



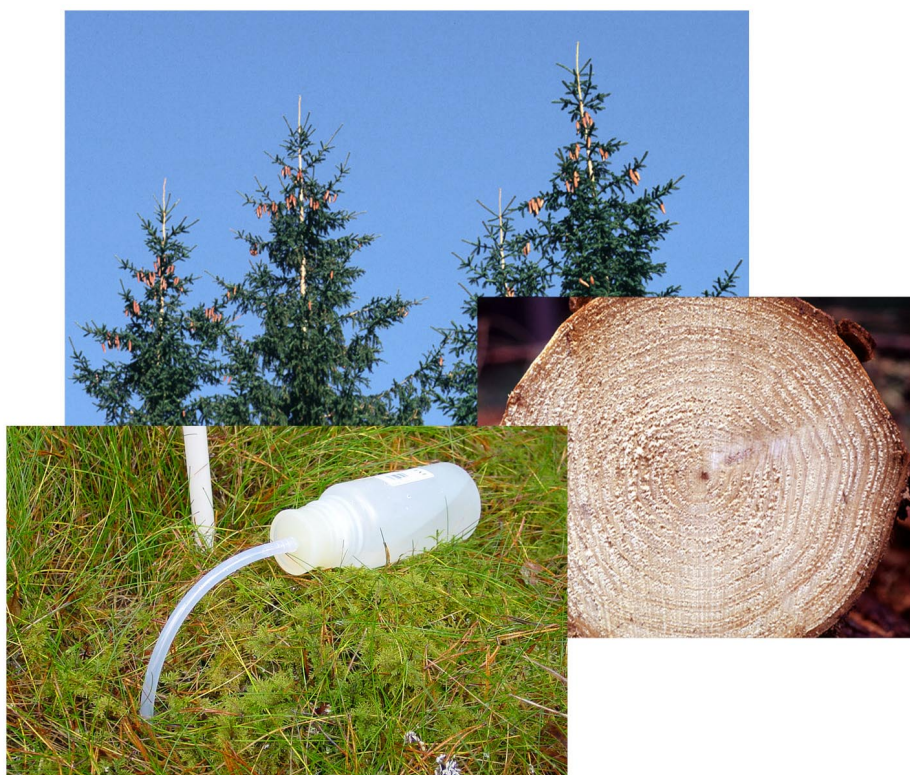
# rapport

IVL Svenska Miljöinstitutet AB

## Markvatten, barrkemi och träd tillväxt efter behandling med olika doser och sorter av kalk

*Årsrapport 1999*

*Effektuppföljning av Skogsstyrelsens program för  
kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark*



Cecilia Akselsson, Olle Westling, Per-Erik Larsson och Per Petersson  
B 1386  
Aneboda, oktober 2000

<p><b>Organisation/Organization</b> IVL Svenska Miljöinstitutet AB</p> <p><b>Adress/Address</b> IVL Aneboda SE-360 30 LAMMHULT</p> <p><b>Telefonnr/Telephone</b> 0472-26 20 75</p>	<p><b>RAPPORTSAMMANFATTNING</b> <b>Report Summary</b></p> <p><b>Projekttitel/Project title</b></p> <p><b>Anslagsgivare för projektet/Project sponsor</b></p> <p>IVLs samfinansierade forskningsprogram</p>
<p><b>Rapportförfattare, author</b> Akselsson Cecilia, Westling Olle, Larsson Per-Erik, Petersson Per</p>	
<p><b>Rapportens titel och undertitel/Title and subtitle of the report</b> Markvatten, barrkemi och träd tillväxt efter behandling med olika doser och sorter av kalk. Årsrapport 1999. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark.</p>	
<p><b>Sammanfattning/Summary</b> Skogsstyrelsens försöksverksamhet med kalkning och vitalisering av skogsmark innehåller sedan 1990 en omfattande effekttuppföljning med basprogram och specialförsök.</p> <p>Denna rapport redovisar effekter på markvattenkemi, barrkemi och träd tillväxt vid olika doser av kalk på skogsmark. Markvattenstudien omfattar även fyra olika kalksorter: krossad kalksten, finmald kalksten, krossad dolomit och finmald dolomit. Doserna 3, 6 och 12 ton/ha jämfördes med obehandlade referensytor. Försöket startade 1992.</p> <p>I <u>markvattnet</u> ledde alla kombinationer av dos och sort till högre kalciumhalt och BC/Al-kvot (kvot mellan baskatjoner och aluminium). För aluminium- och vätejonhalt finns tendenser till lägre halter. Resultaten visar även att det är möjligt att inom några få månader minska markvattnets surhetsgrad, i synnerhet med höga doser och finmald kalksten. Kaliumhalterna var generellt låga och det finns tendenser till minskning vid kalkning med dosen 12 ton/ha. Även halterna av nitrat- och ammoniumkväve är låga och i detta materialet finns inget som tyder på risker för förhöjda kvävehalter, vilket framförts som en risk vid kalkning av skogsmark.</p> <p>En tydlig effekt i <u>barren</u> är att kalciumhalten ökade efter kalkningen. Effekten ökade med dosen. Andra tydliga effekter var att halterna av mangan och aluminium minskade.</p> <p><u>Träd tillväxten</u> påverkades inte av kalkningen vid någon av doserna.</p>	
<p><b>Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område, näringsgren eller vattendrag/Keywords</b> Kalkning, försurning, skogsmark, markvatten, barrkemi, vitalitet, träd tillväxt</p>	
<p><b>Bibliografiska uppgifter/Bibliographic data</b> IVL Rapport B 1386</p>	
<p><b>Beställningsadress för rapporten/Ordering address</b> IVL, Biblioteket, Box 21060, SE-100 31 Stockholm, Sweden</p>	

# Innehåll

<b>Sammanfattning</b> .....	<b>1</b>
<b>Summary</b> .....	<b>2</b>
<b>1 Introduktion</b> .....	<b>3</b>
1.1 Bakgrund.....	3
1.2 Syfte .....	4
1.3 Försöksområde .....	4
1.4 Försöksutformning .....	5
<b>2 Markvatten</b> .....	<b>6</b>
2.1 Metodik för provtagning och analys .....	6
2.2 Utvärderingsmetodik.....	7
2.3 Markvatten på olika djup .....	9
2.4 Markvattenkemiska effekter av olika behandlingar.....	12
2.5 Slutsatser av markvattenundersökningarna.....	32
<b>3 Barrkemi</b> .....	<b>34</b>
3.1 Metodik .....	34
3.2 Barrkemiska effekter av olika behandlingar .....	34
3.3 Slutsatser av de barrkemiska undersökningarna .....	38
<b>4 Träd tillväxt</b> .....	<b>40</b>
4.1 Metodik .....	40
4.2 Tillväxteffekter av olika behandlingar .....	40
4.3 Slutsatser av tillväxtmätningarna .....	40
<b>5 Referenser</b> .....	<b>42</b>
<b>Bilaga 1. Försöksutformning</b> .....	<b>43</b>
<b>Bilaga 2. Kalkningseffekter i markvatten</b> .....	<b>44</b>
<b>Bilaga 3. Tidsutveckling markvattenkemi</b> .....	<b>45</b>
<b>Bilaga 4. Barrkemi efter kalkning</b> .....	<b>49</b>
<b>Bilaga 5. Träd tillväxt efter kalkning</b> .....	<b>50</b>
<b>Bilaga 6. Skogsstyrelsens program för kalkning och vitalisering</b> .....	<b>51</b>
<b>Bilaga 7. Litteratur om försurning, kalkning och vitaliseringsgödning</b> .....	<b>57</b>

## Sammanfattning

Inom Skogsstyrelsens försöksverksamhet för kalkning och vitalisering av skogsmark bedrivs ett omfattande effektuppföljningsprogram. I detta program ingår en studie med syftet att jämföra olika doser av kalk med avseende på effekter på markvattenkemi, barrkemi och trädutväxt. Markvattenstudien omfattar även fyra olika kalksorter: krossad kalksten, finmald kalksten, krossad dolomit och finmald dolomit. Doserna 3, 6 och 12 ton/ha jämfördes med obehandlade referensytor.

Alla kombinationer av dos och sort ledde till förhöjd kalciumhalt och BC/Al-kvot i markvattnet på 50 cm i förhållande till referenserna 6-7 år efter kalkning. För aluminium och vätejonhalt finns tendenser till minskning av halten i förhållande till referensytorna för flertalet behandlingar. Kalkningseffekten på 50 cm djup ökade med dosen för kalciumhalt, BC/Al-kvot, aluminiumhalt och vätejonhalt för de båda kalkstenssorterna. För de båda dolomitsorterna finns inte motsvarande dos-effekt-samband men dosen 12 ton/ha ledde till något större effekt än övriga doser.

Finmald kalksten skilde ut sig från övriga kalksorter, behandlingen ledde generellt till jämförelsevis hög kalciumhalt och BC/Al-kvot samt låg aluminium- och vätejonhalt i markvattnet på 50 cm djup. Skillnaden var störst under de första åren efter kalkning. Behandling med 6 och 12 ton/ha finmald kalksten gav upphov till en kraftig men kortvarig höjning av kalciumhalten ungefär ett år efter behandling; 6 mg/l respektive 9 mg/l. 12 ton/ha krossad kalksten ledde till en höjning av kalciumhalten första året efter kalkning. För de båda dolomitsorterna fanns inget motsvarande förlopp för kalcium. Däremot ökade magnesiumhalten kraftigt under det första året efter behandling med 6 ton finmald dolomit, till omkring 4 mg/l. Inga initiala effekter på aluminium- eller vätejonhalten kunde påvisas. Resultaten pekar på att risker för negativa effekter av kalkning till följd av kraftiga initiala effekter på markvattnets sammansättning enbart finns vid höga doser, främst i kombination med finkornigt kalkmedel. Resultaten visar även att det är möjligt att inom några få månader minska markvattnets surhetsgrad, i synnerhet med höga doser och finmald kalksten.

De olika reaktionerna mellan blocken på samma behandling indikerar att de kortsiktiga effekterna är svåra att generalisera till exempel som dos-respons förhållanden. Effekten påverkas både av markförsurningsgraden innan behandling och markens egenskaper som humustäckets tjocklek och mineraljordens textur.

Kaliumhalterna var generellt låga och det fanns tendenser till minskning vid kalkning med dosen 12 ton/ha. Även halterna nitrat- och ammoniumkväve var låga och i detta materialet finns inget som tyder på risker för förhöjda kvävehalter, vilket framförts som en risk med kalkning.

En tydlig direkteffekt av kalkningen var att kalciumhalten ökade i barren. Effekten ökade med dosen. Andra tydliga effekter var att halterna av mangan och aluminium minskade. För aluminiumhalten var effekten större vid högre doser, medan minskningen av manganhalten tycks vara oberoende av dos. Effekterna av kalkning i dosförsöket sammanfaller i stort med tidigare erfarenheter. Ökningen av kalcium i barren var i detta försök större än vad som vanligtvis noterats tidigare från Sverige, även med måttliga doser som tre och sex ton per ha. Trädutväxten påverkades inte av kalkningen vid någon av doserna. Trädutväxten i denna studie avser den första femårsperioden efter kalkning. Fem år är en kort period i detta sammanhang, för att kunna göra en komplett utvärdering av kalkningens effekter på trädutväxt krävs längre tidsserier.

## Summary

The Swedish Board of Forestry co-ordinates extensive research concerning liming and nutrient compensation on acid forest soils in Sweden. Results from the experimental work are presented in annual reports. This annual report for 1999 describes effects on soil water chemistry, nutrient content in needles and forest growth in experimental plots with untreated spruce forest compared to plots treated with different doses (3, 6, and 12 tons per hectare) of limestone. Concerning soil water chemistry effects were also related to four different kinds of substances; crushed or finely ground limestone ( $\text{CaCO}_3$ ) or dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ). Results from a period of seven years are presented. The experiment was started in 1992.

All combinations of dose and type of limestone resulted in increased concentrations of calcium in soil water (50 cm) and higher base cation/ aluminium ratio. The response was dependent of the dose, especially with limestone. Dolomite increased the concentrations of magnesium, but the effect was not clearly dependent of the dose. The results of the experiment demonstrates that it is possible to decrease the acidity of soil water (50 cm) relatively rapid with liming (in a few months), especially with high doses and finely ground limestone.

Hydrogen ions and aluminium in soil water showed a tendency to decrease after most of the different treatments. Concentrations of potassium were low before the experiment started, and there was a tendency that the highest dose (12 tons per hectare) decreased the already low concentrations. Increased leakage of nitrogen has been mentioned as a risk in connection with forest liming. This experiment showed no decrease during the studied period of the originally low concentrations of inorganic nitrogen after the treatments.

Liming resulted in increased concentrations of calcium in needles, and the response was dependent of dose. The concentrations of manganese and aluminium decreased after most of the treatments. No effect on forest growth was detected five years after liming with all doses and types of limestone.

# 1 Introduktion

## 1.1 Bakgrund

Inom Skogsstyrelsens försöksverksamhet för kalkning och vitalisering av skogsmark bedrivs sedan 1990 en omfattande effektuppföljning med basprogram och specialförsök, med syftet att kartlägga effekter på i första hand träd, mark och vatten. Resultaten presenteras i årliga rapporter. Tidigare rapporter har behandlat kalkningseffekter på ytvatten (Larsson och Westling, 1997), effekter i marken, baserad på markkemiska och markvattenkemiska mätningar (Akselsson, m. fl., 1998) och biologiska effekter på bottenfauna, påväxtalger, barrkemi och trädens vitalitet (Larsson, m. fl., 1999).

Denna rapport redovisar resultat från ett specialförsök med syfte att jämföra olika doser och sorter av kalk med avseende på markvattenkemi, barrkemi och trädutveckling. Försöket ingår i projektet "Effekter av olika behandlingsmetoder i skog" som ingår i IVLs samfinansierade forskning, och är inriktat mot miljöproblem såsom försurning och näringsförluster i skogsmark. Åtgärder som studeras är kalkning, vitaliseringsgödning, kompensationsgödning och speciellt anpassad skötsel för att minska effekterna på ytvatten. Försökens utformning omfattar både intensiv uppföljning i parcellförsök samt övervakning av miljöeffekter i praktiskt utförda fullskalförsök. Projektet påbörjades 1992 och huvudsaklig intressent har varit Skogsstyrelsen, men även andra finansörer inom skogs- och energisektorn samt Naturvårdsverket har bidragit till olika delprojekt.

Huvuddelen av etablering och inledande dokumentation av detta specialförsök utfördes av Erland Möller. Provtagning, mätningar och annat fältarbete har utförts av personal från Asa försökspark samt IVL. Huvudansvariga för försöksdesign och planering av utläggningen av försöket har varit Göran Örlander och Per Pettersson, SLU Asa. Kemiska analyser inom projektet har huvudsakligen utförts av IVL i Aneboda (markvatten) och SLU i Umeå (barrkemi).

Tidigare erfarenheter av kalkningseffekter i skog är nyligen sammanställda och utvärderade i en miljökonsekvensbeskrivning (MKB) av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitalisering (Johansson m. fl., 1999). Det arbetet utgör ett underlag vid utvärdering av resultat från försöket i denna rapport. De kalksorter och doser som prövats tidigare är ofta relativt avvikande från de koncept som är mest aktuella att använda för behandling av försurad fastmark i skog. En viktig fråga är därför om de doser och sorter som används inom den nuvarande försöksverksamheten med kalkning av skogsmark ger effekter som avviker från tidigare erfarenheter. Hänvisningar till tidigare erfarenheter som relateras i denna rapport är huvudsakligen hämtade från ovanstående MKB och för originalreferenser hänvisas till det arbetet.

I bilaga 6 presenteras Skogsstyrelsens program och koncept för kalkning och vitaliseringsgödning av skogsmark.

I bilaga 7 finns en förteckning över litteratur om effekter på skogsekosystem av försurning, kalkning och vitaliseringsgödning som ej ingår i referenslistan, kapitel 5.

## 1.2 Syfte

Syftet med denna utvärdering av försöket är att beskriva:

- i vilken mån dos och kalkmedel påverkar de kortsiktiga (1 till 6 år) effekternas omfattning och tidsförlopp i markvattnet (kan effekterna påskyndas och förstärkas genom att öka dosen och använda ett finkornigt kalkmedel?),
- vilken betydelse dos och sammansättning av kalkmedlet har för kraftiga kortvariga (ofta oönskade) effekter på markvattenkemin,
- hur barrkemin påverkats under perioden vid olika doser av kalk,
- hur trädutväxten påverkats av olika behandlingar fem år efter behandlingen.

## 1.3 Försöksområde

Dosförsöket med kalkning upptar en yta av cirka 3,4 ha i ett bestånd med planterad gran i Asa försökspark i norra Kronobergs län. Marken utgörs av en sandig-moig morän med en jordmån som övergår till podsol. Skogen är knappt 40 år gammal, har ståndortsindex G32 och ligger på relativt bördig mark. Större delen av beståndet har tidigare utgjorts av hagmark med gles ekskog, men i öster finns ett mindre område med andra generationens granskog. Större delen av beståndet planterades troligen 1962 och det mindre området 1966-67. Området är normalt gallrat och ger ett homogent intryck med avseende på träd- och markförhållanden.

Vid försökets start genomfördes en översiktlig vegetationskartering av samtliga försöksytor, parceller, i försöksområdet. Karteringen genomfördes vid olika tillfällen under perioden april-juni 1992. I bottenskiktet var marken till hälften täckt av våra vanliga skogsmossor, väggmossa (*Pleurózium schréberi*), våningsmossa (*Hylocómium splendens*), kammossa (*Ptílium crista-cas.*) och kvastmossa (*Dícranum*). Den andra halvan utgjordes av en matta av fallna barr. Fältskikt förekom endast sporadiskt. Blåbär, lingon, kruståtel, skogsstjärna och ekorrbar förekom som enstaka exemplar i hela försöksområdet. Ett stort antal arter av örter och gräs hittades dock vid väggkanten strax utanför försöksområdet, varför det låga artantalet kan ses som ett beskuggnings- eller konkurrensfenomen.

En studie av de markvattenkemiska förhållandena före kalkning visar på en tydlig öst-västlig gradient, med högst kalciumhalt och pH-värde samt lägst aluminiumhalt mot öster (Akselsson och Westling, 1999). Detta kan bero på skillnader i historik, som att de västra delarna varit hårdare utsatta för skogsbete i den tidigare ekhagen. Asa försökspark ligger i ett område i landet som har haft en kraftigt förhöjd deposition av försurande luftföroreningar under flera decennier. Under de senaste tio åren har depositionen av svavel minskat kraftigt, samtidigt som kvävedepositionen har varit oförändrat hög. Mätningar i granbeståndet där kalkningsförsöket utförs har visat att svavelnedfallet varit cirka 6 kg per ha som medelvärde under perioden 1996 till 1999. Motsvarande deposition för oorganiskt kväve har varit cirka 10 kg. Den ackumulerade depositionen har försurat marken i stora delar av Asa försökspark, vilket bland annat kan avläsas i låga pH-värden och höga aluminiumhalter i markvatten (Carlsson, 2000).

Jordprov har samlats in från parcellernas diagonaler under november 1991. Prov har tagits från humuslagret samt från nivåerna 0-5 cm, 5-10 cm och 10-20 cm i mineraljorden. Jordproven har torkats och lagts i Asa försöksparkens arkiv. Någon analys av dessa prover har ej skett.

## 1.4 Försöksutformning

Försöket är upplagt som ett parcellförsök med tre olika kalkgivor, 3, 6 och 12 ton/ha, samt obehandlad referens. Dessa doser är valda dels med utgångspunkt från erfarenheter och behov av givor vid praktiskt skogsmarkskalkning (3 ton/ha) och dels för att beskriva för- och nackdelar med betydligt högre doser. Det finns fyra upprepningar (block) och totalt 16 parceller (provytor). Försöket har formen av en "romersk kvadrat", vilket innebär att det finns en av varje behandling i alla rader, både lodräta och vågräta. I bilaga 1 visas en principskiss över försöksutformningen.

Var och en av de 16 parcellerna är uppdelad i fem ytor, en stor yta (30\*30 m<sup>2</sup>) för uppföljning av skogliga parametrar (trädutväxt och barrkemi) och fyra små ytor (10\*10 m<sup>2</sup>) för markvattenkemisk uppföljning. Markvatten provtas från två nivåer, 25 och 50 cm djup.

Ytan för skoglig uppföljning har behandlats med så kallad "skogskalk" (2/3 krossad kalksten och 1/3 krossad dolomit). De fyra mindre parcellerna har behandlats med fyra olika kalksorter, med syftet att jämföra markvattenkemiska effekter av olika kalksorter. De fyra kalksorterna är krossad kalksten, 0-3 mm (CaCO<sub>3</sub>), finmald kalksten (CaCO<sub>3</sub>), krossad dolomit, 0-2 mm (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>) och finmald dolomit (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>). Kalkspridningen skedde under maj-juni 1992. Under denna period föll praktiskt taget inget regn. Spridningen har skett för hand. För att erhålla en jämn spridning i parcellerna har dessa delats in i mindre ytor inom vilka delgivor spridits.

Försöket är utformat så att det går att välja mellan att använda nordsydliga eller östvästliga block. Eftersom det före kalkning fanns en markvattenkemisk gradient i östvästlig riktning (Akselsson & Westling, 1999) användes nordsydliga block i den markvattenkemiska studien. Detta ger bättre förutsättningar för statistiska analyser. Utöver de 48 parcellerna (3 doser\*4 block\*4 sorter) tillkommer fyra okalkade ytor i den markvattenkemiska studien, en i varje block, som används som referenser. I skissen över försöksutformningen visas lysimetrarnas placering som punkter. Varje punkt motsvarar två lysimetrar, en på 50 cm och en på 25 cm djup.



## 2 Markvatten

Markvatten är det vatten som finns i marken ovanför grundvattenytan. Vegetationens rötter återfinns i den övre delen av markvattenmagasinet, rotzonen. I skogsmark finns merparten av rötterna i de översta decimetrarna. Djupen som provtas i denna studie, 25 cm och 50 cm, motsvarar nedre delen av rotzonen och markskiktet under rotzonen. Markvattenkemin under rotzonen kan användas som ett mått på utlakningen.

Effekten på markvattenkemin efter kalkning kan följa olika förlopp. Den önskade effekten är en långsam men varaktig förbättring av markvattenkemin. Vissa typer av behandlingar kan dock leda till en oönskad initial effekt, i form av en kraftig men kortvarig effekt. Denna effekt kan orsaka skador eftersom förhållandena ändras mycket och snabbt. Kalkmedlets dos och sammansättning kan påverka effekternas omfattning, både på kort och lång sikt.

Tidigare erfarenheter från försöksverksamhet i Sverige sedan 1980-talet (studier under två till tio år efter behandling) visar att kalkgivor på 2-4 ton per ha i regel ökar pH och halten av kalcium i markvatten, samtidigt som aluminium minskar något (Johansson m. fl., 1999). Erfarenheter av hur höga givor (>6 ton per ha) påverkar markvatten i sura skogsjordar saknas. Vid användning av dolomit sker även en ökning av magnesium. Ökningarna är dock för det mesta relativt små, i synnerhet för pH i från början sura jordar. Även om förändringarna är små med avseende på ökning av baskatjoner och minskningar av aluminium så kan kvoten mellan baskatjoner (BC) och aluminium (Al) stiga märkbart. Denna kvot är en indikator på markförsurning och värdet 1 (ett) har använts som gräns vid beräkningar av kritisk belastning. Lägre värden medför en risk för skador på biota i mark och vattendrag (Sverdrup & Warfvinge, 1993).

Det finns även observationer av både kortvariga och fleråriga minskningar av pH-värdet i markvatten efter kalkning med relativt låga givor (1-3 ton per ha), trots att nitrathalten inte ökat (nitratbildning är en försurande process). Orsaken är sannolikt att tillförseln av baskatjoner tränger ut väte- och aluminiumjoner från markpartiklarna i markens ytskikt. De sura jonerna transporteras ner med hjälp av markvattnet, tillsammans med mobila anjoner som sulfat och klorid. På lång sikt när den tillförda kalken fördelat sig i större delen av markprofilen är det inte troligt att effekten kan kvarstå.

Kalkning av skogsmark medför att pH stiger i humusskiktet. Detta kan stimulera flera olika processer som nitrifikation och lösligheten av organisk substans. Flera försök har visat att halten löst organiskt kol samt nitrat har ökat efter kalkning, men flertalet studier rapporterar små eller uteblivna effekter. En kraftig och varaktig ökning av nitrathalten i markvatten är en oönskad effekt, eftersom det kan leda till utlakning till grund- och ytvatten. Dessutom kan det bidra till ytterligare försurning som motverkar kalkens syraneutraliserande effekt. Kraftig utlakning av nitrat till avrinningsvatten efter kalkning har bara observerats i andra länder som länge haft en betydligt högre kvävedeposition och mer kväverika skogsjordar än i Sverige.

### 2.1 Metodik för provtagning och analys

Markvattenprov togs med hjälp av keramiska undertryckslysimetrar (P80) på två djup, 25 och 50 cm ner i mineraljorden. Alla små parceller (10\*10 m<sup>2</sup>) med olika doser och sorter var utrustade med en lysimeter på respektive djup. Obehandlade referenser hade

två lysimetrar per yta och djup placerade centralt i den stora parcellen (30\*30m<sup>2</sup>). Före behandling genomfördes tre provtagningsomgångar som ingår i denna resultatredovisning. Perioden 0 till 3 år efter behandling representeras av elva provtagningar, och 3 till 6,5 år av sju provtagningar. I början av försöket uttogs 3 till 4 provtagningsomgångar per år, men efter tre år reducerades antalet till två omgångar under vår respektive höst. Analysprogrammet omfattade: pH, alkalinitet, sulfatsvavel (SO<sub>4</sub>-S), nitratkväve (NO<sub>3</sub>-N), klorid (Cl), ammoniumkväve (NH<sub>3</sub>-N), kalcium (Ca), magnesium (Mg), natrium (Na), kalium (K), järn (Fe), mangan (Mn), totalaluminium (Al) och totalt organiskt kol (TOC). Samtliga analyser utfördes på ackrediterade laboratorier med standardmetoder.

## 2.2 Utvärderingsmetodik

Olika ämnen har olika förutsättningar för utvärdering i denna studie. Anjoner (kväve, svavel, klorid och TOC) har av ekonomiska skäl inte analyserats i ett lika omfattande program som katjonerna. Vid varje tidpunkt har ungefär en tredjedel av ytorna analyserats med avseende på anjoner. Olika punkter har valts för analys vid olika tillfällen.

För ett flertal ämnen, kalium, nitrat- och ammoniumkväve, mangan och järn, finns värden under detektionsgränsen. För kalium och kväve handlar det om merparten av värdena. Detta innebär att utvärderingsmöjligheterna är begränsade.

Valet av utvärderingsmetodik för olika parametrar beror dels på analysfrekvens och detektionsgräns, dels på hur sannolikt det är att kalkningen kan ge en effekt. Med utgångspunkt från detta kan parametrarna delas upp i tre grupper med avseende på utvärderingsmetodik. Detta åskådliggörs i tabell 1. I följande tre avsnitt beskrivs metoderna mer ingående.

Tabell 1. Förutsättningar för utvärdering och utvärderingsmetodik för de olika parametrarna

Parameter	Komplett	Alla värden över detektionsgräns	Utvärderingsmetodik*
Kalcium	X	X	Stat. analys och grafisk presentation
Magnesium	X	X	Stat. analys och grafisk presentation
Aluminium	X	X	Stat. analys och grafisk presentation
Vätejoner	X	X	Stat. analys och grafisk presentation
BC/Al**	X	X	Stat. analys och grafisk presentation
Kalium	X		Andel över detektionsgräns vid olika beh.
Kväve			Andel över detektionsgräns vid olika beh.
Svavel		X	Tidsserie i beh. yta jämfört med ref. yta
TOC		X	Tidsserie i beh. yta jämfört med ref. yta
Mangan	X		Tidsserie i beh. yta jämfört med ref. yta
Natrium	X	X	Tidsserie i beh. yta jämfört med ref. yta
Klorid		X	Tidsserie i beh. yta jämfört med ref. yta
Järn	X		Tidsserie i beh. yta jämfört med ref. yta

\*Förklaring finns i avsnitt 2.2.1 – 2.2.3.

\*\*Kvoten mellan mol baskatjoner (kalcium, magnesium och kalium) och mol aluminium. Observera att totalaluminium har använts i stället för organiskt aluminium, som brukar användas i BC/Al-kvoten. Detta beror på att ingen uppdelning i organiskt och oorganiskt aluminium gjorts i denna studie.

### **2.2.1 Utvärdering av effekter på kalcium, magnesium, aluminium, vätejoner och BC/Al-kvot**

För kalcium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), vätejoner ( $H^+$ ) och kvot mellan baskatjoner och aluminium (BC/Al) finns kompletta data. Dessa parametrar är av stort intresse vid effektuppföljning av kalkning. Därför har en omfattande utvärdering gjorts med avseende på dessa parametrar. Perioden 1992-1999 har delats in i två kortare perioder, 0-3 år efter kalkning och 3-6.5 år efter kalkning. Dessa perioder har använts dels i den statistiska bearbetningen, dels i den grafiska redovisningen av data, i form av olika typer av diagram.

I den statistiska analysen har medelförändringen till den första och till den andra treårsperioden efter behandling använts som mått på responsen. Eftersom det är behandlingseffekter, och inte förändringar som orsakats av annat, som är av intresse, har medelförändringen i behandlade ytor subtraherats med medelförändringen i referensytan i motsvarande block.

I var och en av parcellerna som behandlats med olika doser, har de fyra olika kalksorterna spritts i smårutorna som innesluts i varje parcell. Denna utformning, som kallas "split plot", är praktisk att använda vid denna typ av försök. Eftersom de olika behandlingarna inte spritts ut slumpmässigt krävs dock en speciell typ av variansanalys, anpassad till "split plot" metoden. I "split plot"-försök finns en överordnad behandling, som i detta fallet är dos, och en behandling i delyta, sort i detta försöket. Förutsättningarna att hitta signifikanta skillnader är större för behandlingar i delyta än för överordnade behandlingar, vilket i praktiken innebär att signifikansnivåerna för doser och sorter inte är direkt jämförbara. Försöksutformningen innebär att förutsättningarna att finna signifikanta skillnader mellan olika doser är mindre än för sorter.

Utöver den statistiska och grafiska redovisningen av data uppdelat på perioder presenteras även kompletta tidsseriediagram för de olika behandlingarna.

### **2.2.2 Utvärdering av effekter på kalium och kväve**

För kalium (K) och kväve ( $NO_3-N$  och  $NH_4-N$ ) var den övervägande delen av värdena under detektionsgränsen. Dessa parametrar utvärderas genom att jämföra andelen värden över detektionsgränsen mellan olika behandlingar.

### **2.2.3 Utvärdering av effekter på svavel, organiskt kol, mangan, natrium, klorid och järn**

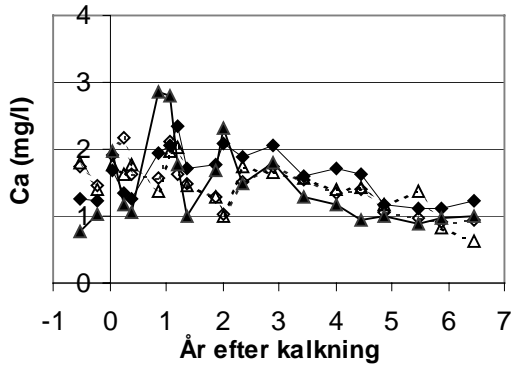
För sulfatsvavel ( $SO_4-S$ ), totalt organiskt kol (TOC), mangan (Mn), natrium (Na), klorid (Cl) och järn (Fe) finns kompletta dataserier enbart för ett urval av provpunkterna. Detta innebär att utvärderingen begränsas till en visuell jämförelse mellan tidsutvecklingen i provpunkter där relativt kompletta dataserier finns.

### **2.3 Markvatten på olika djup**

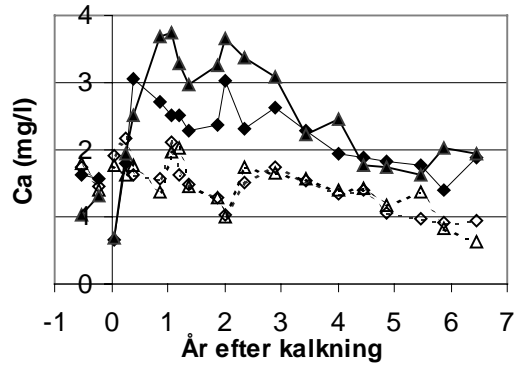
I figur 1-2 presenteras jämförelser i tidsutveckling av kalciumhalt (medeltal av fyra upprepningar) på djupen 25 cm och 50 cm för olika kombinationer av dos och sort. Tidsutvecklingen är i stora drag den samma vid de båda djupen. En skillnad är att halten tenderar variera något mer mellan mättillfällena på 25 cm, sannolikt beroende på att markvattenmängderna varierar mer på detta djup jämfört med 50 cm. I några fall vid kalkning med de finmalda sorterna kan man även se en förskjutning mellan kurvorna på de båda djupen. I dessa fall infaller den initiala effekten något tidigare på 25 cm än på 50 cm.

I denna rapport läggs tyngdvikten av den fortsatta resultatbearbetningen på resultaten från 50 cm nivån, eftersom de större fluktuationerna på 25 cm medför svårigheter att koppla typ av behandling till tidsutveckling under en så kort period som 6 år.

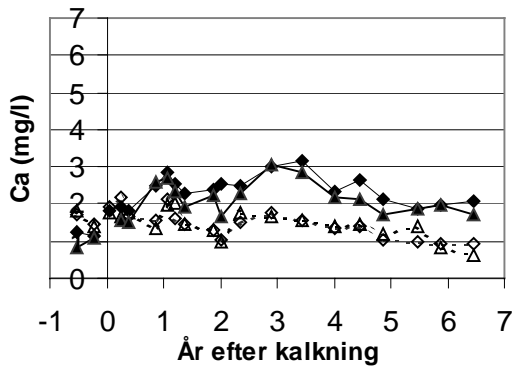
a. 3 ton krossad kalksten



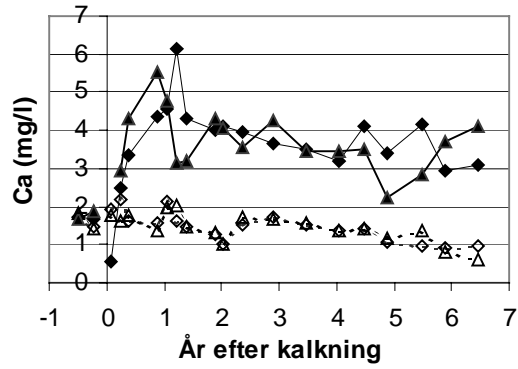
b. 3 ton finmald kalksten



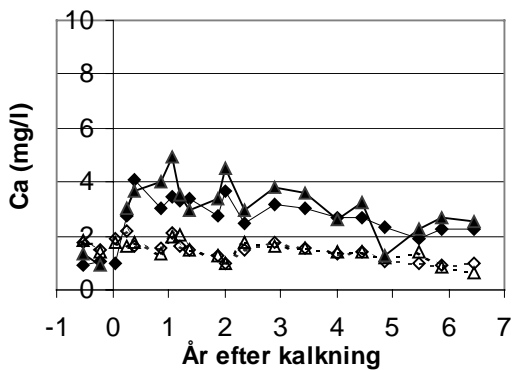
b. 6 ton krossad kalksten



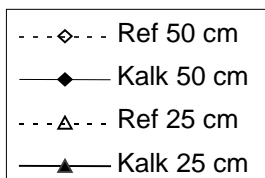
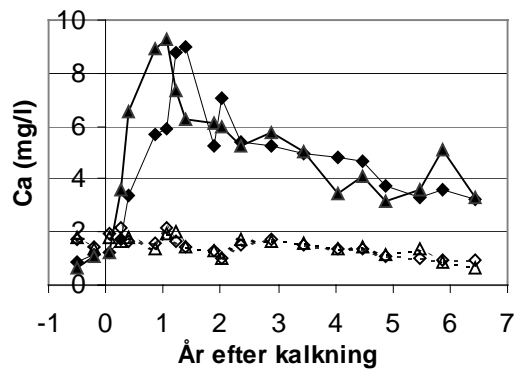
d. 6 ton finmald kalksten



e. 12 ton krossad kalksten

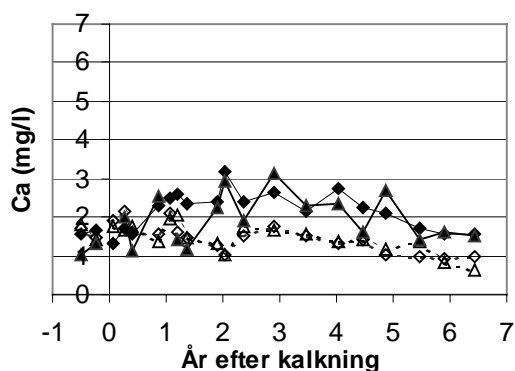


f. 12 ton finmald kalksten

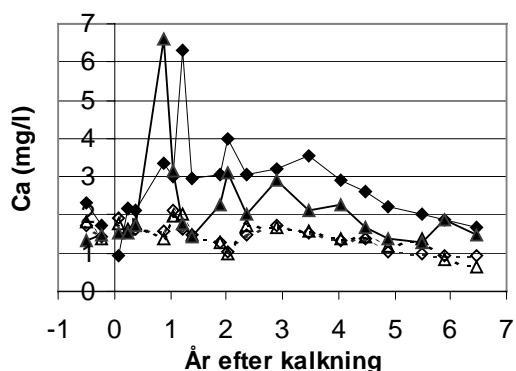


Figur 1. Tidsutveckling för kalciumhalt på djupen 25 och 50 cm vid olika doser av krossad kalksten och finmald kalksten, samt på referensytorna. Observera att y-axlarna har olika skalor.

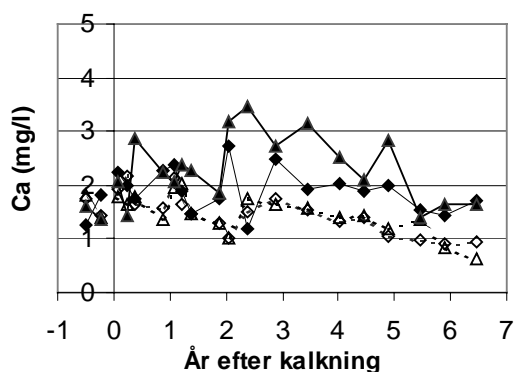
a. 3 ton krossad dolomit



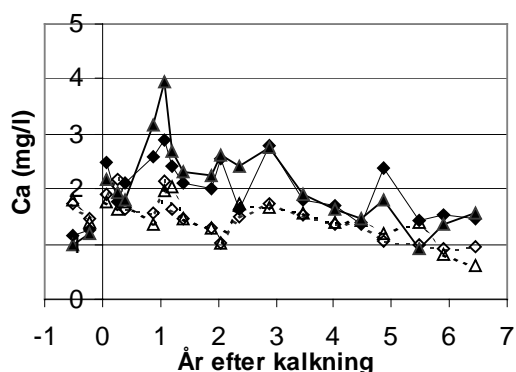
c. 3 ton finmald dolomit



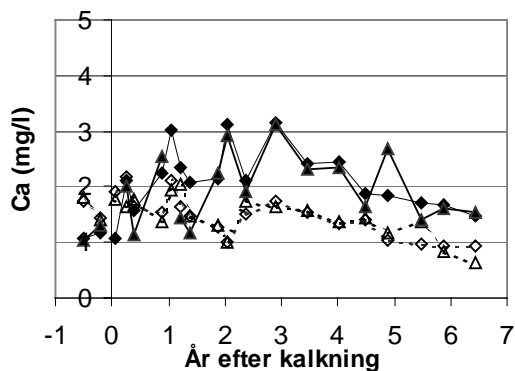
c. 6 ton krossad dolomit



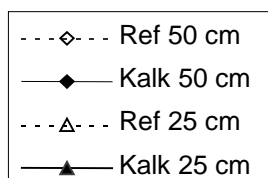
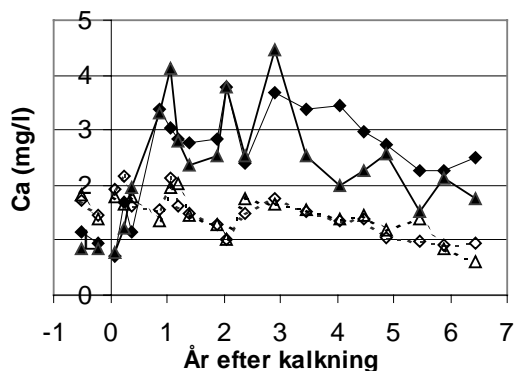
d. 6 ton finmald dolomit



e. 12 ton krossad dolomit



f. 12 ton finmald dolomit



Figur 2. Tidsutveckling för kalciumhalt på djupen 25 och 50 cm vid olika doser av krossad dolomit och finmald dolomit, samt på referensytorna. Observera att y-axlarna har olika skalor.

## 2.4 Markvattenkemiska effekter av olika behandlingar

I tabell 2 och 3 redovisas resultatet av en variansanalys med syftet att finna för vilka ämnen, doser och sorter som behandlingen har lett till signifikanta förändringar. För att enbart finna behandlingseffekter och inte förändringar av andra orsaker, har förändringen i behandlade ytor subtraherats med förändringen i referensytorna för respektive block och tidsperiod. Förändringen har beräknats som medelvärdet efter behandling minus medelvärdet före behandling. Försöket har upplägget av en "split plot", se kap. 2.2.1.

Tabell 2. Signifikansnivåer för behandlingsrelaterade förändringar av markvattenkemin, med avseende på sort. Beräkningar är gjorda dels för perioden 0-3 år efter behandling, dels för perioden 3-6.5 år efter behandling. Stjärnorna anger signifikansnivån.

År efter behandling	Ca	Mg	Al	H	BC/Al
0-3 år	0.000003 (***)	0.0071 (**)	0.017 (*)	0.996	0.00029 (***)
3-6,5	0.0015 (**)	0.0017 (**)	0.47	0.70	0.060

Tabell 3. Signifikansnivåer för behandlingsrelaterade förändringar av markvattenkemin, med avseende på dos. Beräkningar är gjorda dels för perioden 0-3 år efter behandling, dels för perioden 3-6.5 år efter behandling. Stjärnorna anger signifikansnivån.

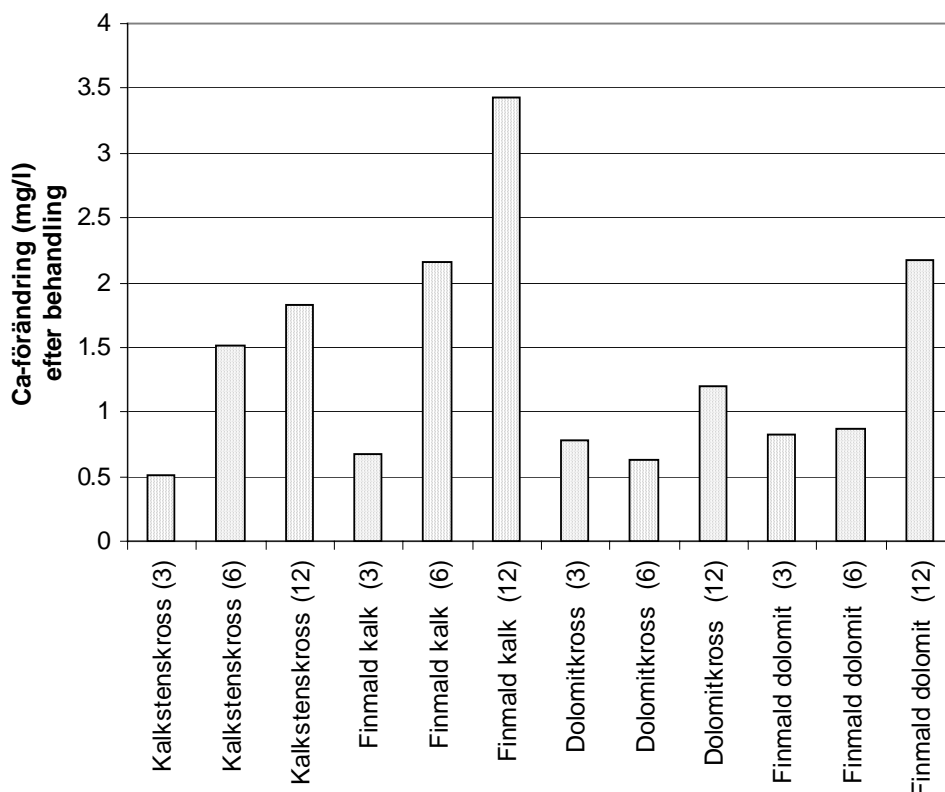
År efter behandling	Ca	Mg	Al	H	BC/Al
0-3 år	0.052	0.39	0.35	0.91	0.11
3-6,5	0.00997 (**)	0.016 (*)	0.18	0.64	0.075

Tabellerna visar att det finns signifikanta förändringar både mellan doser och mellan sorter. För kalcium och magnesium finns signifikanta förändringar både för dos och för sort. För övriga ämnen finns enbart signifikanta skillnader för sort, men notera att split-plot metodiken innebär att osäkerhetsintervallet för dos är större än för sort, och förutsättningarna för att hitta skillnader är därmed sämre mellan olika doser än mellan olika sorter.

Avsnitten 2.4.1 till 2.4.12 presenterar resultat uppdelat på ämnen. I bilaga 2 presenteras medelvärden på förändringen av halterna av kalcium, magnesium, aluminium, vätejoner samt kvoten mellan baskatjoner och aluminium vid olika behandlingar.

### 2.4.1 Kalcium

Kalcium i markvattnet efter behandling ger ett mått på hur mycket kalkmedel som trängt ner i markvattnet. Tabell 2 och 3 visar att det finns signifikanta skillnader med avseende på dos och sort. Figur 3 visar att alla sorter och doser har ökat Ca-halten i markvatten uttryckt som förändringen av kalciumhalt vid de olika behandlingarna, i

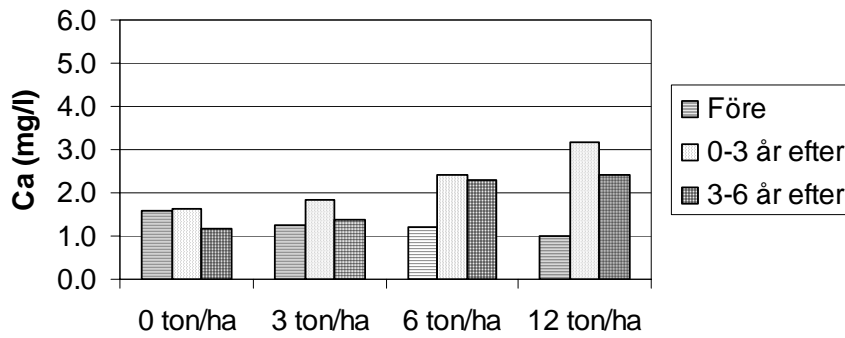


Figur 3. Förändring av kalciumhalt i markvattnet efter behandling i förhållande till förändringen i referensytorna. Förändringen avser perioden före behandling jämfört med perioden 3-6.5 år efter behandling.

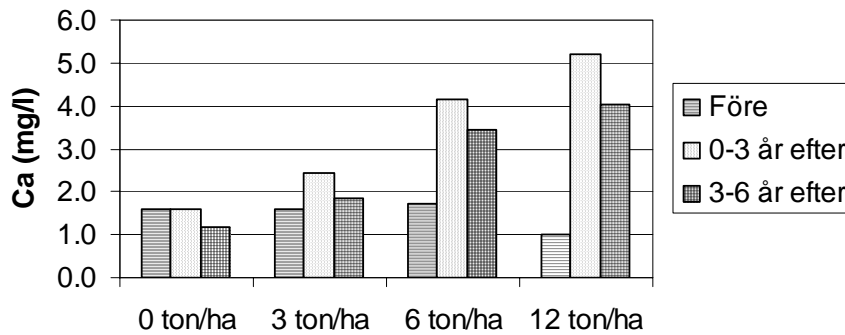
förhållande till referenserna. Alla förändringar är dock inte statistiskt säkerställda. Förändringen i varje yta (behandlade ytor och referenser) har beräknats som differensen mellan medelvärdet från perioden 3-6.5 år efter behandling och medelvärdet från tiden före kalkning. Därefter har förändringen i behandlade ytor subtraherats med förändringen i referensytorna.

I figur 4 visas medelhalter av kalcium före och efter behandling för de fyra olika kalkmedlen. Både figur 3 och 4 visar att effekten ökade med dosen både för krossad kalksten och finmald kalksten, medan effekten efter behandling med dolomit var ungefär konstant oavsett dos. De finmaldade sorterna gav större effekt än de krossade. Dosberoendet för krossad kalksten och finmald kalksten kan användas för att beskriva dos-respons förhållanden, som är ett underlag för att anpassa dosen efter önskad effekt (Halldin, 1998).

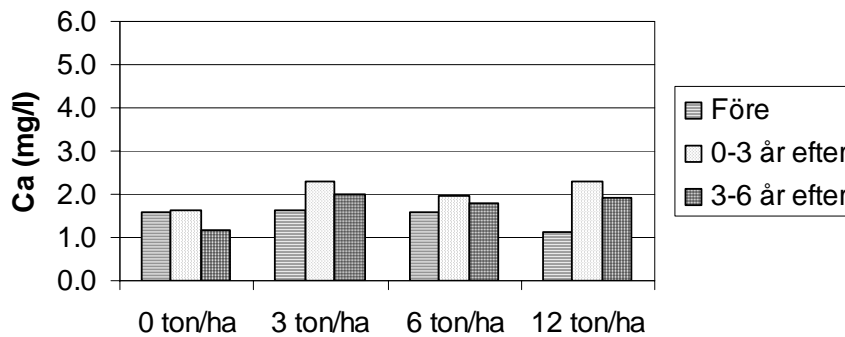




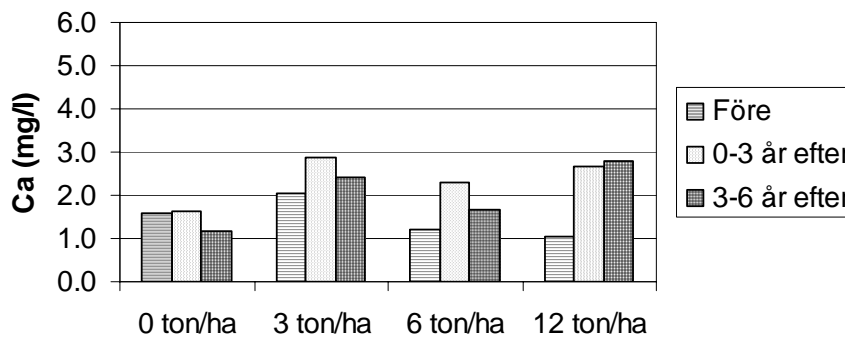
Figur 4a. Kalciumhalt i markvattnet före och efter behandling med krossad kalksten (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 4b. Kalciumhalt i markvattnet före och efter behandling med finmald kalksten (medelvärden från samtliga mätningar).

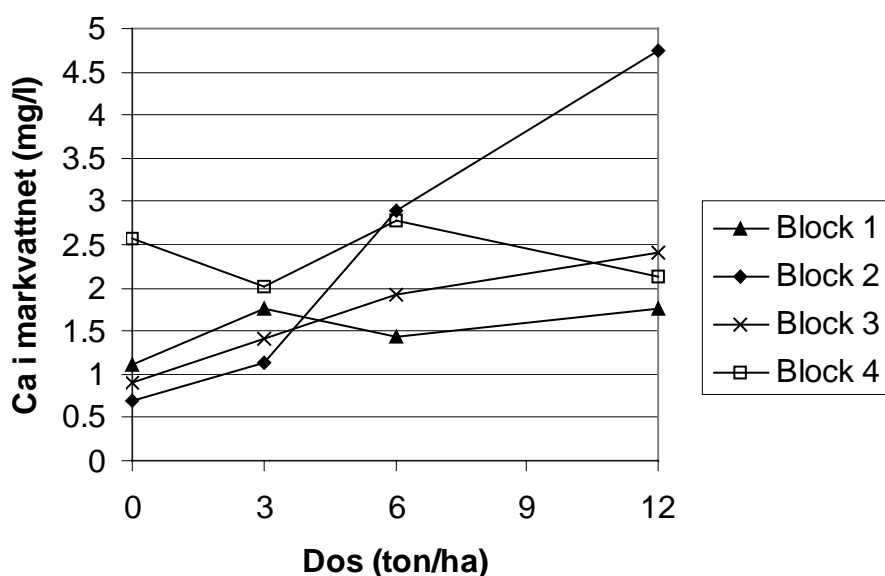


Figur 4c. Kalciumhalt i markvattnet före och efter behandling med krossad dolomit (medelvärden från samtliga mätningar).



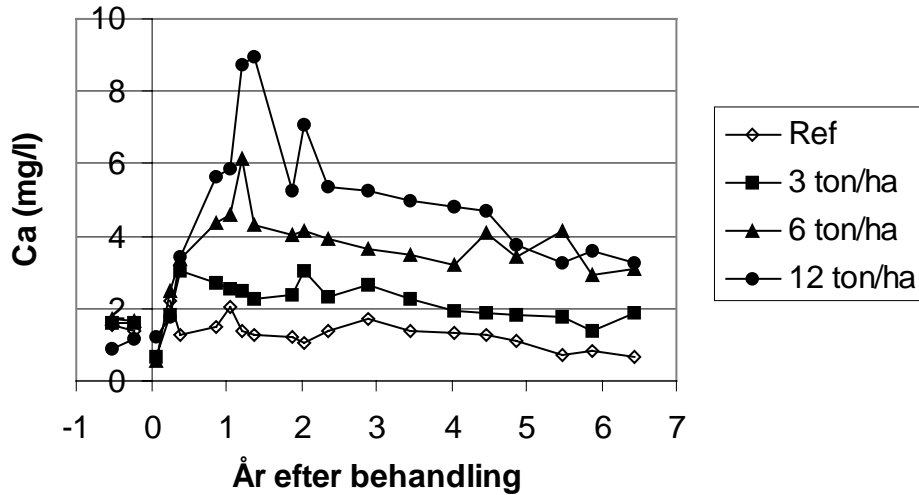
Figur 4d. Kalciumhalt i markvattnet före och efter behandling med finmald dolomit (medelvärden från samtliga mätningar).

Huvuddelen av resultatredovisningen i denna rapport baseras på medelvärden av de fyra upprepningarna i respektive försöksled. En anledning till att det noterades relativt få signifikanta behandlingseffekter (se tabell 2 och 3) i markvatten, men många tendenser i resultaten, är att spridningen mellan de fyra upprepningarna ofta var stor. Detta gäller både obehandlade och behandlade provytor. Detta gör det svårare att generalisera dos-respons förhållanden. Figur 5 visar exempel på hur Ca-halten kan variera med dosen vid behandling med krossad kalksten i de fyra blocken i försöket. Figuren visar på olika relationer mellan dos och respons som är typiska för flertalet kalksorter och ämnen i markvatten i denna undersökning. Block 2 och 3 uppvisar en tydlig ökning av Ca-halten med stigande dos, men ökningen är olika stor. Block 1 visar inget dosberoende, utan alla doser ökar Ca-halten något. Slutligen så visar block 4 lägre halter med två doser efter behandling jämfört med den obehandlade referensen. Block 4 hade dock ett annat utgångsläge än övriga block med högre Ca-halt och även högre pH, vilket sannolikt påverkar de beräknade kalkningseffekterna.

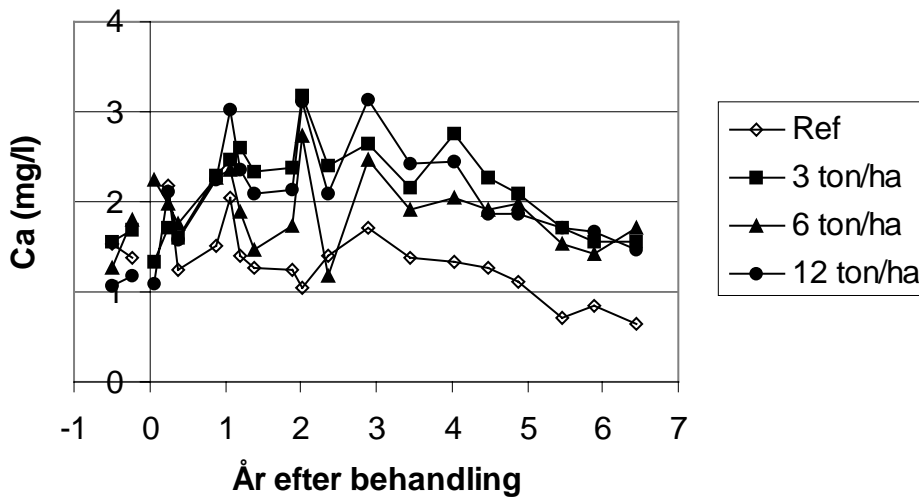


Figur 5. Kalciumhalten som funktion av dos vid behandling med krossad kalksten i de fyra blocken i försöket. Medianvärdet från samtliga mätningar efter behandling (-6,5 år) har använts.

Figur 6, som beskriver effekten av finmald kalksten, visar att dosen främst påverkar den initiala effekten, men även efter sex år är effekten större vid högre dos. Figur 7 visar effekten vid behandling med krossad dolomit, där effekten är betydligt mindre än för finmald kalksten. Det finns dessutom inget samband mellan dos och effekt. Tidsseriediagram för alla fyra sorterna finns i bilaga 3.



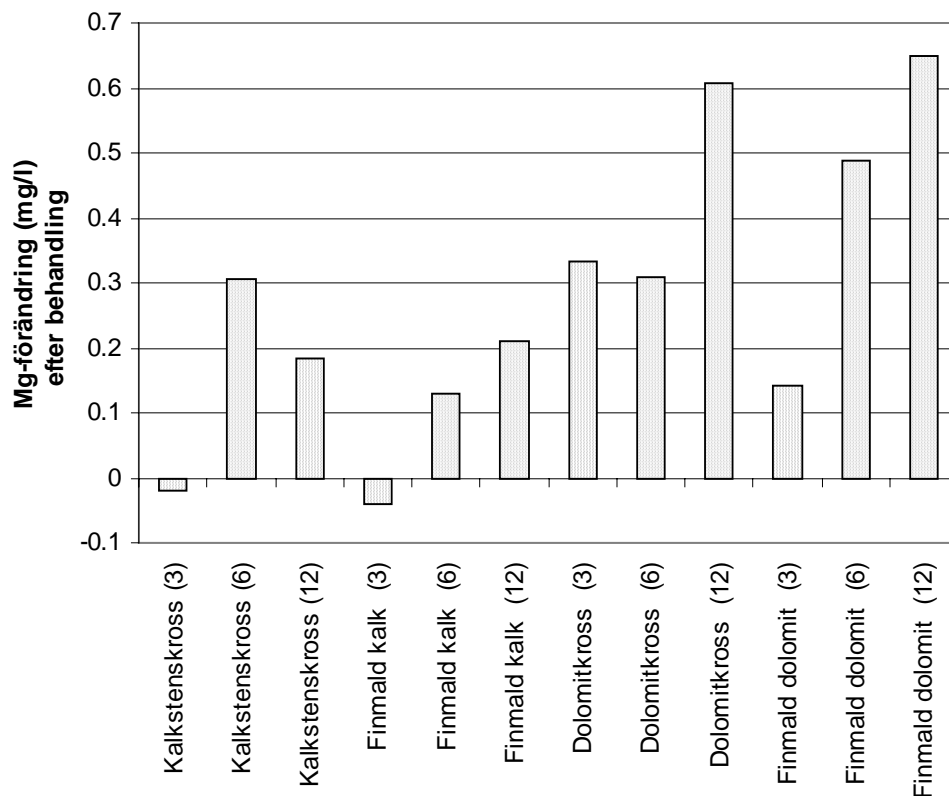
Figur 6. Kalciumhalt vid olika doser av finmald kalksten. Varje punkt motsvarar ett medelvärde från block 1-4.



Figur 7. Kalciumhalt vid olika doser av krossad dolomit. Varje punkt motsvarar ett medelvärde från block 1-4.

## 2.4.2 Magnesium

Magnesium ingår i dolomit och kan därmed, precis som kalcium, användas som ett mått på hur mycket av behandlingsmedlet som nått markvattnet. Den statistiska analysen visar att det finns signifikanta skillnader i behandlingseffekter både med avseende på dos och sort. Figur 8 visar att magnesiumhalten ökade med alla behandlingar utom 3 ton finmald kalksten, i förhållande till referenserna. Förändringen i varje yta (behandlade ytor och referenser) har beräknats som differensen mellan medelvärdet från perioden 3-6.5 år efter behandling och medelvärdet från tiden före kalkning. Därefter har förändringen i behandlade ytor subtraherats med förändringen i referensytorna. Generellt var ökningen av Mg-halten naturligt nog störst med dolomit som innehåller magnesium. Att även kalksten utan

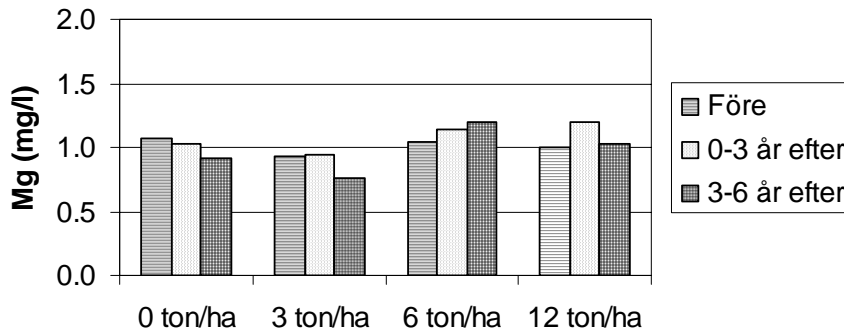


Figur 8. Förändring av magnesiumhalt i markvattnet efter behandling i förhållande till förändringen i referensytorna. Förändringen avser perioden före behandling jämfört med perioden 3-6.5 år efter behandling.

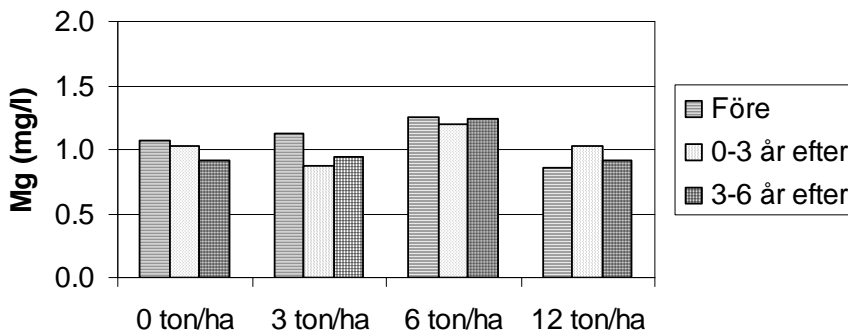
magnesium kan öka Mg-halterna i markvatten beror sannolikt på jonbyte i markens översta skikt som gör att magnesium tillförs marklösningen.

Resultaten visar ett samband mellan dos och effekt. Störst effekt efter 3-6.5 år gav 12 ton av de båda dolomitsorterna, figur 8. Dessa behandlingar ledde till en ökning med drygt 0,6 mg/l.

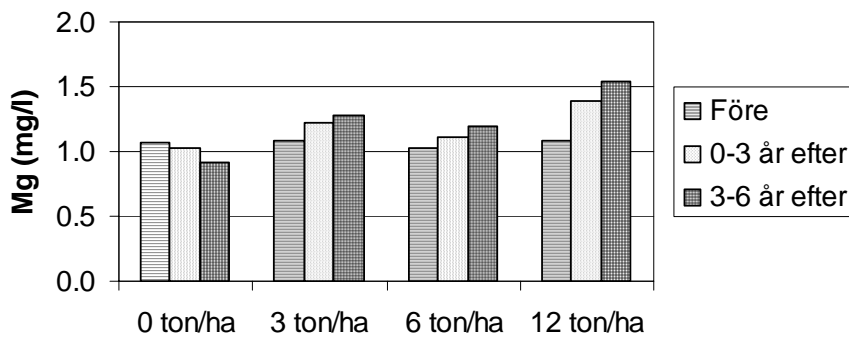
I figur 9 visas medelhalter av magnesium före och efter behandling för de fyra olika kalkmedlen.



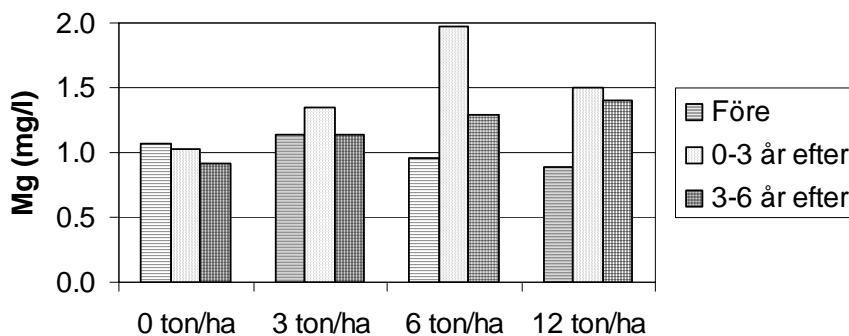
Figur 9a. Magnesiumhalt i markvattnet före och efter behandling med krossad kalksten (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 9b. Magnesiumhalt i markvattnet före och efter behandling med finmald kalksten (medelvärden från samtliga mätningar).

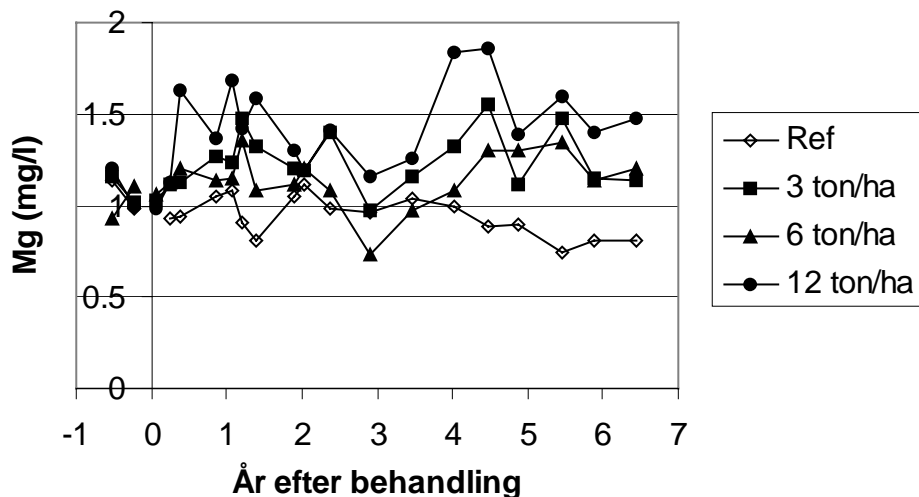


Figur 9c. Magnesiumhalt i markvattnet före och efter behandling med krossad dolomit (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 9d. Magnesiumhalt i markvattnet före och efter behandling med finmald dolomit (medelvärden från samtliga mätningar).

I figur 10 redovisas ett exempel på tidsutveckling vid behandling med krossad dolomit som visar att alla doser har lett till en effekt efter 6 år. Dosen 12 ton har gett störst effekt, både under hela perioden och initialt. Tidsseriediagram för alla fyra sorter finns i bilaga 3.

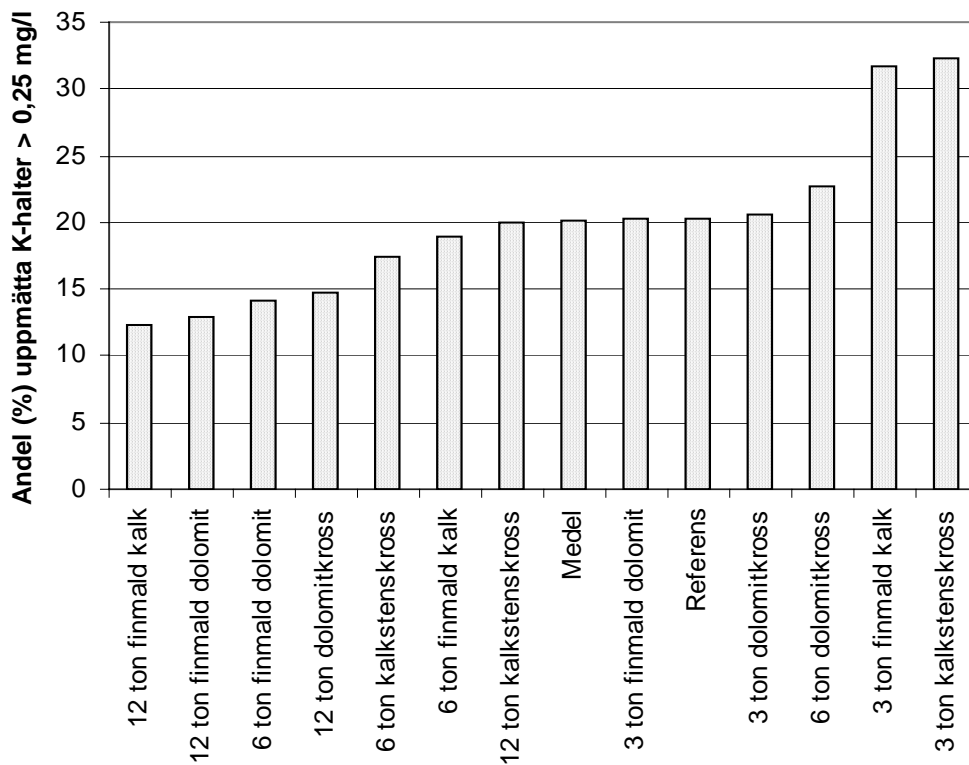


Figur 10. Magnesiumhalt vid olika doser av krossad dolomit. Varje punkt motsvarar ett medelvärde från fyra block.

### 2.4.3 Kalium

Kalium är ett viktigt näringsämne i skogsmark och om kalkning ger stora förändringar av halterna i markvatten medför det en risk för oönskade effekter. Förhöjda halter efter behandling indikerar en ökad utlakning som minskar det växttillgängliga förrådet i marken. Minskade halter indikerar lägre utlakning, men kan även vara ett tecken på en fastläggning som gör kalium mindre tillgängligt.

En svårighet vid utvärderingen av kaliumeffekter i denna studie var att merparten av värdena var under detektionsgränsen 0,2 mg/l. För varje kombination av dos och sort, samt för referenserna, beräknades andelen värden över detektionsgränsen före respektive efter behandling. Andelen före behandling skilde sig inte mycket åt mellan behandlingarna. Andelen efter behandling illustreras i figur 11 och i genomsnitt 20 % av alla mätvärden var över detektionsgränsen. Andelen varierar mellan olika behandlingar mellan 12 och 32 %. Figur 11 visar att dosen 12 ton uppvisar lägst andel värden över detektionsgränsen. Det tycks även generellt sett vara så att behandling med dosen 3 ton lett till störst andel värden över detektionsgränsen. Skillnaderna är inte så stora, men tendenserna är ganska tydliga. Resultaten ger indikationer på att höga doser kan medföra risk för minskning av kaliumhalten, men inget tyder på att dosen 3 ton påverkar kaliumhalten på det sättet, snarare tenderar halten öka vid denna dos. Det går inte att med hjälp av detta material hitta några skillnader mellan kalksorterna med avseende på kaliumeffekt.

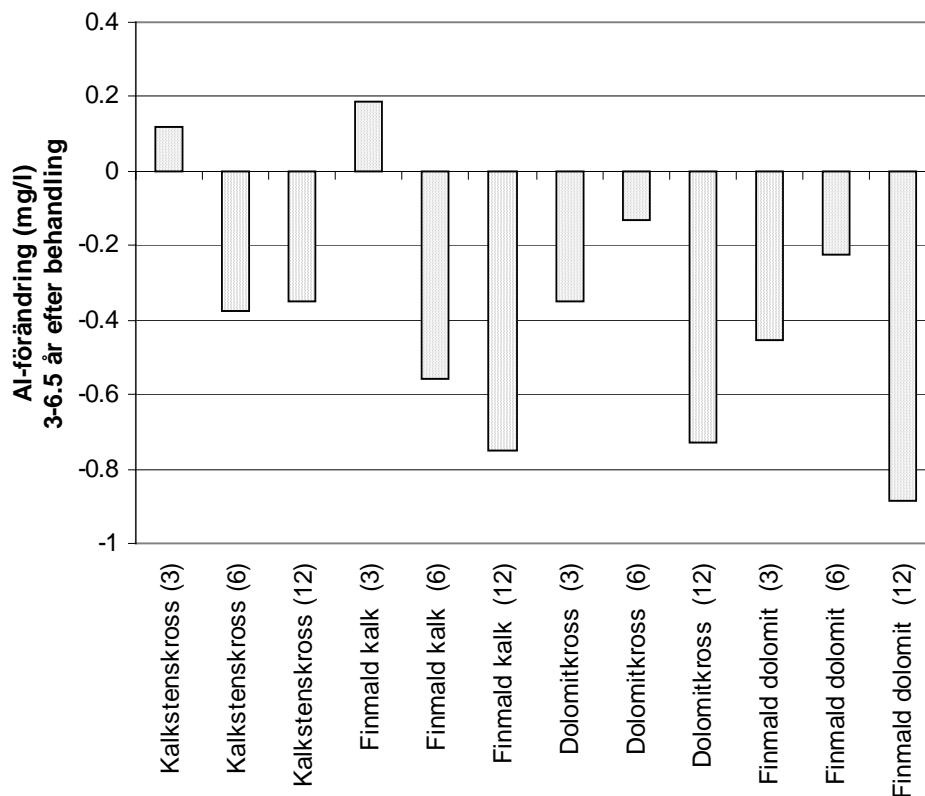


Figur 11. Andel uppmätta kaliumhalter över detektionsgränsen 0,25 mg/l vid olika behandlingar.

#### 2.4.4 Aluminium

Förhöjda aluminiumhalter i mark- och ytvatten är en effekt av försurning som beror på att aluminiumjoner frigörs vid nedfall av starka syror på skogsmark med låga pH-värden. Förhöjda halter av aluminium kan ha skadliga effekter både på växter och djur, vilket gör att sänkta halter i markvattnet är en önskad effekt av kalkning av försurade skogsjordar.

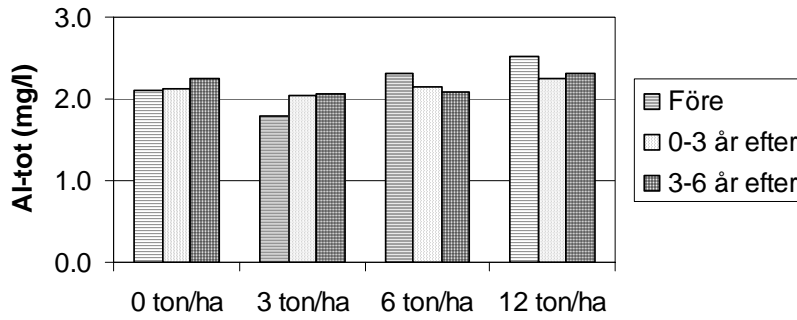
Figur 12 visar förändringen av aluminiumhalten vid de olika behandlingarna, i förhållande till referenserna. Förändringen i varje yta (behandlade ytor och referenser) har beräknats som differensen mellan medelvärdet från perioden 3-6.5 år efter behandling och medelvärdet från tiden före kalkning. Därefter har förändringen i behandlade ytor subtraherats med förändringen i referensytorna.



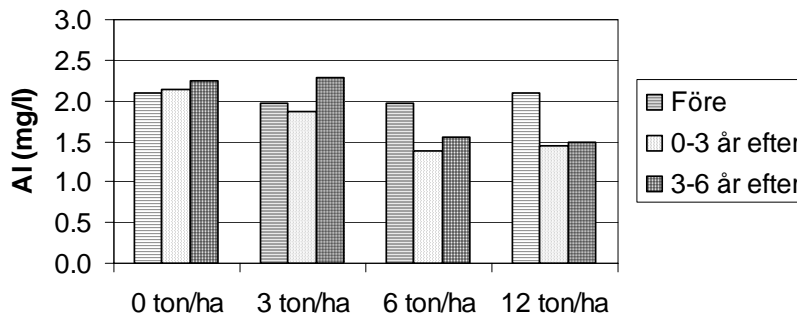
Figur 12 Förändring av aluminiumhalt i markvattnet efter behandling i förhållande till förändringen i referensytorna. Förändringen avser perioden före behandling jämfört med perioden 3-6.5 år efter behandling.

I figur 13 visas medelhalter av aluminium före och efter behandling för de fyra olika kalkmedlen. Den statistiska analysen visade på signifikanta skillnader i behandlingseffekt med avseende på sort. Figur 12 och 13 visar att det är framför allt de finmaldade sorterna som lett till minskning av aluminiumhalten. De tre behandlingar som gett störst effekt är 12 ton finmald kalksten, 12 ton krossad dolomit och 12 ton finmald dolomit.

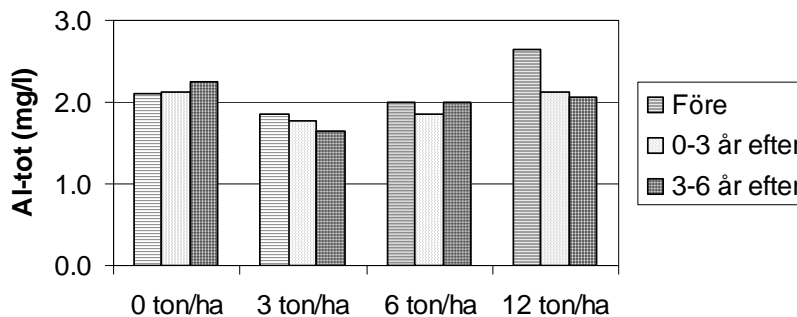




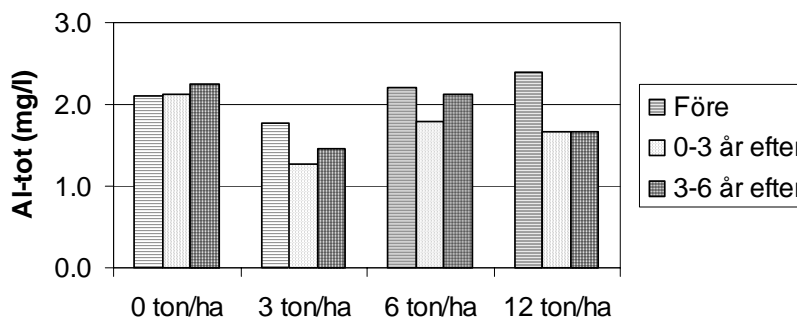
Figur 13a Aluminiumhalt i markvattnet före och efter behandling med krossad kalksten (medelvärden från samtliga mätningar).



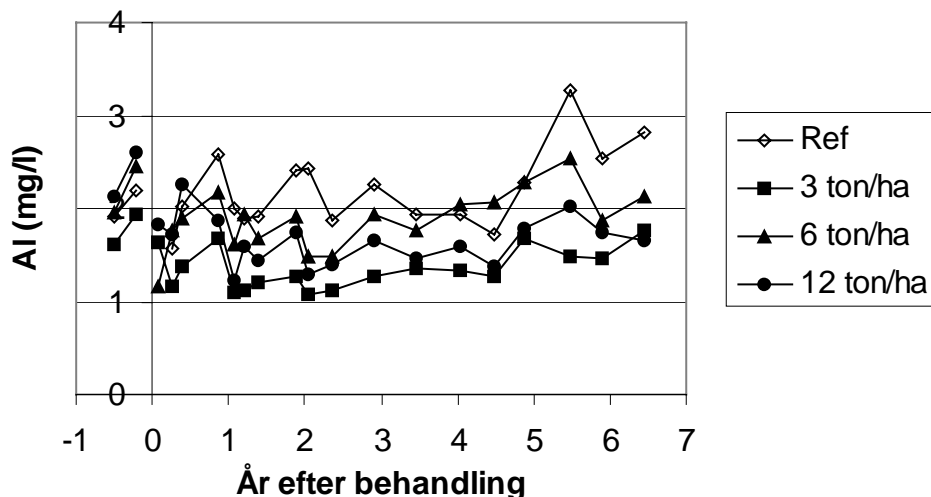
Figur 13b Aluminiumhalt i markvattnet före och efter behandling med finmald kalksten (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 13c Aluminiumhalt i markvattnet före och efter behandling med krossad dolomit (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 13d Aluminiumhalt i markvattnet före och efter behandling med finmald dolomit (medelvärden från samtliga mätningar).

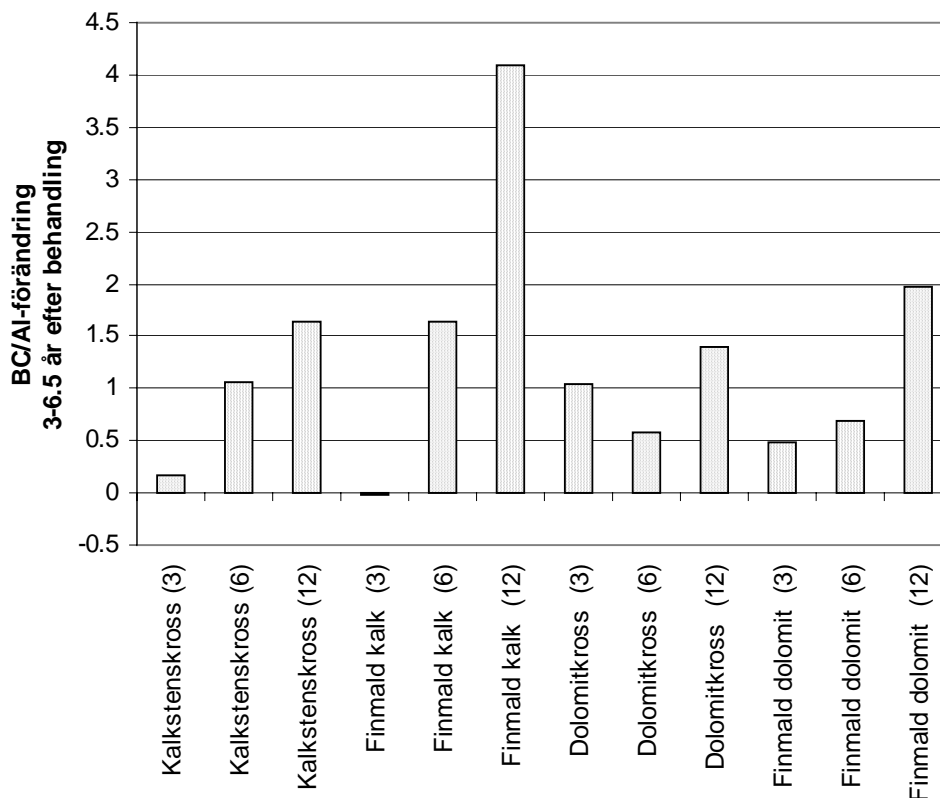


Figur 14. Aluminiumhalt vid olika doser av finmald dolomit. Varje punkt motsvarar ett medelvärde från fyra block.

Figur 14 visar ett exempel på tidsutveckling vid behandling med finmald dolomit, som gav effekter vid samtliga doser. Tidsseriediagram för alla fyra sorter finns i bilaga 3.

#### 2.4.5 BC/Al-kvot

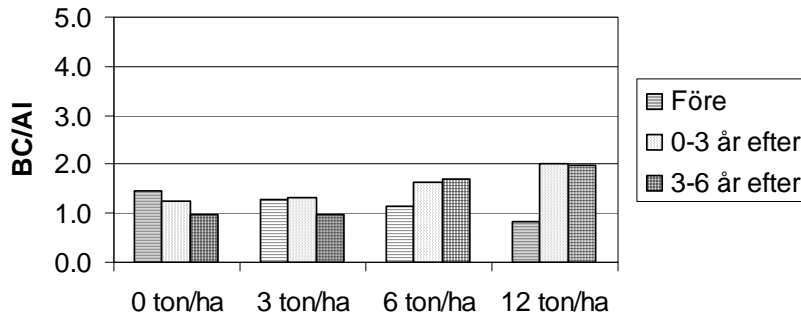
Kvoten mellan baskatjonhalt och halt oorganiskt aluminium (BC/Al) i markvattnet används ofta som ett mått på risken för försurningseffekter. Kvoter lägre än 1 har i vissa försök visat sig medföra ökad risk på skador på skogen i framtiden (Sverdrup och Warfvinge, 1993). I denna studie är aluminium enbart mätt som totalaluminium, vilket innebär att totalaluminium använts i beräkningarna i stället för oorganiskt aluminium. Kvoterna är därför inte direkt jämförbara med kvoter från andra studier.



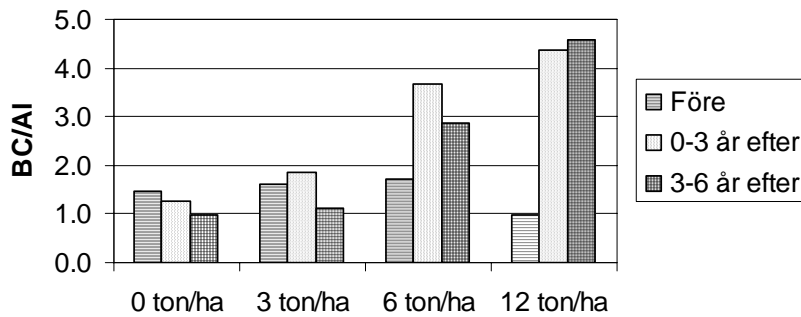
Figur 15. Förändring av BC/Al-kvot i markvattnet efter behandling i förhållande till förändringen i referensytorna. Förändringen avser perioden före behandling jämfört med perioden 3-6.5 år efter behandling.

Figur 15 visar förändringen av BC/Al-kvot vid de olika behandlingarna, i förhållande till referenserna. Förändringen i varje yta (behandlade ytor och referenser) har beräknats som differensen mellan medelvärdet från perioden 3-6.5 år efter behandling och medelvärdet från tiden före kalkning. Därefter har förändringen i behandlade ytor subtraherats med förändringen i referensytorna.

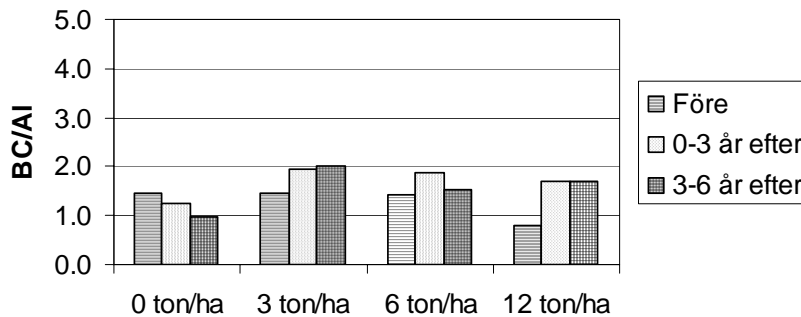
I figur 16 redovisas BC/Al-kvoten före och efter behandling för de fyra olika kalkmedlen och figuren visar att de finmaldade sorterna gav större effekt än kross-sorterna. För BC/Al-kvoten finns signifikanta skillnader mellan behandlingseffekter med avseende på sort. Figur 15-16 visar att det även finns ett tydligt samband mellan dos och effekt för både krossad och finmald kalksten.



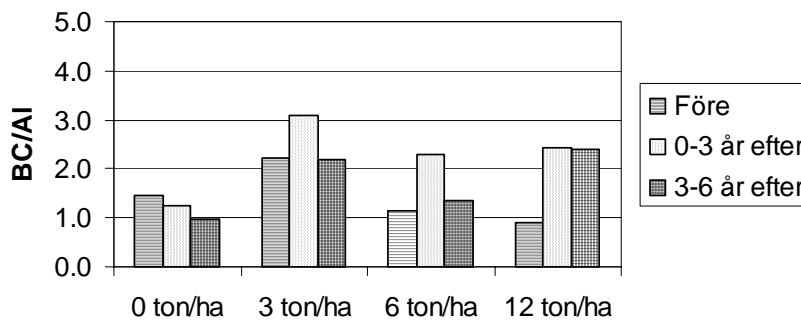
Figur 16a. BC/Al-kvot i markvattnet före och efter behandling med krossad kalksten (medelvärden från samtliga mätningar).



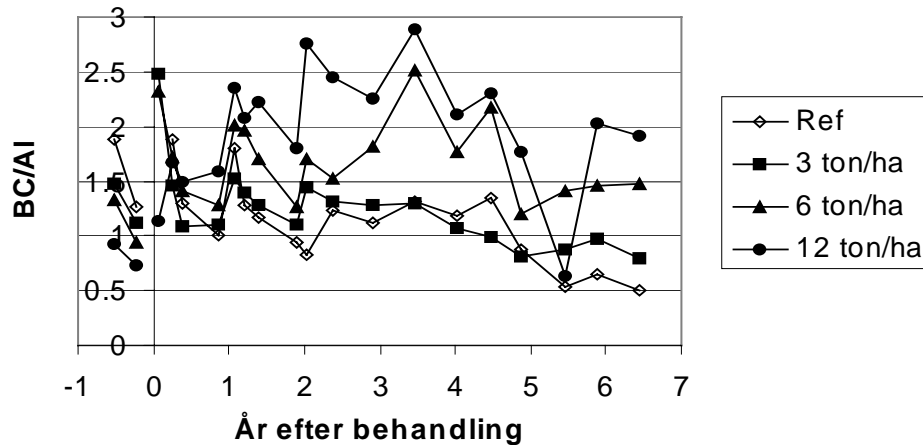
Figur 16b. BC/Al-kvot i markvattnet före och efter behandling med finmald kalksten (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 16c. BC/Al-kvot i markvattnet före och efter behandling med krossad dolomit (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 16d. BC/Al-kvot i markvattnet före och efter behandling med finmald dolomit (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 17. BC/Al-kvot vid olika doser av krossad kalksten. Varje punkt motsvarar ett medelvärde från fyra block.

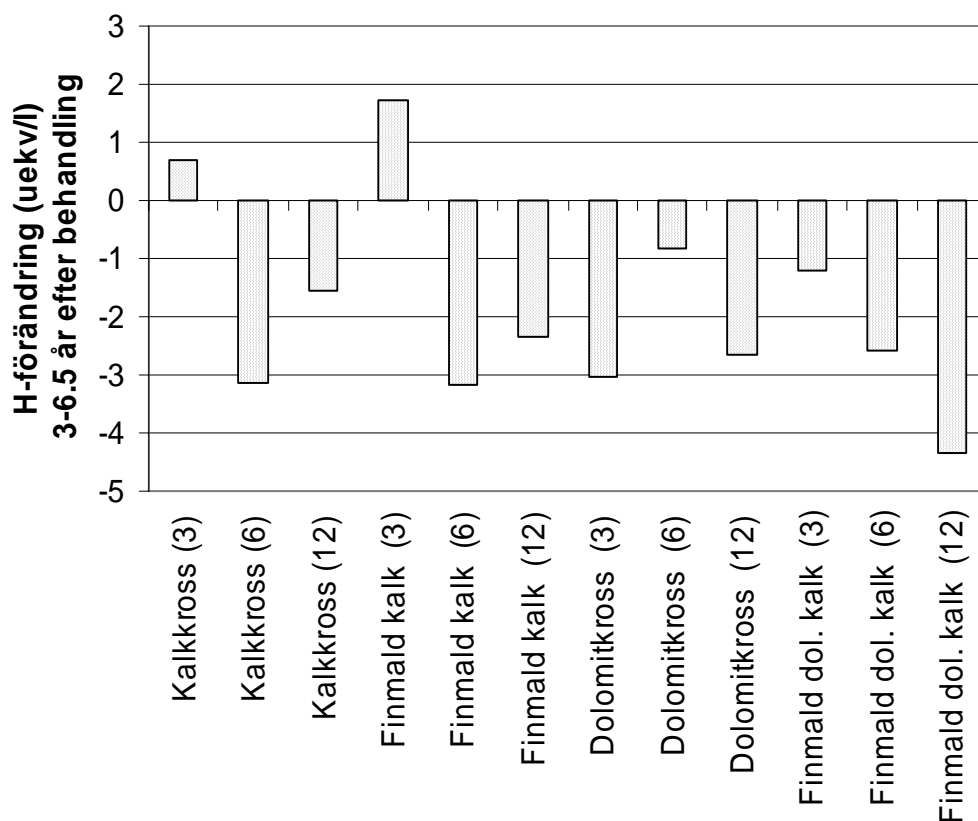
Figur 17 visar ett exempel på tidsutveckling vid behandling med finmald dolomit med ett tydligt samband mellan dos och effekt. Tidsseriediagram för alla fyra sorter finns i bilaga 3.

#### 2.4.6 Vätejonhalt

Surhetsgraden i mark- och ytvatten brukar anges med hjälp av pH. Eftersom pH-skalan är logaritmisk är det enklare att använda vätejonhalten för att kunna bedöma storleken på effekterna jämfört med hur andra ämnen påverkas av behandlingarna. Högre pH motsvarar lägre vätejonhalt och vice versa.

Figur 18 visar förändringen av halten vätejoner vid de olika behandlingarna, i förhållande till referenserna. Förändringen i varje yta (behandlade ytor och referenser) har beräknats som differensen mellan medelvärdet från perioden 3-6.5 år efter behandling och medelvärdet från tiden före kalkning. Därefter har förändringen i behandlade ytor subtraherats med förändringen i referensytorna.

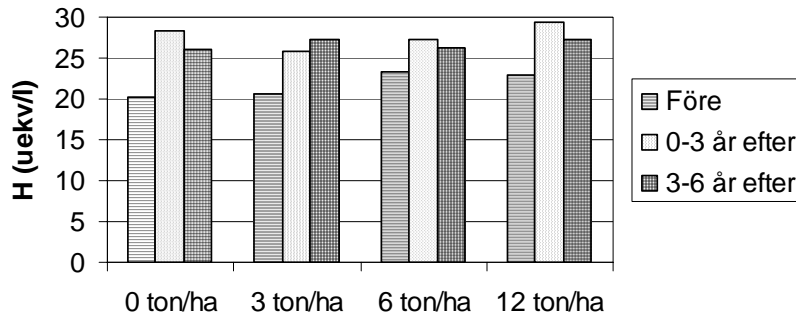
Den statistiska analysen visade inte på några signifikanta skillnader mellan olika behandlingar med avseende på vätejonhalt. Eftersom variationerna i tid (inom och mellan år) och rum normalt är stor för vätejonhalten, minskar förutsättningarna att hitta förändringar orsakade av en behandling. Figur 18 visar dock att vätejonhalten minskade i behandlade ytor i förhållande till referensytorna vid alla behandlingar utom två, vilket tyder på att det finns ett samband mellan behandling och minskad vätejonhalt. I de två fallen, tre ton krossad och tre ton finmald kalksten, ökade den genomsnittliga vätejonkoncentrationen efter behandling. Orsaken var att dessa två behandlingar orsakade en påtaglig ökning av vätejoner (sänkt pH) i markvattnet i block 4. Block 4 hade tydligt lägre halt vätejoner (högre pH) i markvatten vid försökets start än övriga block som reagerat likartat med minskad vätejonhalt på behandlingarna.



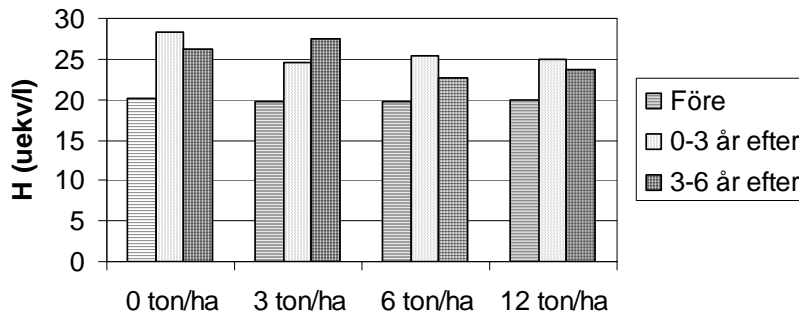
Figur 18. Förändring av vätejonhalt i markvattnet efter behandling i förhållande till förändringen i referensytorna. Förändringen avser perioden före behandling jämfört med perioden 3-6.5 år efter behandling.

I figur 19 visas vätejonhalten före och efter behandling för de fyra olika kalkmedlen.

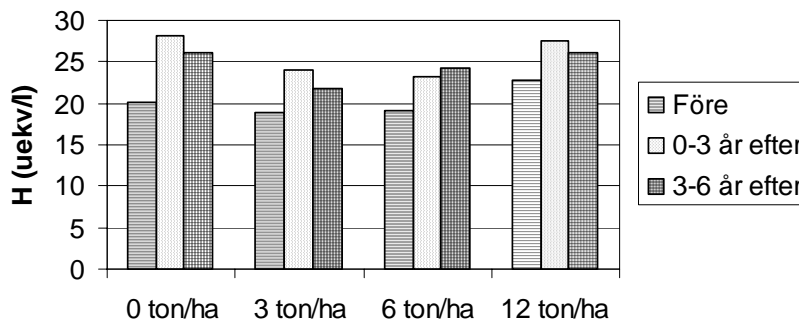
Även i figur 20, som visar ett exempel på tidsutveckling vid behandling med finmald kalksten, syns tendenser till minskning av vätejonhalt efter behandling. Tidsseriediagram för alla fyra sorter finns i bilaga 3.



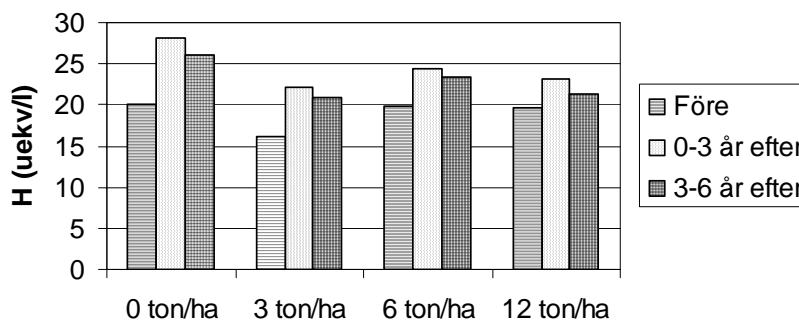
Figur 19a. Halt vätejoner i markvattnet före och efter behandling med krossad kalksten (medelvärden från samtliga mätningar).



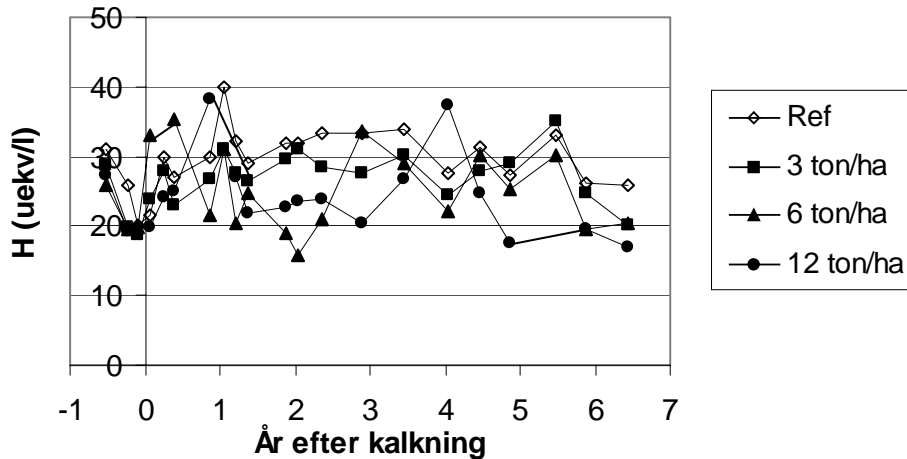
Figur 19b. Halt vätejoner i markvattnet före och efter behandling med finmald kalksten (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 19c. Halt vätejoner i markvattnet före och efter behandling med krossad dolomit (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 19d. Halt vätejoner i markvattnet före och efter behandling med finmald dolomit (medelvärden från samtliga mätningar).



Figur 20. Vätejonhalt vid olika doser av finmald kalksten. Varje punkt motsvarar ett medelvärde från fyra block.

#### 2.4.7 Kväve

Kalkning av skogsmark har i några studier lett till nitratläckage, eftersom ökat pH gynnar nitrifikationsprocesser (Johansson m. fl., 1999). Därför är det av intresse att följa utvecklingen av kvävehalterna i markvatten efter kalkning i denna studie som har ett brett spektra av doser och sorter. Nitratutlakning leder till kraftigt förhöjda kvävehalter i markvattnet.

Liksom för kalium var andelen mätvärden under detektionsgränsen mycket stor för nitrat- och ammoniumkväve, 95 respektive 85 %. Kväve är dessutom ett av de ämnen som analyserats på en begränsad andel av ytorna. Eftersom olika ytor provtagits vid olika tillfällen går det inte att följa hela tidsserier.

Från före kalkning finns 23 mätvärden. 30 respektive 40 % av dessa var över detektionsgränsen för nitrat- och ammoniumkväve. Av de 240 mätningarna som gjorts efter kalkning är motsvarande andelar 3 respektive 14 %. Andelarna från före och efter kalkning är dock inte direkt jämförbara eftersom enbart en liten andel av ytorna provtagits under de två provtagningstillfällena innan kalkning. Ett litet antal mätningar innebär dessutom stor osäkerhet i andelsberäkningen. En slutsats är att inga effekter på kvävehalterna efter kalkning kan påvisas i detta försök.

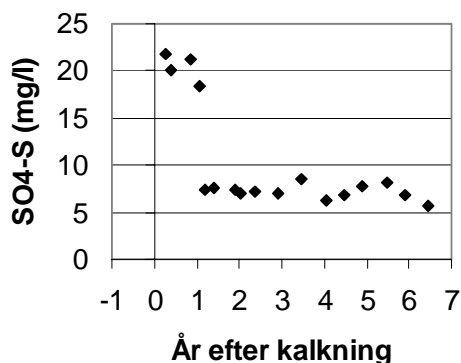
#### 2.4.8 Sulfatsvavel

Sulfatsvavel är, liksom totalt organiskt kol och mangan, ämnen som minskat i markvattnet med det minskade nedfallet på senare år (Hallgren Larsson m. fl., 1997). En återhämtning från försurning av markvattnet förutsätter att halterna av sulfatsvavel minskar, vilket gör det intressant att följa upp effekterna efter kalkning. Nedan visas ett par exempel på tidsutvecklingen för halten av svavel i en referensyta och i en behandlad yta. Ytor med relativt kompletta tidsserier, som dessutom representerar den generella bilden så bra som möjligt, har valts.

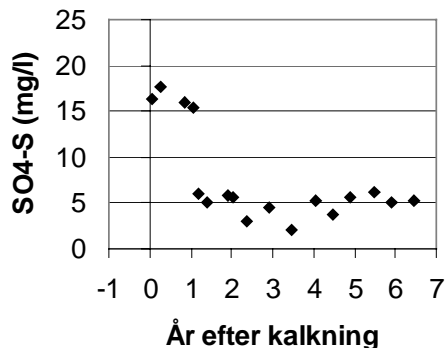
Figur 21 visar en minskning av sulfathalten i både kalkade ytor och referensytorna och det går inte att påvisa någon skillnad mellan kalkade ytor och referensytorna.



a. Referens



b. 6 ton finmald dolomit.

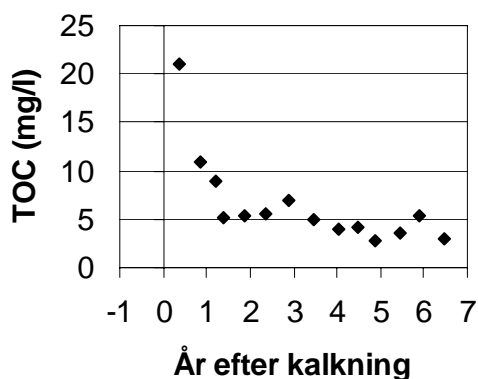


Figur 21. Sulfatsvavel i markvattnet i en referensyta (a) och i en yta behandlad med 6 ton finmald dolomit (b). Mätningar från innan behandling saknas här, men resultaten från andra ytor visar att nivån före kalkning var ungefär den samma som precis efter.

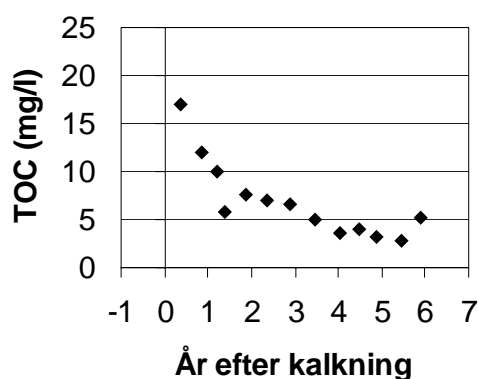
### 2.4.9 Totalt organiskt kol

Totalt organiskt kol har liksom sulfatsvavel minskat under försöksperioden både i kalkade ytor och i referensytor (figur 22). Inte heller här går det att finna någon skillnad i förändring mellan obehandlade och behandlade ytor.

a. Referens



b. 12 ton finmald dolomit.

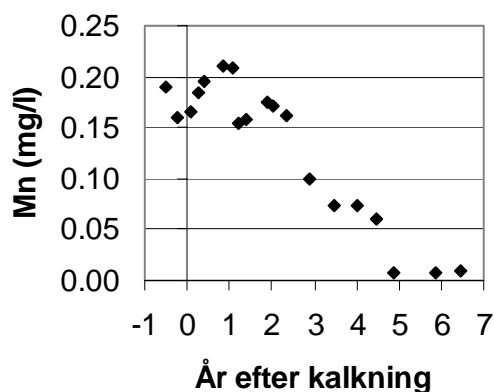


Figur 22. Totalt organiskt kol i markvattnet i en referensyta (a) och i en yta behandlad med 12 ton finmald dolomit (b). Mätningar från innan behandling saknas här, men resultaten från andra ytor visar att nivån före kalkning var ungefär den samma som precis efter.

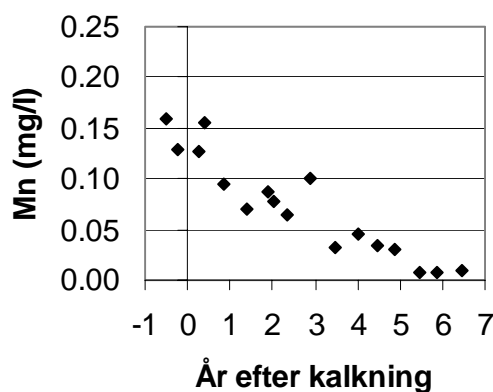
### 2.4.10 Mangan

Manganhalten har minskat kraftigt både i kalkade ytor och i referensytor, och det går inte att påvisa någon kalkningsberoende skillnad i minskning (figur 23).

a. Referens



b. 12 ton finmald dolomit.



Figur 23. Mangan i markvattnet i en referensyta (a) och i en yta behandlad med 12 ton finmald dolomit (b).

### 2.4.11 Natrium och klorid

Enligt nuvarande kunskap finns inget som pekar på något samband mellan kalkning och effekter i markvattnet på natrium- och kloridhalt. För natriumhalt finns kompletta dataserier, medan kloridhalten har analyserats på ett reducerat antal prov, på samma sätt som övriga anjoner.

Variationer av natrium- och kloridhalt styrs i stor utsträckning av vädersituationer (Gustafsson, 1999). Under stormtillfällen, när havsluft blåser in över landet kan depositionen bli mycket hög. Depositionen under ett enda stormtillfälle kan påverka hela årsdepositionen kraftigt. För natrium, och framför allt klorid, finns tecken på högre halter precis i början av perioden i en stor del av ytorna. En kraftig förhöjning av kloridhalterna inträffade i stora delar av landet under 1992/93, vilket motsvarar första året efter kalkningen (Hallgren Larsson & Westling, 1994). Orsaken är en mycket blåsig januarimånad 1993 (SMHI, 1993) med hög deposition av havssalt i stora delar av landet. Det är med all sannolikhet detta, och inte kalkningen, som lett till förhöjda klorid- och natriumhalter under det första året efter kalkning.

### 2.4.12 Järn

Inte heller för järn finns något som talar för att det kan finnas någon påverkan vid kalkning. I denna studie finns inga speciella trender eller skillnader mellan kalkade ytor och referensytor med avseende på Fe-halt, som kan relateras till kalkningen.

## 2.5 Slutsatser av markvattenundersökningarna

En jämförelse mellan tidsutvecklingen av kalciumhalten i markvatten på 25 och 50 cm i parceller med och utan behandling visade på stora likheter. Två skillnader var att fluktuationerna var större på 25 cm samt att den initiala effekten i flera fall kom något tidigare på 25 cm än 50 cm. Djupet 50 cm innebär skiktet under rotzonen och detta markvatten kan användas som ett mått på utlakningen. Huvuddelen av utvärderingarna och slutsatserna från denna studie avser djupet 50 cm.

- Det finns signifikanta skillnader både mellan olika doser och mellan olika sorter med avseende på **kalcium**effekter i markvattnet. Vid behandling med finmald kalksten och krossad kalksten ökade kalciumhalten med dosen. De båda dolomitsorterna ledde också till ökning av kalciumhalten, men ökningen var inte lika tydligt dosberoende. De finmalda sorterna, speciellt finmald kalksten, gav större effekter på kalciumhalten än kross-sorterna. 3 ton krossad kalksten ledde till en ökning av kalciumhalten med 0,5 mg/l, 3-6 år efter behandling. Motsvarande ökning vid behandling med 12 ton finmald kalksten var 3,5 mg/l. Behandling med finmald kalksten gav upphov till en kraftig initial effekt, till omkring 9 mg/l vid dosen 12 ton/ha. Även behandling med 12 ton krossad kalksten ledde till en topp, dock avsevärt mindre, under första året efter behandling.
- Det finns signifikanta skillnader både mellan olika doser och mellan olika sorter med avseende på **magnesium**effekter i markvattnet. Dolomitsorterna, som innehåller magnesium utöver kalcium, gav upphov till en ökning av magnesiumhalten. Det finns inget lika tydligt dos samband som det finns för kalciumhalten vid behandling med krossad kalksten och finmald kalksten, men dosen 12 ton av de båda dolomitsorterna gav störst effekt på magnesiumhalten, en ökning på drygt 0,6 mg/l.
- Doser på 12 ton och i viss mån 6 ton tenderade att minska **kalcium**halten, speciellt för de finmalda sorterna.
- Det finns signifikanta skillnader mellan olika sorter med avseende på effekter på **aluminium**halten under de första tre åren efter behandlingen. De finmalda sorterna ledde till kraftigare minskningar av aluminiumhalten än kross-sorterna. Behandlingarna med 12 ton finmald kalksten, 12 ton finmald dolomit och 12 ton krossad dolomit var de som gav störst minskning av aluminiumhalten, omkring 0,8 mg/l 3-6 år efter behandling. Detta tyder på att även dosen är av betydelse. Försöket visar inte på några kraftiga initiala effekter för aluminiumhalten.
- För **halten vätejoner** finns inga signifikanta skillnader i behandlingseffekt mellan olika doser eller olika sorter. Däremot finns tydliga tendenser till minskning av halten efter kalkning. Inga kraftiga initiala effekter kan påvisas.
- Det finns signifikanta skillnader mellan olika sorter med avseende på **BC/Al-kvoten** 0-3 år efter behandling. De finmalda sorterna gav större effekt än kross-sorterna. Även om det inte finns något signifikant dos-effekt samband finns tydliga tendenser till ökad kvot vid högre doser. En slutsats från försöken är att det är möjligt att snabbt (inom ett år) öka BC/Al-kvoten, men storleken av effekten av olika sorter och doser är svåröversäglig.
- Inga behandlingseffekter kunde påvisas för **svavel**, **TOC** och **mangan**. Halterna minskade i markvattnet både i behandlade ytor och i referensytor.

- Inte heller halterna av **natrium, klorid** och **järn** förändrades med anledning av behandlingen.

Resultaten från denna studie kan jämföras med tidigare erfarenheter från kalkningsförsök i skogsmark. De kalksorter och doser som är aktuella för skogsmarkskalkning, med syfte att långsiktigt bygga upp basmättnadsgraden till nivåer som fanns före den antropogena markförsurningen under 1900-talet, är främst krossade produkter med dosen 3 till 6 ton. De kortsiktiga (upp till 6,5 år) effekterna av sorter och doser i detta försöket skiljer sig inte principiellt från tidigare försök. I regel ökade pH (minskad vätejonhalt) och halten av kalcium efter kalkning. Vid behandling med dolomit ökade dessutom magnesiumhalten.

De olika reaktionerna mellan blocken på samma behandling indikerar att de kortsiktiga effekterna är svåra att generalisera till exempel som dos-responshöjanden. Effekten påverkas både av den aktuella markförsurningsgraden innan behandling och markens egenskaper i stort. På kort sikt är förutsättningen för en behandlingseffekt att den kalk som finns i markens ytskikt dels är upplöst och dels finns i ett så stort överskott att Ca- och Mg-joner kan transporteras ned med markvattnet till 25 och 50 cm djup. Detta syns tydligt under de första åren i försöksleden med framför allt kalksten där både sort och dos har betydelse för effekten i form av ökade halter. Några år senare klingar effekten av, vilket troligen beror på att den mest finkorniga andelen är upplöst. Den avklingande effekten är mest tydlig för finmald kalksten och det är tveksamt om den kalktypen är lämplig för behandling av skogsmark då den initiala effekten är så kraftig och kortvarig.

Huvuddelen av den vittrade kalken kommer med tiden att tillföras humusskiktets förråd av utbytbart kalcium, och magnesium vid användning av dolomit (Staaf m. fl., 1996). På kort sikt efter behandling (10 till 30 år) är djupare delar av mineraljorden relativt opåverkade av tillförd kalk och effekter i markvatten styrs av olika processer som jonbyte högre upp i markprofilen. På lång sikt är det troligt att sorten har mindre betydelse för behandlingseffekten, men förloppet med vittring och tillförsel av baskatjoner till humusskiktets utbytbara förråd kommer att ta längre tid med krossad kalk, jämfört med finmald. Via jonbytesprocesser kommer baskatjonerna att med tiden fördelas allt längre ned i markprofilen. Under det förloppet kan tillfälliga förändringar uppstå, som att utbytta aluminiumjoner från ytliga markskikt uppträder i markvattnet. Efter många decennier, när basmättnadsgraden ökat i hela markprofilen, är det troligt att i första hand dosen kommer att ha betydelse för effekten på markvattnets försurningsgrad (Westling m. fl., 2000).

Oönskade effekter på markvatten efter kalkning i form av minskat pH, samt ökade halter av aluminium, kalium eller nitratkväve som noterats i vissa tidigare försök har inte bekräftats i detta dos- och sortförsök. Tendenser till ökad försurning i ett block med ett förhållandevis högt pH i utgångsläget observerades. En tendens till ökad fastläggning av kalium med höga doser av kalk visade sig genom låga halter i markvatten i de försöksleden. Behandling med kalksten (utan magnesium) tenderade till att öka halterna av magnesium i markvatten, vilket kan leda till en minskning av det utbytbara förrådet i marken.

## 3 Barrkemi

Markvattenkemin avspeglar tillståndet i marken och ger ett mått på grundförutsättningarna för träden. För att få reda på vad träden verkligen tar upp krävs att näringsförhållandena i träden studeras med hjälp av barrkemiska analyser. Resultatet kan användas som ett mått på trädens näringstillstånd, där onormalt låga (eller i vissa fall höga) halter indikerar näringsbrist eller någon form av störning.

Tidigare studier av kalkningseffekter på barrkemi har visat relativt liten påverkan efter både kalkstens- och dolomittillförsel. Tendenser till ökade Ca- och Mg-halter i barren har noterats. En svag minskning av aluminium och mangan halterna har också observerats. Halterna av kväve och fosfor påverkas i allmänhet inte, men i något fall har en tillfällig minskning av fosforhalten noterats (Johansson m. fl., 1999).

### 3.1 Metodik

Provtagning har skett vintertid genom att kvistar klippts från träden med sax på lång stång. Från varje provyta har tio träd provtagits. En kvist från den övre solbelysta delen, 5-8:e grenvarvet, har använts från vart och ett av de tio träden. Ett topp- och två sidoskott från alla tio kvistarna utgjorde ett prov. Ett prov från en provyta bestod således av 30 årsskott. Barrproven har analyserats med ICP/AES-teknik och elementar-analysator. Provtagningar har utförts vid tre tillfällen, 5, 6 och 7 år efter behandling.

De ämnen som utvärderas i denna studie är magnesium (Mg), fosfor (P), svavel (S), aluminium (Al), kalium (K), kalcium (Ca), zink (Zn), järn (Fe), mangan (Mn), kol (C) och kväve (N). Utöver dessa analyserades även bor (B), koppar (Cu), kisel (Si) och natrium (Na). Halterna av dessa ämnen är låga och många prover under detektionsgränsen eller den kvalitativa gränsen och har inte utvärderats. Den kvalitativa gränsen har definierats som den lägsta koncentration som kan analyseras med maximalt 5% spridning.

### 3.2 Barrkemiska effekter av olika behandlingar

I bilaga 4 presenteras resultatet av de barrkemiska analyserna. Behandlingarna jämförs grafiskt i figur 24 a-k som visar medianvärden, 25-75-percentiler samt min- och max-värden för olika ämnen. I anslutning till figurerna finns även angivet vilka signifikanta skillnader som finns mellan de olika behandlingarna. Tukey HSD test har använts (Tukey, 1953). De tre barrårgångarna som provtagits 5-7 år efter kalkning har slagits ihop i den statistiska analysen. I diagrammen kan ungefärliga nivåer för olika näringsämnen läsas ut. Dessutom visar diagrammen om det finns några skillnader mellan de olika doserna och referenserna för de olika ämnena. Dessa kan jämföras med en empirisk sammanställning av önskvärda nivåer samt ”för låga” nivåer av olika ämnen; tabell 4 (Brække, 1994).

Kalciumhalten i barren var högre i ytorna som kalkats, och ökade med dosen. För kalcium finns signifikanta skillnader mellan alla olika behandlingar förutom mellan doserna 3 och 6 ton. I stort sett alla uppmätta värden på kalciumhalt var på ”önskvärd nivå” enligt riktvärdena i tabell 4.

Tabell 4. Önskvärda nivåer och för låga nivåer av näringsämnen i granbarr (mg/g) enligt Brække, 1994. Nivåerna är empiriskt framtagna.

Ämne	För låg nivå	Önskvärd nivå
K	<2,4-6	>6-8
Ca	<1-2	>3-4
Mg	<0,3-0,8	>0,7-1,1
S	-	>1,9-2,2
Mn	<0,01-0,02	0,08-0,5
B	<0,004-0,005	0,008-0,025
Cu	<0,002-0,003	>0,003
Zn	<0,013-0,020	>0,025
Fe	<0,017	-

Magnesiumhalten skilde sig signifikant mellan referensytorna och ytorna behandlade med 12 ton kalk. Halten var högre i behandlade ytor. Även vid de andra doserna fanns tydliga tendenser till en förhöjning gentemot referensytorna, men skillnaderna var inte signifikanta. Mg-halten var på ”önskvärd” nivå.

Kaliumhalten uppvisade tendenser till minskade halter vid kalkning. Skillnaden var dock signifikant endast vid dosen 6 ton. Alla ytor hade halter lägre än ”önskvärd nivå”.

Manganhalten skilde sig signifikant åt mellan kalkade ytor och referensytorna. Halterna var lägre efter kalkning. De olika doserna skilde sig däremot inte åt. Halterna i referensytorna var höga jämfört med intervallet för ”önskvärd nivå”. I behandlade ytor var halterna i nivå med intervallet, eller något högre.

För aluminiumhalten finns signifikanta skillnader mellan referensytorna och dosen 12 ton, samt mellan doserna 3 ton och 12 ton. Halten var lägst vid dosen 12 ton. Även dosen 6 ton var något lägre än referensytorna och ytorna behandlade med 3 ton, dock ej signifikant.

Det finns signifikanta skillnader mellan referenserna och 3 ton respektive 6 ton med avseende på svavelhalten. Halterna vid doserna 3 och 6 ton var högre än på referensytorna. Samtliga halter var lägre än ”önskvärd nivå” enligt tabell 4.

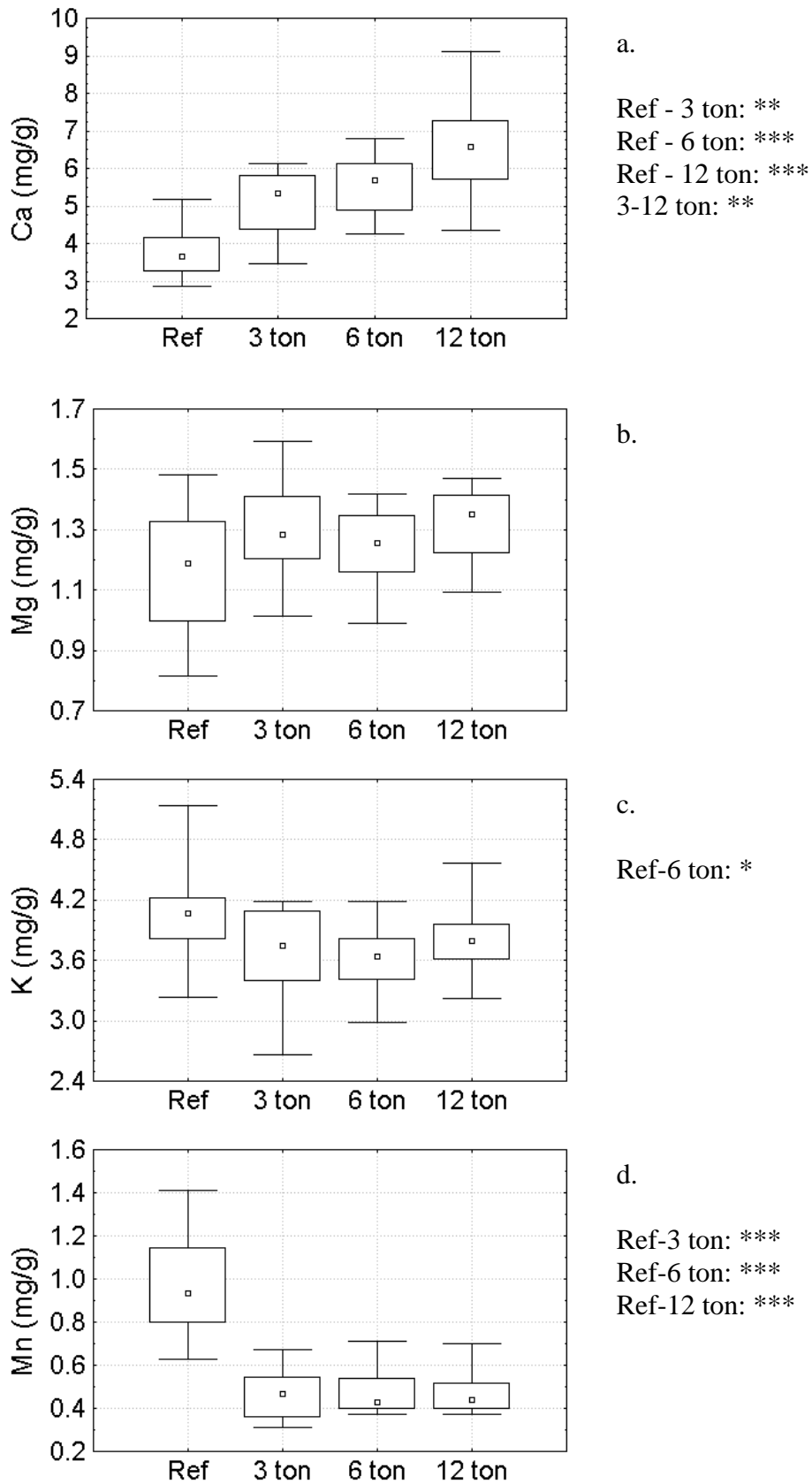
För kväve- och fosforhalt kunde inga signifikanta skillnader, eller tendenser till kalkningsrelaterade skillnader skönjas.

Kolhalten var lägre i de behandlade ytorna än i referensytorna, och minskade med dosen. Referensytorna skilde sig signifikant från doserna 6 och 12 ton. Även doserna 3 och 12 ton skilde sig signifikant åt.

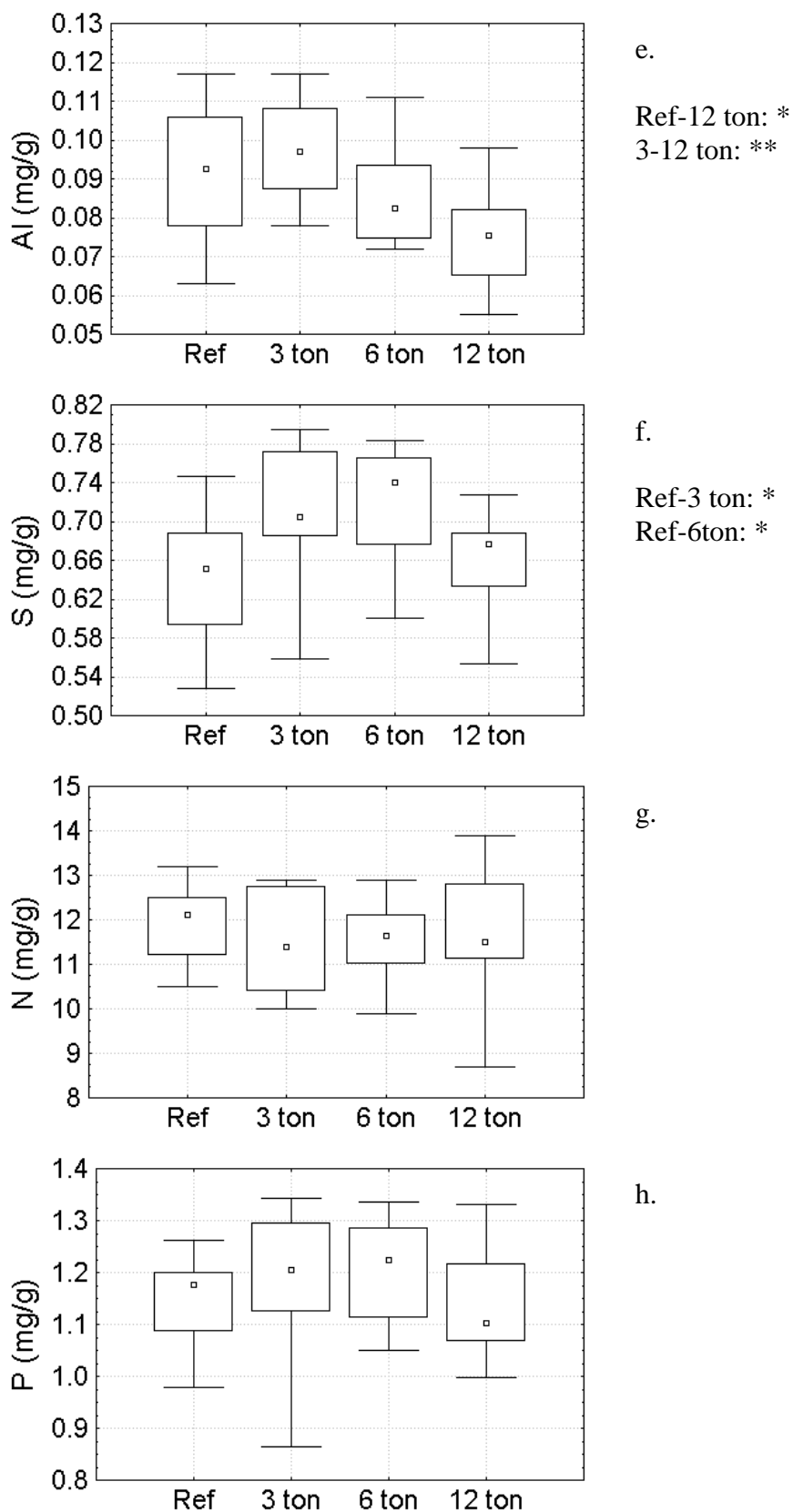
För järnhalt kunde inga signifikanta skillnader, eller tendenser till kalkningsrelaterade skillnader skönjas.

För zinkhalten finns vissa signifikanta skillnader. Vid dosen 12 ton var halten högre än vid dosen 6 ton och på referensytorna. Halten låg i nedre delen av intervallet för ”önskvärd nivå”, eller på ”för låg nivå”, enligt riktvärdena i tabell 4.

Halten bor och koppar var under detektionsgränsen på samtliga ytor, och kunde därför inte utvärderas med avseende på kalkningseffekt. Detektionsgränserna för Si- och Na-halt var 0,125 mg/g och 0,10 mg/g. Dessa ämnen kunde inte heller utvärderas, eftersom en stor andel av värdena var under detektionsgränsen eller under den kvalitativa gränsen.

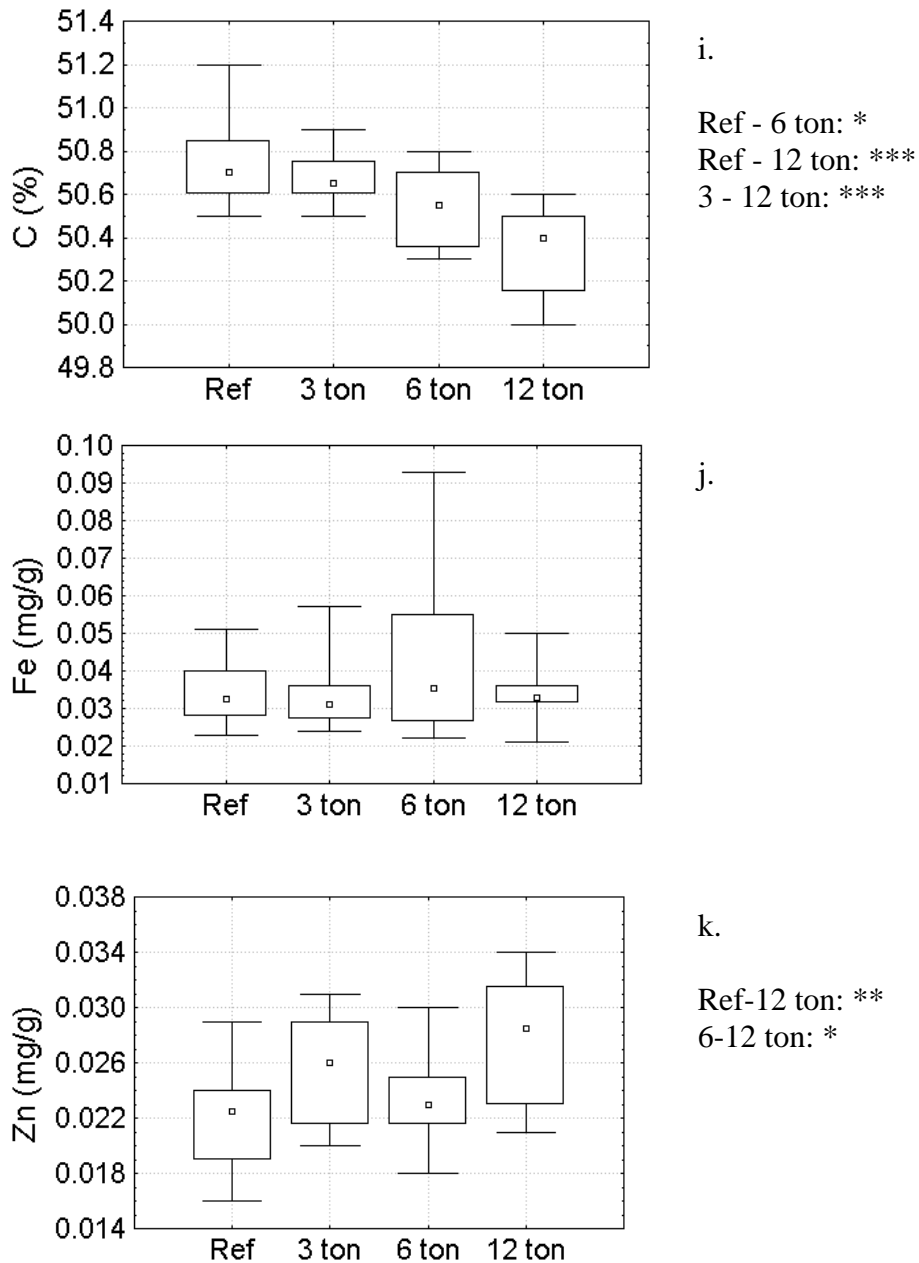


Figur 24 (a-d) Barrkemi vid olika behandlingar. Mittpunkten står för medianvärdet, "boxen" innesluter 25-75 % av alla värden och de yttre gränserna står för min- och max-värden. Till höger om figurerna anges signifikanta skillnader. Stjärnorna anger signifikansnivå.



Figur 24 (e-h) Barrkemi vid olika behandlingar. Mittpunkten står för medianvärdet, "boxen" innesluter 25-75 % av alla värden och de yttre gränserna står för min- och max-värden. Till höger om figurerna anges signifikanta skillnader. Stjärnorna anger signifikansnivå.





Figur 24 (i-k) Barrkemi vid olika behandlingar. Mittpunkten står för medianvärdet, "boxen" innesluter 25-75 % av alla värden och de yttre gränserna står för min- och max-värden. Till höger om figurerna anges signifikanta skillnader. Stjärnorna anger signifikansnivå.

### 3.3 Slutsatser av de barrkemiska undersökningarna

En tydlig direkteffekt av kalkningen var att kalciumhalten ökade i barren. Effekten ökade med dosen. Halterna varierade mellan ungefär 3 och 9 mg/g. Även andra försök, t.ex. i Tågabo och Lidhult, med kalkning och vitaliseringsgödning på försurad granskogsmark, har visat på signifikanta effekter i form av ökning av kalciumhalten (Larsson m. fl., 1999).

Andra tydliga effekter var att manganhalten, aluminiumhalten och halten organiskt kol minskade. Minskningen av manganhalten tycktes vara oberoende av dos.

I Tågabo, som behandlats med en blandning av kalk och aska, gav kalkningen motsatt effekt med avseende på manganhalt, det vill säga en ökning. Detta har troligen att göra med egenskaper hos askan. Minskningen av halten organiskt kol återfinns också i Tågabo, och denna studie tyder på att minskningen är dosberoende. Troligtvis handlar det dock om en relativ minskning av halten organiskt kol. Ökningen av andra ämnen, däribland kalcium, medför en ökning av barrvikten, vilket leder till att andelen kol minskar trots att mängden är den samma.

Effekterna av kalkning i dosförsöket sammanfaller i stort med tidigare erfarenheter. Ökningen av kalcium i barren var i detta försök större än vad som vanligtvis noterats tidigare från Sverige, även med måttliga doser som tre och sex ton per ha. Detta trots att nivåerna inte var låga i barren innan behandlingen. Resultaten visar att granskog har en avsevärd kapacitet till en form av "lyxupptag" när tillgången på kalciumjoner i rotzonen är god. Dosen 12 ton per ha ledde till signifikanta öknningar och minskningar av många ämnen i barren, dock inte det tillväxtbegränsande kvävet.

## 4 Träd tillväxt

Ett långsiktigt mål med skogsmarkskalkning och vitalisering i försurningsdrabbade områden är att motverka att trädens tillväxt och vitalitet minskar till en nivå under den normala för ståndorten. Markvattenkemi och barrkemi är indirekta mått på trädens vitalitet, medan den faktiska träd tillväxten är ett mått som direkt kan relateras till ett av syftena med skogsmarkskalkning och vitalisering.

Äldre kalkningsförsök i tall- och granskog i bland annat mellersta Sverige på relativt svag mark har reviderats och i många fall har en minskad tillväxt noterats under 10 till 30 år efter behandling. Därefter ökar ofta tillväxten relativt obehandlade kontroller. Studier under senare år av träd tillväxt efter kalkning av relativt bördig skogsmark i områden med förhöjd deposition av kväve har inte visat några tillväxtminskningar. Dessa ståndorter i försurningsdrabbade områden i södra Sverige är mer representativa för skogsmark där en åtgärd som kalkning kan vara aktuell, än svaga marker i andra delar av landet. På bättre marker i södra Sverige reagerar ofta både gran och tall med en svag tillväxtökning efter kalkning (Johansson m. fl., 1999).

### 4.1 Metodik

I enlighet med barrkemistudien jämfördes i träd tillväxtstudien effekter vid behandling med 3, 6 och 12 ton skogskalk med varandra, samt med obehandlade referensytor. Fyra upprepningar fanns för varje behandling. Tillväxten mellan våren 1992 och hösten 1996 avses och omfattar således tillväxten efter fem vegetationssäsonger.

Diametermätning skedde av samtliga träd inom varje parcell. Träden korsklavades och diametern registrerades i millimeter. Antalet provträd i varje parcell fastställdes enligt Skogshögskolans rutiner för fasta försök. Provträdens höjd och krongränshöjd registrerades i decimeter.

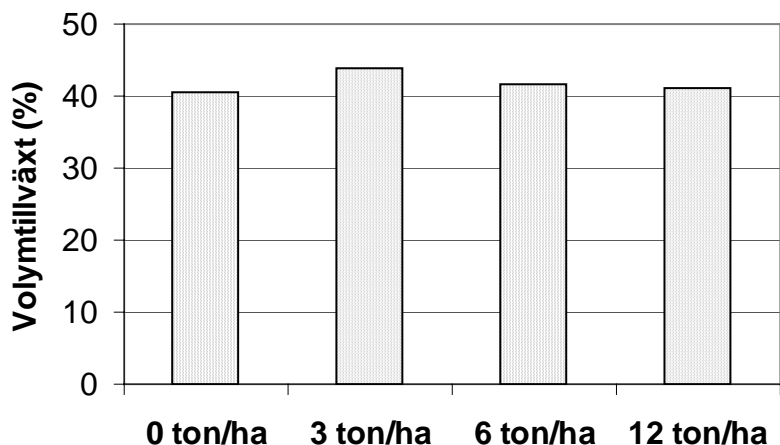
Volymen för 1992 och 1996 beräknades med hjälp av Näslunds större volymfunktion. Med hjälp av denna skapades en sekundär volymfunktion, och därefter tilldelades varje träd en volym. Tillväxten redovisas i skogskubikmeter per hektar ( $m^3$ sk/ha).

### 4.2 Tillväxteffekter av olika behandlingar

I bilaga 5 presenteras resultaten från tillväxtstudien i tabellform. Variansanalys visade att det inte fanns några signifikanta skillnader mellan de olika behandlingarna med avseende på trädens volym, grundyta, aritmetisk medeldiameter eller aritmetisk medelhöjd. I figur 25 presenteras en grafisk jämförelse mellan de fyra behandlingarna, med avseende på volymtillväxt under fem år (medelvärden från de fyra blocken).

### 4.3 Slutsatser av tillväxtmätningarna

Träd tillväxten de första fem åren efter kalkning skilde sig inte åt mellan de fyra olika behandlingarna (kalkning med 3, 6 och 12 ton/ha skogskalk samt obehandlad referens). Fem år är dock en mycket kort period när det handlar om träd tillväxt. Längre tidsserier krävs för att utvärdera den långsiktiga effekten. De näringsämnen som ingår i kalkningsmedlet är inte bristämnen för träd tillväxten, utan eventuella effekter orsakas främst av i vilken grad behandlingarna påverkar tillgången på kväve i rotzonen.



Figur 25. Volymtillväxt vid olika behandlingar under den första femårsperioden (medelvärden från fyra block).

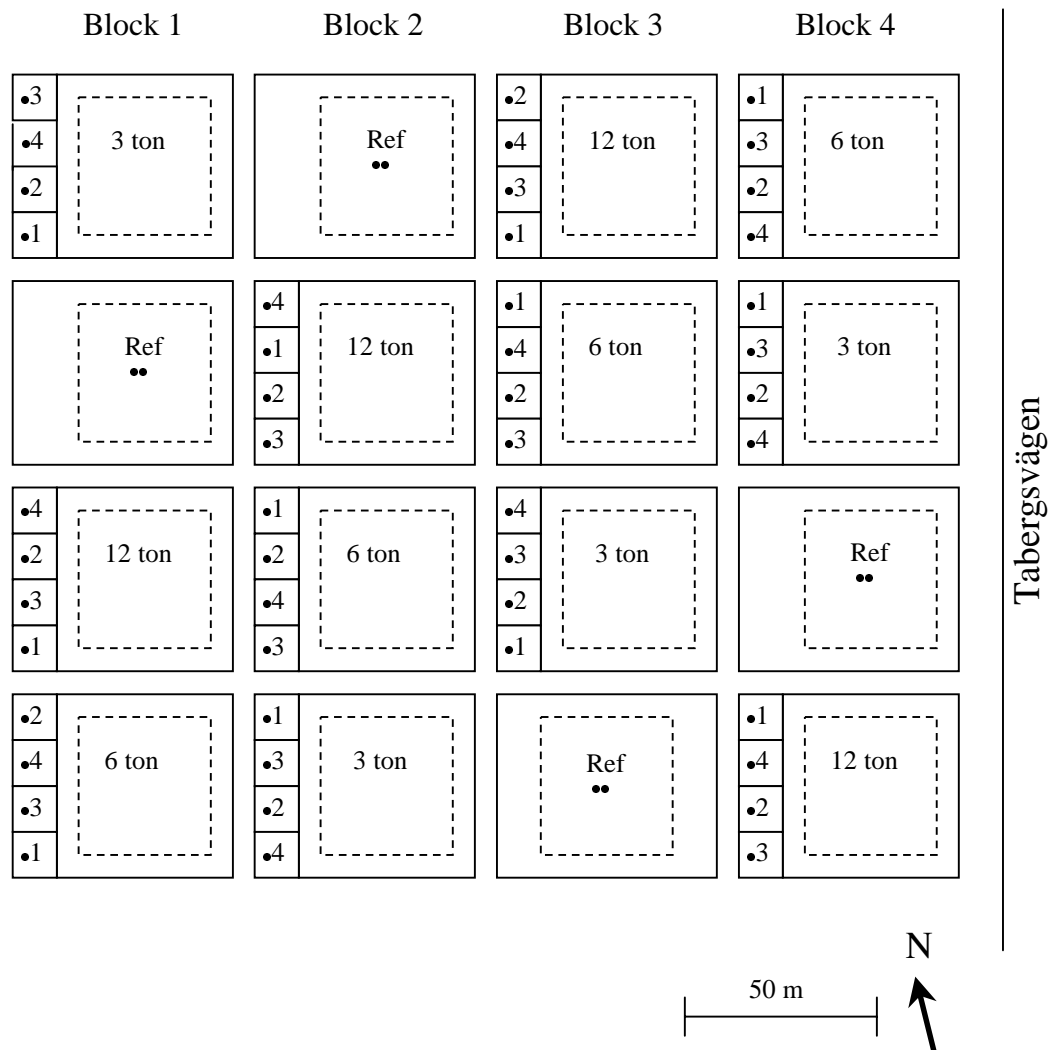
Undersökningar i mellersta och norra Sverige i äldre kalkningsförsök, på svaga marker med hög C/N-kvot, har ofta visat en nedsatt tillväxt under 5 till 30 år efter behandling. Det beror sannolikt på att tillgängligt oorganiskt kväve immobiliseras av den ökade mikrobiella biomassan som kalkningen orsakar. Effekten är temporär och kan senare övergå i en svagt ökad träd tillväxt. Dosförsöket i Asa visade dock inte någon tendens till tillväxtnedsättning, inte ens med en så hög kalkgiva som 12 ton per ha, de första fem åren. Kalkningsförsök i sydvästra Sverige på rika marker med relativt låg C/N kvot har ofta visat en tillväxtökning, i synnerhet i granskog (Andersson m. fl., 1996). Denna relativt snabba tillväxteffekt uppträdde inte i dosförsöket i Asa.

Försöksområdet i Asa ligger på mark som är måttligt bördig och även det nuvarande kvävenedfallet är måttligt, jämfört med områden längre åt sydväst. Det är troligt att de mer långsiktiga tillväxteffekterna blir små, möjligen med en viss ökning efter behandlingarna, eftersom kvävetillgången ligger mitt emellan svaga och rika marker.

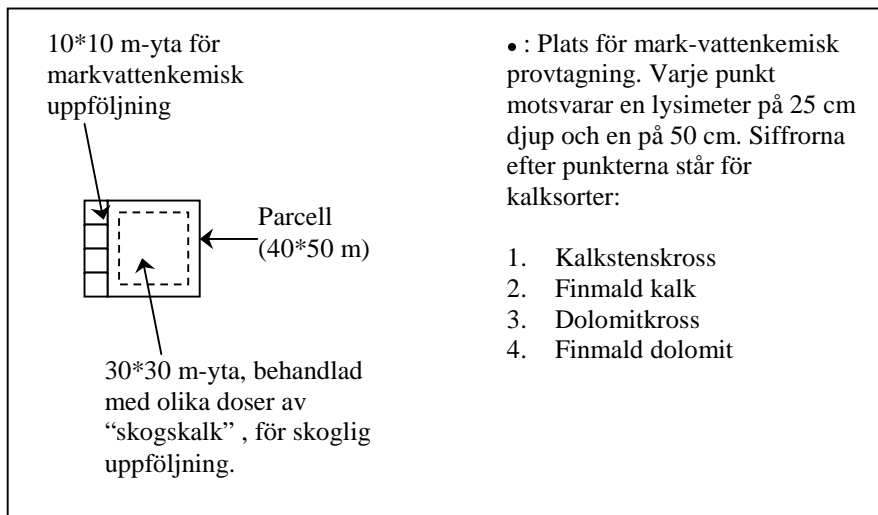
## 5 Referenser

- Akselsson, C., Larsson, P-E, & Westling, O. 1998. Markkemi och markvatten i kalkad skog. Årsrapport 1997. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitalisering av skogsmark. IVL Rapport B 1318.
- Akselsson, C. & Westling, O., 1999. Markvattenkemins rumsliga variation i ett granbestånd i södra Sverige. IVL Rapport B 1319.
- Andersson, F, Hallbäcken, L. & Popovic, B. (1996): Kalkning och trädutväxt. I: Staaf, H., Persson, T., & Bertills, U. (Red.): Skogsmarkskalkning- resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet. Rapport 4559.
- Brække, F., 1994. Diagnostiske grenseverdier for nærings-elementer i gran- och furunåler. NLH, Aktuelt fra Skogforsk, nr 15-94, p 1-11.
- Carlsson, M. (red.) 2000. Sustainable forestry at the landscape level – case study Asa. Arbetsrapport från SUFOR programmet. Lunds Universitet och SLU, Alnarp
- Gustafsson, M., 1999. Marine aerosols in southern Sweden. Geovetarcentrum, Naturgeografiska Institutionen vid Göteborgs Universitet.
- Halldin, R., 1998. Dose-response curves with application to weed control. Institutionen för Matematisk statistik, Lunds Universitet. 1998:E13.
- Hallgren Larsson, E., Knulst, J., Lövlad, G., Malm, G., Sjöberg, K. & Westling, O., 1997. Luftföroreningar i södra Sverige 1985-1995. IVL Rapport B1257.
- Hallgren Larsson, E. & Westling, O., 1994. Luftföroreningar i södra Sverige. Nedfall och effekter oktober 1992 - september 1993. IVL Rapport B1150.
- 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 vitalisering av skogsmark. IVL Rapport B 1343.
- Larsson, P-E. & Westling, O. 1997. Ytvatten i kalkade avrinningsområden. Årsrapport 1996. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitalisering av skogsmark. IVL Rapport B 1279.
- SMHI, 1993. Väder och vatten, januari 1993.
- Staaf, H. & Tyler, G. (red.) 1995. Effects of acid deposition and tropospheric ozone on forest ecosystems in Sweden. Ecological Bulletins 44. Köpenhamn. 369 s.
- Staaf, H., Persson, T. & Bertills (red.) 1996. Skogsmarkskalkning. Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet. Naturvårdsverket. Rapport 4559.
- Sverdrup, H. & Warfvinge, P., 1993. The effect of soil acidification on the growth of trees, grass and herbs as expressed by the (Ca+Mg+K)/Al ratio. Lund University, Department of Chemical Engineering II. Reports in ecology and environmental engineering. Report 2:1993.
- Tukey, J.W., 1953. The problem of multiple comparisons. Unpublished notes, Princeton University.
- Westling, O., Moldan, F., Nilsson, I. & Löfgren, S. 2000. Samordnade åtgärder mot försurning av mark och vatten. Skogsstyrelsen. Rapport 1:2000.

## Bilaga 1. Försöksutformning



### Förklaringar:

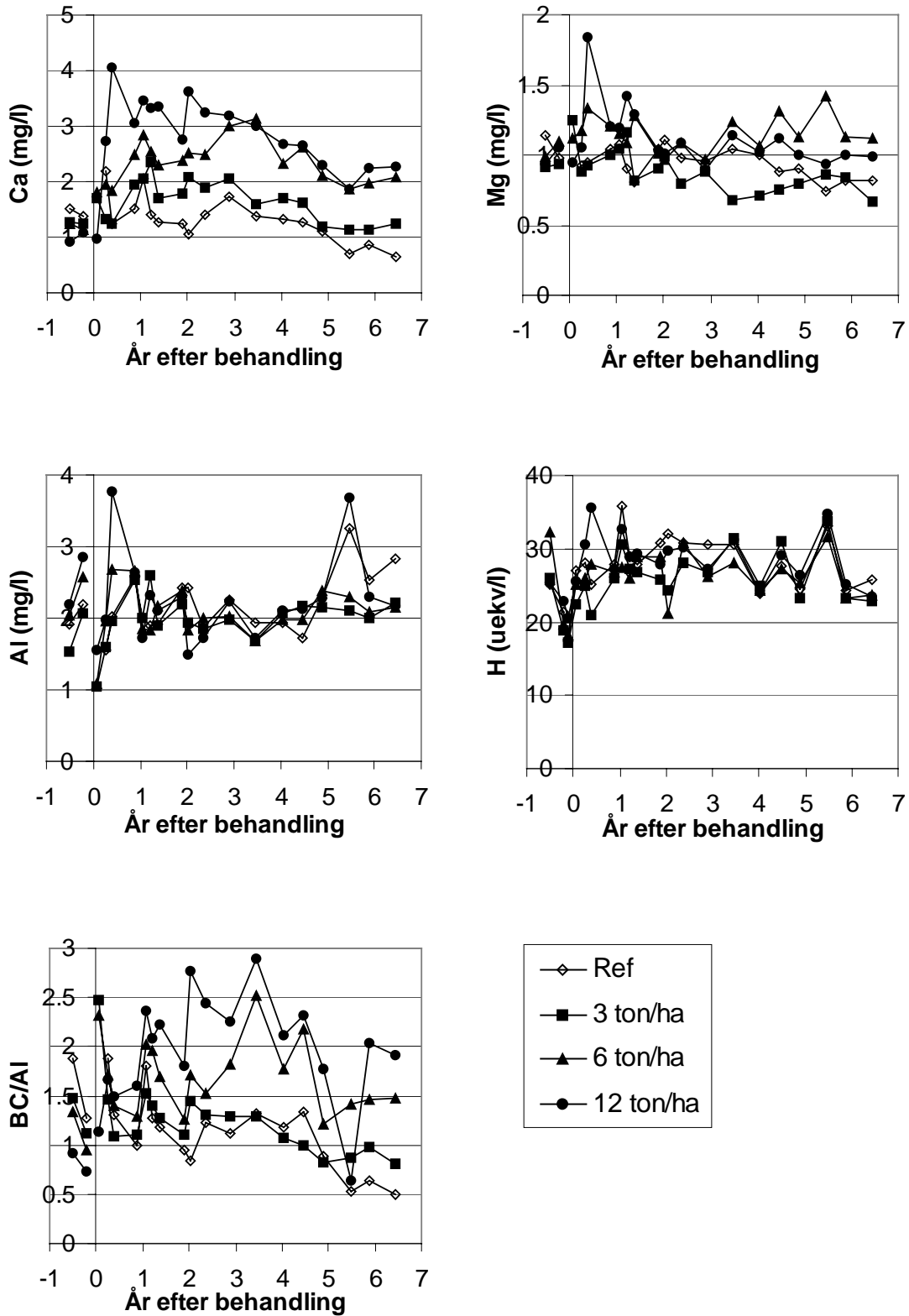


## Bilaga 2. Kalkningseffekter i markvatten

Kalkningseffekter för kalcium, magnesium, aluminium, BC/Al-kvot och vätejoner i markvatten. Effekten är uttryckt som medelförändring (från före behandling till 3-6,5 år efter) på behandlad yta i förhållande till referensyta.

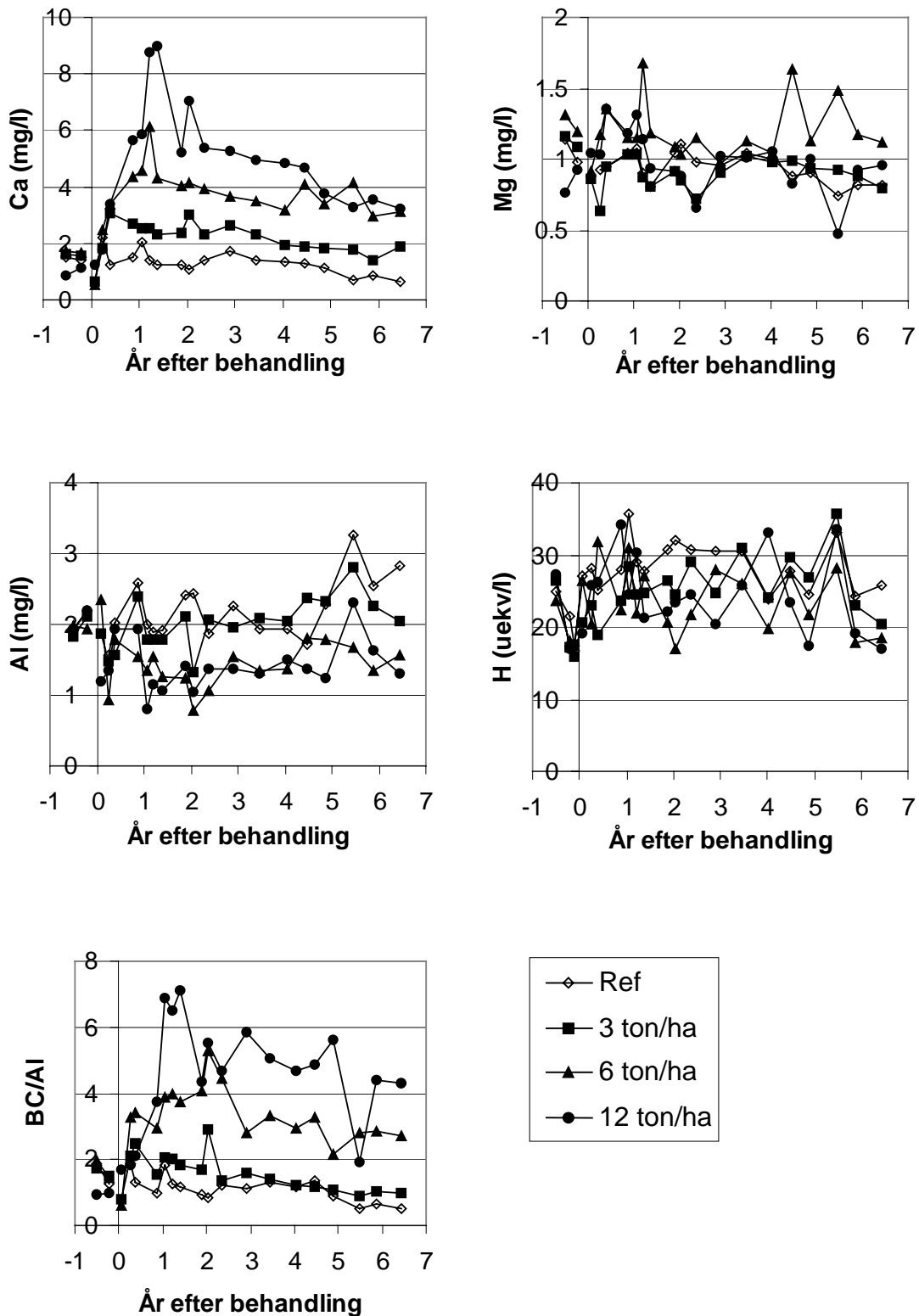
Sort	Dos (ton/ha)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Al-tot (mg/l)	BC/Al	H (uekv/l)
Krossad kalksten	3	0.51	-0.02	0.12	0.16	0.69
Krossad kalksten	6	1.52	0.30	-0.37	1.07	-3.14
Krossad kalksten	12	1.83	0.18	-0.35	1.63	-1.55
Finmald kalksten	3	0.67	-0.04	0.19	-0.01	1.71
Finmald kalksten	6	2.16	0.13	-0.56	1.65	-3.18
Finmald kalksten	12	3.43	0.21	-0.75	4.09	-2.35
Krossad dolomit	3	0.78	0.33	-0.35	1.04	-3.04
Krossad dolomit	6	0.64	0.31	-0.13	0.58	-0.84
Krossad dolomit	12	1.19	0.61	-0.73	1.40	-2.67
Finmald dolomit	3	0.82	0.14	-0.45	0.48	-1.20
Finmald dolomit	6	0.87	0.49	-0.23	0.70	-2.59
Finmald dolomit	12	2.17	0.65	-0.88	1.98	-4.35

## Bilaga 3. Tidsutveckling markvattenkemi

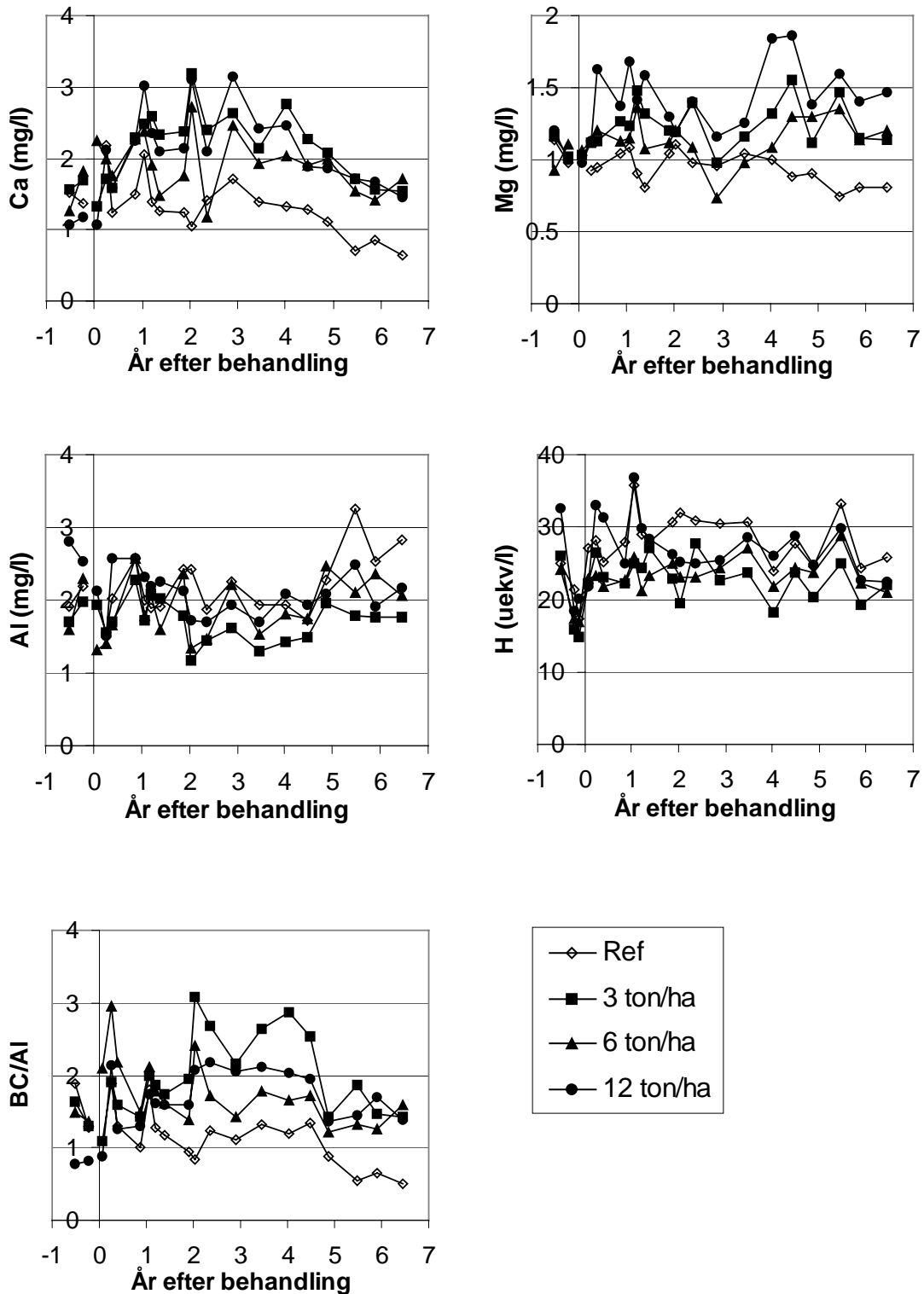


Bilaga 3a. Tidsutveckling i markvattnet vid olika doser av krossad kalksten för kalcium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), vätejoner ( $H^+$ ) och BC/Al-kvot. Medelvärden från de fyra blocken i försöket.

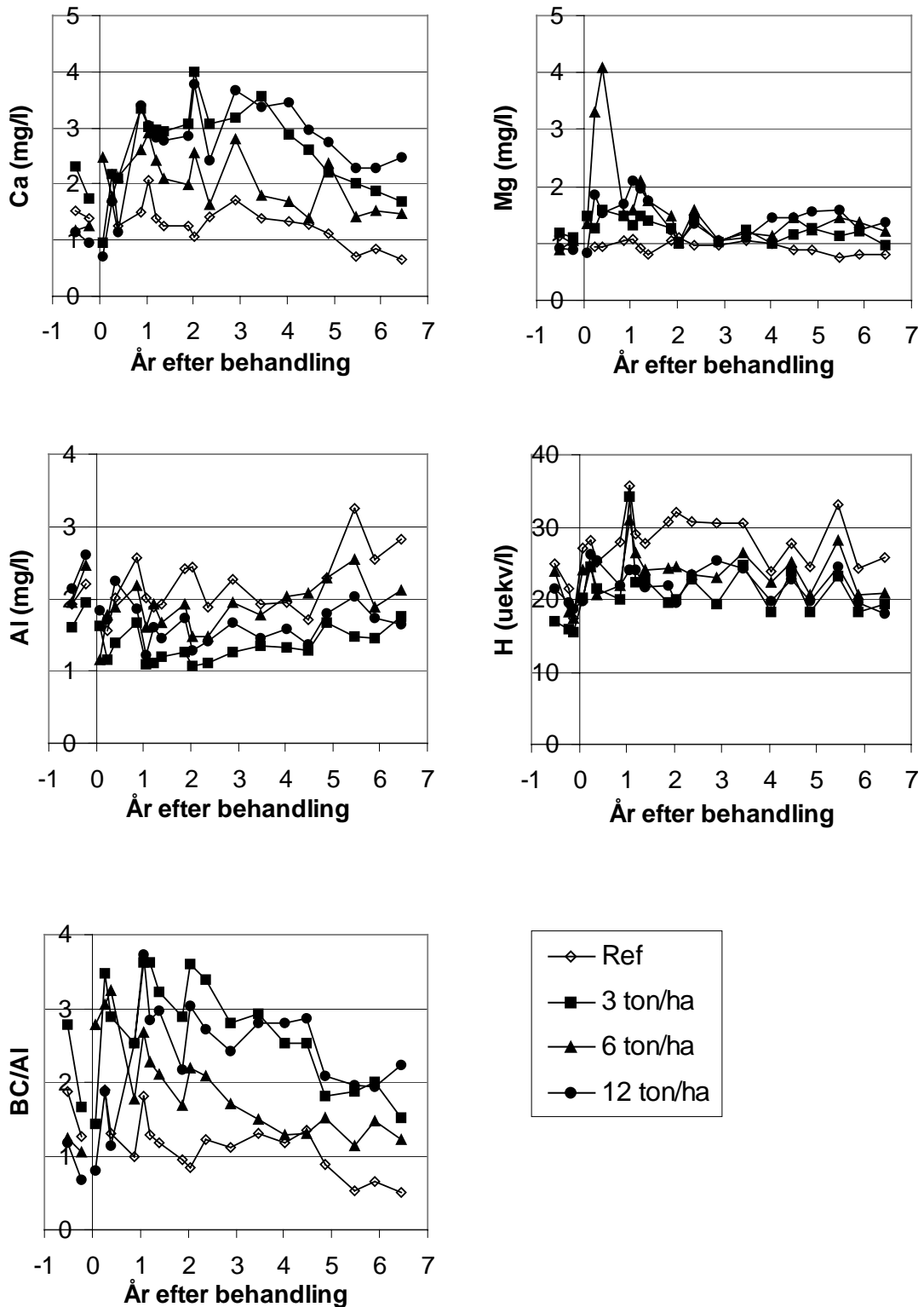




Bilaga 3b. Tidsutveckling i markvattnet vid olika doser av finmald kalksten för kalcium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), vätejoner ( $H^+$ ) och BC/Al-kvot. Medelvärden från de fyra blocken i försöket.



Bilaga 3c. Tidsutveckling i markvattnet vid olika doser av krossad dolomit för kalcium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), vätejoner ( $H^+$ ) och BC/Al-kvot. Medelvärden från de fyra blocken i försöket.



Bilaga 3d. Tidsutveckling i markvattnet vid olika doser av finmald dolomit för kalcium (Ca), magnesium (Mg), aluminium (Al), vätejoner ( $H^+$ ) och BC/Al-kvot. Medelvärden från de fyra blocken i försöket.

## Bilaga 4. Barrkemi efter kalkning

Barrkemisk analys efter kalkning (1996, -97 och -98) angiven som % av torrsubstans. Samtliga värden för B och Cu var under detektionsgränsen\*.

Dos	Block	År	Mg %	P %	S %	Al %	K %	Ca %	Zn %	Fe %	Si %	Mn %	Na %	C %	N %
0	1	96	0.10	0.12	0.053	0.007	0.42	0.29	0.002	0.002	U	0.079	0.006	50.9	1.08
0	2	96	0.13	0.13	0.058	0.009	0.38	0.35	0.002	0.005	U	0.124	0.014	50.5	1.05
0	3	96	0.10	0.12	0.065	0.010	0.38	0.31	0.002	0.004	U	0.090	0.007	51.2	1.16
0	4	96	0.08	0.10	0.063	0.012	0.42	0.38	0.002	0.003	U	0.063	0.008	50.6	1.20
3	1	96	0.10	0.12	0.072	0.009	0.36	0.35	0.002	0.003	U	0.054	0.007	50.6	1.05
3	2	96	0.12	0.12	0.069	0.010	0.31	0.40	0.002	0.004	U	0.053	0.008	50.9	1.07
3	3	96	0.12	0.11	0.068	0.010	0.38	0.44	0.002	0.002	U	0.039	0.009	50.5	1.01
3	4	96	0.10	0.10	0.068	0.009	0.42	0.43	0.003	0.003	0.007	0.032	0.011	50.6	1.00
6	1	96	0.12	0.13	0.077	0.008	0.35	0.49	0.002	0.002	U	0.042	U	50.8	1.14
6	2	96	0.10	0.11	0.067	0.008	0.33	0.49	0.002	0.007	U	0.069	0.010	50.6	1.06
6	3	96	0.11	0.11	0.076	0.009	0.36	0.44	0.002	0.002	U	0.039	0.007	50.7	1.02
6	4	96	0.10	0.11	0.066	0.009	0.37	0.43	0.002	0.008	U	0.043	0.011	50.6	0.99
12	1	96	0.11	0.12	0.064	0.006	0.35	0.44	0.002	0.003	U	0.047	0.006	50.3	1.09
12	2	96	0.12	0.11	0.062	0.008	0.44	0.57	0.003	0.002	0.008	0.041	0.007	50.5	0.99
12	3	96	0.12	0.11	0.065	0.006	0.37	0.69	0.003	0.003	U	0.044	0.007	50.6	1.13
12	4	96	0.12	0.12	0.068	0.009	0.39	0.57	0.003	0.003	U	0.070	0.009	39.8	0.87
0	1	97	0.11	0.12	0.068	0.006	0.39	0.32	0.002	0.003	U	0.080	U	50.5	1.21
0	2	97	0.14	0.13	0.059	0.008	0.32	0.39	0.002	0.003	U	0.132	U	50.6	1.07
0	3	97	0.13	0.12	0.060	0.007	0.40	0.33	0.002	0.005	U	0.096	U	51.0	1.22
0	4	97	0.10	0.10	0.068	0.009	0.41	0.52	0.002	0.003	U	0.080	U	50.7	1.22
3	1	97	0.13	0.13	0.076	0.010	0.36	0.48	0.002	0.003	U	0.060	U	50.9	1.27
3	2	97	0.15	0.13	0.072	0.008	0.27	0.54	0.003	0.003	U	0.050	U	50.7	1.28
3	3	97	0.14	0.13	0.079	0.010	0.37	0.60	0.002	0.003	U	0.043	U	50.8	1.23
3	4	97	0.13	0.12	0.080	0.008	0.41	0.58	0.003	0.003	U	0.033	U	50.7	1.29
6	1	97	0.14	0.13	0.060	0.007	0.42	0.56	0.002	0.004	U	0.044	U	50.3	1.17
6	2	97	0.13	0.13	0.068	0.007	0.30	0.62	0.003	0.003	U	0.063	U	50.4	1.14
6	3	97	0.13	0.12	0.073	0.009	0.35	0.61	0.002	0.003	U	0.037	U	50.4	1.29
6	4	97	0.12	0.12	0.078	0.009	0.33	0.56	0.002	0.003	U	0.045	U	50.8	1.23
12	1	97	0.14	0.13	0.063	0.007	0.38	0.56	0.002	0.003	U	0.045	U	50.5	1.24
12	2	97	0.13	0.13	0.068	0.008	0.39	0.64	0.002	0.003	U	0.039	U	50.0	1.15
12	3	97	0.14	0.11	0.067	0.006	0.37	0.77	0.003	0.004	U	0.037	U	50.3	1.32
12	4	97	0.15	0.12	0.068	0.008	0.38	0.69	0.003	0.004	U	0.065	U	50.4	1.35
0	1	98	0.13	0.12	0.075	0.010	0.47	0.34	0.002	0.004	U	0.099	0.008	50.8	1.21
0	2	98	0.15	0.12	0.065	0.009	0.42	0.44	0.003	0.004	U	0.141	0.016	50.7	1.28
0	3	98	0.14	0.11	0.069	0.011	0.38	0.39	0.002	0.003	U	0.104	0.006	50.8	1.32
0	4	98	0.10	0.11	0.074	0.011	0.51	0.48	0.003	0.003	U	0.077	U	50.7	1.31
3	1	98	0.14	0.13	0.079	0.012	0.40	0.55	0.003	0.006	U	0.067	0.006	50.6	1.29
3	2	98	0.16	0.12	0.069	0.011	0.32	0.58	0.003	0.003	U	0.055	U	50.6	1.06
3	3	98	0.14	0.11	0.069	0.012	0.39	0.61	0.003	0.005	U	0.041	0.008	50.5	1.21
3	4	98	0.12	0.09	0.056	0.008	0.42	0.53	0.003	0.003	U	0.031	0.008	50.7	1.03
6	1	98	0.14	0.13	0.075	0.007	0.38	0.58	0.003	0.002	U	0.039	U	50.3	1.16
6	2	98	0.14	0.12	0.076	0.009	0.37	0.68	0.002	0.009	U	0.071	0.007	50.3	1.20
6	3	98	0.13	0.11	0.078	0.011	0.40	0.60	0.003	0.004	U	0.038	0.006	50.7	1.22
6	4	98	0.12	0.11	0.070	0.008	0.38	0.65	0.003	0.004	U	0.042	0.007	50.5	1.17
12	1	98	0.14	0.11	0.073	0.008	0.32	0.64	0.002	0.005	U	0.044	U	50.4	1.22
12	2	98	0.14	0.11	0.069	0.010	0.40	0.76	0.003	0.004	U	0.039	U	50.5	1.15
12	3	98	0.13	0.10	0.071	0.007	0.46	0.91	0.003	0.003	U	0.039	U	50.0	1.39
12	4	98	0.15	0.11	0.055	0.007	0.35	0.67	0.003	0.004	U	0.057	U	50.0	1.13

\*Detektionsgränser för de ämnen där den underskrids (betecknas med U i tabellen).

Detektionsgränserna är som följer. B: 0,015 mg/g, Cu: 0,01 mg/g, Si: 0,125 mg/g och Na: 0,1 mg/g.

Mätvärden i kursiv stil ligger under den kvalitativa gränsen, vilket innebär större osäkerhet.

## Bilaga 5. Träd tillväxt efter kalkning

Träd tillväxt fem år efter kalkning med olika doser av skogskalk mätt som volym (m<sup>3</sup> sk/ha). Mätningarna utfördes våren 1992 och hösten 1996.

Dos ton/ha	Block	Volym vår 92 m <sup>3</sup> sk/ha	Volym höst 96 m <sup>3</sup> sk/ha	Tillväxt m <sup>3</sup> sk/ha	Tillväxt %
0	1	196	262	66	34
0	2	227	319	92	41
0	3	179	270	91	51
0	4	192	264	73	38
Medelvärde		198	279	81	41
3	1	182	260	78	43
3	2	151	231	80	53
3	3	166	247	81	49
3	4	225	305	79	35
Medelvärde.		181	261	80	44
6	1	160	233	73	45
6	2	183	271	89	49
6	3	189	264	75	40
6	4	252	342	90	36
Medelvärde.		196	278	82	42
12	1	235	329	94	40
12	2	196	283	86	44
12	3	245	342	97	40
12	4	200	284	84	42
Medelvärde.		219	310	90	41

## **Bilaga 6. Skogsstyrelsens program för kalkning och vitalisering**

### **Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark.**

#### **Försurningsproblemet**

Utsläpp av försurande luftföroreningar, svavel och kväve, i hela Europa har orsakat kraftiga förändringar av naturmiljön i Sverige och många andra länder under 1900-talet. I Sverige uppmärksammades problemen först i vattendragen, men grundorsaken till effekterna är i de flesta fall att stora arealer av den näringsfattiga skogsmarken har förlorat en betydande del av den normala buffertförmågan mot syratillförsel. Belastningen i nuläget av svavel och kväve har en tydlig gradient från ett kraftigt förhöjt nedfall i stora delar av södra Sverige, till ett nedfall i norr som i vissa delar inte är påtagligt högre än en naturlig bakgrundsbelastning.

I områden med hög belastning av sura luftföroreningar har skogsmarkens förråd av tillgängliga baskatjoner (kalcium, magnesium och kalium) minskat kraftigt under den senare delen av 1900-talet och ersatts av vätejoner och oorganiskt aluminium. Utarmningen av mineraljordens baskatjonförråd leder till en händelsekedja, där effekter uppträder med olika tidsförlopp. Välkända effekter som redan observerats är låga pH-värden och höga halter av oorganiskt aluminium i grund- och ytvatten, som följer på en långt framskriden markförsurning. Så länge bortförseln av baskatjoner från marken är större än tillförseln i form av nedfall och vittring kommer försurningsutvecklingen att fortsätta.

Nedfallet av kväve har främst haft en gödande effekt på skogen och påverkat sammansättningen av vegetationen. Kväve som inte utnyttjas fullt ut av växter kan bidra till försurningen, samt orsaka läckage av oorganiskt kväve till vattenmiljön.

Studier av det nuvarande miljötillståndet i svensk skogsmark visar att skogsträden i regel har en relativt normal tillväxt och vitalitet, även i områden med hög belastning av försurande luftföroreningar, allvarlig markförsurning samt övergödning av kväve. Detta indikerar att en kraftig påverkan på träden av markförsurning är fördröjd i förhållande till många andra effekter i mark och vatten. Detta skapar ett utrymme för långsiktiga åtgärder utan krav på snabba och kraftiga effekter om skogsmarkens förråd av baskatjoner behöver ökas med markbehandlingen.

#### **Åtgärdsbehovet**

Ett omfattande åtgärdsarbete pågår i Europa för att minska utsläppen av luftföroreningar. Trots stora ansträngningar och i många fall tillgång till miljöanpassad teknik kommer arbetet att ta flera årtionden i anspråk, vilket gör att effekterna i miljön kommer att finnas kvar relativt länge, men de kommer att minska med tiden. I Sverige har försurningens skadeverkningar begränsats främst genom kalkning av vattendrag, som dock är ett uppehållande försvar. I takt med att belastningen av luftföroreningarna minskar är det angeläget att påbörja ett långsiktigt åtgärdsarbete som inom rimlig tid kan ge en återhämtning av försurad mark och vatten, utan behov av återkommande behandlingar. För att nå detta måste skogsmarkens buffertförmåga och tillgång på baskatjoner öka i områden med en hög historisk belastning av sura luftföroreningar.

Arealen skogsmark som försurats snabbt är stor i Sverige och ett återställande av pH-värdet så att det inte understiger 5 i större delen av B-horisonten beräknas kräva behandling av ca 5 milj. ha i landet.

Ett lägre krav på acceptabel surhetsgrad i B-horisonten, som kan minska risken för utlösning av oorganiskt aluminium, är 4,5-4,7. Åtgärdsbehovet kan då bedömas till 0,7-1,8 milj. ha.

### **Syftet med kalkning och vitaliseringsgödning**

Ett vitalt skogsekosystem har en långsiktigt stabil produktionsförmåga samt förutsättningar att hysa normalt förekommande växt- och djurarter. Skogens förmåga att motstå stress och sjukdomar är inte satt ur spel. Dessutom måste omgivningspåverkan vara acceptabel. Det innebär att avrinnande vatten måste ha en kvalitet som skapar förutsättningar för ett normalt liv i sjöar och rinnande vatten. Sannolikt kommer det sistnämnda kravet att vara det kritiska för att avgöra åtgärdsbehovet.

Det är troligt att det under lång tid framåt kommer att ställas stora krav på en stabil och hög produktionsförmåga i skogen. Skogen levererar förnyelsebara råvaror som har stora fördelar i ett miljöanpassat samhälle. För att kunna leva upp till framtida produktionsmål utan oönskade miljöeffekter krävs att markens basmättnadsgrad ökar i områden som har haft en snabb mark- och vattenförsurning under de sista decennierna. Om markens status inte förbättras kommer vattenförsurningen att bestå. På sikt finns risker för näringsobalans samt skadliga effekter av aluminium och låga pH-värden på skogsträd och andra organismer i skogen.

Skogsbrukets egen miljöanpassning måste omfatta en skogsskötsel med långsiktig markvård som syftar till att bevara produktionsförmågan och undvika oönskade effekter på omgivningen, främst vattenmiljön. En långsiktig markvård innebär bland annat att markens förråd av baskatjoner är normalt och utan stora förluster. Utgångsläget för ett skogsbruk som långsiktigt syftar till god markvård är dock dåligt i de mest försurade områdena i landet eftersom marken redan förlorat en stor del av förrådet av baskatjoner.

Syftet med Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödning av skogsmark är att motverka ytterligare försurning och förluster av baskatjoner och andra näringsämnen i de mest luftföroreningsdrabbade områdena i Sverige, samt förbättra markens syra/bas-status. Åtgärderna skall kompensera för de förändringar som försurande luftföroreningar orsakat. Detta skall ge ett bättre utgångsläge för ett framtida skogsbruk som långsiktigt bevarar produktionsförmågan och markens status så att oönskad omgivningspåverkan undviks.

Markbehandlingsprogrammet kan sammanfattas i följande punkter:

- Kalkning och vitaliseringsgödning skall prioriteras i områden där sura luftföroreningar har orsakat stora nettoförluster av baskatjoner, som i sin tur medfört en allvarlig försurning av mark och vatten. Vitaliseringsgödning prioriteras främst i områden med kraftig markförsurning och hög kvävebelastning, samt i områden där näringsobalans kan konstateras. Vitaliseringsmedlen skall förutom baskatjoner innehålla fosfor och mikronäringsämnen.
- Kalkning och vitaliseringsgödning skall bevara, och i många fall öka, markens basmättnadsgrad, trots den fortsatta förväntade belastningen av försurande

- luftföroreningar. Åtgärden skall inte framkalla näringsobalans och skador på träden, eller ge varaktiga produktionssänkningar.
- Efter behandling skall basmättnadsgraden i den övre delen av rostjorden (B-horisonten) efter 10 till 20 år uppgå till 15-25 %. Behandlingarna ska inte orsaka en ökning av pH(H<sub>2</sub>O) i humusskiktet över 5,0 vid något tillfälle. Kalkens och vitaliseringsmedlens upplösning skall ske gradvis över en tioårsperiod och varaktigheten av effekterna ska bestå under 20 till 30 år.
  - Åtgärderna skall minska tillskottet av aciditet (vätejoner och oorganiskt aluminium) till vattenmiljön med 10-40 % under 10 till 20 år. Därefter bör aciditeten minska ytterligare genom ett naturligt återhämningsförlopp, som förutsätter att nedfallet av sura luftföroreningar har minskat till låga nivåer. Yt- och grundvatten skall ej påverkas negativt genom ökat läckage från skogsmarken av nitrat, aluminium eller andra skadliga ämnen.
  - Den naturliga florans och faunas ska såväl kvantitativt som kvalitativt bibehållas i så hög grad som möjligt. Förändringar som motsvarar det förbättrade marktillståndet kan dock accepteras. Vidare kan kortvariga skadeeffekter på till exempel mossor och lavar accepteras om en återhämtning kan ske inom ett par år efter åtgärden.
  - När luftföroreningarna minskat till låga nivåer skall åtgärderna påskynda ett naturligt återhämningsförlopp i skogsmarken, som även förutsätter att skogsbruket anpassar skötselmetoderna till långsiktig näringshushållning och markvård. Om återhämningsförloppet påskyndas kan andra åtgärder, som upprepad vattendragskalkning, trappas ner snabbare och på sikt upphöra.

## Metoder för planering och utförande

Skogsstyrelsens arbete med kalkning och vitaliseringsgödning av skogsmark startade som en försöksverksamhet med syfte att utveckla och pröva metoder för storskalig markbehandling. Arbetet har omfattat utveckling av metoder för kartläggning av åtgärdsbehov, planering av behandlingsområden, samråd, samt prov med olika medel och spridningsutrustningar. Försöksverksamheten har lett fram till ett koncept för kalkning och vitaliseringsgödning av skogsmark.

SKS metod för kalkning av skogsmark bygger i korthet på att tre ton krossad kalk, bestående av både kalksten och dolomitsten, sprids per ha skogsmark. Magnesiumhalten i det blandade kalkningsmedlet är 4 %. Finkornhalten är begränsad till 30 % under 0,25 mm. Att finkornhalten begränsas motiveras av risken för negativa effekter av snabba pH-förändringar. Av den produktiva skogsmarken undantags torvmark, sumpskogsmark, kalavverkad mark, skog nära slutavverkning, samt vissa skogar med speciella naturvärden. Även alla impediment undantags. Spridningssättet är huvudsakligen markspridning med stickvägs- eller beståndsgående maskiner utrustade med centrifugalspridare. Vissa bestånd utan stickvägar samt svårtillgängliga partier kalkas med helikopter. Konceptet är en avvägning, dels mellan kravet på att med 20 till 30 års varaktighet öka skogsmarkens basmättnadsgrad i ytskiktet till en tillfredsställande nivå, dels undvika negativa effekter på känsliga delar av skogsekosystemet som kan utlösas av snabba och kraftiga förändringar av pH-värde och koncentrationer av mineralämnen i skogsmarken.

Metoderna för planering och spridning av vitaliseringsmedel är i stort de samma som för kalkning. Som vitaliseringsmedel används i första hand en blandning av två ton



vedaska (torrvikt) och två ton kalk per ha. Vedaskan är i härdad eller behandlad på annat sätt för att förlänga utlakningstiden och undvika chockeffekter. Vedaskans ursprung är olika värmeverk och industrier som utnyttjar rena skogsbränslen inklusive bark. Vedaskan måste uppfylla krav på näringsinnehåll och låga halter av tungmetaller.

Vid användning av mineralbaserade gödselmedel eftersträvas en sammansättning och egenskaper som liknar blandningen av aska och kalk.

Vitalisering kommer att vara huvudåtgärden i ett område i sydvästra Sverige som omfattar större delen av Halland med angränsande delar av län. I resterande delen av södra och västra Götaland och i västra Svealand kommer kalkning att överväga som åtgärd. Nordöstra delen av Götaland och östra Svealand samt hela Norrland kommer att beröras i mindre omfattning.

### **Kunskapen om effekterna av kalkning och vitaliseringsgödsling**

Omfattande experiment med kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark har utförts i Sverige sen början av 1980-talet. Tidigare kalkningsförsök i Sverige och Finland har studerats för att belysa de långsiktiga effekterna av åtgärderna. Internationellt finns erfarenheter framför allt från Tyskland. De olika studierna finns sammanställda och utvärderade med fokus på behov, möjligheter och risker med kalkning och vitaliseringsgödsling i Sverige.

Det gör att kunskapsunderlaget är relativt bra, men alla effekter av tillämpningen av ett koncept som Skogsstyrelsens program är inte förutsebara. Effekterna av markkalkning påverkas i hög grad av giva och kalksort, i synnerhet kornstorleksfördelningen. I Skogsstyrelsens program har giva och kalkkvalité anpassats så att oönskade effekter skall undvikas. Programmets giva och kalkkvalité har inte specifikt studerats i tidigare forskningsprojekt, och dessutom har inte effekterna av ett storskaligt program undersökts. Det motiverar en effektkontroll med syfte att visa om programmets mål uppfylls, med koncentrerad på specifika önskade och oönskade effekter.

### **Skogsstyrelsens effektkontroll**

Inriktningen är att i skogsområden med olika karaktär, samt med varierande belastning av svavel och kväve, undersöka effekten av kalkningsåtgärder på träd, mark, markvatten och avrinningsvatten. Uppföljningen sker i totalt 24 försöksområden uppdelat på sju län i södra Sverige. Huvuddelen av effektkontrollen utförs av IVL (IVL Svenska Miljöinstitutet AB) i Aneboda. Beståndsbeskrivningar, skogsskadebedömningar, markkemiska undersökningar samt provtagningar utförs av Skogsvårdstyrelserna. Mätningarna av behandlingseffekter är främst inriktade på följande frågeställningar:

- Effekter på pH samt koncentrationer, förråd och arealförluster av baskatjoner.
- Uppträdandet av aluminium i mark och vatten.
- Önskat läckage av kväve och andra näringsämnen från mark till vatten.
- Påverkan på skogsträdens barrutglesning och tillväxt. I försök med vitaliseringsgödsling undersöks även barrkemi.

- Betydelsen av marktyp, samt beståndens trädslag och ålder, för behandlingseffekterna.

Basprogrammet för kalkningsuppföljning utförs i 21 små (10-250 ha) avrinningsområden varav 7 obehandlade kontroller. I utloppet från avrinningsområdena undersöks *vattenkemi* (månatligt) och *flöde* (veckovis). Mätningarna möjliggör beräkningar av arealförluster av olika ämnen i behandlade områden och kontroller. Behandlingarna utfördes under 1990 och 1991. I vissa områden utfördes mätningar även före behandling.

I anslutning till avrinningsområdena finns 49 permanenta provytor (varav 7 obehandlade kontroller), i regel i tre beståndsåldrar (20, 40 och 60 år).

Mätprogrammet omfattar *beståndsbeskrivning* inklusive tillväxt (vart femte år), *skogsskadebevakning* inklusive barrutglesningsstudier (årligen), *markkemi* (före samt ett år efter behandling, därefter vart femte år) och *markvattenundersökningar* med undertryckslysimetrar (fyra gånger per år fram till 1995, därefter två gånger per år). Liksom avrinningsområdena behandlades provytorna under 1990 och 1991.

Basprogrammet för uppföljning av vitaliseringsgödsling utförs i områden med huvudsakligen barrskog i en gradient med ökande kvävebelastning från Kronobergs län (Asa och Lidhult) till Halland (Tågabo och Nyårsåsen). Dessutom utförs en studie av vitaliseringsgödsling i bokskog i ett område i Skåne. Vitaliseringsgödslingen omfattar vedaska, en blandning av vedaska och kalk, samt mineralbaserade gödselmedel. I alla fyra områdena sker undersökningar av *mark* och *barr*, samt i varierande omfattning *skogsskador* och *tillväxt*. Undersökningar av *markvatten* i permanenta provytor sker i Asa och Tågabo. Små avrinningsområden med uppföljning av *vattenkemi* och *flöde* är etablerade i Tågabo (sex områden), Nyårsåsen (två områden) och Söderåsen (två områden).

Resultaten från basprogrammen för uppföljning av kalkning och vitalisering redovisas årligen av IVL i samarbete med Skogsstyrelsen. Primärdata från undersökningarna lagras i databaser på Skogsstyrelsen och IVL i Aneboda. Skogsstyrelsen ansvarar i första hand för data från studier av beståndsvariabler, skogsskador och markkemi. På IVL i Aneboda finns data på kemi i mark- och avrinningsvatten, hydrologi, barrkemi samt data från flertalet specialförsök.

### **Samordning med andra studier**

För att kunna sätta Skogsstyrelsens koncept i relation till högre och lägre doser, behandling av nyligen avverkade marker (som normalt undviks), samt få kompletterande information om effekten på flora och vattenlevande fauna har effektuppföljningen samordnats med flera specialförsök. Dessa studier finansieras helt eller delvis av Skogsstyrelsen. Alla studierna utom uppföljningen av effekter på svamp, mossor och lavar utförs av IVL. Aspekter som belyses i specialförsöken är främst:

- Effekter på mark- och avrinningsvatten av kalkning på hygge och ungskog. Utförs i Hallands- och Älvsborgs län.
- Effekter på markvatten, barrkemi och träd tillväxt av olika kalk- och askdosor. Parcellförsök i granskog i Asa (Kronobergs län) som omfattar 16 försöksled med fyra upprepningar i kalkförsöket (doser 3 till 12 ton per ha, samt olika kalksorter).

- Askförsöket omfattar 8 försöksled med olika doser (1,5 till 6 ton per ha). Behandling utfördes 1991 i kalkförsöket och 1993 i askförsöket.
- Vattenkemiska effekter på små skogssjöar i ett större kalkat skogsområde i Bohuslän (Gårdsjöområdet).
  - Effekter på påväxtalger och bottenfauna i små skogsbäckar med avrinning från behandlad skogsmark. Utförs i Kronobergs- (Asa) och Hallands län (Tågabo) samt Skåne (Östad).
  - Effekter av kalkning på svamp (fruktkroppar), mossor och lavar i vissa områden i Kronobergs, Hallands och Älvsborgs län.
  - Nitrifikation i kalkade och vitaliseringsgödslade marker före och efter avverkning. Utförs i Asa (Kronobergs län) och i Halland.
  - Karakterisering av vedaska. Utprovning av laboratoriemetod som kan indikera syraneutralisering och utlakning av näringsämnen på kort och lång sikt.

Dessutom skall erfarenheterna från effektuppföljningen och specialförsöken ingå i ett syntesarbete som syftar till att generalisera effekterna av olika behandlingar. Med översiktlig kunskap om ett behandlingsområdes skogsbestånd, hydrologi, topografi och markegenskaper skall behandlingseffekterna kunna prognostiseras. Arbetet är viktigt för att kunna förutsäga lokala och regionala effekter vid en storskalig verksamhet, samt hur skogsmarkskalkning och vitaliseringsgödsling kan påskynda ett återhämningsförlopp. Att kunna beskriva de lokala och regionala effekterna av åtgärder i skogsmark är även viktigt för en framtida samordning med vattendragskalkningen.

### **Mer information**

Ytterligare information om Skogsstyrelsens program kan inhämtas från Skogsstyrelsen, 551 83 Jönköping. Uppgifter om effektuppföljningen kan fås från IVL i Aneboda 360 30 Lammhult, Per-Erik Larsson och Olle Westling (tel. båda 0472/262075).

## **Bilaga 7. Litteratur om försurning, kalkning och vitaliseringsgödsling**

Nedanstående förteckning tar främst upp litteratur om effekter på skogsekosystem av försurning, kalkning och vitaliseringsgödsling. Se även referenslistan, kapitel 5.

Biobränsleaska i kretslopp, 1994. Naturvårdsverket och Skogsstyrelsen. Naturvårdsverket informerar. Solna. 12 s.

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.

Ekologiska effekter av skogsbränsleuttag och askåterföring, 1996. Kungliga Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift 135 Nr. 13. Stockholm. 125 s.

Försurning och kalkning av svenska vatten, 1991. Monitor 12, Naturvårdsverket informerar Solna. 144 s.

Hallgren Larsson E., Knulst, J., Lövblad, G., Malm, G., Sjöberg, K & Westling, O. 1997. Luftföroreningar i södra Sverige 1985-1995. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning (IVL) Aneboda, B1257. 142 s. samt bilaga.

Kritiska faktorer för skogsträdens tillväxt och vitalitet, 1995. Kungliga Skogs- och Lantbruksakademiens Tidskrift 134 Nr. 11. Stockholm. 161 s.

Nohrstedt H.-Ö. 1993. Den svenska skogens kvävestatus. SkogForsk redogörelse nr 8. Uppsala. 40 s.

Skogsmarkskalkning, resultat från en fyraårig försöksperiod samt förslag till åtgärdsprogram, 1993. Skogsstyrelsen Rapport 6. Jönköping. 68 s.

Skogsskador i Sverige, nuläge och förslag till åtgärder, 1994. Skogsskadeutredningen, huvudrapport. Skogsstyrelsen Rapport 7. Jönköping. 95 s. samt 7 bilagor.

Staaf, H., Persson, T. & Bertills (red.) 1996. Skogsmarkskalkning. Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet. Rapport 4559: 111-120. ISSN 0282-7298.

Staaf, H. & Tyler, G. (red.) 1995. Effects of acid deposition and tropospheric ozone on forest ecosystems in Sweden. Ecological Bulletins 44. Köpenhamn. 369 s.

## IVL Svenska Miljöinstitutet AB

IVL är ett oberoende och fristående forskningsinstitut som ägs av staten och näringslivet. Vi erbjuder en helhetssyn, objektivitet och tvärvetenskap för sammansatta miljöfrågor och är en trovärdig partner i miljöarbetet.

IVLs mål är att ta fram vetenskapligt baserade beslutsunderlag åt näringsliv och myndigheter i deras arbete för ett bärkraftigt samhälle.

IVLs affärsidé är att genom forskning och uppdrag snabbt förse samhället med ny kunskap i arbetet för en bättre miljö.

### Forsknings- och utvecklingsprojekt publiceras i

IVL Rapport: IVLs publikationsserie (B-serie).

IVL Nyheter: Nyheter om pågående projekt på den nationella och internationella marknaden.

IVL Fakta: Referat av forskningsrapporter och projekt.

IVLs hemsida: [www.ivl.se](http://www.ivl.se)

Forskning och utveckling som publiceras utanför IVLs publikationsserie registreras i IVLs A-serie.

Resultat redovisas även vid seminarier, föreläsningar och konferenser.



#### **IVL Svenska Miljöinstitutet AB**

Box 210 60, SE-100 31 Stockholm  
Hälsingegatan 43, Stockholm  
Tel: +46 8 598 563 00  
Fax: +46 8 598 563 90

#### **IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd**

Box 470 86, SE-402 58 Göteborg  
Dagjämningsgatan 1, Göteborg  
Tel: +46 31 725 62 00  
Fax: +46 31 725 62 90

Aneboda, SE-360 30 Lammhult  
Aneboda, Lammhult  
Tel: +46 472 26 20 75  
Fax: +46 472 26 20 04