

# Markvattenkemiska effekter vid spridning av kalk på skogsmark

Slutrapport från ett 12-årigt dosförsök

Therese Zetterberg, Cecilia Akselsson & Olle Westling

B1652  
Februari 2006

<b>Organisation</b> IVL Svenska Miljöinstitutet AB	<b>Rapportsammanfattning</b>
<b>Adress</b> Box 21060 100 31 Stockholm	<b>Projekttitel</b> Åtgärder mot försurning av skogsmark
<b>Telefonnr</b> +46 (0)31 725 62 00	<b>Anslagsgivare för projektet</b> IVLs samfinansierade forskningsprogram med Skogsstyrelsen som huvudsaklig finansiär
<b>Rapportförfattare</b> Therese Zetterberg, Cecilia Akselsson & Olle Westling	
<b>Rapporttitel och undertitel</b> Markvattenkemiska effekter vid spridning av kalk på skogsmark. Slutrapport från ett 12-årigt dosförsök.	
<b>Sammanfattning</b> <p>Skogsstyrelsen program mot markförsurning och för ett uthålligt brukande av skogsmark bygger i kort-het på att behandla avrinningsområden med kalk och aska där den naturliga återhämtningsförmågan bedöms som otillräcklig eller att halten av surt och aluminiumrikt ytvatten är oacceptabelt hög. Inom försöksverksamheten bedrivs ett omfattande effektuppföljningsprogram. Bland annat ingår en specialstudie med syfte att jämföra olika doser och sorter av kalk med avseende på långsiktiga (9-12 år) effekter på markvattenkemin i mineraljorden. Markvattenstudien omfattar behandling med fyra olika kalksorter: krossad kalksten, finmald kalksten, krossad dolomit och finmald dolomit. Doser på 3, 6 och 12 ton/ha jämfördes med obehandlade referensytor. Experimentet är ett parcellförsök i granskog på moränmark som upprättades 1991 i Asa Försökspark i norra Kronobergs län och som avslutades 2003. Generellt har behandlingen lett till att halterna av Ca och Mg i markvatten på 50 cm djup har ökat medan halterna av H och Al-tot har minskat jämfört med referenserna. Ökningen respektive minskningen skedde oavsett dos och sort, men ökningen var olika stor och inte alltid statistisk signifikant. Dosen 3 ton kalk per hektar ledde endast till små effekter. Behandlingseffekterna på markvatten var likartade på 25 respektive 50cm djup i mineraljorden. Några behandlingseffekter på K, NO<sub>3</sub>-N, Fe, Na, Cl, SO<sub>4</sub>, TOC eller Mn kunde inte konstateras oavsett dos, sort eller kornstorlek. Kalkning i de doser som undersökts i denna studie verkar inte leda till minskad biotillgänglighet av K eller till ökat näringsläckage av NO<sub>3</sub>-N. Alla behandlingarna ökade kvoten BC/Al-tot i markvatten på både kort och lång sikt, vilket minskar risken för skadliga effekter i rotzonen. Högre doser av kalk än 3 ton per ha resulterade i regel i en både snabb och relativt stor ökning av kvoten.</p>	
<b>Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren</b> Kalk, dolomit, pH, aluminium, kalcium, magnesium, kalium, försurning, markvatten, dosförsök, granskog, södra Sverige	
<b>Bibliografiska uppgifter</b> IVL Rapport B1652	
<b>Rapporten beställs via</b> Hemsida: <a href="http://www.ivl.se">www.ivl.se</a> , e-post: <a href="mailto:publicationservice@ivl.se">publicationservice@ivl.se</a> , fax 08-598 563 90, eller via IVL, Box 21060, 100 31 Stockholm	

Rapporten godkänd:  
2006-02-21



Peringe Grennfelt  
Forskningschef

## Sammanfattning

Skogsstyrelsens program mot markförsurning och för ett uthålligt brukande av skogsmark bygger i korthet på att behandla avrinningsområden med kalk och aska där den naturliga återhämtningsförmågan bedöms som otillräcklig eller att halten av surt och aluminiumrikt ytvatten är oacceptabelt hög. Inom försöksverksamheten bedrivs ett omfattande effektuppföljningsprogram. Bland annat ingår en specialstudie med syfte att jämföra olika doser och sorter av kalk med avseende på långsiktiga (9-12 år efter kalkning) effekter på markvattenkemin. Markvattenstudien omfattar behandling med fyra olika kalksorter: krossad kalksten, finmald kalksten, krossad dolomit och finmald dolomit. Dosererna 3, 6 och 12 ton/ha jämfördes med obehandlade referensytor. Experimentet är ett parcellförsök i granskog på moränmark som upprättades 1991 i Asa Försökspark i norra Kronobergs län och som avslutades 2003. Huvudsyftet med denna undersökning var att studera hur olika kalkstenssorter, doser och kornstorlekar av kalk på skogsmark påverkade markvattnets kemi på både kort och lång sikt.

En av de tydligaste behandlingseffekterna var signifikant förhöjda koncentrationer av **kalcium** i markvattnet, oavsett dos och sort. Omedelbart efter kalkning ökade halterna kraftigt men efter 1-2 år stabiliserades de på en lägre men fortfarande förhöjd nivå jämfört med referenserna. Efter 12 år håller behandlingseffekten fortfarande i sig men effekten håller på att klinga av, speciellt i de ytor som behandlades med högre doser. När kalksten (både krossad och finmald) används ökar dessutom halterna med ökad dos vilket inte är fallet med dolomit. Koncentrationen av **magnesium** ökade också i markvattnet oavsett sort och dos men ökningen var störst i de ytor som behandlades med dolomitmalk. Statistiskt fanns det endast ett samband mellan dos men inte sort. Anledningen till att kalksten leder till ökade halter trots att magnesium saknas, beror sannolikt på utbytesreaktioner i marken. Precis som för kalcium fanns det en tydlig doseffekt när marken behandlades med kalksten men inte med dolomitmalk. Det fanns även indikationer på att låga doser kan leda till en minskning av magnesiumhalten. Detta gäller framför allt 3 ton finmald kalksten/ha. Några effekter på **kalium** kunde inte konstateras oavsett sort, dos och kornstorlek.

I detta försök har endast totalhalterna av **aluminium** analyserats. I samtliga fall utom ett (3 ton krossad kalksten) har aluminiumhalterna minskat långsiktigt oavsett dos, sort och kornstorlek. Dosererna 6 resp. 12 ton/ha gav upphov till de kraftigaste minskningarna och för dolomitmalk var den dosberoende. Någon skillnad mellan de olika sorterna kunde inte urskiljas varför dosen, snarare än sorten, är mer betydelsefull för resultatet. Detta bekräftades även i den statistiska utvärderingen där ett signifikant samband kunde påvisas för dos men inte för sort. När kalciumjoner tillförs marken deltar dessa i utbytesreaktioner vilket bland annat kan innebära att vätejoner frigörs och hamnar i markvätskan. I samtliga provtytor har **vätejonkoncentrationen** minskat, oavsett dos, sort och kornstorlek. Generellt minskade halterna med ökad dos, men någon tydlig doseffekt noterades inte vare sig för kalksten eller dolomitmalk. Vilken typ av kalkmedel som har använts verkar inte spela någon roll, utom vid dosen 3 ton/ha. Vid låga doser ger krossad och finmald dolomit upphov till en större minskning än kalksten. Några statistiskt säkerställda samband kunde inte påvisas. Som ett resultat av ökade Ca-halter och minskade Al-tot halter har även **BC/Al-kvoten** ökat i samtliga fall utom två (3 ton krossad och finmald kalksten) där behandlingseffekten är försumbar. Ökningen är dosberoende när kalksten används men inte för dolomit. Statistiskt fanns det ett säkerställt samband både mellan dos och sort. Ökade kvoter av BC/Al i markvatten på både kort och lång sikt, minskar risken för skadliga effekter i rotzonen.

Det finns inga belägg för att de olika behandlingarna har orsakat ökade **halter av nitratkväve**, oavsett dos, sort och kornstorlek. Detta trots att försöksområdet är beläget i ett område med högt kvävenedfall (historiskt och nuvarande). Inte heller har några behandlingseffekter kunnat påvisas för vare sig **järn, natrium, klorid, sulfat, TOC eller mangan**.

## Innehåll

1	Introduktion .....	3
2	Bakgrund.....	4
3	Syfte.....	4
4	Områdesbeskrivning.....	4
5	Försöksutformning .....	5
6	Metodik för provtagning och analys .....	7
7	Utvärderingsmetodik .....	7
8	Statistisk utvärdering.....	8
9	Resultat och diskussion .....	8
9.1	Statistiskt utvärdering.....	9
9.1.1	Kalcium .....	9
9.1.2	Magnesium.....	18
9.1.3	Kalium .....	21
9.1.4	Totalaluminium.....	22
9.1.5	BC/Al-kvot.....	24
9.1.6	Vätejonhalt.....	26
9.1.7	Kväve.....	28
9.1.8	Järn.....	28
9.1.9	Natrium och klorid.....	29
9.1.10	Sulfatsvavel.....	29
9.1.11	Totalt organiskt kol.....	30
9.1.12	Mangan .....	31
10	Sammanfattande diskussion.....	32
10.1	Allmänt .....	32
10.2	Betydelse av markdjup.....	33
10.3	Betydelse av kalkdos .....	33
10.4	Betydelse av kalksort.....	33
10.5	Betydelse för rekommendationer .....	33
11	Referenser.....	34
	Bilaga 1 Deposition .....	36
	Bilaga 2 Tidsutveckling markvattenkemi .....	37
	Bilaga 3 Kort- och långsiktiga behandlingseffekter .....	41
	Bilaga 4 Jämförelse mellan 25 och 50 cm djup.....	42

# 1 Introduktion

Skogsstyrelsen har sedan 1989 genomfört en försöksverksamhet med behandling av försurad skogsmark i södra Sverige. Huvuddelen av Skogsstyrelsens effektuppföljningsprogram utförs av IVL Svenska Miljöinstitutet AB. Beståndsbeskrivningar, skogsskadebedömningar, markkemiska undersökningar samt provtagningar utförs av Skogsvårdsstyrelsen inom respektive berörd region. Större delen av basprogrammet för effektuppföljning, samt de specialförsök som är samordnade med basprogrammet, utförs inom IVLs samfinansierade forskningsprogram med Skogsstyrelsen som huvudsaklig finansiär.

Resultaten från de olika försöken har hittills behandlat kalkningseffekter på ytvatten (Larsson & Westling, 1997 och Zetterberg & Westling, 2005), effekter i marken baserat på markkemiska och markvattenkemiska mätningar (Akselsson m.fl., 1998), biologiska effekter på bottenfauna, påväxtalger, barrkemi och trädens vitalitet (Larsson m.fl., 1999), olika kalksorter och dosers inverkan på markvatten, barrkemi och trädutväxt (Akselsson m.fl., 2000), långsiktiga effekter av skogsmarks-kalkning på mark- och markvattenkemi (Larsson m.fl. 2003), markkemi i kalkad skog, 10 år efter kalkning (Uggla m. fl 2003) och slutligen, en integrerad strategi för kalk- och askspridning i avrinningsområden (Larsson m.fl. 2003).

Denna rapport utgör en slutredovisning från en specialstudie där olika kalksorter och kalkdosers inverkan på markvatten presenteras, 12 år efter behandling. I ett systerförsök har motsvarande undersökning skett med avseende på olika asksorter och doser (Zetterberg m. fl 2006). Den önskade behandlingseffekten är en varaktig förbättring av markvattenkemin. Vissa typer av behandlingar kan leda till oönskade konsekvenser framförallt i det inledande skedet vilket kan orsaka skador eftersom markvattenkemin ändras kraftigt på kort tid. Samtidigt kan en snabb effekt i vissa fall vara önskvärd (se avsnitt 2). Kalkmedlets dos och sammansättning kan påverka effekternas omfattning, både på kort och lång sikt. För en mer omfattande beskrivning av försöksdesign och metoder, samt resultat från de kortsiktiga effekterna (0-7 år), hänvisas till Akselsson m.fl., 2000. Samtliga ovan nämnda rapporter går att ladda ner på [www.ivl.se](http://www.ivl.se). Dosförsöket har utförts i samarbete med SLU, Asa försökspark, som utfört skogliga undersökningar (Akselsson m. fl., 2000). Försöket är planerat och utlagt av Göran Örlander, Per Pettersson och Erland Möller.

## 2 Bakgrund

Skogsstyrelsen försöksprogram mot markförsurning och för ett uthålligt brukande av skogsmark bygger i korthet på att behandla avrinningsområden där den naturliga återhämtningsförmågan bedöms som otillräcklig eller att halten av surt och aluminiumrikt ytvatten är oacceptabelt hög. Den ursprungliga behandlingen omfattade en dos på 3 ton kalk per hektar men för att marken dessutom ska få ett allsidigt tillskott av näringsämnen prövas numera en kombination av kalk och aska i dosen 2 + 2 ton per hektar. Detta motsvarar en kalkverkan på 3 ton kalk/ha. Målsättningen är att kalken och askan skall förbättra det markkemiska och markvattenkemiska tillståndet i skogsmarkens rotzon och även bidra till att höja kvalitén på yt- och grundvattnet. Behandlingen skall ha en verkningstid på 10-20 år eller mer. Metoden skall inte ge upphov till negativa effekter på skogs- och vattnekosystemet.

När dosförsöket som redovisas i denna rapport initierades 1990 fanns farhågor för att utbredda skador på finrötter i områden med sur skogsmark och hög deposition av försurande luftföroreningar (starksyra) kunde vara nära förestående. Risken för skador förknippades med höga halter av fritt aluminium i synnerhet i kombination med låga halter av baskatjoner i marklösningen. Kunskap om att låga doser kalk (1-3 ton per ha) kortsiktigt hade en begränsad effekt på mark och vatten fanns redan före försöket (Westling & Hultberg, 1991). Ett starkt motiv för ett dosförsök vara att pröva om väsentligt högre doser och finmalda kalksorter kunde ge snabba effekter i hela rotzonen med avseende på markvattnets surhetsgrad och halter av aluminium. I början av 1990-talet minskade depositionen av försurande svavel snabbt i södra Sverige (Uggla, m. fl., 2004) som följd av utsläppsbegränsande åtgärder i hela Europa. Det gjorde att risken för rotskador i sur skogsmark minskade högst väsentligt. Det nuvarande behovet av att minska försurningsgraden i skogsmark är främst knuten till områden med begränsad återhämtning, där skogsmarkens ytliga skikt i hög grad påverkar försurningstillståndet i sjöar och rinnande vatten.

## 3 Syfte

Syftet med denna slutrapportering är att beskriva:

- Om kalkning av skogsmark kan motverka försurning av markvatten i mineraljorden i och under rotzonen.
- Betydelsen av olika kalkstenssorter, doser och kornstorlekar av kalk för den neutraliserande förmågan på kort och lång sikt.
- Om kalkning av skogsmark kan ge upphov till oönskade sidoeffekter i markvatten, som ökade halter av oorganiskt kväve.

## 4 Områdesbeskrivning

Försöksområdets storlek är cirka 3,4 ha stort och beläget i Asa försökspark i norra Kronobergs län. I området planterades gran för ca 50 år sedan som fälldes helt och hållet i samband med stormen Gudrun den 8 januari 2005. Beståndet hade ståndortsindex G32 och låg på relativt bördig mark. Marken utgörs av en frisk sandig-moig morän med en jordmån som övergår till podsol. Större delen av beståndet utgjordes tidigare av hagmark med gles ekskog, men i öster fanns ett mindre område med andra generationens granskog. Huvuddelen av beståndet planterades troligen 1962 och det mindre området 1966-67. Området var normalt gallrat och gav ett homogent intryck med avseende på träd- och markförhållanden. En studie av de markvattenkemiska förhållandena före behandling

visade på högst kalciumhalt och pH samt lägst aluminiumhalt i det sydöstra hörnet (Akselsson och Westling, 1999). Detta kan ha att göra med skillnaderna i historik, exempelvis att de västra delarna varit hårdare betade.

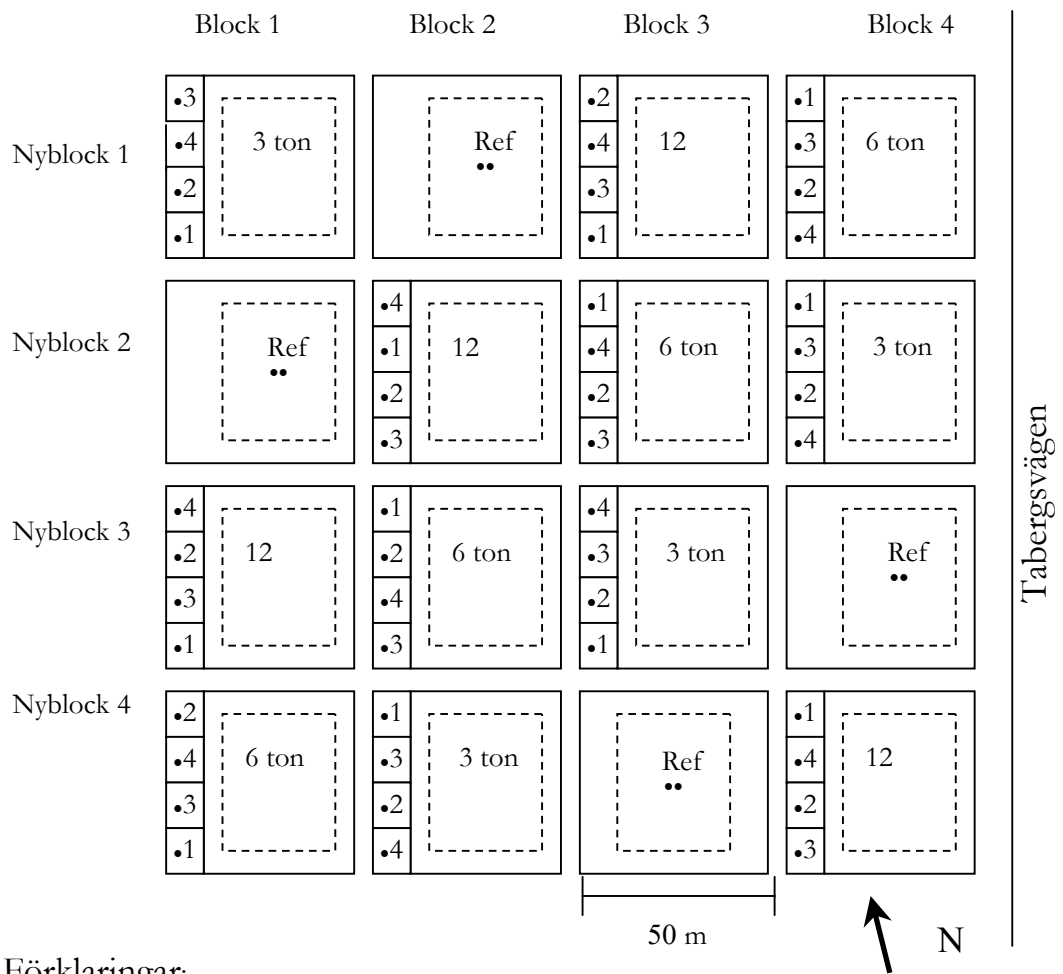
## 5 Försöksutformning

Försöket är upplagt som ett parcellförsök med tre olika kalkgivor, 3, 6 och 12 ton/ha, samt en obehandlad referens. Det finns fyra upprepningar (block) vilket innebär att det finns totalt 16 parceller (provytor). Försöket hade formen av en "romersk kvadrat", vilket innebär att varje behandling förekommer i alla rader, både lodräta och vågräta, se figur 1. Kalkspridningen skedde för hand under maj-juni 1992. Under denna period föll praktiskt taget inget regn.

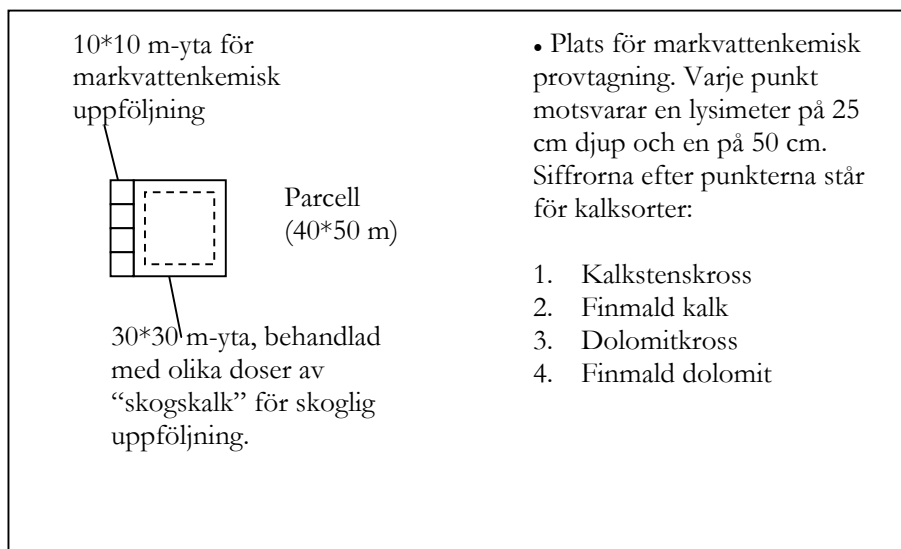
Var och en av de 16 parcellerna är uppdelad i fem ytor, en stor yta (30\*30 m<sup>2</sup>) för uppföljning av skogens näringstillstånd och produktion (barrkemi och träd tillväxt) samt fyra mindre ytor (10\*10 m<sup>2</sup>) för markvattenkemisk uppföljning på två markdjup, 25 och 50 cm. Ytan för uppföljning av produktion och hälsa har behandlats med så kallad "skogskalk" (2/3 krossad kalksten och 1/3 krossad dolomit). För de markvattenkemiska studierna har istället fyra olika kalksorter använts. Sorterna är:

- 1) krossad kalksten, 0-3 mm (CaCO<sub>3</sub>)
- 2) finmald kalksten (CaCO<sub>3</sub>)
- 3) krossad dolomit, 0-2 mm (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>)
- 4) finmald dolomit (CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>).

Utöver de 48 provytorna (3 doser\*4 block\*4 sorter) tillkommer fyra okalkade referensytor i den markvattenkemiska studien, en i varje block. I figur 1 visas lysimetrarnas placering som punkter. Varje punkt motsvarar två lysimetrar, en på 50 cm och en på 25 cm djup. Provdjupen motsvarar nedre delen av rotzonen och markskiktet omedelbart under rotzonen. Vegetationens rötter återfinns i den övre delen av rotzonen. I skogsmark finns merparten av rötterna i de översta decimeterna. Markvattenkemin under rotzonen kan därför användas som ett mått på utlakningen.



Förklaringar:



**Figur 1.** Principskiss över försöksutformningen. Observera att det förekommer en öst-västlig gradient varför statistiska jämförelser har skett utifrån en nord-sydlig riktning (nyblock 1-4).



## 6 Metodik för provtagning och analys

Markvattenprovtagning under perioden 1991 till 2003 skedde med hjälp av keramiska undertrycks-lysimetrar (P80) på två djup, 25 och 50 cm. Alla parceller var utrustad med en lysimeter per djup medan de obehandlade referenserna hade två lysimetrar per djup. Anledningen till detta är att försäkra sig om i alla fall ett markvattenprov under de torrare delarna av året. I början av försöket skedde provtagning 3 till 4 gånger per år, men efter tre år reducerades antalet mättillfällen till två gånger per år (vår respektive höst). Efter år 2000 reducerades antalet mättillfällen ytterligare till endast en gång per år (höst), eftersom de säsongsvisa provtagningarna hade en relativt måttlig variation i respektive provyta

Analyser har skett med avseende på pH, alkalinitet, sulfatsvavel ( $\text{SO}_4\text{-S}$ ), nitratkväve ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), klorid (Cl), ammoniumkväve ( $\text{NH}_4\text{-N}$ ), kalcium (Ca), magnesium (Mg), natrium (Na), kalium (K), järn (Fe), mangan (Mn), totalaluminium (Al) och totalt organiskt kol (TOC). Samtliga analyser utfördes med ackrediterade metoder. BC/Al-kvoten har beräknats som kvoten mellan mol baskationer (Mg, Ca och K) och mol aluminium. Totalaluminium har använts i stället för det mer riktiga oorganiskt aluminium (som inte analyserats), vilket medför en osäkerhet i tolkningen av resultaten. Det är dock sannolikt att oorganiskt Al dominerar totalhalten, baserat på resultat från undersökningar av markvatten (50 cm) inom Krondroppsnetet i en närbelägen granyta i samma bestånd som dosförsöket. Medianvärdet av andelen oorganiskt Al var 87 % under perioden 1998 till 2004 (Liljergren, 2005).

Deposition till skogen i försöket har uppmätts i form av krondropp med 10 insamlare i en av referensytorna i den västra delen av försöket. Svavel och havssalt i krondroppet är ett mått på den totala depositionen (vått och torrt), medan andra ämnen är mer eller mindre påverkade av träd-kronans upptag och utlakning av olika ämnen (Hallgren m. fl., 1997) Metodiken följer manualen som är utarbetad inom det europeiska programmet för depositions-mätningar inom ICP-Forest Level II. Insamlarna i form av trattar (diameter 15,5 cm) sommartid och hinkar (diameter 20,3 cm) vintertid tömdes en gång per månad och krondroppet analyserades på samma sätt som markvatten (Fe, Al, samt TOC analyserades ej i krondropp). Före september 1993 utfördes mätningarna utanför försöket i ett närbeläget granbestånd. Utöver krondropp mättes även nederbördens kemi på ett närbeläget öppet fält under perioden 1992 till 2000. Årsdepositioner under perioden 1992 till 2000 uppmätt som krondropp och i form av nederbörd på öppet fält framgår av bilaga 1.

## 7 Utvärderingsmetodik

Huvuddelen av de resultat som presenteras i denna rapport behandlar Ca, Mg, K, Al-tot, H och BC/Al på 50 cm djup. Dessa parametrar är av stort intresse vid effektuppföljning av kalkning eftersom de har en stor inverkan på det markvattenkemiska tillståndet (och därmed floran och faunan). Ett flertal av parametrarna har uppträtt i så låga koncentrationer (exempelvis K,  $\text{NO}_3\text{-N}$  och  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) att de inte har alltid varit mätbara (under detektionsgränsen). Vidare har anjonerna ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{SO}_4\text{-S}$ , Cl och TOC) inte analyserats vid varje mättillfälle på grund av ekonomiska skäl. Detta innebär att utvärderingsmöjligheterna för dessa ämnen är begränsade.

Majoriteten av redovisningarna bygger på blockmedelvärden för respektive sort och dos, antingen per period eller per mättillfälle. För att kunna särskilja den förändring som har uppstått på grund av behandlingen och inte på grund av naturliga orsaker har medelvärdesförändringen beräknats i vissa fall, det vill säga, medelvärdeskillnaden mellan referensytan och behandlingsytan *före* kalkning och referensytan och behandlingsytan *efter* kalkning. Skillnaden däremellan ger ett mått på behandlings-

effekten. Utvärdering av parametrar som låg nära eller under detektionsgränsen har skett genom att jämföra andelen värden över detektionsgränsen mellan olika behandlingar.

Före behandling genomfördes tre provtagningsomgångar som ingår i denna resultatredovisning. Perioden 0 till 3 år efter behandling omfattas av elva provtagningar, 3 till 6 år av sex provtagningar, 6 till 9 år av fyra provtagningar och slutligen 9 till 12 år av tre provtagningar. Observera att i de tre perioderna ingår både vår och höstvärden medan endast höstvärden ingår i den sista tidsperioden. Detta kan ha betydelse för tolkningen av data.

## 8 Statistisk utvärdering

Utformning i detta försök, som kallas "split plot", är praktisk att använda vid denna typ av experimentupplägg, men eftersom de olika behandlingarna inte är slumpmässigt spridda krävs 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 deltagande behandling i en deltagande, sort i detta försöket. Förutsättningarna att hitta signifikanta skillnader är större för behandlingar i deltagande än för överordnade behandlingar, vilket i praktiken innebär att signifikansnivåerna för doser och sorter inte är direkt jämförbara. Försöksutformningen innebär därför att förutsättningarna att hitta signifikanta skillnader mellan olika doser är mindre än för sorter.

I den statistiska analysen har medelvärdesförändringen mellan den första (-1 till 0 år) och den sista treårsperioden efter behandling (9-12 år) använts som mått på den långsiktiga effekten. Eftersom det är behandlingseffekter som är av intresse, och inte förändringar som orsakats av naturliga skäl, har medelvärdesförändringen i behandlade ytor subtraherats med medelvärdesförändringen i referensytan i motsvarande block och för motsvarande period. Den statistiska utvärderingen har skett med hjälp av en variansanalys i programmet SAS för att undersöka om dosen och/eller sorten har haft en signifikant effekt på markvattenkemin (Ca, Mg, Al-tot, H och BC/Al). På grund av den markvattenkemiska gradienten har nordsydliga block ("nyblock") använts för den statistiska analysen.

## 9 Resultat och diskussion

I nedanstående avsnitt redovisas huvudsakligen behandlingseffekten på koncentrationen av kalcium, magnesium, kalium, aluminium, väte och BC/Al-kvoten i markvattnet på 50 cm djup, med undantag för kalcium där halter på både 25 och 50 visas i figur 3. Effekter på övriga parametrar beskrivs endast kortfattat. Tidsseriediagram för Ca, Mg, Al-tot, H och BC/Al för samtliga doser och sorter dessutom redovisade i bilaga 2. En sammanfattning av de kort- och långsiktiga effekterna för samtliga ämnen redovisas i bilaga 3 uttryckt som medelvärdesförändring, se avsnitt 7. Förhållandet i markvattenkemi mellan djupet 25 cm respektive 50 cm för de olika försöksleden presenteras i bilaga 4 för försökets andra (0-3 år) och sista (9-12 år) period.

## 9.1 Statistiskt utvärdering

I tabell 1 och 2 redovisas resultatet av den statistiska analysen. Tabellerna visar att både dos och sort har signifikant påverkat markvattenhalterna på lång sikt (9-12 år) för Ca, Mg (endast dos) och Al-tot (endast dos) samt BC/Al-kvoten. Långsiktigt uppvisar endast Ca och BC/Al-kvoten signifikanta behandlingseffekter både med avseende på dos och sort. Till skillnad från den tidigare utvärderingen (Åkselsson m. fl. 2000) har totalhalterna av Al minskat signifikant med avseende på dos. Några statistiska skillnader kunde inte påvisas med avseende på vätejonhalten.

**Tabell 1.** Signifikansnivåer för olika markvattenkemiska parametrar med avseende på sort. Antalet stjärnor anger signifikansnivån.

Tidsperiod	Ca	Mg	Al-tot	H	BC/Al
9-12 år	0.0101*	0.6460	0.4096	0.5892	0.0309*

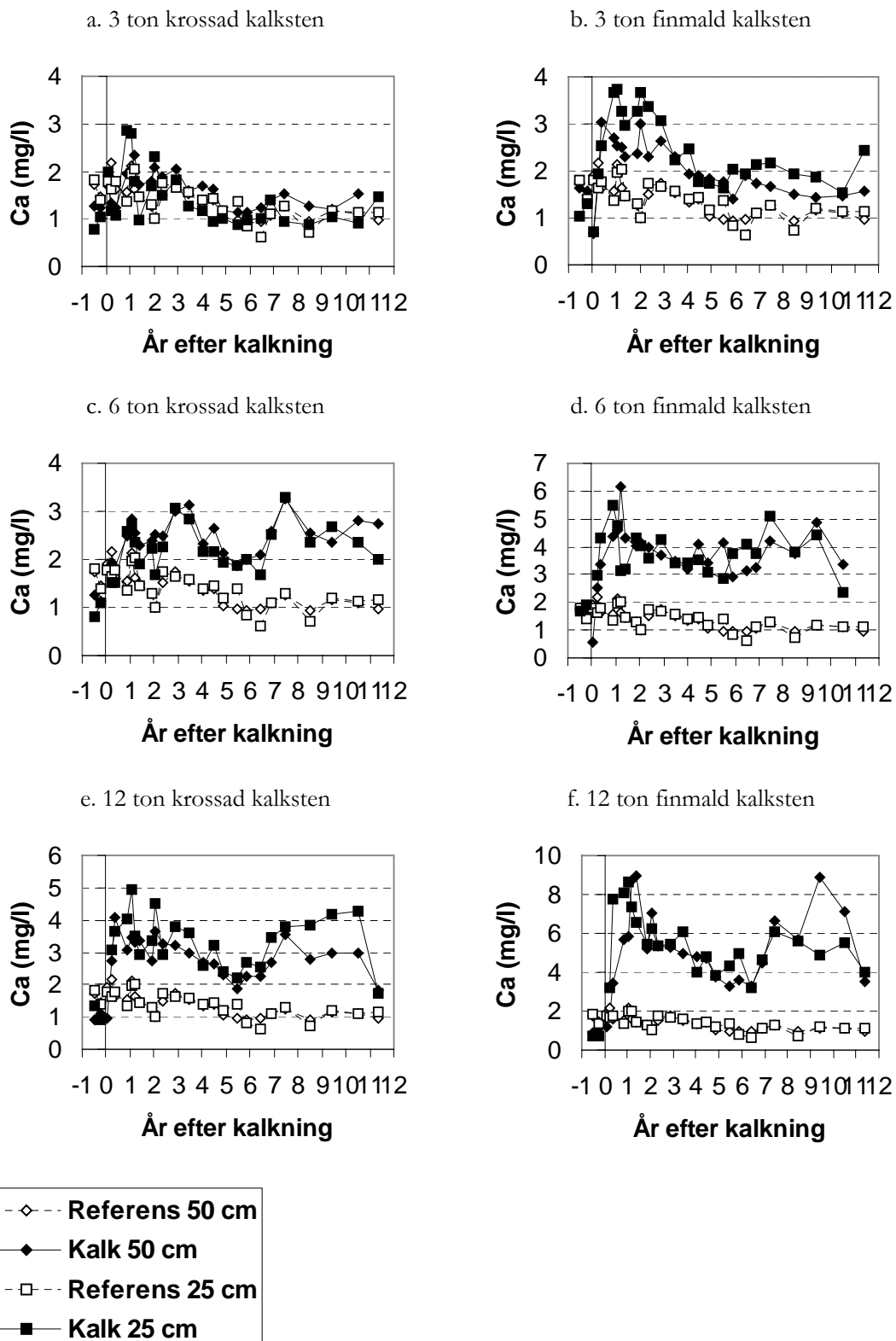
**Tabell 2.** Signifikansnivåer för olika markvattenkemiska parametrar med avseende på dos. Antalet stjärnor anger signifikansnivån.

Tidsperiod	Ca	Mg	Al-tot	H	BC/Al
9-12 år	0.0002***	0.0266*	0.0398*	0.4641	0.0360*

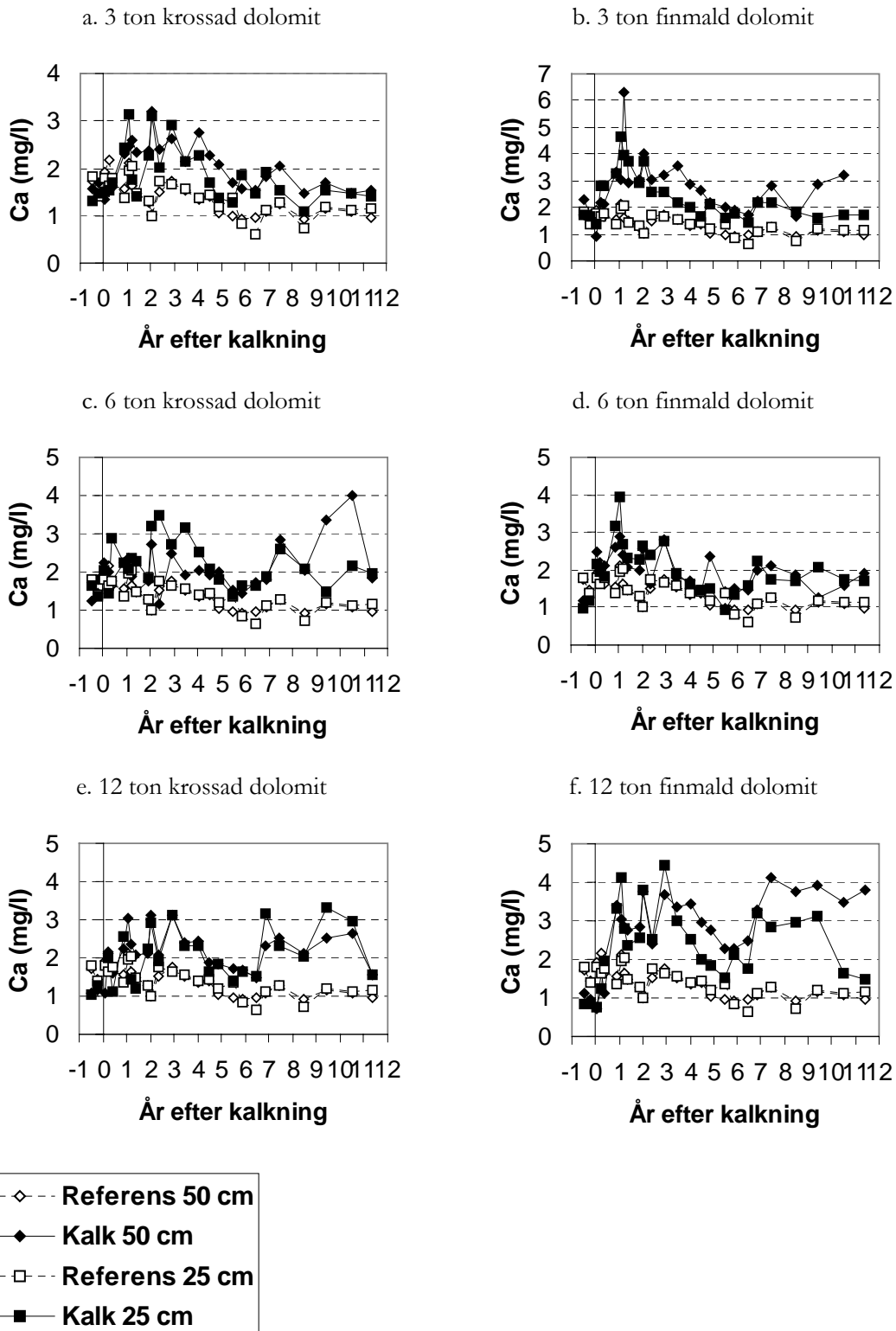
### 9.1.1 Kalcium

Den tydligaste behandlingseffekten i detta försök var förhöjda kalciumhalter i markvattnet. I figur 2 och 3 presenteras jämförelser av kalciumhalten (medelvärde av fyra upprepningar) på djupen 25 cm och 50 cm för olika kombinationer av dos och kalkmedel. Omedelbart efter kalkning ökar Ca-halterna kraftigt i markvattnet oavsett dos och djup, men redan efter 1-2 år stabiliseras värdena på en lägre men fortfarande förhöjd nivå jämfört med referenserna. Efter 12 år håller effekten alltså i sig även om den har avklingat med tiden. Under de två första åren fluktuerar dessutom halterna kraftigt men stabiliseras relativt snabbt. Efter 12 år varierar halterna fortfarande men inte med samma magnitud. Dessutom samvarierar halterna på de två olika djupen, många gånger i takt med variationerna i referensytorna vilket indikerar en naturlig förklaring såsom förändringar i markvattenytan.

Eftersom kalken når 25 cm-nivån tidigare än 50 cm-nivån innebär det att effekterna uppträder med en viss förskjutning i de djupare liggande marklagren. I några fall kan därför en viss initial fördröjning förekomma mellan kurvorna under det första året (exempelvis 3 ton krossad kalk och 3 ton krossad dolomit). Teoretiskt kommer kalkfronten att röra sig neråt vilket innebär att halterna på 25 cm-nivån kommer att minska för att istället öka på 50 cm-nivån. Detta borde få till följd att kurvorna närmar sig varandra med tiden, till en punkt då linjerna korsar varandra. I detta försök existerar inte något sådant mönster utom möjligtvis i ett fall där 12 ton finmald dolomit använts. Markdjupet där provtagning har skett verkar därför inte ha någon inverkan på resultaten i detta försök. Av den anledningen redovisas endast resultaten från 50 cm-nivån i den fortsatta redogörelsen.

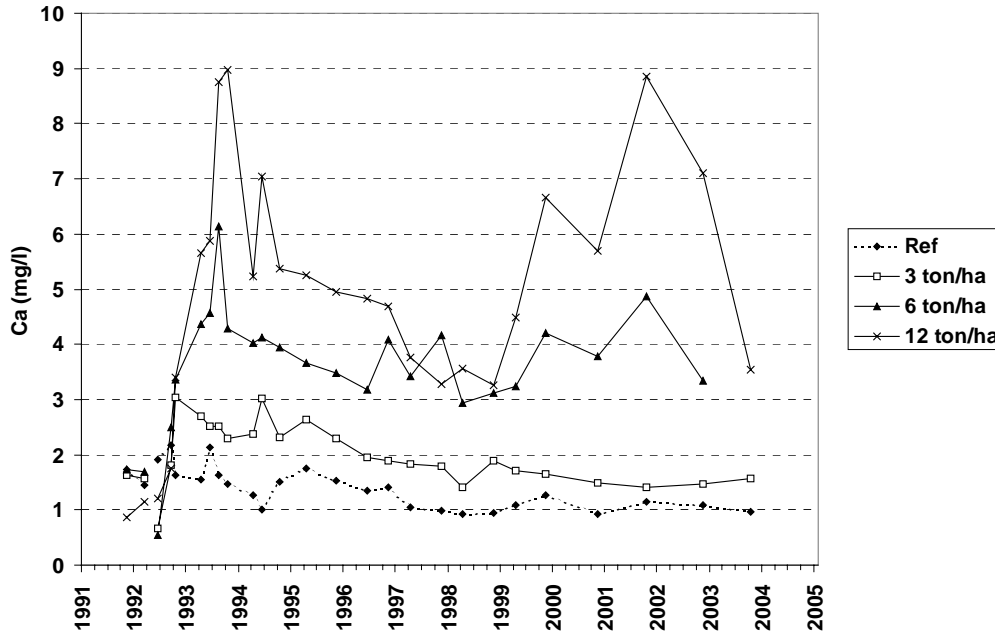


Figur 2. Kalciumhalt (mg/l) i markvattnet före och efter kalkning på två olika markdjup (25 resp. 50 cm) vid olika doser av krossad kalksten och finmald kalksten, samt i referensytorna. Observera att y-axlarna har olika skalor.

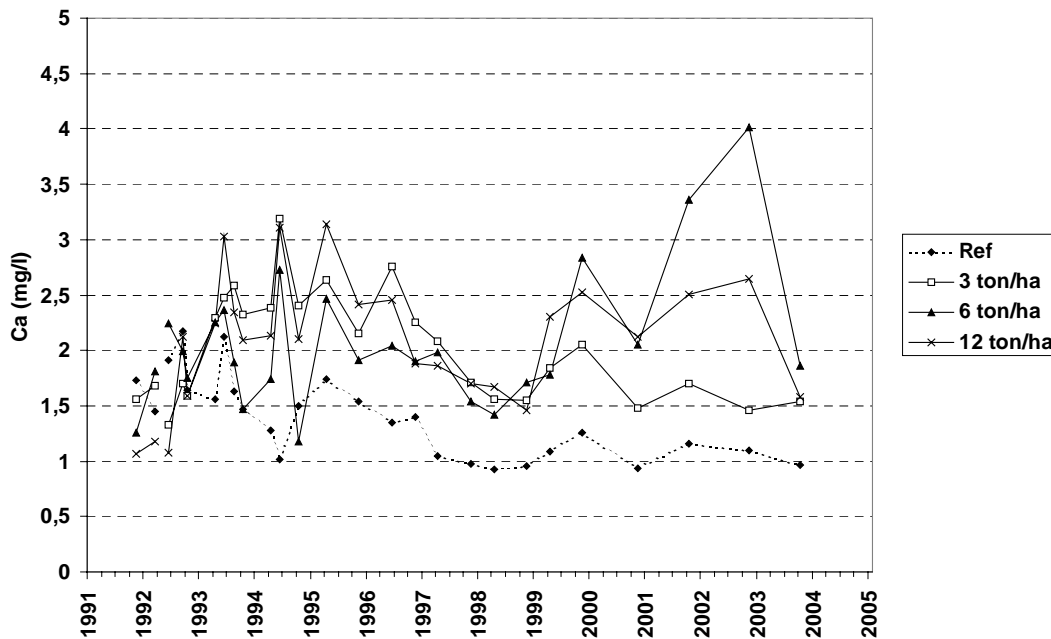


Figur 3. Kalciumhalt (mg/l) i markvattnet före och efter kalkning på två olika markdjup (25 resp. 50 cm) vid olika doser av krossad dolomit och finmald dolomit, samt i referensytorna. Observera att y-axlarna har olika skalor. Uppmärksamma också att figur 2a och 2b i tidigare rapport (B1386) innehöll felaktigheter. Orsaken var förväxling av värden.

Till skillnad från djupet har dosen däremot betydelse för resultatet. Vid behandling med antingen krossad eller finmald kalk uppträder en tydlig doseffekt, se figur 4. Det vill säga, ju högre dos desto högre koncentration av Ca i markvattnet. Efter 12 år kvarstår skillnaden. Motsvarande doseffekt erhålls inte vid behandling med krossad eller finmald dolomitkalk, se figur 5. Anledningen till detta beror på dolomitkalkens höga innehåll av Mg.



Figur 4. Ca-halt i markvattnet före och efter behandling (juni 1992), med 3, 6 och 12 ton finmald kalk. Lägg märke till den tydliga doseffekten. Motsvarande resultat uppnåddes även när krossad kalk användes.

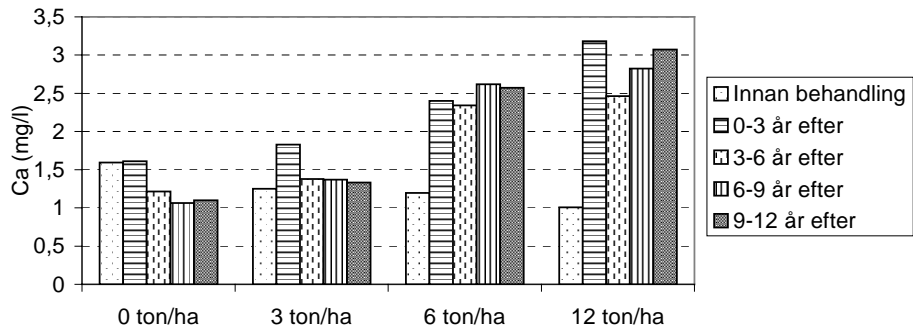


Figur 5. Ca-halt i markvattnet före och efter behandling (juni 1992), med 3, 6 och 12 ton krossad dolomit. Doseffekt saknas i de fall dolomitkalk har använts (krossad eller finmald).

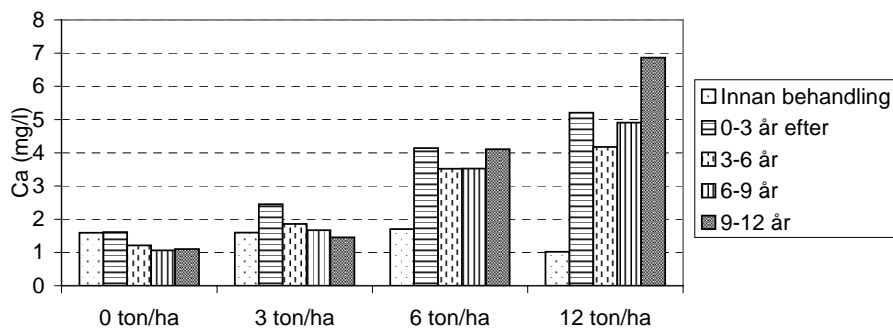
I figur 6a-d visas tidsutvecklingen för samtliga kalksorter och doser indelat i en period före behandling och fyra 3-årsperioder efter behandling. För vare period har medelvärdet av de fyra olika uppreppningarna för varje dos och sort beräknats. Figurerna visar utvecklingen på 50 cm djup. Observera att y-axlarna har olika skalor. Även i dessa figurer är doseffekten tydlig när man sprider krossad eller finmald kalk men inte krossad eller finmald dolomitkalk. Lägg även märke till att Ca-halterna i referensytorna har minskat under de år som mätningarna har pågått.

Ytterligare en faktor som har betydelse för resultatet är kalksorten. Teoretiskt borde ett finkornigt och Ca-rikt medel ha störst effekt på markvattenhalten. I detta försök borde därför finmald krosskalk ge upphov till de högsta koncentrationerna medan krossad dolomitkalk borde ge upphov till de lägsta koncentrationerna. I figur 7-9 visas förhållandet mellan sort och dos över tiden. När krossad och finmald *kalk* jämförs mellan varandra ger den finmalda sorten alltid upphov till de högsta koncentrationerna, oavsett dos. Detsamma gäller när krossad och finmald *dolomit* jämförs med varandra, utom i ett fall där 6 ton dolomit/ha har använts.

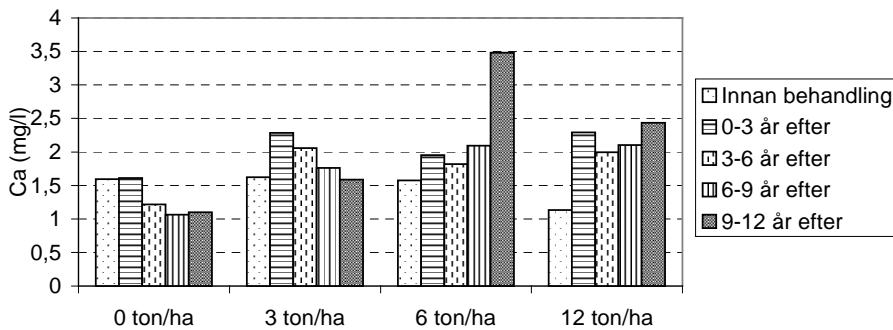
Innehållet av Ca har inte lika tydlig effekt. Vid spridning av 3 ton kalk/ha ger dolomitkalken, och inte kalken, upphov till de högsta koncentrationerna medan det omvända inträffar när 6 ton kalk/ha sprids, se figur 7 och 8. Vid dosen 12 ton kalk/ha ger de två finmalda sorterna (kalk och dolomitkalk) upphov till de högsta Ca-halterna i markvattnet, vilket indikerar att kornstorleken är mer betydelsefull än innehållet av Ca, se figur 9. Anledningen till att förhållandet mellan sorterna inte är lika tydligt vid de lägre doserna beror troligtvis på att Ca-jonerna binds till markpartiklarna och inte deltar i lika många utbytesreaktioner.



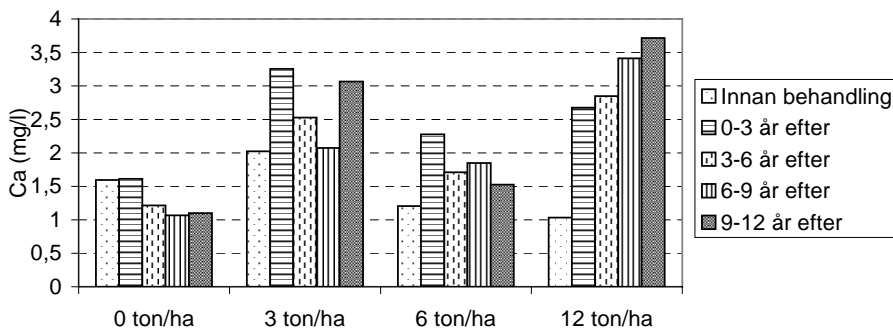
Figur 6a. Ca-halt i markvattnet före och efter behandling med krossad kalksten.



Figur 6b. Ca-halt i markvattnet före och efter behandling med finmald kalksten.

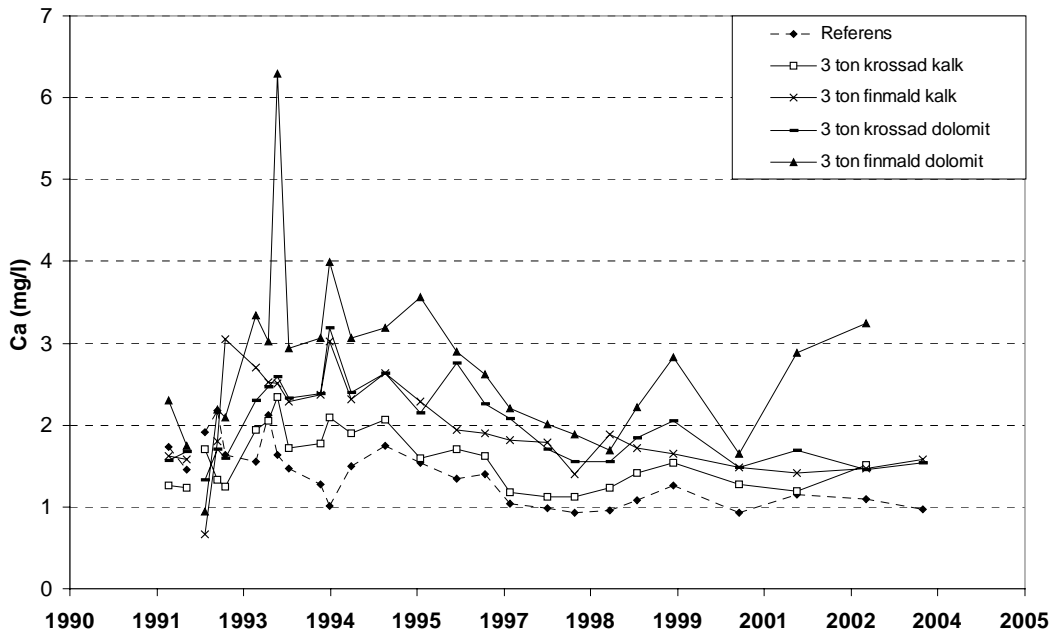


Figur 6c. Ca-halt i markvattnet före och efter behandling med krossad dolomit.

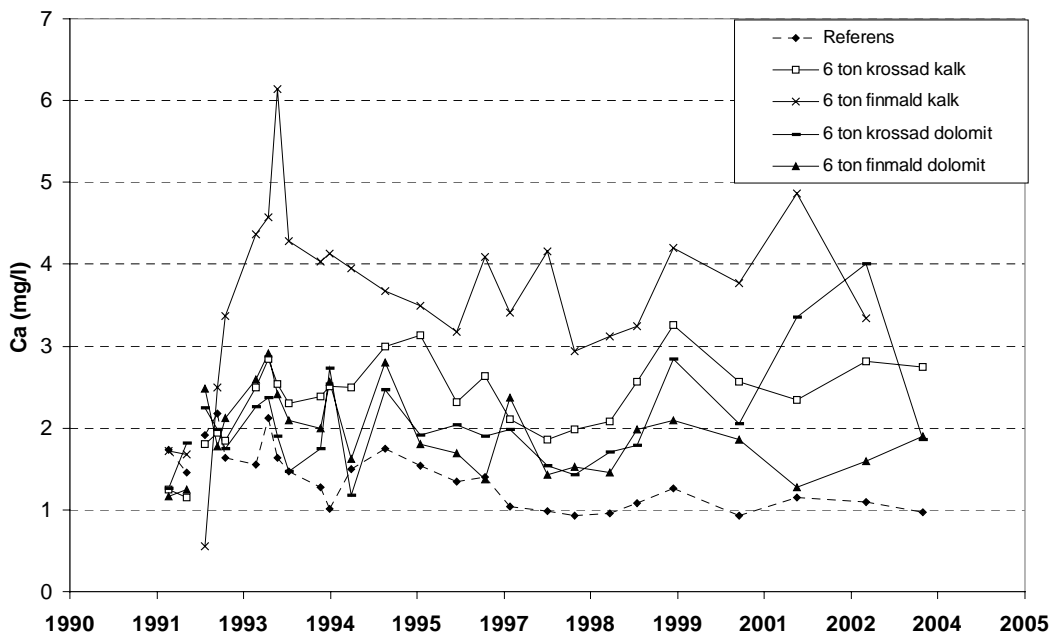


Figur 6d. Ca-halt i markvattnet före och efter behandling med finmald dolomit.

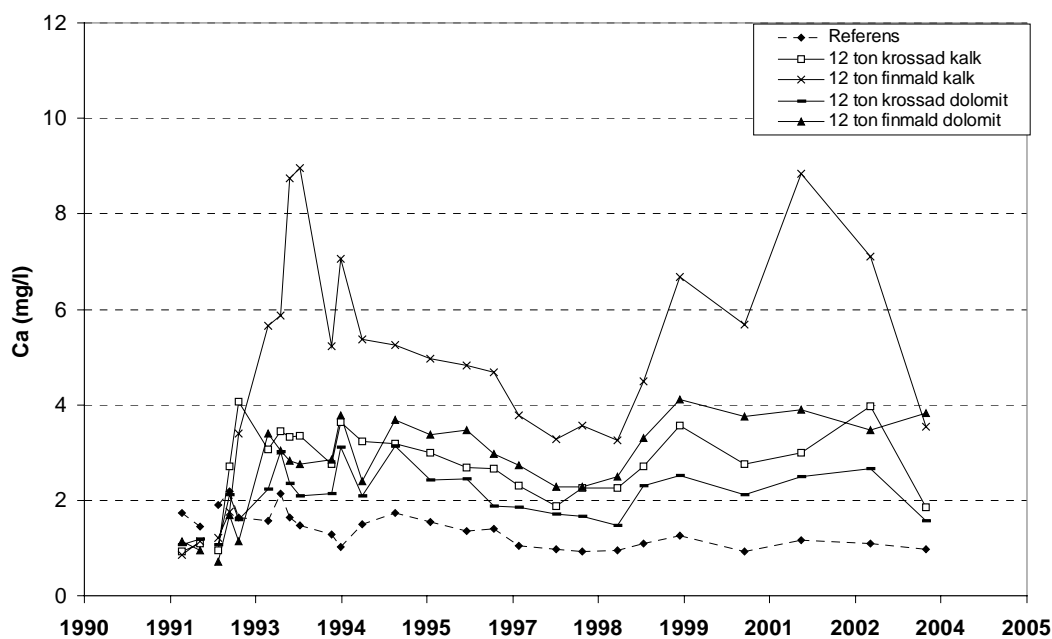




Figur 7. Ca-halt i markvattnet vid spridning av 3 ton kalk/ha för fyra olika kalksorter (medelvärde från fyra olika upprepningarna på 50 cm djup).

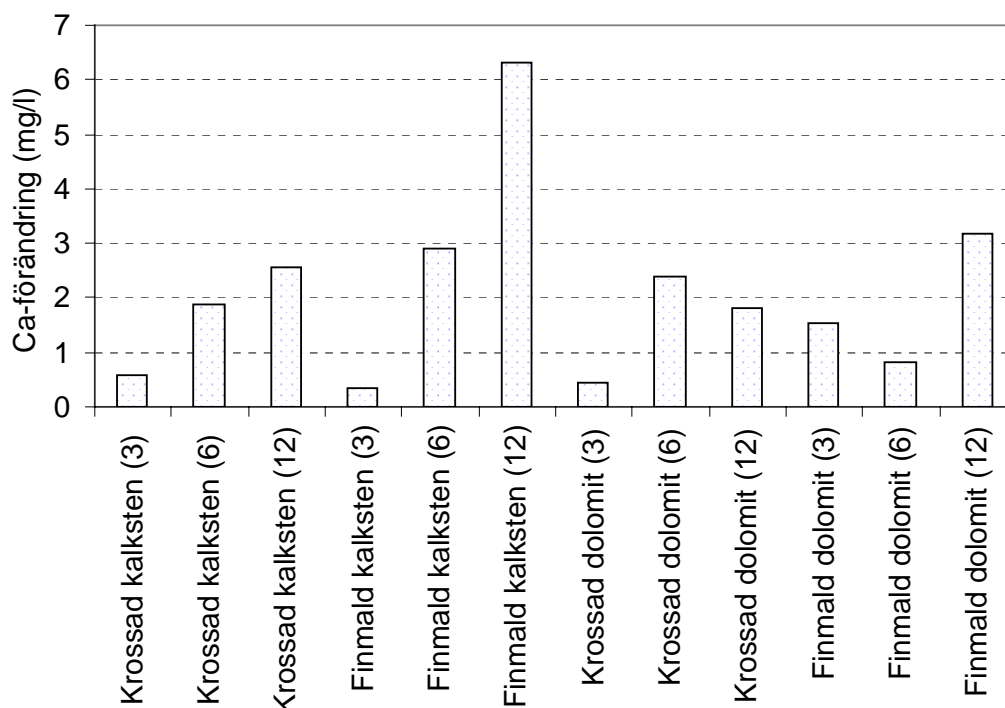


Figur 8. Ca-halt i markvattnet vid spridning av 6 ton kalk/ha för fyra olika kalksorter (medelvärde från fyra olika upprepningarna på 50 cm djup).



Figur 9. Ca-halt i markvattnet vid spridning av 12 ton kalk/ha för fyra olika kalksorter (medelvärde från fyra olika upprepningarna på 50 cm djup).

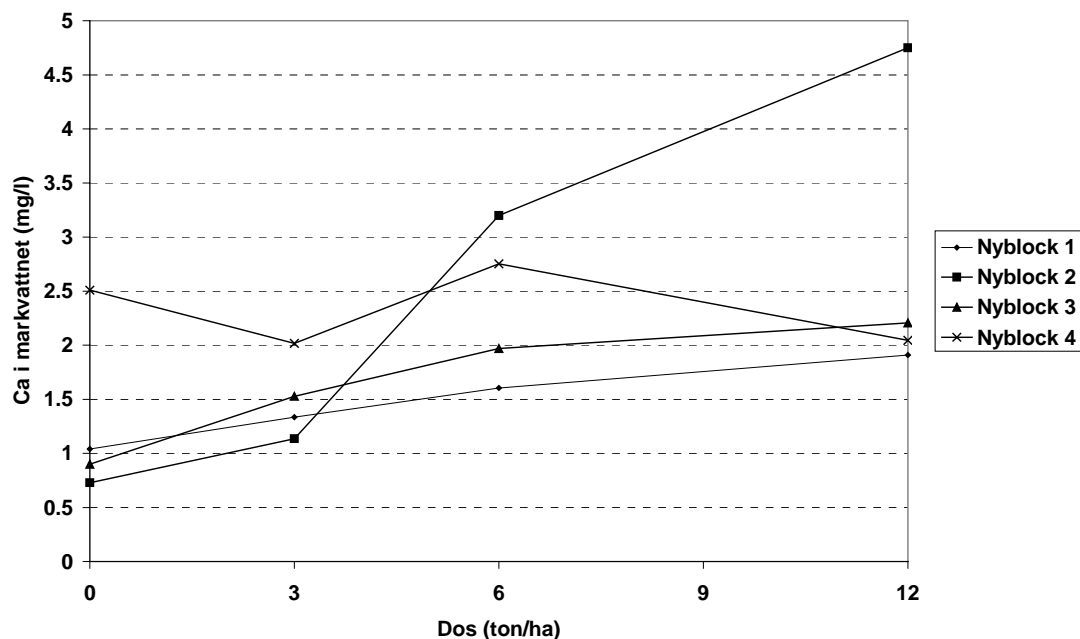
De resultat som presenterats hittills har inte tagit hänsyn till den naturliga förändringen som kan ha ägt rum i området. Ett vanligt sätt att beskriva själva *behandlingseffekten* är att beräkna skillnaden mellan den behandlade ytan och referensytan före behandling (differens 1) och den behandlade ytan och referensytan efter behandling (differens 2). Genom att subtrahera skillnaderna (differens 2 minus differens 1) med varandra får man riktningen, eller åt vilket håll, förändringen har gått. Ett positivt värde indikerar en behandlingseffekt. I figur 10 visas behandlingseffekten, 9-12 år efter behandling. I samtliga fall har Ca-halterna ökat långsiktigt i markvattnet, oavsett dos och sort. I denna figur är doseffekten uppenbar liksom att de finmalda sorterna (oftast) ger upphov till högre halter.



Figur 10. Medelvärdesförändring av Ca-halten i markvattnet 9-12 år efter behandling på 50 cm djup.

I en studie gjord av Akselsson och Westling (1999) undersöktes den rumsliga variationen i samma provtytor som använts i detta experiment. De fann bland annat att variationen på lokal skala var lika stor som den som förekommer på regional och nationell skala. Detta bidrar till att öka spridningen mellan uppreningarna och försvårar möjligheterna att generalisera behandlingseffekterna.

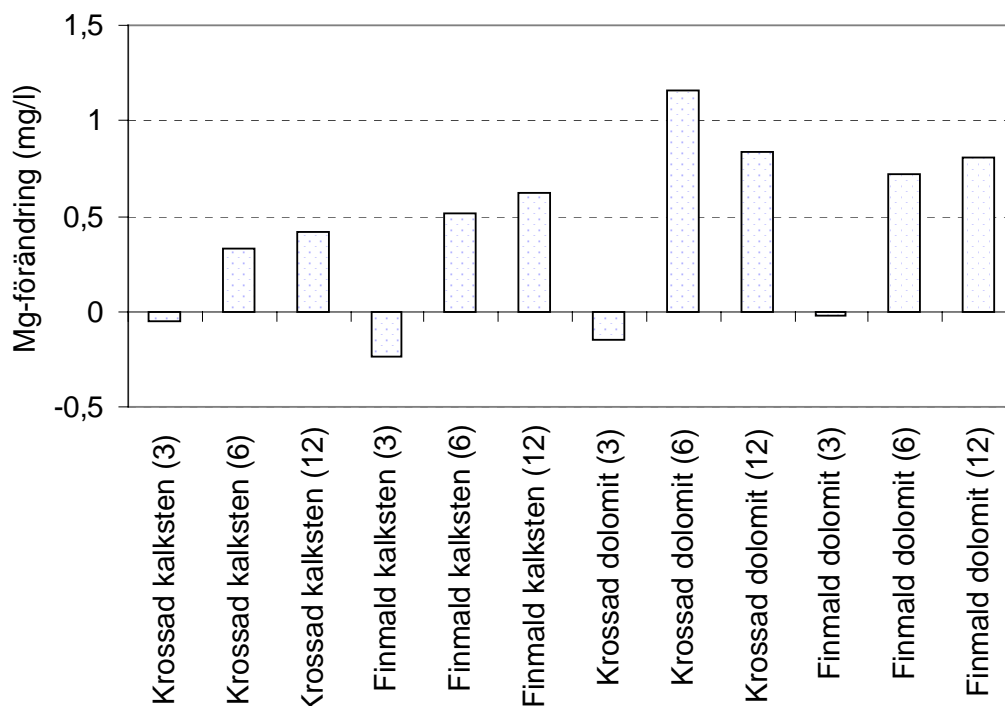
I figur 11 visar exempel på hur Ca-halten kan variera med dosen vid behandling med krossad kalksten i de fyra nyblocken i försöket. Figuren visar på olika relationer mellan dos och effekt som är typiska för flertalet kalksorter och ämnen i markvatten i denna undersökning. I tre av fyra fall (nyblock 1, 3 och 4) ökar Ca-halten i markvattnet med stigande dos, men ökningen är olika stor. Ökningen är som störst i nyblock 2 medan nyblock 1 och 3 uppträder väldigt likartat. Nyblock 4 visar inget dosberoende och skiljer sig dessutom från övriga block i och med att halterna minskar i dosen 3 och 12 ton/ha men ökar i dosen 6 ton/ha jämfört med referenserna. Nyblock 4 hade dock ett annat utgångsläge än övriga block med högre Ca-halt och även högre pH, vilket sannolikt påverkade kalkningseffekterna.



Figur 11. Kalciumhalten som funktion av dos vid behandling med krossad kalksten i de fyra nyblocken i försöket. Medianvärdet från 50 cm djup från samtliga mätningar efter behandling (0-12 år) har använts.

### 9.1.2 Magnesium

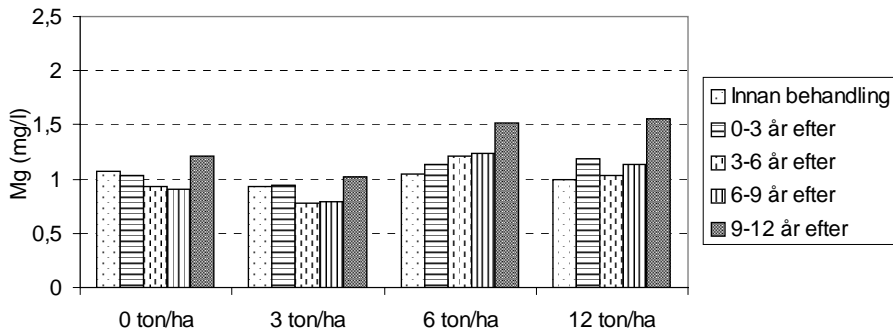
Magnesium ingår i dolomit och kan därmed, precis som kalcium, användas som ett mått på hur mycket av behandlingsmedlet som påverkar markvattnet. I detta försök var ökningen störst i de ytor som behandlats med dolomitkalk (krossad och finmald) och något mindre i de fall krossad eller finmald kalk använts, se figur 12 och 13. Detta gäller endast doserna 6 respektive 12 ton/ha. Att koncentrationerna stiger när ett medel som innehåller Mg används är förväntat men att finmald och krossad kalk (som inte innehåller Mg) leder till ökade koncentrationer är kanske mer förvånansvärt. Förklaringen ligger i att Ca-jonerna ersätter Mg-jonerna på markpartiklarna via jonbytesprocesser vilket får till följd att halten Mg i markvattnet ökar.



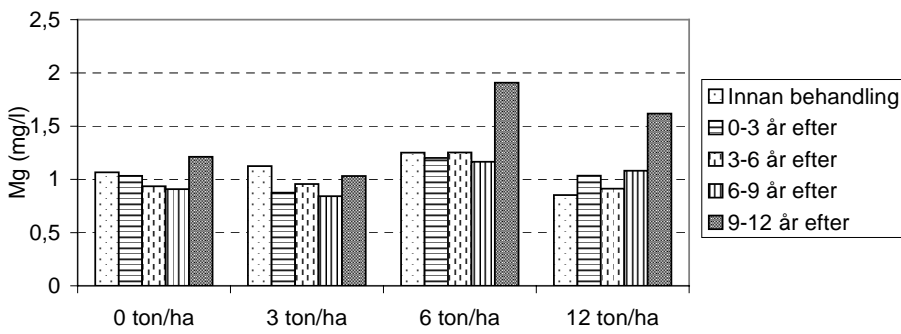
Figur 12. Medelvärdesförändring av Mg-halten i markvattnet 9-12 år efter behandling på 50 cm djup.

Dosen 3 ton/ha verkar däremot inte ge upphov till några behandlingseffekter utom möjligen i ett fall där finmald kalksten har använts, se figur 12 och 13. Istället för en ökning har markvattenkoncentrationen av Mg minskat. En hypotes till denna minskningen är att jonbytet i marken förändras. Normala skogsmarker som inte behandlats med kalk har en hög koncentration av sura joner (H och Al) i markvattnet. Detta gäller framförallt de övre delarna av marken. När dessa joner följer med det nedåtgående vattnet förändras jonkoncentrationen tillfälligt i de djupare marklagren. För att utjämna obalansen mellan markpartiklarna och marklösningen kommer H- och Al-jonerna därför att bytas ut mot Ca men även Mg. När en mark istället behandlas med kalk kommer markvattnet ovanifrån att innehålla en betydligt högre andel Ca-joner och därmed vara mindre surt. Jonbytet kommer därför att förändras eftersom marken inte längre behöver buffra mot de sura jonerna (H och Al). Resultatet är att markvattenkoncentrationerna av Mg *minskar*. Koncentrationen av Ca förändras inte eftersom marklösningen redan är så rik på Ca. Högre doser leder inte till samma resultat vilket troligtvis beror på att Ca-halterna blir så höga att koncentrationen av anjoner påverkas, vilket i sin tur leder till ytterligare ett förändrat jonbytesmönster. De minskningar som har inträffat när marken behandlats med övriga tre kalksorter är försumbara.

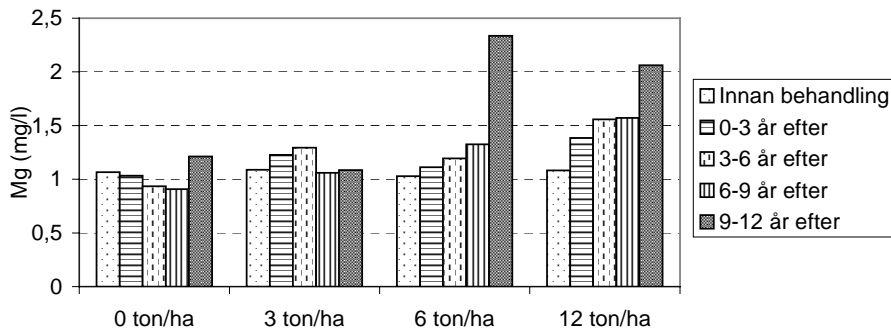
I figur 13a-d visas tidsutvecklingen för samtliga kalksorter och doser indelat i en period före behandling och fyra 3-årsperioder efter behandling. För vare period har medelvärdet av de fyra olika upprepningarna för varje dos och sort beräknats. Figurerna visar utvecklingen på 50 cm djup.



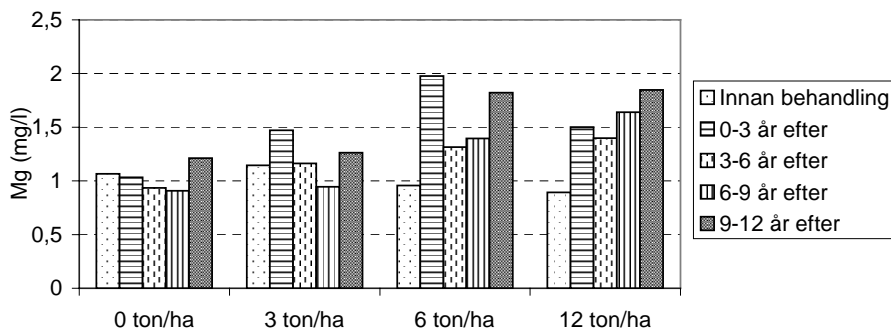
Figur 13a. Mg-halt i markvattnet före och efter behandling med krossad kalksten.



Figur 13b. Mg-halt i markvattnet före och efter behandling med finmald kalksten.



Figur 13c. Mg-halt i markvattnet före och efter behandling med krossad dolomit.

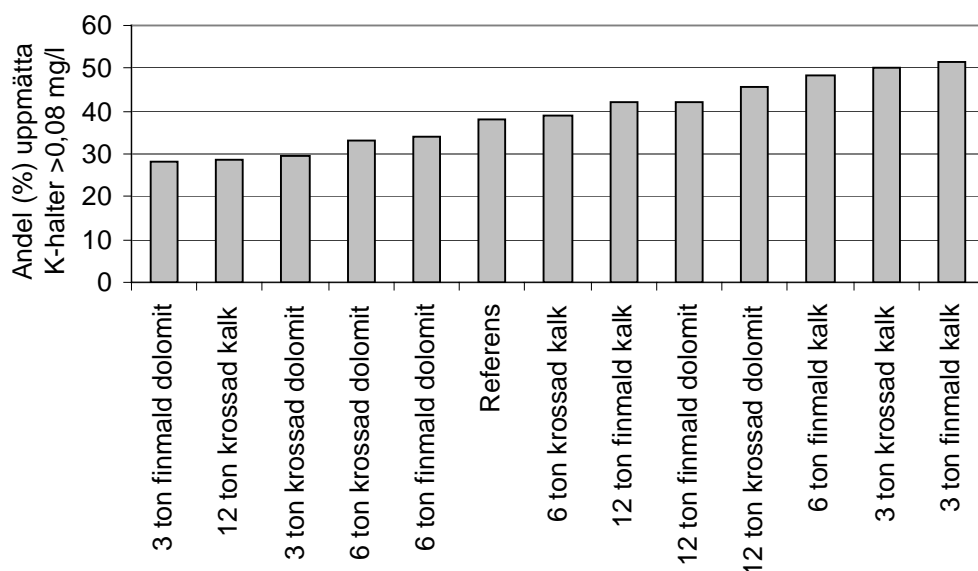


Figur 13d. Mg-halt i markvattnet före och efter behandling med finmald dolomit.

### 9.1.3 Kalium

Kalium är ett mycket viktigt växtnäringsämne i skogen. Det har befarats att kalkning kan öka utlakningen av kalium, vilket innebär att det växttillgängliga förrådet i marken minskar. Omvänt skulle lägre halter kunna indikera en fastläggning i marken, vilket också minskar tillgängligheten för växterna. Tidigare studier har visat tendenser till ökad kaliumkoncentration i avrinningsvattnet på kort sikt (ex. Hultberg m. fl 1995 och Orth & Westling 1998). Resultat från långliggande kalkningsförsök i skogsmark, anlagda mellan 1913 och 1977, uppvisar dock inga signifikanta skillnader i mineraljordens halt av utbytbar kalium, vilket indikerar att utlakningen i genomsnitt varit likartad. Även de nuvarande (år 2000) halterna av kalium i markvatten (50 cm) i de långliggande försöken är på samma nivå (Larsson m. fl.,2003).

Kalium var svåranalyserat eftersom merparten av värdena låg under detektionsgränsen. Vidare har detektionsgränsen förändrats under mätperiodens gång. I den tidigare utvärderingen (Akselsson m. fl. 2000) låg detektionsgränsen på 0,2 mg/l men förändrades efter 1997 till 0,08 mg/l. Av den anledningen är det svårt att göra jämförelser med tidigare resultat. I denna rapport presenteras därför samtliga värden över detektionsgränsen för perioden 1997-2003 (den period då gränsen var 0,08 mg/l), se figur 14.



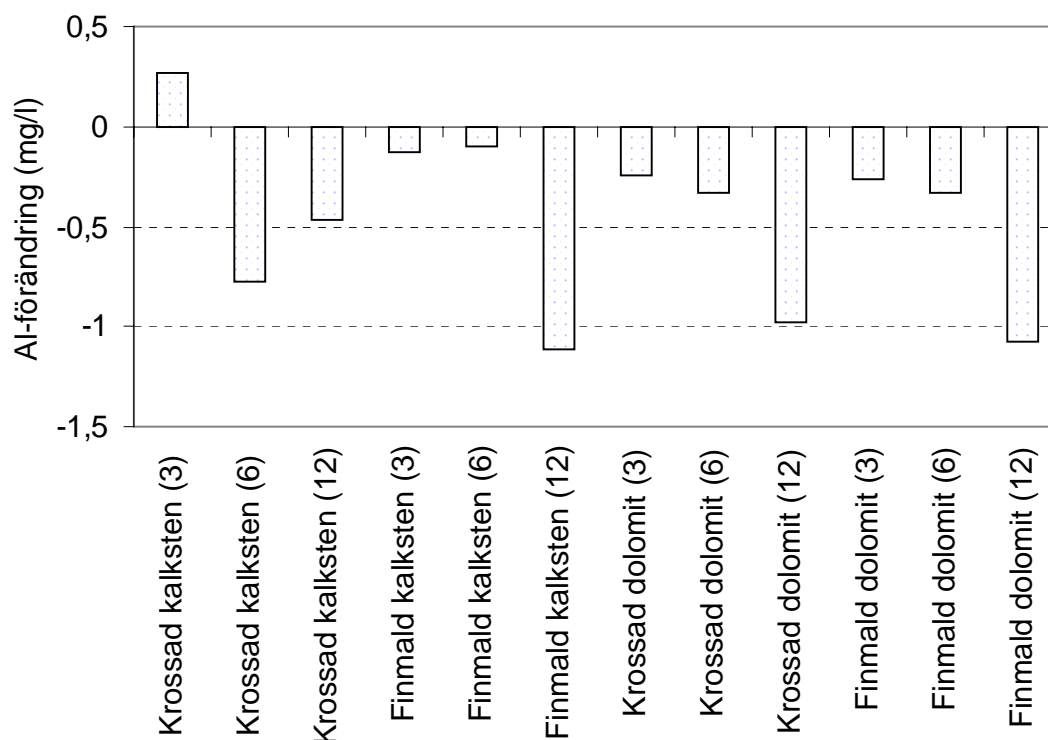
**Figur 14.** Andelen tillfällen då K-halten i markvattnet var över 0,08 mg/l jämfört med totala antalet prover. Beräkningen är gjord för perioden 1997-2003 på 50 cm djup.

Generellt sett har inte dos eller sort någon betydelse för kaliumhalterna, se figur 14. Markvattenhalterna fördelar sig jämt kring de som uppmätts på referensytorna. Kortsiktigt fanns det tendenser till att högre doser gav upphov till en lägre utlakning (fastläggning) medan lägre doser ökade markvattenhalterna (Akselsson m. fl. 2000). Efter 12 år har dessa skillnader suddats ut.

### 9.1.4 Totalaluminium

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.

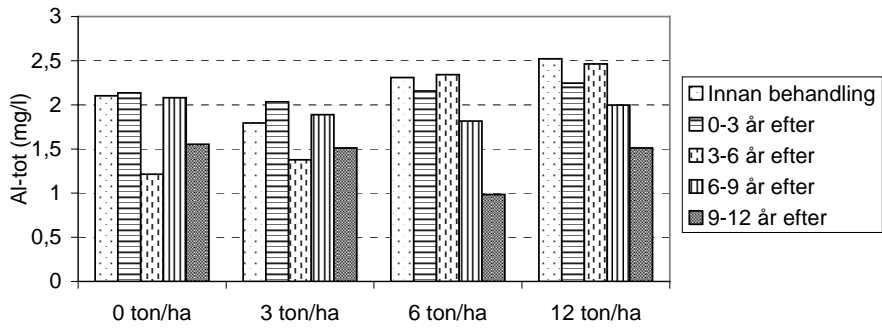
I samtliga fall utom i ett (3 ton krossad kalksten) har aluminiumhalterna minskat långsiktigt, se figur 15. Minskningen verkar dessutom vara dosberoende för dolomitkalk men inte för kalksten. Trenden är dock tydlig, ju mer kalk som sprids desto lägre blir halten av totalaluminium i marklösningen. Dosen, snarare än sorten, är således mer betydelsefull för resultatet.



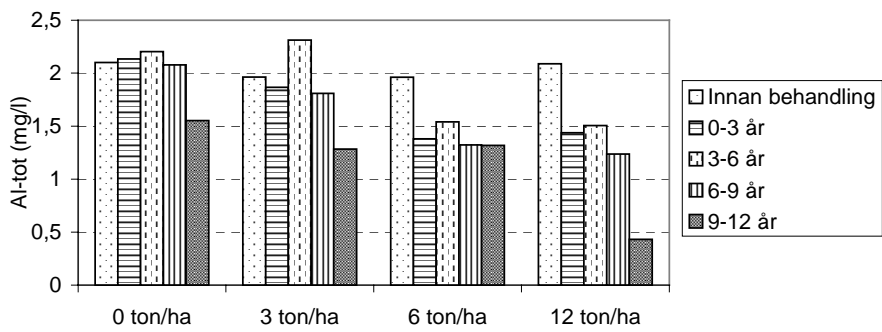
**Figur 15.** Medelvärdesförändring av totalaluminiumhalten i markvattnet 9-12 år efter behandling på 50 cm djup.

I figur 16a-d visas tidsutvecklingen för samtliga kalksorter och doser indelat i en period före behandling och fyra 3-årsperioder efter behandling. För vare period har medelvärdet av de fyra olika upprepningarna för varje dos och sort beräknats. Figurerna visar utvecklingen på 50 cm djup.

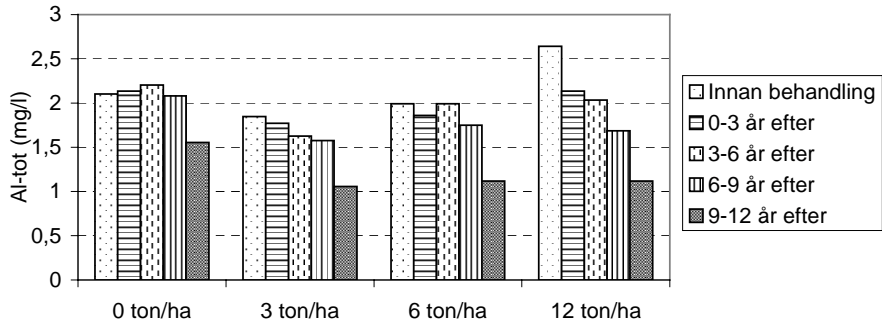




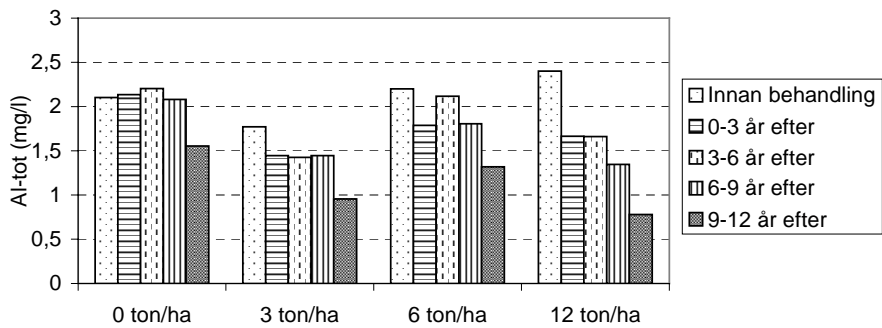
Figur 16a. Al-tot-halt i markvattnet före och efter behandling med krossad kalk.



Figur 16b. Al-tot-halt i markvattnet före och efter behandling med finmald kalk.



Figur 16c. Al-tot-halt i markvattnet före och efter behandling med krossad dolomit.

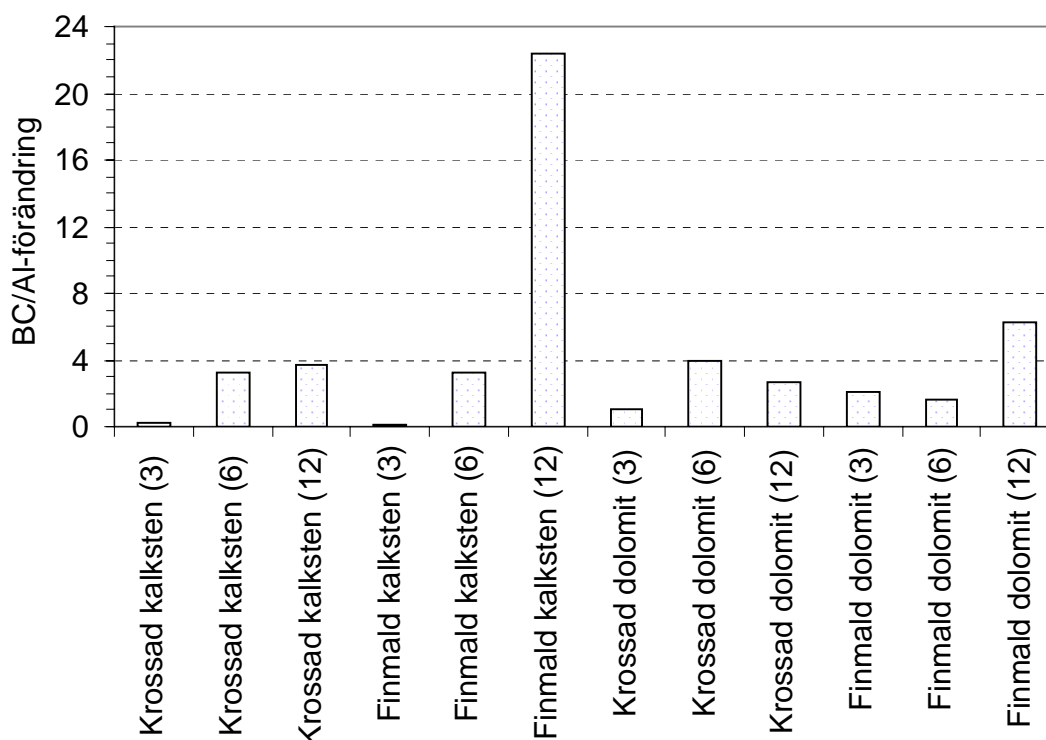


Figur 16d. Al-tot-halt i markvattnet före och efter behandling med finmald dolomit.

### 9.1.5 BC/Al-kvot

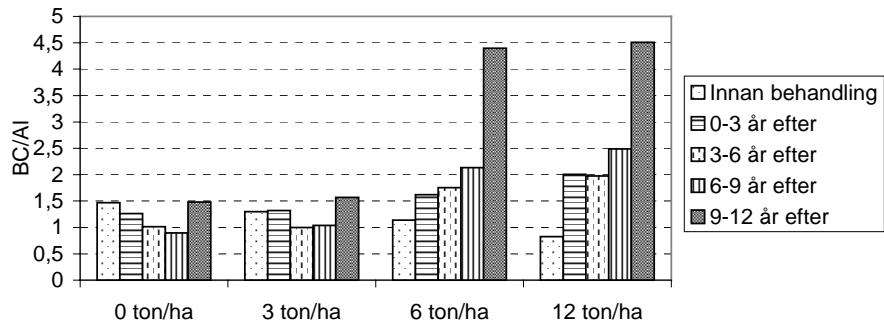
Kvoten mellan baskatjonhalten och halten oorganiskt aluminium (BC/Al) i markvattnet används ofta som ett mått på risken för försurningseffekter. I denna studie är aluminium enbart mätt som totalaluminium, men halterna domineras sannolikt av oorganiskt aluminium (se avsnitt 6). Kvoterna är därför inte direkt jämförbara med kvoter från andra studier, men jämförelser mellan försöksledan kan indikera behandlingseffekter som påverkar kvoten

En förändring i kvot kan antingen bero på en ökning av baskatjonerna (Ca, Mg och K) eller en minskning av Al-tot. Innan behandling var BC/Al kvoterna mellan knappt 0,6 och drygt 2,2 mg/l (Akselsson & Westling, 1999). I figur 17 visas hur BC/Al-kvoten förändrats långsiktigt 9-12 år efter behandling jämfört med referenserna. I samtliga fall utom två har behandlingen medfört en ökning av kvoten. De ökade kvoterna beror huvudsakligen på ökade Ca-halter men också på minskade halter av totalaluminium. Spridning av 3 ton krossad och finmald kalksten har endast lett till obetydliga effekter. Observera även effekten av dosen vid spridning av kalksten, som inte gäller för dolomitkalk.

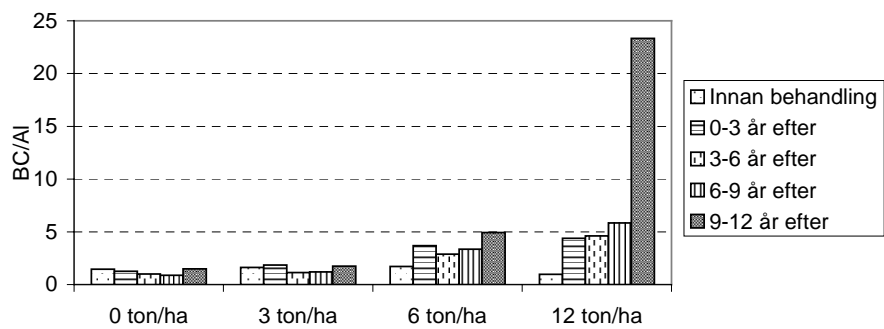


Figur 17. Medelvärdesförändring av BC/Al-kvoten i markvattnet 9-12 år efter behandling på 50 cm djup.

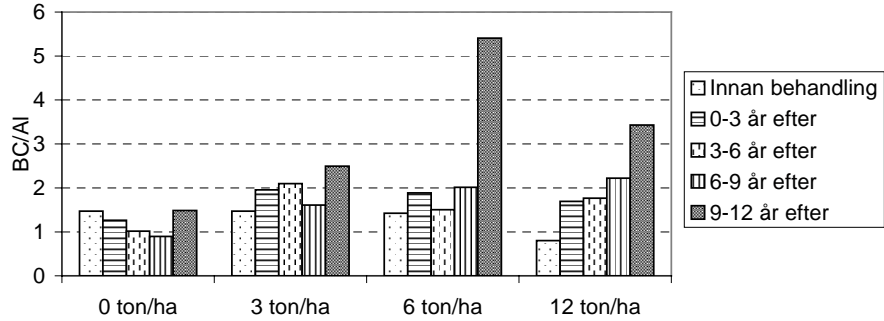
I figur 18a-d visas tidsutvecklingen för samtliga kalksorter och doser indelat i en period före behandling och fyra 3-årsperioder efter behandling. För vare period har medelvärdet av de fyra olika upprepningarna för varje dos och sort beräknats. Figurerna visar utvecklingen på 50 cm djup.



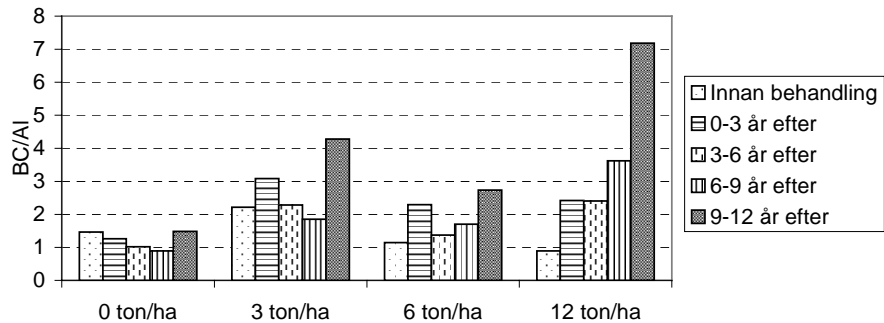
Figur 18a. BC/Al-kvot i markvattnet före och efter behandling med krossad kalk.



Figur 18b. BC/Al-kvot i markvattnet före och efter behandling med finmald kalk.



Figur 18c. BC/Al-kvot i markvattnet före och efter behandling med krossad dolomit.

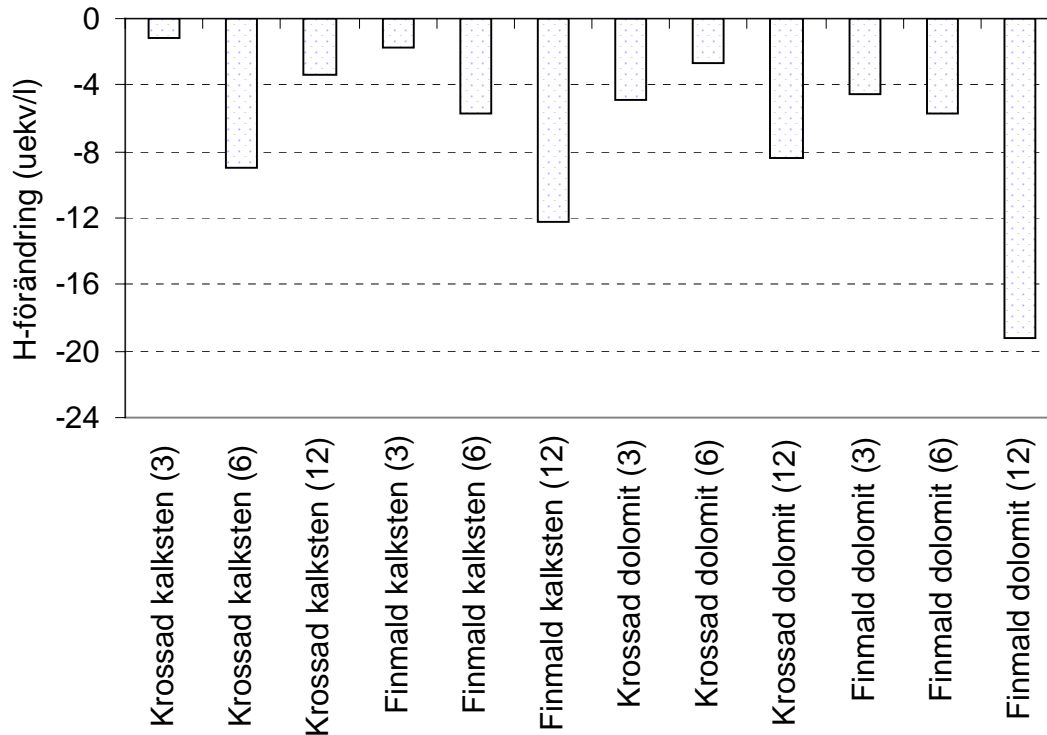


Figur 18d. BC/Al-kvot i markvattnet före och efter behandling med finmald dolomit.

### 9.1.6 Vätejonhalt

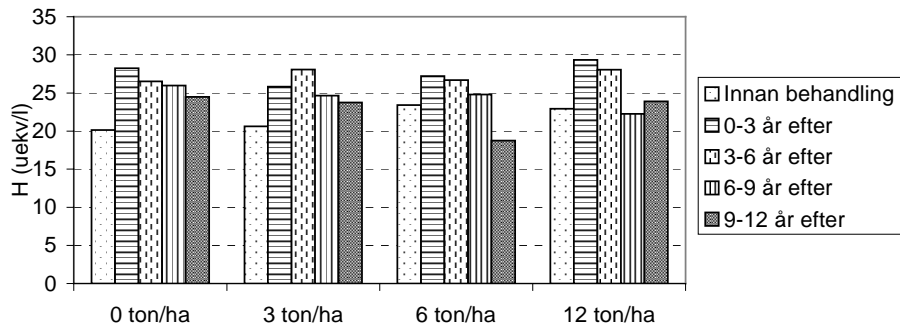
Deposition av starka syror på sur skogsmark leder till att giftigt aluminium löses ut i marklösningen. Ett av huvudskälen till att behandla skogen med kalk är att höja pH-värdet för att på så vis hindra att surt- och aluminiumrikt markvatten ger upphov till biologiska skador.

I detta försök har vätejonhalten minskat ( $\Rightarrow$ pH-värdet har ökat) långsiktigt i samtliga provytor och effekten är kopplad till dosen snarare än sorten, se figur 19. Någon entydig doseffekt finns dock inte.

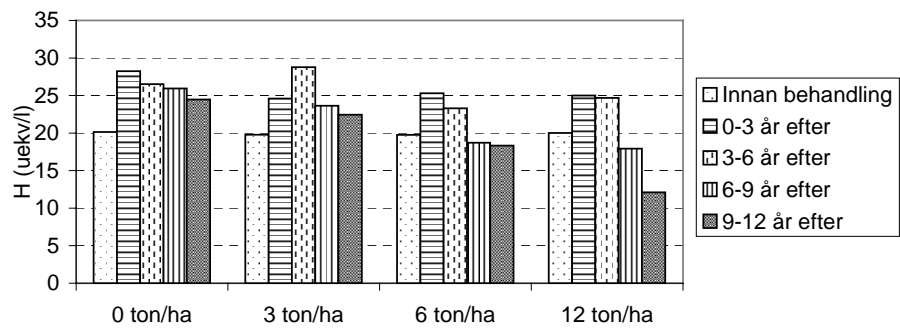


Figur 19. Medelvärdesförändring av vätejonhalten i markvattnet 9-12 år efter behandling på 50 cm djup.

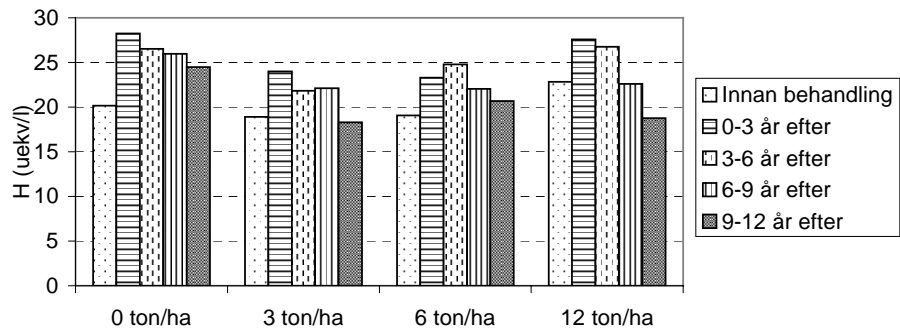
I figur 20a-d visas tidsutvecklingen för samtliga kalksorter och doser indelat i en period före behandling och fyra 3-årsperioder efter behandling. För vare period har medelvärdet av de fyra olika upprepningarna för varje dos och sort beräknats. Figurerna visar utvecklingen på 50 cm djup.



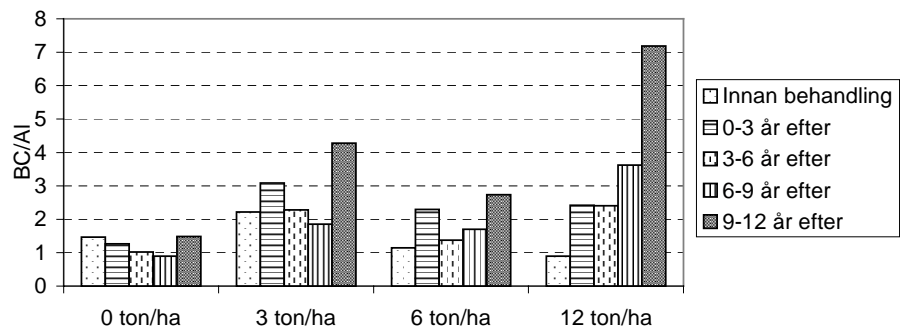
Figur 20a. Halt vätejoner i markvattnet före och efter behandling med krossad kalk.



Figur 20b. Halt vätejoner i markvattnet före och efter behandling med finmald kalk.



Figur 20c. Halt vätejoner i markvattnet före och efter behandling med krossad dolomit.

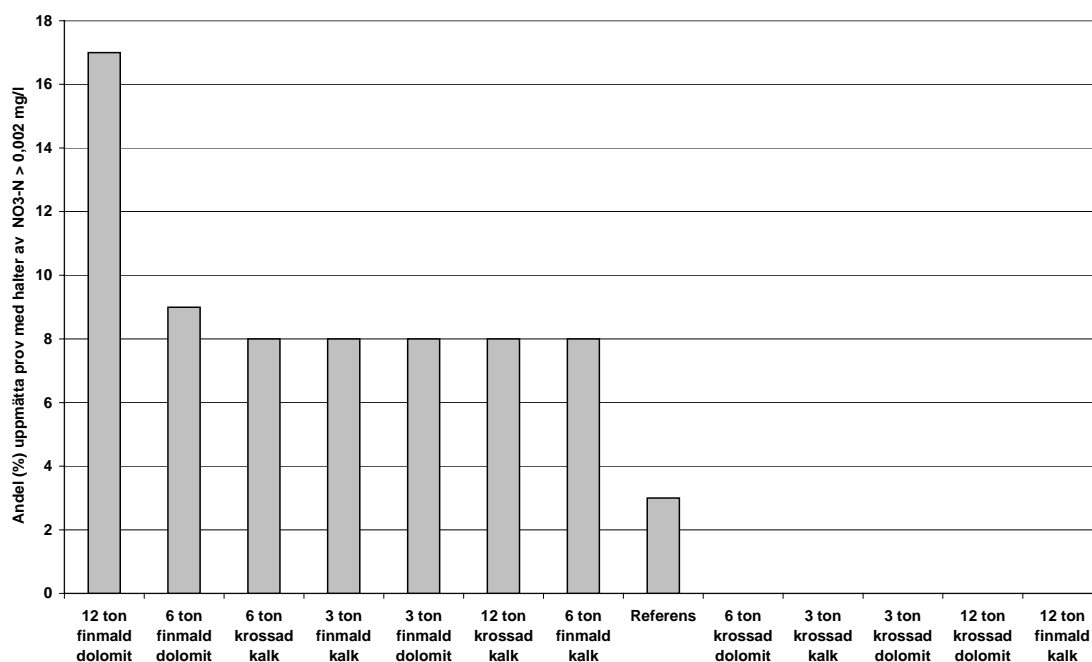


Figur 20d. Halt vätejoner i markvattnet före och efter behandling med finmald dolomit.

### 9.1.7 Kväve

Kväve räknas som ett tillväxtbegränsande ämne i skogen eftersom tillgången normalt är begränsande. Emellertid har det senaste århundradets kvävenedfall lett till ökade halter i marken och inneburit en rad miljöproblem, exempelvis övergödning. Eftersom kalkning ökar pH-värdet i marken finns det en risk att nitrifikationen stimuleras om nitrifikationsbakterier finns närvarande. Om behovet av kväve dessutom är väl tillgodosett (C/N-kvoter lägre än 25- 30) kan nitratjonerna lakas ut och bidra till både försurning och övergödning i vattenmiljön. I några fall har kalkning av skogsmark också visat sig leda till nitratutlakning (Johansson m. fl., 1999).

I detta försök har behandling med kalk inte lett till ett ökade nitratkvävehalter i markvattnet oavsett dos eller sort, se figur 21. Liksom för kalium visade det sig svårt att mäta ammonium- och nitratkvävehalterna eftersom de oftast låg under detektionsgränsen. Gränsen har också förändrats under årens lopp. Av den anledningen visas andelen värden över detektionsgränsen för perioden 1997-2003, se figur 21. Trots att Asa försökspark befinner sig i ett relativt högbelastat område (nuvarande och historiskt) har kalkningen inte lett till någon ökning av nitratkvävehalterna. Som högst har en nitratkvävehalt på 0,03 mg/l och en ammoniumkvävehalt på 0,431 mg/l uppmätts under de år som mätningarna har pågått.



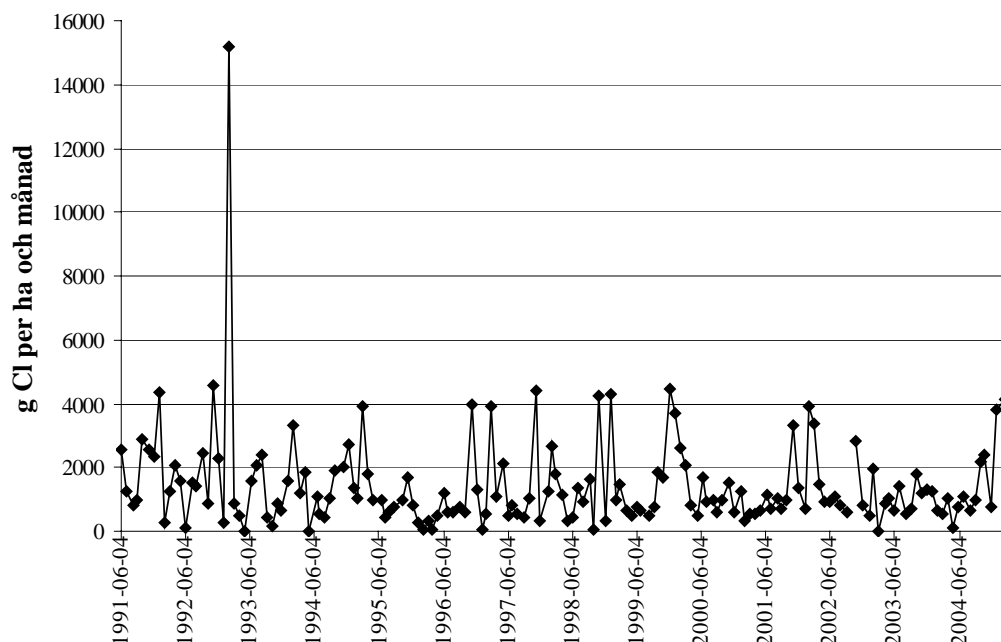
Figur 21. Andelen provtillfällen då halten NO<sub>3</sub>-N i markvattnet har varit över 0,002 mg/l jämfört med totala antalet prover. Beräkningen är gjord för perioden 1997-2003 på 50 cm djup.

### 9.1.8 Järn

I denna studie fanns inga trender eller skillnader mellan kalkade ytor och referensytor med avseende på Fe-halt, som kan relateras till kalkningen, oavsett dos, sort, djup eller tid.

### 9.1.9 Natrium och klorid

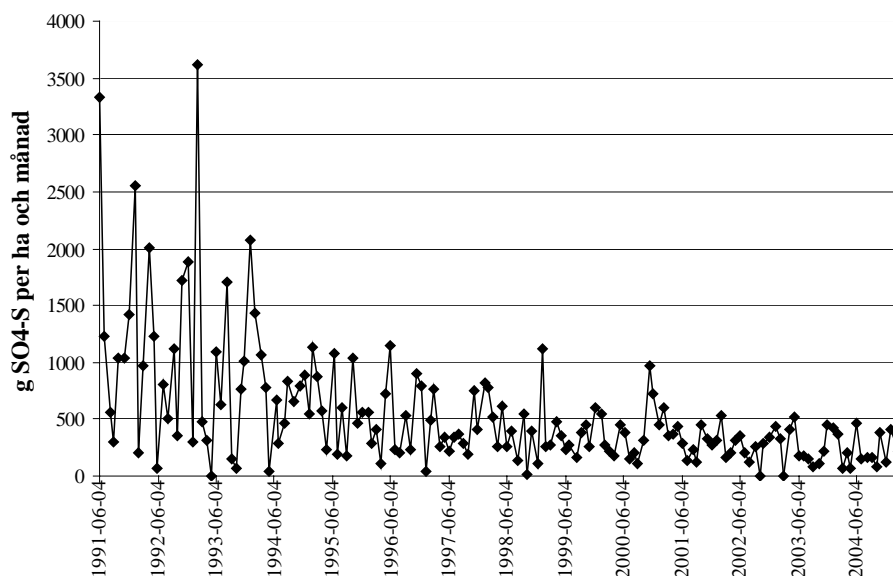
Som nämndes inledningsvis har natrium analyserats kontinuerligt under åren varför kompletta tids-serier finns tillgängliga. Klorid, och övriga anjoner, har däremot bara analyserats på ett reducerat antal prov. I början av mätperioden fanns en tendens att behandlingen ledde till ökade halter av Na och Cl på ett stort antal ytor. Variationer av natrium- och kloridhalt styrs emellertid i stor utsträckning av vädret. Under stormtillfällen kan depositionen av havssalt bli hög även i inlandet. Strax efter kalkningen (januari 1993) var vädersituationen sådan att stora delar av Sverige erhölet ett extremt stort havssaltsnedfall (figur 22, samt bilaga 1) med kraftigt förhöjda Na och Cl-halter i markvatten som följd. Det är med all sannolikhet detta, och inte kalkningen, som lett till förhöjda klorid- och natriumhalter under det första tiden efter kalkning. Utifrån dessa resultat har behandling med kalk, oavsett dos och sort, ingen effekt på Na och Cl-halterna i markvattnet.



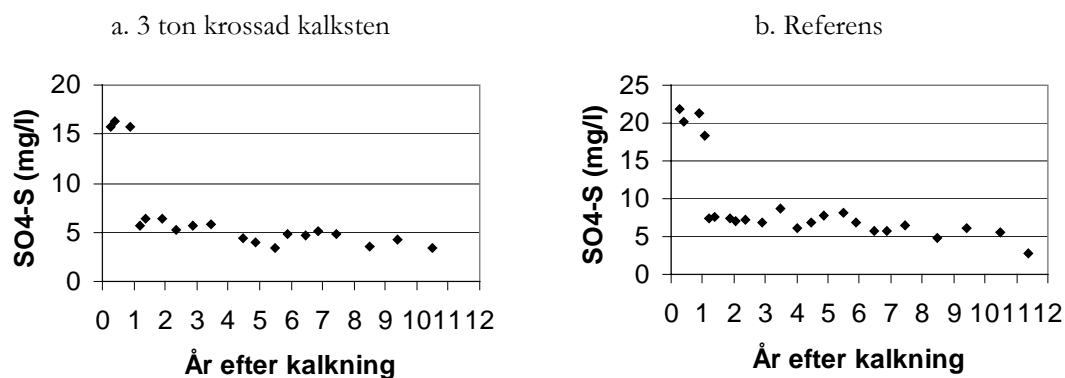
Figur 22. Månadsdeposition av klorid (g per ha och månad) uppmätt i form av kronddropp i försöket. Före september 1993 utfördes mätningarna utanför försöket i ett näraliggande granbestånd.

### 9.1.10 Sulfatsvavel

Sulfatsvavel är, liksom totalt organiskt kol och mangan, ämnen som minskat i markvattnet i takt med det minskade nedfallet på senare år (figur 23, samt bilaga 1). En återhämtning från försurning av markvattnet förutsätter att halterna av sulfatsvavel minskar, vilket gör det intressant att följa upp utvecklingen av sulfat. Nedan visas ett par exempel på hur halten av svavel i en referensyta och i en behandlad yta har förändrats, figur 24. Sulfathalten visar en svag minskning både i kalkade ytor och referensytor och det går inte att påvisa någon skillnad mellan kalkade ytor och referensytor.



**Figur 23.** Månadsdeposition av sulfatsvavel (g per ha och månad) uppmätt i form av krondropp i försöket. Före september 1993 utfördes mätningarna utanför försöket i ett näraliggande granbestånd.

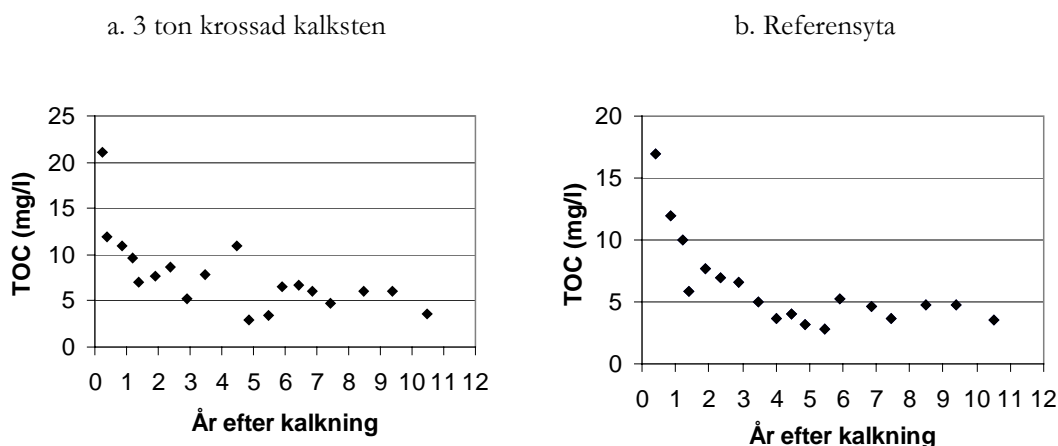


**Figur 24.** Sulfatsvavel i markvattnet på 50 cm djup i en yta behandlad med 6 ton finmald dolomit (a) och i en referensyta (b). Mätningar från innan behandling saknas här, men resultaten från andra ytor visar att nivån före kalkning var ungefär den samma som alldeles efter. Kalkning (år noll) slutfördes i juni 1992.

### 9.1.11 Totalt organiskt kol

Totalt organiskt kol har liksom sulfatsvavel minskat under försöksperioden både i kalkade ytor och i referensytor, figur 25. Ytor med relativt kompletta tidsserier, som dessutom representerar den generella bilden så bra som möjligt, har valts ut. Inte heller här går det att finna någon skillnad i förändring mellan obehandlade och behandlade ytor.

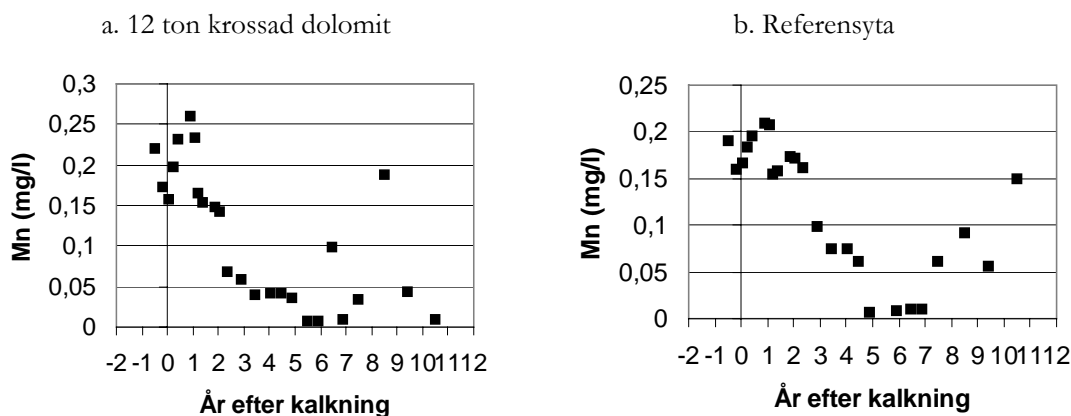




Figur 25. Totalt organiskt kol i markvattnet på 50 cm djup i en yta behandlad med 3 ton krossad kalk (a) och i en referensyta (b). Mätningar från innan behandling saknas här, men resultaten från andra ytor visar att nivån före kalkning var ungefär den samma som alldeles efter. Kalkning (år noll) slutfördes i juni 1992.

### 9.1.12 Mangan

Koncentrationen av mangan i markvattnet är starkt beroende av pH-värdet. När pH-värdet sjunker ökar halterna. I takt med att svavelnedfallet minskar (pH-värdet ökar) har markvattenhalterna av Mn sjunkit, figur 26. Ökningen som inträffar 6-7 år efter behandling beror på byte av analysmetod (från ICP-AES till jonkromatograf) och inte en pH-förändring. Analys av Mn vid låga halter är svårare med en jonkromatograf än en ICP-AES och ger en större osäkerhet i värdena. Någon behandlingseffekt går inte att påvisa i detta experiment.



Figur 26. Manganhalten i markvattnet på 50 cm djup i en yta behandlad med 12 ton dolomitkross (a) och i en referensyta (b). Kalkning (år noll) slutfördes i juni 1992.

## 10 Sammanfattande diskussion

### 10.1 Allmänt

Huvudsyftet med denna undersökning var att studera hur olika kalkstenssorter, doser och kornstorlekar av kalk på skogsmark påverkade effekterna på markvattnets kemi.

En av de tydligaste behandlingseffekterna var signifikant förhöjda koncentrationer av **kalcium** i markvattnet, oavsett dos och sort. Omedelbart efter kalkning ökade halterna kraftigt men efter 1-2 år stabiliserades de på en lägre men fortfarande förhöjd nivå jämfört med referenserna. Efter 12 år håller behandlingseffekten fortfarande i sig men effekten håller på att klinga av, speciellt i de ytor som behandlades med högre doser. När kalksten (både krossad och finmald) används ökar dessutom halterna med ökad dos vilket inte är fallet med dolomit.

Koncentrationen av **magnesium** ökade också i markvattnet oavsett sort och dos men ökningen var störst i de ytor som behandlats med dolomitmalk. Statistiskt fanns det endast ett samband mellan dos men inte sort. Anledningen till att kalksten leder till ökade halter trots att magnesium saknas, beror sannolikt på utbytesreaktioner i marken. Precis som för kalcium fanns det en tydlig doseffekt när marken behandlades med kalksten men inte med dolomitmalk. Det fanns även indikationer på att låga doser kan leda till en minskning av magnesiumhalten. Detta gäller framför allt 3 ton finmald kalksten/ha.

Några effekter på **kalium** kunde inte konstateras oavsett sort, dos och kornstorlek.

I detta försök har endast totalhalterna av **aluminium** analyserats. I samtliga fall utom ett (3 ton krossad kalksten) har aluminiumhalterna minskat långsiktigt oavsett dos, sort och kornstorlek. Doserna 6 resp. 12 ton/ha gav upphov till de kraftigaste minskningarna och för dolomitmalk var den dosberoende. Någon skillnad mellan de olika sorterna kunde inte urskiljas varför dosen, snarare än sorten, är mer betydelsefull för resultatet. Detta bekräftades även i den statistiska utvärderingen där ett signifikant samband kunde påvisas för dos men inte för sort.

När kalciumjoner tillförs marken deltar dessa i utbytesreaktioner vilket bland annat kan innebära att vätejoner frigörs och hamnar i markvätskan. I samtliga provytor har **vätejonkoncentrationen** minskat, oavsett dos, sort och kornstorlek. Generellt minskade halterna med ökad dos, men någon tydlig doseffekt noterades inte vare sig för kalksten eller dolomitmalk. Vilken typ av kalkmedel som har använts verkar inte spela någon roll, utom vid dosen 3 ton/ha. Vid låga doser ger krossad och finmald dolomit upphov till en större minskning än kalksten. Några statistiskt säkerställda samband kunde inte påvisas.

Som ett resultat av ökade Ca-halter och minskade Al-tot halter har även **BC/Al-kvoten** ökat i samtliga fall utom två (3 ton krossad och finmald kalksten) där behandlingseffekten är försumbar. Ökningen är dosberoende när kalksten används men inte för dolomit. Statistiskt fanns det ett säkerställt samband både mellan dos och sort.

Det finns inga belägg för att de olika behandlingarna har lett till ett ökade **halter av nitratkväve**, oavsett dos, sort och kornstorlek. Detta trots att försöksområdet är beläget i ett område med högt kvävenedfall (historiskt och nuvarande). Inte heller har några behandlingseffekter kunnat påvisas för vare sig **järn, natrium, klorid, sulfat, TOC eller mangan**.

## 10.2 Betydelse av markdjup

Skillnaderna i markvattenkvalitet mellan 25 och 50 cm var relativt små i de obehandlade referensområdena under hela försöksperioden. Samtliga försöksled och parametrar som analyserats vid alla provtagningsstillfällen (ej anjoner) redovisas i bilaga 4. Det fanns en tendens till högre halter av H<sup>+</sup>, och K samt lägre halter av Na, på 25 cm jämfört med 50 cm. De olika behandlingarna orsakade inga uppenbara förändringar av det förhållandet. Möjligen minskade surhetsgraden något mer på 25 cm än 50 cm de första åren efter behandling, samtidigt som halterna av Ca och Mg ökade något mer på 25 cm. Det finns enstaka exempel på stora skillnader mellan medelhalter på 25 och 50, men inget generellt mönster i de behandlade provytorna som kan knytas till dos eller sort av kalk.

## 10.3 Betydelse av kalkdos

Generellt ökar markvattenhalterna mer när marken behandlas med 6 eller 12 ton kalk/ha än när 3 ton kalk/ha sprids. I vissa fall erhöles även en doseffekt, det vill säga ju högre dos desto större effekt. Detta var tydligt för Ca och Mg när kalksten användes och för Al-tot när dolomitkalk användes.

## 10.4 Betydelse av kalksort

Finmalda kalksorter ökar markvattenhalterna i större utsträckning än grovkorniga. Några tydliga skillnader mellan kalksten och dolomitkalk finns inte med undantag av Mg där spridning av dolomitkalk ledde till högre koncentrationer.

## 10.5 Betydelse för rekommendationer

Enligt Skogsstyrelsen rekommendationer bör skogsmarker som bedöms ha en otillräcklig återhämtning från försurning inom 20-25 år, åtgärdas. Detta gäller framför allt de sydvästra delarna av Sverige. I Skogsstyrelsens försöksverksamhet prövas en blandning av 2 ton krosskalk och 2 ton skogsbränsleaska per hektar (vilket motsvarar en kalkverkan på 3 ton/ha). Åtgärden ska bland annat leda till att halterna av aluminium i markvatten minskar utan att negativa sidoeffekter.

Under de 12 år som dosförsöket pågått har en rad positiva effekter på markvattenkemin konstaterats, men detta gäller framför när högre doser och finmalda sorter har använts. Baserat på resultaten från detta experiment har behandling med 3 ton krosskalk inte lett till kraftiga behandlingseffekter på markvattenkemin under de 12 år som försöket varade. Liknande resultat under fem år efter behandling (3 ton per ha, krossad kalksten och dolomit 2:1) finns även beskrivna från undersökningar av markvatten i 35 kalkade provytor i gran- och tallskog i hela södra Sverige inom Skogsstyrelsens försöksverksamhet (Akselsson, m. fl., 1998). På grund av den långsamma nedträngningen av kalk i mineraljord kan tydliga effekter förväntas först senare, sannolikt efter flera decennier (Larsson, m. fl., 2003; Uggla, m. fl., 2003). Det gör att dosen 3 ton inte snabbt kan minska surhetsgraden kraftigt i hela rotzonen (ca 0-40 cm), utan åtgärden kan ge effekt på längre sikt. Högre doser och finmalda kalk kan dock ge en snabb effekt på större djup i mineraljorden kort tid efter behandling.

Kvoten mellan baskatjonhalten och halten oorganiskt aluminium (BC/Al) i markvattnet används ofta som ett mått på risken för försurningseffekter (Staaf & Tyler, 1995; Staaf, m. fl., 1996). Kvoter lägre än 1 bedöms medföra ökad risk för skador på skogsträdens finrötter (Sverdrup och

Warfvinge, 1993). Denna observation var en viktig bakgrund till dosförsöket när det planerades, där syftet bland annat var att pröva hur snabbt och i vilken omfattning olika kalkmedel och doser kunde öka BC/Al-kvoterna i försurad skogsmark. Mätningarna innan behandling visade att ca halva beståndet som dosförsöket etablerades i hade BC/Al kvoter under 1 i markvatten på 50 cm (Akselsson & Westling, 1999). Samtliga doser och kalkmedel ökade BC/Al kvoten i försöket på lång sikt (9-12 år), men effekten av 3 ton per ha krossad och finmald kalksten var mycket liten. Däremot hade dolomit en tydlig effekt med 3 ton per ha. Högre givor än 3 ton av alla kalkmedel ökade i regel BC/Al kvoten snabbt efter behandling. Även de obehandlade kontrolltyorna uppvisade ökad BC/Al kvot 9-12 år efter försökets start, vilket indikerar en naturlig återhämtning som minskar behovet av att snabbt motverka låga kvoter i rotzonen med tanke på rotskador. En återhämtning från försurning i mark och vatten kan observeras i stora delar av de antropogen försurade delarna av landet (Bertills, 2003). En slutsats är därför att det akuta behov av att snabbt minska försurningen i vissa skogsjordar, med tanke på risken för skogsskador, inte längre är lika stort som i början av 1990-talet på grund av att depositionen av starksyra minskat kraftigt. Däremot finns fortfarande behov att motverka försurning av ytvatten i skogslandskapet i vissa områden (Bertills, 2003). De små effekterna av 3 ton kalk på markvatten i väl-dränerad mineraljord i försöket står i viss mån i kontrast till tydligare och varaktiga effekter på ytvatten när fastmarken i hela avrinningsområdet med skog kalkats (Zetterberg & Westling, 2005). Fastmark har dock en stor variation från torra till blöta marker och avstånd till surdråg och vattendrag. Utlakningen av basiska ämnen från de bäcknära fuktiga/blöta partier är sannolikt relativt stor de första åren efter kalkning och på sikt kan avlösas av bidrag från torrare områden på längre avstånd från vattenvägarna. Dosser över 3 ton per ha vid kalkning och askbehandling av fastmark kan dock övervägas för att påskynda effekten även på ytvatten (Larsson, m. fl., 2003).

Detta försök visar även att inga oönskade effekter uppstod i markvatten, som ökade halter av nitratkväve, trots höga doser och finmalda kalksorter.

## 11 Referenser

- Akselsson, C., Larsson, P-E. & Westling, O. 1998. Markkemi och markvatten i kalkad skog. Årsrapport 1997. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1318. 47 s.
- Akselsson, C. & Westling, O. 1999. Markvattenkemins rumsliga variation i ett granbestånd i södra Sverige. IVL Rapport B1319. 23 s.
- Akselsson, C., Westling, O., Larsson, P-E. & Petersson, P. 2000. 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. IVL Rapport B1386. 57 s.
- Bertills, U. (red.) 2003. Bara naturlig försurning. Underlagsrapport till fördjupad utvärdering av miljömålsarbetet. Naturvårdsverket Rapport 5317. 147 s.
- Hallgren Larsson E., Knulst, J., Lövblad, G., Malm, G., Sjöberg, K & Westling, O. 1997. Luftföroreningar i södra Sverige 19985-1995. IVL Rapport B1257. 142 s.
- Hultberg, H., Nilsson, S. I. & Nyström, U. 1995. Effects on soils and leaching after application of dolomite to an acidified forested catchment in the lake Gårdsjön watershed, south-west Sweden. *Water, Air and Soil Pollution* 85: 1033-1038.
- Johansson, M-B., Nilsson, T. & Olsson, M. 1999. Miljökonsekvensbeskrivning av Skogsstyrelsens förslag till åtgärdsprogram för kalkning och vitalisering. Skogsstyrelsen rapport 1:1999. 22 s.

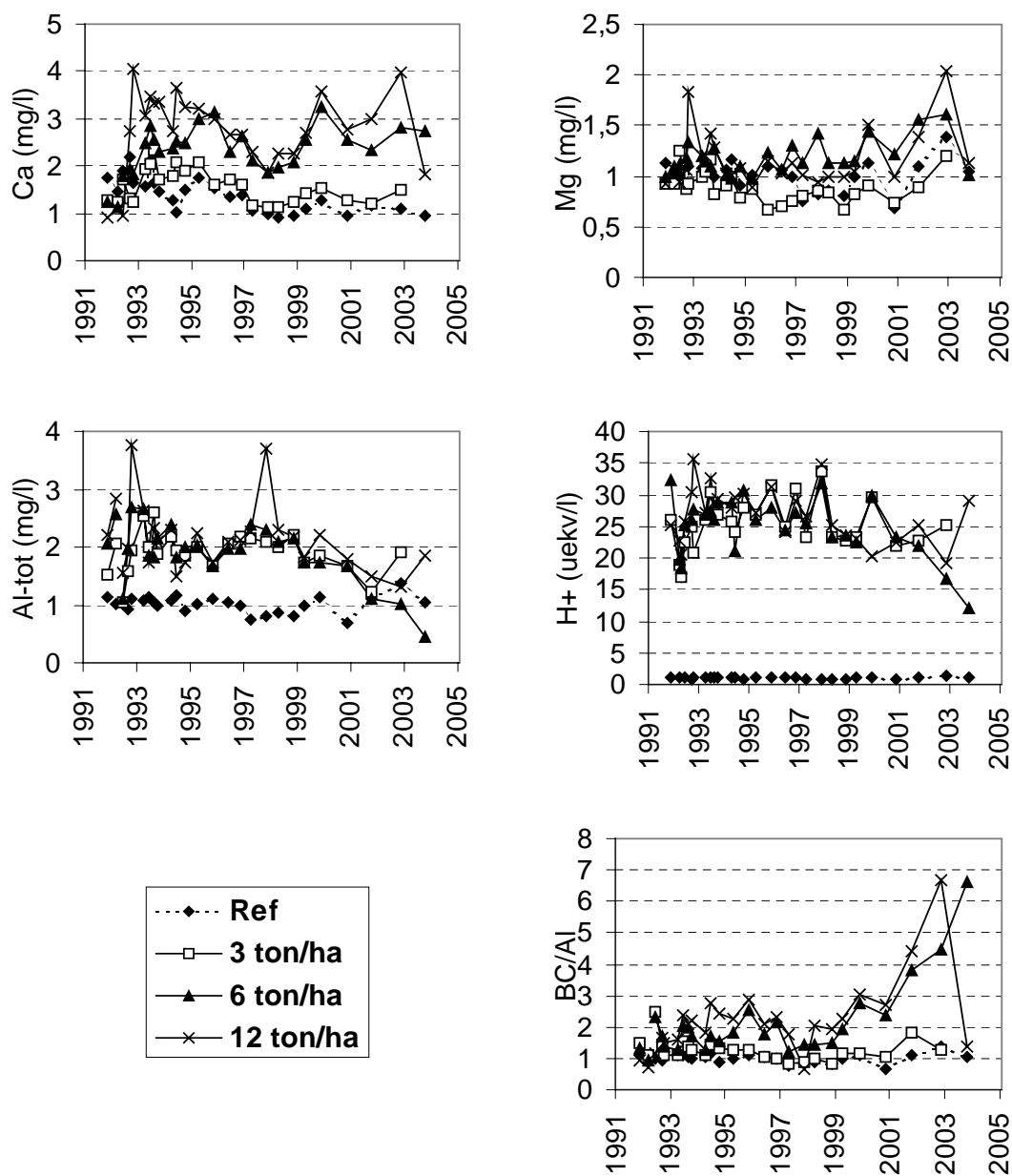
- Larsson, P-E., Akselsson, C., Bengtsson, R. & Bjelke, U. 1999. Biologiska effekter i kalkad skog. Årsrapport 1998. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1343. 58 s.
- Larsson, P-E., Uggla, U. & Westling, O. 2003. Långsiktiga effekter av skogsmarkskalkning på mark- och markvattenkemi. Årsrapport 2001. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1524. 51 s.
- Larsson, P-E. & Westling, O. 1997. Ytvatten i kalkade avrinningsområden. Årsrapport 1996. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1279.65 s.
- Larsson, P-E., Westling, O. & Abrahamsson, I. 2003. En integrerad strategi för kalk- och askspredning i avrinningsområden. Vattenkemiska effekter av markbehandlinger. IVL Rapport B1435. 33 s.
- Liljegren, A. (red.). 2005. För Kronobergs läns Luftvårdsförbund. Övervakning av luftföroreningar i Kronobergs län. Resultat till och med september 2004. IVL Rapport B1614. 24 s.
- Orth, L. & Westling, O. 1998. Tillförsel av aska och kalk till skogsmark i södra Sverige. Statens Energimyndighet ER 5: 1998. 39 s + bilagor.
- Staaf, H. & Tyler, G. (red.) 1995. Effects of acid deposition and tropospheric ozone on forest ecosystems in Sweden. Ecological Bullentins 44.
- Staaf, H., Persson, T. & Bertills, U. 1996. Skogsmarkskalkning. Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet. Naturvårdsverket Rapport 4559. 290 s.
- 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.
- Uggla, E., Larsson, P-E. & Westling, O, 2003. Markkemi i kalkad skog. Lägesrapport 10 år efter kalkning. Årsrapport 2002. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1536. 25 s.
- Uggla, E., Hallgren Larsson, E. & Malm, G. 2004. Krondroppsnätet - Tidsutveckling, trendbrott och nationella miljömål. IVL Rapport B1599. 34 s.
- Westling, O. & Hultberg, H. 1991. Liming and fertilisation of acid forest soils: short term effects on runoff from small catchments. Water, Air and Soil Pollution 54, 391-407.
- Zetterberg, T. & Westling, O. 2005. Utlakning från kalkade avrinningsområden. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1642. 21 s.
- Zetterberg, T., Akselsson, C. & Westling O. 2006. Markvattenkemiska effekter vid spridning av aska på skogsmark. Slutrapport från ett 10-årigt dosförsök. IVL Rapport B1658. 30 s.

## Bilaga 1 Deposition

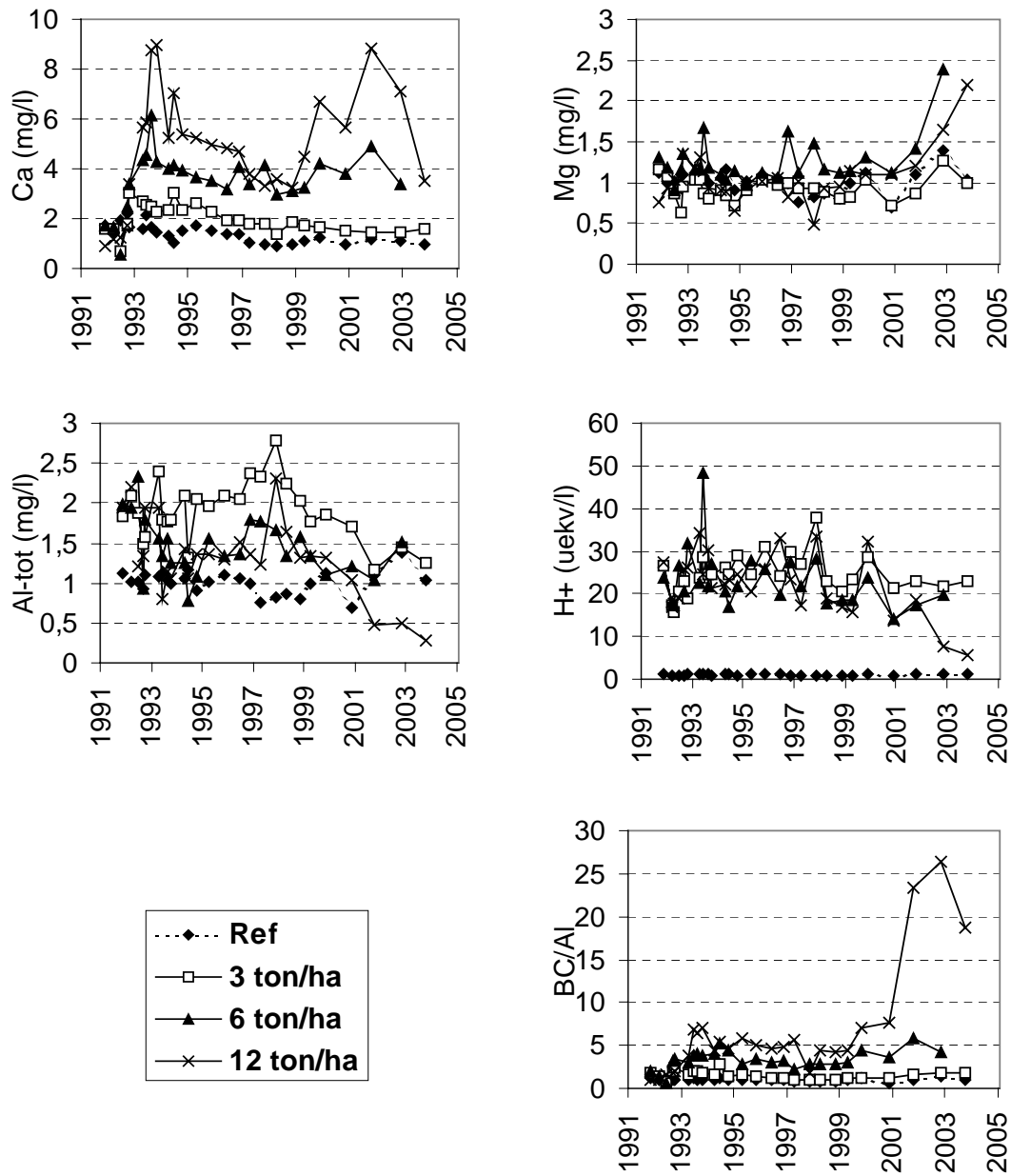
Deposition på öppet fält och i form av krondropp i granskog i dosförsöket i Asa försökspark. Kg per ha och år under perioden 1992 till 2004. Mätningarna på öppet fält avslutades 2000. Insamlaren på öppet fält flyttas en kortare sträcka 1998. Krondropp mättes de två första åren utanför försöket i ett närbeläget granbestånd.

	Lokal	År	Nb mm	H+	SO <sub>4</sub> -S	SO <sub>4</sub> -S exc	Cl	NO <sub>3</sub> -N	NH <sub>4</sub> -N	Ca	Mg	Na	K	Mn
öppet fält	G 06 A	1992	644	0.189	4.87	4.56	6.61	3.44	3.28					
	G 06 A	1993	765	0.235	6.42	5.66	16.33	3.72	4.01					
	G 06 A	1994	932	0.223	5.39	4.96	9.48	3.31	3.26					
	G 06 A	1995	983	0.303	6.85	6.19	14.27	4.18	3.80	3.04	0.97	7.98	1.23	0.03
	G 06 A	1996	642	0.172	3.99	3.76	4.99	2.92	2.52	1.76	0.60	2.89	1.15	0.09
	G 06 A	1997	838	0.234	4.45	3.97	10.48	3.72	3.24	2.55	1.04	5.76	1.14	0.16
	G 06 B	1998	1010	0.238	5.02	4.41	13.13	4.07	3.45	2.14	1.16	7.61	2.61	0.21
	G 06 B	1999	870	0.210	4.90	4.16	16.04	4.04	3.29	2.13	1.41	9.53	2.18	0.16
	G 06 B	2000	1098	0.228	5.68	5.04	13.76	4.69	4.41	1.88	1.52	8.25	2.78	0.24
krondropp	G 06 A	1992	353	0.203	12.04	11.17	18.73	1.37	1.29	6.73	2.91	8.20	15.25	1.43
	G 06 A	1993	382	0.302	16.37	15.06	28.34	1.54	1.61	7.80	3.66	13.63	14.32	1.83
	G 60 A	1994	560	0.185	9.20	8.39	17.49	2.38	1.95	4.58	1.99	8.70	11.96	1.55
	G 60 A	1995	540	0.126	8.16	7.50	14.26	1.92	1.28	5.47	1.92	7.03	12.14	1.36
	G 60 A	1996	400	0.075	6.08	5.61	10.02	1.84	1.14	4.26	1.71	4.98	11.68	1.18
	G 60 A	1997	548	0.081	6.04	5.26	16.94	2.12	1.15	4.46	2.14	8.89	13.67	1.33
	G 60 A	1998	593	0.089	6.04	5.15	19.25	1.52	1.51	4.44	2.16	9.28	16.52	1.08
	G 60 A	1999	545	0.057	5.12	4.29	17.89	1.29	0.88	4.16	2.13	9.01	15.58	1.64
	G 60 A	2000	566	0.051	5.07	4.40	14.46	1.41	1.04	3.45	1.93	7.63	16.01	1.20
	G 60 A	2001	429	0.036	4.46	3.90	12.04	1.34	1.01	3.09	1.65	5.02	16.33	0.96
	G 60 A	2002	539	0.034	4.01	3.22	17.23	1.39	0.69	2.78	1.72	8.19	15.35	0.70
	G 60 A	2003	452	0.028	3.68	3.09	12.77	1.04	1.06	2.38	1.66	5.47	18.40	0.92
	G 60 A	2004	540	0.041	3.36	2.66	15.04	1.16	1.01	3.54	1.92	6.97	12.52	0.58

## Bilaga 2 Tidsutveckling markvattenkemi

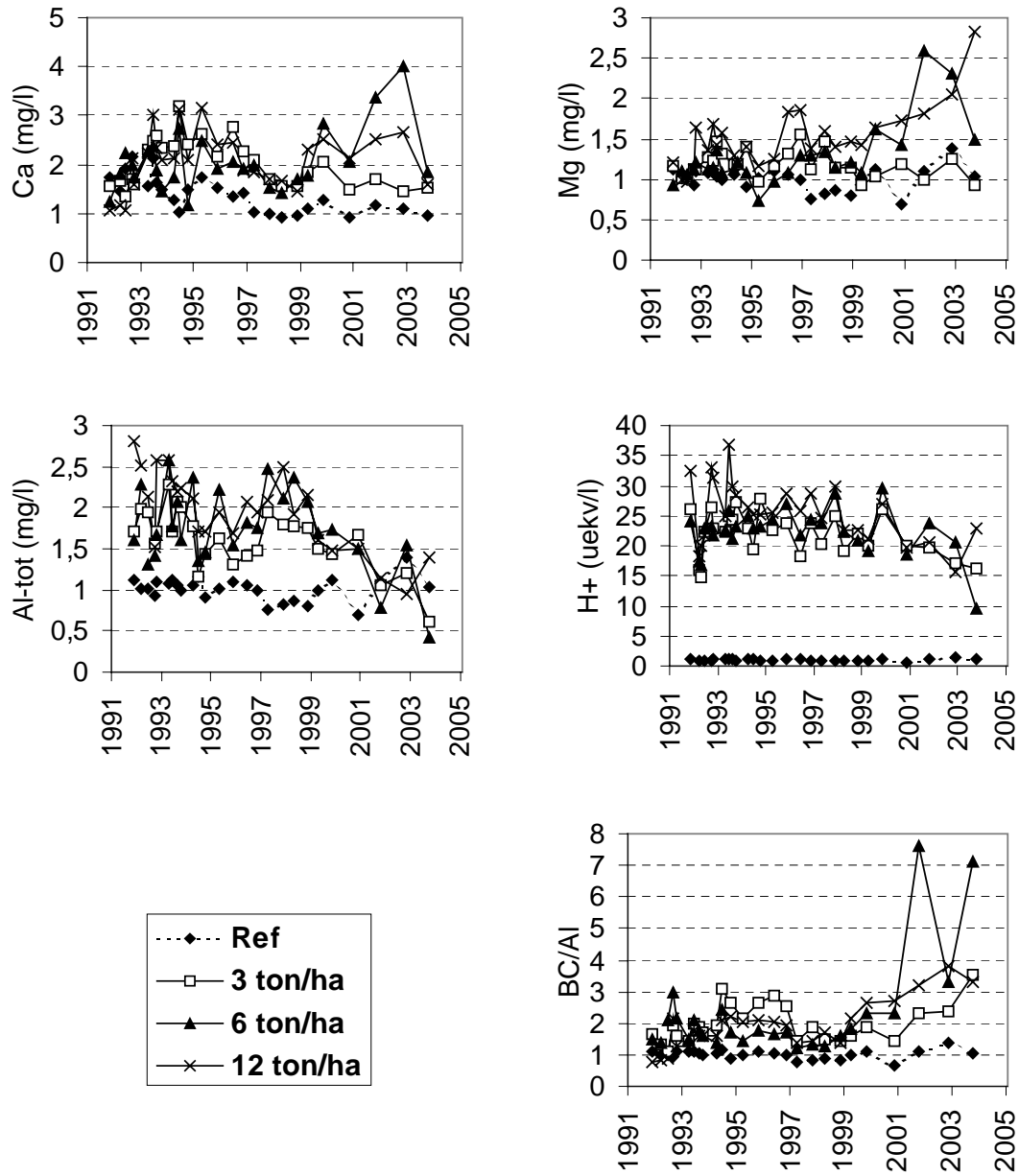


**Bilaga 2a.** Tidsutveckling för koncentrationerna av Ca, Mg, Al, H och BC/Al i markvattnet före och efter kalkning (juni 1992) på 50 cm djup vid olika doser av krossad kalksten. Observera att y-axlarna har olika skalor.

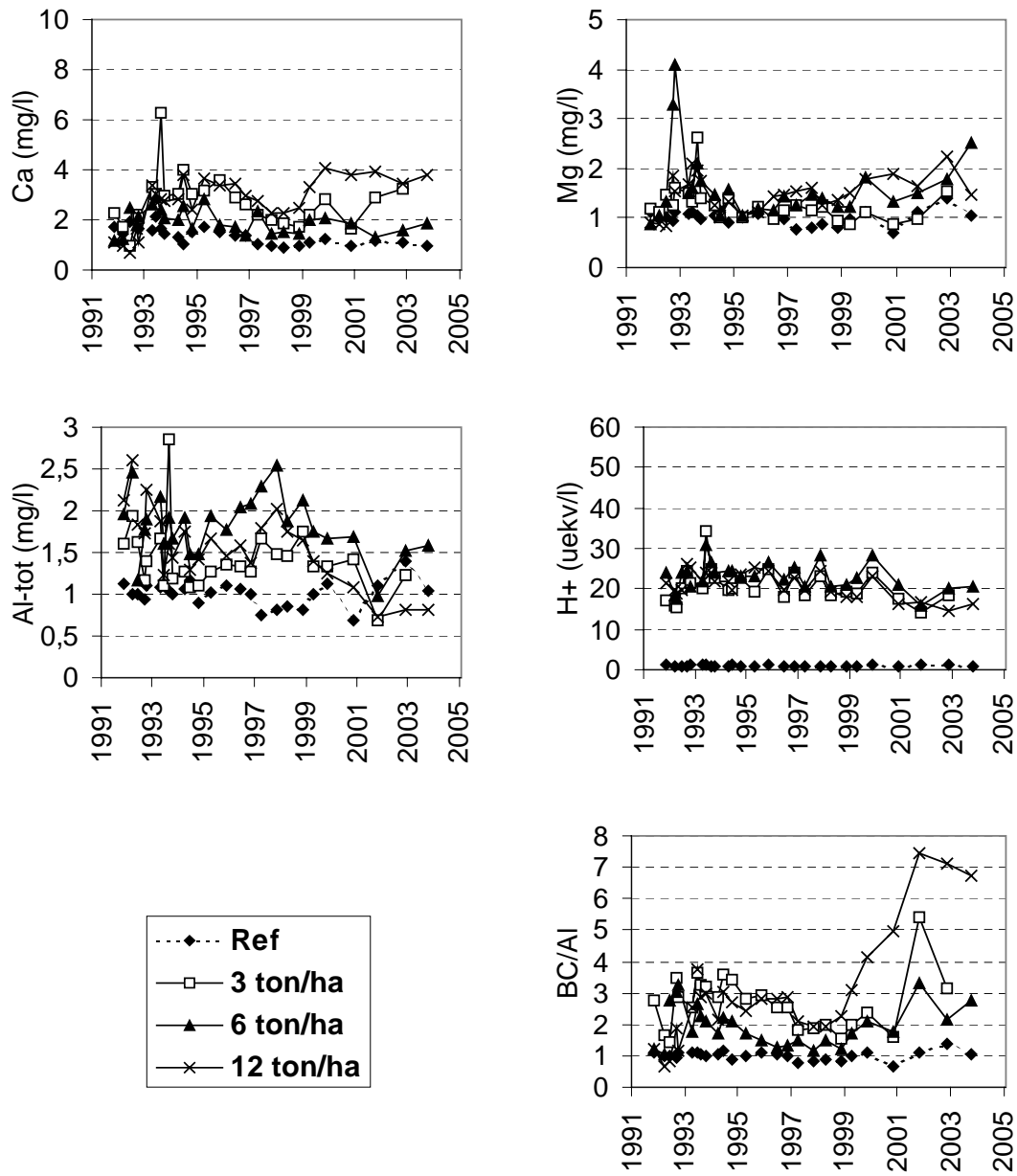


**Bilaga 2b.** Tidsutveckling för koncentrationerna av Ca, Mg, Al, H och BC/Al i markvattnet före och efter kalkning (juni 1992) på 50 cm djup vid olika doser av finmald kalksten. Observera att y-axlarna har olika skalor.





**Bilaga 2c.** Tidsutveckling för koncentrationerna av Ca, Mg, Al, H och BC/Al i markvattnet före och efter kalkning (juni 1992) på 50 cm djup vid olika doser av krossad dolomit. Observera att y-axlarna har olika skalor.



**Bilaga 2d.** Tidsutveckling för koncentrationerna av Ca, Mg, Al, H och BC/Al i markvattnet före och efter kalkning (juni 1992) på 50 cm djup vid olika doser av finmald dolomit. Observera att y-axlarna har olika skalor.

## Bilaga 3 Kort- och långsiktiga behandlingseffekter

Medelvärdesförändringen i markvatten på 50 cm i mg/l (H är uttryckt som uekv/l) mellan försöksleden och referenserna före respektive efter behandling (0-3 samt 9-12 år). För mer information om medelvärdesförändringen, se avsnitt 7.

Försöksled	Kortsiktiga behandlingseffekter 0-3 år												
	Ca	Mg	K	Al-tot	H	BC/Al*	SO4-S	NO3-N	Cl	Na	Mn	Fe	TOC
Krossad kalksten (3)	0.56	0.05	0.06	0.21	-2.87	0.23	-0.81	0.000	0.14	-6.11	0.00	0.03	-2.29
Finmald kalksten (3)	0.83	-0.22	-0.02	-0.13	-3.31	0.44	-0.68	0.000	-0.94	-8.14	-0.04	0.03	2.41
Krossad dolomit (3)	0.64	0.17	-0.01	-0.11	-3.02	0.69	0.13	0.000	1.95	-5.85	-0.05	-0.17	-1.68
Finmald dolomit (3)	1.21	0.36	-0.02	-0.36	-1.76	1.08	9.54	-0.002	9.22	-6.10	-0.04	0.41	-10.01
Krossad kalksten (6)	1.19	0.12	-0.02	-0.18	-4.29	0.69	3.22	-0.018	-1.65	-5.71	-0.04	-0.02	-13.16
Finmald kalksten (6)	2.42	-0.02	0.02	-0.61	-2.56	2.18	9.86	0.001	8.71	-8.41	-0.06	0.04	-12.71
Krossad dolomit (6)	0.36	0.11	0.07	-0.16	-3.85	0.67	-0.05	0.001	5.24	-6.32	-0.03	0.02	5.79
Finmald dolomit (6)	1.06	1.05	-0.02	-0.45	-3.65	1.36	18.96	0.003	16.20	-5.69	-0.03	-0.01	10.90
Krossad kalksten (12)	2.16	0.23	-0.02	-0.31	-1.67	1.38	18.08	0.003	16.35	-6.53	-0.01	-0.02	12.32
Finmald kalksten (12)	4.16	0.21	-0.06	-0.68	-3.13	3.63	0.16	-0.022	10.09	-6.57	-0.04	-0.13	-1.28
Krossad dolomit (12)	1.14	0.33	-0.02	-0.54	-3.36	1.10	6.80	-0.002	-4.20	-6.73	-0.01	-0.01	-8.06
Finmald dolomit (12)	1.63	0.64	-0.02	-0.77	-4.54	1.73	5.99	0.000	4.67	-6.78	-0.02	-0.01	-1.26

Försöksled	Långsiktiga behandlingseffekter 9-12 år												
	Ca	Mg	K	Al-tot	H	BC/Al*	SO4-S	NO3-N	Cl	Na	Mn	Fe	TOC
Krossad kalksten (3)	0.57	-0.05	-0.01	0.27	-1.18	0.26	-1.11	0.000	0.80	0.87	0.01	0.01	-3.09
Finmald kalksten (3)	0.35	-0.24	0.01	-0.13	-1.70	0.12	-2.67	0.000	-0.84	0.52	-0.01	0.00	6.01
Krossad dolomit (3)	0.46	-0.15	0.01	-0.24	-4.95	1.01	-0.60	0.000	-0.76	0.45	-0.05	-0.22	-1.24
Finmald dolomit (3)	1.53	-0.03	-0.09	-0.27	-4.50	2.05	3.45	-0.003	8.36	2.04	0.00	-0.03	-0.69
Krossad kalksten (6)	1.87	0.33	-0.02	-0.78	-8.98	3.25	0.88	-0.018	2.31	1.16	-0.05	-0.02	-3.34
Finmald kalksten (6)	2.90	0.51	0.02	-0.09	-5.76	3.19	2.85	0.002	20.97	2.32	0.05	0.00	-1.79
Krossad dolomit (6)	2.40	1.16	0.09	-0.33	-2.73	3.97	-6.74	0.000	-0.91	4.41	0.03	0.01	-1.94
Finmald dolomit (6)	0.81	0.72	0.13	-0.33	-5.70	1.58	17.51	0.003	11.07	1.52	-0.05	0.00	14.61
Krossad kalksten (12)	2.56	0.42	-0.04	-0.46	-3.34	3.67	17.26	0.003	16.47	1.55	-0.02	-0.01	11.16
Finmald kalksten (12)	6.33	0.62	0.14	-1.11	-12.23	22.33	0.46	-0.022	2.20	0.06	-0.04	-0.16	0.21
Krossad dolomit (12)	1.79	0.83	0.21	-0.98	-8.39	2.62	0.34	-0.003	-6.89	-0.06	-0.04	0.01	4.26
Finmald dolomit (12)	3.18	0.81	0.04	-1.07	-8.17	6.27	7.10	0.004	-0.98	-0.34	-0.02	0.00	-0.04

\*Al-tot

## Bilaga 4 Jämförelse mellan 25 och 50 cm djup

Markvattenkemi på 25 respektive 50 cm djup för respektive försöksled, uttryckt som kvotförhållande. Ett värde över ett indikerar att halterna är högre på 25 cm nivån jämfört med 50 cm nivån och vice versa. Tabellen visar kvoter efter kort respektive lång tid efter behandling.

Försöksled	Förhållandet i markvattenkemi mellan 25 cm och 50 cm under perioden 0-3 år								
	H+	Ca	Mg	Na	K	Mn	Fe	Al-tot	BC/Al*
Referenser	1.3	1.0	1.0	0.5	2.1	1.5	1.0	1.1	0.9
Krossad kalksten (3)	1.3	0.9	0.9	1.0	1.1	0.9	0.8	1.0	1.7
Finmald kalksten (3)	1.2	1.3	1.1	1.1	0.8	1.1	0.5	1.1	1.0
Krossad dolomit (3)	1.0	0.9	1.1	0.8	2.1	0.8	0.7	0.9	1.2
Finmald dolomit (3)	1.3	1.0	1.0	1.2	0.8	1.5	0.1	1.3	0.8
Krossad kalksten (6)	1.1	0.9	0.8	0.7	1.7	1.0	0.7	1.0	0.7
Finmald kalksten (6)	0.8	1.0	0.8	0.7	1.7	0.7	0.5	0.8	1.3
Krossad dolomit (6)	1.2	1.2	1.3	1.1	0.7	5.3	2.5	1.1	1.0
Finmald dolomit (6)	1.0	1.1	1.0	0.8	1.1	1.2	1.6	0.9	1.2
Krossad kalksten (12)	0.9	1.1	0.8	0.7	2.2	0.7	1.7	0.8	1.4
Finmald kalksten (12)	0.6	1.2	0.8	0.8	1.3	0.8	0.3	0.8	2.3
Krossad dolomit (12)	1.1	0.9	0.9	0.8	1.9	0.9	1.7	1.0	0.9
Finmald dolomit (12)	1.0	1.0	1.4	0.8	1.6	0.8	1.3	0.8	1.7

Försöksled	Förhållandet i markvattenkemi mellan 25 cm och 50 cm under perioden 9-12 år								
	H+	Ca	Mg	Na	K	Mn	Fe	Al-tot	BC/Al*
Referenser	1.1	1.0	0.9	0.8	2.8	1.2	2.4	1.1	0.8
Krossad kalksten (3)	1.0	0.8	0.9	1.3	1.8	0.4	2.5	1.0	0.9
Finmald kalksten (3)	1.0	1.2	1.0	1.1	0.6	0.5	1.4	0.8	1.7
Krossad dolomit (3)	1.1	0.9	1.2	1.1	0.6	0.4	1.5	1.1	0.9
Finmald dolomit (3)	1.3	0.5	0.9	0.8	2.5	0.9	1.7	1.4	0.6
Krossad kalksten (6)	1.0	1.0	0.7	0.6	1.8	0.6	1.6	1.3	0.7
Finmald kalksten (6)	1.2	0.9	0.4	0.5	12.7	0.4	1.9	0.7	1.9
Krossad dolomit (6)	0.8	0.5	0.7	0.6	0.4	0.2	2.0	1.0	0.7
Finmald dolomit (6)	1.3	1.2	1.2	1.1	0.3	1.2	2.0	1.1	1.1
Krossad kalksten (12)	0.7	1.2	0.8	0.6	2.2	0.8	1.7	0.8	6.8
Finmald kalksten (12)	1.1	0.6	0.7	0.8	0.2	0.5	0.5	1.5	0.3
Krossad dolomit (12)	1.2	1.2	1.6	1.4	0.3	1.3	0.6	1.4	1.2
Finmald dolomit (12)	0.8	0.6	1.3	0.7	1.1	1.0	1.4	0.7	1.2

\*Al-tot