



rapport

IVL Svenska Miljöinstitutet AB

Markkemi och markvatten i kalkad skog

Årsrapport 1997

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



Cecilia Akselsson, Per-Erik Larsson och Olle Westling

B 1318

Aneboda, december 1998

<p>Organisation/Organization Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning</p> <p>Address/Address IVL Aneboda SE-360 30 LAMMHULT</p> <p>Telefonnr/Telephone 0472-26 20 75</p>	<p>RAPPORTSAMMANFATTNING Report Summary</p> <p>Projekttitel/Project title</p> <p>Anslagsgivare för projektet/Project sponsor Skogsstyrelsen IVLs samfinansierade forskningsprogram</p>
<p>Rapportförfattare, author Akselsson Cecilia, Larsson Per-Erik och Westling Olle</p>	
<p>Rapportens titel och undertitel/Title and subtitle of the report Markkemi och markvatten i kalkad skog. Årsrapport 1997. Effektoppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark.</p>	
<p>Sammanfattning/Summary Skogsstyrelsens försöksverksamhet presenteras i årliga rapporter och denna rapport beskriver effekter i marken. Den baseras på mark- och markvattenkemiska undersökningar inom Skogsstyrelsens storskaliga försök med skogsmarkskalkning i områden med försurade jordar i södra och sydvästra Götaland. Rapporten omfattar tidsperioden hösten 1990 till hösten 1997.</p> <p>Fem år efter kalkning hade bara en liten del av tillförd kalk trängt ner djupare än humuslagret. På vissa provytor låg en del av kalken fortfarande kvar i förnan. I humusskiktet har basmättnaden nästan dubblats samtidigt som vätejon- och aluminiumhalten mer än halverats. Förändringen började redan under första året. Mineraljorden (0-10 cm) uppvisar signifikanta förändringar av halten utbytbara väte- och aluminiumjoner (minskning) samt basmättnad (ökning).</p> <p>Kalkningen påverkade markvattenkemin tillfälligt något eller några år efter kalkningen. Detta noterades främst för kalciumhalten, som höjdes kraftigt i förhållande till referensytorna. I de flesta ytorna skedde även en minskning av aluminiumhalten samt en ökning av BC/Al-kvoten. Effekterna var dock i de flesta fall kortvariga men för kalciumhalten finns dock tydliga tendenser till mer bestående effekter i markvattnet.</p> <p>Undersökningarna av markkemi och markvatten under de första fem åren efter kalkning kan inte visa att utlakningen, eller risken för utlakning, av oorganiskt kväve har ökat på grund av behandlingen.</p> <p>Resultaten efter fem år visar att det finns goda förutsättningar att på sikt nå målen som berör markkemiska aspekter med det kalkningskoncept som prövats i Skogsstyrelsens försöksverksamhet. I humuslagret överskreds i vissa fall målet på högst pH 5,0 efter kalkning, men den genomsnittliga ökningen var endast 0,7 enheter. På grund av att en stor andel av tillförd kalk fortfarande fanns i humuslagret efter fem år finns det en betydande potential för att basmättnaden i mineraljorden skall öka ytterligare och på sikt närma sig målet som innebär en fördubbling av basmättnadsgraden i olika markskikt. Den gradvisa upplösningen av den relativt långsamt vittrande kalksorten indikerar att behandlingseffekten kommer att bli utsträckt i tiden på ett sätt som eftersträvas i målsättningen med åtgärderna.</p>	
<p>Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område, näringsgren eller vattendrag/Keywords Kalkning, försurning, skogsmark, markkemi, markvatten, basmättnad, aluminium, kalcium.</p>	
<p>Bibliografiska uppgifter/Bibliographic data IVL Rapport B 1318</p>	
<p>Beställningsadress för rapporten/Ordering address IVL, Biblioteket, Box 21060, SE-100 31 Stockholm, Sweden</p>	

Innehållsförteckning

Sammanfattning	6
Summary	7
1. Introduktion	8
1.1 Program för mark- och markvattenundersökningar	8
1.2 Kalkning i undersökta områden	9
2. Markkemi	10
2.1 Metodik	10
2.1.1 Provtagning och analys	10
2.1.2 Databearbetning	10
2.2 Markkemin före behandling	11
2.3 Kalkningseffekter	12
2.3.1 Glödförlust och utbytbart kalium.....	13
2.3.2 Utbytbart kalcium och magnesium	14
2.3.3 Utbytbart väte och aluminium	14
2.3.4 Basmättnad	14
2.3.5 Kolkvävekvot	14
2.4 Omfördelning av tillförd kalk efter 1 och 5 år	17
3. Markvattenkemi	19
3.1 Metodik	19
3.1.1 Provtagning och analys	19
3.1.2 Databearbetning	19
3.2 Markvattenkemin före behandling	21
3.3 Kalkningseffekter	21
3.3.1 Kalcium	21
3.3.2 Magnesium.....	22
3.3.3 Aluminium.....	24
3.3.4 BC/Al-kvot.....	25
3.3.5 Vätejonhalt.....	27
3.3.6 Kväve.....	28
3.3.7 ANC.....	30
4. Diskussion och slutsatser	32
4.1 Behandlingseffekter	32

4.2 Jämförelse med uppsatta mål	34
4.3 Långsiktiga effekter av kalkning.....	36
5 Referenser	37
Bilaga 1 Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark	38
Bilaga 2 Ytor med avvikelser beträffande kalkmedlets egenskaper och giva	44
Bilaga 3 Markkemi i undersökta provytor före behandling	45

Omslagsbild: Skogsmark som nyligen behandlats med kalkstenskross, 3 ton/ha.

Sammanfattning

Skogsstyrelsens försöksverksamhet för kalkning och vitalisering av skogsmark innehåller ett omfattande effektuppföljningsprogram. Resultaten presenteras i årliga rapporter och denna rapport beskriver effekter i marken av kalkning med 3 ton krossad kalksten per hektar. Den baseras på mark- och markvattenkemiska undersökningar i samband med Skogsstyrelsens storskaliga försök med skogsmarkskalkning i områden med försurade jordar i södra och sydvästra Götaland. Rapporten omfattar tidsperioden hösten 1990 till hösten 1997. Resultaten sammanfattas i nedanstående punkter:

- Fem år efter kalkning hade bara en liten del av tillförd kalk trängt ner djupare än humuslagret. På vissa provytor låg en del av kalken fortfarande kvar i förnan. Detta innebär att de markkemiska effekterna i form av en minskning av utbytbara väte- och aluminiumjoner, samt en ökning av baskatjoner (kalcium och magnesium), efter fem år var koncentrerade till humusskiktet. Basmätnaden nära dubblerades samtidigt som vätejon- och aluminiumhalten mer än halverades. Förändringen började redan under första året.
- Fem år efter kalkning uppvisade mineraljorden (0-10 cm) signifikanta förändringar av halten utbytbara väte- och aluminiumjoner (minskning) samt basmättnad (ökning), trots att endast en mindre del av tillförd kalk trängt ned under humusskiktet. I genomsnitt ökade basmättnaden med cirka 50 %, aluminiumhalten minskade med cirka 10 % och vätejonhalten minskade med cirka 25 %.
- Markvattenkemin påverkades tillfälligt något eller några år efter kalkningen. Detta noterades främst för kalciumhalten, som höjdes kraftigt i förhållande till referensytorna. I de flesta ytorna skedde även en minskning av aluminiumhalten samt en ökning av BC/Al-kvoten. Effekterna var dock i de flesta fall kortvariga och efter bara något år var halterna tillbaka i referensytornas nivåer. För kalciumhalten fanns dock tydliga tendenser till mer bestående effekter i markvattnet. Kalciumhalten minskade under början av 1990-talet i okalkade ytor, medan nivån i kalkade ytor låg relativt konstant.
- Resultaten efter fem år visar att det finns goda förutsättningar att på sikt nå målen som berör markkemiska aspekter med det kalkningskoncept som prövats i Skogsstyrelsens försöksverksamhet. I humuslagret överskreds i vissa fall målet på högst pH 5,0 efter kalkning, men den genomsnittliga ökningen var endast 0,7 enheter. På grund av att en stor andel av tillförd kalk fortfarande fanns i humuslagret efter fem år finns det en betydande potential för att basmättnaden i mineraljorden skall öka ytterligare och på sikt närma sig målet som innebär en fördubbling av basmättnadsgraden i olika markskikt. Den gradvisa upplösningen av den relativt långsamt vittande kalksorten indikerar att behandlingseffekten kommer att bli utsträckt i tiden på ett sätt som eftersträvas i målsättningen med åtgärderna.
- Undersökningarna av markkemi och markvatten under de första fem åren efter kalkning kan inte visa att utlakningen, eller risken för utlakning, av oorganiskt kväve har ökat på grund av behandlingen. Studierna av markvatten på 50 cm i mineraljorden visar även att inga andra oönskade förändringar inträffade, samtidigt som den önskade minskningen av surhetsgraden var liten. För att höja pH-värde och minska aluminiumhalterna i markvattnet på 50 cm krävs att basmättnadsgraden ökar i djupare mineraljordsskikt, som kan ske på sikt med den tillförda kalkgivan.

Summary

The Swedish Board of Forestry coordinates extensive research concerning forest liming and nutrient compensation in Sweden. Results from the experimental work are presented in annual reports. This annual report for 1997 describes effects on soil chemistry (down to 10 cm in the mineral soil) and soil water chemistry (0.5 m) in experimental areas treated with 3 ton crushed limestone per hectare. Results from a period of five years after liming are presented.

The main conclusions five years after liming are as follows:

- Only a small part of the lime has reached below the humus layer. For this reason the liming effects in the soil are concentrated to this layer. The content of exchangeable hydrogen and aluminium ions decreased to half of the original content. The content of exchangeable base cations increased and the base saturation was almost doubled.
- The content of exchangeable hydrogen and aluminium ions in the mineral soil (0-10 cm) decreased (10% for aluminium and 25% for hydrogen) while the base saturation increased (50%). All differences were significant.
- Soil water chemistry was affected temporarily one or a couple of years after liming. The main effect was increased concentrations of calcium. Decreased concentrations of aluminium, and an increased ratio between base cations and aluminium, were also noticed. For calcium the effects were somewhat more continuous. The decreased concentrations of calcium observed at many sites in Sweden during the 90's were not found in the limed areas. In these areas the calcium concentrations were on the same level throughout the period.
- Results from the first five year period indicate possibilities to reach the aims of liming. However, in the humus layer the pH in some cases exceeded 5.0, contrary of the aim, but the increase was only about 0.7 units. The fact that a great proportion of the lime still after five years has not reached below the humus layer indicates a great potential for the base saturation to increase in the mineral soil. In the future it is likely for the base saturation to reach the goal, which is a doubling. The slow dissolution is a good sign of long lasting effects.
- Results from the first five years after liming also implies that the risk of nitrogen leaching has not increased as an effect of liming. The soil water chemistry did not show any negative effects during the five year period. The positive effects on this level were also very sparse. To obtain positive effects of liming on soil water at this level, the base saturation has to increase deeper in the mineral soil. This is possible, and even likely, in the long run.

1. Introduktion

Skogsstyrelsens försöksverksamhet för kalkning och vitalisering av skogsmark innehåller ett omfattande effektuppföljningsprogram. IVL (Institutet för Vatten- och Luftvårdsforskning) i Aneboda har tillsammans med Skogsvårdsstyrelserna huvudansvaret för uppföljningen. Huvuddelen av programmet är inriktat mot effekter på träd, mark och vatten, då kalkning utförts enligt Skogsstyrelsens koncept. Utöver detta basprogram finns även särskilda försök där olika typer av kalk och aska prövas, eller där effekter på svamp, kärlväxter, mossor och lavar studeras. I bilaga 1 presenteras Skogsstyrelsens program och koncept för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. Större delen av basprogrammet för effektuppföljning, samt de specialförsök som är samordnade med basprogrammet, utförs inom IVLs samfinansierade forskningsprogram med Skogsstyrelsen som huvudsaklig finansör.

Från och med 1997 presenteras resultat från Skogsstyrelsens effektuppföljningsprogram i årliga rapporter. Den första rapporten behandlade kalkningseffekter på ytvatten (Larsson & Westling, 1997). Denna andra rapport beskriver effekter i marken, och den baseras på markkemiska och markvattenkemiska mätningar i samband med Skogsstyrelsens försök med skogsmarkskalkning. Rapporten omfattar tidsperioden hösten 1990 till hösten 1997.

Syftet med denna studie kan sammanfattas i två punkter:

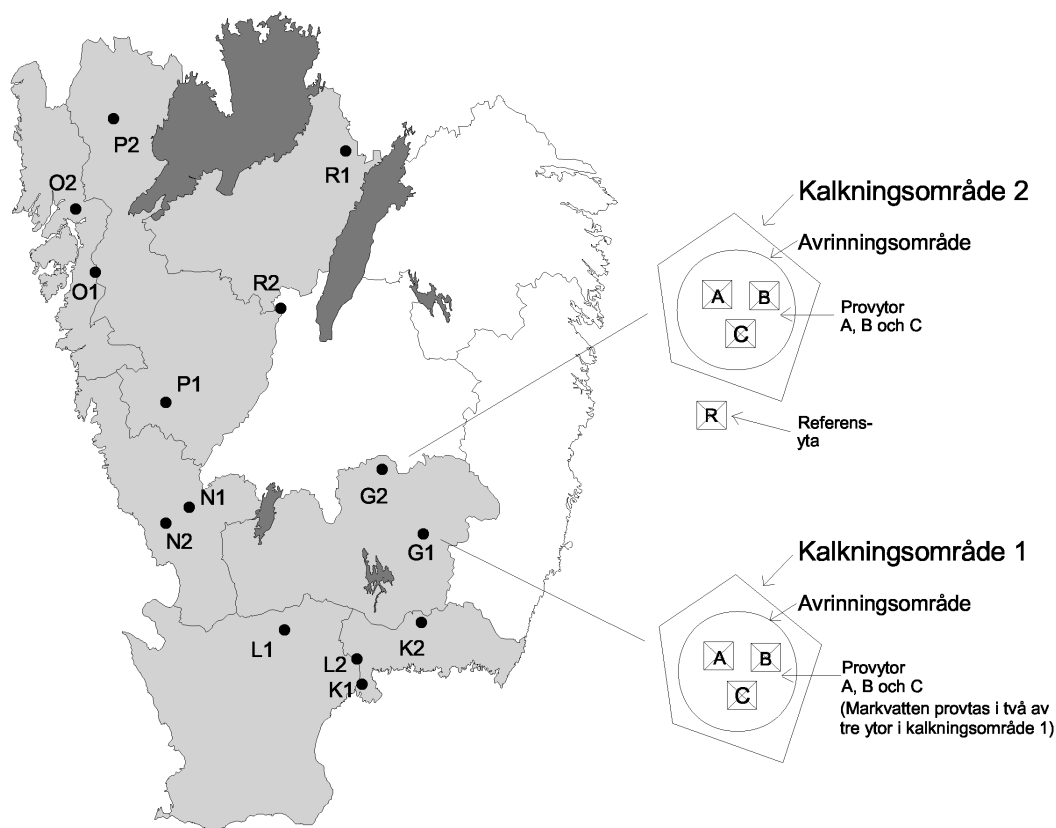
- Att utreda om det finns några kalkningseffekter på markvattenkemi och markkemi i 14 kalkade områden de första fem åren efter behandling.
- Att jämföra eventuella kalkningseffekter med målsättningarna för behandlingen i den mån det är möjligt efter enbart fem år.

Resultaten av de markvattenkemiska och de markkemiska mätningarna redovisas var för sig. Därefter följer ett avsnitt där resultaten vägs ihop och diskuteras.

1.1 Program för mark- och markvattenundersökningar

Basprogrammet för effektuppföljningen berörde sju län i södra Sverige när det inleddes 1990: Skåne, Blekinge, Halland, Kronobergs län, Älvsborgs län, Skaraborgs län och Göteborg och Bohuslän. Under perioden har Älvsborgs län, Skaraborgs län och Göteborg och Bohuslän slagits samman till Västra Götalands län. Figur 1 ger en geografisk överblick över försöksområdena som etablerades 1990.

I berörda län är två kalkningsområden på mellan 500 och 2000 ha uttagna (område 1 och 2). Varje kalkningsområde innesluter ett avrinningsområde på 10-250 ha, där de flesta försöken utförs. Inom respektive kalkningsområde finns tre permanenta provytor, belägna innanför avrinningsområdenas gränser. Provytorna används för olika typer av undersökningar, såsom markkemiska och markvattenkemiska provtagningar och studier av kronutglesning och tillväxt. I anslutning till område 2 i varje län finns även en referensyta. Detta innebär att det finns sammanlagt 49 provytor, varav sju är referensytor. Ytorna är avsedda att representera beståndsåldrarna 20, 40 och 60 år, och en yta av varje ålder finns i alla kalkade områdena. Referensytornas beståndsåldrar är tänkta att motsvara någon av dessa åldrar. Standardmått på provytorna är i de flesta fall antingen 30 x 30 eller 20 x 20 m.



Figur 1. De 14 kalkningsområdena i effektuppföljningsprogrammet. Provytorna A, B och C motsvarar beståndsåldrarna 60 år, 40 år respektive 20 år.

1.2 Kalkning i undersökta områden

Kalkning har i de flesta fall gjorts med skogskalk, även kallad Mg-kalk, som består av en blandning av krossad kalksten och dolomitisk kalksten i proportionerna 2:1. Områdena O1 i dåvarande Göteborg och Bohuslän, R1 i Skaraborgs län, N1 i Halland och P2 i Älvsborgs län utgör undantag. I O1 har ren dolomitkalk spridits, medan område R1 behandlats med granulerad finmald dolomitkalk. I N1 och P2 har kalk utan inblandning av magnesium använts. I samtliga områden har den avsedda givan varit 3 ton per hektar. Extra vikt lades vid att få en jämn spridning på kalken innanför avrinningsområdets gränser. I bilaga 2 ges en utförligare presentation över ytor som av olika skäl behandlats med kalk med avvikande egenskaper samt ytor där givan skiljer sig från den avsedda givan 3 ton/ha.

Behandlingen utfördes vid olika tidpunkter i område 1 och 2. Område 1 behandlades i allmänhet under hösten - vintern 1990-1991 och område 2 hösten 1991.

2. Markkemi

Den geografiska variationen är stor i alla skalor för både för markvattenkemi och markkemi. Däremot varierar inte markkemin lika mycket som markvattenkemin under korta tidsperioder som ett år. Av denna anledning undersöks inte markkemin lika ofta. De markkemiska undersökningarna i denna studie var främst inriktade på den del av olika ämnen som är tillgänglig för växter och som kan utlakas. Denna del förekommer i jonform och jonerna är mer eller mindre hårt bundna till markpartiklarnas yta och kallas utbytbara. Utöver utbytbara halter av olika ämnen undersöktes de totala halterna av viktiga näringsämnen, till exempel kväve, vilka huvudsakligen är organiskt bundna.

2.1 Metodik

2.1.1 Provtagning och analys

Markkemiska undersökningar utfördes på 42 provytor i 14 kalkade avrinningsområden, samt i sju referensytor (figur 1). Mätningarna gjordes vid tre tidpunkter, före kalkning (år 0), ett år efter kalkning (år 1) samt fem år efter kalkning (år 5). 30 provpunkter finns i varje provyta, belägna längs de båda diagonalerna (15 på varje). På varje provpunkt samlades prover in från tre skikt: humus, 0-5 cm och 5-10 cm. Ytterligare två skikt, 10-20 cm och 20-30 cm, har provtagits, torkats och sparats för eventuell senare analys. Humuslagrets tjocklek noterades för varje punkt. Proverna slogs ihop till två samlingsprover, ett för varje diagonal, varefter de analyserats. Analyserna omfattade glödförlust (organisk andel), pH(H₂O), pH(KCl), utbytesaciditet för aluminium (Al) och väte (H), utbytbara baskatjoner (obuffrad extraktion med ammoniumacetat) natrium (Na), kalium (K), kalcium (Ca) och magnesium (Mg) samt totala halter av kol (C), kväve (N), svavel (S), och fosfor (P).

2.1.2 Databearbetning

Datamaterialet bearbetades på flera olika sätt för att bedöma eventuella kalkningseffekter. Nedan följer en beskrivning av de olika metoderna.

Markkemisk utveckling i kalkade ytor

Genom att slå samman de 42 kalkade provytorna går det att få en generell uppfattning om markkemins tidsutveckling i kalkade ytor. Eftersom andra faktorer än kalkningen påverkar tidsutvecklingen räcker det inte för att säkerställa kalkningseffekter, men det kan ändå ge vissa indikationer om eventuella behandlingseffekter.

Beräkningarna grundades på förändringen i varje enskild yta mellan provtagningstillfällena. Sammanslagningen gjordes genom att medelvärde och konfidensintervall av förändringen beräknades. Med T-test prövades om förändringen var signifikant skild från noll, vilket skulle innebära en signifikant förändring.

Beräkningarna gjordes dels för de direkt försurningsrelaterade parametrarna utbytbar kalcium, magnesium, väte och aluminium samt basmättnad, dels för de ej direkt försurningsrelaterade parametrarna glödförlust, utbytbar kalium och kolkväveknot (C/N). Glödförlusten användes som ett mått på osäkerheter vid provtagning, då den ej bör variera nämnvärt under en femårsperiod. Kalium är ett viktigt näringsämne och halten kan teoretiskt minska på grund av både försurning och kalkning genom jonbytesprocesser på markpartiklarna. Behandlingseffekter på kolkväveknoten bör noteras

eftersom låga kvoter (<25) ökar risken för nitratläckage (Gundersen m. fl., 1999), som är en oönskad effekt.

Jämförelse mellan kalkade ytor och referensytor

Jämförelser mellan tidsutvecklingen i de sju referensytorna och tidsutvecklingen i motsvarande sju kalkade ytor behövs för att kunna bedöma om tidsutvecklingen beror på kalkningen. Beräkningarna grundades på förändringen mellan provtagningstillfällena i varje enskild yta.

För att påvisa eventuella kalkningseffekter beräknades differensen mellan förändringen i varje kalkad yta och förändringen i motsvarande referensyta. Med antagandet att kalkningen är det enda som skiljer den kalkade ytan från referensytan är resultatet ett mått på kalkningseffekten i varje enskilt område. En positiv differens innebär att kalkningen lett till en ökning i den kalkade ytan jämfört med referensytan. Det behöver dock inte vara en nettoökning, utan kan lika väl vara en "mindre minskning" i den kalkade ytan. Vid ett negativt värde på differensen är förhållandena de omvända. I praktiken är naturen mer komplex än så, och skillnader mellan den kalkade ytan och referensytan kan bero på andra faktorer. Men med hjälp av en sammanslagning av alla sju områdena kan kalkningseffekternas signifikans prövas. Om alla ytor visar på en "kalkningseffekt" i samma riktning är sannolikheten stor att det verkligen rör sig om en behandlingseffekt.

Den statistiska analysen gjordes genom att pröva om differensen mellan förändringen i de kalkade ytorna och förändringen i referensytorna var skild från noll, vilket i princip innebär en signifikant kalkningseffekt. I detta fallet användes dock teckentestet istället för T-testet, eftersom sju referensytor är för få för att göra T-test. Teckentestet tar som namnet avslöjar bara hänsyn till tecknet i differensen, inte storleken. Om differensen för alla områden har samma tecken är sannolikheten stor att kalkningen har påverkat tidsutvecklingen. Om det finns lika många positiva som negativa värden på differensen går det däremot inte att påvisa någon kalkningseffekt. Efter en summering av antalet positiva och negativa differenser kan signifikansnivån beräknas, det vill säga sannolikheten för att resultaten orsakats av slumpen. Ju färre ytor som ingår, desto svårare är det att påvisa signifikanta skillnader.

Omfördelning av tillförd kalk efter 1 och 5 år

För ett av de ämnen som tillfördes via behandlingen, kalcium, utfördes beräkningar för att beskriva hur snabbt det tränger ner i de olika skikten (humus, samt mineraljord 0-5 cm och 5-10 cm) efter 1 och 5 år. Då halter och olika lagers tjocklek är kända kan kalcium i de olika lagren räknas om till enheten kg/ha och jämföras med givan. På så sätt kan mängden tillförd kalcium som finns kvar i förnan efter 1 och 5 år uppskattas.

Beräkningar gjordes för fem ytor: N1A, N1B, G1B, G1C och P1B. I dessa ytor har speciell vikt lagts vid att dokumentera giva, kalkmedlets sammansättning och humustjocklek. Humustjockleken har mätts på 30 punkter i varje yta och gemensamt för de fem ovanstående ytorna är att tjocklekarna är ungefär normalfördelade, vilket innebär att medelvärdet kan anses användbart.

2.2 Markkemin före behandling

Tabell 1 ger en uppfattning om vilka nivåer de markkemiska parametrarna i de olika skikten uppvisade före kalkning, samt hur stor variationen var. Data för varje enskild yta finns i bilaga 3.

Tabell 1. Medianvärden samt 95- och 5-percentilen för halter av utbytbara ämnen, basmättnad, kolkvävekvot och glödförlust i samtliga ytor i de tre skikten innan kalkning.

Parameter	Humus			0-5 cm			5-10 cm		
	Med- ian	95 perc.	5 perc.	Med- ian	95- perc.	5 perc.	Med- ian	95 perc.	5 perc.
Ca (µekv/g)	59	108	18	3.0	10.7	1.5	1.6	5.2	0.7
Mg (µekv/g)	19	33	6	1.3	2.3	0.7	0.8	1.6	0.4
K (µekv/g)	7	15	3	1.0	2.2	0.6	0.7	2.2	0.5
H+ (µekv/g)	38	60	17	11.0	16.6	7.2	8.3	12.4	5.3
Al (µekv/g)	45	102	21	37.7	51.2	20.0	35.1	43.0	25.4
Basmättnad* (%)	50	68	23	11.6	25.8	5.8	7.1	18.1	4.2
C/N-kvot	25	32	16	19.6	31.2	12.1	19.3	31.9	12.2
Glödförlust (%)	61	80	25	8.8	15.9	4.6	7.9	10.9	4.1

* Basmättnaden innefattar ej natrium och är beräknad som en kvot (ekvivalenter) mellan utbytbara joner: $(Ca+Mg+K)/(Ca+Mg+K+H^++Al)$.

2.3 Kalkningseffekter

I tabell 2-4 finns en sammanställning av signifikanta förändringar för de markkemiska parametrar som valts ut för analys, i de tre olika skikten 1 och 5 år efter kalkning. I tabellerna anges även för vilka av förändringarna som det finns indikationer att kalkningen är orsaken till tidsutvecklingen. Vanligtvis brukar signifikansnivåer under eller lika med 0,05 redovisas ($p \leq 0.05$). Under rubrikerna "Kalkningseffekter" i tabellerna nedan redovisas nivåer över 0.05. Skälet är att det ingår enbart sju ytpar med referensytor och kalkade ytor i det statistiska test som användes för att påvisa kalkningseffekter. Detta gör att det krävs extremt starka samband för att erhålla signifikansnivåer under 0,05.

Tabell 2. Översikt över markkemiska förändringar i kalkade ytor och kalkningseffekter (skillnader mellan kalkade ytor och referensytor) i **humuslagret**. Pilarna anger ökning eller minskning (i kolumnerna "Kalkningseffekt" anges ökning och minskning i förhållande till referenserna). p-värdena anger signifikansnivån.

Parameter	År 0-1		År 0-5	
	Förändring av medelvärde	Kalkningseffekt	Förändring av medelvärde	Kalkningseffekt
Glödförlust (%)	↑ p<0.001	-	↑ p<0.001	-
K (µekv/g)	↑ p<0.001	-	↑ p<0.001	-
H (µekv/g)	↓ p<0.001	-	↓ p<0.001	↓ p<0.05
Al (µekv/g)	↓ p<0.001	↓ p=0.06	↓ p<0.001	↓ p=0.22
Ca (µekv/g)	↑ p<0.001	↑ p=0.06	↑ p<0.001	↑ p=0.22
Mg (µekv/g)	↑ p<0.001	↑ p=0.06	↑ p<0.001	↑ p=0.22
Basmättnad (%)	↑ p<0.001	↑ p=0.06	↑ p<0.001	↑ p=0.22
C/N	-	-	↑ p<0.001	-

Tabell 3. Översikt över markkemiska förändringar i kalkade ytor och kalkningseffekter (skillnader mellan kalkade ytor och referensytor) i **mineraljorden, 0-5 cm**. Pilarna anger ökning eller minskning (i kolumnerna "Kalkningseffekt" anges ökning och minskning i förhållande till referenserna). p-värdena anger signifikansnivån.

Parameter	År 0-1		År 0-5	
	Förändring av medelvärde	Kalkningseffekt	Förändring av medelvärde	Kalkningseffekt
Glödförlust (%)	-	-	-	-
K (µekv/g)	↓ p<0.05	-	↓ p<0.001	-
H (µekv/g)	↑ p<0.05	-	↓ p<0.01	-
Al (µekv/g)	↓ p<0.01	-	↓ p<0.001	↓ p=0.22
Ca (µekv/g)	-	-	↑ p<0.01	↑ p<0.05
Mg (µekv/g)	↑ p<0.05	-	↑ p<0.001	-
Basmätnad (%)	-	-	↑ p<0.001	↑ p<0.05
C/N	-	-	↑ p<0.05	-

Tabell 4. Översikt över markkemiska förändringar i kalkade ytor och kalkningseffekter (skillnader mellan kalkade ytor och referensytor) i **mineraljorden, 5-10 cm**. Pilarna anger ökning eller minskning (i kolumnerna "Kalkningseffekt" anges ökning och minskning i förhållande till referenserna). p-värdena anger signifikansnivån.

Parameter	År 0-1		År 0-5	
	Förändring av medelvärde	Kalkningseffekt	Förändring av medelvärde	Kalkningseffekt
Glödförlust (%)	-	-	-	-
K (µekv/g)	-	-	↓ <0.001	-
H (µekv/g)	-	-	↓ <0.001	-
Al (µekv/g)	↓ <0.05	-	↓ <0.01	↓ p=0.22
Ca (µekv/g)	-	-	-	↑ p=0.22
Mg (µekv/g)	-	-	↑ <0.01	↑ p=0.22
Basmätnad (%)	-	-	↑ <0.01	↑ p<0.05
C/N	-	-	-	-

2.3.1 Glödförlust och utbytbart kalium

Glödförlusten (halten av organiska ämnen) ökade under första året i humusskiktet. Förändringen är signifikant, men kan rimligtvis inte bero på kalkningen. En tänkbar orsak är skillnader i gränsdragning mellan humuslager och mineraljord vid provtagning. Eftersom glödförlusten är mer eller mindre korrelerad med de flesta av de utvalda parametrarna begränsas därmed tolkningsmöjligheterna i humuslagret. Ökningen av utbytbart kalium är troligen skenbar, orsakad av den ökade mängden organiskt material.

Jämförelsen med referensytorna stämmer med resonemanget ovan, då det inte finns några tendenser till att tidsutvecklingen för glödförlust i kalkade ytor och referensytor skiljer sig åt. Inte heller för utbytbart kalium finns några skillnader.

På de båda övriga djupen finns inga signifikanta förändringar i glödförlust mellan åren. Utbytbart kalium minskade däremot på båda djupen, både i kalkade ytor och i referensytor.

2.3.2 Utbytbar kalcium och magnesium

Utbytbar kalcium och magnesium ökade i humuslagret, såväl som i mineraljorden. I humuslagret kom ökningen direkt medan ökningen i de djupare skikten skedde efter första året, vilket talar för en kalkningseffekt.

Även jämförelsen med referensytorna tyder på att ökningen är en effekt av kalkningen. Det finns tendenser på att tidsutvecklingen för utbytbar kalcium skiljer sig åt mellan kalkade ytor och referensytorna i alla tre skikt. Utbytbar kalcium ökade i de kalkade ytorna i förhållande till referenserna. Skillnaderna är tydligast under första året i humusskiktet samt efter första året i 0-5 cm-skiktet. För utbytbar magnesium syns samma tendenser som för kalcium i humuslagret och i 5-10 cm-skiktet.

2.3.3 Utbytbar väte och aluminium

Utbytbar väte minskade i humuslagret, med början redan första året. Motsvarande minskning fanns inte i referensytorna, vilket pekar på att det är en kalkningseffekt. En annan kemisk analys av surhetsgraden i humus är pH-mätning i vattenextrakt som i genomsnitt visade pH 4,0 i provytorna före kalkning. Fem år efter behandling noterades en medelökning på $0,65 \pm 0,15$ enheter (95 % konfidensintervall).

Utbytbar aluminium minskade under första året i alla tre skikten. I humuslagret kan minskningen knytas till kalkningen med hjälp av referensytorna och även i mineraljorden finns starka tendenser till en minskning av aluminiumhalten i behandlade ytor till år 5. I tabell 5 och figur 2-7 åskådliggörs förändringens storlek.

2.3.4 Basmättnad

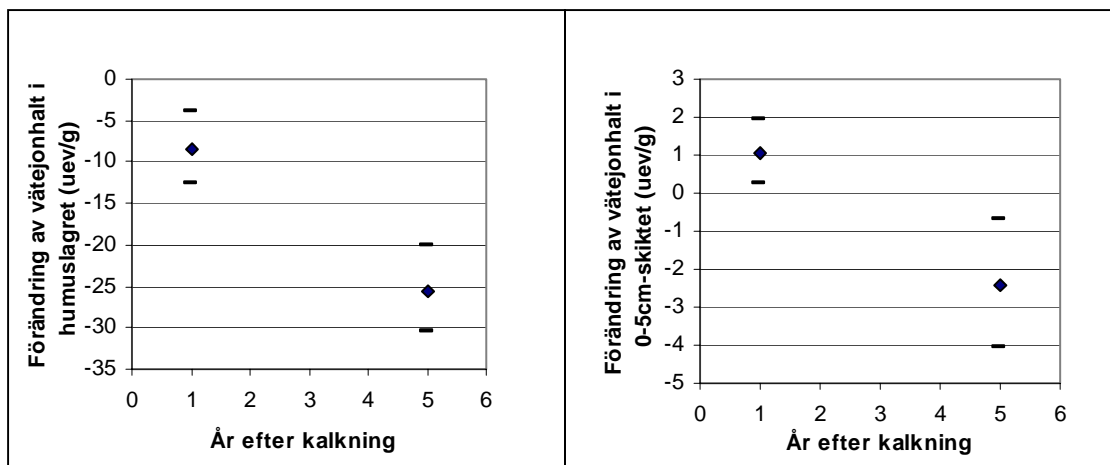
Basmättnaden uppvisar samma trender som kalcium och magnesium. I denna studie ingår kalcium, magnesium och kalium i beräkningen av basmättnad. Natrium är utslutet eftersom det tidsmässigt kan variera kraftigt på grund av skillnader i havssaltsnedfall mellan åren, vilket försvårar utvärderingen av kalkningseffekter. Basmättnaden ökade i alla tre skikten, men ökningen började först efter ett år i 0-5 cm- och 5-10 cm-skikten. I humuslagret kan ökningen under första året knytas till kalkningen med hjälp av referensytorna och i de djupare skikten kan förändringarna mellan år 0 och 5 knytas till kalkningen på samma sätt. I tabell 5 och figur 8-10 åskådliggörs förändringens storlek.

Tabell 5. Medelvärde och förändring av vätejonhalt, aluminiumhalt och basmättnad från år 0 till 5. Förändringen anges som ett 95 %-igt tvåsidigt konfidensintervall, vilket innebär att medelförändringen med 95 % sannolikhet ligger inom det angivna intervallet.

Skikt	H ($\mu\text{ekv/g}$)		Al ($\mu\text{ekv/g}$)		Basmättnad exkl. Na (%)	
	medelvärde år 0	Förändring till år 5	medelvärde år 0	Förändring till år 5	medelvärde år 0	Förändring till år 5
Humus	39	-[20-30]	52	-[25-40]	48	+[35-45]
0-5 cm	11	-[1-4]	35	-[2-7]	13	+[5-12]
5-10 cm	8	-[1-4]	34	-[1-5]	8	+[1-5]

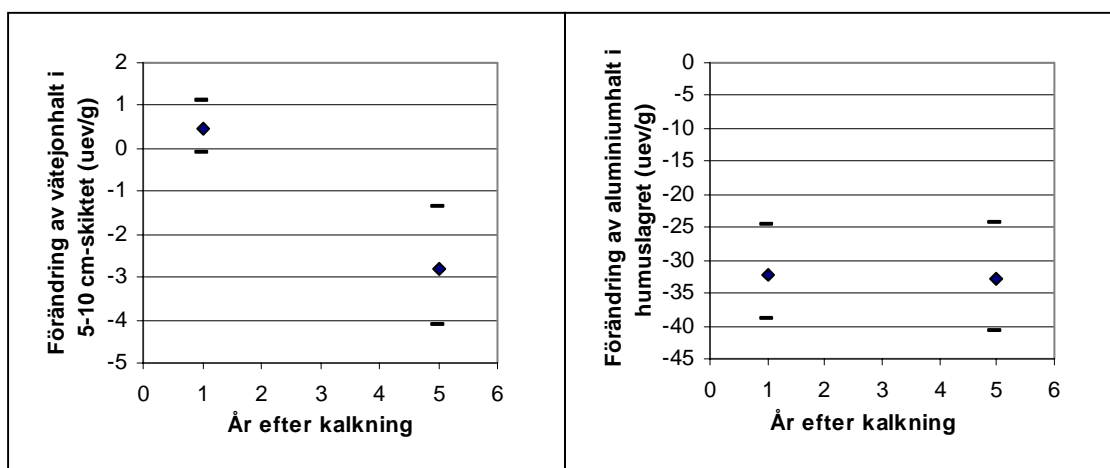
2.3.5 Kolkvävekvot

Kolkvävekvoten ökade till år 5 i alla tre skikten (figur 11-13) i kalkade provytor (ej signifikant i 5-10 cm-skiktet). Ökningen noterades även i de obehandlade referensytorna vilket gör att förändringen inte kan knytas till behandlingen. En ökad kvot minskar risken för kraftig nitrifikation och utlakning av oorganiskt kväve.



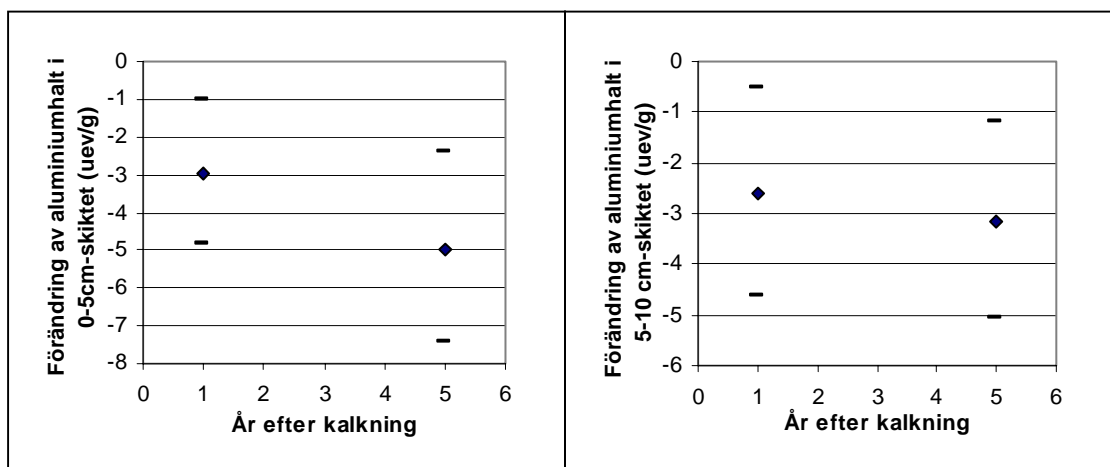
Figur 2

Figur 3



Figur 4

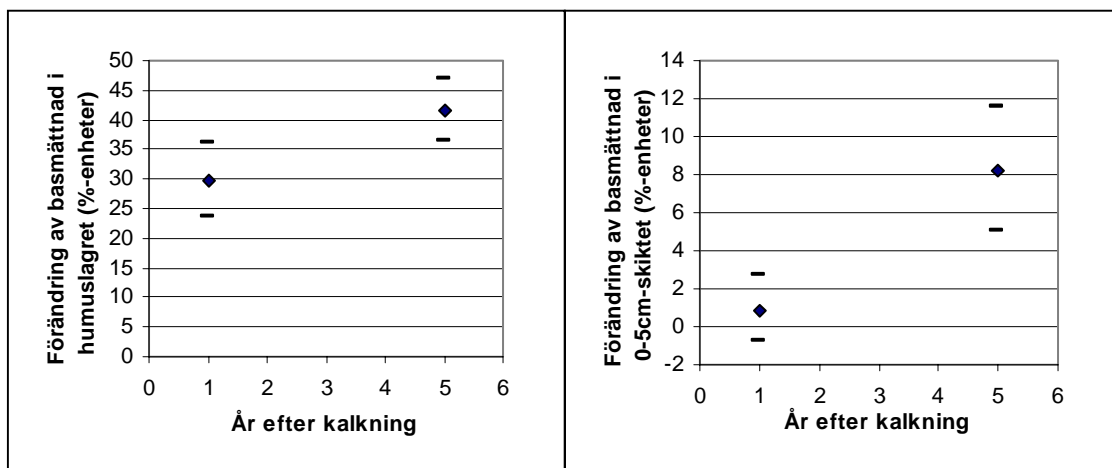
Figur 5



Figur 6

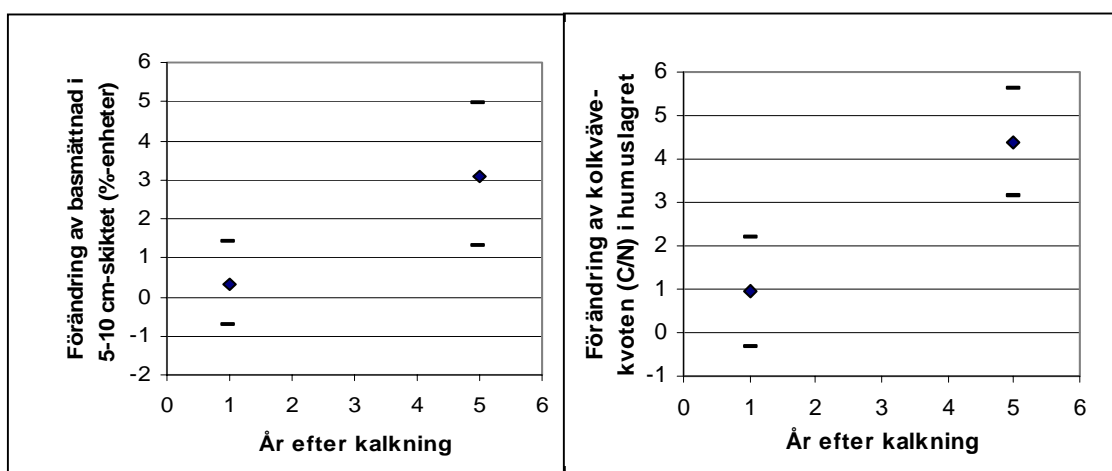
Figur 7

Figur 2-7. Medelförändring med 95 % konfidensintervall av vätejonhalt och aluminiumhalt i olika markskikt 1 och 5 år efter kalkning.



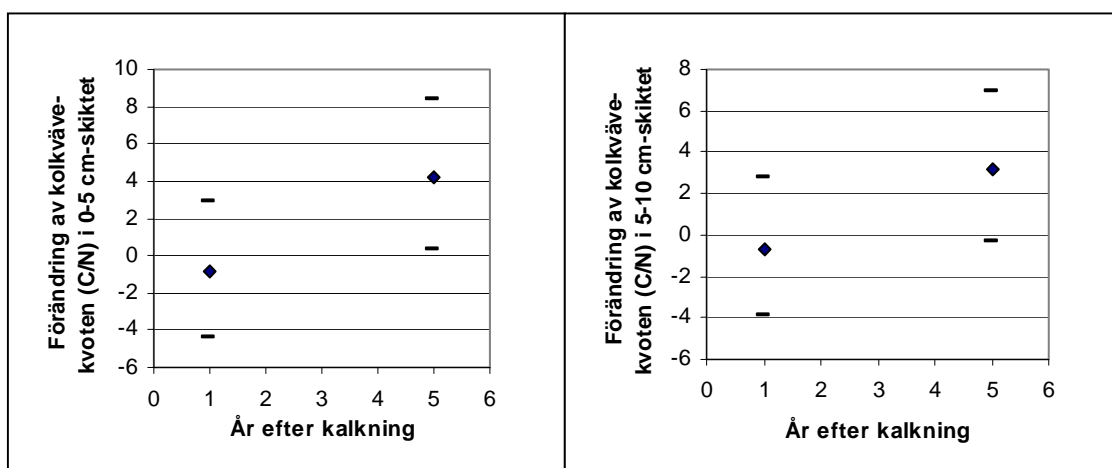
Figur 8

Figur 9



Figur 10

Figur 11



Figur 12

Figur 13

Figur 8-13. Medelförändring med 95 % konfidensintervall av basmättnad (exklusive natrium) och kolkvävekvoten (C/N) i olika markskikt 1 och 5 år efter kalkning.

2.4 Omfördelning av tillförd kalk efter 1 och 5 år

I detta avsnitt ges exempel på hur tillförd kalk tränger ner i marken och omfördelas mellan markskikten under femårsperioden. Beräkningarna grundas på fem ytor som valts ut som typfall. De fem ytorna har analyserats var för sig och det är för få ytor för att kunna göra statistiska beräkningar. Resultatet får därför ses som några exempel på hur kalk omfördelas i marken efter behandling. För att erhålla en mer generell beskrivning krävs förutom fler ytor en mycket omfattande statistisk bearbetning som inkluderar en fullständig osäkerhetsanalys.

I humuslagret ökade kalciumhalten i de fem utvalda ytorna till år 1 med mellan två och fem gånger och till år 5 med mellan två och elva gånger.

På 0-5 cm djup ökade kalciumhalten kontinuerligt på tre av de fem ytorna. Halten ökade med upp till två gånger till år 1 och upp till fyra gånger till år 5. I G1C dubblades kalciumhalten till år 1 varefter nivån låg ganska still.

På 5-10 cm djup noterades mindre förändringar i båda riktningarna. På tre ytor, P1B, N1B och G1C ökade kalciumhalten kontinuerligt, och ökningen till år 5 låg på mellan 2 och 3 ggr. På N1A (ytan med tjockt humuslager) och G1B var kalciumhalten 20 respektive 40 % lägre år 5 än år 0.

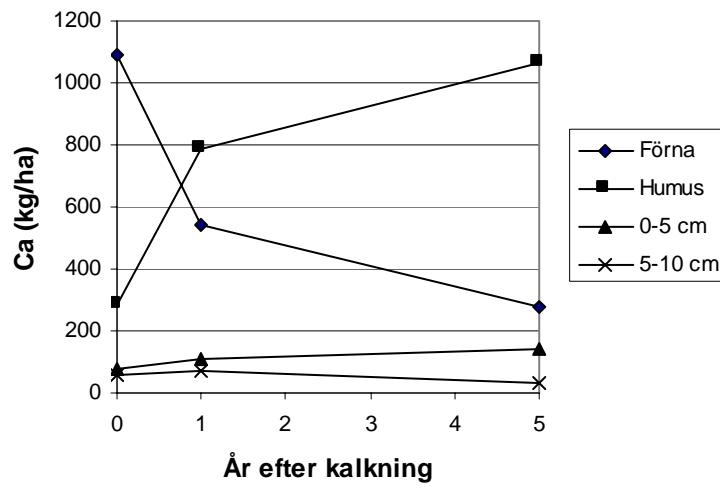
Beräkningarna där kalkgiva jämfördes med kalciumökning i markprofilen gav mycket varierande resultat. Om all kalk trängt ner under förnan men inte djupare än 10 cm i mineraljorden ska kalciummängden i markprofilen, utöver naturligt förekommande kalcium, teoretiskt sett vara lika stor som givan. I praktiken förekommer osäkerheter i de ingående parametrarna som försvårar beräkningarna. Om givan är större än kalciummängden som uppmätts i de tre skikten betyder det att en del fortfarande ligger kvar i förnan, med antagandet att det inte finns några förluster från systemet.

I tre av de fem undersökta ytorna hade allt kalcium trängt ner under förnan efter 5 år enligt beräkningarna. På två av dessa, N1A och N1B, var den uppmätta kalciumökningen i markprofilen betydligt större än givan, vilket är orimligt. Detta visar på de stora osäkerheterna i beräkningarna. Förutom osäkerheterna i själva mätvärdena finns osäkerheter i humustjocklek, kalkmängd och kalksammansättning. Avgränsningen av humustjocklek är ofta svår att bedöma och det har stor betydelse för resultatet av beräkningarna.

På de två återstående ytorna låg 60 respektive 25 % av tillfört kalcium kvar i förnan efter 5 år. Ytan med 60 % kvar i förnan utmärker sig genom att vara torr, vilket innebär mindre vertikal transport.

Efter 5 år hade mellan 0 och 15 % av tillfört kalcium trängt ner i 0-5 cm-skiktet och upp till 6 % i 5-10 cm-skiktet i de 5 undersökta ytorna.

Figur 14 illustrerar tidsutvecklingen för kalcium i de olika markskikten på lokal G1B. År 0 syftar här på tillståndet precis då kalkningen var utförd, då allt tillfört kalk låg i förnan. Värdena i humus, 0-5 cm och 5-10 cm är uppmätta medan värdena i förnan är beräknade med hjälp av givans storlek och sammansättning samt mängderna i de övriga lagren. I figuren syns tydligt att större delen av tillförd kalk transporterades ner i humuslagret under fem år. Enbart en liten ökning syns i 0-5 cm-skiktet och nivån på 5-10 cm ligger i stort sett konstant. Detta förklarar resultaten i avsnitt 2.3 som visar att det är i humuslagret som de största markkemiska förändringarna sker. Observera att diagrammet gäller för en lokal och därmed enbart är ett exempel på resultatet av en kalkning.



Figur 14. Kalciummängd i olika markskikt i yta GIB vid olika tidpunkter. Med år 0 menas i detta diagram direkt efter kalkning.

3. Markvattenkemi

Med markvatten menas vatten som sjunker ned mot grundvattenytan genom den omättade zonen i marken. I ytligare markskikt utnyttjas vattnet av träd och annan vegetation. I denna studie provtas markvatten på 50 cm under markytan, strax under trädens rotzon, vilket ger ett mått på utlakningen från denna zon. Markvattnets kemi påverkas av hydrologi, nedfall av olika ämnen från luften, vegetations- och markprocesser samt markkemin i området.

Markvattenkemin i skogsmark varierar mycket i tid och rum. Variationen i tiden kan delas upp i två delar, dels den naturliga variationen mellan månader som beror på skillnader mellan olika årstider vad gäller väderlek och hydrologi, dels trender över flera år, som beror på ändrade förhållanden, exempelvis minskad syrabelastning, förändringar i skogsbruket eller skogsmarkskalkning. Under 1990-talet finns tydliga trender som visar på exempelvis minskad kalciumhalt i markvattnet (Hallgren Larsson m. fl., 1997). Med tillgång till ett antal mätningar varje år kan dessa trender upptäckas. En jämförelse mellan enstaka värden från olika år och årstider är mer osäker eftersom variationen mellan olika årstider ofta är större än skillnaden mellan samma månad två år.

Den geografiska variationen i markvattenkemin kan vara stor i alla skalor. Faktorer som syrabelastning, geologiskt underlag och beståndsegenskaper spelar naturligtvis stor roll, men även inom ett bestånd som kan tyckas homogent kan stora variationer förekomma (Akselsson & Westling 1999). Det är viktigt att ta hänsyn till variationer i tid och rum i ett okalkat bestånd vid utvärdering av behandlingseffekter efter kalkning.

3.1 Metodik

3.1.1 Provtagning och analys

Markvattenkemiska mätningar utfördes i 35 provytor i de 14 kalkade avrinningsområdena, samt i 7 referensytor (figur 1). Proven togs med hjälp av undertryckslysimetrar (P80) som suger vatten från nivån 50 cm under markytan. Fem lysimetrar var utplacerade i varje yta. Första provomgången användes ej för analys därefter provtogs lysimetrarna första gången cirka en månad efter installation. Analysprogrammet omfattade: pH, alkalinitet, sulfatsvavel ($\text{SO}_4\text{-S}$), nitratkväve ($\text{NO}_3\text{-N}$), klorid (Cl), ammoniumkväve ($\text{NH}_3\text{-N}$), kalcium (Ca), magnesium (Mg), natrium (Na), kalium (K), järn (Fe), mangan (Mn), aluminium (Al) och totalt organiskt kol (TOC).

Under de första åren efter kalkning togs prover fyra gånger per år, men under perioden 1995 till 1997 utfördes provtagning endast två gånger per år. Det finns för de flesta ytorna minst ett par mätningar som utförts före kalkningen. I ett fall, P1C, finns sex mätningar utförda före kalkning.

3.1.2 Databearbetning

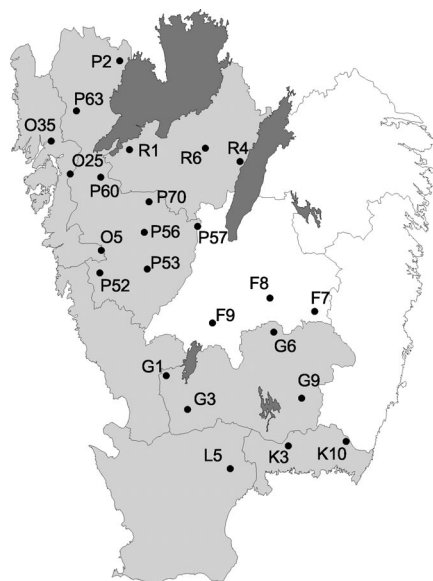
Redovisningen är koncentrerad på försurningsrelaterade parametrar. De parametrar som tas upp är halter av kalcium, magnesium, vätejoner, aluminium och kväve, samt molkvoten mellan baskatjonhalt och aluminiumhalt (BC/Al-kvoten) och ANC (Acid Neutralizing Capacity, ett mått på buffringsförmågan).

Markvattenkemins stora variation i tid och rum gör det svårt att behandla data på samma sätt som markkemin. Genomsnittliga halter under en tidsperiod uttrycks som

medianvärden eftersom medianen är mindre känslig för extrema värden. För att minimera årstidsvariationerna användes enbart mätningar från en årstid (senare halvan av oktober till och med första halvan av december) för medianberäkningarna. Denna årstid valdes eftersom november är en av de månader med flest mätningar, samtidigt som det är en förhållandevis stabil tid på året ur hydrologisk synpunkt.

Markvattenkemi mäts flera gånger per år inom den regionala miljöövervakningen i permanenta observationsytor i skog (Hallgren Larsson m. fl., 1997). Eftersom mätningarna görs på samma sätt som i försöksområdena för kalkning kan de användas som komplement till de sju referensytorna. För detta ändamål valdes 24 ytor ut (figur 15).

För enstaka ytor och år saknas mätningar under den aktuella årstiden. Detta medför att det skiljer något i antalet ytor som ligger till grund för medianberäkningarna. Antalet kalkade ytor som medianberäkningarna baseras på varierar mellan 28 och 35, med undantag för 1990, då enbart 21 ytor med novembermätningar finns tillgängliga. Antalet referensytor ligger generellt sett något lägre och varierar mellan 16 (1997) och 31. Enbart 1997 har färre än 20 ytor med novembermätningar. Kalkningen utfördes vid olika tidpunkter i olika ytor. Endast i två av ytorna med mätningar från november 1990 är kalkning utförd innan mätningen (K12A och K12B kalkades i början av november). Medianen för november 1990 avspeglar därför förhållandena innan kalkning.



Figur 15. Permanenta observationsytor för skog som användes som referenser för markvattenkemin i kalkade ytor.

De sju referensytorna som ingår i effektuppföljningen, och motsvarande sju kalkade ytor, användes för en mer ingående analys av tidsutvecklingen i enstaka områden. Diagram med differenserna för varje ytpar som funktion av tiden togs fram för de olika parametrarna och några typexempel presenteras i denna rapport.

3.2 Markvattenkemin före behandling

Tabell 6 ger en uppfattning om de markvattenkemiska parametrarnas haltnivåer innan kalkning. Tabellen visar medianvärden samt 95- och 5-percentilen från alla mätningar före behandling, oavsett årstid.

Tabell 6. Statistik för markvattenkemin före kalkning (baseras på mätningar före kalkning inom tidsperioden oktober 1990 till mars 1992).

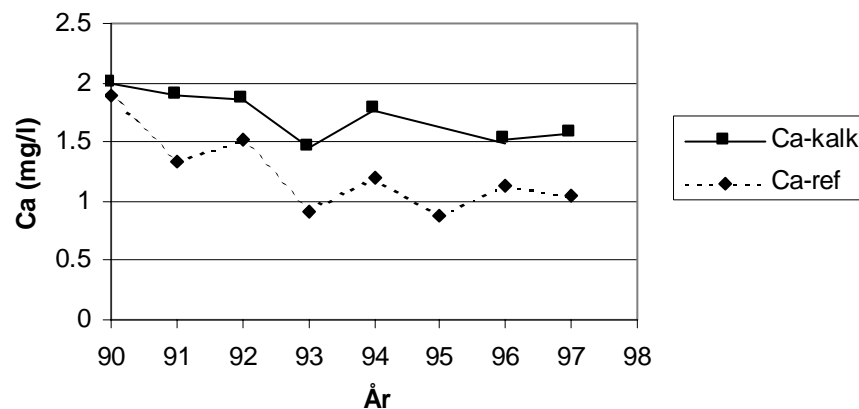
Parameter	Medianvärde	95-perc.	5-perc.
Ca (mg/l)	1.4	6.7	0.8
Mg (mg/l)	1.2	4.0	0.6
Al (mg/l)	1.6	17.8	0.1
H ($\mu\text{ekv/l}$)	22.0	58.4	4.4
NO ₃ -N (mg/l)	<0.005	6.7	0.03
NH ₄ -N (mg/l)	0.03	0.17	<0.01

3.3 Kalkningseffekter

Resultaten för de parametrar som valts ut, halter av kalcium, magnesium, aluminium, kväve och vätejoner samt BC/Al-kvot och ANC, presenteras var för sig. Tidsutvecklingen illustreras i två olika typer av diagram. Den generella tidsutvecklingen för olika parametrar i de kalkade ytorna, jämfört med referensytorna, visas i diagram med medianen för novembermätningarna (medianen av samtliga kalkade respektive obehandlade provytor) som funktion av tiden. För två av de sju kalkade ytorna som har närbelägna referensytor redovisas även differensen mellan kalkad yta och referensyta som funktion av tiden efter behandling.

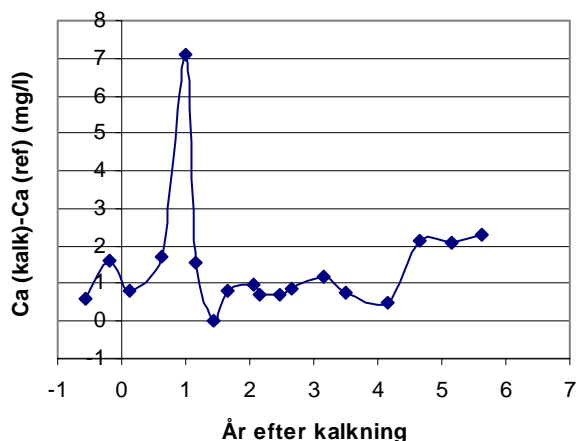
3.3.1 Kalcium

Figur 16 visar medianen för kalciumhalten i kalkade ytor och referensytor mellan 1990 och 1997. Medianen för kalciumhalten 1990 (före kalkning) låg på ungefär samma nivå i de kalkade ytorna som i referensytorna. Till 1991 minskade medianen i referensytorna med ca 0.5 mg/l, medan den i de kalkade ytorna enbart minskade marginellt. Efter det var utvecklingen likartad, med medianen i referensytorna omkring 0.5 mg/l lägre än medianen i de kalkade ytorna.

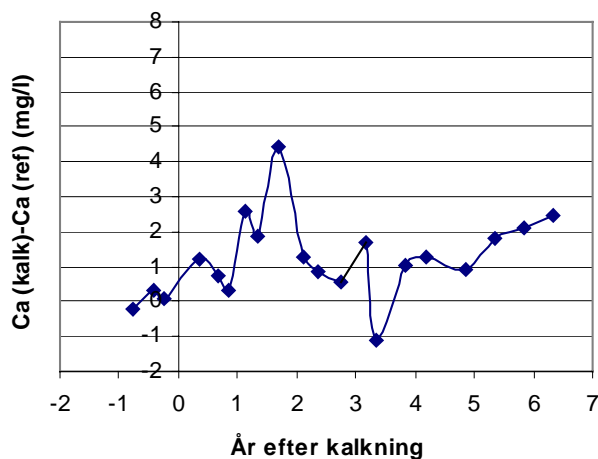


Figur 16. Medianen av Ca-halten i markvatten från kalkade ytor och referensytor under november 90-97.

Differenserna mellan kalciumhalten i sju kalkade ytor och halten i motsvarande referensytor visade på en kortvarig förhöjning av halten i de kalkade ytorna i förhållande till referensytorna mellan ett och tre år efter kalkning i sex av de sju områdena (exempel i figur 17 och 18), alla utom K2 (visas ej i figur). Det fanns även vissa tendenser till en ökning av kalciumhalten efter fyra till fem år.



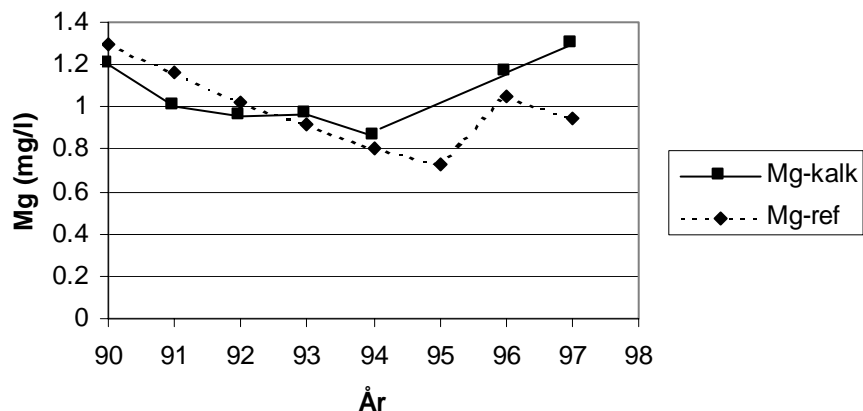
Figur 17. Differensen mellan kalciumhalten i markvatten från R2C (kalkad yta) och R2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning. Ett liknande mönster, med en kort period med förhöjda halter något år efter kalkningen, syns i de flesta av de sju områdena.



Figur 18. Differensen mellan kalciumhalten i markvatten från O2B (kalkad yta) och O2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning.

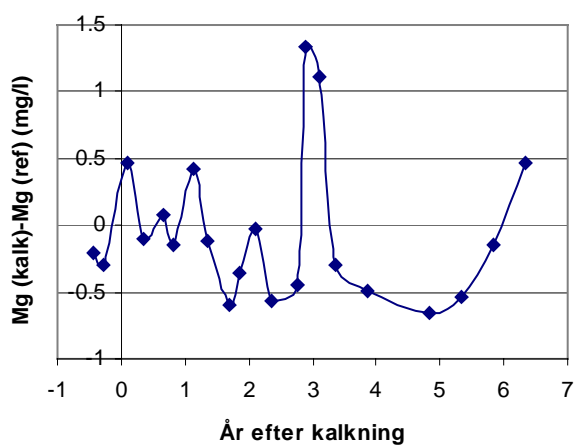
3.3.2 Magnesium

Även medianen för magnesiumhalten låg på samma nivå i referensytor och kalkade ytor före kalkning (figur 19). Vissa tendenser fanns till en ökning av magnesiumhalten i kalkade ytor i slutet av perioden, en ökning som inte hade någon direkt motsvarighet i referensytorna.

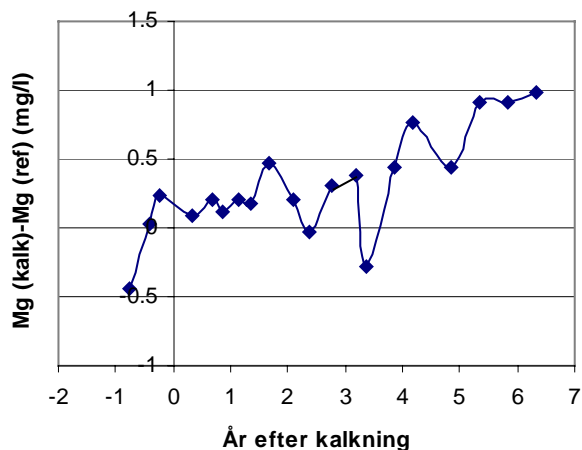


Figur 19. Medianen av Mg-halten i markvatten från kalkade ytor och referensytor under november 90-97.

Även för magnesiumhalten fanns korta perioder med förhöjda halter i de kalkade ytorna i förhållande till referensytorna i flera av områdena (figur 20 visar ett exempel, G2), men de är i de flesta fall inte lika tydliga som för kalciumhalten. Tre ytor, N2, O2 (figur 21) och L2, uppvisar tendenser till en mer bestående ökning under perioden. Två ytor, K2 och P2, visar inga tendenser på ökning, och för P2 kan detta förklaras med att området behandlats med kalk utan dolomitinblandning.



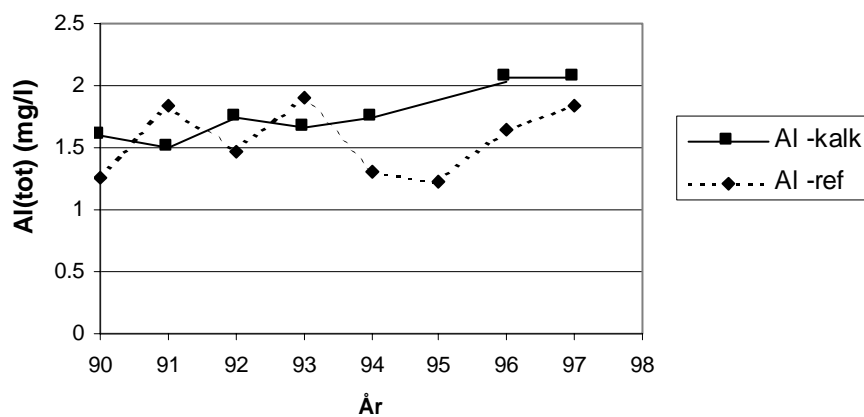
Figur 20. Differensen mellan magnesiumhalten i markvatten från G2A (kalkad yta) och G2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning.



Figur 21. Differensen mellan magnesiumhalten i markvatten från O2B (kalkad yta) och O2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning. Skillnaden mellan kalkade ytor och referensytorna tenderade öka med åren, och så är fallet i tre av de sju områdena.

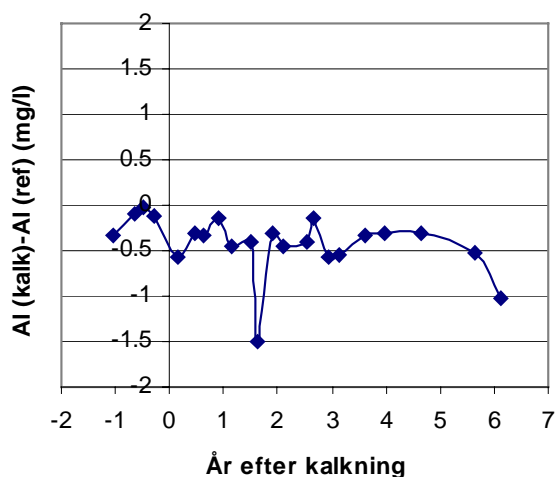
3.3.3 Aluminium

Medianen för aluminiumhalten låg något högre i de kalkade ytorna än i referensytorna både 1990 och 1997 (figur 22). Tidsutvecklingen skiljer sig åt, men det är svårt att veta om det beror på kalkningen. En påtaglig skillnad är att medianen varierade mindre mellan åren i de kalkade ytorna, vilket kan vara en effekt av kalkningen.

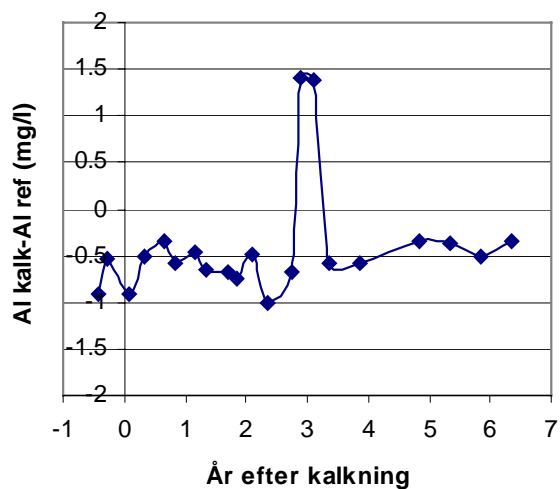


Figur 22. Medianen av Al-halten i markvatten från kalkade ytor och referensytorna under november 1990-1997.

I områdena P2 (figur 23), N2, K2 och O2 finns korta perioder med sänkta halter i de kalkade ytorna i förhållande till referensytorna efter ett till två år. I de tre övriga områdena syns inga sådana tendenser. I G2 finns däremot en kraftig men kortvarig förhöjning av halten efter tre år (figur 24). Inga kvarvarande effekter kan påvisas sex år efter kalkning.



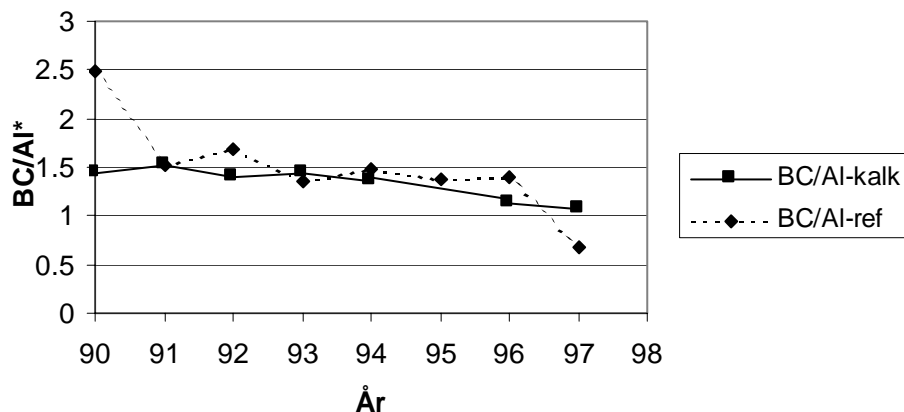
Figur 23. Differensen mellan aluminiumhalten i markvatten från P2C (kalkad yta) och P2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning. Efter något år fanns en kraftig sänkning av halten i de kalkade ytorna i förhållande till referensytorna, som följdes av en höjning till ursprungsnivån, ett mönster som återfanns på fyra av de sju ytorna.



Figur 24. Differensen mellan aluminiumhalten i markvatten från G2A (kalkad yta) och G2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning. Detta område visade på en kort period med kraftigt höjda halter efter tre år, och skiljde sig därmed från övriga ytor.

3.3.4 BC/Al-kvot

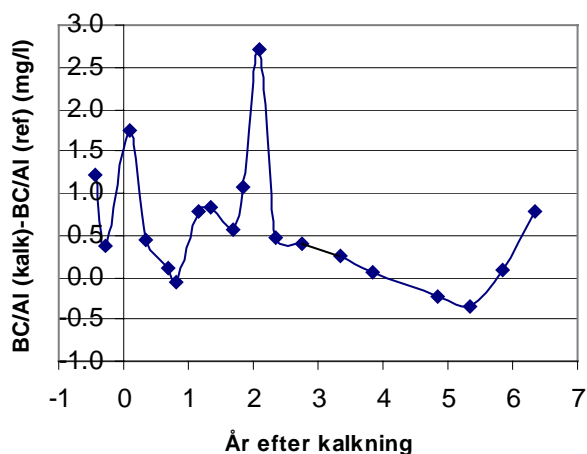
I både kalkade ytor och referensytor minskade medianen av BC/Al-kvoten mellan 1990 och 1997 (figur 25) men tidsutvecklingen skiljer sig åt genom att minskningen i kalkade ytor var liten och skedde gradvis, medan medianen i referensytorna varierade mycket mellan vissa år. Medianen av BC/Al-kvoten var en enhet högre 1990 och nästan en halv enhet lägre 1997 i referensytorna än i de kalkade ytorna.



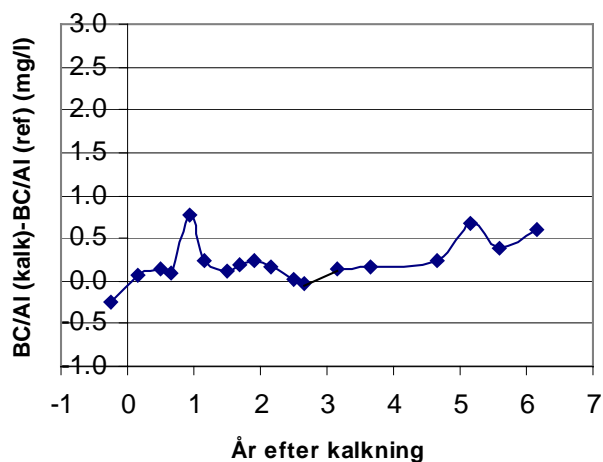
*Totalaluminium har använts för beräkning av kvoten.

Figur 25. Medianen av BC/Al-kvot i markvatten från kalkade ytor och referensytor under november 90-97.

I fyra av de sju områdena, G2 (figur 26), N2 (figur 27), P2 och R2, fanns korta perioder med förhöjd BC/Al-kvot efter ett till tre år. I O2 fanns också en ökning efter ca två år men efter drygt tre år fanns en mycket större minskning. BC/Al-kvoten i L2 ökade kontinuerligt i den kalkade ytan i förhållande till referensytan, medan förhållandet är det omvända i K2.



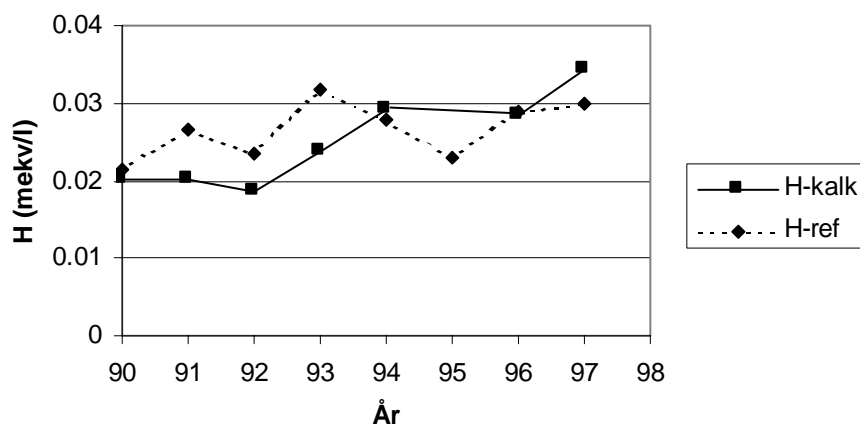
Figur 26. Differensen mellan BC/Al-kvoten i markvatten från G2A (kalkad yta) och G2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning. Flera av de sju områdena visar på ett liknande mönster med en kort period med förhöjda halter efter några år.



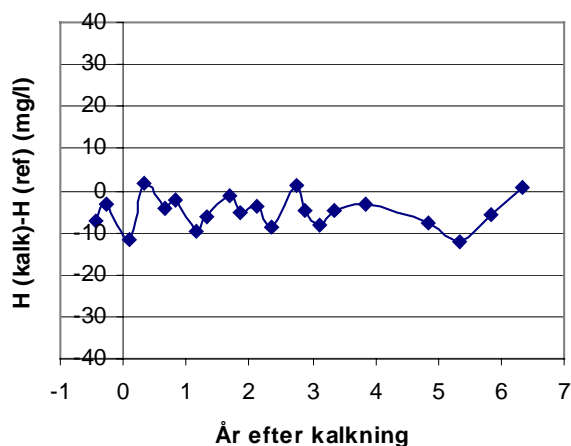
Figur 27. Differensen mellan BC/Al-kvoten i markvatten från N2B (kalkad yta) och N2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning. Precis som i G2 fanns en kortvarig ökning efter något år.

3.3.5 Vätejonhalt

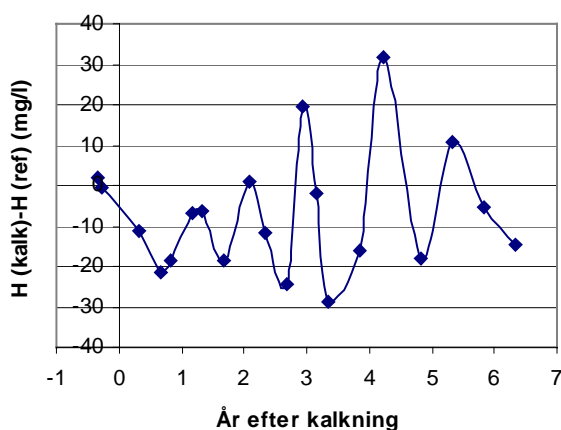
Medianen av vätejonhalten låg på samma nivå i referensytor och i kalkade ytor 1990 (figur 28). Mellan 1990 och 1993 var halten 5-10 μ g/l högre i referensytorna. Detta kan vara en kalkningseffekt, men stora variationer i vätejonhalt i tid och rum försvårar tolkningen. Detta visas i figur 29 och 30, som är två typiska exempel på differensen mellan kalkad yta och referensyta.



Figur 28. Medianen av vätejonhalt i markvatten från kalkade ytor och referensytor under november 90-97.



Figur 29. Differensen mellan vätejonhalten i markvatten från G2A (kalkad yta) och G2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning.

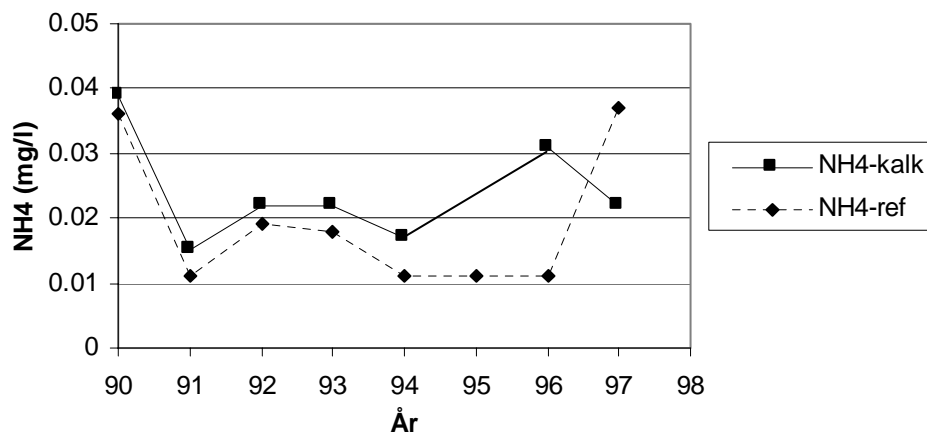


Figur 30. Differensen mellan vätejonhalten i markvatten från K2A (kalkad yta) och K2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning.

3.3.6 Kväve

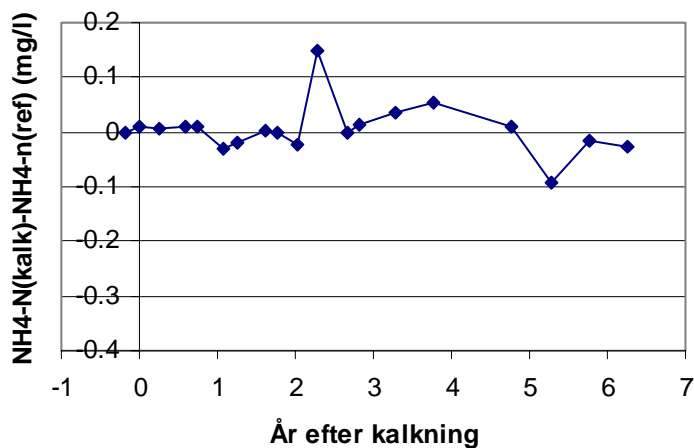
Nitralthalterna låg med få undantag under detektionsgränsen (0,005 mg/l) både i kalkade ytor och referensytor under hela försöksperioden. Endast i två av de 14 områdena, N2 och K2, låg flertalet av mätvärdena över gränsen. I en yta, K2A, var nitralthalten kraftigt förhöjd i förhållande till referensytan (0.75 mg/l) sju månader efter kalkning.

Stora likheter fanns i tidsutvecklingen för medianen av ammoniumhalt i kalkade ytor och referensytor mellan 1990 och 1994 (figur 31). Därefter skiljer sig utvecklingen åt, men det är svårt att knyta det till kalkningen.

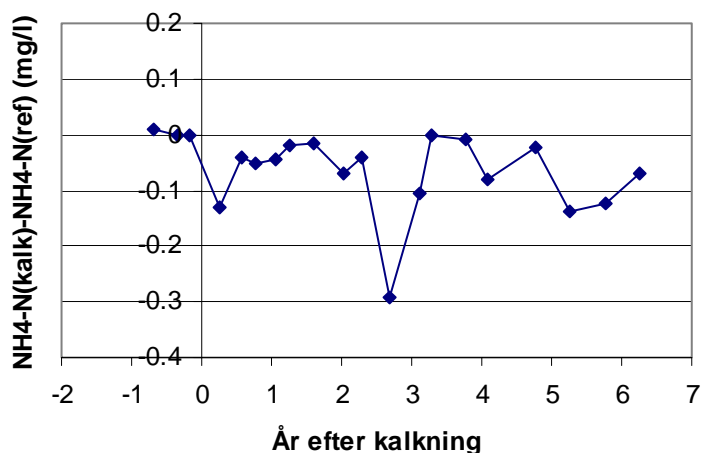


Figur 31. Medianen av halten av ammoniumkväve i markvatten från kalkade ytor och referensytor under november 90-97.

Figur 32 och 33 visar exempel på hur ammoniumhalten varierade på de kalkade ytorna i förhållande till referensytorna. Det går inte att se några tydliga samband mellan kalkningen och tidsutvecklingen.



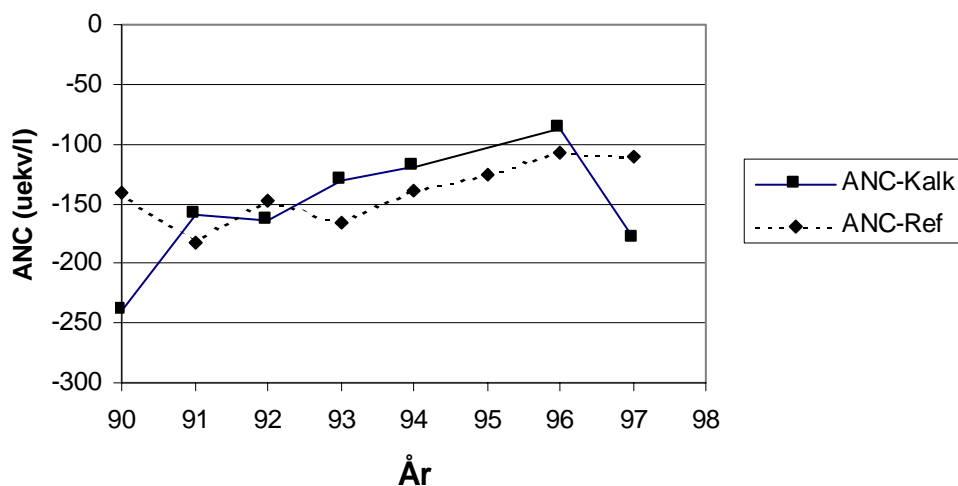
Figur 32. Differensen mellan halten av ammoniumkväve i markvatten från G2A (kalkad yta) och G2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning.



Figur 33. Differensen mellan halten av ammoniumkväve i markvatten från O2B (kalkad yta) och O2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning.

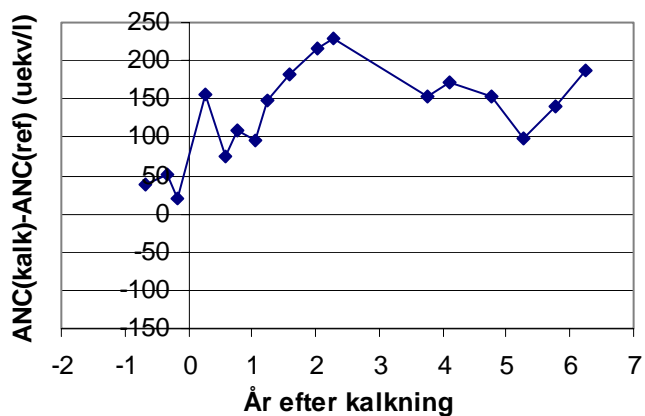
3.3.7 ANC

Medianen för ANC skiljer sig åt mellan kalkade ytor och referensytor under två år, 1990 och 1997 (figur 34). Medianen dessa år låg betydligt lägre i de kalkade ytorna. Det faktum att det är de två ändpunkterna i diagrammet gör det svårt att dra några slutsatser, men mycket talar för att det är något annat än kalkningen som har orsakat skillnaderna. Till exempel kan högt nedfall av havssalt, som ofta har stor lokal variation, tillfälligt ge "surstötter" i markvatten genom jonbyte i sura skogsjordar. Detta kan medföra en relativt kraftig sänkning av ANC.

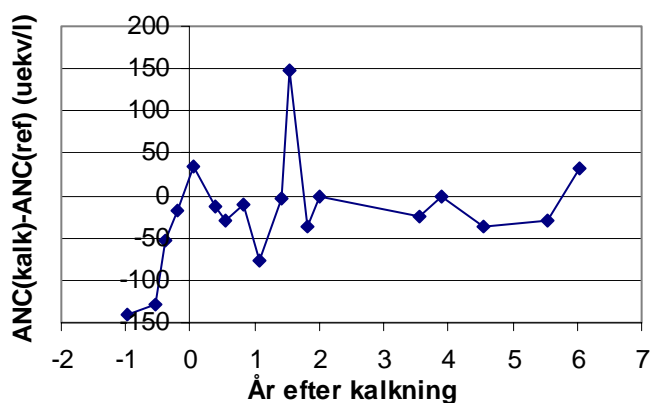


Figur 34. Medianen av ANC i markvatten från kalkade ytor och referensytor under november 90-97.

Figur 35 och 36 visar exempel på skillnader mellan kalkad yta och referensyta i områdena O2 och P2.



Figur 35. Differensen mellan ANC i markvatten från O2B (kalkad yta) och O2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning.



Figur 36. Differensen mellan ANC i markvatten från P2B (kalkad yta) och P2R (referensyta) vid olika tidpunkter före och efter kalkning.

4. Diskussion och slutsatser

4.1 Behandlingseffekter

Målet vid skogsmarkskalkning är att initiera en varaktig förändring av markens syra/bas-status så att en förskjutning sker mot ett mindre surt tillstånd. En sådan förändring kan i denna studie avläsas i de mark- och markvattenkemiska studierna före och efter kalkning.

Markkemi

Markkemin i behandlade provytor uppvisade tydliga förändringar ett och fem år efter kalkning. En stor del av förändringarna kan förklaras som kalkningseffekter efter en analys av tidsutvecklingen i förhållande till obehandlade provytor. Jämförelsen försvåras av att referensmaterialet inte är så stort som det för markvatten, där det finns regelbundna mätningar inom ramen för miljöövervakningen i ett stort antal okalkade provytor i hela Götaland.

Beräkningar av fördelningen av tillfört kalcium i olika skikt visade att kalk tränger ner olika snabbt i olika provytor. Generellt kan dock sägas att fortfarande efter fem år fanns merparten i humuslagret, och det fanns kalk kvar i förnan i vissa provytor enligt beräkningarna. Detta innebär att några stora förändringar inte kunde förväntas i mark- och markvattenkemi i de djupare mineraljordsskikten efter fem år.

Ansamlingen av kalk i humuslagret gör att de största förändringarna under de första åren skedde i detta skikt. I genomsnitt halverades halterna av utbytbara väte- och aluminiumjoner och basmättnaden nära dubblerades fem år efter kalkning. Förändringen i basmättnad och aluminiumhalt skedde huvudsakligen under första året, medan förändringen i vätejonhalt noterades mellan år 1 och 5. Jämförelserna med referensytorna visar att det huvudsakligen var kalkningseffekter.

Även i de ytliga mineraljordsskikten fanns signifikanta skillnader mellan kalkade och obehandlade provytor. Den genomsnittliga basmättnaden ökade kraftigt, cirka 50 %, aluminiumhalten minskade med cirka 10 % och vätejonhalten minskade med cirka 25 % fem år efter kalkning. Förändringarna skedde huvudsakligen efter första året, förutom för aluminium, där förändringar skedde även under första året. Jämförelsen med referensytorna visar att förändringarna i basmättnad och aluminiumhalt med stor sannolikhet var kalkningseffekter. Vätejonhalten minskade något även i referensytorna, och det är därför svårt att bedöma kalkningens effekt. En minskning av utbytbart kalium noterades i både kalkade och obehandlade provytor.

Kol/kväve kvoten (C/N-kvoten) kan användas som ett mått på risken för nitratläckage. Det område i Götaland där kalkningsförsöken utförts har haft kraftigt förhöjt nedfall av kväve med den högsta belastningen i den sydvästra delen (Hallgren Larsson m. fl., 1997). Om C/N-kvoten minskar ökar risken för utlakning av nitratkväve. En kritisk gräns för kvoten i humusskiktet är 25 (Gundersen m. fl., 1999). I de kalkade provytorna i denna studie varierade kvoten i humusskiktet mellan 32 och 15 före kalkning, och av de 42 provytorna var 50 % i riskzonen om gränsen sätts till 25. Det finns inga tecken på att kalkningen har förändrat C/N-kvoten under den första femårsperioden, och därmed har inte risken för nitratläckage ändrats som en följd av kalkningen. Där- emot noterades tendenser till en generell ökning av C/N-kvoten under femårsperioden, oberoende av kalkningen, eftersom ökningen även noterades i obehandlade provytor.

De markkemiska effekterna fem år efter kalkning avviker inte från tidigare försök med skogsmarkskalkning (Staaf m. fl., 1996). Skillnaden mellan Skogsstyrelsens koncept och många av de tidigare försöken är kalkmedlens kornstorleksfördelning. I Skogsstyrelsens försöksverksamhet används krossad kalk där finkornandelen är begränsad (högst 30 % <0,25 mm) och givan relativt låg (3 ton per ha) i motsats till många tidigare försök med mald kalk och högre doser (5-10 ton per ha). Vissa äldre försök där kalksorten anges som "jordbrukskalk" är dock troligen jämförbara med Skogsstyrelsens försök. Den begränsade finkornandelen ger utslag i att de kortsiktiga effekterna är måttliga på till exempel pH-höjning i humusskiktet som i genomsnitt inskränkte sig 0,7 enheter fem år efter kalkning. Finmalda kalksorter ger i regel en större effekt, i regel en enhet eller mer (Staaf m. fl., 1996).

Markvatten

Effekterna på markvattnets kemi under en femårsperiod efter kalkning var relativt små enligt resultaten från denna studie. Eftersom markvattenkemin varierar mycket även i ett opåverkat system, bland annat beroende på väderlek och hydrologi, krävs det långa tidsserier med många mättillfällen för att säkerställa eventuella trender. Under den första femårsperioden fanns tydliga tendenser till att kalkningen motverkade en minskning av kalciumhalten i markvattnet som noterades i början av 1990-talet i okalkade skogsytor (Hallgren Larsson m. fl., 1997). För magnesiumhalt, aluminiumhalt, vätejonhalt och BC/Al-kvot går inga sådana trender att påvisa.

Jämförelser mellan kalkade ytor och referensytor visade på en påtaglig men kortvarig kalkningseffekt någon gång under de tre första åren. Kalciumhalten ökade kraftigt i kalkade ytor jämfört med referensytor, och aluminiumhalten minskade. Effekterna skilde sig åt mellan olika ytor, bland annat beroende på skillnader i humustjocklek och varierande hydrologiska förhållanden.

Endast två av de 14 försöksområdena uppvisade förhöjda halter av nitratkväve i markvatten (oberoende av kalkning) trots att 50 % av provytorna hade en C/N-kvot lägre än 25 i humuslagret. Kalkningen har under de första fem åren inte ändrat det förhållandet.

Tidigare kalkningsförsök med undersökningar av markvatten visar en liknade bild som Skogsstyrelsens försöksområden. Den tydligaste effekten var en ökning av kalciumhalten. Effekterna på pH och aluminium var små under de första åren efter kalkning. På några lokaler med högt kvävenedfall och skog utan markvegetation noterades en ökning av halten nitratkväve efter kalkning (Staaf m. fl., 1996) i tidigare försök, där kalkmedlen inte var det samma som i Skogsstyrelsens försöksverksamhet.

Skillnader i effekter orsakade av variationer i kalkmedlet

Det finns av olika skäl vissa skillnader mellan ytorna vad gäller kalkmedlets egenskaper. I några ytor var avsikten att testa andra kalksorter än Mg-kalk. I andra ytor levererades kalk med egenskaper som avvek från de krav Skogsstyrelsen preciserat. Även givan skilde sig från riktvärdet 3 ton/ha i vissa ytor, vilket beror på kalkningstekniska svårigheter. Dessa skillnader kan tänkas leda till skillnader i kalkningseffekternas omfattning mellan olika ytor. I bilaga 2 ges en överblick över avvikelserna.

Givan, som enligt Skogsstyrelsens koncept skulle vara 3 ton/ha, varierade mellan 2.3 och 5.7 ton/ha. I två fall, N2A och O2B var givan högre än 5 ton/ha. I humuslagret tenderar effekten på kalciumhalten vara något större i dessa ytor än i de övriga ytorna i områdena (N2A jämfördes med N2B och N2C, medan O2B jämfördes med O2A och O2C). För O2B gällde detta även i de båda djupare skikten. Skillnaderna var dock

små och går inte att med säkerhet knyta till skillnaderna i giva. Sammanfattningsvis kan sägas att skillnaderna i giva inte visat sig ha någon avgörande betydelse för effekterna.

Kalkmedlets egenskaper varierade dels med avseende på sammansättning, dels kornstorleksfördelning. Några ytor behandlades med kalk utan magnesiuminblandning, medan andra behandlades med ren dolomitkalk, med högre magnesiumhalt än Mg-kalk. Detta innebär givetvis att effekterna på magnesiumhalten i markprofilen skiljer sig åt mellan olika ytor. Däremot bör det inte ha någon stor påverkan på effekterna på andra markkemiska parametrar såsom aluminiumhalt och basmättnad.

Kornstorleksfördelningen spelar stor roll för hur snabbt kalket upplöses. Finkornsandelen i kalkmedlet är anpassad för att ge en långsam och varaktig förbättring av markkemin. En för hög halt av finkornigt material innebär en risk för oönskade effekter i form av exempelvis en kraftig men kortvarig förhöjning av pH i ett initialt skede efter kalkning.

I några områden var kalkmedlet kraftigt avvikande från Skogsstyrelsens koncept, med avseende på kornstorleksfördelning. Område R1 behandlades med finmald granulerad dolomitkalk. I områdena N2 och P1 var finkornhalten i kalkmedlet avsevärt högre än 30 %, vilket är den övre gränsen i Skogsstyrelsens koncept.

pH-ökningen i humuslagret skiljer sig åt mellan olika ytor. N2 och P1, med hög finkornandel, utmärker sig dock inte genom en större pH-ökning än övriga ytor. I R1 ökade däremot pH kraftigt första året. R1B och R1C är de ytor med störst pH-ökning av alla ytor under första året (2.1 respektive 1.2 enheter). I R1A ökade pH med 0.9 enheter under första året, vilket även det innebär en av de allra största ökningarna. Efter första året skedde ingen ökning. pH-effekterna i R1 beror med stor sannolikhet på det avvikande kalkmedlet.

Det är svårt att uttala sig om hur stor betydelse variationer hos kalkmedlet har på effekterna i markvattnet. Detta beror till stor del beroende på att effekterna i markvattnet efter fem år är mycket diffusa. En jämförelse mellan område N1, som behandlats med kalk med finkornandel enligt Skogsstyrelsens rekommendationer, och område N2, med avsevärt högre finkornandel, visar att kalciumhalten i område N2 omkring ett år efter kalkning höjdes kraftigt under en kort period. I område N1 finns ingen motsvarighet till denna höjning. Samma typ av jämförelser gjordes mellan område P1 (hög finkornsandel) och område P2 (finkornsandel enligt Skogsstyrelsens rekommendationer), men här kunde inga skillnader observeras.

4.2 Jämförelse med uppsatta mål

Flera av de uppsatta målen (bilaga 1) som berör marken innebär att vissa specificerade resultat skall nås efter 10 eller 20 år, vilket innebär att de för närvarande inte går att utvärdera fullt ut. Resultaten från femårsperioden kan dock användas för vissa bedömningar av måluppfyllelsen.

De målsättningar som i viss mån kan utvärderas eller diskuteras är:

- pH (H₂O) får aldrig överstiga 5.0 i humusskiktet.
- Basmättnadsgraden ska höjas (uppgå till 15-25 % i övre delen av rostjorden efter 10-20 år).
- Upplösningen av kalkningsmedlet ska ske gradvis under en 10-årsperiod och varaktigheten av effekterna ska bestå under 20-30 år.
- Yt- och grundvatten ska ej påverkas negativt genom ökad utlakning av nitrat, aluminium och andra skadliga ämnen.

Mål för ökning av pH i humusskiktet

År 0, före kalkning, var pH (H₂O) inte över 5.0 i någon provyta. Ett år efter kalkning var pH högre än 5 på fem provytor och år 5 på tio av totalt 42 ytor. Högsta uppmätta pH var 5.75 (G2B, den enda provytan med brunjord). Generellt var pH-ökningen snabbast i början, men fortsatte även efter ett år. Den kan tänkas fortsätta även efter fem år eftersom det är troligt att en stor del av tillförd kalk fortfarande är ovittrad efter fem år. Antalet ytor med pH mellan 4,5 och 5,0 var tre år 0, sex år 1 och fjorton år 5.

De ytor som efter kalkning hade pH-värden över 5 hade redan före behandling relativt höga värden. Ett alternativ till att ange gränsen till pH 5.0 är att ange en acceptabel ökning. I humus med pH(H₂O) under 5.0 är en enhet en nivå som i ett antal försök visat sig ge en eftersträvd minskning av surhetsgraden utan uppenbara bieffekter (Staafl m. fl., 1996).

Mål för ökning av basmättnad

Basmättnadsgraden i ett jordprov kan variera på grund av analysmetodiken, främst hur halten utbytbara vätejoner är analyserad. Skogsstyrelsens mål innebär i praktiken att basmättnadsgraden nära nog skall fördubblas i mineraljordens översta skikt. En fördubbling motsvarar den minskning som skett i genomsnitt i Götaland enligt upprepning av tidigare markkemiska undersökningar samt modellberäkningar (Eriksson m. fl., 1992, Moldan m. fl., 1998). Att uttrycka målet som en fördubbling underlättar jämförelser mellan olika analys- och beräkningssätt. I denna studie kan det konstateras att basmättnadsgraden ökade med cirka 50 % i skiktet 0-10 cm de första fem åren efter kalkning. På grund av att en stor andel av tillförd kalk fortfarande finns i humuslagret finns det en betydande potential för att basmättnaden i mineraljorden skall öka ytterligare. Framtida studier kan visa om målet nås fullt ut.

Långsam upplösning av kalkningsmedlet

Det faktum att merparten av tillförd kalk efter fem år återfinns i humuslagret innebär goda förutsättningar för att målet kommer att uppfyllas. Den krossade kalken med begränsad finkornandel har dessutom en relativt långsam vittringshastighet i laboratorieförsök med upprepad lakning (Larsson & Westling, 1998). Den dolomitiska kalkstenen vittrar långsammare än vanlig kalksten.

Utlakning

Undersökningarna av markvatten före och upp till fem år efter kalkning, som beskrivning av utlakningen, visar inga effekter på halterna av nitratkväve, aluminium eller andra undersökta ämnen där en ökning eller minskning kan betraktas som oönskad.

4.3 Långsiktiga effekter av kalkning

Fem år är en relativt kort tid att bedöma mark- och markvattenkemiska effekter av skogsmarkskalkning. Det finns dock signifikanta skillnader i markkemi både i humuslagret och i mineraljorden redan under perioden på fem år efter behandling. Det finns en tidsförskjutning som innebär att förändringarna i humuslagret inträffade i princip direkt efter kalkningen, medan effekterna i mineraljorden oftast inte uppträdde förrän efter ett år. Detta beror på att det tar lång tid för tillförd kalk att tränga ned under humusskiktet. Det faktum att det fanns signifikanta effekter i mineraljordsskiktet (0-10 cm) trots att bara en liten del av kalken trängt ned, pekar på att förändringen av kemin i mineraljorden (minskning av utbytbara väte och aluminiumjoner samt ökning av baskatjoner) kommer att fortskrida under en lång tid framöver. På lång sikt, 30 till 60 år, finns förutsättningar att öka basmättnadsgraden i djupare mineraljordsskikt (> 50 cm), vilket har visats i andra studier av gamla kalkningsförsök (Hallbäcken & Popovic, 1985).

De effekter på markvattenkemin som noterats under den femåriga perioden efter kalkning är huvudsakligen initiala kortvariga förändringar som troligen orsakades av en relativt snabb upplösning av det mest finkorniga materialet i kalkningsmedlet. En varaktig minskning av markvattnets surhetsgrad på 50 cm kräver att mineraljordens basmättnad ökar på djupet, ned mot de markskikt där markvattnet provtas. Eftersom kalkens vittring och nedträngningsförmåga är långsam kommer det sannolikt ta lång tid innan markvattnets pH ökar påtagligt. Så länge som markens buffertsystem domineras av aluminium kommer pH att vara lågt (mellan 4 och 5). Det krävs en stor tillförsel av basiska ämnen för att återställa ett buffertsystem som baseras på jonbyte med baskatjoner, vilken kan hålla pH på en betydligt högre nivå (mellan 5 och 6). Denna kraftiga tillförsel efter kalkning går än så länge att finna endast i markens ytligaste skikt. Undersökningarna av markkemi visar att ökningen av mineraljordens basmättnad sannolikt kommer att fortsätta under många år i samband med att tillförd kalk vittrar och tränger ned i markprofilen. Det gör att markvattnets kvalité relativt djupt i mineraljorden kan förbättras (högre pH och lägre halter av aluminium) på lång sikt, som en effekt av kalkningen. Om detta uppnås kan en varaktig minskning av surhetsgraden i grund- och ytvatten uppnås, vilket är ett viktigt mål med Skogsstyrelsens åtgärdskoncept (se bilaga 1).

Kvoten mellan kol och kväve i de undersökta provytorna indikerar att en stor del av den areal som Skogsstyrelsen bedömer som i behov av åtgärder har C/N-kvoter under 25 i humusskiktet, vilket innebär en risk för kraftig nitrifikation och utlakning av organiskt kväve. Resultaten efter fem års mätningar visar att kalkningen inte har stimulerat utlakning av kväve, men det är viktigt att långsiktigt följa utvecklingen när pH ökar i djupare markskikt.

5 Referenser

- Akselsson & Westling 1999. Markvattenkemins rumsliga variation i ett granbestånd i södra Sverige. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning (IVL) B (i tryck).
- Eriksson E., Karlton E. & Lundmark J.-E. 1992. Acidification of Forest Soils in Sweden. *Ambio* 21: 150-154.
- Gundersen P., Callesen I. & de Vries W. 1999. Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios. Accepterad för publicering i *Environmental Pollution* (föredrag vid "Nitrogen Conference" i Holland mars 1998).
- Hallbäcken L. & Popovic' 1985. Markkemiska effekter av skogsmarkskalkning. SNV Rapport 1880. Solna, 240 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.
- Larsson, P.-E. & Westling, O. 1997. Ytvatten i kalkade avrinningsområden - Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitalisering av skogsmark. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning (IVL) B1279. Aneboda, 64 s.
- Larsson, P.-E. & Westling, O. 1998. Leaching of wood ash and lime products-laboratory study. *Scandinavian Journal of Forest Research. Supplement No 2, 1998: 17-22. ISSN 0282-7581.*
- Moldan F., Westling O. & Munthe J. 1998. Geochemical modelling of acidification and recovery in forest soils. Slutrapport från Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning (IVL), stencil, 52 s.
- Staaf, H., Persson, T. & Bertills (red.) 1996. Skogsmarkskalkning. Resultat och slutsatser från Naturvårdsverkets försöksverksamhet. Rapport 4559. Stockholm. 290 s.

Bilaga 1 Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödning 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 markbehandlingar.

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 önskad 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(H₂O) 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 floran och faunan 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 vitaliseringsgödning

Omfattande experiment med kalkning och vitaliseringsgödning 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 vitaliseringsgödning 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 koncentring 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 Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning (IVL) i Aneboda. Beståndsbeskrivningar, skogsskadebedömningar, markkemiska undersökningar samt provtagningar utförs av Skogsvårdsstyrelserna. 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 vitaliseringsgödning 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 trädutväxt 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 syranneutralisering 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 vitaliseringsgödslning 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, Mikael Axelsson (tel. 036/155600). Uppgifter om effektuppföljningen kan fås från IVL i Aneboda 360 30 Lammhult, Per-Erik Larsson och Olle Westling (tel. båda 0472/262075).

Litteratur om försurning, kalkning och vitaliseringsgödslning

Nedanstående förteckning tar främst upp litteratur om effekter på skogsekosystem av försurning, kalkning och vitaliseringsgödslning.

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

Ekologiska effekter av skogsbränsleuttag och askåterföring, 1996. Kungliga Skogs- och Lantbruksakademins 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 1995-1995. Institutet för Vatten och Luftvårdsforskning (IVL) Aneboda, B1257. 142 s. samt bilaga.

Kritiska faktorer för skogsträdens tillväxt och vitalitet, 1995. Kungliga Skogs- och Lantbruksakademins 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. Stockholm. 290 s.

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

Bilaga 2 Ytor med avvikelser beträffande kalkmedlets egenskaper och giva

Bilaga 2a. Skogsstyrelsens riktvärden på kalkmedlets egenskaper och kalkgiva, samt intervallen som använts för att definiera avvikelser i bilaga 2b.

	Skogsstyrelsens riktvärden	Intervall som godkänns i bilaga 2a
Giva	3 ton/ha	2.0-4.0 ton/ha
Kalksort	Mg-kalk	Mg-kalk
Sammansättning	51% CaO, 4% Mg	≥40% CaO, ≥2% Mg
Kornstorlek	Högst 30% <0.25 mm, Högst 5% > 3mm	Högst 35% < 0.25 mm, Högst 10% > 3mm

Bilaga 2b. Ytor där kalkmedlets egenskaper och/eller givan skiljer sig från Skogsstyrelsens koncept. I bilaga 2a anges riktvärdena enligt Skogsstyrelsens rekommendationer, samt gränserna som använts i bilaga 2b.

Lokal	"Avvikelser"
L12B	Hög giva (4.2 ton/ha)
N12A	Ingen Mg-inblandning
N12B	Ingen Mg-inblandning
N12C	Ingen Mg-inblandning
N22A	Engelsk dolomit (mkt hög finkornhalt, ca 50%), hög giva (5.5 ton/ha)
N22B	Engelsk dolomit (mkt hög finkornhalt, ca 50%)
N22C	Engelsk dolomit (mkt hög finkornhalt, ca 50%)
O12A	Dolomitkalk (hög Mg-halt), hög giva (4.3 ton/ha), hög finkornsandel (>35%)
O12B	Dolomitkalk (hög Mg-halt), hög finkornsandel (>35%)
O12C	Dolomitkalk (hög Mg-halt), hög finkornsandel (>35%)
O22B	Hög giva (5.7 ton/ha)
P12A	Låg Mg-halt, hög finkornshalt (>40%)
P12B	Låg Mg-halt, hög finkornshalt (>40%)
P12C	Låg Mg-halt, hög giva (4.1 ton/ha)
P22A	Ingen Mg-inblandning
P22B	Ingen Mg-inblandning
P22C	Ingen Mg-inblandning
R12A	Granulerad finmald dolomitkalk (finkornigt, hög Mg-halt)
R12B	Granulerad finmald dolomitkalk (finkornigt, hög Mg-halt), hög giva (4.3 ton/ha)
R12C	Granulerad finmald dolomitkalk (finkornigt, hög Mg-halt)
R22A	Hög finkornandel (> 35%)
R22B	Hög finkornandel (>35%)
R22C	Hög finkornandel (>35%), låg Mg-halt

Bilaga 3 Markkemi i undersökta provytor före behandling

Bilaga 3a. Markkemi i humuslagret före behandling

Yta	Glöd-förlust (%)	Utbytbara ämnen						C/N
		H uekv/g	Al uekv/g	K uekv/g	Ca uekv/g	Mg uekv/g	Basmättnad (exkl. Na) %	
G1A	65.6	60.3	65.9	7.0	63.9	21.1	41.8	33.4
G1B	54.2	44.3	32.6	7.1	79.0	13.4	56.2	26.4
G1C	57.6	36.3	46.9	5.4	77.5	11.7	53.2	28.7
G2A	21.4	17.1	37.3	3.7	45.0	6.1	50.1	20.9
G2B	32.9	9.4	57.0	3.2	51.2	8.0	48.3	19.4
G2C	39.8	25.9	37.8	5.1	68.9	10.7	56.8	26.2
G2R	75.6	23.1	43.7	13.5	108.5	24.6	68.7	27.0
K1A	58.6	26.9	115.7	5.3	26.1	8.0	22.0	12.8
K1B	23.4	5.7	25.6	4.5	45.0	7.3	64.1	15.4
K1C	44.3	17.5	76.8	5.2	28.6	5.9	29.5	17.6
K2A	52.1	35.4	56.7	8.5	85.1	14.2	53.9	14.9
K2B	80.3	31.3	91.5	7.8	106.5	23.6	52.9	19.7
K2C	32.4	25.7	38.7	7.1	57.1	9.3	53.1	18.6
K2R	40.0	23.1	38.4	1.5	84.6	12.8	60.9	18.4
L1A	82.1	62.0	85.5	7.1	47.5	24.5	34.9	28.5
L1B	78.6	56.5	51.4	8.1	46.6	21.7	41.4	24.9
L1C	75.4	46.4	27.1	9.5	65.5	18.9	56.1	23.9
L2A	79.8	51.3	78.4	9.2	64.0	20.2	41.8	23.5
L2B	79.4	42.1	109.1	13.0	45.5	16.6	33.4	20.5
L2C	76.8	25.9	68.2	19.3	61.8	19.5	51.7	21.2
L2R	66.9	28.6	85.3	11.4	51.1	15.0	40.5	16.3
N1A	77.1	42.3	72.9	6.3	73.6	28.3	48.0	24.6
N1B	45.9	38.2	40.6	3.5	42.4	12.5	42.2	23.0
N1C	68.6	51.3	32.9	5.6	72.4	22.5	54.5	20.4
N2A	59.7	35.7	24.2	9.5	67.8	33.3	64.8	27.8
N2B	62.7	41.5	44.8	6.4	55.6	29.3	51.0	26.4
N2C	23.1	26.1	41.3	2.6	13.1	6.3	23.7	21.2
N2R	45.0	37.8	31.4	4.6	37.7	17.0	46.0	22.5
O1A	72.0	42.9	27.8	9.0	102.7	34.8	67.4	25.2
O1B	57.5	48.5	61.6	9.1	25.9	18.8	31.6	23.9
O1C	78.8	46.5	100.8	8.3	61.2	29.5	40.9	24.3
O2A	51.3	34.0	37.0	7.3	38.1	23.4	48.8	27.2
O2B	36.7	28.7	33.5	5.6	45.2	18.8	52.8	23.3
O2C	89.8	54.5	102.0	5.0	82.2	33.0	43.4	28.4
O2R	33.0	27.6	46.8	4.8	28.3	10.7	37.0	26.1
P1A	28.3	25.5	75.2	1.8	10.8	6.4	15.8	24.8
P1B	29.9	25.2	58.8	2.6	13.4	4.9	20.0	19.9
P1C	64.6	49.1	56.5	3.7	74.9	36.5	52.2	29.2
P2A	54.9	45.5	43.1	10.9	60.3	17.3	50.0	28.4
P2B	60.8	41.5	82.8	15.6	51.2	22.6	42.3	24.6
P2C	49.1	37.6	45.8	8.7	65.8	24.0	53.2	30.4
P2R	53.6	34.6	96.9	9.5	54.5	18.0	38.2	24.0
R1A	64.2	28.9	10.8	8.6	140.5	16.2	80.6	29.2
R1B	75.0	38.1	25.9	9.2	118.0	19.5	69.6	36.4
R1C	79.0	44.8	24.2	11.8	103.7	18.5	66.0	34.0
R2A	80.4	62.1	12.6	14.9	87.2	25.7	63.1	26.9
R2B	62.3	51.6	23.7	11.4	39.4	19.3	48.2	26.6
R2C	63.8	58.7	26.1	11.9	59.4	20.4	51.8	25.2
R2R	72.8	55.9	19.4	17.3	54.8	23.5	56.0	28.7

Bilaga 3b. Markkemi i 0-5 cm-skiktet före behandling

Yta	Glöd- förlust (%)	Utbytbara ämnen					Basmättnad (exkl. Na) %	C/N
		H uekv/g	Al uekv/g	K uekv/g	Ca uekv/g	Mg uekv/g		
G1A	15.5	12.9	56.0	1.2	7.4	2.6	14.0	6.3
G1B	6.3	10.2	32.3	0.9	5.0	1.0	14.0	12.1
G1C	6.3	11.4	36.4	0.8	3.1	0.7	8.8	13.4
G2A	<i>Ej samma skiktindelning vid provtagning i mineraljorden som i övriga ytor</i>							
G2B	14.0	10.0	36.1	1.8	10.1	2.2	23.2	27.1
G2C	11.8	10.9	40.5	1.5	10.8	2.3	22.1	25.2
G2R	13.6	16.6	43.4	2.1	7.0	2.2	16.0	31.0
K1A	16.8	8.3	43.7	1.4	4.6	1.6	12.7	14.4
K1B	7.0	7.4	36.3	0.9	6.6	1.1	16.5	9.4
K1C	12.0	7.2	34.2	1.3	4.6	1.3	14.8	14.3
K2A	11.5	11.4	49.4	2.1	10.4	2.0	19.3	18.0
K2B	59.5	19.4	79.9	3.6	31.5	8.7	30.6	19.5
K2C	10.4	11.3	42.6	1.7	9.3	2.0	19.4	15.5
K2R	11.5	10.1	41.3	0.5	10.2	2.2	20.0	15.0
L1A	8.0	11.7	38.2	0.7	0.9	0.8	4.6	28.4
L1B	13.9	15.3	42.4	1.0	1.5	1.3	6.2	12.1
L1C	6.1	9.8	29.9	0.9	1.7	0.9	7.9	23.2
L2A	11.1	14.7	49.5	1.1	2.0	1.3	6.4	16.3
L2B	16.0	12.4	51.5	1.7	1.8	1.4	7.2	17.9
L2C	13.3	11.4	42.3	1.7	2.1	1.7	9.2	16.9
L2R	15.3	12.8	48.2	1.8	2.4	2.1	9.4	13.6
N1A	6.1	9.2	21.7	0.6	2.2	1.0	11.2	25.5
N1B	6.2	12.2	24.8	0.7	2.8	1.2	11.4	31.3
N1C	5.8	10.1	19.8	1.3	2.1	0.9	12.7	25.7
N2A	9.8	11.9	33.4	1.2	4.1	2.1	13.9	29.1
N2B	6.6	9.0	22.6	0.7	2.5	1.3	12.4	24.6
N2C	8.7	8.5	35.5	0.9	2.0	1.2	8.6	25.1
N2R	8.5	11.1	32.9	0.6	1.6	0.9	6.7	19.2
O1A	5.4	8.3	26.8	1.6	3.7	1.6	16.7	15.7
O1B	9.9	10.2	49.6	1.2	1.2	1.0	5.3	19.3
O1C	6.6	10.9	38.8	0.8	2.0	0.9	7.0	20.9
O2A	4.5	9.5	24.8	0.8	1.6	1.2	9.5	14.5
O2B	9.0	14.5	38.8	1.1	3.4	1.8	10.6	22.7
O2C	5.2	9.5	33.3	0.5	1.5	0.7	5.7	19.1
O2R	8.4	13.8	39.4	1.0	2.3	1.3	8.1	23.1
P1A	9.6	12.3	37.9	0.6	1.9	1.2	6.8	31.2
P1B	8.8	11.0	37.6	0.7	2.8	1.2	8.9	19.5
P1C	6.8	9.3	26.3	0.6	2.5	1.4	11.2	21.1
P2A	9.8	16.6	42.6	2.5	7.2	2.1	16.9	20.8
P2B	10.4	17.1	40.7	2.2	3.5	1.7	11.5	19.4
P2C	7.6	10.2	32.8	0.7	11.1	2.1	23.7	23.1
P2R	8.2	11.4	41.7	0.7	5.1	1.3	11.7	19.6
R1A	3.6	5.3	14.2	0.8	6.6	0.8	29.9	39.3
R1B	5.5	9.2	23.6	1.0	9.1	1.4	26.2	38.7
R1C	2.3	5.8	15.0	0.6	1.9	0.5	13.2	23.7
R2A	<i>Ej samma skiktindelning vid provtagning i mineraljorden som i övriga ytor</i>							
R2B	<i>Ej samma skiktindelning vid provtagning i mineraljorden som i övriga ytor</i>							
R2C	<i>Ej samma skiktindelning vid provtagning i mineraljorden som i övriga ytor</i>							
R2R	<i>Ej samma skiktindelning vid provtagning i mineraljorden som i övriga ytor</i>							

Bilaga 3c. Markkemi i 5-10 cm-skiktet före behandling

Yta	Glöd- förlust (%)	Utbytbara ämnen H uekv/g	Al uekv/g	K uekv/g	Ca uekv/g	Mg uekv/g	Basmättnad (exkl. Na) %	C/N
G1A	8.2	10.1	43.2	0.7	2.5	0.9	7.3	22.1
G1B	6.3	11.2	36.1	0.7	2.9	0.7	8.4	10.3
G1C	6.6	6.1	25.7	0.6	1.3	0.3	6.4	12.4
G2A	<i>Ej samma skiktindelning vid provtagning i mineraljorden som i övriga ytor</i>							
G2B	12.8	9.1	37.1	1.4	5.2	1.5	15.1	23.4
G2C	8.8	7.9	41.8	0.9	4.3	1.2	11.3	22.3
G2R	9.7	10.4	36.0	2.9	4.8	2.1	17.6	32.1
K1A	11.0	5.8	34.5	0.9	2.8	1.0	10.6	12.2
K1B	5.0	4.8	26.9	0.7	2.3	0.5	9.9	9.6
K1C	10.1	6.1	33.2	0.9	2.3	0.8	9.0	12.4
K2A	8.6	5.9	40.0	1.1	4.0	1.0	11.7	14.3
K2B	62.9	20.9	86.0	4.4	31.4	9.2	29.6	18.9
K2C	7.4	7.4	38.5	1.2	3.9	1.2	11.9	12.9
K2R	8.2	7.2	38.5	0.4	4.9	1.4	12.8	14.0
L1A	6.3	6.6	27.5	0.5	0.5	0.4	4.1	28.3
L1B	8.2	11.1	40.2	0.7	0.7	0.6	3.6	36.3
L1C	5.0	5.8	26.0	0.6	0.7	0.4	4.9	25.0
L2A	7.5	7.9	33.8	0.8	0.7	0.5	4.7	15.9
L2B	10.4	6.9	34.2	1.1	0.9	0.8	6.3	15.2
L2C	8.4	5.2	27.8	0.9	0.8	0.7	6.8	15.1
L2R	9.2	6.1	31.2	1.4	1.4	1.2	9.7	13.6
N1A	7.2	12.5	33.3	0.6	1.9	0.9	6.9	25.2
N1B	5.9	8.3	28.9	0.5	1.6	0.7	7.0	23.4
N1C	8.9	13.5	40.4	0.6	1.9	0.8	5.9	28.1
N2A	8.0	8.6	33.5	0.9	1.6	1.5	8.8	30.5
N2B	7.1	11.1	36.4	0.6	1.6	0.9	6.1	27.0
N2C	7.7	7.7	35.7	0.6	1.3	0.8	6.0	21.6
N2R	8.3	9.1	32.0	0.5	1.0	0.6	4.7	19.5
O1A	6.5	9.5	38.0	1.1	2.6	1.2	9.6	15.9
O1B	8.7	6.5	37.0	1.1	1.0	0.7	5.9	24.8
O1C	7.6	8.4	39.4	0.7	1.5	0.7	5.8	15.1
O2A	5.3	9.4	30.7	0.6	1.1	0.7	5.6	17.9
O2B	7.4	10.4	36.2	1.0	1.0	0.8	5.7	17.3
O2C	4.7	8.2	30.9	0.4	0.8	0.4	3.9	15.9
O2R	7.3	9.3	32.4	0.8	1.4	0.7	6.7	19.4
P1A	9.2	10.8	32.7	0.5	1.0	0.6	4.6	25.0
P1B	8.9	10.0	36.6	0.5	1.6	0.6	5.3	13.2
P1C	9.2	11.9	37.0	0.5	2.1	1.1	7.2	25.5
P2A	7.3	12.3	42.4	2.3	1.9	0.9	8.6	19.8
P2B	8.1	11.4	51.1	0.8	1.2	1.0	4.6	16.9
P2C	8.6	8.7	36.0	0.6	8.1	1.6	18.2	24.3
P2R	5.1	7.4	25.5	0.5	2.4	0.7	9.7	16.2
R1A	3.8	6.1	20.0	0.6	5.2	0.6	19.8	26.7
R1B	4.0	8.3	25.4	0.9	5.2	1.1	17.7	19.2
R1C	3.0	2.8	15.6	0.5	1.1	0.4	9.6	38.4
R2A	<i>Ej samma skiktindelning vid provtagning i mineraljorden som i övriga ytor</i>							
R2B	<i>Ej samma skiktindelning vid provtagning i mineraljorden som i övriga ytor</i>							
R2C	<i>Ej samma skiktindelning vid provtagning i mineraljorden som i övriga ytor</i>							
R2R	<i>Ej samma skiktindelning vid provtagning i mineraljorden som i övriga ytor</i>							

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

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