

Utlakning från kalkade avrinningsområden

Effektuppföljning av Skogsstyrelsens
program för kalkning och
vitaliseringsgödsling av skogsmark

Therese Zetterberg och Olle Westling

B1642
September 2005

| | |
|---|---|
| Organisation IVL Svenska Miljöinstitutet AB | Rapportsammanfattning |
| Adress Box 5302 400 14 Göteborg | Projekttitel Utlakning från kalkade avrinningsområden. |
| Telefonnr 031-725 62 00 | Anslagsgivare för projektet IVLs samfinansierade forskningsprogram med Skogsstyrelsen som huvudsaklig finansär. |
| Rapportförfattare Zetterberg, Therese och Westling, Olle | |
| Rapporttitel och undertitel Utlakning från kalkade avrinningsområden. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitalisering av skogsmark. | |
| Sammanfattning <p>IVL Svenska Miljöinstitutet har bearbetat och utvärderat resultat från undersökningar av ytvatten i tio kalkade avrinningsområden i skog samt ett kalkat hygge. Fyra av de kalkade områdena samt hygget har dessutom matchande referenser. Redovisningen omfattar perioden hösten 1990 fram till och med hösten 2004. Kalkningen, i flertalet fall med tre ton per ha av en blandning av krossad kaksten och dolomit, utfördes huvudsakligen under hösten 1990 och hösten 1991, inom ramen för Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödslning av skogsmark. Resultaten beskriver de långsiktiga effekterna på avrinningsvattnet (13 till 14 år efter behandling) av skogsmarkskalkningen. Generellt ökar koncentrationen av kalcium i bäckvattnet liksom den syraneutraliserande förmågan (ANC) omedelbart efter kalkning och denna effekt kvarstår fortfarande efter 14 år. Samtidigt har surheten och halten oorganiskt aluminium minskat i de behandlade områdena. Bäckvattnet från de behandlade områdena uppvisar också en högre motståndskraft mot tillfälliga kemiska förändringar såsom havssaltepisoder. Kalkningen har inte ökat nitratutlakningen förutom en kortvarig svag ökning strax efter kalkningen. Snarare har utlakningen minskat, sannolikt på grund av en stimulerad denitrifikation i bäcknära zoner. I hyggesförsöket ökade också kalciumhalten och ANC i avrinningsvattnet efter behandling och effekten kvarstår fortfarande. Initialt noterades även här en mindre ökning av nitratutlakning men denna upphörde också efter drygt ett år. Utlakningen av totalaluminium var också låg jämfört med referensbäcken.</p> | |
| Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren Kalkning, ytvatten, vattendrag, skogsmark, hygge, långsiktiga, nitrifikation, denitrifikation, utlakning, pH, ANC, oorganiskt aluminium, totalaluminium, nitrat, kalcium. | |
| Bibliografiska uppgifter IVL Rapport B1642 | |
| Rapporten beställs via Hemsida: www.ivl.se , e-post: publicationservice@ivl.se , fax 08-598 563 90, eller via IVL, Box 21060, 100 31 Stockholm | |

Förord

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

Denna rapport redovisar resultatet från undersökningar av ytvatten i kalkade avrinningsområden. Redovisningen omfattar perioden hösten 1990 fram till hösten 2004. Kalkningarna utfördes huvudsakligen under hösten 1990 och våren 1991. Rapporten är utarbetad av Therese Zetterberg och Olle Westling vid IVL i Göteborg. För en mer omfattande beskrivning av försöksupplägget och metoder samt resultat av numera nedlagda provtytor hänvisar vi till tidigare årsrapport (Larsson och Westling 1996).

Sammanfattning

IVL Svenska Miljöinstitutet har bearbetat och utvärderat resultat från undersökningar av ytvatten i tio kalkade avrinningsområden i skog samt ett kalkat hygge. Fyra av de kalkade områdena samt hygget har dessutom matchande referenser. Redovisningen omfattar perioden hösten 1990 fram till och med hösten 2004. Kalkningen, i flertalet fall med en dos på tre ton per ha av en blandning av krossad kaksten och dolomit, utfördes huvudsakligen under hösten 1990 och våren 1991, inom ramen för Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödning av skogsmark. Resultaten beskriver de långsiktiga effekterna på avrinningsvatten (13 till 14 år efter behandling) av skogsmarkskalkningen.

Under de år som mätningarna har pågått har tydliga skillnader kunnat påvisas i ytvattenkvalité från de kalkade områdena samt referensområdena. Generellt ökar koncentrationen av kalcium i bäckvattnet liksom den syraneutraliserande förmågan (ANC) omedelbart efter kalkning och denna effekt kvarstår fortfarande efter 14 år. Samtidigt har surheten och halten oorganiskt aluminium minskat i de behandlade områdena. Bäckvattnet från de behandlade områdena uppvisar också en högre motståndskraft mot tillfälliga kemiska förändringar såsom havssaltepisoder. Kalkningen har inte ökat nitratutlakningen förutom en kortvarig svag ökning strax efter kalkningen. Snarare minskar utlakningen sannolikt på grund av en stimulerad denitrifikation i bäcknära zoner.

I hyggesförsöket ökade också kalciumhalten och ANC i avrinningsvattnet efter behandling och effekten kvarstår fortfarande. Initialt noterades även här en mindre ökning av nitratutlakning men denna upphörde också efter drygt ett år. Utlakningen av totalaluminium var också låg jämfört med referensbäcken.

Resultaten visar att kalkning av slutna skogsbestånd är en metod för att minska surheten och utlakningen av oorganiskt aluminium i avrinningsvattnet, samtidigt som koncentrationen av kalcium ökar. Kalkning erbjuder också ett skydd mot tillfälliga förändringar i vattenkemin som kan orsakas av till exempel nedfall av havsalt. Hyggesförsöket visar dessutom att kalkning av hyggen kan ske utan avsevärda näringsförluster eller utlakning av giftigt aluminium.

Innehållsförteckning

| | | |
|-----|---------------------------------------|----|
| 1 | Bakgrund..... | 3 |
| 2 | Metoder..... | 3 |
| 2.1 | Försöksområden | 3 |
| 2.2 | Vattenkemi..... | 4 |
| 2.3 | Bearbetningar..... | 5 |
| 3 | Resultat och diskussion | 6 |
| 3.1 | Ytvatten | 6 |
| 3.2 | Specialförsöket (hyggesförsöket)..... | 16 |
| 4 | Slutsatser | 21 |
| 5 | Referenser..... | 21 |

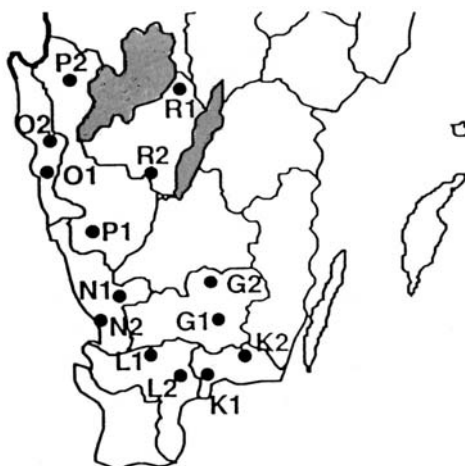
1 Bakgrund

Skogsstyrelsens program mot markförsurning och för ett uthålligt brukande av skogsmark bygger i korthet på att behandla avrinningsområden där den naturliga återhämtningsförmågan bedöms som otillräcklig eller att halten av surt och aluminiumrikt ytvatten är oacceptabelt hög. Den ursprungliga behandlingen omfattade en dos på 3 ton kalk per hektar vilket är den dos som har använts i de försök som redovisas i denna rapport. För att marken ska få ett mer allsidigt tillskott av näringsämnen provas numera en kombination av kalk och aska i dosen 2 + 2 ton per hektar. Detta motsvarar en kalkverkan på 3 ton kalk/ha. Målsättningen är att kalken och askan skall förbättra det markkemiska och markvattenkemiska tillståndet och därigenom höja kvalitén på yt- och grundvattnet. Behandlingen skall ha en verkningstid på 10-20 år eller mer. Metoden skall inte ge upphov till negativa effekter på skogs- och vattenekosystemet. Om utlakningen av surt och aluminiumrikt vatten minskar kan livsmiljön för fisk och andra organismer förbättras.

2 Metoder

2.1 Försöksområden

Effekttuppföljningen av skogsmarkskalkningen sker i fem län i södra Sverige; Skåne, Blekinge, Halland, Kronoberg och västra Götaland (tidigare Älvsborgs, Skaraborgs samt Göteborg och Bohus län). I varje län finns två kalkningsområden (område 1 och 2) som etablerats speciellt för effekttuppföljning. Dessa områden ingår i det så kallade basprogrammet. I anslutning till några av dessa områden finns även referensbäckar. Utöver detta pågår det även specialförsök med bland annat kalkade hyggen. Kalkningsområdenas läge och beteckningar framgår av figur 1. Inom varje kalkningsområde finns delområden och permanenta provytor för olika typer av undersökningar.



Figur 1. Kalkningsområdenas läge och beteckningar. Observera att P, O och R refererar till de tidigare länsbokstäverna för Älvsborgs, Skaraborgs samt Göteborg och Bohus län. Dessa län kallas numera gemensamt för västra Götalands län (O). För enkelhetens skull betecknas provlokaler fortfarande efter de gamla länsbokstäverna.

Under den period som effekttuppföljningsprogrammet pågått har de olika ytornas lämplighet som fortsatta försöksobjekt reviderats vid ett antal tillfällen. Anledningarna till detta skiljer sig åt. Exempelvis avvecklades vissa områden på grund av att de fungerade dåligt rent tekniskt medan andra områden avvecklades på grund av yttre omständigheter såsom svampangrepp (honungsskivling). I tabell 1 redovisas de avrinningsområden som fortfarande ingår i effekttuppföljningsprogrammet tillsammans med information om spridningstidpunkt, medel, giva och spridningsmetod. Observera att tidpunkten för när provtagningen startade ibland skiljer sig åt mellan lokalerna. För en mer utförlig beskrivning av försöksuppläggning och metoder samt resultat från numera nedlagda områden hänvisar vi till Larsson och Westling (1996).

Tabell 1. De ytor som fortfarande ingår i effekttuppföljningsprogrammet samt typ av behandling. Krossad kalksten (KK) och dolomitkalk (DK) har spridits i proportionerna 2:1. H = Helikopterspridning, M = Markspridning. * På grund av felaktig kalkkvalité var finkornhalten betydligt högre jämfört med övriga lokaler.

| Provlokal | Namn | Referensbäck | Spridningstidpunkt | Medel | Dos | Metod |
|-----------------------|-----------|--------------|---------------------|---------|-------------|-------|
| Bas-program | | | | | | |
| G1 | Furuby | | apr-maj 1991 | KK + DK | 3 ton/ha | H + M |
| G2 | Asa | G2R | aug-sep 1991 | KK + DK | 3 ton/ha | H + M |
| K2 | Hallaryd | | aug-okt 1991 | KK + DK | 2.98 ton/ha | H + M |
| L1 | Skeinge | | okt 1990- jan 1991 | KK + DK | 3.05 ton/ha | H + M |
| L2 | Östad | L2R | aug-okt 1991 | KK + DK | 3 ton/ha | H + M |
| N1 | Fröslida | | apr 1991 | KK | 3 ton/ha | H |
| O2 | Munkedal | O2R | aug 1991 | KK | 3 ton/ha | H |
| P1 | Örby | | apr 1992 | KK | 3 ton/ha | H |
| P2 | Bäckefors | | okt-nov 1991 | KK* | 3.1 ton/ha | H + M |
| R2 | Mullsjö | R2R | nov 1991 - apr 1992 | KK + DK | 2.98 ton/ha | H + M |
| Special-försök | | | | | | |
| P3B | Björklida | P3A | okt 1992 | KK + DK | 3.7 ton/ha | M |

2.2 Vattenkemi

Under effekttuppföljningsprogrammets första del (drygt 10 år) skedde provtagning för kemisk analys en gång per månad för att studera de kortsiktiga effekterna på vattenkemin. Programmet har emellertid övergått i en mindre intensiv fas för att istället mäta de långsiktiga effekterna. Provtagning sker därför endast fyra gånger per år (april, maj, september respektive oktober) sedan oktober 2000. Analysprogrammet omfattar: pH, alkalinitet, nitrat, ammonium, organiskt kväve, totalfosfor, kalcium, magnesium, natrium, kalium, mangan, total- och oorganiskt aluminium, färgtal, sulfat och klorid. Beteckningar och analysmetoder framgår av tabell 2.

Tabell 2. Beteckningar och analysmetoder för avrinnande vatten.

| Beteckning | Analysmetod |
|--------------------|--|
| pH | SS 028122-2 |
| Alkalinitet | SS 028139 |
| NO ₃ -N | Jonkromatograf EPA test metod 300.0/EMEP 1996 |
| NH ₄ -N | Tecator ASN 50-05/90 |
| N-Kj | Technicon Ind Meth 376-75W/B Technicon Ind Meth 695-82 W |
| Tot-P | SS 028127-2, mod autoanalyser |
| Ca | ICP-AES EPA metod 200.7 och 200.8 (modifierade) samt jonkromatograf (EMEP, 1996, Small, 1989). |
| Mg | "- |
| Na | "- |
| K | "- |
| Mn | "- |
| Fe | SS 028184 |
| Al | Jonbyte enligt Driscoll 1984 |
| Färgtal | Absorption vid 400 nm mot Pt-std |
| SO ₄ -S | Jonkromatograf EPA test metod 300.0/EMEP 1996 |
| Cl | "- |

2.3 Bearbetningar

För att kunna göra en jämförelse mellan behandlade ytor och referensområden har data från de olika avrinningsområdena delats in i följande grupper:

- Kalkade lokaler med referens: G2, L2, O2 samt R2
- Referenser: G2R, L2R, O2R samt R2R. Bokstaven R står för referens
- Kalkade lokaler med och utan referens: G1, G2, K2, L1, L2, N1, O2, P1, P2 samt R2
- En särskild jämförelse har även skett mellan ett kalkat område (G2) och dess referens (G2R)

För varje grupp har medelvärdet och standardavvikelsen beräknats för april respektive oktober månad för respektive parameter. Anledningen till att vi har valt april och oktober månad för utvärderingen beror på att bäckarna sällan är uttorkade vid dessa tillfällen, även om det förekommer. Antalet prover per månad kan därför skilja sig åt genom åren. Exempelvis saknas värden för K2, N1, P1, P34A samt P34B i april 2004. Anledningen till detta beror dock inte på att bäckarna var uttorkade utan på grund av att proverna uteblev.

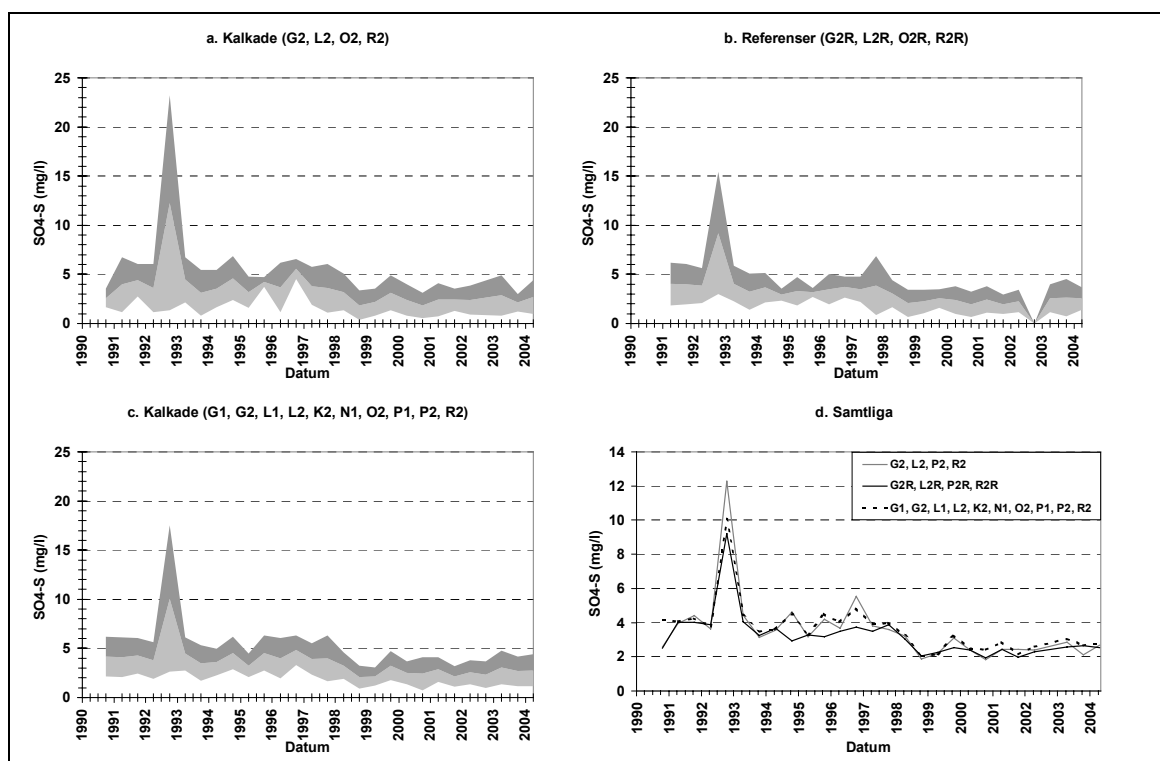
Utöver de analyserade parametrarna har även ytvattnets syraneutraliserande förmåga (ANC=acid neutralizing capacity) beräknats. ANC har angetts som skillnaden mellan antalet positiva och negativa joner, uttryckta som ekvivalenter, enligt följande formel:

$$\text{ANC} = \text{Ca} + \text{Mg} + \text{Na} + \text{K} - \text{SO}_4 - \text{Cl} - \text{NO}_3 \quad (\text{ekv. 1})$$

3 Resultat och diskussion

3.1 Ytvatten

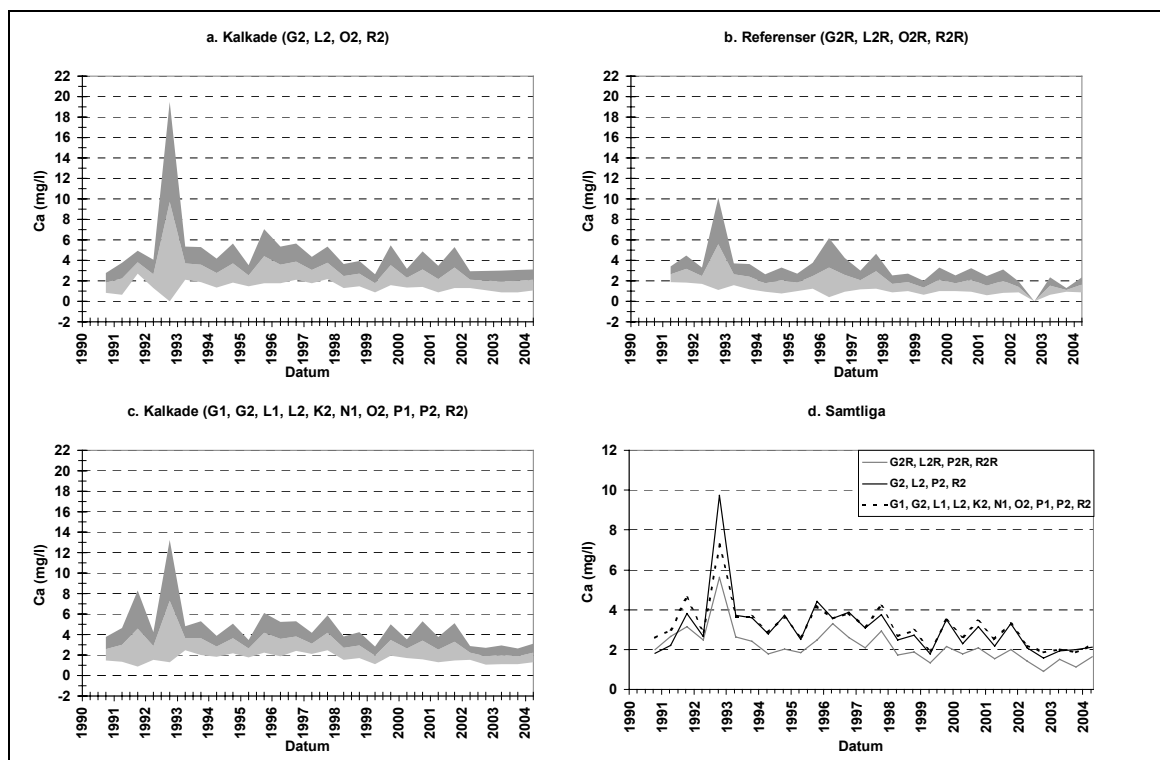
Karaktäristiskt för samtliga lokaler är den kraftiga utlakningen av sulfat som förekommer hösten 1992 (figur 2). Eftersom denna topp även förekommer i referensområdena beror den inte på kalkningen. Snarare är den ett resultat av en grundvattennivå som var mycket under den normala i stora delar av landet. När grundvattnet sjunker kan luftens syre komma i kontakt med djupt liggande sulfidrika marklager. När detta inträffar oxideras sulfid till sulfat. Detta var tydligast i områdena G2 och G2R samt R2 och R2R. Generellt har kalkningen inte haft någon effekt på sulfathalterna i ytvattnet.



Figur 2. April- och oktobermedelvärden för $\text{SO}_4\text{-S}$ mellan perioden 1990-2004. De mörkgrå och ljusgrå fälten representerar standardavvikelsen från medelvärdet. Observera att bäckarna har varit torrlagda vissa år vilket innebär att antalet prover per månad (n) ibland skiljer sig åt. I figur 2d presenteras medelvärdet för samtliga tre grupper tillsammans. Kalkningen utfördes huvudsakligen under hösten 1991 och våren 1992.

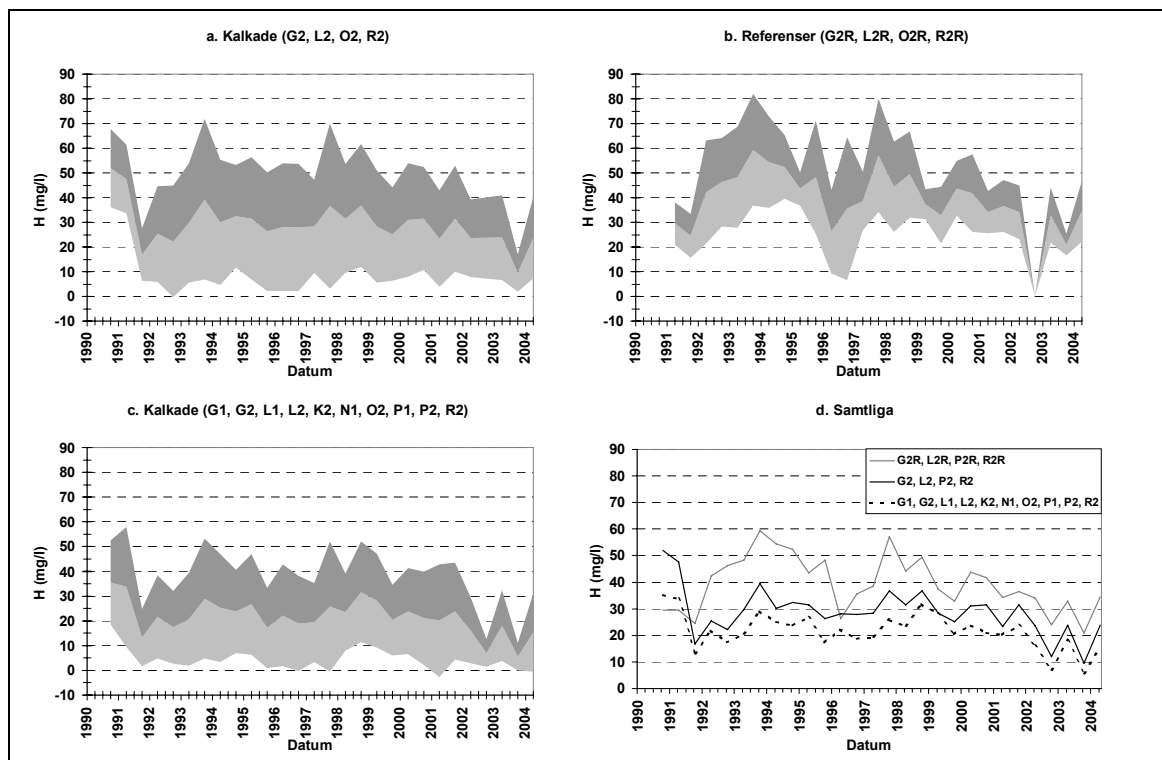
För att jonbalansen (balansen mellan positiva och negativa joner) i ytvattnet skall bibehållas måste läckaget av negativa sulfatjoner balanseras med lika många positiva joner, vilket i detta fall är kalcium (figur 3). Det finns alltså en samvariation mellan sulfat och kalcium. Av den anledningen förekommer också ett stort läckage av kalcium i oktober 1992. Till skillnad från figur 2 är emellertid effekterna av kalkning tydliga i figur 3. I de behandlade områdena G2, L2, O2 samt R2 var

kalciumhalterna lägre jämfört med referenserna innan kalkning. Efter behandlingen (hösten 1991 till och med våren 1992) är halterna istället högre och denna effekt håller fortfarande i sig trots att det har gått mellan 13 och 14 år, figur 3d.

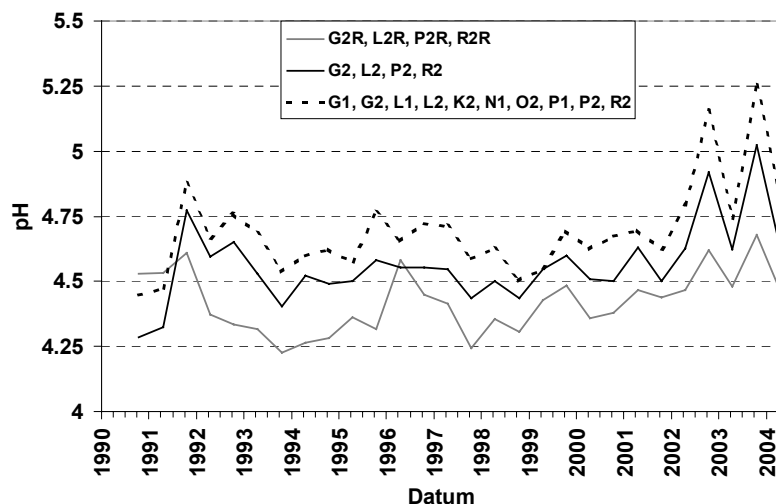


Figur 3. April- och oktobermedelvärden för Ca mellan perioden 1991-2004. De mörkgrå och ljusgrå fälten representerar standardavvikelsen från medelvärdet. Observera att bäckarna har varit torrslagna vissa år vilket innebär att antalet prover per månad (n) ibland skiljer sig åt. I figur 3d presenteras medelvärdet för samtliga tre grupper tillsammans. Kalkningen utfördes huvudsakligen under hösten 1991 och våren 1992.

Samtidigt som kalciumhalterna har ökat i de behandlade bäckarna har surheten istället minskat (figur 4). Efter kalkningen sjunker vätejonkoncentrationen kraftigt i de kalkade bäckarna till nivåer som är lägre än de som uppmätts i referensbäckarna. Efter 13-14 år har koncentrationerna ännu inte stigit till de nivåer som förekom innan behandlingen, utom vid ett tillfälle (april, 1996), figur 4d. I referensbäckarna har vätejonkoncentrationen varit densamma under motsvarande period. Observera också att de behandlade områdena inte uppvisar lika stor fluktuation i bäckvattenkemi, utan verkar vara mer stabil mot förändringar i pH jämfört med referensbäckarna (figur 5).

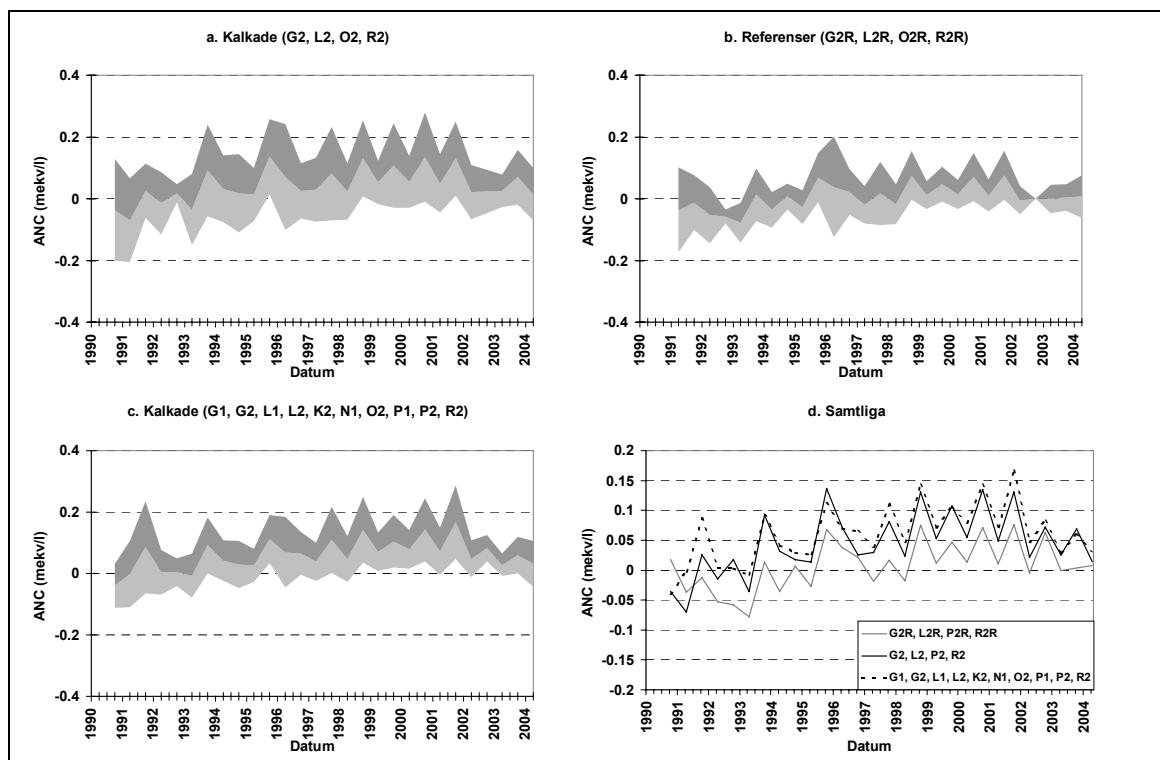


Figur 4. April- och oktobermedelvärden för H mellan perioden 1991-2004. De mörkgrå och ljusgrå fälten representerar standardavvikelsen från medelvärdet. Observera att bäckarna har varit torrlagda vissa år vilket innebär att antalet prover per månad (n) ibland skiljer sig åt. I figur 4d presenteras medelvärdet för samtliga tre grupper tillsammans. Kalkningen utfördes huvudsakligen under hösten 1991 och våren 1992.

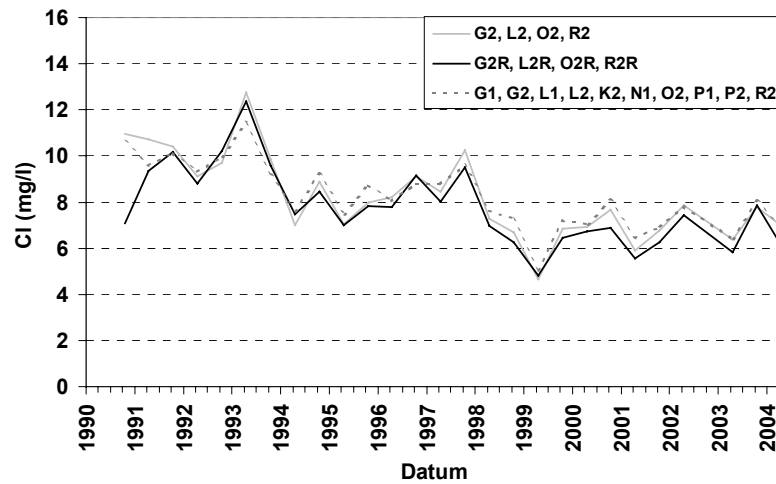


Figur 5. pH-värdet mellan perioden 1991-2004 (april- och oktobermedelvärden). Observera att bäckarna har varit torrlagda vissa år vilket innebär att antalet prover per månad (n) ibland skiljer sig åt. Kalkningen utfördes huvudsakligen under hösten 1991 och våren 1992.

Kalkningen har också haft effekt på vattnets syranutraliserande förmåga (ANC) (figur 6). Innan behandlingen var ANC lägre i G2, L2, O2 samt R2 jämfört med referensbäckarna (figur 6d). Strax efter kalkning ökar emellertid ANC till nivåer som är högre än de som uppmätts i referenserna och denna skillnad existerar fortfarande. Ett annat positivt resultat av kalkningen är lokalernas förmåga att stå emot snabba och tillfälliga kemiska förändringar. Ett exempel på en sådan förändring är de så kallade havssaltepisoderna. Dessa inträffar med stor oregelbundenhet eftersom en förutsättning för deras bildning är kraftiga sydvästliga vindar som bildas ute vid havet och som är kraftiga nog att transportera havssalter (främst Na och Cl) in över land. Väl över land deponeras havssalterna på markytan och deltar i markens utbytesreaktioner, vilket kan få till följd att tillfälliga surstötter uppstår. Hösten 1993 inträffade en sådan havssaltepisod i de sydvästliga delarna av Sverige och Norge vilket indikeras av höga kloridhalter i avrinningsvattnet (figur 7). Denna episod syns också tydligt i figur 6d där ANC sjunker i samtliga bäckar som ett resultat av havssaltnedfallet. Bäckarna i de behandlade avrinningsområdena har däremot klarat av denna kemiska förändring mycket bättre än referensbäckarna, där ANC har sjunkit till betydligt lägre nivåer.

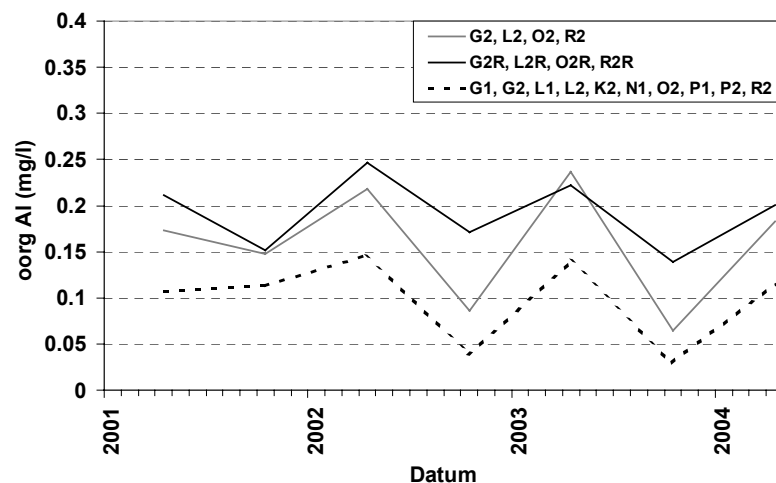


Figur 6. April- och oktobermedelvärden för ANC mellan perioden 1991-2004. De mörkgrå och ljusgrå fälten representerar standardavvikelsen från medelvärdet. Observera att bäckarna har varit torrlagda vissa år vilket innebär att antalet prover per månad (n) ibland skiljer sig åt. I figur 6d presenteras medelvärdet för samtliga tre grupper tillsammans. Kalkningen utfördes huvudsakligen under hösten 1991 och våren 1992.



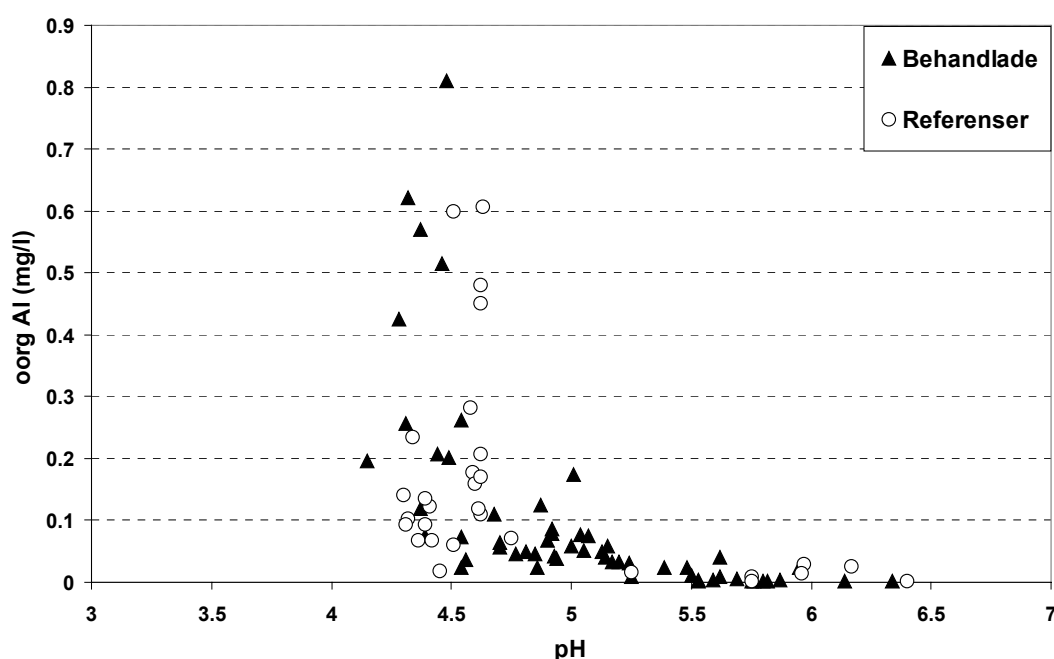
Figur 7. April- och oktobermedelvärden för Cl mellan perioden 1991-2004. Observera att bäckarna har varit torrlagda vissa år vilket innebär att antalet prover per månad (n) ibland skiljer sig åt. Notera den tydliga havssaltepisod som ägde rum i början av 1993. Kalkningen utfördes huvudsakligen under hösten 1991 och våren 1992.

Ett av kalkningens främsta syften är att halterna av oorganiskt aluminium skall minska i avrinningsvattnet. Oorganiskt aluminium har en negativ effekt på både växt- och djurlivet. Analys av oorganiskt aluminium påbörjades emellertid inte förrän i april 2001 varför det inte i dagsläget går att avgöra om behandlingen har haft någon effekt. I bäckarna till de behandlade områdena är halten oorganiskt aluminium dock lägre jämfört med referensbäckarna (figur 8). Däremot går det inte att avgöra om halterna minskar eller ökar under den korta tidsperiod som mätningarna pågått utan fortsatta mätningar får visa utvecklingen.



Figur 8. April- och oktobermedelvärden för oorganiskt Al mellan perioden 2001-2004. Observera att bäckarna har varit torrlagda vissa år vilket innebär att antalet prover per månad (n) ibland skiljer sig åt.

Trots avsaknaden av värden före behandling kan man ändå dra vissa slutsatser om kalkningens effekt på halten oorganiskt aluminium. Det finns nämligen ett klart samband mellan pH-värdet i bäckarna och koncentrationen av oorganiskt aluminium (figur 9). När pH-värdet ökar, minskar halterna av oorganiskt aluminium och vice versa. Figur 9 visar att halten oorganiskt aluminium i avrinningsvattnet från de kalkade områdena har minskat under det att pH-värdet har ökat. Att låga halter oorganiskt aluminium även förekommer vid låga pH-värden beror ett högt färgtal i avrinningsvattnet från framför allt referensbäckarna O2R och R2R. Dessa två avrinningsområden innehåller arealmässigt stora torvmarker vilket ger vattnet dess höga färgtal. Färgtalet är kopplat till halten löst organiskt kol (DOC), vilket orsakar en naturlig surhet i vattendrag samtidigt som det binder oorganiskt aluminium till sig. Resultatet är naturligt sura och brunfärgade vatten med låga halter oorganiskt aluminium.

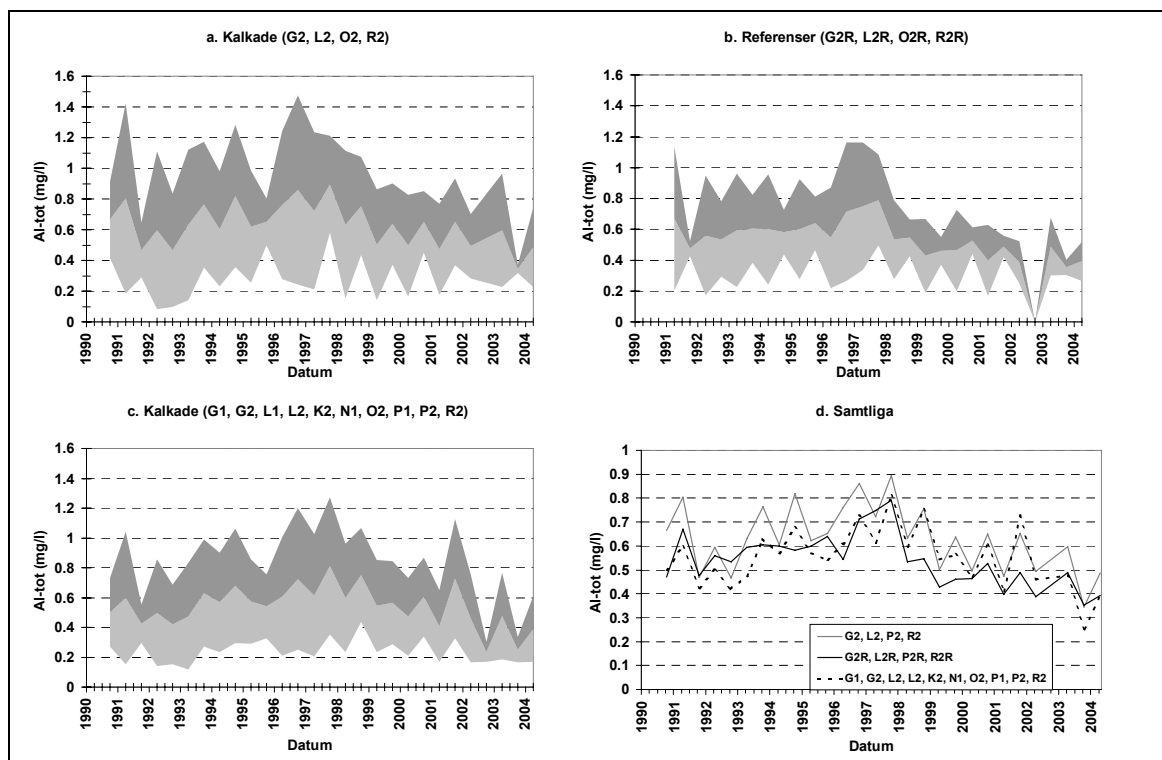


Figur 9. Förhållandet mellan pH-värdet och oorganiskt aluminium mellan perioden 2001-2004 i samtliga bäckar utom de från hyggesförsöket. Antalet n=87.

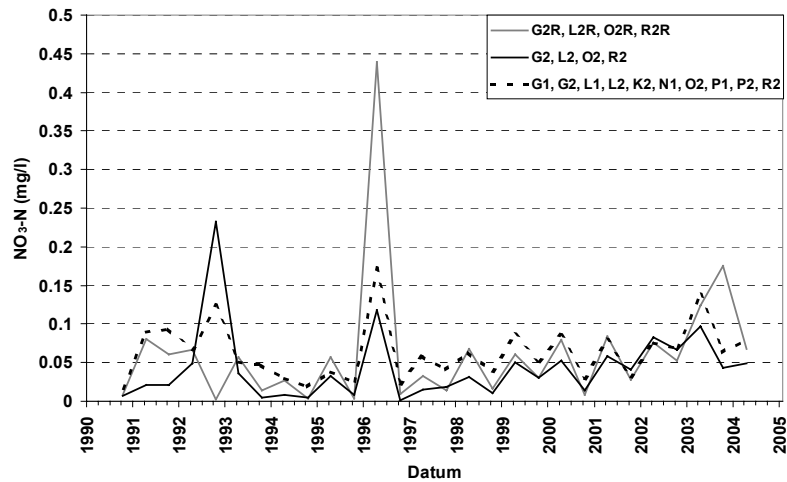
Eftersom aciditeten har minskat i bäckarna till de kalkade områdena (figur 4) är det rimligt att anta att även koncentrationerna av oorganiskt aluminium har minskat som ett resultat av kalkningen. Den totala halten av aluminium verkar emellertid ha sjunkit i samtliga provtytor inklusive referenserna (figur 10). Kalkningen har än så länge inte haft någon effekt på totalhalten.

När marken behandlas med kalk innebär det vanligtvis en förbättring i marktillståndet. Marken blir mindre sur och livsmiljön för de nedbrytande organismerna förbättras varvid också nedbrytningen ökar. En av produkterna vid nedbrytning är ammonium. Om konkurrensen om ammonium är låg samt om nitrifikationsbakterier finns närvarande i marken skapas förutsättningar för att en nitrifikation skall kunna äga rum och att ammonium oxideras till nitrat. Om inte växterna kan tillgoda-göra sig det frigjorda nitraten finns det en risk att det istället kan lakas ut ur marken och orsaka övergödning framför allt i den marina miljön. Resultaten från dessa försök visar dock ingen ökad utlakning av nitrat som effekt av kalkningen (figur 11). Vid flera tillfällen är läckaget från referen-

serna högre än från de behandlade områdena. Kort efter behandlingen sker det en mindre ökad utlakningen från de kalkade områdena, men redan efter ett år har halterna minskat. Det verkar också som om nitratläckaget ökar svagt i samtliga områden, inklusive referenserna, vilket kan indikera att markerna lagrat upp en stor mängd kväve, på grund av ett tidigare och fortsatt högt nedfall. Generellt är utlakningen av nitrat starkt säsongsbetonad, med högre värden på våren (efter snösmältningen och innan vegetationssäsongen har kommit igång) och med lägre värden på hösten.

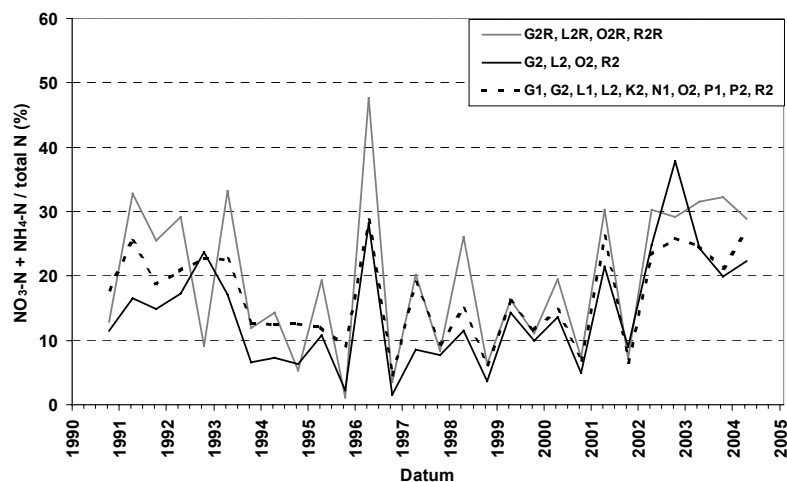


Figur 10. April- och oktobermedelvärden för totalhalter av aluminium mellan perioden 1991-2004. De mörkgrå och ljusgrå fälten representerar standardavvikelsen från medelvärdet. Observera att bäckarna har varit torrlagda vissa år vilket innebär att antalet prover per månad (n) ibland skiljer sig åt. I figur 10d presenteras medelvärdet för samtliga tre grupper tillsammans. Kalkningen utfördes huvudsakligen under hösten 1991 och våren 1992.



Figur 11. Nitrathalter (mg/l) baserad på april- och oktobermedelvärden mellan perioden 1991-2004. Observera att bäckarna har varit torrlagda vissa år vilket innebär att antalet prover per månad (n) ibland skiljer sig åt. Kalkningen utfördes huvudsakligen under hösten 1991 och våren 1992.

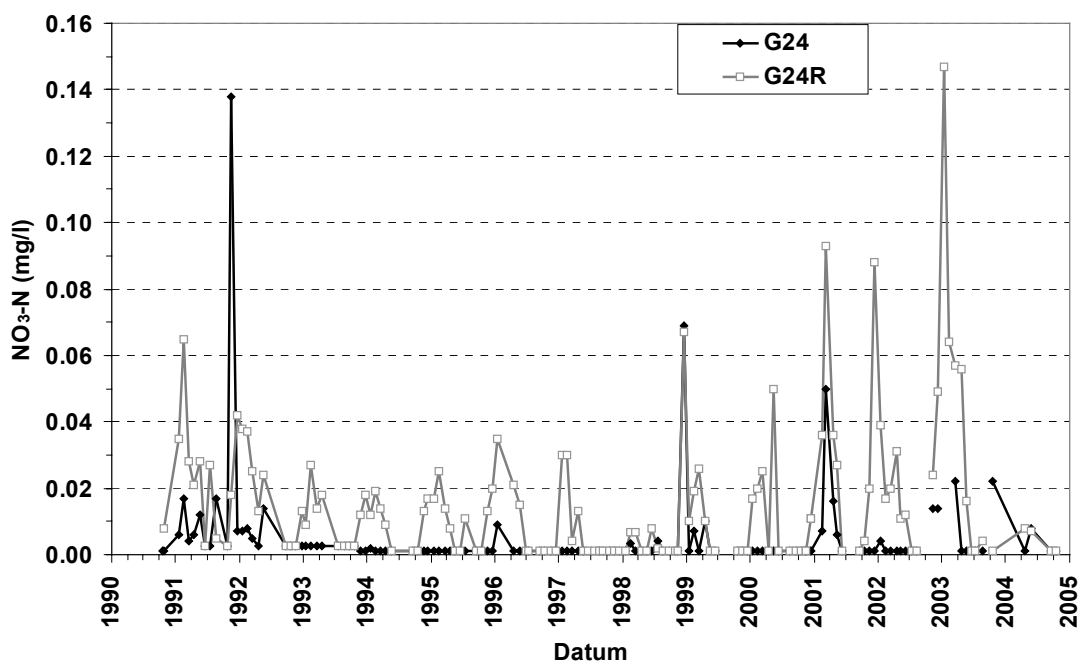
Halten oorganiskt kväve (huvudsakligen nitrat men också lite ammonium) kan jämföras med totalhalterna som en indikation på om kalkningen har förändrat omsättningen av kväve (nitrifikationen) i avrinningsområdet. Figur 12 visar att kalkningen inte har ökat andelen oorganiskt kväve jämfört med referenserna. Efter stora variationer före 1997 ökar andelen oorganiskt kväve i alla områden.



Figur 12. April- och oktobermedelvärden för totalhalter av oorganiskt kväve (huvudsakligen $\text{NO}_3\text{-N}$ och lite $\text{NH}_4\text{-N}$) mellan perioden 1991-2004. För att avgöra huruvida halten oorganiskt kväve har förändrats gentemot totalhalten och inte som ett resultat av förändrade totalhalter har förändringen uttryckts som kvoten mellan oorganiskt kväve och total kväve. Observera att bäckarna har varit torrlagda vissa år vilket innebär att antalet prover per månad (n) ibland skiljer sig åt. Kalkningen utfördes huvudsakligen under hösten 1991 och våren 1992.

En speciell jämförelse mellan en behandlad yta (G2) och en referensyta (G2R) har också gjorts för att närmare studera vad som händer när ett område kalkas. Avrinningsområdet ligger i Asa försökspark i norra Kronobergs län och domineras av gran med inslag av tall och björk. Området är typiskt för stora delar av sydsvenska höglandets skogsområden på sur sandig-moig moränmark ovanför högsta kustlinjen. I områdena finns inslag av fuktig mark, men rena våtmarker saknas. Nederbörd och kvävenedfall är måttligt, liksom det nuvarande svavelnedfallet (Hallgren-Larsson m. fl. 1997). Området har dock tidigare haft en betydligt större svavelbelastning (Westling & Hultberg 1991).

Innan kalkningen fanns det en naturlig variation i läckaget av nitrat både från G2 och G2R. (figur 13). Omedelbart efter behandling upphör läckaget nästan helt och hållet i G2 medan den naturliga variationen fortsätter i G2R. Den obetydliga utlakningen av nitrat från G2 får därför anses som onormalt låg. Anledningen till minskningen beror sannolikt på att förhållandena för denitrifikation i de bäcknära zoner har förbättrats genom det ökade pH-värdet. Denitrifikation inträffar i områden med syrebrist (exempelvis utströmningsområden och bäcknära zoner som ofta är vattenmättade) och innebär att nitrat reduceras till lustgas (N_2O) och kvävgas (N_2). När livsmiljön förbättras för bakterierna stimuleras denna process vilket får till följd att den från början låga nitratutlakningen minskar ytterligare.

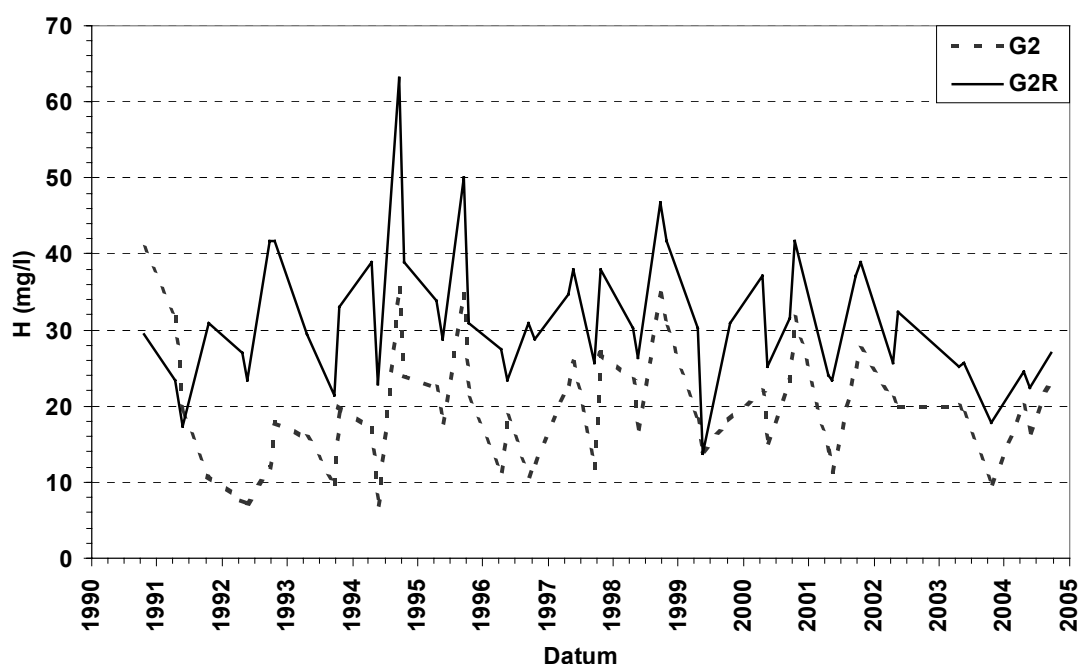


Figur 13. Nitrat (mg/l) i avrinningsvattnet från G2 och G2R. Innan kalkning finns det en naturlig variation i bägge områdena. Efter kalkning (augusti/september 1991) upphör läckaget nästan helt och hållet i G2 medan det fortsätter i G2R. Observera det höga läckaget som inträffar runt 1999. Förmodligen har det inträffat en störning i området. Det behandlade området kalkades hösten 1991.

Lägg dock märke till det plötsliga läckaget i G2R runt 1999. Även i G2 ökar läckaget av nitrat något. Effekten av detta håller i sig fram till och med 2004 då värdena verkar återgå till det normala i referensområdet (G2R). I G2 har värdena ännu inte minskat helt och hållet. Motsvarande öknings har

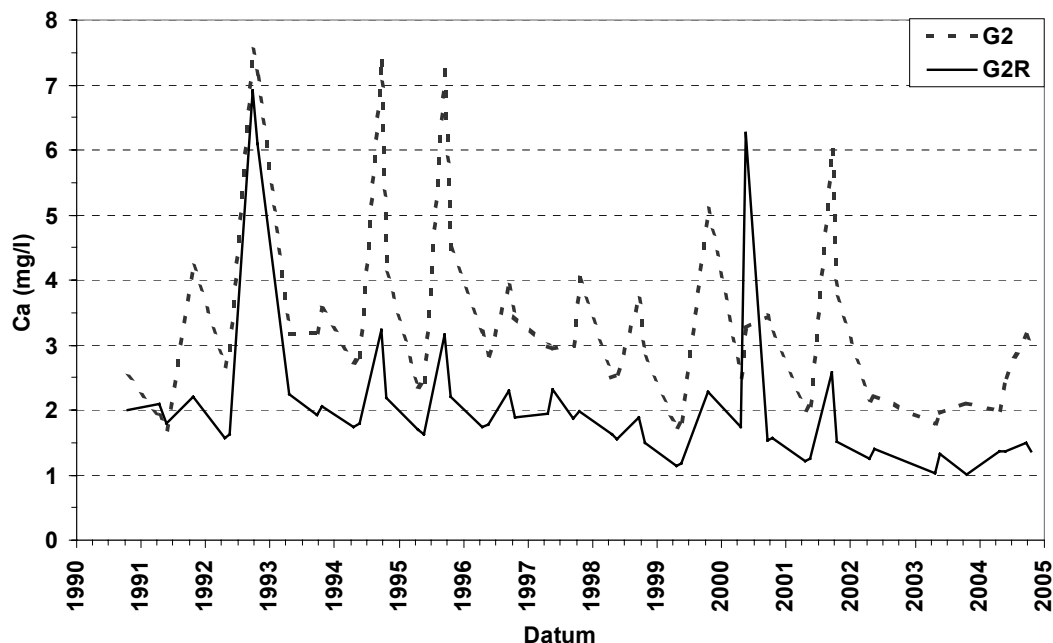
observerats inom det nationella krondroppsnetet vilket skulle kunna vara ett resultat av klimatförändringar i.e. tidigare vårar, högre temperaturer och ökad nedbrytning.

Kalkningen har liksom tidigare även haft en tydlig effekt på vätejonhalten i G2 (figur 14). Innan behandlingen var vätejonhalten högre i G2 men omedelbart efter behandlingen sjunker den till nivåer som är betydligt lägre än de som uppmätts i referensbäcken. Surhetsgraden i avrinningsvattnet från G2 har minskat som ett resultat av kalkningen och skillnaden mot referensen håller fortfarande i sig, 14 år efter behandlingen, även om den har minskat. Lägg märke till den mycket tydliga årstidsvariation som förekommer med låga värden på vårvintern och högre värden på hösten.



Figur 14. Vätejonkoncentrationen (mg/l) i G2 och G2R. Innan kalkning var G2 surare än G2R men strax efter kalkning (augusti/september 1991) minskar surheten i G2 till nivåer under de som uppmätts i referensen. Denna effekt håller i sig fortfarande efter 14 år. Kalkning skedde hösten 1991.

Kalkningseffekten liksom årstidsvariationen är också tydlig på utlakningen av kalcium (figur 15). Omedelbart efter kalkning inträffar det ett stort läckage av kalcium vilket strax därefter också följs av ett mycket stort läckage sommaren 1992. Orsaken till dessa två toppar skiljer sig emellertid åt. Den första toppen är ett direkt resultat av kalkningen medan den andra toppen beror på ett ovanligt högt flöde av sulfat, se figur 2. Behandlingseffekten är fortfarande uppenbar efter 14 år vilket indikerar ett långvarigt skydd av ytvattnet mot försurning.

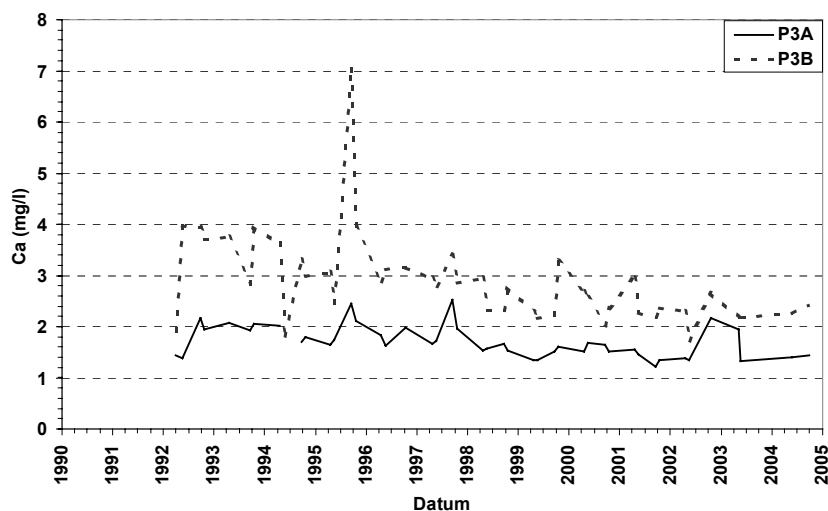


Figur 15. Koncentrationen av Ca (mg/l) i G2 och G2R. Efter kalkningen ökar transporten av kalcium till ytvattnet från G2 vilket markeras av en kraftig initial topp. Efter 14 år är läckaget av Ca fortfarande högre i G2 än i G2R vilket ger bäcken ett bra skydd mot försurning. Kalkning skedde hösten 1991.

3.2 Specialförsöket (hyggesförsöket)

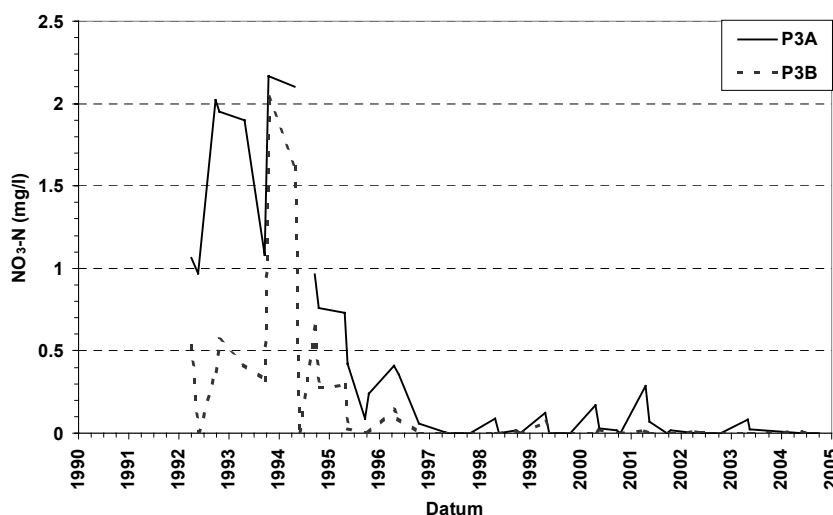
Enligt Skogsstyrelsens rekommendationer (Meddelande 2-2001) bör kalkning och/eller askåterföring ej ske 5 år före respektive efter förnygringsavverkning. En av anledningarna till detta är att undvika nitrifikation och utlakning av näringsämnen då vegetation saknas. En annan anledning är att undvika framtida skador på beståndet. Det finns emellertid ett önskemål från markägare att behandla marken i samband med slutavverkning. Orsaken till detta är att man vill minimera antalet tillfällen då skogsmaskiner befinner sig i beståndet, vilket bland annat minskar risken för körskador. En förutsättning är att det inte sker ett onormalt högt läckage av näringsämnen och/eller tungmetaller, eller att plantorna skadas.

I specialförsöket har ett hygge (P3B) i Älsvborgs län (numera västra Götalands län) slutavverkats och kalkats. Hygget är 14 ha stort och avverkades 1991. Riset togs även bort i samband med detta. På hygget spreds därefter 15 ton kalk (vilket ger en kalkgiva på 3,7 ton/ha) på en yta motsvarande 4 ha. Det okalkade hygget, P3A, är 2,2 ha stort. Kalkningseffekten på det avrinnande vattnet är tydlig i form av förhöjda kalciumhalter (figur 16).



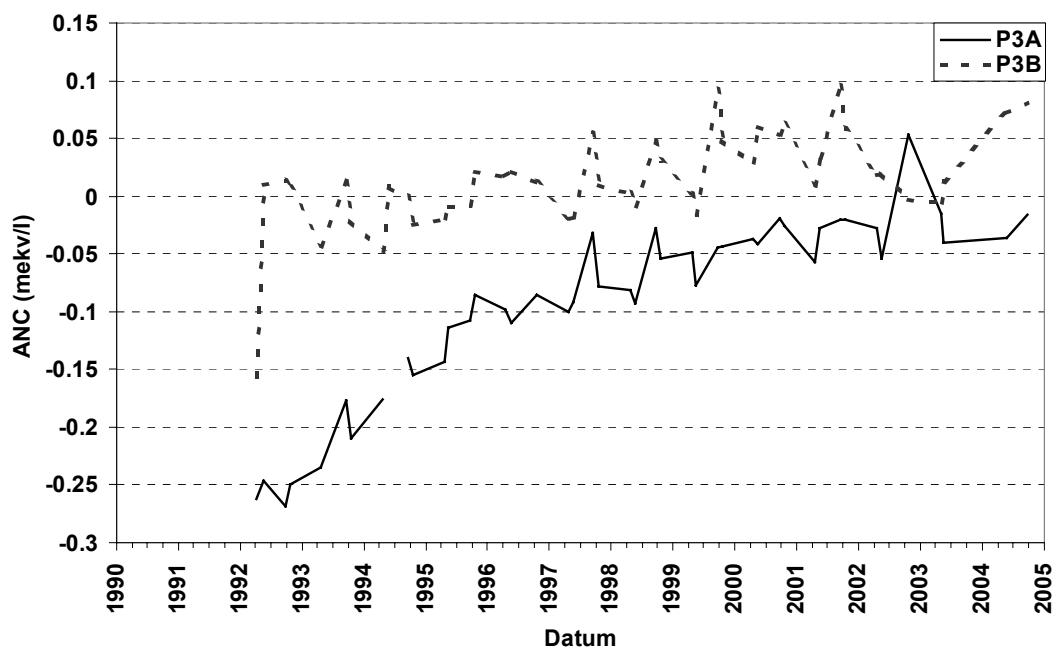
Figur 16. Kalcium (mg/l) i avrinningsvattnet från ett kalkat (P3B) och okalkat (P3A) hygge efter avverkningen 1991. Kalkning av hygget skedde i oktober 1992.

På ett hygge dröjer det oftast några år innan ny vegetation etablerar sig. Under den tiden sker det därför oftast ett läckage av nitrat vilket även syns i hyggesförsöket. Däremot går det inte att säga att kalkningen har orsakat ett förhöjt läckage jämfört med referensbäcken, snarare tvärtom (figur 17). Det är möjligt att det frigjorda nitraten från det kalkade hygget denitrifieras innan det når bäckvattnet eller att etableringen av vegetationen är snabbare på det kalkade hygget.



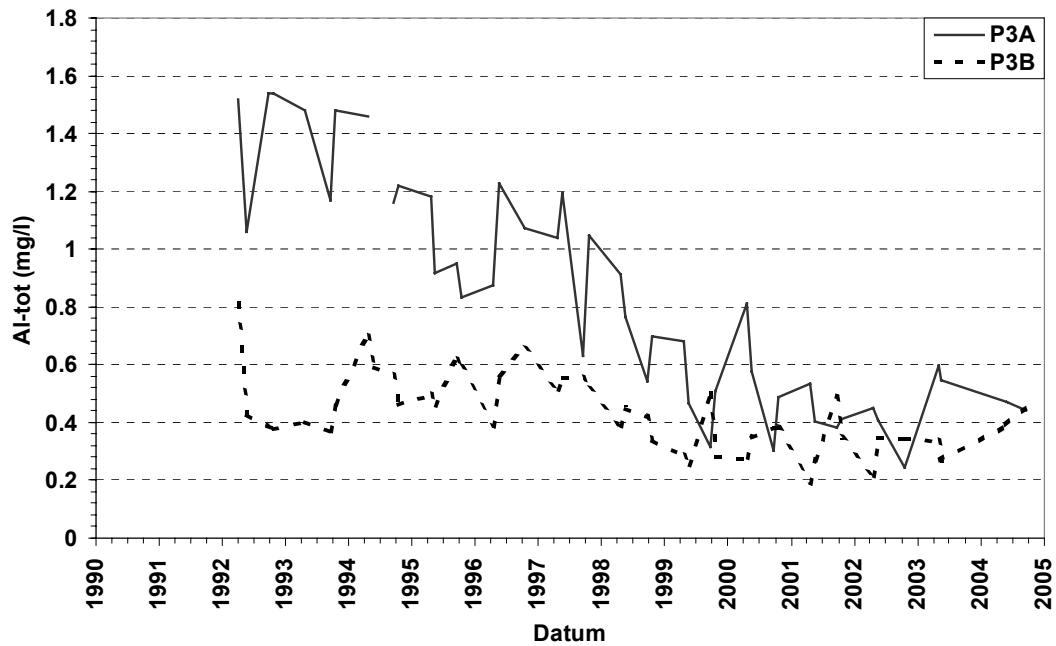
Figur 17. Nitrat (mg/l) i avrinningsvattnet från ett kalkat (P3B) och okalkat (P3A) hygge efter avverkningen 1991. Kalkning av hygget skedde i oktober 1992.

Kalkningen verkar däremot ha gett upphov till högre ANC jämfört med referensområdet, även om ökningen bromsas av nitratutlakningen (figur 18). Generellt har ANC ökat i takt med att nitrathalten minskat men ökningen har varit avsevärt större från det kalkade hygget. Det finns en tydlig skillnad i händelseförlopp mellan de två bäckarna. På det behandlade hygget har kalken neutraliserat de vätejoner som bildas vid nitrifikationen, vilket gav ett högre ANC.

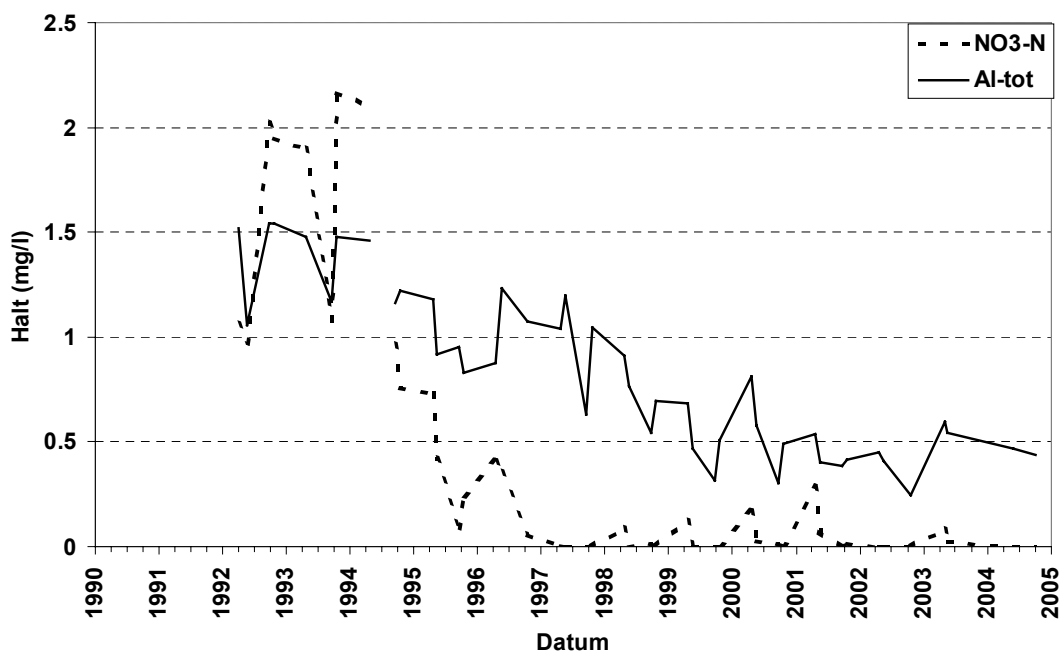


Figur 18. ANC (mekv/l) i avrinningsvattnet från ett kalkat (P3B) och okalkat (P3A) hygge efter avverkningen 1991. Kalkning av hygget skedde i oktober 1992.

Totalhalterna av aluminium i referensbäcken ökar efter avverkning men i bäcken till det behandlade området sker ingen ökning (figur 19). Ökningen i referensbäcken beror på en samvariation med nitrat, figur 20. Föryngringsavverkningen stimulerar nitrifikationsprocessen (varmare, fuktigare) varvid bland annat vätejoner bildas. När det blir surare ökar aluminiumhalterna. På det behandlade hygget har kalken neutraliserat vätejoner och därmed ökar inte heller totalhalterna av aluminium.

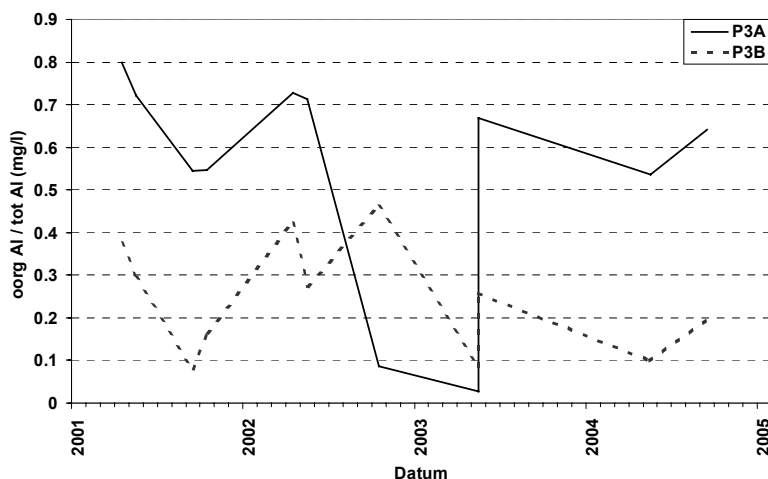


Figur 19. Totalaluminium (mg/l) i avrinningsvattnet från ett kalkat (P3B) och okalkat (P3A) hygge efter avverkningen 1991. Kalkning av hygget skedde i oktober 1992.

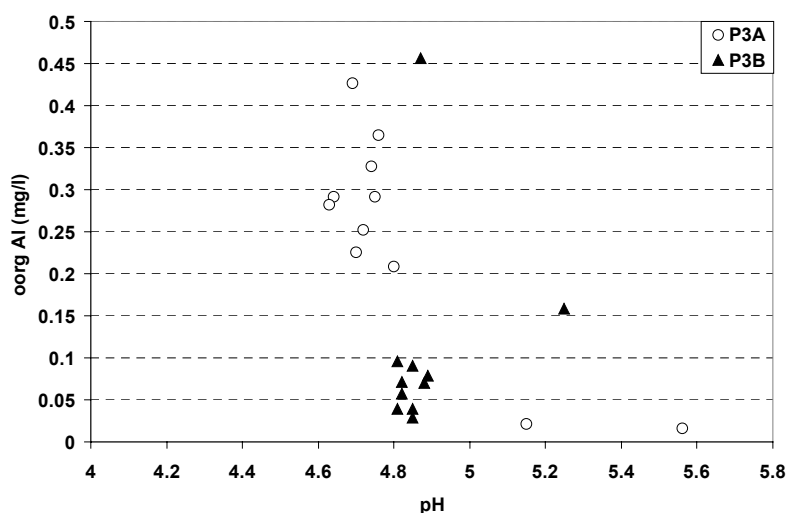


Figur 20. Totalaluminium (mg/l) och nitrat (mg/l) i avrinningsvattnet i referensbäcken (P3A). På grund av en stimulerad nitrifikation (hyggeseffekt) frigörs vätejoner som orsakar att totalhalterna av Al ökar. Kalkning av hygget skedde i oktober 1992.

Under de få år som oorganiskt aluminium har uppmätts finns det en tendens till att utlakningen är mindre från det kalkade hygget jämfört med referensområdet (figur 21). Det är svårt att avgöra om skillnaden existerade innan kalkningen, samt om det rör sig om olika hyggeseffekt eller respons på kalkningen. Eftersom pH-värdet är högre i det kalkade området är det rimligt att anta att det även resulterat i minskade halter av oorganiskt aluminium (figur 22).



Figur 21. Oorganiskt aluminium (mg/l) i avrinningsvattnet från ett kalkat (P3B) och okalkat (P3A) hygge efter avverkningen 1991. För att avgöra huruvida halten oorganiskt Al har förändrats gentemot totalhalterna och inte som ett resultat av förändrade totalhalter har förändringen uttryckts som kvoten mellan oorganiskt Al och total Al. Kalkning av hygget skedde i oktober 1992.



Figur 22. Förhållandet mellan pH och oorganiskt aluminium (mg/l) i avrinningsvattnet.

4 Slutsatser

Resultaten från de långliggande kalkningsförsöken har visat på tydliga skillnader i avrinningsvattnet från kalkade områden och obehandlade referensytor. Kalkning av slutna skogsbestånd har minskat surhetsgraden i avrinningsvattnet och utlakningen av oorganiskt aluminium till ytvattnet samtidigt som koncentrationen av kalcium och den syraneutraliserande förmågan (ANC) har ökat, jämfört med referensytorna. Denna skillnad kvarstår fortfarande efter 14 år vilket. Samtidigt har motståndskraften ökat i de kalkade bestånd mot tillfälliga kemiska förändringar såsom havssaltepisoder. Kalkningen har inte ökat nitratutlakningen, förutom en tillfällig ökning strax efter behandlingen. Snarare minskar utlakningen, sannolikt på grund av en stimulerad denitrifikationen i bäcknära zoner.

Motsvarande resultat har iakttagits i specialförsöket (hyggesförsöket). Initialt noterades även här en mindre ökning av nitratutlakningen men denna upphörde efter drygt ett år. Försöket visar att det är möjligt att kalka hyggen utan avsevärda näringsförluster och utlakning av giftigt aluminium.

5 Referenser

- Driscoll, C. T. 1984. A procedure for the fractioning of aqueous aluminium in dilute acidic waters. *Int. J. Environ. Anal. Chem*, Vol 16: 267-283.
- EMEP. 1996. Manual för sampling and chemical analysis. EMEP/CCC-Report 1:95. NILU, Kjeller
- Hallgren Larsson E., Knulst, J., Lövblad, G., Malm, G., Sjöberg, K & Westling, O. 1997. Luftföroreningar i södra Sverige 1995-1996. IVL-Rapport B1257. 142 s.
- Larsson, P-E. & Westling, O. 1996. Ytvatten i kalkade avrinningsområden. Årsrapport 1996. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL-rapport B1279. 65 s.
- Skogsstyrelsen. 2001. Rekommendationer vid uttag av skogsbränsle och kompensationsgödsling. Meddelande 2-2001. 16 s. Skogsstyrelsens förlag, Jönköping.
- Small, H. 1989. Ion Chromatography. Plenum Press, New York.
- Westling, O. & Hultberg, H. 1991. Liming and fertilization of acid forest soil: short-term effects on runoff from small catchments. In: Proc. of management of nutrition in forest under stress. Int. Symp. at the Albert-Ludwig-University in Freiburg, Germany, Sept. 18-21, 1989. Water, Air and Soil Pollution, vol. 54:391-407.