

Markvattenkemiska effekter vid spridning av aska på skogsmark

Slutrapport från ett 10-årigt dosförsök

Therese Zetterberg Cecilia Akselsson Olle Westling
B1658
Februari 2006

Organisation IVL Svenska Miljöinstitutet AB	Rapportsammanfattning
Adress Box 5302 400 14 Göteborg	Projekttitel Åtgärder mot försurning av skogsmark
Telefonnr +46 (0)31-725 62 00	Anslagsgivare för projektet IVLs samfinansierade forskningsprogram med Skogsstyrelsen som huvudsaklig finansier
Rapportförfattare Therese Zetterberg, Cecilia Akselsson och Olle Westling	
Rapporttitel och undertitel Effekter på markvatten vid spridning av aska på skogsmark Slutredovisning från ett 10-årigt dosförsök	
Sammanfattning Skogsstyrelsen program mot markförsurning och för ett uthålligt brukande av skogsmark bygger i kort- het på att behandla avrinningsområden med kalk och aska där den naturliga återhämtningsförmågan bedöms som otillräcklig eller att halten av surt och aluminiumrikt ytvatten är oacceptabelt hög. Inom försöksverksamheten bedrivs ett omfattande effektuppföljningsprogram. Bland annat ingår en special- studie med syfte att jämföra olika askdosor och sorter med avseende på kort- (0-2.5 år) och långsiktiga (7.5-10 år) effekter på markvattenkemin i mineraljorden. I askförsöket jämförs fem behandlingar med varandra: tre olika doser av krossaska (1.5, 3 och 6 ton/ha), 3 ton/ha finmald aska och en blandning av 3 ton kalk och 3 ton aska/ha. Dessutom ingår två obehandlade referenser. Experimentet är ett parcell- försök i granskog på moränmark som upprättades 1993 i Asa Försökspark i norra Kronobergs län och som avslutades 2003. Behandling med aska och kalk har i de flesta fall tydliga effekter på markvatten- kemin. Generellt har behandlingarna långsiktigt minskat surhetsgraden och ökat halten av baskatjoner i markvattnet på 50 cm djup. I de flesta fall har även aluminiumhalten (total) minskat. Initialt ökade väte- och aluminiumhalten, sannolikt på grund av jonbytesreaktioner i de övre marklagren. Behandling med 3 ton finmald aska har däremot orsakat ett surare markvatten. Två försöksled med behandling med sam- ma asktyp (3 ton krossad aska) har i flera fall uppvisat motsägande resultat, vilket ger en stor spridning som i sin tur leder till att få effekter var statistiskt signifikanta och skilda från varandra. Skillnaderna i effekt med samma askdos kan inte enbart förklaras med vissa olikheter i markvattenkemi före behand- ling i de två försöksleden.	
Nyckelord samt ev. anknytning till geografiskt område eller näringsgren Askåterföring, aska, kalk, pH, aluminium, kalcium, väte, markvatten, långsiktiga effekter, dosförsök, försurning, granskog, södra Sverige	
Bibliografiska uppgifter IVL Rapport B1658	
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	

Rapporten godkänd:
2006-02-21



Forskningschef

Sammanfattning

Skogsstyrelsen program mot markförsurning och för ett uthålligt brukande av skogsmark bygger i korthet på att behandla avrinningsområden med kalk och aska där den naturliga återhämtningsförmågan bedöms som otillräcklig eller att halten av surt och aluminiumrikt ytvatten är oacceptabelt hög. Inom försöksverksamheten bedrivs ett omfattande effektuppföljningsprogram. Bland annat ingår en specialstudie med syfte att jämföra olika askdosor och sorter med avseende på kort- (0-2.5 år) och långsiktiga (7.5-10 år) effekter på markvattenkemin på 25 och 50 cm djup.

I askförsöket jämförs fem behandlingar med varandra: tre olika doser av krossaska (1.5, 3 och 6 ton/ha), 3 ton/ha finmald aska och en blandning av 3 ton kalk och 3 ton aska/ha. Dessutom ingår två obehandlade referenser. Experimentet är ett parcellförsök i granskog på moränmark som upprättades 1993 i Asa Försökspark i norra Kronobergs län och som avslutades 2003.

Under den tid som försöket pågick har få signifikanta skillnader noterats mellan de olika försöksleden och referenserna, vilket främst beror på stor spridning mellan upprepningar i både behandlade provtytor och referensytor. Dos och kornstorlek hade viss betydelse för resultatet. Kortsiktigt (0-2.5 år) skilde sig halterna av Ca, Mg och Mn signifikant åt från referenserna när marken behandlades med högre doser av krossaska. Koncentrationerna av Al-tot, K och H skilde sig inte från referenserna, oavsett behandling. Långsiktigt (7.5-10 år) erhöles inga skillnader utom i två fall, 6 ton krossad aska och 3 ton finmald aska där Mg-halten respektive Fe-halten i markvattnet var signifikant högre jämfört med referenserna.

Trots få signifikanta skillnader observerades tydliga tendenser till effekter på markvattenkemin. En av de mest påtagliga behandlingseffekterna var en långsiktig minskning av vätejonkoncentrationen i samtliga försöksled utom ett (3 ton finmald aska). Kortsiktigt ökade vätejonhalten sannolikt på grund av att askans saltutlakning orsakade jonbyte i marken. Koncentrationen av aluminium (total) följde i stort sett samma mönster. Initialt ökade markvattenhalterna av kalcium och magnesium kraftigt efter behandling. Efter tio år är halterna fortfarande förhöjda. För kalcium var effekten dosrelaterad. Utlakningen av kalcium och magnesium åtföljdes framför allt av sulfatjoner. För kalium fanns ingen entydig tendens på kort sikt men på lång sikt minskar halterna. På lång sikt har behandlingarna även lett till ökade kloridhalter, vilket indikerar att hårdare bundet klorid lakades ut eftersom några kortsiktiga effekter inte noterades. Koncentrationen av mangan ökade kortsiktigt, men minskade med tiden i takt med att vätejonkoncentrationen minskade. Utlakningen av natrium har också påverkats av behandlingen, på både kort och lång sikt.

Ett av försöksleden skilde sig tydligt åt från övriga försöksled. Behandling med 3 ton finmald aska ledde till att koncentrationen av baskatjoner (kalcium, magnesium och kalium) minskade både på kort och lång sikt. Samtidigt ökade utlakningen av väte- och aluminiumjoner. Resultaten indikerar att malningen orsakat speciella egenskaper hos askan. Lakningsförsök med olika kornstorlekar av bland annat den aktuella askan har inte påvisat stora skillnader i syraneutraliserande förmåga.

Två försöksled med behandling med samma asktyp (3 ton krossad aska) har i flera fall uppvisat motsägande resultat, vilket ger en stor spridning som i sin tur leder till svårigheter att generalisera effekterna. Skillnaderna i effekt med samma askdos kan inte enbart förklaras med vissa olikheter i markvattenkemi före behandling i de två försöksleden.

Innehåll

1	Introduktion	3
1.1	Bakgrund	3
1.2	Syfte.....	3
2	Områdesbeskrivning.....	4
2.1	Försöksutformning.....	5
3	Metoder.....	5
3.1	Markvattenprovtagning och analys	5
3.2	Utvärderingsmetodik.....	6
3.3	Statistisk analys.....	6
4	Resultat och diskussion	7
4.1	Behandlingseffekter på markvattnet	7
4.2	Kalcium	8
4.3	Magnesium.....	10
4.4	Kalium	12
4.5	Aluminium	13
4.6	Väte	15
4.7	Nitratkväve.....	16
4.8	Sulfatsvavel	17
4.9	Klorid och Natrium.....	17
4.10	Mangan	19
4.11	Jämförelse mellan 25 och 50 cm djup.....	19
5	Sammanfattande diskussion.....	20
6	Referenser.....	21
	Bilaga 1 Försöksdesign	23
	Bilaga 2 Tidsutveckling.....	24
	Bilaga 3 Kort- och långsiktiga behandlingseffekter	29
	Bilaga 4 Jämförelse mellan 25 och 50 cm djup.....	30

1 Introduktion

1.1 Bakgrund

Skogsstyrelsen har sedan 1989 genomfört försök med spridning av kalk och aska på försurad skogsmark i södra Sverige. I samband med dessa etablerades ett antal provytor. Huvuddelen av Skogsstyrelsens effektuppföljningsprogram utförs av IVL Svenska Miljöinstitutet. Beståndsbeskrivningar, skogsskadebedömningar, markkemiska undersökningar samt provtagningar utförs av Skogsvårdsstyrelsen inom respektive berörd region. Större delen av basprogrammet för effektuppföljning, samt de specialförsök som är samordnade med basprogrammet, utförs inom IVLs samfinansierade forskningsprogram med Skogsstyrelsen som huvudsaklig finansör.

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

I ett annat omfattande specialförsök har ett skogsbestånd behandlats med olika sorters kalk och aska i olika doser, för att se vilken betydelse behandlingsmedlets sammansättning och dos har på markvattenkemi, barrkemi och trädutveckling. Försöket är uppdelat i två systerförsök, ett askförsök och ett kalkförsök. De kort- och långsiktiga effekterna vid behandling med olika kalksorter finns redovisade i rapporterna ”Markvatten, barrkemi och trädutveckling efter behandling med olika doser och sorter av kalk” (Akselsson m.fl., 2000) samt ”Markvattenkemiska effekter vid spridning av kalk på skogsmark” (Zetterberg m. fl., 2006). Denna rapport utgör en slutredovisning av askförsökets kort- och långsiktiga effekter på markvattnet, upp till 10 år efter behandling. Samtliga ovannämnda rapporter går att ladda ner kostnadsfritt på www.ivl.se. Dosförsöket har utförts i samarbete med SLU, Asa försökspark, som utfört skogliga undersökningar. Försöket är planerat och utlagt av Göran Örlander, Per Pettersson och Erland Möller.

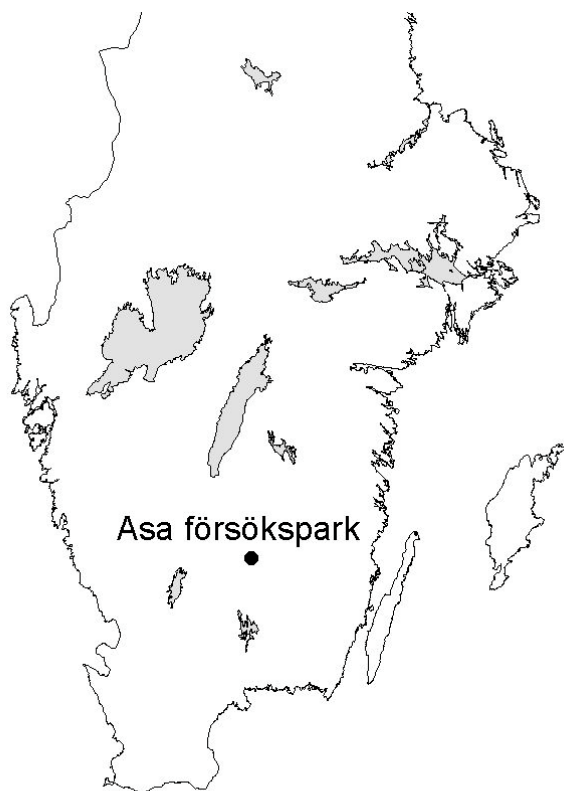
1.2 Syfte

Den önskade effekten vid behandling av skogsmark med aska är en långsam men varaktig förbättring av markvattenkemin. Vissa typer av behandlingar kan dock leda till oönskade konsekvenser framförallt i det inledande skedet, vilket kan orsaka skador på växt- och djurlivet eftersom markvattenkemin ändras kraftigt på kort tid. Askmedlets dos och kornstorlek har därför betydelse för effekternas omfattning, både på kort och lång sikt. Syftet med denna rapport är att utvärdera:

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

2 Områdesbeskrivning

Försöksområdet är cirka 3,1 ha stort och placerat i ett granbestånd i Asa försökspark i norra Kronobergs län, se figur 1. Marken utgörs av sandig-moig morän med en jordmån som övergår till podsol. Skogen, som blåstes ned i samband med stormen Gudrun den 8 januari 2005, var ca 50 år gammal, hade ståndortsindex G32 och låg på relativt bördig mark. Större delen av beståndet hade tidigare utgjorts av hagmark med gles ekskog. Området var normalt gallrat och gav ett homogent intryck med avseende på träd- och markförhållanden. En studie av de markvattenkemiska förhållandena före behandling visade dock på högst kalciumhalt och pH samt lägst aluminiumhalt i det sydöstra hörnet (Akselsson och Westling, 1999). Detta kan ha att göra med skillnaderna i historik, exempelvis att de västra delarna varit hårdare betade.



Figur 1. Försöksområdet är placerat i Asa försökspark i norra Kronobergs län.

I april-juni 1992 genomfördes en översiktlig vegetationskartering i beståndet. I bottenkiktet var marken till hälften täckt av vanliga skogsmossor, väggmossa (*Pleurozium schreberi*), våningsmossa (*Hylocomium splendens*), kammossa (*Ptilium crista-cas.*) och kvastmossa (*Dicranum*). Den andra halvan utgjordes av en matta av fallna barr. Fältskikt förekom endast sporadiskt. Blåbär, lingon, kruståtel, skogsstjärna och ekorrbar förekom som enstaka exemplar i hela försöksområdet.

2.1 Försöksutformning

I askförsöket jämförs fem behandlingar med varandra: tre olika doser av krossaska (1,5, 3 och 6 ton/ha), 3 ton/ha finmald aska och en blandning av 3 ton kalk och 3 ton aska/ha. Dessutom ingår två obehandlade referenser. Ett av försöksleden (3 ton krossaska) är dubblerad. För denna finns det åtta upprepningar (parceller) medan övriga försöksled endast förekommer i fyra upprepningar. Detta innebär sammanlagt 32 cirkelformade parceller med radien 12,5 m, se bilaga 1. I varje parcell finns fyra lysimetrar för markvattenprovtagningar, två på 25 cm djup och två på 50 cm djup, placerade norr och söder om mittpunkten. Dessutom mäts barrkemi och träd tillväxt i parcellerna av SLU i Asa. Spridningen utfördes i november 1993. Askans sammansättning beskrivs i tabell 1. En jämförelse med Skogsstyrelsens rekommenderade halter (Skogsstyrelsen, 2001) visar att innehållet av makronäringsämnen ligger inom eller mycket nära riktvärdena, se tabell 1.

Tabell 1. Innehåll av olika ämnen i askan samt rekommenderat innehåll enligt Skogsstyrelsen (Skogsstyrelsen, 2001), uttryckt som viktprocent. Nd = data saknas.

Ämne	Innehåll i aska	Riktvärden	
		Lägst	Högst
Svavel (S)	2.8	nd	nd
Aluminium (Al)	4.1	nd	nd
Kisel (Si)	12.3	nd	nd
Järn (Fe)	2.4	nd	nd
Titan (Ti)	2.1	nd	nd
Mangan (Mn)	0.7	nd	nd
Magnesium (Mg)	1.6	2	-
Kalcium (Ca)	16.7	12.5	-
Natrium (Na)	1.0	nd	nd
Kalium (K)	2.3	3	-
Fosfor (P)	0.8	1	-

3 Metoder

3.1 Markvattenprovtagning och analys

Markvatten är det vatten som finns ovanför grundvattenytan. Vegetationens rötter återfinns i den övre delen av markprofilen, i den så kallade rotzonen. Djupen som provtas i denna studie, 25 cm och 50 cm, motsvarar nedre delen av rotzonen och markskiktet under rotzonen. Markvattenkemin under rotzonen kan användas som ett mått på utlakningen till grund- och ytvatten.

Markvattenprovtagningen skedde med hjälp av keramiska undertryckslysimetrar (P80). I varje parcell fanns fyra lysimetrar, två på 25 cm djup och två på 50 cm djup, placerade centralt i parcellen. Under första året efter behandling, 1994, genomfördes fyra provtagningsomgångar. Därefter har två provtagningsomgångar per år genomförts, en på våren och en på hösten, fram till och med oktober 1999. Efter det provtogs markvatten endast en gång per år på hösten (oktober) fram till 2003, eftersom de säsongsvisa provtagningarna hade en relativt måttlig variation i respektive provyta. Försöket avslutades i förtid på grund av stormen Gudrun som fällde det nygrallrade beståndet den 8 januari 2005. Analysprogrammet omfattar: pH, alkalinitet, sulfatsvavel (SO₄-S), nitratkväve (NO₃-N), klorid (Cl), ammoniumkväve (NH₃-N), kalcium (Ca), magnesium (Mg), natrium (Na), kalium (K), järn (Fe), mangan (Mn), totalaluminium (Al) och totalt organiskt kol (TOC). Samtliga analyser utfördes med ackrediterade metoder.

3.2 Utvärderingsmetodik

De resultat som presenteras i denna rapport behandlar huvudsakligen Ca, Mg, K, Al-tot och H på 50 cm djup. Dessa parametrar är av speciellt intresse vid effektuppföljning av aska eftersom de speglar surhetstillståndet i markvatten. Övriga ämnen berörs mer kortfattat.

Ett flertal av parametrarna har uppträtt i så låga koncentrationer (exempelvis $\text{NO}_3\text{-N}$ och $\text{NH}_4\text{-N}$) att de inte alltid har varit mätbara (under detektionsgränsen). Vidare har anjonerna ($\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{SO}_4\text{-S}$, Cl och TOC) inte analyserats vid varje mättillfälle på grund av ekonomiska skäl. Detta innebär att utvärderingsmöjligheterna för dessa ämnen är begränsade.

Majoriteten av den grafiska redovisningen bygger på blockmedelvärden för respektive försöksled, antingen per period eller per mättillfälle. För att särskilja den förändring som har uppstått på grund av behandlingen och inte på grund av naturliga orsaker har medelvärdesförändringen beräknats i vissa fall, det vill säga, vad var skillnaden i medelvärde mellan referensytan och behandlingsytan *före* spridning samt referensytan och behandlingsytan *efter* spridning. Skillnaden däremellan ger ett mått på behandlingseffekten. Före behandling genomfördes två provtagningsomgångar som ingår i denna resultatredovisning. Perioden 0 till 2.5 år efter behandling omfattar sex provtagningar, perioden 2.5 till 5 år av sex provtagningar, perioden 5 till 7.5 år av tre provtagningar och slutligen perioden 7.5 till 10 år av tre provtagningar.

3.3 Statistisk analys

Med hjälp av en envägs variansanalys, ANOVA, undersöktes skillnader mellan olika behandlingar, både på kort (0-2.5 år) och på lång sikt (7.5-10 år). Variansanalysen jämför variationen inom och mellan olika populationer och är användbar vid jämförelser av fler än två grupper. För beräkning av signifikansnivån användes ”Tukey HSD” metod (Tukey, 1953). De olika försöksleden har grupperats enligt följande indelning för att undersöka effekten av 1) dos, 2) kornstorlek och 3) blandning av aska och kalk på markvattnet;

- 1) jämförelse mellan olika doser av krossaska (1,5, 3 och 6 ton/ha) och referens
- 2) jämförelse mellan 3 ton krossaska, 3 ton finmald aska och referens
- 3) jämförelse mellan 6 ton krossaska, blandning mellan 3 ton krossaska och 3 ton kalk samt referens

Observera att endast ett av det dubblerade försöksledet (3 ton krossaska/ha (1)) och en av referenserna (referens (1)) ingår i analysen. Däremot presenteras samtliga försöksled i figurerna i kommande avsnitt. Anledningen till att de inte ingår i analysen beror på begränsningar i det statistiska testet vid behandling av dataset med olika antal upprepningar i försöksleden.

I variansanalysen har medelvärdesförändringen mellan första (-1 till 0 år) och andra (0-2.5 år) perioden samt första (-1 till 0 år) och sista perioden efter behandling (7.5-10 år) använts som responsparametrar för den statistiska analysen. De parametrar som har utvärderats är Ca, Mg, K, Al-tot, H, Mn, Na och Fe på 50 cm djup.

4 Resultat och diskussion

I avsnitt (4.1-4.10) redovisas en ämnesvis genomgång av effekterna på Ca, Mg, K, Al-tot, H, NO₃-N, SO₄-S, Cl, Na och Mn. I avsnitt 4.11 jämförs halterna på 25 respektive 50 cm djup. I bilaga 3 och 4 sammanfattas de kort- och långsiktiga effekterna.

4.1 Behandlingseffekter på markvattnet

Resultatet från den statistiska analysen visar på få signifikanta behandlingseffekter, se tabell 2, 3 och 4. Generellt skiljer sig, på kort sikt (0-2.5 år), halterna av Ca, Mg och Mn signifikant åt mellan behandlade försöksled och referensen vid högre doser. För K, Al-tot och H uppmättes inga behandlingseffekter, oavsett behandling. Dos och kornstorlek hade viss betydelse för resultatet. I tabell 2 visas sambandet mellan olika doser krossaska (1.5, 3 samt 6 ton/ha) och referensen. Det finns ett tydligt och signifikant dossamband, det vill säga, ju högre dosen är, desto större är behandlingseffekten på Ca-halten (och nästan Mg-halten). Observera dock skillnaden mellan de två försöksleden där 3 ton krossaska applicerats. Långsiktigt (7.5-10 år) har dossambandet emellertid försvunnit och inga signifikanta skillnader kunde påvisas för någon av kombinationerna

Tabell 2. Signifikanta skillnader mellan olika försöksled med avseende på dos, 0-2.5 år efter behandling med krossaska i olika doser. Antalet stjärnor anger signifikansnivån.

	Ca	Mg	K	Al-tot	H	Na	Mn
Ref: 1.5 ton	-	-	-	-	-	-	-
Ref: 3 ton (1)	0.019*	0.030*	-	-	-	-	-
Ref: 3 ton (2)	-	-	-	-	-	-	-
Ref: 6 ton	0.00095***	0.044*	-	-	-	-	0.033*
1.5 ton: 3 ton (1)	-	-	-	-	-	-	-
1.5 ton: 3 ton (2)	-	-	-	-	-	-	-
1.5 ton: 6 ton	0.032*	-	-	-	-	-	-
3 ton (1): 6 ton	-	-	-	-	-	-	-
3 ton (2): 6 ton	0.0033**	-	-	-	-	-	-

I tabell tre visas sambandet mellan krossad och finmald aska och referensen. Behandling med den ena krossade askan (1) har kortsiktigt (0-2.5 år) gett upphov till signifikanta skillnader i kalciumhalt. Den finmalda askan har inte lett till några förändringar oavsett parameter. Långsiktigt (7.5-10 år) har den finmalda askan gett upphov till en signifikant ökning av järn ($p=0.020$) jämfört med referensen och .

Tabell 3. Signifikanta skillnader mellan olika försöksled med avseende på kornstorlek, 0-2.5 år efter behandling. Antalet stjärnor anger signifikansnivån

	Ca	Mg	K	Al-tot	H	Na	Mn
Ref: 3 ton krossaska (1)	0.0091**	-	-	-	-	-	-
Ref: 3 ton krossaska (2)	-	-	-	-	-	-	-
Ref: 3 ton finmald aska	-	-	-	-	-	-	-
3 ton kalk: 3 ton krossaska (1)	0.012*	0.039*	-	-	-	-	-
3 ton kalk: 3 ton krossaska (2)	-	-	-	-	-	-	-

Kortsiktigt (0-2.5 år) gav behandling med 6 ton/ha krossaska och en blandning av aska och kalk upphov till signifikanta skillnader jämfört med referensen, men krossaskan gav upphov till den tydligaste skillnaden, se tabell 4. Långsiktigt (7.5-10 år) skilde sig Mg-halten signifikant åt ($p=0.043$) mellan 6 ton krossaska och referenserna.

Tabell 4. Signifikanta skillnader mellan olika försöksled med avseende på blandeffekten, 0-2.5 år efter behandling. Antalet stjärnor anger signifikansnivån

	Ca	Mg	K	Al-tot	H	Na	Mn
Ref: 6 ton krossaska	0.0019**	0.0015**	-	-	-	-	0.043*
Ref: 3 ton kalk + 3 ton krossaska	0.023*	0.0090**	-	-	-	-	-
6 ton krossaska: 3 ton kalk + 3 ton krossaska	-	-	-	-	-	-	-

4.2 Kalcium

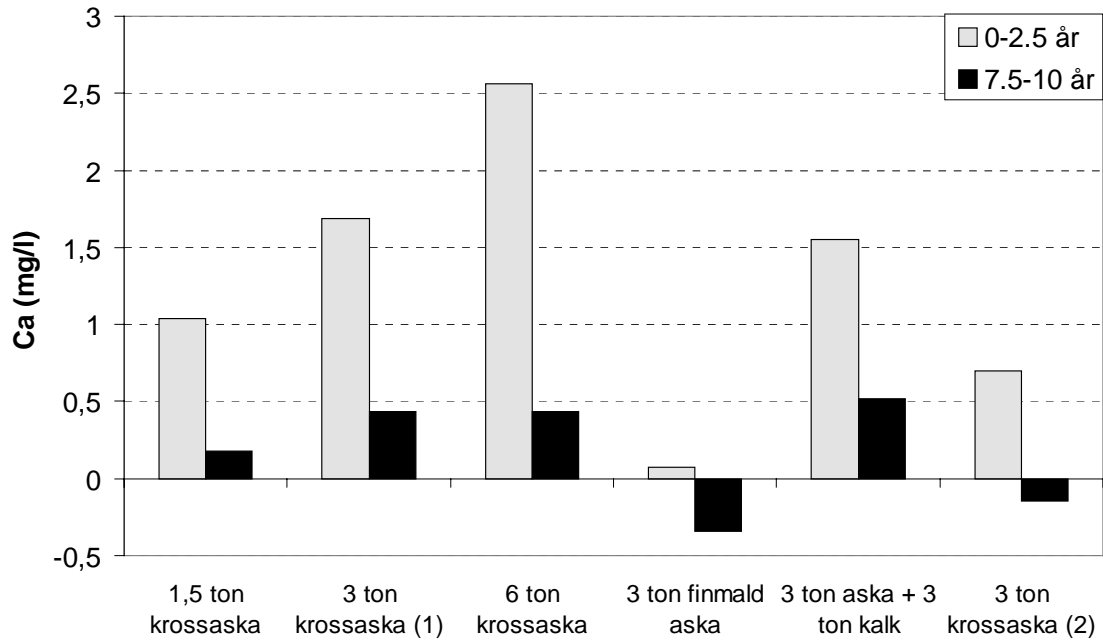
Trädaska innehåller en stor mängd baskatjoner, i synnerhet kalcium, som snabbt kan lösas upp vid kontakt med vatten. Snabba kemiska förändringar kan leda till oönskade effekter på flora och fauna samtidigt som viktiga näringsämnen riskerar att lakas ut. Av den anledningen stabiliseras askan genom härdning för att få en långsam upplösning som på sikt motverkar markförsurningen och återför näringsämnen till marken.

I ett försök att ta reda på den förändring som uppstått som ett resultat av behandlingen, har den naturliga förändringen av kalciumhalten som ägt rum i referensytorna subtraherats från kalciumhalten i de behandlade ytorna, se figur 2. På kort sikt (0-2.5 år) fanns det en tydlig behandlingseffekt i samtliga försöksled, även om den var mycket svag i ytan som behandlats med 3 ton finmald aska. Den största förändringen uppstod i ytan som behandlats med 6 ton krossad aska medan den lägsta effekten erhöles vid behandling med 3 ton finmald aska och 3 ton krossaska (2). Halterna före behandling var emellertid högst i dessa två försöksled, vilket kan bidra till den svaga effekten, se figur 3. Behandling med krossaska uppvisade även en doseffekt, det vill säga ju högre dos desto större markvattenkemisk förändring. Effekten var signifikant vid doserna 3 (1) resp. 6 ton krossaska/ha, se tabell 2. Signifikanta skillnader observerades även för blandningen 3 ton aska och 3 ton kalk, jämfört med referensen, se tabell 4.

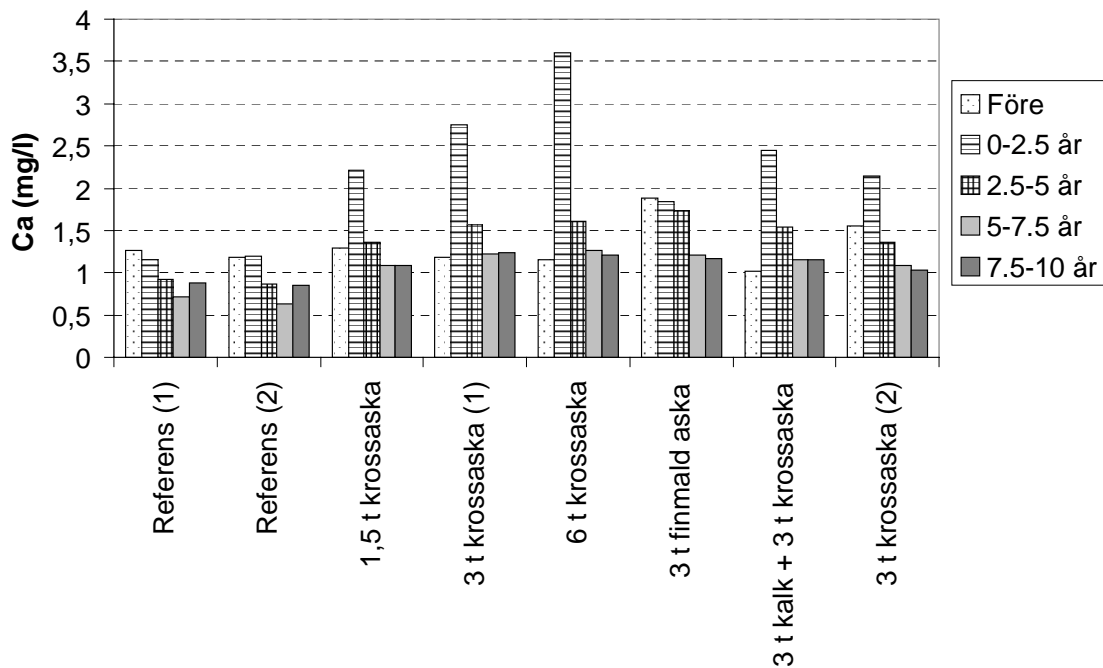
På lång sikt (7.5-10 år) kvarstår behandlingseffekten, om än försvagad, i samtliga fall utom två (3 ton finmald aska och 3 ton krossaska (2)) som uppvisat svagast behandlingseffekt. I dessa har behandlingen istället haft motsatt effekt. Statistiskt signifikanta långsiktiga effekter kunde inte påvisas.

I figur 3 visas tidsutvecklingen i samtliga försöksled indelat i 2.5-årsperioder. Till skillnad från figur 2 visar figur 3 både den naturliga förändringen samt behandlingseffekten. Liksom ovan ökade Ca-halten i markvattnet kortsiktigt (0-2.5 år) efter behandling i samtliga fall utom ett, 3 ton finmald aska. Efter 2.5 år minskade halterna successivt och efter 10 år var halterna i några fall (1.5 ton krossaska, 3 ton finmald aska och 3 ton krossaska (2)) lägre än de som uppmättes innan behandling. Jämfört med referenserna låg de fortfarande på en högre nivå.

I bilaga 2 visas tidsutvecklingen för respektive år för referenserna samt olika grupper av behandlingar med avseende på kalcium, magnesium, kalium, aluminium och väte. Försöksleden har grupperats så att jämförelser kan ske med avseende på dos-, kornstorlek och blandeffekt.

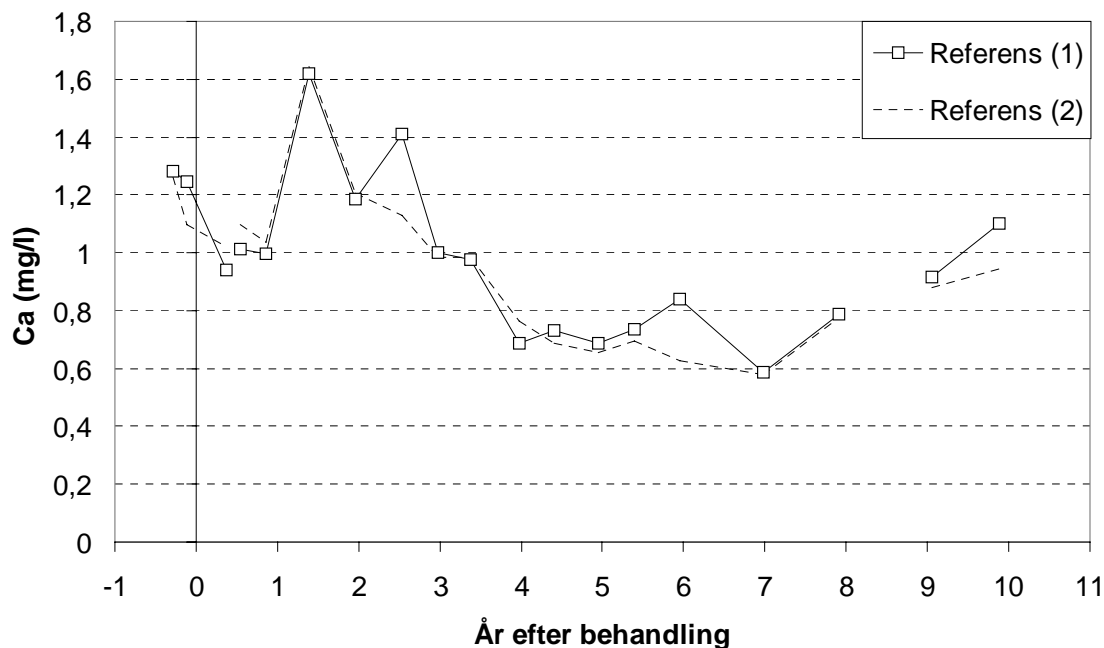


Figur 2. Medelvärdesförändringen av kalciumhalten i markvattnet efter behandling i relation till förändringen i referenserna, på kort och på lång sikt, på 50 cm djup.



Figur 3. Kalciumhalt före och efter behandling. Medelvärden från samtliga mätningar respektive period från de fyra blocken på 50 cm djup.

En speciell jämförelse har även skett mellan de två referenserna, se figur 4. Jämförelsen visade att utvecklingen i de två försöksleden var likartad. Övriga parametrar uppvisade samma mönster med dessa presenteras inte i denna rapport. Vid jämförelser med de behandlade försöksleden har enbart den ordinarie referensen (1) använts, så att förutsättningarna är densamma (=lika antal mätillfällen) som för de olika behandlingarna.

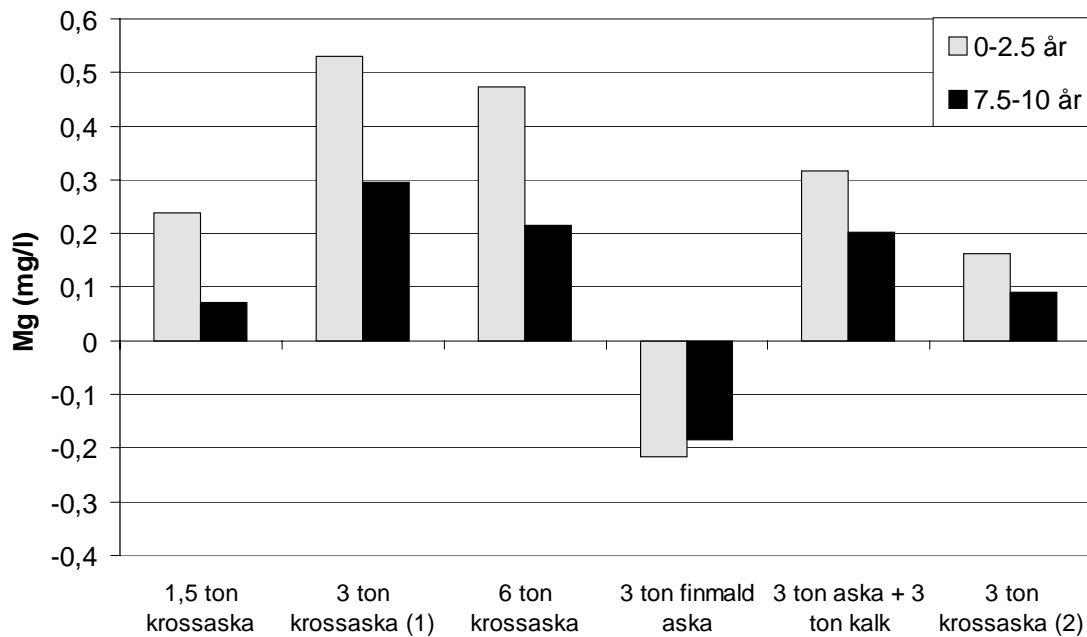


Figur 4. Kalciumhalt på 50 cm djup i de två referenserna (medelvärde från fyra block).

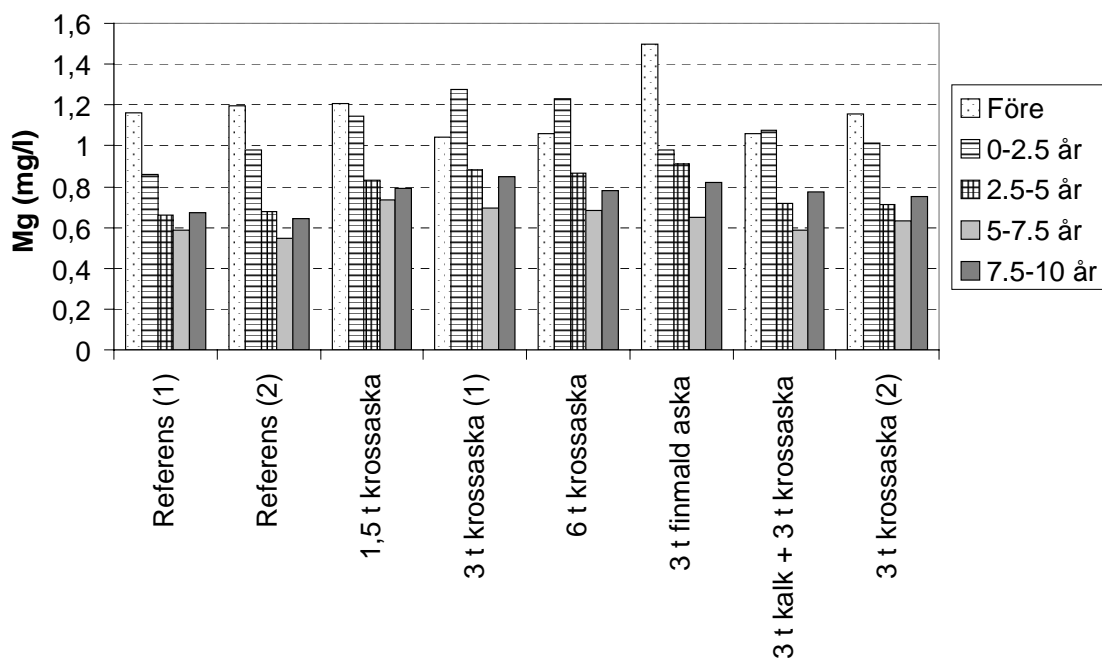
4.3 Magnesium

I figur 5 visas den kort- och långsiktiga förändringen av magnesiumhalten i de behandlade ytorna efter subtraktion av den naturliga förändringen som ägt rum i referensytorna. Behandling med krossaska har, oavsett dos, ökat Mg-halten i markvattnet både på kort och lång sikt även om effekten har försvagats med tiden. Jämfört med Ca finns ingen tydlig doseffekt. Även kalk- och askblandningen har gett upphov till ökade Mg-halter medan behandling med 3 ton finmald aska har minskat halterna, både på kort och lång sikt, se figur 5.

Kortsiktigt (0-2.5 år) gav behandling med 3 (1) och 6 ton krossaska samt 3 ton krossaska + 3 ton kalk upphov till en signifikant ökning jämfört med referensen, se tabell 2-4. Vidare skilde sig även behandling med 3 ton krossaska (1) och 3 ton finmald aska från varandra, se tabell 3. Långsiktigt gav endast behandling med 6 ton krossaska upphov till en signifikant ökning av magnesiumhalten. I figur 6 visas tidsutvecklingen per 2.5-årsperiod för behandlade ytor och referenser. Initialt var Mg-halten högre än 1 mg/l i samtliga försöksled men efter 10 år hade halten sjunkit till cirka 0.6 mg/l i referensytorna. I de behandlade ytorna har Mg-halten också minskat, men jämfört med referenserna har minskningen inte varit lika stor. Detta beror troligtvis på askbehandlingen.



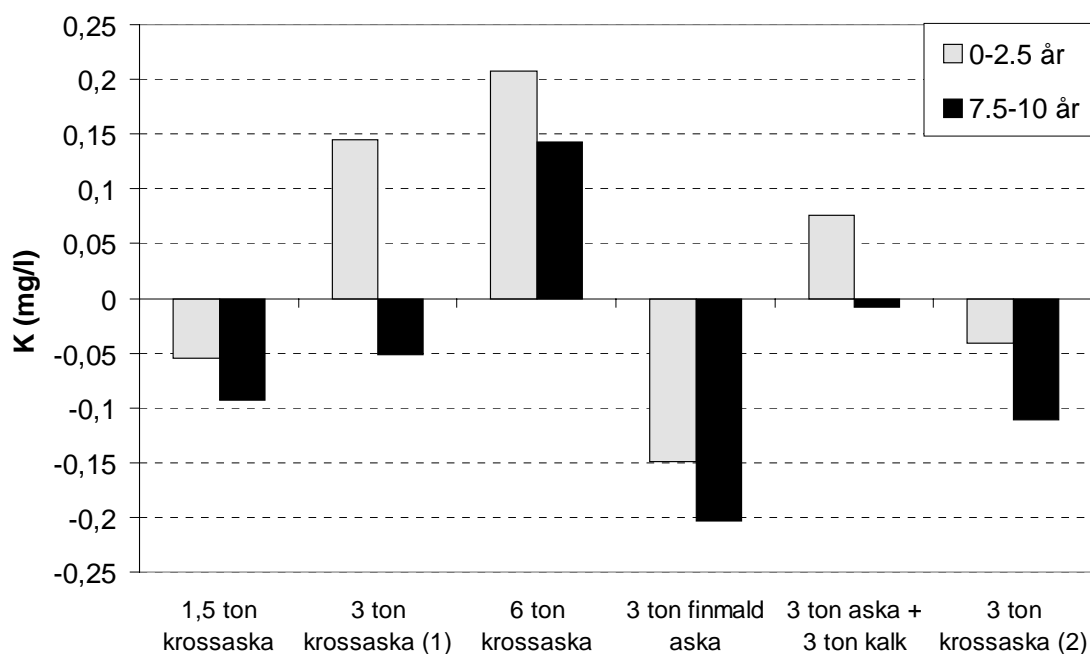
Figur 5. Medelvärdesförändringen av magnesiumhalten i markvattnet efter behandling i relation till förändringen i referenserna, på kort och på lång sikt, på 50 cm djup.



Figur 6. Magnesiumhalt före och efter behandling. Medelvärden från samtliga mätningar under respektive period från de fyra blocken på 50 cm djup.

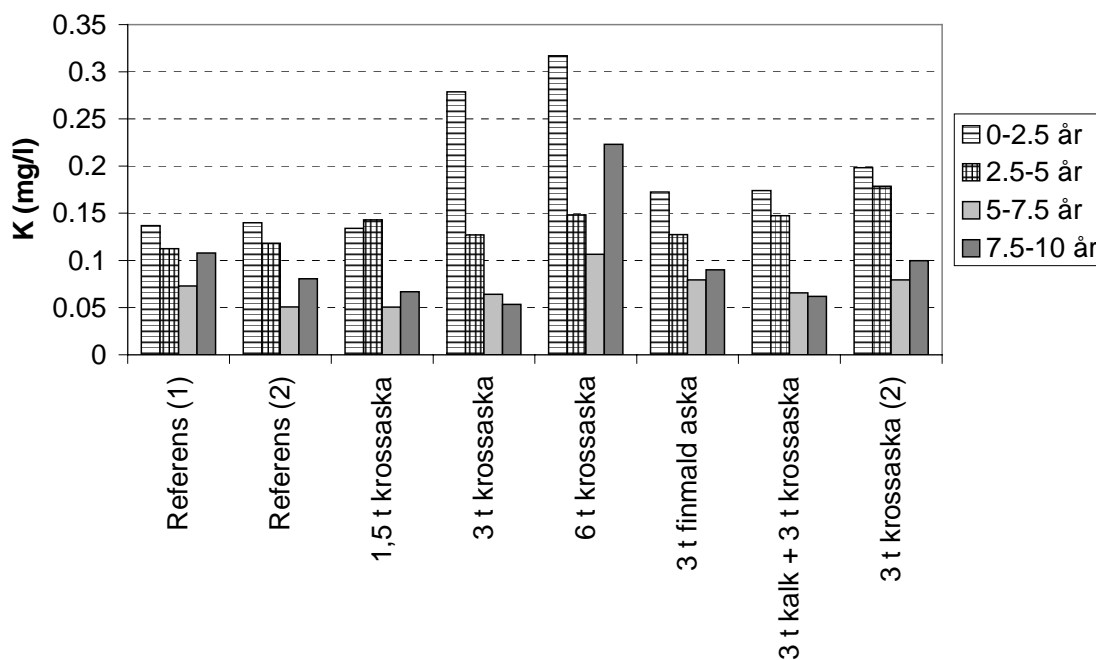
4.4 Kalium

Kalium är ett ämne som ofta löser ut från aska relativt snabbt och kan därför lakas ut, speciellt de första åren efter behandling. Det finns ett antal studier som visar att koncentrationen av kalium ökat i markvattnet efter tillförelse av aska (se exempelvis Lundborg och Nohrstedt 1996; Nohrstedt m. fl. 1993; Jacobson & Ring 1995). I detta försök fanns ingen entydig behandlingseffekt på kort sikt men på lång sikt minskade halterna. Resultaten har en betydande osäkerhet vid låga halter (< 0.1 mg/l) eftersom många värden var under analysmetodens detektionsgräns. Perioden före behandling har uteslutits ur figur 8, eftersom analysmetod och detektionsgräns avvek från senare mätningar. I de ytor som behandlades med 3 och 6 ton krossaska samt 3 ton krossaska+3 ton kalk per hektar ökade K-halten kortsiktigt (0-2.5 år), se figur 7. I övriga ytor minskade istället K-halten vilket indikerar en fastläggning i marken eller ökat upptag. Detta var tydligast vid behandling med 3 ton finmald aska, där K-halten efter 10 år minskat ytterligare. Statistiskt kunde inga effekter påvisas, varken på lång eller kort sikt.



Figur 7. Medelvärdesförändringen av kaliumhalten i markvattnet efter behandling i relation till förändringen i referenserna, på kort och på lång sikt, på 50 cm djup.

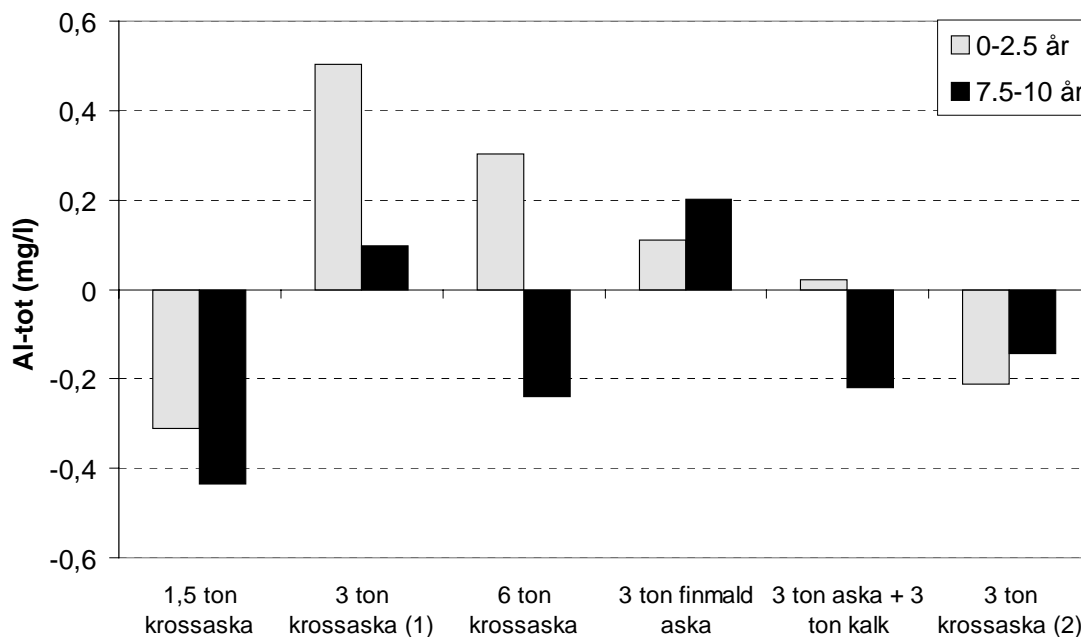
Generellt har K-halten minskat med tiden, se figur 8. Den största förändringen inträffar vid samma tidpunkt som ytorna behandlades med aska eller aska och kalk. Minskningen har, jämfört med referenserna, inte varit lika stor i de behandlade ytorna. Det finns en generell tendens att halterna ökar återigen efter 7.5-10 år i samtliga försöksled.



Figur 8. Kaliumhalt före och efter behandling. Medelvärden från samtliga mätningar efter behandling under respektive period från de fyra blocken på 50 cm djup.

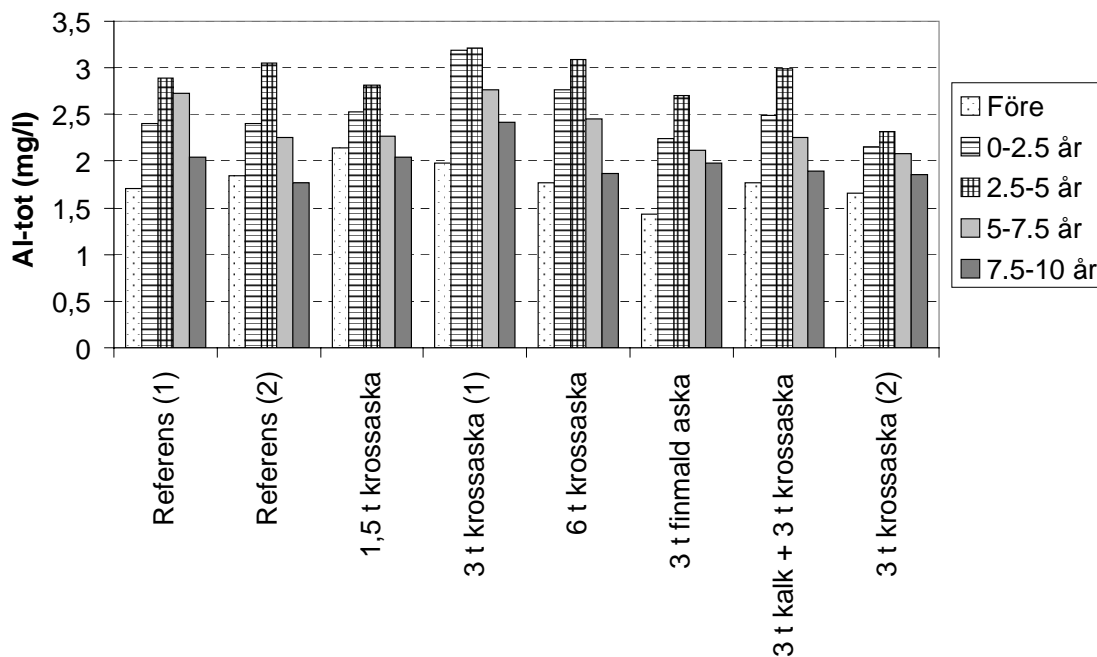
4.5 Aluminium

Ett av de främsta syftena med ask- och kalkbehandling är att minska halten och utlakningen av surt- och aluminiumrikt vatten till omgivande sjöar och vattendrag. Behandling med 3 (ett försöksled) och 6 ton krossaska samt 3 ton finmald aska per hektar har kortsiktigt lett till ökade aluminiumhalter (total), se figur 9. Den kortsiktiga ökningen sammanfaller med en ökad surhetsgrad vilket har resulterat i en ökad rörlighet av aluminium se figur 11. Långsiktigt har endast 3 ton krossaska (ett försöksled) och 3 ton finmald aska ökat halterna. Den största minskningen, både på lång och kort sikt erhöles vid spridning av 1.5 ton krossaska. Statistiskt kunde dock inte behandlingseffekter påvisas, varken på kort eller lång sikt, se tabell 2-4.



Figur 9. Medelvärdesförändringen av aluminiumhalten (total) i markvattnet efter behandling i relation till förändringen i referenserna, på kort och på lång sikt, på 50 cm djup.

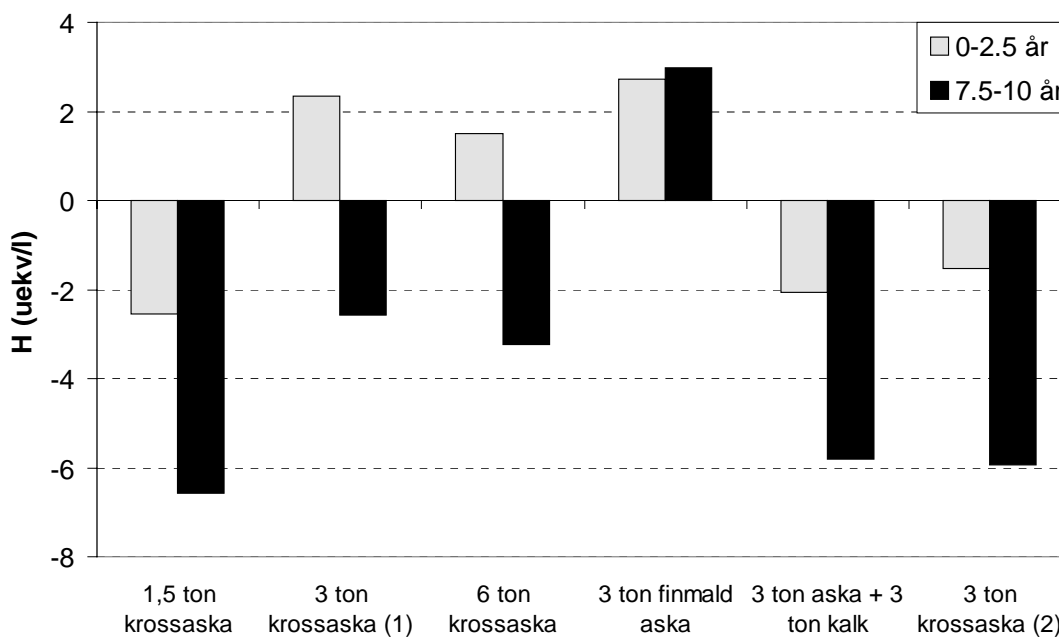
I motsats till baskatjonhalterna (Ca, Mg och K) har halterna av aluminium ökat med tiden i samtliga försöksled inklusive obehandlad referens, se figur 10. Ökningen inträffar strax efter behandlingen men minskar återigen efter 5-10 år.



Figur 10. Aluminiumhalt (total) före och efter behandling. Medelvärden från samtliga mätningar under respektive period från de fyra blocken på 50 cm djup.

4.6 Väte

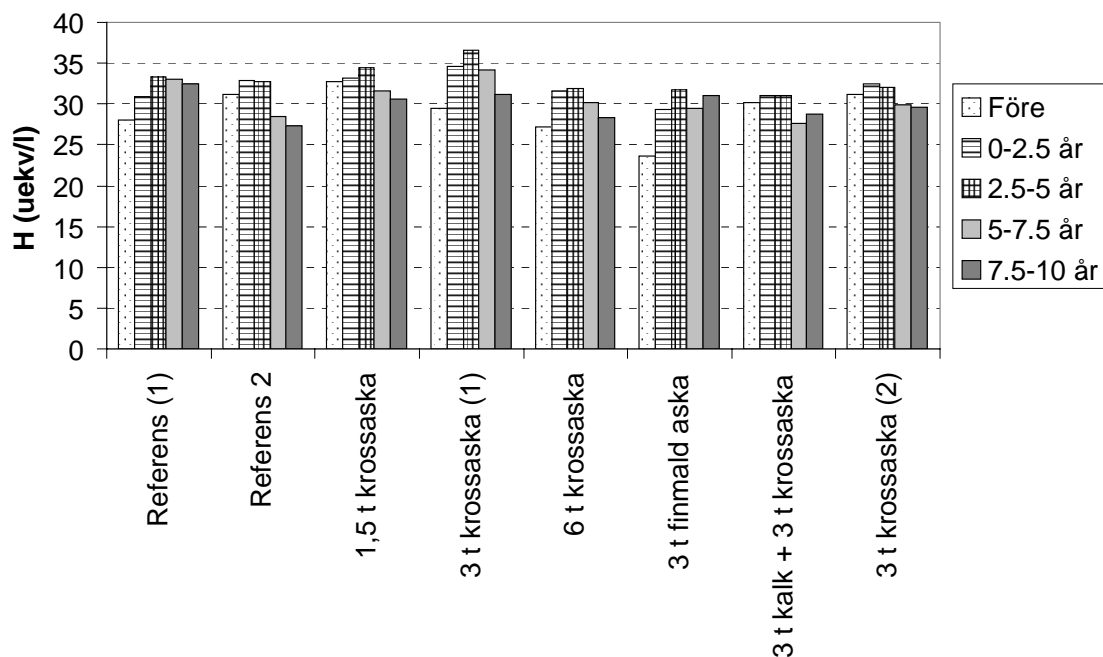
En av de tydligaste behandlingseffekterna som observerades i askförsöket var en långsiktig minskning av vätejonhalten i samtliga ytor utom en (3 ton finmald aska), se figur 11. I ytan som behandlades med 3 ton finmald aska ökade istället surhetsgraden, både på kort men framför allt på lång sikt. Kortsiktigt uppstod även en tillfällig ökning i de ytor som behandlades med 3 (ett försöksled) respektive 6 ton krossaska. Denna typ av pH-minskning har observerats i andra studier. Exempelvis, i ett försök i Hälsingland tillfördes aska i två doser (2 och 5 ton) vid två olika tillfällen vilket orsakade en pH-minskning i rostjorden på upp till enhet (Rosén m. fl. 1993). Effekten varade i åtminstone två år, men kan hålla i sig så länge som fem år (Nohrstedt m. fl. 1993).



Figur 11. Medelvärdesförändringen av vätehalten i markvattnet efter behandling i relation till förändringen i referenserna, på kort och på lång sikt, på 50 cm djup.

Ökningen av vätejonerna kan inte förklaras utifrån en ökad nitrifikation, se avsnitt 4.7. Den observerade minskningen beror snarare på jonbytesreaktioner i de övre marklagren mellan baskatjoner som lakas ut från askan, samt väte- och aluminiumjoner på markpartiklarna. De frigjorda aluminiumjonerna kan i sin tur hydratiseras varvid ytterligare vätejoner frigörs. Denna så kallade salteffekt (Wiklander 1975) ger tillfälligt ett surare markvatten, men i gengäld ökar markens buffertkapacitet. Det sura markvattnet rör sig ned genom markprofilen och orsakar även en pH-sänkning i de djupare marklagren. Med tiden byts allt färre väte- och aluminiumjoner ut varför pH-värdet i markvattnet sannolikt kommer att öka, både i de övre och nedre delarna av marken. Jonbytesreaktioner i de djupare marklagren är inte troliga på grund av den förhållandevis korta tid som askan samt askan+kalken legat på marken. Trots tydliga tendenser kunde inga effekter påvisas statistiskt, varken på kort eller lång sikt.

I figur 12 visas tidsutvecklingen i referensytorna och de behandlade ytorna. Vätejonhalten har förändrats med tiden även i de obehandlade referenserna under försöksperioden. Efter försöket ökade surhetsgraden men efter drygt 5 år minskar halterna igen.



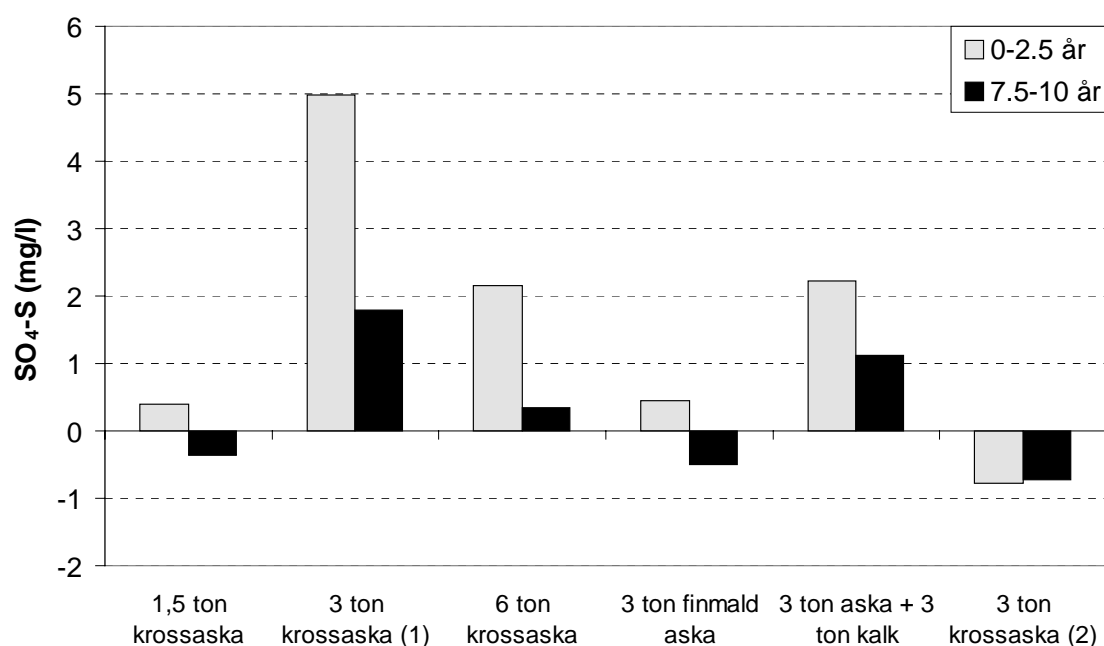
Figur 12. Vätehalt före och efter behandling. Medelvärden från samtliga mätningar under respektive period från de fyra blocken på 50 cm djup.

4.7 Nitratkväve

Det finns en risk för att nitrifikationsprocessen stimuleras om pH-värdet i marken höjs genom exempelvis aska eller tillförsel av aska tillsammans kalk. Förhöjda nitrathalter i markvattnet har observerats efter tillförsel av aska (ex. Rosén m. fl. 1993). Om ökningen är så stor att vegetationen inte hinner ta upp nitratjonerna riskerar de istället att lakas ut och bidra till både övergödning och försurning i vattenmiljön. Risken för en ökad nitrifikation är som störst i bördiga jordar eller områden som har ett stort kvävenedfall. Kvävenedfallet i Asa försökspark har varit och är fortfarande högt med ett årligt nedfall i skog på 10-15 kg/ha (Liljergren, 2005). Trots detta finns det inget som tyder på att behandlingarna har lett till förhöjda halter av kväve i markvattnet. I bilaga 3 sammanfattas de kort- och långsiktiga effekterna.

4.8 Sulfatsvavel

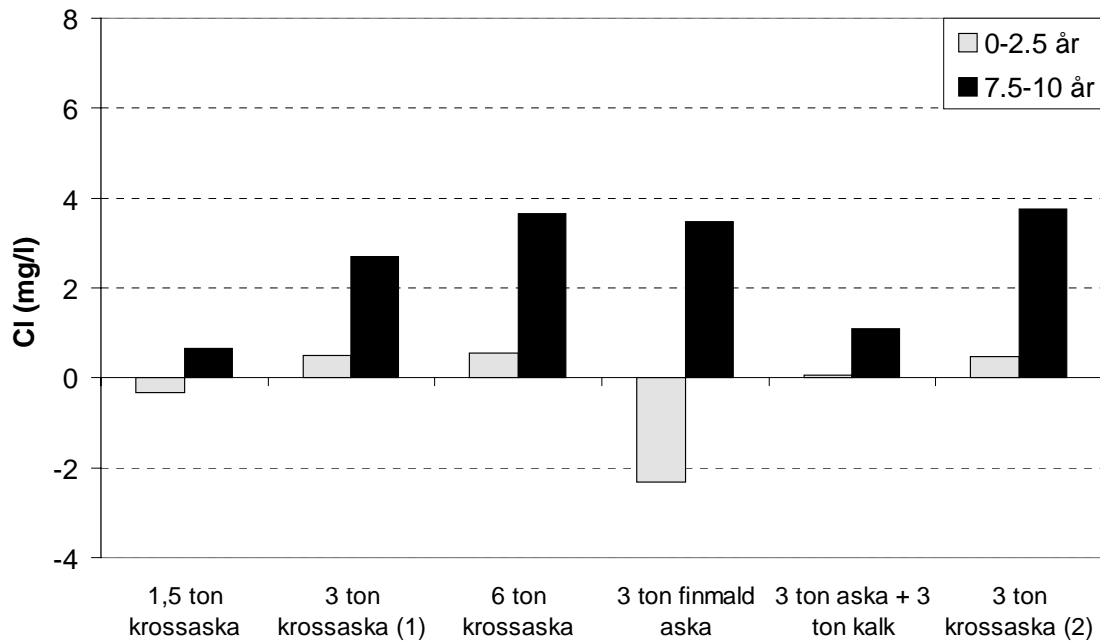
För att jonbalansen i markvattnet skall bibehållas måste utlakning av positiva katjoner balanseras med en lika stor mängd negativa anjoner. Den ökade utlakningen av kalcium, magnesium och kalium har, i första hand, balanserats av sulfatjoner, se figur 13. Utlakningen av sulfat är som störst omedelbart efter behandling men minskar med tiden, i takt med att utlakningen av katjoner minskar. Observera skillnaden mellan försöksleden som behandlats med 3 ton krossaska (1 och 2). Trots att samma dos och aska har använts i bägge fallen skiljer sig den markvattenkemiska effekten kraftigt åt. Krossaskan har i det ena fallet (krossaska 1) gett upphov till en ökning och i det andra fallet (krossaska 2) gett upphov till en minskning. Liknande resultat har observerats även för Ca, K, H och Al, se figur 2, 7, 9 och 11.



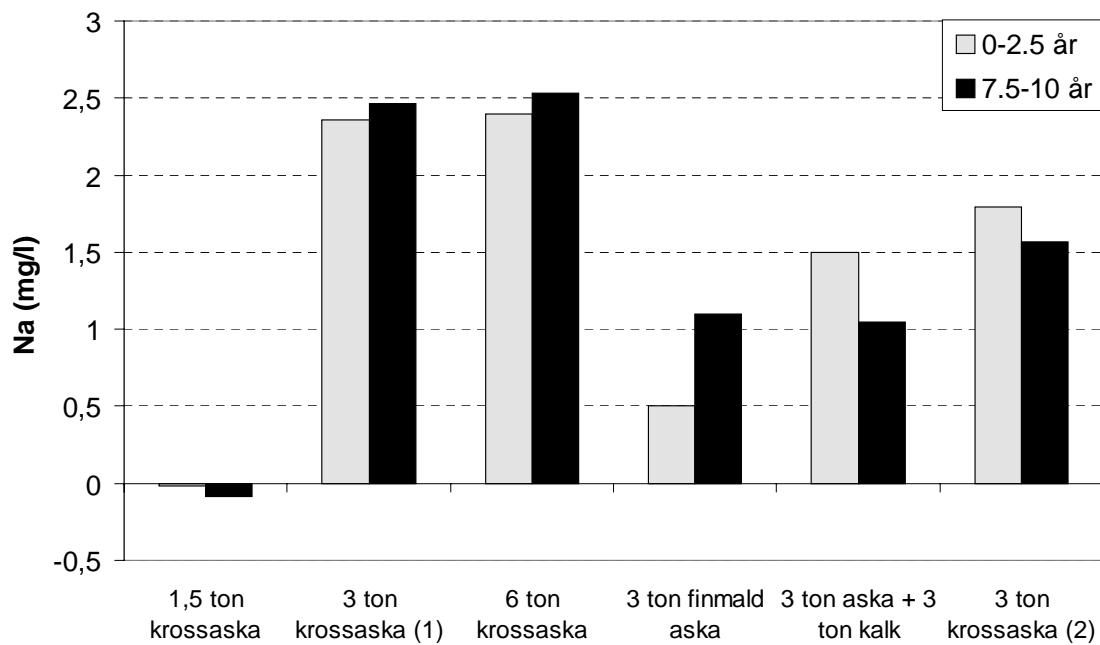
Figur 13. Medelvärdesförändringen av sulfathalten i markvattnet efter behandling i relation till förändringen i referenserna, på kort och på lång sikt, på 50 cm djup.

4.9 Klorid och Natrium

Utlakningen av klorid har inte påverkats på kort sikt utom i försöksledet med 3 ton finmald aska, se figur 14. På lång sikt har behandlingen däremot lett till en ökad utlakning av sannolikt hårdare bundet klorid i askan. Koncentrationen av natrium påverkades inte vid behandling med 1.5 ton krossaska men ökade kraftigt vid behandling med övriga asksorter och blandningar, se figur 15.



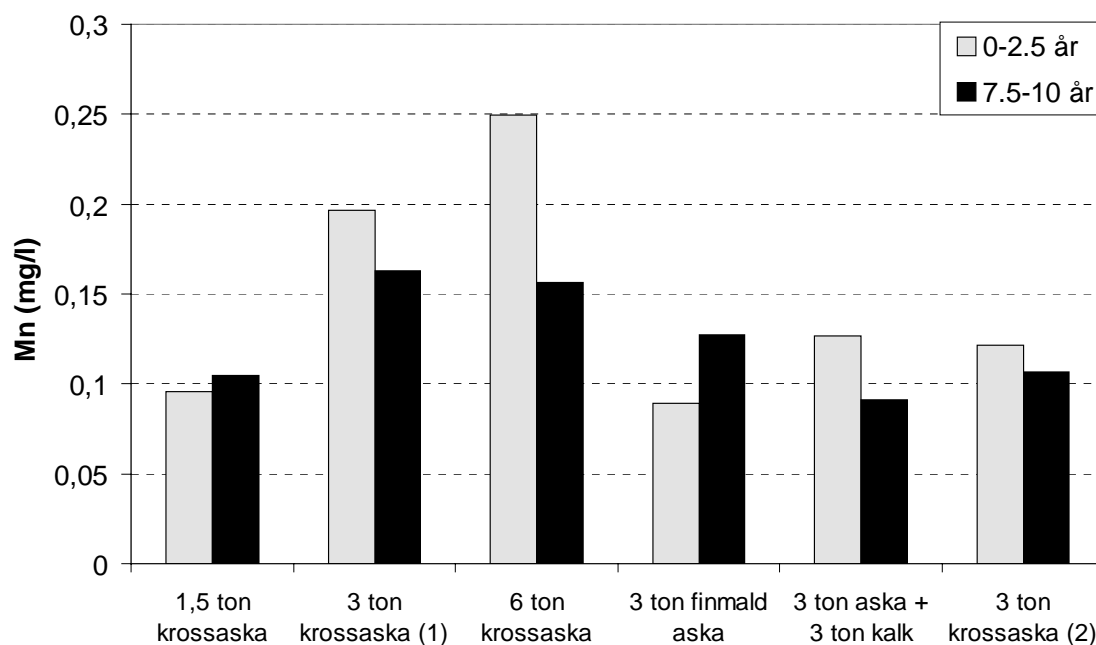
Figur 14. Medelvärdesförändringen av kloridhalten i markvattnet efter behandling i relation till förändringen i referenserna, på kort och på lång sikt, på 50 cm djup.



Figur 15. Medelvärdesförändringen av natriumhalten i markvattnet efter behandling i relation till förändringen i referenserna, på kort och på lång sikt, på 50 cm djup.

4.10 Mangan

Koncentrationen av mangan i markvattnet är starkt beroende av pH-värdet. När pH-värdet sjunker ökar halterna. Initialt ökade manganhalterna men på lång sikt har halterna sjunkit, se figur 16. Minskningen sammanfaller med att surhetsgraden i marken har minskat, se figur 11. I endast ett försöksled (3 ton finmald aska) har manganhalten (och vätejonhalten) ökat med tiden.



Figur 16. Medelvärdesförändringen av manganhalten i markvattnet efter behandling i relation till förändringen i referenserna, på kort och på lång sikt, på 50 cm djup.

4.11 Jämförelse mellan 25 och 50 cm djup

Skillnaderna i markvattenkvalitet mellan 25 och 50 cm var relativt små i de obehandlade referensområdena under hela försöksperioden. Samtliga försöksled och parametrar som analyserats vid alla provtagningsstillfällen (ej anjoner) redovisas i bilaga 4. Det fanns en tendens till högre halter av K samt lägre halter av Fe, på 25 cm jämfört med 50 cm i de obehandlade provytorna. De olika behandlingarna orsakade inga uppenbara förändringar av det förhållandet. Möjligen ökade skillnaderna i kaliumhalter ytterligare på lång sikt i de flesta behandlade försöksled på 25 cm, jämfört med 50 cm. Även Ca och Fe uppvisade en svag tendens till ökade halter på 25 cm i förhållande till 50 cm i vissa behandlade försöksled. Det finns enstaka exempel på stora skillnader mellan medelhalter på 25 och 50, men inget generellt mönster i de behandlade provytorna som kan knytas till dos eller sort av aska och kalk.

5 Sammanfattande diskussion

Under den tid som försöket pågick har få signifikanta skillnader noterats mellan de olika försöksleden och referenserna, vilket främst beror på stor spridning mellan upprepningar i både behandlade provytor och referensytor. Dos och kornstorlek hade viss betydelse för resultatet. Kortsiktigt (0-2,5 år) skilde sig halterna av Ca, Mg och Mn signifikant åt från referenserna när marken behandlades med högre doser av krossaska. Koncentrationerna av Al-tot, K och H skilde sig inte från referenserna, oavsett behandling. Långsiktigt (7,5-10 år) erhöles inga skillnader utom i två fall, 6 ton krossad aska och 3 ton finmald aska där Mg-halten respektive Fe-halten i markvattnet var signifikant högre jämfört med referenserna.

Trots få signifikanta skillnader observerades tydliga tendenser till effekter på markvattenkemin. En av de mest påtagliga behandlingseffekterna var en långsiktig minskning av vätejonkoncentrationen i samtliga försöksled utom ett (3 ton finmald aska). Kortsiktigt ökade vätejonhalten sannolikt på grund av att askans saltutlakning orsakade jonbyte i marken. Koncentrationen av aluminium (total) följde i stort sett samma mönster. Initialt ökade markvattenhalterna av kalcium och magnesium kraftigt efter behandling. Efter tio år är halterna fortfarande förhöjda. För kalcium var effekten dosrelaterad. Utlakningen av kalcium och magnesium åtföljdes framför allt av sulfatjoner. För kalium fanns ingen entydig tendens på kort sikt men på lång sikt minskar halterna. På lång sikt har behandlingarna även lett till ökade kloridhalter, vilket indikerar att hårdare bundet klorid lakades ut eftersom några kortsiktiga effekter inte noterades. Koncentrationen av mangan ökade kortsiktigt, men minskade med tiden i takt med att vätejonkoncentrationen minskade. Utlakningen av natrium har också påverkats av behandlingen, på både kort och lång sikt.

Ett av försöksleden skilde sig tydligt åt från övriga försöksled. Behandling med 3 ton finmald aska ledde till att koncentrationen av baskatjoner (kalcium, magnesium och kalium) minskade både på kort och lång sikt. Samtidigt ökade utlakningen av väte- och aluminiumjoner. Resultaten indikerar att malningen orsakat speciella egenskaper hos askan. Lakningsförsök med olika kornstorlekar av bland annat den aktuella askan har inte påvisat stora skillnader i syraneutraliserande förmåga (figur 3, aska A9 i Larsson & Westling, 1999).

Två försöksled med behandling med samma asktyp (3 ton krossad aska) har i flera fall uppvisat motsägande resultat, vilket ger en stor spridning som i sin tur leder till svårigheter att generalisera effekterna. Skillnaderna i effekt med samma askdos kan inte enbart förklaras med vissa olikheter i markvattenkemi före behandling i de två försöksleden.

Behandling med aska i detta försök hade liknande effekter på markvattnets kemi som ett försök med kalkning i samma bestånd (Zetterberg, m.fl., 2006). Ökningen av kalciumhalterna i markvatten 7,5- 10 år efter behandling med 3 ton aska per ha var dock större än med 3 ton krossad eller finmald kalk. Studier med upprepad lakning i laboratorium av krossaskor har visat att kalcium ofta löses ut relativt snabbt i början av lakningsperioden jämfört med kalk, se Larsson & Westling (1999) figur 4, aska A9. Däremot kan varaktigheten i effekten på markvatten, med erfarenhet från lakningsförsök, vara längre med kalk jämfört med samma dos aska. Krossaskans och kalkens uppträdande i fält under de första åren efter behandling har i en studie av Westling och Larsson (2006) uppvisat stora likheter med lakningstester i laboratorium med upprepad lakning av samma askor respektive kalk. I den studien användes bland annat samma krossaska som i dosförsöket och försöken i fält visade att nära 30 % av kalciuminnehållet och nära 50 av kaliuminnehållet lakades ut efter 30 månader från påsar med aska i humusskiktet. Det var betydligt mer än andra prövade askor i studien. Det bör dock noteras att askan hade lagrats i sju år i säck, vilket kan ha förändrat egenskaperna jämfört med askan som användes i dosförsöket 1993.

Resultaten från askdosförsöket i denna studie avviker inte generellt från andra experiment med oftast 3 ton aska per ha där effekter på markvatten undersökts (Arvidsson, 2001; Westling m. fl., 2004). Den tydligaste behandlingseffekten är ökad kalciumhalt och ANC. Effekten på halten av totalaluminium samt vätejoner är varierande. Askbehandling orsakar inte förhöjda halter av nitratkväve i markvatten med undantag av färska hyggen, men även där är effekten kortvarig (Westling, m. fl., 2004). Den syraneutraliserande effekten av 3 ton aska är i regel fullt tillräcklig för att kompensera för biomassauttagets försurande effekt i studier där askbehandlingen utförts nära efter sluttavverkning med uttag av avverkningsrester (Westling, m. fl., 2004). Resultaten från dosförsöket i Asa försökspark indikerar att dosen 1,5 ton per ha är mest optimal under 10 efter behandling som en försiktig kompensation för försurande uttag av biomassa, med tanke på markvattnets kvalitet. Men eftersom effekten avtar med tiden är sannolikt 3 ton per ha mer långsiktigt optimal. Risken med högre doser som indikeras i detta dosförsök är kortvarigt och kraftigt förhöjda halter av olika salter från askan som ger upphov till jonbyte i marken. Risken för eventuella skadliga effekter är svårbedömd när till exempel halten av vätejoner och aluminium oftast kortvarigt stiger i markvattnet efter askbehandling.

Försöken med upprepad lakning (Larsson & Westling, 1999) indikerar att halten av baskatjoner i den härdade och krossade askan, främst kalcium, har stor betydelse för den syraneutraliserande förmågan de första åren (Westling & Kronnäs 2006), trots att krossaskorna är både flyg- och botte-naskor som är ett resultat av olika bränslemix och härdningsprocedur. Det innebär att lämplig dos måste ta hänsyn till askans kemiska sammansättning. Askan som användes i dosförsöket i denna studie hade en kalciumhalt på knappt 17 % (tabell 1), vilket kan betraktas som relativt genomsnittligt för trädaskor (Olsson & Westling 2006). Väsentligt högre, respektive lägre, kalciumhalt kan innebära att effekten på mark och vatten i förhållande till dosen avviker från de som redovisas i denna studie.

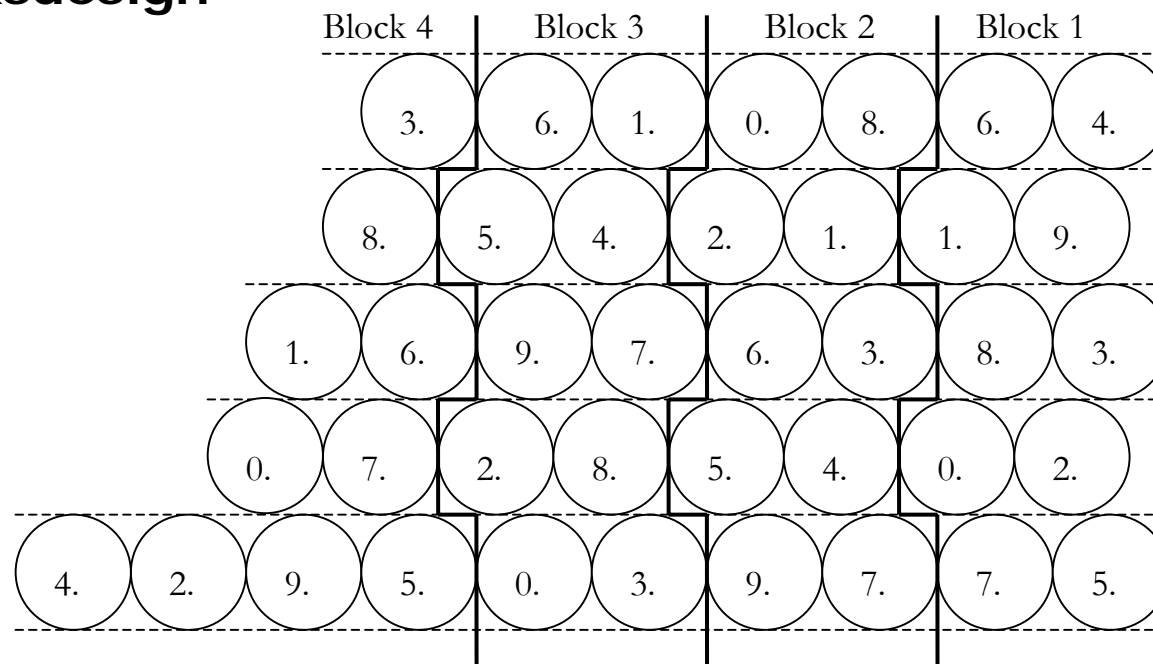
6 Referenser

- Akselsson C., Larsson P-E. & Westling O. 1998. Markkemi och markvatten i kalkad skog. Årsrapport 1997. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1318. 47 s.
- Akselsson C. & Westling, O. 1999. Markvattenkemins rumsliga variation i ett granbestånd i södra Sverige. IVL Rapport B1319. 23 s.
- Akselsson C., Westling O., Larsson P-E. & Petersson P. 2000. Markvatten, barrkemi och trädttillväxt efter behandling med olika doser och sorter av kalk. Årsrapport 1999. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1386. 57 s.
- Arvidsson H. 2001. Wood Ash Application in Spruce Stands – Effects on ground vegetation, tree nutrient status and soil chemistry. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, Sylvestria 221. Doktorsavhandling, SLU Ultuna. 33.s + 4 appendix.
- Jacobson, S. & Ring, E. 1995. Effekter av granulerad vedaska på skogsproduktion, barrkemi och markvattenkemi. SkogForsk, Manuskript. Slutrapport till NUTEK. 19 s. 40 bilagor.
- Larsson P-E., Akselsson C., Bengtsson R. & Bjelke U. 1999. Biologiska effekter i kalkad skog. Årsrapport 1998. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1343. 58 s.

- Larsson P-E., Uggla U. & Westling O. 2003. Långsiktiga effekter av skogsmarkskalkning på mark- och markvattenkemi. Årsrapport 2001. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1524. 51 s.
- Larsson P-E. & Westling O. 1997. Ytvatten i kalkade avrinningsområden. Årsrapport 1996. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1279.65 s.
- Larsson, P.-E. & Westling, O. 1999. Lakning av vedaska - en laboratoriestudie. IVL Rapport B1325. 21 s.
- Larsson P-E., Westling O. & Abrahamsson I. 2003. En integrerad strategi för kalk- och askspridning i avrinningsområden. Vattenkemiska effekter av markbehandlingar. IVL Rapport B1435. 33 s.
- Liljegren, A. (red.). 2005. Övervakning av luftföroreningar i Kronobergs län. Resultat till och med september 2004. IVL Rapport B1614. 24 s.
- Lundborg A. & Nohrstedt H-Ö. 1996. Effekter av askspridning i skogen. NUTEK R1996: 13. 38 s.
- Nohrstedt H-Ö., Sikström U. & Ring E. 1993. Försök med vitaliseringsgödsling av skog i Blekinge och nordöstra Skåne. SkogsForsk Resultat Nr 15, 1993, 4 s.
- Olsson B & Westling O. 2006. Skogsbränslecykelns näringsbalans. IVL Rapport B1669. 31 s.
- Rosén K., Eriksson H., Clarholm, M., Lundqvist, H. & Rudbeck, A. 1993. Granulerad vedaska till skog på fastmark - ekologiska effekter. NUTEK R 1993:26. 60 s.
- Skogsstyrelsen, 2001. Rekommendationer vid uttag av skogsbränsle och kompensationsgödsling. Skogsstyrelsen, Meddelande 2-2001. Jönköping. 16 s.
- Tukey J.W. 1953. The problem of multiple comparisons. Unpublished notes, Princeton University.
- Uggla E., Larsson P-E. & Westling O. 2003. Markkemi i kalkad skog. Lägesrapport 10 år efter kalkning. Årsrapport 2002. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1536. 25 s.
- Westling O., Örlander G. & Andersson I. 2004. Effekter av askåterföring till granplanteringar med riståkt. IVL Rapport B 1552. 47 s.
- Westling, O. & Kronnäs, V. 2006. Långsiktiga effekter av askåterföring på mark- och markvattenkemi i skog. Slutrapport till Energimyndigheten. Projekt 12761-1. IVL Svenska Miljöinstitutet. 27 s.
- Westling, O. & Larsson P-E. 2006. Översättning av resultat i laboratorium till fältförhållanden. IVL Rapport B1660. 23 s.
- Wiklander, L. 1975. The role of neutral salts in the ion exchange between acid precipitation and soil. *Geoderma* 14: 93-105.
- Zetterberg, T. & Westling, O. 2005. Utlakning från kalkade avrinningsområden. Effekttuppföljning av Skogsstyrelsens program för kalkning och vitaliseringsgödsling av skogsmark. IVL Rapport B1642. 21 s.
- Zetterberg, T., Akselsson, C. & Westling O. 2006. Markvattenkemiska effekter vid spridning av kalk på skogsmark. Slutrapport från ett 12-årigt dosförsök. IVL Rapport B1652. 44 s.

Bilaga 1 Försöksdesign

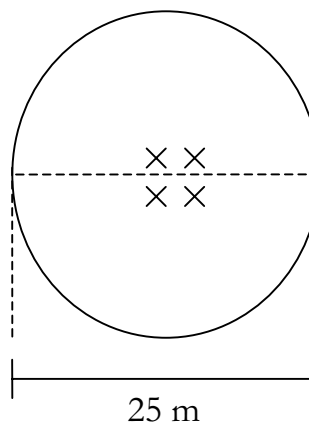
23



Tabergsvägen

- 0. Referens (1)
- 1. Referens (2)
- 2. 1,5 t krossaska
- 3. 3 t krossaska (1)
- 4. 6 t krossaska
- 5. 3 t finmald aska
- 6. 3 t aska+3 t kalk
- 7. 3 t krossaska (2)
- 8. Konst. grundyta
- 9. Sjunk. grundyta

Ex. provyta:

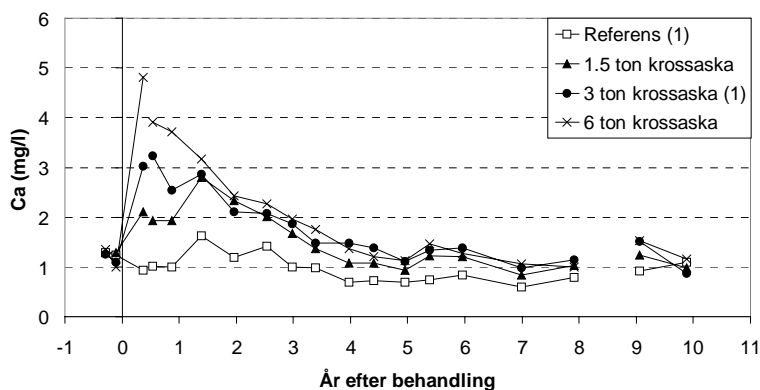


× = Lysimeter. På varje sida om mittlinjen finns en lysimeter på 25 cm och en på 50 cm nivå.

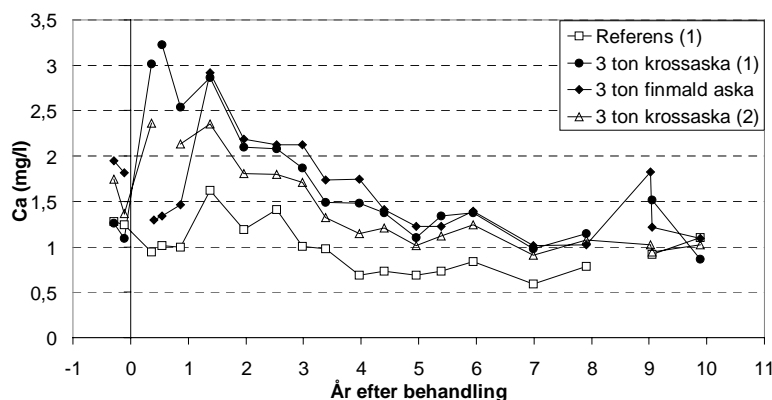
Bilaga 2 Tidsutveckling

Bilaga 2 redovisar tidsutvecklingen på 50 cm djup efter olika typer av behandlingar. Varje punkt motsvarar ett medelvärde från fyra block. Observera att skalorna på Y-axeln skiljer sig åt.

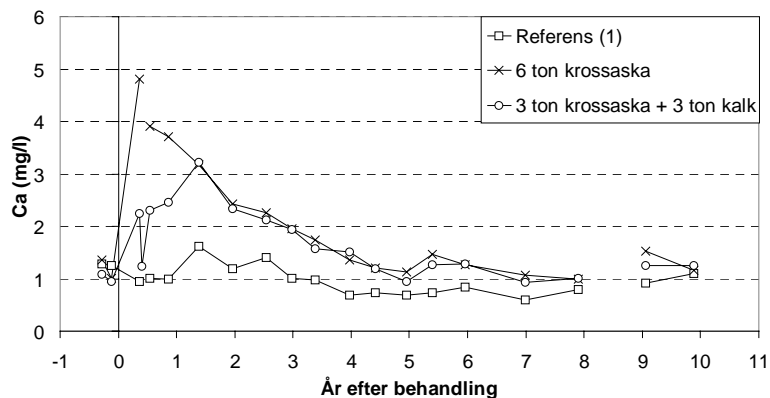
Doseffekt



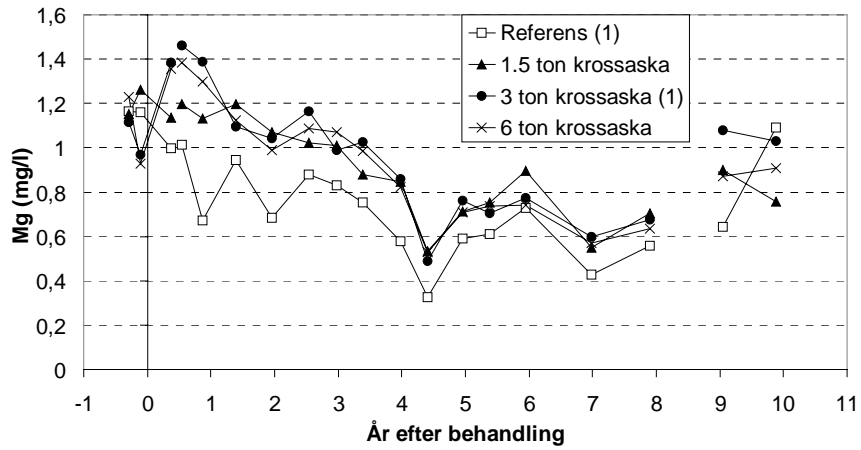
Kornstorlekseffekt



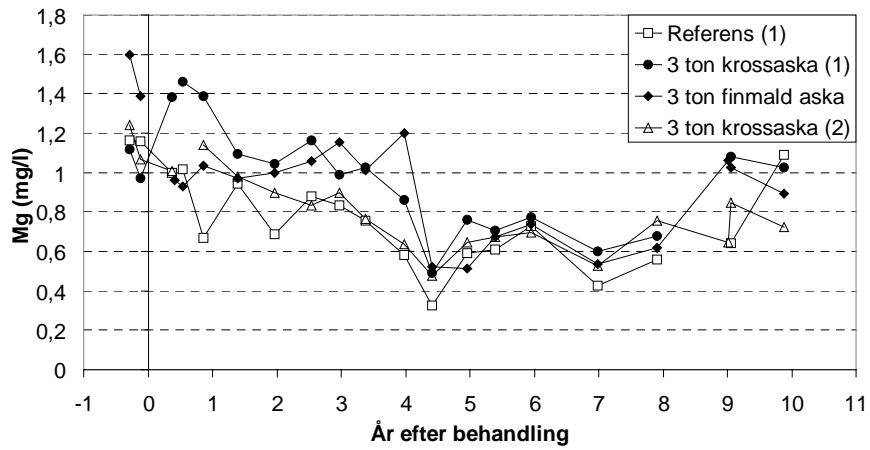
Blandeffekt



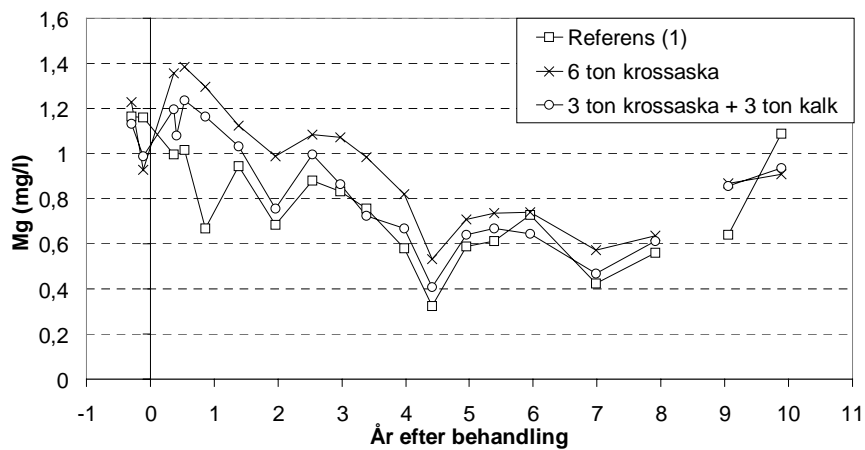
Doseffekt



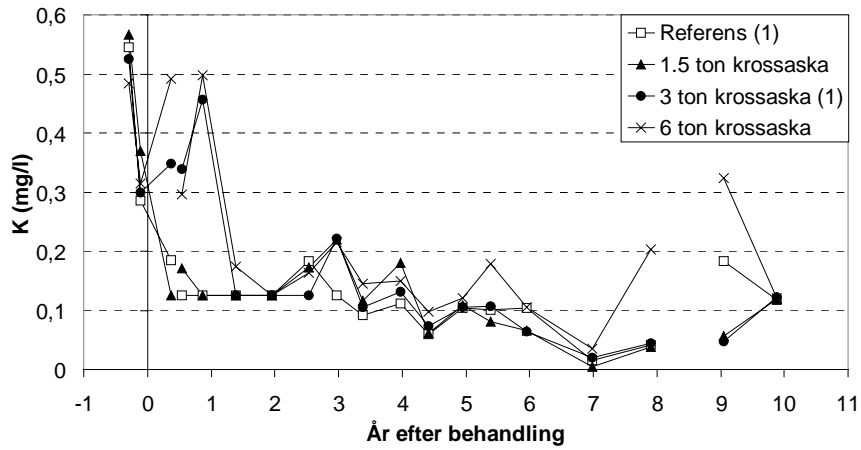
Kornstorlekseffekt



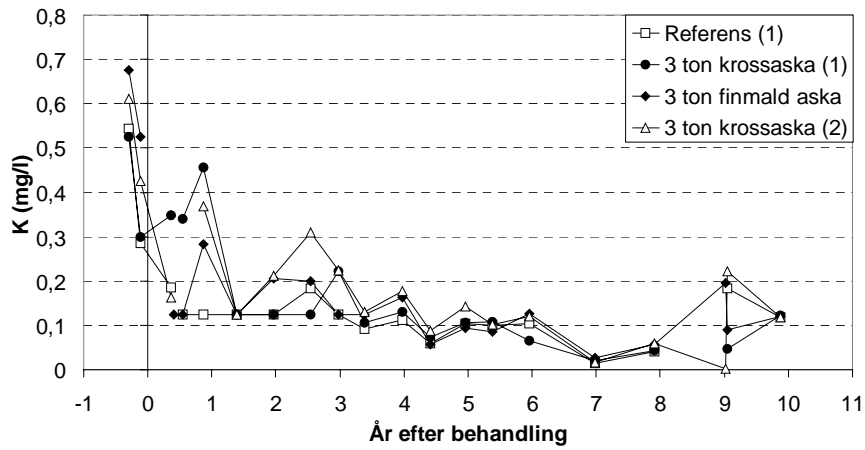
Blandeffekt



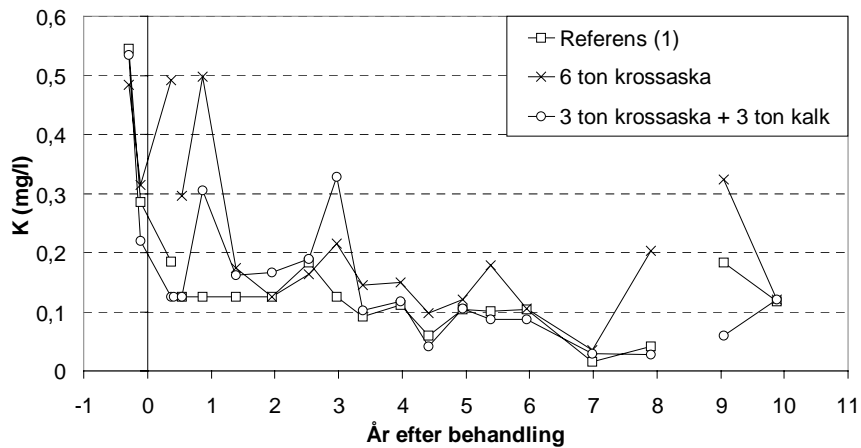
Doseffekt



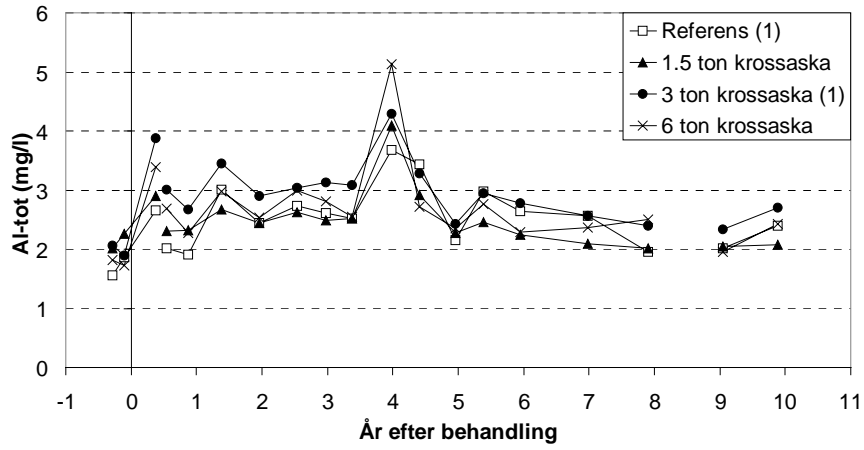
Kornstorlekseffekt



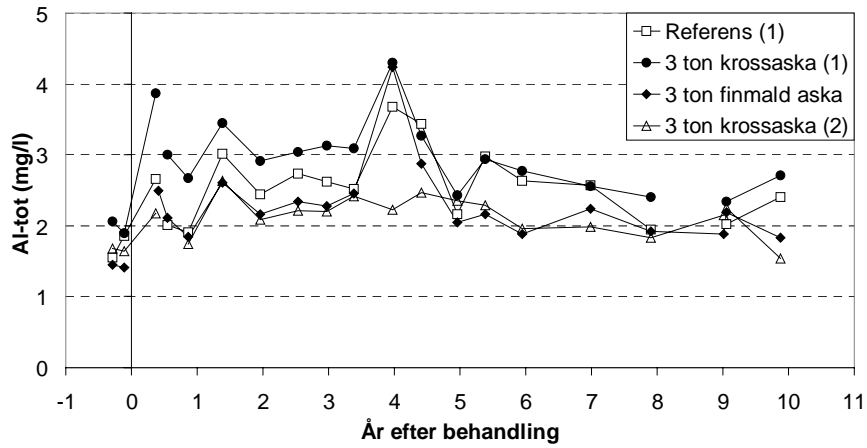
Blandeffekt



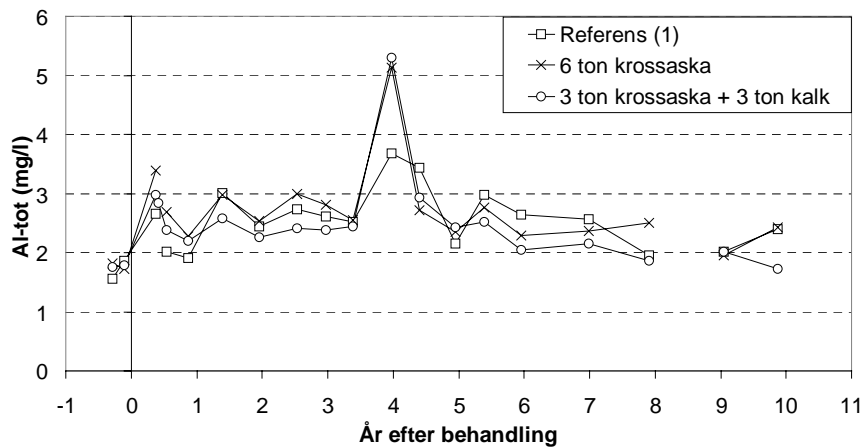
Doseffekt



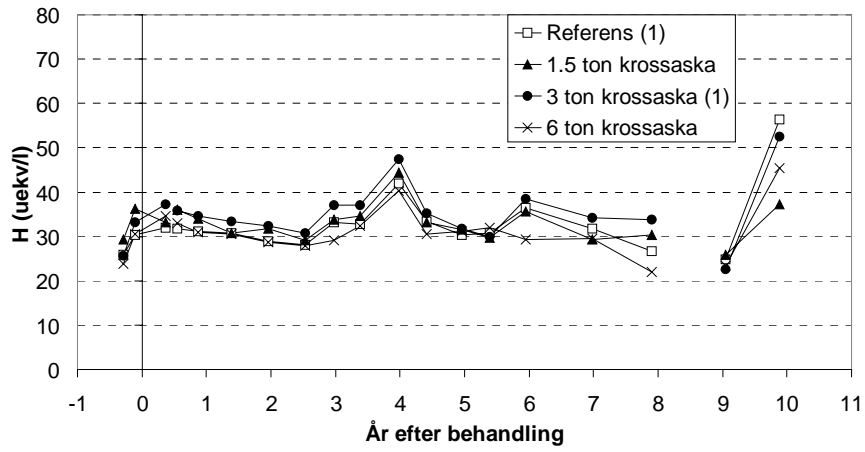
Kornstorlekseffekt



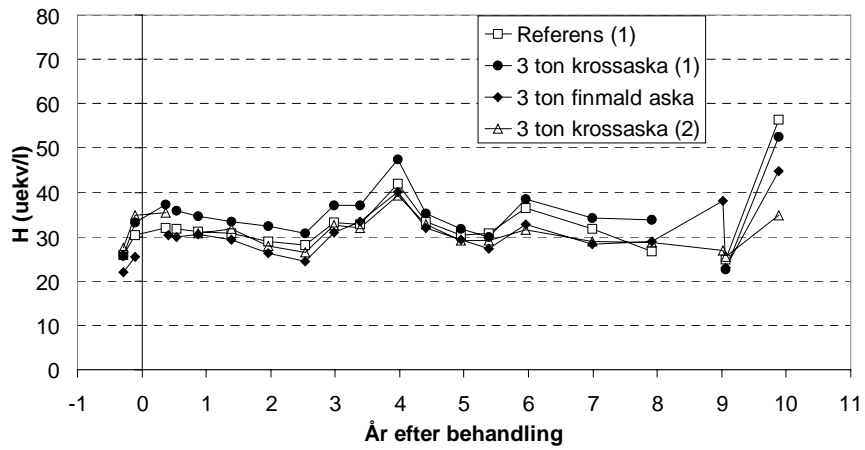
Blandeffekt



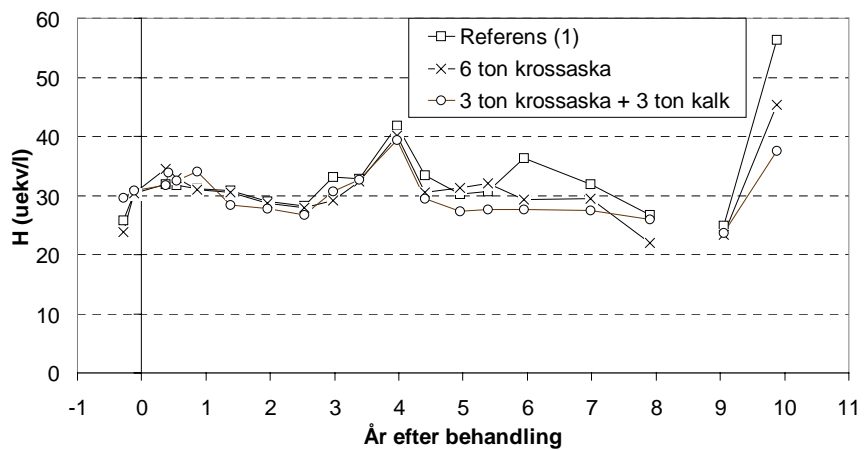
Doseffekt



Kornstorlekseffekt



Blandeffekt



Bilaga 3 Kort- och långsiktiga behandlingseffekter

Medelvärdesförändringen i markvatten på 50 cm i mg/l (H är uttryckt som uekv/l) mellan försöksleden och referenserna före respektive efter behandling (0-2.5 samt 7.5-10 år). För mer information om medelvärdesförändringen, se avsnitt 3.2

Försöksled	Kortsiktiga behandlingseffekter 0-2.5 år											
	Ca	Mg	K	Al-tot	H	SO4-S	NO3-N	Cl	Na	Mn	Fe	TOC
1,5 ton krossaska	1,04	0,24	-0,06	-0,31	-2,55	0,39	0,0008	-0,32	-0,02	0,10	0,04	1,10
3 ton krossaska (1)	1,68	0,53	0,15	0,50	2,35	4,99	0	0,49	2,36	0,20	0,01	1,48
6 ton krossaska	2,56	0,47	0,21	0,30	1,50	2,15	0	0,55	2,40	0,25	0,01	-1,57
3 ton finmald aska	0,07	-0,22	-0,15	0,11	2,73	0,45	0	-2,32	0,50	0,09	0,06	2,93
3 ton aska + 3 ton kalk	1,55	0,32	0,08	0,02	-2,07	2,23	0	0,07	1,50	0,13	0,00	0,67
3 ton krossaska (2)	0,70	0,16	-0,04	-0,21	-1,52	-0,78	0	0,48	1,80	0,12	0,02	-1,65

Försöksled	Långsiktiga behandlingseffekter 7.5-10 år											
	Ca	Mg	K	Al-tot	H	SO4-S	NO3-N	Cl	Na	Mn	Fe	TOC
1,5 ton krossaska	0,18	0,07	-0,09	-0,43	-6,56	-0,36	0,0208	0,64	-0,09	0,10	0,01	2,06
3 ton krossaska (1)	0,44	0,30	-0,05	0,10	-2,58	1,79	0	2,70	2,46	0,16	0,02	-0,35
6 ton krossaska	0,44	0,21	0,14	-0,24	-3,23	0,34	0	3,64	2,53	0,16	0,00	0,73
3 ton finmald aska	-0,34	-0,19	-0,20	0,20	2,97	-0,50	0	3,47	1,10	0,13	0,03	5,98
3 ton aska + 3 ton kalk	0,52	0,20	-0,01	-0,22	-5,80	1,12	0	1,10	1,05	0,09	0,00	-1,67
3 ton krossaska (2)	-0,14	0,09	-0,11	-0,14	-5,94	-0,73	0	3,75	1,56	0,11	0,01	-2,30

Bilaga 4 Jämförelse mellan 25 och 50 cm djup

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

Försöksled	Kortsiktiga behandlingseffekter 0-2.5 år							
	H+	Ca	Mg	Na	K	Mn	Fe	Al-tot
Referens (1)	1.0	1.0	0.9	0.9	1.3	1.1	0.8	1.1
Referens (2)	1.0	0.9	0.8	0.7	1.5	1.0	0.4	1.0
1,5 ton krossaska	1.0	1.0	0.8	0.7	1.4	1.4	0.2	1.0
3 ton krossaska (1)	1.1	1.0	0.9	0.9	1.2	1.0	1.7	1.0
6 ton krossaska	1.0	1.2	1.0	0.9	1.4	1.0	1.0	1.1
3 ton finmald aska	1.0	0.8	0.8	0.8	1.3	1.1	0.2	1.0
3 ton aska + 3 ton kalk	1.1	1.1	1.0	1.1	1.2	1.0	1.6	1.1
3 ton krossaska (2)	1.1	1.0	0.9	0.8	1.5	0.9	0.8	1.1

Försöksled	Lågsiktiga behandlingseffekter 7.5-10 år							
	H+	Ca	Mg	Na	K	Mn	Fe	Al-tot
Referens (1)	0.9	0.8	0.8	0.9	0.6	0.9	0.6	1.1
Referens (2)	0.9	0.8	0.6	0.6	1.8	1.4	0.9	0.8
1,5 ton krossaska	0.9	1.1	0.8	0.7	3.6	0.7	0.9	1.0
3 ton krossaska (1)	0.9	1.1	1.0	0.7	5.8	1.0	1.5	0.7
6 ton krossaska	1.1	1.0	0.8	0.7	0.5	0.6	0.7	1.0
3 ton finmald aska	1.0	0.9	0.8	0.6	3.2	0.8	0.4	0.9
3 ton aska + 3 ton kalk	1.0	1.5	1.0	0.8	4.3	0.8	4.3	0.9
3 ton krossaska (2)	1.0	1.3	0.9	0.8	2.8	0.7	1.7	0.9