

Effekten av grova kalkprodukter som kalkningsmedel i sjöar

Vattenkemiska resultat från nio sjöar kalkade med
grovkalk, GX-kalk och Bulltofta-kalk



■ Effekten av grova kalkprodukter som kalkningsmedel i sjöar

Vattenkemiska resultat från nio sjöar kalkade med grovkalk, GX-kalk och Bulltofta-kalk

Titel	Effekten av grova kalkprodukter som kalkningsmedel i sjöar.
Meddelande	Nr 2011:17
Referens	Tobias Haag, Naturavdelningen Vattenfunktionen, mars 2011.
Författare	Anders Svahnberg, Myrica AB och Ingemar Abrahamsson, Medins Biologi AB.
Kontaktperson	Tobias Haag, Länsstyrelsen i Jönköpings län Direkttelefon 036-39 50 51, e-post tobias.haag@lansstyrelsen.se.
Webbplats	www.lansstyrelsen.se/jonkoping
Omslag	Spridning av GX-kalk, foto Anders Svahnberg, Myrica AB.
ISSN	1101-9425
ISRN	LSTY-F-M—11/17-SE
Upplaga	100 exemplar
Tryckt på	Länsstyrelsen, Jönköping 2011
Miljö och återvinning	Rapporten är tryckt på miljömärkt papper och omslaget består av PET-plast, kartong, bomullsväv och miljömärkt lim. Vid återvinning tas omslaget bort och sorteras som brännbart avfall, rapportsidorna sorteras som papper.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	6
1. Inledning	7
1.1 Bakgrund	7
1.2 Syfte	8
1.3 Produkten grovkalk	8
1.4 Produkten GX-kalk	8
1.5 Produkten Bulltofta-kalk	9
2. Metoder	11
3. Resultat och diskussion	14
3.1 pH och alkalinitet.....	14
3.2 Uttransporterad och upplöst kalk.....	16
3.3 Modellsimuleringar	20
4. Slutsatser.....	23
5. Rekommendationer	24
Erkännanden.....	25
Referenser	25

Bilaga: Kartöversikt med sjöarnas geografiska läge

Sammanfattning

Problemen med damning och vindavdrift vid helikopterkalkning med torrt kalkstensmjöl är väl kända inom kalkningsbranschen. Redan 1992 beskrevs i en rapport att så mycket som 50 % av den spridda kalken kan driva iväg och inte komma det avsedda kalkningsobjektet tillgodo. Vindavdriften orsakar estetiska problem i omgivningen och påverkan på vegetation men innebär också en ekonomisk förlust då kalkningens effekt blir lägre.

I syfte att finna en alternativ produkt för att eliminera damningen kalkades 2004 tre sjöar på försök med granulerad kalk och tre sjöar med (våtmarks-) grovkalk, två produkter vilka dammar obetydligt vid spridning. År 2006 utökades försökskalkningarna med ytterligare sex sjöar i vilka ytterligare två grova kalkprodukter spreds, GX grovkalk och utfällningskalk från Bulltofta vattenverk.

Föreliggande rapport behandlar effekterna under 4-6 år efter kalkning med de grova kalkprodukterna (våtmarks-) grovkalk, GX-kalk och Bulltofta-kalk. Resultaten visar att de grova kalkprodukterna löste sig långsammare och något sämre än kalkstensmjöl. Kalkningseffekten med avseende på pH och alkalinitet var jämnare och uppvisade en bättre varaktighet än i mjölkalkade sjöar. Modellsimuleringar visar att grova kalkprodukter ger jämnare neutralisationseffekter än kalkstensmjöl och att de periodvis höga halttillskotten reduceras i jämförelse med kalkstensmjöl.

Vid övergång från spridning av kalkstensmjöl till grovkalkmedel rekommenderas årlig kalkning med oförändrad giva. Eventuellt kan dock en extra årsgiva kalk spridas för att er-hålla effektneutralitet under de första åren.

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Problemet med damning och vindavdriftsförluster vid helikopterspridning av torrt kalkstensmjöl är välkänt. Kalkstensdamm som driver bort från den tilltänkta spridningsytan, sjö eller våtmark, medför estetiskt negativa effekter på byggnader, båtar, bryggor, jaktorn o dyl samt kan även orsaka problem för maskiner i skogsbruket och nerdamning av kläder och hundar. Den vindbortförda kalken kan även orsaka icke önskvärd påverkan på vegetation i kalkningsobjektets närhet. Vindavdriften medför också en ekonomisk förlust eftersom en del av den spridda kalken inte direkt kommer till nytta i den tilltänkta sjön eller våtmarken. Redan 1988 påbörjade Anders Svahnberg, Myrica kalkningskonsult, studier av vindavdriftens omfattning och funktioner. I en rapport beskrivs att upp till hälften av den spridda kalkmängden kan driva bort med vinden (Svahnberg 1992).

Sedan 1992 har Myrica kalkningskonsult bedrivit studier av kalkningseffekten i våtmarker som kalkats med alternativa mindre eller icke dammande produkter.

Resultaten har efterhand lett fram till att våtmarker idag huvudsakligen kalkas med kalkprodukter som dammar obetydligt eller inte alls (Svahnberg & Abrahamsson 2001). När det gäller helikopterkalkning av sjöar är dock torrt mjöl fortfarande den dominerande produkten.

På initiativ av länsstyrelsen i Västra Götalands län (granuler) och Myrica (grovkalk) och i samarbete med berörda entreprenörer, konsulter, kommuner och länsstyrelsen i Hallands län, initierades 2004 ett försök med helikopterspridning av granulerad kalk och grovkalk i sjöar. Försöket inleddes i Myrica kalkningskonsult övriga försöksverksamhet avseende kalkning av våtmarker. Liksom i Myrica's övriga försöksverksamhet har försöket finansierats av flera berörda aktörer i kalkningsverksamheten.

Sex tidigare ej kalkade sjöar valdes ut för granul- och grovkalkning. Därutöver kalkades tre tidigare okalkade sjöar med torrt P-märkt kalkstensmjöl som kalkade referenser. Dessutom provtogs tre helt okalkade sjöar som referenser. Resultaten



Bild 1-2. Helikopterspridning med GX- resp Bulltofta-kalk i Bredsjön resp Gällsjön. Foto: Anders Svahnberg, Myrica AB.

efter fyra års uppföljning har redovisats i rapport (Svahnberg & Abrahamsson 2008). Uppföljningen av de sjöar som kalkades med mjöl respektive granuler upphörde därefter.

År 2006 utökades verksamheten med ytterligare två produkter efter initiativ av Movab (Bulltofta-kalk) och SMA (GX-kalk). Produkterna spreds i ytterligare två grupper om vardera tre tidigare okalkade sjöar. Föreliggande rapport behandlar effekterna av sex års uppföljning av de 2004 grovkalkade sjöarna samt fyra års uppföljning av de sjöar som 2006 kalkades med GX- resp Bulltofta-kalk.

1.2 Syfte

Syftet med undersökningen var följande:

- att ge svar på frågan om grova kalkprodukter är användbara ur kalkeffektsynpunkt som kalkningsmedel vid helikopterkalkning av sjöar.
- att klarlägga upplösnings- och uttransportfunktioner.
- att ge underlag för rekommendationer rörande dosering och spridningsintervall.

1.3 Produkten grovkalk

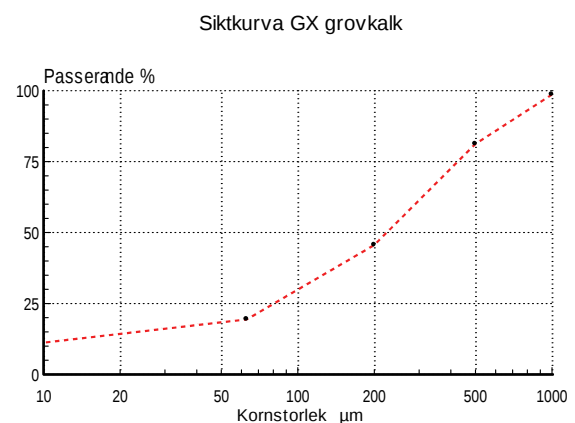
Den kalk som i föreliggande rapport benämnes 'grovkalk' levererades från Uddagårdskalk. Grovkalkens kvalitet motsvarade P-märkt grovkalk enligt SPCR 155 våtmarkskalk. Det innebär bl a att andelen finpartiklar <0,20 mm understiger 10 %. CaO-värdet för den i försöks-sjöarna spridda kalken uppgavs av fabriken vara 48,3 %.



Bild 3. Grovkalk (Ignaberga) i naturlig storlek.
Foto: InformArt.

1.4 Produkten GX-kalk

GX-kalken är en grovkalk som tillverkas av SMA Mineral Persberg AB. Fabriken och gruvan ligger i Persberg några km öster om Filipstad i Värmland. Sedan några år har GX-kalken börjat användas för kalkning av våtmarker. GX-kalken marknadsförs under produktnamnet Cresco GX. Kalktypen är kristallin urbergskalk som bildades för ca 1 900 miljoner år sedan. CaO-värdet på den i försöket använda kalken var 52,5 % (torr produkt) och fukthalten var 3 %.



Figur 1. Siktkurva för GX-kalk som spreds i försöket.

GX-kalken innehöll ca 45 % mjöl under 0,2 mm. Siktcurvan från den i försöket använda GX-kalken redovisas i figur 1. Detta är en kraftigt dammande fraktion vid spridning av torra grovkalker oavsett mjölandel. Den något fuktiga GX-kalkens egenskaper är dock sådana att mjölfraktionen binds och bildar aggregat med de större kornen vilket motverkar damning och därmed vindavdrift. Aggregatbildningen ger också den effekten att i det fall kalk hamnar på mark i strandzonen uppträder den som en avsevärt grövre produkt utan finfraktion (se bild 4) och upplevs inte besvärande såsom dammig. GX-kalken kan därför ses som en dammbunden grovkalk vars egenskaper minimerar damning och estetisk påverkan på omgivningen.



Bild 4. GX-kalk efter spridning.
Foto: Anders Svahnberg, Myrica AB.

1.5 Produkten Bulltofta-kalk

Vid avhärdning av råvatten i vissa vattenverk bildas kalkutfällningsprodukter som sedan ett antal år används för spridning på våtmarker inom kalkningsverksamheten. I det sammanhanget har kalkutfällningsprodukterna visats ha en ekvivalent effekt jämfört med (våtmarks-) grovkalk. (Svahnberg & Abrahamsson 2005). Nomenklaturen är emellertid oklar rörande dessa kalkutfällningsprodukter och ett antal termer används i olika sammanhang för motsvarande kalkutfällningsprodukter från olika vattenverk. De vanligaste uttrycken är vomber, vombgranuler, bulltoftagranuler, bulltofta, kalkfällningsprodukter, vombkalk och vattenverksgranuler. I tidigare rapporter från Myrica's försöksverksamhet har kalkutfällningsprodukterna gemensamt benämnts 'Vomber'. I föreliggande rapport används benämningen Bulltofta-kalk för den kalkutfällningsprodukt som spridits i de i rapporten redovisade sjöarna och som kom från vattenverket i Bulltofta.

Kalkutfällningsprodukterna bildas vid avhärdning av råvatten. Tekniken är väl känd och utvecklad i bl a Holland. Vattenverket i Vomb i Skåne startade sin avhärdningsanläggning 1999 som den första i Sverige. Ytterligare tre anläggningar har därefter startats, Bulltoftaverket i Malmö samt Bäcklösa- och Gränbyverken i Uppsala. I Vombverket produceras ca 3 500 ton/år, i Bulltoftaverket ca 1 500 ton/år samt i Uppsalaverken ca 6 000 ton/år.

Kalken i vattnet fälls ut på sandkorn genom tillsats av natriumhydroxid. Sandkornen hålls svävande i en reaktortank (fluidisering). Efterhand som kalken utfälls och kalkkornen växer sjunker de till botten och tas senare ut ur avhärdningsreaktorn. Resultatet blir kalkkorn med sandkärna och en diameter vanligen på ca

0,5-2 mm. Se bild 5. Medeldiametern på kalkkornen skiljer sig mellan de olika verken. Störst är kalkkornen från vattenverket i Vomb och minst från Bulltoftaverket. De båda Uppsalaverken producerar kalkkorn med en medelstorlek däremellan.

Kalken fälls ut i dricksvatten som klassas som livsmedel. Vattnet analyseras kontinuerligt med avseende på förekomst av tungmetaller och miljögifter. Separata analyser av tungmetallinnehållet i utfällningskalken visar på låga värden och inom Naturvårdsverkets gränsvärden för kalkningsmedel. CaO-värdet är ca 49-53% inkluderat sandkärnorna.

Nordkalk började leverera och sprida Vomb-kalk på våtmarker inom kalkningsverksamheten 1999. Under senare år har det spridits ca 5 000 ton Vomb-kalk/år inom kalkningsprojekt. Den

största och avgörande fördelen med kalkutfällningsprodukterna som kalkningsmedel är att kalken är fysiskt hårt bunden och produkterna går därför att transportera och sprida med helikopter helt utan dammbildning i något led. På våtmarker blir kalkningen mycket diskret eftersom kalken knappast syns alls efter en spridning. För den som rör sig i ett kärr kalkat med kalkutfällningsprodukter eller dess närhet finns så gott som inga negativa estetiska effekter såsom smutsning, damning eller ”närmjölad” vegetation. De små kalkkulorna fastnar inte på kläder eller hundar och man blir inte nersölad av att beträda ett kärr eller t ex ett jaktorn. Dessa faktorer gör kalkutfällningsprodukter till ett attraktivt alternativ till P-märkt kalkstensmjöl vid helikopter-kalkning.



Bild 5. Den mörkare utfällningsprodukten i bildens vänstra del är producerad i Bulltofta vattenverk medan den ljusare utfällningsprodukten i bilden högra del är producerad i vattenverket i Vomb. Återgivning i naturlig storlek. Foto: Anders Svahnberg, Myrica AB.

2. Metoder

Tre sjöar kalkades med grovkalk från Uddagården, tre med Bulltofta-kalk och tre med GX-kalk. Kalkprodukterna spreds jämnt fördelat över sjöytorna med helikopter. Med jämnt fördelat i detta sammanhang avses att det är helikopterns spridningsstråk som är jämt fördelade över sjöarna. Kalkdoser, spridda mängder samt sjöarnas hydrografi framgår av tabell 1. Sjöarnas geografiska läge redovisas i bilaga. Ingen av sjöarna har såvitt känt kalkats tidigare.

Vattenprov togs i utloppet från sjöarna vid tre till fyra tillfällen före kalkning och därefter vid nio till tio tillfällen årligen efter kalkning. Förutom de nio kalkade sjöarna provtogs även två referenssjöar. Halter av kalcium har analyserats av Alcontrol AB enligt metoden SS-EN ISO 11885-1.

Vid transportberäkningarna av kalcium subtraherades skattade bakgrundshalter från de uppmätta halterna. Bakgrundshalterna beräknades utifrån halterna i en av de okalkade referenssjöarna. Sambandet antogs vara $[Ca]_b = [Ca]_r + ([Ca]_i - [Ca]_{ri})$, där $[Ca]_b$ är bakgrundhalten, $[Ca]_r$ är halten i referensen vid samma provtillfälle, $[Ca]_i$ är haltmedelvärdet före kalkning och $[Ca]_{ri}$ är haltmedelvärdet i referenssjön före kalkning. Ällesjön användes som referenssjö eftersom den generellt gav något bättre förklaringsgrader vid beräkning av kalkupplösningen. Från de beräknade halttillskotten av kalcium beräknades uttransporterna av kalk genom multiplicering av vattenföringen mellan varje provtillfälle. Vattenföringen vid varje mätpunkt beräknades från den

Tabell 1. Kalknings- och hydrografidata för de kalkade sjöarna.

Sjö	Yta (ha)	ARO (ha)	Djup max (m)	Djup medel (m)	Volym (milj. m ³)	Teoretisk oms.-tid (år)	Kalkmängd 50 % CaO (ton)	Dos (kg/ha ARO)	Spridnings- tidpunkt	Produkt
Bredsjön	16,9	140	4,2	1,9	0,32	0,27	36,2	259	Nov-06	GX
Bråtasjön	15,1	147	10	3,7	0,56	0,44	45,7	311	Nov-06	GX
Ryasjön	8,1	120	6,5	2,9	0,23	0,23	34,6	288	Nov-06	GX
Gällsjön	9,7	140	17,3	6,3	0,61	0,50	34,2	244	Nov-06	Bulltofta
Lillesjö	4,2	42	9,7	3,4	0,14	0,39	11,8	281	Nov-06	Bulltofta
Långasjön	16,4	170	15	4,4	0,71	0,49	51,2	301	Nov-06	Bulltofta
Holmsjön	16	140	5,7	2,7	0,44	0,40	39,1	279	Apr-04	Grovkalk
Långasjö	24	210	4,3	2,2	0,55	0,33	71,9	342	Apr-04	Grovkalk
Stensjön	27	94	6	2,4	0,65	0,88	36,3	386	Apr-04	Grovkalk

specifika avrinningen vid SMHI:s mätstation Pepparforsen i Högvadsån (103-2341). Den specifika avrinningen vid Pepparforsen multiplicerades med beräknad avrinningsområdesareal för varje mätpunkt. Avrinningsområdenas storlek togs fram på fastighetskartan (skala 1:10 000) med hjälp av flygbildstolkning, kartans höjdkurvor och fältbesiktning av vattendelare. Kalkens kalciumhalt beräknades utifrån uppgifter på den spridda kalkens syraneutraliserande verkan. De tillförda kalkmängderna, omräknat till en syraneutraliserande verkan på 50 %, antogs innehålla 35 % kalcium.

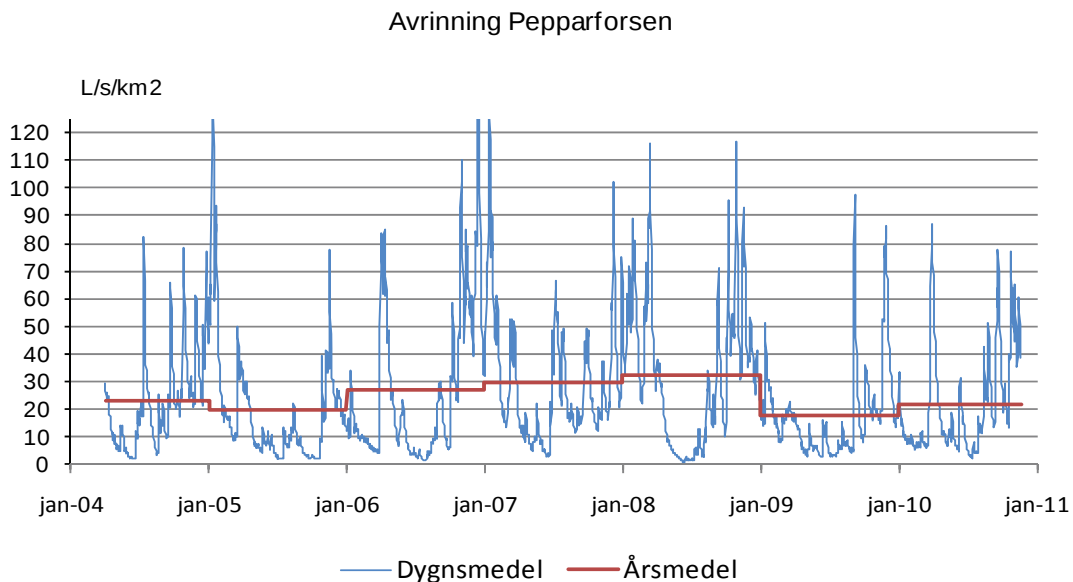
Vid beräkning av andelen upplöst kalk adderades den uttransporterade andelen med den andel som fanns upplöst i sjön vid varje provtagningstillfälle. Andel upplöst kalk i sjön beräknades från kalciumtillskottet vid mätpunkten (utloppet) multiplicerat med sjöns vattenvolym. Vid beräkningen antogs således att kalciumhalterna i mätpunkten var representativa

för sjöns hela vattenmassa. Detta underskattar troligen andelen upplöst kalk i sjön, särskilt under temperaturskiktade tidsperioder. Beräkningsmetoden bedöms dock ge ett relativt bra mått på hur stor andel av den tillförda kalken som finns upplöst i merparten av den kalkade sjöns volym.

Upplösningen av tillförd kalk har modellberäknats. Kalkupplösningen har antagits följa en ekvation där upplösningshastigheten utgör en funktion av tiden enligt

$$m_d/m_p = 1/(\mathcal{A} + B/t),$$

där m_d och m_p är massorna av upplöst kalk respektive tillförd partikulär kalk. $\mathcal{A}$ och B är numeriska koefficienter medan t är tid (år). Värdena för de numeriska koefficienterna har beräknats genom iterativ simulering enligt minsta kvadratmetoden i Statgraphics (nonlinear regression) baserat på de beräknade andelarna uttransporterad kalk och i sjövolymen upplöst kalk.



Figur 2. Specifik avrinning vid SMHI mätstation Pepparforsen i Högvadsån perioden april 2004-nov 2010.

För att kunna jämföra de olika kalkmedlen har en modell framtagits, baserad på resultaten från de kalkade sjöarna, för att simulera haltförloppen efter kalkning. Modellen utgörs av två delar, den ovan beskrivna ekvationen för kalkupplösningen och en modell för utförsel av upplöst kalk från sjön. Utförseln av kalciumjoner har antagits följa den teoretiska utspädningen i vattenmagasin med fullständig omblandning. Utspädningsförloppet vid fullständig omblandning uttrycks av den matematiska funktionen:

$$[Ca]_{t1} = e^{-W} ([Ca]_{t0} - [Ca]_b) + [Ca]_b$$

där $[Ca]$ är kalciumhalten vid tiden t_0 och t_1 , $[Ca]_b$ är den beräknade bakgrundshalten av kalcium och W är vattenmassans vattenutbyte under tidsperioden beräknat som Q/V (Q = mängd avrunnet vatten (m^3), V = vattenmassans volym (m^3)).

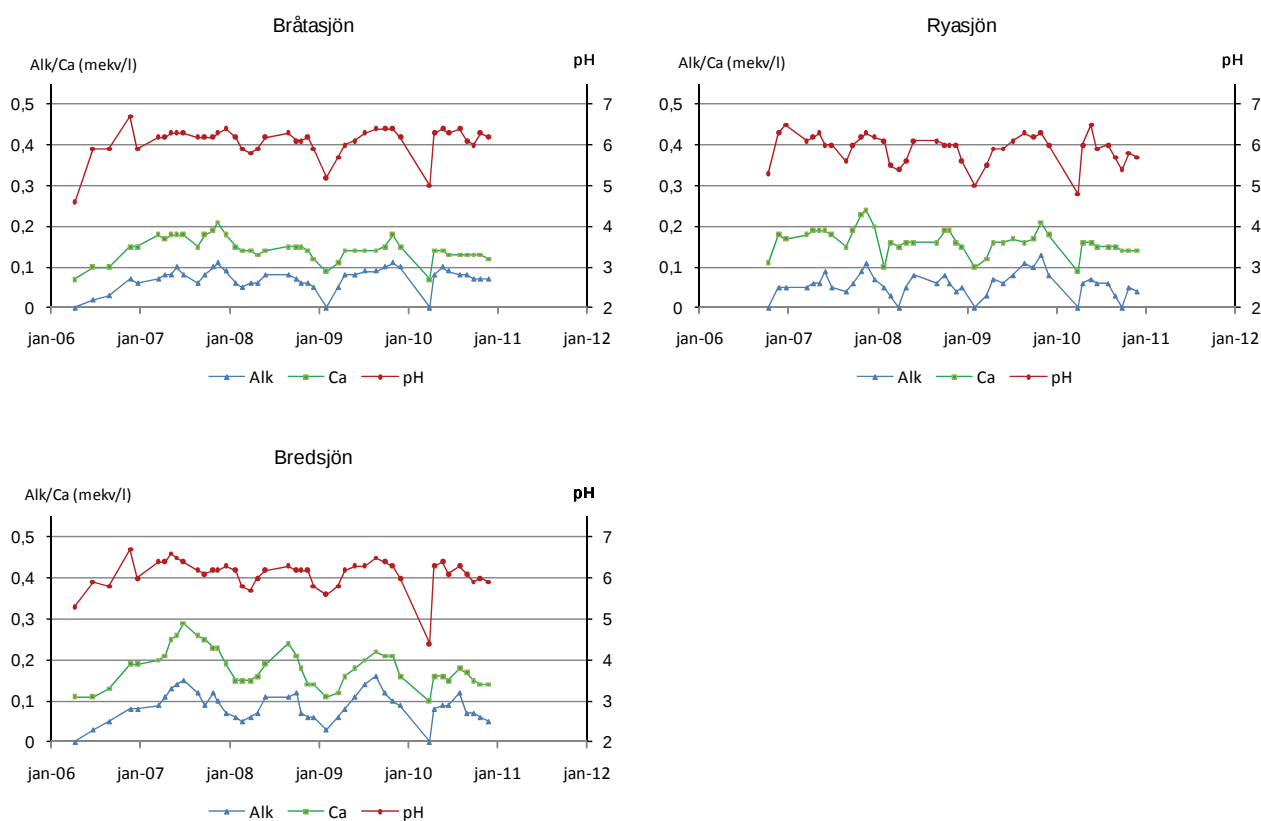
Antagandet om fullständig omblandning i sjöarna kan ge en viss överskattning av utspädningens hastighet eftersom omblandningen under temperaturskiktade tidsperioder är reducerad.

3. Resultat och diskussion

3.1 pH och alkalinitet

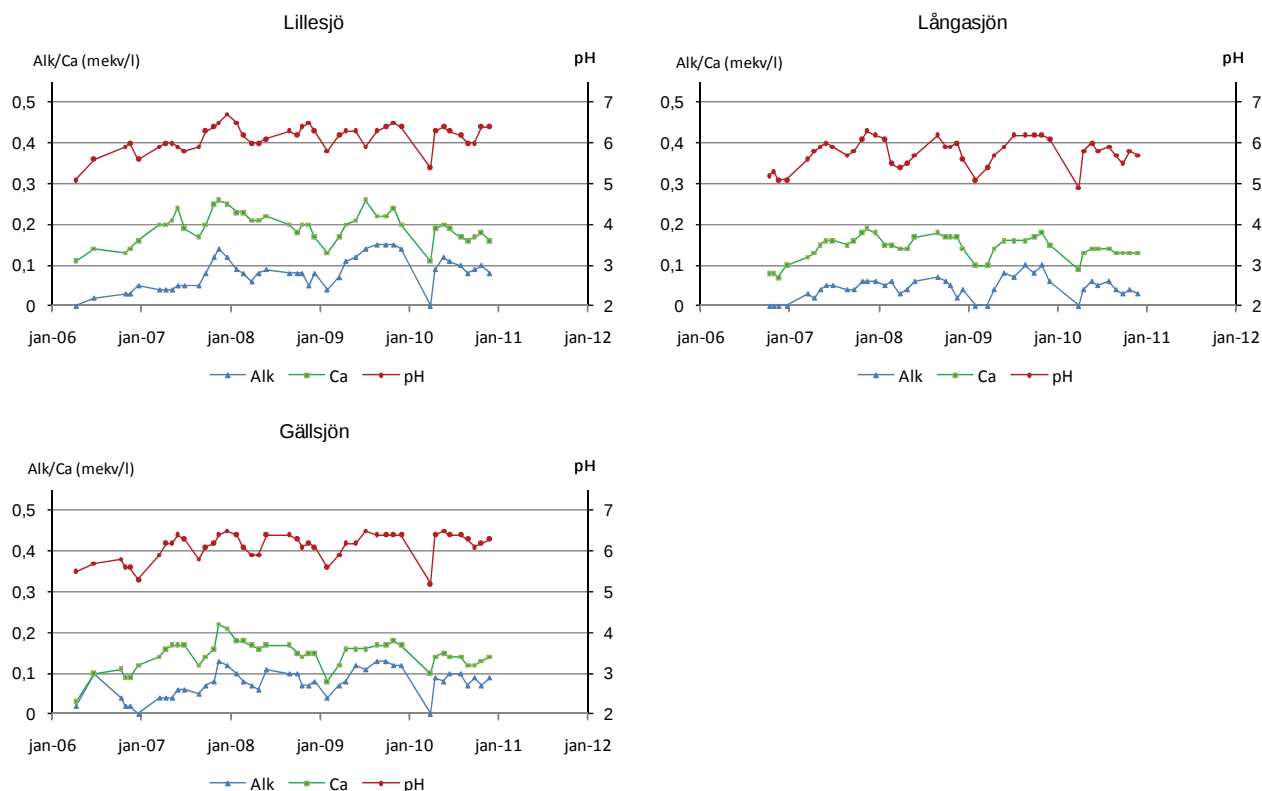
I figur 3-5 visas värdena på pH och alkalinitet och kalcium i avrinningsvattnet från nio sjöar kalkade med grova kalkprodukter. Kalkningseffekten med avseende på pH och alkalinitet var i samtliga sjöar betydligt jämnare under mätperioden och hade längre varaktighet jämfört

med tidigare undersökta sjöar kalkade med kalkstensmjöl. Detta trots att omsättningstiderna i samtliga sjöar utom Stensjön var kortare än i de mjölkalkade sjöarna (Svahnberg & Abrahamsson 2008).

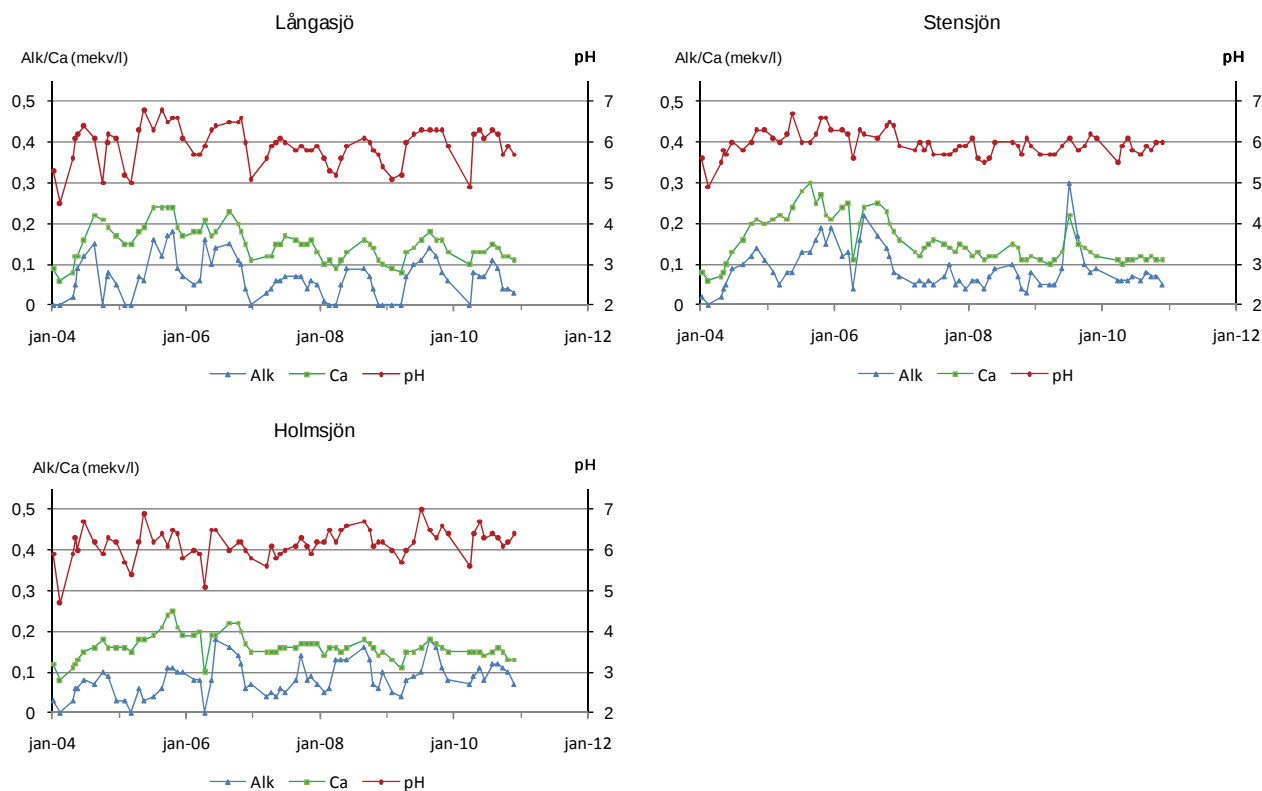


Figur 3. pH, alkalinitet och kalciumhalter i utloppen från tre sjöar kalkade med GX-kalk i november 2006.

EFFEKTEN AV GROVA KALKPRODUKTER SOM KALKNINGSMEDEL I SJÖAR



Figur 4. pH, alkalinitet och kalciumhalter i utloppen från tre sjöar kalkade med Bulltofta-kalk i november 2006.



Figur 5. pH, alkalinitet och kalciumhalter i utloppen från tre sjöar kalkade med grovkalk i april 2004.

3.2 Uttransporterad och upplöst kalk

I november 2010, fyra år efter kalkning, beräknas 52-62 % av tillförd GX-kalk ha löst upp sig i Bredsjön, Bråtasjön och Ryasjön (figur 6, tabell 2). Den beräknade upplösningen har likartade förlopp i de tre sjöarna. I Bredsjön och Ryasjön, som har kortare omsättningstid, var uttransporterna och upplösningen något högre. Upplösningshastigheten i de tre sjöarna var betydligt långsammare än den som registrerades av Svahnberg & Abrahams-son (2008) i tre liknande sjöar kalkade med kalkstensmjöl.

I de tre sjöar som kalkades med Bulltofta-kalk beräknas 44-56 % av den tillförda kalken ha löst upp sig efter fyra år (figur 7, tabell 2). Upplösning- och transportförloppen var mycket likartade de som beräknades för de tre sjöarna kalkade med GX-kalk (jmf figur 6). Liksom för GX-kalken var upplösningshastigheten för Bulltofta-kalken betydligt långsammare än den som har registrerats för kalkstensmjöl i helikopteralkade sjöar med snabb vattenomsättning. I Gällsjön och Lillesjön avvek utvecklingen något från det som registrerades i Långasjön

och GX-sjöarna. Under sensommaren 2007 sjönk kalciumhalterna i Gällsjön och Lillesjön vilket medförde att den beräknade kalkupplösningen fick ett starkt cykliskt förlopp under första året efter kalkning.

I november 2010, 6,6 år efter kalkning, beräknas 63-66 % av tillförd grovkalk ha löst upp sig i Stensjön, Långasjö och Holmsjön (figur 8, tabell 2). Den beräknade upplösningen har olika förlopp i de tre sjöarna medan uttransporterna var relativt likartade. I Stensjön var upplösningshastigheten högre i början för sedan långsamt avta. I Holmsjön och Långasjö var kalkupplösningen mycket långsam och under de första åren nästan rätlinjig. Det är svårt att dra några slutsatser av motstridiga resultaten men den långsamt avtagande kalkupplösningen i Stensjön bedöms vara mest trovärdig. Upplösningförloppet i Stensjön är mycket snarlikt det som registrerades av Alenäs (1986) i Långetjärn i Härryda kommun efter kalkning med grovmalen dolomitkalk (0-1 mm) hösten 1977. Utvecklingen i Stensjön var dessutom mer lik den som de tre sjöarna kalkade med GX-kalk uppvisade. Sammantaget indikerar detta att de beräknade upplösningförloppen i

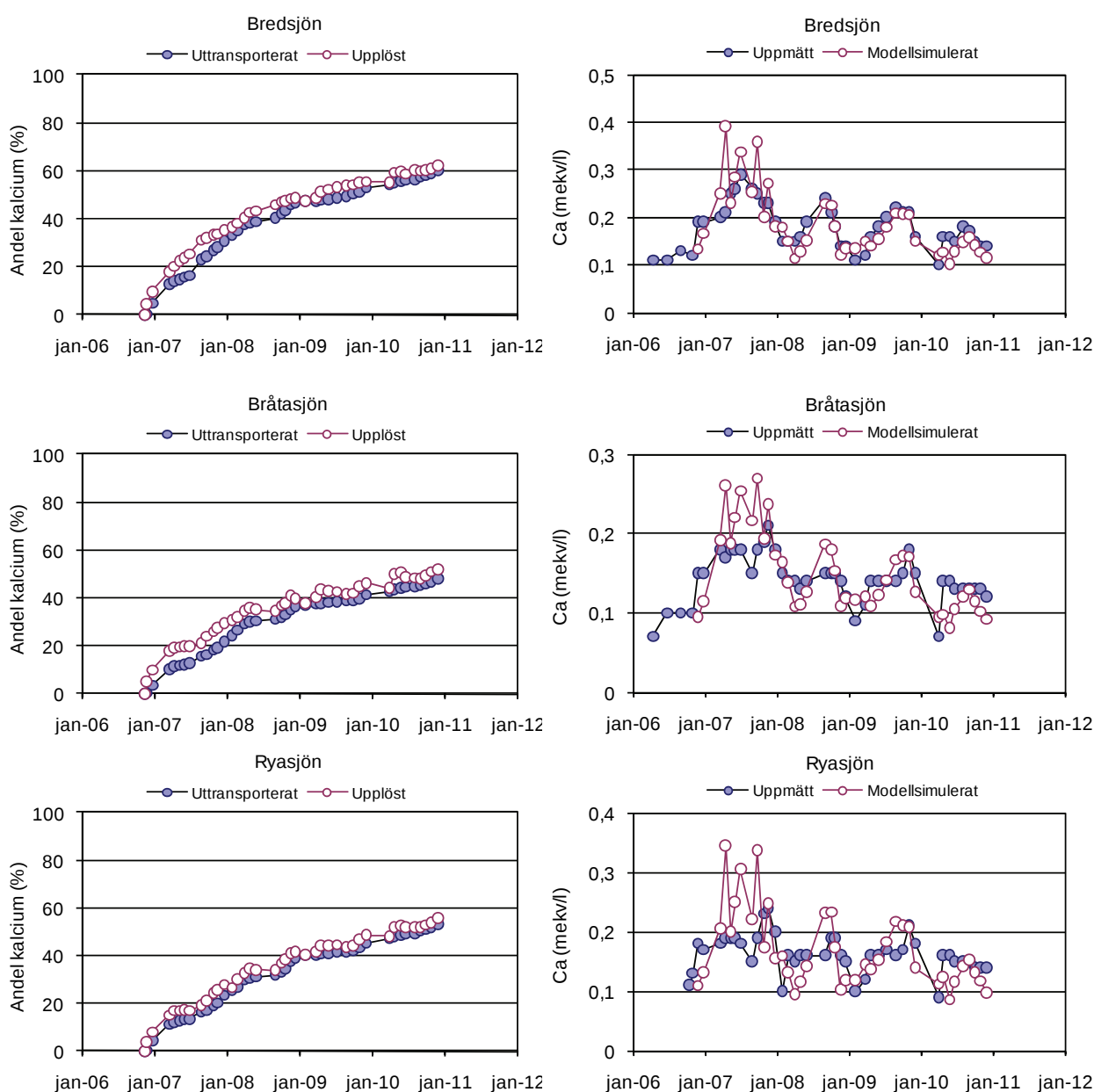
Tabell 2. Beräknade andelar av tillförd kalk som har uttransporterats och upplösts i de kalkade sjöarna. Även de modellberäknade värdena för upplösningkoefficienterna (A, B) och beräknat slutligt kalkutnyttjande redovisas.

Sjö	Mätperiod		Andel av tillförd kalk		Modellberäkningar			Produkt
	Startdatum	Slutdatum	Uttransporterad (%)	Upplöst (%)	A	B	Slutligt utnyttjande (%)	
Bredsjön	2006-11-14	2010-11-26	60	62	1,24	1,64	81	GX
Bråtasjön	2006-11-14	2010-11-26	48	52	1,52	2,01	66	GX
Ryasjön	2006-11-14	2010-11-26	53	56	1,23	2,60	81	GX
Gällsjön	2006-11-17	2010-11-26	48	53	1,27	2,67	79	Bulltofta
Lillesjö	2006-11-17	2010-11-26	53	56	1,08	2,77	92	Bulltofta
Långasjön	2006-11-17	2010-11-26	40	44	1,35	3,96	74	Bulltofta
Holmsjön	2004-04-27	2010-11-26	64	66	-	-	-	Grovkalk
Långasjö	2004-04-27	2010-11-26	61	63	-	-	-	Grovkalk
Stensjön	2004-04-27	2010-11-26	61	65	1,20	2,55	83	Grovkalk

Långasjö och Holmsjön är missvisande. Det är dock oklart vilken eller vilka faktorer som har orsakat de avvikande resultaten. Eventuellt kan utvecklingen av språngskikt, till följd av höga halter av upplösningsprodukter i bottenvattnet, utgöra en betydande felkälla vid beräkningarna av kalkupplösningen.

För sju av de nio sjöarna har det slutliga andelen upplöst kalk prognoserats genom antagandet att kalkupplösningen

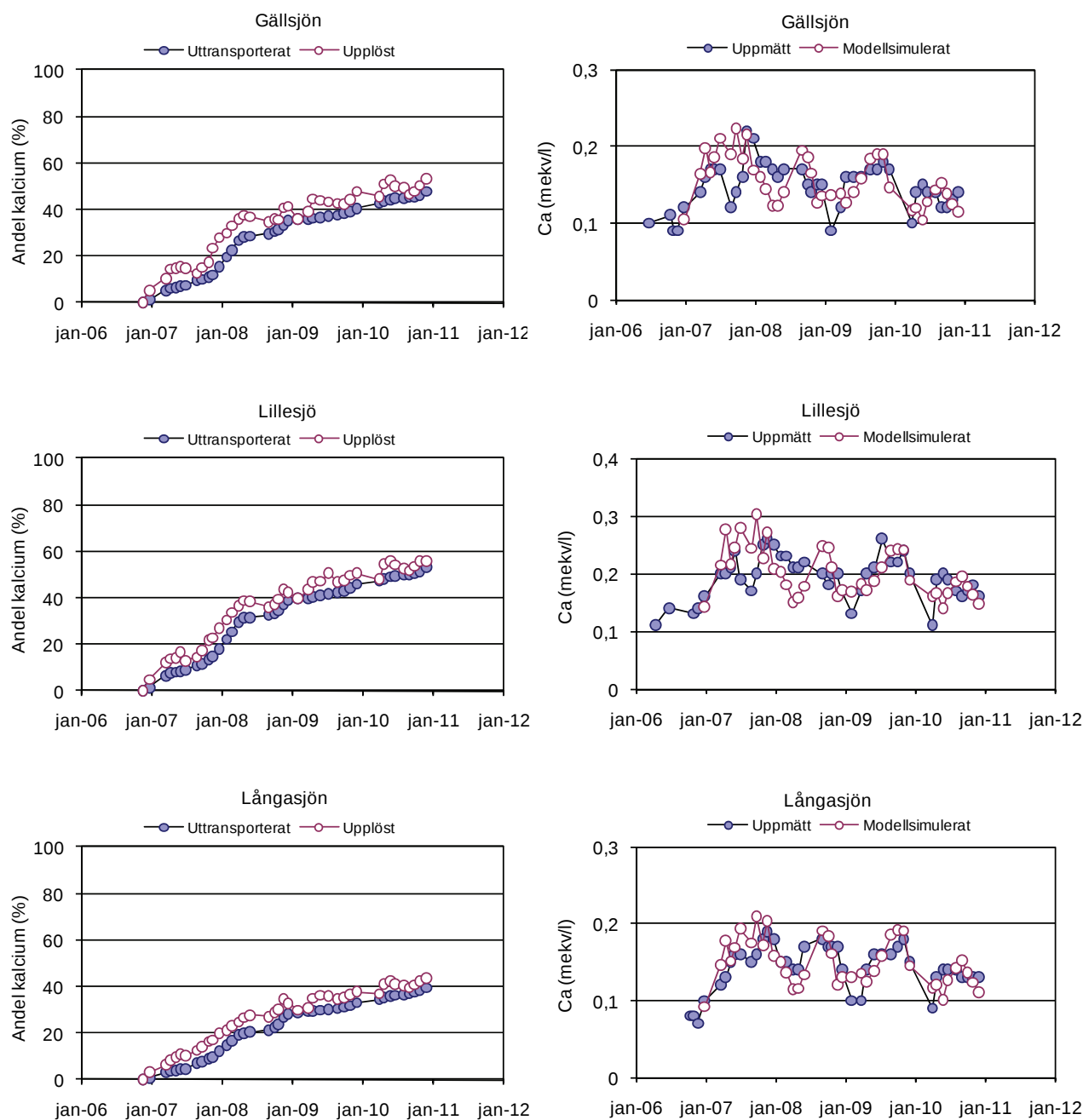
utgör en funktion av tid efter kalkspridning. Upplösningskoefficienten A anger den extrapolerade slutliga upplösningsgraden för varje sjö. I de tre sjöarna kalkade med GX-kalk beräknas det slutliga kalkutnyttjandet till 66, 81 och 81 % (tabell 2). I sjöarna med Bulltofta-kalk beräknas det till 74, 79 och 92 %. I Stensjön, kalkad med grovkalk, beräknas det till 83 %. För Holmsjön och Långasjö, även de kalkade med grovkalk,



Figur 6. Kumulativ andel upplöst och uttransporterat kalcium av tillförd mängd (vänster) samt uppmätta och modellsimulerade kalciumhalter (höger) i tre sjöar kalkade med GX-kalk i november 2006.

har rimliga värden på slutligt kalkutnyttjandet inte kunnat erhållas eftersom upplösningförloppen inte visar något tydligt samband med tid. Baserat på resultat från sju av de nio sjöarna bedöms utnyttjandegraden för de tre kalkprodukterna uppgå till 65-90 % vid helikopteralkning av sjöar med kort omsättningstid.

De modellberäknade värdena för upplösningkoefficienten B indikerar att kalkupplösningen var något snabbare i sjöarna med GX-kalk än i sjöarna med Bulltofta-kalk (tabell 2). En skillnad som skulle kunna bero på skillnader i egenskaper mellan de två kalkprodukterna alternativt att GX-kalk löser sig snabbare

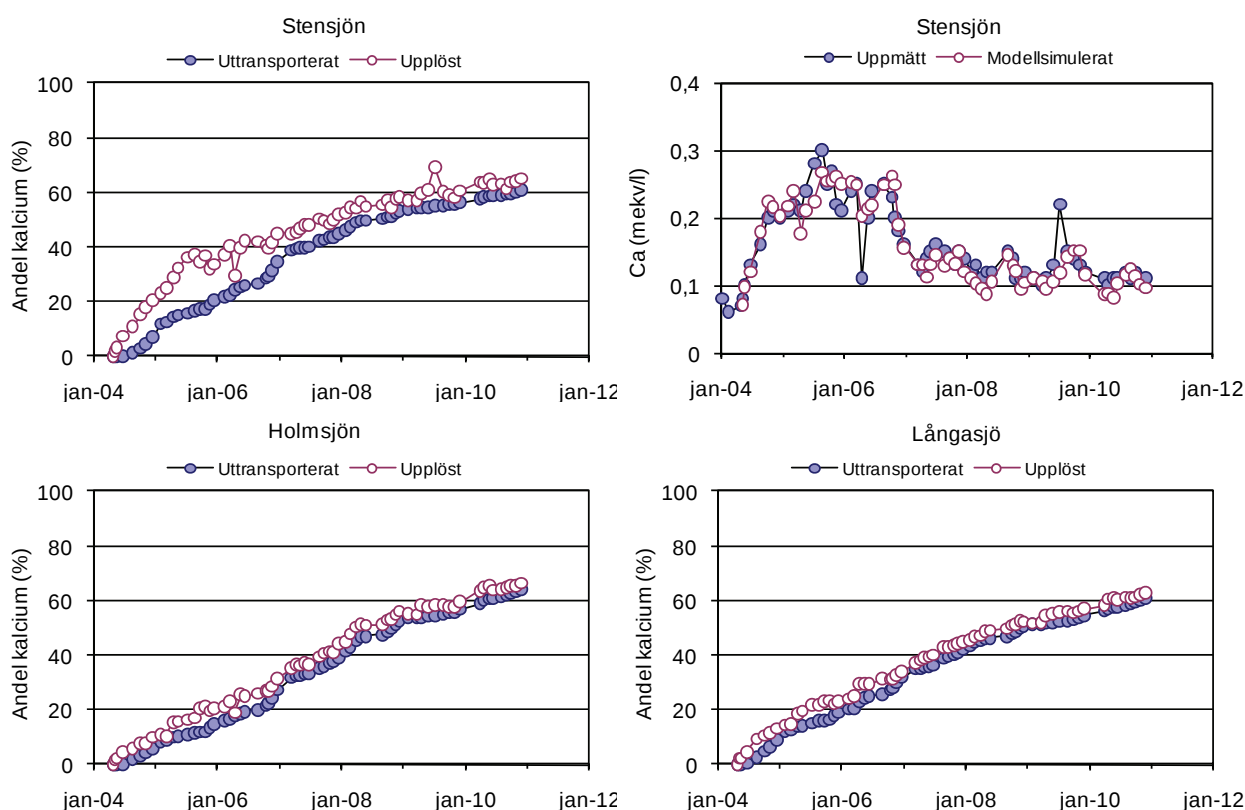


Figur 7. Kumulativ andel upplöst och uttransporterat kalcium av tillförd mängd (vänster) samt uppmätta och modellsimulerade kalciumhalter (höger) i tre sjöar kalkade med Bulltofta-kalk i november 2006.

till följd av GX-sjöarnas snabbare vattenomsättning. Baserat på resultaten från sju av de nio sjöarna bedöms upplösningskoefficienten B för de tre kalkprodukterna uppgå till ett värde mellan 2,0-3,0 vid kalkning i sjöar med kort omsättningstid (0,2-0,8 år).

Det skall påpekas att värdet för B inte är ett bra mått på den faktiska

kalkupplösningen eftersom utloppshalter av kalcium sannolikt underskattar andelen upplöst kalk i sjöns vattenvolym. Däremot är värdet ett mått på hur snabbt den upplösta kalken ger neutralisationseffekter i den kalkade sjöns yt- och utloppsvatten.



Figur 8. Kumulativ andel upplöst och uttransporterat kalcium av tillförd mängd i tre sjöar kalkade med grovkalk i april 2004. Dessutom redovisas uppmätta och modellsimulerade kalciumhalter i en av sjöarna (Stensjön).

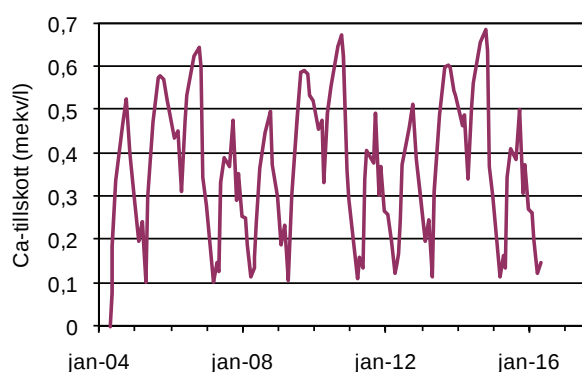
3.3 Modellsimuleringar

Modellen för att simulera haltutvecklingen efter kalkning har testats på de sju sjöarna som ligger till grund för den modellberäknade kalkupplösningen. Valideringen är av mindre värde, eftersom den inte utförs på kalkningar i oberoende sjöar, men de simulerade halterna kan användas till att belysa orsakerna till avvikande halter och resultat. Modellresultaten, baserade på sjöns vattenomsättning och de beräknade upplösningskoefficienterna, överensstämmer relativt väl med de uppmätta halterna i merparten av sjöarna (figur 6-8). Eftersom modellen förutsätter fullständig omblandning i sjöarna är den sämre på att simulera haltutvecklingen vid tillfällen med ofullständig omblandning i kombination med stor avrinning. Ett sådant tillfälle inträffade i april 2006 i Stensjön i samband med en omfattande snösmältning under första halvan av månaden (figur 8). Klimatförhållandena medförde sannolikt en ytlig temperaturskiktning i sjön vilket fick till följd att surt tillrinningsvatten strömmade igenom i den översta delen av vattenmassan. Liknande ytliga surstötter förefaller ha uppstått även i januari 2009 och mars 2010 i flera av sjöarna (figur 6-8). Modellen kan inte simulera denna typ av sura ”overflows”. De uppmätta kalciumhalterna är vid dessa provtillfällen således lägre än de modellsimulerade.

I flera av sjöarna, främst Bråtasjön, Ryasjön, Gällsjön och Lillesjön, var de uppmätta halterna genomgående lägre än de simulerade under den nederbördsrika sensommaren och hösten 2007 (figur 6-8). Däremot var de uppmätta halterna något högre än de simulerade under den påföljande vintern. Även dessa avvikelser orsakades sannolikt av ofullständig omblandning i sjöarna. Under sensommaren och tidig höst gav kalkupplösningen vid botten inte upphov till ökade halter i ytvattnet på grund av välutvecklade språng-

skikt. I samband med höstcirkulation fördes dock uppkalkat bottenvatten upp och blandades med den övriga vattenmassan. Detta innebar inte att kalkupplösningen avstannade under sensommaren, som upplösningsförloppen förefaller att indikera, utan att mycket av den lösta kalken blev kvar i bottenvattnet fram till höstcirkulation. Varför förefaller inte det samma ha inträffat i Bredsjön sensommaren och hösten 2007? Troligen för att Bredsjön är betydligt grundare än de övriga sjöarna. Med ett maxdjup på 4,2 m uppstår troligen inga språngskikt under sommarhalvåret.

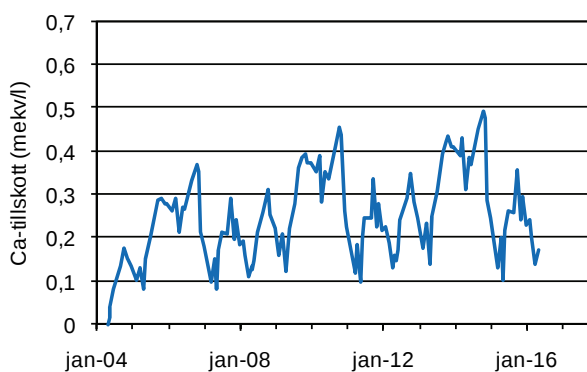
De modellberäknade värdena för upplösningskoefficienterna A och B kan användas för att jämföra olika kalkmedel vid en hypotetisk kalkning av en sjö. I figur 9 visas modellsimulerade tillskott av syraneutraliserande ämnen vid årlig spridning av kalkstensmjöl i en sjö i Högvasås vattensystem med en omsätt-



Figur 9. Modellsimulerade tillskott av syraneutraliserande ämnen i utloppet av en modellsjö som kalkas årligen i april månad med kalkstensmjöl. Sjöns teoretiska medelomsättningstid är 0,5 år och utnyttjandegraden har antagits vara 90 % av tillförd kalk. Indata för kalkdoser: 310 kg/ha avrinningsområde (år 2004) respektive 200 kg/ha/år (från 2005). Indata för upplösningskoefficienter: $A = 1,11$, $B = 0,47$. Indata för vattenföring: dygnsmedelvärden från SMHI:s mätstation Pepparforsen i Högvasås (103-2341) för tidsperioden 2004-04-26 till 2008-04-25 (upprepade två ggr för tidsperioden 2008-04-26 till 2016-04-25). Den specifika avrinningen var $27,1 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^2$ under tidsperioden.

ningstid på 0,5 år. De valda värdena på upplösningskoefficienterna har hämtats från Svahnberg & Abrahamsson (2008). Kalkdoserna har anpassats för att erhålla syraneutraliserande tillskott på minst 0,1 mekv/l under en tolvårsperiod. De modellsimulerade tillskotten är genomgående kraftigt fluktuerande med återkommande maxvärden på 0,5-0,7 mekv/l. Enligt modellresultaten inträffar tre kritiska episoder under varje fyraårsperiod, totalt vid nio tillfällen, då halttillskotten är föga mer än 0,1 mekv/l (figur 9). Incidenter med låga halttillskott som uppstår under perioder med hög tillrinning och snabb vattenomsättning i sjöarna.

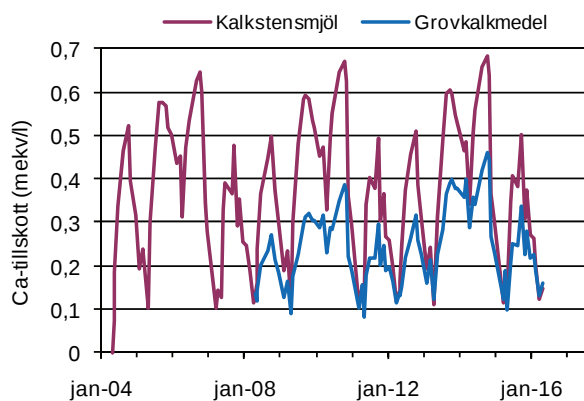
På motsvarande sätt kan de syraneutraliserande tillskotten simuleras vid spridning av grov-, GX- eller Bulltofta-kalk i samma sjö vid samma tillfällen och med samma kalkdoser (figur 10). Samma värden på upplösningskoefficienterna har antagits för de tre kalkprodukterna eftersom det inte finns några resultat som tydligt indikerar att något av grovkalkmedlen avsevärt skulle avvika med avseende på upplösningsgrad eller upplösningshastighet. Det skall dock påpekas att de simule-



Figur 10. Modellsimulerade tillskott av syraneutraliserande ämnen i utloppet av modellsjön som kalkas årligen i april månad med ett grovkalkmedel (grov-, GX- eller Bulltofta-kalk). Utnyttjandegraden har antagits vara 80 % av tillförd kalk. Indata för upplösningskoefficienter: $A = 1,25$, $B = 2,5$. Indata för kalkdoser och vattenföring är samma som för figur 9.

rade halttillskotten bedöms vara mer osäkra för de tre grovkalkprodukterna eftersom de modellberäknade värden för upplösningskoefficienterna uppvisar en större variation än de gjorde i sjöarna med kalkstensmjöl (se Svahnberg & Abrahamsson 2008). Modellsimuleringen visar att de syraneutraliserande bidragen från de tre grovkalkmedlen blir mer utjämnade än från kalkstensmjölet men att tillskotten blir lägre vid merparten av de kritiska episoderna med stor tillrinning (figur 9, 10). På grund av grovkalkmedlens långsammare upplösning tar det ca fyra år innan halttillskotten under de kritiska episoderna kommer upp i de nivåer som erhålls från kalkstensmjölet.

Hur mycket behöver kalkdoserna öka vid en övergång från kalkstensmjöl till grovkalkmedel med bibehållen neutralisationseffekt? I figur 11 har en årlig kalkning med kalkstensmjöl simulerats under en tolvårsperiod och jämförts med ett scenario där ett grovkalkmedel har ersatt kalkstensmjölet efter de första fyra åren. Kalkdoserna för grovkalkmedlet är samma som för kalkstensmjölet (200 kg/ha/år). På grund av



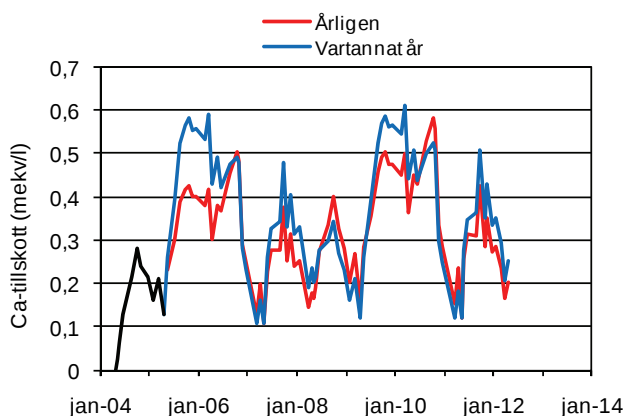
Figur 11. Modellsimulerade tillskott av syraneutraliserande ämnen i utloppet av modellsjön som kalkas årligen i april månad med kalkstensmjöl enligt samma indata som för figur 9. Som jämförelse visas en övergång till ett grovkalkmedel (grov-, GX- eller Bulltofta-kalk) efter fyra år med samma kalkdos som för kalkstensmjölet (200 kg/ha/år). Indata för upplösningskoefficienter som i figur 10.

den långsammare kalkupplösningen blir effekterna lägre från grovkalkmedlet under de inledande ca 4 åren. De blir dock endast marginellt sämre vid de kritiska episoderna när kalktillskotten är som lägst. Efter de inledande ca fyra åren kommer halttillskotten under de kritiska episoderna att bli minst lika högt som från kalkstensmjölet på grund av grovkalkmedlens något jämnare effekter på syra-baskemin i sjövattnet.

Hur påverkas effekterna från ett grovkalkmedel om spridningsintervallen förlängs? I figur 12 har kalkning vartannat år jämförts med årlig kalktillförsel. Vid tvååriga spridningsintervall blir kalktillskotten något mer ojämna. De höga tillskotten blir generellt något högre medan de låga tillskotten blir något lägre. Skillnaderna vid de kritiska episoderna blir dock relativt små. Endast i slutet av tvåårsperioden reduceras halttillskotten påtagligt vid vartannatårsspridning.

Har grovkalkmedel förutsättningar att motverka sura "overflows" i kalkade sjöar under vårvinterns islagda period? Tyvärr ger resultaten i denna rapport inget underlag för att besvara den frågan. I flera av försökssjöarna uppstod kraftiga ytliga surstötter vid några tillfällen, bl a i Holmsjön och Stensjön i april 2006 (figur 5). Liknande surstötter kunde registreras i Abborrasjön och Barksjön, kalkade med kalkstensmjöl respektive granuler, vid samma tillfälle (Svahnberg & Abrahamson 2008). Troligen har grovkalkmedel

lika svårt som kalkstensmjöl att motverka denna typ av ytliga surstötter som ibland inträffar under vårvintrar i kalkade sjöar med snabb vattenomsättning. Eventuellt skulle grovkalkmedel i grunda sjöar, där stora delar av kalkade bottenytan är grundare än ca två meter, kunna tillföra upplösningssprodukter i samband med en ytlig surstöt och därmed reducera pH-sänkningen. Det kan noteras att Bredsjön, den grundaste av försökssjöarna med ett medeldjup på 1,9 m, inte uppvisade några tydliga tecken på förekomst av sura "overflows" vid en jämförelse mellan uppmätta och simulerade kalciumhalter (figur 6).



Figur 12. Modellsimulerade tillskott av syraneutraliserande ämnen i utloppet av modellsjön vid kalkning med ett grovkalkmedel (grov-, GX- eller Bulltofta-kalk) i april månad. Från 2005 jämförs årlig tillförsel med tillförsel vartannat år. Indata för kalkdoser: 500 kg/ha (år 1) respektive 250 kg/ha/år (år 2-8). Indata för upplösningkoefficienter som i figur 10. Indata för vattenföring som figur 9.

4. Slutsatser

I helikopteralkade sjöar löser sig grovkalkmedel (grov-, GX- och Bulltoftakalk) långsammare och något sämre än kalkstensmjöl. Det totala kalkutnyttjandet kan förväntas uppgå till 65-90 % från ett grovkalkmedel.

Modellsimuleringar visar att grovkalkmedel ger jämnare neutralisationseffekter än kalkstensmjöl och att de periodvis höga halttillskotten reduceras i jämförelse med kalkstensmjöl. Vid årlig kalktillförsel blir halttillskotten vid de kritiska episoderna minst lika höga som för kalkstensmjölet eftersom grovkalkmedlets något sämre kalkutnyttjande kompenseras av den jämnare kalkupplösningen.

Det skall påpekas att ovanstående slutsatser baseras på resultaten från engångskalkningar av sju sjöar med korta omsättningstider (0,2-0,9 år) där kalken sprids jämnt över sjöytan. Det kan inte uteslutas att årlig upprepad kalktillförsel, långsammare vattenomsättning eller ojämn spridning kan ha en inverkan på grovkalkmedlens upplösningsgrad och upplösningshastighet. En inverkan som, om den är betydande, torde ge resultat som avviker från de som ligger till grund för slutsatserna och rekommendationerna i denna rapport.

5. Rekommendationer

I sjöar med korta omsättningstider (< 1 år) ger grovkalkmedel neutralisationseffekter som är likvärdiga med de som erhålls från kalkstensmjöl. Detta medför att samma kalkdosering som för kalkstensmjöl kan användas. Grovkalkmedel bör spridas jämnt över sjöytan. Årlig tillförsel av kalk rekommenderas. Vid en övergång från kalkstensmjöl till grovkalkmedel uppkommer under ca fyra år något lägre syraneutraliserande effekter vid de kritiska episoderna. Om effektneutralitet eftersträvas bör kalkdoseringen för grovkalk-

medlet höjas med ca 100 % första året eller med 50 % under de två första åren.

Det skall påpekas att kalkutnyttjandet för ett grovkalkmedel kan förväntas vara ca 10 % lägre än för kalkstensmjöl. Detta innebär att grovkalkmedlet kan ge lägre nedströmseffekter, t ex i utloppet av en nedströms belägen sjö där halttillskotten är utjämnade. Vid kalkning av sjöar med relativt lång omsättningstid, där sprids i uppströms belägna sjöar med kort omsättningstid, bör kalkdoseringen därför uppräknas med ca 15 % om grovkalkmedel används istället för kalkstensmjöl.



Bild 6. Spridning av grovkalk i Holmsjön 2004. Foto: Anders Svahnberg, Myrica AB.

Erkännanden

Undersökningen har bekostats av länsstyrelserna i Hallands, Jönköpings och Västra Götalands län, Naturvårdsverket, Falkenbergs kommun, Movab, Myrica AB, Nordkalk och SMA Mineral, Logistik & Entreprenad AB.

Referenser

Alenäs, I. 1986:

Kalkningsprojektet Härskogen 1976-1986. IVL rapport L86/201.

Institutet för vatten- och luftvårdsforskning.

Svahnberg, A. 1992:

Vindavdrift och spridningsjämnhet.

Länsstyrelsen i Jönköpings län 1992:8.

Svahnberg, A., Abrahamsson, I. 2001:

Grovkalk, Granuler, Kalkstensmjöl. Effekter vid spridning på våtmarker.

Länsstyrelsen i Jönköpings län, Meddelande nr 23/01.

Svahnberg, A., Abrahamsson, I. 2005:

Effekten av Vomber som kalkningsmedel på våtmarker.

Myrica ab, Värnamo.

Svahnberg, A., Abrahamsson, I. 2008:

Effekten av granulerad kalk och grovkalk som alternativ till mjöl vid helikopter-kalkning av sjöar.

Länsstyrelsen i Jönköpings län, Rapport 2008:82.

Bilaga

Kartöversikt med sjöarnas geografiska läge.

