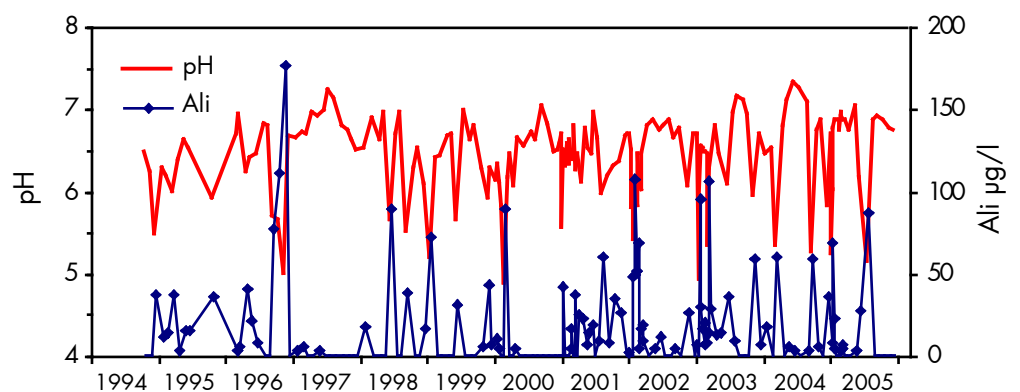




Episodförsurning

Underlag till revision av Naturvårdsverkets handbok
för kalkning av sjöar och vattendrag



*Hans Borg (editor), Cecilia Andrén, Marcus Sundbom,
Anders Wilander, Teresia Wällstedt*

Institutionen för tillämpad miljövetenskap

Department of Applied Environmental Science

Episodförsurning

Underlag till revision av Naturvårdsverkets handbok för kalkning av sjöar och vattendrag

*Hans Borg (editor), Cecilia Andrén, Marcus Sundbom,
Anders Wilander¹, Teresia Wällstedt*

Institutionen för tillämpad miljövetenskap, ITM
Stockholms universitet
e-post: hans.borg@itm.su.se

¹ Institutionen för miljöanalys, Sveriges lantbruksuniversitet (SLU)
750 07 Uppsala

Rapportering av uppdrag från Naturvårdsverket Dnr 235-5918-06 N1, 2006:
Utvärderingar inför revideringen av Naturvårdsverkets kalkningshandbok
Delprojekt U2: Sura episoder

ISSN 1103-341
Tryckeri: PrintCenter, SU, 2007-03-30
ISRN SU-ITM-R-160-SE

Innehåll	Sid
Sammanfattning	6
1. Uppdraget enligt avtalstexten	7
2. Inledning	7
3. Orsak till surstötter i olika delar av landet	7
3.1. <i>Regionala skillnader i orsaker till sura episoder?</i>	9
4. Förekomst av sura episoder i olika regioner	12
4.1 <i>Förekomsten av sura episoder i kalkade vatten enligt länsstyrelsernas regionala effektuppföljning</i>	12
4.2. <i>Regionala undersökningar av episoder</i>	15
4.3. <i>Episodundersökningar inom IKEU-programmet</i>	16
4.4. <i>Är sura episoder med extrema pH-värden entydigt kopplade till höga flöden?</i>	19
4.5 <i>Surstötter i kalkade sjöar</i>	21
5. Biologiska skador av surstötter i olika regioner i Sverige	27
6. Kalkningsmetoder och uppföljning av rinnande vatten	31
6.1 <i>Kalkningsmetoder</i>	31
6.1.1. Rekommendationer	34
6.2. <i>Effektuppföljning</i>	34
6.2.1. Rekommendationer	35
7. Referenser	35

Sammanfattning

Föreliggande rapport är ett underlag för revision av handboken för kalkning av sjöar och vattendrag, särskilt avsnitten som behandlar kalkning mot episodförsurning

Sura episoder (surstötter) uppstår i samband med ökat flöde pga snösmältning eller regn. Detta leder till en utarmning av vattnets buffertkapacitet (alkalinitet, ANC) fr a genom utspädning av kationer, utläckage av organiska syror från marken (humusämnen), ökad avrinning av starka syror av sulfat och nitrat från luftföroreningar i nederbörden (snötäcket). Långvarig torka innan episoden kan leda till ökat läckage av oxiderade svavelföreningar (SO_4^{2-}) vid högflöde. En annan orsak till surstötter är deposition av havssalter, genom att kationer i nederbörden (såsom Na^+) byts ut mot vätejoner i marken, vilka snabbt frigörs med avrinnande vatten.

Resultat från episodundersökningar i Sverige pekar på att det största bidraget till minskat ANC under högflöde är utspädning av kationer. En mindre men bidragande orsak är ökad tillförsel av organiska syror fr a i de nordligare vattendragen och av sulfat och nitrat fr a i söder. Från länsstyrelsernas effektuppföljning kan konstateras att surstötsproblemen i kalkade vattendrag inte har förändrats nämnvärt under de senaste 15 åren i de flesta län. I södra och västra Sverige uppträder lägsta pH under sen höst, vinter och tidig vår. I norr är episoder med lågt pH fr a koncentrerade till april-maj. Sambandet mellan pH och vattenföring är starkast i söder och försvagas längre norrut, särskilt för kalkade vattendrag. Resultaten tyder på att låga pH är flödesstyrda och att extrema pH-värden på goda grunder kan antas orsakas av en ”sur episod” med ökad vattenföring. En stor del av vattendragen i landet kan ha en störd bottenfauna och fisksammansättning, trots kalkning. Uppföljningen av vattenkemin har dock oftast för låg provtagningsfrekvens för att upptäcka kortvariga surstötter. Biologiska undersökningar är då ett viktigt komplement för att påvisa att skadliga sura episoder har förekommit.

Rekommendationer

- För målområden i vattendrag eller nedströms näraliggande sjöar är kalkning med doserare lämplig. Denna bör vara utrustad med automatisk styrning via vattennivån, larm med fjärranslutning, samt serviceavtal för regelbunden tillsyn.
- Våtmarkskalkning åstadkommer en jämn vattenkvalitet och minskar utflödet av metaller ur marken. Förutsättningen är att våtmarkens flora tål kalk och att damningen minimeras, t ex med användning av granuler.
- Sjöalkning med syftet att skydda nedströms liggande vattendragssträckor kan ha begränsad effekt med ökande avstånd från sjön och bör kompletteras med bäck-, våtmarks- eller doserarkalkning.
- För att skydda vattendrag och sjöar från sura episoder är en kombination av flera metoder oftast det säkraste sättet för att uppnå bästa måluppfyllelse. För vattendrag kombineras lämpligen doserar- och våtmarkskalkning och för sjöar kombineras sjöalkning med strand- våtmarks- eller uppströmskalkning med doserare.
- Anpassa provtagningsprogrammen för att bättre dokumentera sura episoder. I södra Sverige oftast förekommande under december-april, och längre norrut fr a vid snösmältning.
- Det vattenkemiska analysprogrammet bör utökas, åtminstone under högflödesperioder och vid några tillfällen under basflödet, till att omfatta jonbalans (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-), TOC (totalt organiskt kol) och oorganiskt aluminium.
- Biologisk uppföljning av effekter av sura episoder bör genomföras årligen, speciellt i områden där syradepositionen och markförsurningen fortfarande är hög och där episodförsurning kan förväntas. Förutom elfisken och provtagning av bottenfauna, bör även bentiska kiselalger inventeras årligen.

1. Uppdraget enligt avtalstexten

Leverantören åtar sig att under 2006 utföra det uppdrag som finns preciserade i bilagorna till detta avtal (Dnr 235-5918-06-N1). Syftet med projekten är att, genom litteratursammanställningar och uppgifter från IKEU-projektet, ta fram underlag till revideringar av Naturvårdsverkets kalkningshandbok.

Bilaga 3, Utredningsprojekt U2, sura episoder:

Projektet omfattar beskrivning av förekomst av sura episoder samt framtagande av förslag till hur kalkning mot skadliga surstötter kan utformas. Följande områden diskuteras: när, var och hur surstötter förekommer, deras påverkan på bottenfauna och fisk, samt hur de nya bedömningsgrunderna kan användas. Uppdraget redovisas som tryckfärdigt manus till rapport som utgör underlag för motsvarande avsnitt i den kommande upplagan av kalkningshandboken. Manuset skall vara Naturvårdsverket tillhanda senast 2006-12-31 i fem exemplar samt levererat i digitalt format.

2. Inledning

Föreliggande rapport är ett underlag för en revision av avsnitten som behandlar kalkning mot episodförurning, dvs kortvariga surstötter i vattendrag och sjöar, i handboken för kalkning av sjöar och vattendrag (Naturvårdsverket 2002).

En episod eller surstöt definieras här som en kortvarig ökning av vattenföringen (dagar), vilken leder till en pH-sänkning med minst en pH-enhet vid ett basflödes-pH på över eller lika med 5,4 (motsvarar alkalinitet = 0), eller en sänkning med minst 0,5 pH-enheter vid ett basflödes-pH på mindre än 5,4.

Slutsatserna i rapporten bygger i huvudsak på redan befintliga publikationer och rapporter som behandlar problemet med episoder ur olika aspekter. För att i någon mån uppdatera och verifiera resultat från tidigare undersökningar har vi dock kompletterat med bearbetningar av nyare data från IKEU-programmet (Integrerad Kalknings Effekt Uppföljning) och från länsstyrelsernas databaser för regional effektuppföljning, till och med 2005.

3. Orsak till surstötter i olika delar av landet

I områden med hög andel av årsnederbörden som snö, såsom i Norrland och fr a i fjällen, innebär en snabb avsmältning av snön ofta kraftiga och snabba flödesökningar i vattendragen. Även utan förhöjda svavel och kvävehalter i snön sjunker pH-värdet i vattendragen genom utspädning med smältvattnet, vilket ger en utarmning av buffertkapaciteten, dvs minskad ANC och alkalinitet. Speciellt i kalfjällsområden med tunna jordlager kan en stor del av smältvattnet transporteras ytligt utan att laka ut några buffrande kationer ur marken. I svenska fjällkedjan har sura episoder registrerats under 1970- till 1990-talet, men den lokala variationen är stor pga varierande buffertförmåga i vattendragens avrinningsområden. Det är fr a i områden med svårvittrad berggrund som låga pH-värden har registrerats under vårfloden (Ahlström och Isaksson 1990, Bjärnberg 1983, 1986). I södra fjällkedjan började kraftiga surstötter uppträda under slutet av 1970-talet (Andersson och Nyberg, 1984, Borg et al., 1995, 2001). En tydlig koppling till nederbördens pH och sulfatkoncentration har här varit tydlig och orsaken till

dessa extra kraftiga surstötter är fr a innehållet av starka syror i snön, från i första hand SO_4^{2-} men även NO_3^- . Under 1989-1992 genomförde länsstyrelserna i Norrlands inland och fjälltrakter en inventering av 1500 vattendrag med kemiska och biologiska analyser (Ahlström et al., 1995). Kommunerna närmast kusten undantogs från denna undersökning. Efter att hänsyn tagits till inverkan av naturliga organiska syrors bidrag till surstötter, konstaterades att totalt 14 % av vattendragen var försurningspåverkade, huvuddelen i de sydligare länen. Ett starkt samband konstaterades också mellan pH i snön och min pH i vårfloden. Snö med pH över 5,0 medförde inte några drastiska surstötter medan snö med pH under 4,8 orsakade surstötter med alkalinitet 0 eller under (aciditet) i vattendragen, dvs pH 5,4 eller lägre. Ett dylikt samband har även tidigare visats på 70- och 80-talen i Härjedalen (Andersson och Nyberg 1984).

Några år senare, under 1996-1999 studerades 12 okalkade vattendrag i Norrland, med fokus på sura episoder, varvid konstaterades att utspädning av baskatjoner och en ökning av organiska syror orsakade flertalet av de observerade surstötterna under vår- och höstflod (Laudon et al. 2001). I vissa av vattendragen utfördes också fältförsök med öring varvid akuttoxiska effekter (dödlighet) konstaterades i vissa fall, samt nedsatt kondition dokumenterad såsom sänkt plasmaklorid, ökade hematokritvärden och även ökade aluminiumhalter på gälarna hos försöksfisken. Luftföroreningar beräknades bidra till 0,1 till 0,3 pH-enheter i flertalet av de observerade pH-sänkningarna på upp till 2,5 pH-enheter. I syfte att kvantifiera och separera luftföroreningarnas bidrag till surstötter under högflödesperioder i Norrland, utvecklades en operationell modell (BDM), som bygger på jämförelse av vattenkemin vid basflödet med högflödet och beräkning av den eventuella utspädningen under högflödesperioden (Laudon et al. 2001). Modellen kräver analys av jonbalans och TOC under några tillfällen vid basflödet före episoden samt fyra till åtta tillfällen under episoden. Modellen förutsätter vidare att vissa antaganden uppfylls för att tillförlitligt kunna beräkna en förindustriell kemi;

- 1) att basflödet är opåverkat av försurning, dvs att pH och ANC inte är påverkade eller att de kan korrigeras,
- 2) att summa baskatjoner är ett bra mått på naturlig utspädning av ANC under högflödesperioder,
- 3) att TOC är oförändrat sedan förindustriell tid och har inte påverkats av skogsbruk, dikning eller försurning.

Det första antagandet, att basflödet är opåverkat av försurning, är inte helt invändningsfritt eftersom även vissa delar av Norrland visar en viss påverkan på basflödeskemin, liksom södra Sverige. I så fall kan en viss korrigering göras, för att förbättra beräkningarnas tillförlitlighet. Antagande 2, att baskatjoner är ett bra mått på utspädningen kan i någon mån påverkas av att den ofta förekommande ökningen av humusämnen under vårfloden även bidrar till att baskatjoner lakas ut, varför utspädningen av dessa då blir mindre under episoden. Som de flesta andra modeller är således även denna behäftad med mer eller mindre stora osäkerheter, när det gäller att bedöma den antropogena delen av episodförsurning. De ovan beskrivna förutsättningarna, fr a antagandet att basflödeskemin inte är påverkad av försurning, gör givetvis att beräkningsmetoden är mindre användbar i mellersta och södra Sverige (Laudon et al. 2001)

Sura episoder uppstår inte bara i samband med snösmältning när stora mängder ackumulerad nederbörd med förhöjda halter av svavel och kväve rinner av, utan även i samband med sensommar-, höst- och vinterregn, när grundvattennivån stiger efter

sommaren. Förutom en utspädning av buffertkapaciteten sker i vissa fall då en kraftig ökning av sulfathalten i vattendragen, vilket kan förstärka ANC- och pH-sänkningen. Fenomenet beror på att svavel i marken reduceras och fastläggs som sulfider i t ex våtmarker vid höga grundvattennivåer, för att oxideras till sulfat under torra perioder när grundvattennivån sänks. Sulfat kan sedan sköljas ut när grundvattennivån stiger i samband med episoder. Denna process är sedan länge påvisad t ex i Norrland i områden under högsta kustlinjen, såsom i Västerbottens och Norrbottens kustland (Lohammar 1938, Vallin 1953). Där är lager av sulfidleror - alunjordar eller sk svartmocka - av marint ursprung orsak till stora variationer i pH, sulfat-, järn- och aluminiumhalter i sjöar och vattendrag i takt med grundvattennivåns förändringar. Så låga pH-värden som 3,0-4,0 har där redovisats i många sjöar efter torrperioder (Dietrichson 1978). I t ex Blåmisusjön i Norrbottens kustland rapporterade Sten Vallin om pH värden på 2,8-3,6 och höga sulfathalter under åren 1948-1952 och effekterna av den extrema vattenkemin på faunan i sjön har studerats vid flera tillfällen (Vallin 1953, Rydgård et al., 1985).

De förhöjda svavelhalterna i marken pga decennier av hög svaveldeposition, fr a i Sydsverige, kan ha förstärkt de torkdrivna surstötarna under sensommar och höst, men även dikningar i områden med hög svavelhalt förstärker utläckaget till vattendragen. I en rapport framtagen i samband med arbetet med revision av bedömningsgrunder för försurning konstaterades att omfattningen och frekvensen av torkstyrda episoder i de 20 undersökta vattendragen var ytterst varierande och att förändringen under episoden inte oväntat var störst i de vattendrag som hade basflödes pH över ca 5,3 (Laudon och Westling 2003). I 17 av de 20 vattendragen fanns ett samband mellan SO₄-ökningen och omfattningen av torrperioden innan episoden. Vidare bedömdes att torrdrivna surstötter kan komma att motverka återhämningsprocessen i försurade vattendrag framöver.

Havssaltsepisoder har förekommit i samband med västvindar och nederbörd från havet, fr a på norska västlandet men även i Västsverige. Vid ökad deposition av natrium frigörs vätejoner från ytliga marklager genom jonbytesprocesser, vilket orsakar pH-sänkning i berörda vattendrag och därigenom också en ökad halt av oorganiskt aluminium (Hindar et al., 1995, 2004). Beroende på jordmån och hydrologiska faktorer frigörs Na sedan långsammare än klorid från marken, vilket gör att Na/Cl-kvoten ökar under en tid. Detta bidrar då till en temporär ökning av ANC (Skjelkvåle et al., 2006).

3.1. Regionala skillnader i orsaker till sura episoder?

För att få en uppfattning om hur stor betydelse olika joner har på minskningen av ANC vid högflöden och om det finns några regionala skillnader har vi beräknat differensen mellan koncentration vid basflöde och koncentration vid högflöde för Ca, Mg, SO₄²⁻, Cl, NO₃⁻ samt organiska anjoner (Org A, beräknades som anjondeficit, dvs underskottet på anjoner i jonbalansen och som ökar med vattnets humushalt) för vattendrag som ingår i IKEU-programmet:

$$\text{Differens(jon)} = C(\text{jon})_{\text{högflöde}} - C(\text{jon})_{\text{basflöde}} \quad (\text{mekv/l})$$

För varje år och vattendrag beräknades en sådan differens. Det provtagningstillfälle som hade årets högsta ANC antogs representera basflöde, medan årets lägsta ANC antogs representera högflödestillfället, oavsett tidpunkt under året. Därefter beräknades medeldifferensen över samtliga år från vilka vi har data (1-17 år, median 9 år) för vardera jon och vattendrag.

Ett negativt värde på differensen representerar således en utspädning vid högflödet medan ett positivt värde representerar en ökad tillförsel vid högflödet. Eftersom ANC kan beräknas som

ANC = baskatjoner – starka syrors anjoner, dvs

$$(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^{+} + K^{+}) - (SO_4^{2-} + Cl^{-} + NO_3^{-}) \quad (\text{mekv/l})$$

kommer en utspädning, dvs ett negativt värde, för Ca och Mg att bidra till sänkt ANC, medan utspädning av SO_4^{2-} , Cl^{-} , NO_3^{-} motverkar ANC-sänkningen. För anjonerna är det i stället en positiv differens, dvs ökad tillförsel, som bidrar till sänkt ANC.

Vattendragen delades upp i 3 kategorier; sura (medel pH <5,5), neutrala (medel pH >6,0) och kalkade, samt i två regioner, norra och södra Sverige, med gräns vid Dalälven.

Därefter beräknades för varje vattendragstyp och region, ett medelvärde på differensen $C_{\text{högflöde}} - C_{\text{basflöde}}$ för vardera jon (Figur 1-3). Detta ger ett mått på hur stor relativ inverkan de olika jonerna har på ANC-minskningen vid högflöden. Här bör dock noteras att de sura vattendragen är få, bara ett i norra Sverige och tre i södra Sverige. I gengäld ingår mätvärden från 9 år i det nordliga vattendraget och för 5, 9 och 16 år i de tre sydliga.

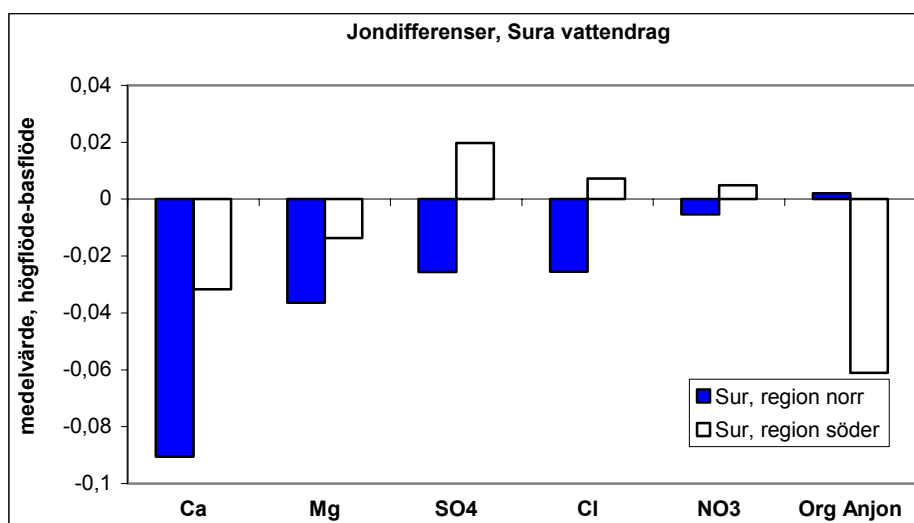


Fig. 1. Medelvärden av differensen $C_{\text{högflöde}} - C_{\text{basflöde}}$ (mekv/l), för sura vattendrag i norra Sverige ($n=1$) resp. södra Sverige ($n=3$)

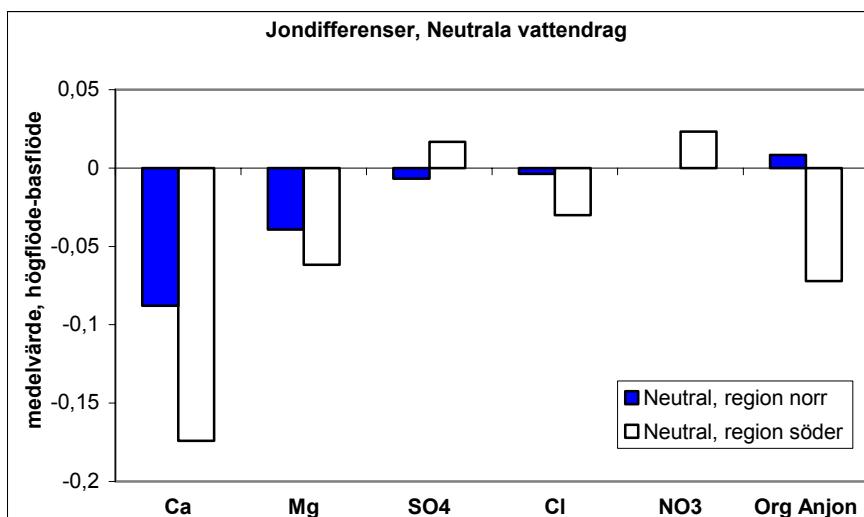


Fig. 2. Medelvärden av differensen $C_{\text{högflöde}} - C_{\text{basflöde}}$ (mekv/l), för neutrala vattendrag i norra Sverige ($n=6$) resp. södra Sverige ($n=6$)

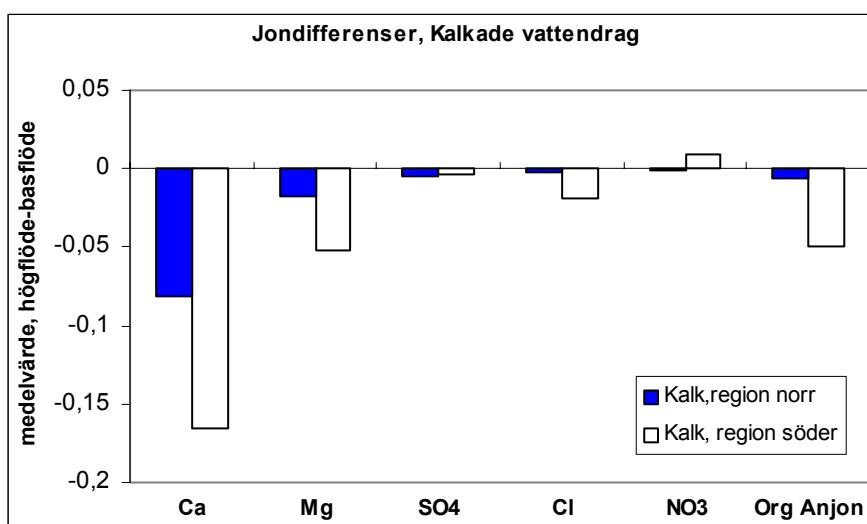


Fig.3. Medelvärden av differensen $C_{\text{högflöde}} - C_{\text{basflöde}}$ (mekv/l), för kalkade vattendrag i norra Sverige ($n=6$) resp. södra Sverige ($n=12$)

Av figurerna framgår att i den norra regionen är utspädning (negativ differens) av baskatjonerna den största orsaken till ANC-minskningen vid högflöden, för alla tre vattendragstyperna. En liten tillförsel (positiv differens) av organiska anjoner bidrar också, förutom i de kalkade vattendragen. För övriga anjoner ser vi också en utspädning, vilket i viss mån motverkar minskningen i ANC.

För de sydliga vattendragen är bilden något mer komplex. Även här ser vi en kraftig utspädning av baskatjonerna vid högflöde för samtliga vattendragstyper. När det gäller NO_3^- visas, i motsats till de nordliga vattendragen, en tillförsel under högflödena, vilket ytterligare bidrar till sänkningen av ANC. Liksom NO_3^- ökar även SO_4^{2-} -koncentration under högflöden, utom i de kalkade vattendragen där man i stället ser en utspädning, om än mycket liten. Även för de organiska anjonerna påvisar analysen en motsatt bild jämfört med i de nordliga vattendragen; i söder ser vi en utspädning under högflöden vilken då motverkar ANC-minskningen. Klorid visar en utspädning i de

kalkade och neutrala vattendragen i söder, men en liten tillförsel i de sura, vilket pekar på att deposition av havssalter kan bidra till sura episoder.

Generellt kan man alltså dra slutsatsen att det största bidraget till sänkning av ANC under högflöden är utspädning av baskatjoner. En mindre, men bidragande, orsak är tillförsel av organiska syror i norr och av sulfat och nitrat i söder. Denna fördelning är också att förvänta med tanke på den fortfarande större depositionen av försurande svavel- och kväveföreningar i södra Sverige. Det bör dock betonas att detta är en ganska grov analys. Differenserna baseras på den största ANC-differensen under året, oavsett tidpunkt. Högflödestillfället kan alltså ligga före basflödestillfället i tiden och de beräknade differenserna kan därmed inte sägas representera specifika surstötter.

I en studie i nordöstra USA användes ett liknande angreppssätt för att beskriva regionala skillnader i vattenkemiska orsaker till sura episoder (Wigington *et al.* 1996). Där fann man också vissa skillnader mellan olika regioner i vilka joner som bidrog mest till ANC-minskningen vid sura episoder. Det fanns också skillnader mellan olika typer av episoder. Vid kraftiga episoder, med lågt ANC-minimum, visade sig nitrat- och sulfatpulser samt organiska syror vara viktigare, medan baskatjonutspädningen hade större betydelse vid mindre drastiska episoder.

Sammanfattningsvis kan konstateras att sura episoder uppstår i samband med ökning av vattenföringen pga snösmältning eller regn. De förändringar av vattenkemin som detta orsakar och som leder till en utarmning av vattnets buffertkapacitet (alkalinitet, ANC) är i första hand:

- *Utspädning* – minskad ANC.
- *Utläckage av organiska syror* från marken (humusämnen).
- *Avrinning av starka syror av sulfat och nitrat* från luftföroreningar i nederbörden (snötäcket), medför ytterligare pH-sänkning.
- *Långvarig torka innan episoden* kan medföra ökat läckage av oxiderade svavelföreningar (SO_4^{2-}) från marken vid högflöde.
- *Ökad deposition av havssalter* bidrar till sura episoder genom att deponerade katjoner (Na^+) byts ut mot vätejoner vilka frigörs ur marken och transporteras ut med avrinnande vatten.

4. Förekomsten av sura episoder i olika regioner

4.1. Förekomsten av sura episoder i kalkade vatten enligt länsstyrelsernas regionala effektuppföljning

Det totala antalet provtagningar inom länsstyrelsernas effektuppföljning är mycket stort och bör kunna ge värdefull information om tillstånd och förändringar vad gäller episodförsurning i kalkade vatten. Ett problem är dock att effektuppföljningen skiljer sig mycket mellan länen och sällan är optimerad för att upptäcka sura episoder. Av kostnadsskäl tvingas länen ofta minimera antalet provtagningar såväl som antalet kemivariabler. Majoriteten av alla prover i kalkade vattendrag mellan 1989-2005 är tagna på våren. Norrlandslän har ofta koncentrerat provtagningarna till våren medan sydligare län sprider provtagningarna mer jämnt över året (Fig. 4). Dessutom kan det ha skett förändringar i provtagningsprogrammen under den aktuella perioden. Med reservation för

dessa begränsningar kommer vi här att använda detta datamaterial för att ge en bild av situationen i kalkade vatten.

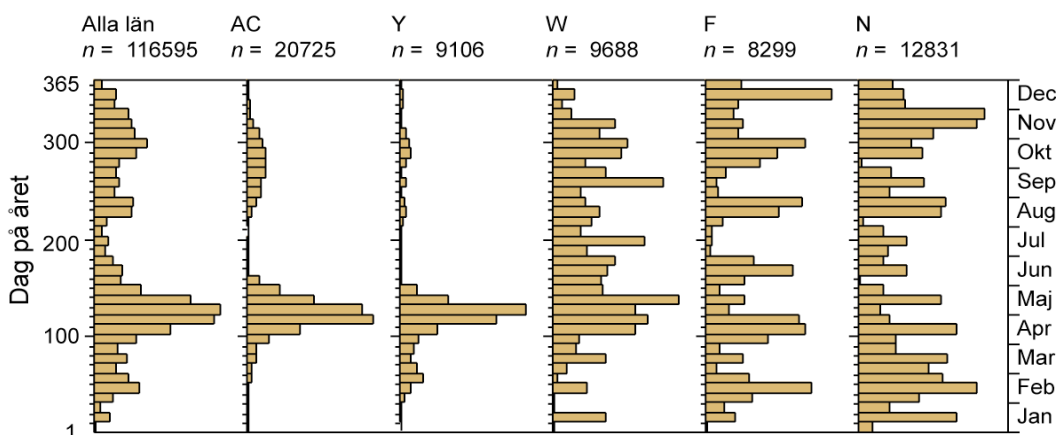


Fig.4. Fördelning av dag på året för provtagning av vattenkemi i länsstyrelsernas kalkningsprogram. Längst till vänster redovisas alla tillgängliga provtagningar i kalkade vattendrag under perioden 1989-2005. Längre till höger visas exempel på fördelningen för några enskilda län, med reservation för att det saknas provtagningar och att felklassade stationer kan förekomma (sjöar eller okalkade vattendrag).

Förändringar under perioden 1989-2005

Sammantaget över hela perioden framträder signifikanta skillnader mellan länen i medel-pH och andelen extremt låga pH (Ancova, $p < 0,0001$, Analysis of covariance, län och tid som oberoende variabler; Fig. 5), återspeglade skillnader i försurningssituationen och kalkningsstrategier. Medel-pH har generellt stigit sedan 1989 med 0,1-0,2 enheter i kalkade vattendrag (det finns dock län med motsatt trend). Däremot finns ingen motsvarande förbättring på nationell nivå vad gäller extrema pH (Ancova, $p = 0,14$) även om vissa län uppvisar signifikanta förändringar. I N- och O-län har 10-kvantilen på årsbasis (de 10 % lägsta pH-värdena) stigit medan den i T och W län sjunker (Fig.5). Regionala förändringar över tiden kan ha orsakats både av återhämtning och av förändringar i kalkningsintensitet eller i uppföljningsprogrammen.

Inom de flesta län verkar alltså surstötsproblemen inte ha förändrats avsevärt under de senaste 15 åren i kalkade vattendrag. Det finns en tendens att lägsta pH ökar, men antalet tillfällen under året som pH understiger pH 6 har inte förändrats under perioden. Om vi komprimerar den studerade perioden till ett år och bildar månadsmedelvärden kan vi undersöka hur extrema pH fördelar sig under olika säsonger. I södra och västra Sverige uppträder de lägsta pH under sen höst, vinter och tidig vår (Fig.6). I norr är låga pH i huvudsak koncentrerade till april-maj. På samma sätt kan antalet ”överträdelser” studeras, d.v.s. hur många gånger som ett visst pH understiges. Även observationer av $pH < 6$ sker framförallt i samband med förväntade högflöden – på hösten och våren i södra Sverige och på våren i norra Sverige. Det är relativt ovanligt med $pH < 5$ i de flesta län. Kalkade vattendrag i Skåne- och Örebro län är anmärkningsvärt sura, medan pH i Kalmar län sällan understiger pH 6 (Fig.6).

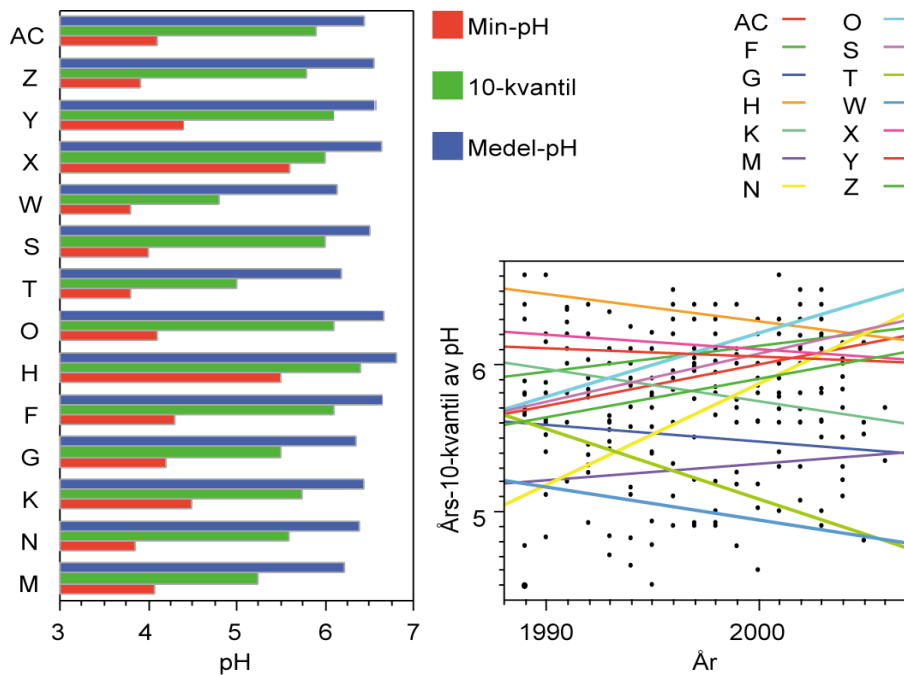


Fig. 5. Stapeldiagrammet visar medel-pH, 10-kvantilen och lägsta observerade pH i vattendrag inom den regionala effektuppföljningen. Variablerna är beräknade utifrån samtliga tillgängliga data för perioden 1989-2005 och det finns signifikanta skillnader mellan länen. Diagrammet till höger illustrerar (avsaknandet av) generella trender i 10-kvantilen beräknat på årsbasis. Tiokvantilen representerar här alltså den övre gränsen för de 10 % lägsta observationerna under ett år för varje län.

Resultaten belyser i grova drag förekomsten av sura episoder i kalkade vattendrag i olika regioner. Man bör dock inte lägga för stor vikt vid detaljer i figurerna eftersom det tillgängliga datamaterialet är heterogent vad gäller provtagningsperiod och kvalitetskontroll. Provtagningsfrekvensen under högflödesperioder har traditionellt ofta varit för låg, varför sura episoder kan ha missats. Bristerna i datamaterialet kan därför ge en överdrivet positiv bild i många län och jämförelser över tiden och mellan länen kan alltså bli något missvisande.

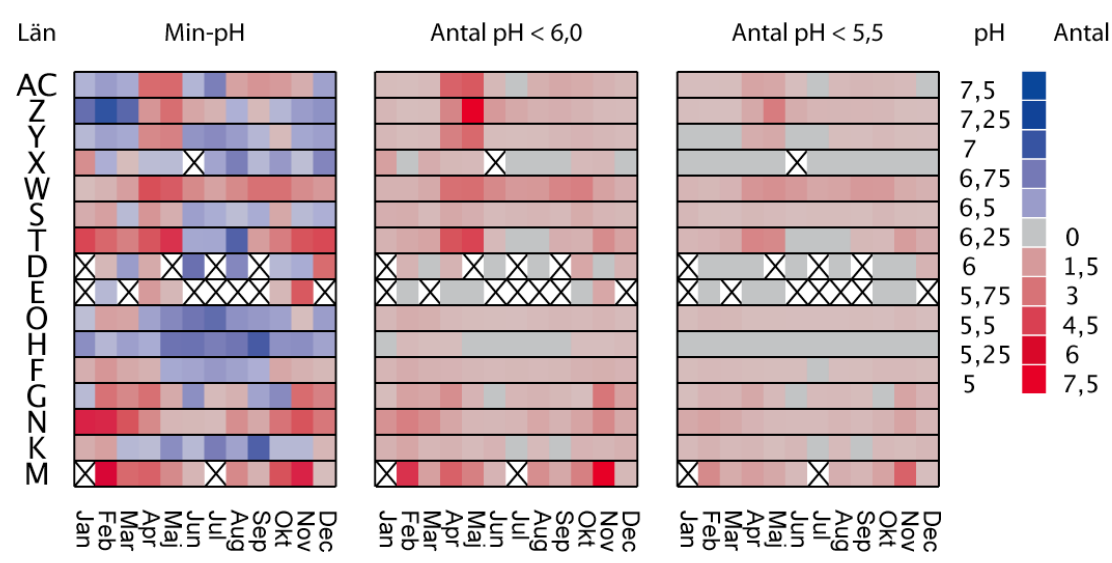


Fig.6. Episodförsurningens säsongsvariation i olika län. Celldiagrammens färgskala baseras på månadsmedelvärden av lägsta uppmätta pH respektive antal "överträdelser" för varje län under perioden 1989-2005. Röd färg indikerar att pH i genomsnitt är lågt eller att större antal observationer av pH är lägre än 6,0 eller 5,5. Kryss markerar att inga mätningar förekommit under aktuell månad.

4.2. Regionala undersökningar av episoder

Utifrån en inventering av 220 vattendrag som genomfördes i Västra Götalands län 2001, beräknades närmare 25 % av de kalkade vattendragen i länet ligga i riskzonen för att drabbas av surstötar med skadliga pH-värden och aluminiumhalter som följd (Länsstyrelsen Västra Götaland, 2002). Andelen vattendrag i riskzonen var densamma om samtliga vattendrag i undersökningen räknas in. Det var alltså ett relativt stort antal vattendrag som konstaterades kunna drabbas av sura episoder i regionen.

Episodprojektet i Norrland konstaterade att av de 30-tal episoder som undersöktes 1996-1999, orsakades endast ett fåtal av antropogent betingade pH-sänkningar (Laudon et al. 2001). Till detta bidrar den påtagligt minskade depositionen av svaveldioxid, jämfört med under 1970-talet, vilken har medfört att snöns koncentration av starka syror har minskat. Den ca 65-procentiga minskningen av svaveldepositionen över Norrland mellan 1970-1990 har medfört att den yta av Norrland som drabbas av kraftiga surstötar pga antropogena luftföroreningar har minskat med ca 75 % under denna period (Laudon och Bishop 2002).

Den tidigare diskuterade metoden för att beräkna antropogen respektive naturlig andel av pH-sänkningen vid surstötar (Laudon et al. 2001) har även testats för *kalkade* vattendrag i Västerbotten, uppströms och nedströms kalkdoserare. Förutom direkta effekter på pH och Ca^{2+} -koncentration så kan ytterligare vattenkemiska förändringar förväntas efter kalkningen. Dessa kan allvarligt försvåra användningen av episodmodellen. Följande effekter kan tänkas:

1. TOC kan påverkas både genom att ökat pH ger ökad löslighet av TOC men även genom att TOC kan fällas ut med Al-, Fe- och Mn-hydroxider då pH ökar.
2. Precisionen i Ca^{2+} -korrigerig medelst Ca/Mg-kvot är inte tillräcklig för att summan av baskatjoner ska kunna användas som utspädningsindex.
3. Ökade halter av Ca^{2+} förändrar halten av andra baskatjoner i vattendraget genom utbytesreaktioner.
4. Ett stort övertryck av CO_2 uppstår eftersom en mycket stor mängd HCO_3^- tillsätts vilket kan leda till att det blir svårt att modellera pH.
5. Utfällning av kalciumföreningar (tex gips; CaSO_4) p.g.a. höga koncentrationer av Ca^{2+} .

Den önskade vattenkemiska effekten av kalkning är en ökning av pH och detta görs normalt genom en tillsättning av kalk (CaCO_3) vilket leder till en ökad koncentration av Ca^{2+} . Eftersom episodmodellen använder baskatjoner som mått på utspädningen under vårfloden måste därför en korrigerig av Ca^{2+} -koncentrationen göras. Korrigerigen görs enklast genom den starka korrelationen av mellan Mg^{2+} och Ca^{2+} i okalkade vattendrag. Resultaten från doserarkalkade vattendrag i Västerbotten visade att denna korrigerig fungerade i stort sett utom i slutet av vårfloden då kalktillsatsen förefaller att även ha orsakat viss förhöjning även av Mg och andra baskatjoner. Generellt minskade sulfathalten betydligt mer under vårfloden i kalkpåverkade delar av vattendragen jämfört med uppströms doserarna. Detta tolkades som ett resultat av utfällning av gips (CaSO_4). Detta medför att den enligt episodmodellen beräknade antropogent betingade ANC-förlusten blir underskattad i kalkade vatten (Laudon 2003). Resultaten pekar tydligt på svårigheterna med att anpassa beräkningsmetoderna i episodmodellen till kalkade vatten.

Ett alternativt och mer tillförlitligt sätt att beräkna antropogen påverkan på vårfloden som föreslagits är att använda sig av det väl dokumenterade sambandet mellan sulfatdepositionen under vintern, snö-pH och den antropogena ANC-förlusten under vårfloden (Andersson och Nyberg 1984, Ahlström et al., 1995, Laudon et al., 2001, Laudon och Bishop 2002). Om Ca^{2+} -koncentrationen efter kalkning korrigeras till okalkad nivå med hjälp av sambandet med Mg^{2+} och utspädningsfaktorn används för att beräkna maxflödets ANC, kan vattnets påverkansgrad bedömas t ex med hjälp av bedömningsgrunderna för försurning.

4.3. Episodundersökningar inom IKEU-programmet

Uppföljningen av kalkade vatten, speciellt vattenkemin, har traditionellt i regel haft för låg provtagningsfrekvens för att ge en riktig bild av förekomsten av sura episoder. I vissa av IKEU-programmets vattendrag (5-8 st, 2000-2003) har dock provtagningen kompletterats under vintern-våren med tätare provtagning i syfte att belysa detta (Andrén 2005). De viktigaste slutsatserna från denna studie kan sammanfattas som följer.

De sura episoderna innebär en period med högt vattenstånd och lågt pH och hög halt oorganiskt Al. I de nordliga vattendragen inträffar detta i regel i samband med vårfloden och i de sydliga sker det oftast under höst- och vinterregn. Vanligen sker då i nordliga vattendrag en TOC-ökning medan det i sydliga vattendrag oftare förekommer en utspädning av TOC. Den intensifierade provtagningen visar på starkast koppling mellan vattenkvaliteten och vattenföringen i Skuggälven, Haraldsjöån och Källsjöån och Arån. De modellerade maxflödena har visserligen inte kunnat fångas i dessa vattendrag men trots det har skillnader uppmätts i analysresultaten mellan ordinarie och förtätad provtagning i just dessa vattendrag.

I de kalkade vattendragen Lillån, Blankan (Halland), Arån (Jämtland) och Källsjöån (Hälsingland) dämpar kalkningen pH-variation (aldrig $\text{pH} < 6,0$) och i synnerhet halten Ali (oftast $< 10 \mu\text{g/l}$). I Skuggälven (Bohuslän) och Haraldsjöån (Västmanland) uppträder pH-värden under 5,0-5,5 i samband med flödestoppar, trots kalkningen, då även halterna av oorganiskt aluminium når toxiska nivåer (50-150 $\mu\text{g/l}$), se exempel från Skuggälven i figur 7-12, vilka kompletterats med data från 2004-2005. I Skuggälven sammanfaller surstötter ibland med ökade sulfathalter och ibland med en ökning av organiska anjoner. Vid en del surstötter kan även havssalter ha bidragit, vilket syns som en tillfällig ökning av kloridhalten. En viss utspädning av baskatjoner förekommer också vid höga flöden, trots kalkningen. Skuggälven är inte målområde för insatserna men är påverkad av kalkningen i den uppströms liggande Ejgdesjön.

I norra Sverige uppträder episoder oftast på våren i samband med snösmältning och vinterns deposition av sulfat i snön avgör deras styrka (Laudon et al, 2001). I det nordligaste intensivundersökta referensvattendraget i IKEU-rapporten, Härån, ökar vattenföringen i samband med att snön smälter, vilket får en rad effekter på vattenkemin; pH sjunker tillsammans med alkalinitet och sulfat medan TOC ökar. Ett sydligt kontrasterande exempel är halländska Lillån-Bosgård. När det regnar på senhöst, tidig vinter ökar vattenföringen och även här sjunker pH tillsammans med alkalinitet och sulfat (fast inte så tydligt) men där sjunker istället TOC. Vattenkemin är således inte helt lika men då pH i båda fallen blir lågt samtidigt som halten Ali är hög så kan negativa effekter uppstå på biota. De kemiska variabler som uppvisar starkast signifikanta samband med

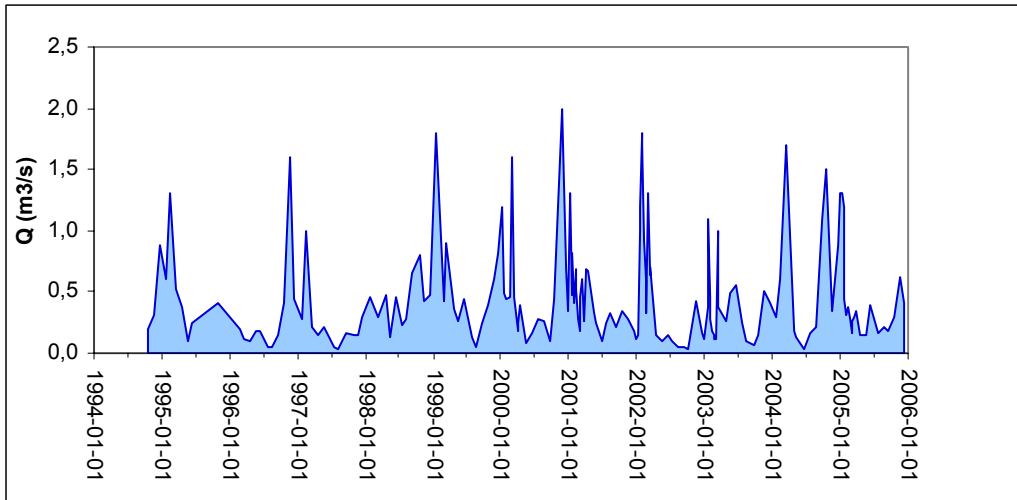


Fig 7. Vattenföring i IKEU- vattendraget Skuggälven, O-län, 1994-2005.

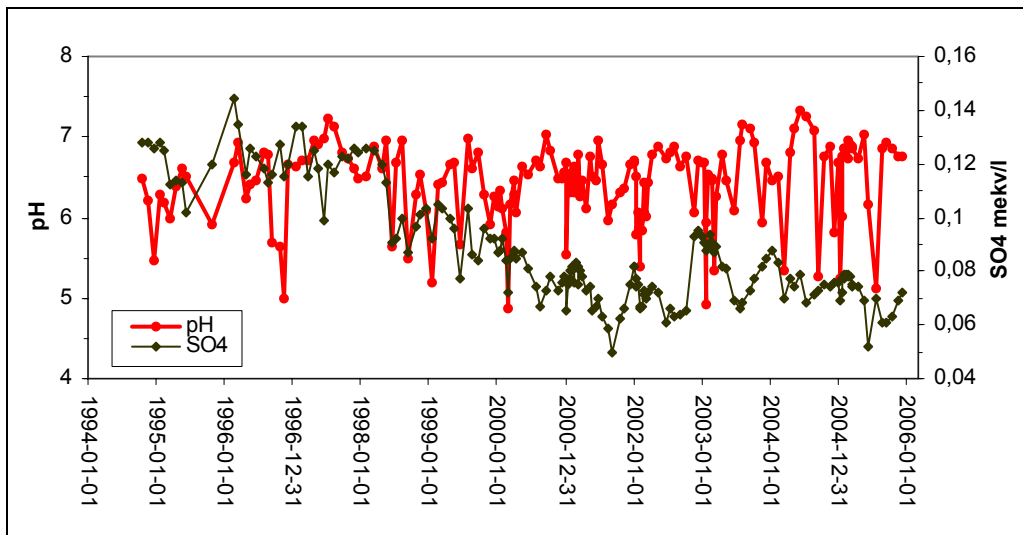


Fig.8. pH och sulfatkoncentration i Skuggälven, 1994-2005.

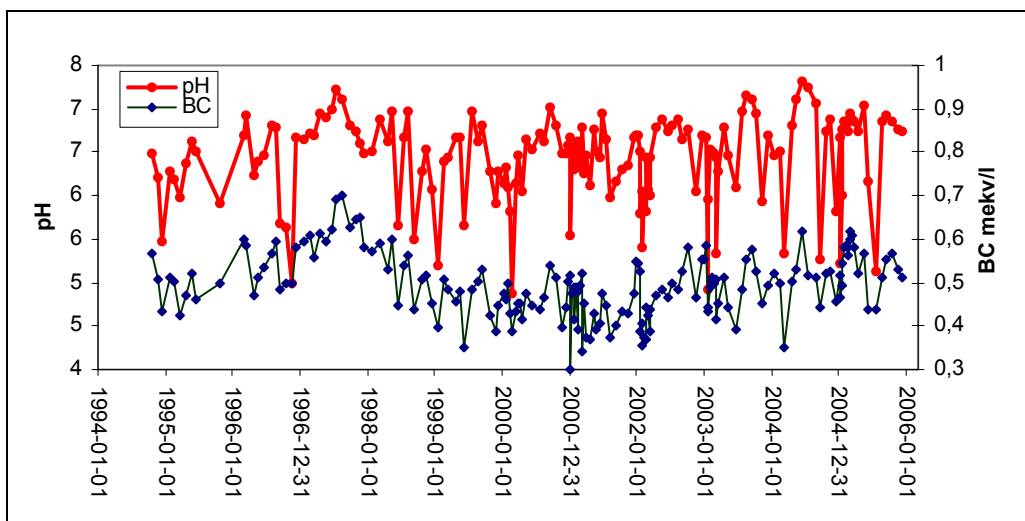


Fig.9. pH och koncentrationen av baskatjoner i Skuggälven, 1994-2005.

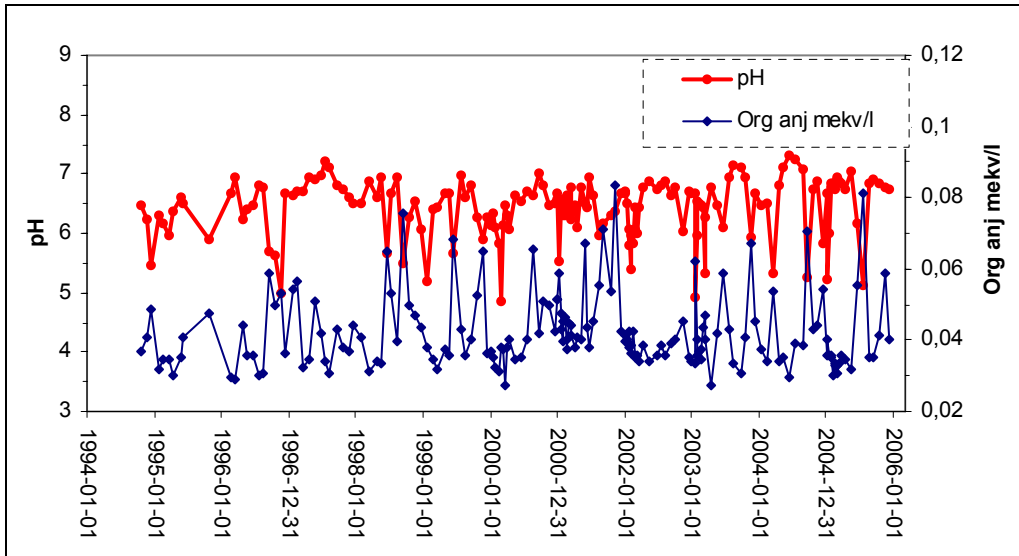


Fig.10. pH och organiska anjoner (anjondeficit i jonbalansen) i Skuggälven, 1994-2005.

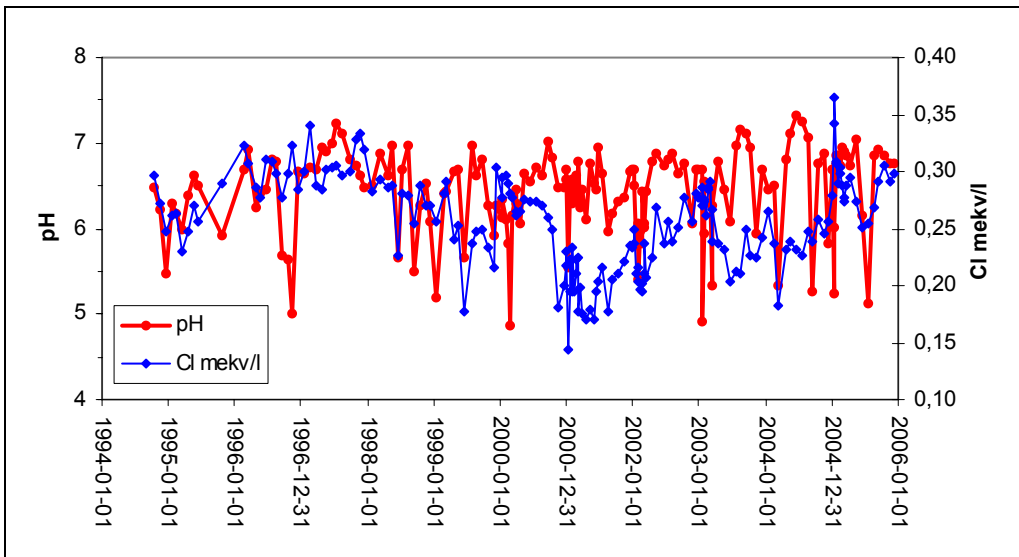


Fig.11. pH och koncentrationen av klorid i Skuggälven, 1994-2005.

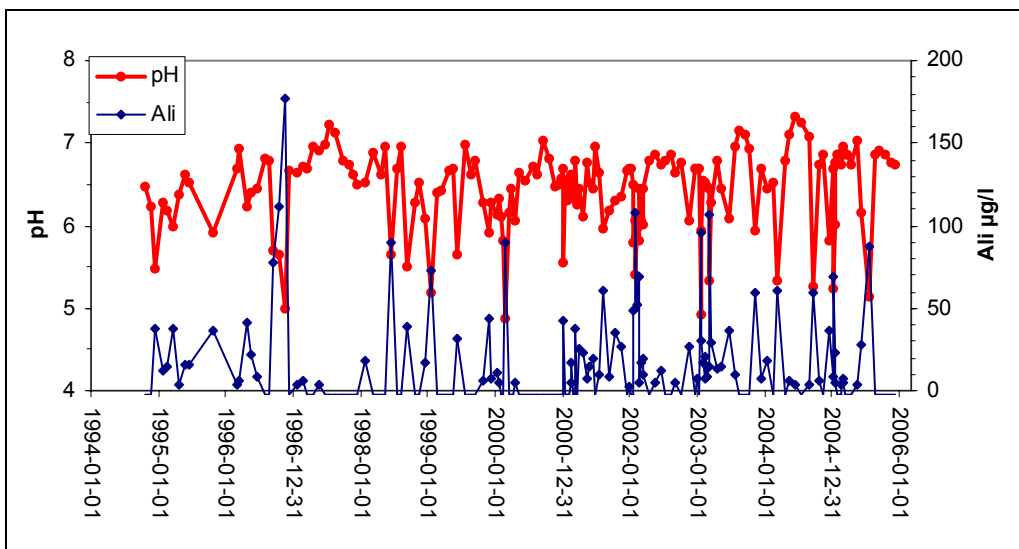


Fig.12. pH och koncentrationen av oorganiskt Al (Ali) i Skuggälven, 1994-2005. .

vattenföringen är inte oväntat oftast pH och alkalinitet, medan ANC oftast visar ett något svagare samband. I de sydligare vattendragen visar inte TOC något signifikant samband med vattenföringen, men däremot i de nordligare Källsjöån, Härån och Arån, där positiva men relativt svaga samband uppträder.

För att få bättre kunskap om episoder genomfördes en förtätad provtagning inom IKEU-projektet under vintern och våren 2005 och 2006 i 22 vattendrag. Bland dessa ingår såväl kalkade vattendrag som sura och neutrala referensvattendrag (Andrén 2006). I figur 13 visas min-pH och max oorganiskt Al för dessa lokaler samt för de övriga som ingår i programmet med ordinarie provtagning. Min pH varierar från 4,3 till 7,0 och oorganiskt Al varierar omvänt från 180 till ca 10 µg/l eller lägre.

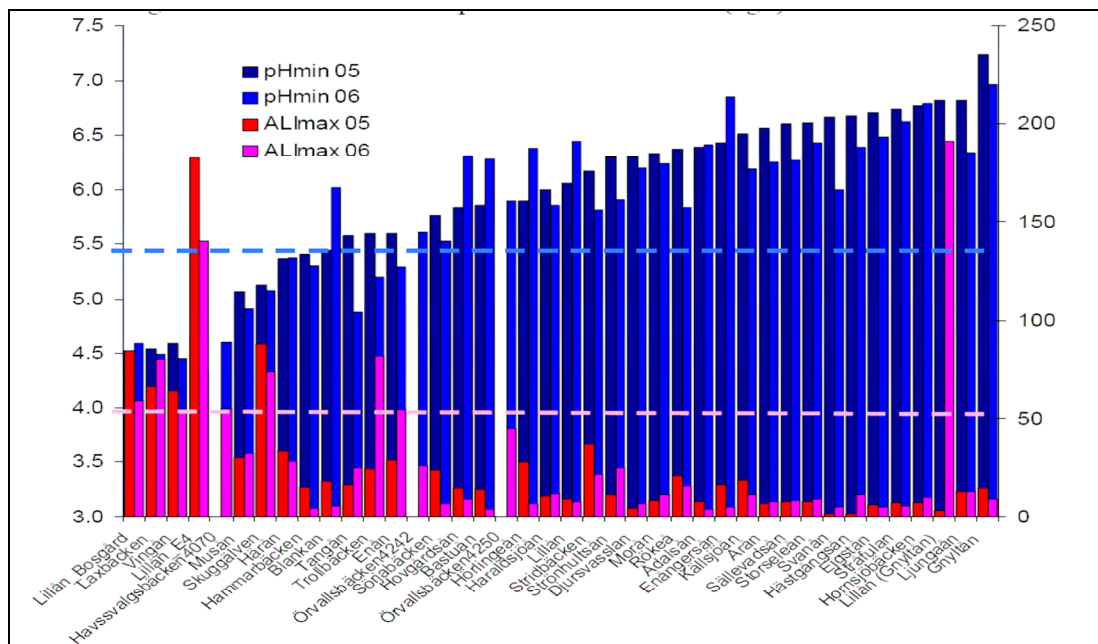


Fig. 13. pH och oorganiskt Al i vattendrag 2005 och 2006, sorterade efter min pH 2005.

I de kalkade vattendragen är som väntat surstötarna mindre drastiska, men även här förekommer, liksom vid den tidigare ovan nämnda undersökningen, låga pH-värden tämligen frekvent. I sju av vattendragen noterades pH-värden <6,0 och i några fall även <5,5 speciellt under vårfloden 2006, efter den ovanligt snörika vintern i södra Sverige. I tabell 1 återfinns extremvärden för pH och oorg Al (Alimax) 2005 och 2006 tillsammans med data för bentiska kiselalger och bottenfauna (försurningsindex).

4.4. Är sura episoder med extrema pH-värden entydigt kopplade till höga flöden?

Bland intensivundersökta vattendrag går det att finna många exempel på tillfällen med extremt låga pH (t.ex. i ovan diskuterade episodrapport från IKEU-vattendragen). För att avgöra om dessa handlar om sura episoder krävs dock att vi samtidigt kan uppvisa höga flöden, vilket inte är lätt eftersom flödesmätningar i regel saknas. Vattenföringen är starkt årstidsbunden men stora variationer förekommer mellan år och olika regioner. Därför kan inte t.ex. månad utgöra ett tillförlitligt substitut för vattenföring vid verifiering av sura episoder. Det finns emellertid modellerade flöden för de flesta av IKEUs vattendragsstationer. Samtliga flödesdata (veckomedelvärden) för IKEU- och intensivvattendrag finns i IKEU-databasen. Tillförlitligheten av denna typ av

Tabell 1. Vattenkemi och biologiska indikatorer för episoder i vattendragen; ACID: bentiska kiselalger, E/P(Taxa) och Medin: bottenfauna (endast värden under gränsvärdena medtagna). Typ: r=referens, å=återförsurningslokal, k=kalkad. * biologieresultat fr 2006, övriga 2004 och 2005 (Andrén 2006).

Vattendrag	Typ	pHmin 05	ALImax 05	pHmin 06	ALImax 06	ACID	E/P(T)	Medin
Lillån_E4	r	4,65	183	4,35	140	0,8	0,29	4
Vingån	r	4,59	64	4,45	54	0,5	0,2	3
Laxbäcken	r	4,54	66	4,49	80	0,4	0,09	4
Lillån_Bosgård	r	4,42	85	4,59	59	0,9	0,2	2
Havssvalgsb. 4070*	år			4,6	55	1,5	0	2
Tangån	r	5,57	16	4,88	24	4,0	0,2	3
Musån	r	5,07	30	4,91	32	1,8	0,43	6
Skuggälven	k	5,13	88	5,08	74	5,6	0,33	6
Trollbäcken	r	5,59	24	5,2	82	5,1	0,38	6
Enån	k	5,59	29	5,29	54	5,7	0,4	5
Hammarbäcken	å	5,4	15	5,3	5	5,6	0,36	6
Härån	r	5,36	33	5,37	28	5,6	0,33	6
Sörjabäcken	r	5,76	24	5,52	7	4,1		6
Örvallsb. 4242*	å			5,6	26			6
Stridbäcken	k	6,17	37	5,82	21		0,43	3
Rökeå	k	6,37	21	5,84	16	5,9		
Haraldsjöån	k	6	11	5,86	12	5,5		
Örvallsb. 4250*	å			5,9	45		0,33	4
Strönhultsån	k	6,3	11	5,91	25			
Svanån	k	6,66	1	6	5			
Blankan	k	5,44	18	6,02	6	4,7		6
Lillån (Gnyltån)	r	6,81	3	6,05	191			6
Bastuån	r	5,86	14	6,28	4		0,4	4
Hovgårdsån	k	5,84	14	6,31	9	6,0		
Hörlingeån	r	5,9	27	6,38	7	5,9		

flödesmodelleringar kan diskuteras men vi använder dem här för att undersöka sambandet mellan extrema pH och vattenföring. Vi konstaterar att pH under 6,0 är relativt ovanligt i kalkade IKEU-vattendrag och att de flesta incidenter med låga pH-värden sker vid höga flöden, även i okalkade vattendrag (Fig.14). Sambandet mellan pH och modellerad vattenföring är statistiskt signifikant i både referensvattendrag (Ancova, $R^2 = 0,87$, $n = 1907$, $p < 0,0001$) och kalkade vattendrag (Ancova, $R^2 = 0,54$, $n = 2087$, $p < 0,0001$). Detta samband är starkare (=brantare lutning,) för okalkade än för kalkade vattendrag (Ancova, $p < 0,0001$), vilket är ett väntat resultat eftersom kalkningen syftar till att buffra mot pH-förändringar.

Det förefaller som om sambandet är starkast i söder och försvagas längre norrut, särskilt för kalkade vattendrag. Detta skulle kunna tolkas som om känsligheten för episodförsurning minskar med minskande deposition av försurande ämnen som även den, starkt förenklat, avtar i nord-sydlig riktning. En alternativ tolkning är att kalkning mot surstötter är effektivare i nordliga län, beroende på bättre kalkningsstrategier eller en mindre allvarlig försurningsituation.

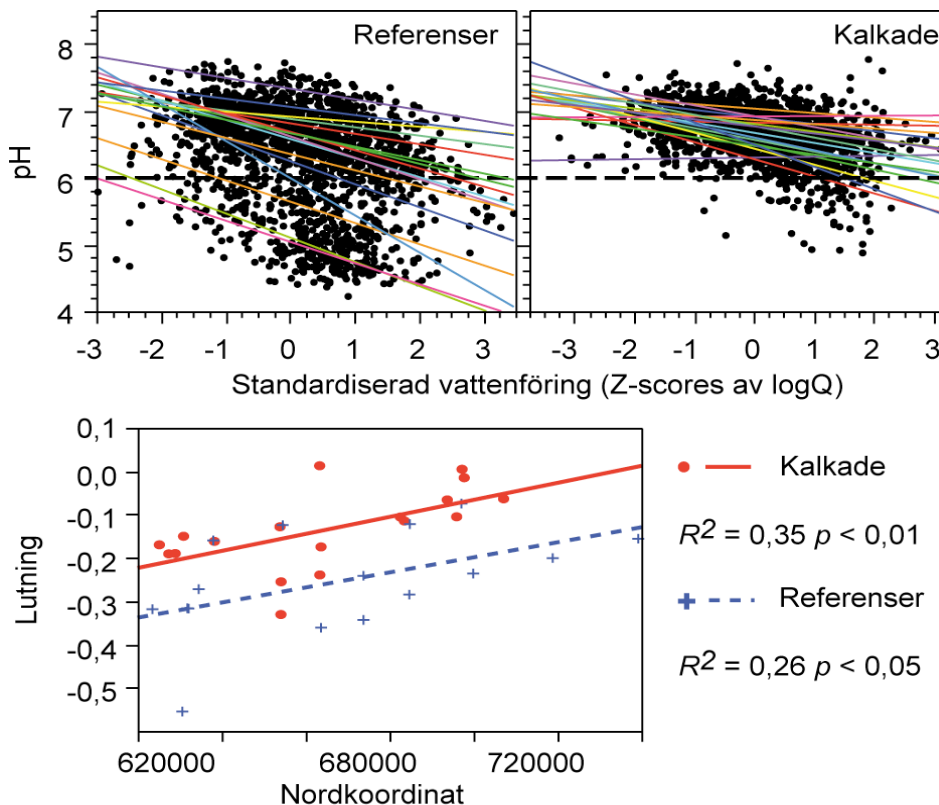


Fig.14.Överst: Sambandet mellan pH och vattenföring i okalkade och kalkade vattendrag. Endast vattendrag med fler än 50 observationer (samtidig pH och vattenföring) är inkluderade. Den horisontella streckade linjen anger pH 6,0 som är ett vanligt pH-mål för kalkningen. För att erhålla normalfördelning och jämförbarhet mellan stationer anges vattenföringen här som log-transformerade och standardiserade värden. Noll innebär alltså medelvattenföring och positiva värden motsvarar högflöden. De linjära sambanden är skattade med Ancova. Nederst: De skattade lutningskoefficienterna från den övre raden mot stationens nordkoordinat (SMHIs x-koordinat).

Resultaten tyder på att låga pH är flödesstyrda och att observationer av extrema pH-värden på goda grunder kan antas orsakas av en ”sur episod” med ökad vattenföring även om kännedom om vattenföring saknas.

4.5 Surstötter i kalkade sjöar

Inledning

Surstötter i sjöar i samband med snösmältning är kända sedan 1970-talet. Att det i samband med smältningen sker en fraktionering visades troligen först av Svante Odén och Johan Bergholm 1972 och därefter i Finland av Kirsti Haapala och i Norge av Arne Henriksen, Dick Wright och Merete Johannesen (se Johannesen m.fl. 1978, 1980). Johannesen visade både i laborieförsök och i fältstudier att koncentrationen av H^+ och SO_4^{2-} i den första tredjedelen av smältvattnet var mellan 1,9 och 2,4 gånger högre än koncentrationen i snöpacken. Men det finns även andra faktorer som sänker pH-värdet i avsmältande vatten såsom ren utspädning (Galloway et al. 1980). Dessutom tillförs organiska anjoner (humusämnen) och högt koldioxidtryck kan bidra (Bishop et al., 2000). Detta innebär att en definition av surstötter är väsentlig. Således definierar Davies et al. (1992) en episod som varje kortvarig minskning av ANC, medan en surstöt (‘acidic episode’) är en episod under vilken $ANC < 0$. I det senare fallet kommer effekter av

utspädning, organiska syror och koldioxidtryck inte att definieras som surstöt eftersom endast stark syra leder till ett negativt ANC.

De flesta undersökningarna av surstötar gäller rinnande, mindre vatten, som kan påverkas av sur nederbörd under hela året. I sjöar ger vanligen vindinducerade strömmar en sådan omblandning att en surstöt bara kan ske under isbelagda förhållanden. Vid snösmältning sker en inskiktning av smältvattnet strax under isen på grund av temperaturstyrda densitetsskillnader, som kan stärkas av en lägre salthalt i smältvattnet. Inströmmande vatten blandas alltså inte med det kalkade sjövattnet.

Som ett exempel på inskiktning av surt vatten i en kalkad sjö kan N. Baksjön i Värmland nämnas (Grahn och Hultberg, 1977). Dickson (1980) beskriver hur surt tillrinnande vatten samlades längs sjön Undens stränder, medan den centrala delens vatten hade högre pH-värde. Några år senare har flertalet tillflöden kalkats och under senvintern var pH-värdet högre i de strandnära områdenas ytvatten (Dickson 1986). Han visar också på den skarpa skiktningen i Råvekärrens Långevatten där pH-värdet var strax över 4 på 0,5 m djup och runt 6 på 1,1 m djup (Dickson 1983). I en omfattande genomgång fann Hasselrot et al. (1987) att i fyra kalkade islagda sjöar vid Västkusten påverkade inflödande surt vatten pH-värdena ned till ca 2 m inom ca 200 m från inflödet.

Förhållandena i Bösjön

Bösjön, som sjökalkas och som ingår i IKEU-programmet, undersöktes 2001 (Wilander, 2001). Låga pH-värden förekom i de centralare delarna av sjön, vattnet här var samtidigt klarare än vid stränderna. Brunare vatten med relativt hög Ca-halter fanns längs stränderna. Detta bör vara en effekt av våtmarkskalkning i tillrinningsområdet, varigenom det humösa tillrinnande vattnet var neutraliserat. Här smälte snön och gav en pH-sänkning i ytvattnet. Även om minimivärdena för pH på 5,24 och alkalinitet på $-0,005$ mekv/l klart visar på en episod så uppfylls inte Davies (1992) kriterium på 'episodic acidification' då ANC skall vara <0 mekv/l. Det lägsta värdet på ANC var 0,041 mekv/l, beroende på halten av humusämnen. Halten av total-Al var ungefär 120 $\mu\text{g/l}$, sannolikt till stor del bundet av humusämnen. Den oorganiska, toxiska fraktionen av Al varierade med pH-värdet och var som högst ≈ 100 $\mu\text{g/l}$ vid de lägsta pH-värdena. Vid pH-värden $>5,6$ var oorg Al lägre än 70 $\mu\text{g/l}$. Halterna är således potentiellt toxiska. En sådan effekt syns dock inte utgående från littoralfaunan (tabell 2). Surhetsindexets värde betecknas som "måttligt högt index".

Tabell 2. Littoralfauna i Bösjön (Metod SS-EN 27828).

År	Månad	Antal taxa	Henriksson-Medin index
1998	10	12 (med M42 16)	1 (4)
1999	10	16	4
2000	10	21	3
2001	0521	18	4
2001	0605	29	6

Skillnaden mellan de två provtagningarna under våren 2001 beror bland annat på ett ökat antal taxa av Ephemeroptera och Trichoptera (från 3 till 5 respektive 4 till 7). Ett HMI index på 6 innebär förekomst av snäckor, musslor och iglar. Effekten på littoralfaunan i Bösjön synes inte vara stor. Antalet taxa steg inom två veckor från 18 till 29, det senare det högsta uppmätta sedan mätningarnas början. Mycket tyder på att ökningen beror på en invandring av framför allt sländlarver från djupare vatten.

Liksom i Bösjön fann Henriksson (1988) i Gårdsjön, att bottenfaunan i två vikar visade tecken på migration. Han konstaterade att ”*Asellus* in one acidified bay of Lake Gårdsjön had migrated to deeper water while it was found in a less affected part of the limed lake”. I den senare viken fanns fler organismer på 2-3 m djup än den mer påverkade. Men samtidigt förekom känsliga arter av sländlarver på bägge ställen. Håvningar i stranden gav endast signifikanta skillnader i förekomst av *Asellus aquaticus* och *Sialis lutaria*.

Surstötter i andra IKEU-sjöar

I IKEU-sjöarna har provtagning normalt inte skett strax före islossning i samband med snösmältning. Men ett visst underlag finns ändå i basprogrammet för att bedöma eventuella surstötter under islagd period. Resultaten för åren 2005 och 2006 pekar på att pH-värdet i ytvattnet endast i två sjöar har understigit 6,0. Dessa är N. Särnamannasjön med ett lägsta värde på 5,91 och Tryssjön med 5,89. I N.Särnamannasjön inträffade minimum pH bägge åren i maj. Samtidigt var sulfathalterna de lägsta under året. De observerade surstöterna har orsakats av kraftigt utspädning från smältvatten tillsammans med den låga halten försurande sulfat. Förhållandena i Tryssjön var annorlunda. De lägsta pH-värdena uppmättes i februari och i september. Sjön har ett relativt högt ANC (0,17 mekv/l) och de relativt låga pH-värdena orsakas främst av organiska syror, men även sulfat kan ha bidragit. Som regel var pH-värdet högst strax under isen och sjönk sedan mot djupet. Detta beror sannolikt på ökad koldioxidbildning, vilket stöds av att syrgashalterna också är lägre där. Slutsatsen av detta är att surstötter i kalkade sjöar torde vara ovanliga idag tack vare minskad deposition och bättre kalkningsmetoder.

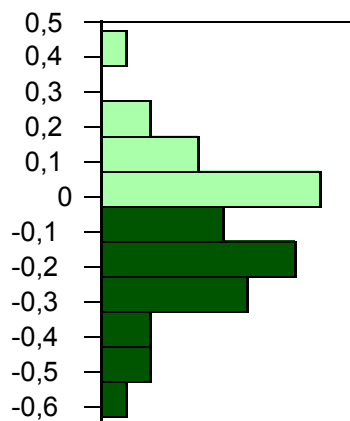
Surstötter i nationella referenssjöar

En genomgång av de nationella referenssjöarna visar att surstötter sällan upptäcks. Data från och med 1998 utvärderades och bland dessa fanns 10 som någon gång haft ett pH-värde lägre än 6,0 och dessutom provtagits under isläggning (registrerat som omvänd temperaturskiktning). Sammantaget finns data för 41 provtagningar, varav några togs samma år. En sammanställning av dessa visar att surstötter sällan förekommer (tabell 3).

Tabell 3. Sammanställning av observationer av surstötter under isläggning i referenssjöar från 1998

SMHI X	SMHI Y	Namn	Antal år	Observation
642489	151724	Allgjuttern	1	1 år ingen surstöt
643914	127698	Härsvatten	2	2003,2004 surstöt
645289	128665	Fräcksjön	1	1 år mycket svag 1999
652902	125783	Rotehogstjärnen	2	1998 mycket svag, 2003 tydlig
655275	153234	Älgsjön	1	1999 mycket svag
655587	158869	Stora Envättern	1	2003 ingen
683337	133785	Ö. Särnamannasjön	6	lägre pH till 2002
683673	154083	Stensjön	6	ingen, svag2002
708619	162132	Remmarsjön	6	2002mars-april
744629	167999	Jutsajaure	5	5 år ingen surstöt

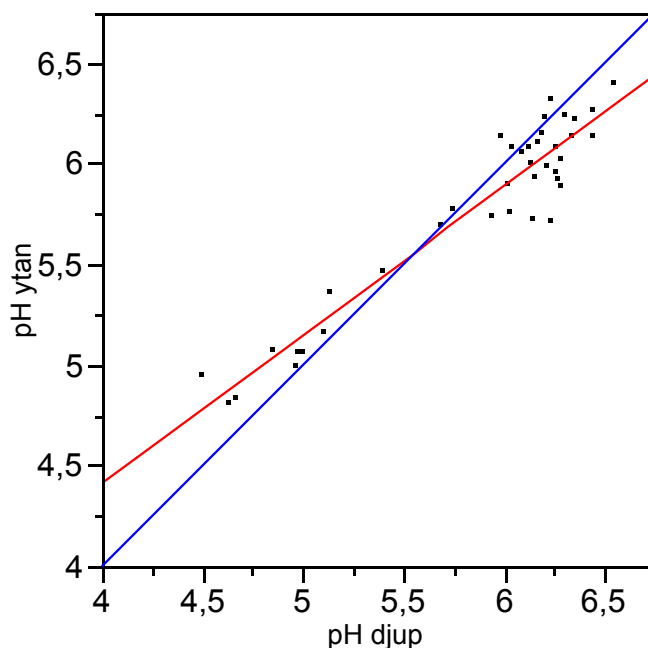
De intensivt undersökta sjöarna bör kunna ge en bild av eventuella surstötter trots att frekvensen under vintern är relativt låg. Provtagning under isläggning gjordes vid 40 tillfällen i 9 sjöar. Utav dessa var pH-värdet i ytvattnet lägre än i djupare vatten vid 24 tillfällen (figur 16).



Figur16. Skillnader i pH-värde mellan ytprov och djupare prov vid 40 tillfällen i 9 referenssjöar under isläggning. Tillfällen med lägre pH-värden i ytvattnet markerade i mörkgrönt.

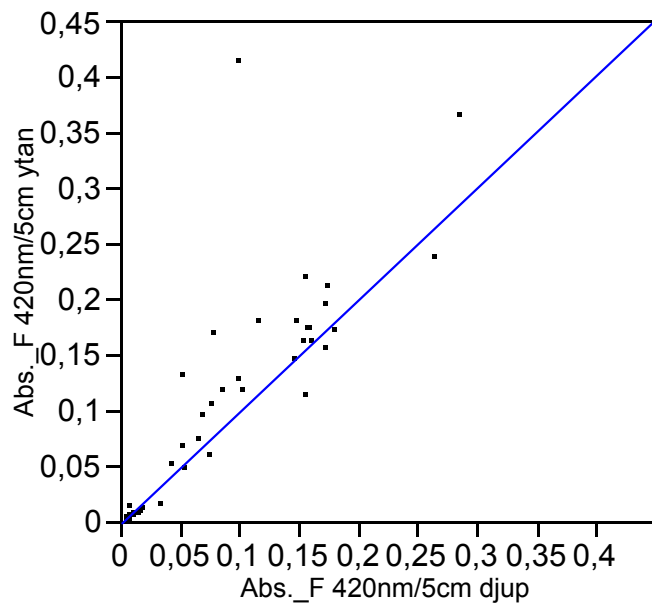
Den högsta positiva pH-skillnaden uppmättes i Ö. Särnamannasjön 1999 och den tycks bero på en mycket mindre nitrathalt i ytvattnet. Skillnaden mellan djupen kan förklara nästan hela ökningen i alkalinitet.

Det är tydligt att suraste sjöarnas ytvatten snarast har ett högre pH-värde i ytvattnet, medan de svagt sura har lika eller lägre pH-värden (figur 17). De svagt sura sjöarna tillförs numera oftast ett mindre surt smältvatten.



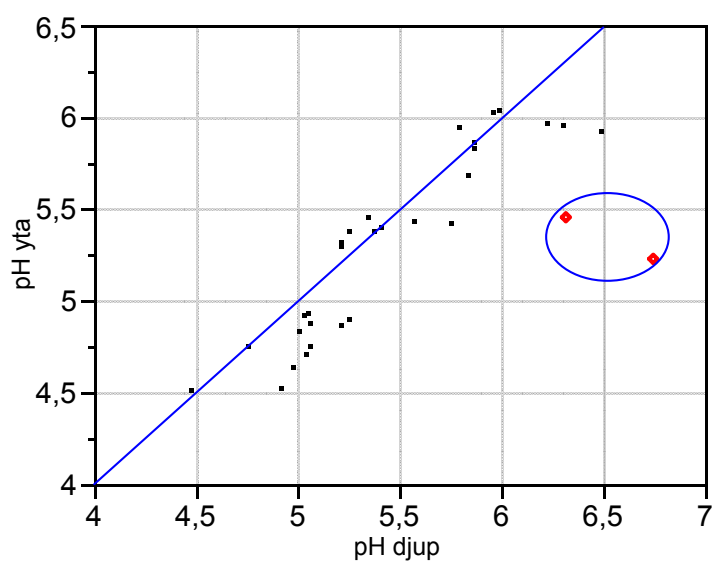
Figur 17. pH-värden i ytvatten i förhållande till djupvatten vid 40 tillfällen i 9 referenssjöar under isläggning.

Orsaker till de lägre pH-värdena i ytvattnet kan bara säkerställas för 13 tillfällen då fullständig analys gjorts på både yt- och djupvatten. Endast vid fyra av tillfällena skulle en högre sulfathalt i ytvattnet kunna vara orsaken till ett lägre pH-värde. Istället tycks de lägre pH-värdena främst ha orsakats av tillförsel av sura, bruna humusämnen (figur 18).



Figur 18. Vattenfärg (absorbans) i ytvatten i förhållande till djupvatten vid 40 tillfällen i 9 referenssjöar under isläggning.

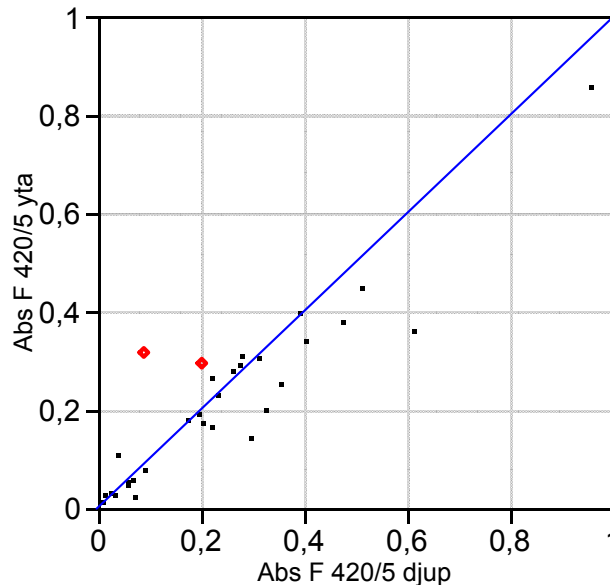
För att få ett bättre underlag togs under 2006 prover förhållandevis sent på vårvintern och dessutom på två djup i 83 referenssjöar. 35 av dessa hade ett minimum-pH <6,0. Vattentemperaturen användes för att få en bild av skiktningförhållandena (under isen). I 31 sjöar var skillnaden >0,2° C och dessa utvärderades ytterligare. Det krävs en skillnad på minst 05°C innan en inskiktning med surare vatten uppmäts. I de flesta fallen är skillnaden i pH-värden mellan ytvatten och djupare vatten obetydlig (figur 19).



Figur 19. Förhållandet mellan pH-värden i ytvatten och på 2 m djup i 31 referenssjöar provtagna mars-april 2006. Två sjöar med påtagligt surt ytvatten är markerade.

Endast två sjöar Blanksjön (623175 146111) i Blekinge och Nässjön (634180 133441) i Västra Götaland avviker med väsentligt surare ytvatten. I Blanksjön minskade

alkaliniteten med 0,46 mekv/l och i Nässjön med 0,16 mekv/l. Nässjöns ytvatten hade ett pH-värde på 5,47 mot 6,31 vid 2 m djup. En stor del att detta orsakas av utspädning. Kalciumhalterna minskade samtidigt med 0,41 respektive 0,16 mekv/l. Däremot förblev natriumhalterna ungefär konstanta. Endast i dessa två sjöar var halten organiskt material högre i ytvattnet.



Figur 20. Förhållandet mellan vattenfärg (absorbans) i ytvatten och på 2 m djup i 31 referenssjöar provtagna mars-april 2006. Två sjöar med påtagligt surt ytvatten är markerade.

Halterna av TOC var naturligtvis även de högre i ytvattnet; i Blanksjön i det närmaste en fördubbling från 11,9 till 22,7 mg/l i Nässjön hade bottenvattnet en TOC-halt på 10,2 mot 12,8 mg/l i ytvattnet.

Orsaker till surstötter

Förutsättningarna för en surstöt i en sjö är: is, sur nederbörd och ett relativt stort tillrinningsområde. Sjön måste vara islagd för att surt tillrinnande vatten skall skiktas in ytligt och inte neutraliseras. För att det skall bli ett så tjockt skikt av smältvatten måste smältvatten tillföras från ett relativt stort område.

Hur mycket nederbörd behövs? Vi antar att effekten på biota i sjön sker när sura skiktet är 0,5 m tjockt. Om snötäcket är 50 cm motsvarar det 50 mm vatten. Då krävs ett avrinningsområde som är 10 gånger större än sjöns yta. Deposition av stark syra har under en 20-års period minskat med ca 70-80%. Deponerad sulfat har liten effekt på sjöns pH-värde. Förhållandet till sulfat är svagt negativt och antyder alltså en viss effekt av stark syra (Wilander 2001). Kalkningspåverkan framgår av den, om än svaga, positiva korrelationen mellan pH-värde och Ca. Högre halter av humussyra (vattenfärg mätt som absorbans) sammanfaller med högre pH-värden. Detta sammanhänger med att vatten med hög humushalt kommer från sjöns kalkade omgivningar; alltså blir förhållandet omvänt mot det förväntade. De genomgående svaga korrelationerna torde bero på effekter av kalkningarna. Kalkning i tillrinningsområdet förhindrar således de mest kraftiga och omfattande surstötterna. Sulfathalterna var som regel lägre i ytvattnet, men i de fall de var högre var samtidigt pH-värdet lägre. Typiska exempel på sådana är Älgarydssjön (140731, 633989) och Älgsjön (153234, 655275), båda belägna i sydöstra delen av

Sverige. Älgarydssjön är kraftigt sur med pH-värden på 4,86 och 5,21 i yt- respektive djupare vatten. Älgsjön hade däremot 5,92 i ytvattnet och 6,49 på 2 m djup.

Betydelsen av organiska syror tycks vara bättre att följa som absorbans (filtrerat) än som TOC. Även om merparten organiskt material är i lösning i sjövattnet så ger vattenfärgen (absorbansen) tydligen ett säkrare mått på organiska syror. Utav de nio sjöar som hade en högre vattenfärg i ytvattnet så var pH-värdet lägre i sju av dessa.

5. Biologiska skador av surstötter i olika regioner i Sverige

Enligt de översiktliga sammanställningar som gjorts t ex i samband med arbetet med revision av bedömningsgrunder kan konstateras att en måttlig förändring av pH, på 0,4 enheter, ger en tydlig förändring av bottenfaunans sammansättning, om denna beräknas t ex med surhetsindex enligt Henriksson-Medin (Fölster 2006). Sambandet är tydligast vid pH-värden runt 5,6. Enligt det relativt fåtaliga dataunderlaget kan det finnas en tendens att vattendragen påverkas något mer än sjöar vid motsvarande pH-sänkning (Fig.21). En dylik måttlig pH-förändring är vanligt förekommande i såväl kalkade som okalkade vattendrag i samband med episoder under höglödesperioder. Det finns alltså förutsättningar för en negativ påverkan på känsliga arter av bottenfauna i många vattendrag.

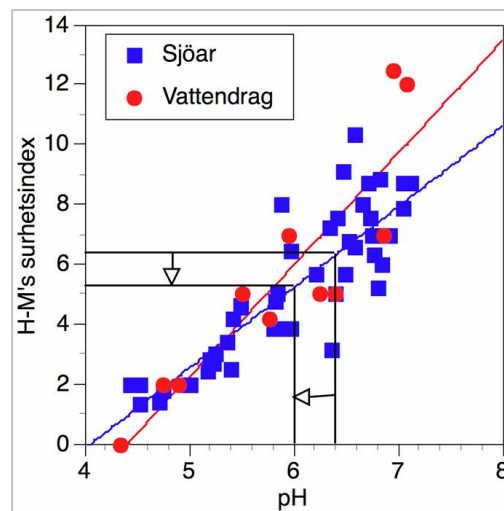


Fig.21. Samband mellan Henriksson-Medins surhetsindex och pH i sjöar och vattendrag i södra Sverige. En pH-förändring på endast 0,4 enheter motsvarar ungefär en förändring i en enhet i surhetsindex (Fölster 2006).

Enligt IKEU-rapporten om episoder (Andrén 2005) ger kvoten Ephemeroptera/Plecoptera med antal taxa och med antal individer en god klassificering ($p < 0.01$) för bottenfaunan. De index som användes i nuvarande bedömningsgrunder - antal arter respektive Medins försurningsindex - fungerar dock sämre i detta sammanhang. Vår bottenfauna har ett starkare samband till lägsta pH sedan föregående höst än bottenfaunan som är provtagen på hösten. I denna delgrupp med prover så ger den kvalitativa M42-metoden en bättre

Vid den fortsatta undersökningen av episoder i dessa och andra vattendrag under 2005-2006 utvärderades data på bottenfauna och bentiska kiselalger (Andrén 2006). Vi den tidigare ovannämnda studien visades att kvoten Ephemeroptera/Plecoptera kan användas för att skilja vattendrag med pH <5,5 från sådana med min pH 6,0 eller mer. Om kvoten är <0,5 kan vattendraget anses ha varit utsatt för pH <5,5. I bedömningsgrunder för försurning anges att Medins index under 6 indikerar måttlig till kraftig inverkan av surhet. I fig. 23 och 24 är vattendragen sorterade i stigande ordning efter dessa båda index. Markeringen av de två kritiska gränserna är markerade i figuren, varvid kan konstateras att nästan hälften av vattendragen ligger under Medins index 6 och ca en tredjedel under Ephemeroptera/Plecoptera-kvot <0,5. Bland dessa finns även några kalkade vattendrag. Se vidare tab.1 (sid.18) för sammanställning av index för de vattendrag som ligger under gränserna samt för vattenkemin.

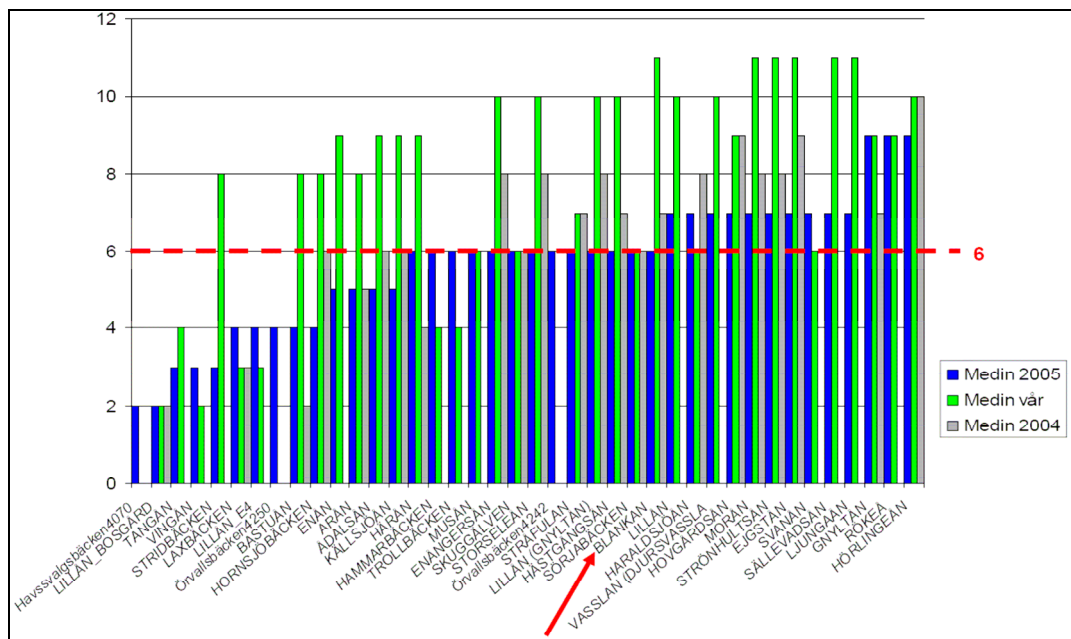


Fig. 23. Medins index för bottenfauna 2004-2005, vattendragen är sorterade efter ökande index hösten 2005 (Andrén 2006).

Förutom bottenfauna användes även bentiska kiselalger som indikatorer på pH-nivån i vattendragen (fig.25). Denna metod har tidigare testats i referensvattendrag och i kalkade vattendrag t ex inom arbetet med revision av bedömningsgrunder för försurning och visat sig ge en tillförlitlig bedömning av försurningstillståndet i vattendrag (Andrén och Jarlman 2005).

Resultaten visar att ett ansenligt antal av vattendragen hamnar under index 6, som är liktydigt med pH värden under 6,4 och några även under 4, vilket motsvarar min pH på 5,6. De lägsta indexvärdena återfinns som väntat i sura referensvattendrag, men de kalkade vattendragen Skuggälven, Rökeå, Haraldssjöån, och Blankan har index under 6 (Andrén 2006).

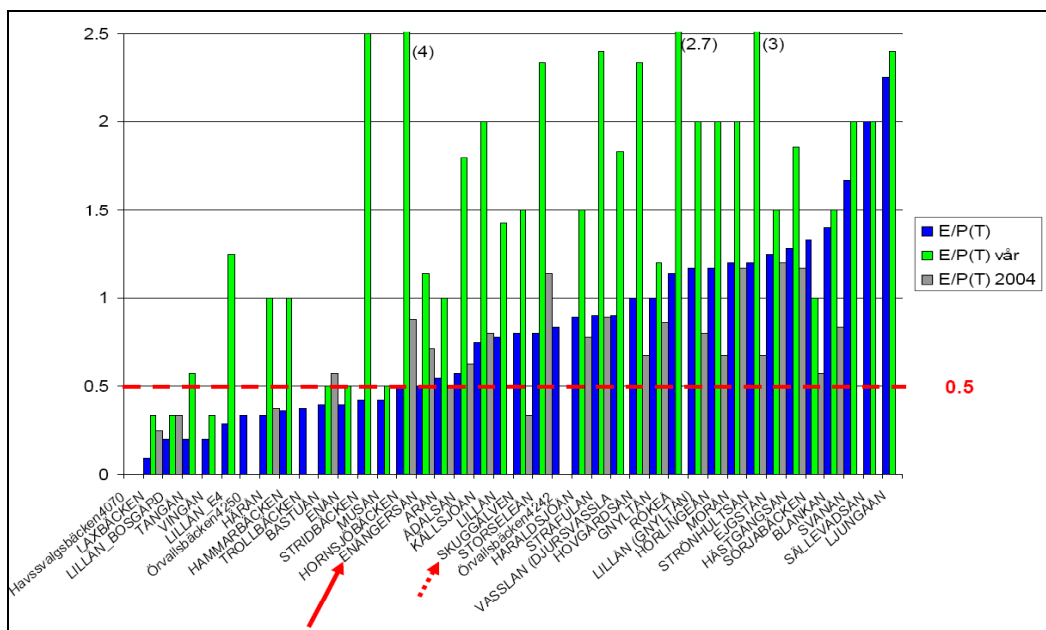


Fig. 24. Kvoten Ephemeroptera/Plecoptera 2004-2005, vattendragen är sorterade efter ökande kvot hösten 2005 (Andrén 2006).

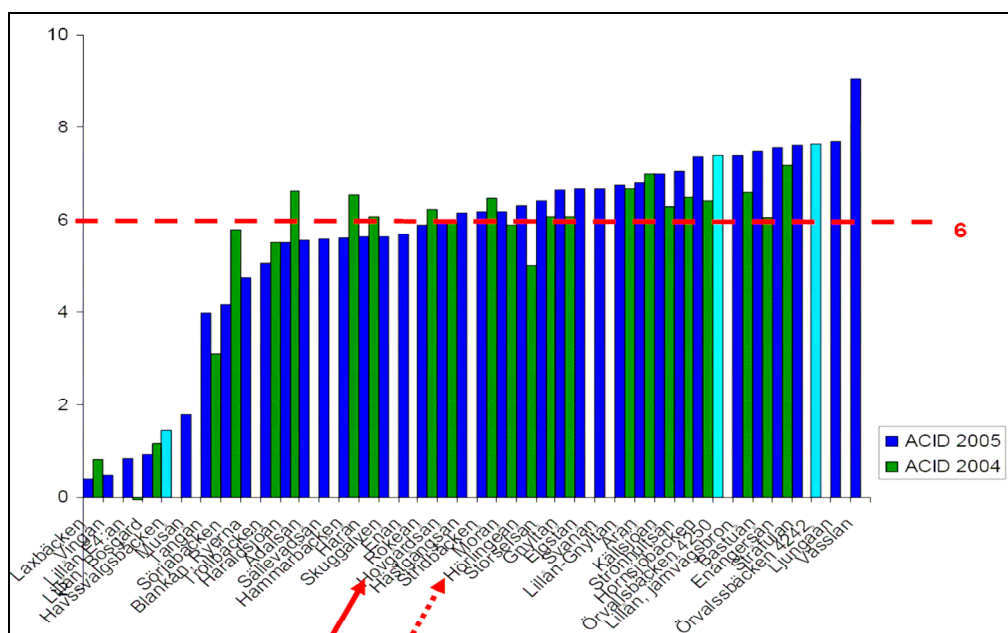


Fig. 25. Bentiska kiselalger i rinnande vatten 2004-2005, sorterade efter ökande surhetsindex ACID för 2005 (Andrén 2006).

Vid en omfattande inventering av Västerbottens fjällområden under 1989-1992, konstaterades att ca hälften av de 200 undersökta lokalerna visade tecken på sura episoder i form av försämrade öringreproduktion. Bottenfaunan i fem olika regioner uppvisade försurningsskador (Ahlström et al., 1997). Detta visar att inte heller de nordliga fjällområdena undgick att drabbas av skadliga episoder under 1980-1990 talen,

trots den relativt stora minskningen av svaveldepositionen som ägt rum sedan 1980-talets början.

Index 4-arter av bottenfauna (arter som inte tål $\text{pH} < 5,5$) återfanns på mindre än 20% av totalt 84 lokaler i Västerbottens län innan kalkningar startades före 1990. Sedan dess har en successiv förbättring noterats och idag återfinns dessa arter på 89% av lokalerna, vilka är kalkade med våtmarkskalkning eller med doserare. Under perioden 2000-2004 skedde en kontinuerlig resultatförbättring och resultatet 2005 antyder att förhållandena har stabiliserats på en hög nivå (Ahlström et al., 2006).

I en omfattande inventering av 1500 vattendrag i Norrlands inland och fjälltrakter 1989-1992, konstaterades skador på bottenfaunan i 38 % av vattendragen, i första hand i klarare vatten. Resultaten indikerade här att pH underskridit 5,4. Få rödlistade arter påträffades i inventeringen. Av 399 insamlade taxa svarade 25 st för 80 % av totala individantalet. I 23 % av vattendragen saknades öringreproduktion vilket pekade på att pH hade varit 5,0-5,4. En sammanslagen bedömning utifrån kemi och biologi pekade på klara försurningsskador på 11 % av undersökt areal och möjliga skador på 23 % av arealen. Områdena med klara försurningsskador återfanns i Dalarnas, Jämtlands och Västerbottens län (Ahlström et al, 1995).

Vid en jämförelse av bottenfaunans status under 1976-83 med förhållandena 1990 konstaterades att försurningssituationen inte hade förändrats märkbart i vattendragen i inlandet i Västerbottens och Norrbottens län. Försurningskänsliga arter var lika frekventa 1990 som tidigare. Detta trots att svaveldepositionen bör ha minskat även över detta område under denna period. Resultat från angränsande regioner i söder, väster och öster om det undersökta området visade dock tilltagande försurningsskador under motsvarande period (Engblom och Lingdell 1990).

Sammanfattningsvis kan alltså konstateras att det finns anledning att befara att en stor del av vattendragen i landet, trots kalkning med olika metoder, kan ha en störd bottenfauna och fisksamansättning. Den uppföljning och miljöövervakning som löper har dock oftast för låg provtagningsfrekvens för att upptäcka kortvariga sura episoder, med hjälp av vattenkemiska analyser. Biologiska undersökningar såsom provtagning av bottenfauna och påväxtalger (kiselalger) är då ett viktigt sätt att påvisa att skadliga sura episoder har förekommit, även om det inte ger information om frekvensen och intensiteten av dessa.

6. Kalkningsmetoder och uppföljning av rinnande vatten

6.1. Kalkningsmetoder

I en översikt om kalkdoserares funktion och kostnadseffektivitet i Sverige, konstaterade Naturvårdsverket 1996 att ca hälften av dessa då inte klarade att upprätthålla vattenkemiska mål i målområdena under högflödesperioder (Naturvårdsverket 1996). De uppkomna surstötarna var ofta långvariga pga för låg kalkdosering och driftstopp. Vidare konstaterades problem med att ställa in rätt kalkdosering, pga tekniska brister på doserarna. Slutsatserna grundade sig på doserare i drift 1994 varav många var av äldre modeller från 80-talet. Sedimentering av kalk nedströms doseraren förekom endast i undantagsfall i sådan omfattning att det utgör något problem. Tjällossning under våren, vilken gör vägarna oframkomliga, medför att ca 20-40 % av doserarna inte kan fyllas på under denna tid, vilket ställer krav på att lagerkapaciteten i kalksilon är tillräcklig.

Kalkning med doserare medförde generellt en minskad försurningspåverkan på bottenfaunan i nedströms liggande vattendrag. Från mitten av 1990-talet har en teknisk utveckling skett och idag är doserarna driftsäkrare och även beredskapen för underhåll är generellt bättre med serviceavtal etc.

Vid en tidigare undersökning på 80-talet av bottenfaunans diversitet och abundans i nio vattendrag med kalkdosere rapporterades varierande grad av förbättring i sju av dessa (Engblom och Lingdell 1985). I två av dessa fall, där behandlingen hade kombinerats med sjö- eller markkalkning, uppvisade bottenfaunan klara förbättringar, med förekomst av arter med toleransgräns pH 5,4 och högre. Sämre resultat uppnåddes som regel vid enbart doserarkalkning. Oftast förbättras förhållandena successivt nedströms doseraren, troligen pga ökad grumlighet allra närmast doseraren, vilket kan inverka negativt på bottenfaunan. Grumligheten minskar som regel efter några hundra meter till acceptabla förhållanden. Kalkbankar av varierande storlek konstaterades och spår av kalk kunde uppträda upp till två kilometer nedströms doseraren. De direkta biologiska effekterna av grumlighet och kalkbankar bedömdes som små jämfört med den förbättring av bottenfaunan som konstaterades i flertalet av vattendragen. Kalkbankar kan dessutom ge ett visst skydd mot surt vatten vid tillfälliga driftstopp.

Bottenfaunan nedströms doserare bedömdes inte vara likvärdig med den i ej försurade vattendrag. Förhållandena var likväl bättre än de som rådde i försurade vattendrag med fler arter varav fler dokumenterat försurningskänsliga arter. Bästa förhållanden uppnåddes ju längre och mer omfattande kalkningsinsatserna hade varit. Skador på bottenfaunan noterades efter driftstopp under sura episoder (Engblom och Lingdell 1985).

Effekter på öring av vattenkemins fluktuationer under vårfloden studerades med fältförsök 2004 uppströms och nedströms en doserare i Stridbäcken, Västerbotten (Ahlström et al., 2006). Till skillnad från vid försöket uppströms doseraren avled ingen försöksfisk under studien nedströms doseraren. Medelhalten av aluminium på gälarna låg här på 14 µg/g för Gullspångsöring och 17 µg/g för Lögdeälvsöring. Motsvarande nivå för öringen ovan doseraren var 202 µg/g respektive 98 µg/g. Aluminium ackumulerades inte på gälarna och ingen fysiologisk stress kunde påvisas på försöksfisken nedströms doseraren. Trots att pH vid ett tillfälle var lägre än pH-målet på 6,0 åstadkom således kalkdoseren en effektiv avgiftning av vattnet och skapade en gynnsam vattenkvalitet för öring.

I syfte att studera effekter av driftstopp under vårfloden stängdes en doserare avsiktligt under våren 2004 (Ahlström et al., 2006). En doserare i Aspan i Nordmalings kommun stängdes av under 12 dygn under vårfloden 2004, varvid pH sjönk till 4,8. Halten av oorganiskt aluminium ökade till ca 50 µg/l med åtföljande ökning på gälarna hos öring som användes i försöket. Ingen fisk avled trots att halten av oorganiskt aluminium låg runt 80 µg/l och pH runt 4,7 under 3-4 dagar. I parallella försök i Stridbäcken, Västerbotten, avled försöksfisk vid likartade förhållanden, men först när aluminiumhalten på gälarna nådde upp mot 150 µg/g och plasmakloriden sjunkit till 70 mmol/L. Under försöksperiodens fyra sista dygn var pH ca 4,7, oorganiskt aluminium 80 µg/l, kalcium 0,04 mekv/l och TOC 13-14 mg/l. Uppenbarligen innebar inte detta en akuttoxisk miljö för försöksfisken. Med en likartad vattenkemi torde således ett doserarstopp på 3-4 dygn inte medföra förödande konsekvenser på ett öringbestånd. Försöksfisken visade också en bra förmåga till fysiologisk återhämtning och sannolikt medför en kortare surstöt ingen framtida försämring av gälfunktionen.

Resultaten av denna avsiktliga avstängning av en doserare innebär inte att surstötter i samband med driftavbrott är ofarliga för djurlivet. I försöket användes 2-årig öring, men ensam öring kan vara betydligt känsligare. Vid fältförsök under hösten 1998 avled årsungar redan under första dygnet vid likartade kemiska förhållanden som i detta försök. Korta surstötter kan naturligtvis också påverka andra känsliga djurgrupper såsom olika arter av dagsländor eller kräftdjur (Ahlström et al., 2006).

Ett alternativ till doserare som sedan slutet av 1980-talet har använts i allt större utsträckning är våtmarkskalkning. Ur vattenkemisk synvinkel är den effektiv och ger relativt god varaktighet. Om den föregås av noggrann rekognosering och kalkdoserna koncentreras till grundvattnets utströmningsområden kan doserna hållas relativt låga. Metoden har fördelen att minska metallutlakningen från försurade marker så att metallbelastningen på vattendragen minskar. Goda exempel på detta finns t ex från vattendrag i Lofsdalen i Härjedalen, där de tidvis mycket höga koncentrationerna av järn, mangan och aluminium som uppträdde vid högflöden minskade påtagligt efter det att kalkningen inleddes (se t ex Borg et al., 1995, 2001).

Våtmarkskalkningar har emellertid också nackdelar, fr a för markvegetationen. Vitmossor, levermossor och lavar kan slås ut och konkurrensförhållanden ändras så att starr, tuv- och ängsull ökar. En annan effekt av våtmarkskalkning är att botten blir mindre tillgängligt för upptag i träden och bristsjukdomar kan uppträda på tall och gran, vilket har dokumenterats i Västerbotten (Ahlström, 2006). En annan nackdel vid användning av kalkstensmjöl för våtmarkskalkning och spridning från helikopter, är att damningen gör att kalken sprids med vinden även utanför det avsedda området. För att råda bot på detta har man under de senaste åren allmänt övergått till granuler (små kalkkuler) vilket gör att kalkförbrukningen minskar i och med att förlusterna blir mindre och kalkningen mer effektiv.

Att åstadkomma en jämn vattenkvalitet utan stora pH-variationer genom kalkning i vattendrag med ofta kraftigt varierande vattenföring och därmed varierande vattenkemi med återkommande surstötter är inte utan problem. Ofta är en kombination av flera metoder nödvändig och det är också mycket vanligt i många målobjekt. I den ovan citerade studien av bottenfauna nedströms doserare (Engblom och Lingdell 1985) konstaterades mycket riktigt också att den bästa statusen uppnåddes på lokaler som kalkats länge och även gynnats av kalkningar med andra metoder exempelvis i uppströms belägna sjöar.

Uppströms kalkning i en sjö gynnar givetvis vattendraget nedströms men de positiva effekterna minskar med ökande avstånd och begränsas också av eventuella biflöden med surare vatten, varför episoder kan uppträda längre nedströms (jfr fig från Skuggälven ovan). Denna åtgärd är alltså inte alltid tillräcklig, utan måste ofta kompletteras med doserare eller våtmarkskalkning. Det effektivaste är i allmänhet en kombination av dessa två åtgärder, eftersom våtmarkskalkningen bidrar till att binda aluminium och andra metaller kvar i marken. Förutsättningen är givetvis att ovan beskrivna nackdelar med våtmarkskalkning kan bemästras och att en sådan behandling av det aktuella området kan anses acceptabel.

I nuvarande Handbok för kalkning av sjöar och vattendrag skrivs att:

”Sjökalkning är mindre lämpligt för att motverka påverkan från surt tillrinningsvatten på grunda bottenar och ytligt sjövatten. En särskilt känslig tid är vintern islagda period och

snösmältning”. I exempelvis Bösjön inom IKEU-projektet har sjökalkningen kompletterats med våtmarkskalkning, liksom i många andra objekt. Denna åtgärd har tydligen bidragit till att någon allvarlig surstöt inte uppträdde, åtminstone inte 2001 när den specialstuderades. De sura förhållandena i mer centrala delar av sjöns ytvatten torde bero på snösmältningen direkt på sjön. Sådana förhållanden, åtminstone i den omfattning som observerades i Bösjön, har mindre betydelse för biota i littoralzonen. Genom kalkning på sjöisen kan dylika problem eventuellt undvikas.

6.1.1. Rekommendationer

- För målområden i vattendrag eller nedströms näraliggande sjöar är kalkning med doserare lämplig. Denna bör vara utrustad med elektronisk reglering av kalkdoseringen, med automatisk styrning via vattennivån. Den bör också vara försedd med larm med fjärranslutning vid driftstopp, samt serviceavtal för regelbunden tillsyn.
- Våtmarkskalkning är en effektiv metod för att åstadkomma en jämn vattenkvalitet. På detta sätt kvarhålls Al och andra metaller i marken och belastar därmed inte vattendraget i samma utsträckning vid surstötar. Förutsättningen är givetvis att våtmarken kan anses tåla spridningen av kalk och att oavsiktlig spridning genom damning minimeras, t ex med användning av granuler.
- Ett komplement eller alternativ till doserare eller våtmarkskalkning kan vara att sprida grövre kalkfraktioner direkt i vissa strömsträckor, något som har visats ge god effekt med lång varaktighet på en del håll.
- Sjukalkning som enda åtgärd för att skydda nedströms liggande vattendragssträckor kan ha begränsad effekt med ökande avstånd från sjön. Om vattendraget är målområde bör åtgärden kompletteras med bäck-, våtmarks- eller doserarkalkning.
- För att skydda såväl vattendrag som sjöar från sura episoder är en kombination av flera metoder oftast det säkraste sättet för att uppnå bästa måluppfyllelse. För vattendrag kombineras lämpligen doserar- och våtmarkskalkning och för sjöar kombineras sjukalkning med strand- våtmarks- eller uppströmskalkning med doserare.

6.2. Effekttuppföljning

En genomgång av det befintliga datamaterialet gällande uppföljning av kalkningsåtgärder i svenska vatten visar tydligt på bristerna i materialet vad gäller dokumentation av kalkningens effektivitet för att motverka sura episoder. Detsamma gäller den nationella miljöövervakningen av vattendrag när det gäller att dokumentera sura episoder. Generellt är provtagningsfrekvensen för låg och inte optimalt fördelad under året. I bästa fall tas prover månadsvis vilket gör att merparten av tillfälliga flödestoppar med extrem vattenkemi missas. Sammantaget ger alltså inte resultaten en representativ bild av de verkliga förhållandena i vattendragen. Den översiktliga bild som går att få fram ur databasen för kalkningsuppföljning t o m 2005 ger alltså sannolikt en alltför positiv bild av förhållandena i rinnande vatten.

En mer flexibel provtagning med förtätning under högflödesperioder skulle ge ett säkrare underlag. I större miljöövervakningsprogram kan detta givetvis vara lite svårare att genomföra praktiskt och administrativt.

För att öka möjligheterna till tolkning av förloppen under episoder och till att klarlägga orsakerna till dessa, är det också nödvändigt att det vattenkemiska analysprogrammet byggs ut med jonbalans och TOC (totalt organiskt kol). Detta är också en förutsättning för att kunna använda datamodeller såsom MAGIC för utvärdering och prognoser. Ur ekotoxikologisk synvinkel och för att kunna utvärdera biologiska undersökningar tillfredsställande är det väsentligt att oorganiskt aluminium finns med i analysprogrammen, speciellt i vattendrag. Biologisk uppföljning är givetvis central för att bedöma effekten av insatta kalkningsåtgärder. Vid sidan av de traditionellt använda metoderna med bottenfauna och elfisken, har även undersökningar av bentiska kiselalger visat sig ha ett bra indikatorvärde när det gäller att bedöma vattnens försurningsstatus.

6.2.1. Rekommendationer

- Anpassa provtagningsprogrammen, med förtätning under högflödesperioder, för att bättre dokumentera sura episoder. En ökning från månadsvis till veckovis provtagning är att rekommendera. I södra Sverige inträffar högflöden förutom under våren ofta även under december-februari, medan sura episoder längre norrut oftast är mer koncentrerade till vårfloden vid snösmältning. Behovet ser alltså lite olika ut i olika delar av landet.
- Det vattenkemiska analysprogrammet bör utökas, åtminstone under högflödesperioder och vid några tillfällen under basflödet, till att omfatta jonbalans (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^+), TOC (totalt organiskt kol) och oorganiskt aluminium.
- Biologisk uppföljning av effekter av sura episoder bör genomföras årligen i vattendrag. Speciellt gäller detta givetvis i områden som fortfarande har syradeposition över kritisk belastningsnivå och med kraftig markförsurning. Förutom elfisken efter t ex 1+ och 2+ öring, samt provtagning av bottenfauna, bör även bentiska kiselalger inventeras årligen.

7. Referenser

- Ahlström, J., Isaksson, K.E., 1990. Försurningsläget i Norrlands inland och fjälltrakter. Naturvårdsverket, rapport 3781, 136 s.
- Ahlström, J., Degerman, E., Lindgren, G., Lingdell, P.E. 1995. Försurning av små vattendrag i Norrland. Naturvårdsverket, rapport 4343, ISBN 91-620-4343-9, 129 s.
- Ahlström, J., Bondestad, L., Norberg, M., 1997. Försurning av vattendrag i Västerbottens läns fjällområde. Länsstyrelsen i Västerbottens län, meddelande 6, 1997.
- Ahlström, J., Andersson, S., Lindgren, L., Norberg, M., Owusu-Ansah, E. 2006. Försurning och kalkning av sjöar och vattendrag i Västerbottens län - Årsrapport 2004. Länsstyrelsen Västerbottens län, ISSN 1652-3229.
- Ahlström, J. 2006. Försurning och kalkning av sjöar och vattendrag i Västerbottens län - Årsrapport 2005. Länsstyrelsen Västerbottens län, ISSN 1652-3229, 45 s.

- Andersson, P., Nyberg, P. 1984. Experiments with brown trout (*Salmo trutta* L.) during spring in mountain streams at low pH and elevated levels of iron, manganese, and aluminium. *Rep. Inst. Freshw. Res., Drottningholm*, 61, 34-47.
- Andrén C. 2005. Studier av episodisk försurning i IKEU-projektet. ITM-rapport 144, ISSN 1103-341, Stockholms universitet, 41 s.
- Andrén, C. 2006. IKEU-Specialprojekt S9 – Episoder i vattendrag. Inst för tillämpad miljövetenskap (ITM), Stockholm universitet, 2006 12 15, 13 s.
- Andrén, C., Jarlman, A. 2005. Bentiska kiselalger som surhetsindikatorer i rinnande vatten. ITM-rapport 149, Stockholms universitet, 47 s.
- Bishop, K., Laudon, H. & Köhler, S. 2000. Separating the natural and anthropogenic components of spring flood pH decline: A method for areas that are not chronically acidified. *Wat. Resour. Res.* 36:1873–1884.
- Björnberg, B. 1983. Dilution and acidification effects during the spring flood of four Swedish mountain brooks. *Hydrobiologia* 101, 19-26.
- Björnberg, B. 1986. Försurning i Tärnafjällen, Lappland - Kemisk undersökning av mindre vattendrag och av snö i samband med vårfloдера 1980-1984. Naturvårdsverket rapport 3149.
- Borg, H., Andersson, P., Nyberg, P., Olofsson, E., 1995. Influence of wetland liming on water chemistry of acidified mountain streams in Lofsdalen, central Sweden. *Water, Air, and Soil Pollut.* 85: 907-
- Borg H., Ek, J., Holm, K. 2001. Influence of acidification and liming on the distribution of trace elements in surface waters. *Water, Air and Soil Pollut.* 130, 1757-1762.
- Davies, T.D., Tranter, M., Wigington Jr, P.J., & Eshleman, K.N. 1992. 'Acid episodes' in surface waters in Europe. *J. Hydrol.* 132:25–69.
- Dickson, W. 1980. Properties of acidified waters. *Proc. Int. Conf. Ecol. Impact acid precip.* Norway. SNSF pp. 75–83.
- Dickson, W. 1983. Liming toxicity of aluminium to fish. *Vatten* 39:400-404.
- Dickson, W. 1986. Kalkning av sjöar och vattendrag. I: Kalkning av sjöar och vattendrag. Kalkningsmäsia i Hagfors 3-5 oktober 1985. Naturvårdsverket Rapport 3167. p 3–18.
- Dietrichson W. 1978. Regional sjöundersökning i Skellefteå kommun med omnejd. 1. pH-förhållanden och något om dess orsaker. Naturvårdsverket SNV PM 1015, 47 s.
- Driscoll, C.T., Ayling, W.A., Fordham, G.F. & Oliver, L.M. 1989. Chemical response of lakes treated with CaCO₃ to reacidification. *Can. J. Fish. Aquat. Sci* 46:258–267.
- Engblom, E., Lingdell, P.E. 1985. Hur påverkar kalkdoserare bottenfaunan? Naturvårdsverket, SNV PM 1994. 81 s.
- Engblom, E., Lingdell, P. E. 1990. Försurningsutvecklingen i Norrlands inland. Naturvårdsverket rapport 3835. ISBN 91-620-3835-4, 41 s.
- Fölster, J. 2006. Bedömningsgrunder för försurning i sjöar och vattendrag - Preliminärt förslag för cirkulation. Institutionen för Miljöanalys, SLU, 060331.
- Galloway, J.N., Schofield, C.L., Hendrey, G.R. Peters, N.E & Johannes, A.H. 1980. Sources of acidity in three lakes acidified during snowmelt. *Proc.Int. conf. Ecol. Impact acid precip. Norway. SNSF* pp. 264-265.
- Grahn, O. & Hultberg, H. 1977. Undersökningar i samband med kalkning av sjöarna N. Baksjön, Övern, Lången, V:a Rödvattnet, Runnsjön och St Hällsjön i Arvika och Torsby kommuner, Värmlands län. IVL.
- Hasselrot, B., Andersson, I.B., Alenäs, I. & Hultberg, H. 1987. Response of limed lakes to episodic acid events in southwestern Sweden. *Water Air Soil Poll.* 32:341–362.

- Henriksson, L. 1988. Effects on water quality and benthos of acid water inflow into the limed Lake Gårdsjön. In: Liming of Lake Gårdsjön (ed. W. Dickson). National Swedish Environmental Protection Board. Report 3426 pp. 309–327.
- Hindar, A., Henriksen, A., Kaste, Ø., and Tørseth, K. 1995. Extreme acidification in small catchments in southwestern Norway associated with a seasalt episode. *Water Air Soil Pollut.* 85: 547-552.
- Hindar, A., Tørseth, K., Henriksen, A., and Orsolini, Y. 2004. The significance of the North Atlantic oscillation (NAO) for sea-salt episodes and acidification-related effects in Norwegian rivers. *Environ. Sci. Technol.* 38, 26-33.
- Johannesen, M., Henriksen, A. 1978. Chemistry of snow meltwater: Changes in concentration during melting. *Wat. Resour. Res.* 14:615–619.
- Johannesen, M., Skartveit, A. & Wright, R.F. 1980. Streamwater chemistry before, during and after snowmelt. *Proc. Int. Conf. Ecol. Impact acid precip. Norway. SNSF* pp. 224-225.
- Laudon, H. 2000. Separating natural acidity from anthropogenic acidification in the spring flood of northern Sweden. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria* 160.
- Laudon, H., Westling, O., Poléo, A., Vollestad, L.A. 2001. Naturligt sura och försurade vatten i Norrland. Naturvårdsverket rapport 5144, 115 s.
- Laudon H., Bishop K. H. 2002. The rapid and extensive recovery from episodic acidification in northern Sweden due to declines in SO_4^{2-} deposition. *Geophysical Res. Letters*, 29.
- Laudon, H. 2003. Vidareutveckling av episodmodellen – uppdragsprojekt åt Naturvårdsverket. Inst för skogsekologi, SLU, Umeå, 27s.
- Laudon, H., Westling, O. 2003. Surstötter i södra Sverige: frekvens och omfattning. Uppdragsprojekt åt Naturvårdsverket, 2003. 9 s.
- Lohammar, G. 1938. Wasserchemie und höhere Vegetation schwedischer Seen. *Symbolae Botan. Upsaliensis*, 3, 1-22.
- Länsstyrelsen, Västra Götaland, 2002. Försurningssituationen i rinnande vatten Västra Götaland. Länsstyrelsen, Västra Götaland, 2002:21
- Naturvårdsverket 1996. Kalkdoserare – en metod att kalka sjöar och vattendrag. Naturvårdsverket rapport 4627. ISBN: 91-620-4627-6, 120 s.
- Naturvårdsverket 2002. Kalkning av sjöar och vattendrag. Handbok 2002:1, 96 s. ISBN: 91-620-0115-9.
- Rydgård, M., Brodin, Y.W., Nilsson, A.N., Olsson, T. I. 1985. Insektsfaunan i en extremt sur sjö i Norrbottens kustland. *Ent. Tidskr.* 106, 133-138. ISSN 0013-886x.
- Skjelkvåle, B.L., Borg, H., Hindar, A., Wilander, A. 2006. Large scale patterns of chemical recovery in lakes in Norway and Sweden; importance of seasalt episodes and changes in dissolved organic carbon. *Appl. Geochem.* (in press).
- Vallin, S. 1953. Zwei azidotrophe Seen im Küstengebiet von Nordschweden. *Annual Report 1952. Inst. Freshwater Research, Drottningholm, Report 34.* Fishery Board of Sweden.
- Wigington, P.J., DeWalle, D.R., Murdoch, P.S., Kretser, W.A., Simonin, H.A., Van Sickle, J., Baker, J.P. 1996. Episodic acidification of small streams in the Northeastern United States: ionic controls of episodes. *Ecological Applications*, 6, 389-407.
- Wilander, A. 2001. Surstötter i kalkade sjöar. *Vann*, 36, 4B, 471-476,