

2a:4b

Kalkningseffekter på kvicksilver i fisk

FÖRFATTARE

Marcus Sundbom, ITM, Institutionen för tillämpad miljövetenskap, Stockholms universitet

2a:4b

Kalkningseffekter på kvicksilver i fisk

FÖRFATTARE

Marcus Sundbom, ITM, Institutionen för tillämpad miljövetenskap, Stockholms universitet

INNEHÅLL

Sammanfattning 203

Inledning 203

Syfte 204

Provtagning, dissektion och analys 204

Resultat och diskussion 205

Kalkningseffekter 205

Jämförelser mellan perioderna före och efter kalkning 205

Trender 208

Andra källor till variation 210

Förslag till hur programmet kan förbättras och vad som bör ingå i en fördjupad utvärdering 212

Referenser 212

SAMMANFATTNING

Syftet med IKEUs program för kvicksilver (Hg) i fisk är huvudsakligen att studera långtidseffekter av kalkning på Hg-halter i sjöar. Årliga mätningar av kvicksilver i småabborre har ingått i IKEUs program sedan 1990. Ursprungligen ingick fyra kalkade sjöar. Under åren 1998–1999 och 2005–2007 tillkom ytterligare elva respektive sex sjöar. Sammanlagt omfattar Hg-programmet alltså 23 sjöar varav sex är okalkade referenser och en kalkavslutat 1995. I denna rapport har IKEUs insamlade data t.o.m. år 2007 utvärderats i syfte att undersöka kalkningens påverkan på koncentrationer av Hg i fisk (muskelprov av abborre på c:a 10 g och 1–2 år) genom att jämföra haltnivåer och tidstrender mellan olika sjökategorier och kalkningsmetoder. Data från IKEUs omfattande vattenkemiska och biologiska mätprogram har används för att försöka förklara observerade trender och andra variationsmönster. Utvärderingen är beställt av Naturvårdsverket och utgör ett underlag för IKEU-utredningen 2008.

- Hg-halter i abborre samvarierar främst med sjöns pH men även med totalt organiskt kol (TOC), delvis oberoende av pH.
- I de fem IKEU-sjöar där data finns tillgängliga från tiden före första kalkning ledde kalkningen till att Hg-halterna i abborre minskade med i genomsnitt 50 % efter fem år (medianhalter).
- Kvicksilverhalterna i kalkade sjöar ligger 10 eller 30 procent lägre än i referenssjöar beroende på vilket jämförelsematerial som används: parvis jämförelse av kalkade och okalkade sjöar nära varandra eller jämförelser mellan samtliga kalkade och okalkade objekt inom IKEU-programmet.
- Under perioden 1996–2007 förekommer det signifikant avtagande trender i flera sjöar i sydvästra Sverige. Sammantaget har avklingningen varit långsammare i referenssjöar än i kalkade sjöar men det kan bero på att det saknas referenssjöar i sydvästra Sverige där depositionsminskningarna varit störst.
- Det finns ett positivt samband mellan Hg-trender och temperaturtrender vilket kan betyda att ett allt varmare klimat riskerar bromsa återhämtningen från förhöjda Hg-halter i fisk.
- Mellanårsvariationen förklarar upp till 80 % av den totala observerade variationen inom en sjö men mellanårsvariationen visar inga signifikanta samband med enskilda variabler såsom temperatur, pH, syrgas, skiktningförhållanden, kalkdos, zooplanktonbiomassa eller mörttäthet.

INLEDNING

Höga halter av kvicksilver (Hg) i insjöfisk har varit ett känt miljöproblem sedan decennier. Tidigt uppmärksammades ett samband mellan vattnets surhet och halten Hg i fiskmuskel. Sambandet har dock varierat kraftigt mellan sjöar och de bakomliggande orsakerna till detta samband är sannolikt mycket komplexa eftersom det finns många processer i luft, mark och vatten som direkt eller indirekt kan påverka både pH och Hg i fisk (Richman *et al.*, 1988; Nelson & Campbell, 1991; Spry & Wiener, 1991). Likväl föddes en förhoppning om att halterna Hg i fisk kunde sänkas genom att höja vattnets pH och ett omfattande forskningsprojekt initierades där effekten av kalkning (och andra åtgärder) på kvicksilver i fr.a. gädda undersöktes. Projektet ”Kalkning-Kvicksilver” pågick 1986–1989, en för kort period för att kunna dra några säkra slutsatser har det i efterhand visat sig. Visserligen minskade halterna i småabborre med 30 % inom två år, och halterna i gädda förutspåddes minska 15–40 % inom fyra år efter kalkning (Håkanson *et al.*, 1990). Men senare uppföljningar av delvis samma sjöpopulation visade att resultaten inte var varaktiga vad gäller skillnader mellan kalkade och okalkade sjöar (Meili, 1995; Andersson & Lundberg, 1996). Slutsatsen var att halterna minskade lika mycket i båda sjökategorierna förutom i våtmarkskalkade sjöar där halterna förvånande nog inte hade sjunkit i motsvarande grad som i sjökalkade eller okalkade sjöar. I dessa undersökningar förekom också mycket stor skillnad i respons mellan olika sjöar inom kategorierna. Det gick således inte att på ett tydligt sätt belägga kalkningens effekt på kvicksilver i fisk utifrån dessa studier.

I efterhand visar resultaten på svårigheterna att studera temporala förändringar av kvicksilver i fisk. Variationen mellan såväl olika år som individuella fiskar är ofta stor och det krävs således långa tidsserier av mätningar på ett starkt standardiserat urval av tillräckligt många individer. Ett sådant upplägg har eftersträfvats inom IKEU där Hg-halter i fisk har analyserats sedan 1990 med syftet att studera långtidsutvecklingen i kalkade sjöar. Nackdelar med IKEUs Hg-program i jämförelse med projektet ”Kalkning-Kvicksilver” är att IKEU saknar möjlighet att styra kalkningsåtgärderna samt att mätdata för tiden innan kalkning ofta saknas. Å andra sidan ger IKEUs längre och mer homogena tidsserier betydligt bättre möjligheter till att studera skillnader och trender.

IKEUs delprogram ”metaller i fisk” omfattade ursprungligen fyra kalkade sjöar med årliga mätningar av kvicksilver i småabborre. Resultaten har de senaste sex åren publicerats i form av kortare PM som beskriver årets resultat och inkluderar även en

viss tillbakablick (t.ex. Sundbom *et al.*, 2004; finns att ladda ner från IKEUs hemsida). Valet av småabborre istället för i sammanhanget mer traditionella 1kg-gädda bottnade i att små fiskar är lättare att samla in i tillräcklig mängd och deras Hg-halter förväntas svara snabbare på förändringar. Dessutom hade liknande program pågått i dessa fyra sjöar redan innan dessa togs med i IKEU. Åren 1998–99 expanderade programmet med ytterligare 10 kalkade sjöar och, mycket viktigt, fyra referenssjöar. Under perioden 2005–2007 tillkom ytterligare 6 sjöar, både kalkade, okalkade och kalkavslutssjöar. Utöver småabborre har stor abborre och gädda samlats in c:a vart femte år från de fyra ursprungliga sjöarna för analys av Hg i muskel och Cd i lever. Inom IKEU har det även genomförts ett specialprojekt 2000–2001 om metallhalter i gålar hos öring i rinnande vatten. Varken det projektet eller de glesare provtagningarna av stor abborre och gädda, kommer att behandlas här, utan fokus ligger helt på utvärderingen av de täta tidsserierna av Hg i småabborre.

SYFTE

Syftet med denna studie är att undersöka hur kvicksilverhalter i insjöfisk har påverkats av kalkning. För att kunna göra detta är det nödvändigt att också undersöka andra orsaker än kalkning till variationer över tiden och skillnader mellan sjöar. Eftersom detta utgör en underlagsrapport för IKEU-utvärderingen finns det mellan raderna även ett övergripande syfte, nämligen att undersöka om programmet är tillräckligt väl utformat för att kunna uppfylla dess syften.

Alltså kan denna rapport's syfte sammanfattas i följande punkter:

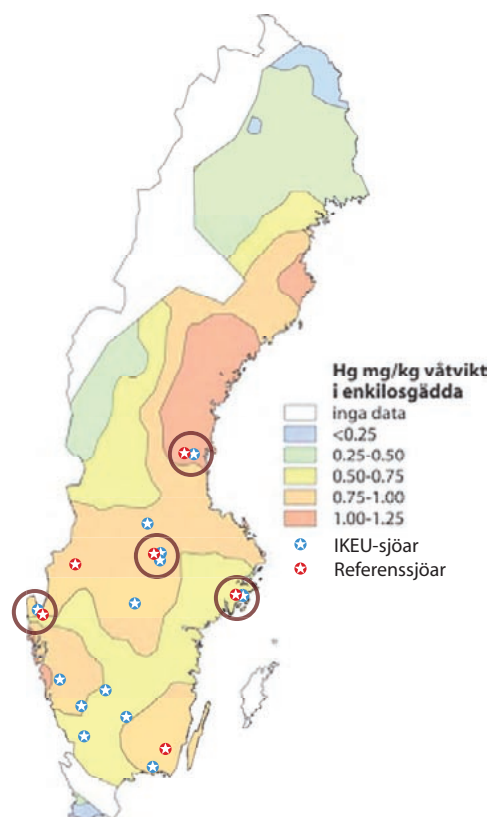
- Kalkningseffekter
- Långtidstrender
- Något om andra orsaker till variation
- Rannsaking av programmets upplägg och utvärdering.

PROVTAGNING, DISSEKTION OCH ANALYS

ITM ansvarade för insamling av fisk fram till och med 1997. Därefter har fisket utförts av Fiskeriverket i samband med ordinarie provfisken (se Wilander *et al.*, 2008 för detaljer om fiskemetoder). Provinsamlingarna har fått instruktioner om att välja ut c:a 35 abborrar (*Perca fluviatilis*) enligt en önskad storleksfördelning så långt som möjligt. Målsättningen har varit att få med främst åldrarna 1+ och 2+. Utvalda fiskar mäts, vägs och packas individuellt och levereras sedan i fryst tillstånd till ITM.

Av de levererade fiskarna görs ett urval av 20 individer. Urvalet görs utifrån fiskens längd och baseras på tidigare års storleksfördelning och empiriska samband mellan längd och ålder för varje sjö. Målsättningen är att få en så homogen tidsserie som möjligt avseende fiskens storlek och ålder. I samband med dissektion noteras kön och olika längder (total längd används här) och vikter och en representativ bit av ryggmuskeln tas ut och fryses omedelbart. Otoliter och gällock dissekeras fram och skickas till Fiskeriverket för åldersbestämning. Frysta prover frystorkas varvid torrsubstanshalten beräknas. Analys av Hg har utförts på frystorkat prov med ackrediterade metoder (se Bilaga 7 i Wilander *et al.*, 2008 för detaljer).

FIGUR 1. Sverigekarta med positioner för de kalkade och okalkade sjöar som ingår i IKEUs program för kvicksilver i fisk (1990–2006) i relation till genomsnittliga Hg-halter i gädda. Kartbildens zonindelning är från Åkerblom och Johansson (2008) och baseras på kvicksilverkoncentrationer i fisk från 2223 sjöar, normerade till enkilosgädda. Ringarna indikerar kalkade sjöar som har en lämplig referenssjö i närområdet och därmed lämpade för parvisa jämförelser. Observera att Övre Skärsjön i Bergslagen utgör referens till två närbelägna kalkade sjöar.



RESULTAT OCH DISKUSSION

Drygt 5000 fiskar är analyserade och årsmedelvärden för Hg-halter i småabborre varierade mellan c:a 50–500 ng Hg g⁻¹ fv. Storleksordningen är normal för svenska näringsfattiga skogssjöar. Baserat på kända halt-storlekssamband förväntas halterna i större abborre överstiga Livsmedelsverkets gränsvärden (500 ng g⁻¹ fv) i flera av sjöarna. Efter 1996 har halter över 500 ng g⁻¹ uppmätts i c:a 150 fiskar från främst Brunnsjön, Gyltigesjön, Källsjön och Stensjön (AB).

Kalkningseffekter

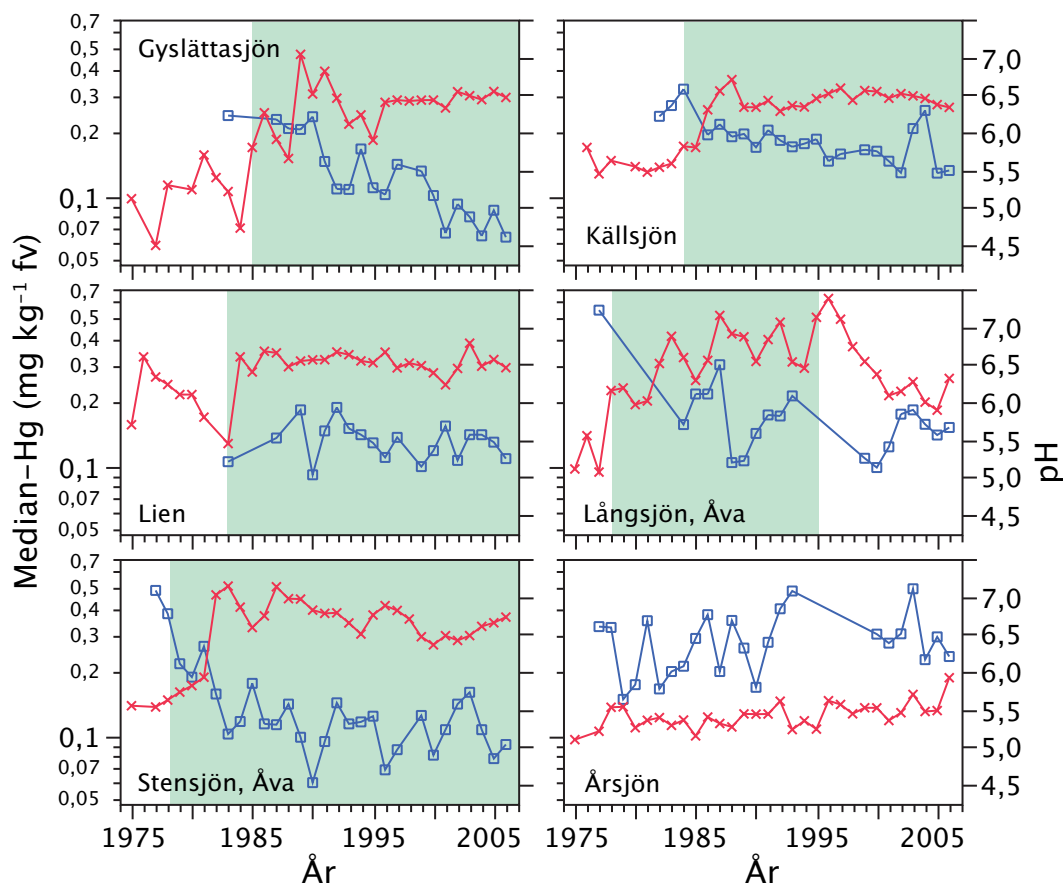
Effekter av kalkning på Hg i fisk kan i huvudsak studeras på två sätt. Antingen genom att följa haltutvecklingen under perioderna före och efter första kalkning, eller genom att jämföra kalkade sjöar med okalkade referenssjöar. Det förra tillvägagångssättet är naturligtvis att föredra eftersom man slipper bedöma huruvida referenserna är representativa. IKEU-programmet startades efter att kalkning redan

inletts vilket gör att vi här i första hand kan använda oss av jämförelser mellan olika sjökategorier.

Jämförelser mellan perioderna före och efter kalkning

I några av IKEU-sjöarna finns dock data även från tiden före kalkning. Dessa är Lien, Gylttasjön, Källsjön och Stensjön i Åva. Dessutom finns längre tidsserier i referenssjön Årsjön och kalkavslutssjön Långsjön, båda i Åvaområdet. I fyra av sjöarna förfaller Hg-koncentrationerna i abborre minska efter kalkning (Figur 2). Under den kalkade perioden ligger halterna i dessa sjöar kvar vid den lägre nivån, eller fortsätter att minska. I Långsjön som slutades kalkas 1995 har möjligen halterna stigit under tvåtusenålet parallellt med återförsurningen. Sett över en längre period ryms denna ökning inom den historiska variationen och det är därför svårt att med säkerhet fastställa om ökningen beror på återförsurningen. I Lien syns ingen effekt av kalkning på Hg i fisk, möjligen

FIGUR 2. Medianhalter av kvicksilver i småabborre (blå fyrkanter) och pH i ytvatten (årsmedel, röda kryss) under nästan tre decennier i 6 sjöar inom IKEU. Det skuggade fältet indikerar kalkad period. Kalkning avslutades i 1995 i Långsjön, Åva. Årsjön, också i Åva-området, har aldrig kalkats. Notera att Hg-skalan är logaritmisk.



TABELL 1. Uppmätta och normaliserade halter av Hg i abborrmuskel (ng/g fv). Halterna är medelvärden av årsmedelvärden \pm årsmedelvärden av SE. Rådsjön, Skifsen, Geten och Långsjön (T) har nyligen slutat kalkas men betraktas här som kalkade sjöar eftersom de var kalkpåverkade under den undersökta perioden. Långsjön (AB) betraktas här som referenssjö eftersom kalkningen upphörde där redan 1995.

Sjö	Tidsperiod	Antal år	Ålder vid 10 g	Uppmätt Hg	Hg vid 10 g	Hg vid 10 g & 1,5 år	
Kalkade IKEU-sjöar	Blanksjön	2005-2007	3	1,55	77,3 \pm 6,3	73 \pm 6	75,5 \pm 23,2
	Ejgdesjön	1999-2006	6	1,66	78,2 \pm 4,4	78,5 \pm 4,6	71,3 \pm 5,2
	Geten	2007	1	2,09	129 \pm 9	132 \pm 7,4	94 \pm 9,2
	Gyltigesjön	1998-2007	10	2,26	261,4 \pm 17,4	301,8 \pm 20,8	199,8 \pm 47,9
	Gyslättsjön	1996-2007	12	1,78	93,4 \pm 5,9	94,1 \pm 5,3	78,2 \pm 18,4
	Källsjön	1996-2007	12	2,35	167,1 \pm 9,7	193,4 \pm 11,1	123,4 \pm 25,6
	Lien	1996-2007	12	1,77	136,3 \pm 9,4	136,8 \pm 7,8	117 \pm 10,5
	Långsjön (T)	1998-2007	10	2,01	168,3 \pm 9,2	166,3 \pm 8,7	124 \pm 12,6
	Nässjön	2005-2007	3	2,06	75,3 \pm 4,2	79,3 \pm 3,1	57,3 \pm 6,3
	Rådsjön	2007	1	2,11	82 \pm 3,3	81 \pm 3,1	58 \pm 4,1
	Skifsen	2007	1	2,27	102 \pm 4,9	102 \pm 5,3	67 \pm 6,3
	Stengårdshultasjön	1998-2007	10	1,85	113,8 \pm 7,1	110,1 \pm 6,1	88,2 \pm 10
	Stensjön (AB)	1996-2007	12	1,99	105,4 \pm 6,5	108,1 \pm 5,7	82,2 \pm 11,8
	Stora Härsjön	1998-2007	10	1,76	69,2 \pm 4,7	68,7 \pm 4,8	58,6 \pm 9,7
Tryssjön	1998-2007	9	1,36	121,5 \pm 7,4	113,9 \pm 6	131,6 \pm 27,9	
Västra Skälsjön	1998-2007	10	1,64	72,6 \pm 3,9	71,2 \pm 4,1	65,5 \pm 13,3	
Referenssjöar	Brunnsjön	1999-2007	9	2,27	397,7 \pm 25,2	431,4 \pm 33,7	286,8 \pm 76,7
	Långsjön (AB)	1998-2007	10	1,94	147,7 \pm 10	145,6 \pm 7,9	112,9 \pm 12,3
	Rotehogstjärnen	1999-2007	9	2,15	196,7 \pm 20,5	183,2 \pm 23,4	129,1 \pm 33,9
	Stensjön (X)	1998-2007	10	2,00	82,3 \pm 4,6	88,4 \pm 3,9	66,5 \pm 8,4
	Årsjön	1998-2007	9	1,43	298 \pm 15,7	263,1 \pm 13,4	286,4 \pm 136,1
	Örvattnet	2006-2007	2	2,03	96 \pm 7,4	107,5 \pm 5,4	80,5 \pm 12,7
	Övre Skärsjön	1999-2007	9	2,05	135,9 \pm 6,9	145,1 \pm 8,1	107 \pm 18,5

beroende på att sjön aldrig varit särskilt sur (Figur 2). I Årsjön har pH ökat under perioden men trots detta kan någon minskning i Hg inte påvisas.

Mellanårsvariationen är omfattande och gör det svårt att utläsa tydliga trender men sammantaget har halterna minskat under de senaste 20–30 åren i de IKEU-sjöar där så långa tidsserier finns att tillgå. Medianhalterna från fem år efter kalkning låg i medeltal drygt 50 % lägre än före kalkning. Den största och tidiga fasen av haltminskningen verkar tidsmässigt vara kopplad till ökat pH och är därmed sannolikt en effekt av genomförda kalkningar.

Jämförelser mellan kalkade sjöar och okalkade referenser

Under åren 1998–99 tillkom de sjöar som utgjort och fortfarande utgör huvudparten av IKEUs program för Hg i fisk. Under denna period har även fångstförhållanden och urval av fisk varit oförändrade och möj-

liggör normalisering av data efter storlek eller ålder. Det finns många tänkbara ansatser vid normalisering efter vikt eller ålder. Här har vi dock använt samma beräkningsgrunder som i den årliga rapporteringen. Halter i småabborre har i regel skalats till att motsvara en individ på 10 g och 1,5 år ($\approx 1+$). Detaljer för hur normaliseringen gjorts finns i t.ex. Sundbom et al. (2004). För några sjöar finns motsvarande normaliserade data även för åren 1996–97 och även dessa har tagits med i analyserna. De sjöar och tidsperioder som ligger till grund för analyserna nedan sammanfattas i Tabell 1, där även medelvärden av uppmätta halter, och storleksnormerade och åldersnormerade halter redovisas.

Under perioden 1996–2007 var medelmedelkoncentrationerna 112 och 175 ng/g fv i kalkade sjöar respektive referenssjöar. Normalisering till 10g-abborre ger endast en marginell förändring av medelhalterna (114 och 172 ng/g fv). Om däremot

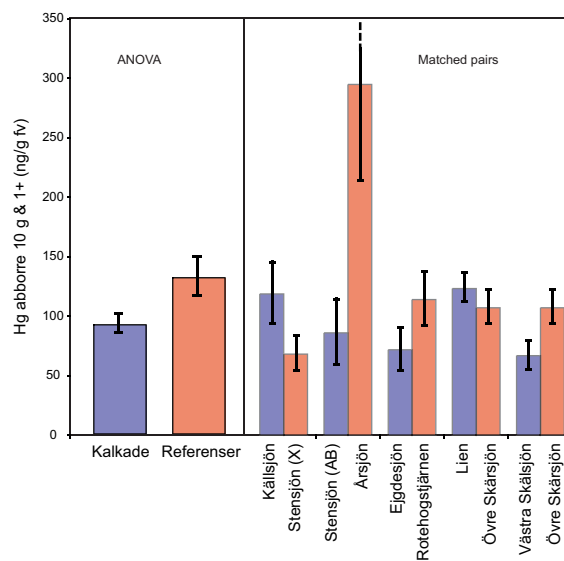
även fiskens ålder tas med i normaliseringen får vi en större förskjutning av medelhalterna. Vid 10 g och 1,5 års ålder var medelkoncentrationen 93 ng Hg/g fv i kalkade sjöar och 133 ng Hg/g fv i referenssjöar (Figur 3). Den stora förändringen kan förklaras av att en 10g-abborre i genomsnitt var äldre än 1+; medelåldern vid 10 gram varierade mellan 1,0 och 2,7 år med en median på 1,9 år. Oavsett normalisering var dock Hg-halterna drygt 30 % lägre i kalkade än i obehandlade sjöar och skillnaden var statistiskt signifikant (ANOVA, $p < 0,0001$). En trettioprocentig minskning av Hg-halterna i småabborre var just vad man observerade i projektet ”Kalkning-Kvicksilver” (Håkanson et al., 1990). Bekräftar resultaten här från IKEU-sjöarna att kalkningen ger en minskning av den storleksordningen? Det beror naturligtvis på hur representativt IKEUs sjöurval är, inte minst geografiskt eftersom Hg-halterna varierar över landet (Figur 1). Programmet innehåller betydligt fler kalkade sjöar än referenssjöar och om man studerar den geografiska utbredningen för de studerade sjöarna (Figur 1) framgår det att det saknas närliggande referenssjöar till många kalkade sjöar, särskilt i sydvästra Sverige där inte en enda referenssjö finns med i Hg-programmet. Jämförelsen mellan grupper av kalkade och okalkade sjöar kan därför bli missvisande.

Ett alternativ är att jämföra sjöar parvis. Kalkade och okalkade sjöar kan paras ihop efter olika kriterier men om vi här väljer att para ihop närbelägna sjöar finns det fem naturliga sjöpar inom IKEUs kvicksilverprogram (Figur 1). De inbördes skillnaderna i normerade Hg-koncentrationer varierade kraftigt mellan sjöparen (Figur 3). I tre fall hade den kalkade sjön lägre halter än referensen, i ett fall var det ingen skillnad och i ett fall var halterna lägre i referensen (Figur 3). Skillnader mellan data som kan inordnas parvis kan testas med en variant av t-test och sammantaget var halterna drygt 10 % lägre i de kalkade sjöarna och skillnaden var statistiskt signifikant (parvis t-test; $p < 0,005$).

För att sammanfatta jämförelserna ovan kan vi konstatera att Hg-halter i kalkade sjöar var c:a 50, 30 eller 10 procent lägre än före kalkning eller i referenssjöar beroende på hur vi använder tillgängligt dataunderlag. Orsaken till spridningen är främst att sjöar är väldigt individuella både vad gäller Hg-halter i fisk och hur de reagerar på kalkning, vilket kan ge olika resultat vid ett begränsat urval av sjöar.

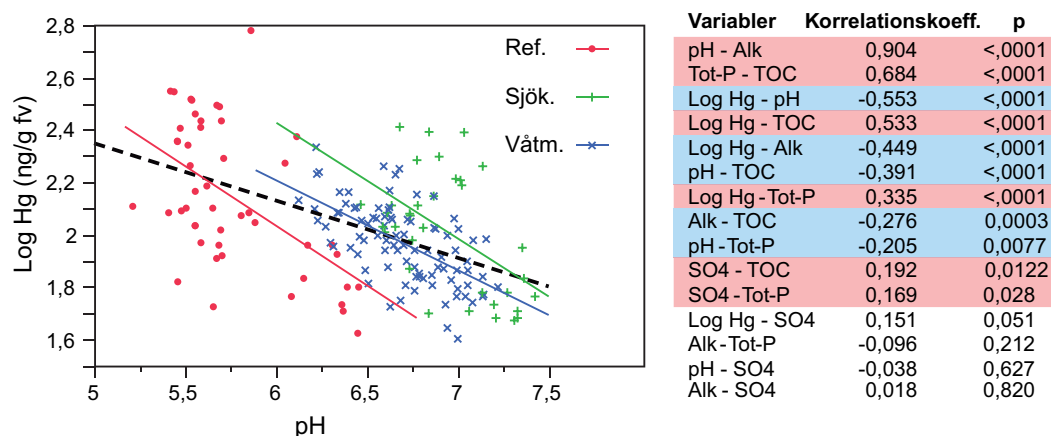
För att kunna dra slutsatsen att skillnaderna i huvudsak orsakats av kalkning och inte av andra faktorer som skiljer mellan sjöarna, har samband mellan Hg och olika vattenkemiska variabler beräknats. Den viktigaste vattenkemiska effekten av kalkning är höjt pH (och alkalinitet) och man bör därför förvänta sig

FIGUR 3. Jämförelse mellan Hg-koncentrationer abborre från kalkade och referenssjöar inom IKEU. Staplarna visar medelvärden av årsmedelvärden 1996–2007 av halter i muskel hos abborre normaliserade till vikten 10 gram och ålder 1+ (se Tabell 1). Felstaplarna anger 95 % konfidensintervall. I vänstra panelen har samtliga år och sjöar grupperats efter om sjön är kalkad ($n = 120$) eller inte ($n = 58$). I den högra panelen visas Hg-halten i samtliga par av kalkade och okalkade sjöar inom IKEU-programmet som ligger nära varandra (se karta i Figur 1).



att sambandet med pH är starkare än sambandet med andra faktorer om kalkningen har stor betydelse. Som även noterats i tidigare studier finns det här ett statistiskt signifikant samband mellan Hg och pH (Figur 4). Motsvarande samband är även signifikanta inom kategorierna referenser och kalkade sjöar, liksom mellan sjökalkade och våtmarkskalkade sjöar. Parvisa korrelationer avslöjar även signifikanta samband mellan Hg och variablerna TOC, alkalinitet och Tot-P även om sambandet med pH var det starkaste (Figur 4). Sambandet mellan Hg och alkalinitet har sannolikt samma grund som pH-sambandet eftersom pH och alkalinitet samvarierar starkt. Däremot finns det ett positivt samband mellan Hg och TOC som inte kan förkastas som enbart samvariation med pH. Sambandet Hg-TOC är starkare än sambandet Hg-alkalinitet och nästan lika starkt som det mellan Hg och pH (Figur 4). Visserligen finns det en korrelation mellan pH och TOC men den är betydligt svagare än den mellan pH och alkalinitet. Halten TOC kan förklara över 16 % av residualvariationen för Hg-pH-sambandet ($P < 0,0001$) både i kalkade och referenssjöar. Det finns även ett signifikant samband mellan Hg och totalfosfor. Sambandet är positivt vilket vid en första anblick kan verka förvånande

FIGUR 4. Grafen visar sambandet mellan kvicksilverhalter i abborrmuskel och pH. Varje punkt motsvarar logtransformerade årsmedelvärden av storleksnormaliserade halter och medelvärdet av pH i ytatten under ett år före fiskfångsten. Den svarta streckade linjen är regressionslinjen mellan Hg och pH i samtliga år och sjöar medan de färgade linjerna är motsvarande linjer för referenser (röd), sjökalkade (grön) och våtmarkskalkade (blå) sjöar. Tabellen visar korrelationskoefficienter mellan kvicksilver och olika vattenkemiska variabler. De parvisa korrelationerna är ordnade efter avtagande styrka; röd bakgrund indikerar statistiskt signifikanta positiva korrelationskoefficienter, blå bakgrund indikerar signifikanta negativa koefficienter. Ofärgade rader är inte statistiskt signifikanta ($p > 0,05$).



eftersom fisk i oligotrofa sjöar brukar ha högre halter än fisk i näringsrika sjöar. Intervallet för Tot-P är dock här för begränsat man ska förvänta sig någon bioutspädning, d.v.s. en ineffektiv trofisk transport i näringskedjan p.g.a. att sjöns biotillgängliga kvicksilver fördelas över en stor biomassa av växtplankton. Anledningen till korrelationen mellan Hg och fosfor beror snarast på den starka kopplingen mellan fosfor och TOC (Figur 4).

Trots att det alltså är svårt att entydigt kvantifiera kalkningseffekten tyder resultaten på att kalkning leder till sänkta halter av Hg i fisk. Detta stöds av de observerade sambanden med kalkningsrelaterad vattenkemi. Vid jämförelser med data före kalkning måste man beakta förändringar i både deposition och klimat under den studerade trettioårsperioden. Dessutom uppvisar Hg i småfisk ofta en stor mellanårsvariation utöver en stor variation mellan individer. För att bättre kunna kvantifiera kalkningens roll behöver vi alltså undersöka såväl långtidstrender som kopplingen till lokala faktorer som kan förklara mellanårsvariationen.

Trender

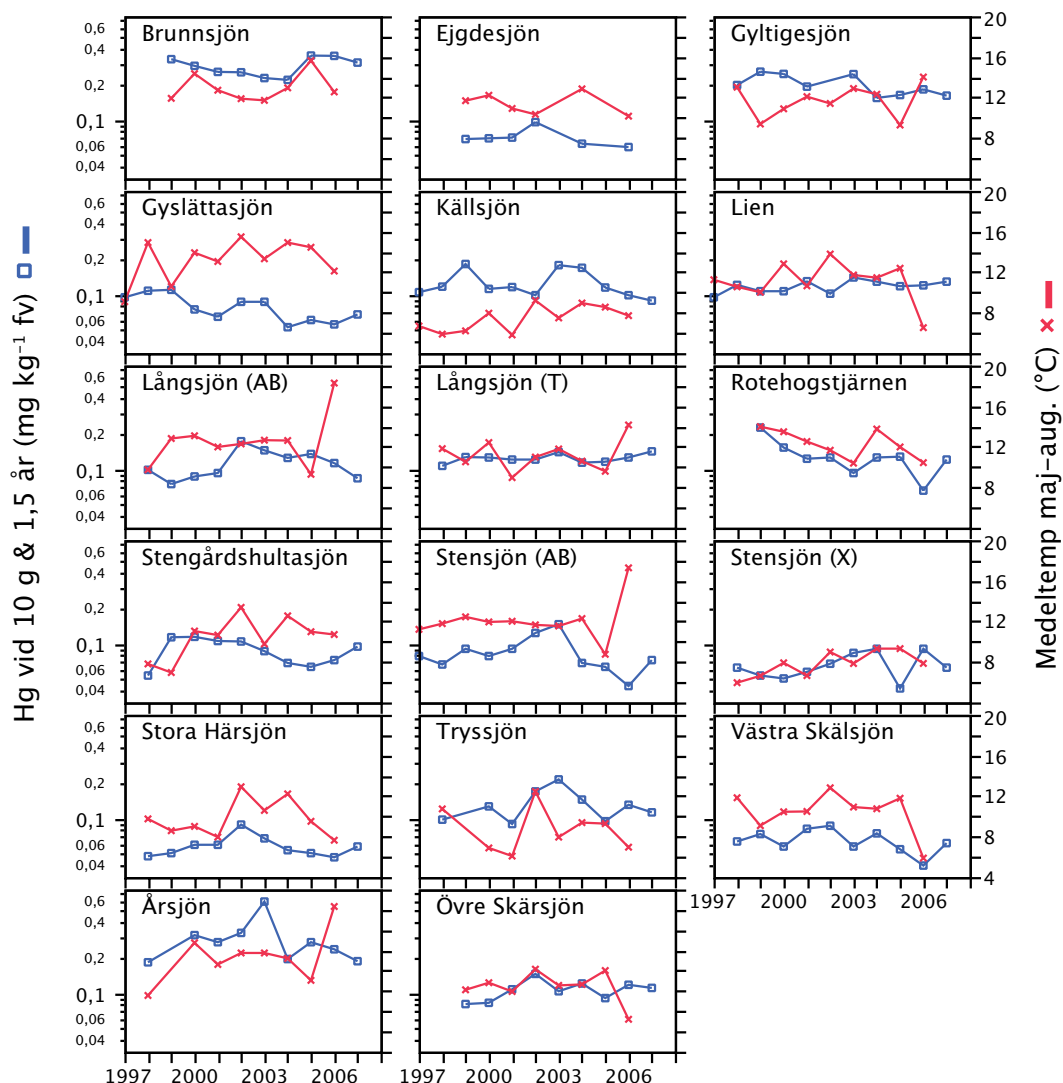
Av de sex sjöar där vi har de längsta tidsserierna uppvisar Gyslättsjön (log-linear regression; $p < 0,0001$), Källsjön ($p = 0,037$) och Stensjön ($p = 0,011$) signifikant sjunkande Hg-halter medan trenden är svagare i Långsjön och Lien (Figur 2). Dessa trender återspeglar dock inte enbart trender kopplade till klimat eller deposition eftersom kalkning påbörjats (eller

avslutats) under perioden, vilket kan ge initialt snabbt sjunkande halter. Detta är tydligast i Stensjön, Åva där halterna mer än halverats, men en koppling till de första årens kalkningar anas även i Långsjön, Åva, Gyslättsjön och Källsjön. I Lien däremot verkar kalkningen inte ha påverkat halterna alls. I okalkade Årsjön förefaller halterna ha ökat svagt under perioden men denna trend är inte signifikant.

Under perioden 1996–2007 som uppvisar mer konstanta förhållanden vad gäller kalkning ser haltutvecklingen olika ut i olika sjöar. Årsmedelkoncentrationerna av kvicksilver i abborre varierar påtagligt mellan år och endast i vissa sjöar verkar det finnas en antydning till monoton trend (Figur 5). Signifikanta negativa trender observerades i sydvästra Sverige i Gyslättsjön, Gyltigesjön och Rotehogstjärnen (Figur 6), medan en positiv trend observerades i Lien i Bergslagen. Årsjön, som sett över en längre period inte uppvisade någon trend (eller möjligtvis en antydning till ökning; Figur 2), visar här en ganska kraftig negativ trend även om den inte är signifikant (Figur 5). Detta motsatsförhållande illustrerar hur starkt beroende trendskattningar är av vilket tidsfönster man väljer eller har tillgång till. Särskilt när mellanårsvariationen är stor och det finns luckor i materialet.

Varken med ANCOVA eller med icke-parametriska metoder (Mann-Kendall) kunde några signifikanta trender eller skillnader i trender observeras mellan kalkade och okalkade sjöar; och inte heller mellan sjökalkade och våtmarkskalkade sjöar (Figur 6). För sjökalkade sjöar fanns en antydning till en negativ

FIGUR 5. Årsmedelvärden av kvicksilverhalter i muskel hos abborre normaliserade till vikt 10 gram och ålder 1+ (blå kvadrater) och ytvattentemperatur (röda kryss) under perioden 1997–2007 i kalkade sjöar och referenssjöar inom IKEU.

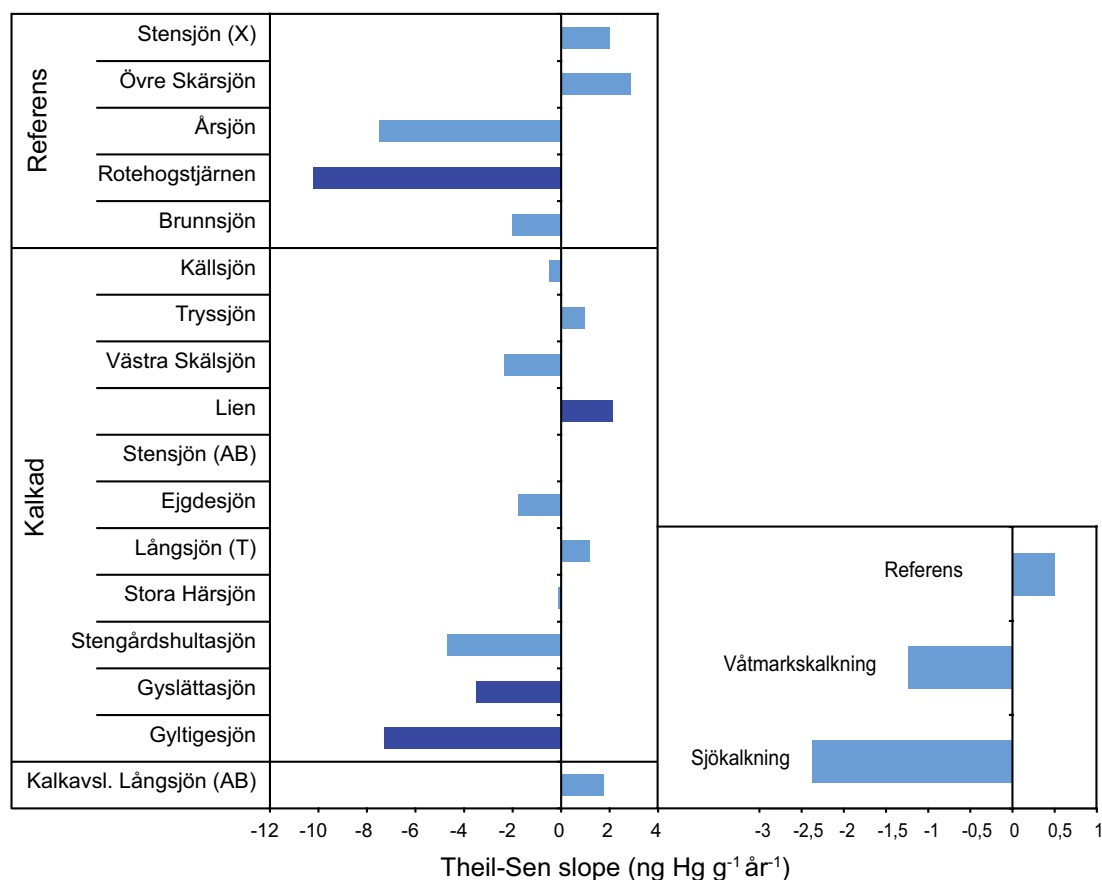


trend ($p = 0,13$) och de uppvisade också brantast minskning. Även om man inte ska ha för stor tilltro till dessa trender är det intressant att återknyta till projektet "Kalkning-Kvicksilver" där minskningen också var större i sjökalkade än i våtmarkskalkade sjöar (Meili, 1995; Andersson & Lundberg, 1996). Å andra sidan uppvisade referenserna i det projektet en lika stor minskning som i sjökalkade sjöar. En närmare jämförelse mellan resultat från IKEU och "Kalkning-Kvicksilver" är dock inte relevant eftersom de senare baseras på de första åren efter kalkning medan förhållandena varit mer stabila under IKEU-perioden.

För att undersöka vad som kan ligga bakom eventuella trender i Hg har motsvarande trender skattats

för några andra variabler: temperatur, pH, alkalinitet, totalfosfor och totalt organiskt kol (TOC). Alla dessa kan direkt eller indirekt ha effekter på Hg i fisk och alla kan ha förändrats under perioden p.g.a. kalkning, deposition eller klimat. Approachen är här mycket enkel; för att få samma tidsupplösning som för Hg har vi valt att beräkna trenderna utifrån "effektiva" årsmedelvärden, d.v.s. 12 månader räknat bakåt från fångstillfället. Och liksom för Hg användes Mann-Kendall och Theils-Sen's slope för att skatta trenderna. En enkel korrelationsanalys mellan trender visar ingen stark koppling mellan trender för Hg och de andra variablerna utom för temperatur (Figur 7) där sambandet var signifikant och positivt ($r = 0,57$; $p = 0,017$). Därutöver fanns det ett förväntat positivt

FIGUR 6. Vänstra panelen: trender för Hg i abborre under perioden 1996-2007 skattade med Theil-Sen's slope. Mörkblå staplar anger att trenden är statistiskt signifikant ($p < 0,10$) enligt Mann-Kendall's tau. Inom respektive kategori är sjöarna ordnade uppifrån och ner i nord-sydlig riktning. Högra panelen motsvarande trender med sjöarna grupperade i okalkade, våtmarkskalkade och direktkalkade sjöar.



samband mellan pH och alkalinitet ($r = 0,77$; $p = 0,0003$) samt ett lite överraskande negativt samband mellan vattentemperatur och TOC ($r = -0,63$; $p = 0,007$). Även om det fanns antydning till förväntade negativa samband mellan alkalinitet pH och totalfosfor måste resultaten tolkas som om förändringarna i Hg under denna period berott mer på ökningarna i vattentemperatur än på förändringarna i någon av de andra variablerna. Eftersom temperatortrenderna är övervägande positiva medan Hg snarare minskat kan det observerade sambandet innebära att den globala uppvärmningen motverkar den minskning som förväntas följa av minskande deposition.

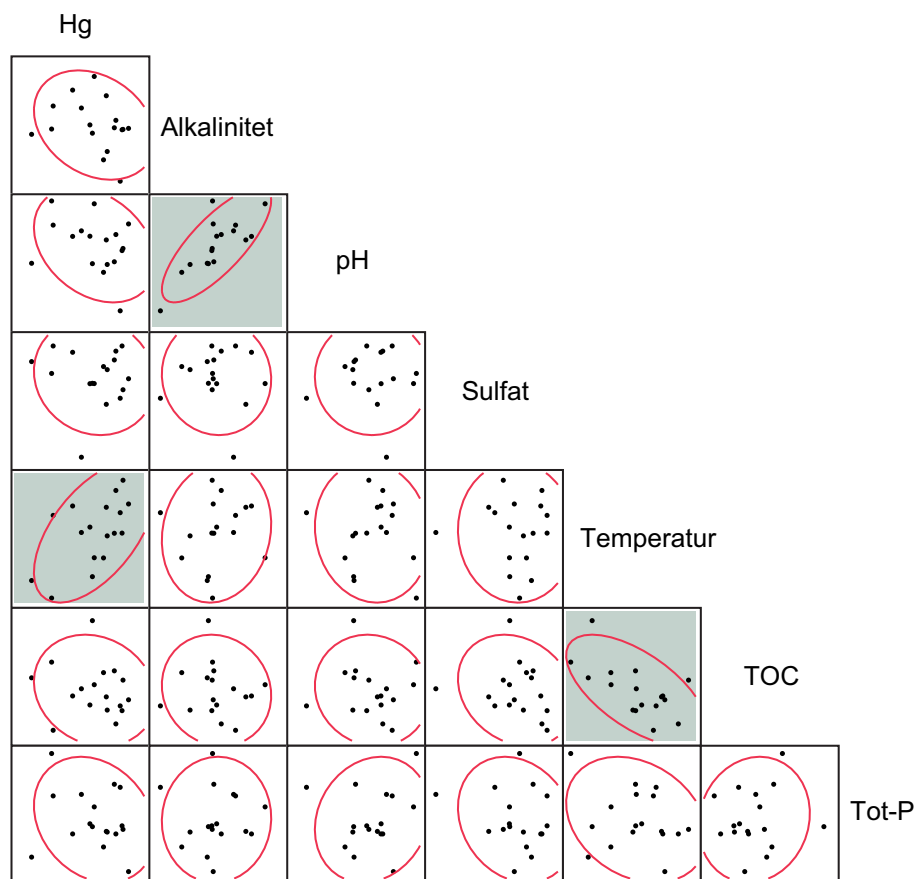
Andra källor till variation

Tiden förklarar 13–82 % (i medeltal 46 %) av den totala variationen inom sjöar. Om man bortser från långsiktiga tidstrender som styrs av andra orsaker är mellanårsvariationens bidrag 12–71 % (medel 40 %). Skillnaden mellan lång- och kortsiktig temporal

variation är förvisso flytande och några extrema år i änden av en tidserie kan felaktigt uppfattas som en trend. Helt klart är dock att under den studerade perioden har variationen mellan enskilda år i medeltal varit större än de långsiktiga förändringarna. I alla sjöar (utom i Rotehogstjärnen som har haft en kraftig långsiktig trend; jmf Figur 5) är mellanårsvariationen starkt signifikant, dvs. Hg-halten under ett eller flera år avviker signifikant från medelnivån.

Den återstående variationen inom sjöar, i medeltal $100 - 46 = 54$ %, beror således på skillnader mellan individer. Om vi bortser från skillnader i ålder och storlek som här är små p.g.a. urvalsprinciperna och som vi i möjligaste mån kan normalisera för, orsakas denna variation av skillnader i föda och bioenergetik mellan enskilda fiskar. Skillnader i tillväxthastighet är till viss del inkluderad i ålderskorrigeringen. Annars saknas information om enskilda fiskars egenskaper och vi kan i dagsläget inte komma så mycket längre med att förklara den individuella variationen. Man

FIGUR 7. Samband mellan trender för Hg i fisk, ytvattentemperatur, och olika vattenkemiska variabler. Skuggning indikerar statistiskt signifikanta korrelationer ($p < 0,05$). Punkterna representerar Theil-Sen's slope mellan årsmedelvärden av mätresultat och provtagningstid. Hg-halter är normaliserade till att motsvara abborre 10 g och ålder 1+.



skulle visserligen kunna öka antalet analyserade fiskar för att få säkrare medelvärdeskattningar men det skulle inte tillföra trendskattningarna särskilt mycket eftersom mellanårsvariationen i högsta grad är reell (och inte skenbar p.g.a. för få analyserade fiskar).

Mellanårsvariationen kan ha många tänkbara orsaker t.ex. variationer i väderlek, kalkning, syrgasförhållanden eller trofiska samband. IKEU har ett starkt integrerat mätprogram vilket ger stora möjligheter att undersöka olika tänkbara variationskällor. Ett djuplodande utforskande av dessa möjligheter ligger utanför tidsramen för denna studie. Här redogörs dock för några preliminära tester av hypoteser kopplade till klimat, vattenkemi, kalkning och biologi. Ansatsen påminner om den som användes för trender: jag undersöker eventuella korrelationer mellan medelvärden av Hg i abborre med motsvarande medelvärden eller andra mått för ett antal variabler som kan ha inverkan på Hg. Alkalinitet, pH, TOC eller någon annan enskild variabel kunde inte förklara mellanårsva-

riationen. Det fanns inte heller något samband mellan Hg och syrgas- eller skiktningförhållanden uttryckt som min-syrgas, antal månader med skiktade förhållanden eller intensiteten på skiktningen (Δtemp). Vattentemperaturen, som hade ett signifikant samband med långtidstrender (Figur 7), visade dock inget signifikant samband med mellanårsvariationen.

Mellanårsvariationen verkar inte heller ha någon koppling till kalkning, åtminstone inte vad gäller variationens storlek som inte skiljde sig mellan referenser, sjökalkade och våtmarkskalkade sjöar. Inte heller kalkdos eller det faktum att en sjö kalkats inom ett år före fiskfångst hade något signifikant samband med Hg i abborre.

Slutligen undersöktes några biologiska variabler av potentiellt intresse. Ur provfiskedatabasen hämtades uppgifter om mörtförekomst. Om andelen mört är hög kan det tänkas att abborren får konkurrens om födan vilket kan påverka både födoval och tillväxteffektivitet vilket i sin tur kan påverka Hg. Det fanns

inget signifikant samband med mörtens andel vare sig den uttrycks som biomassa eller abundans. På samma sätt undersöktes födotillgången med avseende på zooplanktonbiomassa och sammansättning dock utan att finna några effekter på Hg i fisk inom sjöar. Det kan tilläggas att de flesta av här nämnda variabler har signifikanta samband med Hg om man undersöker förhållandena mellan sjöar, även om många av dessa samband bedöms bero på samvariation med t.ex. pH eller TOC. Inom sjöar däremot är förmodligen variationen för flera av dessa variabler mellan olika år inte tillräcklig för att ge stora återverkningar på Hg i abborre.

FÖRSLAG TILL HUR PROGRAMMET KAN FÖRBÄTTRAS OCH VAD SOM BÖR INGÅ I EN FÖRDJUPAD UTVÄRDERING

FLER REFERENSSJÖAR: Det ingår få referenssjöar i programmet, särskilt i sydvästra Sverige. De behövs för att kunna tolka trender och renodla kalkningseffekter. Lämpliga intensivundersökta referenssjöar för en utvidgning av kvicksilverprogrammet är Stora Skärsjön, Fiolen och Fräcksjön.

KALKAVSLUT: År 2007 utökades IKEUs program för kalkavslut med Skifsen, Rädsjön och Geten. De har här behandlat som kalkade sjöar eftersom de nyligen slutat kalkas men tillsammans med de ”gamla” Långsjön i Åva (sista kalkning 1995) och Långsjön i Örebro län (nyligen avslutad kalkning) kommer de alltså inom en nära framtid utgöra ett ganska bra underlag för att studera hur avslutad kalkning påverkar kvicksilverhalterna i fisk. Det är därför viktigt att dessa sjöar finns kvar i Hg-programmet.

HG-DEPOSITION: De observerade sambanden mellan trender i vattentemperatur och Hg bör följas upp genom att även beakta data för deposition av Hg. Programmet bör om möjligt få tillgång till uppskattad årlig Hg-deposition för samtliga ingående sjöar.

KOPPLING TILL KLIMAT: Klimatets växlingar påverkar sannolikt mobiliseringen av Hg från avrinningsområdet både på kort och på lång sikt. Dessutom är bioackumuleringen temperaturberoende i fisk och andra kallblodiga organismer. Här har vi enbart använt oss av vattentemperatur för att undersöka kopplingen till klimat. I framtiden vore det bra att även kunna undersöka hur t.ex. nederbörd och avrinning påverkar Hg i abborre.

TOC/DOC: Löst organiskt material är av intresse inte

bara för kvicksilverproblematiken utan även för bedömningen av försurningsåterhämtning och inte minst för klimatdebatten. För att erhålla mer kvalitativ information än vad vi har idag skulle optisk karakterisering av DOC som är en relativt enkel metod, kunna ingå i IKEUs arsenal av vattenanalyser.

STABILA ISOTOPER: Kvicksilver tas upp av fisk framför allt via födan. Stabila kol- och kväveisotoper i fiskmuskel (numera standard inom miljöövervakningen) kan användas för att studera den genomsnittliga födans ursprung och trofiska position. Denna information kan vara av betydelse för tolkning av Hg-halter och dess variationer både hos individer och på populationsnivå. Alla fiskprover inom IKEU har sparats i frystorkat skick och en retrospektiv studie av isotopsammansättningen är alltså fullt möjlig.

STORLEKSNORMERING: I denna rapport och i de årliga redovisningarna har vi använt en och samma ansats för storleks- och åldersnormering. Det kan dock finnas ansatser som är bättre och det vore därför intressant att i en specialstudie använda sig av hela materialet för att jämföra olika metoder för storleksnormering. En bra normering minimerar fel vid extrapolering och förbättrar möjligheterna till att kvantifiera skillnader och upptäcka förändringar över tiden.

MULTIVARIAT ANSATZ: Här har vi valt att studera de viktigaste variablerna med hjälp av enkla statistiska metoder för att göra sambanden tydliga, i synnerhet vad gäller kopplingen till kalkning. Många variabler samvarierar dock, vilket kan göra det svårt att upptäcka komplexa samband. Med multivariata metoder där variabler kopplade till klimat, kemi och biologi integreras i samma analys kan man förhoppningsvis ytterligare öka förståelsen av de processer som styr kvicksilverhalterna i fisk i sura och kalkade sjöar.

REFERENSER

Andersson, T. & Lundberg, P. (1996) *Orsaker till förändrade kvicksilverhalter i gädda i svenska sjöar mellan perioderna 1981–87 och 1988–95*. Naturgeografiska Institutionen. Umeå universitet, Naturgeografi, Arbetsrapport 96–10.

Håkanson, L. m.fl. (1990) *Åtgärder mot höga kvicksilverhalter i insjöfisk: slutrapport för kvicksilverdelen av projektet Kalkning-kvicksilver-cesium*. Rapport 3818, Statens naturvårdsverk, Solna.

Meili, M. (1995) Liming effects on mercury concentrations in fish. in *Liming of Acidified Surface Waters – a Swedish Synthesis* (eds Henrikson, L. & Brodin, Y. W.), pp. 125-178. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

Nelson, W. O. & Campbell, P. G. C. (1991) The effects of acidification on the geochemistry of Al, Cd, Pb and Hg in freshwater environments: A literature review. *Environmental Pollution*, 71, 91-130.

Richman, L. A., Wren, C. D. & Stokes, P. M. (1988) Facts and Fallacies Concerning Mercury Uptake by Fish in Acid Stressed Lakes. *Water Air and Soil Pollution*, 37, 465-473.

Spry, D. J. & Wiener, J. G. (1991) Metal bioavailability and toxicity to fish in low-alkalinity lakes: A critical review. *Environmental Pollution*, 71, 243-304.

Sundbom, M., Meili, M., Johansson, A.-M. & Kärrhage, P. (2004) *Kvicksilver i abborre från IKEU-, referens- och återförsurningssjöar år 2003*. PM aug. 2004.

Wilander, A., Andrén, C., Bergquist, B., Holmgren, K. & Sundbom, M. (2008) *Provtagning och analysarbete. Redovisning av delprojekt 1a inom IKEU-utvärderingen 2008*.

Åkerblom, S. & Johansson, K. (2008) *Kvicksilver i svensk insjöfisk – variationer i tid och rum*. Inst. för miljöanalys, SLU, Uppsala, Rapport 2008:8.