

Paleolimnologiska undersökningar av kalkade referenssjöar

Del 1. Källsjön, Gävleborgs län

av

Tom Korsman
Ingemar Renberg
Jan-Erik Wallin



Miljöförändringsanalys
Institutionen för ekologi och geovetenskap
Umeå universitet
901 87 Umeå

Utgiven av
Institutionen för ekologi och geovetenskap
Umeå universitet
901 87 Umeå

Tom Korsman
Epost: Tom.Korsman@eg.umu.se
Tel: 090-786 5423

Tryckt av VMC, KBC, Umeå universitet, 2000
ISBN 91-7191-959-7

Paleolimnologiska undersökningar av kalkade referenssjöar

Del 1. Källsjön, Gävleborgs län

av

Tom Korsman
Ingemar Renberg
Jan-Erik Wallin



Miljöförändringsanalys
Institutionen för ekologi och geovetenskap
Umeå universitet
901 87 Umeå

FÖRORD

Detta är första rapporten i en serie paleolimnologiska undersökningar av kalkade referenssjöar. Undersökningarna har gjorts inom ramen för IKEU-projektet på uppdrag av Naturvårdsverket. Förutom författarna till rapporten har en rad personer deltagit i arbetet. Här kan särskilt nämnas den grupp studenter som våren 1999 undersökte Källsjöns utveckling som projektarbete inom ramen för kursen *Ekologisk miljöhistoria, inriktning mot aktuella miljöproblem* (10p) vid Umeå universitet. Deras sedimentanalyser ligger som grund för denna rapport. Andra som förtjänar ett särskilt omnämnande är handledarna Maja-Lena Brännvall som hjälpte studenterna att göra och tolka de kemiska analyserna, Ove Emteryd som analyserade bly med ICP-MS, och Peter Rosén som fanns till hands vid kiselalgalanalyserna.

SAMMANFATTNING

- Källsjön (683582, 154935) ligger ca 20 km väster om Njutånger i Hälsinglands kustland. Idag saknas fast bebyggelse vid sjön, men fram till 1959 fanns en by på nordöstra stranden. Som mest hade byn ett tiotal hushåll. Sjön är ca 25 ha stor och har brunt vatten. Kalkning mot försurning började 1984. Dessförinnan hade pH 4,8 uppmätts som lägst.
- I januari 1999 togs en 3,5 m lång sedimentpropp upp ur botten i sjöns djupaste del (17 m). Den täcker perioden från idag och ca 9000 år bakåt, till tiden för sjöns tillkomst. Sjön isolerades från havet genom landhöjningen. Syftet var att med hjälp av sedimentanalyser skapa en bild av hur sjön och dess närmaste omgivning har utvecklats genom tidernas lopp. Av särskilt intresse var att ta reda på hur sjöns surhetsgrad förändrats. Därom vittnar kiselalger som bevarats som subfossil i sedimentet. Dessa algglämningar ger också en indikation på algsamhällets tillstånd före och efter kalkningen. Kiselalger är viktiga primärproducenter i våra sjöar.
- För att få ett mått på atmosfärisk föroreningsbelastning analyserades bly och flygsk-partiklar. Bly är en god allmänindikator på föroreningar eftersom det kommer från förbränning, metallframställning, bilavgaser, mm. Flygskpartiklar är en specifik indikator på föroreningar som härstammar från förbränning av olja och kol. I Källsjön, liksom i de flesta andra sjöar i Sverige, syns otvetydiga spår av tidigt nedfall av bly i form av ändrad isotopkvot ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$) i sedimentet. Blyföroreningsnedfall började för minst tretusen år sedan. En svag topp syns under romersk tid för tvåtusen år sedan. För ca ettusen år sedan, började blykoncentrationen stiga från ursprungsnivån $4 \mu\text{g g}^{-1}$ torrt sediment. Blykoncentrationen når som höst ca $80 \mu\text{g g}^{-1}$ i modern tid. Samtidigt är antalet flygskpartiklar i sedimentet i storleksordningen 5 000 partiklar g^{-1} torrt sediment. Både blyet och flygskpartiklarna vittnar om att området fått ta emot ganska stort luftföroreningsnedfall.
- Pollenanalysen berättar om hur skogsvegetationen förändrats och hur jordbrukskulturen utvecklats vid sjön. Under tusentals år dominerades skogen av tall, men för lite mindre än tretusen år sedan bredde granen ut sig. För ungefär ettusen år sedan expanderade jordbrukskulturen längs norrlandskusten. Också trakten kring Källsjön påverkades. I sjösedimentet blev pollen av kulturgynnade växter vanligare vilket tyder på att området utnyttjades för bete. För ungefär femhundra år sedan började rågpollen uppträda i sedimentet, och gräs blev vanligare. Då hade mark röjts för odling nära sjön. Under första delen av 1900-talet nådde odlingen sin största omfattning. Minst 10 ha av marken närmast sjön var åker.
- Under en period efter isoleringen från havet dominerades kiselalgsamhället i sjön av alkalifila arter, dvs sådana som är typiska för vatten med högt pH, såsom *Cyclotella kützingiana* och *Achnanthes minutissima*. Gradvis förändrades floran, *Achnanthes minutissima* blev mindre vanlig och planktonarten *Cyclotella kützingiana* försvann efter tvåtusen år. Istället blev *Aulacoseira distans* var. *tenella*, som är typisk för mera dystrofa vatten, den dominerande planktonarten. Den förblev så ända fram till att kalkningarna började. Kiselalgsammansättningen visar att sjön länge haft humusrikt vatten. Som en följd av kalkningarna återkom *Achnanthes minutissima*, och *Asterionella formosa* blev den helt dominerande planktonarten.

- Sammansättningen hos kiselalgalfloran som bevarats i sedimentet kan användas för att uttolka vilket pH vattnet i sjön har haft vid olika tidpunkter. Det sker med hjälp av en sk transferfunktion, som är en statistisk funktion som beskriver samband mellan sjöars kiselalgsammansättning och vattnets pH. Strax efter Källsjöns tillkomst var pH ca 6,6 och därefter har det sjunkit gradvis med en takt av i medeltal 0,1 pH-enhet per tusen år. Det är en normal naturlig försurning som beror på markens åldrande och på en ökad tillförsel av organiska syror till sjön. Det förefaller som om denna nedåtgående trend vändes i och med att jordbruk anlades vid sjön, men detta är inte statistiskt säkerställt. Att jordbruket påverkade sjöns vatten i positiv riktning är dock mycket troligt. Det lägsta pH-värdet någonsin i sjöns historia är enligt kiselalgerna pH 5,7 och det registrerades i modern tid, omedelbart före det att kalkningsverksamheten började. Som följd av kalkningarna har pH stigit till samma nivå som just efter sjöns tillkomst för ca 9 000 år sedan.
- Var då sjön försurad av surt nedfall eller bara naturligt sur när kalkningarna initierades? Som kiselalgerna visar är Källsjön en av naturen ganska humös och sur sjö. Det är troligt att avrinningen från jordbruksmarken hade högre pH och innehöll näringsämnen som bidrog till att öka sjöns produktivitet så länge jordbruk bedrevs vid sjön. När sedan skogen återtog den forna åker- och betesmarken kan det ha bidragit till en viss skenbar försurning. Detta utesluter emellertid inte att sjön också utsatts för försurning på grund av surt nedfall. Det lägsta pH-värdet enligt kiselalgerna är 5,7 medan det lägsta uppmätta pH-värdet är 4,8. Det ligger ingen motsägelse i detta. Det är nämligen viktigt att notera att kiselalgerna i sedimentet ger ett medelvärde för vegetationsperioden medan det låga uppmätta värdet kan representera en surstöt.
- Kalkningarna har förändrat kiselalgsamhället i sjön, men de har inte återställt den flora som fanns på 1800-talet eller på 1900-talet innan sjön eventuellt försurades. *Asterionella formosa* som nu dominerar plankton har knappast alls funnits i sjön tidigare, inte ens strax efter sjöns tillkomst då pH var ungefär detsamma som idag. Att kalkning ger en speciell kiselalgsflora har också konstaterats i ett fåtal andra paleolimnologiska undersökningar.
- IKEU-projektet har 13 kalkade referenssjöar. Det ligger nära till hands att se dessa som typexempel, dvs att de ska representera det stora flertalet kalkade sjöar i Sverige. Vad representerar då Källsjön? Ja, det är helt klart att den inte representerar den genuina skogs-sjön, eftersom jordbruk har haft så stor utbredning vid sjön. Men den är kanske ändå en god referenssjö. Många, för att inte säga majoriteten av våra sjöar i Sverige har ju faktiskt varit utsatta för mer eller mindre stor påverkan av den äldre jordbrukskulturen som utnyttjade hela landskapet.

INLEDNING

För att motverka effekter av försurning har sjöar och vattendrag i Sverige kalkats sedan 1970-talet (Henriksson et al. 1995). Den biologiska målsättningen med kalkningen är att den naturliga floran och faunan ska kunna bestå och att arter som försvunnit på grund av försurning ska kunna återkolonisera vattendraget eller sjön. Som ett led i att studera de långsiktiga effekterna av denna kalkningsverksamhet startade Naturvårdsverket 1989 IKEU-projektet (Integrerad Kalknings-EffektUppföljning). Utöver studier av de långsiktiga effekterna är den övergripande målsättningen med IKEU-projektet att undersöka om kalkningsåtgärder återskapar ett ekosystem, med avseende på artsammansättning och biologisk mångfald, liknande det före försurningen, samt om kalkningsverksamhet ger oönskade effekter (Naturvårdsverket 1997).

IKEU-projektet omfattar för närvarande 13 kalkade sjöar och 12 kalkade vattendrag. I projektet ingår även Naturvårdsverkets kalkreferenssjöar (ca 190 st), vilka aldrig kalkats. Sjöarna har analyserats med avseende på vattenkemi, bottenfauna, växt- och djurplankton, samt fisk. År 1999 initierades också paleolimnologiska undersökningar för att belysa sjöarnas utveckling. I denna rapport redovisas resultaten från en paleolimnologisk studie av Källsjön, Gävleborgs län. Målsättningen med studien var att ta reda på hur Källsjöns surhetsgrad förändrats under sjöns historia, samt att bidra till att bedöma hur den biologiska sammansättningen i sjön var innan försurningen. Paleolimnologiska undersökningar pågår också i ytterligare tre IKEU-sjöar: Stengårdshultasjön, Stensjön och Gyslättasjön.

Vi tror att det är viktigt att inte bara studera den sentida utvecklingen i försurade sjöar, utan också att kunna ge en bild av utvecklingen under hela den tiotusenåriga period som förlöpt sedan senaste istiden. Ett sådant långsiktigt perspektiv är motiverat av flera skäl. Bland annat bör betonas att det "förindustriella tillståndet", mot vilket försurningssituationen ska ställas, inte är ett konstant tillstånd. Tidigare studier har visat att den postglaciala utvecklingen är mer dynamisk än

man vanligtvis anser (se t ex Renberg et al. 1993a; 1993b). För att förstå de nutida förändringarna i sjöarna måste vi känna till: a) den långsiktiga naturliga utvecklingen, b) betydelsen av naturlig störning, och c) betydelsen av den långsiktiga antropogena påverkan i form av ökad markanvändning och ökad belastning av föroreningar. Diskussionen om vilket tillstånd man bör sträva efter att uppnå i samband med kalkning underlättas avsevärt om man har hela den postglaciala utvecklingen klar för sig.

Den långsiktiga utvecklingen i försurade sjöar har sannolikt också betydelse för vilken respons man kan förvänta sig i samband med kalkning. Detta har inte tidigare studerats i samband med effektuppföljning av kalkningsverksamheten. Det är dock möjligt att sjöar som genomgått en mer långsiktig gradvis försurning reagerar annorlunda på kalkning än sjöar med ett snabbt försurningsförlopp under de senaste decennierna. Flera sydsvenska klarvattensjöar har också genomgått en alkaliseringsfas (en period med förhöjt pH) innan den moderna försurningen började (Renberg et al. 1993a). Huruvida detta också gäller de kalkade referenssjöarna är dock inte känt, men om så är fallet kan detta eventuellt ha satt sin prägel på det moderna försurningsförloppet samt på vilka kalkningseffekter som kan förväntas.

OMRÅDESBESKRIVNING

Källsjön (683582, 154935) i Gävleborgs län, har kalkats vartannat år sedan 1984, huvudsakligen i form av våtmarkskalkning kring Prästvallsbäcken, som rinner ut i Källsjön (Andersson et al. 1989). Under åren 1984 och 1988 kalkades även Svartvallstjärnen uppströms Källsjön.

Sjön ligger 232 m över havet, dvs strax under högsta kustlinjen, som är ca 240 m ö h i området (Fredén 1994). Berggrunden i tillrinningsområdet (18,3 km²) är till 70 % av sur, granitisk karaktär och jordarterna domineras av morän (75 %) med mindre inslag av grovsediment och hållmark (Andersson et al. 1989). Drygt 20 % av området är myrmark.

Fäbodvallar finns i sjöns tillrinningsområde. Svartvallen och Prästvallen tillhör socknens äldsta vallar och togs i bruk redan i början av 1700-talet (Delsbo hembygdsförening 1996). Vid sjön har också en by med ett tiotal hushåll legat, och 1959 flyttade de sista bofasta från Källsjön. Rester av en damm som anlades under 1800-talet finns vid sjöns utlopp. Dammen, som rasade 1958, har haft en regleringshöjd på 1,5-2 m (Andersson et al. 1989). På de forna åkermarkerna längs sjön har det planterats skog, och idag utgör skogsbruk den enda markanvändningen i området. Det finns i dagsläget två hyggen i anslutning till sjön.

Sjön har en area av 0,25 km² och en vattenvolym på 1,8 x 10⁶ m³. Medeldjupet är 7,4 m och det största djupet anges till 17,2 m. Omsättningstiden för Källsjön har beräknats till 0,4 år (Naturvårdsverket 1997). Lägsta pH innan kalkning har uppmätts till 4,8 och under de senaste åren har pH-värdena legat mellan 6,5 och 7. Källsjön har haft den högsta aluminiumhalten av IKEU-sjöarna, med halter upp till 200 µg L⁻¹, och fosforhalt och vattenfärg är de näst högsta bland IKEU-sjöarna (www.ma.slu.se). Medelhalten för totalfosfor (Tot-P) låg under perioden april till oktober år 1990-93 på 15 µg L⁻¹ i ytvattnet och 20 µg L⁻¹ i bottenvattnet. Motsvarande värden för organiskt kol (TOC) låg på 15,9 mg L⁻¹ i ytvattnet och 15,2 mg L⁻¹ i bottenvattnet. Resultatet från 1994 års provfiske visade förekomst av fyra fiskarter: abborre, gädda, mört och nors (Svensson & Appelberg 1995).

För ytterligare uppgifter angående vattenkemi och områdeskaraktistik, se Andersson et al. (1989) och hemsidan för Institutionen för miljöanalys, SLU, Uppsala (www.ma.slu.se).

MATERIAL OCH METODER

Sedimentprovtagning och glödförlust-analys

Sedimentprovtagningen gjordes i sjöns djupaste del (17 m vattendjup) i januari 1999. Provtagning av det sentida sedimentet (de översta 0-60 cm) gjordes med frysprovtagare. I detta fall användes en helt mekanisk variant av den provtagare som beskrivits av Renberg och Hansson (1993). Denna frysprovtagare består av en kilformad metallbehållare som sänks ned i sedimentet, efter att provtagaren först fyllts med kolsyreis och alkohol. Sedimentet fryser fast utanpå provtagaren (Fig. 1). Det frusna sedimentet smälts loss från provtagaren och transporteras till laboratoriet i fruset tillstånd för senare analys. Det djupare, mer kompakterade, sedimentet provtogs med hjälp av en rysk torvborrh (Aaby & Digerfeldt 1986). Totalt omfattade sedimentprofilen ca 350 cm från sedimentytan ner till det minerogena östersjösediment som ligger under Källsjöns sediment.

För att bestämma mängden organiskt material i sedimentet gjordes en glödförlustanalys. Centimetertjocka prover togs med 10 cm mellanrum, förutom närmast sedimentytan där prover togs med tätare intervall. Sedimentproverna torkades vid 105 °C i 24 timmar, och därefter glödgades de vid 550 °C i 4 timmar.

Flygaska

När olja och kol förbränns i högtemperaturanläggningar bildas svaveldioxid, men också flygaskpartiklar som liksom svavlet kan transporteras långa sträckor. En typ av flygaskpartiklar är sfäriska, svarta, mikroskopiska partiklar med ett karakteristiskt utseende (Fig. 2). Dessa partiklar finns i sediment och i markens ytskikt i hela Sverige (Renberg & Wik 1985a; 1985b; Wik & Renberg 1991; 1996). Det är en god korrelation mellan koncentrationen av flygaskpartiklar i sjösedimenten och svaveldepositionen över Sverige. Mängden flygaskpartiklar i sedimenten speglar kol- och oljeförbränningens historia. Koncentrationen av partiklar i en sedimentpropp ger



Figur 1. Provtagning av det översta sedimentlagret (ca 60 cm) i Källsjön gjordes med frysprovtagare.



Figur 2. Foto av flygaskpartikel taget i svepelektronmikroskop. Denna typ av partikel från fossil förbränning är normalt 5 – 30 μm i diameter.

således en uppfattning om hur belastat området har varit av föroreningar från fossil förbränning. I Sverige gäller att flygaskpartiklar började uppträda mer allmänt i sediment från och med 1800-talets mitt. På 1950-talet ökade förekomsten på grund av att användningen av fossila bränslen ökade markant. En topp nåddes i början av 1970-talet och därefter har förekomsten minskat på grund av minskad oljeförbränning och utbyggd rökgasrening. Denna efterkrigsuppgång och toppen på 1970-talet syns normalt tydligt i sedimenten och kan användas för indirekt datering.

Prover för flygaska togs ur frysprovet, med tätare intervall i sedimentprofilens övre del. Beredning av flygaskpreparat omfattar bortoxidering av organiskt sedimentmaterial med hjälp av 30 % väteperoxid. Därefter sker en tvättning i 10 % saltsyra, samt upprepad tvättning i destillerat vatten. Suspensionen överförs till glaspetriskål och vattnet får avdunsta, varefter räkning av partiklar sker i stereomikroskop (50x förstoring). Metoden finns mer utförligt beskriven i Wik och Renberg (1996). Varje prov räknades två gånger för att öka säkerheten.

Blykoncentration samt isotopkvot

Analys av blykoncentrationer och stabila isotoper (^{206}Pb och ^{207}Pb) i sediment- och torvlagerföljder, har visat att bly har en mycket längre föroreningshistoria än man tidigare ansett. I Sverige ser vi de första spåren av blyhaltiga luftföroreningar för 3 000 - 4 000 år sedan. Under romersk tid, kring år 0, förekom en liten men tydlig topp i nedfallet över hela Sverige. Från 900-talet e Kr ökade nedfallet markant. Man kan säga att det är medeltiden som är den verkliga starten på föroreningseran snarare än den industriella revolutionen (Renberg et al. 1994; Brännvall et al. 1997; 1999; 2001; Bindler et al. 1999; Renberg et al. 2000).

Med hjälp av isotopanalyser kan man särskilja föroreningsbly från naturligt förekommande bly som härstammar från den lokala berggrunden och jorden. Förutom att blyanalyserna ger en beskrivning av hur depositionen av luftburna föroreningar varit genom tidernas lopp, kan blyprofilen

användas för indirekt datering av sedimentet. Det är möjligt genom att blyprofilen innehåller några markanta tidsmässiga förändringar som är lätta att hitta igen.

Från Källsjöns sediment analyserades prover med avseende på såväl blykoncentration som de stabila isotoperna ^{206}Pb och ^{207}Pb . I de översta 5 cm togs kontinuerliga halvcentimetertjocka prover och längre ner i sedimentet togs prover ut med glesare intervall. Proverna torkades vid $80\text{ }^\circ\text{C}$, varefter de finfördelades i mortel. Därefter vägdes 0,3 g torrt sediment in i teflonrör, och salpetersyra och perklorsyra (10:1) tillsattes för att lösa upp organiskt material och lättlösliga mineral. Proverna analyserades med ICP-MS teknik på Miljöforskningslaboratoriet, SLU Umeå.

Koncentrationen föroreningsbly i varje prov ($\text{Pb}_{\text{föroren}}$) beräknades enligt formeln:

$$\text{Pb}_{\text{föroren}} = \left[\frac{{}^{206}\text{Pb} / {}^{207}\text{Pb}_{\text{prov}} - {}^{206}\text{Pb} / {}^{207}\text{Pb}_{\text{bkgd}}}{{}^{206}\text{Pb} / {}^{207}\text{Pb}_{\text{föroren}} - {}^{206}\text{Pb} / {}^{207}\text{Pb}_{\text{bkgd}}} \right] \times \text{Pb}_{\text{prov}}$$

Den naturliga bakgrundskvoten i området ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}_{\text{bkgd}}$) beräknades som medelvärdet av de fem nedersta sedimentproverna. Föroreningskvoten ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}_{\text{föroren}}$) antogs vara 1,14 (Hopper et al. 1991) för de översta 15 cm av sedimentet (1900-talet fram till idag) och 1,17 (Wedepohl et al. 1978) för de djupare sedimentproverna (före 1900-talet). Dessa värden representerar en beräknad medelkvot för blyutsläpp till luft som grundar sig på omfattande analyser av bland annat malmer som användes under respektive period (se Brännvall et al. 2001). Pb_{prov} är total blykoncentration i provet (summan av föroreningar och naturligt bly).

Kalcium- och magnesiumanalys

Kalcium och magnesium ingår i dolomitkalk, som ofta används vid kalkning av sjöar och vattendrag. Dessa ämnen är relativt mobila i sjösediment, men det är tänkbart att en förhöjd halt av kalcium och magnesium kan ses i sjösediment efter kalkning, vilket i så fall skulle kunna ge ytterligare en datering av de ytliga

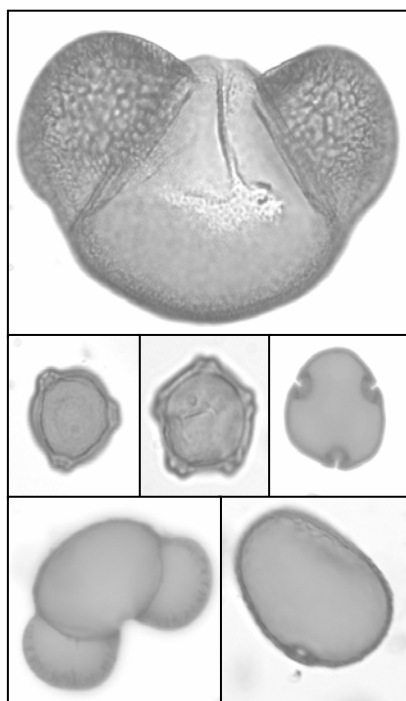
sedimentlagren (mitten av 1980-talet, när den första kalkningen ägde rum i Källsjön).

De lösningar som användes för blyanalys analyserades därför också med avseende på kalcium och magnesium. Proverna filtrerades och lantanlösning tillsattes innan analys utfördes med atomabsorptionsspektrofotometer (Skoog 1998).

Pollen

Tidigare erfarenheter från paleolimnologisk forskning har visat att pollenanalys är ett viktigt verktyg för förståelsen av sjöars pH-utveckling (Renberg et al. 1993a; 1993b; Korsman et al. 1994; Korsman & Segerström 1998). Med pollenanalys kan man fastställa hur vegetation och markanvändning utvecklats i tillrinningsområdet.

Som ett första steg i pollenanalysen gjordes en preliminär analys för att fastställa på vilken nivå i sedimentet granpollen börjar förekomma. Granen etablerade sig som skogsbildande trädslag i området för ca 2 800 år sedan (Engelmark 1978). Därefter togs sex prover jämnt utspridda i perioden från sjöns isolering från havet till för ca 3 000 år sedan, och för de sista 3 000 åren togs ett prov var femte cm (i medeltal ett prov per århundrade). Prover för pollenanalys preparerades enligt standardmetod (Moore et al. 1991). Prepareringen omfattar avlägsnande av minerogent material med hjälp av vätefluorid, följt av acetolys med ättiksyraanhydrid och svavelsyra för att avlägsna organiskt material utöver pollen och sporer. Efter tvättning i ättiksyra och vatten infärgas proverna med safraninfärgad glycerin för att underlätta identifiering. På varje nivå räknades ca 500 pollenkorn. Den relativa förekomsten av pollen beräknades utgående från det totala antalet pollen från landlevande kärlväxter (Fig. 3). Sporer är således inte inräknade i beräkningsunderlaget.



Figur 3. Foton av ett urval pollen tagna i ljusmikroskop. Överst gran, i mitten från vänster björk, al och lind, samt längst ner tall och råg. Ett granpollen är ca 300 μm stort.

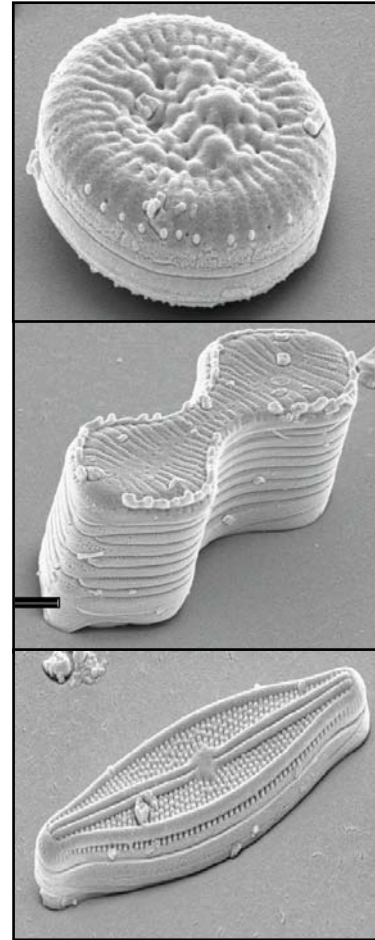
Kiselalger och pH-rekonstruktion

Kiselalger, eller diatoméer som de också kallas, är encelliga alger med ett skal av kisel (Fig. 4). Kiselalgerna, som är vanliga i alla typer av sjöar, är endast 5 - 200 μm stora och utgör en grupp alger bestående av hundratals olika arter. Varje år avsätts normalt över en miljon döda kiselalger per cm^2 i en sjös djuphåla (ackumulationsbotten). De mikroskopiska kiselalgsskalen är mycket svår-

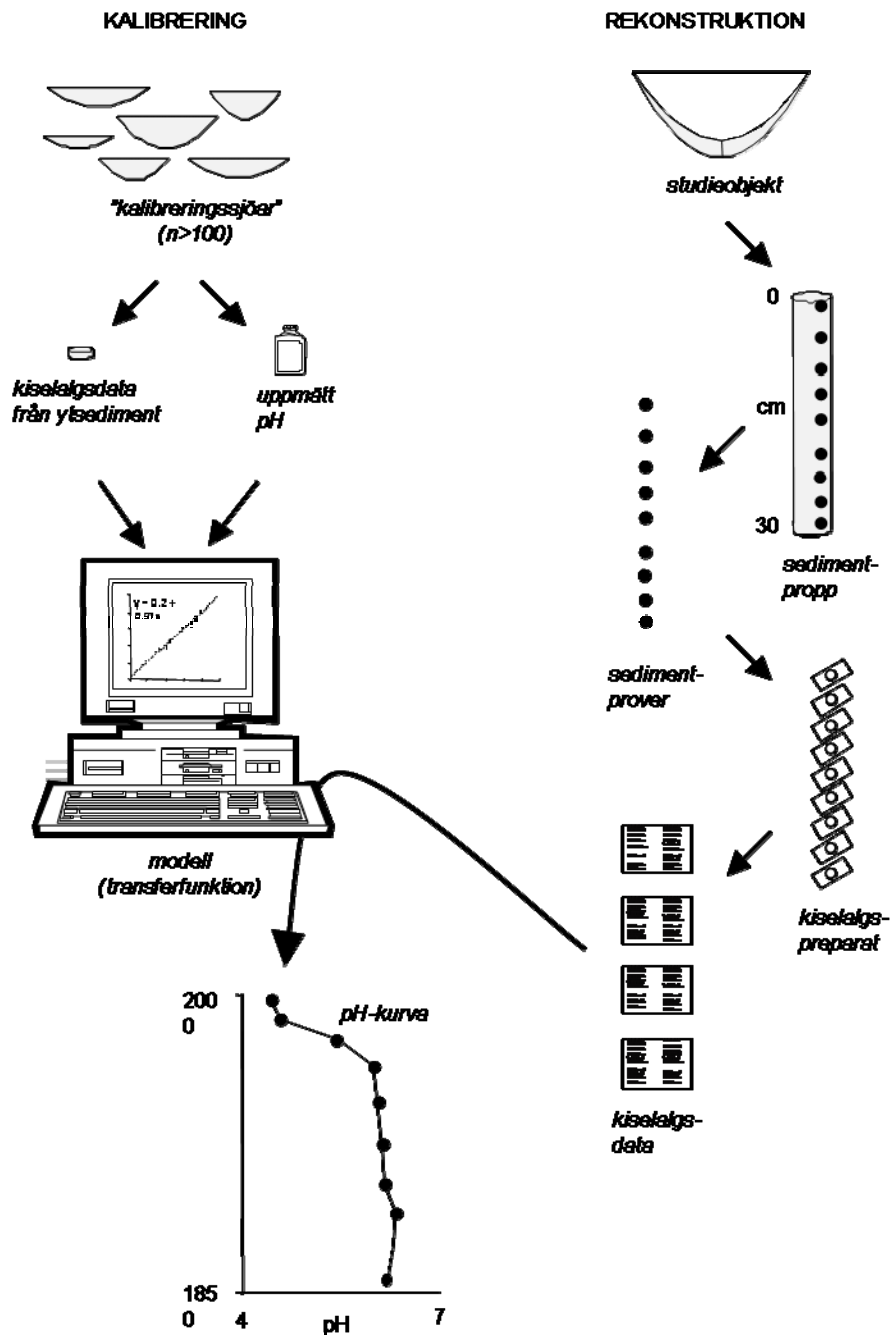
nedbrytbara, och de kan lätt identifieras även om de legat tusentals år i sedimentet.

Kiselalgspreparat gjordes för 19 nivåer i Källsjön. I de översta sedimentlagren, som representerar kalkningsperioden, togs täta prover, medan glesare prover togs för att undersöka bakgrundsförhållanden. Preparatberedningen omfattar borttagning av organiskt material med hjälp av väteperoxid, tvättning i saltsyra, samt upprepad tvättning i destillerat vatten (Renberg 1990). Preparaten monterades med monteringsmedium Microps 163 Diatom mountant (ASCO Laboratories, Manchester) och 300-500 kiselalgsskal räknades på varje nivå i faskontrastmikroskop med 1000x förstoring. Taxonomin följer Camburn et al. (1986), Krammer och Lange-Bertalot (1986-1991), och Stevenson et al. (1991).

Kiselalgerna är känsliga för surhetsgraden i vattnet. Det innebär att vissa arter enbart förekommer i surt vatten, medan andra i stort sett bara förekommer vid högt pH. Detta upptäcktes redan i början av 1900-talet, och under senare tid har metoder utvecklats för att använda kiselalger som en "biologisk pH-meter" för att bedöma vilket pH en sjö haft förr i tiden (se t ex Renberg et al. 1993a; Battarbee et al. 1999). Dessa metoder bygger på analyser av vilka arter som förekommer och hur vanliga dessa är på olika nivåer i en sedimentpropp (Fig. 5). För att "översätta" artammansättningen till pH-värden (rekonstruera pH) måste en så kallad transferfunktion finnas tillgänglig. Transferfunktionen tas fram genom multivariat modellering (weighted-average-kalibrering) av sambandet mellan kiselalgfloras sammansättning i ytsediment från ett stort antal sjöar och uppmätt pH i dessa sjöar. För rekonstruktion av pH i Källsjön användes en transferfunktion som bygger på pH-optima för 115 kiselalgsarter från 118 svenska sjöar. En beskrivning av rekonstruktionsförfarandet, samt pH-optima och tolerans för de arter som ingår i kalibreringen ges i Korsman och Birks (1996). Rekonstruktionen av pH gjordes med hjälp av dataprogrammet WACALIB (Line et al. 1994), medan dataprogrammet CANOCO (Ter Braak, 1988; 1990) användes för multivariat modellering av förändringar i den fossila kiselalgsammansättningen.



Figur 4. Foton av kiselalger tagna med svepelektronmikroskop. Överst *Cyclotella comensis*, i mitten *Tabellaria binalis* och längst ner *Brachysira vitrea*.



Figur 5. Principskiss för pH-rekonstruktion med hjälp av kiselalger. Till vänster redovisas kalibreringssteget, dvs upprättande av en så kallad transferfunktion för "översättning" av artsammansättningen till pH-värden. Transferfunktionen tas fram genom multivariat modellering av sambandet mellan kiselalgsfloras sammansättning i ytsediment från ett stort antal sjöar och uppmätt pH i dessa sjöar. Till höger rekonstruktionssteget. En serie prover från sedimentpropparna analyseras i mikroskop vid högsta möjliga förstoring med avseende på kiselalgsfloras sammansättning (vilka arter som förekommer och deras frekvens). Resultaten sätts in i transferfunktionen som översätter kiselalgsfloras sammansättning i varje prov till ett pH-värde för sjövattnet i vilket kiselalgerna en gång levde.

RESULTAT OCH DISKUSSION

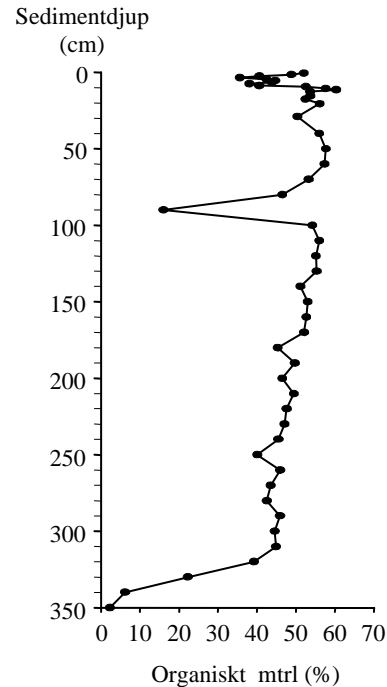
Sedimentkaraktär och glödförlust-analys

Om man betraktar sedimentet nedifrån så övergår det minerogena östersjösedimentet till mörkbrunt sjösediment vid ungefär 340 cm djup under sedimentytan. Två distinkta lerlager finns i sjösedimentet. De omfattar ett 1 cm tjockt lager vid ca 185 cm djup, samt ett 6 cm tjockt lager ca 90 cm under sedimentytan. Omfattningen på dessa lager tyder på någon form av ras. Vid cirka 30 cm nivån övergår sedimentet uppåt till att bli ljusare, vilket tyder på en ökad andel minerogent material. De översta två centimetrarna består av laminerat sediment, där sex mörka lager kan urskiljas. En rimlig tolkning till denna laminering är att syrgasbrist rått just ovanför sedimentytan de senaste åren och att detta reducerat bottenfaunan.

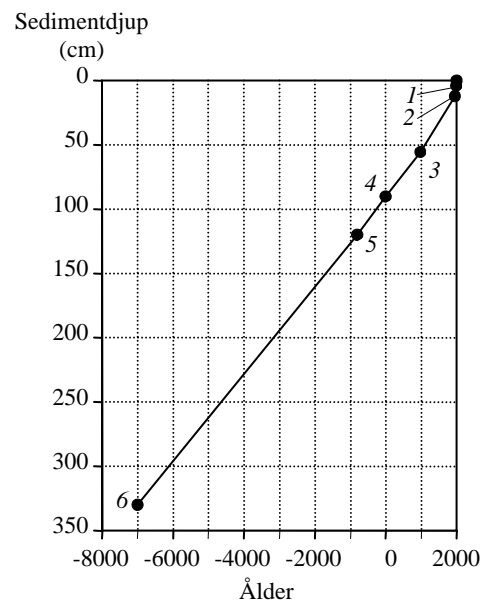
Andelen organiskt material (mätt som glödförlust) ökar från <10 % vid 350 cm sedimentdjup till >40 % vid 320 cm (Fig. 6). Därefter ökar halten organiskt material svagt för att som mest nå ca 60 %. I det minerogena lagret vid ca 90 cm, sjunker förståsen halten markant. Den organiska halten ligger sedan på en hög nivå strax under 60 %. Från 10 cm och upp till ytan fluktuerar den, som lägst är den 35 % i ett diffust minerogent lagret vid 3,5 cm sedimentdjup, för att sedan öka till drygt 50 % i ytan.

Datering

En indirekt datering av Källsjöns sediment har gjorts genom en sammanställning av resultaten från analyserna av kalcium, flygaska, blyföreningar och pollen (Fig. 7). För närmare förklaring se också kommande redovisning av resultat av de enskilda analyserna. Den markanta ökningen i kalciumkoncentration (redovisas som punkt 1 i diagrammet), som börjar fyra cm ner i sedimentet, antas markera starten för kalkningsverksamheten i sjön. Från flygaskanalysen utnyttjas uppgången i partikelförekomsten under 1950-talet, som i Källsjöns sediment kan ses ca 12 cm ner i sedimentet (2). Förändringar i $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -kvoten som beror på nedfall av blyhaltiga luft-

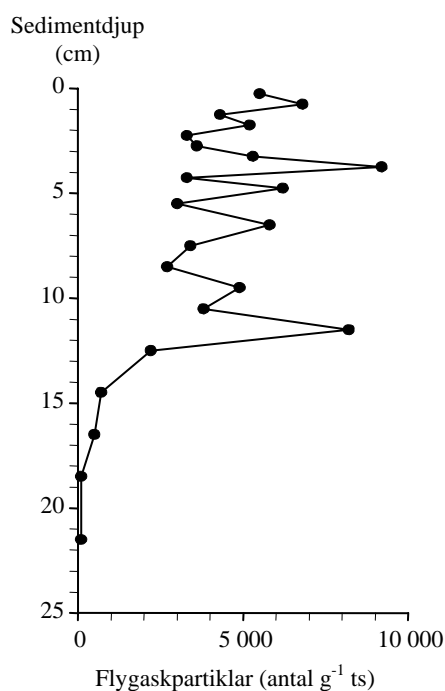


Figur 6. Halten organiskt material (% glödförlust) i Källsjöns sediment.



Figur 7. Djup-ålder-diagram för Källsjöns sediment. I diagrammet redovisas de sex indirekta dateringarna (1 - 6), som presenteras i texten.

föroreningar visar på vilken nivå i sedimentet som 1000 e Kr (3) och år 0 (4) ligger. Vad gäller datering med hjälp av pollenanalys utnyttjades etablering av gran som skogsbildande trädart i området (5) samt den tidiga postglaciala etableringen av al (6) (Engelmark 1978).



Figur 8. Koncentrationen av flygaskpartiklar i Källsjöns sediment. ts=torrt sediment.

Flygaska

Förekomsten av flygaskpartiklar visar en tydlig ökning från 18 till 12 cm sedimentdjup. Där ovanför fluktuerar koncentrationen kring 5 000 partiklar per gram torrt sediment (ts) (Fig. 8). Det maximala antalet partiklar ligger mellan 8 000 och 10 000 partiklar per gram torrt sediment, vilket är i storleksordningen fem gånger lägre värden än i sydsvenska sjöar (Wik & Renberg 1996). Ingen tydlig 70-tals-topp och därpå följande nedgång kan dock ses i Källsjöns sediment. Detta och fluktuationerna i flygaskprofilen i de översta centimetrarna av sedimentet tyder på en viss påverkan på sedimentationen i sjön. Detta kan vara en effekt av kalkningarna. Dessförinnan kan också dämningarna av sjön liksom den upphörda dämningens regimen efter att dammen raserades ha påverkat sedimentationen. Störning på grund av bioturbation i djuphålan kan dock uteslutas på grund av förekomst av laminering i det ytliga sedimentet.

Bly

Ursprungskoncentrationen för bly i Källsjöns sediment är praktiskt taget konstant, ca 4 µg g⁻¹ torrt sediment (ts), upp till 90 cm sedimentdjup (Fig. 9), med undantag för lite högre koncentration i det minerogena sedimentet i sedimentprofilens botten. Vid 50 cm sker en markant ökning av blykoncentrationen, och maximivärden upp mot 80 µg g⁻¹ ts nås nära sedimentytan.

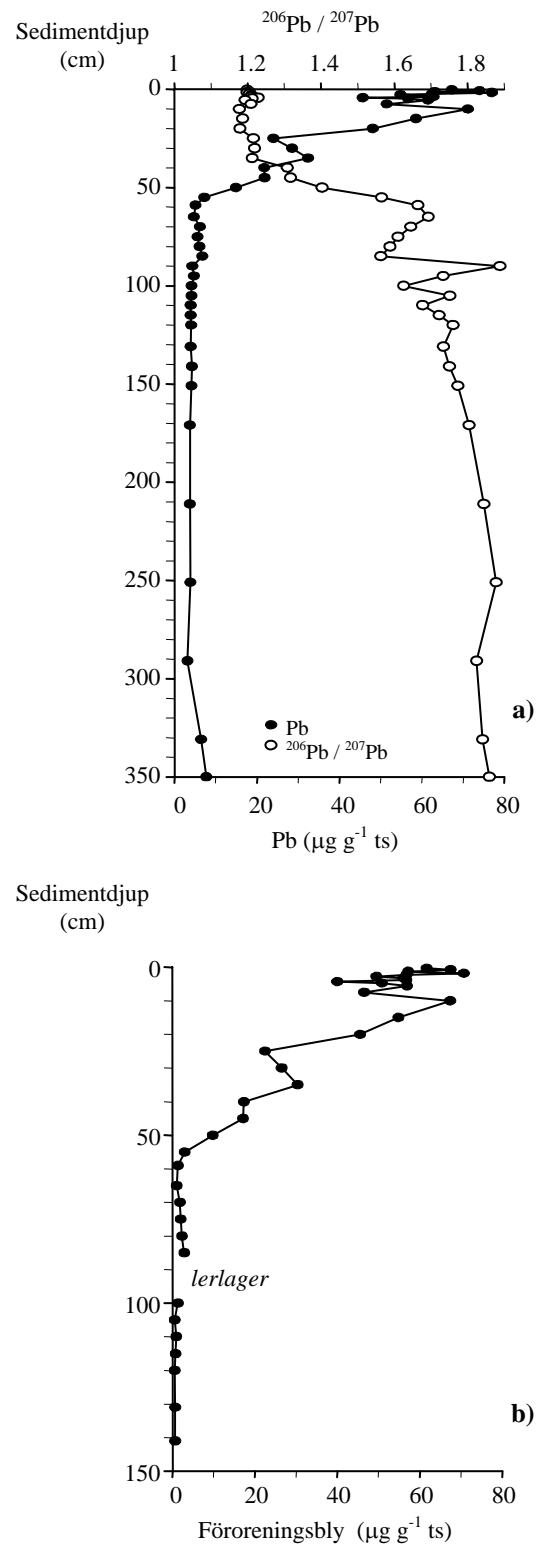
Blyisotopkvoten (²⁰⁶Pb/²⁰⁷Pb) ligger på ca 1,8 och är relativt konstant fram till 150 cm under sedimentytan, där en sänkning börjar märkas. I det minerogena lagret mellan 95 och 90 cm syns en tillbakagång mot ursprungskvoten. Ett minimum i kvoten finns vid ca 85 cm, och sedan stiger kvoten upp till 65 cm, varefter den återigen

sjunker. I de översta 30 centimetrarna varierar isotopkvoten mellan 1,18 och 1,23.

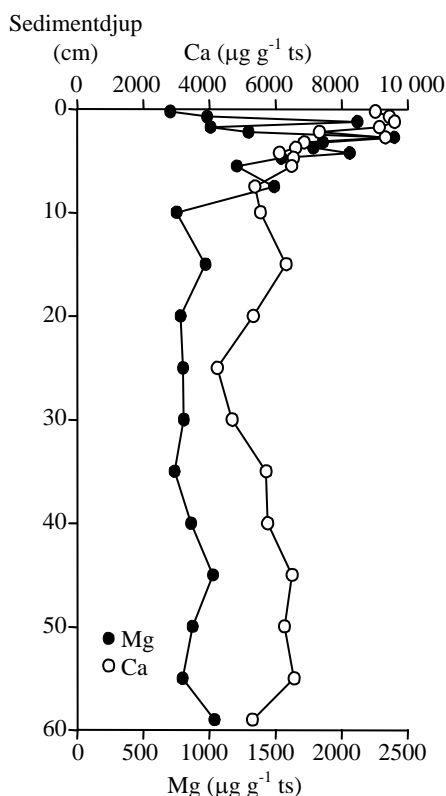
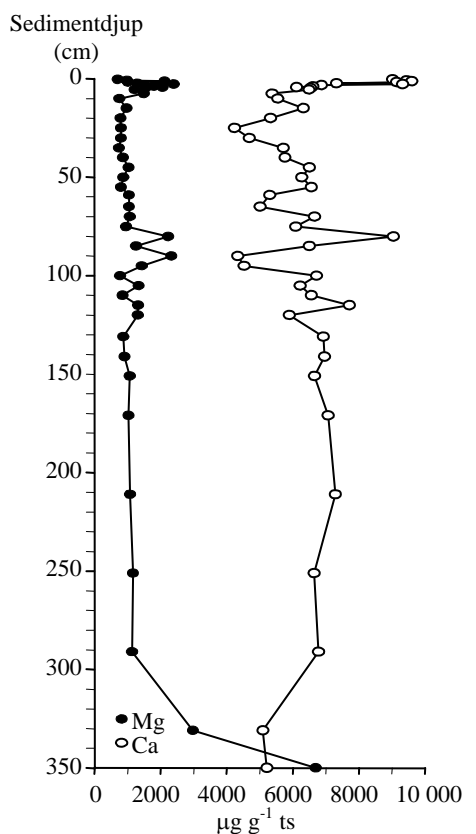
Blyisotopkvoten är mycket känsligare för att detektera inflöde av föroreningsbly än blykoncentrationen, särskilt i en sjö som denna som har så hög naturlig $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ kvot och låg blykoncentration i sedimentet. Det behövs ett förhållandevis litet tillskott av föroreningsbly med en låg kvot (ca 1,17) för att kvoten i sedimentet ska sjunka. I sydvenska sjöar har som redan nämnts nedfall av blyhaltiga luftföroreningar spårats ungefär 3 500 år bakåt i tiden med blyisotopanalyser samt genom koncentrationsanalyser i ombrotrof torv från högmossar (Brännvall et al. 1997). I Källsjön börjar $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ -kvoten sjunka någonstans vid 150 cm nivån, dvs föroreningsinflytande börjar märkas här vid ungefär samma tidpunkt som i södra Sverige.

I Figur 9b redovisas koncentrationen av föroreningsbly, som beräknats med hjälp av isotopkvoten ($^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$). Tidstrenden följer den som numera är väl belagd genom undersökningar av >30 sjöar i Sverige (Brännvall et al. 1999; 2001; Renberg et al. 2000). Vid tiden för Kristi födelse finns det en första mindre topp i nedfallet, som härstammar från utsläpp i Europa under romersk tid (den störs något av lerlagret). Vid ca 50 cm djup följer en markant uppgång som speglar en påtaglig ökning av luftföroreningar med början under senare delen av 900-talet. Sedan ökar nedfallet av bly efterhand. Liksom för flygaskpartiklar ser blykoncentrationskurvan inte helt typisk ut i modern tid. Det finns ingen entydig 1970-tals topp. Denna topp är väl dokumenterad från sedimentundersökningar liksom från karteringen av blynedfall med hjälp av skogsmossor (Rühling et al. 1996). Således tyder blyanalyserna liksom flygaskanalyserna på att sedimentationen i sjön är störd. Även om man normaliserar resultaten för det faktum att glödförlusten varierar så förändras inte bilden påtagligt.

Sammanfattningsvis ger blyanalyserna bevis på ett långvarigt inflytande av luftföroreningsnedfall. I det moderna sedimentet är koncentrationen av föroreningsbly ca $75 \mu\text{g g}^{-1}$, vilket är mindre än



Figur 9. a) Den totala blykoncentrationen och blyisotopkvoten $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ i Källsjöns sediment. b) Koncentrationen av föroreningsbly. ts=torrt sediment.



Figur 10. Kalcium- och magnesiumkoncentrationen i Källsjöns sediment. ts=torrt sediment.

hälften av vad sydsvenska sjöar brukar ha (Stengårdshultasjön, en annan referenssjö, har till exempel $175 \mu\text{g g}^{-1}$). På västkusten finns sjöar som har ännu högre blyhalt, men å andra sidan finns sjöar i Norrlands inland med mycket lägre halter.

Om man följer Naturvårdsverkets (1999) bedömningsgrunder för miljö kvalitet gällande sjöar och vattendrag finner man att Källsjöns här uppmätta ursprungshalt ($4 \mu\text{g g}^{-1}$) överensstämmer väl med bedömningsgrundernas sk naturliga, ursprungliga halt ($5 \mu\text{g g}^{-1}$). Man finner vidare att halten i ytsedimentet ligger något över den sk bakgrundshalten i N Sverige ($50 \mu\text{g g}^{-1}$) och i paritet med bakgrundshalten i S Sverige ($80 \mu\text{g g}^{-1}$). Med bakgrundshalt menas i bedömningsgrunderna nuvarande "normala" halter i ytsediment i sjöar som inte är påverkade av lokala källor. Källsjön med sin blyhalt på $80 \mu\text{g g}^{-1}$ i ytsedimentet måste således klassificeras som uppvisande en "Tydlig avvikelse" från jämförvärdet (ursprungshalten). I Sverige lär det inte finnas någon sjö som förtjänar klassificeringen "Ingen avvikelse", dvs där nuvarande halt inte överstiger ursprungshalten (i annat fall än om den organiska halten i sedimentet varierar, men i så fall har klassificeringen inget med föroreningsbelastningen att göra).

Kalcium- och magnesium

Kalcium- och magnesiumkoncentrationen varierar i grova drag med andelen organiskt material i sedimentet (Fig. 10). Magnesium som framförallt är knutet till minerogent material uppvisar höga värden i östersjösedimentet, i lerlagret vid ca 90 cm sedimentdjup, samt just under sedimentytan. Kalcium, som är mera knutet till organiskt material, visar en delvis motsatt bild. Magnesiumtoppen i ytsedimentet (2-8 cm djup) kan huvudsakligen förklaras av ökat minerogent inslag i sedimentet (lägre glödförlust), medan den höga kalciumkoncentrationen i de översta fyra cm av sedimentet inte kan förklaras av glödförlustvariationer utan beror på kalkningarna.

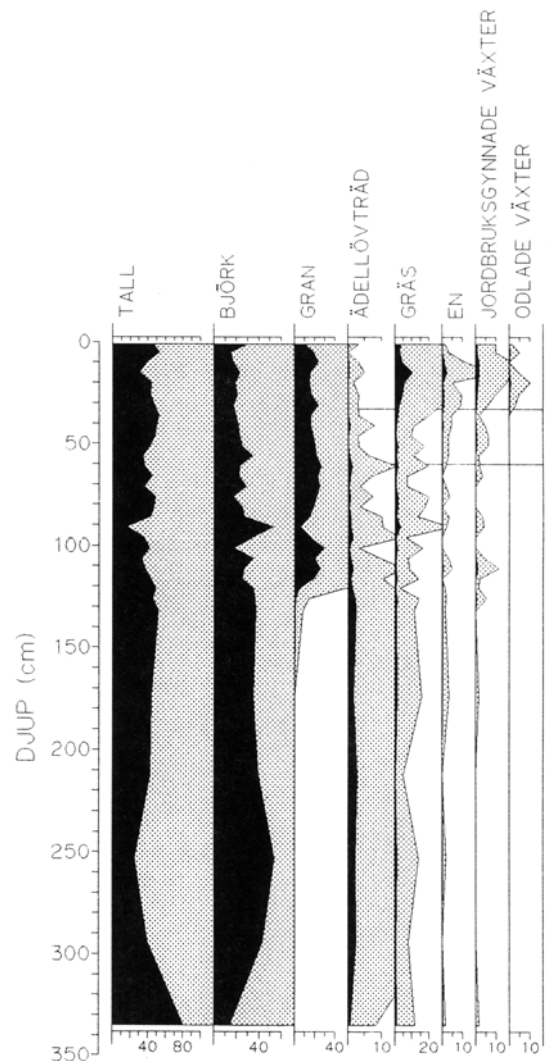
Pollen

Vegetations- och odlingsutvecklingen sammanfattas i Figur 11. Ett fullständigt pollendiagram redovisas i Bilaga 1.

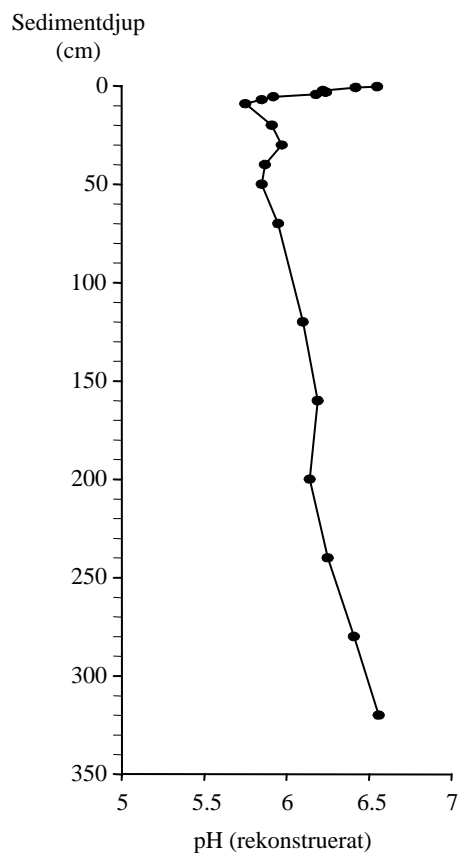
Längst ner i sedimentet dominerar pollen från tall och björk. Här finns också pollen från havtorn, vilket tyder på en havsstrandflora. Under perioden 7 000 – 1 000 f Kr dominerar pollen av tall och från lövträd, främst björk och al, men även ädellövträd såsom ek, alm, lind och hassel. Granpollen uppträder från och med 120 cm sedimentdjup, samtidigt som pollen från ädellövträd minskar. Pollenundersökningar från ¹⁴C-daterade sediment- och torvproppar i närheten har visat att granetableringen i området skedde för ca 2 800 år sedan (Engelmark 1978).

Det tjocka minerogena lagret vid ca 90 cm djup karakteriseras av en kraftig topp av björk och ormbunke och en motsvarande nedgång i tall och gran. Sannolikt har det minerogena lagret uppkommit på grund av en naturlig störning i tillrinningsområdet. Inga säkra tecken finns i pollenanalysen på att människan börjat utöva påverkan i tillrinningsområdet vid denna tidpunkt. Först senare, omkring 1 000 e Kr (ca 60 cm djup), kan man se en viss uppgång av pollen från kulturgynnade arter, såsom en, syror, mårör och groblad. Detta tyder på att jordbrukskulturen, möjligen något som liknade fäbodverksamhet, startat i området. Det är väl känt från pollenanalyser att jordbrukskulturen expanderade längs hela norrlandskusten för i runda tal 1 000 år sedan (se t ex Engelmark & Wallin 1985).

Vid ca 30 cm, uppskattningsvis för 500 år sedan, börjar pollen av sädesslag förekomma i sedimentet. Det är främst råg och möjligen även korn. Gräspollen blir också betydligt vanligare. Detta tyder på att mark har röjts för odling i närheten av sjön. I ytsedimentet sker en nedgång i frekvensen pollen av kulturgynnade och odlade växter, något man kan förvänta sig med hänsyn till att byn vid sjön övergivits.



Figur 11. Relativ förekomst av pollen från tall, björk, gran, en och gräs samt pollen som speglar odlingsutvecklingen. Ett fullständigt pollendiagram redovisas i Bilaga 1.



Figur 12. pH-utvecklingen i Källsjön baserad på rekonstruktion med hjälp av kiselalgsammansättningen.

Kiselalger och pH-förändringar

I Bilaga 2 visas den procentuella fördelningen av de vanligaste kiselalgsarterna. Det tidiga kiselalgssamhället i Källsjön (320-240 cm sedimentdjup) karakteriseras framförallt av en närvaro av arter som förekommer i vatten med högre pH, s k alkalifila arter, såsom *Achnanthes minutissima* och planktonarten *Cyclotella kützingiana*. Planktonarter inom släktet *Aulacoseira* är också vanliga under Källsjöns tidiga utvecklingsstadium.

Detta kiselalgssamhälle förändras därefter gradvis till en flora som domineras av arter som förekommer vid lågt pH, s k acidofila arter. Denna acidofila flora består framförallt av bentiska arter inom släktet *Eunotia*, med *Eunotia incisa* som dominerande art. Planktonarterna domineras av arter inom släktet *Aulacoseira*, medan *Cyclotella*-arter försvinner helt. En dominerande planktonart är *Aulacoseira distans* var. *tenella*, som framförallt förekommer i relativt dystrofa vatten (Eloranta 1986). I de översta centimetrarna förändras florans drastiskt. Nu blir alkalifila planktonarter dominerande, med *Asterionella formosa* som den mest dominerande, tillsammans med *Cyclotella stelligera*, medan *Aulacoseira distans* var. *tenella* minskar markant. Den bentiska, alkalifila arten *Achnanthes minutissima* återkommer också i de översta sedimentlagren, medan *Eunotia*-arterna minskar.

Det är ingen tvekan om att förändringarna i kiselalgsammansättningen i ytsedimentet är en följd av kalkningarna. Förändringarna överensstämmer med tidigare paleolimnologiska studier i kalkade sjöar. I Källsjön blir planktonarten *Asterionella formosa*, som knappast förekommit tidigare under sjöns postglaciala historia, en vanlig art. En liknande förändring har noterats i samband med kalkning i USA (Ohl et al. 1990), Skottland (Flower et al. 1990; Cameron 1995) och i Stora Älgsjön i Dalarna (Renberg & Ek 1998). I Källsjön skedde också en kraftig ökning av den bentiska arten *Achnanthes minutissima*, vilken också visat sig reagera kraftigt på kalkning i Holmes Lake, Adirondack (Rhodes 1991) liksom i Lysevatten, Bohuslän (Renberg & Hultberg 1992).

Vid sjöns bildning låg pH enligt kiselalgsberäkning på ca 6,6 och det har sedan gradvis sjunkit ner till pH 5,7 vid 9 cm sedimentdjup (Fig. 12). Den nedåtgående trenden i pH överensstämmer med tidigare paleolimnologiska studier av pH-utvecklingen i försurningskänsliga sjöar (Renberg et al. 1993a; 1993b; Korsman & Segerström 1998; Korsman 1999; Renberg & Ek 1998). Denna naturliga försurningsutveckling, som pågått sedan Källsjön bildades, bryts inte förrän kalkningsverksamheten drar igång. I samband med kalkningsverksamheten sker sedan en markant ökning till pH-nivåer över 6 i de översta centimetrarna, med det högsta värdet (pH ca 6,6) i det översta provet.

En eventuell svag alkalinisering (högre pH) kan skönjas vid 25-30 cm sedimentdjup. Detta är enligt pollenanalysen vid tidpunkten för starten av odling i sjöns närhet (jfr Fig. 11). Förändringen i pH är dock inte signifikant, utan ryms inom felmarginalen för kalibreringsmodellen ($\pm 0,36$ pH-enheter; Korsman & Birks 1996).

Noteras bör också att den kiselalgsbaserade pH-rekonstruktionen inte visar på lika sura förhållanden som de som uppmätts innan kalkningarna började (pH 4,8). Här kan möjligen de störningar i sedimentet som påvisats i flygask- och blyanalysen ha spelat en roll. Om en omlagring har skett av sediment från grundare områden i sjön till djuphålan kan detta ha resulterat i att arter med högre pH-optima har kommit dit. En viktigare faktor är sannolikt att de lägsta uppmätta pH-värdena representerar surstötter, och surstötter kan inte detekteras i en sedimentbaserad studie som inte kan ge så hög tidsupplösning. Kiselalgssammansättningen i sedimentet speglar de förhållanden som råder under huvuddelen av året, dvs basflödesförhållanden.

KÄLLSJÖNS UTVECKLING FRÅN TILLKOMSTEN FRAM TILL IDAG

Källsjön isolerades från havet genom landhöjningen för ungefär 9 000 år sedan. Längst ned i den undersökta sedimentproppen finns minero- gent sediment som härstammar från isolerings-

fasen. Medan sjön ännu var en havsvik växte havtorn och andra havsstrandsväxter vid sjön, men landhöjningen var flera centimeter per år och snart var sjön helt omgiven av skog. Skogen dominerades av tall men var rikare på lövträd än dagens skog. Förutom björk och al förekom ädellövträd som ek, alm, lind och hassel. Vattnets pH var cirka 6,5.

Årtusendena gick och sjön förblev en skogssjö. Sedimentets höga organiska halt vittnar om att det inte förekom någon erosion av markerna runt sjön eller nämnvärd införsel av minerogent material via tilloppet. pH sjönk med en takt av ungefär 0,1 pH-enhet per årtusende. Detta är en normal företeelse för en sjö som denna som är omgiven av ganska magra jordar. Denna naturliga försurning beror på fortskridande jordmånsprocesser, dvs urlakning av markens ytskikt och bildning av en sur skogsjord. Det vatten som kom till sjön innehöll små mängder näringsämnen och var relativt surt. I sjön försvann kiselalgsplankton av släktet *Cyclotella*, som uppträder i näringsrikare sjöar med högt pH, och ersattes av *Aulacoseira*-arter, inte minst av en art (*A. distans* var. *tenella*) som är typisk för relativt dystrofa sjöar. Sjövattnet innehöll således humusämnen som gjorde det brunt och svagt surt, vilket är vanligt i skogssjöar.

De första spåren av mänskligt inflytande som vi ser i sedimentet är nedfall av föroreningsbly för cirka 3 000 år sedan. Det handlar om mycket små mängder, men det är tillräckligt för att blyisotopsammansättningen i sedimentet ska börja förändras. Innan nedfallet av luftföroreningar började höja blyhalten i sedimentet var blyhalten cirka 4 µg per gram torrt sediment, dvs en tjugonedel av vad den är idag. Runt tiden för Kristi födelse ökade blynedfallet något, men det var förstås fortfarande väldigt lågt jämfört med i nutid. Detta ökade nedfall syns bäst i blyisotopsammansättningen, särskilt som ett flera centimeter tjockt mineralkornlager som stör bilden råkar finnas i sedimentet vid denna tid. Detta lager bör härstamma från något ras som inträffat i tillrinningsområdet. Orsaken till detta ras kan man naturligtvis bara spekulera om. Men i Kassjön i Västerbotten vittnar det varviga sedimentet om en abrupt ändring av erosionsförhållandena 250 f Kr,

något som Petterson (1999) tolkat som en effekt av en ökad snömängd och ökad vårflod. Måhända kan raset vid Källsjön kopplas samman med en möjlig sådan klimatförändring.

En av de största förändringar som ägt rum i landskapet är granens etablering, som i detta område ägde rum för ungefär 2 800 år sedan. Granen fick på mycket kort tid en dominerande roll i vegetationen. Det har ofta sagts att granen försurar, men i Källsjön orsakade granen inte någon ökad försurningstakt utan pH fortsatte att sjunka i samma långsamma takt som tidigare. I en tidigare paleolimnologisk studie, vars syfte var att studera pH-effekter i samband med den naturliga expansionen av granskogar i Sverige, syntes inte heller några tecken på att den naturliga invandringen av granen orsakade försurning av sjöar (Korsman et al. 1994). I den studien ingick bland annat en sjö från Hälsingland.

Kring 1000-talet börjar säkra spår av vegetationsförändringar till följd av mänsklig aktivitet uppträda i sedimentet. Det är pollen av syror, mårar och groblad. Dessa växter gynnas av bete och annan påverkan av jordbrukskulturen som breder ut sig längs norrlandskusten vid denna tid. Naturligtvis hade människor funnits i området långt tidigare, men de utövade inte någon större påverkan i detta ganska marginella område. Det var i de bördigare områdena närmare kusten och i de stora dalgångarna som bosättningen var koncentrerad. Brons- och järnålderskultur är väl dokumenterad såväl i arkeologiskt som paleoekologiskt material från Hälsingland (Baudou 1992; Liedgren 1992; Engelmark & Wallin 1985).

Under de sista årtiondena på 900-talet, ökar också nedfallet av blyluftföroreningar. Det sker över hela Sverige eftersom det rör sig om långväga transporterade föroreningar som härstammar till största delen från kontinentala Europa och från Storbritannien (Brännvall et al. 1999; Renberg et al. 2000). I Källsjöns sediment stiger blyhalten till 20-30 µg per gram torrt sediment. Det var alltså ett stort nedfall - ungefär hälften av den nedfallsnivå som vi har idag.

Under denna tid bryts också den nedåtgående trenden i Källsjöns pH-utveckling. Enligt kiselalgerna i sedimentet var då pH just under 6. Det finns tecken på att pH möjligen steg något de följande århundradena. Detta sker samtidigt som det i sedimentet uppträder tydliga tecken på att odling förekom invid sjön, framförallt pollen av råg. Vi uppskattar att denna odling började för ungefär 500 år sedan. Målet för den här undersökningen var dock inte att fastslå när odling började, och därför har vi inte lagt ned möda på att precis avgöra denna fråga. Varför bryts då den naturliga försurningstrenden? Den viktigaste orsaken är med säkerhet jordbrukskulturens intåg i området. Bränning, bete, uppodling, gödsling, och så småningom skogsbruk är faktorer som ändrade vegetation och markbeskaffenhet runt sjön, och tillförde sjön baskatjoner och näringsämnen som påverkade sjöns produktivitet och pH. Detta skedde dock i så liten grad att det inte förtjänar att benämnas eutrofiering.

En by uppstod vid sjön och som mest fanns ett tiotal hushåll. På ekonomiska kartan från början av 1950-talet är ungefär 10 ha markerat som odlingsmark. Omstruktureringen av ekonomin med omfattande nedläggning av småbruk efter andra världskriget slog hårt mot denna by, och 1959 flyttade de sista bofasta därifrån. Idag växer skog på de tidigare åkrarna. Det är naturligt att detta leder till en återgång mot naturliga, surare förhållanden. Naturligtvis kan man inte bortse från att det sura nedfallet ökat markant under samma tidsperiod. Såväl flygaskpartiklarna som föroreningsblyet vittnar om ett betydande luftföroreningsnedfall, även om det inte i storlek kan jämföras med det nedfall som drabbat till exempel sydvästra Sverige.

Som lägst kan vi utläsa ett pH kring 5,7 från kiselalgerna i sedimentet. Det skiljer sig markant från de lägsta uppmätta pH-värdena före kalkningarna. Det allra lägsta uppmätta pH-värdet är 4,8. Det framgår inte av tillgängliga uppgifter när detta prov togs, men det rör sig sannolikt om ett surstötsvärde. Även om kiselalgerna avslöjar att sjön inte drabbats av basflödesförsurning i modern tid finns ingen möjlighet att utifrån kiselalgerna hävda att sjön inte är påverkad av försurning under högflöden (surstötter). Sjöns

kiselalger, som växer under hela vegetationsperioden och som när de dör ansamlas i miljontal per kubikcentimeter sediment, känner inte av en surstöt på några dagar. Däremot kan en sådan surstöt naturligtvis slå hårt mot fisken.

1984 kalkades sjön första gången. Därmed steg pH momentant och har sedan legat mellan 6,5 och 7. Således är det från kiselalgerna rekonstruerade värdet i ytsedimentet på 6,6 i överensstämmelse med uppmätta värden. Sjöns pH är återställt till den nivå som rådde strax efter sjöns tillkomst för 9 000 år sedan. Kiselalgsfloran är dock vare sig densamma som då, eller som den var under 1900-talets första hälft. Istället har planktonarten *Asterionella formosa*, som praktiskt taget inte funnits i sjön tidigare, blivit den dominerande kiselalgsarten. Den alkalifila arten *Achnanthes minutissima* har också ökat markant efter kalkningarna. Orsaker till dessa floristiska förändringar är svåra att fastställa, men en möjlig förklaring kan vara en förändring i hårdheten på vattnet i samband med kalkningarna. Försumningskänsliga sjöar brukar karakteriseras av ett mjukt vatten, och kalkning kommer därmed inte enbart att resultera i en förändring i pH, utan också i en påtaglig förändring i hårdheten. Sannolikt har Källsjön, i likhet med andra försumningskänsliga skogssjöar, haft en låg kalcium- och magnesiumhalt under största delen av sin utveckling. Något som kan stödja denna tolkning av kiselalgsanalysen är att *Asterionella formosa*, som blir dominerande i samband med kalkningarna, oftast är knuten till relativt näringsrika jordbrukssjöar. Om liknande resultat uppvisas i andra IKEU-sjöar, kan en ökad forskning på effekter av omvandling av mjuka vatten till hårda vatten i samband med kalkning vara motiverad.

Denna studie av Källsjön illustrerar vikten av att få en bild av hela den postglaciala utvecklingen. Utgående från den kiselalgsbaserade rekonstruktionen kan man inte fastställa en konstant förindustriell pH-nivå. Analyserna visar på en gradvis ökad basflödessurhet. Om man med kalkningen ska återskapa ett naturligt tillstånd bör således målet för Källsjön ligga något under pH 6.

Slutligen kan man ställa frågan om Källsjön är en bra referenssjö i bemärkelsen att den är typisk för

många sjöar. Man kan direkt slå fast att Källsjön inte representerar det man skulle kunna kalla den genuina skogssjön, eftersom den så direkt påverkats av jordbruk. Men i detta sammanhang kan det vara viktigt att tänka på att de flesta sjöar i landet faktiskt påverkats i större eller mindre omfattning av den gamla jordbrukskulturen som bokstavligen utnyttjade hela landskapet.

REFERENSER

- Aaby, B. & Digerfeldt, G. 1986. Sampling techniques for lakes and bogs. In Berglund, B.E. (ed.) *Handbook of Holocene Paleoecology and Paleohydrology*. John Wiley & Sons Ltd, Chichester: 181-194.
- Andersson, P., Borg, H., Olsson, B., Nilsson, Å. & Håkansson, L. 1989. Bakgrundstillstånd och genomförda åtgärder i PU-laboratoriets sjöar. Projekt kalkning - kvicksilver - cesium. Naturvårdsverket, Rapport 3608.
- Battarbee, R.W., Charles, D.F., Dixit, S.S. & Renberg, I. 1999. Diatoms as indicators of surface water acidity. In Stoermer, E.F. & Smol, J.P. (eds) 1999. *The diatoms: applications for the environmental and earth sciences*. Cambridge University Press, Cambridge: 85-127.
- Baudou, E. 1992. *Norrlands forntid - ett historiskt perspektiv*. Förlags AB Wiken, Höganäs.
- Bindler, R., Brännvall, M.-L., Renberg, I., Emteryd, O. & Grip, H. 1999. Natural lead concentrations in pristine boreal forest soils and past pollution trends: a reference for critical load models. *Env. Sci. Technol.* 33: 3362-3367.
- Brännvall, M.-L., Bindler, R., Emteryd, O., Nilsson, M. & Renberg, I. 1997. Stable isotope and concentration records of atmospheric lead pollution in peat and lake sediments in Sweden. *Water Air Soil Poll.* 100: 243-252.
- Brännvall, M.-L., Bindler, R., Renberg, I., Emteryd, O., Bartnicki, J. & Billström, K. 1999. The Medieval metal industry was the cradle of modern large scale atmospheric lead pollution in northern Europe. *Env. Sci. Technol.* 33: 4391-4395.

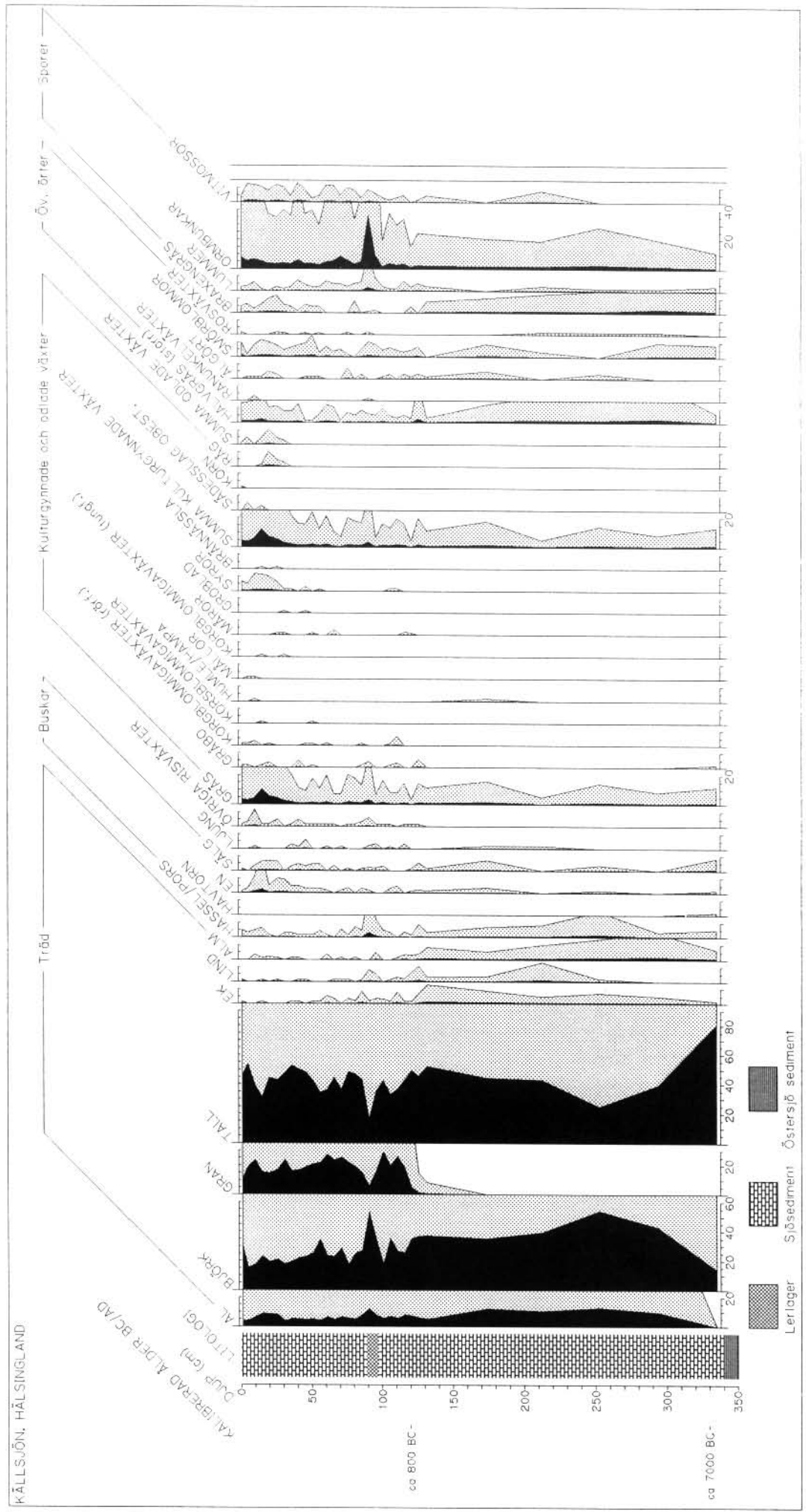
- Brännvall, M.-L., Bindler, R., Emteryd, O. & Renberg, I. 2001. Four thousand years of atmospheric lead pollution in northern Europe: a summary from Swedish lake sediments. *J. Paleolim.* (In press)
- Camburn, K.E., Kingston, J.C. & Charles, D.F. 1986. PIRLA Diatom Iconograph. Report Number 3, PIRLA Unpublished Report Series, Bloomington, IN. (53 photographic plates, 1059 figures).
- Cameron, N.G. 1995. The representation of diatom communities by fossil assemblages in a small acid lake. *J. Paleolim.* 14: 185-223.
- Delsbo hembygdsförening 1996. Fäbodrar i Delsbo. AB Romi tryck, Ljusdal.
- Eloranta, P. 1986. *Melosira distans* var. *tenella* and *Eunotia zasuminensis*, two poorly known planktonic diatoms in Finnish lakes. *Nord. J. Bot.* 6: 99-103.
- Engelmark, R. 1978. The comparative vegetational history of inland and coastal sites in Medelpad, N. Sweden, during the iron age. *Early Norrland* 11: 25-62.
- Engelmark, R. & Wallin, J.E. 1985. Pollen analytical evidence for Iron Age agriculture in Hälsingland, Central Sweden. *Archaeol. Environm.* 4: 353-366.
- Flower, R.J., Cameron, N.G., Rose, N., Fritz, S.C., Harriman, R. & Stevenson, A.C. 1990. Post-1970 water chemistry changes and palaeolimnology of several acidified upland lakes in the U.K. *Phil. Trans. R. Soc., London B* 327: 427-433.
- Fredén, C. (red.) 1994. Berg och jord. Sveriges nationalatlas. Bra Böcker, Höganäs.
- Henriksson, L., Hindar, A. & Thörnelöf, E. 1995. Freshwater liming. *Water Air Soil Poll.* 85: 131-142.
- Hopper, J.F., Ross, H.B., Sturges, W.T. & Barrie, L.A. 1991. Regional source discrimination of atmospheric aerosols in Europe using isotopic composition of lead. *Tellus* 43B: 45-60.
- Korsman, T. 1999. Temporal and spatial trends of lake acidity in northern Sweden. *J. Paleolim.* 22: 1-15.
- Korsman, T., Renberg, I. & Anderson, N.J. 1994. A palaeolimnological test of the influence of Norway spruce (*Picea abies*)

- immigration on lake-water acidity. *Holocene* 4: 132-140.
- Korsman, T. & Birks, H.J.B. 1996. Diatom-based water chemistry reconstructions from northern Sweden: a comparison of reconstruction techniques. *J. Paleolim.* 15: 65-77.
- Korsman, T. & Segerström, U. 1998. Forest fire and lake-water acidity in a northern Swedish boreal area: Holocene changes in water quality at Makkassjön. *J. Ecol.* 86: 113-124.
- Krammer, K. & Lange-Bertalot, H. 1986-91. Süßwasserflora von Mitteleuropa. Bacillariophyceae Band 2/1-4. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.
- Liedgren, L. 1992. Hus och gård i Hälsingland. *Studia Archaeologica Universitatis Umenensis* 2. Doktorsavhandling, Umeå universitet.
- Line, J.M., ter Braak, C.J.F. & Birks, H.J.B. 1994. WACALIB version 3.3 - a computer program to reconstruct environmental variables from fossil assemblages by weighted averaging and to derive sample-specific errors of prediction. *J. Paleolim.* 10: 147-152.
- Moore, P.D., Webb, J.A. & Collinson, M.E. 1991. *Pollen Analysis*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Naturvårdsverket 1997. Biologisk mångfald i kalkade sjöar. Utvärdering av IKEU-programmets sex första år. Naturvårdsverket, Rapport 4816.
- Naturvårdsverket 1999. Sjöar och vattendrag. Bedömningsgrunder för miljö kvalitet. Naturvårdsverket, Rapport 4913.
- Ohl, L.E., Gont, R.A. & Dibble, E.D. 1990. Diatom response to liming of a temperate, brown water lake. *Can. J. Bot.* 68: 347-353.
- Petterson, G. 1999. Image analysis, varved lake sediments and climate reconstruction. Doktorsavhandling, Umeå universitet.
- Renberg, I. 1990. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores. *J. Paleolim.* 4: 87-90.
- Renberg, I. & Wik, M. 1985a. Carbonaceous particles in lake sediments: pollutants from fossil fuel combustion. *Ambio* 14: 161-163.

- Renberg, I. & Wik, M. 1985b. Soot particle counting in recent lake sediments: an indirect dating method. *Ecological Bulletins* 37: 53-57.
- Renberg, I. & Hultberg, H. 1992. A paleolimnological assessment of acidification and liming effects on diatom assemblages in a Swedish lake. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49: 65-72.
- Renberg, I. & Hansson, H. 1993. A pump freeze corer for recent sediments. *Limnol. Oceanogr.* 38: 1317-1321.
- Renberg, I. & Ek, A. 1998. Försurat eller naturligt surt? En undersökning av den historiska pH-utvecklingen i tre sjöar i Gyllbergen. Länsstyrelsen Dalarna, Rapport 1998:7.
- Renberg, I., Korsman, T. & Anderson, N.J. 1993a. A temporal perspective of lake acidification in Sweden. *Ambio* 22: 264-271.
- Renberg, I., Korsman, T. & Birks, H.J.B. 1993b. Prehistoric increases in the pH of acid-sensitive Swedish lakes caused by land-use changes. *Nature* 362: 824-827.
- Renberg, I., Wik Persson, M. & Emteryd, O. 1994. Pre-industrial atmospheric lead contamination detected in Swedish lake sediments. *Nature* 368: 323-326.
- Renberg, I., Brännvall, M.-L., Bindler, R. & Emteryd, O. 2000. Atmospheric lead pollution history during four millenia (2000 BC to 2000 AD) in Sweden. *Ambio* 29: 150-156.
- Rhodes, T.E. 1991. A paleolimnological record of anthropogenic disturbances at Holmes Lake, Adirondack Mountains, New York. *J. Paleolim.* 5: 255-262.
- Rühling, Å., Steinnes, E. & Berg, T. 1996. Atmospheric heavy metal deposition in northern Europe 1995. *Nord* 1996: 37, Nordic Council of Ministers, Copenhagen.
- Skoog, D.A. 1998. Principles of instrumental analysis. Fifth edition. Saunders College Publishing, Philadelphia.
- Stevenson, A.C., Juggins, S., Birks, H.J.B., Anderson, D.S., Anderson, N.J., Battarbee, R.W., Berge, F., Davis, R.B., Flower, R.J., Haworth, E.Y., Jones, V.J., Kingston, J.C., Kreiser, A.M., Line, J.M., Munro M.A.R., & Renberg, I. 1991. *The Surface Waters*

- Acidification Project Palaeolimnology Programme: modern diatom/lake-water chemistry data-set. ENSIS Publishing, London.
- Svensson, T. & Appelberg, M. 1995. Effekter av kalkning. IKEU Årsrapport 1994. Naturvårdsverket, Rapport 4482.
- Ter Braak, C.J.F. 1988. CANOCO - A FORTRAN program for canonical community ordination by [partial] [detrended] [canonical] correspondence analysis, principal components analysis and redundancy analysis (version 2.1). Technical Report LWA-88-02, GLW, Wageningen, 90 pp.
- Ter Braak, C.J.F. 1990. Update notes: CANOCO VERSION 3.10. Agricultural Mathematics Group, Wageningen, 35 pp.
- Wedepohl, K.H., Delevaux, M.H. & Doe, B.R. 1978. The potential source of lead in the permian kupferschiefer bed of Europe and some selected Paleozoic mineral deposits in the Federal Republic of Germany. *Contrib. Mineral. Petrol.* 65: 273-281.
- Wik, M. & Renberg, I. 1991. Recent atmospheric deposition in Sweden of carbonaceous particles from fossil-fuel combustion surveyed using lake sediments. *Ambio* 20: 289-292.
- Wik, M. & Renberg, I. 1996. Environmental records of carbonaceous particles from fossil-fuel combustion: a summary. *J. Paleolim.* 15: 193-206.

Bilaga 1. Pollendiagram för Källsjön.





Det finns rikligt med spår av den by som en gång låg vid Källsjön, bland annat husgrunder och ett raserat uthus. Av dammen som reglerade sjön finns jordvallar och timringar kvar, men dammluckorna är borta. En stor del av den forna åkermarken är täckt av planterad tallskog. På vissa områden har björken koloniserat den fordom öppna marken, och där har vegetationen fläckvis karaktären av ett högörtssamhälle.