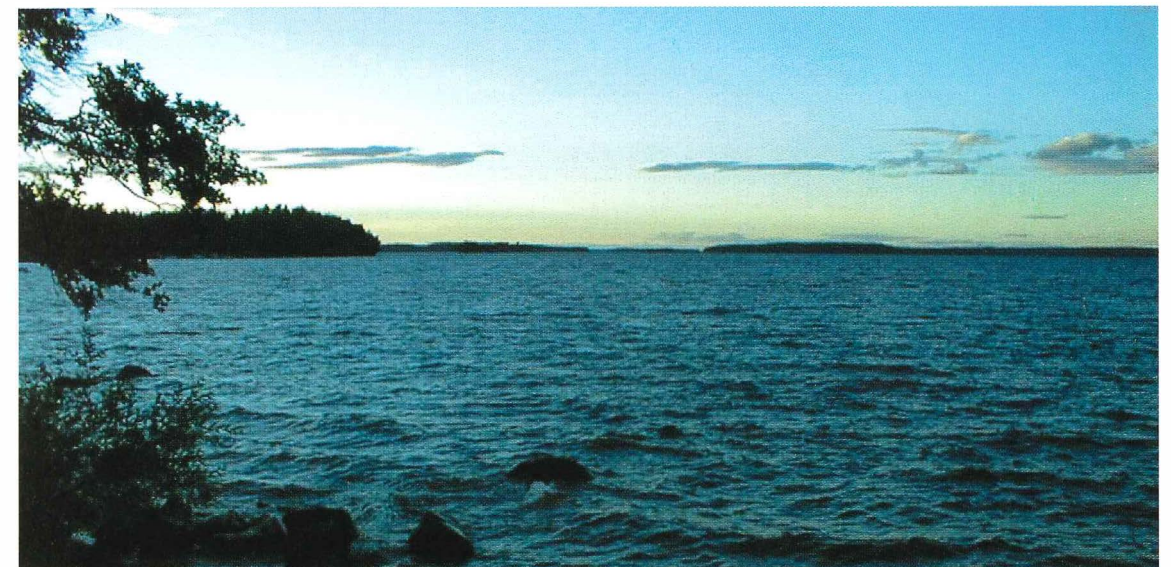


Näringstillståndet i Södra Björkfjärden, Mälaren, under tusen år

En paleolimnologisk undersökning

av

Ingemar Renberg



Institutionen för ekologi och geovetenskap
Umeå universitet
901 87 Umeå

Näringstillståndet i Södra Björkfjärden, Mälaren, under tusen år

En paleolimnologisk undersökning

av

Ingemar Renberg

Under medverkan av

John Anderson
Richard Bindler
Emily Bradshaw
Maja-Lena Brännvall
Anna Ek
Ove Emteryd
Veronika Gählman
Anders Hedefalk
Mattias Karlsson
Erik Lundberg
Suzanne McGowen
Jan Persson
Göran Possnert
Eero Salo
Jan-Erik Wallin
Håkan Wallmark

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

Ingemar Renberg
Epost: Ingemar.Renberg@eg.umu.se
Tel: 090-786 6029

Tryckt av VMC, KBC, Umeå universitet, 1999
ISBN 91-7191-775-6

1999-12-28
Institutionen för ekologi och geovetenskap
Umeå universitet
901 87 Umeå

SAMMANFATTNING

- Sedimentproppar från Södra Björkfjärden i Mälaren har undersökts. Syftet är att bidra till bättre kunskap om Mälarens utveckling, främst vad gäller dess näringstillstånd. Huvudfrågan är: Hur var fjärdens ursprungliga (naturliga) näringstillstånd och hur har det förändrats genom tiderna fram till idag? Denna kunskap är värdefull när man ska bedöma sjöns nuvarande tillstånd och ställa upp framtida miljömål.
- Provtagningsplatsen ligger nordväst om Slandön och öster om Norrskär. Vattendjupet är 44 m. Sedimentpropparna täcker de senaste tusen åren, dvs i princip hela den tid som gått sedan denna del av Mälaren isolerades från Östersjön. Sedimentet har låg halt av organiskt material.
- Sfariska kolhaltiga flygaskpartiklar (SCP) har analyserats för att bedöma belastningen av luftföroreningar från förbränning av kol och olja och som en indirekt dateringsmetod för sentida sediment. Sedimentet som avsatts de senaste femtio åren har en hög SCP-halt, vilket man kan förvänta med tanke på närheten till tätbefolkade och industrialiserade områden.
- Blykoncentration och $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ kvot har analyserats. Tanken var att använda dessa analyser för att bedöma luftföroreningsbelastningen och som stöd för dateringen av sedimentet. Resultaten avviker dock helt från gängse mönster för svenska sjöar där luftburna blyföroreningar dominerar. Sedimentproppar från sex andra platser i Mälaren har därför också analyserats. Alla dessa tycks ge samma bild. Sett nedifrån och uppåt i Södra Björkfjärdens sedimentlagerföljd, så ökar blykoncentrationen och isotopkvoten sjunker i intervallet 90-80 cm. Blykoncentrationen varierar där ovanför kring $50 \mu\text{g g}^{-1}$ torrt sediment, men sjunker anmärkningsvärt nog ovanför nivån 15-20 cm (efter ca 1950) samtidigt som isotopkvoten stiger. Vår hypotes är att blyinnehållet i sedimentet speglar en mycket stor historisk belastning och en genomgripande förorening av hela Mälaren av bly från Bergslagens gruvverksamhet (ca 1000-1950 AD), samt att sentida luftföroreningsbly från förbränning och bilavgaser spelar en underordnad roll. Detta bör undersökas vidare.
- Pollen har analyserats för att bedöma vegetations- och odlingsutvecklingen runt fjärden. Pollen från sädeslag och andra kulturrelaterade växter finns som förväntat genom hela sedimentlagerföljden. Pollenkorn från enbuskar är vanliga men minskar i frekvens ovanför nivån 20-30 cm (1900-talet) samtidigt som björkpollen blir vanligare. Detta speglar förändringar i jordbrukslandskapet, en övergång från ett beteslandskap till ett igenväxande landskap.
- Kiselalger, pigment, fosfor, kol och kväve (inklusive isotoper) har analyserats för att bedöma hur vattnets näringsgrad varit genom tiderna. Med hjälp av en s k transferfunktion har kiselalgsammansättningen "översatts" till värden för tidigare totalfosforhalter i vattnet.
- Planktonarter dominerar kiselalgsfloran. Det finns förändringar i kiselalgsammansättningen som visar på en eutrofiering av fjärdens vatten. Också pigmenten i sedimentet tyder på eutrofiering. Under ca 20 cm nivån är förhållandena relativt stabila, men ovanför denna nivå (mitten av 1900-talet) sker förändringarna. Enligt rekonstruktionen ökar totalfosforhalten i vattnet då från ca 20-30 till 40-50 $\mu\text{g L}^{-1}$ (korrigerade värden), och med en tendens till lägre värden i de senaste årens sediment.
- Fosforanalyserna i sedimentet ger ingen indikation på eutrofiering, vilket kan bero på att fosfor återförts till vattenmassan. Däremot sker förändringar i kol- och kvävesammansättningen, framför allt i isotoperna. Ovanför nivån 25 cm ökar kol- och kvävekoncentrationen och isotopsammansättningen förändras på ett sätt som kan tolkas som effekter av ökad gödsling av fjärden.
- Sammanfattningsvis ger de olika analyserna ett samlat budskap om en svag ökning av näringsgraden i fjärdens vatten under 1900-talet, men denna ökning är på intet sätt dramatisk. När man diskuterar Mälarens ursprungliga (naturliga) näringstillstånd måste man beakta att Mälaren har varit påverkad av en omfattande jordbruksaktivitet som ägt rum i tillrinningsområdet under hela sjöns historia. Samtidigt har Mälaren påverkats av gruvverksamhet under mycket lång tid och man borde utreda i vilken mån denna verksamhet också kan ha bidragit till att gödsla sjön. Vårt värde för fosforhalten före 1900-talet ($20-30 \mu\text{g L}^{-1}$) skiljer sig markant från ett teoretiskt beräknat värde ($6 \mu\text{g L}^{-1}$). Frågan om Mälarens tidigare näringstillstånd är således inte entydigt besvarad.

FÖRORD

Denna undersökning har utförts på uppdrag av Länsstyrelserna vid Mälaren. Den har finansierats av Miljövårdsfonden, Stockholms läns landsting. Kontaktperson hos beställaren har varit Lars Edenman vid Länsstyrelsen i Västmanland. Vi riktar ett varmt tack till finansiären, Lars Edenman och övriga i länsstyrelsernas "Miljöövervakningsgrupp", samt till Eva Willén.

Ansvarig för planering, genomförande och rapportering av uppdraget har varit Professor **Ingemar Renberg**. Många andra forskare vid Miljöförändringsanalys, som är en forskargrupp tillhörande Institutionen för ekologi och geovetenskap vid Umeå universitet, har deltagit i arbetet. Miljöförändringsanalys är en grupp som specialiserat sig på att använda sjösediment och andra naturliga miljöarkiv för att studera miljöförändringar, inte minst för att undersöka hur människan påverkat miljöns tillstånd.

Även andra forskare vid Umeå universitet och SLU i Umeå, samt vid Avdelningen för miljöhistoria och klimat, GEUS i Danmark, har deltagit i projektet.

Deltagande forskare:

John Anderson. Professor. Ansvarig vid GEUS. Har bidragit bl a med transferfunktion för rekonstruktion av TP.
Richard Bindler*. Doktorand. Ansvarig för utvärdering av fosfor-, kol- och kväveanalyserna.

Emily Bradshaw. Doktorand, GEUS, Köpenhamn. Har utfört och utvärderat kiselalgalanalyserna.

Maja-Lena Brännvall*. Doktorand. Ansvarig för utvärdering av blyanalyserna.

Anna Ek*. Doktorand. Har deltagit i planering, utvärdering och rapportering.

Ove Emteryd. Laboratoriechef. Miljöforskningslaboratoriet, Inst för Skogsekologi, SLU, Umeå. Har utfört blyanalyserna.

Veronika Gählman och **Mattias Karlsson**. Studerande. Har utfört flygskanalyserna.

Erik Lundberg. Förste kemist. Umeå Marina Forskningscentrum. Har utfört fosforanalyserna.

Suzanne McGowen. Post doc, GEUS. Har utfört och utvärderat pigmentanalyserna.

Jan Persson, Anders Hedefalk och **Eero Salo**. Har tagit sedimentproverna.

Göran Possnert. Ångströmlaboratoriet, Uppsala universitet. Har utfört kol-14 datering.

Jan-Erik Wallin*. Doktorand. Har utfört pollenanalyserna.

Håkan Wallmark. Laboratorieingenjör. Inst för Skogsekologi, SLU, Umeå. Har utfört kol- och kväveanalyserna.

* tillhör Ekologi och geovetenskap, Umeå universitet.

SEDIMENT SOM MILJÖARKIV

Sediment avsätts varje dag, år ut och år in, på botten av varje sjö. Denna process har pågått sedan sjöarna bildades. Sedimentet består av biologiska lämningar från sjöns ekosystem och från sjöns närhet, liksom av jordpartiklar och annat icke biologiskt material som kommit in från omgivningarna. Även föroreningar hamnar i sedimentet. Lagerföljden i botten i sedimentet i varje sjö bildar sålunda ett arkiv över sjöns och dess omgivnings historia.

Genom att analysera sedimentets sammansättning kan man ta reda på hur sjöns biologi och kemi har förändrats genom tidernas lopp, hur omgivningens vegetation sett ut, hur jordbrukslandskapet utvecklats, och hur sjön har belastats av föroreningar, för att nämna några exempel.

Det bästa med dessa arkiv är att man kan studera hur miljön var innan det fanns några skriftliga källor. Man kan skapa sig en bild av en sjös tillstånd innan den började påverkas av jordbruk och andra mänskliga aktiviteter. Denna bakgrundkunskap är värdefull när man ska bedöma sjöns nuvarande tillstånd och ställa upp realistiska framtida miljömål.

Sedimentundersökningar har använts allt oftare under de senaste decennierna i olika miljövårdssammanhang, inte minst när det gäller försurning och eutrofiering (Battarbee et al. 1999, Stoermer och Smol 1999).

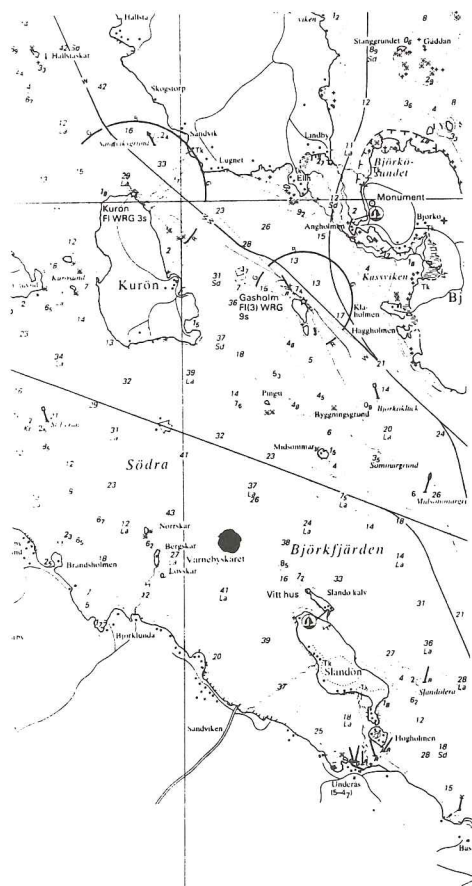
UNDERSÖKNINGEN OCH DESS SYFTE

I denna undersökning har vi analyserat sediment från Södra Björkfjärden i Mälaren. Syftet är att bidra till bättre kunskap om Mälarens utveckling särskilt när det gäller dess näringstillstånd. Huvudfrågan är: Hur var sjöns ursprungliga ("naturliga") näringstillstånd och hur har det förändrats genom tidernas lopp fram till idag?

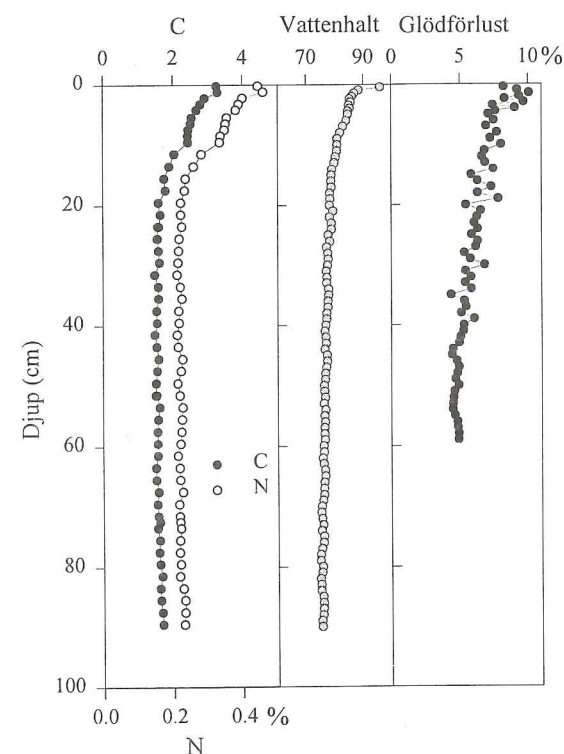
För att besvara denna fråga har vi analyserat kiselalger, pigment, fosfor, kol och kväve i Södra Björkfjärdens sedimentlagerföljd. Analyser av bly och flygaskpartiklar har använts för att få ett mått på belastningen av föroreningar och som ett stöd för åldersbestämningen av sedimentet. En kol-14 datering har också gjorts. Pollenanalyser har utförts för att belysa områdets jordbrukshistoria. Jordbruket är en viktig källa för sjöns näringsämnen.

SEDIMENTPROVTAGNINGEN

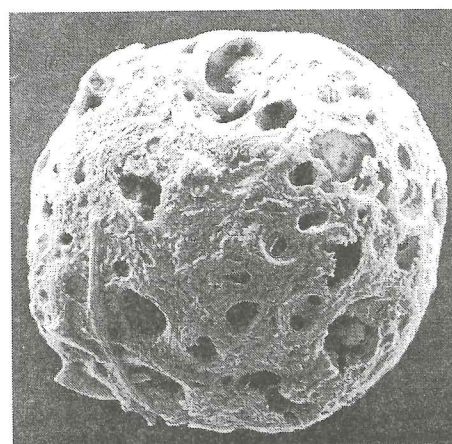
Sedimentet togs i september 1998 i den djupaste delen av Södra Björkfjärden nordväst om Slandön, ungefär 1 km öster om Norrskär (Figur 1). Vattendjupet var ca 44 m. Två typer av provtagare användes, en sk Mackereth provtagare (Mackereth 1969) och en HTH-Kajak provtagare (HTH-Teknik, Vårvägen 37, 976 31 Luleå). Principen för båda provtagarna är att ett plaströr trycks ned i botten och en propp av sedimentet tas upp. Flera proppar togs och av dessa



Figur 1. Provtagningsplatsens läge i Södra Björkfjärden, Mälaren.



Figur 2. Halten av kol och kväve, vattenhalten, samt glödförlusten i sedimentet. C, N och glödförlusten är angivna i procent av torrvidten av sedimentet.



Figur 3. Foto av sfärisk kolhaltig flygaskpartikel (SCP) taget i svepelektronmikroskop. Dessa partiklar är normalt 0.01 - 0.03 mm i diameter.

har tre använts, en Mackereth propp (benämnd M2) som var 90 cm lång och två HTH-Kajak proppar (benämnda K1 och K2) som var båda 66 cm. Propparna skivades upp i 0.5 cm tjocka prover ned till 5 cm och därunder i 1 cm tjocka prover. Detta gjordes i fält direkt vid provtagningen.

Analys av flygaska, organiskt kol och blyisotoper har använts för att para samman de sedimentproppar som använts. Detta gick utan problem. Men generellt kan man nästan aldrig utan analyser matcha centimeter mot centimeter i olika proppar även om de tagits på samma ställe. Det beror normalt inte på att sedimentationen varierat utan på effekter av provtagningen.

ANALYSER OCH RESULTAT

Nedan redovisas motiv för de olika analyser som utförts, de resultat som erhållits och slutsatserna av dessa. Först behandlas analyser som beskriver sedimentet, sedan analyser som beskriver föroreningsbelastning, därefter pollenanalysen, och sist de analyser som säger något om hur vattnets näringsgrad varit förr.

Sedimentets organiska halt och sedimentets utseende

Vattenhalten i sedimentet och dess innehåll av organiskt material beskriver sedimenttypen, som i sin tur beror av sjöns egenskaper. Sedimentet i Björkfjärden har en låg halt av organiskt material. Det kan också uttryckas som att det är en hög halt av mineralkorn som härstammar från tillrinningsområdet. Som dateringarna visar (se nedan) är sedimenttillväxten ganska stor, så införseln av mineralkorn har varit betydande. Halten av kol ligger under 3 % (Figur 2). Av detta kol är en del bundet till oorganiska karbonater. Sedimentets glödförlust (organiska halt) ligger runt 5 % i nedre delen av proppen och stiger till 8-10 % vid ytan. Den ökande organiska halten kan bero såväl på en ökad deposition av organiskt material som en relativt sett minskad deposition av mineralkorn. För att bedöma vilket skälet är krävs många dateringar av sedimentet, vilket vi inte har.

Nyss upptaget sediment är gråbrunt och det innehåller en hel del mörka ränder som i de översta centimetrarna får en svag karaktär av lamineringar.

Flygaska

Vid förbränning av olja och kol vid hög temperatur i värme- och energianläggningar bildas sfäriska kolhaltiga flygaskpartiklar med ett mycket typiskt utseende (Figur 3). Dessa partiklar är väldigt beständiga mot nedbrytning och de kan prepareras fram ur sedimentet genom kokning i väteperoxid (Wik och Renberg 1996). Dessa partiklar finns i alla sentida sediment i hela Sverige, som Maria Wik Persson (Wik 1992) visade i sin doktorsavhandling. Mängden i sedimentet står i proportion till belastningen av luftföroreningar härstammande från fossil förbränning. Dessa partiklar börjar uppträda i sediment från mitten av

1800-talet, därefter går mängden upp efter andra världskrigets slut. Ett tydligt maximum brukar finnas i sediment som bildades vid 1970-talets början, innan oljekrisen och utbyggd rökgasrening ledde till minskade utsläpp.

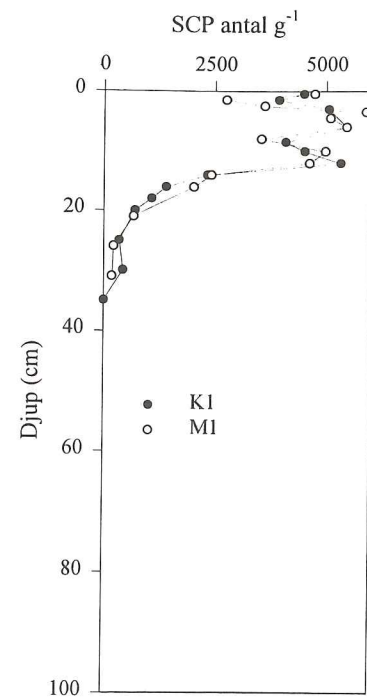
I Södra Björkfjärdens sediment ser inte profilen ut riktigt på det viset (Figur 4). Det finns en uppgång som bör motsvara ungefär 1950 vid ca 15-20 cm djup, men någon topp som entydigt kan hänföras till 1970-talet finns inte. Flygaskpartiklar har räknats i propparna K2 och M1 och profilerna liknar varandra mycket, så det handlar inte om något analysproblem. En förklaring till att mönstret inte ser ut som på andra ställen i Sverige kan vara att det finns någon lokal/regional utsläppskälla för flygaskpartiklar som haft stort inflytande på mönstret.

Som högst finns ca 5000 partiklar per gram torrt sediment. Det är en hög halt med tanke på den höga halten mineralkorn i sedimentet. Om partikelantalet anges per gram organiskt material så blir halten ca 70 000 partiklar per gram material. Det är en förhållandevis hög halt om man jämför med andra svenska sjösediment (Wik 1992). Det är fullt logiskt att flygasknedfallet vid Björkfjärden varit högt med tanke på närheten till Södertälje, Stockholm och flera andra tätorter.

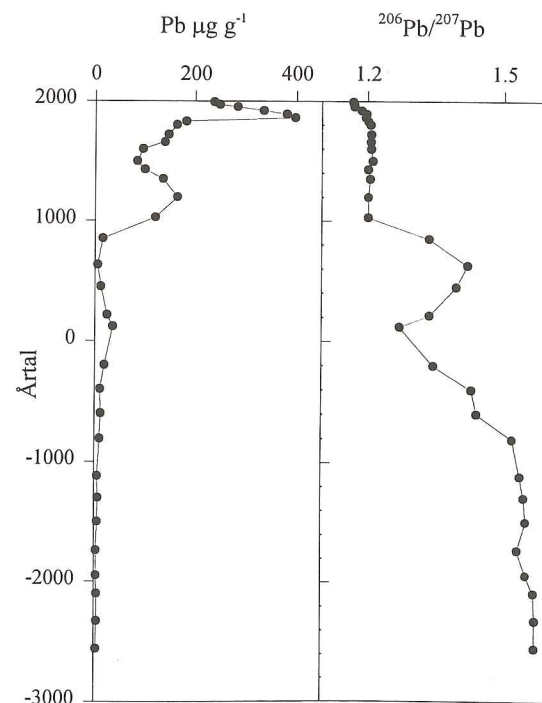
Bly

Blyhaltiga luftföroreningar har en minst 3000 år lång historia. Det har vi kunnat visa genom undersökningar av sediment- och torvprofiler från många platser i Sverige (Renberg et al. 1994, 2000, Brännvall et al. 1997, 1999). För 2000 år sedan, under den Romerska kulturens höjdpunkt, spreds så mycket luftföroreningar från Syd- och Centraleuropa norrut att de gav upphov till en tydlig ökning av nedfallet som syns ända upp i nordligaste Sverige och i inlandsisen på Grönland (Hong et al. 1994). Efter Romarrikets fall minskade nedfallet av luftföroreningar. Men i slutet av 900-talet ökade det kraftigt igen. Sedan ökade nedfallet förstas med industrialiseringen på 1800-talet, men inte så mycket som man vanligtvis föreställer sig. Det är först i och med den ökade användningen av blyad bensin efter andra världskriget som blyföroreningarna verkligen ökade. Situationen förbättrades med början på 1970-talet, och med nuvarande förbättringstakt kommer blynedfallet snart att vara nere på medeltida nivå.

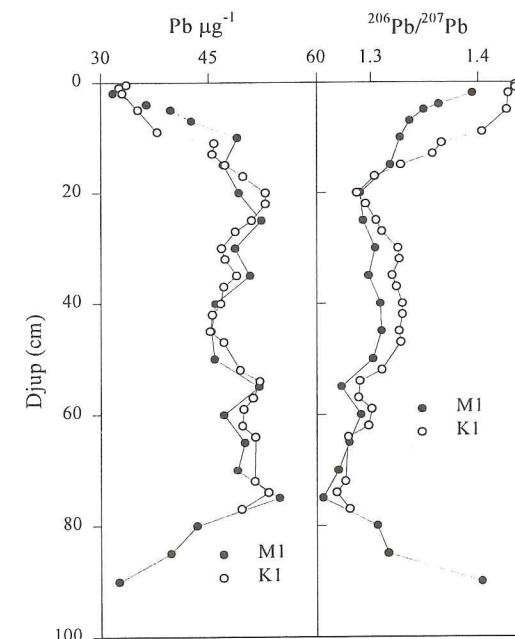
Denna bild av blyluftföroreningarnas historia har vi fått fram genom att analysera blykoncentrationen i sediment från ett trettiotal sjöar från sydligaste till nordligaste delen av Sverige. Genom att analysera blyisotoper kan man särskilja naturligt bly och föroreningsbly. Blyet som finns naturligt i den svenska berggrunden har i allmänhet en hög kvot av isotoperna $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$. Luftföroreningsblyet från europeiska utsläppskällor har en lägre kvot. Detta innebär att kvoten sjunker ju större andel av blyet i sedimentet som har



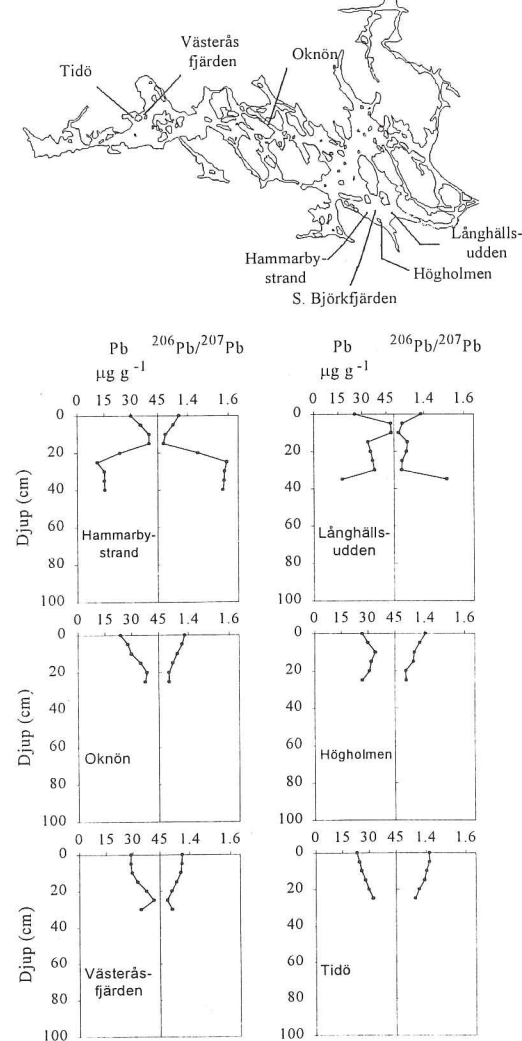
Figur 4. Koncentrationen av sfäriska kolhaltiga flygaskpartiklar (SCP) i två parallella proppar från Södra Björkfjärden. Koncentrationen är angiven per gram torrt sediment.



Figur 5. Typisk bild av hur blykoncentrationen och blyisotopkvoten har förändrats genom tiderna i sydsvenska sjöars sediment. Datat är från Rudegyl i Blekinge (Brännvall et al. 1997). Blykoncentrationen är per gram torrt sediment.



Figur 6. Blykoncentrationen (per gram torrt sediment) och blyisotopkvoten i sedimentet från Södra Björkfjärden, i två olika sedimentproppar.



Figur 7. Provtagningsplatser och resultat av de sex extra sedimentpropparna från Mälaren.

föroreningsursprung. Figur 5 visar en typisk bild av hur blykoncentration och isotopkvot har förändrats genom tiderna i sydsvenska sjöars sediment.

Mot bakgrund av denna bild som går igen i sjö efter sjö i Sverige så är resultaten från Mälaren överraskande (Figur 6). Sett nedifrån och uppåt, dvs. med tiden, så ökar blykoncentrationen först, samtidigt som isotopkvoten faller. Både isotopkvot och koncentration varierar sedan måttligt under en lång period, men vid 15-20 cm börjar isotopkvoten stiga och blykoncentrationen falla. Flygaskpartiklarna tyder på att nivån 17 cm motsvarar ungefär 1950. På 1950-talet ökade det atmosfäriska blynedfallet markant och blyet kom i stor utsträckning från tillsatser i bensin. Detta bensinbly hade en låg kvot, ofta omkring 1.1. Varför minskar då blykoncentrationen och ökar då kvoten i sedimentet från Södra Björkfjärden, när man väntar sig det motsatta?

För att försöka förstå varför blykurvorna uppvisar detta ovanliga mönster togs ytterligare sex sedimentproppar från Mälaren hösten 1999. Tre togs i Södra Björkfjärden, en vid Oknön norr om Strängnäs, och två vid Västerås (se karta Figur 7). Dessa togs med en HTH-Kajak provtagare. Propparnas längd varierade mellan 25-40 cm. Som framgår av Figur 7 visar alla en minskande blykoncentration och ökande isotopkvot mot sedimentytan. Två av propparna (Hammarbystrand och Långhällsudden) har fallande koncentration och ökande isotopkvot längst ned och uppvisar därmed samma mönster som de ursprungliga propparna från Björkfjärden. Propparna från de andra nya platserna är tagna i skyddade bassänger där sedimentationen är större. Där når propparna inte lika långt tillbaka i tiden.

Södra Björkfjärdens blyprofil är således inget undantagsfall utan något som tycks gälla för hela Mälaren. Vi tror att förklaringen står att finna i Bergslagens gruvhistoria, nämligen att blyföroreningarna i Mälarens sediment i huvudsak härstammar från utsläpp från alla de gruvor, smältverk och metallindustrier som funnits i Bergslagen under de senaste ettusen åren. Blyet har kommit till Mälaren via tillflödena från Bergslagen som mynnar i västra delen av Mälaren och blyet har förorenat hela Mälaren. Koncentrationsökningen och isotopkvotssänkningen mellan 90-75 cm i sedimentet i Södra Björkfjärden speglar stora inflöden av föroreningsbly i samband med gruvornas tillkomst för 1000 till 500 år sedan. Minskningen av koncentrationen och ökningen av kvoten i de översta 20 cm av sedimentet beror av minskad föroreningsbelastning i samband med att gruv- och metallindustrin har lagts ned under 1900-talet. $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ kvoten i malmerna från Bergslagen är låg (ca 1.0, Johansson och Rickard 1984) medan det naturliga blyet i jorden vid Mälaren har en hög kvot (>1.4, enligt fem stickprover av oförorenad mineraljord och enligt de äldsta sedimentproverna). Därför stiger blyisotopkvoten när föroreningarna minskar i andel.

Luftföroreningsblyet har till synes inte påverkat blykoncentrationen, men det är naturligtvis inte sant. Hade inte luftföroreningsblyet funnits skulle sänknings av blykoncentrationen under 1900-talets andra hälft varit ännu större.

Den förklaring till blykurvornas utseende i Mälarens sediment som presenterats här får tillsvidare betraktas som en väl underbyggd hypotes. Är den riktig spelar de moderna utsläppen en helt underordnad roll för Mälarens belastning av föroreningsbly. Det kan finnas skäl att tro att detta också gäller flera andra tungmetaller, malmerna i Bergslagen innehöll ett brett spektrum av metaller. När man tidigare diskuterat Mälarens tungmetallbelastning har den historiska belastningen ignorerats. Den är av allt att döma mångfalt större än den moderna, åtminstone när det gäller bly.

Datering

Nivån 87-88 cm i M1 har åldersbestämts med kol-14 metoden vid Ångströmlaboratoriet. En liten bit sediment i sin helhet daterades, inte en specifik växtlämning från någon landväxt. När man daterar sediment i sin helhet är det vanligt att provet får en något för gammal ålder (skenbar ålder). Det kan röra sig om några hundra år. Kol-14 åldern på provet (Ua-14594) är 1505 ± 60 BP. Om man kalibrerar detta till kalenderår motsvarar det 420-660 efter Kristus (AD).

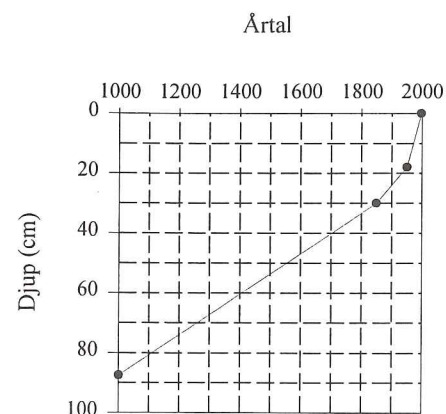
Enligt Miller (1982) och Risberg och Miller (1997) isolerades denna del av Mälaren med början ca 900 AD. Det finns inga tecken på påverkan av bräckt vatten i kiselalgsammansättningen i sedimentet från Södra Björkfjärden, dvs hela den lagerföljd som vi studerat har avsatts i sött vatten. Sälunda bör nivån 87-88 cm vara yngre än ca 900 AD. Vi har tillsvidare satt den till ca 1000 AD.

I Figur 8 har de indirekta dateringarna som kan utläsas från flygaskpartikelkurvans utseende och den beräknade åldern för sedimentproppens nedersta del avsatts.

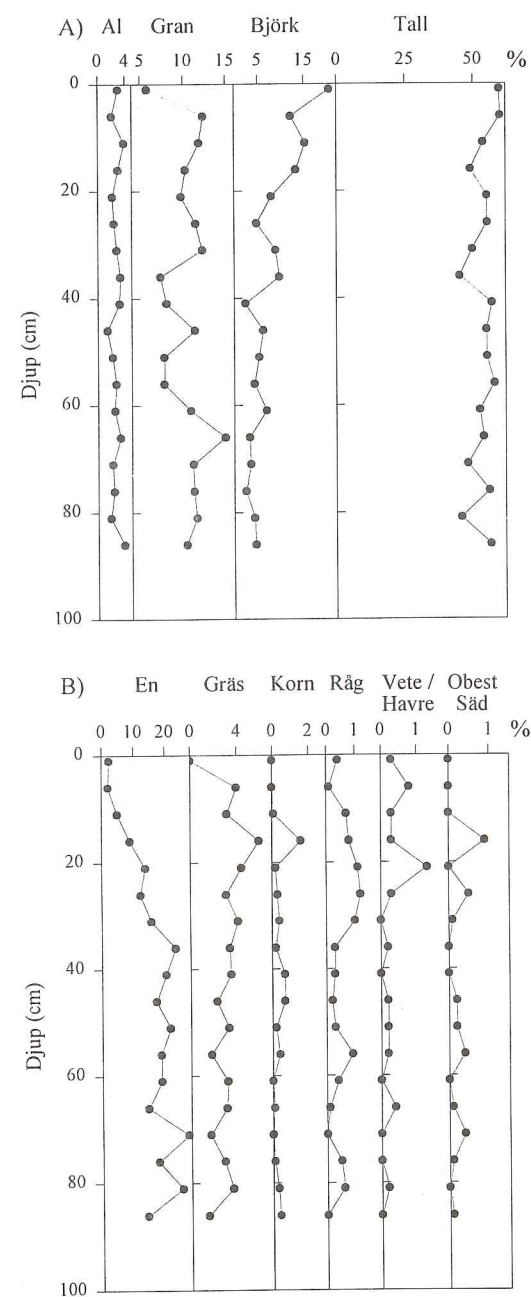
Pollen

Pollenanalys är en etablerad metod för att studera hur vegetationen sett ut förr i tiden och hur jordbrukslandskapet utvecklats (Behre 1981, Moore et al. 1991). Här har ett tjugotal prover analyserats med standardmetoder. Pollenkornen i sedimentet i en så stor sjö som Mälaren kommer från ett ganska stort område. Det kan röra sig om någon eller några mil runt fjärden. Pollen från träd (tall, gran, björk och al) är vanligast. Även pollen från enar och gräs är vanliga. Pollen från sädeslag finns ned genom hela profilen (korn, råg och vete/havre) (Figur 9). Pollendiagrammet i Appendix 1 visar de vanligaste arternas pollenfördelning i procent.

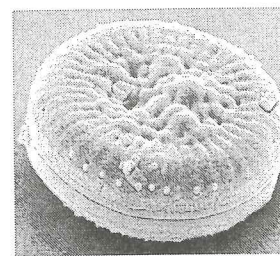
Det sker inte särskilt stora förändringar i pollen-sammansättningen, förutom att enen blir betydligt mindre



Figur 8. Djup-ålder diagram för sedimentet från Södra Björkfjärden.



Figur 9. A) Diagram visande de vanligaste trädens pollenförekomst i sedimentet från Södra Björkfjärden. B) Pollen från en, gräs och sädeslag. Varje arts pollenandel är uträknad i procent av summan av samtliga påträffade pollen av levande växter.



Figur 10. Foto av kiselalg av släktet *Cyclotella* taget i svepelektronmikroskop. Diametern är 0.01 mm.

vanlig ovanför nivån 20-30 cm, samtidigt som björken ökar. Gräspollen liksom summan av pollen från sädeslag och jordbruksväxter (dit ogräs hör) har ett maximum mellan 15-30 cm (Figur 9).

Pollenanalysen bekräftar vad som är känt sedan tidigare, att omfattande odling har förekommit runt fjärden under de cirka ettusen år som sedimentproppen täcker (Borgegård 1990). Den minskande förekomsten av pollen från enar mot nutid speglar förändringar i landskapet under 1900-talet, som beror på att betet har minskat. Som följd har björken blivit vanligare. Maximum i förekomsten av odlade växter och ogräs just före 1950 och nedgången därefter är rimlig med tanke på jordbruksutvecklingen. Efter andra världskriget förändrades jordbruket till ett mera koncentrerat åkerbruk från att ha varit ett helhetsutnyttjande av landskapet.

Kiselalger

Kiselalger är mikroskopiska, encelliga alger med ett kiselskal som gör att de bevaras bra i sediment (Figur 10). De är mycket vanliga i alla sjöar. De är känsliga för vattnets kvalitet, till exempel dess surhetsgrad och dess näringsgrad. Artsammansättningen är olika i näringsfattiga och i näringsrika sjöar.

Ett fyrtiotal prover på olika djup i sedimentet har analyserats enligt standardmetoder (Renberg 1990, Stoermer och Smol 1999). Kiselalgsdiagrammet i Appendix 2 visar den procentuella fördelningen av skal tillhörande de vanligaste arterna.

Kiselalgskalen är bra bevarade i sedimentet från Södra Björkfjärden. Floran domineras av planktonarter. Förändringarna i kiselalgsfloran över tiden är relativt stora. Som exempel varierar procenten av arten *Aulacoseira islandica* mellan 10 och 60 % och ett par *Cyclotella* arter blir vanligare i övre delen av sedimentproppen (Figur 11). Sådana förändringar beror av förändringar i vattnets kemi och biologi.

Huvuduppgiften i detta projekt är att besvara frågan om hur vattnets näringsgrad har förändrats genom tiderna. Som ett viktigt i led i att besvara frågan har vi utifrån sammansättningen av kiselalger i sedimentet utläst hur vattnets totalfosforhalt (TP) har varit under loppet av de senaste ettusen åren. Det kan man göra med hjälp av en så kallad transferfunktion. En transferfunktion är ett matematisk samband mellan, i det här fallet, vattnets fosforhalt och sammansättningen av kiselalgsfloran. En sådan transferfunktion upprättar man genom att samla in ytsediment och tillhörande värden för vattnets fosforhalt i en serie sjöar längs en gradient från mycket låga till höga fosforhalter i vattnet. Sedan analyserar man kiselalgsammansättningen i proverna och modellerar sambanden mellan kiselalgerna och vattenkemin med statistiska metoder. För att utläsa tidigare

fosforhalter i Södra Björkfjärden har vi använt en transferfunktion som är framtagen med prover från sydsvenska sjöar. I dagsläget är denna transferfunktion acceptabel men inte perfekt för uppgiften. Ett problem är att de sjöar som ligger till grund för transferfunktionen är små i förhållande till Mälaren.

Enligt transferfunktionen var fosforhalten stabil kring $40 \mu\text{g L}^{-1}$ upp till nivån ca 20 cm, dvs till kort före 1950. Därefter stiger den uppemot $60 \mu\text{g P L}^{-1}$ med en tendens till lägre värden (ca $50 \mu\text{g}$) vid sedimentytan (Figur 12). Det är klart högre än vad mätningar av vattenprover säger. Enligt SVELAB och Stockholm Vattens rapport (1996) sjönk totalfosforhalten från ca 40 vid 1960-talets slut till ca $20 \mu\text{g}$ i mitten av 1990-talet. Det är uppenbart att fosforvärdena som utlästs från kiselalger överskattar vattnets fosforhalt, men däremot finns all anledning att tro att trenden hos de utlästa försörvningarna är riktig. I en undersökning som gjorts i Ekoln med samma metoder som här finns en god överensstämmelse i tidstrenden mellan de från kiselalger utlästa TP-värdena och de uppmätta värdena i vattnet (Bradshaw opubl data). Ekoln har en lång tidsserie av mätta värden. Däremot är de rekonstruerade värdena i Ekoln $10\text{-}20 \mu\text{g L}^{-1}$ för höga jämfört med de mätta.

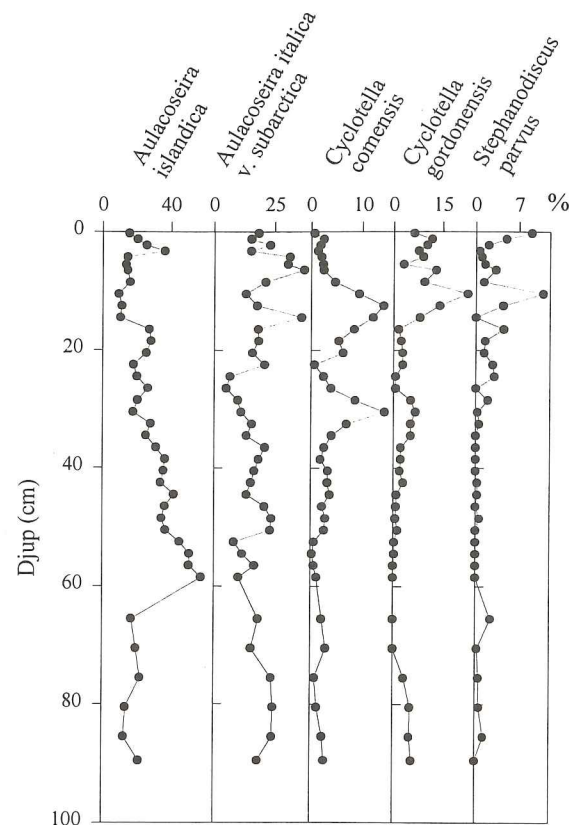
Kiselalger visar således på en eutrofiering av Södra Björkfjärden. Mera om detta och den centrala frågan om bakgrunds-nivån diskuteras under rubriken "Slutsatser angående Södra Björkfjärdens utveckling".

Pigment

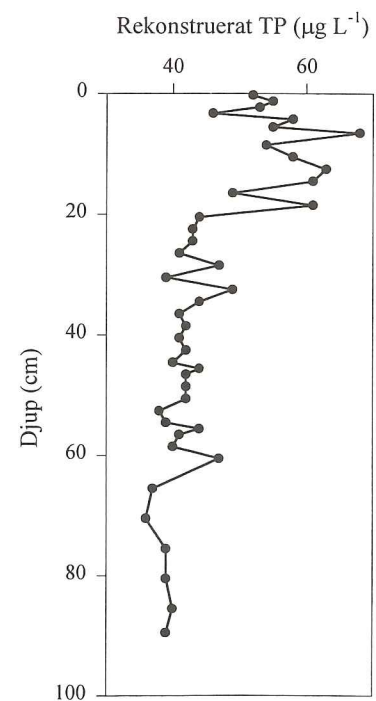
Pigment från alger bevaras mer eller mindre väl i sediment och kan användas för att dra slutsatser om algfloras tidigare sammansättning och om tidigare produktionsförhållanden (Leavitt 1993). Särskilt i sediment med en låg organisk halt kan dock bevarandegraden hos pigmenten vara dålig. Det kan göra resultaten svårtolkade.

I Södra Björkfjärden är pigmenten dåligt bevarade, men det är ändå möjligt att dra vissa slutsatser av pigmentanalyserna. De dominerande pigmenten i sedimentet är nedbrytningsprodukter av klorofyll, representerade av pheophytin i Figur 13. Pheophytin bildas av klorofyll a. Klorofyll a finns också i sedimentet. Flera karotenoider identifierades och dessa är delvis specifika för vissa algrupper. Fucoxanthin produceras av kiselalger, guldalger och vissa dinoflagellater. Alloxanthin är unikt för kryptofyter och peridin för dinoflagellater. Sammansättningen av pigmenten tyder på att samma typ av algsamhälle har existerat i Södra Björkfjärden under den analyserade perioden.

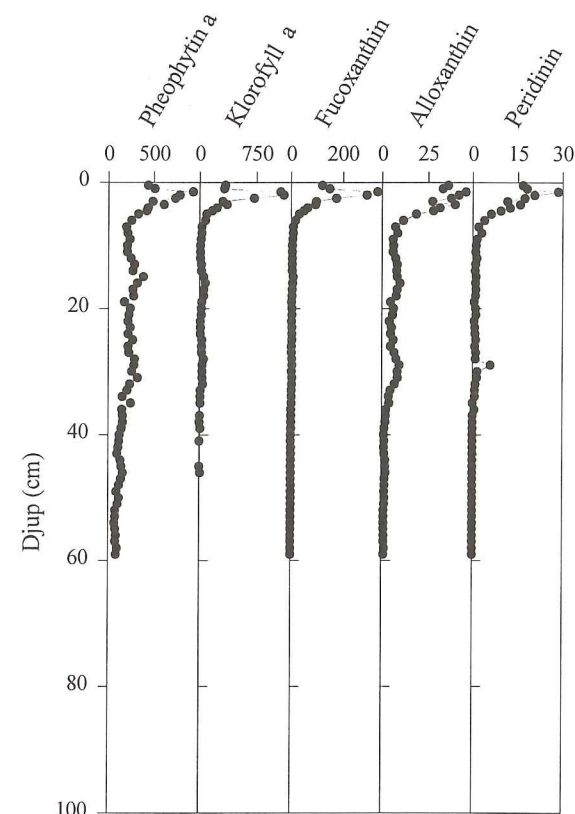
När det gäller att dra slutsatser om tidigare algproduktion utifrån pigmenthalten i sedimentet, som uttrycks per gram organiskt material, får man absolut inte tro att pikhöjden i



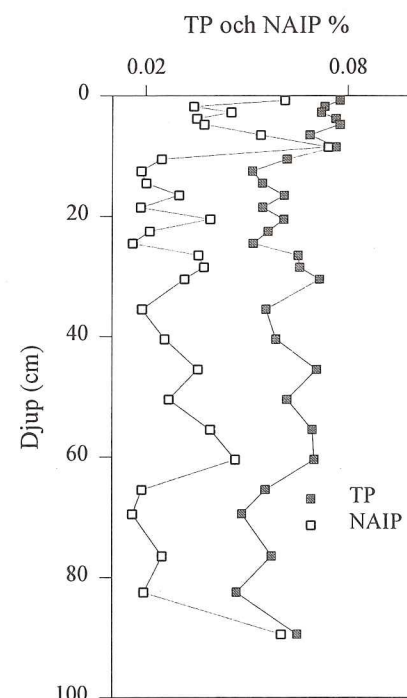
Figur 11. Förekomsten av ett urval vanliga kiselalger i sedimentet från Södra Björkfjärden. Varje arts förekomst är angiven i procent av samtliga påträffade arters skal.



Figur 12. Tidigare totalfosforhalter i vattnet i Södra Björkfjärden utlästa från kiselalgernas sammansättning.



Figur 13. Halten av ett urval pigment i sedimentet från Södra Björkfjärden, per gram organiskt material.



Figur 14. Koncentrationen av de två formerna av fosfor som analyserats i sedimentet från Södra Björkfjärden. Koncentrationen anges i procent av sedimentets torrsvikt.

diagrammet (Figur 13) står i direkt proportion till produktionen. Ökningar av klorofyll a, alloxanthin och fucoxanthin vid nivåerna ca 30 cm och 7 cm kan emellertid tyda på ökad produktivitet. Sålunda stöder pigmentanalyserna slutsatsen att vattnet i Södra Björkfjärden blivit något näringsrikare i modern tid.

Fosfor

Analys av totalfosfor (TP) och en form av fosfor, som på engelska benämns NAIP (non-apatite inorganic P), har använts i sediment från de stora sjöarna i USA för att studera eutrofiering (Schelske et al. 1988, Schelske och Hodell 1995). NAIP anses vara biologiskt tillgänglig och en bättre sedimentindikator på belastningen av fosfor till sjön än TP.

Ett trettiotal sedimentprover analyserades enligt den modell som använts i USA (se referenser ovan). Värdena fluktuerar en del och NAIP och TP följs åt i stora drag utom vid 10 cm nivån. De högsta värdena både för NAIP och TP finns i de översta 10 cm (Figur 14).

Fosforanalyserna tyder inte på någon påtaglig ökning av belastningen av fosfor till sedimentet. De ger sålunda inte stöd åt det resultat som kiselalger givit som tyder på viss ökning av fosforhalten i fjärdens vatten. Men förklaringen kan vara att en stor del av fosfor återcirkulerats till vattenmassan där det är ett begärligt näringsämne istället för att bindas i sedimentet. Först när belastningen ökar ännu mera lämnar detta spår i sedimentet.

Kol och kväve

Det kol (C) och kväve (N) som analyserats förekommer först och främst bundet i organiskt material, och när det gäller kol i karbonater. Detta organiska material kan härstamma från biologisk produktion i vattenmassan eller det kan komma från land. Analyser av isotopsammansättningen kan bidra till att förklara varifrån det organiska materialet härstammar.

Från botten av sedimentproppen upp till ca 20 cm är halten av C och N konstant kring 1,6 % respektive 0,25 % av sedimentets torrsvikt (Figur 15). Från ca 20 cm och upp till sedimentytan fördubblas C- och N-halten. Trots att nedbrytningsprocesser, som eventuellt ännu inte hunnit verka färdigt i ytsedimentet, kan bidra till ett sådant mönster, så tyder den markanta ökningen på en ökad avsättning av organiskt material i modern tid (även om en reservation måste göras för att en ökad halt av C och N i sedimentet i princip också kan bero på minskad deposition av mineraler som nämndes tidigare i rapporten).

Det råder ett praktiskt taget konstant förhållande mellan halten av C och N i sedimentet ($r^2=0.99$). C/N kvoten är ca 7 genom hela sedimentproppen. I allmänhet har organiskt material från kärlväxter på land en C/N kvot över 20, medan

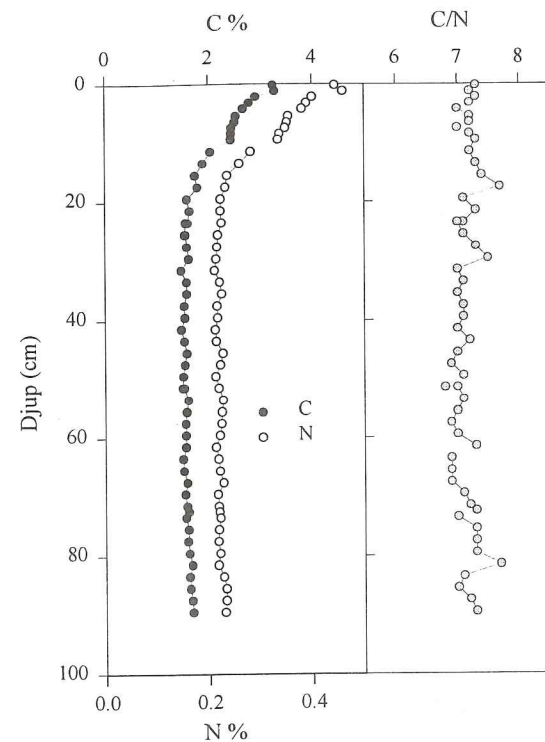
alger har en kvot som ligger mellan 4-10 (Meyers och Ishiwatari 1993). Det organiska materialet i Södra Björkfjärden är helt tydligt dominerat av organiskt material som producerats i sjön. Det är typiskt för stora sjöar som undersökningar i till exempel Lake Michigan och Lake Biwa har visat (Meyers och Ishiwatari 1993). Sedimentnedbrytning har liten effekt på C/N kvoten. Den konstanta C/N kvoten i Södra Björkfjärdens sediment tyder således på att ursprunget till det mesta av det organiska materialet alltid har varit biologisk produktion i vattenmassan.

Mönstret för isotopen ^{13}C i sedimentet visar större variationer än C-halten (Figur 16). Resultaten av kolisotopanalyserna anges som δ -värden. Dessa representerar en avvikelse i promille (‰) från en sk PDB standard för kol, enligt $\delta_{\text{prov}} = [(R_{\text{prov}}/R_{\text{standard}})-1]1000$, där R är $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ i prov och standard.

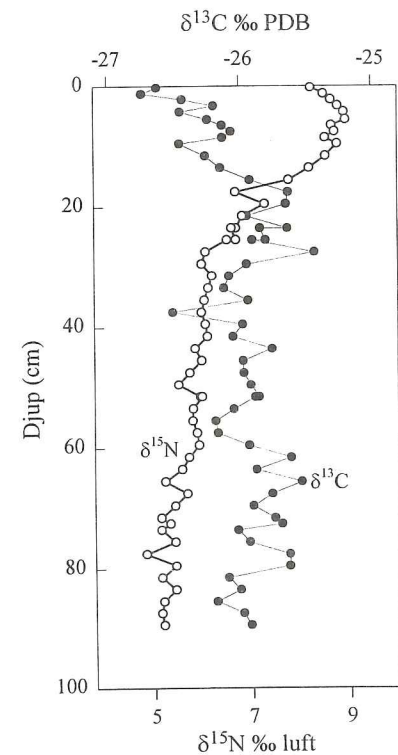
Från 90 cm upp till ca 20 cm djup i sedimentet fluktuerar $\delta^{13}\text{C}$ värdet runt -25.9 . Från 20 cm och upp till ytan faller värdet till -26.6 . Det finns en korrelation mellan C % och $\delta^{13}\text{C}$ ($r=-0.69$) som kan tyda på en gemensam bakomliggande faktor. Det finns två övergripande faktorer som kan vara inblandade i att bestämma $\delta^{13}\text{C}$ hos organiskt material i en sedimentprofil (Meyers och Ishiwatari 1993). Den ena är variationer i proportionen mellan terrestriskt och akvatiskt organiskt material i sedimentet, och den andra är tidsmässiga variationer i isotopsammansättningen hos det lösliga oorganiska kolet i vattnet som utnyttjats för fotosyntes. Det senare är en funktion av kolutbytet mellan atmosfären och vattnet, återcirkulationen av kol från fast till lös form (t ex återcirkulation av kol som är utarmat på $\delta^{13}\text{C}$, från sönderfallande organiskt material i vattenmassan eller i sedimentet), förändringar i inflödet till sjön av löst organiskt kol, och förändringar i artsammansättningen i fytoplankton eftersom olika alger kan ta upp kol från olika källor. Med hänsyn till den obefintliga variationen i C/N kvoten, kan förändringar i proportionen mellan terrestriskt och akvatiskt material uteslutas. Således måste $\delta^{13}\text{C}$ variationen över tiden i sedimentet bero på förändringar i isotopsammansättningen hos det lösliga organiska kolet eller förändringar i planktonupptaget.

$\delta^{15}\text{N}$ (som anges som ett provs promilleavvikelse från luftens sammansättning) ökar nästan linjärt från 5 ‰ vid 90 cm djup till 6 ‰ vid 27 cm djup (Figur 16). Ovanför nivån ca 25 cm ökar värdet kraftigt till ett maximum på 9 ‰ vid ungefär 5 cm djup. Det finns en positiv korrelation mellan N% och $\delta^{15}\text{N}$ ($r=0.83$) och en svagare negativ korrelation mellan $\delta^{15}\text{N}$ och $\delta^{13}\text{C}$ (-0.56).

De faktorer som kontrollerar $\delta^{15}\text{N}$ värdet i sedimentets organiska fraktion är biologiskt utnyttjande av N liksom källorna för N (Hodell och Schelske 1998). Positiva $\delta^{15}\text{N}$



Figur 15. Halten av kol och kväve samt kol/kväve kvoten i sedimentet från Södra Björkfjärden.



Figur 16. Resultat av kol- och kväveanalyserna i sedimentet från Södra Björkfjärden.

värden är typiska när akvatiskt producerat organiskt material dominerar. $\delta^{15}\text{N}$ värdena i Björkfjärden tyder, liksom C/N kvoten som nämndes tidigare, på att akvatiskt producerat organiskt material alltid har dominerat. Förändringar i upptaget av N av fytoplankton kan orsakas av ökad fosfortillgång som leder till ökad akvatisk produktion och ökade värden för $\delta^{15}\text{N}$ genom att balansen mellan akvatiskt och terrestriskt material förändras. Förändringar i N belastningen till sjön kan också öka $\delta^{15}\text{N}$. N i avrinning från jordbruksmark som gödslats, liksom avloppsvatten, har vanligtvis höga $\delta^{15}\text{N}$ värden. Nitrat i jorden har värden mellan 3-12 ‰, och värden på 10-20 ‰ har rapporterats i avloppsvatten (Hodell och Schelske 1998). Det finns således en möjlighet att de ökande $\delta^{15}\text{N}$ värdena i Björkfjärdens sediment speglar en ökande gödning av sjön med N som kommer från jordbruket och med avloppsvatten.

SLUTSATSER ANGÅENDE BJÖRKFJÄRDENS UTVECKLING

Sedimentpropparna från Södra Björkfjärden täcker de senaste ettusen åren. Det är i praktiken hela den period som sjön har varit isolerad från havet (Miller 1982).

Under hela denna period har Björkfjärden utsatts för föroreningar, såväl storskaliga luftföroreningar som föroreningar från tillrinningsområdet. Sedimentet från Södra Björkfjärden, liksom från de sex andra undersökta platserna i Mälaren, tyder på en mycket stor belastning av bly före 1900-talet och en markant förbättring under 1900-talets senare hälft. Vi tror att källan är gruvverksamheten i Bergslagen. Denna verksamhet har en flera hundra år lång historia och var mycket omfattande fram till andra världskrigets slut. Vid de tidigare studier som gjorts av metallhalter i Mälarens botten sediment (se t ex Håkansson 1977, Persson 1991), där man har använt kvoter mellan halter i yt sediment och halter i sediment från förindustriell tid som föroreningsmått, har man så vitt vi kan förstå förbisett den historiska belastningen. Det finns skäl att tro att Mälaren belastats av många andra tungmetaller från gruv- och metallindustrin i Bergslagen under århundradenas lopp. Genom att blyet i Bergslagsmalmen har en så låg $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$ kvot i förhållande till det naturliga bly som finns i jorden runt Mälaren och därmed också naturligt i sjösedimentet, skulle det med en större sedimentundersökning gå att beräkna hur stor mängd föroreningsbly från gruv- och metallindustrin som finns deponerat i Mälarens botten sediment. Naturligtvis skulle då en korrigering behövas göras för det atmosfäriska nedfallet, men det låter sig göras eftersom den ackumulerade belastningen av föroreningsbly genom tiderna från luften är känd ($2-3 \text{ g m}^{-2}$, Brännvall et al. opubl). Den atmosfäriska belastningen skulle också kunna bestämmas mera precist genom analyser av jordprofiler runt Mälaren enligt den modell som använts av Bindler et al. (1999) och Brännvall et al. (opubl).

Resultaten av analyserna av kiselalger, pigment, kol och kväve i sedimentet talar alla för att fjärdens vatten blivit något näringsrikare. De från kiselalgerna rekonstruerade totalfosforhalterna för vattnet pekar på en ökning från 40 till 60 $\mu\text{g P L}^{-1}$ – en ökning som skett under 1900-talet, främst efter 1950 – och med en tendens till lägre värden (kring 50 μg) i de senaste årtiondena. Men eftersom 50-60 μg är mycket högre än vad som uppmätts vid vattenprovtagningar får man inte ta dessa rekonstruerade värdena som absolutvärden. Den transferfunktion som använts är inte optimal för en så stor sjö som Mälaren. Dock finns alla skäl att tro att trenden med högre totalfosforhalter under 1900-talet är riktig.

Såväl i Södra Björkfjärden som i Ekoln är de totalfosforvärden som utlästs från kiselalgerna 10-20 $\mu\text{g P L}^{-1}$ högre än de uppmätta. Om man antar att skillnaden mellan rekonstruerade och uppmätta värden är linjär inom det mätområde som vi här rör oss, vilket det tycks vara, kan man reducera de rekonstruerade värdena med motsvarande värde. Då skulle TP-halten i Södra Björkfjärden ha legat kring 20-30 μg från 1000-talet till 1900-talet innan den steg. Det är avsevärt mycket högre än den s k "ursprungliga" halt som presenterats av Persson et al. (1991) på basis av en modellering enligt Naturvårdsverkets bedömningsgrunder för sjöar och vattendrag (SNV 1990). De anger en så låg halt som 6.4 $\mu\text{g P.L}^{-1}$ som ursprungshalt. Vi bedömer inte att den teoretiska modelleringen är en säkrare metod än rekonstruktion med kiselalger.

Ska man då kalla den halt som rådde i Södra Björkfjärden före 1900-talet för den naturliga bakgrundshalten? Nej knappast, om man med detta uttryck menar den strikt naturliga halten som skulle ha funnits om människan inte påverkat sjön. Man måste ha klart för sig att redan från medeltiden var Södra Björkfjärden påverkad av näringsämnen från jordbruket runt sjön. Södra Björkfjärden ligger i ett gammalt kulturområde. Avståndet till Birka (Björkö) är endast 5 km. Eftersom fjärden blev en sjö så sent som för ettusen år sedan har den aldrig haft en möjlighet att anta ett strikt naturligt tillstånd – den gick från en brackvattensfjärd till en kulturpåverkad sjö. Dessutom kan det finnas skäl att fundera på vad gruvverksamheten i Bergslagen kan ha inneburit för sjöns forntida näringsstillstånd. En del malmer som bröts var mycket fosforrika. I vilken mån kan denna fosfor ha kommit in i Mälaren med det tillrinnande vattnet, på samma sätt som föroreningsblyet?

SLUTORD

Denna undersökning har visat på behovet av tidsperspektiv när det gäller miljöfrågor. Många gånger har man sett alltför "romantiskt" på den förindustriella tiden. I många avseenden

var den inte den rena period vi föreställt oss. Myten om den opåverkade förindustriella miljön är djupt rotad.

Trots att åtskilliga sedimentstudier har gjorts i Mälaren tycks ingen ha tänkt på att Mälaren är recipient för ett stort område där gruvverksamhet har förekommit under tusen år eller mera. Man har resonerat som om det inte funnits miljöföroreningar före 1800- eller 1900-talet. Den tidigare metallbelastningen på Mälaren borde utredas. Detta har ett arkeologiskt/historiskt värde. Gruvverksamheten i Bergslagen har varit av central betydelse för Sveriges ekonomiska utveckling. Den tidigare metallbelastningen har också ett intresse för dagens miljö. När man bedömer dagens miljötillstånd kan man inte bara titta på den aktuella tillförseln av metaller till Mälaren och förbise den sannolikt mycket stora mängd metaller som finns deponerad i sjön från förindustriell tid.

När det gäller huvudfrågan för denna undersökning, vad är det "naturliga" näringsstillståndet för Mälaren, måste man konstatera att den frågan ännu inte är entydigt besvarad. Steget mellan vårt förslag 20-30 $\mu\text{g P L}^{-1}$ vatten i Södra Björkfjärden och den teoretiskt beräknade siffran ca 6 $\mu\text{g L}^{-1}$ är långt. Båda metoderna har sina brister. Som nämnts tidigare är inte kiselalgetoden, såsom den finns tillgänglig idag, utvecklad för så stora sjöar som Mälaren. Mot bakgrund av det problem som eutrofiering faktiskt är i ett europeiskt perspektiv, och de kostnader som är förenade med att sätta upp orealistiska (onaturliga) mål för reduktionen av näringstillförseln till en sjö som Mälaren, så borde mera forskning vara motiverad för att utveckla den paleolimnologiska tekniken.

När man ska bedöma Mälarens så kallade naturliga näringsstillstånd måste man beakta områdets jordbruks-historia och den näringstillförsel som jordbruket orsakat under hela sjöns historia. Som nämnts borde man kanske också ägna en tanke åt vad den tidigare gruvverksamheten och brytningen av fosforrik malm kan ha inneburit för sjöns näringsstillstånd.

REFERENSER

Battarbee, R.W., Charles, D.F., Dixit, S.S. & Renberg, I. 1999. Diatoms as indicators of surface water acidity. I: Stoermer, E.F. & Smol, J.P. (eds.) *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press, s. 85-127.

Behre, K.-E. 1981. The interpretations of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen et Spores* 23:225-245.

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. *Environmental Science & Technology* 33:3362-3367.

Borgegård, S.-O. 1990. Jordbruket under vikingatid i mälarmrådet. *Svensk Botanisk Tidskrift* 84:369-392.

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 Pollution* 100:243-252.

Brännvall, M.-L., Bindler, R., Renberg, I. & Emteryd, O. (opubl). Vertical distribution of atmospheric lead in Swedish boreal forest soils. *Water, Air & Soil Pollution* (insänt).

Brännvall, M.-L., Bindler, R., Renberg, I., Emteryd, O., Bartnicki, J. & Billström, K. 1999. The Medieval metal industry was the cradle for modern large-scale atmospheric lead pollution in northern Europe. *Environmental Science & Technology* 33:4391-4395.

Hodell, D.A. & Schelske, C.L. 1998. Production, sedimentation, and isotopic composition of organic matter in Lake Ontario. *Limnology and Oceanography* 43: 200-214.

Hong, S., Candelone, J.-P., Patterson, C.C. & Boutron, C.F. 1994. Greenland ice evidence of hemispheric lead pollution two millennia ago by Greek and Roman civilizations. *Science* 265: 1841-1843.

Håkansson, L. 1977. Sediments as indicators of contamination – Investigations in the four largest Swedish lakes. *SNV PM* 839.

Johansson, Å. & Rickard, D. 1984. Isotopic composition of Phanerozoic ore leads from the Swedish segment of the Fennoscandian shield. *Mineral. Deposita* 19:249-255.

Leavitt, P.R. 1993. A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance. *Journal of Paleolimnology* 9: 109-127.

Mackereth, F.J.H. 1969. A short core sampler for subaqueous deposits. *Limnology and Oceanography* 14:145-151.

Meyers, P.A. & Ishiwatari, R. 1993. Lacustrine organic geochemistry – an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Journal of Organic Geochemistry* 20: 867-900.

Miller, U. 1982. Shore displacement and coastal dwelling in the Stockholm region during the past 5000 years. *Ann. Acad. Sci. Fennicae A.III* 134:185-211.

Moore, P. D., Webb, J.A. & Collinson, M.E. 1991. *Pollen analysis*. Blackwell Scientific Publ. Oxford. 216 s.

Persson, G. 1991. Mälarens vattenkvalitet under 20 år. 3. Metaller i sediment och vatten samt metalltillförseln. *Naturvårdsverket Rapport* 3904.

Persson, G., Olsson, H. & Willén, E. 1991. Mälarens vattenkvalitet under 20 år. 1. Växtnäring, tillförsel, sjökoncentrationer och växtplanktonmängder. *Naturvårdsverket Rapport* 3759.

Renberg, I. 1990. A procedure for preparing large sets of diatom slides from sediment cores. *Journal of Paleolimnology* 4: 87-90.

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 millennia (2000 BC to 2000 AD) in Sweden. *Ambio* (i tryck).

Risberg, J. & Miller, U. 1997. Siliceous microfossils in soils, ash strata and sediments from the Birka excavation site and its surroundings. *PACT* 52:261-275.

Schelske, C.L., Robbins, J.A., Gardner, W.S., Conley, D.J. & Bourbonniere, R.A. 1988. Sediment record of biogeochemical responses to anthropogenic perturbations of nutrient cycles in Lake Ontario. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 45: 1291-1303.

Schelske, C.L. & Hodell, D.A. 1995. Using carbon isotopes of bulk sedimentary organic matter to reconstruct the history of nutrient loading and eutrophication in Lake Erie. *Limnology and Oceanography* 40: 918-929.

SNV 1990. *Bedömningsgrunder för sjöar och vattendrag. Klassificering av vattenkemi samt metaller i sediment och organismer*. Statens Naturvårdsverk, Allmänna råd 90:4.

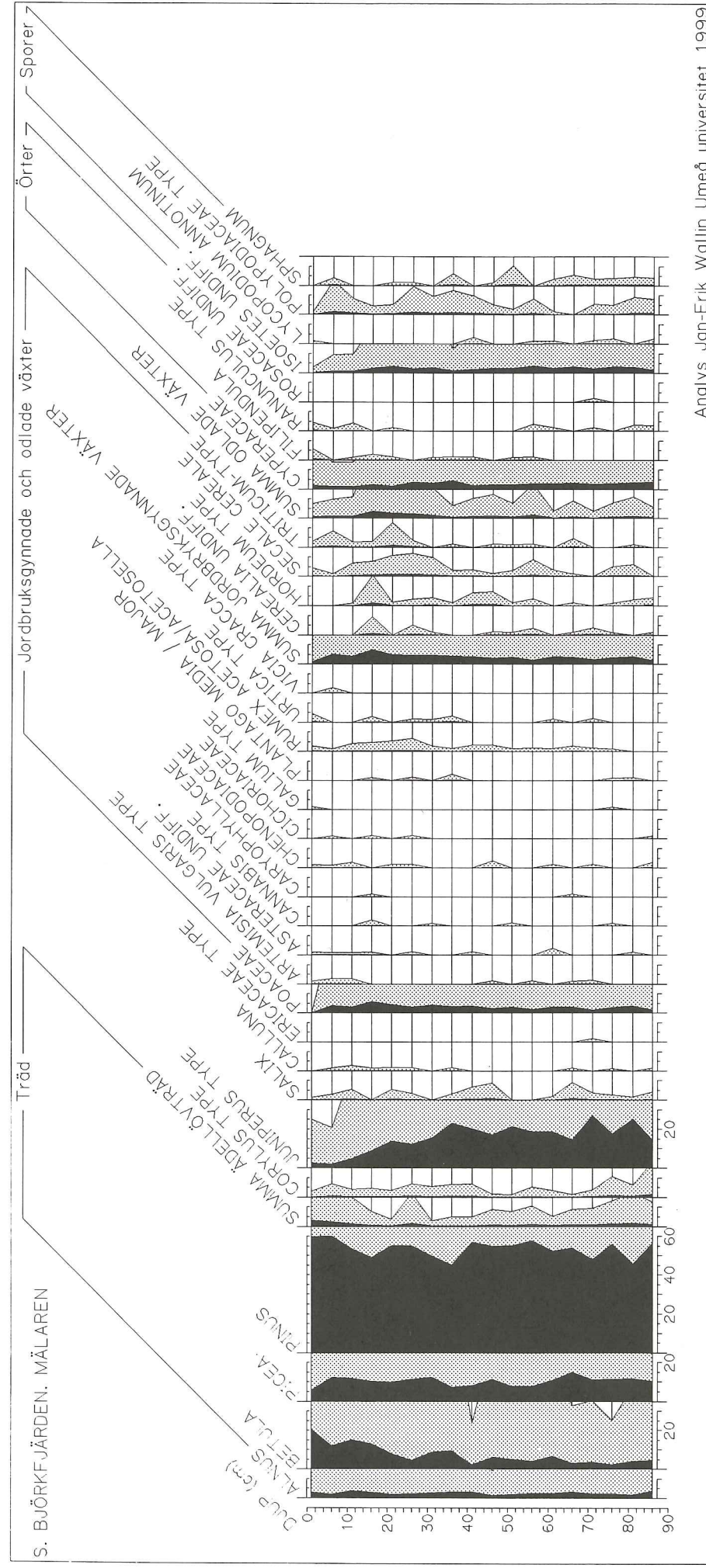
Stoermer, E.F. & Smol, J.P. (eds) 1999. *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences*. Cambridge University Press. 469 s.

SVELAB Miljölaboratorier & Stockholm Vatten. 1996. *Undersökningar i Mälaren* 1996.

Wik, M. 1992. Environmental records of carbonaceous fly-ash particles from fossil-fuel combustion. *Doktorsavhandling*. Inst för Ekologisk Botanik, Umeå universitet.

Wik, M. & Renberg, I. 1996. Environmental records of carbonaceous fly-ash particles from fossil-fuel combustion. A summary. *Journal of Paleolimnology* 15:193-206.

Appendix 1. Pollendiagram från Södra Björkfjärden



Appendix 2. Kiselalgiogram från Södra Björkfjärden

