



Åge Molversmyr


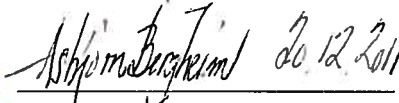

**Metoder for innsjøhistoriske undersøkelser
for kartlegging av eutrofiutvikling**

Rapport IRIS - 2011/239

Prosjektnummer: 7151771
Prosjektets tittel: Metoderapporter innsjøsedimenter

Oppdragsgiver(e): Vannområdeutvalget Morsa
Forskningsprogram:
ISBN: 978-82-490-0752-3
Gradering: Åpen

Stavanger, 20.12.2011

	20/12-2011		20.12.2011		
Åge Molversmyr Prosjektleder	Sign.dato	Asbjørn Bergheim Kvalitetssikrer	Sign.dato	Arild Johannessen Forskningsjef	Sign.dato

© Kopiering er kun tillatt etter avtale med IRIS eller oppdragsgiver.

International Research Institute of Stavanger AS (IRIS) er sertifisert etter et kvalitetssystem basert på standard NS - 1:N ISO 9001

FORORD

Vannområdeutvalget Morsa og Klif har ønsket å få utarbeidet en rapport om metoder som benyttes for innsjøhistoriske undersøkelser der en vil belyse nyere tids eutrofiutvikling. Rapporten gir en kortfattet og generell beskrivelse av et utvalg av metoder, belyst med eksempler fra undersøkelser som er utført i Frøylandsvatnet og Seldalsvatnet i Rogaland og i Vansjø i Østfold. IRIS har hatt ansvaret for utarbeidelse av rapporten, i samarbeid med NIVA.

Rapporten er skrevet av seniorforsker Åge Molversmyr (IRIS).

Kvalitetssikrer for prosjektgjennomføringen har vært seniorforsker Asbjørn Bergheim (IRIS).

Stavanger, 20. desember 2011

Åge Molversmyr, prosjektleder

Nøkkelord: Innsjøsedimenter; paleolimnologi; fossile pigmenter; kiselalger; naturtilstand.

Referanse:

Molversmyr, Å., 2011. Metoder for innsjøhistoriske undersøkelser for kartlegging av eutrofiutvikling. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2011/239.*

INNHold

1	INNLEDNING	1
2	PRØVETAKING.....	2
2.1	Innsamling av sedimentkjerner	2
2.2	Prøvesplitting	3
3	ANALYSEMETODER	5
3.1	Datering av sedimentprøver	5
3.2	Generell karakterisering.....	6
3.3	Pigmentanalyser.....	6
3.4	Rester av organismer	8
4	RESULTATER OG TOLKINGER.....	10
5	REFERANSER.....	16

Kapittel 1**INNLEDNING**

Sedimentet i en innsjø består av uorganiske og organiske komponenter som tilføres utenfra eller som har sitt opphav i prosesser i vannmassene i innsjøen. Sammen med annet partikulært materiale blir rester av organismer som har levd i innsjøvannet avsatt i sedimentene, lag på lag, år etter år. Sedimentet blir dermed en "historiebok", som inneholder informasjon om tidligere tiders tilstand og utvikling i innsjøen. Analyse av biologiske og kjemiske indikatorer i ulike lag i sedimentet vil dermed gi informasjon om tilstanden i innsjøen i ulike tidsperioder. I de øverste lagene vil nåtilstanden gjenspeiles, mens de dypere lagene vil gi informasjon om tidligere tiders tilstand.

Et felles trekk for eutrofe innsjøer i Norge er at en ikke har tilgang på uberørte lokaliteter av samme vanntype, noe som gjør det vanskelig å fastsette hva som er naturgitte bakgrunnsnivåer for næringsstoffer i innsjøene. Slik kunnskap er viktig både for å fastsette realistiske miljømål og for å vurdere tålegrenser og avlastningsbehov. Det vil også være avgjørende i relasjon til Vannrammedirektiv, der avvik fra naturtilstanden benyttes for fastsettelse av økologisk status. En mulig måte å belyse dette på, er å kartlegge innsjøens historiske utvikling gjennom analyse av sedimentkjerner. Ofte vil dette være den eneste mulighet en har for å få informasjon om den opprinnelige tilstanden i en innsjø. Data fra slike undersøkelser vil også ha kulturhistorisk interesse siden de kan belyse når utviklingen i landbruk og i kulturlandskap fikk betydning for tilstanden i et vassdrag.

Senere tids utvikling av paleolimnologiske metoder har forbedret muligheten til å rekonstruere eutrofiutviklingen i innsjøer, og viktigst i denne sammenheng er kanskje utviklingen av metoder for å identifisere algepigmenter og deres nedbrytningsprodukter i sedimentet. Forekomsten av pigmenter i sedimentet kan brukes til å rekonstruere tidligere tiders algesammensetning og -biomasse (Leavitt & Hodgson 2001). Andre rester av vannlevende organismer benyttes også, og skall av kiselalger kan identifisere forekomst av indikatorarter typiske for ulike trofotilstander i innsjøen. Denne type data benyttes bl.a. til å rekonstruere tidligere fosforkonsentrasjoner i innsjøvannet (Bennion *et al.* 2004, 2005).

I de senere årene har slike metoder blitt stadig mer anvendt, og muligheten de gir for å påvise endringer i tilstanden i innsjøer er bekreftet der en har hatt mulighet til å sammenholde resultater med lange tidsserier med overvåkingsdata (Schelske & Hodell 1995). Metodene brukes også nå i utstrakt grad i arbeidet med Vannrammedirektiv, for å rekonstruere referansetilstand i innsjøer. I Norge har en begrenset erfaring med bruk av slike metoder, men i Frøylandsvatnet i Rogaland (Molversmyr *et al.* 2006) og i Vansjø i Østfold (Hobæk *et al.* 2009) ble denne tilnærmingen forsøkt. Senere er metodikken også benyttet i Seldalsvatnet i Rogaland (Molversmyr *et al.* 2010).

I denne rapporten gis kortfattede og generelle beskrivelser av utvalgte metoder og prinsipper for innsjøhistoriske undersøkelser, basert på erfaringene fra Frøylandsvatnet, Seldalsvatnet og Vansjø, og belyses med eksempler fra undersøkelsene som er utført her.

Nøyere beskrivelse av relevante metoder og teknikker for innsjøhistoriske undersøkelser kan finnes i en bokserie fra Kluwer Academic Publishers (nå Springer; www.springer.com) kalt "Tracking Environmental Change Using Lake Sediments", som består av 5 volum.

Kapittel 2

PRØVETAKING

2.1 Innsamling av sedimentkjerner

Det er viktig at sedimentet som samles inn for en innsjøhistorisk (paleolimnologisk) undersøkelse gir et mest mulig korrekt bilde av innsjøens historie. Sedimentkjerner bør derfor tas ved innsjøens dypeste punkt, der sedimentet i minst grad er utsatt for resuspensjon eller andre påvirkninger og hvor kronologien i sedimentets oppbygging følgerig er mest intakt.

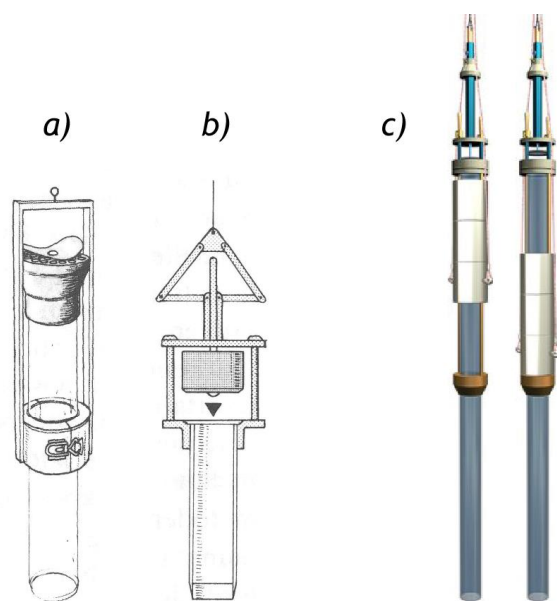
Innsamling av en sedimentkjerne er kanskje den mest kritiske fasen i en innsjøhistorisk undersøkelse. Utfordringen er å få hentet opp en representativ del av sedimentet, dvs. at sedimentet er mest mulig intakt og uforstyrret og at prøven fortrinnsvis inkluderer grenseflaten mellom sediment og vann. Det finnes en rekke ulike typer prøvetakere som kan benyttes, og valg av utstyr vil avhenge av sedimentets beskaffenhet, vanddyb, prøvestedets tilgjengelighet, og ikke minst hva som er formålet med undersøkelsene.

Den enkleste typen prøvetaker er den såkalte rørhenteren ("open barrel" eller "gravity corer"), som er egnet til å ta relativt korte sedimentkjerner som inkluderer overgangsfasen mellom sediment og overliggende vann. Slike prøvetakere består i prinsippet av et rør som trenger ned i sedimentet ve hjelp av prøvetakerens egen vekt (figur 1). Normalt senkes prøvetakeren ned til en meter eller to over sedimentet, for så å la den falle mer eller mindre fritt den siste distansen. Hastigheten må imidlertid ikke bli for stor, og det er viktig at vann mest mulig uhindret kan passere gjennom røret under nedsenkningen. Dette for å unngå at det dannes en trykkløse foran røret, som kan skyve bort bløtt overflatesediment i det prøverøret trenger ned i sedimentet. Enkelte prøvetakere har egne lodd som kan opereres fra overflaten for å gi "hammerslag" som fører røret ennå dypere ned i sedimentet (figur 1). Når prøvetakeren dras opp igjen vil en mekanisme stenge åpningen i toppen av røret, og bidra til at sedimentet holdes i røret under oppstigningen. Før røret heises over vannoverflaten, må det monteres en propp i bunnen av røret.

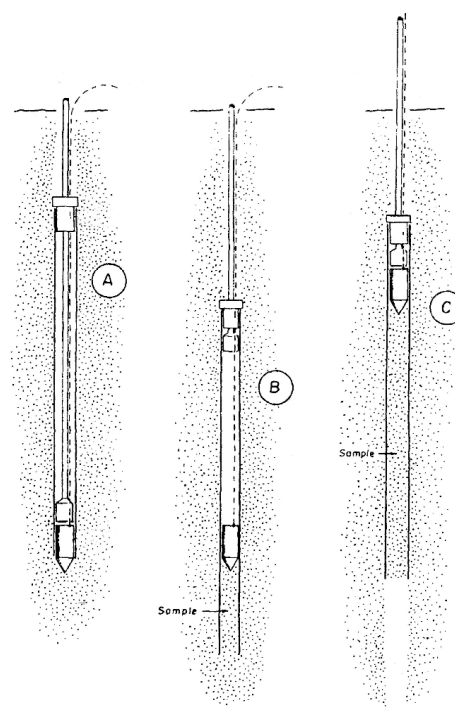
Med relativt bløtt sediment vil en kunne få opp 0,5-1 meter lange kjerner med denne type prøvetaker, som ofte er dypt nok til at en relativt upåvirket innsjøtilstand er representert i de dypeste sedimentlagene. I Frøylandsvatnet i Rogaland fikk en i 2005 opp en kjerne på 76 cm med denne teknikken, hvor bunnen ble anslått å stamme fra ca. 1860 og hvor søylen dypere enn ca. 45 cm representerte perioden før eutrofieringseffekter kunne påvises (Molversmyr *et al.* 2006). I Seldalsvatnet i Rogaland fikk en i 2009 opp en kjerne på 80 cm, der sjiktet ved 30 cm sedimentdyb ble datert til ca. 1870 og hvor sedimentet i bunnen av kjernen kan ha vært avsatt så tidlig som midt på 1600-tallet.

I innsjøer med mer kompakt sediment kan det være vanskelig å få hentet opp lange nok kjerner med denne type prøvetakere. I Vansjø i Østfold, der sedimentet er leirholdig og betydelig mer kompakt enn i Frøylandsvatnet, fikk en imidlertid i 2006 tatt opp kjerner på om lag 60 cm ved hjelp av en tyngre rørprøvetaker med hammeraksjon. De dypeste lagene i disse kjernene ble antatt å stamme fra tiden før 1850 (Hobæk *et al.* 2009).

For kompakte sedimenttyper er en stempelhenter ("piston corer") bedre egnet for å få opp lengre kjerner, men de er vanskeligere å bruke enn rørhenterne. Denne typen prøvetaker har et stempel som holdes i et bestemt nivå, mens et rør som omgir stempelet presses ned i sedimentet mens stempelet holdes fast (figur 2). Stempelet skaper et undertrykk/mottrykk som hindrer at sedimentet presses sammen nedover i kjernen, og som gjør at røret lettere kan trenge dypere ned i sedimentet slik at relativt lange kjerner kan hentes opp. Dette kan også gjøres ved å hente kortere kjerner (f.eks. 1 meter lange) suksessivt nedover i sedimentet. For ytterligere omtale av ulike prøvetakere, og om sedimentprøvetaking generelt, henvises til Glew *et al.* (2001). Utstyr og teknikker for kjerneboring og opphenting av lange kjerner er beskrevet av Leroy & Colman (2001).



Figur 1. Rørprøvetakere
 a) Skogheim-henter og b) Kajek-henter (fra Vennerød 1984),
 c) Uwitec-henter med "hammer"-lodd (fra www.uwitec.at).



Figur 2. Stempelprøvetaker
 A) Nedsenking, B) Prøvetaking,
 C) Oppheising (fra Glew *et al.* 2001).

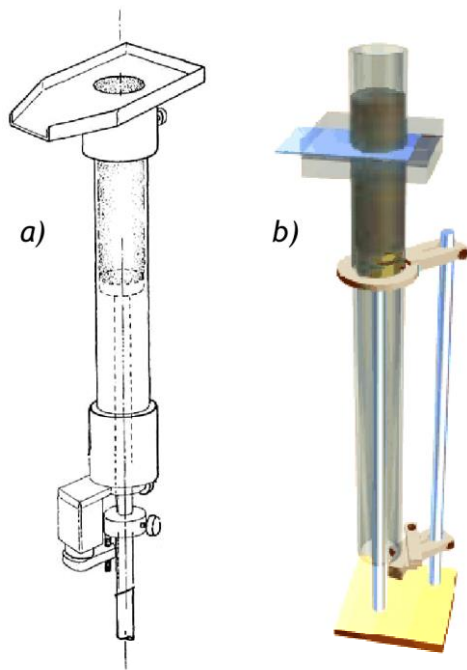
2.2 Prøvesplitting

Rør som inkluderer overgangen mellom sediment og vann må holdes oppreist, og fraktets stående til stedet hvor prøvesplitting skal foregå. Rørene må være korket i begge ender. Lengre kjerner som er tatt med stempelprøvetaker (og som ikke inkluderer overgangen mellom sediment og vann) kan transporteres liggende, dersom strukturen i kjernen blir bevart.

Kjerner med bløtt sediment, som omfatter overgangen mellom sediment og vann, kan vanskelig transporteres tilbake til laboratoriet uten at overflatesedimentet blir forstyrret. Slike prøver må derfor splittes i felt. Bruk av geldannende forbindelser for å stabilisere vannet like over sediment-overflaten kan forenkle eventuell transport til laboratoriet (Glew *et al.* 2001).

Før prøvesplitting bør kjernens utseende beskrives, og under splittingen noteres karakteristika som farge, konsistens, osv. De fleste (relativt korte) kjerner splittes i vertikalt posisjon, ved at et stempel føres inn gjennom prøverøret fra undersiden for å presse sedimentet ut gjennom toppen. Det finnes ulike typer utstyr for fraspilting av sediment, som er tilpasset ulike prøvetakere/prøverør. Noen benytter en oppsamlingsplate der sedimentskiver av ønsket tykkelse skrapes av (figur 3a), mens andre benytter en ring (rør) med samme diameter som prøverøret hvor sedimentet føres inn og splittes ved at en tynn plate skyves mellom ringen og prøverøret (figur 3b, 4.

De fleste typer utstyr har også en mekanisme som gjør det enklere å ta ut gjentatte skiver med faste intervaller nedover i sedimentkjernen. Normalt splittes en kjerne i 5-10 mm intervaller (avhenger av formålet med undersøkelsen), og det er hensiktsmessig å ta ut alle sjiktene gjennom hele kjernens lengde selv om ikke alle disse prøvene i utgangspunktet skal analyseres. Dette gjør det mulig å se nærmere på bestemte sjikt i sedimentet dersom analyseresultater viser spesielle trender mellom planlagt analyserte sedimentsjikt. Hvert sjikt separeres i det antall replikater som analysene krever, og prøvene has i egnede beholdere. Små lynlås-poser av plast er hensiktsmessige, men ikke lufttette (se nedenfor). Prøvene må merkes entydig med egnet skriveredskap (f.eks. vannfast tusj).



Figur 3. Eksempel på utstyr for prøvesplitting
 a) fra Glew et al. 2001,
 b) fra www.uwitec.at.



Figur 4. Splitting av kjerne fra Vansjø.

Algepigmenter i sedimentet er ømfintlige, og påvirkes bl.a. av lys. Kjerner som hentes opp i rør av gjennomsiktig materiale bør derfor skjermes mot lys ved f.eks. å pakkes i svart plast. Prøvene vil også påvirkes av oksygen og forhøyet temperatur. Prøvesplittingen må derfor foregå raskt, og prøver må oppbevares kjølig før de så raskt som mulig fryses (helst ultrafryser ved $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$). Oppbevaringstiden før videre analyse bør være så kort som mulig. Andre rester av vannlevende organismer, slik som kisel skall, er ikke like ømfintlige for påvirkning under prøvesplitting og senere oppbevaring, men prøver for slike analyser kan også med fordel fryses ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) før videre analyse.

Formålet med undersøkelsen vil avgjøre hva som skal tas ut av prøver ved prøvesplittingen. Hvilke analyser som skal utføres må være planlagt på forhånd, slik at hvert sedimentsjikt som splittes fra kjernen blir fordelt på et tilstrekkelig antall replikate prøver (med nødvendig volum/ mengde sediment).

Kapittel 3

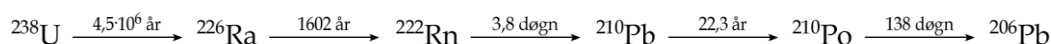
ANALYSEMETODER

I det følgende omtales viktige teknikker og metoder som er relevante for innsjøhistoriske undersøkelser, og fastsettelse av naturtilstand med utgangspunkt i innsjøsedimenter. De omtalte metodene ble benyttet for undersøkelser i Vansjø i Østfold (Hobæk *et al.* 2009) og i Frøylandsvatnet (Molversmyr *et al.* 2006) og Seldalsvatnet (Molversmyr *et al.* 2010) i Rogaland, som er utgangspunktet for de følgende beskrivelsene.

Det finnes imidlertid en lang rekke metoder og teknikker som kan være aktuelle for innsjøhistoriske undersøkelser, og en omfattende oversikt finnes i bokserien fra tidligere Kluwer Academic Publishers (nå Springer) omtalt i innledningen til denne rapporten.

3.1 Datering av sedimentprøver

En forutsetning for å kunne tolke analyseresultater fra en sedimentkjerne er at en kjenner alderen på de ulike sedimentsjiktene, dvs. at en kan tidfeste når de enkelte lagene i sedimentet ble avsatt, og at tidsrekkefølgen er mest mulig korrekt. Relativt nylig avsatte sedimenter (0-150 år) dateres oftest ved hjelp av ^{210}Pb , som er en naturlig radioaktiv isotop av bly (Pb).



Figur 5. Nedbrytningsrekken for ^{238}U , som viser de viktigste radionuklidene og deres halveringstider.

^{210}Pb forekommer som en av radionuklidene i den naturlige omdanningen/ nedbrytningen av ^{238}U (uran) (figur 5). I denne kjeden forekommer den gassformige nukliden ^{222}Rn (radon), og noe av dette unnslipper til atmosfæren hvor det raskt omdannes til ^{210}Pb . Dette faller ut igjen med nedbør og som tørrdeposisjon. Den totale aktiviteten av ^{210}Pb i sedimentet har derfor to komponenter; såkalt "supported" ^{210}Pb som skriver seg fra omdanning/ nedbrytning av ^{226}Ra i selve sedimentet (bakgrunnsverdi) og såkalt "unsupported" ^{210}Pb som har opphav i atmosfærisk nedfall. Den sistnevnte komponenten beregnes vanligvis ved å trekke bakgrunnsaktiviteten ("supported") fra den totale målte aktiviteten.

Resultatene benyttes for selve dateringen av de ulike sedimentsjiktene, som omfatter validering og bruk av ulike modeller. Ofte benyttes den såkalte "constant rate of supply" (CRS) modellen (Appleby & Oldfield 1978) som antar konstant tilførselsrate for "unsupported" ^{210}Pb , men flere andre tilnærminger vil være aktuelle. Uansett må det nøye vurderes hvilke modell som er best egnet i det enkelte tilfelle, og resultatene bør bekreftes ved måling av uavhengige indikatorer slik som de menneskeskapte radionuklidene ^{137}Cs og ^{241}Am . Radioaktivt nedfall som følge av atomprøvesprengningene og den senere Tsjernobyl-ulykken kan finnes igjen i sedimentet, og gir uavhengig bestemmelse av sedimenttypene som tilsvarende henholdsvis 1963 og 1986. Videre omtale av dateringsteknikker for "nyere" avsatte sedimenter finnes i Appleby (2001).

Selve bestemmelsen av ^{210}Pb -aktivitet foregår ved alfa- eller gammaspespektrometriske metoder ved et laboratorium som er utstyrt for dette. Datering av sedimentkjerner fra ^{210}Pb -analyser krever spesiell kompetanse, og er langt fra en rutinemessig prosedyre. Tilgjengeligheten på laboratorier som kan utføre ^{210}Pb datering er derfor relativt begrenset.

3.2 Generell karakterisering

I tillegg til en generell beskrivelse av en sedimentkjernes utseende (lengde, farge, lagdeling, osv.), vil den grunnleggende karakteriseringen av sedimentprøvene bestå i å bestemme innholdet av vann, uorganisk og organisk materiale. Vanninnholdet bestemmes ved å veie ut en gitt mengde vått sediment, som så tørkes (normalt ved 105 °C) til vannet har fordampet. Vekttapet gir da vanninnholdet i prøven. Den tørre restprøven er tørrstoffet i sedimentet, og for å bestemme uorganisk og organisk fraksjon av dette kan den glødes ved høy temperatur (normalt 550 °C). Ved denne behandlingen vil organisk materiale forbrenne, og det som er igjen er den uorganiske delen av prøven. Vekttapet i forbrenningsprosessen gir mengden av organisk materiale i prøven. Ved å relatere disse mengdene til den innveide mengden av vått sediment kan en uttrykke sammensetningen av sedimentet som vektprosent av vann, uorganisk og organisk materiale. Fremgangsmåten for disse analysene kan finnes i norsk standard NS 4764:1980.

Organisk innhold i sedimentet bestemmes ofte mer spesifikt som mengden av karbon ved hjelp av elementanalysator, der organisk karbon forbrennes fullstendig (ved svært høy temperatur) til CO₂ som måles med en passende detektor. Ofte bestemmes også nitrogeninnholdet i den samme analysen, som kan gi ytterligere informasjon om kilder til næringsstoffer og trofinivå. Forholdet mellom karbon og nitrogen (C:N-forholdet) i organisk materiale vil for eksempel gjenspeile den relative bidraget fra alger produsert i innsjøen og rester av planter fra nedbørfeltet, siden alger har et C:N-forhold (basert på atomvekt) i området 4:1 - 10:1 mens landplanter har et høyere C:N-forhold, større enn 20:1 (Meyers & Ishiwatari 1993; Meyers & Lallier-Verges 1999).

3.3 Pigmentanalyser

Som nevnt innledningsvis har utvikling av metoder for å identifisere algepigmenter og deres nedbrytningsprodukter i sedimentet forbedret muligheten til å rekonstruere eutrofiutviklingen i innsjøer. Siden ulike algetyper har ulik pigmentsammensetning, kan forekomsten av pigmentene i sedimentet brukes til å rekonstruere både algebiomasse og -sammensetning.

En rekke ulike pigmenter finnes normalt igjen i sedimentet, og disse er karakteristiske for ulike taksonomiske grupper (tabell 1). Pigmentene vil i hovedsak indikere algesammensetningen på klassenivå, men nøyere skille er mulig for enkelte typer blågrønnalger som inneholder unike pigmenter (Leavitt & Hodgson 2001).

Før ekstraksjon av pigmenter fra sedimentprøver bør sedimentet frysetørkes for å oppnå et lavt og likt vanninnhold i prøver fra ulike sedimentdyp, noe som gir mer effektiv og reproduserbar ekstraksjon (Leavitt & Hodgson 2001). Algepigmenter ekstraheres fortrinnsvis i en blanding av aceton:metanol:vann (80:15:5, volum), som Leavitt & Hodgson (2001) antyder gir mer fullstendig ekstraksjon enn blandingen 10% vann i aceton som ofte benyttes for ekstraksjon av pigmenter fra planteplankton. Siden pigmenter lett endres ved eksponering for lys og kontakt med oksygen, må hele prosessen skjermes fra lys og arbeidet bør fortrinnsvis foregå under inert atmosfære (N₂).

Etter ekstraksjon blir algepigmentene normalt separert og kvantifisert ved bruk av høytrykks-væsekromatografi (HPLC) koblet til en diode-array detektor. Kalibrering av systemet baseres på pigmentstandarder, og identifisering av pigmenter baseres på sammenligning av retensjonstider og spektrofotometrisk sammenligning med pigmentstandardene og pigmenter ekstrahert fra enalgekulturer. Bruk av massespektrometri (MS) for identifikasjon av pigmentene er også mulig med mer avansert instrumentering. Utfyllende beskrivelse av metodikken finnes i Leavitt & Hodgson (2001).

Innholdet av pigmenter i sedimentet uttrykkes normalt som andel av organisk stoff (mengde pigment pr. gram organisk stoff eller organisk karbon). Siden organisk stoff generelt, i likhet med algepigmentene, først og fremst brytes ned under sedimentasjon gjennom vannmassene, vil forholdet mellom pigmenter og totalt organisk stoff i sedimentet forbli relativt uforandret. Organisk-spesifikk mengde av pigmenter gir derfor et godt mål for tidligere tiders forekomst av alger i vannet (Leavitt & Hodgson 2001). Nedbrytningsprosessene gjør imidlertid at resultatene

av pigmentmålingene for de øverste centimeterne av sedimentet må tolkes med varsomhet. Dessuten kan resultater påvirkes av uhomogen prøvematriks, siden svært små prøvemengder benyttes i analysene. Resultater fra enkeltprøver (enkeltår) må derfor også tolkes med varsomhet, og vurderinger bør bygge på overordnede trender fremfor resultater fra enkeltår.

Tabell 1. Pigmenter s i innsjøsediment, og deres taksonomiske relevans (fra Leavitt & Hodgson, 2001).

Table I. Pigments commonly recovered from lake sediments and their taxonomic affinities. Quantitatively important sources indicated in *italics*. Distributions modified for lake ecosystems from Goodwin (1980a), Jeffrey et al. (1997a). Predominant source identified as planktonic (P), littoral (L), terrestrial (T) or sedimentary (S, post-depositional derivatives); upper case letters indicate quantitatively more important sources. Relative degree of chemical stability and preservation is ranked from most (1) to least (4) stable based on mesocosm experiments and mass-balance studies (see Leavitt, 1993). - = uncertain stability.

Pigment	Source ¹	Stability	Affinity
β , β -carotene	P,L,t	1	<i>Plantae, Algae</i> , some phototrophic bacteria
β , α -carotene	P,l	2	<i>Cryptophyta, Chrysophyta, Dinophyta</i> , some <i>Chlorophyta</i>
β -isorenieratene ²	P	1	<i>Chlorobiaceae</i> (green sulphur bacteria)
isorenieratene ²	P	1	<i>Chlorobiaceae</i> (brown varieties)
alloxanthin	P	1	<i>Cryptophyta</i>
fucoxanthin	P,L	2	<i>Dinophyta</i> ³ , <i>Bacillariophyta, Chrysophyta</i>
diatoxanthin	P,L,s ⁴	2	<i>Bacillariophyta, Dinophyta, Chrysophyta</i>
diadinoxanthin	P,L,s ⁴	3	<i>Dinophyta, Bacillariophyta, Chrysophyta, Cryptophyta</i>
dinoxanthin	P	-	<i>Dinophyta</i>
peridinin	P	4	<i>Dinophyta</i>
echinenone	P,l	1	<i>Cyanobacteria</i>
zeaxanthin	P,l	1	<i>Cyanobacteria</i>
canthaxanthin	P,l	1	colonial <i>Cyanobacteria</i> , herbivore tissues
myxoxanthophyll	P,l	2	colonial <i>Cyanobacteria</i>
scytonemin ⁵	p,L	-	colonial <i>Cyanobacteria</i>
oscillaxanthin	P,l	2	<i>Cyanobacteria (Oscillatoriaceae)</i>
aphanizophyll ⁶	P,l	2	N ₂ -fixing <i>Cyanobacteria (Nostocales)</i>
lutein	P,L,t	1	<i>Chlorophyta, Euglenophyta, Plantae</i>
neoxanthin	l	4	<i>Chlorophyta, Euglenophyta, Plantae</i>
violaxanthin	l	4	<i>Chlorophyta, Euglenophyta, Plantae</i>
okenone ²	P	1	purple sulphur bacteria
astaxanthin	P,l	4	invertebrates, N-limited <i>Chlorophyta</i>
chlorophyll <i>a</i>	P,L	3	<i>Plantae, Algae</i>
chlorophyll <i>b</i>	P,L	2	<i>Plantae, Chlorophyta, Euglenophyta</i>
pheophytin <i>a</i>	P,L,t,s	1	Chl <i>a</i> derivative (general)
pheophytin <i>b</i>	P,L,t,s	2	Chl <i>b</i> derivative (general)
pheophorbide <i>a</i>	P,l,s	3	Chl <i>a</i> derivative (grazing, senescent diatoms)
pyro-pheo(pigments)	L, S**	2	derivatives of <i>a</i> and <i>b</i> -phorbins
Chl <i>c</i>	P,l	4	<i>Dinophyta, Bacillariophyta, Chrysophyta</i>

¹ importance of given source also depends on lake morphometry and physical properties (e.g., clarity).

² mainly found in sediments of meromictic lakes, along with bacteriochlorophylls and derivatives (e.g., Hodgson et al., 1998).

³ some dinoflagellates contain peridinin as their main carotenoid, but this very labile compound is rarely recovered from lake sediments.

⁴ Diatoxanthin may interconvert with diadinoxanthin in lake sediments. Both are elements of the xanthophyll cycle of chromophyte algae.

⁵ Cyanobacteria, particularly benthic colonial forms, may produce and deposit scytonemin and its derivatives in some lakes which are transparent to UV radiation (Leavitt et al., 1999).

⁶ *Nostocales* and allied cyanobacteria have a highly diverse complement of similar, glycosidic carotenoids. Many of these pigments are not easily separated by HPLC (cf. Leavitt & Findlay, 1994).

3.4 Rester av organismer

Mange rester av ulike organismer kan gjenfinnes i innsjøsedimenter, i første rekke strukturer av silikat eller andre strukturer som ikke så lett brytes ned og som dermed bevares i sedimentet. Felles er at slike rester gir grunnlag for å identifisere arter, og med kunnskap om artenes miljøpreferanser (indikatorarter) kan tilstanden i innsjøen da organismene levde vurderes. Smol *et al.* (2001a, b) beskriver ulik biologisk informasjon som kan samles inn fra innsjøsedimenter, og hvordan slik informasjon kan anvendes.

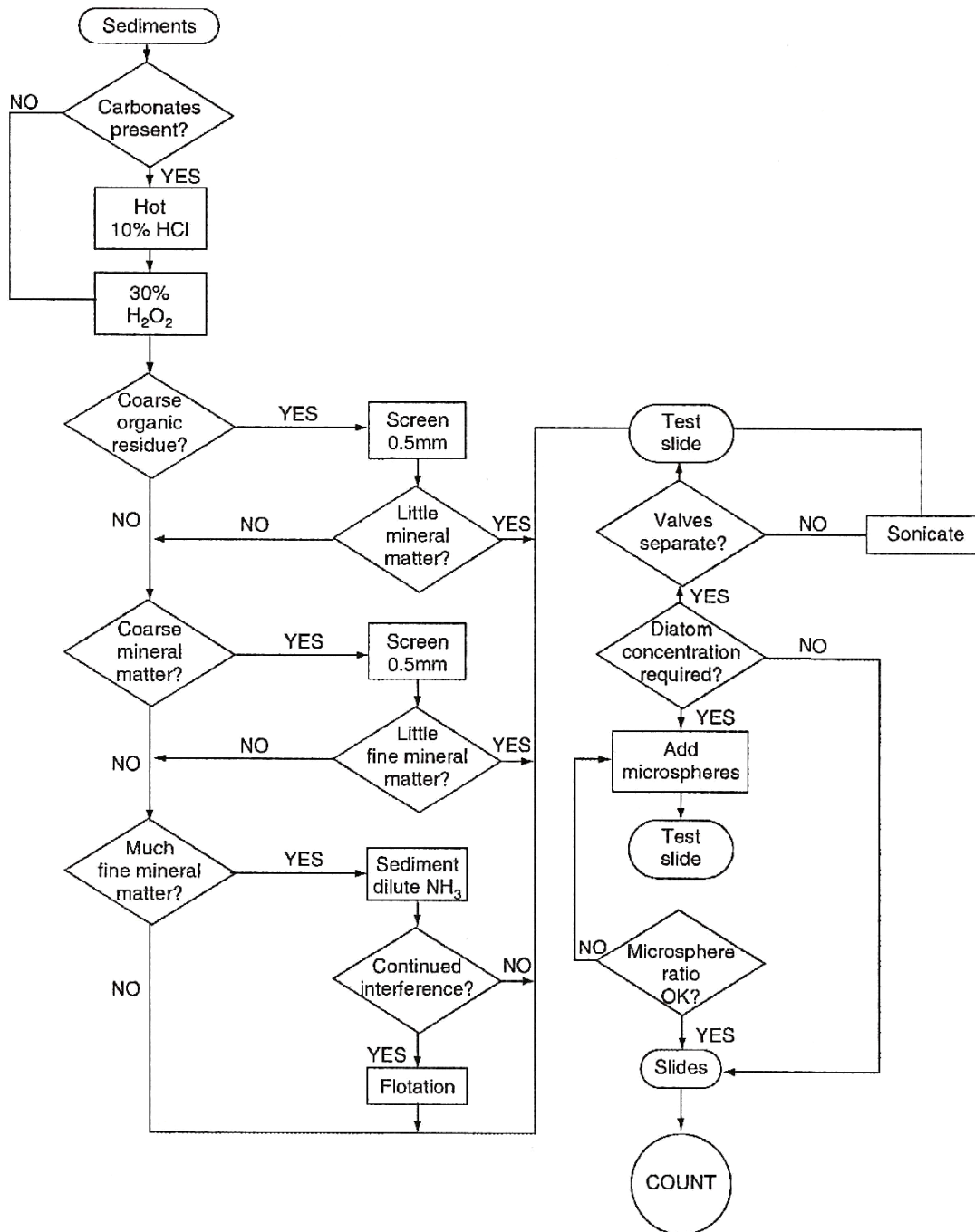
Identifisering av skall av kiselalger er noe som ofte inngår i paleolimnologiske undersøkelser. Algenes kiseliskall isoleres fra sedimentprøver og undersøkes i lysmikroskop eller elektronmikroskop, og arter av tidligere kiselalger identifiseres. Historiske endringer i sammensetningen av kiselalgefloraen i innsjøen kan dermed vurderes. En forutsetning for dette er imidlertid at kiselalgefloraen som rekonstrueres fra sedimentet er representativ for den floraen som levde i vannet. Flere prosesser i innsjøen kan motvirke dette, og særlig i overflatesedimentet der oppløsning av kiseliskall kan være et problem. En trenger derfor også informasjon om senere års sammensetning av kiselalgesamfunnene i vannmassen og om viktige kjemiske parametere i innsjøvannet, for å sammenligne med kiselalgene en finner i de øverste sedimentlagene og for å "kalibrere" modellene som benyttes for vurderingen av kiselalgedataene fra dypere sedimentlag. Det er i denne sammenheng viktig at prøvetakingsutstyret som benyttes kan ta opp kjerner der sedimentoverflaten er mest mulig uforstyrret (se avsnitt 2.1).

Ubehandlete eller frysetørkede sedimentprøver er utgangspunktet for prøveprepareringen, som i prinsippet utføres ved å fjerne løselige salter, organisk stoff og minerogent materiale, før restmaterialet tillages på slides for undersøkelse i mikroskop (figur 6). I hele prosessen må en være nøye for å unngå kontaminering (mellom prøver), og det er anbefalt å benytte engangsutstyr. Dersom glassutstyr skal brukes om igjen, må det vaskes grundig i varm lut (10% Na₂CO₃).

I tillegg til å bestemme forekomst av ulike arter gjøres ofte statistiske beregninger (f.eks. diversitetsindeks), og clusteranalyse kan utføres for å identifisere hovedgrupper i dataene som tegn på endringer i kiselalgesammensetningen. Prinsipal komponentanalyse (ter Braak & Prentice 1988) brukes for å analysere variansen i kiselalgesammensetningen, og hjelper til med å identifisere endringer i komplekse og artsrike datasett. Graden av endring i kiselalgesamfunnene mellom prøven fra bunnen av kjernen og hver av de andre prøvene uttrykkes gjerne ved hjelp av "squared chord distance" ulikhetsindeks (Overpeck *et al.* 1985), som ofte foretrekkes fremfor andre ulikhetsmål.

Funksjoner basert på avanserte statistiske metoder benyttes for å rekonstruere tidligere tilstand fra sedimentkjernedata, forutsatt at kiselalgene i sedimentprøvene er godt representert i referansedataene, og at kiselalgeanalysene benytter samme taksonomiske system som for referansedatasettet. Særlig relevant for vurdering av trofinivå er funksjoner for å rekonstruere tidligere innhold av total fosfor i vannmassene ("diatom-inferred total phosphorus", DI-TP) (Bennion *et al.* 1996, 2005). Nøyere beskrivelser av teknikker og metoder finnes i (Battarbee *et al.* 2001).

Identifisering av kiselalger krever betydelig taksonomisk kunnskap, og tolking av resultater og bruk av aktuelle modeller krever høy kompetanse og betydelig statistisk kunnskap. Disse metodene må derfor utføres av personer med særlig ekspertise på området.



Figur 6. Flyttdiagram for preparering av sedimentprøver for bestemmelse av kiselalger (fra Batterbee et al. 2001).

Kapittel 4

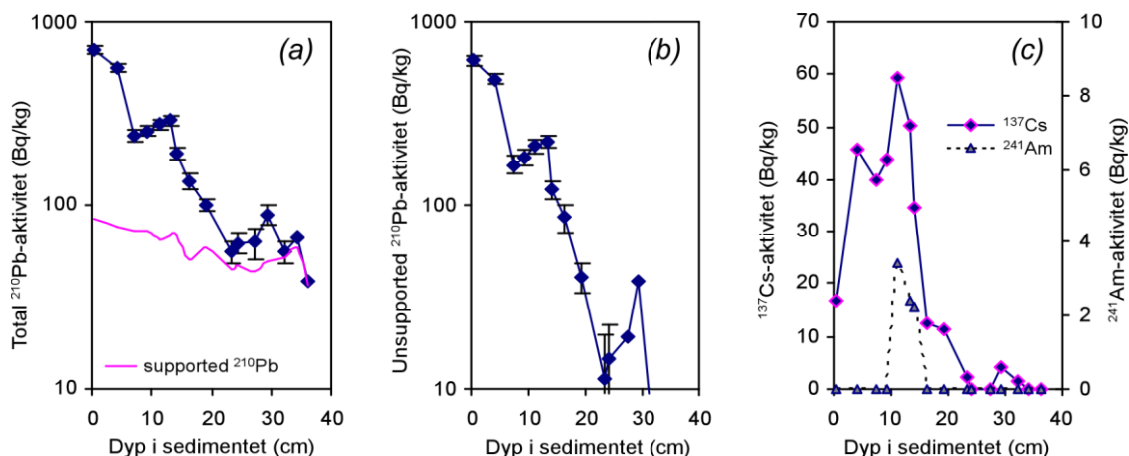
RESULTATER OG TOLKINGER

Nedenfor vises utvalgte resultater fra de nevnte undersøkelsene i Vansjø, Frøylandsvatnet og Seldalsvatnet, og hva disse resultatene kan fortelle oss om tidligere tilstand i innsjøene diskuteres kort.

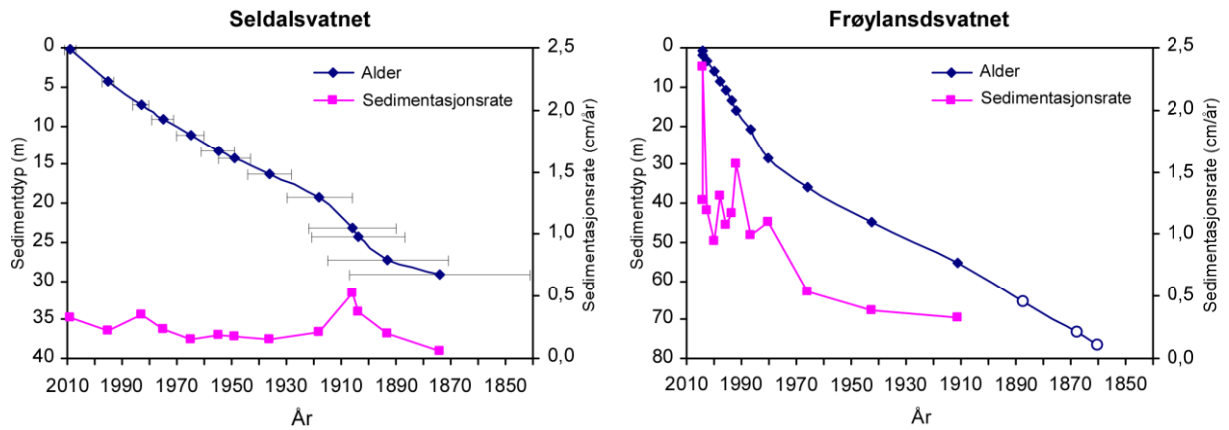
For å kunne datere sediment med akseptabel nøyaktighet med ^{210}Pb -metoden må totalaktiviteten av ^{210}Pb være signifikant høyere enn bakgrunnsaktiviteten (dvs. at "unsupported" ^{210}Pb -aktivitet må kunne bestemmes; se avsnitt 3.1), som betyr at sjiktet der totalaktiviteten ikke lenger kan skilles fra bakgrunnsnivået vil danne grensen for hvor dypt ned i sedimentet alder kan fastsettes. I Seldalsvatnet fant en det dypeste sedimentlaget som kunne aldersbestemmes ca. 30 cm nede i sedimentkjernen, beregnet avsatt rundt 1870 (figur 7 og 8). I Vansjø (Storefjorden) fant en dette ved 45 cm sedimentdyb (datert til ca. 1900; figur 9), mens en i Frøylandsvatnet måtte betydelig dypere for å finne tilsvarende alder (figur 8). Dette skyldes at Frøylandsvatnet har hatt vesentlig høyere sedimentasjonsrate (som cm/år) enn de to andre innsjøene (figur 8 og 9). Sedimentasjonsrater (målt som g/cm²/år eller cm/år) beregnes med bakgrunn i dateringsresultater og tørrstoffbestemmelser.

Dateringer basert på ^{210}Pb -metoden bekreftes/kalibreres ved måling av uavhengige indikatorer, og i figur 7c kan en se klart definerte topper av ^{137}Cs og ^{241}Am som ble funnet ca. 11,5 cm nede i sedimentet i Seldalsvatnet. Dette gjenspeiler med stor sannsynlighet maksimum nedfall i 1963 fra atmosfæriske prøvesprengninger av kjernevåpen. En mindre topp i ^{137}Cs funnet høyere opp i sedimentet kan stamme fra nedfall etter Tsjernobylulykken i 1986.

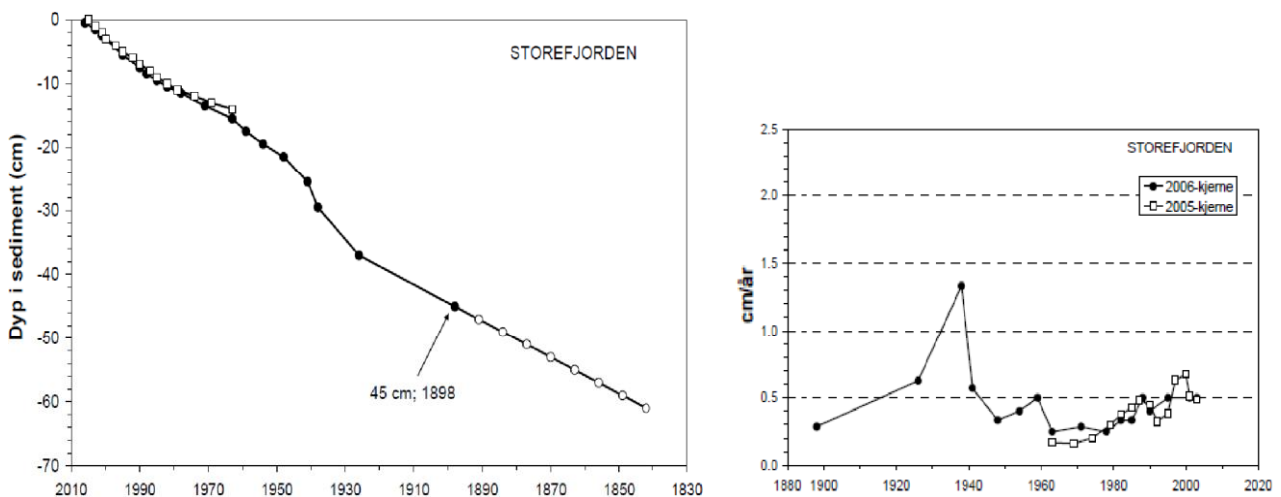
Alder for dypere lag enn eldste daterte kan anslås ved å ekstrapolere ut fra sedimentasjonsrater i de dypeste daterte lagene, men usikkerheten knyttet til dette er imidlertid stor. For Frøylandsvatnet ble bunnen av den 76 cm lange sedimentkjernen anslått å stamme fra ca. 1860, mens en i Vansjø (Storefjorden) var tilbake før 1850 i de dypeste lagene i den 62 cm lange kjernen derfra (figur 9). For Seldalsvatnet ble usikkerheten for stor til å gjøre konkrete anslag, men her kan sedimentet i bunnen av den 80 cm lange kjernen være avsatt så tidlig som midt på 1600-tallet. Hovedsaken er at en med stor sikkerhet kan anta at bunnen i alle de omtalte kjernene ble avsatt vesentlig tidligere enn slutten av 1800-tallet, og at dermed representerer en nær referansetilstand for disse innsjøene.



Figur 7. Aktivitet av radionuklider i sedimentkjerner fra Seldalsvatnet (2009). Figuren viser (a) total ^{210}Pb , (b) "unsupported" ^{210}Pb , og (c) ^{137}Cs - og ^{241}Am -aktivitet (fra Molversmyr et al. 2010).



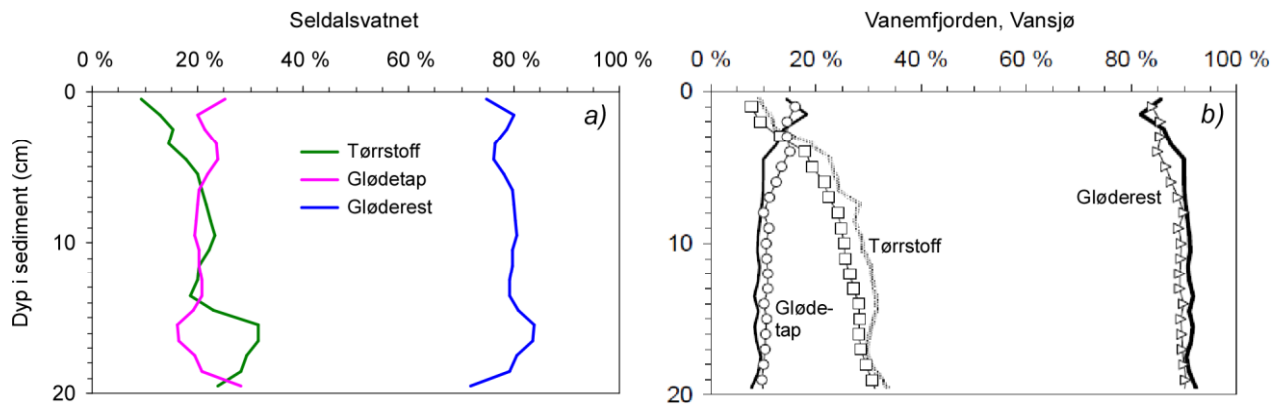
Figur 8. Datering av sedimentkjerne fra Seldalsvatnet (2009) og Frøylandsvatnet (2005). Figuren viser estimert alder (usikkerhetsintervaller angitt for Seldalsvatnet) og sedimentasjonsrater. Åpne sirkler viser alder basert på ekstrapolert sedimentasjonsrate fra de eldste daterte sjikt (omarbeidet fra Molversmyr et al. 2006 og 2010). Merk ulik skala på akse for sedimentdyp.



Figur 9. Datering av sedimentkjerner fra Vansjø (Storefjorden). En kort kjerne fra 2005 er vist med åpne firkanter, mens en lengre kjerne fra 2006 er vist med fylte sirkler (eldste daterte sjikt er angitt). Åpne sirkler viser alder basert på ekstrapolert sedimentasjonsrate fra eldste daterte sjikt. Sedimentasjonsrater er vist i figuren til høyre (fra Hobæk et al. 2009).

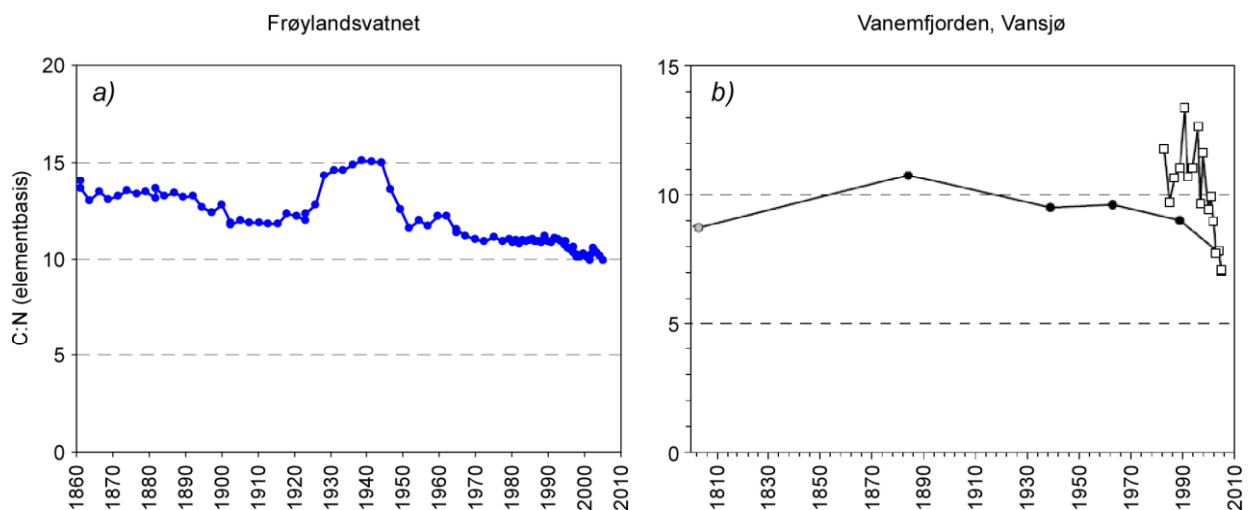
Når en har datert de ulike sedimentlagene i en kjerne kan en tilegne alder til resultatene fra de andre analysene en har utført, og dermed kan tidsperiode for eventuelle endringer anslås.

I sedimentet i Vanemfjorden i Vansjø fant en at organisk innhold (målt som glødetap) økte svakt men jevnt frem til 1960, deretter noe raskere og til slutt raskt i sedimentet avsatt etter år 2000 (de øverste 5 cm i figur 10b). Dette kan gjenspeile økt algeproduksjon, men muligens også redusert nedbrytning som følge av oksygenvinn i bunnvannet etter dette tidspunktet. I Seldalsvatnet har endringene vært mindre klare, men det har også der vært en svak økning av organisk innhold de siste 70 årene (de øverste 15 cm i figur 10a). En klar forskjell mellom disse to innsjøene er at sedimentene fra Vansjø har vesentlig høyere andel uorganisk stoff, som skyldes betydelig avsetning av leire i denne innsjøen.



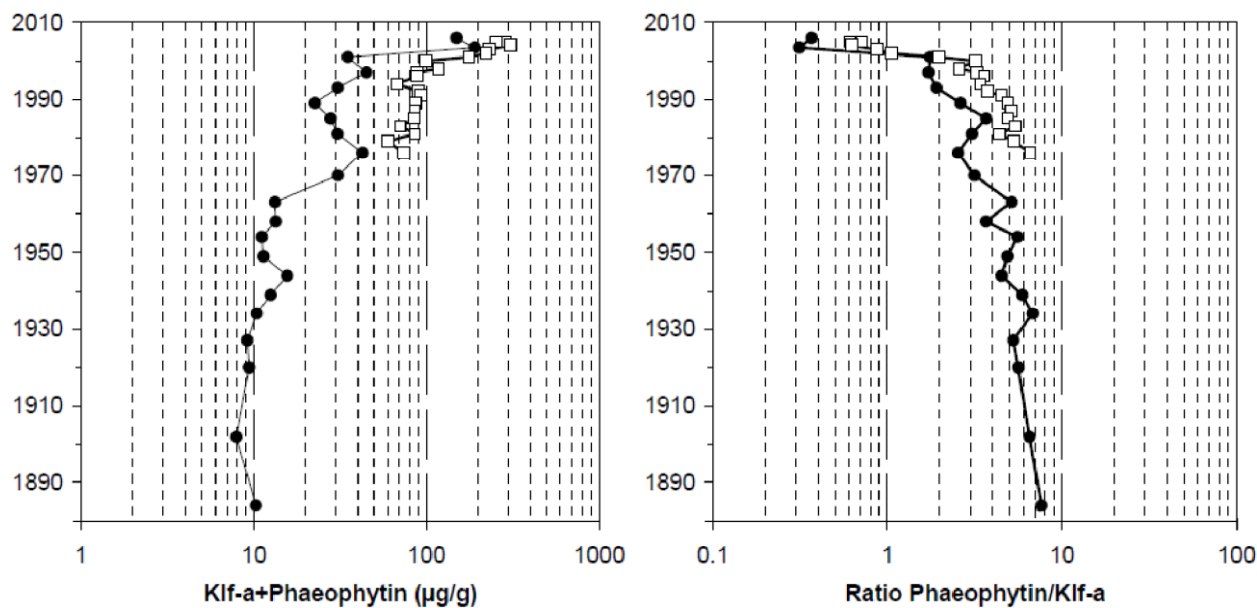
Figur 10. Tørrestoff og gløderest/glødetap i øvre sedimentlag fra Seldalsvatnet og Vanemfjorden i Vansjø. For sistnevnte er kjerne fra 2006 vist som linjer, mens kjerne fra 2005 er vist som åpne punkter (omarbeidet fra Molversmyr et al. 2010 og Hobæk et al. 2009).

Forholdet mellom karbon og nitrogen i organisk materiale i sedimentet kan gi informasjon om opphavet til dette materialet (se avsnitt 3.2). Både i Vansjø og i Frøylandsvatnet er C:N-forholdet i sedimentet (figur 11) på nivå med det en normalt finner i "algedominerte" innsjøer. I Vanemfjorden i Vansjø har det vært markert nedgang i C:N-forholdet i sedimentet de siste årene (etter 1990; figur 11b), mens det i Frøylandsvatnet har vært nedgang gjennom en lengre periode, særlig etter ca. 1945 (figur 11a). Avtakende C:N-forhold gir generelt signal om økt algeproduksjon, mens økningen i C:N-forholdet i Frøylandsvatnet på 1930-tallet kan indikere økte tilførsler av organisk stoff fra høyere plantevekst, muligens som følge av endring i arealbruken i nedbørfeltet i denne perioden (økt erosjon av jord og planterester).

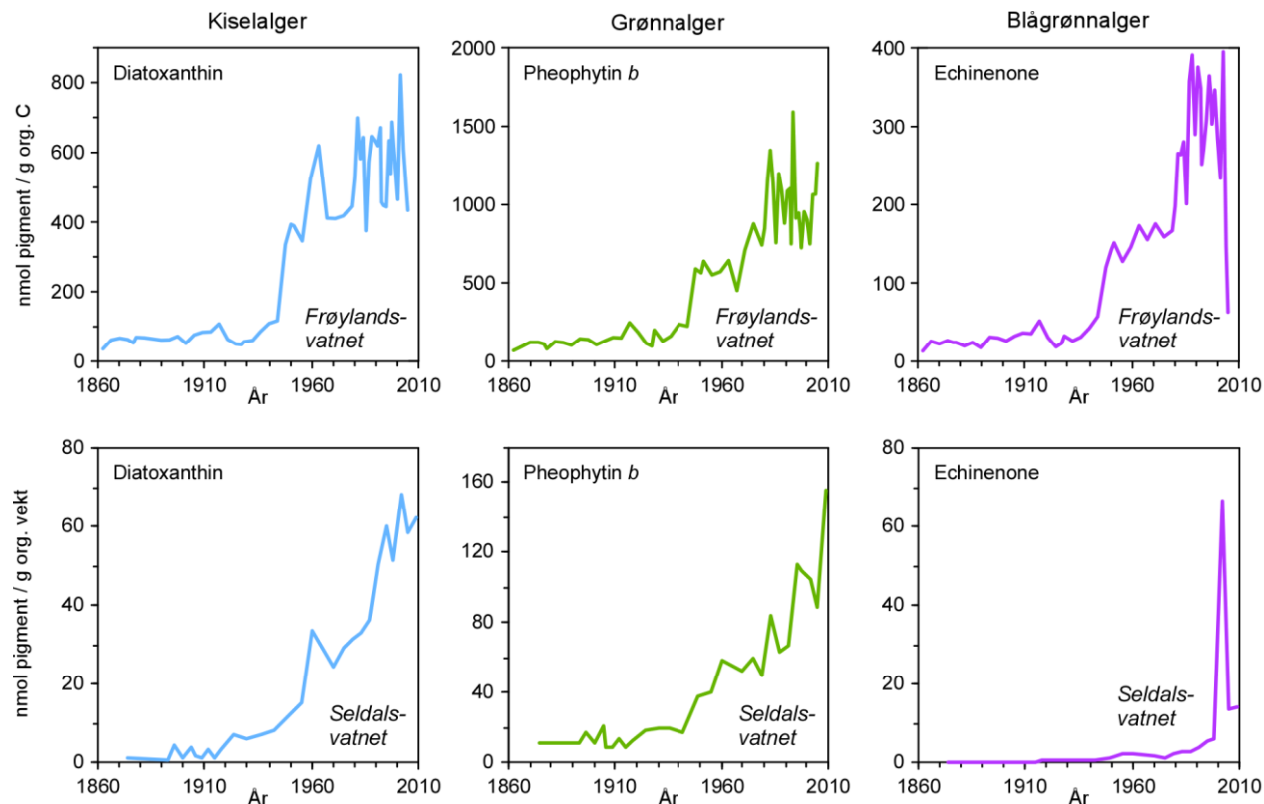


Figur 11. Forholdet mellom karbon og nitrogen i sedimentkjerner fra Frøylandsvatnet og Vanemfjorden i Vansjø. For sistnevnte er kjerne fra 2006 vist med fylte sirkler, fra 2005 med åpne firkanter, og sediment eldre enn eldste datering (alder estimert ved ekstrapolering) er vist som grått punkt (omarbeidet fra Molversmyr et al. 2006 og Hobæk et al. 2009).

Endringer i algeproduksjonen i innsjøene reflekteres tydelig ved resultatene fra analyser av algepigmenter i sedimentkjernene. I Vanemfjorden i Vansjø viste målinger av klorofyll *a* og dets nedbrytningsprodukt phaeophytin i sedimentet (summen gir et estimat av total algebiomasse) at det var lav og nokså stabil algebiomasse frem til ca. 1930 (figur 12). Deretter ser algemengden ut til å ha vært noe høyere frem til ca. 1965, da den synes å øke kraftig. Og en ny, kraftig økning synes å ha skjedd etter år 2000. Forholdet mellom phaeophytin og klorofyll *a* var jevnt økende nedover i kjernen før ca. år 2000, og var markert lavere i de yngre sedimentene slik en vil forvente som følge av nedbrytning av klorofyll *a*.



Figur 12. Algepigmenter i sedimentkjerner fra Vanemfjorden i Vansjø. Venstre panel viser variasjon i total algebiomasse (klorofyll a + nedbrytningsproduktet phaeophytin; $\mu\text{g/g}$ tørrstoff) mens høyre panel viser forholdet mellom phaeophytin og klorofyll a. Kjerner fra 2006 vist med fylte sirkler, fra 2005 med åpne firkanter (omarbeidet fra Hobæk et al. 2009).



Figur 13. Algepigmenter i sedimentkjerner fra Frøylandsvatnet og Seldalsvatnet. Figuren viser utvalgte algepigmenter som representerer ulike algegrupper. Merk ulik skala på y-aksene, og at resultater fra de to innsjøene har ulik benevning (omarbeidet fra Molversmyr et al. 2006 og 2010).

I kjernene fra Frøylandsvatnet og Seldalsvatnet i Rogaland ble det også målt en rekke ulike algepigmenter, som gir informasjon om forekomst av ulike algetyper (figur 13). I Frøylandsvatnet viste analysene at både total algebiomasse og biomassen av de fleste algegrupper var stabilt lav frem til midten av 1940-tallet. Etter dette økte algebiomassen raskt til et nytt nivå som holdt seg til ut på 1970-tallet, for så å øke ytterligere til en topp sent på 1980-tallet. Analysene viser også at algemengden avtok noe tidlig på 1990-tallet, og har holdt seg relativt stabil de seneste årene.

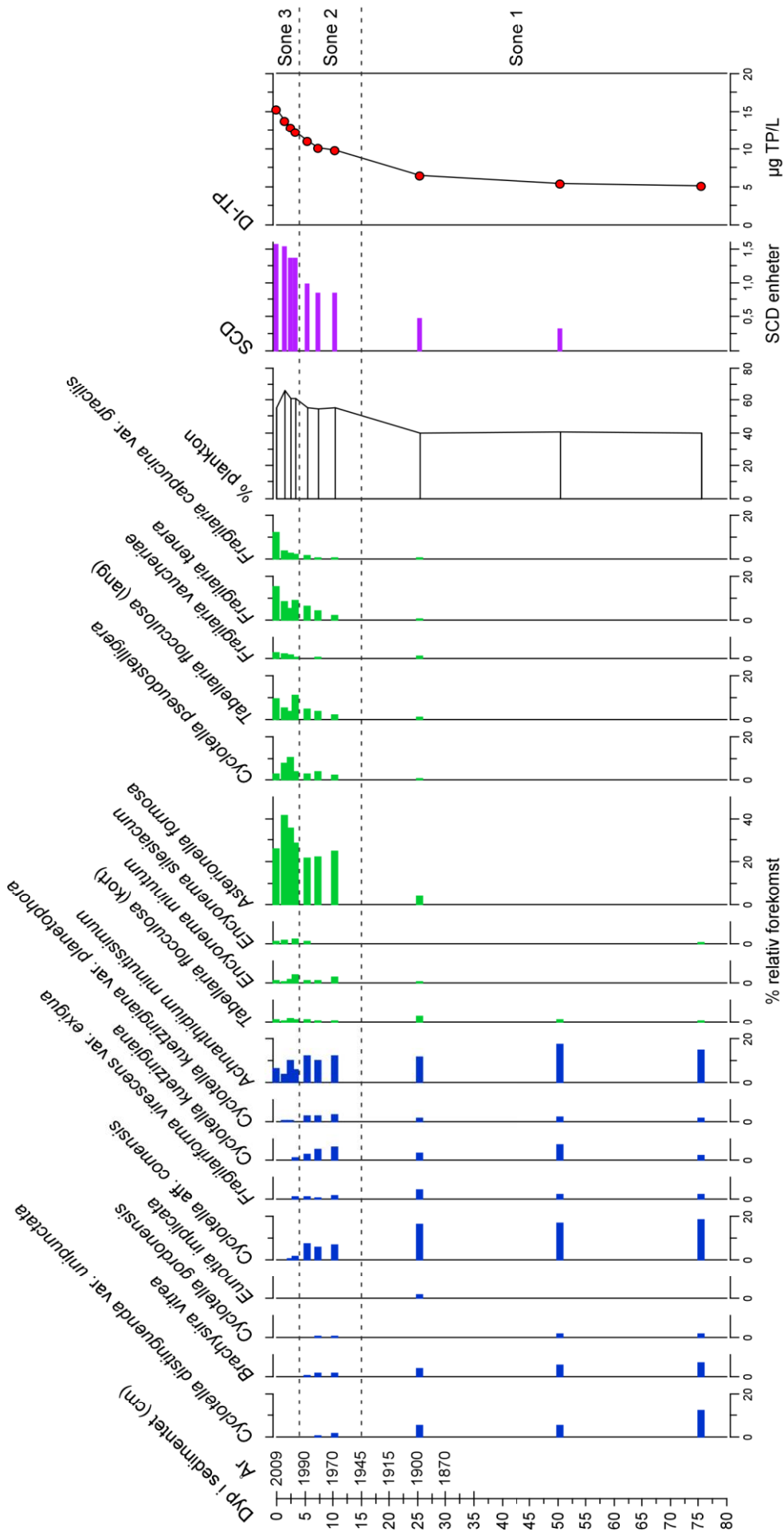
Seldalsvatnet øverst i Ims-Lutsi vassdraget er vesentlig mindre belastet/eutrof enn Frøylandsvatnet, men også her synes eutrofieringseffekter å ha oppstått midt på 1940-tallet. Her indikerer dataene jevnt økende biomasse av de fleste algetyper helt frem til i dag, mens kortvarige økninger i pigmenter fra koloniformede blågrønnalger i de øverste sedimentsjiktene (tilsvarende perioden etter ca. 1990) indikerer relativt nylige endringer i blågrønnalgesamfunnet i innsjøen og gjenspeiler antakelig blågrønnalgeoppblomstringene som er observert i senere år.

Endringer i algeproduksjonen i innsjøene vises også tydelig fra analyser av kiselalgesammensetningen i sedimentkjernene. I Seldalsvatnet (figur 14) viste kiselalgestratigrafien godt samsvar med resultatene fra pigmentanalysene, og en kan tydelig se overgang fra oligotrofe arter til mer næringskrevende arter i perioden etter midten av 1940-tallet. Tre soner ble identifisert ved clusteranalyse, og i perioden før ca. 1945 var det dominans av både planktoniske og ikke-planktoniske arter som indikerer oligotrofe (næringsfattige) forhold. I sonen som representerte perioden fra ca. 1945 til ca. 1995 var det klart økende forekomst av mer næringskrevende arter mens oligotrofe arter avtok, andelen planktoniske former økte, og det samme gjorde indeksen for ulikhet i forhold til dyptliggende sedimentlag. Denne utviklingen forsterket seg i den øverste sonen som representerer perioden etter ca. 1995, der enkelte av de "næringsfattige" artene var helt fraværende.

Rekonstruksjon av fosforkonsentrasjoner fra kiselalgedataene (DI-TP i figur 14) indikerer at Seldalsvatnet hadde lavt næringsinnhold, med ca. 5 µg Tot-P/l i vannet i tiden da sedimentet i bunnen av kjernen ble avsatt. En har ikke sikre data for når dette var, men basert på gjennomsnittlig sedimentasjonsrate for de dypeste daterte sedimentlagene (se figur 8) kan det anslås å ha vært så tidlig som på begynnelsen av 1600-tallet. Siden estimatet for overflatesedimentet gir rimelig samsvar med hva som er målt i vannet de siste årene, kan en anta at estimatet for bunnen av kjernen også er rimelig sikkert og at det er nær naturtilstanden i innsjøen.

Å kunne fastsette naturtilstand i en innsjø med rimelig sikkerhet er vesentlig i forhold til å kunne klassifisere dagens tilstand, og å bestemme eventuelle behov for tiltak. I Frøylandsvatnet antydte beregninger basert på kiselalger i sedimentet at fosforkonsentrasjonene var om lag 7 µg Tot-P/l rundt midten av 1800-tallet, som også antas å være nær naturtilstanden i denne innsjøen selv om det allerede da var noe påvirkning fra spredt jordbruksaktivitet (Molversmyr *et al.* 2006). For Vansjø var det stor usikkerhet i det paleoøkologiske grunnlaget for fastsettelse av naturtilstand, og rekonstruerte fosforverdier for de eldste sedimentlagene i kjernene indikerte høyere nivåer enn hva som synes rimelig. Her ble det, basert på empiriske data fra upåvirkede innsjøer (MEI-modellen), i stedet antydte at fosforinnholdet har ligget rundt 11 µg/l i Storefjorden og rundt 14 µg/l i Vanemfjorden før midten av 1800-tallet (Hobæk *et al.* 2009).

Bruk av paleoøkologiske metoder som de som er omtalt i denne rapporten kan som vist gi verdifull informasjon om opprinnelig tilstand og historisk utvikling i innsjøsystemer. Og ved å lete i historiske kilder vil en kunne få informasjon om hvilke endringer i nedbørfeltet som har medvirket til endringene en ser har skjedd i en innsjø, og dermed bedre kunne vurdere årsaker til, og kanskje potensielle løsninger på, problemer som har oppstått.



Figur 14. Kiselasgestratigrafi for sediment fra Seldalsvatnet. Kun arter med forekomst på mer enn 2 % av totalt antall i minst en prøve er vist.

Blå stolper representerer "næringsfattige" arter, mens grønne stolper representerer mer næringskrevende typer.

SCD (squared chord distance) er en indeks for ulikhet mellom prøven fra bunnen av kjernen og de andre prøvene.

DI-TP (diatom-inferred total phosphorus) er rekonstruert innhold av total fosfor i innsjøvannet basert på kiselasgedataene.

Kapittel 5**REFERANSER**

- Appleby, P.G., 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. *In: Last, W.M. & J.P. Smol (eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 1: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 171-203.
- Appleby, P.G. & F. Oldfield, 1978. The calculation of ^{210}Pb dates assuming a constant rate of supply of unsupported ^{210}Pb to the sediment. *Catena* 5: 1-8.
- Battarbee R.W., V.J. Jones, R.J. Flower, N.G. Cameron, H. Bennion, L. Carvalho & S.Juggins, 2001. Diatoms. *In: Smol J.P, H.J.B. Birks & W.M. Last (eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 155-202.
- Bennion, H., S. Juggins & N.J. Anderson, 1996. Predicting epilimnetic phosphorus concentrations using an improved diatom-based transfer function, and its application to lake eutrophication management. *Environ. Sci. Tech.* 30: 2004-2007.
- Bennion, H., J. Fluin & G.L. Simpson, 2004. Assessing eutrophication and reference conditions from Scottish freshwater lochs using subfossil diatoms. *J. Appl. Ecol.* 41: 124-138.
- Bennion, H., P. Johnes, R. Ferrier, G. Phillips & E. Haworth, 2005. A comparison of diatom phosphorus transfer functions and export coefficient models as tools for reconstructing lake nutrient histories. *Freshwater Biol.* 50: 1651-1670.
- Glew, J.R., J.P. Smol & W.M. Last, 2001. Sediment core collection and extrusion. *In: Last, W.M. & J.P. Smol (eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 1: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 107-135.
- Goodwin, T.W., 1980a. The Biochemistry of Carotenoids. Vol. 1. Plants. *Chapman and Hall, N.Y.*, 377 pp.
- Hobæk, A., K. Bjørndalen, M. Grung, S.W. Johansen, T. Rohrlack, A. Lyche-Solheim, H. Bennion, A. Burgess & H. Yang, 2009. Utredninger Vansjø 2006 - Undersøkelser av naturtilstanden og eutfieringsutviklingen i Vansjø. *NIVA, rapport 5460-2009.*
- Hodgson, D.A., S.W. Wright, P.A. Tyler & N. Davies, 1998. Analysis of fossil pigments from algae and bacteria in meromictic Lake Fidler, Tasmania, and its application to lake management. *J. Paleolimnol.* 19: 1-22.
- Jeffrey, S.W., R.F.C. Mantoura & S.W. Wright, 1997a. Phytoplankton pigments in oceanography: guidelines to modern methods. *UNESCO Publishing, Paris*, 661 pp.
- Leavitt, P.R., 1993. A review of factors that regulate carotenoid and chlorophyll deposition and fossil pigment abundance. *J. Paleolimnol.* 9: 109-127.
- Leavitt, P.R. & D. Hodgson, 2001. Sedimentary pigments. *In: Smol J.P, H.J.B. Birks & W.M. Last (eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 295-325.
- Leavitt, P.R. & D.L. Findley, 1994. Comparison of fossil pigments with 20 years of phytoplankton data from eutrophic Lake 227, Experimental Lake Area, Ontario. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 51:2286-2299.
- Leavitt, P.R., D.L. Findlay, R.I. Hall & J.P. Smol, 1999. Algal responses to dissolved organic carbon loss and pH decline during whole-lake acidification: Evidence from paleolimnology. *Limnol. Oceanogr.* 44: 757-773.
- Leroy, S.A.G & S.M. Colman, 2001. Coring and drilling equipment and procedures for recovery of long lacustrine sequences. *In: Last, W.M. & J.P. Smol (eds.), Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 1: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, pp. 73-105.

- Meyers, P.A. & R. Ichiwatari, 1993. Lacustrine organic geochemistry – an overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. *Org. Geochem.* 20: 867-900.
- Meyers, P.A. & E. Lallier-Verges, 1999. Lacustrine sedimentary organic matter records of Late Quaternary paleoclimates. *J. Paleolimnol.* 21: 345-372.
- Molversmyr, Å., L. Bunting, A. Burgess & H. Bennion, 2006. Frøylandsvatnet: innsjøhistoriske undersøkelser. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2006/018.*
- Molversmyr, Å., S. McGowan, G. Clarke, H. Bennion & H. Yang, 2010. Innsjøhistorisk undersøkelse i Seldalsvatnet. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2010/194.*
- Overpeck, J.T., T. Webb, & I.C. Prentice, 1985. Quantitative interpretation of fossil pollen spectra - dissimilarity coefficients and the method of modern analogs. *Quaternary Research* 23: 87-108.
- Schelske, C.L. & D.A. Hodell, 1995. Using carbon isotopes of bulk sedimentary organic matter to reconstruct the history of nutrient loading and eutrophication in Lake Erie. *Limnol. Oceanogr.* 40: 918-929.
- Smol J.P, H.J.B. Birks & W.M. Last (eds.), 2001a. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 3: Terrestrial, Algal, and Siliceous Indicators.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 371 pp.
- Smol J.P, H.J.B. Birks & W.M. Last (eds.), 2001b. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 4: Zoological Indicators.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 217 pp.
- ter Braak, C.J.F. & I.C. Prentice, 1988. A Theory of Gradient Analysis. *Advances in Ecological Research* 18: 271-317.
- Vennerød, K. (red.), 1984. Vassdragsundersøkelser. En metodebok i limnologi. *Norsk Limnologforening, Universitetsforlaget, 283s.*