

IPM-Rapport

Nr. 2, 2010

AKKUMULERING AV NÆRINGSSTOFFER OG SPORMETALLER I ÅRUNGENS SEDIMENTER - SEDIMENTENES BETYDNING SOM FOSFORKILDE

**Gunnhild Riise, Tore Krogstad, Inggard Blakar, Elin
Gjengedal, Ståle Haaland, Johnny Kristiansen, Kristine Naas,
Torgeir Åstveit Reierstad, Aleksandra T. Romarheim,
Johnson Rutsinda og Sara Brækhus Zambon**

**Institutt for plante- og miljøvitenskap,
Ås-UMB**

Institutt for plante-og miljøvitenskap

Universitetet for miljø- og biovitenskap (UMB)

Postboks 5003, 1432 Ås Telefon: 64 96 56 00 -. Ås

Telefax: 64 96 56 01

Rapportens tittel og forfattere:

AKKUMULERING AV NÆRINGSSTOFFER OG SPOR-METALLER I ÅRUNGENS SEDIMENTER - SEDIMENTENES BETYDNING SOM FOSFORKILDE

Gunnhild Riise, Tore Krogstad, Inggard Blakar, Elin Gjengedal, Ståle Haaland, Johnson Rutsinda, Johnny Kristiansen, Kristine Naas, Torgeir Åstveit Reierstad, Aleksandra T. Romarheim, Sara Brækhus Zambon

Rapport nr. : 2/2010

ISBN nr.:

Distribusjon: Åpen

Dato: 15. juli 2010

Faggruppe:

*Hydrologi og limnologi.

*Jord.

Geografisk område:

Norge

Antall sider (inkl. bilag):

Oppdragsgivers ref.:

Oppdragsgiver: PURA og Fylkesmannen i Oslo og Akershus

Sammendrag:

Sedimentundersøkelsen er basert på arbeidet til 4 mastergradsstudenter ved UMB i perioden 2009-2010. For å få en god horisontal prøvedekning, ble prøver tatt i et rutenett på 100 x 100 m (122 prøver i mars/april 2009). Prøvene ble delt i felt, i et øvre 0-2,5 cm og et nedre lag 2,5-5,0 cm. På grunnlag av analyser og sammenstilling av data, er det framkommet følgende konklusjoner:

Årungen ligger i et erosjonsutsatt område dominert av marin leire. Innsjøen fungerer som en stor fangdam og holder tilbake en stor andel av materialet som forlater jordene. Det er estimert at ca 2 mill. kg materiale transporteres ut i Årungen årlig, hvorav 1,5 mill. kg akkumuleres i innsjøen, med andre ord en retensjonsfaktor på 0,75.

Erosjonsmateriale inneholder fosfor, og for 2009 er det estimert at ca 5700 kg fosfor ble transport til Årungen. Årlig akkumulering av fosfor i sedimentene er bestemt til ca 3000 kg, noe som gir en retensjonsfaktor på ca 0,5.

Erosjonen er selektiv med hensyn på partikkelstørrelse, slik at finmaterialet har størst tendens til å følge vanntransporten ut i vassdraget. I selve innsjøen skjer det også en sorteringsprosess hvor finmateriale (leirfraksjonen) har en tendens til å akkumulere i dypere deler av innsjøbassenget, mens grovmateriale

avsettes i strandsonen.

Akkumulering av fosfor og mange av spormetallene viser i stor grad samme fordelingsmønster som leirfraksjonen, og viser følgelig en generell økning med dypet med noen unntak (bl.a kvikksølv og kadmium).

Med unntak av spormetallene Cr og Ni, kan miljøstatus for metallene generelt sies å være god og sedimentene er lite forurensset. På grunn av stor materialtransport fra nedbørsfeltet, vil sammensetningen i sedimentene i stor grad gjenspeile sammensetningen i jorda rundt innsjøen, og mineralmateriale vil kunne "fortynne" eventuelle forurensinger.

Sammenlignet med tidligere sedimentundersøkelser, har det vært en markert bedring i miljøstatus siden 1970-tallet. Bedringen gjelder spesielt for svovel, kvikksølv, bly og kadmium, men også fosfor, nitrogen og organisk materiale har vist en markert nedgang.

På grunn av en stor anrikning av finfraksjonen i innsjøsedimentene, inneholder sedimentene generelt mer fosfor enn jordene rundt Årungen. Innholdet av plantetilgjengelig fosfor (P-AL) er imidlertid på samme nivå for innsjøsedimentene og dyrka jord i nedbørsfeltet.

Betydningen av sedimentene som en intern fosforkilde i innsjøen viser store årlige variasjoner som er relatert til klima. Vekstperioder med stabil temperatursikting og lite nedbør fremmer anoksiske forhold mot bunnen av dypbassenget, og frigivelse av fosfor. For vekstperioder med mye nedbør og rask vannutskifting, er oksygenforholdene generelt bedre, og lekkasjene fra sedimentene i dypbassenget er vesentlig mindre.

Tilførsel av erosjonsmateriale anriket på fosfor under nedbørsrike episoder i vekstperioden utgjør en potensiell fosforkilde. Høye pH-verdier, drevet av stor fotosyntetisk aktivitet, kan bidra til høyere løselighet av fosfor for vekstperioden sammenlignet med resten av året. Littoralsonen utgjør også en potensiell fosforkilde.

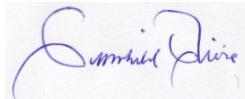
På grunn av stor materialtransport fra nedbørsfeltet, har dette stor innvirkning på Årungens miljøstatus. Tiltak for å bedre næringsstatus bør derfor i stor grad rette seg mot tiltak som reduserer tilførslene av næringsstoffer fra nedbørfeltet. For å kontrollere effekter av tiltak er det viktig å følge opp med innsjøundersøkelser.

Emneord, norske

1. Sedimenter
2. Eutrofiering
3. Spormetaller
4. Akkumulering av fosfor

Emneord, engelske

1. Sediments
2. Eutrophication
3. Trace metals
4. Accumulation of phosphorous



Gunnhild Riise

Professor



Tore Krogstad

Professor

Akkumulering av næringsstoffer og spormetaller i Årungens sedimenter – sedimentenes betydning som fosforskilde

Forord:

Rapporten er basert på et arbeid som er gjennomført av 4 masterstudenter i perioden mars 2009-juni 2010. I veiledningen av studentene har følgende personer bidratt: Gunnhild Riise, Tore Krogstad, Inggard Blakar, Elin Gjengedal, Ståle Haaland, Johnny Kristiansen og Aleksandra T. Romarheim.

Arbeidet har vært støttet av PURA for å gjennomføre prosjektene: "Sedimentenes betydning som P-kilde i Årungen" og "Akkumulering av miljøgifter i innsjøsedimenter – betydning av arealbruk og sedimenttegenskaper for miljøstatus"

For en mer detaljert beskrivelse av sedimentundersøkelsen henvises til følgende masteroppgaver:

1. Rutsinda Johnson: "Grain size distribution and clay mineralogy in eutrophic lake-sediments, case study Årungen"
2. Kristine Naas: "Horizontal distribution of organic mater, nitrogen and sulfur in the sediments of an eutrophic lake; Årungen"
3. Torgeir Åstveit Reierstad: "Phosphorus in eutrophic lake sediments – A case study in Lake Årungen"
4. Sara Brækhus Zambon: "Metals in the sediments of the eutrophic lake Årungen, Norway – Horizontal distribution and association with clay"

Innledning:

I områder med landbruksaktivitet er en stor andel av vann og vassdrag svært næringsrike med dårlig vannkvalitet p.g.a store tilførsler av næringsstoffer fra nedbørssfeltet. Gjødslingsnivået i mange landbruksområder overstiger ofte behovet for god planteproduksjon, og resultatet er stor avrenning av næringsstoffer, hvor spesielt fosfor er et problem. Fosfor viser stor grad av binding til partikler, noe som medfører stor transport av fosfor i perioder med høy vannføring og stor erosjon. Den største andelen av fosfor som kommer inn i Årungen kommer fra landbruksområdene i nedbørssfeltet. Hele 93 % av jordbruksarealene er oppdyrket med korn hvor mye jord eroderer, mens grasområdene i sørrenden av vannet har noen av de høyeste fosfornivåene i jorda i Follo.

En innsjø fungerer som en stor fangdam, hvor en stor del av det transporterte materialet fanges opp i innsjøsedimentene. Prosesser som styrer utvekslingen mellom sediment og overliggende vannmasser, er bestemmende for andelen av akkumulerte stoffer som bringes opp i vannmassene igjen. Hvorvidt innsjøen fungerer som en intern kilde for f.eks fosfor eller et mer eller mindre "permanent lager" avhenger av en rekke forhold, slik som innsjøens algeproduksjon, sirkulasjonsmønster, oksygenfordeling, sedimentenes evne til å binde fosfor med mer. Til tross for reduserte tilførsler av fosfor i de senere tiår, er det enkelte år i nyere

tid registrert oksygenfrie forhold og frigivelse av fosfor fra sedimentene i Årungen. Massebalansestudier over næringstilførsel støtter opp om dette (Gunnarson, 2006). Høye pH-verdier i perioder med stor algeproduksjon vil også bidra til økt løselighet av fosfor og økt tilgjengelighet for biologisk opptak. I produktive systemer vil det videre skje en kontinuerlig omsetning av fosfor, f.eks i organisk materiale akkumulert på sedimentoverflata. Løst fosfor vil raskt bli brukt til nydannelse av alger såframt fosforet når fram til produktive sjikt i innsjøen.

På grunnlag av sedimentundersøkelser er det mulig å bestemme mengden fosfor som er akkumulert i innsjøen og den potensielle tilgjengeligheten av det akkumulerte fosforet. I tillegg til næringssstoffer, skjer det en akkumulering av ulike miljøgifter i sedimentene. Her har vi valgt å analysere for en rekke spormetaller, inklusiv kvikksølv for å undersøke spormetallnivåer i en landbrukspråvirket innsjø under marin grense.

Erosjonsmateriale som stammer fra nedbørsfeltet gjennomgår en sorteringsprosess før det avsettes som sedimenter. Først avsettes grove fraksjoner, før suksessivt finere og finere fraksjoner sedimenterer. Avhengig av strømning og dybdeforhold i innsjøen, kan sedimentene inndeles i følgende soner (Håkanson og Jansson, 1983); en strandnær *erosjonssone* uten sedimentering av finmateriale, en *transportsone* med periodevis sedimentering av finmaterialet, og en *akkumulasjonssone* i de dypere deler av bassenget. For å undersøke den romlige variasjonen og å kvantifisere mengden materiale som er akkumulert i hele innsjøbassenget, er det i denne undersøkelsen lagt vekt på å dekke hele innsjøbassenget med prøvepunkter i et rutenett på 100 x 100 m.

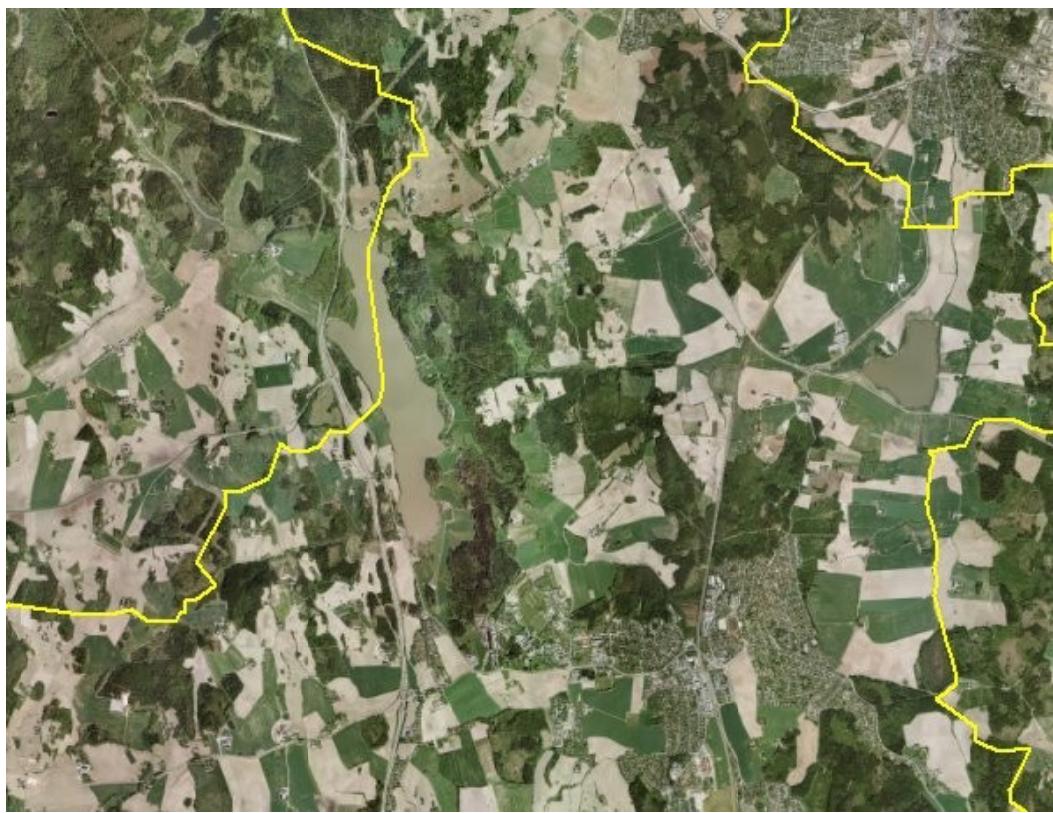
Viktige problemstillinger har vært å:

1. Karakterisere egenskapene til sedimentene i hele innsjøbassenget
2. Vurdere sammensetningen av jord (løsmasser) i nedbørsfeltet opp imot innsjøsedimentenes sammensetning
3. Undersøke hvordan sedimentegenskapene påvirker fordelingen av næringssstoffer og spormetaller i ulike soner av innsjøen
4. Kvantifisere mengden av fosfor som akkumuleres per år i innsjøsedimentene
5. Vurdere mengden av fosfor som potensielt er tilgjengelig for frigivelse til vannmassene

Materiale og metoder:

Lokalitetsbeskrivelse Årungen:

Innsjøen Årungen (Figur 1 og 2) er lokalisert i Ås og Frogn kommune i Akershus fylke. I tillegg til Ås og Frogn utgjør også Ski kommune en del av nedbørsfeltet til Årungen. Nedbørsfeltet strekker seg fra en høyde på 33 moh (vannoverflata på Årungen) til 166 moh, og ligger derfor i sin helhet under marin grense. Løsmassene består hovedsakelig av marin leire og morene, og dominerende bergrunn er gneis og granitt. Innsjøoverflata er 1,2 km² og utgjør ca 2,3 % av det 52 km² store nedbørsfeltet. Nedbørsfeltet er dominert av landbruk som dekker 53 %, mens skog og utmark utgjør 34 %, og tett bebygde områder og innsjøoverflater utgjør 10 og ca 3 %.



Figur 1: Årungen ligger i et landbruksdominert område innenfor kommunene Ås, Frogn og Ski. (<http://www.norgebilder.no/>)



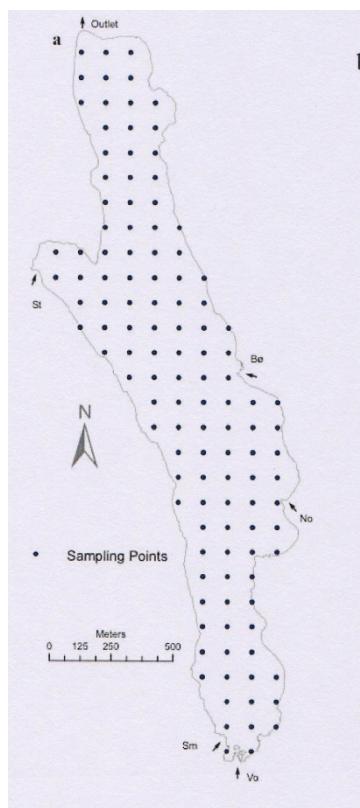
Figur 2: Oversiktskart over nedbørfeltet til Årungen med inndeling i delnedbørsfelt (Borch m. fl. 2007)

Flere bekker drenerer til Årungen, hvor Bølstadbekken står for ca halvparten av vanntransporten inn i Årungen (Tabell 1). Utløpet er lokalisert i nord (Figur 5), hvor Årungenelva drenerer videre ut i Bunnefjorden, en arm av Oslofjorden.

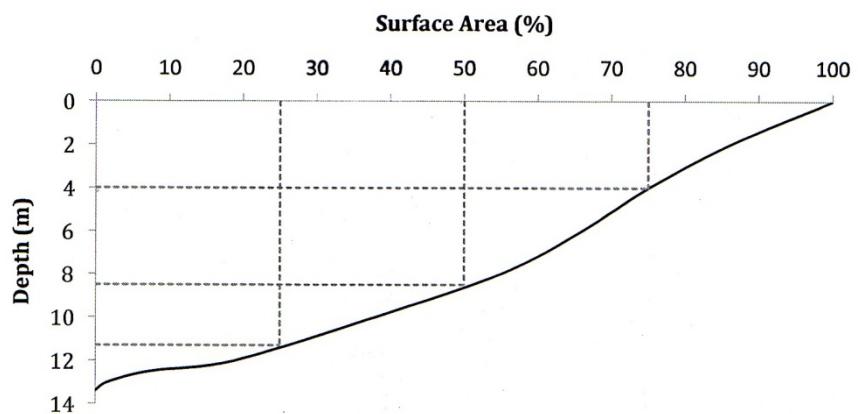
Tabell 1: Størrelse (km^2) og vanntransport (%) fra 6 hovedbekker som drenerer til Årungen, samt restarealer uten definert bek. Etter Gunnarsson (2007)

Bekk	Nedbørsfeltareal (km^2)	Avrenning (%)
Bølstadbekken	25,2	50
Storgrava	8,3	17
Smedbølbekken	7,2	15
Norderåsbekken	2,7	6
Vollebekken	2	4
Brønnerudbekken	0,8	2
Restarealer	4,3	6

Feltmetodikk:

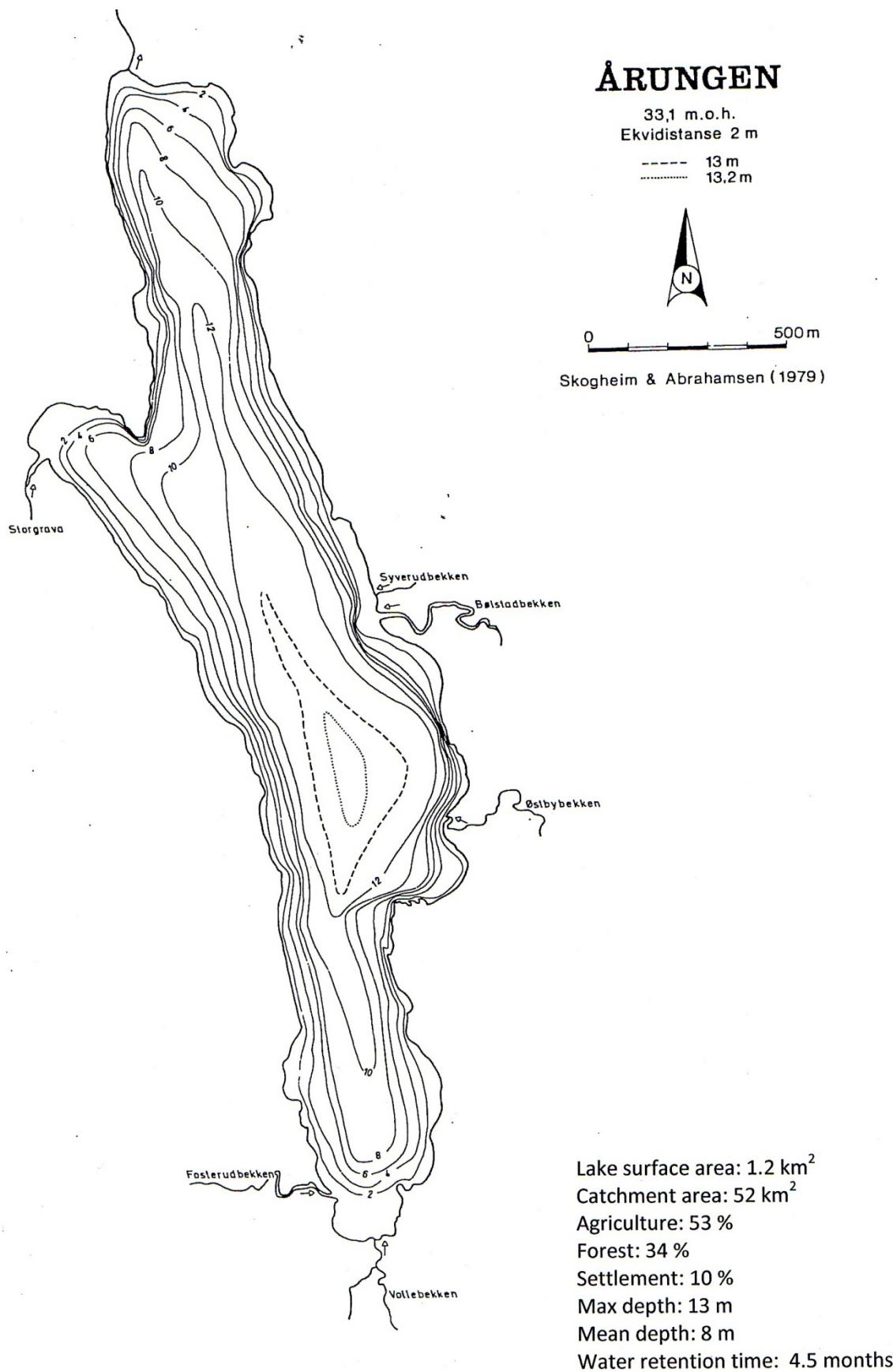


1 Felt: Sedimentprøver ble innsamlet med en Uwitec sediment samler i mars/april 2009 i et rutenett (100 m x 100 m), totalt 122 prøver (Figur 3). Sedimentprøvene ble splittet i to lag, et øvre (0-2,5 cm) og nedre lag (2,5-5,0 cm), og overført til plastbegre med skrulokk. Prøvene ble lagret mørkt og kjølig inntil analyse.



Figur 4: Dybde-areal kurve for Årungen. Modifisert etter Hexum (1963). (Zambon 2010)

Figur 3: Fordeling av prøvpunkter, i et rutenett på 100 x 100 m (Zambon, 2010)



Figur 5: Dybdekart over Årungen (Skogheim og Abrahamsen, 1979)

Analyser:

Sedimentprøvene ble analysert for kornfordeling etter "pipettemetoden" (Krogstad m. flere, 1991), hvor et utvalg av prøvene ble analysert for leirmineraler med et røntgendiffraktometer (Philips PW 1730/10). Organisk materiale ble bestemt ved glødetap og total karbon. Total karbon og nitrogen ble bestemt ved et LECO CHN 1000 instrument. Prøver for elementanalyse ble oppsluttet med en Milstone UlttraClave3 før videre analyse. Aluminium (Al), barium (Ba), kalsium (Ca), krom (Cr), jern (Fe), kalium (K), magnesium (Mg), mangan (Mn), natrium (Na), nikkel (Ni), strontium (Sr) og vanadium (V) ble bestemt med ICP-OES, mens arsen (As), kadmium (Cd), kobolt (Co), cesium (Cs), bly (Pb), og sink (Zn) ble bestemt med ICP-MS. Kvikkolv (Hg) ble bestemt med en kalddamp atomabsorpsjonsteknikk (CV-AAS, Perkin Elmer FIMS400) samme dag som prøvene ble oppsluttet. Sertifisert referanse materiale (CRM) ble anvendt for å bestemme nøyaktigheten til analysemetoden.

Total fosfor ble bestemt med ICP-OES etter oppslutning med UltraClave 3. Bestemmelse av uorganisk fosfor ble bestemt etter ekstraksjon med svovelsyre og analyse av fosfat ($\text{PO}_4\text{-P}$) etter molybdenblåttmetoden. Organisk fosfor ble bestemt som differensen mellom total fosfor og uorganisk fosfor. Andelen oksalatløselig fosfor (P-ox) samt armoft og lett krystallinsk Fe og Al hydroksider, ble bestemt etter van Reeuwijk, (1995). Fosformetningsgraden (PSD) ble beregnet som andelen bundet fosfor målt som P-ox i forhold til jordas maksimale evne til å binde fosfor (Breeuwsma og Silva, 1992). Plantetilgjengelig fosfor (P-Al) ble bestemt etter Krogstad (2004).

Den horisontale fordelingen av de ulike variablene ble framstilt ved interpolering ved bruk av et GIS verktøy (ESRI © ArcVIEWtm 9,3). Bearbeiding av data er gjort med bl.a. scatterplots, regresjonsanalyser og t-test analyser.

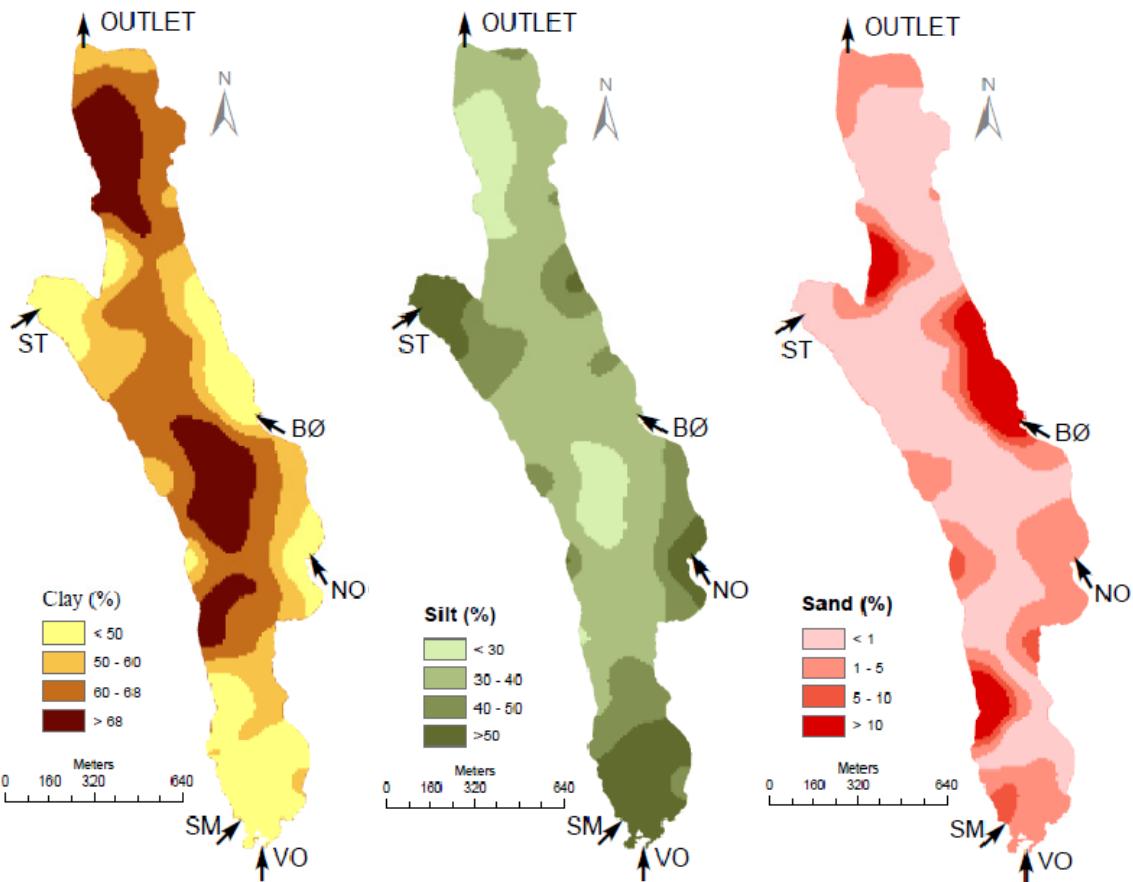
Ved behandling av data, ble innsjøen inndelt i 4 ulike soner, hvor hver sone utgjorde 25 % av innsjøens overflateareal. Sonene ble inndelt etter følgende dyp, Sone 1: < 4 m, Sone 2: 4 - 8,5 m, Sone 3: 8,5-11,3 m og Sone 4: 11,3-13,4 m (Figur 4).

For nærmere beskrivelse av metodene henvises til masteroppgavene.

Resultater og diskusjon:

Egenskaper til sedimentene i Årungenbassenget

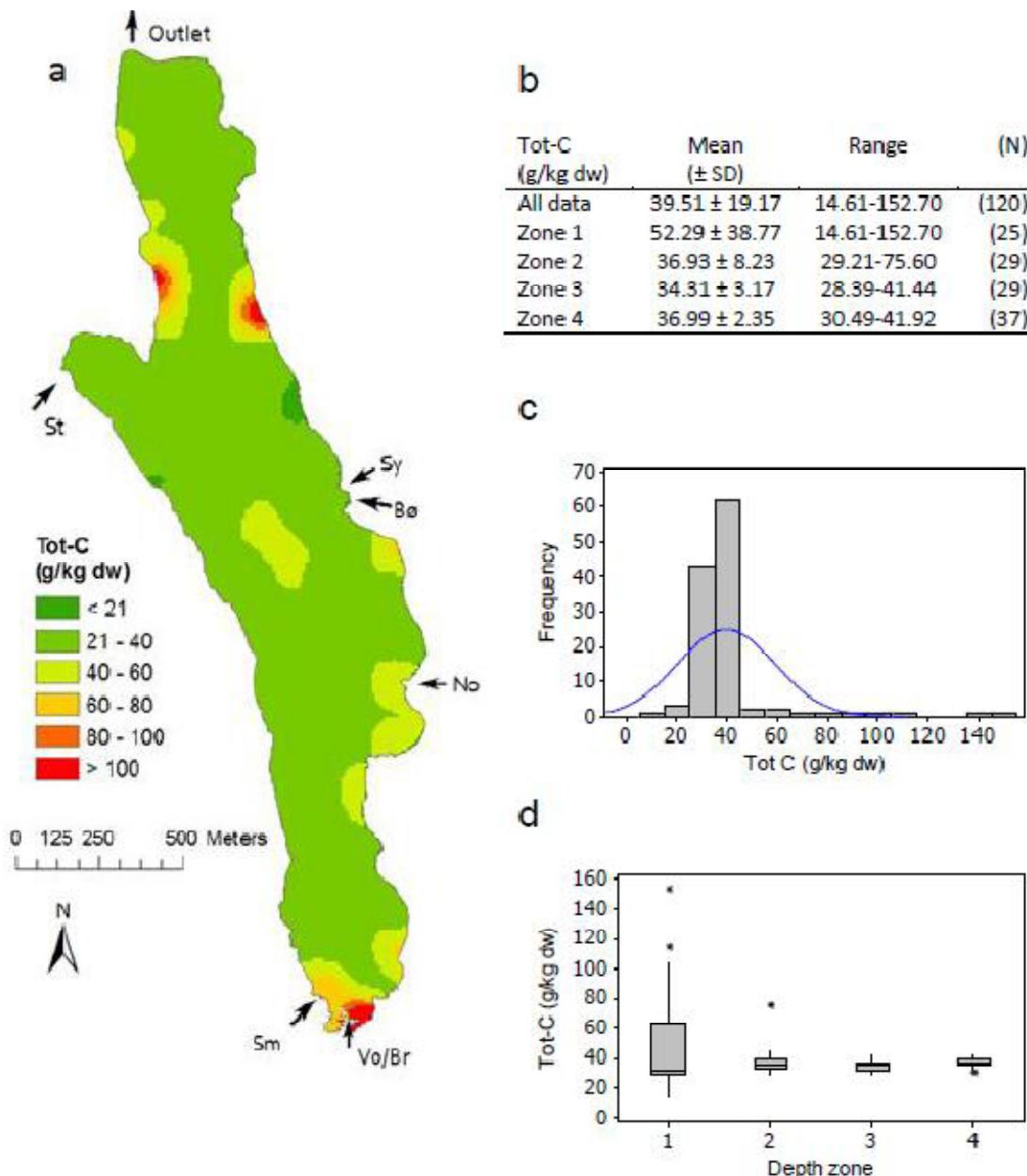
Finfraksjonen, gitt ved leirfraksjonen (< 0,002 mm), er den klart dominerende kornstørrelsen i sedimentene og utgjør gjennomsnittlig 58 % for alle prøvene. Siltfraksjonen (0,002-0,060 mm) og sandfraksjonen (0,060- 2 mm) utgjør henholdsvis 38 % og 4 %. Analysene er basert på et utvalg av 60 prøver i nedre sjikt 2 (2,5 - 5,0 cm). Anrikningen av leirfraksjonen er høyest i de dypere deler av innsjøen samt i nordlige deler av Årungen, hvor leirfraksjonen utgjør mer enn 68 %. Siltfraksjonen er anriket (> 50 %) i sydlige deler av Årungen samt ved innløpsbekkene Norderåsbekken og Storgrava. De høyeste verdiene for sandfraksjonen er knyttet til deler av littoralsonen, hvor tilførsler fra land og strømningsforhold fører til en sedimentering av de grovere fraksjonene - erosjonssonen (Figur 6). Grensen for akkumulering av finmateriale (Deposition boundary depth – DBD) er beregnet til ca 3 m for Årungen (Rutsinda 2010).



Figur 6: Fordeling (%) av ulike kornstørrelser i Årungens sedimenter, a) leirfraksjonen, b) siltfraksjonen og c) sandfraksjonen (Rutsinda, 2010).

Røntgendiffraktogrammene, for bestemmelse av leirmineraler og tektosilikater, viste små variasjoner både mellom jord fra dyrka mark og sedimentprøver som gruppe og innen disse gruppene. Sammensetning av leirmineraler synes derfor relativt lik både i ulike soner i innsjøen og i jord sammenlignet med innsjøsedimentet. Det skjer følgelig ingen separasjon eller endring i leirmineralsammensetning innen nedbørssfeltet. Sammenligningen gjelder kun jord (0-30 cm) og øvre deler av sedimentet. Eventuelle endringer med tid for dypere sjikt av sedimentet er ikke undersøkt. I den enkelte prøve var illitt det dominerende leirmineralet med vermiculitt og kloritt på de neste plassene. Av ikke-leirmineraler (tektosilikatene), var feltspat dominerende både for jord og sedimentprøver, men med noe kvarts også i leirfraksjonen.

Sedimentene inneholdt gjennomsnittlig 4 % karbon, 0,5 % nitrogen og 0,1-0,2 % svovel. Total karbon utgjorde 50-60 % av glødetapet, noe som tilsier at analyser av total karbon i hovedsak er et uttrykk for organisk karbon. Littoralsonen viste store variasjoner, slik at både de høyeste og laveste konsentrasjonen av karbon, nitrogen og svovel ble funnet i littoralsonen. De høyeste konsentrasjonene av organisk materiale er lokalisert til våtmarksområdene i sør, Vollebekken/Brønnerudbekken og til littoralsonen i nordlige deler av bassenget, med verdier på mer enn 10 % organisk karbon (Figur 7). Den høyeste anrikningen av nitrogen og svovel var knyttet til tilsvarende lokaliteter. Generelt viste sydlige deler av bassenget noe lavere verdier enn det nordlige med hensyn på karbon og nitrogen. Svovel viste en større tendens til å akkumulere i dypområdene (profundalen) sammenlignet med karbon og nitrogen.



Figur 7: Graphical summary of the distributional patterns of the tot-C in Lake Årungen. a) Visual presentation of the horizontal distribution. b) Descriptive statistics. c) Frequency distribution. d) Boxplot with the ratios grouped according to depth zones. The box represents the middle 50 % of the data (interquartile range box). Horizontal lines represent first quartile (bottom line of box) median (midline) and third quartile (top line). Vertical lines (whiskers) represent minimum and maximum data points within 1.5 box heights from the bottom of the box. The outliers are represented by dots and are datapoints that fall beyond the upper or lower whisker (Minitab inc. 2007) (Naas, 2010)

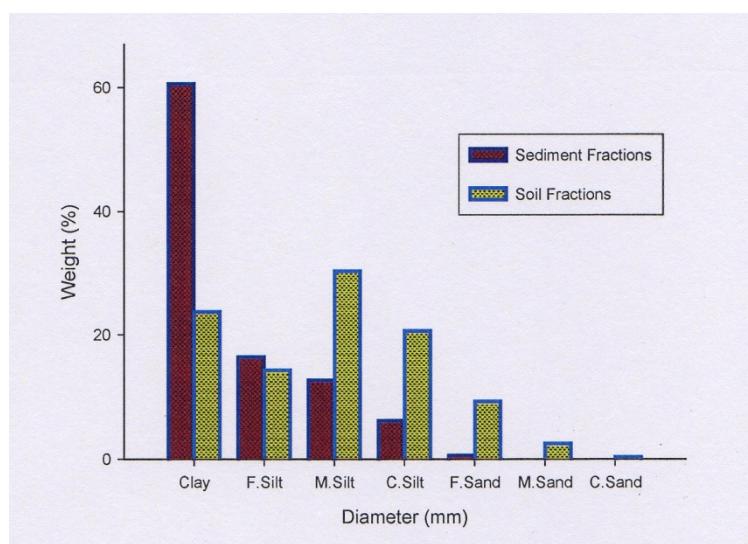
Generelt er C/N forholdet mindre enn 10, med en medianverdi på 8,7, noe som tilsier at innsjøens egenproduksjon av organisk materiale dominerer over eksterne tilførsler. I områder av littoralsonen hvor C/N forhold er høyere enn 18 er trolig det terrestriske bidraget av organisk materiale noe større (bl.a i våtmarksområdet i syd). Utelates prøvepunktene i littoralsonen i beregningen, avtar generelt C/S forholdet med dypt. Dette

indikerer at akkumuleringen av svovel har sammenheng med redoksforholdene og skjer i perioder med reduserende forhold. Nitrogen viser stor grad av sammenheng med organisk materiale, noe som indikerer at en stor andel av nitrogen er organisk bundet. Tilsvarende sammenhenger er ikke funnet for svovel.

Sammenlignet med tidligere undersøkelser er mengden av organisk materiale i sedimentene redusert de siste 30 år (Skogheim og Erlandsen, 1984). Redusert algeproduksjon, samt økt mineralisering av organiske materiale kan bidra til redusert akkumulering av organisk materiale. Under reduserende forhold vil nedbrytningen av organisk materiale være ufullstendig, noe som bidrar til økt akkumulering. Også nitrogen viser lavere verdier sammenlignet med tidligere undersøkelser. Lavere nitrogenverdier tilsier reduserte tilførsler av nitrogen, eller økt omsetning av organisk bundet N. Svovel har vist betydelige endringer med tiden, fra en svovelkonsentrasjon på ca 11 g/kg (Skogheim og Erlandsen, 1984) til 1,9 g/kg i de øverste 3 cm av sedimentet (Naas 2010). Redusert atmosfærisk bidrag fra langtransporterte forurensinger samt redusert antall episoder med anokside betingelser, er trolig årsaken til reduksjonen i svovel.

Selektiv erosjon av finmateriale – sammenligning av jord og innsjøsediment:

Sammenlignet med analyser av jord i nedbørsfeltet er andelen av finmateriale vesentlig høyere i innsjøsedimentene. Gjennomsnittlig utgjør leirfraksjonen i jordprøvene 23 % mot 58 % i sedimentene. Når jord løsner fra overflata på grunn av erosjonskrefter, skjer en såkalt selektiv erosjon av finmateriale. Videre har finmateriale en større evne til å holde seg suspendert i vannfasen i forhold til grovt materiale. Dette bidrar til at finmateriale kan transporteres over lange strekninger, og bruker lang tid på å sedimentere. Andelen av finmateriale i innsjøsedimentene påvirker konsentrasjonen av en rekke andre elementer, både på grunn av sammensetningen av selve leirmineralene i leirfraksjonen og på grunn av stor spesifikk overflate som bidrar til et stort antall bindingsplasser for ulike mikroforurensinger. Fosfor og ulike fosforfraksjoner viser også markante forskjeller mellom jord og innsjøsedimenter. Dette er nærmere omtalt under kapitlet om fosfor.



Figur 8: Sammenligning av innsjøsedimentene og jordas kornfordeling (Rutsinda 2010).

Elementsammensetning:

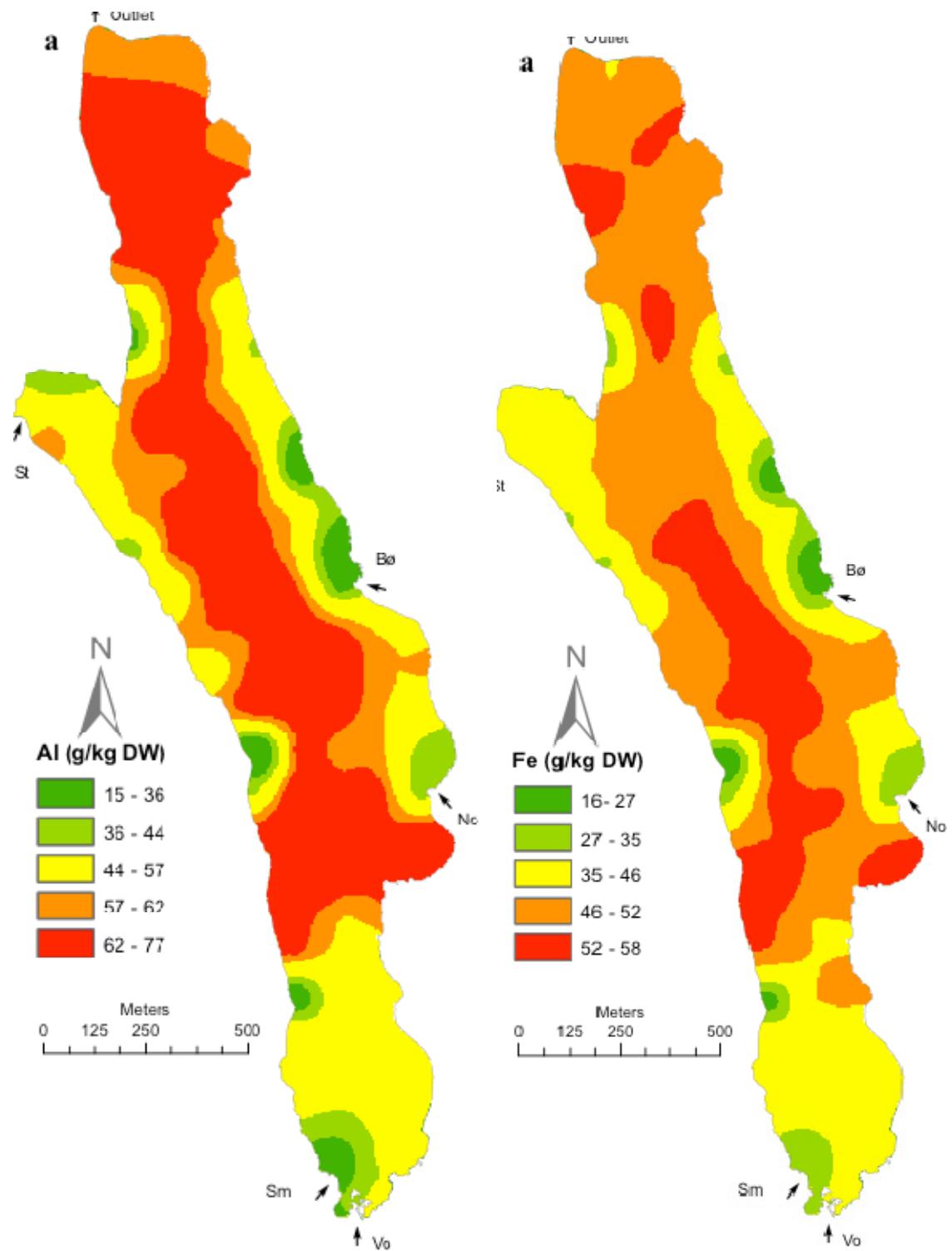
Hovedelementer: I områder med stor erosjon vil ofte elementer som utgjør en viktig del av jorda, finnes igjen i sedimentene i relativ høye konsentrasjoner. Elementsammensetningen til finmateriale i nedbørfeltet vil derfor ha en stor innvirkning på elementsammensetningen i innsjøsedimentene. For hovedelementene ble følgende rekkefølge funnet basert på avtagende konsentrasjoner: Al>Fe>K>Mg>Ca>Mn>Na (Tabell 2).

Tabell 2. Elementsammensetning i Årungens sedimenter (Zambon 2010)

Table 8. Principal values of the studied trace elements. N= total number of samples, Min: minimum value, Max= maximum value, St. Dev= Standard deviation.

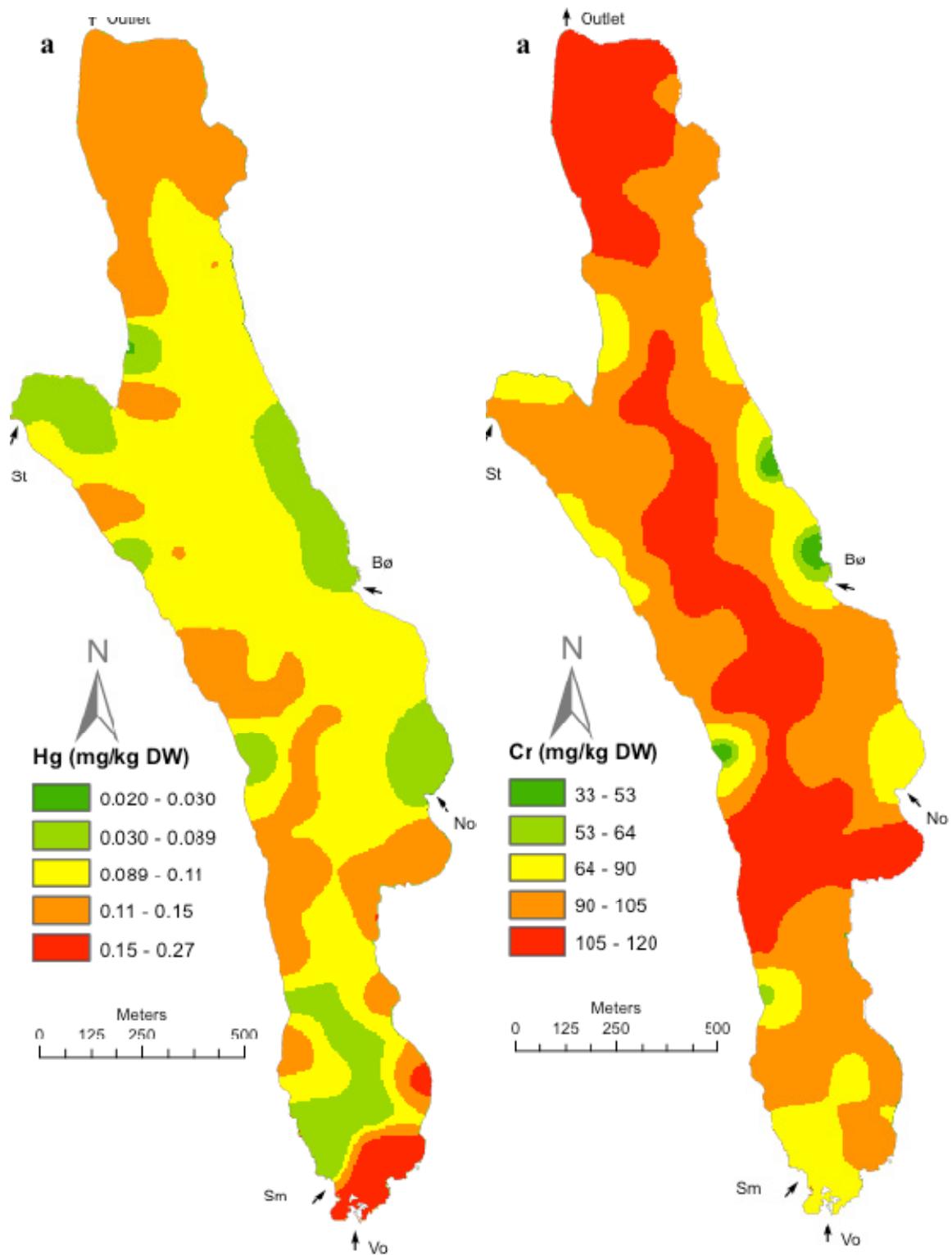
Element	N	Min	Average	Median	Max	St. Dev
Al (g/kg)	120	15	60	60.0	77	12
Fe (g/kg)	120	16	45	48	58	8.8
K (g/kg)	120	4.4	17	18	23	3.7
Mg (g/kg)	120	3.5	12	13	16	2.2
Ca (g/kg)	120	4.8	7.0	6.7	16	1.4
Mn (g/kg)	120	0.30	0.91	0.87	1.9	0.26
Na (g/kg)	120	0.33	0.73	0.75	1.2	0.11
Ba (mg/kg)	120	100	460	500	630	110
Zn (mg/kg)	120	46	200	210	260	40
V (mg/kg)	120	40	130	130	170	26
Cr (mg/kg)	120	33	96	100	120	15
Sr (mg/kg)	120	29	59	60	75	5.4
Ni (mg/Kg)	120	18	54	57	72	10
Cu (mg/kg)	120	9.1	31	33	63	7.6
Pb (mg/kg)	120	11	27	28	36	4.7
Co (mg/kg)	120	6.9	16	17	21	2.5
As (mg/kg)	119	1.9	6.4	6.4	11	1.6
Cs (mg/kg)	119	1.1	5.8	6.2	8.3	1.4
Cd (mg/kg)	119	0.15	0.56	0.5	1.5	0.17
Hg (mg/kg)	120	0.020	0.10	0.10	0.27	0.028

Hovedelementene Al, Fe, K og Mg viser økende konsentrasjoner med økende leirinnhold og dyp. For elementene Mn og Na var trenden noe mindre utpreget. Ca viste en motsatt trend med de høyeste verdiene i littoralsonen og avtak med dypet. Anrikning av Ca i de grunnere partiene kan indikere at det har skjedd biogen felling av CaCO_3 pga høy fotosyntese sommerstid.



Figur 9: Horisontal fordeling av hovedelementet aluminium og jern i Årungens sedimenter (Zambon 2010)

Sporelementer: For sporelementene avtok konsentrasjonen etter følgende rekkefølge: Ba>Zn>V>Cr>Sr>Ni>Cu>Pb>Co>As>Cs>Cd>Hg. Konsentrasjonen av de ulike elementene er gitt i tabell 2.



Figur 10: Horisontal fordeling av Hg og Cr i Årungens sedimenter (Zambon 2010)

På lignende måte som for hovedelementene, var leirinnholdet klart styrende for innholdet av de fleste sporelementene. Ba, Zn, V, Cr, Ni, Cu, Pb, Co, As og Cs viste stor grad av sammenheng med leirinnholdet i sedimentene, og de høyeste verdiene ble generelt funnet i de dypere deler av innsjøen. Dybdeforholdene i innsjøen er følgelig viktig for sedimenteringsforløpet og anrikningen av de fleste spormetallene.

Cd og Hg viste imidlertid en annen trend, med de høyeste verdiene i flekkvise deler av littoralsonen. De høyeste verdiene for Hg ble funnet i utløpet av Vollebekken, med konsentrasjoner opp imot 0,27 mg/kg (Figur 10), og kan ha sammenheng med høye verdier for organisk materiale i våtmarksområdet ved Vollebekken eller en lokal kilde i nedbørssfeltet. Verdiene for Hg er imidlertid lave sammenlignet med maksimalnivåer som er registrert i sedimentene på 1970-tallet (Skogheim, 1984). Cd viste forhøyede verdier i nærheten av Bølstadbekken, noe som kan ha stamme fra en søppelfylling i nedbørssfeltet til Bølstadbekken. Sammenlignet med geokjemisk atlas for elvesedimenter i Norge (Ottesen m.fl. 2000) viste Zn, V, Cr, Ni, Cu og As forhøyede verdier (basert på gjennomsnittlige verdier). Dette kan ha sammenheng med lokale geologiske forskjeller, ulike typer forurensinger eller metodiske forskjeller i bestemmelse av elementene. Sammenlignet med nasjonale undersøkelser (Rognersrud m. fl. 2008) har Årungen relativt lave verdier for As, Hg, Mn og Pb, mens Ni og Cr skiller seg ut med å vise høyere verdier. Denne trenden samsvarer med SFTs klassifiseringssystem (Bakke m. fl. 2007), som tilsier at metallforurensingen av sedimentene i Årungen, generelt, er lave med unntak av Cr og Ni som viser forhøyede verdier. Klassifiseringssystemet er imidlertid ikke utviklet for ulike innsjøtyper. Akkumulering av forurensninger er i stor grad avhengig av sedimenteringsforløpet. I et leirdominert område, som for Årungen, med stor erosjon, vil mineralmateriale fra nedbørssfeltet i stor grad kunne "fortynne" metallforurensingene. Dette medfører at metallkonsentrasjonen kan være langt høyere i et skogstjern med liten direkte antropogen påvirkning.

Sammenlignet med tidligere sedimentundersøkelser (Skogheim, 1984) har det vært en økning i Cr, fra 50 mg/kg (1970-tallet) til 100 mg/kg. En tidligere viktig kilde for Cr var trykkimpregnert trevirke, hvor det nå er innført forbud mot bruk. Det kan allikevel være rester av trevirke som har en viss innvirkning. Videre er det i veggjære innsjøer vist forhøyede konsentrasjoner av Cr i innsjøsedimenter (Bækken og Haugen 2006). Motorveien langs E6, på vestsiden av Årungen, kan følgelig også være en potensiell kilde. Ni viste også forhøyede verdier, spesielt i de dypeste delene av bassenget og i den nordlige delen av innsjøen.

Avtaket i konsentrasjon siden 1970-tallet har vært spesielt markert for Hg, Pb og Cd. Mediankonsentrasjonen av Hg var på 0,10 mg/kg (Zambon, 2010), mens i Skogheim (1984) varierte konsentrasjonen av Hg fra 0,09 mg/kg i de dypere deler av sedimentsøylen til 22 mg/kg ved ca 9 cm dyp i søylen. Dette indikerer en sterk nedgang i Hg nivåene, og at Årungen er tilnærmet tilbake til referansennivåene for Hg, med unntak av partier i sydlige deler av Årungen. Medianverdien for Pb var 28 mg/kg (Zambon 2010), og ligger i nærheten av tidligere målte referanseverdier på 25 mg/kg. Maksimumsverdier for Pb i sedimentet fra 1970-tallet var på 55 mg/kg. Reduserte blynivåer i bensin har bidratt til denne nedgangen. For Cd var konsentrasjonen spesielt lav med en Cd konsentrasjon på 0,49 mg/kg (Zambon 2010) mot 0,8 mg/kg som er registrert som referanseverdi tidligere. Høye referanseverdier for Cd kan ha sammenheng med metodiske årsaker, enten at tidligere analyser viser for høye

verdier, eller ulike metoder til bestemmelse av Cd. Maksimumsverdier for Cd i sedimentene på 1970-tallet var 5,3 g/kg.

Fordeling av fosfor i innsjøsedimentene

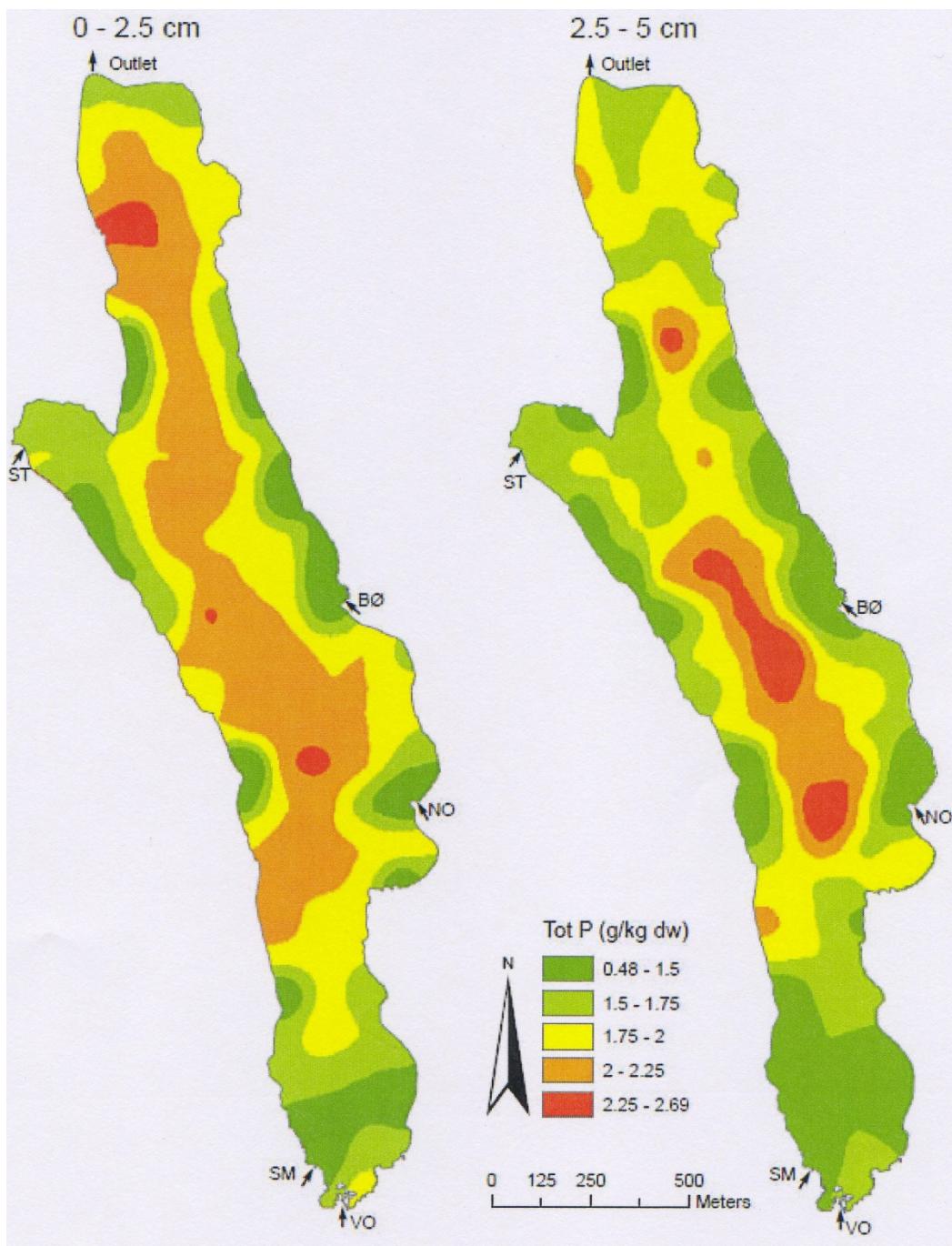
Total fosfor (Figur 11) og fosforfraksjonene viste stort sett samme fordelingsmønster, med akkumulering i de dypeste områdene og avtak mot grunnere partier i innsjøen. Denne fordelingen samsvarer med mønsteret for leirfraksjonen (Figur 6), Al og Fe (Figur 9). Fordelingen samsvarer også med vannkjemien i innløpsbekkene, med lave nivåer ved innløpet fra Norderåsbekken, Bølstadbekken og Smebølbekken og noe høyere ved Storgrava og Vollebekken.

Det var noen ulikheter i total fosfor mellom øvre (0-2,5 cm) og nedre lag 2 (2,5 -5,0 cm), spesielt i den nordlige delen av bassenget, hvor det øverste sjiktet hadde noe høyere verdier for fosfor sammenlignet med laget under (Figur 11). For øvre og nedre lag var den gjennomsnittlige verdien for total fosfor 1,8 mg/kg og 1,7 mg/kg. Nivåene av total fosfor er klart lavere enn på 1970-tallet, da nivåene av total fosfor var høyere enn 3,5 g/kg i store deler av innsjøsedimentene (Skogheim 1978). Konsentrasjonen av total fosfor i de øvre sedimentlagene er 25-50 % lavere enn fra denne perioden (Reierstad, 2010), og har sammenheng med tiltak som er gjennomført for å redusere tilførslene av fosfor til innsjøen.

Uorganisk fosfor utgjorde 70-75 % av total fosfor, og dominerte klart over organisk bundet fosfor. Organisk bundet fosfor viste generelt samme fordelingen som uorganisk fosfor, og både uorganisk og organisk fosfor viste generelt en økning med dypet. Organisk bundet fosfor viste liten sammenheng med fordelingen av organisk materiale. Generelt er nivåene av organisk materiale lave. Videre kan store tilførsler av erodert mineralmateriale som inneholder fosfor, bidra til at den uorganiske fraksjonen blir styrende for fosfornivåene slik at organisk materiale har liten innvirkning på fosforfordelingen.

PSD lå mellom 20 og 30 %, og viste ikke et klart fordelingsmønster i sedimentene. PSD var generelt høyere i det dypeste sammenlignet med det øvre laget. Dette kan ha sammenheng med et oksidert mikrolag på toppen av sedimentene som bidrar til felling av jernhydroksid og flere tilgjengelige bindingssteder for fosfor. Det er en god sammenheng mellom PSD og jord/sediments evne til å løse ut fosfor til vannet (Sharpley, 1995). I Nederland, hvor denne metoden brukes i forvaltningsammenheng for å styre tiltak mot utlekking er PSD i jord, er faregrensen for utlekking av fosfor til overflate- og grunnvann satt til 25 %. Verdiene i sedimentene i Årungen ligger omkring og delsvis over denne grensen. Sammenlignet med sedimentene i Vansjø, som også har stor fokus på grunn av eutrofiering, er PSD i sedimentene i Årungen vesentlig høyere (Krogstad, upubl.).

P-AL viste mindre samsvar med dyp enn de andre fosforfraksjonene. Videre var det noen forskjeller i fordelingen av P-AL mellom øvre og nedre lag (Fig. 12). I det øverste laget ble de høyeste konsentrasjonene funnet i den nordlige delen av innsjøbassenget, hovedsakelig i de dypeste områdene. I det nedre laget ble de høyeste verdiene registrert i dypere deler i den sentrale delen av innsjøen. Generelt var nivåene noe høyere i det øverste laget. Høye nivåer i nordlige deler av innsjøen, kan ha sammenheng med tilførsler fra Storgrava som drenerer jorder med høye P-AL verdier eller strømningsforhold i innsjøen.



Figur 11: Horisontal fordeling av total fosfor i Årungens sedimenter for lag 1 (0-2,5 cm) og lag 2 (2,5-5,0 cm) (Reierstad 2010).

P-fraksjoner i jord og innsjøsediment

Landbruks- og skogsområder i nedbørssfeltet til Årungen har total fosfornivåer på gjennomsnittlig 1,1 og 0,85 g/kg (Krogstad 2006). Nivåene i sedimentene er høyere med fosforkonsentrasjoner på 1,8 og 1,7 g/kg for øvre og nedre lag, noe som tilsvarer en økning på ca 63 % (Reierstad 2010). For fosforfraksjonene var det spesielt uorganisk fosfor, men også oksalatløselig fosfor som viste en økning i sedimentene sammenlignet med jorda i nedbørssfeltet. P-AL viste små endringer fra jord til sediment. I landbruksjorda var

gjennomsnittskonsentrasjonen 0,12 g/kg (P-AL 12 mg/100g) og i skogsjord 0,04 g/kg (P-AL 4 mg/100g). I sedimentene var konsentrasjonen 0,14 og 0,12 g/kg (P-AL 14 og 12 mg/100g) for øvre og nedre sedimentlag, og følgelig på tilsvarende nivå som for landbruksjorda. Manglende anrikning av P-AL fraksjonen sammenlignet med de andre fosforfraksjonene, kan ha sammenheng med at P-AL fraksjonen er lett løselig, og tas opp av alger og/eller at fosfor bindes sterkere i sedimentene sammenlignet med landjorda (flere bindingssteder).

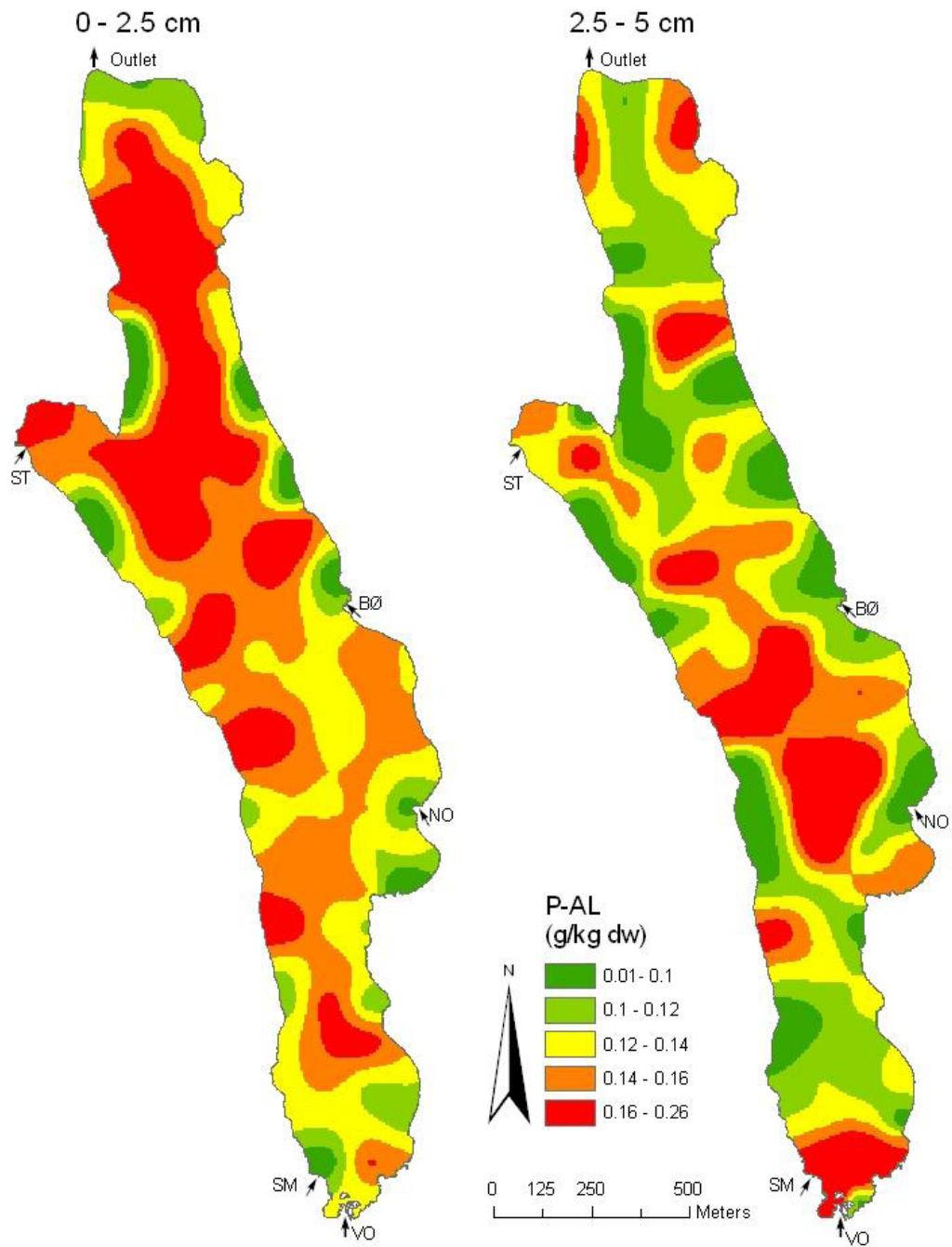
Akkumulering av fosfor i sedimenter

Anslag over sedimenteringshastigheter og kjemisk sammensetning av sedimentene i ulike soner i innsjøen gir grunnlag for å beregne årlige akkumuleringer av næringsstoffer og sedimentmateriale de senere år. Gjennomsnittelig er det estimert at 3000 kg fosfor og 1,5 mill kg sedimentmateriale (tørrstoff) akkumuleres årlig (Reierstad 2010). For årene 2008 og 2009 er det beregnet at 2789 og 2691 kg fosfor samt 540 000 og 460 000 kg sedimentmateriale ble transportert gjennom utløpet av Årungen (Bioforsk 2010). Summen av estimert akkumulering og fluks gjennom utløpet gir en total tilførsel av fosfor på 5700 kg/år for 2009, og en retensjonsfaktor på 0,5. Til sammenligning gir modellen til Larsen og Mericier (1976) en retensjonsfaktor for fosfor på 0,4. Denne modellen har imidlertid en tendens til å underestimere fosforretensjonen for innsjøer med store tilførsler av partikler. Løvstad (2010) har oppgitt en retensjonsfaktor for fosfor på 0,7 for Årungen, noe som innebærer at årlige tilførsler av fosfor til Årungen må oppjusteres i forhold til tidligere anslag. Selv om det er visse usikkerheter knyttet til beregningen av mengden fosfor som er akkumulert i innsjøsedimentene i Årungen (Reierstad 2010), mener vi at en retensjonsfaktor på 0,5 for fosfor virker rimelig. For sedimentmateriale (tørrstoff) er tilførslene estimert til 2 mill kg og retensjonsfaktoren bestemt til 0,75 (Reierstad 2010). Den beregnede årlige tilførselen av fosfor til Årungen på 5700 kg er vesentlig høyere enn beregnet ut fra modeller hvor erosjon er hovedbidraget (Krogstad, 2008).

Interne tilførsler

Årungen mottar stor transport av finmateriale som er anriket på fosfor fra nedbørfeltet. En stor andel av dette fosforet (anslag 50 %) akkumuleres i innsjøsedimentene. Hvorvidt fosforet forblir en del av sedimentet eller går over i vannfasen er styrt av dynamiske forhold i innsjøen. Her nevnes noen viktige forhold som gjelder for Årungen.

Redoksforholdene i sjiktet rett over sedimentoverflata er styrende for løseligheten av jern og sedimentenes evne til å binde fosfor. Kritiske perioder med hensyn på oksygenmangel er gjerne mot slutten av vinter- og sommerstagnasjonen. For Årungen er sirkulasjonsforholdene og stabiliteten av temperatursjiktningen sterkt regulert av klima, som igjen har stor innvirkning på betydningen av de interne fosforkildene i innsjøen. Høy temperaturer og lite nedbør i vekstperioden (f.eks 2006) fremmer en stabil temperatursjiktning og liten utveksling av vannmasser mellom øvre og nedre sjikt i innsjøen. I slike perioder er det registrert mangel på oksygen og svært høye fosforverdier ($> 1 \text{ mg/l}$) i dypere sjikt av innsjøen ($> 12 \text{ m}$). Fosforkonsentrasjonen viser imidlertid en rask reduksjon høyere opp i vannmassene. Volummessig utgjør derfor de fosforrike vannmassene en begrenset del av innsjøvolumet (se Figur 4). Sentralt er imidlertid om fosforet som er frigjort fra sedimentene når primærproduktive lag i innsjøen.



Figur 12: Horisontal fordeling av P-AL i Årungens sedimenter for lag 1 (0-2,5 cm) og lag 2 (2,5-5,0 cm) (Reierstad 2010).

For år hvor vekstperioden er preget av lave temperaturer og mye nedbør, er imidlertid fosfordynamikken annerledes. Vannutskiftningen går raskere, temperatursjiktningen er mindre markert, det øvre vannlaget sirkulerer dypere og det oppstår sjeldent oksygenfrie forhold i de dypere vannmassene. I slike perioder er økningen i fosfor i dypere sjikt av innsjøen mye mindre markert. Resten av vannmassene kan imidlertid vise forhøyede fosforverdier under perioder med stor avrenning og tilførsler av fosfor fra land. Betydningen av sedimentene som intern kilde for fosfor på grunn av reduserende forhold, er derfor sterkt knyttet til klimaforholdene. Framtidige endringer i klimaforhold kan derfor ha stor innvirkning på fosfordynamikken i Årungen.

pH er en annen faktor som innvirker på løseligheten av fosfor. I vekstperioden, registreres gjerne høye pH-verdier ($> \text{pH } 9$) i de produktive lag av innsjøen. Dette kan bidra til økt løselighet av fosfor fra sedimentene i de grunnere deler av innsjøen (fotisk sone). Littoralsonen er også mer utsatt for vind som kan virvle opp sedimenter. Videre kan bioturbasjoner bidra til resuspensjon av sedimentene. Med noen unntak viste, imidlertid, sedimentene i de grunnere delene av innsjøen lavere fosforkonsentrasjoner sammenlignet med dypbassenget. Generelt er ofte littoralsonen og spesielt våtmarksområder produktive områder hvor det skjer viktige prosesser for omsetning av fosfor. Betydningen av littoralsonen som fosforkilde må undersøkes videre før det er mulig å kvantifisere betydningen av den.

Et annet viktig forhold med hensyn på høye pH verdier, er løseligheten av fosfor fra partikler som holdes suspendert i vannmassene. Fosfor-rikt erosjonsmateriale som holdes suspendert i vannmassene i produksjonsperioden, vil generelt ha en større tendens til å løse ut fosfor sammenlignet med mindre produktive perioder av året. P-AL verdiene er et uttrykk for tilgjengeligheten av fosfor. I Årungen var P-AL verdiene noe høyere i øvre (0-2,5 cm) enn for nedre (2,5 – 5,0 cm) sedimentlag. Videre var P-AL verdiene for det øvre laget spesielt høye i de nordlige deler av innsjøbassenget. Årsaken til dette kan ha sammenheng med strømningsforhold i innsjøen og store tilførsler av fosfor fra Storgrava. Dette kan indikere en noe større anrikning av lett omsettlig P i overflatesedimentene i nordlige deler av innsjøen. Dette kan ha betydning for andelen løst fosfor som føres med utløpet av Årungenelva og ut i Bunnefjorden.

Konklusjon:

Årungen ligger i et erosjonsutsatt område dominert av marin leire. Innsjøen fungerer som en stor fangdam og holder tilbake en stor andel av materialet som forlater jordene. Det er estimert at ca 2 mill. kg materiale transporterer ut i Årungen årlig, hvorav 1,5 mill. kg akkumuleres i innsjøen, med andre ord en retensjonsfaktor på 0,75.

Erosjonsmateriale inneholder fosfor, og for 2009 er det estimert at ca 5700 kg fosfor ble transport til Årungen. Årlig akkumulering av fosfor i sedimentene er bestemt til ca 3000 kg, noe som gir en retensjonsfaktor på ca 0,5.

Erosjonen er selektiv med hensyn på partikelstørrelse, slik at finmaterialet har størst tendens til å følge vanntransporten ut i vassdraget. I selve innsjøen skjer det også en sorteringsprosess hvor finmaterialet (leirfraksjonen) har en tendens til å akkumulere i dypere deler av innsjøbassenget, mens grovmateriale avsettes i strandsonen.

Akkumulering av fosfor og mange av spormetallene viser i stor grad samme fordelingsmønster som leirfraksjonen, og viser følgelig en generell økning med dypt med noen unntak (bl.a kvikksølv og kadmium).

Med unntak av spormetallene Cr og Ni, kan miljøstatus for metallene generelt sies å være god og sedimentene er lite forurensset. På grunn av stor materialtransport fra nedbørsfeltet, vil sammensetningen i sedimentene i stor grad gjenspeile sammensetningen i jorda rundt innsjøen, og mineralmateriale vil kunne "fortynne" eventuelle forurensinger.

Sammenlignet med tidligere sedimentundersøkelser, har det vært en markert bedring i miljøstatus siden 1970-tallet. Bedringen gjelder spesielt for svovel, kvikksølv, bly og kadmium, men også fosfor, nitrogen og organisk materiale har vist en markert nedgang.

På grunn av en stor anrikning av finfraksjonen i innsjøsedimentene, inneholder sedimentene generelt mer fosfor enn jordene rundt Årungen. Innholdet av plantetilgjengelig fosfor (P-AL) er imidlertid på samme nivå for innsjøsedimentene og dyrka jord i nedbørsfeltet.

Betydningen av sedimentene som en intern fosforkilde i innsjøen viser store årlige variasjoner som er relatert til klima. Vekstperioder med stabil temperatursjiktning og lite nedbør fremmer anoksiske forhold mot bunnen av dypbassenget, og frigivelse av fosfor. For vekstperioder med mye nedbør og rask vannutskifting, er oksygenforholdene generelt bedre, og lekkasjene fra sedimentene i dypbassenget er vesentlig mindre.

Tilførsel av erosjonsmateriale anriket på fosfor under nedbørsrike episoder i vekstperioden utgjør en potensiell fosforkilde. Høye pH-verdier, drevet av stor fotosyntetisk aktivitet, kan bidra til høyere løselighet av fosfor for vekstperioden sammenlignet med resten av året. Littoralsonen utgjør også en potensiell fosforkilde.

På grunn av stor materialtransport fra nedbørsfeltet, har dette stor innvirkning på Årungens miljøstatus. Tiltak for å bedre næringsstatus bør derfor i stor grad rette seg mot tiltak som reduserer tilførslene av næringsstoffer fra nedbørfeltet. For å kontrollere effekter av tiltak er det viktig å følge opp med innsjøundersøkelser.

Referanser:

Bakke, T., Breedveld, G., Källqvist, T., Oen, A., Eek, E., Ruus, A. Kibsgaard, A., Helland, A. og Hylland, K. (2007). Revidering av klasifisering av metaller og organiske miljøgifter i vann og sedimenter. TA-2229/2007. Statens Forurensingstilsyn. 12 pp.

Bioforsk (2010). Rapport Årungen. (upublisert)

Borch, H., Yri, A., Løvstad, Ø., Turtumøygard, S., Øygard, L. og Skadeberg, I. (2007). Tiltaksplan for Årungen. Bioforsk Rapport 2 (52). 52 pp.

Breeuwsma, A. og Silva, S. (1992). Phosphorus fertilization and environmental effects in the Netherlands and the Po region (Italy). Agric. Res. Dep. 57. Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Res., Wageningen, the Netherlands.

Bækken, T. og Haugen, T. (2006). Kjemisk tilstand i vegnære innsjøer – Påvirkning fra avrenning av vegsalt, tungmetaller og PAH. Statens vegvesen. Rapport UTB 2006/6

Gunnarson, J.O. (2007). Massebalansestudier I innsjøen Årungen. Masteroppgave ved Universitetet for miljø- og biovitenskap, Ås.

Hexum, E. (1963) En limnologisk undersøkelse av Årungen i Ås kommune. Hovedfagsoppgave i fysisk geografi, Universitetet i Oslo. 88 pp.

Håkansson, L. og Jansson, M. (1983). Principles of Lake Sedimentology. The Blackburn Press. New Jersey, USA.

Krogstad, T. (1991). Manual for kornfordelingsanalyse etter pipettemetoden. Rapport nr. 6/91. Institutt for jordfag, Ås-NLH. 41 s.

Krogstad, T.(2004). Beskrivelse av metoder til emnet JORD212. Jordanalyse. Institutt for plante- og miljøvitenskap. NLH. 41 pp

Krogstad, T. (2006). Ås, UMB (upublisert)

Krogstad, T. (2008). LIMNO-SOIL. Beregning av fosfortap fra nedbørfelter rundt Årungen 2007. Intern rapport PURA (Landbruksgruppa), Ås. 9 s.

Larsen, D.P. og Mericier, H.T. (1976). Phosphorous retention capacity of lakes. J. Fish. Res. B. Canada, 33 (8): 1742-1750.

Løvstad, Ø. (2010). PURA: Vannområde Bunnefjorden med Årungen – og Gjersjøvassdraget. Vannforekomster ferskvann: karakterisering, økologisk status og fosfortilførsel – mål for vannkvalitet. Oslo: LIMNO.CONULT. 51 pp

Naas, K. (2010). Horizontal distribution of organic mater, nitrogen and sulfur in the sediments of an eutrophic lake; Årungen. Masteroppgave ved Universitetet for miljø- og biovitenskap, Ås.

Ottesen, R.T., Bogen, J., Bølviken, B., Volden, T. og Gaugland, T. (2000). Geokjemisk atlas for Norge. Geochemical atlas for Norway. Part 1. Geochemical composition of overbank sediments. Norges Geologiske Undersøkelse/Norges Vassdrag – og Energidirektorat. P 140.

Rognerud, S., Fjeld, E., Skjelkvåle, B.L., Christensen, G. og Røyset, O.K. (2008). Nasjonal insjøundersøkelse, 2004-2006, del 2: sedimenter. Forurensning av metaller, PAH og PCB. Rapport 1012/2008. Statens forurensingstilsyn. p. 77.

Reierstad, T.Å. (2010). Phosphorus in eutrophic lake sediments – A case study in Lake Årungen. Masteroppgave ved Universitetet for miljø- og biovitenskap, Ås.

Rutsinda, J. (2010) . Grain size distribution and clay mineralogy in eutrophic lake-sediments, case study Årungen. Masteroppgave ved Universitetet for miljø- og biovitenskap, Ås.

Sharpley, A.N. (1995). Dependence of runoff phosphorus on extractable soil phosphorus. J. Environ. Qual. 24:920-926.

Skogheim, O.K. (1978). Recent sediments in a eutrophicated lake; Årungen, Norway. Verh. Internat. Verein. Limnol.: 20: 749-757.

Skogheim, O.K. Erlandsen, A.H. (1984). The eutrophication of lake årungen as interpreted from paleolimnological records in sediment cores. Vann 4: 451-463.

Van Reeuwijk, L.P. (eds) (1995). Procedures for soil analysis. Fifth edition ed. Technical Paper, 9. International Soil Reference and Information Center, Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Zambon, S.B. (2010). Metals in the sediments of the eutrophic lake Årungen, Norway – Horisontal distribution and association with clay. Masteroppgave ved Universitetet for miljø- og biovitenskap, Ås.