



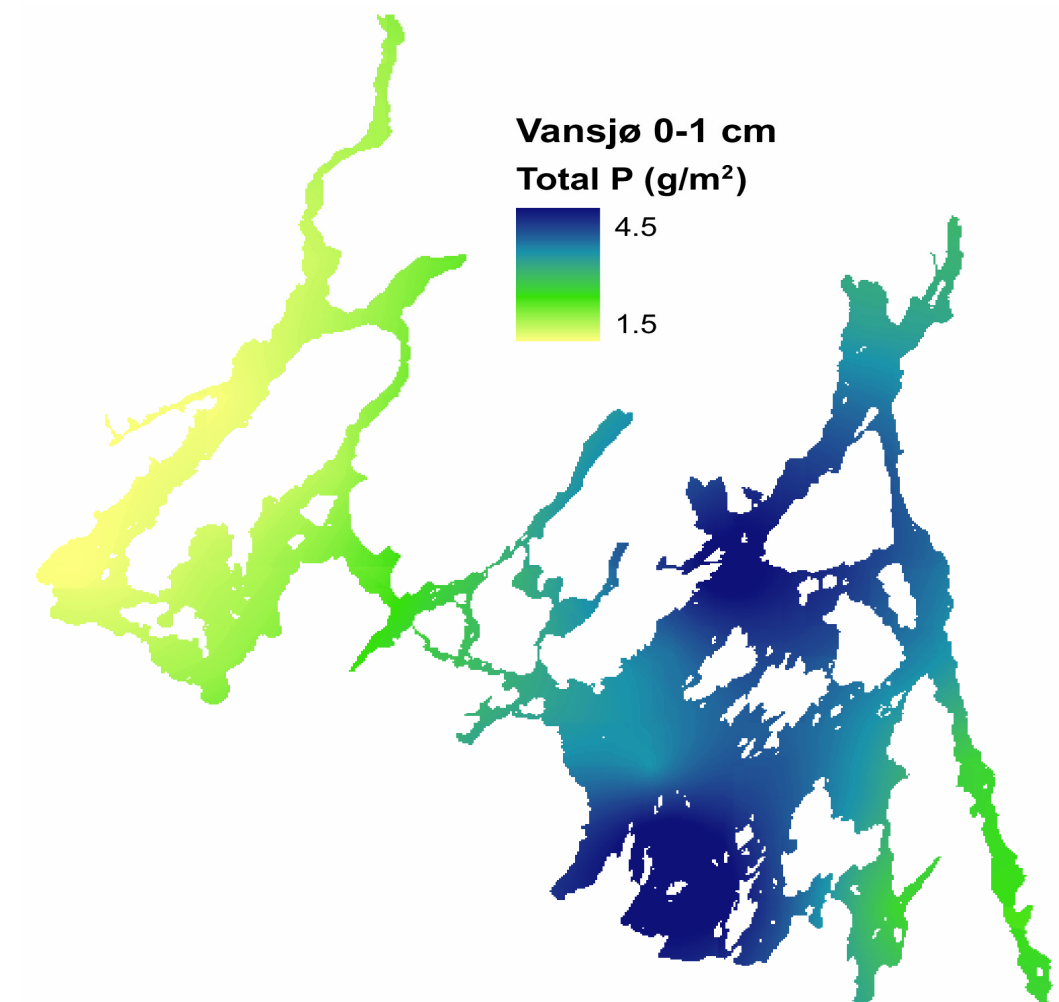
RAPPORT LNR 5144-2006



Biologisk
Institutt og
LFI

Utreddninger Vansjø 2005
Interngjødsling i Vansjø

Delrapport 2



Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet: www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5005 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Midt-Norge


Postboks 1266
7462 Trondheim
Telefon (47) 73 54 63 85 / 86
Telefax (47) 54 63 87

Tittel Vurdering av mulig interngjødsling i Vestre Vansjø	Løpenr. (for bestilling) 5144-2006	Dato 30.01.2006
	Prosjektnr. Undernr. O-25207	Sider Pris 31
Forfatter(e) Tom Andersen, UiO, Åge Brabrand, UiO, Per J. Færøvig UiO, Berit Kaasa, UiO, Åge Molversmyr, IRIS, Birger Skjelbred, UiO, Tone Aasberg	Fagområde Eutrofi Ferskvann	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Østfold	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Statens forurensningstilsyn og Vannområdeutvalget Morsa	Oppdragsreferanse Helga Gunnarsdottir
---	--

Sammendrag
Denne delrapporten omhandler vurderinger av mulig interngjødsling i Vansjø som følge av vinddrevet resuspensjon, høy pH, lavt oksygeninnhold, båttrafikk og fisk. Sedimentene i Vansjø har overraskende lavt fosforinnhold, spesielt det mest eutrofe vestre bassenget. Sammenlignet med eksterne tilførsler er interngjødslingen fra sedimentene i praksis tilnærmet null på årsbasis. Det kan ikke utelukkes at sedimentoppvirvling av vind og fisk kan gi netto fosfortilførsel til Vestre Vansjø i kortere perioder om sommeren.

Fire norske emneord 1. Fosfor 2. Interngjødsling 3. Sediment 4. Fisk	Fire engelske emneord 1. Phosphorus 2. Internal loading 3. Sediment 4. Fish
--	---


Knut Bjørndalen
Prosjektleder


Stig A. Borgvang
Forskningsleder


Øyvind Sørensen
Prosjektleder

Utredninger Vansjø 2005

Vurdering av mulig intergjødsling i Vestre Vansjø

Delrapport 2

Forord

Denne rapporten presenterer resultatene fra prosjektet *Utredninger Vansjø 2005*. Prosjektet ble igangsatt da Vannområdeutvalget Morsa i 2005 fikk økonomisk støtte fra Miljøverndepartementet (MD)/ Statens forurensningstilsyn (SFT) til å gjennomføre utredninger med det hovedmål å få økt kunnskap om innsjøen og prosesser knyttet til næringsstoffer som grunnlag for planlegging av videre hensiktsmessige tiltak.

Utredninger Vansjø ble etter en avsluttet anbudskonkurranse gjennomført av et konsortium bestående av Norsk institutt for vannforskning (NIVA), Universitet i Oslo (v. Biologisk Institutt og Laboratorium for Ferskvannøkologi og Innlandsfiske (LFI)) og Jordforsk. NIVA har hatt prosjektledelsen og har vært ansvarlig overfor oppdragsgiver. NIVA har også hatt det overordnede ansvaret for kvalitetssikringen av prosjektet og dets leveranser. NIVA har samarbeidet med International Research Institute of Stavanger (IRIS) om arbeidsoppgaver som var av felles interesse for både Vansjø og Jærvassdragene.

Utredninger Vansjø har bestått av følgende delprosjekter med følgende hovedansvarlige:

- Kartlegging av variasjon av tilstand i Vansjø *Hovedansv: Knut Bjørndalen, NIVA*
- Undersøke mulig interngjødsling i Vestre Vansjø *Hovedansv. Tom Andersen, UiO, med Åge Brabrand, UiO, som faglig ansvarlig for fiskens betydning*
- Utrede naturtilstanden i Vansjø ved sedimentundersøkelser *Hovedansv. Anne Lyche Solheim; NIVA*
- Forbedre tilførselsberegninger *Hovedansv. Johannes Deelstra, Jordforsk*
- Beregne tålegrenser vha hydrologisk/økologisk modellering. *Hovedansv. Tuomo Saloranta, NIVA*

I tillegg til hovedfinansieringen via MD/SFT har prosjektet blitt samordnet med og støttet av andre forskningsprogrammer for å øke kunnskapsutbyttet. Dette gjelder EU-programmene REBECCA, EUROHARP samt Intereg IIIB-programmet NOLIMP.

Prosjektet er samordnet med vannkvalitetsovervåkingen i regi av Fylkesmannen i Østfold. Prosjektet har også benyttet resultater fra Grimstadbukta som er finansiert av MOVAR IKS og fra prosjektet *Lokale fosfortilførsler til Vestre Vansjø* i regi av Jordforsk, finansiert av kommunene Moss, Rygge og Våler.

Prosjektleder for konsortiet har vært Knut Bjørndalen, NIVA, mens prosjektets kvalitetssikrer har vært Stig Borgvang, NIVA. Oppdragsgivers kontaktperson har vært daglig leder Helga Gunnarsdottir, Vannområdeutvalget Morsa.

Konsortiet vil takke Helga Gunnarsdottir som en aktiv og konstruktiv medspiller gjennom hele prosjekt- perioden. Konsortiet vil i tillegg takke leder av Vannområdeutvalget Morsa Kjell Løkke for reflekterende innspill og nyttige diskusjoner. Konsortiet vil også få takke representantene fra Morsa-kommunene, Vansjø grunneierlag, fylkesmennene og fylkeskommunene i Akershus og Østfold for nyttige innspill på arbeidsseminaret på Kjærnes den 9. og 10. januar 2006. Konsortiet vil til slutt takke MOVAR IKS for samarbeidet under feltarbeidet.

NIVA, den 31. januar 2006

Knut Bjørndalen
prosjektleder

Innhold

Sammendrag	6
1. Innledning	9
2. Sedimentenes betydning	10
2.1 Bakgrunn	10
2.2 Resultater	10
2.3 Konklusjoner	20
3. Fiskens betydning	21
3.1 Innledning	21
3.2 Fiskebiomasse og bestandens størrelsesfordeling	21
3.3 Fiskens næringsvalg	24
3.4 Ekskresjonsrate	25
3.5 Beregnet fosformengde fra fisk i Vestre Vansjø	26
4. Litteratur.	30

Sammendrag

Sedimentenes betydning

Sedimentene i Vansjø er fattige på organisk materiale. Dette vil si at selv om Vansjø har høy produksjon så gjør en effektiv nedbrytning at lite av dette lagres i sedimentene. Store grunne områder og sterk vindpåvirkning er begge naturgitte forhold som gir rask og effektiv omsetning i Vansjø: organisk materiale som synker til bunns vil med stor sannsynlighet kunne virvles opp igjen av vinddrevne strømmer. Hver gang partikler synker ned etter en slik episode vil de synke ned igjen litt fattigere på organisk materiale, og på litt større dyp. Slik blir det også til at det er relativt stor akkumuleringsrate (ca. 1 cm pr. år) i de aller dypeste sedimentene i Vansjø, mens store arealer antagelig har praktisk talt ingen sedimentakkumulering (erosjonssediment). Hvis vi ser på hele Vansjø samlet, vokser antagelig tykkelsen på sedimentet med ca. 1 mm pr. år, som er temmelig typisk for mange lavlandsinnsjøer.

Sedimentene i Vansjø har relativt lave konsentrasjoner av fosfor. Særlig hvis en sammenlikner med for eksempel innsjøer i jernrike morenelandskap som Frøylandsvatnet på Jæren, hvor konsentrasjonen av fosfor i sedimentene er omtrent 10 ganger høyere enn i Vansjø. I tråd med dette har Frøylandsvatnet også betydelig høyere konsentrasjoner av de lettest mobiliserbare sedimentfosforfraksjonene (P adsorbent til partikler og løst i porevann). Vi ser dessuten, litt overraskende, at fosforkonsentrasjonene i overflatesediment er lavest i de mest eutrofe vestre bassengene, og at konsentrasjonen øker nedover i sedimentet (og bakover i tid) i hele innsjøen. Den romlige fordelingen av fosforfraksjoner viser at sedimentene i vestre Vansjø ikke bare er fattigere på fosfor enn resten av Vansjø, men at disse sedimentene også inneholder de laveste andelene av labile fosforfraksjoner.

At fosforinnholdet i sedimentene synes å være høyere i eldre (dypere) sedimenter kan tolkes enten som at sedimentene tilføres mindre fosfor, eller at de har fått mindre evne til å binde fosfor. Da sedimentene i Storefjorden ble grundig undersøkt for 25 år siden var tendensen den motsatte med høyest fosforkonsentrasjon i det øverste (yngste) laget. Det er nærliggende å tolke dette som en opplading av sedimentene i Storefjorden under økende eutrofiering på 1970-tallet og en tilsvarende tømning som resultat av at det innstiller seg en ny likevekt med reduserte tilførsler i seneste tid.

Fosfor som er lagret i sedimentene kan frigjøres tilbake til vannmassene under bestemte forhold. Dette kalles gjerne interngjødsling, selv om uttrykket er upresist: fosfor som lekker ut fra sedimentene har også opprinnelig blitt tilført utenfra. Interngjødsling blir først og fremst et problem når fosfor som er tilført over lengre tid, kanskje flere tiår, begynner å lekke tilbake til vannmassene. Denne prosessen vil være spesielt betydningsfull i en innsjøes fosforbudsjett når de ytre tilførslene minker, men vil alltid til slutt avta igjen, selv om det kan ta lang tid å komme dit hvis sedimentene har et stort fosforlager. Effekten av interngjødsling kan være meget demoraliserende hvis en har gjort omfattende og kostbare tiltak i nedbørfeltet, men ikke ser noen forbedring i innsjøen.

For vestre Vansjø viser alle målinger og forsøk vi har gjort at interngjødslingen må være betydelig mindre enn man i utgangspunktet hadde trodd. Undersøkelsene viser at fosforfrigjøring i bunnvannet under oksygenfrie forhold angår så små områder og er av så begrenset omfang at denne prosessen kan sees bort fra når man skal lage et fosforbudsjett for innsjøen (input-output). Fosforfrigjøring fra oppvirvlede sedimenter på grunnere vann kan ha en betydning i en kortere periode midt på sommeren, men på årsbasis er antagelig nettoeffekten nær null. En kan likevel ikke se helt bort fra at den korte perioden med netto frigjøring fra oppvirvlede sedimenter kan være kritisk for den for tiden årlige *Microcystis*-oppblomstringen i vestre Vansjø.

Fiskens betydning

Fiskens resirkulering av fosfor gjennom konsum av sedimenter er en del av de mekanismer som går under samlebegrepet interngjødsling fra sedimenter. Her inngår tilbakeføring av fosfor som skyldes effekt av vind, pH, oksygensvinn, bunndyr, og også fisk.

Det er gitt en beregning av fosforbidrag fra fisk i Vestre Vansjø. Beregning av fiskens bidrag er basert på:

- Beregning av total fiskebiomasse i ulike størrelsesgrupper av mort og arter tilhørende "brasmegruppen" (brasme, flire, hybrider mort/brasme) basert på garnfangster og kvantitativ hydroakustikk i Vestre Vansjø 2005, se Bjerkeng *et al.* 1991.
- Analyse av fiskens næringsvalg i Vestre Vansjø i august 2005.
- Fosfor ekskresjonsrater som funksjon av fiskens størrelse basert på litteraturverdier, se Brabrand *et al.* 1990.
- Korreksjon for de temperaturer som er målt i Vestre Vansjø 2005.

Dybdefordeling, arter og biomasse

Det ble beregnet en tetthet på 7 400 fisk ha⁻¹ i områder av Vanemfjorden som i dybdesjiktet 2-8 m i august 2005. Basert på garnfangster var 37 % av dette mort og 38 % tilhørende "brasmegruppen". Dette ga en biomasse på 70 kg ha⁻¹ mort og 117 kg ha⁻¹ av "brasmegruppen" (korrigert til dybdesjiktet 2-9 m under vannoverflaten) for alle lengdegrupper. Biomassen av fisk større enn ca 10 cm er beregnet å være henholdsvis 66 kg mort og 107 kg i "brasmegruppen", og det er disse beregningene som er lagt til grunn for P fra fisk.

En beregnet biomasse i Vestre Vansjø av mort på 70 kg ha⁻¹ og av arter i "brasmegruppen" på 117 kg ha⁻¹ gir et samlet estimat på 187 kg ha⁻¹ karpesfisk for dybdesjiktet 2-8 m. Dette må betegnes som rimelig ut fra forventningen basert på total artssammensetning og områdets eutrofe tilstand.

For både brasme og mort større enn ca 10 cm ble det konsumert betydelig mengder av typiske sedimentert materiale, vekselvis av både sand/mudder og preg av leire med mer eller mindre dødt organisk materiale (detritus). Det totalt dominerende næringsdyr var larver av fjærmygg. Disse er nedgravd i substratet, og vil følge med når fisker suger i seg bunnmaterialet mer eller mindre selektivt. For de grupper av fisk som er undersøkt utgjør sedimenter og detritus en andel på 80 %. Det er helt tydelig at næringsopptaket skjer ved et lite selektivt næringsøk ved opptak av bunnmateriale. For individer mindre enn ca 10 cm ble det konsumert hovedsakelig zooplankton, men enkelte også betydelige mengder påvekstalger.

Ved beregninger for Vansjø er det benyttet månedlig målt temperatur for epilimnion i Vanemfjorden for 2005 (mai = 13 °C, juni = 15 °C, juli = 19 °C, august = 18 °C, september = 10 °C, oktober = 5 °C). Basert på artssammensetningen på garnfangstene er det forutsatt at 74 % av fiskebiomassen beregnet ved hydroakustikk er karpesfisk, og fosforekskresjon er basert på denne andelen karpesfisk av totalt antall fisk. Av karpesfisk vil mort, brasme og flire være typiske sedimentspisere. Disse artene utgjør den helt overveiende delen av biomassen karpesfisk. Suter (nyetablert), laue og sørv consumerer også ikke-animalsk næring, men disse artene er mer utpregete detritus- og plantespisere. Med sin karakteristiske munnutforming er det også lite sannsynlig at sørv er en typisk sedimentspiser i nærvær av mort, brasme og flire. Sørv er derfor ikke inkludert i brasmegruppen i denne sammenheng. Suter har liten bestand, og inngikk ikke i fangstene i august 2005. En økning i denne artens forekomst i fremtiden kan ikke utelukkes, og vil med stor sannsynlighet tilhøre samme funksjonelle gruppe som "brasmegruppen".

Den fiskebiomassen som konsumerer sedimenter bidrar med et internbidrag av P som skyldes ekskresjon. Den maksimale mengden ble beregnet til 0,68 og 0,6 mg m⁻² døgn⁻¹ i henholdsvis juli og august, noe som tilsvarer 0,20 kg SRP ha⁻¹ mnd⁻¹ i juli og august 0,18 kg SRP ha⁻¹ mnd⁻¹ i august.

Dette estimatet er basert på at ekkogrammene er representative, at garnfangster gir et korrekt bilde av artssammensetningen og at ekskresjon av fosfor fra fisk i Vestre Vansjø er den samme som i Gjersjøen for mort og brasme, og for sedimentspisende karpe (Lamarra 1975).

Når det gjelder ekskresjonsrater må det antas at disse er avhengig av P-innholdet i det som konsumeres. Det er i 2005 funnet lavt innhold av fosfor i sedimenter over store områder i Vestre Vansjø (se kapittel: Sedimentenes betydning), og det er konkludert med at lekkasjen av fosfor fra sedimenter fra disse områdene er lavt. Dette resulterer i at det sannsynligvis er lavere ekskresjonsrater av fosfor fra fisk i Vansjø enn fra Gjersjøen, og at tilbakeføring av fosfor fra fisk som er beregnet for Vestre Vansjø derved er for høyt, i beste fall maksimalverdier. Videre er det sannsynlig at det fosforet som fisk bringer opp i vannmassene er det samme fosforet som andre internkilder bidrar med, og at fiskens bidrag derved ikke kan betraktes som nytt fosfor som ellers ville vært unntatt resirkulasjon.

1. Innledning

Vannområdeutvalget Morsa fikk i 2005 økonomisk støtte fra MD/SFT til å gjennomføre utredninger i Vansjø i 2005 mht. tilstandsvariasjoner, interngjødsling, naturtilstand, forbedring av tilførselsberegninger, beregning av fosforbudsjett og tålegrenser. Målsetningen var å få økt kunnskap om innsjøen og prosesser knyttet til omsetningen av næringsstoffer, som grunnlag for planlegging av videre hensiktsmessige tiltak. Videre var det en målsetning at kunnskap en samler i prosjektgjennomføringen er av en slik karakter at den har størst mulig overføringsverdi til andre vassdrag. Miljøtilstanden i Vansjø har ikke vist signifikant bedring i de senere år til tross for gjennomføring av betydelige tiltak for å begrense fosfortilførsler fra nedbørfeltet. Særlig i Vanemfjorden har store oppblomstringer av toksiske blågrønnalger de senere år medført betydelige brukerkonflikter. En mulig årsak til den manglende responsen på de tiltakene som er gjennomført innen landbruk og på kloakksektoren er intern utlekking av fosfor fra innsjøsedimentene. For å kunne vurdere dette, bør sedimentsammensetningen og mekanismene for fosforutlekking undersøkes nærmere. I sammenheng med vurdering av interngjødslingen ønskes også at innvirkningen av karpefisk og båttrafikk blir belyst og vurdert.

Mangelen på uberørte lokaliteter av samme vanntype som Vansjø (moderat kalkrike, humøse innsjøer i lavlandet), gjør det vanskelig å fastsette hva som er naturgitte bakgrunnsnivåer for næringsstoffer i innsjøen. Slik kunnskap er viktig både for å fastsette realistiske miljømål og å vurdere tålegrenser og avlastningsbehov. Det vil også være avgjørende i relasjon til EUs rammedirektiv for vann, der avvik fra naturtilstanden blir viktig å fastsette. En mulig måte å belyse dette på, er å kartlegge innsjøens historiske utvikling gjennom analyse av sedimentkjerner. I tillegg til å skaffe informasjon om den opprinnelige tilstanden i innsjøene, vil dette også ha kulturhistorisk interesse ved å belyse når utviklingen i landbruket og i kulturlandskapet fikk betydning for tilstanden i vassdragene. Disse forholdene er omhandlet i delrapport 3 (Inr 5145-2006)

Det er også knyttet store usikkerheter til eksisterende estimater av næringstilførsler til innsjøen og dens ulike bassenger. Utredningene omfatter derfor også en deloppgave på forbedring av tilførselsberegninger og en nærmere vurdering av fosforbudsjettet for innsjøen (jmf delrapport 4, Inr 5146-2006).

For å kunne få bedre sikkerhet i tilstandsvurderingen av innsjøen er det også prioritert å utrede innsjøens romlige og tidsmessige variasjon i en rekke nøkkelparametere for bedømmelse av tilstand. Det er derfor behov for gjennomføring av et intensivt prøvetakingsprogram i 2005, for å få kvantifisert denne variasjonen (jmf. Delrapport 1, Inr 5143-2006). De innsamlede data kan både gi et bedre grunnlag for miljømålfastsettelsen og for design av et faglig forsvarlig overvåkingsprogram i tråd med kravene i EUs Rammedirektiv for Vann.

Tålegrensen dvs. det kvantitative miljømålet som ble foreslått i tiltaksanalysen i 2001 var basert på en meget enkel modell uten usikkerhetsanslag. For å få et sikrere grunnlag for vurdering av tiltak skal derfor nye modeller tas i bruk for å fastsette innsjøens tålegrense.

Den foreliggende rapport omhandler undersøkelse av mulig interngjødsling i Vansjø. De øvrige temaene gis ut i egne delrapporter.

2. Sedimentenes betydning

2.1 Bakgrunn

Beregninger basert på eksisterende datagrunnlag viser at det renner mer fosfor ut av Vestre Vansjø enn det som renner inn via Storefjorden (Lyche-Solheim m.fl. 2001). Årsakene til dette avviket kan være underestimert av tilførsler fra lokale bekker i vestre Vansjø nedbørfelt, interngjødsling i innsjøen, samt at tilførslene fra Storefjorden kan være underestimert. For å kunne anbefale ytterligere tiltak for å bedre vannkvaliteten i Vestre Vansjø er det av avgjørende betydning å finne ut hvor mye av dette fosforet som kommer fra henholdsvis lokale tilførsler og fra sedimentene (interngjødsling). Dersom bidraget fra sedimentene er stort, er det også viktig å kunne fastslå hvilke prosesser som bidrar til interngjødslingen og omfanget av denne, herunder bioturbasjon (bunndyrspisende fisk), vinddrevet resuspensjon (oppvirvling), anaerob frigjøring ved oksygenvinn og aerob frigjøring ved høy pH.

Oksygenmålinger tatt i august 2004 indikerer at utlekking av fosfor under anaerobe (oksygenfrie) forhold ikke utgjør hoveddelen av den interne gjødslingen. Det antas à priori at resuspensjon som følge av vindpåvirkning i gruntvannsområder, samt effekt av bunndyrspisende fisk som roter opp sedimentoverflaten, utgjør hoveddelen av interngjødslingen. For å teste denne antagelsen, samt for å anslå hvor stort bidrag som kommer fra de forskjellige prosessene, er det foretatt undersøkelser av innsjøens sedimenter og utført enkle eksperimenter. Særlig fokus er lagt på sommerperioder med høy algevekst og tidvis høy pH, og hvilken rolle interngjødslingen kan spille for oppblomstring av blågrønnalger. Vurderingene er gjort i nært samarbeid med Rogalandforskning, og deres tilsvarende vurderinger for Frøylandsvannet.

For å få en oversikt over hvor mye fosfor som finnes i sedimentene, og i hvilken form det finnes, ble det gjort en omfattende horisontal undersøkelse av sedimentkjerner fra de to hovedbassengene i Vansjø. I tillegg ble det gjort tre typer forsøk for ytterligere å vurdere frigjøring av fosfor:

- Som følge av vinddrevet resuspensjon – binding og frigivelse av fosfor til sedimentpartiklene (adsorpsjons- og desorpsjonsprosesser)
- Via båttrafikk, ved at motorbåttrafikken i Vansjø kan potensielt bidra til interngjødsling av fosfor via oppvirvling av sedimentpartikler i vannmassene
- Ved henholdsvis høy pH og anaerob (oksygenfri) frigjøring, ved utvekslingsforsøk med intakte sedimentkjerner, for å belyse potensialet for fosforutlekking under bestemte forhold.

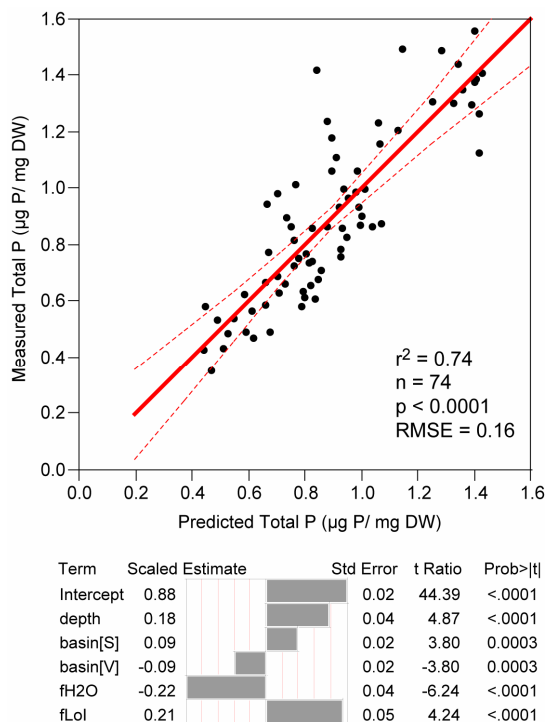
I tillegg er betydningen av fosforfrigjøring via bunndyrspisende fisk undersøkt av Laboratorium for Ferskvannøkologi og Innlandsfiske (LFI), Universitetet i Oslo (se kapittel 3).

2.2 Resultater

Fosforinnhold i sediment. I august 2005 tok vi opp til sammen 34 sedimentkjerner på forskjellige steder i Vansjø, med fokus på hovedbassengene Vanemfjorden (13 kjerner) og Storefjorden (21 kjerner). Alle prøvetakingsstedene ble kartfestet med GPS. Vi søkte å unngå typisk erosjons sediment i de grunneste områdene slik at prøvetakingsdypene varierte fra 3 til 41 meter. Det ble tatt prøver av overflatesjiktet (0-1 cm) i alle kjernene, mens 4 kjerner (to fra hver av Storefjorden og Vanemfjorden) ble også analysert i 1-cm sjikt nedover i sedimentprofilet.

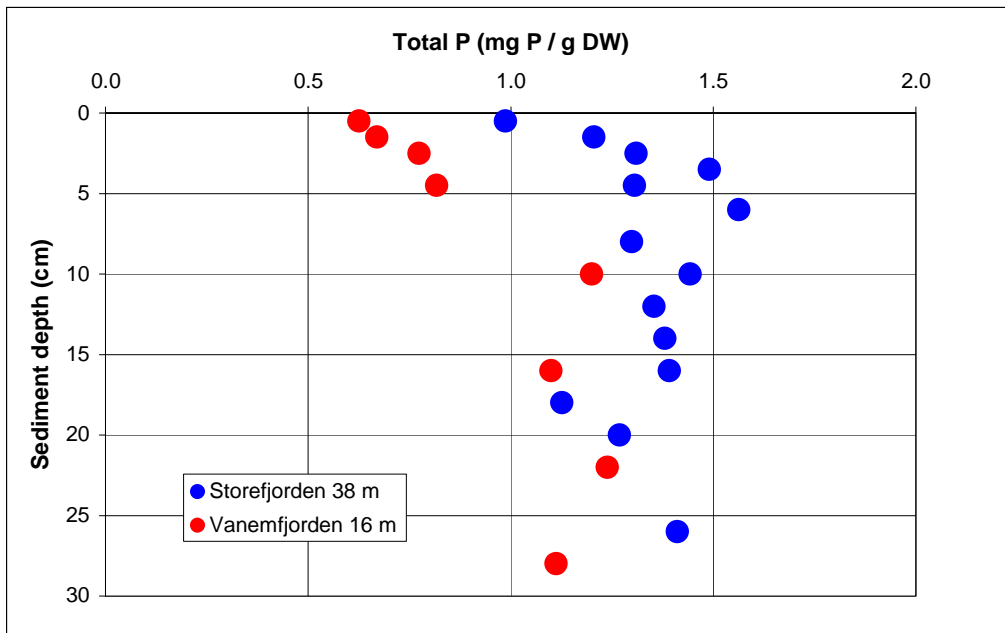
Alle sedimentprøvene ble analysert for vanninnhold og glødetap. Innholdet av organisk materiale (målt som glødetap) er gjennomgående lavt (2-5 %) i alle sedimentene fra Vansjø, noe som tyder på effektiv mineralisering av sedimentert materiale. Røntgendiffraksjonsanalyse av sedimentpartikler viser veldig lik mineralsammensetning i de to bassengene, med dominans av kvarts og leirminerale (jernholdig kloritt, montmorillonitt, illitt). Fire prøver overflatesediment fra forskjellige dyp og bassenger hadde alle ca. 20 % av partiklene < 20 µm. Det vil si at 80 % av partiklene i

overflatesedimentet hadde sedimentasjonshastighet > 1 meter pr. time, som er ganske typiske verdier for grunne erosjonssedimenter (Håkansson og Jansson 1983).



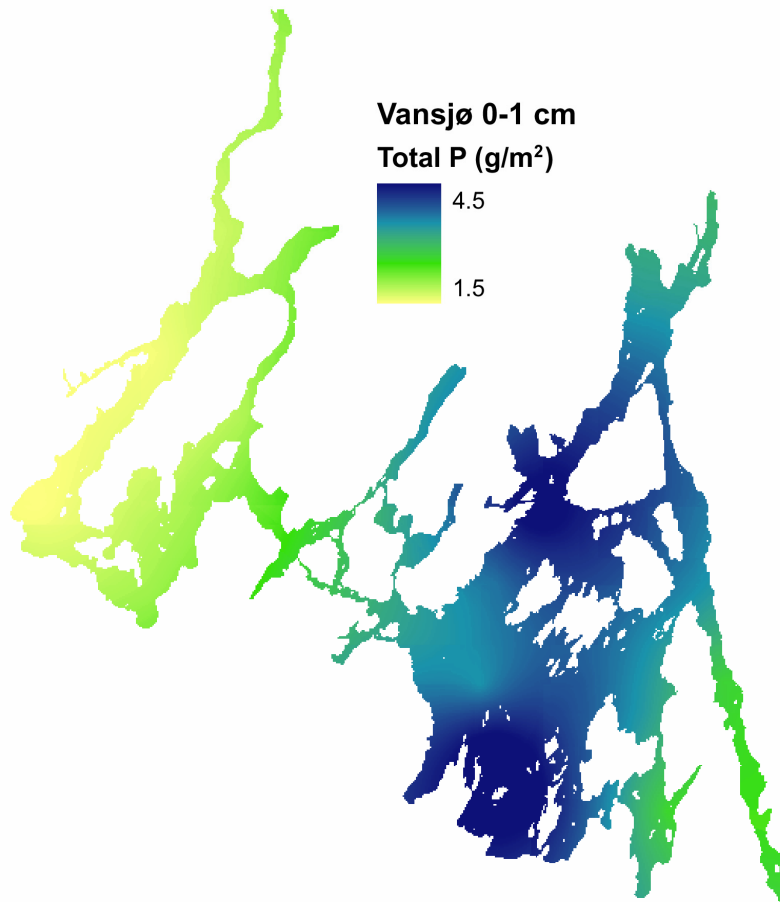
Figur 1. Multippel lineær regresjonsmodell for total fosfor pr. enhet tørrstoff i sediment (mg P / g TV) som funksjon av dyp (depth), basseng (basin: V = Vanemfjorden, S = Storefjorden), vanninnhold (fH₂O) og glødetap (LoI). Modellen forklarer 74 % av variansen. Det nedre panelet viser effektene av de enkelte forklaringsvariablene som såkalte skalerte estimater (regresjonskoeffisient multiplisert med halve variasjonsbredden til variabelen).

Totalt fosfor ble målt på alle sedimentprøvene etter våtoksidasjon med K₂S₂O₈ (K-peroksodisulfat). En multippel lineær regresjonsmodell forklarer ca. 75 % av variansen i total fosfor per vektenhet tørt sediment når en trekker inn dyp, basseng, vanninnhold og glødetap som forklaringsvariable (figur 1). Datamaterialet omfatter både sedimentoverflaten og dypereliggende sjikt, men hvilket sjikt prøven kom fra hadde ingen signifikant forklaringsgrad. Det vil si at ferskt og eldre sediment utgjør en homogen gruppe når en justerer for forskjeller i vanninnhold etc. og at de forskjellene vi ser i fosforinnhold lar seg i hovedsak forklare ut fra geografisk plassering (dyp og basseng) og sedimentets fysiske egenskaper (innhold av vann og organisk materiale). Figur 1 viser også at de fire forklaringsvariablene hadde omtrent like stor effekter: fosforinnholdet øker med dypet og med innholdet av organisk materiale, mens det avtar med økende vanninnhold. Når vi justerer for forskjeller i fysiske egenskaper er fosforkonsentrasjonen gjennomsnittlig ca. 0,2 mg P / g tørrvekt (TV) lavere i Vanemfjorden enn i Storefjorden.



Figur 2. Total fosfor i sedimentprofiler fra dypområdene i Storefjorden og Vanemfjorden

Analysene viste at sedimentene i Vansjø inneholder fra 0,4 til 1,5 mg P pr. gram tørt sediment. I en sammenstilling av P-innhold i sediment fra innsjøer over hele verden fant Håkansson og Jansson (1983) til sammenlikning en variasjonsbredde fra 0,5 til 10 mg P / g tørrvekt (TV). Sedimentene i Vansjø blir altså å anse som fosforfattige i forhold til typiske verdier for eutrofe innsjøer. Hvis vi justerer for forskjeller i fysiske egenskaper er fosforinnholdet som nevnt ca. 0,2 mg P / g TS lavere i Vanemfjorden enn i Storefjorden. Denne forskjellen gjelder særlig for overflatelaget mens forskjellene er mindre tydelige for eldre, dypere sedimentsjikt (figur 2). Fosforinnholdet avtar mot overflaten i alle sedimentkjernene som ble snittet i flere sjikt (figur 2). Begge disse resultatene er overraskende i forhold til de forestillinger en kanskje hadde på forhånd: Vanemfjorden har ikke det høyeste fosforinnholdet i sedimentene selv om den er det klart mest eutrofe bassenget i innsjøen, og fosforinnholdet i sedimentene i Vansjø har tilsynelatende snarere avtatt enn økt i takt med eutrofieringsproblemene i innsjøen. Ut fra de sedimentakkumuleringsrater man har estimert for dypvannsedimentene i Vansjø (ca 10 mm / år i Vanemfjorden og 5 mm / år i Storefjorden – Lyche-Solheim m.fl. 2006) kan det virke som at fosforinnholdet i sedimentene begynte å avta i begge bassengene for ca 10 år siden.



Figur 3. Romlig interpolasjon (kriging) av fosforinnhold i overflatesediment, målt som gram P pr. m² i sjiktet 0-1 cm.

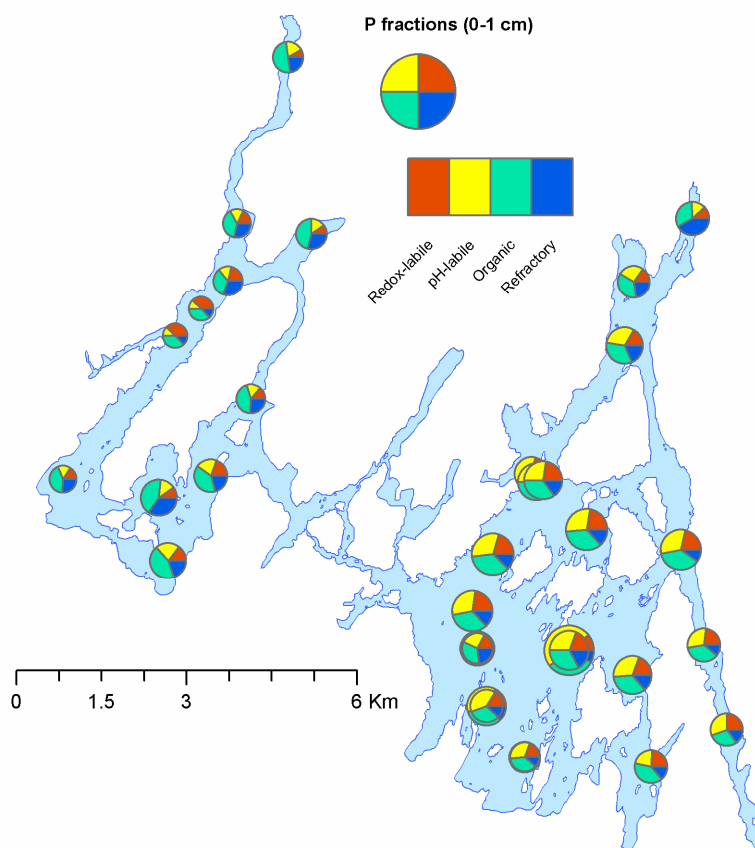
Ved å ta hensyn til vanninnhold og glødetap kan en regne om fosforinnhold pr. enhet tørrstoff til mengde fosfor p.r m² i sjiktet 0-1 cm. Romlig interpolasjon (kriging) kan så brukes til å lage en sammenhengende representasjon av sedimentene i hele Vansjø (figur 3). Denne interpolasjonen kan også brukes til å gi et arealrettferdig veid gjennomsnitt av egenskapene til sedimentene: Overflatesedimentene i Vansjø inneholder $0,74 \pm 0,19$ mg P / g TV eller $3,1 \pm 0,9$ g P m⁻² i sjiktet 0-1 cm. Hvis vi multipliserer dette siste tallet med arealet av Vansjø får vi at den øverste centimeteren i sedimentene inneholder 110 ± 32 tonn fosfor. Hvis fosforretensjon i hele Vansjø er ca. 12 ± 8 tonn P / år (Lyche-Solheim m. fl. 2001) så blir netto sedimentakkumuleringsrate for hele Vansjø lik $1,1 \pm 0,8$ mm / år. Dette er vesentlig lavere enn den raten man kan estimere fra isotopdateringer i sedimentkjerner fra de dypeste punktene (5-10 mm / år). Denne forskjellen er ikke overraskende tatt i betraktning at de dypeste områdene i Vansjø utgjør et svært lite areal, mens det er store grunnområder med erosjonssediment og nær null nettoakkumulering. En konsekvens av dette er at man vil trenge flere daterte sedimentkjerner fra forskjellige dyp for å kunne estimere en arealrettferdig fosforakkumuleringsrate for Vansjø.

Fosforfraksjoner i sediment. Sedimentprøvene ble også analysert på fosforfraksjoner etter en lett modifisert prosedyre fra Hieltjes og Lijklema (1980):

- Ekstraksjon med NH₄Cl gir løst fosfor i porevann og fosfor adsorbert til partikler. Denne fraksjonen var alltid mindre enn 0,2 % av total P og blir følgelig neglisjerbar i de fleste grafiske sammenlikninger.

- Ekstraksjon med $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ (Na-dithionitt) gir redoks-labilt fosfor, dvs. fosfor som kan frigjøres ved anaerobe (oksygenfrie) forhold. *Redoks-labilt P* utgjorde i snitt 14 % av total fosfor i sedimentet.
- NaOH-ekstraherbart reaktivt P vil typisk være bundet til Fe og Al, og vil kunne være labilt ved høy pH. *pH-labilt P* utgjorde i snitt 20 % av total fosfor.
- Organisk P ble estimert som differansen mellom totalt og reaktivt (uorganisk) NaOH-ekstraherbart P. *Organisk P* utgjorde i snitt 26 % av total fosfor.
- HCl-ekstraherbart P vil typisk være bundet til Ca, ofte som tungt løselig apatitt. I Vansjø utgjør denne fraksjonen i snitt 22 % av totalen, slik at summen av alle fraksjonene utgjør bare 82 % av totalen.
- *Refraktivt P* estimert som differansen mellom totalt P og summen av redoks-labilt, pH-labilt og organisk P. Denne fraksjonen omfatter alle former av fosfor som ikke vil kunne frigjøres ved vanlige kjemiske og biologiske prosesser i innsjøen. I snitt utgjør denne fraksjonen ca. 40 % av total P i Vansjø.

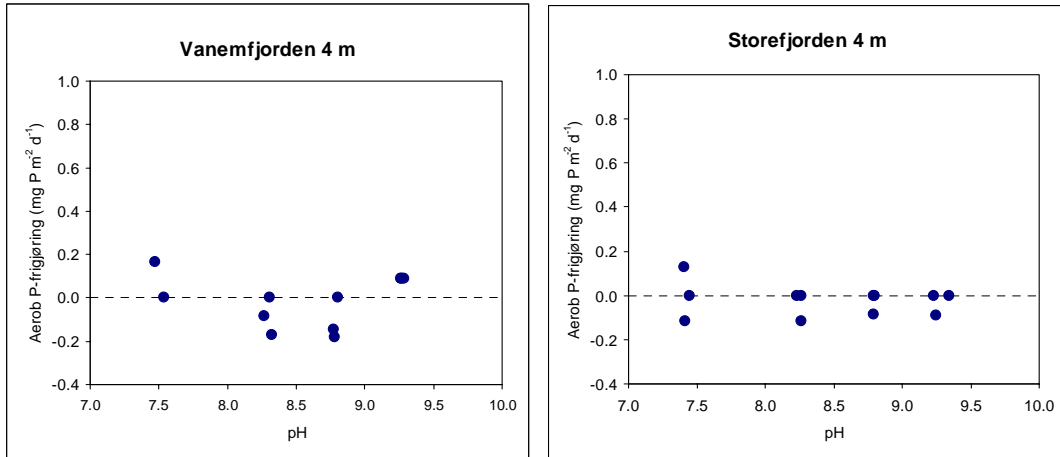
Summen av de pH- og den redoks-labile fraksjonene kalles ofte for 'Non-Apatite Inorganic P' (NAIP) som antas å representere den delen av total fosfor som kan frigjøres ved høy pH eller oksygenvinn. Den romlige fordelingen av fosforfraksjoner (figur 4) viser at sedimentene i Vanemfjorden ikke bare er fattigere på fosfor enn resten av Vansjø, men at disse sedimentene også inneholder de laveste andelene av labile fosforfraksjoner (NAIP).



Figur 4. Fordeling av fosforfraksjoner i overflatesediment (0-1 cm) på forskjellige stasjoner i Vansjø. Størrelsen på sirklene er proporsjonal med den totale fosformengden mens sektorene viser den betydningen av de forskjellige fraksjonene.

Fosforutlekking fra intakte sedimentkjerner. Utlekkingsforsøk med intakte sedimentkjerner fra Vansjø ble utført av Åge Molværsmyr, Rogalandsforskning (RF).

Aerob fosforutlekking ble målt ved 4 forskjellige pH-verdier i 12 kjerner fra grunt vann (4 m) i hvert basseng (Vanemfjorden og Storefjorden). Figur 5 viser at ingen av forsøkene viste signifikant fosforutlekking ved pH opp til 9,5 (som er høyeste pH som noen gang er målt i Vansjø).



Figur 5. Aerob fosforutlekking i intakte sedimentkjerner fra Vansjø som funksjon av pH. Forsøkene er utført av Åge Molværsmyr, Rogalandsforskning.

Anaerob fosforutlekking ble målt i 3 kjerner fra dypeste punkt i hvert basseng (hvv. 16 m og 41 m for Vanemfjorden og Storefjorden). Ingen av kjernene fra Storefjorden og 2 av 3 kjerner fra Vanemfjorden viste ingen signifikant utlekking. Hvorfor den tredje kjernen fra Vanemfjorden avga fosfor, men ikke de andre, er ukjent.

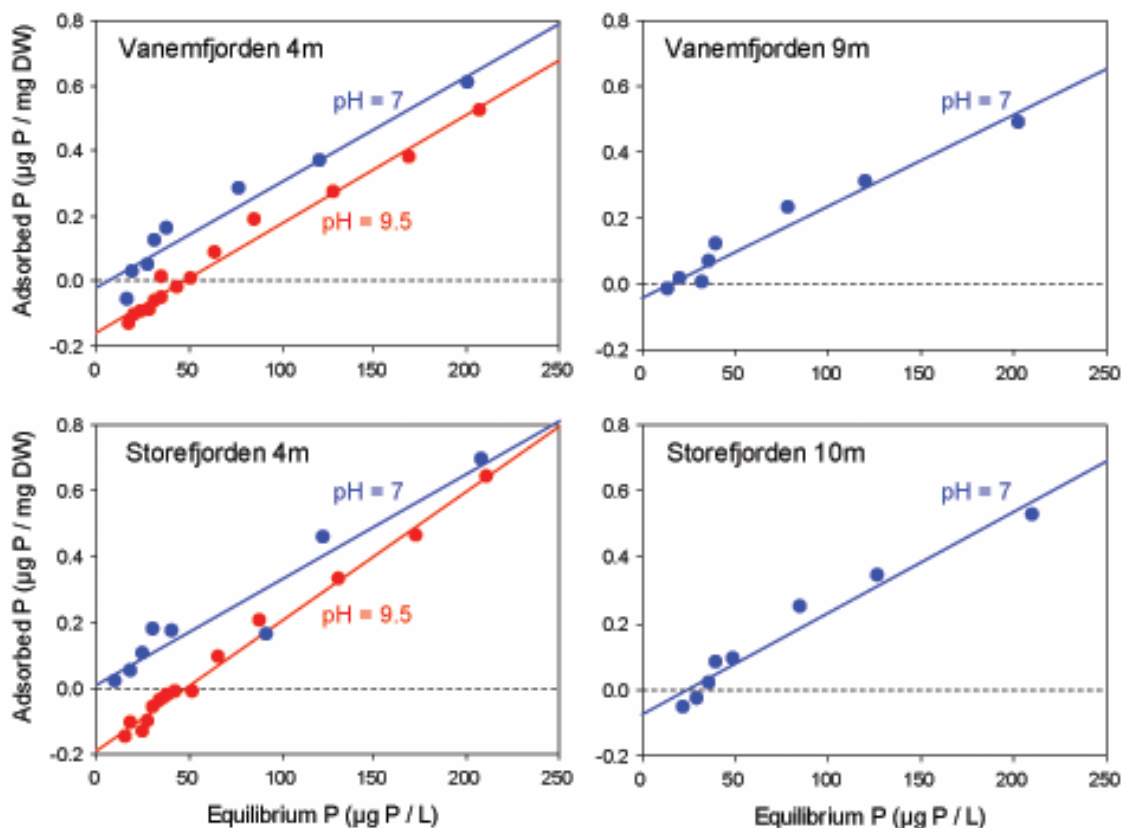


Figur 6. Horisontal utbredelse av oksygenfrie bunnområder i Vansjø, 5-6 august 2005 (skravert med rødt). Områdene representerer dyp større enn 11 m i Vanemfjorden, større enn 30 m i Rosfjorden (Storefjorden, nord) og større enn 22 m i Borgebunnen (Storefjorden, sørøst). Dypdekartet har ikke tilstrekkelig detaljeringsgrad til å vise de anaerobe områdene i Grepperødfjorden (dypere enn 6,5 m), men også her dreier det seg om meget små områder.

Fosfor og oksygen i bunnvannet. I en horisontal undersøkelse av oksygenforholdene i Vansjø 8-9. august 2005 ble det funnet oksygenbrist (mindre enn 0,2 mg / L) på dyp større enn 11 meter i Vanemfjorden. Det ble også funnet like lave oksygenverdier i bunnvannet i mer isolerte armer av resten av innsjøen (Grepperødfjorden, Rosfjorden, Borgebunnen), men ikke i selve hovedbassenget i Storefjorden. Figur 6 viser den horisontale utbredelsen av oksygenfrie bunnområder i Vansjø, august 2005. På grunn av topografi (store gruntvannsområder) og beliggenhet (stort vindfang i hovedvindretningen for solgangsbrisen om sommeren), så har Vansjø relativt begrensede områder hvor det kan utvikle seg oksygenbrist.

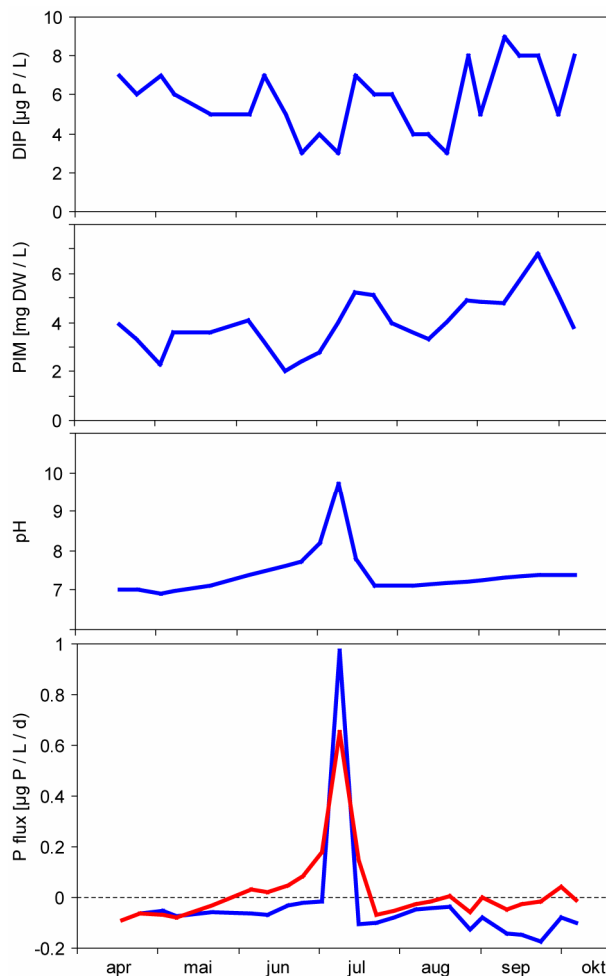
Nitratkonsentrasjonene var gjennomgående høyere enn 100 $\mu\text{g N / L}$ i bunnvannet på alle stasjonene og det ble ikke funnet forhøyede fosforkonsentrasjoner på noen av dem. Så lenge det er nitrat til stede vil reduksjonspotensialet være for høyt til at en får fosforfrigjøring ved reduksjon av 3-verdig jern. Analysene av fosforfraksjoner i sedimentene viser dessuten at den redoks-labile fosforfraksjonen er liten, særlig i Vanemfjorden. Begge disse faktorene reduserer potensialet for anaerob frigjøring av fosfor fra dypvannssedimenter. Feltobservasjonene gir en uavhengig støtte til konklusjonene fra forsøkene med intakte sedimentkjerner om at anaerob fosforutlekking ved oksygenvinn er av liten betydning i Vansjø.

Fosforbinding til suspenderte partikler. Vansjø er grunn og sterkt vindpåvirket, slik at strøm og bølger hele tiden vil virvle opp (resuspendere) sedimenter i de grunne områdene. Vi ser dette blant annet fra konsentrasjonene av suspendert uorganisk materiale som er høye hele sommeren. Forskjellene i middeldyp gjør at oppvirvlingen er sterkest i Vanemfjorden, som gjennomgående har dobbelt så høye konsentrasjonene av suspendert uorganisk materiale som Storefjorden. Det knyttet seg stor interesse til hvorvidt resuspending av sedimentpartikler utgjør en netto fosfortilførsel til de frie vannmassene.



Figur 7. Adsorpsjonsforsøk med resuspendert sediment fra Vansjø, framstilt som adsorbert P som funksjon av likevektskonsentrasjon av løst uorganisk P

Vi utførte i alt tre sett av forsøk med resuspendert sediment fra Vansjø. Hvert forsøk starter med å lage en suspensjon av overflatesediment tilsvarende ca. 1 gram tørt sediment pr. liter. Denne suspensjonen fortynnes 1:10 med filtrert innsjøvann og tilsettes forskjellige mengder fosfat (fra 0 til 200 $\mu\text{g P/L}$). Suspensjonene settes på ristebord ved konstant temperatur (17 °C) i 24 timer og sentrifugeres før måling av likevektskonsentrasjonen av fosfat. Data framstilles som konsentrasjon av adsorbert P på partiklene (som $\mu\text{g P/mg TV}$) mot konsentrasjon av løst uorganisk P (som $\mu\text{g P/L}$). Hvis det er en rettlinjet sammenheng mellom de to tyder dette på at partiklene ikke er mettet på fosfat og at fordelingen av fosfat mellom partikler og vann kan beskrives med en konstant partisjonskoeffisient. Sammenhengen kan beskrives med to parametere. S_0 er likevektskonsentrasjonen mellom vann og partikler: partiklene avgir P når den ytre konsentrasjonen er mindre enn S_0 og tar opp P når den er større enn S_0 . P_0 er den mengde P som kan desorberes (frigis) fra partiklene når den ytre fosfat-konsentrasjonen går mot null, for eksempel på grunn av opptak i biota.



Figur 8. Netto P-fluks fra resuspendert sediment i Vanemfjorden sommeren 2005, basert på målinger av løst uorganisk P (DIP, 0-4 m), partikulært uorganisk materiale (PIM, 0-4 m) og pH (0 m), samt adsorpsjonsisotermene fra figur 7, interpolert henholdsvis lineært med pH (rød kurve) eller OH⁻ (blå kurve). Begge estimater antar at suspenderte partikler har en gjennomsnittlig oppholdstid i frie vannmasser på ett døgn

Sedimentpartikler fra grunt vann (4 m) i begge bassenger hadde ikke signifikante mengder adsorbert P ved pH = 7 (figur 7). Det vil si at disse partiklene heller er et sluk heller enn en kilde for P når de suspenderes av vind eller bioturbasjon. Hvis pH økes til 9,5 som er en fullt realistisk pH deler av

sommeren i Vanemfjorden, så vil begge sedimentene avgi P så lenge den ytre konsentrasjonen er mindre enn ca. 50 $\mu\text{g P / L}$. Begge sedimentene vil da maksimalt kunne avgi ca 0,2 $\mu\text{g P / mg TV}$. Dette tilsvarer omtrent den mengden som ble funnet i den NaOH-ekstraherbare fraksjonen av total fosfor i overflatesedimentet (figur 4). De dypereliggende sedimentene på 9-10 meter vil antagelig utsettes sjeldnere for resuspensjon, og er derfor ikke blitt vasket rene for desorberbart P slik som grunnere sedimenter bærer preg av. Disse sedimentene vil kunne avgi P så lenge den ytre konsentrasjonen er mindre enn 10 – 20 $\mu\text{g P / L}$, selv ved nøytral pH (høy pH er sjelden relevant på disse dypene). Kapasiteten er vesentlig lavere enn for 4m-sedimentet ved høy pH, bare 4 – 8 $\mu\text{g P / mg TV}$.

Betydningen av resuspendert sediment for fosforfrigjøring i Vanemfjorden. Vi kan gjøre en grov analyse som antyder betydningen av resuspendert sediment i Vanemfjorden, hvor vi vil forvente de største effektene siden det er her vi har mest suspendert materiale og høyest pH. Hvis vi kjenner konsentrasjonen av løst uorganisk P (fritt ortofosfat PO_4^{3-}) og har en relevant adsorpsjonsisoterm som i figur 7, så kan vi beregne hvor mye P som kan bindes (adsorberes) eller frigjøres (desorberes) per mengde partikler ved likevekt. Hvis vi kjenner konsentrasjonen av suspenderte sedimentpartikler kan denne mengden regnes om til en konsentrasjon av P som kan bindes eller frigjøres fra partiklene. Hvis en også vet hvor lenge en sedimentpartikkel i gjennomsnitt holdes svevende før den synker til bunns igjen, så kan denne konsentrasjonen regnes om til en fluks av P bundet til eller frigjort fra suspenderte partikler per dag.

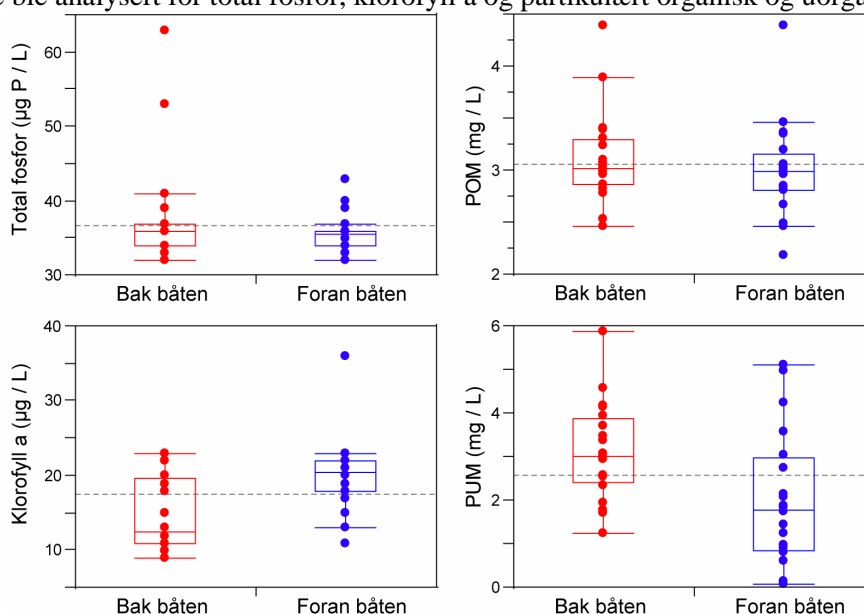
Siden vi bare kjenner adsorpsjonskinetikken ved to pH-verdier (7 og 9,5) er vi nødt til å gjøre ytterligere antagelser for å kunne interpolere mellom disse. Naturlige valg vil enten være å interpolere lineært med pH eller med konsentrasjonen av OH^- , som jo øker eksponentielt med pH. Erfaringsmessig vil adsorpsjonsegenskapene endre seg ulineært med pH slik at en interpolasjon i forhold til OH^- kan virke riktigst.

Vi har ingen direkte målinger av oppholdstiden til resuspenderte partikler. Men vi vet fra direkte målinger at ca. 80 % av partiklene i overflatesedimentet har en synkehastighet som er større enn 1 m pr. time, noe som burde tyde på at oppholdstiden i de frie vannmassene er ganske kort. Samtidig vet vi at konsentrasjonen av partikulært uorganisk materiale varierer relativt lite fra uke til uke selv om vinden kan variere mye i samme tidsrom, noe som tyder på oppholdstiden ikke kan være så veldig kort (ellers burde korttidsvariasjonene vært større). Til sammen antyder dette en oppholdstid i størrelsesorden ett døgn, nødvendigvis med meget stor usikkerhet.

Figur 8 viser resultatet av to beregninger basert på målte verdier for pH, løst uorganisk P (fritt ortofosfat PO_4^{3-}) og partikulært uorganisk materiale i Vanemfjorden sommeren 2005. Konsentrasjonene av løst uorganisk P er overraskende høye gjennom hele sommeren, noe som antyder at lys heller enn fosfor er den primære begrensingsfaktoren for algeveksten i Vanemfjorden. Overflatemålingene av pH er alltid høyere enn målinger på blandprøver 0-4 m, slik at figur 8 vil gi et maksimumsestimert av effekten av høy pH på frigivelse (desorpsjon) av fosfor fra resuspenderte sedimenter. Hvis en interpolerer isotermene lineært med OH^- vil en i en kort periode i juli med høyest pH ha en netto tilførselsrate fra sedimentet til de frie vannmassene på opp mot 1 $\mu\text{g P / L / d}$. På sesongbasis vil det likevel være en netto fluks til sedimentene i størrelsesorden 4 $\mu\text{g P / L}$, eller 0,02 $\mu\text{g P / L / d}$. Hvis en derimot interpolerer lineært med pH vil den maksimale netto tilførselsraten bli lavere, men perioden med netto positiv tilførsel lengre, slik det på sesongbasis blir en netto tilførsel fra sedimentene på 6 $\mu\text{g P / L}$, eller 0,03 $\mu\text{g P / L / d}$. Hvis en velger større eller mindre verdier for oppholdstida til partiklene så vil estimatene endre seg tilsvarende, men forskjellen i fortegnet på nettofluksen vil være uavhengig av dette. En får altså et positivt eller negativt nettobidrag fra resuspenderte sedimenter etter som hvordan en velger å interpolere. Det sier oss først og fremst at nettoeffekten er liten og at dette står fast selv om de absolutte usikkerhetene i estimatene er store. Effekten vil være enda mindre i Storefjorden hvor både pH og konsentrasjonene av suspenderte partikler og uorganisk P er lavere.

Betydning av båttrafikk for oppvirvling av sediment. Det blir antatt at både antall fritidsbåter og størrelse/motorkraft av disse er økt i Vansjø, uten at det finnes offisielle statistikker som kan underbygge dette. Det har derfor blitt spekulert rundt hvorvidt en økende trafikk av fritidsbåter kan bidra til økt oppvirvling av sediment, og dermed til interngjødslingen.

Vi gjorde et lite eksperiment 3. oktober 2005, hvor vi prøvde å kvantifisere effekten av å kjøre med en relativt kraftig båt (17' Buster aluminiumsbåt med 50 Hk påhengsmotor) over grunnområdene i vestre Vansjø, sørvest for Dillingøy. Motorstammen ble skråstilt for at båten skulle grave mest mulig når motoren ble kjørt på maksimal effekt. Slik sett er dette eksperimentet nok et ekstremtilfelle i forhold til typiske båter og båtbruk på Vansjø. Det ble i alt tatt 20 parallelle overflateprøver før og etter båten hadde passert over et område. Dybde og posisjon i prøvetakingsstedet ble registrert med ekkolodd og GPS. Prøvene ble analysert for total fosfor, klorofyll a og partikulært organisk og uorganisk materiale.



Figur 9. Boksploott av total fosfor, klorofyll, partikulært organisk og uorganisk materiale (POM og PUM) i overflateprøver tatt foran og bak en båt som kjører med full motoreffekt (50 Hk) over grunnområdene sørvest for Dillingøy.

Det var ingen signifikant forskjell total fosfor og partikulært organisk materiale (POM) mellom prøver tatt bak og foran båten (Wilcoxon rank-sum test; $p = 0,40$ og $0,45$). Derimot var det signifikant forskjell mellom foran og bak for både partikulært uorganisk materiale (PUM) og klorofyll (Wilcoxon rank-sum test; $p = 0,012$ og $0,004$), men med motsatt fortegn. Det ble altså mer PUM og mindre klorofyll etter at båten hadde passert, mens det var ingen effekt på POM og total fosfor. En mulig forklaring på dette kan være at det var uvanlig vindstille denne dagen slik at det var tydelig ansamling av blågrønnalger i overflaten. Når båten passerte ble algene virvlet ned mens sediment ble virvlet opp, noe som gir seg utslag i at klorofyll går ned mens PUM går opp. For total fosfor og POM motvirker disse to effektene hverandre slik at nettoresultatet blir null.

Oppvirvling av sediment fra båttrafikk har en veldig lokal effekt som maksimalt kan øke mengden partikulært uorganisk materiale med 50 %. Den samlede effekten av båttrafikken blir antagelig svært liten i forhold til den vinddrevne oppvirvlingen i Vansjø. Som antydnet ovenfor så er nettoeffekten av vinddrevet resuspensjon på fosfortilførslene til Vansjø antagelige relativt liten siden P-innholdet i sedimentene er så lavt i utgangspunktet. På bakgrunn av dette blir effektene av båttrafikk antagelig et ubetydelig bidrag til fosfortilførslene i Vansjø.

2.3 Konklusjoner

Sedimentene i Vansjø er fattige på organisk materiale. Dette vil si at selv om Vansjø har høy produksjon så gjør en effektiv nedbrytning at lite av dette lagres i sedimentene. Store grunne områder og sterk vindpåvirkning er begge naturgitte forhold som gir rask og effektiv omsetning i Vansjø: organisk materiale som synker til bunns vil med stor sannsynlighet kunne virvles opp igjen av vinddrevne strømmer. Hver gang partikler synker ned etter en slik episode vil de synke ned igjen litt fattigere på organisk materiale, og på litt større dyp. Slik blir det også til at det er relativt stor akkumuleringsrate i de aller dypeste sedimentene i Vansjø, mens store arealer antagelig har praktisk talt ingen sedimentakkumulering (erosjonssediment). Hvis vi ser på hele Vansjø samlet, vokser antagelig tykkelsen på sedimentet med ca. 1 mm pr. år, som er temmelig typisk for mange lavlandsinnsjøer.

Sedimentene i Vansjø har relativt lave konsentrasjoner av fosfor. Særlig hvis en sammenlikner med for eksempel innsjøer i jernrike morenelandskap som Frøylandsvatnet på Jæren, hvor konsentrasjonen av fosfor i sedimentene er omtrent 10 ganger høyere enn i Vansjø. I tråd med dette har Frøylandsvatnet også betydelig høyere konsentrasjoner av de lettest mobiliserbare sedimentfosforfraksjonene (P adsorbent til partikler og løst i porevann). Vi ser dessuten litt overraskende at fosforkonsentrasjonene i overflatesediment er lavest i de mest eutrofe vestre bassengene, og at konsentrasjonen øker nedover i sedimentet i hele innsjøen. Den romlige fordelingen av fosforfraksjoner viser at sedimentene i vestre Vansjø ikke bare er fattigere på fosfor enn resten av Vansjø, men at disse sedimentene også inneholder de laveste andelene av labile fosforfraksjoner.

At fosforinnholdet i sedimentene synes å være høyere i eldre (dypere) sedimenter kan tolkes enten som at sedimentene tilføres mindre fosfor, eller at de har fått mindre evne til å binde fosfor. Når sedimentene i Storefjorden ble grundig undersøkt for 25 år siden var tendensen den motsatte med høyest fosforkonsentrasjon i det øverste (yngste) laget. Det er nærliggende å tolke dette som en opplading av sedimentene i Storefjorden under økende eutrofiering på 1970-tallet og en tilsvarende tømning som resultat av reduserte tilførsler i seneste tid.

Fosfor som er lagret i sedimentene kan frigjøres tilbake til vannmassene under bestemte forhold. Dette kalles gjerne interngjødsling, selv om uttrykket er upresist: fosfor som lekker ut fra sedimentene har også opprinnelig blitt tilført utenfra. Interngjødsling blir først og fremst et problem når fosfor som er tilført lengre tid, kanskje flere tiår, begynner å lekke tilbake til vannmassene. Denne prosessen vil være spesielt betydningsfull i en innsjøes fosforbudsjett når de ytre tilførslene avlastes men vil alltid til slutt avta igjen, selv om det kan ta lang tid å komme dit hvis sedimentene har et stort fosforlager. Effekten av interngjødsling kan være meget demoraliserende hvis en har gjort store og dyre tiltak i nedbørfeltet men ikke ser noen forbedring i innsjøen.

For vestre Vansjø viser alle målinger og forsøk vi har gjort at interngjødslingen må være betydelig mindre man i utgangspunktet hadde trodd. Fosforfrigjøring i bunnvannet under oksygenfrie forhold angår så små områder og er av så begrenset omfang at denne prosessen kan sees bort fra. Fosforfrigjøring fra oppvirvlede sedimenter på grunnere vann kan ha en betydning i en kortere periode midt på sommeren, men på årsbasis er antagelig nettoeffekten nær null. En kan likevel ikke se helt bort fra at den korte perioden med netto frigjøring fra oppvirvlede sedimenter kan være kritisk for den for tiden årlige *Microcystis*-oppblomstringen i vestre Vansjø.

Dette betyr at sedimentene ikke har noe stort lager av mobiliserbart fosfor som potensielt kunne ha forsinket en forbedring av vannkvaliteten i lang tid. Det betyr også at man må se til andre kilder enn sedimentene for å forklare at vestre Vansjø har ca. 25 % høyere total fosfor enn østre Vansjø, selv om det i prinsippet er det samme vannet. Lokale kilder i små delnedbørfelt til vestre Vansjø er antagelig den viktigste årsaken til dette (Bechmann m. fl. 2006).

3. Fiskens betydning

3.1 Innledning

Det er mange undersøkelser som viser at fisk påvirker økologiske prosesser som gir økt produksjon av alger (Schindler et al. 1997, Vann & Layne 1997). De økologiske prosessene er dels knyttet til nedbeiting og er derved med på å endre næringskjedenes struktur, dels dreier det seg om resirkulering av næringsalter. De gruppene av fisk som vanligvis knyttes til algeproduksjon er fisk som betegnes som planktivore (konsumerer zooplankton), benthivore (konsumerer bunndyr) arter, eller er predatorarter (rovfisk). Denne koblingen mellom spesielt benthivore og planktivore fiskearter, næringsalter og derved produksjon av alger forklares gjennom tre mekanismer.

- Fisk kan konsumere sedimenter med mye fosfor og avgi fosfor til alger gjennom ekskresjon (Brabrand et al. 1990, Schindler et al. 1993). I tillegg vil fiskens roting i sedimentene under næringsopptaket gi et bidrag utover det som konsumeres, men dette vil ikke spres på samme måte i vanmassene.
- Fisk konsumerer zooplankton og modifierer strukturen i zooplanktonsamfunnet, som forandrer resirkulering av fosfor gjennom zooplanktonleddet (Sterner et al 1992).
- Fisk konsumerer store algespisende zooplankton, der mindre forekomst av algespisende zooplankton gir mer alger (Carpenter et al 1985).

Fiskens resirkulering av fosfor gjennom konsum av sedimenter er en del av de mekanismer som går under samlebegrepet ”resuspensjon” fra sedimenter. Her inngår tilbakeføring av fosfor som skyldes effekt av vind, pH, oksygenvinn, bunndyr, og også fisk.

Det er i dette kapittelet gitt en beregning av fosforbidrag fra fisk i Vestre Vansjø. Beregningene tar utgangspunkt i fisk som spiser sediment (ikke zooplankton og bunndyrspisende fisk); beregning av fiskens bidrag er basert på:

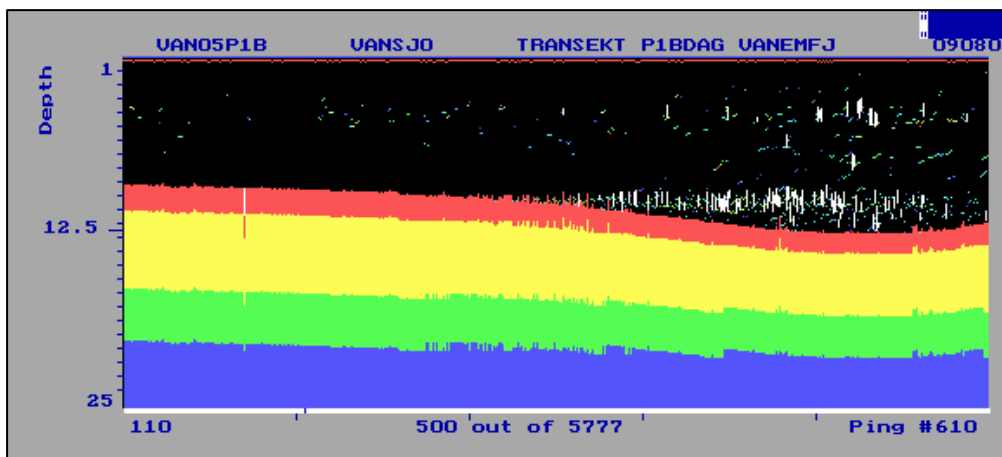
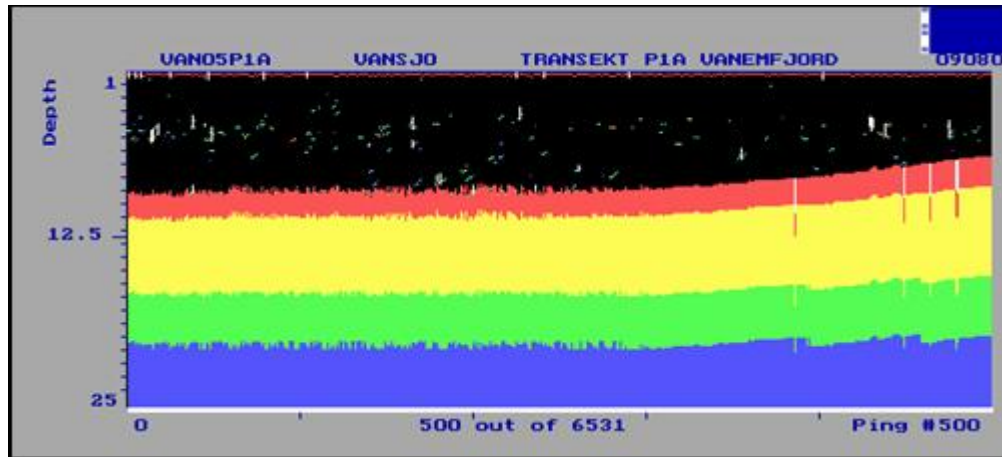
- Beregning av total fiskebiomasse i ulike størrelsesgrupper av mort og arter tilhørende ”brasmegruppen” (brasme, flire, hybrider mort/brasme) basert på garnfangster og kvantitativ hydroakustikk i Vestre Vansjø 2005, se Bjerkeng *et al.* 1991.
- Analyse av fiskens næringsvalg i Vestre Vansjø i august 2005.
- Fosfor ekskresjonsrater som funksjon av fiskens størrelse basert på litteraturverdier, se Brabrand *et al.* 1990.
- Korreksjon for de temperaturer som er målt i Vestre Vansjø 2005.

3.2 Fiskebiomasse og bestandens størrelsesfordeling

Tetthet og størrelsesfordeling i bestanden av fisk i Vestre Vansjø er beregnet ved hydroakustikk langs antatt representative transekter 2002, 2003 og 2005 i august eller september. Det er benyttet ekkolodd av typen Simrad EY-M, og metodikk er beskrevet i Lindem og Sandlund (1984).

Ekkosignalstyrkene angir fiskens målstyrke, ’target strength’ TS, i desibel (dB). Disse verdiene er en funksjon av fiskens størrelse og kan omregnes til fiskelengde i cm (L). Det er valgt å benytte regresjonen gitt av Lindem og Sandlund (1984):

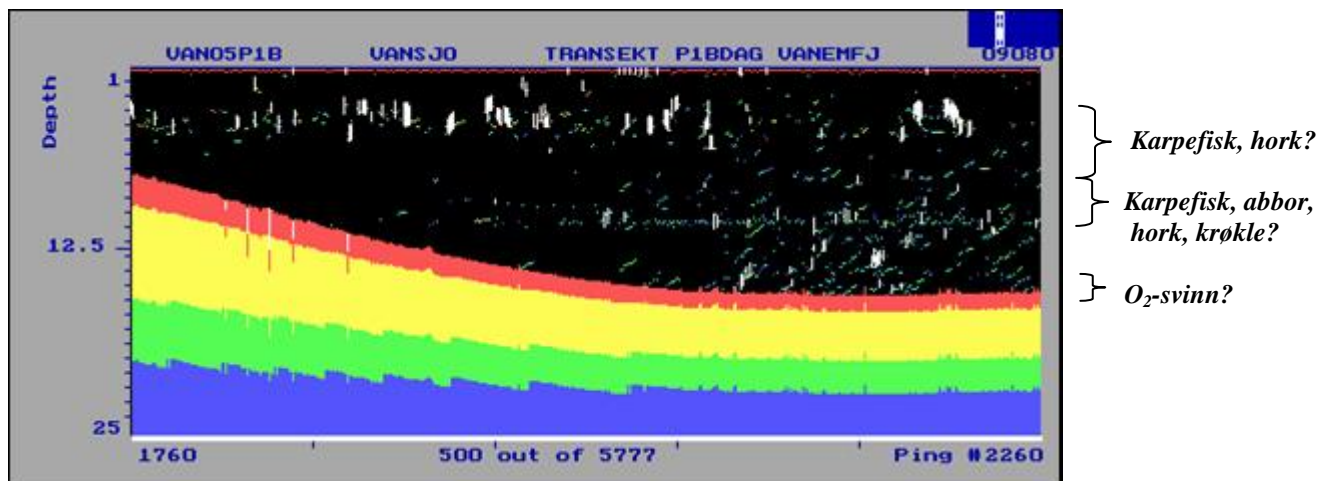
$$TS = 20 \cdot \log_{10}(L) - 68$$



Figur 10. Ekkogrammer fra Vanemfjorden, Vansjø 7.08.05 på dagtid. Det vises både enkelt fisk og stimer av fisk. Der totaldypet er større enn ca. 10 m vises et markert sjikt med stimer i vann sjiktet 10-12 m.

Denne regresjonen er utarbeidet på grunnlag av ekkolodd /trålundersøkelse på fiskesamfunn bestående av sik, lagesild og krøkle i Mjøsa. Imidlertid er det ikke funnet signifikante forskjeller mellom denne regresjonen og regresjoner basert på bestander dominert av mort (Bjerkeng et al. 1991).

På grunnlag av ekkosignalstyrke og regresjon mellom signalstyrke og fiskelengde er lengdefordelingen i bestanden som oppholder seg i transektet beregnet. Fisketetthet for beregninger av biomasse fisk i dette notatet er gjort på grunnlag av ekkoloddundersøkelse 7. august 2005. Det ble da kjørt tre parallelle transekter i Vanemfjorden i Vestre Vansjø. Typisk ekkogram for 2005 er vist i Fig.10 og 11



Figur 11. Ekkogrammer fra Vanemfjorden, Vansjø 7.08.05 på dagtid. Det vises både enkelt fisk og stimer av fisk. Der totaldypet er større enn ca 10 m vises stedvis markerte stimer av fisk i dybdesjiktet 2-5 m under overflaten.

Beregnet antall fisk fordelt på størrelsesgrupper er vist i Tabell 1. Antallet er basert på ekkosignaler mottatt fra et valgt dybdeintervall på 2-8 m under transduseren (lydkilden). Siden transduseren er montert 1 m under vannoverflaten, vil beregningene dekke dybdeintervallet 3-9 m under vannoverflaten. Det er valgt å inkludere dybdesjiktet 1-3 m under overflaten, men å utelukke 0-1 m sjiktet (dominert av laue). Det er derfor lagt inn en korreksjon som forutsetter at fisketettheten i sjiktet 1-3 m er den samme som den i 3-9 m. Korrigerte verdier for fisketetthet vil da dekke dybdeintervallet 2-9 m under overflaten.

Tabell 1. Antall fisk pr. ha innsjøoverflate beregnet ved hydroakustikk 7. aug. 2005 i Vestre Vansjø, Vanemfjorden, for dybdeintervallet 2-8 m under transduseren (lydkilden) over områder langs 6 transekter. Fiskestørrelse er basert på ekkosignalstyrke og beregnet etter Lindem og Sandlund (1984).

Signalstyrke (dB)	Antall fisk ha ⁻¹ innsjøoverflate	Fiskestørrelse (cm)
-56	144	4,0
-54	2058	5,0
-52	2032	6,5
-50	1193	8,0
-48	502	10,0
-46	505	12,6
-44	311	15,9
-42	323	20,0
-40	151	25,0
-38	171	31,0

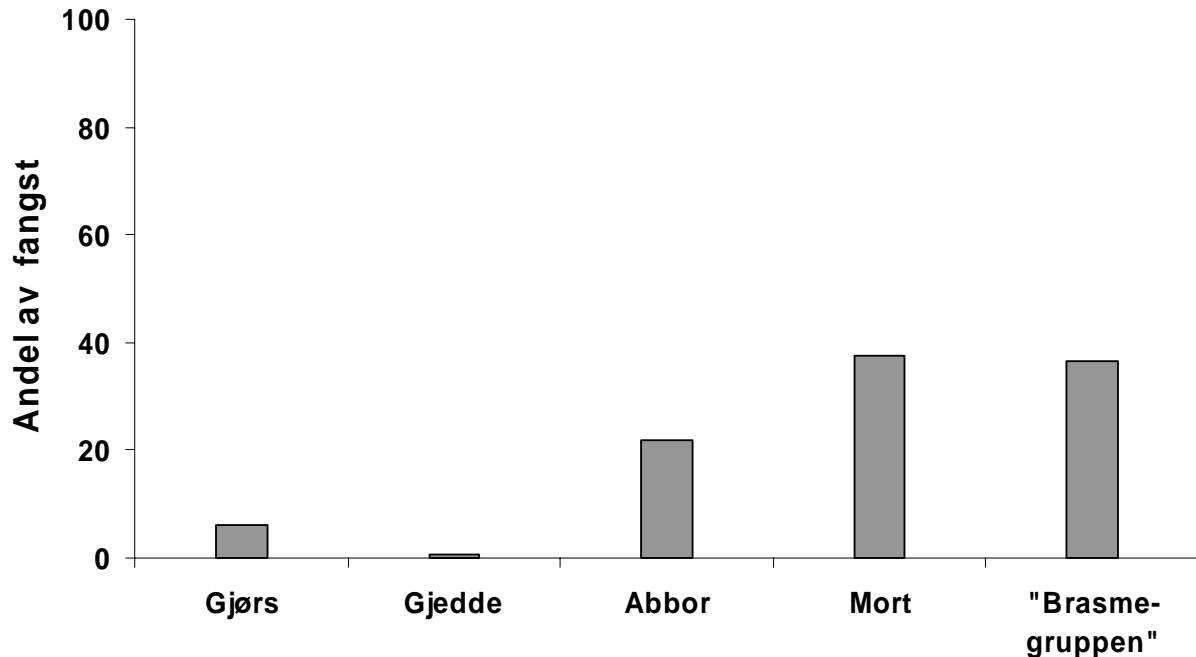
De fiskeartene som er tilstede langs transektene er dokumentert ved garnfangster som er gjennomført samtidig med ekkoloddundersøkelsen. Det er en usikkerhet knyttet til hork, som tidligere (Pethon 1980) er vist å ha svært store bestander i Vestre Vansjø. Denne opptrer i stim og er pga. sitt næringsvalg utelatt i beregning av P-bidrag. Det er benyttet 4 timers garnfiske med bunn garn med maskeviddene 10 16 19.5 22.5 24 29 45 og 52 mm. Garna ble satt på 5-10 m's dyp der ekkogrammene viste innslag av fisk.

For å beregne fiskens biomasse er det benyttet regresjoner mellom vekt (W i gr.) og lengde (L i cm).

For mort: $W = 0,00398 \cdot L^{3,3}$ (Brabrand unpubl.)

For brasme: $W = 0,0129 \cdot L^{3,09}$ (Tierney et al. 1999)

Prosentvis fordeling av fiskearter på garn i Vestre Vansjø i mai 2005 er vist i figur 12.

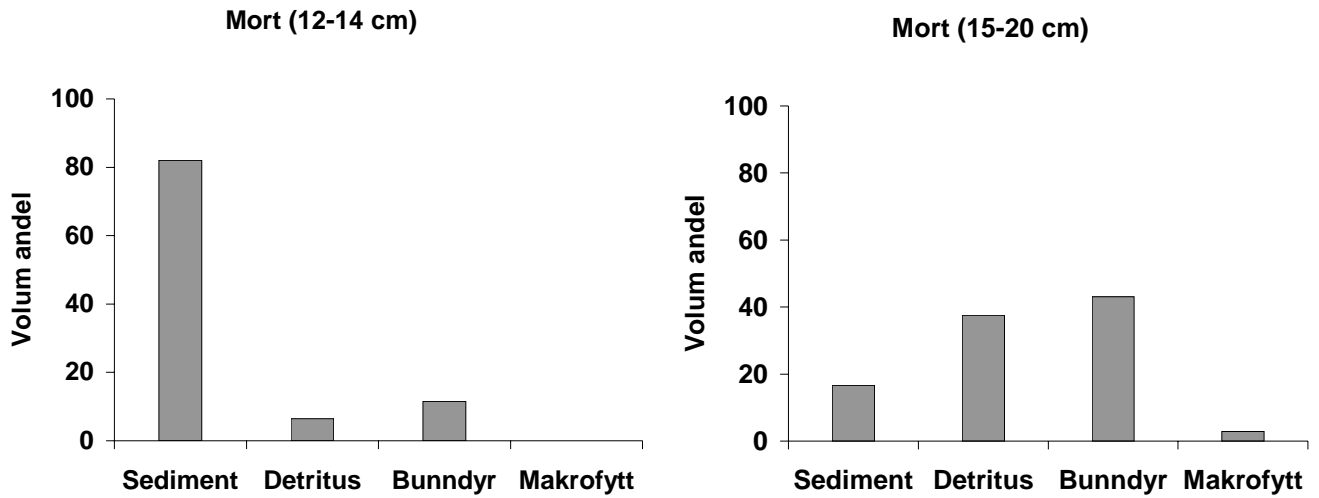


Figur 12. Prosentvis fordeling av fiskearter på garn i Vestre Vansjø, Vanemfjorden 7.08.2005. "Brasme-gruppen" består av brasme, flire og hybrider mellom mort og brasme. Karpefisk som gruppe utgjorde 74 % av totalfangsten.

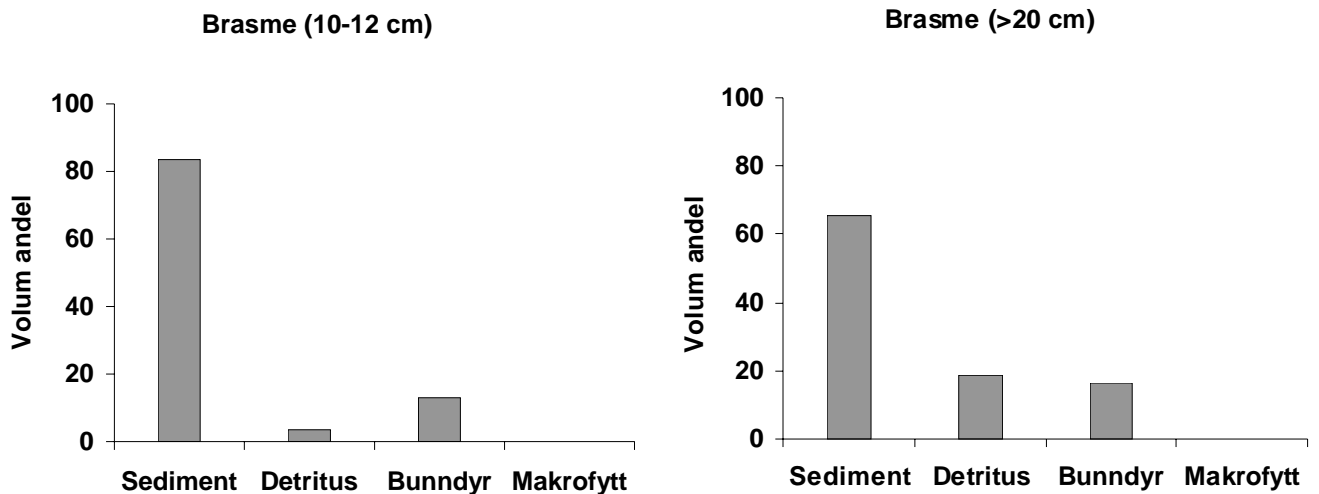
3.3 Fiskens næringsvalg

Mage/tarminnhold av karpefiskartene mort og brasme ble analysert. Målsettingen var primært å undersøke hvorvidt fisken konsumerte bunnsedimenter, detritus eller rent animalsk næring. Tre lengdegrupper av hver art ble analysert, og det benyttet en modifisert metode fra Ricker (1968) for primært å angi prosentvolumet av de ulike komponentene sedimenter, detritus, bunndyr og vegetasjon (makrofytter).

Både brasme og mort større enn ca 10 cm konsumerte betydelig mengder av typisk sedimentert materiale, vekselvis av både sand/mudder og preg av leire med mer eller mindre dødt organisk materiale (detritus). Det totalt dominerende næringsdyr var larver av fjærmygg. Disse er nedgravd i substratet, og vil følge med når fisker suger i seg bunnmaterialet mer eller mindre selektivt. For de grupper av fisk som er undersøkt utgjør sedimenter og detritus en andel på 80 %. Det er helt tydelig at næringsopptaket skjer ved et lite selektivt næringsøk ved opptak av bunnmateriale. For individer mindre enn ca. 10 cm ble det konsumert hovedsakelig zooplankton, men enkelte også betydelige mengder påvekstalger.



Figur 13. Prosentvis andel av mage/tarminnhold hos to lengdegrupper av mort tatt på garn på dagtid i Vanemfjorden i august 2005.



Figur 14. Prosentvis andel av mage/tarminnhold hos to lengdegrupper av brasme tatt på garn på dagtid i Vanemfjorden i august 2005.

3.4 Ekskresjonsrate

For beregning av fiskens ekskresjon av fosfor er det korrigert for temperatur etter Persson (1982). Han beskrev følgende sammenheng mellom ekskresjonsrate (R = gutt evacuation i timer) og temperatur (T = °C):

$$R = 0,032 \cdot e^{0,115 \cdot T}$$

Fra denne sammenhengen er bare temperaturavhengigheten (konstanten 0,115) benyttet, mens konstanten 0,032 er erstattet med et vektavhengig uttrykk og justert til 22 °C etter:

$$R = 13,5 \cdot W \quad \text{for fisk mindre enn 2,8 g}$$

$$R = 22 \cdot W^{0,53} \quad \text{for fisk større enn 2,8 g,}$$

der R er $\mu\text{g SRP time}^{-1} \text{fisk}^{-1}$.

Det vektavhengige uttrykket er basert på ekskresjonsforsøk med mort og brasme fra Gjersjøen (forsøk kjørt ved 17 °C) og primærdata fra Lamarra (1975, forsøk kjørt ved 22 °C), se Brabrand, Faafeng and Nilssen (1990). Forsøkene ble utført på fisk som ble samlet inn i felt og plassert i kjent vannvolum, der ekskresjon av fosfor, nitrogen og jern ble målt som økning i konsentrasjonen, med en lineær fase som varte i 18-20 timer. Disse forsøkene ble utført på sedimentspisende mort, der andelen sedimenter i mageinnholdet var 60-90 % av totalt mageinnhold (Brabrand et al. 1984) og nær det som ble observert i Vansjø. Basert på disse forsøkene ble det laget følgende sammenheng mellom fosforekskresjon og fiskestørrelse for mort:

For fisk mindre enn 2,8 g settes ekskresjonsraten til en fast verdi:

$$P_{17} = 7,6 \mu\text{g SRP time}^{-1} \text{g}^{-1}$$

$$P_{22} = 13,5 \mu\text{g SRP time}^{-1} \text{g}^{-1}$$

For fisk større enn 2,8 g:

$$P_{17} = 12,4 \cdot W^{-0,47}$$

$$P_{22} = 22 \cdot W^{-0,47}$$

Disse ekskresjonsverdiene er korrigert for mht. temperatur etter sammenhengen:

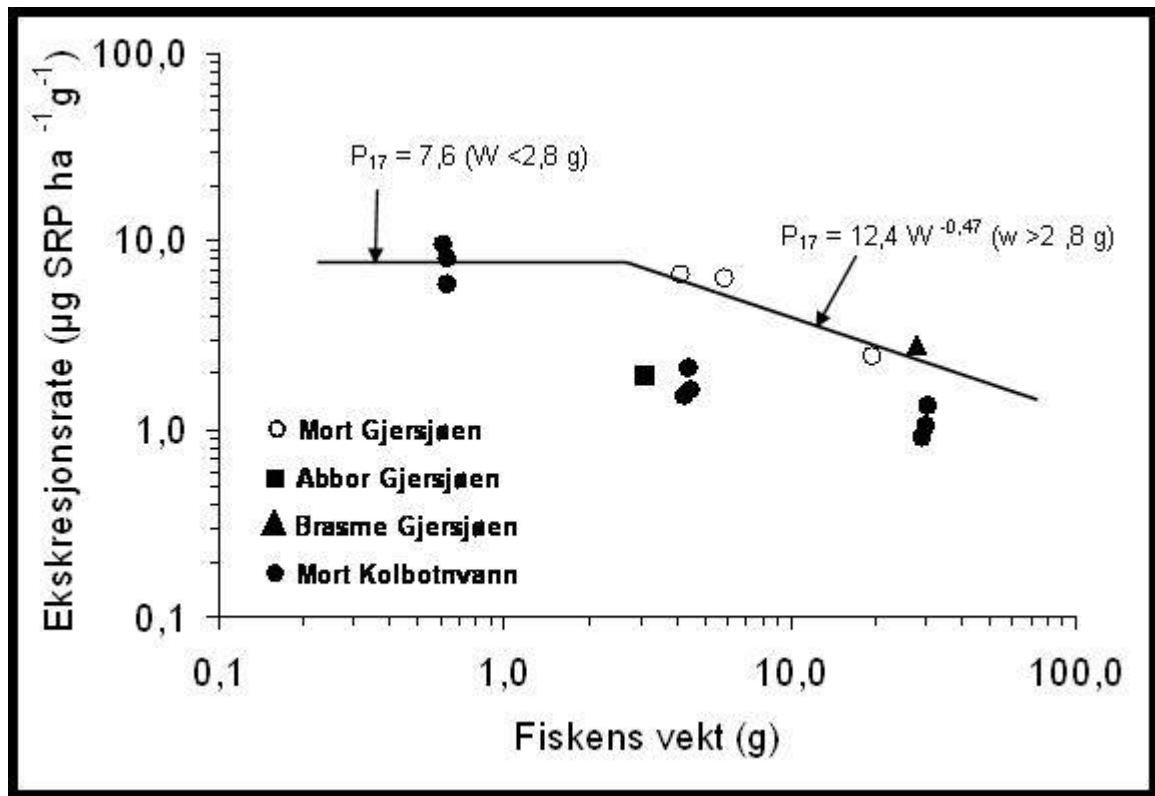
$\ln R = \ln R_{22} + p \cdot (T - 22 \text{ °C})$, der $p = 0,115$, temperaturavhengigheten, er hentet fra Persson (1982).

Ved beregninger for Vansjø er det benyttet månedlig målt temperatur for epilimnion i Vanemfjorden for 2005 (mai = 13 °C, juni = 15 °C, juli = 19 °C, august = 18 °C, september = 10 °C, oktober = 5 °C). Basert på artssammensetningen på garnfangstene er det forutsatt at 74 % av fiskebiomassen beregnet ved hydroakustikk er karpefisk, og fosforekskresjon er basert på denne andelen karpefisk av totalt antall fisk. Av karpefisk vil mort, brasme og flire være typiske sedimentspisere. Disse artene utgjør den helt overveiende delen av biomassen karpefisk. Suter (nyetablert), laue og sørv konsumerer også ikke-animalsk næring, men disse artene er mer utpregete detritus- og plantespisere. Med sin karakteristiske munnutforming er det også lite sannsynlig at sørv er en typisk sedimentspiser i nærvær av mort, brasme og flire. Sørv er derfor ikke inkludert i brasmegruppen i denne sammenheng. Suter har liten bestand, og inngikk ikke i fangstene i august 2005. En økning i denne artens forekomst i fremtiden kan ikke utelukkes, og vil med stor sannsynlighet tilhøre samme funksjonelle gruppe som "brasmegruppen".

3.5 Beregnet fosformengde fra fisk i Vestre Vansjø

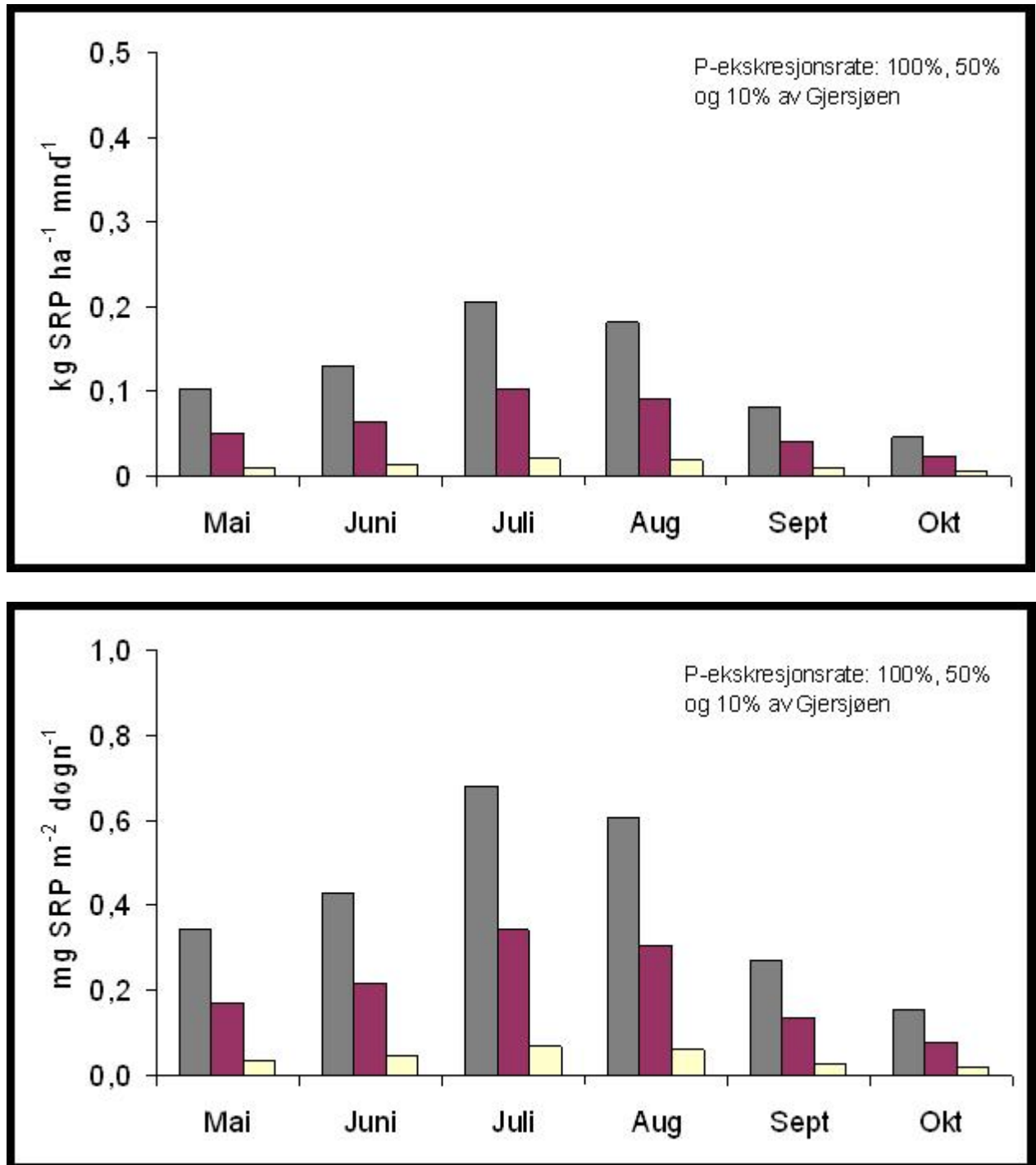
Det er valgt å beregne fosforekskresjon fra fisk som genererer fosfor fra sedimenter som konsumeres og spres gjennom faces og ekskresjon. Av sedimentspisende fisk er det skilt mellom mort og "brasmegruppen", der sistnevnte består av brasme, flire og hybrider mellom brasme og mort.

Av disse to gruppene er det i beregningene benyttet fisk som er større enn 10 cm, da det er denne gruppen som klart skiller seg ut med sitt betydelige opptak av sediment/detritus. Bidraget fra mort og "brasmegruppen" er beregnet separat, og basert på den andel de utgjorde i garnfangster



Figur 15. Sammenheng mellom fosfor fra fisk (SRP) ved 17 °C (P_{17}) og fiskens vekt (W) hos sedimentspisende mort (\circ) og brasme (\blacktriangle) fra Gjersjøen og bunndyrspisende mort (\bullet) fra Kolbotnvann og bunndyrspisende abbor (\blacksquare) fra Gjersjøen. Data også basert på Lamarra (1975) og Brabrand, Faafeng, Nilssen (1990).

av det totale antall fisk beregnet ved hydroakustikk, begge deler utført i august 2005. For øvrig er det forutsatt at brasme, flire og mort har samme ekskresjonsrate ($\mu\text{g SRP} \cdot \text{time}^{-1} \cdot \text{g fisk}^{-1}$), og at temperaturavhengigheten er den samme.



Figur 16. Beregnet mengde fosfor (SRP) regenerert fra sedimentspisende fisk i Vestre Vansjø, basert på biomasse av fisk over 10 cm av mort (66 kg ha⁻¹) og "brasmegruppen" (107 kg ha⁻¹). Det er benyttet ekskresjonsrater som de funnet for sedimentspisende mort i Gjersjøen (antatte maksimalverdier) og henholdsvis 50% og 10% av disse. Øverst: mg SRP m⁻² døgn⁻¹, nederst: kg SRP ha⁻² mnd⁻¹.

Det ble beregnet en tetthet på 7 400 fisk ha⁻¹ i områder av Vanemfjorden som i dybdesjiktet 2-8 m under transduseren i august 2005. Basert på garnfangster var 37 % av dette mort og 38 % tilhørende "brasmegruppen". Dette ga en biomasse på 70 kg ha⁻¹ mort og 117 kg ha⁻¹ av "brasmegruppen"

(korrigert til dybdesjiktet 2-9 m under vannoverflaten) for alle lengdegrupper, Biomassen av fisk større enn ca 10 cm er beregnet å være henholdsvis 66 kg mort og 107 kg i ”brasmegruppen”, og det er disse beregningene som er lagt til grunn for P fra fisk.

Denne fiskebiomassen er beregnet å bidra med et internbidrag av P som skyldes ekskresjon gitt i Fig. 16. Den maksimale mengden ble beregnet til 0,68 og 0,6 mg m⁻² døgn⁻¹ i henholdsvis juli og august, noe som tilsvarer 0,20 kg SRP ha⁻¹ mnd⁻¹ i juli og august 0,18 kg SRP ha⁻¹ mnd⁻¹ i august.

Dette estimatet er basert på at ekkogrammene er representative, at garnfangster gir et korrekt bilde av artssammensetningen og at ekskresjon av fosfor fra fisk i Vestre Vansjø er den samme som i Gjersjøen for mort og brasme, og for sedimentspisende karpe (Lamarra 1975).

Det relative standard avviket i tilsvarende beregninger for Gjersjøen er av Bjerkeng *et al.* og Brabrand *et al.* beregnet til ca 35 %. Den statistiske feilkilden er angitt å komme fra tre kilder, beregningsgrunnlaget i ekskresjonsrater (35-80 % av total varians), fisketetthet beregnet ved hydroakustikk (5-50 % av total varians) og beregning av fiskelengde basert på ekkosignalstyrke (ca. 10 % av total varians).

De mest uoversiktlige ”feilene” er sannsynligvis knyttet til hvorvidt ekkoloddregistreringene og artssammensetningen i garnfangstene er representative (døgnvariasjon, garnseleksjon), og om ekskresjonsratene fra Gjersjøen er overførbare til å gjelde Vestre Vansjø. Transektet ved ekkoloddregistreringene er gjort i Vanemfjorden på dagtid. Dette kan underestimere mengden karpefisk fordi denne kan primært stå littoralt. Garnfangstene viste imidlertid store mengder karpefisk også uavhengig av littoralsonen på dagtid. Det er imidlertid større stimer som er ukjente partikler, og som kan være lite fangbar fisk (krøkle, hork) eller svevemygg.

De bestandsberegninger som er foretatt i sammenliknbare sjøer viser biomasser av karpefisk i den størrelsesorden som er beregnet for Vestre Vansjø. I Gjersjøen ble det på grunnlag av ekkolodd og nær samme beregninger beregnet en pelagisk biomasse av mort på 300 kg ha⁻¹ (Bjerkeng *et al.* 1990), mens det i Årungen i perioden 1979-83 ved merking-gjenfangst ble beregnet en biomasse (littoralt og pelagisk) på 150-700 kg ha⁻¹ (Borgstrøm 1984). I Tunevann ble det i forbindelse med bestandsreduksjon i 2003-2004 tatt opp et samlet kvantum på 158 kg ha⁻¹, hvorav karpefisk, spesielt mort, totalt dominerte fangstene.

En beregnet biomasse i Vestre Vansjø av mort på 70 kg ha⁻¹ og av arter i ”brasmegruppen” på 117 kg ha⁻¹ gir et samlet estimat på 187 kg ha⁻¹ karpefisk. Dette må betegnes som rimelig ut fra forventningen basert på total artssammensetning og områdets eutrofe tilstand. At karpefisk dominerer i Vestre Vansjø er tidligere vist i notfangster i Brabrand (1979) og i fangster med storruse (Hauger 1980). I storrusefangstene utgjorde brasme 45 %, flire 7,5 % og mort 37 %. I disse storrusefangstene ble det tatt svært lite gjedde, abbor og gjørs, og disse artene var sannsynligvis underrepresentert.

Det bør nevnes at bestandsstørrelsen av krøkle i Vestre Vansjø er vanskelig å vurdere. Garnfangster og notfangster (Brabrand 1979) viste sjelden forekomst av krøkle i Vestre Vansjø, men arten er samtidig lett å underestimere på redskap fordi den er lite fangbar. Men det ble tatt lite krøkle i trålfangster (Pethon 1980), og arten finnes sjelden i mageinnhold hos rovfisk fra Vanemfjorden. Dette tyder på at bestanden i denne delen av Vansjø er liten, noe som kan forklares med at krøkle primært er en pelagisk art med preferanse for dype, kalde områder som det er lite av i Vestre Vansjø.

Når det gjelder ekskresjonsrater må det antas at disse er avhengig av P-innholdet i det som konsumeres. Det er i 2005 funnet lavt innhold av fosfor i sedimenter over store områder i Vestre Vansjø (se 2.2), og det er konkludert med at ”lekkasjen” av fosfor fra sedimenter fra disse områdene er lavt. Dette resulterer i at det sannsynligvis er lavere ekskresjonsrater av fosfor fra fisk i Vansjø enn fra Gjersjøen, og at tilbakeføring av fosfor fra fisk som er beregnet for Vestre Vansjø derved er for høyt, i

beste fall maksimalverdier. Videre er det sannsynlig at det fosforet som fisk bringer opp i vannmassene er det samme fosforet som andre internkilder bidrar med, og at fiskens bidrag derved ikke kan betraktes som nytt fosfor som ellers ville vært unntatt resirkulasjon. Se tidligere kommentarer om årlig P syklus og Nytt P.

Beregningene på fosfor fra fisk er konsentrert om fisk som spiser sedimenter, eller som har et stort potensiale for å ha slik adferd. Dette næringsopptaket kan ses på som et bidrag til å føre sedimentert fosfor inn i næringskjeden på en annen måte enn arter som eter zooplankton og bunndyr. Temperaturen er en avgjørende faktor for mengden fosfor som resirkuleres gjennom fisk, og det er dette som gir høy aktivitet og stor ekskresjonsrate i august og september. Tilsvarende beregninger for fisk i Gjersjøen ga $0,9 \text{ kg SRP P ha}^{-1} \text{ mnd}^{-1}$, basert på en biomasse på 300 kg ha^{-1} , mens den beregnede biomassen i Vestre Vansjø ga et maksimalt bidrag over grunne områder på $0,2 \text{ kg SRP P ha}^{-1} \text{ mnd}^{-1}$, ved nær samme temperatur ($18 \text{ }^\circ\text{C}$). Årsaken ligger i lavere biomasse av mort og brasme i Vansjø, og at biomassen av pelagisk mort i Gjersjøen nesten utelukkende besto av små sedimentspisende mort i størrelse 7-10 cm med høy ekskresjonsrate.

4. Litteratur.

- Bechmann, M., Eggestad, H.O. og Kværnø, S. 2006. Lokale fosfortilførsler til Vestre Vansjø. Jordforsk rapport.
- Bjerkeng, B., Borgstrøm, R., Brabrand, Å. and Faafeng, B. A. 1991. Fish size distribution and total fish biomass estimated by hydroacoustical methods: a statistical approach. *Fisheries Research* 11: 41-73
- Borgstrøm, R. 1984. Fisk, zooplankton og bunndyr i Årungen. NLVF/Styringsutvalget for jordforskning 538, 16 s.
- Brabrand, Å. 1979. Fiskeribiologiske undersøkelser I forbindelse med eutrofiering av Vansjø, Østfold. Rapp. Lab. Ferskv. Økol. Innlandsfiske, Universitetet i Oslo, rapport nr. 40, 34 s
- Brabrand, Å., Faafeng, B.A., and Nilssen, J.P. 1984. Can iron defecation from fish influence phytoplankton production and biomass in eutrophic lakes? *Limnology and Oceanography*, 29(6):1330-1334
- Brabrand, Å., Faafeng, B. A. Nilssen, J. P. 1990. Relative importance of phosphorus supply to phytoplankton production: fish excretion versus external loading. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 47(2):364-372
- Carpenter, S. R., Kitchell, J. F., Hodgson, J. R. 1985. Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bioscience* 35: 634-639
- Hauger, T. 1980. Fiskeprosjekt Vansjø. Årsrapport for året 1980. Samarbeidsutvalget for Vansjø-Hobølvassdraget, 14 s.
- Hieltjes, A. H. M. og L. Lijklema. 1980. Fractionation of inorganic phosphates in calcareous sediments. *J. Environ. Quality* 9: 405-407
- Håkansson, L.Jansson, M. 1983. Principles of Lake Sedimentology. Springer-Verlag. 316 s.
- Lamarra, V.R. jr. 1975. Digestive activities of carp as a major contributor to the nutrient loading of lakes. *Verh. Int. Ver. Limnol.* 19: 2461-2468.
- Persson, L. 1982. Rate of food evacuation in roach (*Rutilus rutilus*) in relation to temperature, and the application of evacuation rate estimates for studies on the rate of food-consumption. *Freshwater Biology* 12: 203-210

- Pethon, P. 1980. Beskrivelse av noen erfaringar med bunntål for ferskvannsbruk. *Fauna* 33:29-33.
- Lindem, T. og Sandlund, O.T. 1984. Ekkoloddregistrering av pelagiske fiskebestander i innsjøer. *Fauna* 37: 105-111.
- Lyche-Solheim, Vagstad, N., Kraft, P., Løvstad, Ø., Skoglund, S., Turtumøygard, S. & Selvik, J.R. 2001. Tiltaksanalyse for Morsa (Vansjø-Hobøl-vassdraget). Sluttrapport. NIVA-report 4377: 104 s.
- Ricker, W.E. 1968. Methods for assessment of fish production in fresh waters. IBP Handbook 3. Blackwell.
- Schindler, D. E., Kitchell, J. F., He, X., Carpenter, S. R., Hodgson, J. R., Cottingham, K. L. 1993. Food-web structure and phosphorus cycling in lakes. *Trans. Am. Fish. Soc.* 122: 756-772
- Sterner, R. W., Elser, J. J., Hessen, D. O. 1992. Stoichiometric relationships among producers, consumers and nutrient cycling in pelagic ecosystems. *Biogeochemistry* 17: 49-67
- Tierney, D., Donnelly, R.E. and Caffrey, J.M. 1999. Growth of bream, *Abramis brama* (L.), in Irish canals and implications for management. *Fisheries Management and Ecology*, 6: 487-498.
- Treer, T., Opa ak, A., An i , I, Safner, R., Piria, M. and Odak, T. 2003. Growth of bream, *Abramis brama*, in the Croatian section of the Danube. *Czech J. Anim. Sci.*, 48 (6): 251-256
- Vanni, M. J., Layne, C. D. 1997. Nutrient recycling and herbivory as mechanisms in the "top-down" effect of fish on algae in lakes. *Ecology* 78 (1): 21-40