



IRIS

www.iris.no

Åge Molversmyr

Undersøkelser av sedimentene i Hålandsvatnet

Rapport IRIS – 2010/114

Prosjektnummer: 7151849
Prosjektets tittel: Sedimenter Hålandsvatnet

Oppdragsgiver(e): Rogaland fylkeskommune
Forskningsprogram:
ISBN: 978-82-490-0699-1
Gradering: Åpen

Stavanger, 1.9.2010

Åge Molversmyr
Prosjektleder

1/9-2010

Sign.dato

Asbjørn Bergheim
Kvalitetssikrer

03.09.2010

Sign.dato

Arild Johannessen
Forskningsjef

3/9-2010

Sign.dato

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

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

FORORD

Rogaland fylkeskommune, Aksjon Jærvassdrag, fikk støtte fra SFT til å kartlegge og vurdere betydningen av interngjødsling i Hålandsvatnet. Vurderingene er basert på resultatene av forsøk som er gjennomført for å kartlegge sedimentets sammensetning, og potensialet for utlekking av fosfor under ulike betingelser. Resultatene er også sammenholdt med data fra sedimentundersøkelse utført på slutten av 1980-tallet, samt med sammenlignbare data fra forsøk utført i Frøylandsvatnet i Orrevassdraget og i Vansjø i Morsa.

Sedimentprøver (sedimentkjerner) ble samlet inn av seniorforsker Åge Molversmyr. Forsøk knyttet til karakterisering av sedimentet og interngjødsling som følge av resuspensjon, ble gjennomført ved IRIS sine fasiliteter på Ullandhaug i Stavanger. Ansvarlig for disse forsøkene var seniorforsker Åge Molversmyr.

Analyser av prøver fra resuspensjonsforsøk ble utført av Eurofins i Stavanger, mens analyser av sedimentets sammensetning (sedimentprøver og prøver fra fraksjoneringsforsøk) ble utført av NIVA-Seksjon for analyse, Oslo. Begge laboratoriene er akkreditert for de aktuelle analysene.

Databearbeiding og rapportering er utført av seniorforsker Åge Molversmyr, mens kvalitetssikrer for prosjektgjennomføringen har vært seniorforsker Asbjørn Bergheim.

Stavanger, 1. september 2010

Åge Molversmyr, prosjektleder

Nøkkelord: Aksjon Jærvassdrag; Hålandsvatnet; interngjødsling; sediment; fosforutlekking, retensjon.

INNHold

SAMMENDRAG	1
1 INNLEDNING	2
2 MATERIALE OG METODER	3
2.1 Lokalitetsbeskrivelse	3
2.2 Innsamling av sediment i felt	4
2.3 Karakterisering av sedimentet	6
2.4 Laboratorieforsøk	6
3 RESULTATER OG DISKUSJON	7
3.1 Sedimentets sammensetning	7
3.2 Potensiell fosforutlekking ved resuspensjon og andre frigjøringsmekanismer	12
3.3 Betydningen av interngjødsling i Hålandsvatnet	15
3.4 Konklusjoner	17
4 REFERANSER	18
DATAVEDLEGG	20

SAMMENDRAG

Hålandsvatnet i Stavanger og Randaberg kommuner har vært påvirket av jordbruksaktivitet og tilførsler fra spredt avløp i lang tid, og på 1980-tallet var innsjøen sterkt eutrof med årvisse oppblomstringer av blågrønnalger (cyanobakterier). Senere er forurensningstilførslene redusert (endringer i landbruket og sanering av kloakktilførsler), og tilstanden i innsjøen ble forbedret. Men i 2005 ble Hålandsvatnet rammet av en kraftig oppblomstring av blågrønnalgen *Planktothrix mougeotii*, som oppnådde ekstremt høy biomasse om våren og sommeren. Oppvekst av denne algen har også gjentatt seg i mindre grad de fleste av de etterfølgende årene. Når en tilsynelatende forverring av tilstanden i Hålandsvatnet opptrer på tross av at forurensningstilførslene til innsjøen er redusert, må interngjødsling fra fosfor i sedimentene antas å være en mulig årsak. Vinddrevet resuspensjon av sediment i denne sterkt vindpåvirkede innsjøen kan være en viktig faktor, noe det er satt fokus på i denne undersøkelsen.

Sedimentene i Hålandsvatnet er derfor undersøkt nærmere. Sedimentkjerner ble samlet inn fra i alt 18 lokaliteter, med tanke på å karakterisere overflatesedimentet i ulike deler av innsjøen. Det ble dessuten tatt kjerner fra gruntområde (4 meters dyp) og fra dypområde (24 meters dyp) for å karakterisere sammensetningen nedover i sedimentdypet. I tillegg ble det tatt prøver fra ulike gruntvannssedimenter for å belyse sammensetningen av sedimentet gjennom sommersesongen, og ved forsøk i laboratoriet å belyse potensiell fosforutlekking forårsaket av resuspensjon.

Resultatene viser at overflatesedimentet i Hålandsvatnet har endret seg lite siden slutten av 1980-tallet, og har fortsatt svært høyt innhold av fosfor (på nivå med den en har funnet i Frøylandsvatnet) som for en stor del foreligger på en form som potensielt kan løses ut i vannmassene. Men fosforinnholdet (og organisk stoff) avtar raskt nedover i sedimentet, særlig i de gruntliggende sedimentene. Resultatene viste dessuten at det ikke var klare endringer i fosforsammensetningen i gruntliggende sedimenter om sommeren, slik det er antydning å skje i Vansjø, og det er dermed ikke indikasjon på at sedimentet avgir betydelige mengder fosfor i denne perioden.

Vinddrevet resuspensjon av sediment må antas å være en fremtredende prosess i Hålandsvatnet, og forsøk viser at resuspendert sediment under normale forhold alltid vil avgi fosfat til vannet. Beregninger indikerer at vinddrevet resuspensjon kan gi betydelige fosforbidrag, særlig dersom det skjer i perioder med høy pH i vannet. Data fra de siste årene viser at pH ofte har vært svært høy i perioder om sommeren, noe som i seg selv indikerer betydelig fosforutlekking.

Det er likevel lite som tyder på at interngjødsling generelt er dominerende i Hålandsvatnet, og tilbakeholdelse (retensjon) av fosfor i innsjøen synes å være på forventet nivå. Selv om betydelige mengder fosfor blir frigjort fra sedimentene, vil dette inngå i resirkuleringsprosesser og sedimentere i innsjøen igjen relativt raskt. Interngjødsling i Hålandsvatnet synes å ha liten effekt på det generelle fosfornivået i innsjøen, men kan ha vesentlig betydning for utviklingen av algebiomassen om våren og sommeren.

At fosforinnholdet i sedimentet avtar raskt med sedimentdypet kan gi håp om at effekten av interngjødslingsprosessene ikke vil skape langvarige forsinkelser mht. forbedring av vannkvaliteten. Men selv om en oppnår tilstrekkelige reduksjoner i de ytre tilførslene må en forvente at fosforet i overflatesedimentet fortsatt vil fungere som en buffer mot tilførselsendringer utenfra, og at interngjødsling vil kunne gi næring til større og mindre algeoppblomstringer. I denne sammenheng er utløsende årsaker til oppblomstring av blågrønnalgen *Planktothrix* som en har sett de siste årene noe som bør utredes nærmere.

Referanse:

Molversmyr, Å., 2010. Undersøkelser av sedimentene i Hålandsvatnet. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2010/114.*

*Kapittel 1***INNLEDNING**

Hålandsvatnet har vært påvirket av jordbruksaktivitet og tilførsler fra spredt avløp i lang tid, og på 1980-tallet var innsjøen sterkt eutrof med årvisse oppblomstringer av blågrønnalger (cyanobakterier). Senere er forurensningstilførslene redusert (endringer i landbruket og sanering av kloakktilførsler), og undersøkelser bekreftet at tilstanden i innsjøen var forbedret (Molversmyr 2002). Men i 2005 ble Hålandsvatnet rammet av en kraftig oppblomstring av blågrønnalgen *Planktothrix mougeotii*, som oppnådde ekstremt høy biomasse om våren og forsommeren. Dette har også gjentatt seg i noe mindre grad de fleste av de etterfølgende årene, og denne blågrønnalgepopulasjonen viste seg i tillegg til å danne stor biomasse også å være sterkt giftproduserende (Molversmyr 2009).

Når denne tilsynelatende forverringen av tilstanden i Hålandsvatnet opptrer på tross av at forurensningstilførslene til innsjøen er redusert, må interngjødsling fra fosfor i sedimentene antas å være en mulig årsak. Resuspensjon av innsjøsedimenter er f.eks. foreslått som en medvirkende årsak til den kraftige oppblomstringen av *Planktothrix* i 2005 (Molversmyr 2006). Sedimentsammensetningen i Hålandsvatnet er derfor undersøkt nærmere, og det er gjennomført forsøk med sedimentet for å kartlegge potensialet for fosforutlekking ved resuspensjon.

I sedimentene i innsjøer akkumuleres materiale som tilføres utenfra (både uorganisk og organisk materiale), og materiale som har opphav i innsjøene selv (i hovedsak rester av planter og dyr). Innholdet av de fleste forbindelser er langt høyere i sedimentet enn i vannmassene ovenfor. Et sedimentsjikt av noen millimeters tykkelse kan f. eks. inneholde mer fosfor enn hele innsjøens vannmasser. Særlig vil dette være tilfelle i Hålandsvatnet, der sedimentet er sterkt anrikt med fosfor. Frigjøring av en liten del av sedimentets fosforinnhold kan derfor føre til store økninger i algeveksten. Fosforet i sedimentet foreligger imidlertid på en rekke ulike former, som ikke alle er like mobiliserbare.

Sedimentet i Hålandsvatnet er tidligere undersøkt i 1988 (Molversmyr & Sanni 1990). Resultater fra den gang viste at sedimentet var svært fosforrikt, og at gruntvannssedimentet var en viktig potensiell fosforkilde, særlig dersom pH i vannet er høy som følge av stor algeproduksjon. Nye sedimentundersøkelser er nå foretatt for å kartlegge om sedimentsammensetningen i Hålandsvatnet har endret seg de senere årene (det øverste sedimentlaget er f.eks. nyavsatt siden 1988) og for å ytterligere belyse potensialet for fosforutlekking forårsaket av resuspensjon. Dette kan gi grunnlag for å kunne vurdere hvordan vannkvaliteten ventes å utvikle seg i årene som kommer.

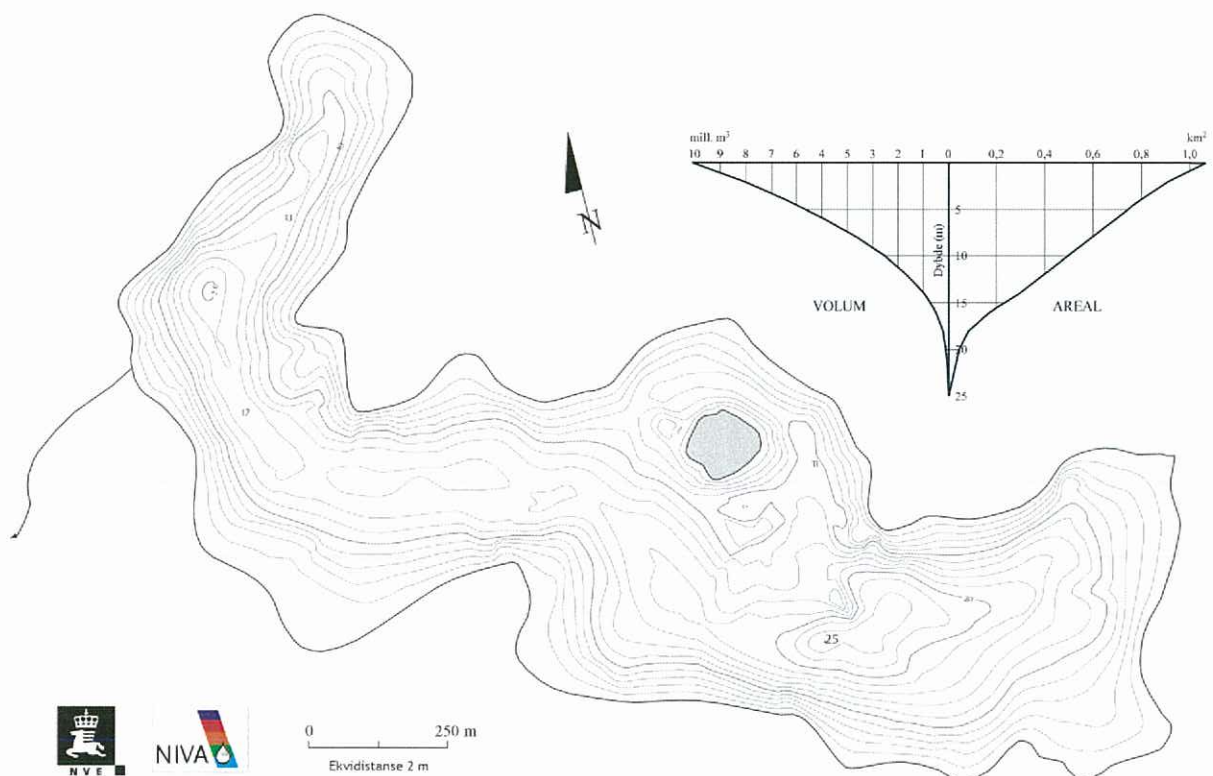
Undersøkelsene er så langt det har vært mulig harmonisert med tilsvarende undersøkelser som er foretatt i Frøylandsvatnet i Orrevassdraget (Molversmyr & Andersen 2006) og i Vansjø i Morsa (Andersen *et al.* 2006, Andersen & Færøvik 2007). Det må presiseres at resultater fra forsøk hvor sediment tas ut av sitt naturlige innsjømiljø og underkastes laboratoriebetingelser alltid vil være forbundet med betydelig usikkerhet. En har f.eks. i laboratoriet et helt annet forhold mellom vannvolum og sediment enn i en innsjø, og forbindelser som løses ut i vannet vil anrikes ulikt det som skjer i naturlige systemer. En vil dessuten ikke kunne direkte ekstrapolere fra forsøk med tidsskala timer/dager til et naturlig innsjøsystem med tidsskala uker/måneder. Likevel kan slike forsøk gi nyttig informasjon om prosesser og forhold som kontrollerer stoffutveksling mellom vann og sediment. Resultatene som presenteres i denne rapporten må derfor vurderes med dette for øye, og ikke oppfattes som absolutte sannheter.

Kapittel 2

MATERIALE OG METODER

2.1 Lokalitetsbeskrivelse

Hålandsvatnet har i henhold til data fra NVE et nedbørfeltet på 7,9 km², og av dette utgjør selve innsjøen 1,1 km² (14 %). Nedbørfeltet er relativt lite i forhold til innsjøarealet, og teoretisk oppholdstid er relativt lang (tabell 1). Hålandsvatnet er relativt smalt og dypt, med lengderetningen eksponert mot dominerende vindretning fra havet. Innsjøen må regnes som sterkt vindpåvirket. Morfometriske data er vist i tabell 1.



Figur 1 Dybdekart og areal/volumkurver for Hålandsvatnet.
(Kilde: NVE)

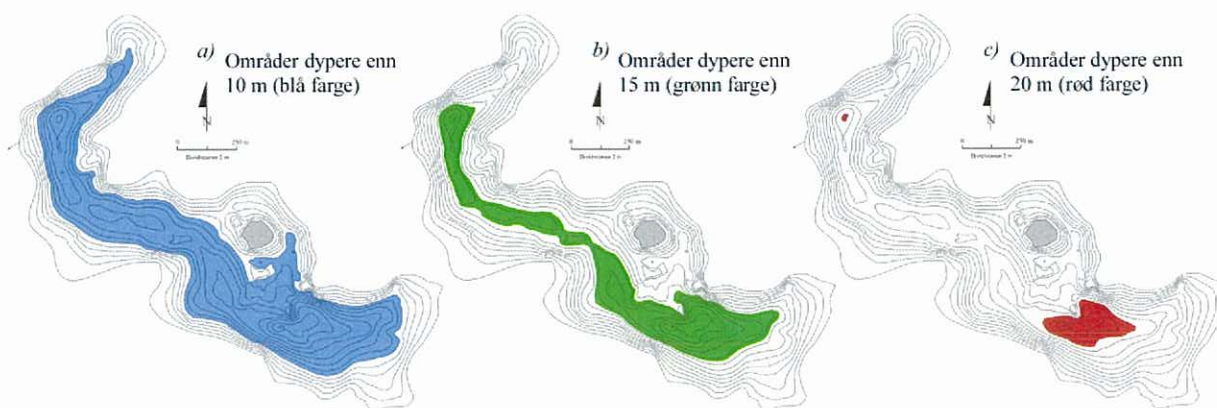
I Hålandsvatnet inntreer normalt en temperatur-sjiktning tidlig i mai, mens fullsirkulasjon om høsten ofte skjer midt i oktober. I størstedelen av stagnasjonsperioden ligger sprangsjiktet mellom 7 og 12 meter. I vannet under sprangsjiktet avtar oksygeninnholdet raskt som følge av betydelig nedbrytningsaktivitet, og oftest er det oksygenfrie forhold i det dypeste partiet allerede tidlig i juni. Og tidlig i juli er det oftest oksygenfritt i vannsøylen under 15 meter (Molversmyr 2009).

Tabell 1. Morfometriske data, Hålandsvatnet.

Parameter	Størrelse
Innsjøareal (km ²)	1,07
Innsjøvolum (10 ⁶ m ³)	10,08
Maksimalt dyp (m)	25
Middeldyp (m)	9,4
Teoretisk oppholdstid (år)	1,28

Hålandsvatnet er en relativt dyp innsjø sett i forhold til overflatearealet, med ganske bratte bassengvegger ned til ca. 12-14 meter (figur 1). I figur 2 er arealer dypere enn 10, 15 og 20 meter fremhevet. Drøye halvparten av sedimentarealet (54 %) ligger grunnere enn 10 meter, og vil normalt være eksponert for den øvre, sirkulerende, vannsøylen (over sprangsjiktet) om sommeren. Dette er en betydelig mindre andel av det totale sedimentarealet enn f.eks. i Frøylandsvatnet i Orrevassdraget (Molversmyr & Andersen 2006). Likevel er det, som også påpekt av Molversmyr & Sanni (1990), de grunne (aerobe) sedimentene som forventes å gi de dominerende bidragene til interngjødsling i Hålandsvatnet. Vinddrevet resuspensjon av sediment i denne sterkt vindpåvirkede innsjøen kan være en viktig faktor, noe det er satt fokus på i denne undersøkelsen.

Om lag 22 % av arealet og 6,7 % av innsjøvolumet ligger dypere enn 15 meter, og andelen som ligger under 20 meters dyp er 4 % av arealet og 0,9 % av volumet. Områder som berøres av oksygenvikt i stagnasjonsperioder om sommeren er begrenset, og dypvannssedimentene ventes bare å kunne gi et lite bidrag til interngjødslingen (Molversmyr & Sanni 1990).



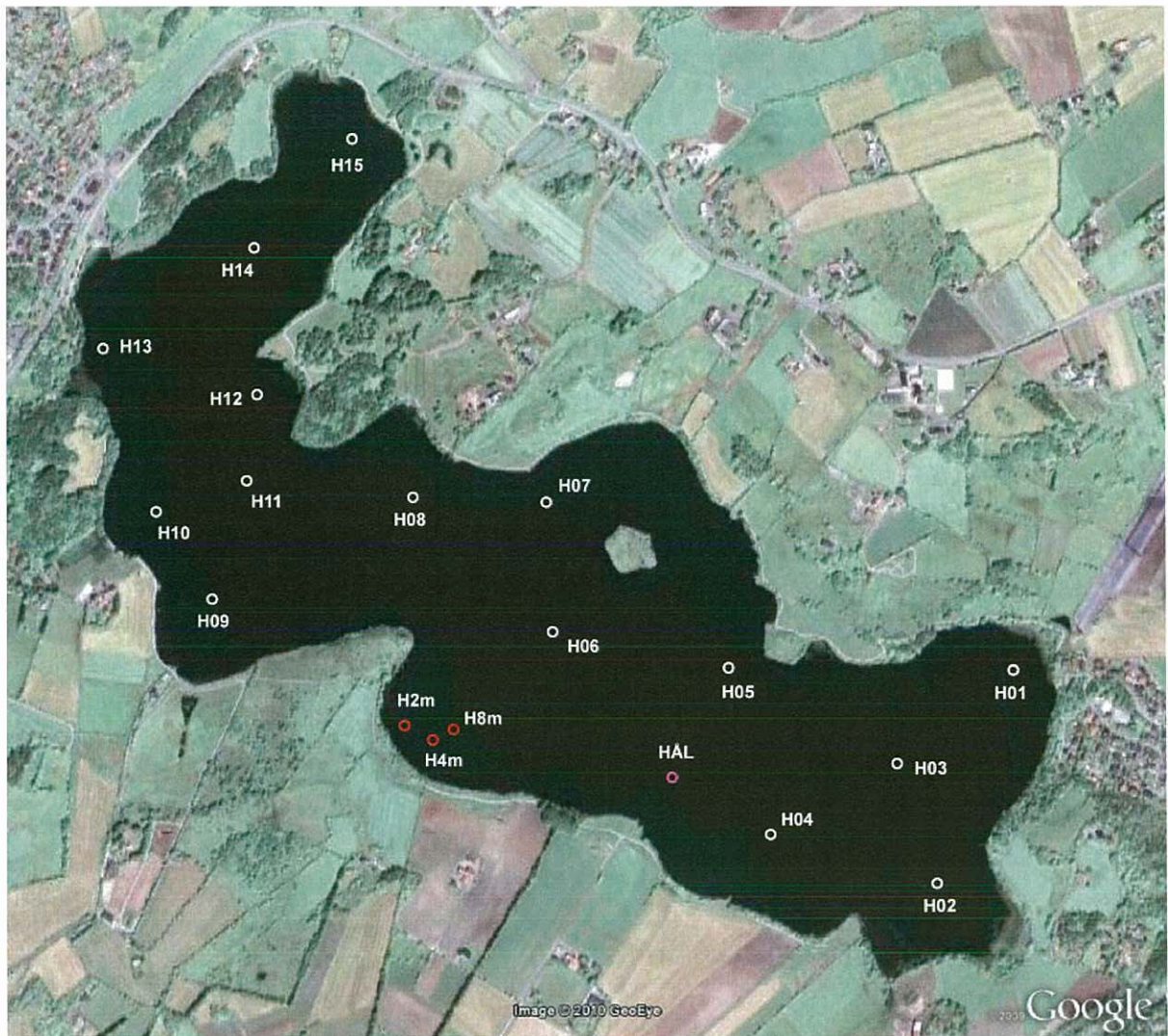
Figur 2. Dypområder i Hålandsvatnet.

2.2 Innsamling av sediment i felt

Sedimentprøver fra Hålandsvatnet ble samlet inn fra ulike dyp og ved ulike anledninger: 24.11.2008 ble det tatt sedimentkjerner fra gruntområde (4 meters dyp ved stasjon H4m i figur 3) og fra dypområde (24 meters dyp ved stasjon HÅL i figur 3) med tanke på karakterisering av sammensetning i ulike sedimentdyp. Den 26.8.2009 ble det tatt sedimentkjerner fra ulike lokaliteter (stasjonene H01 til H15 i figur 3) med tanke på å karakterisere sedimentet i ulike deler av innsjøen. Ved fire ulike tidspunkt (18.6, 9.7, 26.8 og 29.9 i 2009) ble det dessuten tatt prøver fra meget grunt, grunt og middels grunt sediment (stasjonene H2m, H4m og H8m) for å belyse sammensetningen av sedimentet gjennom sommersesongen. Fra de samme lokalitetene ble det den 26.8.2009 også tatt prøver som ble benyttet til resuspensjonsforsøk (se avsnitt 2.4). Prøvetakingsdypene er vist i tabell 2.

Prøvestedene HÅL og H15 er på tilnærmet samme sted som de Molversmyr & Sanni (1990) benyttet for sedimentundersøkelser i 1988.

Sedimentkjernene ble tatt med en Uwitec Corer (www.uwitec.at) rørprøvetaker med prøverør av klar PVC (lengde: 60 cm, indre diameter: 59,5 mm). Kjerner ble transportert tilbake til laboratoriet i intakt form, hvor de ble splittet i 1 cm tykke sjikt for videre karakterisering og bruk i forsøk.



Figur 3. Prøvestasjoner.

Tabell 2. Prøvedyp sedimentkjerner.

Stasjon	Dyp (m)	Stasjon	Dyp (m)	Stasjon	Dyp (m)
H01	6	H08	13	H15	3
H02	4	H09	7		
H03	14	H10	10	H2m	2
H04	13	H11	15	H4m	4
H05	15	H12	7	H8m	8
H06	16	H13	4		
H07	7	H14	13	HÅL	24

2.3 Karakterisering av sedimentet

Sedimentkjernene tatt fra gruntområde (H4m i figur 3) og fra dypområde (HÅL i figur 3) den 24.11.2008 ble splittet i 1 cm tynne sjikt i hele kjernenes lengde, og utvalgte sjikt ble analysert for innhold av total fosfor og jern, samt vanninnhold og organisk stoff (glødetap). Tørrstoff og gløderest ble bestemt i henhold til Norsk standard NS 4764, etter tørking ved 105 °C og gløding ved 550 °C. Innholdet av total fosfor og jern ble bestemt i henhold til NS-EN ISO 11885 (ICP-AES) etter oppslutning iht. NS 4770.

For de resterende sedimentkjernene ble overflatesedimentet (0-1 cm) tatt av, og underkastet de samme analysene. Overflatesediment tatt ved lokalitetene H2m, H4m og H8m ble i tillegg nøyere karakterisert ved at ulike fosforfraksjoner i sedimentet ble bestemt etter en sekvensiell ekstraksjonsmetode beskrevet av Psenner *et al.* (1984), og modifisert av Hupfer *et al.* (1995) og Rydin (2000). Innholdet av total fosfor og løst fosfat i ekstraktene ble bestemt i henhold til Norsk standard NS 4724 og NS 4725. Fosforinnholdet i sedimentrestene etter ekstraksjonene ble analysert etter oppslutning med $K_2S_2O_8$ ved 120 °C i 1 time. Tabell 3 viser en oversikt over de sekvensielle ekstraksjonsprosedyrene, og hvilke fosforfraksjoner en forventer å finne. Summen av redoks-labil P og løst uorganisk del av pH-labil P regnes som ikke-apatitt-bundet uorganisk fosfor (Non Apatite Inorganic P; NAIP) som antas å representere den delen av fosforet som kan frigjøres ved høy pH eller oksygensvinn. Refraktivt P estimeres som differansen mellom totalt P og summen av redoks-labil, pH-labil og organisk P (siden innholdet av løst og adsorbert P oftest er neglisjerbart). Dette omfatter alle former av fosfor som ikke vil frigjøres ved vanlige kjemiske og biologiske prosesser i innsjøen.

Tabell 3. Oversikt over sekvensiell prosedyre for ekstraksjon av fosfor, samt forventede fosforfraksjoner (etter Psenner *et al.* (1984) og Hupfer *et al.* (1995)).

Ekstraksjonsmåte (tid)	Forventet P-fraksjon
1. 1 M NH_4Cl (0,5 t)	Løst og adsorbert (svakt bundet) P.
2. 0,11 M $Na_2S_2O_4$ (1 t) (bikarbonat/dithionit)	Redoks-labil P. P bundet til jernhydroksid og manganforbindelser.
3. 1 M NaOH (16 t)	pH-labil P. P bundet til metalloksider (særlig Fe og Al); inorganiske P-forbindelser som er løsbare i lut (base), samt organisk P. Organisk P kan regnes som differansen mellom total fosfor og løst fosfat i ekstraktet.
4. 0,5 M HCl (16 t)	I hovedsak P bundet til kalsiummineraler, ofte som tungt løselig apatitt.
5. $K_2S_2O_8$, 120°C (1t)	Tungtløselig P (residual-P).

2.4 Laboratorieforsøk

Overflatesediment (0-1 cm sjikt) fra stasjonene H2m, H4m og H8m ble benyttet i enkle laboratorieforsøk knyttet til binding og frigivelse av fosfor fra sedimentpartikler (adsorbsjons-desorbsjonsprosesser), for å belyse potensialet for fosforutlekking forårsaket av resuspensjon. Forsøkene ble utført etter følgende metode:

Slurry av vått sediment tilsvarende ca. 2 g tørrvekt ble resuspendert i 1 liter filtrert innsjøvann. 4 ml slurry ble så fortynnet med 40 ml filtrert innsjøvann i 50 ml sentrifugerør, og 9 rør ble tilsatt kjente mengder fosfat (tilsvarende 0, 10, 20, 30, 40, 50, 100, 150, 200 μg P/l) og satt på ristebord ved romtemperatur i 24 timer. Fosfat ble målt i sentrifugerte prøver, og adsorbert P (μg P/mg tørrvekt) ble beregnet som differansen mellom tilsatt + startkonsentrasjon, og sluttkonsentrasjon. Startkonsentrasjonen er i praksis lik konsentrasjonen av fosfat i slurrien (etter sentrifugering) fortynnet 1:11, siden konsentrasjonen i fortynningsvannet var praktisk talt null.

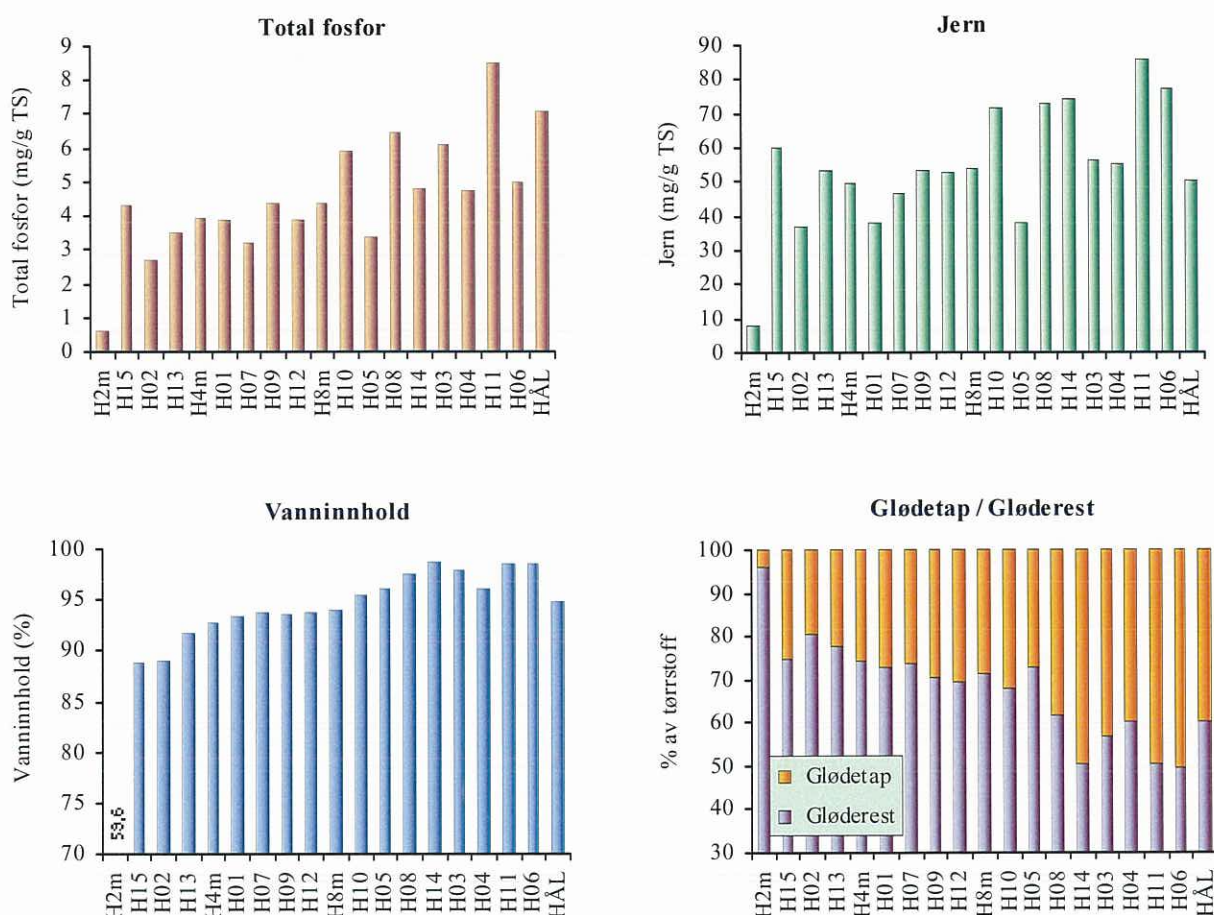
Kapittel 3

RESULTATER OG DISKUSJON

3.1 Sedimentets sammensetning

Målingene viser at overflatesedimentet i Hålandsvatnet fortsatt er svært fosforrikt. Resultatene viser fosforinnhold av samme størrelse som målt for 20 år siden (Molversonmyr & Sanni 1990), som indikerer at det ikke har endret seg vesentlig i denne perioden. Men dataene lar seg vanskelig sammenligne direkte, siden analysemetodikken har endret seg betydelig siden den gang.

Som forventet var det en tydelig trend til høyere fosforinnhold i dyptliggende sediment i forhold til grunnere sediment i Hålandsvatnet, og det samme gjaldt i noe grad for jerninnholdet (figur 4). Dette har sammenheng med at turbulente vannbevegelser stadig flytter de minste partiklene mot dypere partier (Blais & Kalff 1995), og at mer fosfor er knyttet til små partikler enn til store (pr. vektenhet). Fosforinnholdet ligger typisk i området 3-4 mg P/g tørrstoff i grunne og middels grunne sedimenter, men helt opp til mer enn 8 mg P/g tørrstoff i de dype sedimentene.



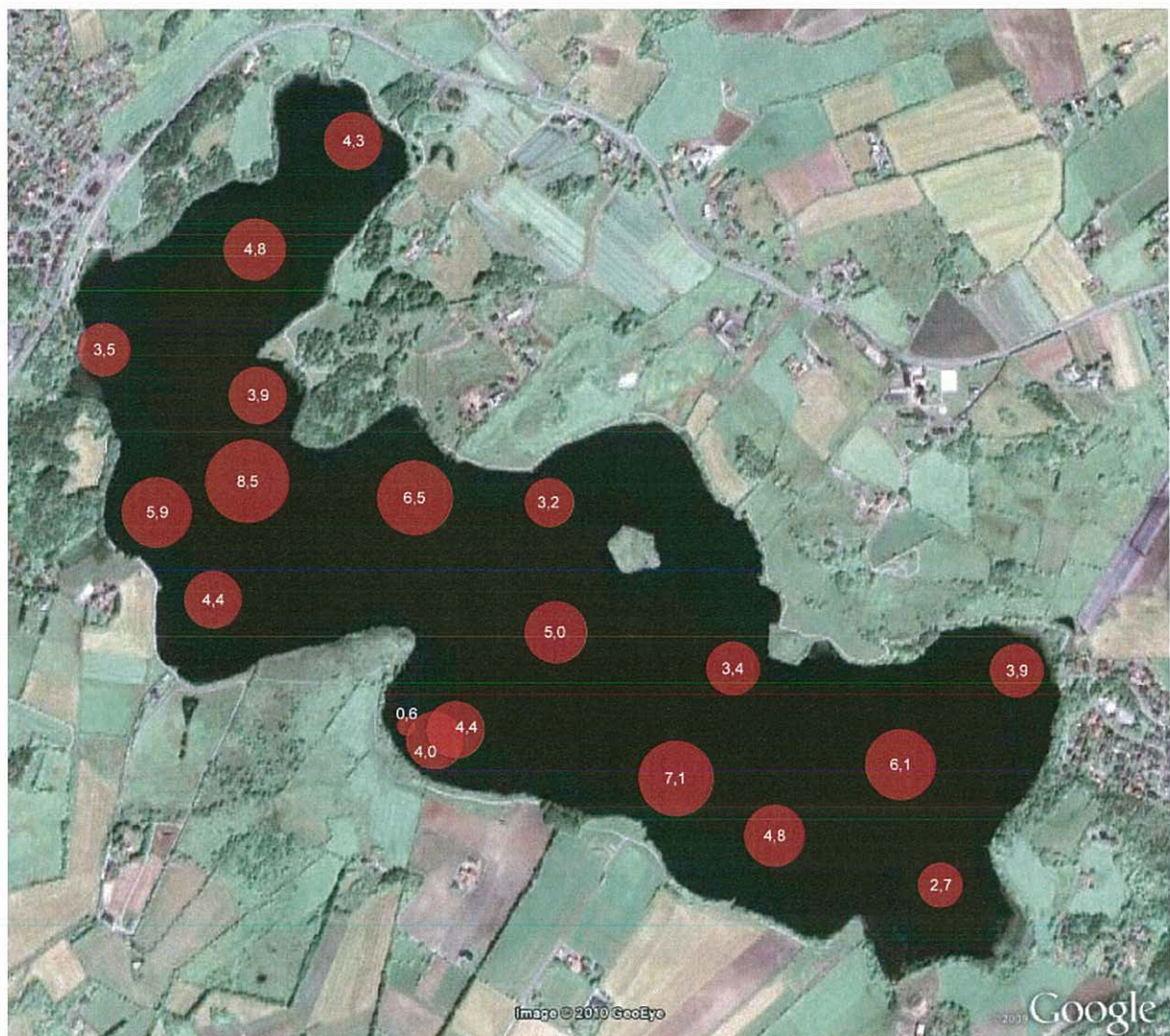
Figur 4. Fosfor, jern, vanninnhold og glødetap i overflatesediment (0-1 cm) i Hålandsvatnet. (Prøvestasjoner som vist i figur 3, og er sortert fra venstre mot høyre etter dyp.)

Sammenlignet med målinger av sedimentet i Frøylandsvatnet i 2005 (Molversmyr & Andersen 2006) foretatt med samme metodikk, har sedimentet på middels grunne områder i Hålandsvatnet tilsvarende innhold av både fosfor og jern som i Frøylandsvatnet mens dypvannssedimentet i Hålandsvatnet synes å være vesentlig mer fosforrikt enn i Frøylandsvatnet.

Det var også økende vanninnhold i overflatesedimentet med økende innsjødyp, og organisk innhold målt som glødetap var også høyt og økende med innsjødypet. Glødetapet utgjorde fra drøye 20 % av tørrstoffet i grunne områder til opp mot 50 % i de dypere områdene (figur 4). Organisk innhold i Hålandsvatnets sedimenter var høyere enn i Frøylandsvatnets.

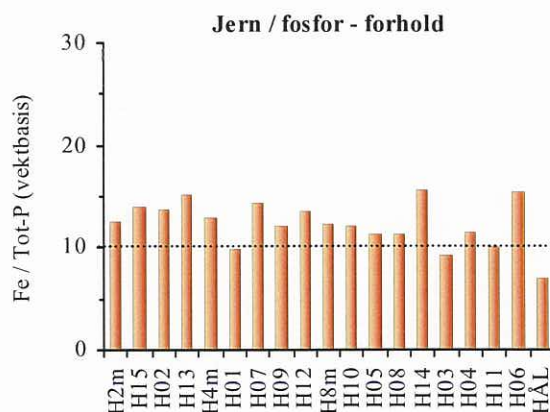
Det var ingen tydelige trender mht. sedimentsammensetning i ulike deler av innsjøbassenget, ut over den nevnte sammenhengen med innsjødypet. Figur 5 viser fosfor i overflatesedimentet ved de ulike stasjonene i Hålandsvatnet.

Det helt grunne sedimentet i Hålandsvatnet var sandrikt, noe som gjorde det vanskelig å samle inn prøver fra områder grunnere enn ca 3 meter (særlig øst i innsjøen). Dette er karakteristisk for såkalt erosjons sediment (Håkanson 1977), som er utsatt for sterk turbulens. Sedimentet fra meget grunt område (stasjon H2m, se figur 3) skilte seg vesentlig fra de andre stasjonene på denne måten, og hadde også vesentlig lavere innhold av både fosfor og jern (figur 4).



Figur 5. Fosfor i overflatesedimentet (0-1 cm) ved de ulike stasjonene i Hålandsvatnet. Sirklenes størrelse er proporsjonal med fosforinnholdet (tall angir mg P/g tørrstoff).

Høyt fosforinnholdet i sedimentet indikerer ikke uten videre at fosforutlekkningen fra sedimentet er høy. Studier har vist at fosforinnholdet i vannet i innsjøer i liten grad er korrelert med fosforinnholdet i sedimentet. I stedet synes det å være en god korrelasjon mellom fosforinnholdet i vann, og forholdet mellom jern og fosfor (Fe/P) i sedimentet (Jensen *et al.* 1992; van der Molen & Boers 1994). Dette skyldes antakelig at jern er den viktigste faktoren for binding og immobilisering av fosfor i det øverste aerobe sedimentlaget i de fleste innsjøer (Scheffer 1998). Det synes også å være slik at jernet i sedimentet kan binde mer eller mindre permanent en mengde fosfor som tilsvarer omlag 10 % av sin egen vekt, og at det i stor grad er overskuddsfosfor som kan løses ut i vannet (op. cit). Ser en på forholdet mellom jern og fosfor i sedimentet (figur 6) er dette bare litt høyere enn 10 ved de fleste prøvestasjonene, og endog i underkant av 10 noen steder (særlig i dypvannet, se nedenfor). Resultatene indikerer at det er tilstrekkelig, men ikke spesielt mye, jern tilstede som kan hindre utlekking av fosfor ved normale forhold (så lenge overflatelaget av sedimentet er aerobt).



Figur 6. Forhold mellom jern og fosfor i sediment (0-1 cm overflatesjikt) i Hålandsvatnet. (Prøvestasjoner som vist i figur 3.)

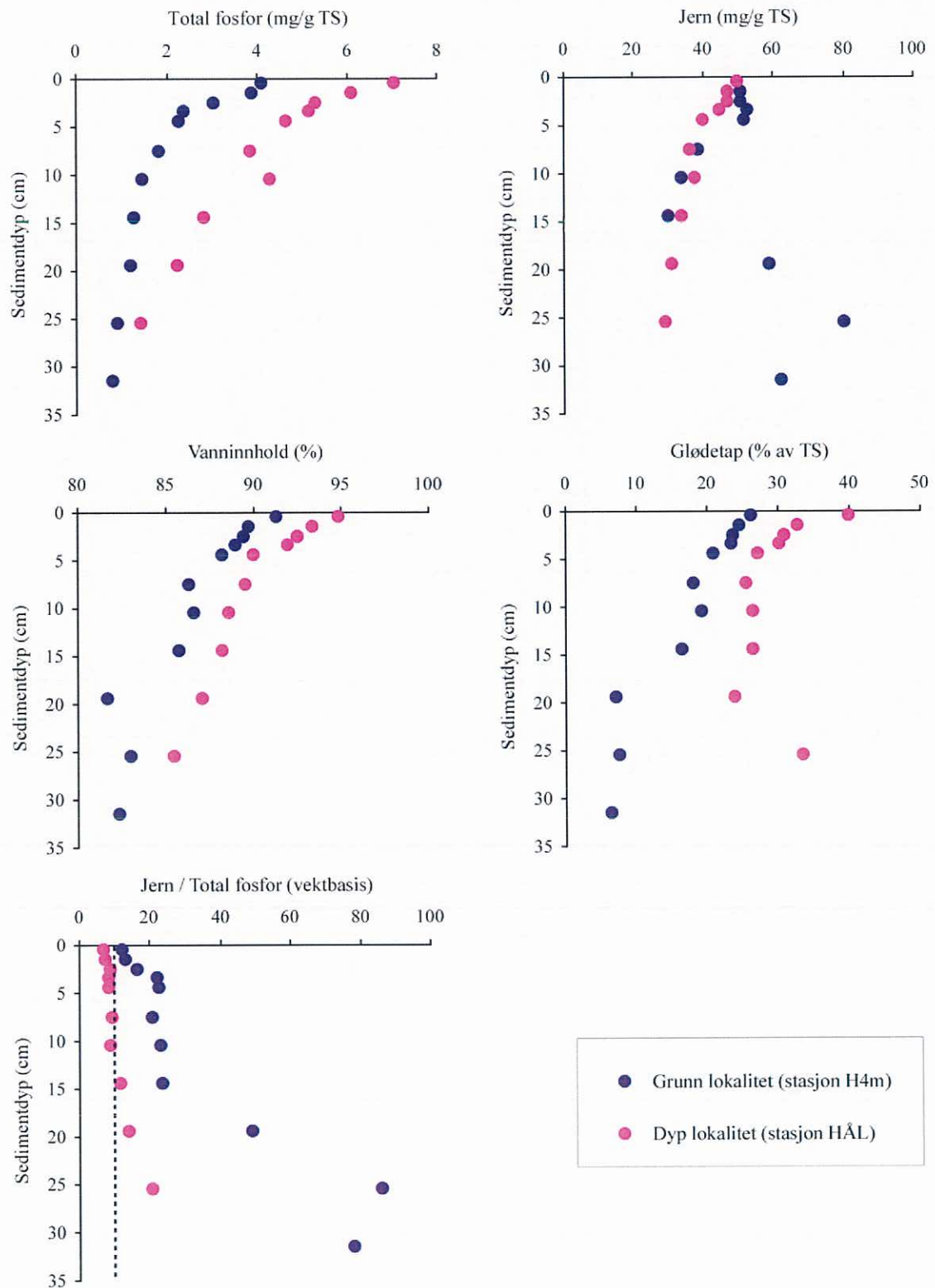
Fra grunn lokalitet (stasjon H4m) og dyp lokalitet (stasjon HÅL) ble det tatt sedimentkjerner som ble splittet i ulike sedimentsjikt og undersøkt mht. de samme parametrene. Resultatene viser at det var betydelig høyere fosforinnhold i overflatesediment enn i dypere sedimentlag, både ved grunn og dyp lokalitet (figur 7). Men i gruntvannssedimentet skal en ikke dypere enn 5-10 cm før fosforinnholdet er mer moderat.

En lignende, men betydelig svakere gradient, ble også funnet for jern, men ved grunn lokalitet var jerninnholdet høyere igjen i undersøkte sjikt fra 20 cm og dypere. Som forventet viste vanninnholdet avtakende trend mot sedimentdypet. Både vanninnhold og innhold av fosfor og organisk stoff var dessuten høyere i sedimentet ved dyp lokalitet enn ved grunn lokalitet.

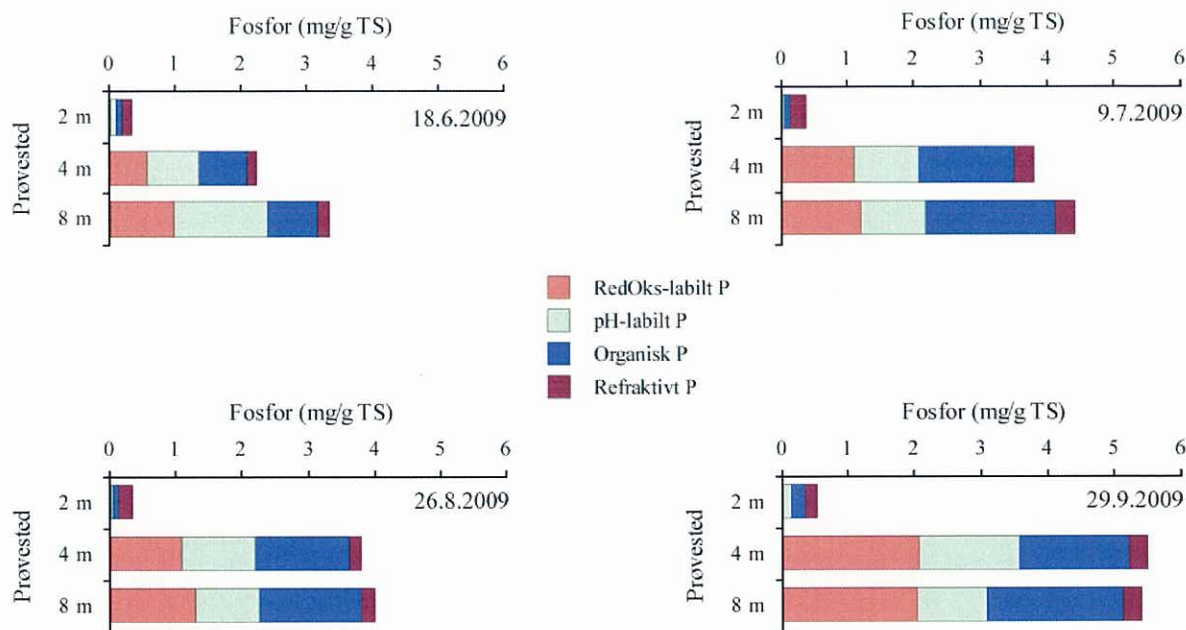
Innholdet av organisk stoff (målt som glødetap) var høyt i sedimentoverflaten, men avtok betydelig mot dypet, særlig i gruntvannssedimentet (figur 7). Mineraliseringen synes her å være relativt stor. Ved vinddrevet resuspensjon vil sedimentpartikler virvles opp i vannet, og hver gang dette skjer vil de sedimenterer igjen i litt mer mineralisert form. Raskt avtakende innhold av organisk materiale nedover i sedimentsøylen kan tyde på at disse prosessene er fremtredende.

Dataene viser også at det var mindre jern i forhold til fosfor i dypvannssedimentet enn hva det var i gruntvannssedimentet (figur 7). Forholdet Fe/Tot-P var i dypvannssedimentet lavere enn "grenseverdien" på 10 helt ned til ca 15 cm sedimentdyp, noe som indikerer at fosfor her relativt lett vil kunne lekke ut ved anaerobe forhold i bunnvannet.

Resultatene fra Hålandsvatnet skiller seg fra tilsvarende resultater fra Frøylandsvatnet, særlig ved at innholdet av fosfor og organisk stoff avtok betydelig nedover i sedimentlagene i Hålandsvatnet. I Frøylandsvatnet fant en ikke en slik trend, og der var stoffinnholdet relativt likt og stabilt i hele sedimentsøylen ned til 20 cm sedimentdyp (Molversmyr & Andersen 2006). Dette kan tyde på at vinddrevet resuspensjon er en vesentlig mer betydningsfull prosess i Hålandsvatnet (se over), men også at forurensningsbelastningen her har vært mindre de senere årene. Og selv om grunne og middels grunne områder i de to innsjøene har relativt likt fosforinnhold i overflatesedimentet, inneholder totalt sett de øvre sedimentlagene i Hålandsvatnet vesentlig mindre fosfor enn i Frøylandsvatnet. Resultatene indikerer dermed også at interngjødsling med fosfor fra sedimentene vil kunne være et mindre langvarig problem i Hålandsvatnet enn i Frøylandsvatnet.



Figur 7. Fosfor, jern, vanninnhold, glødetap og forhold mellom jern og fosfor i grunntvannssediment og dypvannssediment i Hålandsvatnet.



Figur 8. Fosforfraksjoner målt i overflatesediment (0-1 cm) fra meget grunn, grunn og middels grunn lokalitet i Hålandsvatnet.

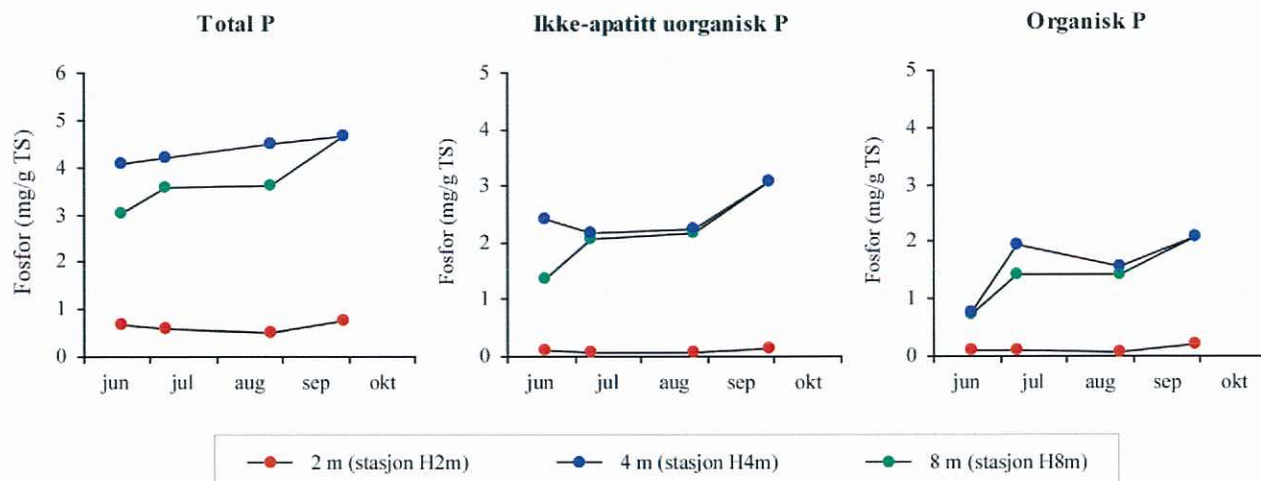
Fra meget grunn (stasjon H2m), grunn (stasjon H4m) og middels grunn (stasjon H8m) lokalitet ble det gjennom sommeren 2009 også gjort analyser for å kartlegge på hvilken form sedimentfosforet foreligger. Dette ble gjort ved en sekvensiell ekstraksjonsprosedyre (se avsnitt 2.3 om metoder) med overflatesediment, og resultatene er vist i figur 8.

Som forventet var innholdet av løst og adsorbert P (fraksjonen som løses ut ved ekstraksjon med NH_4Cl ; se tabell 3) svært lavt (i gjennomsnitt 0,3 % av total P), og blir følgelig neglisjerbar i de fleste grafiske fremstillinger. Andelen av fosforet som var bundet i potensielt lett mobiliserbare fraksjoner (redoks-labilt og pH-labilt P; se figur 8) var imidlertid høy, og utgjorde om lag 60 % av totalfosforet i overflatesedimentet fra grunn og middels grunn lokalitet. Ved meget grunn lokalitet, der sedimentet var betydelig mer sandholdig, var andelen av mobiliserbart fosfor betydelig mindre, og utgjorde bare ca. 20 % av totalfosforet. Her utgjorde refraktivt fosfor (som ikke frigjøres ved vanlige kjemiske og biologiske prosesser) om lag 60 % av totalfosforet, mens det i sedimentet fra dypereliggende lokaliteter utgjorde bare i størrelsesorden 5 % av totalen. Organisk bundet P utgjorde dermed ca. 20 % av totalfosforet ved meget grunn lokalitet, og 35 % ved de dypereliggende lokalitetene.

Som nevnt ovenfor er fosforinnholdet i overflatesedimentet i Hålandsvatnet på nivå med det en har funnet i Frøylandsvatnet, og andelen potensielt lett mobiliserbart fosfor var også om lag på nivå med det en fant der (Molversmyr & Andersen 2006). Men andelen organisk fosfor var noe høyere i sedimentet i Hålandsvatnet og den refraktive P-andelen mindre enn i Frøylandsvatnet.

Resultatene fra sedimentkarakteriseringen viser altså at sedimentet i Hålandsvatnet også er svært fosforrikt, og at hoveddelen av fosforet forekommer på en form som lett kan la seg mobilisere. Betydningen av dette blir nærmere omtalt i de påfølgende avsnittene av rapporten.

Utviklingen i fosforfraksjoner gjennom sommeren 2009 (figur 9) viste ingen tidstrender slik det ble funnet for grunt sediment å Vansjø i 2006 (Andersen & Færøvik 2007), men både ikke-apatitt uorganisk fosfor og organisk fosfor syntes å ha en økende trend i grunt og middels grunt sediment utover sommeren. I Hålandsvatnet var det dermed ikke indikasjon på at det grunne sedimentet avgir betydelige mengder fosfor i perioden med mye alger, og at dette kommer tilbake til sedimentet igjen om høsten, slik Andersen & Færøvik (2007) antydte å kunne skje i Vansjø. Men her må det tas forbehold om at prøvelokalitetene var representative, og også at slik utlekking kan ha skjedd tidligere på forsommeren (tidligere enn det som ble antydte i Vansjø).



Figur 9. Fosforfraksjoner i overflatesediment (0-1 cm) fra meget grunn, grunn og middels grunn lokalitet i Hålandsvatnet gjennom sommeren 2009.

3.2 Potensiell fosforutlekkning ved resuspensjon og andre frigjøringsmekanismer

Hålandsvatnet er sterkt vindpåvirket, og under ekstreme turbulente forhold vil sediment bli resuspendert. Sedimentpartiklene som derved blir ført ut i vannmassene vil (når sedimentet et fosforanrikt) normalt frigjøre fosfat, og den interne belastningen kan øke betydelig i forhold til situasjonen med et uforstyrret sediment (Søndergaard *et al.* 1992).

Laboratorieforsøke med sediment fra Hålandsvatnet viste også at det er betydelig potensial for fosforfrigjøring fra resuspendert sediment. I forsøket, hvor fosfat ble tilsatt i suspensjoner av resuspendert sediment (avsnitt 2.4), var det relativt lineær sammenheng mellom adsorbert P og likevektskonsentrasjonen i suspensjonene (figur 10). Den lineære sammenheng kan beskrives som

$$y = \frac{y_0}{x_0}(x - x_0)$$

der:

y = adsorbert P ($\mu\text{g P/mg tørrstoff}$),

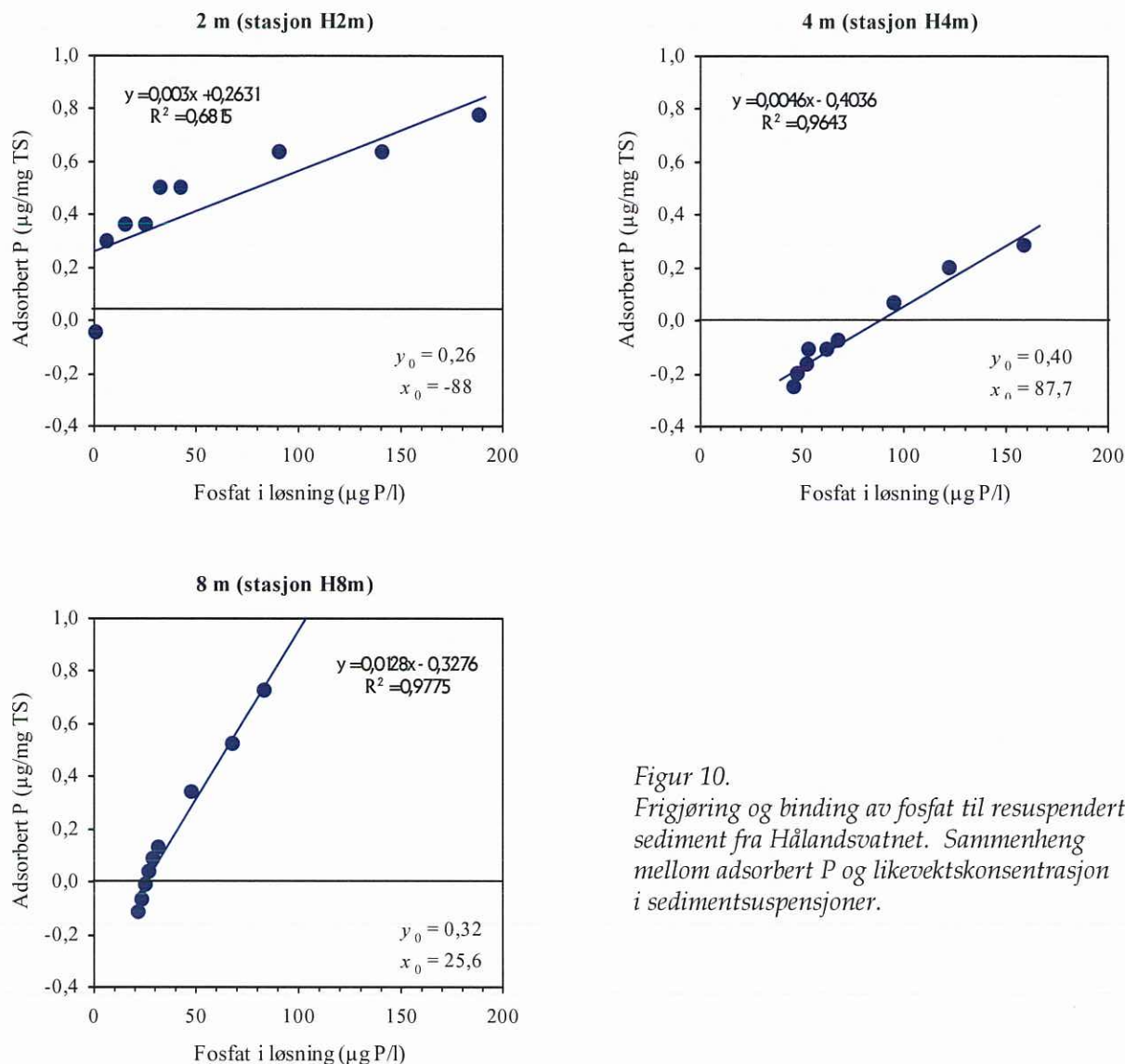
x = likevektskonsentrasjonen ($\mu\text{g P/l}$),

x_0 = likevektskonsentrasjonen hvor kurven skjærer x-aksen, dvs. den konsentrasjonen hvor partiklene verken adsorberer eller desorberer P,

y_0 = skjæringspunkt med y-aksen, dvs. partiklenes opprinnelige innhold av adsorbert P.

Sammenhengen indikerer at sedimentpartiklene vil avgi P når fosfatkonsentrasjonene er mindre enn x_0 , mens de vil ta opp P hvis konsentrasjonen er større enn x_0 . Tilsvarende vil y_0 være den maksimale mengden P som kan desorberes hvis fosfatkonsentrasjonen drives mot null (f.eks. av biologisk opptak).

Resultatene varierte betydelig mellom de ulike prøvedypene i Hålandsvatnet (figur 10), og den grunneste lokaliteten skilte seg betydelig fra de to andre ved at x_0 var negativ (dvs. at sedimentpartiklene her ikke vil frigjøre, men heller ta opp fosfat om de blir resuspendert). Sedimentet ved denne lokaliteten skilte seg som nevnt fra de to andre ved å være betydelig mer sandrikt. Men også resultatet fra grunn (4 meter) og middels grunn (8 meter) lokalitet var relativt forskjellige, til tross for at sedimentene her var temmelig like med tanke på totalinnhold av fosfor og andre



Figur 10.
 Frigjøring og binding av fosfat til resuspendert sediment fra Hålandsvatnet. Sammenheng mellom adsorbent P og likevektkonsentrasjon i sedimentsuspensjoner.

komponenter, og andelen potensielt lett mobiliserbare fosforfraksjoner. Resultatene fra grunn lokalitet (4 m) indikerer at sedimentet her vil frigjøre fosfat dersom det resuspenderes, så lenge fosfatkonsentrasjonene i vannet er lavere enn ca. 90 $\mu\text{g P/l}$, mens resultatet fra middels grunn lokalitet (8 m) indikerer tilsvarende frigjøring ved mindre enn 25 $\mu\text{g P/l}$ fosfat i vannet. Ved begge disse lokalitetene syntes imidlertid den totale mengde fosfor som kan frigjøres å være ganske lik; 0,3 - 0,4 $\mu\text{g P/mg}$ tørrvekt sediment.

Det synes klart at resuspendert sediment i Hålandsvatnet uansett vil avgi fosfat (med unntak av det helt grunne og sandrike sedimentet), siden innholdet av fosfat i innsjøvannet uansett vil være lavere enn 90 $\mu\text{g/l}$ og temmelig sikkert også lavere enn 25 $\mu\text{g P/l}$ i de fleste tilfellene. Hvor mye fosfor som frigjøres vil derimot avhenge av hvor mye sediment som resuspenderes, og av forholdene i innsjøen ellers.

I denne sammenheng må særlig nevnes potensialet for frigjøring av fosfor fra sedimentene ved høy pH i overliggende vannmasser. Som i Frøylandsvatnet er det tidligere ved forsøk funnet at fosfortutlekkingen øker kraftig når pH i overliggende vann stiger høyere enn ca. 9,0 (Molversmyr & Sanni 1990), noe som kan følge av intens algevekst (fotosynteseaktivitet). Overvåkingsdata fra de siste årene viser at dette har vært tilfellet i lange perioder om sommeren (Molversmyr 2009, 2010). Fosforfrigjøring ved høy pH antas å skje ved at hydroksylioner (OH^-) bytter plass med

fosfationer som er knyttet til jern i sedimentet, og dermed reduserer sedimentets evne til å binde fosfor (Søndergaard *et al.* 2003). Dersom dette sammenfaller med episoder med vinddrevet resuspensjon, må fosforfrigjøringen ventes å være særlig stor.

Fosfor vil også kunne frigjøres fra dypvannssedimenter ved anaerobe forhold i bunnvannet, som er vanlig i Hålandsvatnet under store deler av stagnasjonsperioden om sommeren. Løst nitrat i vannet vil imidlertid virke som en "buffer", siden dette vil forbrukes ved denitrifikasjon før red-oks forholdene blir slik at fosfor kan frigjøres i vesentlig grad fra sedimentet. I Hålandsvatnet skjer dette i utstrakt grad, og bl.a. i 2005 og 2006 ble det påvist betydelig utlekking av fosfor til bunnvannet (Molversmyr 2006, 2007). Da kunne en kjenne tydelig sulfidlukkt av bunnvannet ved prøvetaking (et tegn på at red-oks forholdene er slik at fosfor frigjøres), noe som også er tilfellet ved prøvetaking sensommeren 2010. I Hålandsvatnet er det imidlertid små sedimentarealer som normalt vil berøres av dette (se ovenfor), og en vil ikke forvente at fosforbidraget fra dypvannssedimentet vil gi vesentlig bidrag til interngjødningen i innsjøen. Men noe fosfor vil i år med vesentlig fosforfrigjøring til bunnvannet tilføres det sirkulerende overflatelaget (sonen for potensiell algevekst) når dette eroderer og bryter ned sjiktningen til det stagnerte bunnvannet utover høsten.

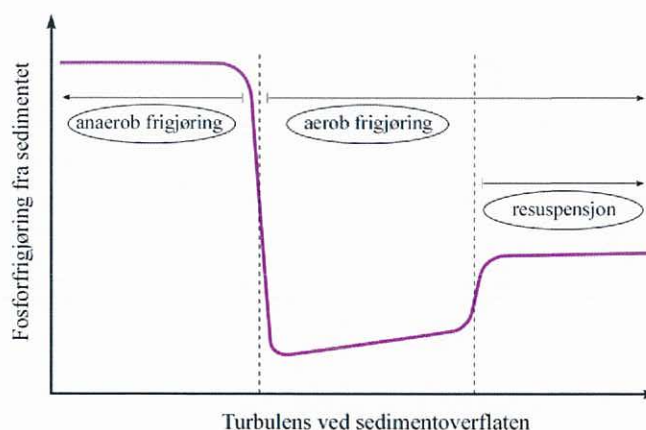
I tillegg til prosessene nevnt ovenfor er det en rekke ulike forhold som har betydning for utvekslingen av fosfor mellom sediment og vann, og det er de rådende forholdene i innsjøen som til enhver tid som avgjør hvor mye fosfor som eventuelt frigjøres. Mekanismene som styrer utveksling av fosfor er imidlertid svært komplekse, og omfatter biologiske (f.eks. bakteriell aktivitet, mineralisering, bioturbasjon), kjemiske (f.eks. redoks, pH, jern:fosfor-forhold, nitrat-tilgjengelighet) og fysiske (f.eks. resuspensjon) faktorer (Søndergaard *et al.* 2001). De viktigste forholdene omtales kort her:

Diffusjon av fosfor til overliggende vann forårsaket av en konsentrasjonsgradient nedover i sedimentet vil skje nærmest kontinuerlig, og porevannet (som sjelden inneholder mer enn 1 % av fosforet i sedimentet) er viktig for denne transporten og representerer kontakten mellom overliggende vann og fosforet i sedimentet. Oppvirvling av sedimentoverflaten (f.eks. ved vinddrevet resuspensjon) kan øke denne utlekkingen betydelig (Golterman 2004).

Det øverste aerobe (oksygenholdige) sedimentsjiktet danner en effektiv barriere som motvirker utlekking av fosfor fra underliggende lag, og høyt bakterielt oksygenopptak i sedimentoverflaten medvirker til at det oksiderte toppsjiktet blir tynnere. Hvor langt ned i sedimentet oksygen (og nitrat) strekker seg vil avhenge av intensiteten av de mikrobielle prosessene, og høy temperatur vil øke mineraliseringshastigheten og redusere tykkelsen av det oksiderte sjiktet. Slike temperatureffekter kan medføre vesentlig utlekking av fosfor fra aerobe sedimenter i grunne innsjøer (Jensen & Andersen 1992).

Turbulens i innsjøvannet er en nøkkelfaktor for utveksling av fosfat mellom sedimentet og vann, ikke bare ved at det medvirker til transport av løst fosfor ut fra sedimentet, men også ved at det tilfører oksygen til sedimentoverflaten og medvirker til å opprettholde det aerobe sjiktet i sedimentoverflaten. Som nevnt vil mye av sedimentet i Hålandsvatnet ha oksygenrikt overliggende vann, med antatt aerob (oksygenholdig) sedimentoverflate. Fravær av omføring kan medføre betydelig utlekking av fosfor til vannet selv om overliggende vannmasser forblir aerobe (Sundby *et al.* 1986). Høy temperatur om sommeren, kombinert med vindstille perioder, kan derfor tenkes å medvirke til slik pulsvis frigivelse av fosfor fra sedimentet i Hålandsvatnet, særlig om natten når respirasjonsprosesser dominerer. I den ekstreme turbulente situasjonen vil sediment bli resuspendert, med påfølgende frigivelse av fosfor. En skjematisk fremstilling og oppsummering av effekten av turbulens på fosforfrigjøringen fra sedimenter er vist i figur 11.

Fisk kan på flere måter påvirke omsetningen av fosfor i en innsjø, og relatert til sedimentene er bentivor fisk viktigst ved at de spiser bunndyr og organisk materiale i sedimentene. Betydelige mengder sedimentpartikler kan virvles opp når fisken roter i sedimentet etter mat (bioturbasjon). I Hålandsvatnet er imidlertid fiskesamfunnene slik at dette ikke ventes å ha særlig betydning.



Figur 11. Effekter av turbulens på fosforfrigjøring fra sedimentet (omarbeidet etter Scheffer 1998).

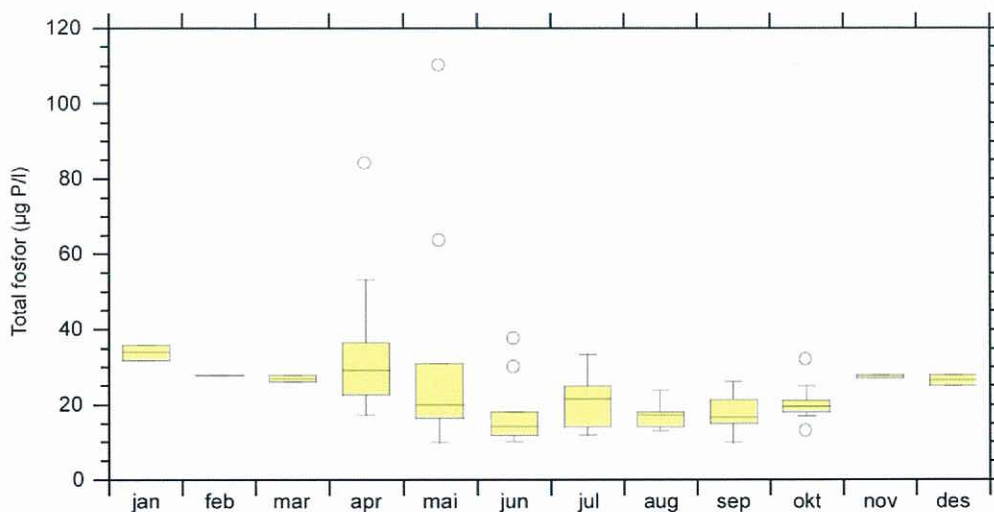
Til sist må nevnes vannplanter (makrovegetasjon), som kan påvirke omsetningen av næringsstoffer i innsjøen på ulike måter (f.eks. transport av fosfor fra og til sedimentet, hindring av resuspensjon, oksygenendringer i vannet ved fotosyntese og respirasjon, økt pH som følge av fotosyntese). Effekten av makrovegetasjon kan i teorien virke begge veier, og i litteraturen finnes eksempler på at makrovegetasjon i innsjøer både kan øke og redusere konsentrasjonen av total fosfor i vannet (Scheffer 1998). Stephen *et al.* (1997) konkluderte imidlertid med at når rotfast makrovegetasjon signifikant påvirket fosforfrigjøringen, var det ved å øke denne.

3.3 Betydningen av interngjødsling i Hålandsvatnet

Hvor mye fosfor som løses ut fra sedimentet i Hålandsvatnet er som nevnt ovenfor avhengig av en rekke faktorer, og det har ikke vært mulig å gjøre spesifikke estimater av de interne tilførselene innenfor rammen av denne undersøkelsen. Molversmyr & Sanni (1990) beregnet at interne tilførsler var om lag 750 kg P i løpet av en årsperiode, hvorav det meste (ca. 75 %) kom fra gruntvannsedimentene. Og dette var tilførsler som ikke skyldes særlige forhold som høy pH i overflatevannet, anaerobt bunnvann, eller episoder med vinddrevet resuspensjon. Lignende beregninger for Frøylandsvatnet antydte at interne tilførsler der var i størrelsesorden 1000-1500 kg P/år, hvor hoveddelen skyldes mineralisering og diffusjon av fosfor fra sedimentoverflaten (Molversmyr & Andersen 2006).

Interne tilførsler i denne størrelse kan synes høye i forhold til de ytre tilførselene, men må antas som vanlige i næringsrike innsjøer og betraktes som bakgrunnsbelastning. Det er ekstraordinære interne tilførsler som vil være viktigst, og i Hålandsvatnet må dette særlig antas å kunne følge av høy pH i overflatevannet og episoder med vinddrevet resuspensjon. Som nevnt ovenfor har det de siste årene vært observert høy pH (pH > 9) i lange perioder om sommeren. Innsjøens plassering og utforming gjør den dessuten sterkt vindutsatt, og vinddrevet resuspensjon må ventes å kunne være en viktig bidragsyter til interngjødsling av fosfor (Bloesch 1995), særlig dersom dette inntreffer i en periode med høy pH i overflatevannet.

Ekstraordinære interne tilførsler vil normalt gjenspeiles i økt innhold av totalfosfor i vannet, men i Hålandsvatnet er det få tydelige tegn til dette bortsett fra at fosforinnholdet normalt synes å øke litt i juli (figur 12). Basert på et fåtall vintermålinger (2 sesonger) synes innholdet av total fosfor i vannet om vinteren å være i størrelsesorden 30 µg P/l, og de fleste årene avtar dette gradvis til et minimum i juni (figur 12). Økningen i juli kan derimot gjenspeile effekter av intern gjødsling, siden dette normalt er en tørr periode med lite ekstern tilrenning (men dette er også en periode med potensielt økte tilførsler fra landbruket, i forbindelse med gjødsling etter første slåtten). Og kraftig oppblomstring av blågrønnalger om våren og forsommeren de siste årene (reflektert i høye fosforverdier vist som åpne sirkler i figur 12) må også kunne settes i sammenheng med intern gjødsling, siden tilgjengelig fosfor i vannet og eksterne tilførsler neppe alene vil kunne gi



Figur 12. Box-plot som viser sesongutvikling for total fosfor i overflatevann i Hålandsvatnet.

opphav til en slik oppbygging av biomasse. En tilsynelatende forverring av vannkvaliteten i Hålandsvatnet de siste årene (tidvis kraftig oppvekst av blågrønnalgen *Planktothrix*) synes derfor å ha bakgrunn i interngjødslingsprosesser, men det må påpekes at utløsende årsaker til denne oppveksten er uklare. Etter at denne populasjonen nærmest eksploderte i 2005 har den vist evne til å oppnå høy vekst og biomasse om våren og forsommeren, og kan tydeligvis effektivt utnytte forholdene som en da har i innsjøen.

Normalt er imidlertid fosforinnholdet i innsjøvannet relativt lavt, og det er lite som tyder på at interngjødsling generelt er en dominerende prosess. I forhold til antatte ytre tilførsler (Molverson *et al.* 2008) synes Hålandsvatnet å opptre som "vanlige" innsjøer der en vesentlig andel av fosforet tilført fra ytre kilder holdes tilbake i innsjøen (retensjon). Data om variasjonen i ytre tilførsler gjennom året mangler imidlertid, og en kan derfor ikke si om retensjonen i innsjøen er spesielt svekket (eller negativ) i perioder hvor en kan anta at interngjødslingen er vesentlig. Men på årsbasis synes i størrelsesorden ca. 70 % av tilført ytre fosfor å bli holdt tilbake i innsjøen, og dette er i tråd med hva retensjonsformler av Chapra (1975) og Reckhow (1979) angir.

Selv om betydelige mengder fosfor må antas å bli frigjort fra sedimentene i Hålandsvatnet, er altså fosforretensjon i innsjøen ikke mindre enn det en ville forvente. Sedimentasjonen av fosfor i innsjøen må derfor være betydelig, og det er lite som tyder på at interngjødslingen er spesielt stor i forhold til sedimentasjonsprosessene. Fosfor som frigjøres vil inngå i resirkuleringsprosesser, og synes å sedimentere igjen relativt raskt. Totalt kan det dermed synes som om interngjødslingen i Hålandsvatnet har relativt liten effekt på det generelle fosfornivået i innsjøen, men at det kan ha vesentlig betydning for utviklingen av algebiomassen om våren og sommeren.

At fosforinnholdet i sedimentet i Hålandsvatnet, i motsetning til i Frøylandsvatnet, avtar raskt med sedimentdypet (se ovenfor), kan gi håp om at effekten av interngjødslingsprosessene ikke vil skape langvarige forsinkelser mht. forbedring av vannkvaliteten. Men selv om en oppnår tilstrekkelige reduksjoner i de ytre tilførslerne (Molverson *et al.* 2008) må en forvente at fosforet i overflatesedimentet fortsatt vil fungere som en buffer mot tilførselsendringer utenfra (Scheffer 1998), og at interngjødsling vil kunne gi næring til større og mindre algeoppblomstringer. I denne sammenheng er utløsende årsaker til oppblomstring av blågrønnalgen *Planktothrix* som en har sett de siste årene noe som bør utredes nærmere.

3.4 Konklusjoner

- Overflatesedimentet i Hålandsvatnet har endret seg lite siden slutten av 1980-tallet, og har fortsatt svært høyt innhold av fosfor (på nivå med den en har funnet i Frøylandsvatnet). En stor andel av fosforet foreligger på en form som potensielt kan løses ut i vannmassene.
- Fosforinnholdet (og organisk stoff) avtar raskt nedover i sedimentet, særlig i de gruntliggende sedimentene. Dette står i motsetning til hva en fant i Frøylandsvatnet. De øvre sedimentlagene i Hålandsvatnet inneholder dermed vesentlig mindre fosfor enn i Frøylandsvatnet, og resultatene indikerer at interngjødsling med fosfor fra sedimentene vil kunne være et mindre langvarig problem her.
- Det var ingen klare endringer i fosforsammensetningen i gruntliggende sedimenter om sommeren slik det er antydnet å skje i Vansjø, og det er dermed ikke indikasjon på at sedimentet avgir betydelige mengder fosfor i denne perioden.
- Vinddrevet resuspensjon av sediment må antas å være en fremtredende prosess i Hålandsvatnet, og forsøk viser at betydelige mengder fosfor vil frigjøres fra gruntliggende sediment under slike forhold. Særlig stor vil fosforfrigjøringen være dersom dette skjer i perioder med høy pH i vannet. Data fra de siste årene viser at pH ofte har vært svært høy i perioder om sommeren, noe som i seg selv indikerer betydelig fosforutlekking.
- Det er likevel lite som tyder på at interngjødsling generelt er dominerende i Hålandsvatnet, og tilbakeholdelse (retensjon) av fosfor i innsjøen synes å være på forventet nivå. Selv om betydelige mengder fosfor blir frigjort fra sedimentene, vil dette inngå i resirkuleringsprosesser og sedimentere i innsjøen igjen relativt raskt.
- Interngjødsling i Hålandsvatnet synes å ha liten effekt på det generelle fosfornivået i innsjøen, men kan ha vesentlig betydning for utviklingen av algebiomassen om våren og sommeren.

Kapittel 4**REFERANSER**

- Andersen, T., Å. Brabrand, .P.J. Færøvik, B. Kaasa, .Å. Molversmyr, .B. Skjelbred & T. Aasberg, 2006. Vurdering av mulig interngjødsling i Vestre Vansjø. *NIVA, rapport 5144-2006*.
- Andersen, T. & .P.J. Færøvik, 2007. Utredninger Vansjø 2006 – Undersøkelse av mulig interngjødsling 2006. *NIVA, rapport 5353-2007*.
- Blais, J.M. & J. Kalff, 1995. The influence of lake morphometry on sediment focusing. *Limnol. Oceanogr.* 40: 582-588.
- Bloesch, J., 1995. Mechanisms, measurement and importance of sediment resuspension in lakes. *Mar. Freshwater Res.* 46: 295-304.
- Chapra, S.C., 1975. Comment on "An empirical method of estimating the retention of phosphorus in lakes" by W.B. Kirchner and P.J. Dillon. *Water Resour. Res.* 11: 1033-1034.
- Golterman, H.L., 2004. The chemistry of phosphate and nitrogen compounds in sediments. *Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 251s*.
- Hupfer, M., R. Gächter & R. Giovanoli, 1995. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. *Aquat. Sci.* 57: 305-324.
- Håkanson, L., 1977. The influence of wind, fetch and water depth on the distribution of sediments in Lake Vänern, Sweden. *Can. J. Earth Sci.* 14: 397-412.
- Jensen, H.S & F.E. Andersen, 1992. Importance of temperature, nitrate and pH for phosphate release from aerobic sediments of four shallow, eutrophic lakes. *Limnol. Oceanogr.* 37: 577-589.
- Jensen, J.P., P. Kristensen, E. Jeppesen & A. Skytthe, 1992. Iron phosphorus ratio in surface sediment as an indicator of phosphate release from aerobic sediments in shallow lakes. *Hydrobiologia* 235/236: 731-743.
- Molversmyr, Å., 2002. Undersøkelse av miljøforholdene i Hålandsvatnet 2001. *Rogalandsforskning, rapport RF - 2002/053*.
- Molversmyr, Å., 2006. Undersøkelser i Hålandsvatnet 2005. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2006/068*.
- Molversmyr, Å., 2007. Undersøkelser i Hålandsvatnet 2006. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2007/131*.
- Molversmyr, Å., 2009. Undersøkelser i Hålandsvatnet i 2008 og vinteren 2009. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2009/274*.
- Molversmyr, Å., 2010. Overvåking av Jærvassdrag 2009 – Datarapport. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2010/050*.
- Molversmyr, Å. & S. Sanni, 1990. Hålandsvatnet. Resipientundersøkelse. *Rogalandsforskning, rapport RF-28/90*.
- Molversmyr, Å. & T. Andersen, 2006. Kartlegging og vurdering av interngjødsling i Frøylandsvatnet. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2006/017*.
- Molversmyr, Å., M. Bechmann, H.O. Eggestad, A. Pengerud, S. Turtumøygard & E. Rosvoll, 2008. Tiltaksanalyse for Jærvassdragene. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2008/028*.
- Psenner, R., R. Pucsko & M. Sager, 1984. Die Fraktionierung organischer und anorganischer Phosphorverbindungen von Sedimenten – Versuch einer Definition ökologisch wichtiger Fraktionen. *Arch. Hydrobiol./Suppl.* 70: 111-155.

- Reckhow, K.H., 1979. Uncertainty applied to Vollenweider's phosphorus criterion. *J. Water. Pollut. Control. Fed.* 51: 2123-2128.
- Rydin, E., 2000. Potentially mobile phosphorus in Lake Erken sediment. *Water Res.* 34: 2037-2042.
- Scheffer, M., 1998. Ecology of shallow lakes. *Population and Community Biology Series 22, Chapman & Hall, London: 357s.*
- Stephen, D., B. Moss & G. Phillips, 1997. Do rooted macrophytes increase sediment phosphorus release? *Hydrobiologia* 342: 27-34.
- Sundby, B., L.G. Anderson, P.O.J. Hall, Å. Iverfeldt, M.M.R. Van der Loeff & S.F.G. Westerlund, 1986. The effect of oxygen on release and uptake of cobalt, manganese, iron and phosphate at the sediment-water interface. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 50: 1281-1288.
- Søndergaard, M., P. Kristensen & E. Jeppesen, 1992. Phosphorus release from resuspended sediment in the shallow and wind-exposed Lake Arresø, Denmark. *Hydrobiologia* 228: 91-99.
- Søndergaard, M., J. P. Jensen & E. Jeppesen, 2001. Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes. *TheScientificWorld* 1: 427-442.
- Søndergaard, M., J.P. Jensen & E. Jeppesen, 2003. Role of sediment and internal loading of phosphorus in shallow lakes. *Hydrobiologia* 506-509: 135-145.
- van der Molen, D.T. & P.C.M. Boers, 1994. Influence of internal loading on phosphorus concentration in shallow lakes before and after reduction of the external loading. *Hydrobiologia* 275/276: 379-389.

DATAVEDLEGG

Sedimenter Hålandsvatnet 26.8.2009: Diverse stasjoner (0-1 cm sjikt)

Stasjon	Stasjon dyp (m)	Vanninnhold (%)	Glødetap % av TS	Tot-P mg/g TS	Fe mg/g TS
H01	6	93	27	3,9	9,9
H02	4	89	20	2,7	13,7
H03	14	98	44	6,1	9,2
H04	15	96	40	4,8	11,6
H05	13	96	27	3,4	11,2
H06	16	99	51	5,0	15,5
H07	7	94	26	3,2	14,4

Stasjon	Stasjon dyp (m)	Vanninnhold (%)	Glødetap % av TS	Tot-P mg/g TS	Fe mg/g TS
H08	13	98	38	6,5	11,3
H09	7	94	30	4,4	12,2
H10	10	95	32	5,9	12,1
H11	15	99	50	8,5	10,0
H12	7	94	31	3,9	13,5
H13	4	92	23	3,5	15,1
H14	13	99	50	4,8	15,5
H15	3	89	25	4,3	13,9

Sedimenter Hålandsvatnet 24.11.2008: Sedimentprofil på 4 meters dyp (H4m)

Dybde-sjikt (cm)	Vanninnhold (%)	Glødetap % av TS	Tot-P mg/g TS	Fe mg/g TS
0-1	91	26	4,1	50,2
1-2	90	25	3,9	51,1
2-3	89	24	3,1	50,8
3-4	89	24	2,4	52,6
4-5	88	21	2,3	51,9
7-8	86	18	1,9	38,5
10-11	87	19	1,5	34,0
14-15	86	17	1,3	30,3
19-20	82	7	1,2	59,0
25-26	83	8	0,9	80,1
31-32	82	6	0,8	62,4

Sedimenter Hålandsvatnet 24.11.2008: Sedimentprofil på 24 meters dyp (HAAL)

Dybde-sjikt (cm)	Vanninnhold (%)	Glødetap % av TS	Tot-P mg/g TS	Fe mg/g TS
0-1	95	40	7,1	50,2
1-2	93	33	6,1	47,2
2-3	93	31	5,3	47,3
3-4	92	30	5,2	44,6
4-5	90	27	4,7	40,0
7-8	90	26	3,9	36,2
10-11	89	27	4,3	37,7
14-15	88	27	2,8	34,1
19-20	87	24	2,2	31,3
25-26	86	34	1,4	29,2

Sedimenter Hålandsvatnet 18.6.2009 (0-1 cm sjikt)

Stasjon	Vanninnhold (%)	Glødetap % av TS	Tot-P mg/g TS	Fe mg/g TS	Fosforfraksjoner					
					NH4Cl-P (mg/g TS)	BD-P (mg/g TS)	NaOH-P (mg/g TS)		HCl-P (mg/g TS)	Residual-P (mg/g TS)
					PO4-P	PO4-P	Tot-P	PO4-P	PO4-P	-
H2m	63	3	0,7	8,4	0,001	0,027	0,199	0,092	0,126	0,141
H4m	93	26	3,0	47,5	0,014	0,564	1,528	0,785	0,041	0,123
H8m	94	29	4,1	55,2	0,015	0,996	2,167	1,419	0,114	0,195

Sedimenter Hålandsvatnet 9.7.2009 (0-1 cm sjikt)

Stasjon	Vanninnhold (%)	Glødetap % av TS	Tot-P mg/g TS	Fe mg/g TS	Fosforfraksjoner					
					NH4Cl-P (mg/g TS)	BD-P (mg/g TS)	NaOH-P (mg/g TS)		HCl-P (mg/g TS)	Residual-P (mg/g TS)
					PO4-P	PO4-P	Tot-P	PO4-P	PO4-P	-
H2m	56	3	0,6	6,3	0,000	0,023	0,138	0,038	0,203	0,215
H4m	95	26	3,6	49,1	0,023	1,094	2,414	0,977	0,175	0,300
H8m	94	29	4,2	52,7	0,006	1,188	2,938	0,985	0,188	0,301

Sedimenter Hålandsvatnet 26.8.2009 (0-1 cm sjikt)

Stasjon	Vanninnhold (%)	Glødetap % av TS	Tot-P mg/g TS	Fe mg/g TS	Fosforfraksjoner					
					NH4Cl-P (mg/g TS)	BD-P (mg/g TS)	NaOH-P (mg/g TS)		HCl-P (mg/g TS)	Residual-P (mg/g TS)
					PO4-P	PO4-P	Tot-P	PO4-P	PO4-P	-
H2m	49	2	0,5	7,3	0,000	0,019	0,132	0,048	0,199	0,217
H4m	92	26	3,6	48,1	0,010	1,069	2,543	1,110	0,065	0,173
H8m	94	28	4,5	53,6	0,002	1,292	2,517	0,952	0,121	0,203

Sedimenter Hålandsvatnet 29.9.2009 (0-1 cm sjikt)

Stasjon	Vanninnhold (%)	Glødetap % av TS	Tot-P mg/g TS	Fe mg/g TS	Fosforfraksjoner					
					NH4Cl-P (mg/g TS)	BD-P (mg/g TS)	NaOH-P (mg/g TS)		HCl-P (mg/g TS)	Residual-P (mg/g TS)
					PO4-P	PO4-P	Tot-P	PO4-P	PO4-P	-
H2m	71	6	0,8	10,1	0,001	0,038	0,318	0,117	0,142	0,184
H4m	93	26	5,5	52,9	0,061	2,059	3,162	1,512	0,083	0,255
H8m	95	29	4,7	53,0	0,021	2,021	3,123	1,053	0,102	0,274

Resuspensjonsforsøk 27.-28.8.2009.

Sedimenter Hålandsvatnet 26.8.2009 (0-1 cm sjikt)

Stasjon	Slurry P ($\mu\text{g P/l}$)	Slurry tørrstoff (g tørrvektv/l)	Organisk fraksjon	P tilsatt ($\mu\text{g P/l}$)	P målt ($\mu\text{g P/l}$)	Adsorbert P ($\mu\text{g P/mg TV}$)
H2m	3	0,16	0,31	0	1	-0,050
H2m	3	0,16	0,31	10	6	0,294
H2m	3	0,16	0,31	20	15	0,363
H2m	3	0,16	0,31	30	25	0,363
H2m	3	0,16	0,31	40	33	0,500
H2m	3	0,16	0,31	50	43	0,500
H2m	3	0,16	0,31	100	91	0,638
H2m	3	0,16	0,31	150	141	0,638
H2m	3	0,16	0,31	200	189	0,775
H4m	57	1,80	0,28	0	46	-0,249
H4m	57	1,80	0,28	10	48	-0,201
H4m	57	1,80	0,28	20	53	-0,170
H4m	57	1,80	0,28	30	54	-0,115
H4m	57	1,80	0,28	40	63	-0,109
H4m	57	1,80	0,28	50	68	-0,078
H4m	57	1,80	0,28	100	95	0,062
H4m	57	1,80	0,28	150	123	0,197
H4m	57	1,80	0,28	200	159	0,282
H8m	32	1,80	0,28	0	22	-0,117
H8m	32	1,80	0,28	10	24	-0,068
H8m	32	1,80	0,28	20	25	-0,013
H8m	32	1,80	0,28	30	27	0,036
H8m	32	1,80	0,28	40	29	0,085
H8m	32	1,80	0,28	50	32	0,128
H8m	32	1,80	0,28	100	48	0,336
H8m	32	1,80	0,28	150	68	0,519
H8m	32	1,80	0,28	200	84	0,727