

Kunnskapsgrunnlag for innsjø- interne tiltak i Hålandsvatnet

Forfattere | Åge Molversmyr (NORCE) og Steinar Sanni (UiS)

(UiS) Rapport | [01.09.2025] – Klima og miljø 7-2025

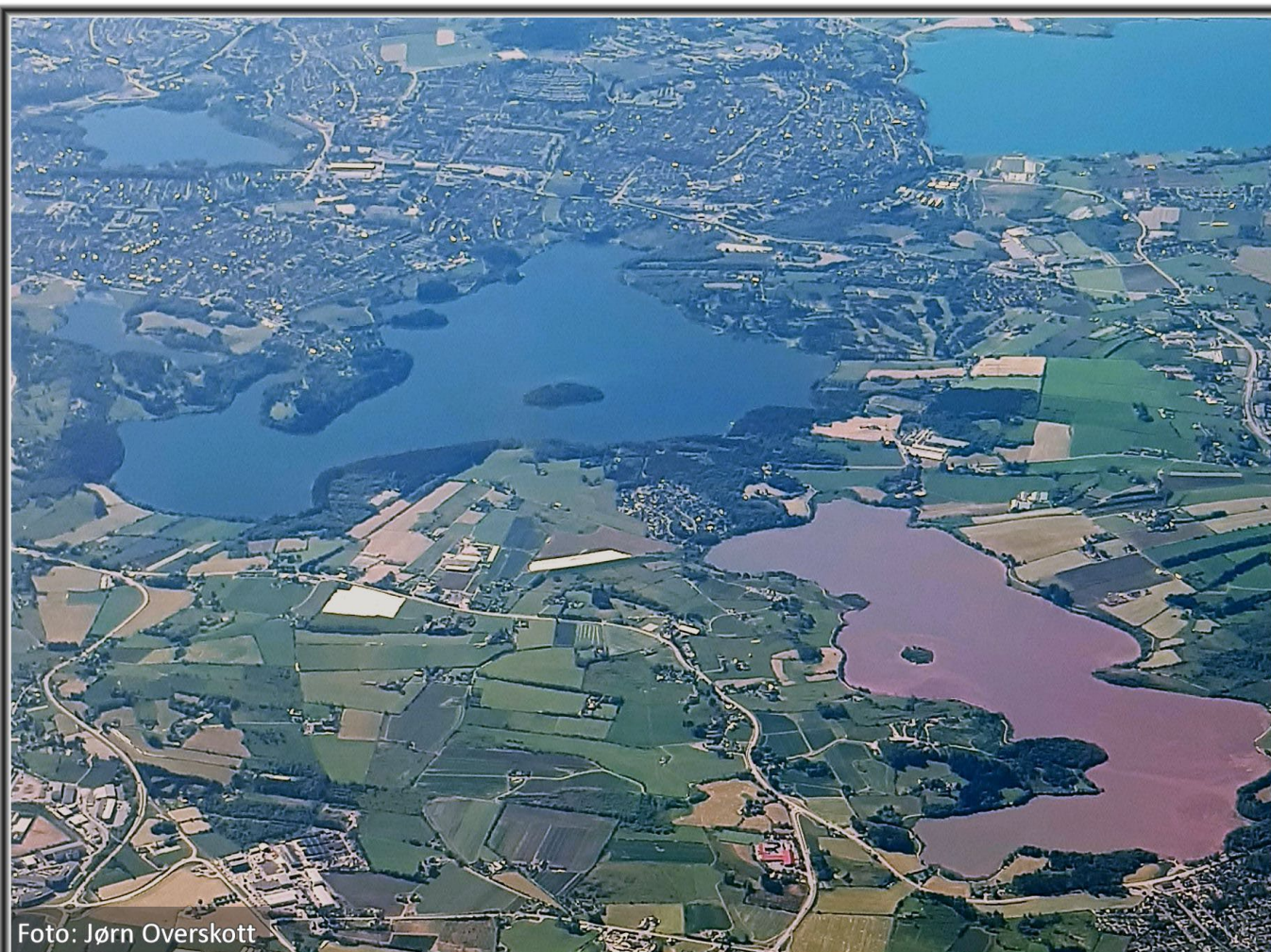


Foto: Jørn Overskott

Rapporttittel	Kunnskapsgrunnlag for innsjøinterne tiltak i Hålandsvatnet
Prosjektnummer	109280
Institusjon	NORCE Klima og miljø
Oppdragsgiver(e)	Rogaland fylkeskommune
Gradering	Åpen
Rapportnr.	Klima og miljø 7-2025
ISBN	ISBN 978-82-8408-407-7
Antall sider	27
Publiseringsdato	01.09.2025
CC-lisens	
Sitering	Molversmyr, Å. & S. Sanni, 2025. Kunnskapsgrunnlag for innsjøinterne tiltak i Hålandsvatnet. <i>NORCE rapport, Klima og miljø 7-2025</i> .
Bildekreditering	Bildet på forsiden av rapporten er tatt av Jørn Overskott, og er gjengitt med tillatelse fra fotografen
Kvalitetsansvarlig	Asbjørn Bergheim
Stikkord	Hålandsvatnet; overgjødsling; innsjøinterne tiltak

Sammendrag

Rogaland fylkeskommune gjennomfører et treårig samarbeidsprosjekt, der målet er å hindre eutrofiering og forbedre vannkvaliteten i Hålandsvatnet. NORCE har fått i oppdrag å utarbeide en rapport med oppdatert kunnskapsgrunnlag for innsjøen. Formålet med rapporten har vært å samle og sammenfatte eksisterende data og informasjon om forhold som er av betydning for hvordan innsjøsystemet fungerer (systemanalyse), og å identifisere og vurdere hovedutfordringene som det er mest hensiktsmessig at tiltakene rettes mot internt i innsjøen. Rapporten gir også en gjennomgang og prinsipiell vurdering av relevante tiltak.

Summary

Rogaland County Council is undertaking a three-year collaborative project to prevent eutrophication and improve water quality in Lake Hålandsvatnet. NORCE has been commissioned to provide an updated knowledge base for the lake. The purpose of this report has been to compile and synthesize existing data and information on factors of importance for the functioning of the lake system (systems analysis), and to identify and assess the key challenges towards which internal lake management measures should most appropriately be directed. The report also presents a review and a principal evaluation of relevant mitigation measures.

FORORD

Rogaland fylkeskommune gjennomfører et treårig samarbeidsprosjekt, "Bedre vannkvalitet i Hålandsvatnet", der målet er å hindre eutrofiering og forbedre vannkvaliteten i innsjøen. Samarbeidsprosjektet er delt i fire delprosjekt, der "Innsjøinterne tiltak" er ett av disse. Formålet med dette delprosjektet er å gi kommunene grunnlaget de trenger for å starte prosessen med planlegging og gjennomføring av innsjøinterne tiltak.

NORCE har fått i oppdrag å utarbeide en rapport med oppdatert kunnskapsgrunnlag for Hålandsvatnet. Formålet med rapporten har vært å samle og sammenfatte eksisterende data og informasjon om forhold som er av betydning for hvordan innsjøsystemet fungerer (systemanalyse), og å identifisere og vurdere hovedutfordringene som det er mest hensiktsmessig at tiltakene rettes mot internt i innsjøen. Rapporten gir også en gjennomgang og prinsipiell vurdering av relevante tiltak.

Åge Molversmyr ved NORCE har vært prosjektleder for oppdraget, og har hatt ansvar for utarbeidelse av rapporten i samarbeid med Steinar Sanni (UiS).

Faglig kvalitetssikrer for prosjektet har vært Asbjørn Bergheim (nå Bio Marine AS).

Prosjektet er finansiert av Rogaland fylkeskommune.

*Åge Molversmyr (prosjektleder)
Seniorforsker*

INNHold

SAMMENDRAG	1
1 INNLEDNING	2
2 KUNNSKAPSGRUNNLAG OG ANALYSE	3
2.1 Hydromorfologiske forhold	3
2.2 Tilførsler av næringsstoffer fra nedbørfeltet	6
2.3 Sedimentets rolle, og tilførsler av fosfor fra sedimentene	6
2.4 Omsetning av fosfor og næringsdynamikk	11
2.5 Hovedutfordringene i innsjøen	14
3 INNSJØINTERNE TILTAK	16
3.1 Innsjøinterne tiltak mot eutrofiering	16
3.2 Hovedutfordringene identifisert fra systemanalyse	16
3.3 Implikasjoner for tiltak i innsjøen	16
3.4 Tiltak med høy relevans i forhold til hovedutfordringer	18
3.5 Tiltak med lite relevans i forhold til hovedutfordringer	19
3.6 Tiltak med mulig relevans – i kombinasjon med andre tiltak	19
4 KOMMENTARER OG ANBEFALINGER	20
5 REFERANSER	21

SAMMENDRAG

Rogaland fylkeskommune gjennomfører et treårig samarbeidsprosjekt, der målet er å hindre eutrofiering og forbedre vannkvaliteten i Hålandsvatnet. NORCE har fått i oppdrag å utarbeide en rapport med oppdatert kunnskapsgrunnlag for innsjøen. Formålet med rapporten har vært å samle og sammenfatte eksisterende data og informasjon om forhold som er av betydning for hvordan innsjøsystemet fungerer (systemanalyse), og å identifisere og vurdere hovedutfordringene som det er mest hensiktsmessig at tiltakene rettes mot internt i innsjøen. Rapporten gir også en gjennomgang og prinsipiell vurdering av relevante tiltak.

Systemanalysen viser følgende om tilførsler og omsetning av fosfor i Hålandsvatnet (se figur 14):

- ✓ Betydelige mengder fosfor frigjøres fra sedimentene, og gir økt algevekst og kan gi opphav til store algeoppblomstringer.
- ✓ Internt frigjort fosfor vil inngå i et kretsløp i innsjøen, og det meste vil havne i sedimentet igjen sammen med mye av fosforet som tilføres fra nedbørfeltet.
- ✓ Retensjonen (tilbakeholdelse) av fosfor i Hålandsvatnet er om lag som forventet basert på innsjømodeller, og det er betydelig mer fosfor som tilføres innsjøen enn det som tapes via utløpet.
- ✓ Store mengder fosfor tilføres fra nedbørfeltet, og betydelige mengder akkumuleres i sedimentene.

Hålandsvatnet har mottatt store mengder næringsstoffer over lang tid. Jordbruksarealene i nedbørfeltet inneholder svært mye fosfor, og tilsvarende er det akkumulert svært mye fosfor i innsjøsedimentene. Det akkumulerte fosforet vil ta svært lang tid å vaske ut, og sedimentene er en viktig fosforkilde som vil forsinke respons på reduserte tilførsler fra nedbørfeltet. Følgende hovedutfordringer i innsjøen kan trekkes frem:

- Frigjøring av fosfor fra gruntvannssedimentene
- Store algeoppblomstringer med intensiv algevekst og medfølgende høy pH i overflatevannet
- Høyt oksygenforbruk og utvikling av anaerobe forhold i bunnvannet
- Utlekking av fosfor fra dypvannssedimentene

Alle disse er, direkte eller indirekte, knyttet til fosfortilførsler fra sedimentene, og tiltak for å begrense (minimere) interne tilførsler vil antakelig være avgjørende for å sikre god tilstand i Hålandsvatnet innen rimelig tid.

De nevnte utfordringene har klare implikasjoner for relevans og valg av tiltak i innsjøen, noe som omtales i avsnitt 3.3. Eksempler på relevante fysisk/kjemiske tiltakstyper vil være slike som på ulike måter kan hindre fosfatutlekking fra bunnsedimenter, både gruntvanns- og dypvannssedimenter. Disse kan både gå på å hindre utvikling av fysiske og kjemiske forhold som utløser mobilisering av fosfat i sedimentet (høy pH i overflatevann), og på å binde fosfatet i sedimentet på tross av tilstedeværelse av utløsende fysiske/kjemiske forhold (høy pH i overflatevann, anaerobe forhold i bunnvann). Biologiske tiltak (f.eks. biomanipuleringstiltak) vil antageligvis ikke ha særlig stor relevans i Hålandsvatnet.

En forutsetning for å kunne oppnå stabile forhold uten større algeoppblomstringer, er at det gjennomføres tiltak i nedbørfeltet som reduserer næringsstofftilførslene til innsjøen i tilstrekkelig grad. En må også ta i betraktning at et fremtidig varmere klima ventelig vil forsterke prosessene som forårsaker problemene Hålandsvatnet. Ved valg av tiltak, og før slike iverksettes, bør en nøye vurdere potensielle miljøpåvirkninger som tiltaket/tiltakene kan ha. Ved gjennomføring bør et overvåkingsprogram etableres som skaffer tilstrekkelig grunnlag til at tiltaket/tiltakene kan bli evaluert og fulgt opp.

Kapittel 1

INNLEDNING

Hålandsvatnet, på grensen mellom Randaberg og Stavanger kommuner, er en næringsrik innsjø med stort potensial for algevekst i vannmassene. Som i andre næringsrike innsjøer oppstår ofte betydelige oppblomstringer av cyanobakterier (blågrønnalger), og tilstanden i Hålandsvatnet er dårlig eller svært dårlig (Direktoratsgruppa for vannforvaltning 2025) avhengig av hvor store oppblomstringer som skjer de enkelte år (Molversmyr *et al.* 2025). Siden 2005 har planteplanktonet de fleste årene vært dominert av cyanobakterien *Planktothrix*, som også har produsert betydelig med giftstoffer. Dette medfører ofte forbud mot badeaktiviteter om sommeren, og brukerverdien av innsjøen er vesentlig redusert.

Opprinnelig var antakelig Hålandsvatnet en relativt næringsfattig innsjø (jamfør det nærliggende Stora Stokkavatnet; Molversmyr *et al.* 2023), og dagens tilstand i innsjøen er en følge av høye tilførsler av næringsstoffer over lang tid fra landbruksaktiviteter og husholdningsavløp. Eutrofieringsutviklingen kan ventelig sammenlignes med den som er påvist for Frøylandsvatnet på Jæren, hvor den for alvor skjøt fart for mer enn 80 år siden (Molversmyr *et al.* 2006). Lang tids overbelastning har medført at sedimentene i Hålandsvatnet er kraftig anriket med næringsstoffer (Molversmyr 2010; Nadelyaeva 2018), og det er liten tvil om at sedimentene nå bidrar vesentlig til de kraftige algeoppblomstringene en har sett her de siste årene.

Slik interngjødsling vil motvirke endringer i innsjøen når tilførsler fra nedbørfeltet reduseres (Scheffer *et al.* 2001), og det tar ofte lang tid fra tiltak i nedbørfeltet er gjennomført til forventet effekt i innsjøen oppnås (Cooke *et al.* 2005; Jeppesen *et al.* 2005). For Hålandsvatnet gjør dette det aktuelt å gjennomføre innsjøinterne tiltak i tillegg til tiltak i nedbørfeltet, for å oppnå raskere respons i innsjøen. Denne rapporten sammenfatter eksisterende data og informasjon om hvordan innsjøsystemet fungerer, og om hvilke hovedutfordringer det er mest hensiktsmessig å rette interne tiltak mot. Flere slike tiltak er tidligere vurdert og foreslått (Molversmyr 2019), og rapporten gir en oppdatert gjennomgang og prinsipiell vurdering av relevante tiltak basert på systemanalysen og de identifiserte hovedutfordringene. Dette vil danne en del av grunnlaget for det videre arbeidet med anbefalinger, støttet av vurderinger som vil bli foretatt av en nedsatt ekspertgruppe og prosjektgruppen for innsjøinterne tiltak i Hålandsvatnet.

Kapittel 2

KUNNSKAPSGRUNNLAG OG ANALYSE

2.1 Hydromorfologiske forhold

Hålandsvatnet har et lite nedbørfelt (figur 1), og vann-tilsiget til innsjøen er dermed lite. I forhold til beregnet innsjøvolum er teoretisk oppholdstid for vannet lang. Lav vanngjennomstrømming gjør at det er mindre som skal til av næringstilførsler før det oppstår eutrofieringseffekter i innsjøen. Nøkkeltall for Hålandsvatnet er vist i tabell 1.

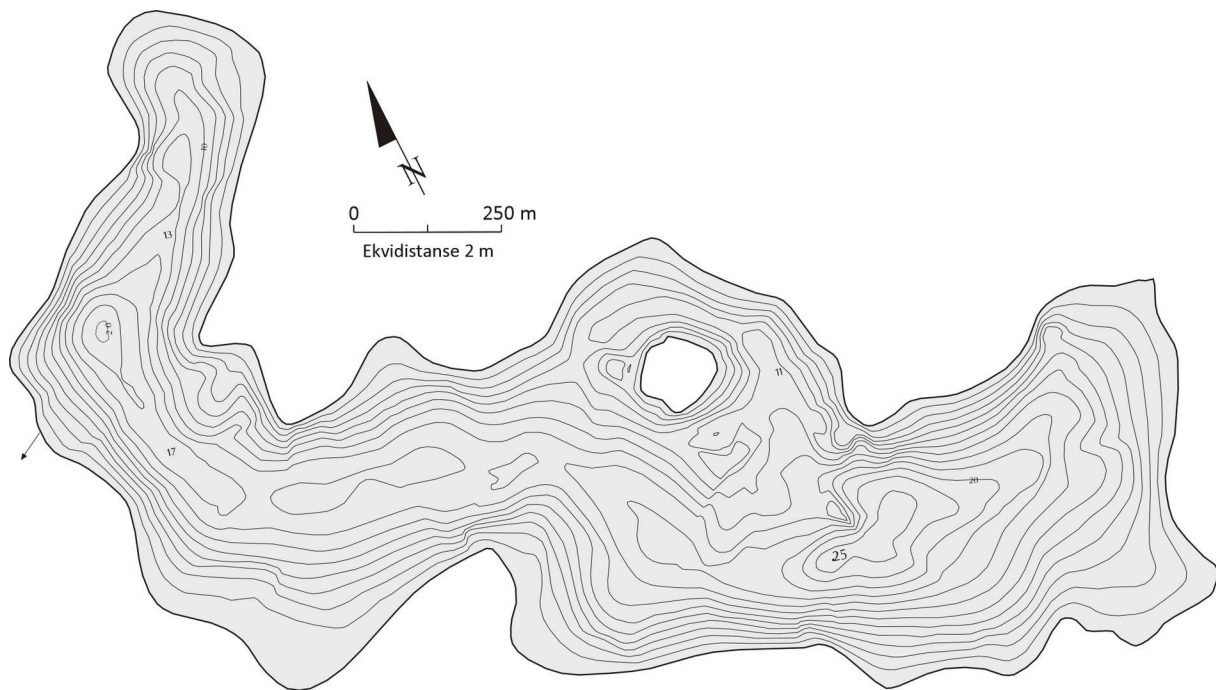
Innsjøen er relativt smal og lang, og må regnes å være sterkt vindpåvirket. Innsjøbassenget har relativt bratte sider ned til ca. 14-15 meter, og det dypeste området ligger i den sør-østlige delen (figur 2).

Tabell 1. Innsjødata (kilde: NVE).

Parameter	Størrelse
Nedbørfelt inkl. innsjø (km ²)	6,2
Innsjøareal (km ²)	1,2
Maksimalt dyp (m)	25
Middeldyp (m)	9,3
Innsjøvolum (10 ⁶ m ³)	11,2
Vanntilsig (10 ⁶ m ³ /år)	6,16
Teoretisk oppholdstid (år)	1,82



Figur 1. Hålandsvatnet med nedbørfelt.



Figur 2. Dybdekart for Hålandsvatnet (kilde: NVEs innsjødatabase).

Det er knyttet noe usikkerhet til nedbørfeltets størrelse, som følge av grøfting og drenering som gjør at nedbørfeltgrenser ikke nødvendigvis følger det topografien skulle tilsi. Dette ble nøye gjennomgått og vurdert under arbeidet med rapporten fra 2022 om tilførsler og avlastningsbehov (Molversmyr *et al.* 2022), bl.a. etter innspill fra grunneiere og kommunene. Resulterende nedbørfelt, slik det vises i figur 1, antas å være det som mest presist gjenspeiler området for tilrenning til innsjøen.

Det er ingen større tilløpsbekker til Hålandsvatnet, og det meste av vanntilsiget skjer via overflate-avrenning, grøftevann og grunnvann. En har ikke data for vanntilsiget i dette nedbørfeltet, og dataene i tabell 1 er basert på beregninger utført ved bruk av karttjenesten på nevina.nve.no¹.

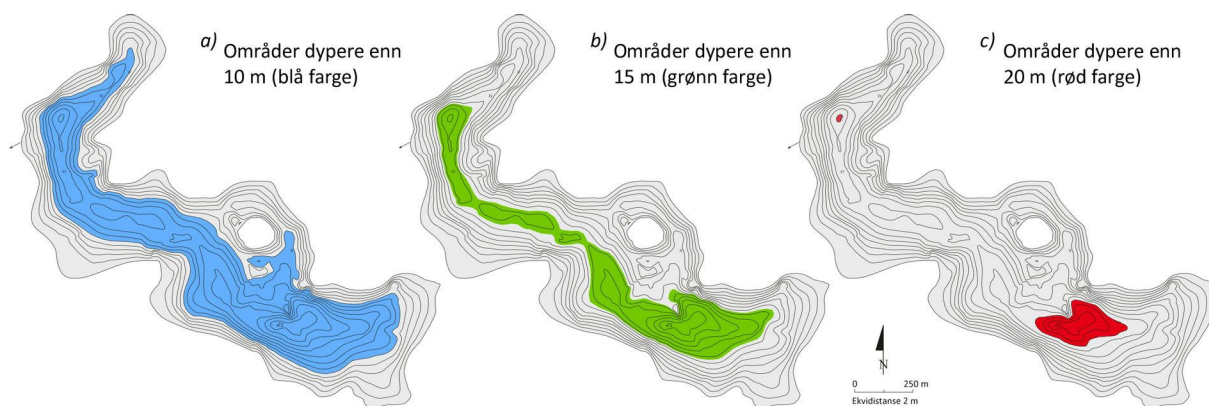
Beregnet årlig middelavrenning for standard normalperioden 1991-2020 er 31,5 l/s·km², og økte nedbørmengder gjør at avrenningen har økt med drøye 17 % siden forrige normalperiode 1961-1990. Økt vanntilsig har medført at teoretisk oppholdstid for vannet i innsjøen er redusert fra 2,1 år til 1,8 år, basert på avrenningstallene for de to normalperiodene. Økt vanngjennomstrømming er gunstig med tanke på effekter av forurensningsbelastning, og ville i henhold til innsjømodeller medføre betydelig reduksjon av næringsstoffinnhold i vannet i innsjøen (4-6 µg/l) dersom økningen kom som rent vann. Men økt nedbør/tilsig gjør også at tilførslene av næringsstoffer øker (som følge av utvasking fra nedbørfeltet), og effektene i innsjøen vil derfor være marginale. Dette gjelder ventelig også med tanke på videre økning i nedbør og vanntilsig i årene som kommer.

Vannmassene i Hålandsvatnet er sjiktet gjennom sommersesongen. Sjiktingen oppstår normalt i slutten av april og varer til siste halvdel av oktober, og sprangsjiktet ligger i området 10-12 meter frem til midten av august. Meteorologiske forhold (vind, temperatur, varmeinnstråling/-utstråling) vil være bestemmende for hvordan sjiktingen er det enkelte år, men angitte periode og dyp er representative for observasjoner utført de siste 20 årene.

I figur 3 er arealer dypere enn 10, 15 og 20 meter fremhevet. Drøye halvparten av sedimentarealet (56 %) ligger grunnere enn 10 meter, og vil normalt være eksponert for den øvre, sirkulerende, vannsøylen over sprangsjiktet om sommeren (kalt gruntvannssedimenter videre i rapporten). Vannvolumet som ligger under dette dypet, og som normalt ligger under sprangsjiktet om sommeren, utgjør ca. 26 %

¹ Nedbørfeltet redigert som vist i figur 1; GUID: 7e5dc542-a70a-4c75-bce3-1773f8378f70

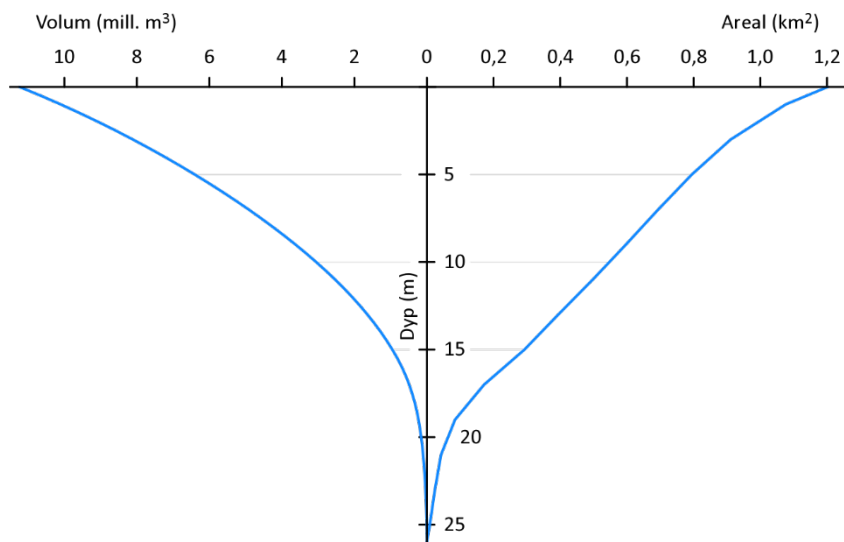
av innsjøvolumet (tilhørende sediment omtales som dypvannssedimenter videre i rapporten). Dypere enn 15 meter ligger om lag 22 % av arealet og 8 % av innsjøvolumet, og andelen som ligger under 20 meters dyp er kun 4 % av arealet og 0,7 % av innsjøvolumet. Dette fremkommer også fra tabell 2 og fra volum-/arealkurver vist i figur 4. Disse forholdene påvirker hvordan interngjødsling i innsjøen vil foregå, og hvor stor betydning det vil ha.



Figur 3. Dypområder i Hålandsvatnet.

Tabell 2. Volum bunnvann

Dyp (m)	Areal-dybde-kurve (km ²)	Underliggende volum (mill. m ³)
10	0,55	3,05
12	0,42	2,06
14	0,34	1,27
16	0,23	0,69
18	0,13	0,34
20	0,06	0,16



Figur 4. Areal og underliggende volum ved ulike dyp i Hålandsvatnet.

2.2 Tilførsler av næringsstoffer fra nedbørfeltet

Kilder til tilførsler av fosfor fra nedbørfeltet ble nøye gjennomgått i 2022 (Molversmyr *et al.* 2022), og det ble beregnet at innsjøen årlig tilføres drøye 730 kg fosfor fra ytre kilder ($0,61 \text{ g P m}^{-2} \text{ år}^{-1}$). Jordbruksarealer utgjør ca. 67 % av landarealet, og arealavrenning fra jordbruket er den største kilden til fosfortilførsler til innsjøen (86 %). Arealet med grønnsaker og potet bidrar med rundt 50 % av de totale fosfortilførslerne, mens tilførslerne fra eng og beite er beregnet til 24 %. Spredt og kommunalt avløp bidrar også, men totalt utgjør disse kildene ifølge beregningene kun 7 % av de totale tilførslerne. Naturlig bakgrunnsavrenning (deposisjon vann, utmark og bakgrunnsavrenning) utgjør 7 % av tilførslerne.

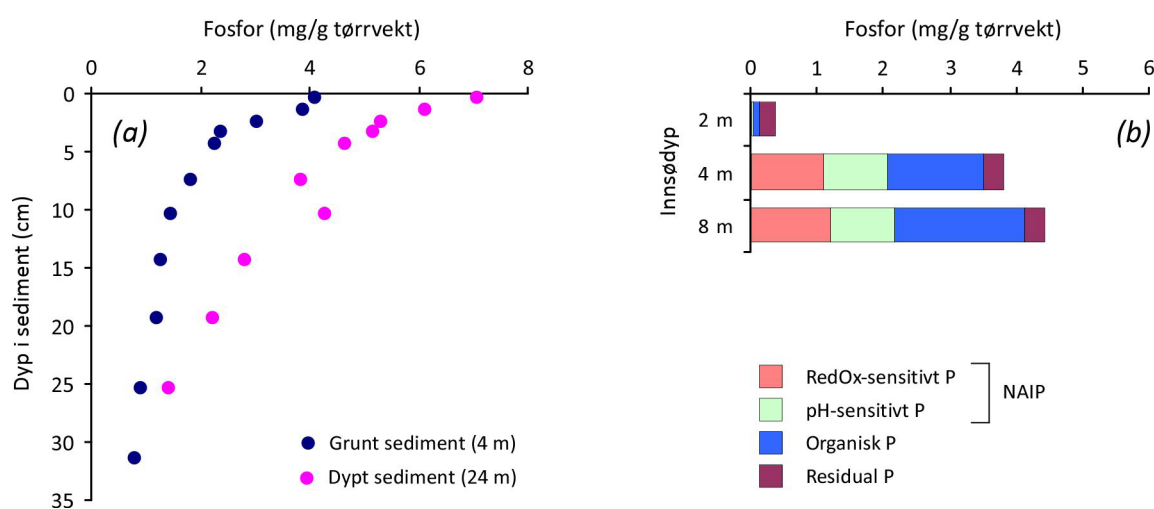
Tilførsler i denne størrelse er langt høyere enn det antatte miljømålet for innsjøen. I nevnte rapport ble det anslått at årlige eksterne tilførsler ikke bør overstige 270 kg P ($0,22 \text{ g P m}^{-2} \text{ år}^{-1}$) for at stabilt god økologisk tilstand skal kunne oppnås og opprettholdes. Dette baseres på gjeldende klassifiseringsveileder (Direktoratsgruppa for vannforvaltning 2025), som for Hålandsvatnet angir at grensen mellom god og moderat tilstand er $17 \mu\text{g/l P}$ som gjennomsnittlig innhold av total fosfor i overflatevannet i vekstsesongen. Hvor store tilførsler av fosfor som vil gi dette fosfornivået i innsjøvannet ble beregnet ved hjelp av en innsjømodell (Nürnberg 1998). På dette nivået antas det at det ikke vil oppstå nevneverdig algeoppblomstring eller andre eutrofieringseffekter under normale forhold.

2.3 Sedimentets rolle, og tilførsler av fosfor fra sedimentene

2.3.1 Sedimentets sammensetning

Store fosfortilførsler over tid har ført til at innsjøsedimentet er svært fosforrikt. Resultater fra undersøkelser i 2009 (Molversmyr 2010) og 2017 (Nadelyaeva 2018) viste at de øverste sedimentlagene er svært fosforrike, og at mye av fosforet finnes på former som lett kan mobiliseres og løses ut i vannmassene. I figur 5 er dette illustrert, der det fremgår at overflatesedimentet fra grunt område (4 m dyp) inneholdt ca. 4 mg P/g tørrstoff og nær det dobbelte i sediment fra dypområde. Om lag halvparten av fosforet kan regnes som ikke-apatitt-bundet fosfor (NAIP), som antas å representere den delen av totalfosforet som lett kan mobiliseres ved høy pH eller oksygensvinn.

Tilsvarende fosforinnhold og sammensetning ble funnet i en undersøkelse i 2017, som omfattet både grunne og dype sedimenter (Nadelyaeva 2018). Så lenge fosfor fra nedbørfeltet fortsatt akkumuleres i sedimentet (se avsnitt 2.4) er det lite sannsynlig at forholdene i de øverste sedimentlagene er vesentlig endret siden disse undersøkelsene ble foretatt.



Figur 5. Fosfor i sedimentet i Hålandsvatnet (omarbeidet fra Molversmyr 2010).

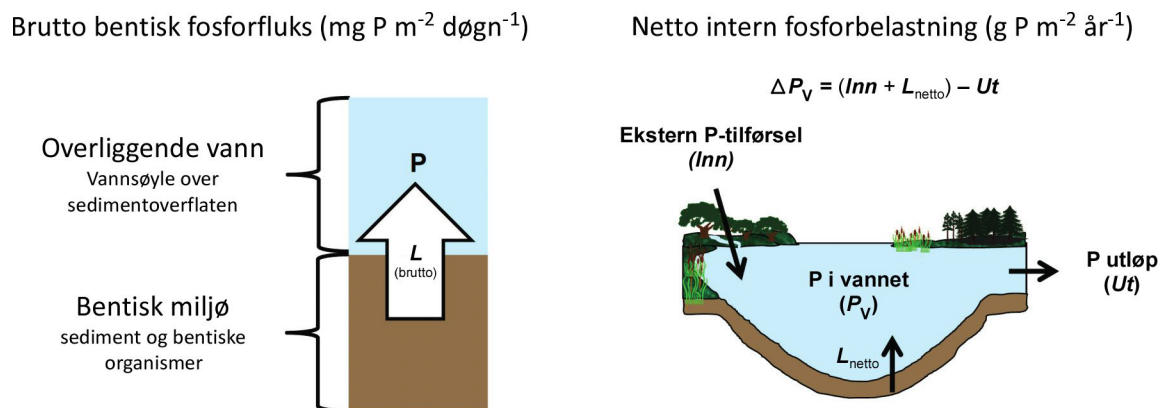
(a) Innhold av total fosfor i ulike dyp i sediment fra grunt og dypt område.

(b) Fraksjoner av fosfor i øverste sedimentsjikt (0-1 cm) fra meget grunt, grunt, og middels grunt sediment (bestemt etter metode fra Psenner *et al.* (1984) og Hupfer *et al.* (1995)).

2.3.2 Interne tilførsler og intern gjødsling

Begrepet intern gjødsling blir brukt på ulike måter, som kan gi rom for feiltolkning og misforståelser (Orihel *et al.* 2017). Det er derfor viktig å presisere hva som legges i begrepet i denne rapporten. Intern gjødsling defineres her som alle fysiske, kjemiske og biologiske prosesser som mobiliserer og frigjør fosfor fra bentisk miljø til overliggende vann (Steinman & Spears 2020), der «bentisk miljø» omfatter organismer som oppholder seg i eller på overflaten av sedimentet. Grunnen til dette er at en primært har fokus på fosformengden som potensielt blir tilgjengelig for planteplanktonet. Fosfor fra sedimentet som f.eks. tas direkte opp av perifyton² som vokser på sedimentoverflaten, blir ikke tilgjengelig for planteplankton, og bør derfor ikke inkluderes.

Ved denne bruken av begrepet forholder en seg til utlekking fra spesifikke sedimentflater over relativt korte tidsperioder, og mengden uttrykkes gjerne som $\text{mg P m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Dette anses som brutto transport (fluks) av fosfor fra sedimentet til vannmassene (slik som illustrert i figur 6), potensielt tilgjengelig for planteplanktonet på løst form som lett kan utnyttes. Netto intern fosforbelastning representerer balansen for hele innsjøsystemet, og uttrykkes gjerne som $\text{g P m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ (figur 6). Dette omtales nærmere i avsnitt 2.4.



Figur 6. Illustrasjon av brutto transport av fosfor fra sediment til vann, og netto intern gjødsling i en innsjø (omarbeidet fra Orihel *et al.* 2017).

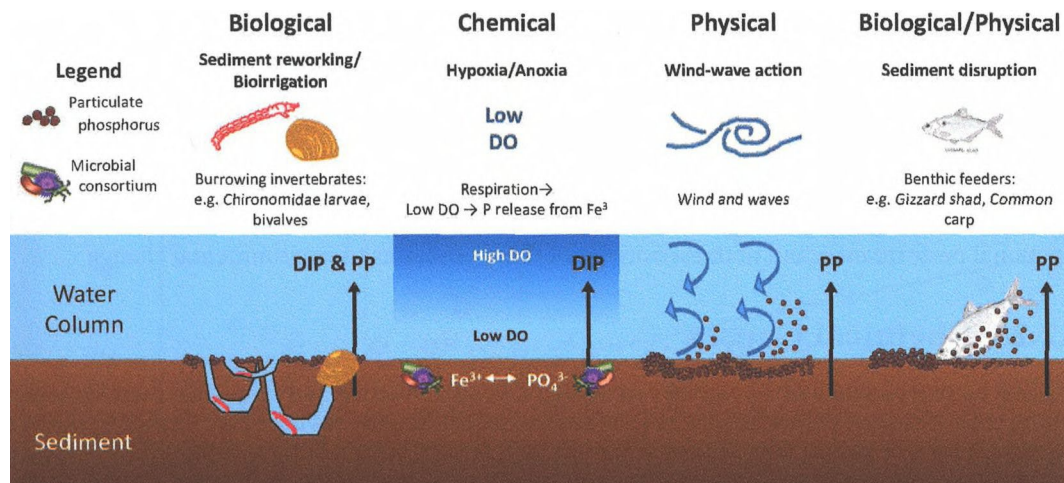
Det bemerkes at eventuelle tilførsler av fosfor via grunnvann som siger gjennom innsjøsedimentet her er inkludert i eksterne tilførsler, slik disse er beskrevet i avsnitt 2.2. Omfanget av tilførsler via grunnvann til Hålandsvatnet er ikke kjent, og massebalanseberegninger vil i liten grad kunne skille slike tilførsler fra «ekte» interne fosfortilførsler.

Det er en rekke mekanismer som kan medføre frigjøring av fosfor fra sedimenter, slik som illustrert i figur 7. Illustrasjonen er hentet fra Steinman & Spears (2020), og viser viktige biologiske, kjemiske og fysiske faktorer. I de to følgende avsnittene omtales nærmere mekanismer som antas å ha størst betydning for frigjøring av fosfor til dypvann og gruntvann i Hålandsvatnet.

2.3.3 Frigjøring av fosfor til dypvann (fra dypvannssedimenter)

I bunnvannet i sjiktede innsjøer vil bakteriell nedbrytning av organisk stoff i vannsøyle og sediment-overflate medføre at oksygen forbrukes, og siden det ikke tilføres nytt oksygen så lenge vannsøylen er sjiktet vil oksygeninnholdet i bunnvannet avta. Hvor raskt dette går, avhenger av hvor mye organisk stoff som er tilgjengelig, og dette bestemmes i stor grad av utsynking/sedimentasjon av alger som vokser i overflatelaget. I Hålandsvatnet viser observasjoner fra de siste 20 årene at det typisk tar om lag 7 uker fra vannmassene sjiktes til vannet nær bunnen i det dypeste området i innsjøen blir oksygenfritt. I år med kraftige vinter-/våroppblomstringer av alger kan det gå raskere, og i 2024 tok det bare drøye 3 uker. Dette året sedimenterte en stor biomasse av cyanobakterier kort tid etter at vannmassene ble sjiktet (Molversmyr *et al.* 2025).

² Perifyton refererer til det levende organismesamfunnet som vokser på faste overflater i vannmiljøer, som steiner, sedimenter, planter eller strukturer som er nedsenket i vann.



Figur 7. Skjematisk fremstilling av viktige mekanismer som kan medføre intern fosforbelastning i innsjøer (hentet fra Steinman & Spears (2020); illustrasjon kreditert Emily Kindervater).

Oksygenfritt blir det etter hvert også høyere opp i vannsøylen, og observasjoner viser at det i august vanligvis er oksygenfritt helt opp til sprangsjiktet. Dette går stadig dypere utover høsten, frem til høstsirkulasjonen gjør at oksygenrikt vann igjen sirkulerer til bunns. Områdene som omfattes av oksygenfrie forhold i bunnvannet er dermed ikke ubetydelige, verken i forhold til areal, volum eller tid (tabell 2, og figur 3 og 4).

Oksygenfrie forhold i bunnvannet gjør at forholdene etter hvert kan bli slik at fosfor som er lagret i underliggende sediment vil lekke ut. Dette skjer når redoksprosesser har medført at treverdig jern i sedimentoverflaten reduseres til toverdig, og dermed frigjør fosfat som var bundet til det treverdige jernet. Slik redoksbettinget fosforfrigjøring er den dominerende prosessen som medfører anrikning av løst fosfat i bunnvannet. Resultater fra overvåking de siste 20 årene viser omfattede fosforutlekking fra dypvannssedimentene i Hålandsvatnet de fleste årene etter 2005. Det nevnes at undersøkelser i 1988 (Molversmyr & Sanni 1990) og 2001 (Molversmyr 2002) ikke påviste slik fosforutlekking, selv om bunnvannet disse årene også var oksygenfritt i betydelige deler av stagnasjonsperioden om sommeren.

Hvor mye fosfor som akkumuleres i bunnvannet kan estimeres ved massebalanseberegninger, og Hupfer *et al.* (2020) beskriver en metode som baseres på innhold av fosfor i ulike sjikt av bunnvannet til ulik tid (ligning 1). Basert på overvåkingsdata fra de siste ti årene kan det med denne fremgangsmåten estimeres at det i bunnvannet i stagnasjonsperioden har akkumulert mellom 57 kg P i 2020 ($0,3 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) og 214 kg P i 2024 ($0,9 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), i snitt 123 kg P ($0,6 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Eller totalt for året i snitt $0,10 \text{ g P m}^{-2} \text{ år}^{-1}$.

$$HPA = \frac{\sum_{z=1}^i (cP_z \times V_z)_{t2} - \sum_{z=1}^i (cP_z \times V_z)_{t1}}{A \times (t_2 - t_1)} \quad [\text{Ligning 1}]$$

Der:

HPA = akkumuleringsrate for P i hypolimnion ($\text{mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$)

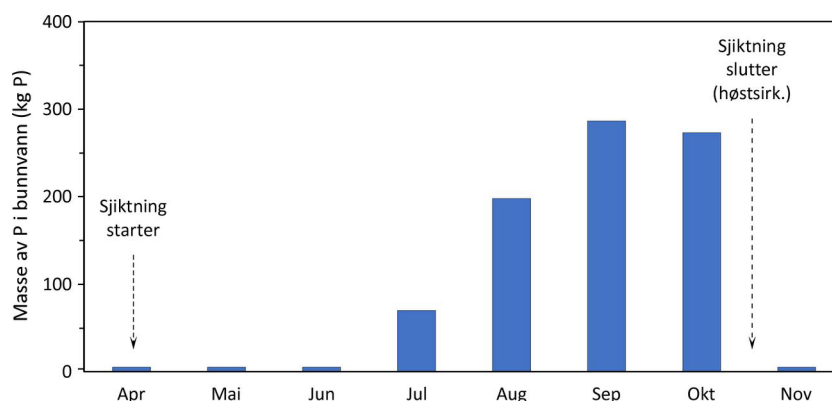
cP_z = gjennomsnittlig P-konsentrasjon i et vannsjikt (mg m^{-3})

V_z = volum av et vannsjikt (m^3)

A = sedimentareal tilhørende hypolimnion (m^2)

t₂ – t₁ = perioden mellom to definerte tidspunkt (døgn)

Hvor mye som akkumuleres det enkelte år avhenger av flere faktorer; hvor tidlig vannsøylen sjiktes, temperatur i bunnvannet, meteorologiske forhold gjennom sommeren, forekomst av alger som sedimenterer og blir brutt ned i bunnvannet, med mer. Estimaten viser imidlertid at bunnvannet hvert år inneholder betydelige mengder fosfor som potensielt vil være tilgjengelig for algevekst, og figur 8 viser beregnet fosformengde i bunnvannet gjennom sommeren 2024.



Figur 8. Beregnet mengde av fosfor i bunnvannet i Hålandsvatnet gjennom sommeren 2024.

Mot slutten av sjiktningssperioden var estimert utlekkingsrate dette året $5,3 \text{ mg m}^{-2} \text{ døgn}^{-1}$ regnet for bunnvannets arealutbredelse, som er det samme som gjennomsnittet for de siste 10 årene. Til sammenligning beregnet Molversmyr & Sanni (1990) en utlekkingsrate på $5,6 \text{ mg m}^{-2} \text{ døgn}^{-1}$ i et utlekkingsforsøk med intakte sedimentkjerner fra innsjøen.

2.3.4 Frigjøring av fosfor til gruntvann (fra gruntvannssedimenter)

Mens det i dypvannet er redoksbettinget fosforfrigjøring som vil være den dominerende mekanismen, er det en rekke biologiske, kjemiske og fysiske faktorer som gjør at fosforrike gruntvannssedimenter kan være kilde til betydelig interngjødsling. Fosforfrigjøring ved høy pH i overflatevann (som følge av intensiv algevekst) vil kunne være betydelig, mens frigjøring ved vinddrevet resuspensjon av sediment også kan ventes å gi vesentlige bidrag (Molversmyr 2010). Mineralisering i sedimentoverflaten når mikroorganismer bryter ned organisk materiale som samles der, er også en prosess som vil frigjøre fosfor. Nedbrytningsprosessene i sedimentet gir økt innhold av fosfor i porevannet, som vil diffundere til overliggende vann (pga. konsentrasjonsforskjeller). Utlekkingen vil øke når temperaturen er høy, og særlig dersom rolige vindforhold gjør at det øverste sedimentsjiktet blir anaerobt i perioder (som følge av høyt bakterielt oksygenforbruk). I tillegg vil sedimentspisende fisk og andre dyr som lever eller finner føde i sedimentet frigjøre fosfat ved såkalt bioturbasjon (omrøring av sediment, samt transport til vann via ekskrementer) (Andersson *et al.* 1988). Hvor mye som frigjøres fra gruntvannssedimentene avhenger av mange faktorer, og vil variere betydelig etter forholdene som til enhver tid er i innsjøen. En kan vanskelig tallfeste «normale» verdier for denne interngjødslingen, men det kan skisseres nivåer for hva som er tenkelig.

Ved et utlekkingsforsøk med intakte sedimentkjerner fra Frøylandsvatnet på Jæren i 2005, ble det beregnet at utlekking ved høy pH i overliggende vann ville tilsvare om lag $6 \text{ mg P m}^{-2} \text{ døgn}^{-1}$ ved pH 9,5 (Molversmyr & Andersen 2006). Det ble utført et lignende forsøk med sedimentkjerner fra Hålandsvatnet i 2019 (Molversmyr *et al.* 2020), og selv om dette forsøket ikke var designet for å måle frigjøringsrater kan det beregnes at det ble frigjort ca. $6,5 \text{ mg P m}^{-2} \text{ døgn}^{-1}$ i gjennomsnitt over en 7-dagers periode da vannet over sedimentet ble holdt ved ca. pH 9,5. Samsvar med nevnte resultat fra Frøylandsvatnet kan være tilfeldig, men overfatesedimentet er relativt likt i disse innsjøene med tanke på fosforinnhold og -sammensetning. Et tilsvarende utlekkingsforsøk utført med sediment fra Hålandsvatnet i 1988 indikerte vesentlig høyere utlekkingsrater, helt opp mot $17 \text{ mg P m}^{-2} \text{ døgn}^{-1}$ ved pH 9,5 (Molversmyr & Sanni 1990).

Høy pH i vannet er et resultat av intens algevekst (fotosynteseaktivitet), og i Hålandsvatnet er det ofte målt pH mellom 9 og 10 gjennom store deler av sommeren (f.eks. Molversmyr *et al.* 2024; Stølen 2020). Frekvensen og varigheten av slike perioder, og intensiteten av algeveksten, varierer fra år til år, og pH vil variere gjennom døgnet i tråd med at fotosynteseaktiviteten varierer med lyset. Men basert på frigjøringsratene nevnt ovenfor, og på observerte perioder med høy pH, kan det anslås at i størrelsesorden $300\text{--}500 \text{ kg P}$ ($0,29\text{--}0,42 \text{ g P m}^{-2} \text{ år}^{-1}$) frigjøres fra gruntvannssedimentene gjennom året ved denne prosessen, slik forholdene har vært der de senere årene.

Hålandsvatnet ligger eksponert til for vindpåvirkning, og en må vente at vind tidvis vil skape bølgebevegelser som kan medføre at sediment blir suspendert og blandet inn i vannmassene. Hvor store sedimentarealer som berøres vil avhengig av både vindstyrke og vindretning, men Stølen (2020) beregnet f.eks. at kuling vindstyrke fra nord-vest (dominerende vindretning) vil påvirke sediment ned til ca. 3,5 meters dyp. Molversmyr (2010) gjorde forsøk med sediment fra ulike dyp i Hålandsvatnet, og fant at sedimentet nesten uansett ville frigjøre fosfat dersom det ble resuspendert (med unntak av det helt grunneste, og mer sandholdige sedimentet). Basert på disse forsøkene og sedimentarealet som kan påvirkes, kan det anslås at 50-100 kg P vil kunne frigjøres fra resuspendert sediment under en episode med sterk kuling. Selv en episode med frisk bris vil kunne medføre at flere titalls kg P blir frigjort. Dersom resuspensjon skjer når det er høy pH i vannet, vil frigjøringen av fosfat ventelig øke vesentlig. Hvor mye dette bidrar til intern fosforgjødsling vil variere betydelig fra år til år, avhengig av vindstyrke, vindretning, og hyppighet og varighet av vindepisoder. Det synes imidlertid klart at potensialet er stort (antakelig flere hundre kg P pr. år).

En annen viktig mekanisme er frigjøring av fosfor som følge av mineralisering i sedimentoverflaten, og diffusjon til overliggende vann. Dette vil foregå i større eller mindre grad i alle innsjøer, avhengig av mengde og sammensetning av organisk materiale som akkumuleres i sedimentet. Bakteriell nedbrytning stimuleres av økt temperatur, og i tillegg til resulterende frigjøring av organisk bundet fosfor vil dette kunne medføre lavere red-oks potensial i sedimentoverflaten og utlekking av jernbundet fosfor. I en utredning om interngjødsling i Frøylandsvatnet (Molversmyr & Andersen 2006) ble det i et forsøk med intakte sedimentkjerner fra innsjøen funnet et «bakgrunnsnivå» for fosforutlekking som var i overkant av $1 \text{ mg P m}^{-2} \text{ døgn}^{-1}$, som ble antatt å skyldes mineralisering. Om en antar tilsvarende utlekkingsrate fra sedimentene i Hålandsvatnet kan det anslås at i størrelsesorden 150-200 kg P vil tilføres vannet i overflatelaget gjennom vekstsesongen. Forsøket i Frøylandsvatnet ble utført ved 17 °C, og utlekkingsraten må ventes å være høyere når temperaturen øker. Temperatur er en vesentlig faktor som påvirker fosforutlekking fra sedimenter (Jensen & Andersen 1992; Kindervater *et al.* 2020), og mineralisering vil ventelig få større betydning i et fremtidig varmere klima.

Av andre faktorer som kan medføre transport av fosfor fra sediment til vann nevnes bioturbasjon forårsaket av dyr som lever i eller finner føde i sedimentene. Eksempelvis er det funnet at aktiviteten til insektlarver i sedimentet kan gi signifikante bidrag av fosfor til overliggende vann (Chaffin & Kane 2010; Hölker *et al.* 2015). En kjenner ikke utbredelsen av slike eller andre bunnlevende dyr i Hålandsvatnet, hverken i tid eller rom, og det lar seg ikke gjøre å estimere hvor mye interngjødsling dette kan medføre. Men trolig er det ikke vesentlig i forhold til andre kilder omtalt ovenfor.

Enkelte karpefisk er derimot kjent for å kunne gi betydelige bidrag til interngjødsling ved at de roter i sedimentet, spiser bunndyr og slipper ut ekskrementer i vannmassene (Brabrand *et al.* 1990; Sandlund *et al.* 2016). I Hålandsvatnet ble karpefisken sørv (*Scardinius erythrophthalmus*) påvist i 2011, og finnes nå i betydelige forekomster i hele innsjøen (Enge 2023; K.S. Eriksen, pers. komm.) Andre fiskeslag er ørret (*Salmo trutta*), som vedlikeholdes for sportsfiske ved jevnlig utsetting av settefisk. Antakelig finnes også ål (*Anguilla anguilla*) og kanskje stingsild (*Gasterosteus aculeatus*) i innsjøen, mens en tidligere populasjon av røye (*Salvelinus alpinus*) antas nå å være utdødd (Enge 2023).

Sørv oppholder seg i hovedsak i strandsonen i områder med vannvegetasjon, og spiser primært plante-materiale og detritus, men også dyreplankton og bunndyr. Sørv er betraktet som en av de mest plante-spisende artene i europeisk fiskefauna, men dietten kan skifte gjennom livssyklusen (Forsgren *et al.* 2023). Det finnes få studier på sørvs rolle i norske innsjøer, og en har begrenset kunnskap om hvordan populasjoner av sørv kan påvirke interngjødsling. En studie med forsøk i innhegninger indikerte at sørv ikke forårsaket transport av fosfor fra sediment til vann, slik annen karpefisk kan gjøre (Razlutskiy *et al.* 2025). Sørv er i hovedsak plantespisende når temperaturen er høyere enn 20 °C (García-Berthou & Moreno-Amich 2000; Boedeltje *et al.* 2019), mens den unngår planteføde ved lavere temperaturer (Vejříková *et al.* 2016). Forsøkene til Razlutskiy *et al.* (2025) ble utført ved temperaturer mellom 17 og 23 °C, som er sammenlignbart med forholdene i Hålandsvatnet om sommeren. Resultatene er ikke direkte overførbare, og det kan være at sørven i Hålandsvatnet har større innslag av dyreplankton og bunndyr i føden som effekt av noe lavere temperaturer. Men de kan likevel gi

signal om at sørv ikke bidrar i vesentlig grad til interngjødslingen. I disse vurderingene kommer også at strandsonen i Hålandsvatnet utgjør en forholdsvis liten del av det totale vannarealet/volum, som gir sørven et begrenset leveområde. Men sørven kan ha andre effekter på innsjøsystemet, som ikke er direkte knyttet til utløsning av fosfor fra sedimenter (f.eks. Razluts kij *et al.* 2025; Walseng *et al.* 2022). Dette er ikke nærmere vurdert i denne rapporten.

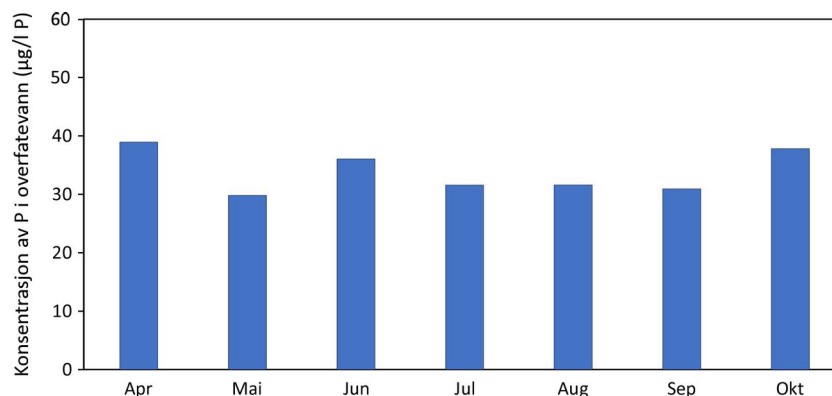
2.4 Omsetning av fosfor og næringsdynamikk

I det følgende vurderes betydningen av den omtalte fosforutlekkningen fra sedimentene, og hvordan fosforet omsettes i innsjøsystemet.

Fosforet som akkumuleres i bunnvannet om sommeren vil i større og mindre grad blandes inn i det sirkulerende overflatevannet ved diffusjon og effekter av indre bølger i sprangsjiktet. Det siste blir særlig viktig når sprangsjiktet brytes ned utover høsten. Stølen (2020) gjorde detaljerte undersøkelser i Hålandsvatnet i 2019, og estimerte at transport fra bunnvann til overflatevann gjennom stagnasjonsperioden dette året var om lag 365 kg/P.

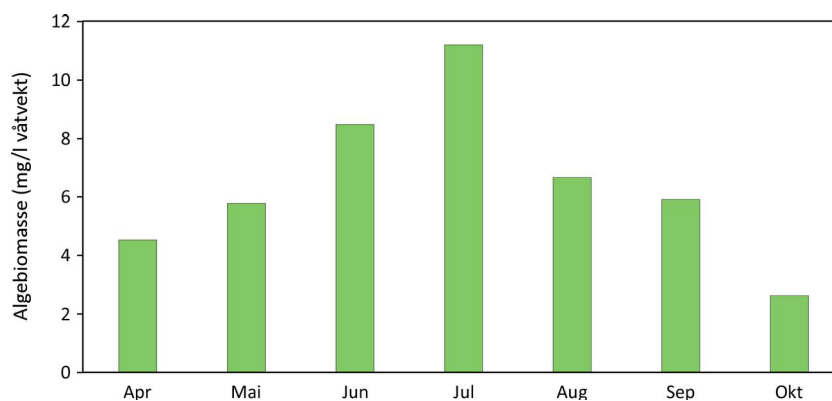
En stor del av dette fosforet vil imidlertid raskt felles ut og sedimentere, ved at redusert jern i det innblandede bunnvannet oksideres og binder seg til seg fosfat igjen. Men jern i bunnvannet kan også bindes som jernsulfid når sulfid er til stede, som dermed vil frikoble fosfatet fra jernet (Nürnberg 2025). Hvor mye fosfor fra bunnvannet som potensielt blir tilgjengelig for algevekst i overflatevannet er usikkert, men en relativt moderat økning av total fosfor i overflatevannet som registreres fra sommer til høst (figur 9) tilsvarer om lag 80 kg P (og mindre enn dette dersom fosforinnholdet i tilførselsvannet fra nedbørfeltet øker i samme periode). En har imidlertid lite overvåkingsdata fra sent om høsten og vinteren, men data fra 2007 og 2008 (Molversmyr 2008, 2009) viste økt og målbart innhold av løst fosfat i overflatevannet (opp til 10 µg/l P) perioden november-januar. I stagnasjonsperiodene forut for disse målingene var det relativt lite som var akkumulert i bunnvannet (opp til 80 µg/l PO₄-P nær bunnen), og vesentlig mindre enn det som er målt de seneste årene (500-600 µg/l PO₄-P). Fosforet i bunnvannet kan derfor ventelig gi vesentlig bidrag av algetilgjengelig fosfor som grunnlag for algevekst i starten av vekstsesongen.

Enkelte algetyper kan også utnytte fosfor direkte fra det anrikede bunnvannet. Mange cyanobakterier har f.eks. evne til å regulere oppdrift og plassering i vannsøylen, og særlig *Planktothrix* (den viktigste «problemalgen» i Hålandsvatnet) er kjent for å kunne ha biomassemaksima i sprangsjiktet eller endog i øvre deler av hypolimnion (bunnvannet) (Padisák *et al.* 2003; Nürnberg 2025). I Hålandsvatnet har en ikke observert slike dype maksima i algebiomasse, men det kan ikke utelukkes at cyanobakterier (og andre alger med evne til vertikal flytning) foretar mer og mindre regelmessige vandringer vertikalt i vannsøylen for å kunne utnytte fosfor direkte fra anriket bunnvann.



Figur 9. Beregnet gjennomsnittlig konsentrasjon av total fosfor i overflatevann i Hålandsvatnet i perioden 2010-2024.

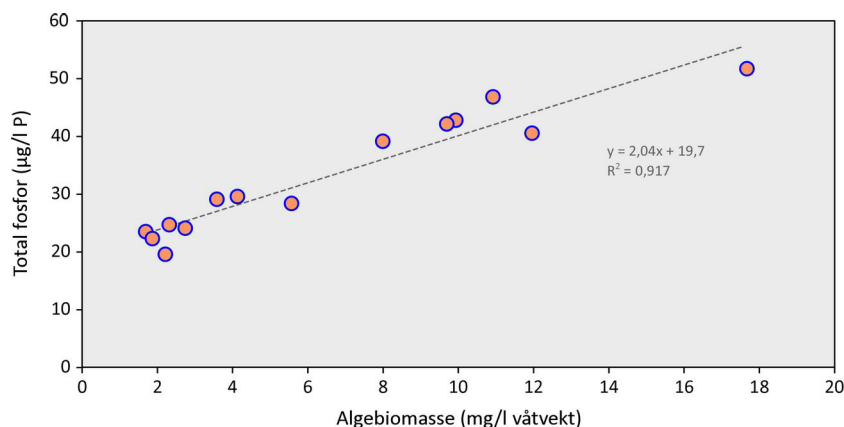
Fosfor som frigjøres fra gruntvannssedimenter tilføres vannmassene der algene vokser, og vil være direkte tilgjengelig for økt algevekst. I Hålandsvatnet har det ofte forekommet store algeoppblomstringer om sommeren, og i figur 10 reflekteres dette med tydelig økt algebiomasse i juni og juli. Spesielt kraftig var en oppblomstring i 2012 (Molversmyr *et al.* 2013), som kan anslås å ha forbrukt i størrelsesorden 400 kg P for å bygge opp biomassen som ble observert i juni og juli dette året. Dette må i hovedsak ha blitt tilført fra sedimentene, siden slike mengder neppe kan ha kommet fra nedbørfeltet i de aktuelle periodene om sommeren.



Figur 10. Beregnet gjennomsnittlig algebiomasse i Hålandsvatnet i perioden 2010-2024.

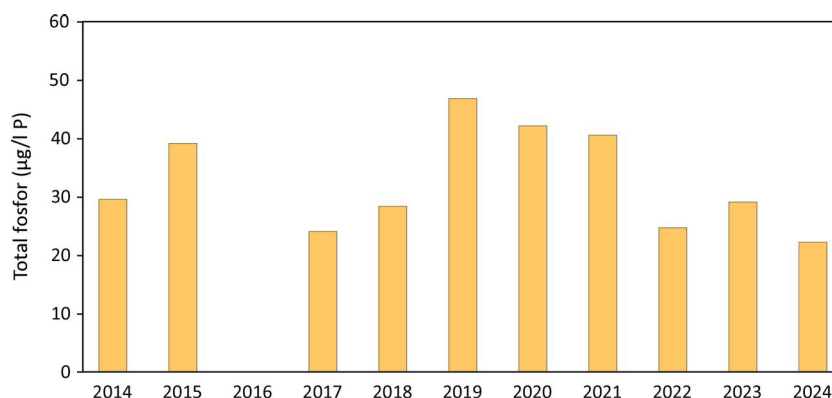
Med forbehold om betydelig usikkerhet i estimatene kan det anslås at det totalt frigjøres i størrelsesorden 600-1200 kg P år⁻¹ fra sedimentene i Hålandsvatnet, der bidrag fra gruntliggende sedimenter vil dominere. Mengdene som frigjøres vil variere, og ventes å være størst i de årene hvor det oppstår algeoppblomstringer med intensiv vekst som gir høy pH i vannet. Fosforet som da frigjøres vil medvirke til ytterligere vekst, og utlekkingen blir selvforsterkende. Andre faktorer som antas å ha betydning er vanntemperaturen (frigjøring ved mineralisering), styrke og frekvens av vindepisoder (frigjøring ved resuspensjon), og dessuten forekomst av algetyper som kan gjøre vandringer vertikalt i vannsøylen for å utnytte fosfor direkte fra anriket bunnvann. Enkelte år vil antakelig frigjøringen kunne være vesentlig større enn antydnet ovenfor.

Hvor mye som transporteres ut av innsjøen kan estimeres basert på målte fosforkonsentrasjoner i vannet, reell og normal fordeling av nedbør over året, og normalavrenning (oppgett av NVE). Fosforkonsentrasjonene har variert betydelig fra år til år, og i takt med algeoppblomstringer siden en vesentlig del av totalfosforet vil være knyttet til algebiomasse (figur 11).



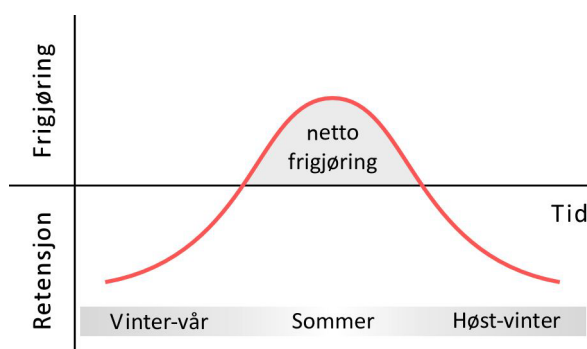
Figur 11. Sammenheng mellom algebiomasse og totalfosfor i Hålandsvatnet. (basert på gjennomsnitt for vekstsesonger i perioden 2010-2024).

De siste tre årene har det ikke vært store oppblomstringer, og fosforinnholdet i vannet har vært relativt moderat. De tre forutgående årene var derimot preget av større algeoppblomstringer, og vesentlig høyere fosforinnhold (figur 12). Hva som kan regnes som representativt innhold av fosfor i vannet er noe usikkert, men dersom en legger de siste 10 årene til grunn kan det beregnes at drøye 200 kg P normalt vil tapes årlig via utløpet. I forhold til beregnede årlige tilførsler fra nedbørfeltet (avsnitt 2.2) betyr dette at ca. 70 % av tilført fosfor holdes tilbake i innsjøen (retensjon). Dette er på størrelse med hva som normalt kan ventes å bli holdt tilbake i denne innsjøen (Nürnberg 2020; Khorasani & Zhu 2021). Det betyr at det meste av fosforet som frigjøres fra sedimentene vil havne tilbake i sedimentet igjen, i en intern syklus i innsjøen.



Figur 12. Gjennomsnittlig fosforinnhold i overflatevann i Hålandsvatnet i vekstsesongene de siste 10 årene.

Fosforfrigjøringen skjer i hovedsak om sommeren, og bidrar da til de store algeoppblomstringene som observeres. Men det meste vil sedimentere igjen med biomassen som etter hvert havner i sedimentet. En slik sesongvariasjonen er illustrert i figur 13.

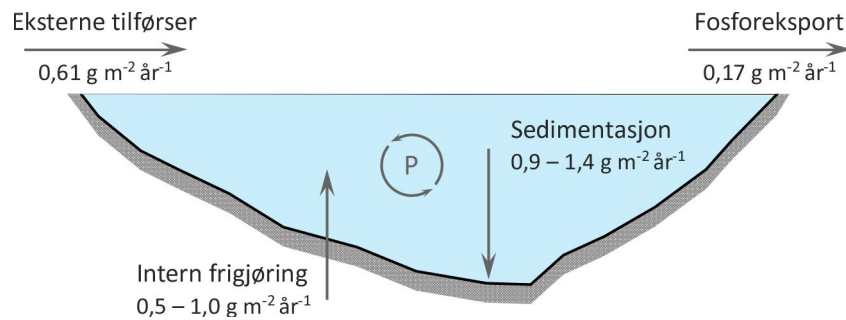


Figur 13. Illustrasjon: sesongmessig variasjon av fosforutlekking og -retensjon fra/til innsjøsediment. (omarbeidet fra Hupfer et al. 2020).

Følgende kan oppsummeres om tilførsler og omsetning av fosfor i Hålandsvatnet, med anslåtte mengder som skissert i figur 14:

- Betydelige mengder fosfor frigjøres fra sedimentene, og gir økt algevekst og kan gi opphav til store algeoppblomstringer.
- Internt frigjort fosfor vil inngå i et kretsløp i innsjøen, og det meste vil havne i sedimentet igjen sammen med mye av fosforet som tilføres fra nedbørfeltet.

- Retensjonen (tilbakeholdelse) av fosfor i Hålandsvatnet er om lag som forventet basert på innsjømodeller (f.eks. Nürnberg 1998), og det er betydelig mer fosfor som tilføres innsjøen enn det som tapes via utløpet (ingen netto tap).
- Store mengder fosfor tilføres fra nedbørfeltet, og betydelige mengder akkumuleres fortsatt i sedimentene.



Figur 14. Illustrasjon av fosforomsetningen i Hålandsvatnet (se tekst).

2.5 Hovedutfordringene i innsjøen

Hålandsvatnet har mottatt store mengder næringsstoffer (overgjødsling) over lang tid. Jordbruksarealene i nedbørfeltet inneholder svært mye fosfor (Molversmyr *et al.* 2022), og tilsvarende er det akkumulert svært mye fosfor i innsjøsedimentene. Det akkumulerte fosforet (på engelsk: legacy phosphorus) vil ta svært lang tid å vaske ut. Goyette *et al.* (2018) angir at dette kan ta mange hundre år etter at avbøtende tiltak i nedbørfeltet er gjennomført, og etterlyser nye strategier for å håndtere langsiktige tap av akkumulert fosfor fra jord til ferskvann i fosformettede nedbørfelt. Innsjøsedimentet kan skifte fra å akkumulere fosfor til å frigjøre fosfor når reduksjon av tilførsler fra nedbørfeltet til innsjøen oppnås (Søndergaard 2007; Sharpley *et al.* 2013), og sedimentene blir en viktig fosforkilde som vil forsinke respons på tilførselsreduksjoner.

Allerede i 1988 ble det påpekt at betydelige tilførselsreduksjoner måtte til for å oppnå tilfredsstillende forhold i Hålandsvatnet (Molversmyr & Sanni 1990). Cyanobakterier (blågrønnalger) har i varierende grad vært dominerende i algesamfunnet, og i 2005 var det for første gang en kraftig oppblomstring av cyanobakterien *Planktothrix* i innsjøen. Denne har hatt masseforekomster i mange av de siste 20 årene, og med medfølgende høye forekomster av toksiner som den kan produsere. De seneste tre årene har imidlertid *Planktothrix* ikke blomstret tilsvarende, og planteplanktonsamfunnet har hatt større innsalg av grønnalger om sommeren (Molversmyr *et al.* 2025). *Planktothrix*-forekomstene har også produsert mindre toksin (microcystin) enn tidligere år. En vet at det forekom ulike stammer av arten tidlig i *Planktothrix*-perioden (Rohrlack *et al.* 2015), og det er mulig at en stamme med mindre toksinproduksjon har dominert de senere årene.

Grønnalgene som har vært fremtredende de seneste årene har også forekommet med betydelig biomasse, og særlig påfallende var den store forekomsten av *Volvox aureus* i 2024 (Molversmyr *et al.* 2025). Arten er ikke tidligere påvist i Hålandsvatnet, og det er ikke rapportert lignende forekomster i Norge. *Volvox* danner store kolonier som har evne til egenbevegelser i vannet (Reynolds 1983), og på lignende måte som *Planktothrix* kan den potensielt utnytte løst fosfor i sprangsjiktet og øvre deler av bunnvannet (se ovenfor). Det nevnes at *Volvox* også er observert med betydelig forekomst i inneværende år (juli 2025).

Mange faktorer påvirker oppvekst av algepopulasjoner, og det er de som til enhver tid best kan utnytte tilgjengelige ressurser som vil vinne frem (Sommer 1989; Reynolds 2006). *Planktothrix* har f.eks. evne til å vokse i kaldt vann, og har i Hålandsvatnet ofte hatt høy biomasse tidlig om våren og endog under

is om vinteren. Store forekomster av *Planktothrix* har også flere ganger kollapset og forsvunnet raskt, som settes i sammenheng med infeksjon av chytrider (parasittisk sopp). Dette er en viktig tapsprosess for *Planktothrix*, som Rohrlack *et al.* (2015) diskuterer med eksempel fra Hålandsvatnet. Hvilke faktorer som har vært utløsende for de store algeoppblomstringene om sommeren kan være flere, men felles for utviklingen av slike oppblomstringer er at det meste av næringsgrunnlaget må antas å komme fra innsjøsedimentene (se avsnitt 2.3). Selv om det ikke har vært store oppblomstringer de seneste årene, kan sedimentene gi grunnlag for nye store oppblomstringer under de rette forholdene.

Basert på vurderingene i avsnittene ovenfor kan en trekke frem følgende hovedutfordringer i Hålandsvatnet:

- Frigjøring av fosfor fra gruntvannssedimentene
- Store algeoppblomstringer med intensiv algevekst og medfølgende høy pH i overflatevannet
- Høyt oksygenforbruk og utvikling av anaerobe forhold i bunnvannet
- Utlekking av fosfor fra dypvannssedimentene

Alle disse er, direkte eller indirekte, knyttet til fosfortilførsler fra sedimentene, og tiltak for å begrense (minimere) interne tilførsler vil derfor ventelig være avgjørende for å sikre god tilstand i Hålandsvatnet innen rimelig tid.

Kapittel 3

INNSJØINTERNE TILTAK

Det er lagt opp til at interesserte forslagsstillere kan fremme forslag til innsjøinterne tiltak i Hålandsvatnet. Disse vil bli evaluert (bl.a. av en ekspertgruppe) i forhold til de fire hovedutfordringene ovenfor. Dermed er det ikke i denne rapporten diskutert og anbefalt spesifikke tiltak. Imidlertid er det gitt en generell gjennomgang av kjente typer av innsjøinterne tiltak, og foretatt en diskusjon som innebærer en grovsortering av hvilke typer tiltak som kan synes relevante og hvilke typer som antageligvis ikke vil være det. Dette må oppfattes som en veiledning, og ikke som en avgjørende føring. Det vil være åpent for alle innspill av tiltaksforslag, inkludert mulige nye typer, og gjerne sammensetning av tiltak med antatt kombinerte effekter.

I det følgende gis det først en generell gjennomgang av kjente typer av innsjøinterne tiltak mot eutrofiering, og deretter en diskusjon av antatt egnethet i forhold til hovedutfordringene i Hålandsvatnet.

3.1 Innsjøinterne tiltak mot eutrofiering

Interne tiltak mot eutrofiering i innsjøer tar sikte på å kontrollere næringsnivåene i selve innsjøen, med fokus på å redusere intern fosforresirkulering og å håndtere algeoppblomstring. Disse tiltakene kan være fysiske, kjemiske eller biologiske. Systemanalysen som er gjort her, peker på fire hovedutfordringer i Hålandsvatn, som i tillegg til fysiske, kjemiske eller biologiske tiltak alene også kan kreve en kombinasjon av tiltak for å oppnå best mulig resultat. En kort oversikt med eksempler på de ulike typene tiltak er gitt i tabell 3 nedenfor:

3.2 Hovedutfordringene identifisert fra systemanalyse

I tillegg til betydelige reduksjoner i eksterne næringstilførsler fra nedbørfeltet (f.eks. fra landbruk eller avløpsvann), indikerer systemanalysen de fire hovedutfordringene med tanke på å oppnå ønsket vannkvalitet innen rimelig tid fortsatt vil eksistere (fra forrige kapittel):

- Frigjøring av fosfor fra gruntvannssedimentene
- Store algeoppblomstringer med intensiv algevekst og medfølgende høy pH i overflatevannet
- Høyt oksygenforbruk og utvikling av anaerobe forhold i bunnvannet
- Utlekking av fosfor fra dypvannssedimentene

Disse fire utfordringene har sterke implikasjoner for relevansen og valget av tiltak i innsjøen. Dette forklares kort i det følgende, etterfulgt av en grovkategorisering av hvilke typer tiltak som antas relevante i forhold utfordringene, hvilke som antas mindre relevante, eller ikke i det hele tatt. Det er ikke ment å være en evaluering av ulike spesifikke tiltak, men en veiledning for å sortere ut hvilke typer tiltak som bør vektlegges etter relevans i den påfølgende grundigere evalueringen, der også andre kriterier vil bli vurdert. For øvrig kan det henvises til en tidligere rapport (Molversmyr 2019) der flere spesifikke innsjøinterne tiltak for Hålandsvatnet ble diskutert.

3.3 Implikasjoner for tiltak i innsjøen**3.3.1 Frigjøring av fosfor fra gruntvannssedimentene**

Utlekking av fosfat fra grunt sediment må i størst mulig grad forhindres, fordi det utgjør en intern næringstilførsel som gir grunnlag for de svært kraftige oppblomstringene av cyanobakterier som har forekommet i flere sommersesonger de siste tjue årene. Disse tilførslene bidrar til å opprettholde en høy algeproduksjon via en positiv tilbakekoblingseffekt («snøballeffekt») utover et «vippepunkt» i innsjøens utvikling. Når dette «vippepunktet» passeres vil den innsjøinterne næringstilførselen bli selvforsterkende og lite kontrollerbar, på tross av tiltak i nedbørfeltet.

Tabell 3. Kort oversikt med eksempler på ulike typer tiltak.

Tiltak	Beskrivelse	Litteratur
<i>Fysiske tiltak</i>		
Mudring	Fjerning av næringsrikt sediment fra bunnen av innsjøen kan redusere den interne belastningen av fosfor	Riza <i>et al.</i> 2023
Lufting eller oksygenering av hypolimnion	Tilførsel av luft/oksygen i de dypere lagene av innsjøen (hypolimnion) kan forhindre utslipp av fosfor fra sedimentene, og forbedre oksygenivået for vannlevende organismer	Beutel & Horne 1999
Hypolimnion-tilbaketrekking	Fjerning av næringsrikt vann fra hypolimnion kan bidra til å redusere næringskonsentrasjoner og forbedre vannkvaliteten	Nürnberg 2007
<i>Kjemiske tiltak</i>		
Kjemisk utfelling	Tilsetning av kjemikalier som aluminium eller jernbaserte forbindelser kan binde seg til fosfor, noe som fører til at det utfelles fra vannsøylen	Jensen <i>et al.</i> 2015 Huser <i>et al.</i> 2016
Lantanmodifisert bentonitt (LMB)	Et materiale som kan brukes til å binde fosfor i sedimentet, noe som reduserer tilgjengeligheten for algevekst	Copetti <i>et al.</i> 2016
<i>Biologiske tiltak</i>		
Biomanipulering	Manipulere næringsnett ved å introdusere eller fjerne visse fiskearter kan bidra til å kontrollere algepopulasjoner	Bernes <i>et al.</i> 2015
Planting av makrofyter	Omplanting av vannplanter i undervannsområder eller flytende øyer kan bidra til å absorbere næringsstoffer og stabilisere sedimenter, noe som reduserer interne fosforutslipp	Colares <i>et al.</i> 2020
<i>Kombinerte løsninger</i>		
Analyse av innsjøsystem	Basert på analyse av innsjø-økosystemet, identifisere den mest effektive kombinasjonen av tiltak for den spesifikke innsjøen	Paul <i>et al.</i> 2021 Lürling <i>et al.</i> 2024
Koordinerte tiltak	Det kan være mer effektivt å implementere flere tiltak samtidig enn å stole på én enkelt tilnærming (f.eks. "Floc and Lock")	Lürling & Oosterhout 2013 Lürling <i>et al.</i> 2020

Hovedmålet med et tiltak i innsjøen for å motvirke dette bør være å bringe intensiteten av innsjøens interne (biogeokjemiske) prosesser ned til et nivå under dette «vippepunktet». Dette vil forhindre at de kraftigste algeoppblomstringene utløses og opprettholdes gjennom vekstsesongene.

En slik effekt kan også utvikle seg etter reduksjon i ekstern næringsbelastning, men uten noen rimelig god kontroll over næringsomsetningen i innsjøen som sikrer redusert algevekst. Det kan tenkes ulike innsjøinterne tiltak som kan foreslås for å redusere fosfortilførsler fra gruntvannssedimentene (ikke diskutert særskilt her).

3.3.2 Store algeoppblomstringer med intensiv algevekst og medfølgende høy pH i overflatevannet

Det er viktig å forhindre en etter hvert hyppig forekommende prosess/situasjon i Hålandsvatnet, karakterisert av store algeoppblomstringer med intensiv algevekst og medfølgende høy pH i overflatevannet. Denne utfordringen er nært knyttet til frigjøringen av fosfor fra gruntvannssedimenter. Når fosforfrigjøringen med påfølgende algeoppblomstring når over «vippepunktet» nevnt ovenfor, vil den bli selvforsterkende i form av følgende prosess: Høyt CO₂-opptak i algene i forbindelse med intensiv algevekst medfører pH-økning i de øvre vannmassene. Disse vannmassene eksponerer gruntvannssedimentene, og økt OH-konsentrasjon ved økt pH medfører ionebytte med fosfationer (HPO₄²⁻)

knyttet til sedimentet, som dermed frigjøres direkte til vannmassene der algeveksten foregår. Dette gir ytterligere økt algevekst, som opprettholder eller øker pH ytterligere.

Dette gir den ovenfor omtalte tilbakekoblingseffekten («snøballeffekten»), og inntreffer når prosessen overskrider et visst «vippepunkt». Overskridelse av dette «vippepunktet» kan betraktes som hyppigere forekommende over en lengre periode (flere år) med utvikling av sterkere eutrofiering, men det kan også betraktes innenfor hver enkelt vekstsesong, påvirket bl.a. av de aktuelle værfaktorene, og som i stor grad bestemmer hvor sterk algeveksten vil bli og hvilke arter som vil forekomme i den aktuelle sesongen.

Det kan forventes at redusert frigjøring av fosfor fra gruntvannssedimentene vil bidra til at prosessen med intensivert algevekst og høy pH vil reduseres. Det er imidlertid flere faktorer involvert, og det er viktig å forhindre at prosessen kommer i gang i aktuelle vekstsesonger der forholdene ellers ligger til rette for at den skal inntre. Tiltak rettet spesielt mot igangsetting av denne typen av prosess, særlig tidlig i vekstsesongen, er derfor viktig for å møte denne utfordringen. Det kan tenkes ulike tiltak som kan foreslås for å oppnå dette (ikke diskutert særskilt her).

3.3.3 Høyt oksygenforbruk og utvikling av anaerobe forhold i bunnvannet

Av ulike årsaker er det viktig å redusere utviklingen av anaerobe forhold i dypvannet. I hele vannvolumet under temperatursprangsjiktet utvikles oksygensvikt, og senere i stagnasjonsperiodene også med utvikling av hydrogensulfid. Dette medfører periodevis at få organismer i det hele tatt kan leve der. Videre bidrar det til å utvikle de kjemiske forholdene i bunnvannet slik at utlekking fra dypvannssedimentene inntre (se neste utfordring).

Reduksjon av eksterne fosfortilførsler (og tilførsler fra gruntvannssedimenter) vil i prinsippet medføre at produksjon av organisk materiale og tilførsel av nedbrytbart organisk materiale til bunnvannet og dypvannssedimentene etter hvert reduseres. Dette er imidlertid en langsom prosess, og det er derfor en utfordring som vil trenge innsjøintern(e) tiltak for å få en raskere bedring av tilstanden. Det finnes en rekke ulike tiltak (kjente, og muligens også nye) som kan foreslås for å motvirke anaerobe forhold i bunnvannet (ikke diskutert særskilt her).

3.3.4 Utlekking av fosfor fra dypvannssedimentene

Utlekking av fosfor fra dypvannssedimentene skjer først og fremst som en følge av at det utvikles anaerobe forhold i dypvannet (se ovenfor). Hovedutfordringen ved denne utlekkingen er at den bidrar i innsjøens eutrofieringsutvikling ved at noe av det frigjorte fosforet transporteres oppover til de øvre vannmassene og tilgjengeliggjøres for algevekst der, særlig om sensommeren og tidlig høst. Systemanalysen viser at dette er signifikante mengder som kan bidra til økt algeproduksjon med påfølgende tilførsel av dødt organisk materiale til bunnvannet og dypvannssedimentene, som dermed kan bidra til økt oksygenforbruk der (f.eks. ved inngangen til neste sommersesong med ny temperatursjiktning).

Dette er også en type av tilbakekoblingseffekt, men med noe lengre tilbakekoblingstid enn fosforfrigjøringen ved høy pH fra gruntvannssedimenter, og som inntre med «vippepunkt» knyttet til graden av anaerobe forhold i bunnvannet. Siden prosessen på denne måten også bidrar til innsjøens eutrofieringsutvikling, er det viktig å forhindre også denne forforfrigjøringen. Siden prosessen er nært knyttet til høyt oksygenforbruk og utvikling av anaerobe forhold i bunnvannet (ovenfor), vil dermed bedring av oksygenforholdene bidra til å redusere fosforutlekkingen fra dypvannssedimentene. Det er også ulike andre typer av tiltak (kjente, og muligens også nye) som også kan bidra til dette uten at de anaerobe forholdene reduseres, og kan derfor være aktuelle å foreslå ift. denne utfordringen (ikke diskutert særskilt her).

3.4 Tiltak med høy relevans i forhold til hovedutfordringer

Ulike fysiske og kjemiske tiltakstyper vil kunne være relevante i forhold til de identifiserte hovedutfordringene.

Eksempler på relevante fysisk/kjemiske tiltakstyper vil være slike som på ulike måter kan hindre fosfatutlekking fra bunnsedimenter, både gruntvanns- og dypvannssedimenter. Disse kan både gå på å hindre utvikling av fysiske og kjemiske forhold som utløser mobilisering av fosfat i sedimentet (høy pH, anaerobe forhold), og på å binde fosfatet i sedimentet på tross av tilstedeværelse av utløsende fysisk/kjemiske forhold.

3.5 Tiltak med lite relevans i forhold til hovedutfordringer

Biologiske tiltakstyper vil antageligvis ikke ha særlig stor relevans i forhold til de identifiserte hovedutfordringene. For eksempel vil biomanipuleringstiltak ikke være relevant pga. at økosystemet ikke er strukturert på en slik måte at vesentlig forbedring av vannkvalitet kan forventes, samt at innsjøens volum- og sjiktningsforhold ikke vil ligge til rette for effektive biomanipuleringstiltak. Makrofyttbeplanting (bunnfast eller flytende) antas heller ikke å kunne være særlig effektivt i Hålandsvatnet.

Noen fysiske tiltakstyper kan i prinsippet gi relevant effekt, men pga. innsjøstørrelse (skala) vil de antageligvis ikke være aktuelle. Et eksempel på dette kan være mudring med uttak av innsjøens sedimenter med påfølgende bort-transport og ekstern deponering.

3.6 Tiltak med mulig relevans – i kombinasjon med andre tiltak

Noen typer av fysisk/kjemiske tiltak synes å kunne ha relevans, men bare hvis de utføres i kombinasjon med andre tiltak.

Eksempel på dette er tiltak med felling av fosfat i vannmassene, men dette kan bare forventes å ha vedvarende effekt hvis det kombineres med tiltak som hindrer ny utlekking av det utfelte fosfatet fra sedimentet.

Forslag med koordinerte kombinasjonstiltak anbefales for å utnytte potensialet med høyere effektivitet og kostnadseffektivitet når flere tiltak gjennomføres samtidig sammenlignet med å satse på én enkelt tilnærming. Slike kombinerte forslag bør kunne begrunnes med bakgrunn i systemanalysen foran i denne rapporten.

Kapittel 4

KOMMENTARER OG ANBEFALINGER

En forutsetning for å kunne oppnå stabile forhold uten større algeoppblomstringer i Hålandsvatnet, er å gjennomføre tiltak som reduserer næringsstofftilførsler fra nedbørfeltet i tilstrekkelig grad. En gjennomgang av tilførsler og avlastingsbehov i 2022 viste at dette bl.a. vil kreve betydelig reduksjon av fosforinnholdet i jordbruksjorda i nedbørfeltet (Molversmyr *et al.* 2022). Dette kan oppnås ved å «omsette» akkumulert fosfor i avlinger der det ikke tilføres fosfor gjennom gjødsel, som dermed vil redusere eksisterende fosforlager i jorda. Som påpekt av Jarvie *et al.* (2013) vil akkumulert fosfor slik kunne «gjenbrukes», og en unngår at en viktig ressurs gjøres mer utilgjengelig om den tapes og transporteres til nedstrøms systemer. Men å oppnå en tilstrekkelig reduksjon av fosforinnholdet i jorda i nedbørfeltet til Hålandsvatnet vil ta svært lang tid. Det er derfor aktuelt å gjøre interne tiltak i innsjøen for at forbedringer skal kunne oppnås innen rimelig tid. Dersom en ikke gjør slike tiltak, må en forvente at situasjonen med forekomst av betydelige algeoppblomstringer som en har hatt de senere årene vil fortsette i lang tid.

En må også ta i betraktning at problemene i Hålandsvatnet ventelig blir forsterket i et fremtidig varmere klima, med høyere vanntemperaturer, lengre og mer stabile perioder med sjiktning, økt oksygenforbruk i bunnvann, osv. Dette vil øke muligheten for utlekking av fosfor fra sedimenter, og forsterke vekst av cyanobakterier (Nürnberg 2025).

Ved valg av tiltak, og før slike iverksettes, bør en nøye vurdere potensielle miljøpåvirkninger som tiltaket/tiltakene kan ha. Ulike tiltak kan ha ulik påvirkning på økosystemet i innsjøen og i nedstrøms habitater, både under gjennomføringen og i tiden etter. Viktigst vil være å vurdere potensielle negative effekter, men også positive følgeeffekter av tiltak bør tas med i betraktningene.

Ulike tiltak vil ha effekter med ulik varighet. Noen vil kunne ha effekter som varer i mange år, mens andre vil måtte gjentas ofte for å ha tiltenkt effekt. Kostnadene med å gjennomføre og vedlikeholde ulike tiltak må vurderes, slik at kostnadseffektiviteten blir klarlagt.

Det bør etableres et overvåkingsprogram som er tilstrekkelig omfattende for å kunne dokumentere effektene av tiltaket/tiltakene som iverksettes. Overvåkingen må kunne dokumentere om tiltenkte effekter oppstår som forventet, og bør pågå lenge nok for å vurdere varigheten av tiltaket/tiltakene. Programmet bør også omfatte undersøkelser som kan avdekke eventuelle negative effekter. Overvåkingen må kunne skaffe tilstrekkelig grunnlag til at tiltaket/tiltakene blir evaluert og fulgt opp.

Kapittel 5

REFERANSER

- Andersson, G., W. Granéli & J. Stenson, 1988. The influence of animals on phosphorus cycling in lake ecosystems. *Hydrobiologia*, 170: 267–284.
- Andersen, J.M., 1975. Influence of pH on release of phosphorus from lake sediments. *Arch. Hydrobiol.* 76: 411–419.
- Bernes, C., S.R. Carpenter, A. Gårdmark, P. Larsson, L. Persson, C. Skov, J.D.M Speed. & E. Van Donk, 2015. What is the influence of a reduction of planktivorous and benthivorous fish on water quality in temperate eutrophic lakes? A systematic review. *Environmental Evidence* 4:7.
- Beutel, M.W. & A.J. Horne, 1999. A Review of the Effects of Hypolimnetic Oxygenation on Lake and Reservoir Water Quality. *Lake and Reservoir Management* 15: 285–297.
- Boedeltje G., B. Klutman, M. Schaap, P. Sollman, M. de Vos, J.P. Lenssen & W.C.E.P. Verberk, 2019. Plant dispersal in a temperate stream by fish species with contrasting feeding habits: the role of plant traits, fish diet, season, and propagule availability. *Front. Ecol. Evol.* 17:54.
- Brabrand, Å., B.A. Faafeng & J.P.M. Nilssen, 1990. Relative importance of phosphorous supply to phytoplankton production: Fish excretion versus external loading. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 47: 364–372.
- Chaffin, J.D. & D.D. Kane, 2010. Burrowing mayfly (Ephemeroptera: Ephemeridae: Hexagenia spp.) bioturbation and bioirrigation: a source of internal phosphorus loading in Lake Erie. *J. Great Lakes Res.* 36: 57–63.
- Colares, G.S., N. Dell’Osbel, P.G. Wiesel, G.A. Oliveira, P.H.Z. Lemos, F.P. da Silva, C.A. Lutterbeck, L.T. Kist & Ê.L., Machado, 2020. Floating treatment wetlands: a review and bibliometric analysis. *Sci. Total Environ.* 714, 136776.
- Cooke, G.D., E.B. Welch, S. Peterson & S.A. Nichols, 2005. Restoration and Management of Lakes and Reservoirs. CRC press, Boca Raton, 589 pp.
- Copetti, D., K. Finsterle, L. Marzali, F. Stefani, G. Tartari, G. Douglas, K. Reitzel, B.M. Spears, I.J. Winfield, G. Crosa, P. D’Haese, S. Yasseri & M. Lüring, 2016. Eutrophication management in surface waters using lanthanum modified bentonite: A review. *Water Research* 97: 162 – 174.
- Direktoratsgruppa for vannforvaltning, 2025. Veileder for klassifisering av miljøtilstand i kyst- og ferskvann (siste endring 28.01.2025). *Vannportalen* (vannportalen.no/veiledere/klassifiseringsveileder).
- Enge, E. 2023. Prøvefiske i Hålandsvatnet, Stavanger & Randaberg, 21. juni 2023 (oppdragsgiver: Stavanger kommune).
- Forsgren E., K.M. Bærum, A.G. Finstad, K.Ø. Gjelland, T. Hesthagen, H. Knutsen & R. Wienerroither, 2023. Actinopterygii: Vurdering av sørvr *Scardinius erythrophthalmus* for Fastlands-Norge med havområder. *Fremmedartslista 2023. Artsdatabanken*. (nedlastet 03.07.2025.)
- García-Berthou E. & R. Moreno-Amich, 2000. Rudd (*Scardinius erythrophthalmus*) introduced to the Iberian Peninsula: feeding ecology in Lake Banyoles. *Hydrobiologia* 436:159–164.
- Goyette, J.-O., E.M. Bennett & R. Maranger, 2018. Low buffering capacity and slow recovery of anthropogenic phosphorus pollution in watersheds. *Nature Geosci.* 11: 921–925.
- Hupfer, M., R. Gächter & R. Giovanoli, 1995. Transformation of phosphorus species in settling seston and during early sediment diagenesis. *Aquat. Sci.* 57: 305–324.
- Hupfer, M., K. Reitzel & B. Grüneberg, 2020. Methods for measuring internal phosphorus loading. I: *Internal Phosphorus Loading: Causes, Case Studies, and Management* (Eds. Steinman, A.D., Spears, B.M.). J. Ross Publishing, Plantation, FL, pp. 15–43.
- Huser, B.J., S. Egemose, H. Harper, M. Hupfer, H. Jensen, K.M. Pilgrim, K. Reitzel, E. Rydin, & M. Futter, 2016. Longevity and effectiveness of aluminum addition to reduce sediment phosphorus release and restore lake water quality. *Water Research* 97: 122–132.
- Hölker, F., M.J. Vanni, J.J. Kuiper, C. Meile, H.-P. Grossart, P. Stief, R. Adrian, A. Lorke, O. Dellwig, A. Brand, M. Hupfer, W.M. Mooij, G. Nützmann & J. Lewandowski, 2015. Tube-dwelling invertebrates: tiny ecosystem engineers have large effects in lake ecosystems. *Ecol. Monogr.* 85: 333–351.

- Jarvie, H.P., A.N. Sharpley, B. Spears, A.R. Buda, L. May & P.J.A. Kleinman, 2013. Water Quality Remediation Faces Unprecedented Challenges from "Legacy Phosphorus". *Environ. Sci. Technol.* 47: 8997–8998.
- Jensen, H.S. & F.Ø. 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, H., K. Reitzel & S. Egemose, 2015. Evaluation of aluminum treatment efficiency on water quality and internal phosphorus cycling in six Danish lakes. *Hydrobiologia* 751: 189–199.
- Jeppesen, E., M. Søndergaard, J.P. Jensen, m.fl., 2005. Lake responses to reduced nutrient loading – an analysis of contemporary long-term data from 35 case studies. *Freshwater Biol.* 50: 1747–1771.
- Khorasani, H. & Z. Zhu, 2021. Phosphorus retention in lakes: A critical reassessment of hypotheses and static models. *J. Hydrol.* 603, 126886.
- Kindervater, E., N. Hahn & A.D. Steinman, 2020. Factors influencing internal phosphorus loading: A meta-analysis. I: *Internal Phosphorus Loading: Causes, Case Studies, and Management* (Eds. Steinman, A.D., Spears, B.M.). J. Ross Publishing, Plantation, FL, pp. 433–444.
- Lüring, M. & F. Van Oosterhout, 2013. Controlling eutrophication by combined bloom precipitation and sediment phosphorus inactivation. *Water Research* 47: 6527–6537.
- Lüring, M., L. Kang, M. Mucci, F. van Oosterhout, N.P. Noyma, M. Miranda, V.L.M. Huszar, G. Waajen & M.M. Marinho, 2020. Coagulation and precipitation of cyanobacterial blooms. *Ecol. Eng.* 158: 106032.
- Lüring, M., M. Mucci, S. Yasseri c, S. Hofstra, L.M.S. Seelen & G. Waajen, 2024. Combined measures in lake restoration – A powerful approach as exemplified from Lake Groote Melanen (the Netherlands). *Water Research* 263: 122193.
- Molversmyr, Å., 2002. Undersøkelse av miljøforholdene i Hålandsvatnet 2001. *Rogalandsforskning, rapport RF-2002/053*.
- Molversmyr, Å., 2008. Undersøkelser i Hålandsvatnet i 2007 og vinteren 2008. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2008/137*.
- Molversmyr, Å., 2009. Undersøkelser i Hålandsvatnet i 2008 og vinteren 2009. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2009/274*.
- Molversmyr, Å., 2010. Undersøkelser av sedimentene i Hålandsvatnet. *IRIS, rapport 2010/114*.
- Molversmyr, Å., 2019. Innsjøinterne tiltak i Hålandsvatnet – vurdering av muligheter og effekter. *NORCE, rapport 021-2019*.
- 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., L. Bunting, A. Burgess & H. Bennion, 2006. Frøylandsvatnet: innsjøhistoriske undersøkelser. *IRIS, rapport 2006/018*.
- Molversmyr, Å., S. Schneider, H. Edvardsen, H.M. Berger & M.A. Bergan, 2012. Overvåking av Jærvassdrag 2012 – Datarapport. *International Research Institute of Stavanger, rapport IRIS - 2013/030*.
- Molversmyr, Å., L. Moodley & A. Le Tressoler 2020. Innledende laboratorie-undersøkelser knyttet til mulig bruk av Phoslock® for å bedre tilstanden i Hålandsvatnet. *NORCE rapport, Miljø 12-2020*.
- Molversmyr, Å., M. Bechmann, S. Kværnø & S. Turtumøygard, 2022. Tilførsler og avlastningsbehov for Hålandsvatnet i Rogaland. *NORCE rapport, Klima og miljø 2-2022*.
- Molversmyr, Å., G.H. Tveite Olsen, I. Greipsland, L. Nielsen, T. Stabell & M.T. Solhaug Jenssen, 2024. Overvåking av innsjøer og elver i Jæren vannområde 2023. *NORCE rapport, Klima og miljø 1-2024*.
- Molversmyr, Å., L. Nielsen og T. Stabell, 2025. Overvåking av innsjøer og elver i Jæren vannområde 2024. *NORCE rapport, Klima og miljø 2-2025*.
- Molversmyr, Å., T. Stabell & L. Nielsen, 2023. Overvåking av innsjøer og elver i Jæren vannområde 2022. *NORCE rapport, Klima og miljø 2-2023*.
- Nadelyaeva, Y., 2018. Implication of forms and distribution of phosphorous in sediments of three Stavanger lakes and ponds of constructed wetland on the potential for sedimentary phosphorous release and future eutrophication. *Universitetet i Stavanger, Masteroppgave, Vårsemesteret 2018*.

- Nürnberg, G., 1998. Prediction of annual and seasonal phosphorus concentrations in stratified and polymictic lakes. [*Limnol. Oceanogr.* 43: 1544-1552.](#)
- Nürnberg, G.K., 2007. Lake responses to long-term hypolimnetic withdrawal treatments. [*Lake Reserv. Manag.* 23: 388-409.](#)
- Nürnberg, G., 2020. Internal Phosphorus Loading Models: A Critical Review. I: [*Internal Phosphorus Loading: Causes, Case Studies, and Management \(Eds. Steinman, A.D., Spears, B.M.\). J. Ross Publishing, Plantation, FL*](#), pp. 45–62.
- Nürnberg, G., 2025. Lake Functioning. Internal Phosphorus Loading, Cyanobacteria, and Climate Change. CRC Press/Balkema, Abingdon, Oxon, UK, 280 pp.
- Orihel, D.M., H.M. Baulch, N.J. Casson, R.L. North, C.T. Parsons, D.C.M. Seckar & J.J. Venkiteswaran, 2017. Internal phosphorus loading in Canadian fresh waters: a critical review and data analysis. [*Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 74: 2005–2029.](#)
- Padisák, J., F. Barbosa, R. Koschel & L. Krienitz, 2003. Deep layer cyanoprokaryota maxima in temperate and tropical lakes. [*Arch. Hydrobiol. Spec. Issues Advanc. Limnol.* 58: 175-199.](#)
- Paul, B., S.S. Bhattacharya & N. Gogoi, 2021. Primacy of ecological engineering tools for combating eutrophication: An ecohydrological assessment pathway. [*Sci. Total Environ.* 762: 143171.](#)
- Psenner, R., R. Pucsko & M. Sager, 1984. Die Fraktionierung organischer und anorganischer Phosphor-verbindingen von Sedimenten – Versuch einer Definition ökologisch wichtiger Fraktionen. [*Arch. Hydrobiol./Suppl.* 70: 111-155.](#)
- Razlutskiy, V., X. Mei, Y. Tang, N. Maisak, A. Karpaeva, R.G. Goncharik, E. Jeppesen & X. Zhang, 2025. Comparison of the impact of native and invasive omnivorous fish on plankton and benthic algae communities, water quality, and submerged macrophytes. [*Biol Invasions* 27:41.](#)
- Reynolds, C.S., 1983. Growth-rate responses of *Volvox aureus* Ehrenb. (Chlorophyta, Volvocales) to variability in the physical environment. [*Br. phycol J.* 18: 433-442.](#)
- Reynolds, C.S., 2006. The Ecology of Phytoplankton. [*Cambridge University Press, Cambridge*: 535 pp.](#)
- Riza M., M.N. Ehsan, M.N. Pervez, M.M.O. Khyum, Y. Cai & V. Naddeo 2023. Control of eutrophication in aquatic ecosystems by sustainable dredging: Effectiveness, environmental impacts, and implications. [*Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 7: 100297.](#)
- Rohrlack T., S. Haande, Å. Molversmyr & M. Kyle, 2015. Environmental conditions determine the course and outcome of phytoplankton chytridiomycosis. [*PLoS ONE* 10\(12\): e0145559.](#)
- Sandlund, O.T., O. Pettersen & T. Hesthagen, 2016. Effekter av spredning av karpefisk på biologisk mangfold. En litteraturgjennomgang. [*Norsk institutt for naturforskning, NINA Kortrapport* 35.](#)
- Scheffer, M., S. Carpenter, J.A. Foley, C. Folke & B. Walker, 2001. Catastrophic shifts in ecosystems. [*Nature*, 413\(6856\): 591-596.](#)
- Sharpley, A., H.P. Jarvie, A. Buda, L. May, B. Spears & P. Kleinman, 2013. Phosphorus legacy: overcoming the effects of past management practices to mitigate future water quality impairment. [*J. Environ. Qual.* 42: 1308–1326.](#)
- Sommer, U. (ed.), 1989. Plankton Ecology. Succession in Plankton Communities. [*Springer, Berlin*: 369 pp.](#)
- Steinman, A.D. & B.M. Spears, 2020. What is internal phosphorus loading and why does it occur? I: [*Internal Phosphorus Loading: Causes, Case Studies, and Management \(Eds. Steinman, A.D., Spears, B.M.\). J. Ross Publishing, Plantation, FL*](#), pp. 3–13.
- Stølen, M.T.R., 2020. A phosphorous mass-balance and implications of sedimentary phosphate release in lake Hålandsvatn. *Universitetet i Stavanger, Masteroppgave* 2020.
- Søndergaard, M., 2007. Nutrient dynamics in lakes – with emphasis on phosphorus, sediment and lake restorations. [*Doctor's dissertation \(DSc\). National Environmental Research Institute, University of Aarhus, Denmark.* 276 pp.](#)
- Vejříková, I., L. Vejřík, J. Syvänta, M. Kiljunen, M. Čech, P. Blabolil, M. Vašek, Z. Sajdlová, S.H.T. Chung, M. Šmejkal, J. Frouzová & J. Peterka, 2016. Distribution of herbivorous fish is frozen by low temperature. [*Scientific reports* 6:39600.](#)
- Walseng, B., T. Hesthagen & B. Skjelbred, 2022. Introduksjon av sørv (*Scardinius erythrophthalmus*) – en katastrofe eller kun til irritasjon? En supplerende undersøkelse. [*Norsk institutt for naturforskning, NINA Rapport* 2096.](#)

NORCE

Norwegian Research Centre AS
Postboks 22 Nygårdstangen
5838 Bergen, Norway

E-POST post@norceresearch.no

WEB norceresearch.no

TEL. +47 56 10 70 00

ORG NO 919 408 049

