

# Tiltak for å bedre oksygenforholdene i poller og terskelfjorder

Av Jarle Molvær, Frode Steinar Berge, Gotfred Nilsen og Arve Thendrup

Jarle Molvær er cand.real. og ansatt som forskningsleder ved Norsk institutt for vannforskning. Frode Steinar Berge er siv.ing. og ansatt som forsker ved Vassdrags- og havnelaboratoriet. Arve Thendrup er siv.ing. og ansatt som gruppeleder ved Vassdrags- og havnelaboratoriet. Gotfred Nilsen er cand.real. og ansatt som lektor ved Kragerø videregående skole.

## INNLEDNING

En terskelfjord består i prinsippet av et fjordbasseng med en relativt grunn undersjøisk rygg — en terskel — ved munningen. Ved terskelen er det ofte også en horisontal innsnevring av fjorden. Disse topografiske forhold fører til dårlig utskiftning av dypvannet og kombinert med en viss belastning med lett nedbrytbart organisk materiale oppstår oftest oksygenproblemer. Omfanget av oksygenproblemer kan være stort. For fjorden i Vest-Agder er til eksempel utstrekningen av råttent dypvann uten fisk beregnet til å være i størrelsesorden 35 km<sup>2</sup> (Molvær 1982).

Slike forhold forsøker man vanligvis å utbedre ved å redusere utslippene av plantenæringsstoffer og organisk stoff til fjorden. I mange situasjoner vil man imidlertid finne at oksygenproblemer ikke er løst ved dette. Grunnen er at restbelastningen på fjorden (f.eks. noe kommunalt avløpsvann, industrielt avløpsvann, avrenning fra jordbruksarealer, avrenning fra skog og utmark) er for stor. I slike situasjoner kan det være aktuelt med direkte tiltak i fjorden for å bedre vann-

utskiftningen og dermed tilstanden i dypvannet.

Bortsett fra helt eller delvis å sprengte bort terskelen, er det mest nærliggende alternativet å forbedre utskiftningen av dypvannet ved å tilføre energi, f.eks. ved innblåsing av luft eller å pumpe ned lettere vann.

I 1979—80 ble pumping av overflatevann og komprimert luft ned på dypet forsøkt av NHL i Bongstøvann og Rona i Vest-Agder (Berge 1981). Resultatene var lovende og NTNf og SFT ga deretter NHL og NIVA i oppdrag å utarbeide en oversikt over forskjellige metoder for å bedre vannutskiftningen i terskelfjorder. I det etterfølgende blir noen av hovedpunktene i rapporten presentert (Berge et al. 1982).

## METODER

De fleste metoder for å øke oksygeninnholdet i dypvannet er bare utprøvd i innsjøer. Selv om en innsjø både fysisk, kjemisk og biologisk skiller seg fra en terskelfjord, er årsakene til oksygenmangel grovt sett de samme. I begge typer av

vannforekomster er oksygentilførselen til dypet for liten i forhold til oksygenforbruket.

I det følgende skal vi omtale de to metodene som synes mest velegnet til å bedre vannutskiftningen i terskelfjorder.

### Total lufting

Med total lufting mener vi at luft eller en blanding av luft/vann føres til dypet og at luften fritt får strømme til overflaten. Herved svekkes eller elimineres tetthetssjiktningen. Den mest aktuelle metoden er bruk av boblegardin.

Ved en boblegardin føres trykkluft ned til en diffusor som plasseres i resipienten. Det oppstår en sterk oppadstigende strøm av luftbobler og vann.

Herved oppnås tre fordeler:

- 1) Dypvannet får en direkte tilførsel av oksygen.
- 2) Gammelt, oksygenfattig dypvann fjernes og erstattes kontinuerlig av mer oksygenrikt vann.
- 3) Da tettheten i dette «nye» dypvannet vil være relativt lav, legges forholdene tilrette for økt hyppighet av dypvannsutskiftning gjennom terskeloverskyllinger.

Denne metoden ble benyttet i Bongstøvann ved Mandal.

### Pumping av lettere vann ned på dypet — fortykning av dypvannet

Ved pumping av overflatevann ned på dypet i tetthetssjiktete fjorder vil man få en oppdriftsstråle som river med seg omkringliggende vann og gir opphav til en vertikal sirkulasjon i dypvannet. Denne metoden ble forsøkt i Bongstøvann (Berge

1981). Strålen vil stige opp mot overflate- laget dersom det er svak eller ingen vertikal tetthetsgradient i dypvannet. Når det har tetthetsgradienter i dypvannet vil utslippsvannet kunne innlagres under overflate- laget. Det generelle strømningsbildet vil være som i fig. 1.

Der forholdene ligger tilrette vil dyp- utslipp av elvevann være en meget enkel og billig løsning. Her kan det være mulig å få nødvendig trykkehøyde, og dermed unngå pumping.

I denne sammenhengen må det nevnes at dyputslipp av avløpsvann vil ha samme virkning som nevnt ovenfor. Som vi skal komme tilbake til, har man sannsynligvis et eksempel på dette i Nordåsvatnet ved Bergen.

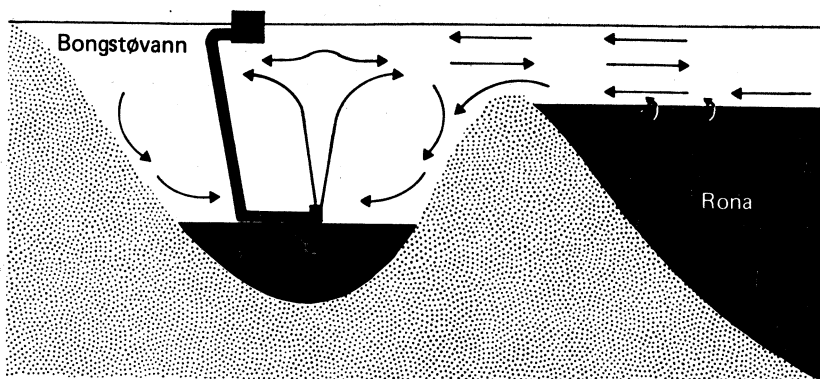
### OMSETTING AV ENERGI TIL BLANDING AV VANNMASSENE

For å skifte ut tungt bunnvann må dette løftes til et høyere nivå i vannsøylen. Det betyr at en slik blandingsprosess øker den potensielle energien i vannsøylen. Denne energien får vannmassene naturlig tilført fra ytre kilder som

- vinden
- ferskvanntilførsel
- tidevannet
- trykkeløstet i havet.

En sammenligning av naturlig og kunstig tilført blandingsenergi er nyttig fordi den kunstig tilførte energi bør være betydelig større om den skal resultere i en vesentlig forbedring av vannutskiftningen.

I Berge et al. (1982) er det utført slike beregninger. Nedenfor er vist eksempler for en fjord med areal 1 km<sup>2</sup>.



Figur 1. Antatt strømningsbilde under pumpeperioden i Bongstøvann. Innlagring av dypvann under overflaten. De mørke områdene indikerer forholdsvis uberørte vannmasser (etter Berge 1981).

- Energi fra vind (5 m/s) : 5 kW
- Energi fra tidevann, tidev.forskjell 1 m : 90 »
- Energi fra ferskvannstillrenning 5 m<sup>3</sup>/s, utslippshastighet 1 m/s : 5 »
- Energi fra terskeloverskyllinger (100 m bred terskelområde og 5 m tykkelse for det innstrømmende vann) : ~ 100 »
- Energi fra utslipp av ferskvann, 1 m<sup>3</sup>/s, utslippshastighet 2 m/s, utslippsdyp 25 m, dypvannets egenvekt 1025 t/m<sup>3</sup> : ~ 7 »
- Energi fra komprimert luft, 0.1 m<sup>3</sup>/s, 25 m dyp : ~ 12 »

Tidevannsens energien gir trolig det største bidrag til turbulent energi for de fleste fjorder i Midt-Norge og Nord-Norge, og

energi tilført fra tidevann er av samme størrelse som energi tilført fra vind for de fleste fjorder i Sør-Norge. Beregningene illustrerer også den store energiomsetningen under terskeloverskyllingene. Slike hendelser er imidlertid mer sporadiske.

Det er videre interessant å legge merke til at den turbulente energien som tilføres fjorden gjennom naturlige prosesser ikke er større enn at det er økonomisk overkommelig å bedre vannutskiftingen vesentlig selv for ganske store (<10 km<sup>2</sup>) fjorder. Ved kraftutbygging kan det være aktuelt å slippe ut store mengder ferskvann på dypet for å motvirke isdannelse i fjorden vinterstid. Dette kan også bidra til å bedre vannkvaliteten i fjorden.

Vi kan også legge merke til at en hyppig trafikk med skip vil gi større tilførsel av turbulent energi enn de energiformer som er tabulert foran for en fjord av nevnte størrelse.

## VIRKNINGER PÅ VANNUTSKIFTNINGSFORHOLDENE

### *Vannutskifting i overflatelaget*

Hvordan utslipp av luft/lett vann på dypet vil påvirke vannutskiftingen i overflatelaget er det svært vanskelig å vurdere på generelt grunnlag. Dersom vi imidlertid forutsetter at det brakkvannet eller ferskvannet i fjorden blandes godt, kan det beregningsmessig vises at brakkvannslagens tykkelse er proporsjonal med blandingen (inntil brakkvannstykkelsen er lik  $1/2 \times$  dybden ved terskelen) og at oppholdstiden av overflatelaget er avhengig av blandingsgraden. Virkningen vil også være avhengig av lokale forhold som sjiktning i vannmassene, tykkelse av overflatelaget, forholdet mellom terskeldyp og tykkelse av overflatelaget.

Videre vil det være avgjørende hvor mye overflatevann eller ferskvann som pumpes ned sett i forhold til overflatelagets volum eller fjordens totale ferskvannstilførsel, og om dypvann innblandes i overflatelaget eller innlagres i eller under sprangsjiktet.

Så lenge mengdene av tilført luft/lett vann er forholdsvis små, er det imidlertid sannsynlig at vannutskiftingen i overflatelaget (*oppholdstiden*) generelt sett ikke blir vesentlig endret. Et uttrykk for dette er også at de tekniske tiltakene i seg selv ikke betyr noen ekstra direkte tilførsel av vann til fjorden. Derimot er det klart at *strømsystemet* kan bli forandret.

En annen sak er at vannutskiftingen i overflatelaget øker i perioder med terskeloverskylling, og at hyppigheten av disse vil øke. Dette behandles i det følgende.

### *Endringer i terskeloverskyllinger*

Ved utslipp av komprimert luft eller lettere vann på dypet blir bunnvannet

erstattet med lettere vann fra nær overflaten.

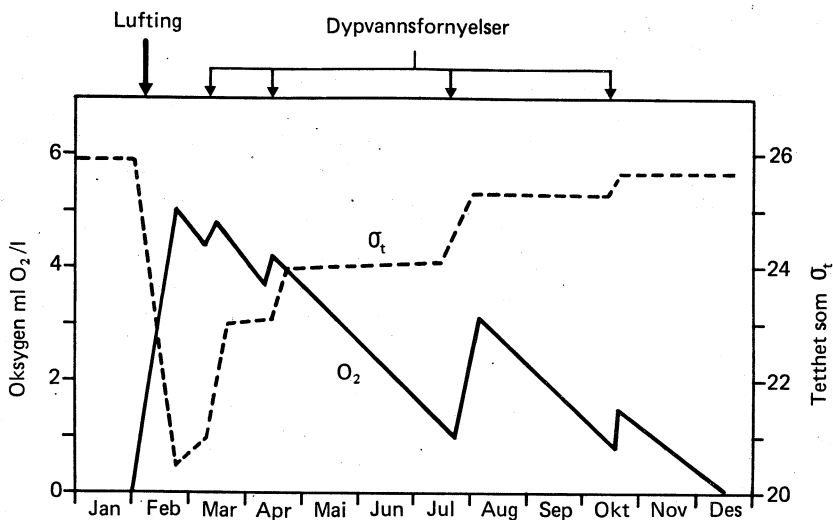
Selv en liten minskning av dypvannets tetthet øker sannsynligheten for at vann i terskelhøyde blir tungt nok til å trenge inn i fjorddypet og skifte ut gammelt dypvann. I tillegg til den direkte utluftingen, vil man derfor selv etter at denne er avsluttet få flere dypvannutskiftinger som vesentlig kan forlenge en periode med gode oksygenforhold i dypvannet. Denne prosessen er rent skjematisk illustrert på figur 2. Forløpet vil variere fra fra fjord til fjord avhengig av bredde og dyp ved terskelen, volumet av dypvannet, avstand til kystvannet m.m.

Den økte frekvensen av terskeloverskyllinger vil alene radikalt kunne bedre oksygenforholdene i dypet. Avgjørende er om dypvannet utskiftes så ofte at de nedbrytende prosessene ikke rekker å bruke opp oksygenet mellom hver gang dypvannet fornyes.

Eksempler på dette har man fra Bongstøvann ved Mandal da NHL utførte luftingsforsøk i 1979—80 (Berge 1981). Under et tre-måneders opphold i luftingen (desember 1979 — mars 1980) fikk man med sikkerhet én betydelig dypvannsfornyelse — trolig også flere mindre. Uten disse ville man sannsynligvis på nytt hatt hydrogensulfid i dypvannet etter tre måneder.

Etter at luftingen der ble avsluttet i mai 1980 medførte flere dypvannsfornyelser at dypvannet var oksygenholdig vesentlig lenger enn ventet, og hydrogensulfid ble først registrert i mai 1981, dvs. først etter ett år (upubliserte data, Vest-Agder fylkeskommune).

Dette viser en særdeles gunstig ettervirkning av en dypvannslufting. Ved praktisk bruk av metoden er det derfor meget viktig å velge tidspunkt da sjan-



Figur 2. Skjematiske bilde av utviklingen i tetthets- og oksygenforhold i dypvannet etter en lufting.

sene er størst mulig for en etterfølgende langvarig serie av dypvannsfornyelser.

I Nordåsvatnet ved Bergen har man sannsynligvis et tilfelle som viser hvordan flere permanente dyputslipp av ferskvann (avløpsvann) har bidratt til å forbedre vannutskiftningen og dermed oksygenforholdene. Mot slutten av 1960-årene lå grenseflaten mellom oksygen og hydrogensulfid vanligvis i 12–15 m dyp. Høsten 1969 ble et dyputslipp av kommunal kloakk tilsvarende ca. 30.000 p.e. satt i drift. Utslippet lå på ca. 35 m dyp, og midlere vannmengde ble målt til ca. 0.2 m<sup>3</sup>/s. Figur 3 viser målinger av oksygen i Nordåsvatnet i 1969–70. Det er sannsynlig at hovedårsaken til bedringen av oksygenforholdene fra 1970 av er økt utskiftning av dypvannet. En vesentlig sekundær effekt kan ellers ha vært at primærproduksjonen og dermed også sedi-

mentasjonen av organisk stoff ble redusert p.g.a. mindre tilførsel av plantenæringsstoffer til overflatelaget.

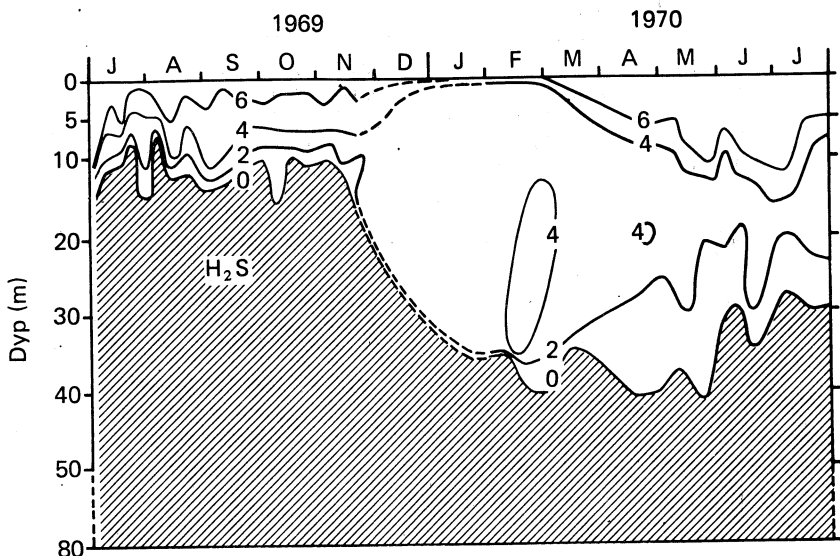
### KJEMISKE OG BIOLOGISKE EFFEKTER VED LUFTING AV DYPVANNET I EN FJORD

Effektene av en lufting vil naturlig nok være forskjellig for fjordens dypvann og for overflatelaget. De vil derfor bli behandlet hver for seg.

#### Dypvannet

Tilgang på oksygen er en forutsetning for at høyerestående organismer skal overleve. Forbedring av oksygenforholdene er derfor det primære mål ved slik fjordforbedring.

De fleste marine organismer overlever ikke ved oksygenkonsentrasjoner lavere



Figur 3. Oksygenforholdene på st. H2, Nordåsvatnet, i tidsrommet juli 1969 — juli 1970 (etter Johannessen 1972).

enn 0.8 ml/l. Konsentrasjoner over 3.5 ml/l ansees som tilfredsstillende. Ved fjordforbedrende tiltak bør man som minimumskrav sikte mot å unngå perioder med oksygenkonsentrasjoner under 2 ml/l.

I forhold til en tidligere tilstand ved oksygensvikt vil da artsrikdommen øke og dypvannet bli en mer produktiv del av fjorden. Dette kan f.eks. resultere i bedre fiske.

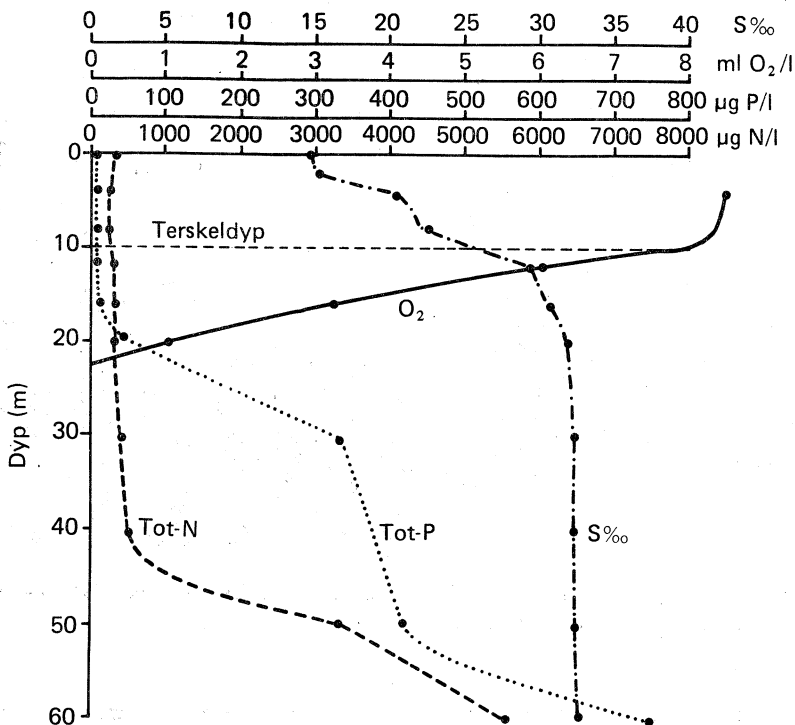
Økt vertikalsirkulasjon og økt hyppighet av dypvannsutsiftninger vil også endre på temperatur og saltholdighet. I fjordens dypvann er det normalt små variasjoner i temperatur og saltholdighet. Disse variasjonene vil øke som følge av en luftings-prosess. Ved riktig dimensjonering av luft/ferskvannsutslippet bør det imidlertid være mulig å unngå at variasjonene blir så store og raske at det hindrer or-

ganismesamfunnene i å etablere og utvikle seg.

#### Overflatelaget

Dypvannet er normalt rikere på plantenæringsalter enn overflatelaget, se fig. 4. Økt vertikaltransport av vann vil dermed øke tilførselen av plantenæringsalter til den eufotiske sonen. Dette kan medføre økt produksjon, ikke bare i første, men i alle ledd i næringskjedene. Om en slik produksjonsøkning er gunstig eller ugunstig må vurderes ut fra de lokale forholdene. Man kan f.eks. godt tenke seg at en mindre produksjonsøkning er ønskelig i enkelte fjorder og poller, spesielt med sikte på økt fiske.

Dersom det er nødvendig å unngå en økning i produksjonsforholdene, bør luf-



Figur 4. Vertikal fordeling av salinitet, oksygen, total fosfor og total nitrogen i Hellefjorden ved Kragerø 6.6 1978.

tingen begrenses til vinterhalvåret.

I startfasen ved en lufting kan det være en fare for at oksygenfattig/hydrogensulfidholdig vann transporteres opp i høyereliggende vannlag og skaper problemer der. Dette må en søke å unngå ved f.eks. gradvis oppstartning av luftingen. Problemet vil være størst ved periodiske luftinger, ettersom tidsfaktoren da er viktig for bl.a. kostnadene. Ved permanente dyputslipp av ferskvann kan disse sannsynligvis dimensjoneres slik at vertikaltransport av oksygenfattig vann ikke er noe problem.

#### KONKLUSJONER

- Oksygensvikt i terskelfjorder og poller skyldes vanligvis en kombinasjon av dårlig vannutskiftning som følge av naturgitte forhold og en belastning av organisk materiale på dypvannet p.g.a. tilførsler av plantenæringsalter og organisk materiale fra land.
- I mange tilfeller vil selv restbelastningen etter at tradisjonelle avlastningstiltak er gjennomført være for stor til at oksygenproblem i dypvannet kan unngås. I slike tilfeller vil lufting av dyp-

vannet være et nødvendig *supplement* for å eliminere oksygenproblemene. I fjorden der problemene er konsentrert om dypvannet mens forholdene i overflatelaget er tilfredsstillende, kan lufting tenkes som et *alternativ* til videregående rensing av avløpsvann.

- Pumping av luft eller utslipp av ferskvann er metoder som bør kunne benyttes for lufting av dypvannet. Ved utslipp av ferskvann vil det være gunstig å etablere permanente utslipp i tilknytning til en elv eller lignende.
- Selv om prinsippene er klare er det behov for praktiske erfaringer for å få etablert dimensjoneringskriterier, og for å få bedømme effektene på organismesamfunn og virkninger på produksjonsforholdene i vannforekomsten.

Spesielt viktig er valg av tidspunkt med sikte på å unngå ugunstige effekter i overflatelaget og optimalisere langtidseffekten med hyppige terskeloverskyllinger og dypvannsutskiftninger.

- Vi synes det kan være av interesse å nevne at de metodene som er skissert også kan ha andre anvendelsesområder. Tiltak for å hindre ising i fjorder og havner kan nevnes. Andre anvendelsesområder kan være å regulere temperaturoverholdene i oppdrettskummer i sjøen ved å føre opp det mer temperaturstabile vannet på 10—20 m dyp. Litt lengre fram i tid ligger kanskje at kunstig vertikal omrøring kan bedre den biologiske produksjonen i poller for dyrking av østers og skjell.

#### LITTERATUR

- Berge, F.S. (1981): Fjordforbedring i Bongstøvann og Rona. VHL-rapport SFT 60 A81011.
- Berge, F.S., Molvær, J., Nilsen, G. og Thendrup, J. (1982): Fjordforbedring. Tiltak for å bedre oksygenforholdene i poller og terskelfjorder. NIVA-rapport 81046. VHL-rapport SFT 60 A82077.
- Johannessen, P. J., (1972): Undersøkelser i Nordåsvatnet 1969—70. Hydrografi, planktoniske copepoder og en kort oversikt over meduser og ctenophorer. Hovedoppgave i marinbiologi. Universitetet i Bergen.
- Molvær, J., (1982): Vannforekomster i Vest-Agder. Vurdering og kommentarer til fysisk-kjemiske analyseresultater fra fjorder i tidsrommet 1978—81. NIVA-rapport 81072.