


# Hydrogensulfid i Sælenvatnet, Bergen

Vurdering av foreslåtte tiltak  
for å eliminere luktplager



# NIVA - RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning  NIVA

Prosjektnr.: O-94239 O-94270	Undernr.:
Løpenr.: 3 3 2 2	Begr. distrib.: Nei

<b>Hovedkontor</b> Postboks 173, Kjelsås 0411 Oslo Telefon (47) 22 18 51 00 Telefax (47) 22 18 52 00	<b>Sørlandsavdelingen</b> Televeien 1 4890 Grimstad Telefon (47) 37 04 30 33 Telefax (47) 37 04 45 13	<b>Østlandsavdelingen</b> Rute 866 2312 Ottestad Telefon (47) 62 57 64 00 Telefax (47) 62 57 66 53	<b>Vestlandsavdelingen</b> Thormøhlensgt 55 5008 Bergen Telefon (47) 55 32 56 40 Telefax (47) 55 32 88 33	<b>Akvaplan-NIVA A/S</b> Søndre Tollbugate 3 9000 Tromsø Telefon (47) 77 68 52 80 Telefax (47) 77 68 05 09
--	---	--	---	--

Rapportens tittel: <b>HYDROGENSULFID I SÆLENVATNET I BERGEN VURDERING AV FORESLÅTTE TILTAK FOR Å ELIMINERE LUKTPLAGER</b>	Dato: Trykket: Mai/Aug. 95 Sept. 1995
Forfatter(e): Lars G. Golmen Anders Hobæk Torbjørn M. Johnsen	Faggruppe: Hydrol./oseanogr. modeller
	Geografisk område: Hordaland
	Antall sider: Opplag: 50 1ste

Oppdragsgiver: Bergen Kommune, Teknisk Utbygging, Postboks 805, 5002 Bergen	Oppdragsg. ref.: Sverre Ottesen
---	------------------------------------

Ekstrakt: Rapporten omhandler nye målinger i Sælenvatnet vinteren 1994-95, samt vurderinger av foreslåtte tiltak for å redusere hydrogensulfidmengdene (H <sub>2</sub> S) og forbedre vannkvaliteten i dypvannet. Tilstanden i Sælenvatnet i måleperioden var bedre enn foregående vinter med hensyn til dyp for grensesjiktet mot H <sub>2</sub> S holdig vann, som lå rundt 2,5 - 4 m dyp. Konsentrasjonen av H <sub>2</sub> S i dypvannet var 50-60 mg/l. I rapporten vurderes fire hovedmetoder for forbedring av vannkvaliteten: Dykket utslipp av ferskvann, nedpumping av overflatevann, bruk av lufteren "Minox-duppen" og bruk av lufter/turbulensgenerator "Aerator". Det konkluderes med at tilførsler av ferskvann/overflatevann til dypet gir tilstrekkelig og ønsket effekt på vannkvaliteten både på kort og lang sikt. Dette er også de rimeligste metodene. Til Aeratoren knyttes det en del ubesvarte spørsmål til operasjon og drift, samt til realismen i den garantien om virkning som er gitt, men denne enheten vil teoretisk kunne benyttes med ønsket virkning både på kort og lang sikt. Minox-duppen vurderes til å ha for liten kapasitet til å kunne være aktuell i Sælenvatnet.
--

4 emneord, norske

1. Fjord-forbedring
2. Hydrogensulfid
3. Dypvannsutskifting
4. Dykket ferskvannutslipp

Prosjektleder



Lars G. Golmen

4 emneord, engelske

1. Fjord restoration
2. Hydrogen sulphide
3. Deep water exchange
4. Submerged freshwater discharge

For administrasjonen



Torgeir Bakke

ISBN 82-577-2854-3

**O-94239, O-94270**

**HYDROGENSULFID  
I SÆLENVATNET I BERGEN  
VURDERING AV FORESLÅTTE TILTAK  
FOR Å ELIMINERE LUKTPLAGER**

**NIVA-Vest,  
Bergen, mai/august 1995**

**Lars G. Golmen,       prosjektleder, forfatter  
Anders Hobæk,       forfatter  
Torbjørn M. Johnsen, forfatter  
Inger Midttun,       medarbeider  
Terje Hopen,         medarbeider**

**Forsidefoto:  
Parti av kanalen sett fra sør,  
mot Sælenvatnet.  
Foto: L.G. Golmen**

## FORORD

En ugunstig kombinasjon av liten utskiftingshyppighet av dypvann, relativt stor organisk belastning og et markert brakkvannslag gjør at det dannes hydrogensulfid i dypvannet i Sælenvatnet i Bergen. Gassen tvinges tidvis opp i overflatelaget av vind m.m. med store luktplager for naboene som følge.

Særlig ille var forholdene vinteren 1993/94. Dette foranlediget at Bergen kommune v/kommunalavd. teknisk utbygging lot gjennomføre flere undersøkelser av tilstanden i vatnet med siktemål å få satt i gang fysiske tiltak for å forbedre vannkvaliteten.

Foreliggende rapport bygger egentlig på to adskilte mindre prosjekter som NIVA-Vest har gjennomført. Det første prosjektet blei oppstarta i oktober 1994, med konkret siktemål å vurdere effekt av ferskvannsinnblanding i dypvannet. I desember 1994 kom forespørsel om også å vurdere to andre metoder som kommunen hadde fått tilbud på.

Kommunen sendte rapportutkastet på høring til flere instanser (utstyrslleverandørene Mastrans A/S og Water Protector A/S, samt Landbrukshøgskolen på Ås og Universitetet i Bergen) i juni 1995. Det kom skriftlig tilbakemelding fra de tre førstnevnte. Det framkom ikke opplysninger som påvirket våre konklusjoner. I forhold til utkastet er det på basis av høringskommentarene således bare foretatt mindre tekstjusteringer. Vi har funnet det nødvendig å presisere bedre i innledningen (avsnitt 1.2) hvilke konkrete spørsmål og metoder kommunen ba NIVA om å utrede. Videre har vi framskaffet konkrete tall for kostnader forbundet med dykket ferskvannsutslipp, og rapport sammendraget er noe omarbeidet.

Hos Bergen kommune, kommunalavd. teknisk utbygging, har overingeniør Sverre Ottesen vært kontaktperson. Forskerne Torbjørn M. Johnsen og Anders Hobæk hos NIVA-Vest har vært ansvarlige for deler av utredningene, og avd. leder Lars G. Golmen har stått for prosjektledelse, samt fysiske utredninger. Forsker Jarle Molvær hos NIVA i Oslo har bidratt med faglige kommentarer undervegs.

Under våre ekspedisjoner i Sælenvatnet vinteren 1994/95 kom vi i prat med mange interesserte og engasjerte naboer. En spesiell takk rettes til fam. Haugland ved kanalen, som lånte oss plass for montering av måleutstyr og som ga nyttige opplysninger om tidligere luktepisoder m.m.

Bergen, mai/august 1995

Lars G. Golmen

# INNHOLD

SAMMENDRAG.....	4
<b>1. INNLEDNING.....</b>	<b>5</b>
1.1. BAKGRUNN FOR DENNE UTREDNINGEN .....	5
1.1.1. Helsemessige aspekt.....	5
1.2. MÅLSETTING MED RAPPORTEN.....	7
1.3. HVORFOR ER TILSTANDEN SÅ DÅRLIG? .....	7
1.4. NATURLIG TILSTAND I SÆLENVATNET .....	8
1.5. OPPNÅELIG OG ØNSKET TILSTAND .....	8
1.6. AKTUELLE VANNFORBEDRINGSTILTAK .....	10
1.6.1. Dykket utslipp og nedpumping av ferskvann.....	10
1.6.1.1. Nedpumping av overflatevann.....	11
1.6.2. Turbulensgenerering evt. med luftinnblanding (Aeratoren) .....	12
1.6.3. Kunstig oksygenering (Minox-duppen).....	13
<b>2. BESKRIVELSE AV SÆLENVATNET .....</b>	<b>14</b>
2.1. TOPOGRAFI OG TILFØRSLER .....	14
2.1.1. Tilførster.....	14
2.2. HYDROGRAFI OG VANNUTSKIFTING .....	14
2.2.1. Vannsøylens stabilitet .....	15
2.2.2. Noen energibetraktninger .....	18
2.3. INDRE BØLGER.....	18
2.4. DANNELSE AV HYDROGENSULFID .....	19
<b>3. NYE MÅLINGER I SÆLENVATNET.....</b>	<b>20</b>
3.1. HYDROGRAFI .....	20
3.1.1. Sjikting .....	20
3.2. MÅLING MED T-S KJEDE.....	20
3.2.1. Indre bølger .....	24
3.3. OKSYGEN OG HYDROGENSULFID .....	24
3.3.1. Lukt-episoder:.....	24
3.3.2. Dypvann og grensesjikt.....	24
3.4. MÅLING AV STRØM OG TEMPERATUR I KANALEN .....	24
3.5. VANNSTANDSMÅLINGER.....	24
3.6. NEDBØR OG VANNFØRING.....	28
<b>4. TEKNISKE BEREGNINGER OG VURDERINGER .....</b>	<b>30</b>
4.1. FERSKVANN TIL DYPET .....	30
4.1.2. Beregningsgrunnlag.....	31
4.1.2.1. Resipienten .....	31
4.1.2.2. Utslippet .....	32
4.1.3. Resultater .....	32
4.2. NEDPUMPING AV BRAKKVANN/FERSKVANN.....	33
4.2.1. Nedpumping av overflatevann.....	33
4.3. ANVENDELSE AV AERATOREN.....	34
4.3.1. Tilsetting av oksydasjonsmiddel .....	35
4.4. ANVENDELSE AV MINOX-DUPPEN.....	36

<b>5. KONKLUSJONER OG ANBEFALING .....</b>	<b>37</b>
5.1. VURDERING AV AERATOR FRA WATER PROTECTOR A/S .....	37
5.1.1. Aeratorens effektivitet .....	37
5.1.2. Vurderinger av tilbudet fra Water Protector A/S .....	37
5.1.3. Vurdering av "Pengene tilbake"-garantien .....	37
5.2. VURDERING AV DYKKET FERSKVANNSUTSLIPP .....	38
5.2.1. Ellevann .....	38
5.2.2. Overflatevann .....	39
5.3. VURDERING AV MINOX-DUPPEN .....	39
5.3.1. Kostnader som vedrører Minox-duppen .....	40
5.4. SAMLA VURDERING .....	42
5.4.1. Effekt-tilførsel .....	42
5.4.2. Effektforbruk .....	42
5.4.3. Oksygentilførsel .....	43
5.4.4. Effekt på oksygen og sulfidfordelingen .....	44
5.4.5. Effekt på sjiktning .....	44
5.5. OVERVÅKING AV TILSTAND .....	45
<b>REFERANSER .....</b>	<b>46</b>
VEDLEGG 1.	
VEDLEGG 2.	
VEDLEGG 3.	

## SAMMENDRAG

Sælenvatnet i Fyllingsdalen i Bergen har dypvann med høy konsentrasjon av hydrogensulfid. Tidvis kommer denne gassen i kontakt med lufta, og er da til sjenanse for beboere i området. Bergen kommune planlegger å iverksette tiltak for å forhindre lukt-plagene.

Kommunen har på denne bakgrunn bedt NIVA om å gi en oppdatert tilstandsrapport for Sælenvatnet, og å vurdere effekten av ulike tiltak som er foreslått for å forbedre vannkvaliteten på kort og lang sikt. Disse tiltakene er:

- Anvendelse av en luftingsenhet ("Minox-duppen", ved firma Mastrans A/S),
- Anvendelse av en kraftig luftenhet ("Aerator" enheten, ved firma Water Protector A/S),
- Dykket utslipp av ferskvann fra Sælenelva eller Gjeddevatn,
- Nedpumping av overflatevann.

### Tilstanden i Sælenvatnet vinteren 1994-95

Tilstanden i Sælenvatnet vinteren 1994-1995 var mindre kritisk enn foregående vinter m.h.t. hydrogensulfidgass i øvre lag. Med unntak av to enkeltstående og kortvarige lukt-episoder lå grenseflaten mellom oksisk og anoksisk vann dypere enn 2,5-3 m ved måletidspunktene. Konsentrasjonene av hydrogensulfid i dypvannet lå rundt 50-60 mg/l.

### Vurdering av vannforbedringsmetodene

En Minox-dupp er vurdert å ha for liten kapasitet til å gi nevneverdig effekt å vannkvaliteten. Dette gjelder både på kort og lang sikt. Bruk av flere Minox-dupper samtidig etter en forsøksperiode er foreslått av leverandøren, men hvor mange som vil være det faktiske behovet, er ikke klarlagt.

Aeratoren har større netto-effekt enn Minox-duppen. Det er flere ubesvarte spørsmål omkring absoluttverdi for effektiviteten, og til hvordan denne enheten kan opereres uten at det oppstår utilsiktet oppstrømming av H<sub>2</sub>S-holdig vann sammen med luftboblene. På bakgrunn av de opplysninger vi sitter inne med, vil Aeratoren kunne benyttes både på kort og lang sikt, med formål å holde det øverste 5-6 m tykke laget fritt for H<sub>2</sub>S. Leverandørgarantien ("pengene tilbake"-garantien) sier at fjerning av all H<sub>2</sub>S i de øverte 10 m av vannsøylen i løpet av 60 døgn krever kontinuerlig drift. Dette kan tolkes slik at ved avbrudd gjelder ikke garantien lenger. Kommunen anbefales her å få en bedre presisering av garantien.

Nedpumping av overflatevann og dykket utslipp av ferskvann fra elv vurderes som tilnærmet likeverdige metoder når det gjelder virkning. Disse metodene har også den fordel at de i større grad påvirker densiteten i dypvannet, slik at dette lettere kan bli gjenstand for naturlig utskifting p.g.a. tynge innstrømmende vann. Det tilføres også oppløst oksygen til en større del av vannsøylen enn ved de andre metodene. Nedpumping av overflatevann framstår som den rimeligste metoden av de fire vurderte på kort sikt, mens nedføring av vann fra Sælenelva er rimeligst på lang sikt.

### Anbefaling

Vi anbefaler kommunen å gå videre med planlegging av et dykket ferskvannsutslipp. For å komme raskt (og rimelig) i gang, anbefales det å velge løsningen med nedpumping av overflatevann fra en flåte. Dette vil medføre kort prosjekterings- og etableringstid, etableringskostnader på bare om lag 100.000 kr, samt årlige driftskostnader på om lag 55.000 kr.

# 1. INNLEDNING

I dette kapitlet beskrives bakgrunnen for denne utredningen, hvilke forutsetninger den bygger på, og de mål som er satt for denne.

## 1.1. Bakgrunn for denne utredningen

Den dårlige vannutskiftingen i Sælenvatnet (fig. 1.1) nederst i Fyllingsdalen i Bergen medfører vedvarende høye konsentrasjoner av giftig hydrogensulfid ( $H_2S$ ) i dypvannet. Ved særskilte vær-situasjoner har dypvannet kommet til overflaten, med store luktplager for lokalbefolkningen og forringet vannkvalitet i overflaten som resultat.

Beboere ved kanalen har vært spesielt plaget. Ved kombinasjonen kraftig sønnavind og tynt brakkvannslag kan dette laget bli ført vekk fra kanal-området og nordover i vatnet. Dypvann kommer opp i sør-enden og føres ut i kanalen og ut i Nordåsvatnet, mens det skjer en kraftig blanding og eksponering mot lufta. Dermed oppstår det særlige luktplager ved kanalen. I større omfang skjedde dette sist vinteren 1993-1994 med vedvarende sterk lukt i ukevis.

Til tross for flere utredninger de siste årene ang. Sælenvatnet har det vært vanskelig å kunne enes om tiltak for å bli kvitt luktplagene. En rekke miljømessige og tekniske faktorer må tas i betraktning. Etter den kraftige utluftingen vinteren 1993/94 blei det imidlertid satt fortgang i planleggingen med sikte på snarlig gjennomføring av konkrete tiltak.

Gjennom en dialog mellom Bergen kommune og fagmiljøer som Rådgivende Biologer A/S, Universitetet i Bergen, NIVA og NLH på Ås, har flere metoder for vannforbedring blitt diskutert. Diskusjonen har etter hvert innskrenket seg til å omhandle tre hovedmetoder som enten kan benyttes hver for seg eller i kombinasjon (se avsnitt 1.6).

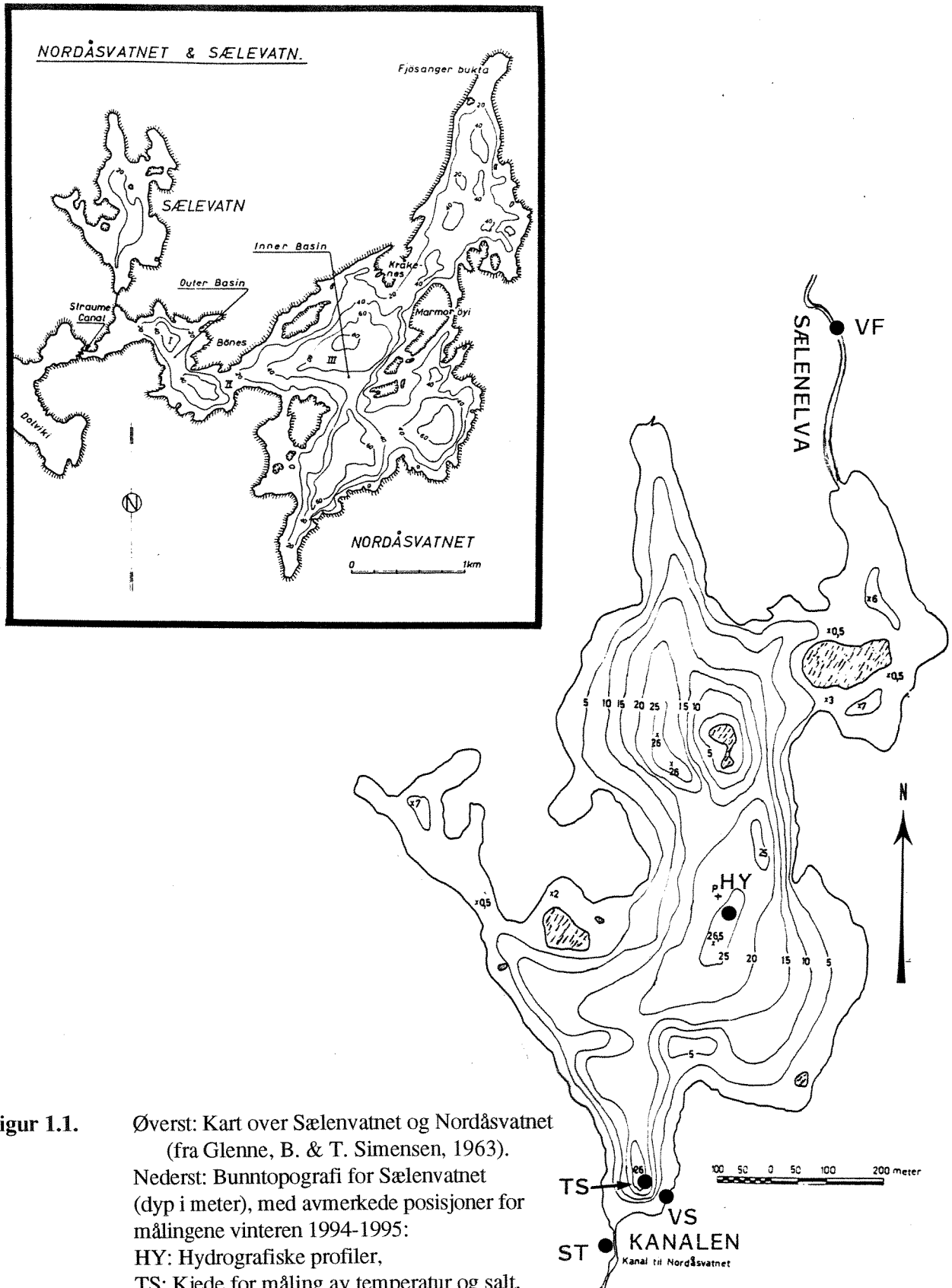
### 1.1.1. Helsemessige aspekt

Det er anslått at så mange som 15-20000 fastboende personer tidvis har vært sjenert av lukten i større eller mindre grad. I tillegg kommer alle de som passerer området med bil.

Situasjonen har som nevnt vært verst for beboerne ved kanalen. Dette dreier seg om i størrelsesorden 10 husstander der gassplagen i noen tilfeller (også innendørs) har medført kvalme, oppkast og svimmelhet. Sykemeldinger har vært resultatet i noen tilfeller. Inne i husene har sølvtøy blitt misfarget på kort tid.

Hydrogensulfid kan luktes ved svært små konsentrasjoner, ned til 1 ppm (volumdel). Internasjonalt blir det operert med grenseverdier for 8 timers yrkeshygienisk eksponering (8h-TWA verdi) på 10 ppm ( $14 \text{ mg/m}^3$ ), eller 15 ppm ( $21 \text{ mg/m}^3$ ) for korttids (10 minutt) eksponering (James og Lord 1992). I norsk landbruk (fjøs, siloer) opereres det med grenseverdier på 5 ppm for korttidseksponering. En kan anta at verdiene ved kanalen var langt over disse verdiene mens forholdene var på det verste. Miljømessige luftkvalitetsnormer sier max.  $20 \text{ } \mu\text{g/m}^3$  (ca 0,015 ppm) for  $H_2S$ , m.a.o. langt lavere verdier enn de yrkeshygieniske kravene.





**Figur 1.1.**

Øverst: Kart over Sælenvatnet og Nordåsvatnet  
(fra Glenne, B. & T. Simensen, 1963).

Nederst: Bunntopografi for Sælenvatnet  
(dyp i meter), med avmerkede posisjoner for  
målingene vinteren 1994-1995:

HY: Hydrografiske profiler,

TS: Kjede for måling av temperatur og salt,

ST: Strømmåling,

VS: Vannstand.

## 1.2. Målsetting med rapporten

### Utredning av metoder

I samråd med de forskjellige fagmiljøene som blei nevnt innledningsvis, har kommunen vurdert flere skisserte vannforbedringsmetoder til bruk både på kort og lang sikt. En blei til slutt stående igjen med følgende aktuelle hovedmetoder som kommunen ba NIVA om å utrede videre:

- a1) Ferskvann fra elv ledes ned til mellomlag eller dypvann ute i Sælenvatnet.
- a2) Overflatevann i Sælenvatnet pumpes ned i dypere sjikt.
- b) Vannmassene luftes/blandes mekanisk ved hjelp av en s.k. "Aerator" enhet.
- c) Vannmassene luftes/oksygeneres med den s.k. Minox-duppen.

Siden overflatevannet i Sælenvatnet er tilnærmet ferskvann, er metodene a1 og a2 nært beslektet. Metode b) innebærer stimulert blanding v. hj. a. en kraftig vannstråle hvor også luft kan trekkes inn, mens metode c) dreier seg om tilførsel av luft, evt. oksygen, til vann i aktuelt sjikt. Metode b) og c) er metoder som først og fremst er tenkt å kunne løse problemene på kort sikt, men de vil også kunne benyttes på lengre sikt. De ulike metodene presenteres separat i egne avsnitt.

De konkrete momenter (garantier, økonomi, virkningsgrad) vedrørende metodene som kommunen ba NIVA om å utrede, framgår av kommunens to bestillingsbrev (datert 21/11 1994 og 7/3 1995) som er tatt med som *Vedlegg 1* og *Vedlegg 2* i denne rapporten.

### Beskrivelse av nye måleresultater

Høsten 1994 blei det satt i gang et måleprosjekt i Sælenvatnet for å skaffe kommunen supplerende data om elvetilførsler, inn/utstrømming og hydrografiske variasjoner. Denne rapporten innbefatter en presentasjon av de viktigste resultatene. De supplerende målingene blei ansett som nødvendige for detalj-prosjektering av praktiske tiltak. Sistnevnte inkluderte bl.a. utprøving av en kontinuerlig registrerende Aanderaa T-S kjede (målebøye) som kommunen har foreslått brukt som kontroll ved iverksetting av vannforbedringstiltak.

## 1.3. Hvorfor er tilstanden så dårlig?

Den dårlige vannkvaliteten i Sælenvatnet skyldes sammenfall av flere ugunstige faktorer, både fysiske, kjemiske og mikrobiologiske.

Nytt sjøvann strømmer tidvis inn og synker til bunns under det ferskere og lettere overflatelaget. Organisk materiale synker ned og råtner, og forbraker dermed oksygen. Når oksygenet er forbrukt, henter mikroorganismene oksygen fra andre kilder, som sulfat fra sjøvannet.

Den hydrogensulfid som dannes, holdes i dypvannet av et markert sprangsjikt (pyknoklin), som forhindrer turbulent blanding med overflatevann. Gjennom pyknoklinen foregår det kun en langsom lekkasje (diffusjon) og mikrobiologisk oksydasjon under normale forhold i Sælenvatnet.

Den beskrevne tilstand forstyrres så under ugunstige værforhold eller ved innstrømming av tungt nytt brakkvann. Ved innstrømming fortrenses dypvann med H<sub>2</sub>S og løftes opp i vannsøylen, evt. så høyt at gassholdig vann kommer i kontakt med luft.

Tilsvarende vil en vindoppstuing av overflatelaget også kunne eksponere dypvann. H<sub>2</sub>S-gassen frigjøres ikke umiddelbart, men kan henge igjen i overflatevann f.eks. i kanalen og utenfor i timevis. Millero m. fl. (1987) fant halveringstid på 26 timer. Andre har rapportert verdier opp mot 50 timer, avhengig av bl. a. turbulensnivå.

#### 1.4. Naturlig tilstand i Sælenvatnet

Fagmiljøer ved Universitetet i Bergen ønsker av forskningsmessige grunner å bevare Sælenvatnet så nært "naturlig" eller nåværende tilstand som mulig. Det vil si med H<sub>2</sub>S i dypvannet og naturlige bakteriekulturer i grensesjiktet.

Det kan diskuteres hva som er naturlig tilstand for Sælenvatnet. Tilstanden kan ha endret seg gradvis etter at kanalen blei utdypet i slutten av forrige århundre. Tidligere var kanalen som ei elv, med passasjemuligheter for små båter. Muligens har Sælenvatnet i perioder hatt ferskvann helt til bunns. I følge utsagn har luktplager imidlertid forekommet så langt tilbake som for 80 år siden, kanskje også ennå tidligere.

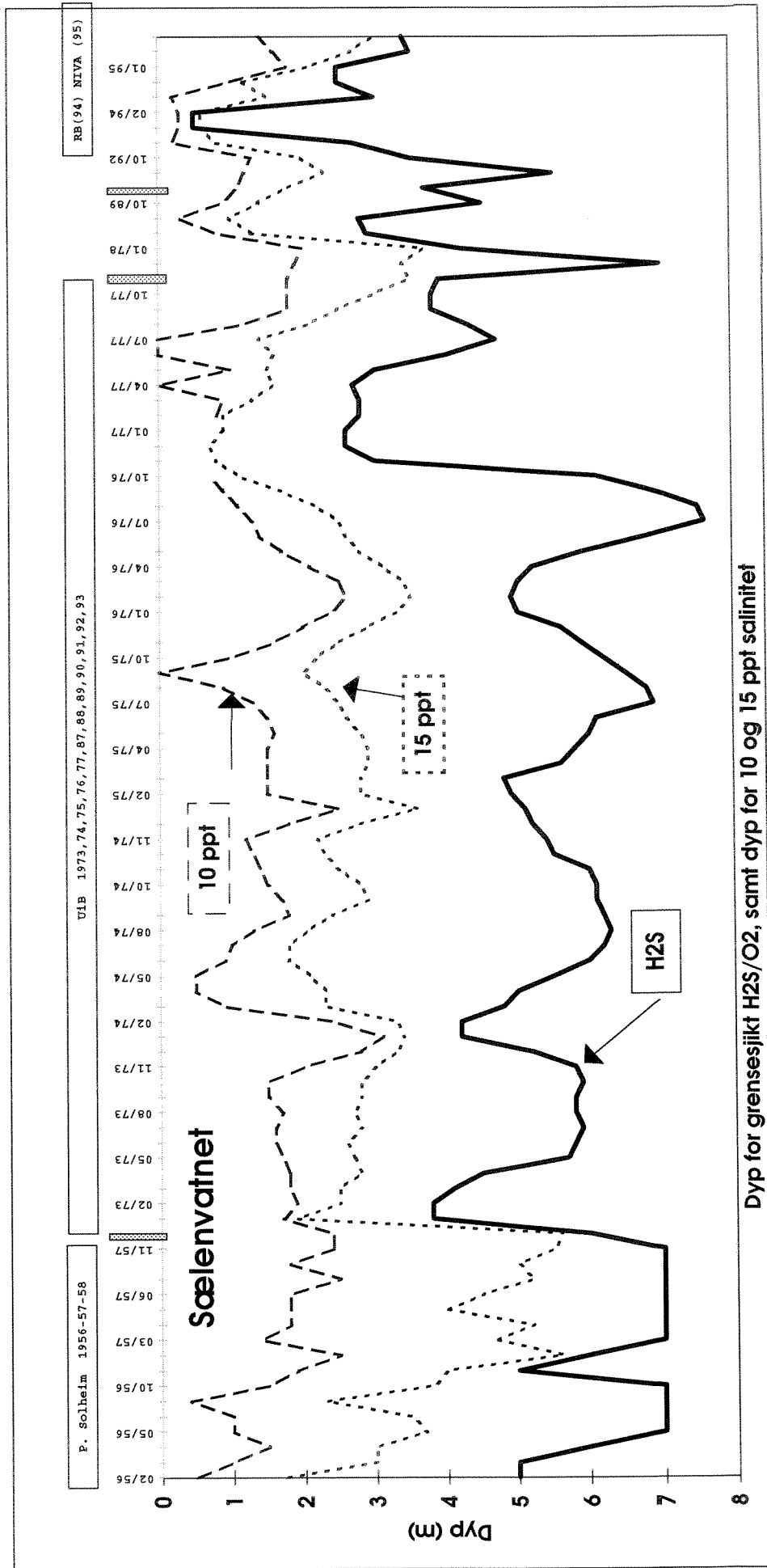
Tilførslene av organisk materiale og næringssalter kan ha økt de siste ti-åra, og dermed bidratt negativt til situasjonen ved å løfte H<sub>2</sub>S-grensesjiktet noe (fig. 1.2). Regulering og sanering av kloakkutslipp sammen med redusert landbruksaktivitet tilsier imidlertid det motsatte, selv om det ikke foreligger brukbart tallmateriale på dette fra tidligere tider.

Det har vært spekulert på om endringer i ferskvannstilførsler har medført endring av overflatelagets tykkelse og sprangsjiktets skarphet fra 1950-årene til i dag i takt med grenseflaten for H<sub>2</sub>S, som da sannsynligvis lå på 5-7 m dyp, mot 2-4 m i dag (fig. 1.2). Firma Rådgivende Biologer A/S (1994) fant ingen klar sammenheng i dataene. De endringer i ferskvannstilførsler som har skjedd, knytter seg til overføring av avløpsvann og drensvann til Knappen renseanlegg. I forhold til naturlig avrenning fra nedslagsfeltet på ca 0,5 m<sup>3</sup>/s i snitt utgjør endringen i følge kommunen sannsynligvis mindre enn 10%. Dette medfører neppe utslagsgivende endringer i sjiktningforholdene.

#### 1.5. Oppnåelig og ønsket tilstand

I prinsippet kan vannet i Sælenvatnet gjøres "rent" fra topp til bunn. Dette forutsetter at permanente sirkulasjonsfremmende tiltak iverksettes, evt. i kombinasjon med tilførselsbegrensinger. Dårlig sedimentkvalitet vil nok medføre begrensede livsvilkår for bunndyrfaunaen en stund. Lekkasje fra sedimentene til vann vil kunne forurense dypere deler av vannsøylen p.g.a. sulfidlekkasje m.m., og redusere oksygenkonsentrasjonen i grensesjiktet mot bunn. Men dette vil kunne holdes i sjakk ved hyppig utskifting eller vertikalblanding. Vannet vil kunne gi vilkår for tilnærmet normalt dyre- og planteliv.

Etter møte mellom kommunen og forskjellige miljøer og myndigheter 6. mars 1995, tas det nå sikte på å senke grenseflaten mellom oksygen og H<sub>2</sub>S ned til 6-7 meter. Dermed kan mikrobiologiske prosesser (inkludert lysavhengige) sannsynligvis opprettholdes omtrent som i dag. Det antas at dette tilsvarer om lag tilstanden slik den var i 1950-årene.



**Figur 1.2.** Tidsutvikling for dyp av øvre grensesjikt for H<sub>2</sub>S i Sælenvatnet 1956-1995, samt for 10 og 15 ppt salinitet, basert på målinger. Luktperioder/episoder der H<sub>2</sub>S grenseflaten må ha ligget i overflaten er ikke med.

## 1.6. Aktuelle vannforbedringstiltak

Det finnes mange metoder som sannsynligvis kan bidra til forbedret vannkvalitet i Sælenvatnet, eller i alle fall til å fjerne deler av hydrogensulfiden, og dermed luktproblemene.

Kortfattet kan nevnes:

- 1 Økt tilførsel av ferskvann i overflaten
- 2 *Dykket utslipp av elvevann*
- 3 Reduksjon i forurensingstilførsler
- 4 Oppdemming eller sluse i kanalen for å hindre innstrømming
- 5 Utdyping av kanalen for hyppigere innstrømming
- 6 *Mekanisk blanding (turbulens) i vannet, evt. med luftinnblanding*
- 7 Utpumping av dypvann
- 8 Tilsetning av oksydasjonsmiddel
- 9 Stimulert vertikalkonveksjon
- 10 Innpumping av sjøvann
- 11 *Kunstig oksygenering og lufting*
- 12 *Nedpumping av overflatevann til dypereliggende sjikt*
- 13 Tilførsler av komprimert luft

Flere av disse metodene vil kunne samvirke for bedre resultat (se f.eks. Berge m.fl. (1982) for en beskrivelse av flere av disse metodene). Videre vil enkelte av metodene brukt i begrenset omfang kunne legge forholdene til rette for at naturlige prosesser som vindblanding og vertikalkonveksjon får bedre betingelser.

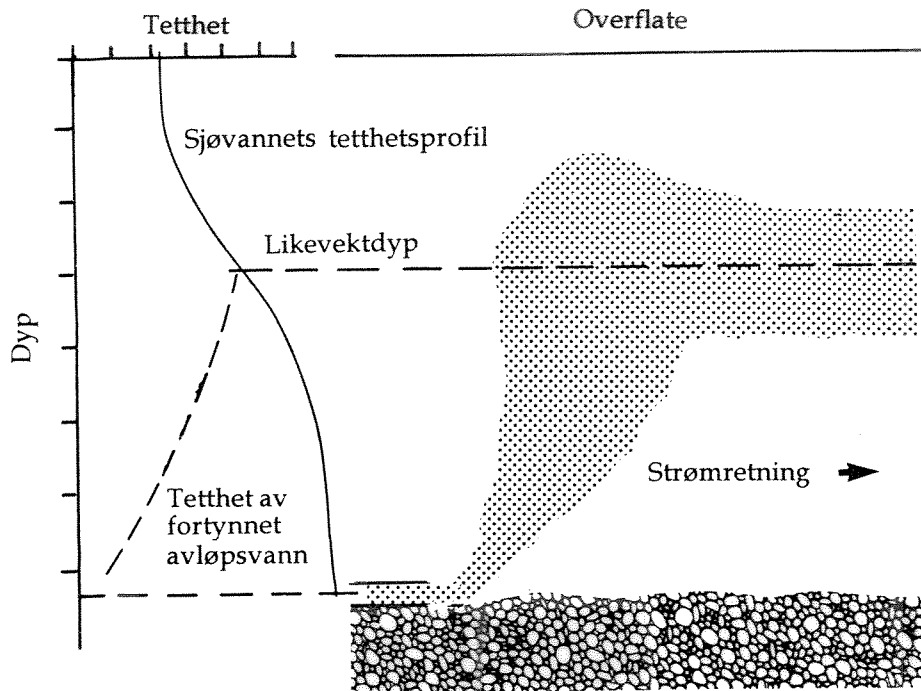
I denne rapporten berøres de metodene som er framhevet (*kursiv*) ovenfor. Metode 2 og 12 betraktes som én metode. Mekanisk blanding (metode nr 6) er forutsatt utført med en såkalt Aerator enhet, og metode 11 med såkalt Minox-dupp.

### 1.6.1. Dykket utslipp og nedpumping av ferskvann

Utslipp av ferskvann gjennom slange/rør (fig. 1.3) til dypere sjikt i Sælenvatnet har lenge vært vurdert som et aktuelt tiltak mot luktplagene. Varianter av metoden har vært benyttet og benyttes flere steder i Norge, bl.a. i Nordåsvatnet (Johannessen 1985), og i andre liknende resipienter som Horvereidvatnet i Nærøy (NHL 1983) og i fjorder på Sørlandet (Molvær et al. 1985). Stort sett har erfaringene vært positive, selv om langtidsvirkning ikke er dokumentert.

Neddykkede utslipp av ferskvann er mer effektive i sjøvannsresipienter enn i ferskvannsresipienter fordi en i sjøvann også har fordel av ekstra oppdrift p.g.a. tetthetsforskjell mellom ferskvann og sjøvann. For Sælenvatnets vedkommende er denne forskjellen av størrelsesorden 15-20 kg/m<sup>3</sup>, som forårsaker at ferskvannet stiger oppover i vannsøylen før innlagring (fig. 1.3.). Metoden presenteres nærmere i kapittel 4.

Både vann fra Sælenelva og Gjeddevatn har vært vurdert brukt i et dykket utslipp. Overføring fra Gjeddevatn vil fordre bruk av pumpe. Utslippsfluks og utslippsarrangement må dimensjoneres, evt. reguleres, slik at ferskvannet ikke trenger gjennom til overflaten dersom det er risiko for luktplager, økt algevekst e.l.



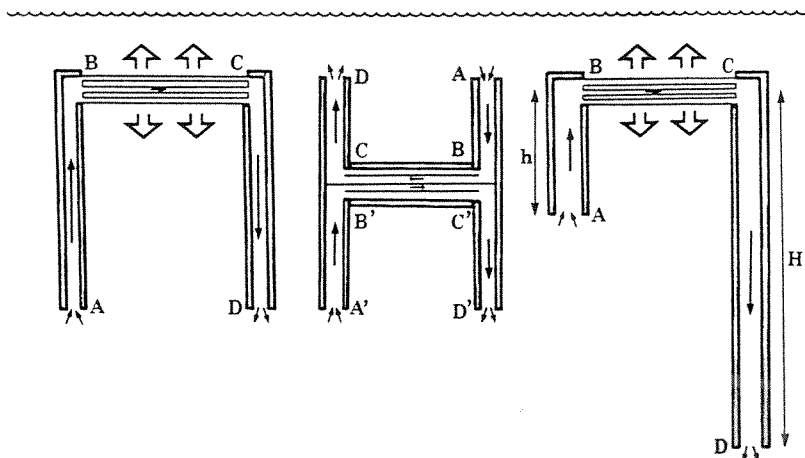
**Figur 1.3.** Prinsskisse som viser utslipp av ferskvann i resipient med tyngre (saltre) vann.

#### 1.6.1.1. Nedpumping av overflatevann

Overflatevannet (brakkvannet) i Sælenvatnet er lett (d.v.s. at saliniteten er lav). Derfor kan det antas at effektene av å pumpe ned overflatevann vil ha tilnærmet samme effekt i resipienten som et dykket utslipp som skissert ovenfor. Dette vil kunne utføres ved en enkel kombinasjon av en pumpe montert på en flåte, og der fluksen evt. kan reguleres i forhold til tilgjengelig brakkvann.

En mer sofistikert metode er å la nedpumpingen skje ved å utnytte potensiell energi i vannsøylen. Beregninger viser at dette er mulig (Golmen og C. Roisin 1992). Prinsippet for energikonvertering består av en flytende eller nedsenkbar "flåte" der vann fra et gitt dybdesjikt bringes i rør til et annet dyp, evt. til sjøoverflaten, hvor temperaturen er forskjellig fra inntaksdypet. Den tilknyttede avkjølingen eller oppvarmingen (avhengig av design og plassering) av det vertikalt strømmende vannet forårsaker endring av sjøvannets tetthet (densitet). Sjøvannet får dermed endret oppdrift, og gjennom system av vertikale og horisontale rør (isolerte rør og radiatorer, fig. 1.4) vil vannet danne en selvoppretholdende sirkulasjon.

For Sælenvatnets vedkommende vil vann fra f.eks. 2-3 m dyp om vinteren kunne føres opp til overflaten og så ned tilbake til inntaksdypet, eller ned til større dyp enn dette (konfigurasjon "c" i fig. 1.4).

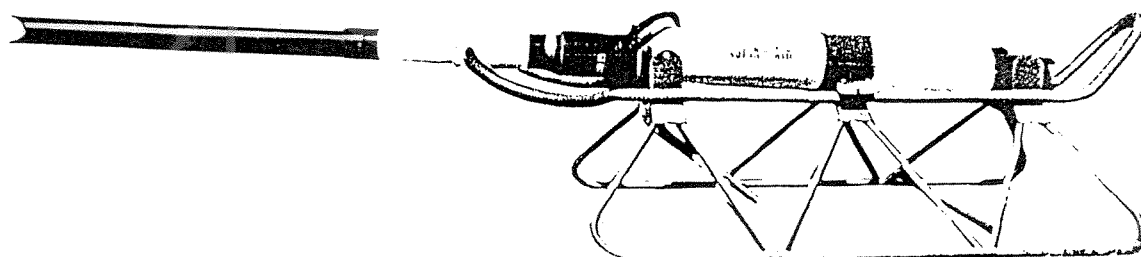


**Figur 1.4.** Tre mulige arbeidskonfigurasjoner av diffusjonspumpen. Horisontale og vertikale rør/radiatorer sørger for selv-oppretholdende sirkulasjon over termoklinen. Konfigurasjon "c" er den mest nærliggende for anvendelse Sælenvatnet.

#### 1.6.2. Turbulensgenerering evt. med luftinnblanding (Aeratoren)

For å fjerne  $H_2S$  i de øvre 10 meterne av vannsøylen i Sælenvatnet tilbyr Water Protector A/S å selge en "Aerator" eller luftinnblander til Bergen kommune. Tilbud er gitt i to dokument datert henholdsvis 04.03.94 og 02.06.94. I begge tilbudene gis det garantier for at utstyret under visse forutsetninger skal føre til tallgitte forbedringer av vannkvaliteten i Sælenvatnet. I en revidert leverandørgaranti datert 24.01.95 (Vedlegg 3) er det gjort en presisering av en del viktige forutsetninger for garantien.

Aeratoren eller luftinnblanderen (fig. 1.5) er utformet som et rør med diameter 6" og har forbindelse med atmosfæren via en slange opp til like over vannoverflaten. Selve luftinnblanderenheten drives av en avansert undervannspumpe som blander vann og luft og "skyter" vann med innblanding av små luftbobler ut med stor kraft. I stedet for luft kan slangeforbindelsen til overflaten benyttes til innsuging av kjemikalier i pulverform, og Aeratoren vil spre disse utover i vannmassene.



**Figur 1.5.** Bilde av aerator enheten som tilbys av Water Protector AS.

### 1.6.3. Kunstig oksygenering (Minox-duppen)

Informasjon om Minox-duppen er tatt fra leverandørens (Mastrans A/S) tilbud om et utviklingsprosjekt datert 13.09.94. Videre er det lagt fram et revidert forslag datert 21.09.94, der prosjektets annen fase også er utredet. Noe supplerende informasjon ble oversendt Bergen kommune fra Mastrans A/S 5.12.94. Her er også spørsmålet om luktproblemer som følge av luftingen behandlet. I tillegg til dette er Mastrans A/S ved Norolf Henriksen kontaktet direkte for å få svar på spørsmål vedrørende følgende punkter:

1. Enhetens oppgitte effekt
2. Innhold av teknisk oppfølging fra Mastrans A/S under forsøksperioden
3. Innhold og omfang av måleprogram skissert i prosjektets fase 2

Utstyret er opprinnelig utviklet for å bedre vannkvalitet i oppdrettsanlegg med tilførsel av oksygen til vannmassene. Senere er den modifisert til å bruke luft isteden for oksygen. Selve enheten er montert på en flåte som får tilført elektrisitet via en kabel lagt på sjøbunnen. Systemet trekker vann opp gjennom et stigerør fra ønsket dyp. Dypet kan justeres ettersom behovet endres. I stigerøret er det montert et boblekammer, der det pumpes inn luft fra overflaten. Luftet vann vil normalt slippes i eller nær overflaten, men kan føres ned på dypere vann om ønskelig. Dette kan være aktuelt dersom enheten installeres i Sælenvatnet. Enheten er oppgitt å ha en kapasitet på ca 300 m<sup>3</sup> fulloksygenert vann pr time. Ifølge leverandøren Mastrans A/S er enheten kostnadseffektiv med et effektforbruk på 1 kWh pr kg O<sub>2</sub>. I praksis trekker den ca 5 kW under drift.

Minox-duppen ble i 1991- 1992 testet i en stor terskelfjord med dårlig vannutskifting (Skjoldafjorden i Rogaland), uten at en kunne registrere noen merkbar bedring i forholdene (Vea m.fl. 1994). Dette behøver ikke bety at enheten i seg selv er ineffektiv, men at kapasiteten ikke sto i forhold til det aktuelle vannvolumet.

Minox-duppen er tilbudt som et felles utviklingsprosjekt mellom Bergen kommune og Mastrans A/S. I den første fasen er det foreslått å sette ut én dupp i Sælenvatnet, og registrere effekten av denne på vannkvaliteten i ulike avstander fra duppen. Dette baseres på kontinuerlig drift av enheten gjennom tre måneder. Deretter rapporteres og evalueres resultatene av Mastrans A/S, og evalueringen danner basis for en eventuell videreføring dersom man finner grunnlag for dette.

Målsettingen med en videreføring av prosjektet er å optimalisere enheten med tanke på kapasitet og effektbruk. Dette innebærer en ombygging av enheten og en ny testperiode på minimum 6 mnd. Ifølge produsenten er det realistisk å oppnå en kapasitet på ca 700 m<sup>3</sup> luftet vann pr time ved videreutvikling av produktet. Tidsmessig vil det ta 12 mnd fra avtale inngås til begge forsøksperioder er gjennomført. Imidlertid opplyser produsenten at forsøksperiodene ikke behøver å være så lange for den tekniske utviklingens del, men at de er lagt inn for å gi rom for et kjemisk/biologisk måleprogram. Hvis man bare tar hensyn til utviklingstiden, kan prosjektiden kortes ned til 4-5 mnd.

Utviklingsprosjektet vil i seg selv ikke medføre noen effektiv utlufting av de øvre vannmasser i Sælenvatnet. Først etter at prosjektet er avsluttet, kan man sette i gang en oppskalert lufting.



## 2. BESKRIVELSE AV SÆLENVATNET

Her gis en kortfattet topografisk og fysisk beskrivelse av Sælenvatnet og omgivelsene. Opplysningene benyttes i påfølgende analyser.

### 2.1. Topografi og tilførsler

Sælenvatnet (fig. 1.1) har et overflateareal på ca 0,6 km<sup>2</sup>. Tabell 2.1 gir vannvolum i ulike sjikt.

Tabell 2.1. Vannvolum i ulike dybdesjikt i Sælenvatn.

Dybdeintervall (m)	Volum (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )
0-5	2,43
5-10	1,61
10-15	1,08
15-20	0,58
20-25	0,17
> 25	0,07

Samla volum er bergna til 5,94 mill m<sup>3</sup>. Dette tallet stemmer rimelig bra med Rådgivende Biologer (1994a) sine beregninger (5,7 mill m<sup>3</sup>), men det er noe større enn det Indrebø (1976) fant i sin hovedoppgave (3,9 mill m<sup>3</sup>).

#### 2.1.1. Tilførsler

Sælenvatnet utgjør nedre del av Fyllingsdalsvassdraget. Nedslagsfeltet for Sælenvatnet er 3,26 km<sup>2</sup> (Rådgivende Biologer A/S, 1992), og for Sælenelva 7,3 km<sup>2</sup> (Hobæk m. fl. 1994), som gir en gjennomsnittlig tilrenning til vatnet på ca 0,6 m<sup>3</sup>/s, vesentligst gjennom Sælenelva (fig. 1.1). Årlige forurensingstilførsler er estimert til ca 200 kg P, 16 tonn N og 54 tonn org. karbon. Mye av forurensingen kommer med Sælenelva fra Ortuvatnet.

Sælenvatnet tilføres også vann fra Nordåsvatnet gjennom kanalen. Størrelsen på tilførslene varierer i takt med vannstanden. Stor ferskvannstilrenning kan i perioder blokkere for innstrømming i kanalen.

### 2.2. Hydrografi og vannutskifting

Miljøtilstanden i Sælenvatnet styres av en ballanse mellom fysiske og kjemiske/biologiske prosesser. De fleste tiltak som er foreslått for å forbedre tilstanden, er fysiske. Noen kjemiske og også biologiske metoder har vært diskutert og vurdert som mindre aktuelle.

Sælenvatnet kan betraktes som en fjord med svært grunn terskel. Betegnelsen "*meromiktisk innsjø*" er tidligere brukt om Sælenvatnet. Dette gjelder imidlertid innsjøer med tetthetssjiktning forårsaket av økt saltinnhold i dypet, men som ikke har toveis vannutveksling med kystvannet. Saltet i slike innsjøer kan for øvrig ha til dels svært avvikende kjemisk sammensetning i forhold til sjøsalt i fjorder.

Overflatelaget i Sælenvatnet har lav salinitet, gjerne 2-10 ppt ned til 2-3 m dyp. Vannets densitet øker markert fra overflaten ned til 3-5 m dyp. Derfra og ned er det nesten ingen sjiktning med salinitet på 20-21 ppt og temperatur på 10-11 grader. Dypvannet har m.a.o. også brakkvannskaraktistikk, ut fra definisjonen lavere salinitet enn 25 ppt. Et vertikalt temperaturmaksimum holder seg utover vinteren, noe som indikerer enten svært liten vertikalutveksling eller varmeproduksjon fra (bio)kjemiske prosesser.

Sælenvatnet har sammenfallende fysiske likhetstrekk med mange fjorder med grunn terskel og permanent H<sub>2</sub>S i dypvannet, bl. a. Framvaren (Skei, 1988) i Vest-Agder, der NIVA har regissert flere undersøkelser (ref: særnummer av *Marine Chemistry* Vol 23, nr 3-4, 1988). For Framvaren er det fjorder, ikke innsjøer, som utgjør det mest relevante sammenlikningsgrunnlaget både med hensyn til indre dynamikk, vannutskifting og kjemiske/biologiske prosesser.

Tilstanden i Sælenvatnet når det gjelder hydrografi, er relativt godt kjent, gjennom flere undersøkelser i regi av Universitetet i Bergen (se oppsummeringsnotat v/ Bratbak og Thingstad (1994)). Tilstanden i dypvannet viser liten tidsvariasjon. Temperaturen ligger i intervallet 10-11 grader, og saliniteten rundt 21 p.p.t. Måle metodene for salinitet har nok hatt sine begrensinger når det gjelder nøyaktighet, slik at målte variasjoner ikke alltid har vært reelle.

Fig. 2.1a,b viser fordeling av temperatur og salinitet i åra 1973-1977 (UiBs målinger). Dypvannsverdiene holdt seg temmelig konstante helt til våren 1977, da saliniteten økte noe, muligens som resultat av en større innstrømming. Det skjedde også en viss reduksjon i H<sub>2</sub>S konsentrasjonen (fra ca 2,5 til 1,5-2,0 mM/l) ved dette tidspunktet.

### 2.2.1. Vannsøylens stabilitet

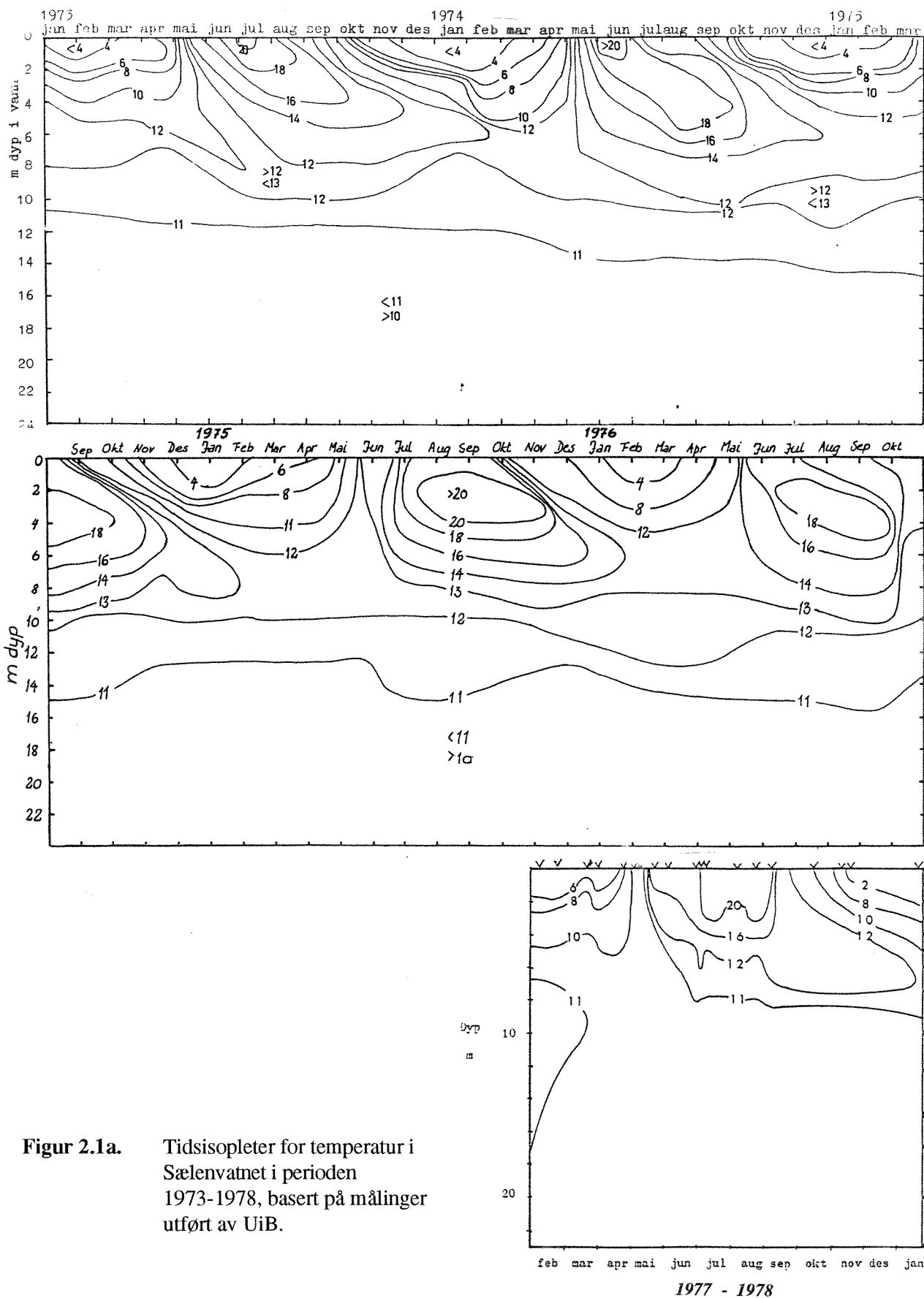
Begrepet *stabilitet* i vannsøylen har vært et gjennomgående tema i diskusjonen om tiltak i Sælenvatnet. Høyest stabilitet er forbundet med sterkest sjiktning. Blanding av vannmassene ved f.eks. vind, bølger eller ved tekniske løsninger, vil kunne bidra til å minske stabiliteten. Dykket ferskvannsutslipp der densiteten i nedre lag reduseres ved tilførsel av oppdrift, vil også bidra til destabilisering.

Sjiktingsgraden bestemmes av vertikalgradienter i temperatur og salinitet. Naturlige endringer i salinitet og temperatur gjennom året bidrar til skiftende sjiktingsforhold. Dypvannet i Sælenvatnet har liten sesongvariasjon i dypvannet under 7-8 m dyp slik at det er endringene i grunnere, d.v.s. ferskere sjikt, som er viktigst.

Naturlig forekommende salinitetsendringer i Sælenvatnet har en relativt sett langt større effekt på densiteten enn tilsvarende (observerte) temperaturendringer. Temperaturendringer har aller minst effekt (<0,1 kg/m<sup>3</sup> pr grad) i kaldt, ferskt vann, som Tabell 2.2 illustrerer. D.v.s. at nedkjøling om høsten eller oppvarming om våren medfører liten endring i sjiktingsforholdene, i motsetning til i en innsjø. Salinitetsendringer skapt av ferskvannstilførsler eller blanding av ulike vannmasser skaper 5-10 ganger større endring i densitet enn temperaturendringer.

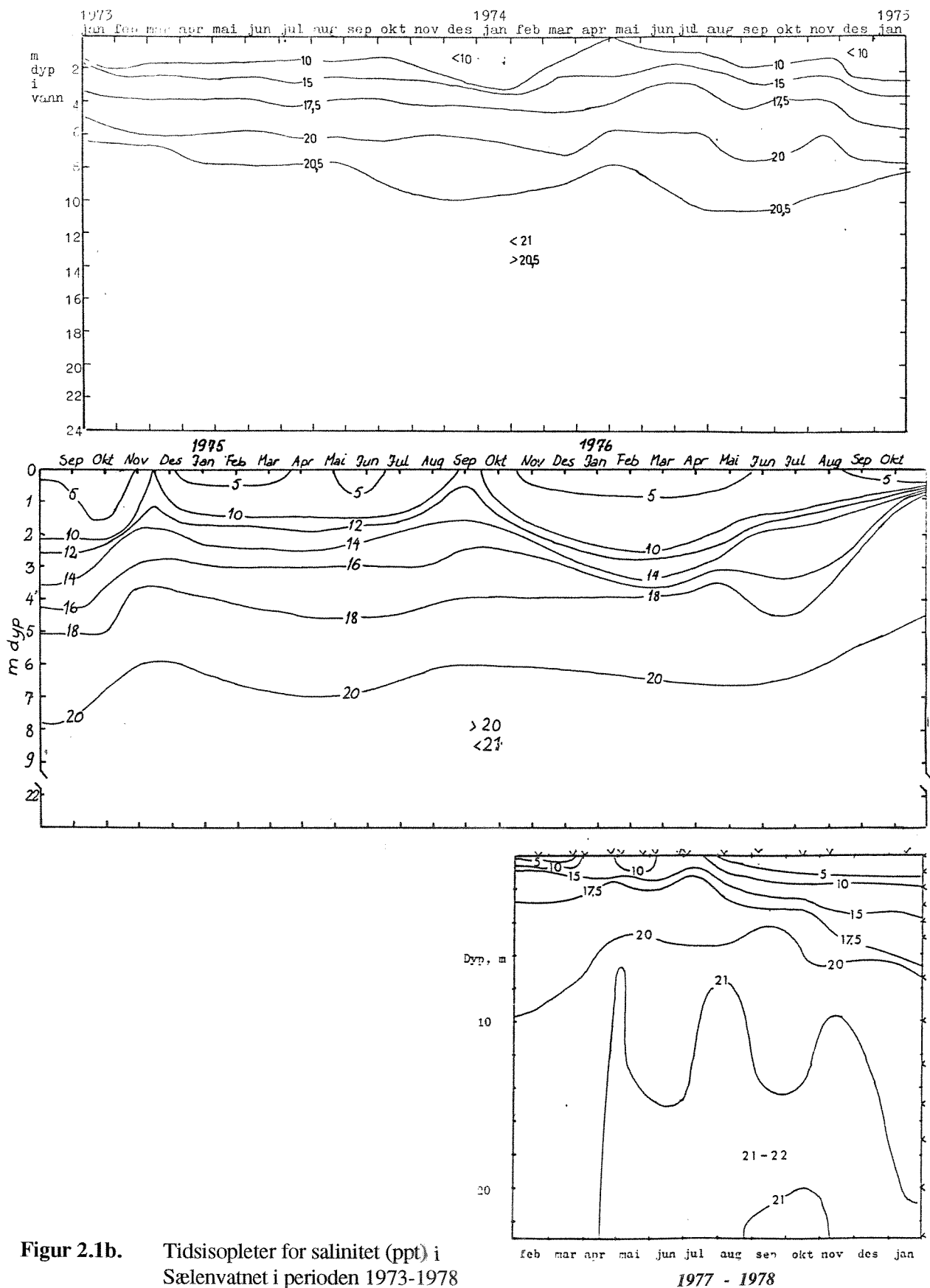
**Tabell 2.2.** Noen eksempler som viser den relative betydning av endring i salinitet (S) og temperatur (T) på densiteten for brakkvann med forskjellige T-S karakteristikk, uttrykt ved den haline (β) og termiske ekspansjonskoeffisienten.

	$\beta = 1/\rho \partial\rho/\partial S$ [kg/m <sup>3</sup> /ppt]		$\alpha = -1/\rho \partial\rho/\partial T$ [kg/m <sup>3</sup> /°C]	
	T = 5 °C	T = 15 °C	T = 5 °C	T = 15 °C
S = 5 ppt	0.78	0.77	0.03	0.16
S = 20 ppt	0.79	0.77	0.08	0.29



**Figur 2.1a.** Tidsisopleter for temperatur i Sælenvatnet i perioden 1973-1978, basert på målinger utført av UiB.

1977 - 1978



Figur 2.1b. Tidsisopleter for salinitet (ppt) i Sælenvatnet i perioden 1973-1978 basert på målinger utført av UiB.

### 2.2.2. Noen energibetraktninger

Det kreves energi for å forflytte vann både oppover og nedover i en stabil vannsøyle. Jo høyere stabilitet, jo mer energi trengs til forflytting og for å blande vannsøylen.

Den statiske stabiliteten kan uttrykkes ved vannsøylens potensielle energi (pr m<sup>2</sup>) relativt til en gjennomblandet søyle,

$$P = \int (\rho' - \rho(z)) z g dz,$$

der g er tyngdeaksellerasjonen (m/s<sup>2</sup>),  $\rho$  er densiteten (kg/m<sup>3</sup>),  $\rho'$  er midlere densitet (etter blanding) og z er dybden. En gjennomblandet vannsøyle vil ha høyest potensiell energi. Dess mer sjiktet, dess lavere potensiell energi (lavere "tyngdepunkt").

Størrelsesordenen på energidifferansene ved ulike sjikttingsforhold er illustrert i Tabell 2.3 ved to tilfeller med ulik salinitet i det øvre av to lag, der det nederste er uendret. Verdiene er i overensstemmelse med forholdene i Sælenvatnet. Ved dette eksempelet, der densiteten i øvre lag er satt h.h.v. 1.005 og 1.012 kg/m<sup>3</sup>, er forskjellen i potensiell energi 1,5 kJ/m<sup>2</sup>. Teoretisk skal altså denne energimengden tilføres vannsøylen for å forvandle den fra sterk (lavt energinivå) til svak sjikting (høyt energinivå) uten ekstra inn/utstrømming av vann. Dette kan besørges av f.eks. en mekanisk enhet, som Aeratoren, eller av naturen selv ved f.eks. vind eller redusert ferskvannstilrenning.

**Tabell 2.3.** Eksempel på fordeling av potensiell energi ved to ulike sjikttingsforhold. Ved svak sjikting er vannsøylens tyngdepunkt, og dermed energien, høyest.

	Svak sjikting		Sterkere sjikting	
Lag 1, 0-3 m	1012 kg/m <sup>3</sup>	237.8 kJ/m <sup>2</sup>	1005 kg/m <sup>3</sup>	236.2 kJ/m <sup>2</sup>
Lag 2, 3-25 m	1015 kg/m <sup>3</sup>	111.7 kJ/m <sup>2</sup>	1015 kg/m <sup>3</sup>	111.7 kJ/m <sup>2</sup>
	-	349.5 kJ/m <sup>2</sup>	-	347.9 kJ/m <sup>2</sup>

Tiltak for å destabilisere Sælenvatnet vil hele tiden måtte arbeide mot stabilisering p.g.a. konkurrerende ferskvannstilførsel som vil redusere energinivået. I tillegg kommer den kontinuerlige inn-/utstrømmingen gjennom kanalen. Derfor er det viktig å få med tidsfaktoren ved vurdering av effekter av tiltak, og ikke bare tenke ut fra statisk før-etter situasjon som illustrert i Tabell 2.3, som i praksis bare vil gjelde for korte tidsrom.

## 2.3. Indre bølger

I innelukkede bassenger som Sælenvatnet, kan det dannes stående indre bølger ved at sprangsjiktet vandrer opp og ned med mer eller mindre regelmessig periode. Disse bølgene, som kan være generert av vind eller kraftig innstrømming, kan være årsak til episodisk utlufting av dypvann. Det har vært spekulert på om eventuelle tiltak som endrer sirkulasjon eller sjikttingsforhold, også kan generere kraftigere indre bølger enn i dag.

P.g.a. grenseflater, sjikting og kontinuitetsbetingelser vil svingningene gjerne ha en karakteristisk fasong og periode. Ved kontinuerlig økende densitet med dypet vil teoretisk svært mange svingeperioder kunne eksistere. Men med to lag og et relativt markert sprangsjikt kan en gjøre tilnærmelser og kalkulere sannsynlige svingeperioder ( $T_i$ ) ut fra følgende formel:

$$T_i (s) = 2L [\rho_2/g(\rho_2-\rho_1)(1/H_1 + 1/H_2)]^{1/2}.$$

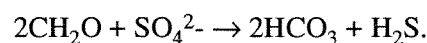
$\rho_1$  og  $\rho_2$  er densitet i øvre og nedre lag, og  $H_1$  og  $H_2$  er respektiv tykkelse.

Ved å sette den effektive lengden til Sælenvatnet lik 1.200 m,  $\rho_1$  lik 1.005 kg/m<sup>3</sup> og  $\rho_2$  lik 1.015 kg/m<sup>3</sup>,  $H_1 = 3$  m og  $H_2 = 25$  m, gir formelen en svingeperiode på ca 1 time. Dette kan tilsvare tidsskalaen for kortvarige luktepisoder.

Frie svingninger på grenseflaten kan også genereres av ytre forstyrrelser, f.eks. brå innstrømming ved kanalen. Sjiktingen bestemmer også her hvilke frekvenser som kan forventes. Dess kraftigere sprangsjikt, dess høyere frekvens. Realistiske verdier for øvre lag av Sælenvatnet vil ligge i intervallet 0,5-5 minutter. M.a.o. vesentlig kortere periode enn for stående bølger.

## 2.4. Dannelse av hydrogensulfid

Nedbryting av organisk materiale i dypvannet skjer sannsynligvis vesentligst ved såkalt dissimilatorisk SO<sub>4</sub> reduksjon ved anaerobe bakterier, og danning av H<sub>2</sub>S:



Denne produksjonen er avhengig av organiske tilførsler. Næs m. fl. (1988) fant vertikal fluks i Framvaren (20 m o. bunn) lik 20 g C m<sup>-2</sup>år<sup>-1</sup>. Børsheim (1978) estimerte primærproduksjonen i Sælenvatnet (øvre lag) til 140 g C m<sup>-2</sup> år<sup>-1</sup>. Dette utgjorde mindre enn 50% av det materialet som blei nedbrutt. M.a.o. må det også skje betydelige tilførsler fra nedslagsfeltet eller fra Nordåsvatnet.

Det må foregå en betydelig produksjon av H<sub>2</sub>S i Sælenvatnet, som i det vesentligste stammer fra sulfat i sjøvannet i form av NaSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, MgSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>- KSO<sub>4</sub><sup>-</sup> og SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Gjennomsnittlig sulfatkonsentrasjon i reint sjøvann (ved ca 35 ppt salinitet) er 0,904 gS/kg (Krouse og Grinenko 1991), altså ca 1/40 vektdel av alt saltet. Samlet sulfatkonsentrasjon som funksjon av salinitet i havvann gis av formelen

$$[\text{SO}_4^{2-}] = 0,808 \times S \text{ (mM/l)}.$$

For S = 21 ppt (dypvann Sælenvatnet), blir teoretisk SO<sub>4</sub> konsentrasjon der 17 mM/l, mens målt (av UiB) er 14-15. M.a.o. må 2-3 mM/l ha blitt konvertert til H<sub>2</sub>S ved kjemiske og mikrobiologiske prosesser. Dette stemmer bra med den H<sub>2</sub>S-konsentrasjonen som faktisk er målt. Noe svovel frigjøres også i dypvannet fra døde organismer (fyto-/zooplankton, med svovelinnhold ca 1-3% av tørrvekt).

### 3. NYE MÅLINGER I SÆLENVATNET

Vinteren 1994-1995 blei det gjennomført et måleprogram i Sælenvatnet for å supplere eksisterende data-materiale. Måleresultatene er presentert i en separat datarapport (NIVA 1995). Her gis kun en kortfattet presentasjon av måleresultatene.

Ved planlegging av målingene blei det lagt vekt på å framskaffe data som bedre kunne bidra til å avdekke dynamikken i systemet, spesielt tilknyttta kortvarige endringer/episoder. Videre skulle målingene danne grunnlag for tekniske beregninger i samband med vurdering av foreslåtte tiltak og framtidig overvåking.

#### 3.1. Hydrografi

##### 3.1.1. Sjikting

Profilene som blei tatt med 2-4 ukers mellomrom, synte at det øvre laget består av nesten ferskt overflatevann. Pyknoklinen (sprangsjiktet) varierte i tykkelse fra ca 3 m til 6-7 m i perioden desember-mars.

Fig. 3.1 syner tilstanden som blei målt 28. februar 1995 med en Seabird SBE sonde med stor nøyaktighet. Ferskvannslaget (salinitet på 1-2 ppt) strakte seg ned til ca 1 m dyp. Derfra økte salinitet og densitet gradvis til ca 7 m dyp. Dypvannsverdiene lå på 21,2-21,3 ppt i salinitet, 1.016,2 kg/m<sup>3</sup> i densitet og 10,4 °C i temperatur.

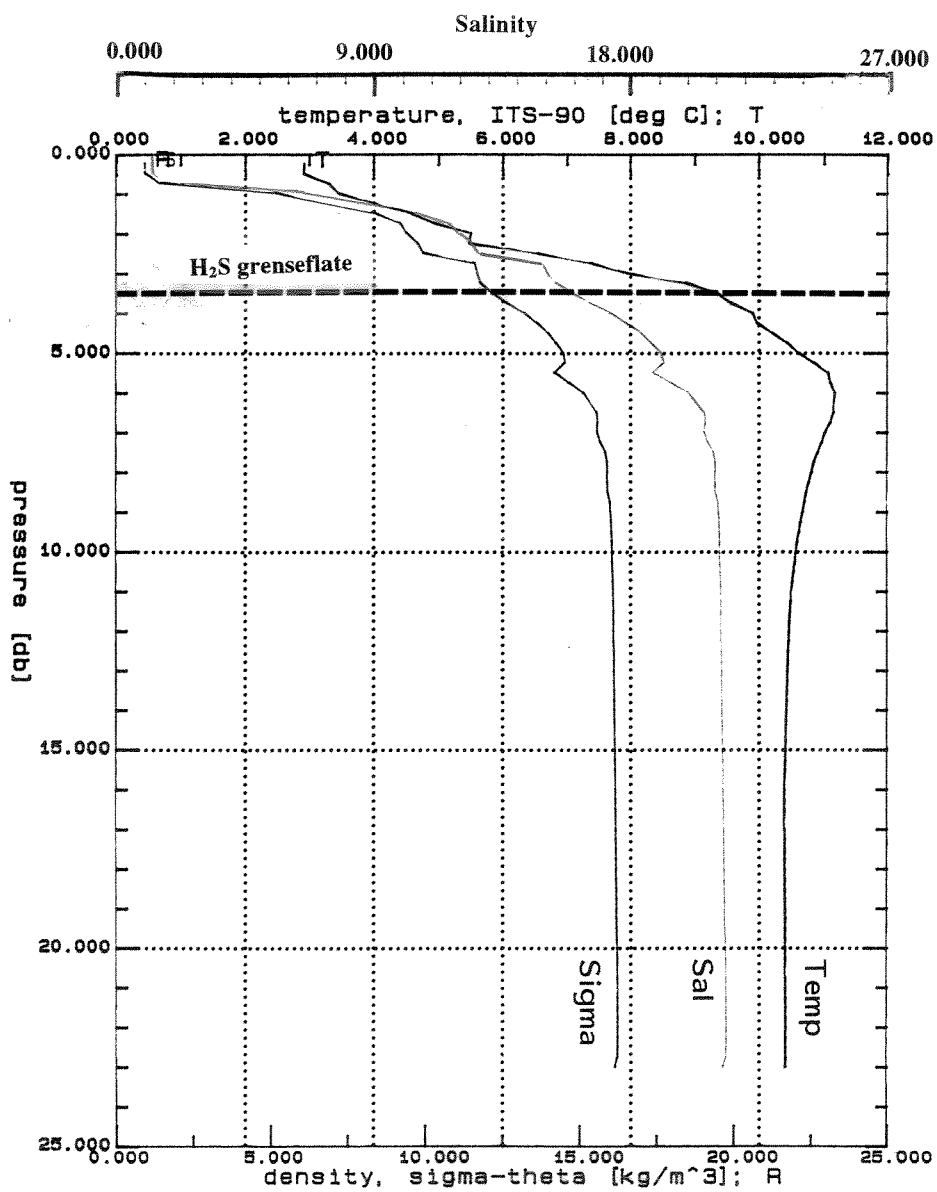
Et sjikt med temperaturn maksimum (over 11°C) spores i 5-6 m dyp. Dette representerte sannsynligvis rester av fjordårets oppvarming. Det er også mulig at biokjemiske prosesser i pyknoklinen (redox-prosesser etc) bidrar med varme til dette sjiktet, men vi har ikke funnet relevante tall for størrelsen av en slik effekt.

Sjiktningsforholdene vinteren 1994-1995 (fig. 3.1) var annerledes enn det som blei registrert foregående vinter (Rådgivende Biologer 1994a), da det øvre laget strakte seg ned til 1,5-2,5 meter, med en skarpere overgang (knekkpunkt i kurvene) mellom øvre lag og dypvann. Sjiktet med temperaturn maksimum var tykkere og lå dypere. Foregående vinter var det også tilsynelatende tendenser til ustabil vannsøyle i dypvannet (avtakende salinitet med dypet), men disse registreringene kan muligens skyldes unøyaktig måleutstyr (tilsvarende instabilitet er ikke registrert av NIVA ved noe tilfelle).

#### 3.2. Måling med T-S kjede

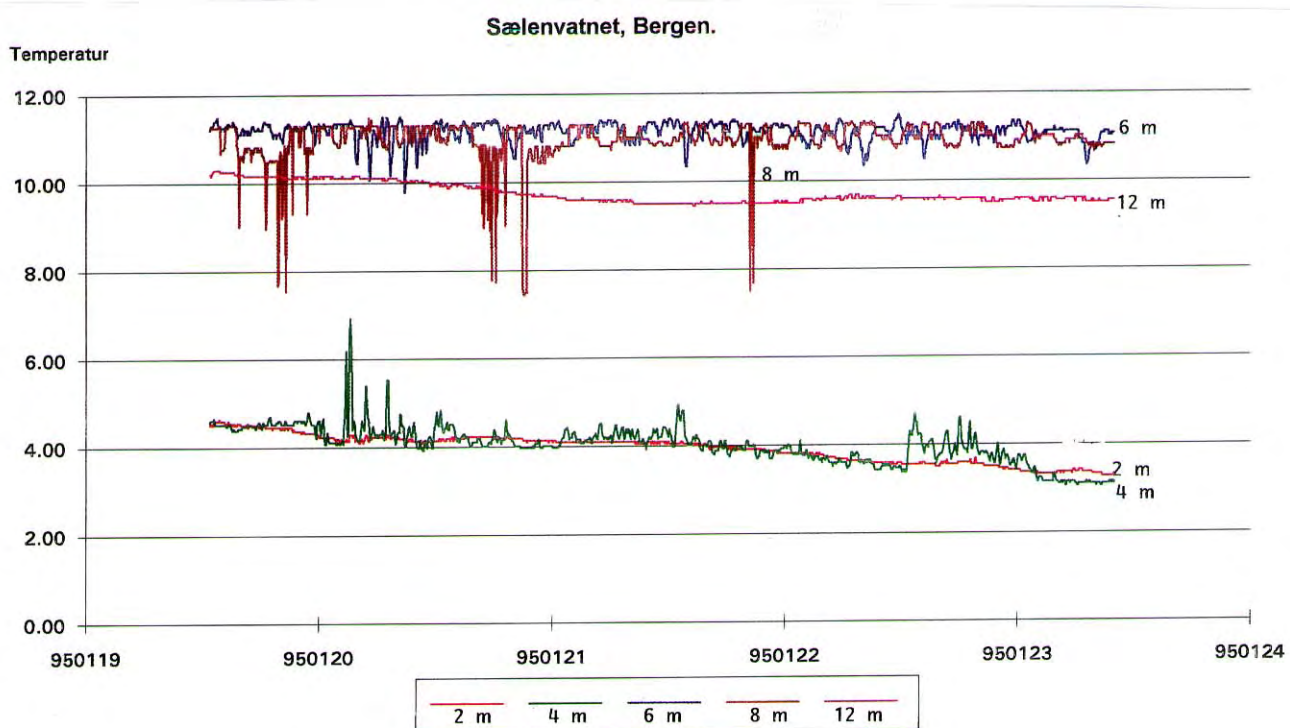
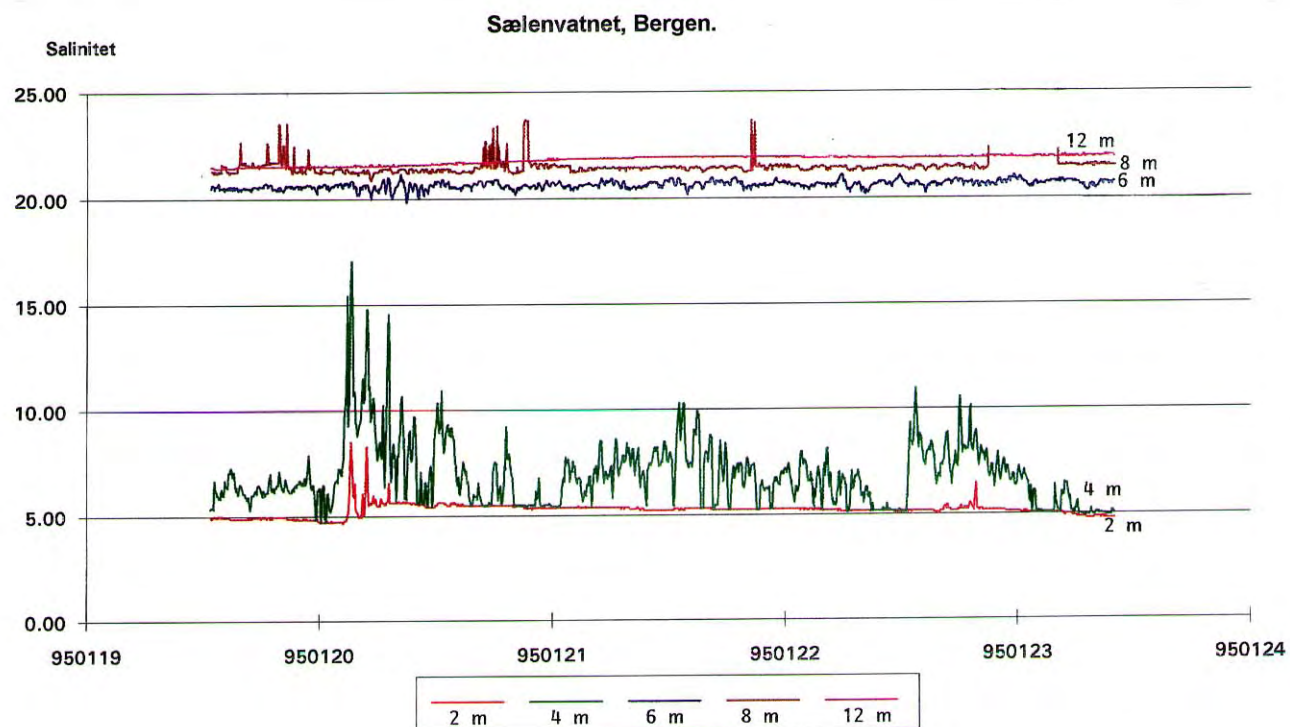
Målinger med T-S kjede med sensorer for temperatur og salinitet i 5 ulike dyp blei foretatt over to 3-ukers perioder, i januar og februar-mars 1995. Fig. 3.2a,b viser resultater (ukalibrerte) for målinger over ulike perioder fra 1-2 m dyp og nedover til litt under pyknoklinen i midten av januar (fig. 3.2a) og begynnelsen av mars. (Måledypene var litt forskjellige i de to periodene; dybdeangivelser er angitt i figurene.)

Målingene viser at forholdene under pyknoklinen var stabile gjennom måleperiodene. Lenger oppe i vannsøylen var det imidlertid variasjoner, med markerte svingninger i 5 m dyp og over. I 1 m dyp varierte saliniteten mellom ca 2 ppt (i begynnelsen av mars) og 13-14 ppt (8. mars, fig 3.2b). I januar kan en notere datoen den 20., da saliniteten i 2 m dyp brått økte fra 5-6 ppt til over 17 ppt. Det blei da registrert H<sub>2</sub>S lukt ved vatnet (se avsn. 3.3).



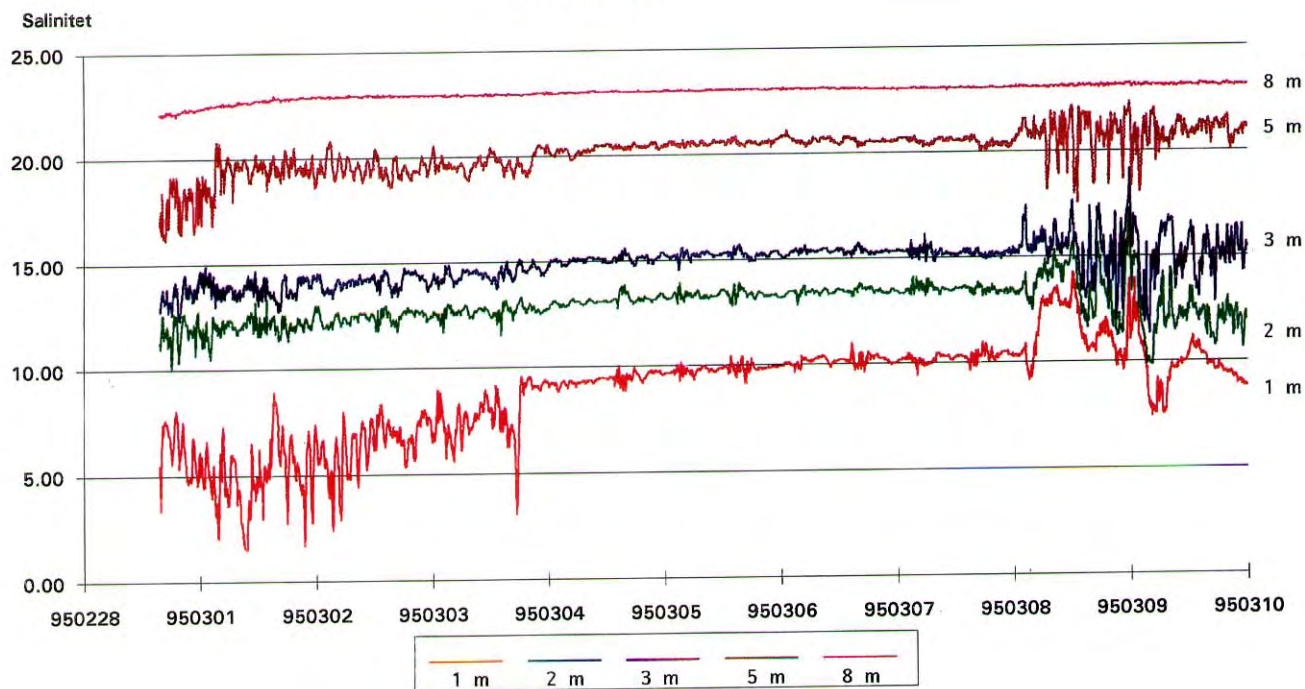
**Figur 3.1.** Vertikalprofil av målt temperatur og salinitet, samt beregnet densitet 28. februar 1995, i Sælenvatnet. Nivå for grenseflate mellom oksisk og anoksisk vann er også indikert.



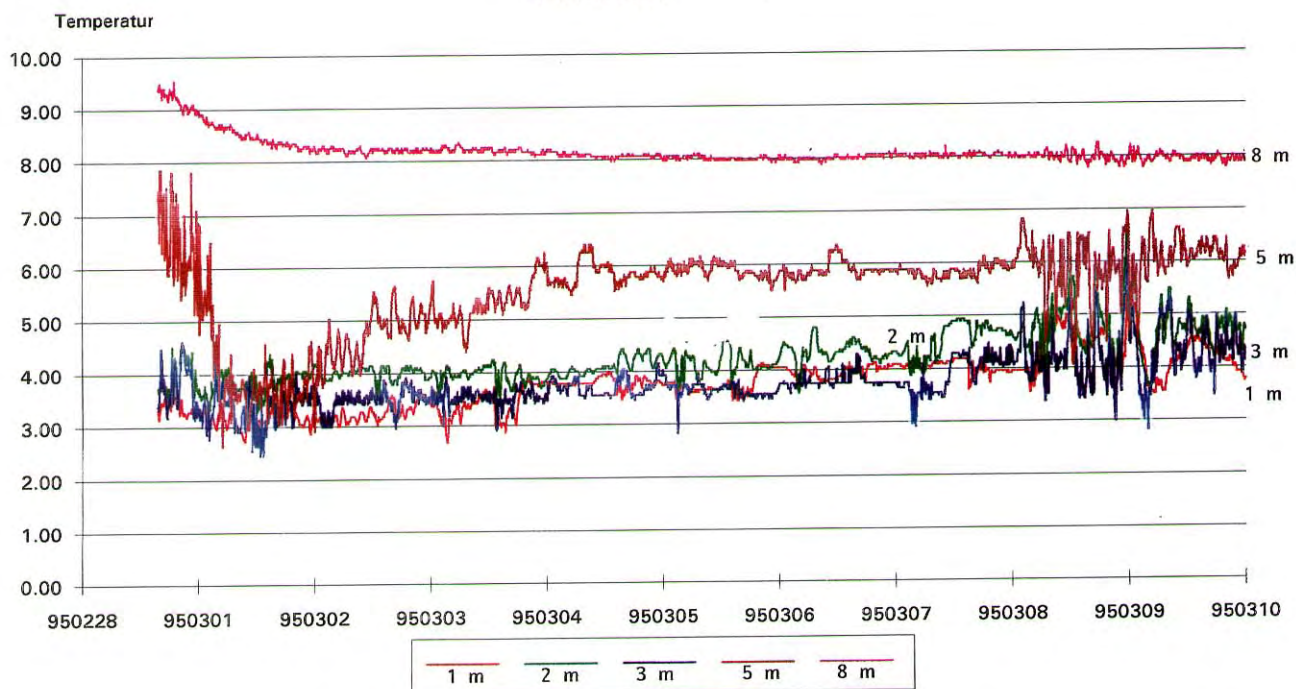


**Figur 3.2a.** Målinger av salinitet (øverst) og temperatur med T-S kjede i Sælenvatnet i perioden 19. - 23. januar 1995. Merk episoden med høy salinitet i øverste sjikt 20. januar, da det også blei registrert  $H_2S$  lukt.

## Sælenvatnet.



## Sælenvatnet.



**Figur 3.2b.** Målinger av salinitet (øverst) og temperatur med T-S kjede i Sælenvatnet i perioden 28. februar - 9. mars 1995.

### 3.2.1. Indre bølger

T-S målingene viste at rolige perioder av flere dagers varighet innimellom blei avbrutt av perioder med større svingninger i 1-5 m dyp. Av fig. 3.2 framgår det visse kort-periodiske svingninger som vedvarte over flere dager. I første del av serien var framherskende periode 1,3 time, og på slutten 1,5 time. Dette må være tale om egensvingninger (stående bølger) i pyknoklinen. Noe varierende periode skyldes sannsynligvis variasjon i hydrografiske forhold. Merk at de målte periodene samsvarer rimelig bra med den størrelsesorden på perioden som blei beregnet i avsnitt 2.3.

## 3.3. Oksygen og hydrogensulfid

### 3.3.1. Lukt-episoder:

Vinteren 1994-1995 registrerte naboene til kanalen (fam. Haugland) to kortvarige lukt-episoder:

17. desember, ca kl 18-22 og  
20. januar, ca kl 07-13.

Ved begge episodene hadde vi måleapparater som kunne fange opp visse tilstandsendringer i vatnet og i kanalen.

### 3.3.2. Dypvann og grensesjikt

Det blei registrert vedvarende og høye verdier av  $H_2S$  i dypvannet vinteren 1994-1995. Konsentrasjoner blei målt til mellom 50 og 60 mg/l  $H_2S$  på større dyp enn 10 m. Redox grenseflaten registrert v.h.j.a. vannprøver ved enkelte tidspunkt, lå mellom 2,5 m (9. jan.) og 4 m. I enkelte kortvarige perioder må denne grenseflaten ha berørt overflaten (luktepisodene).

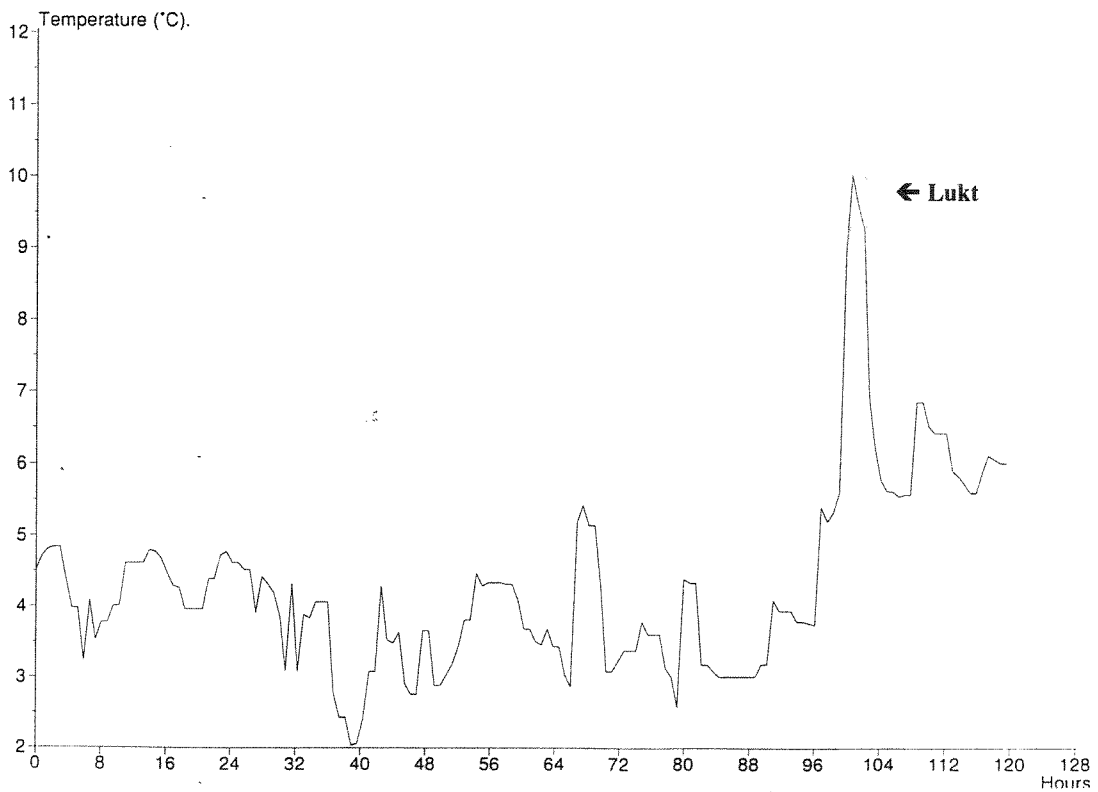
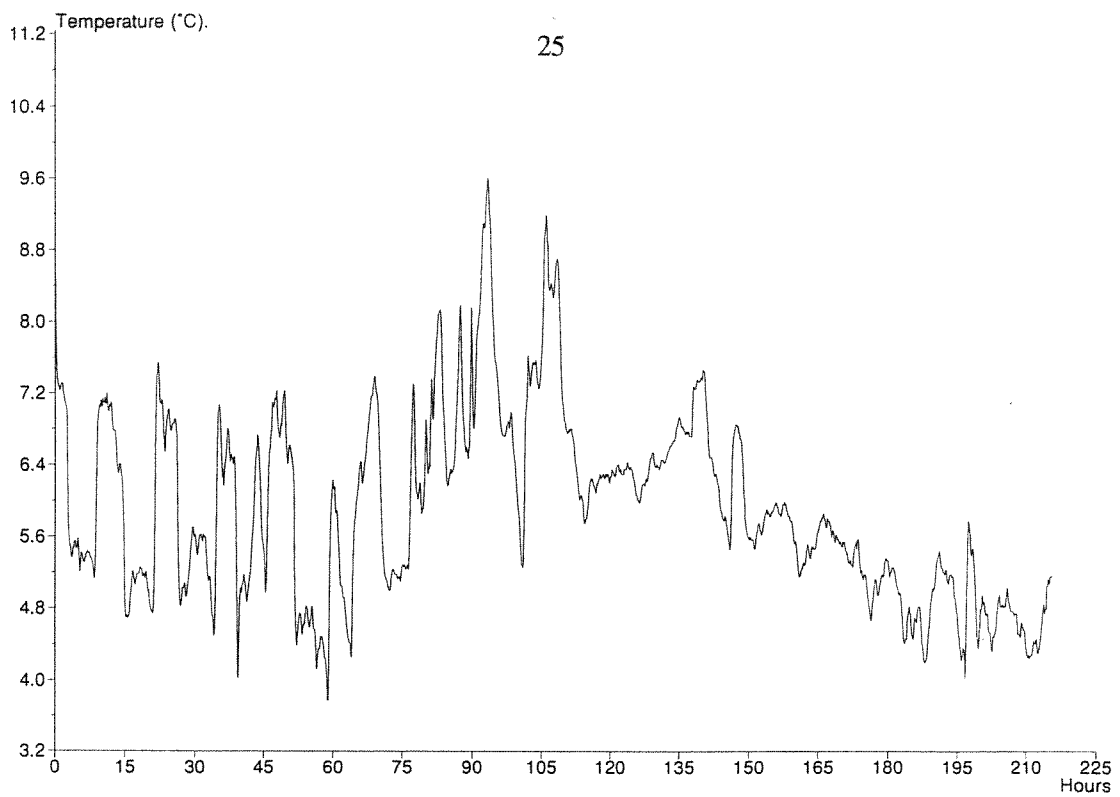
## 3.4. Måling av strøm og temperatur i kanalen

Strømmålinger i kanalen blei utført kontinuerlig fra desember 1994 til mars 1995. Måleinstrumentene registrerte også vanntemperaturen. Fig. 3.3a viser temperaturutviklingen i kanalen gjennom 2 perioder i desember. Perioder med varmere vann enn ca 8 °C representerer utstrømmende vann, fra øvre del av pyknoklinen. Dette vannet kan inneholde  $H_2S$ , slik tilfellet var 17. desember, da måleren registrerte temperatur over 10 °C en kort stund. Det var ikke spesielt kraftig strøm ved dette tidspunktet (30-50 cm/s).

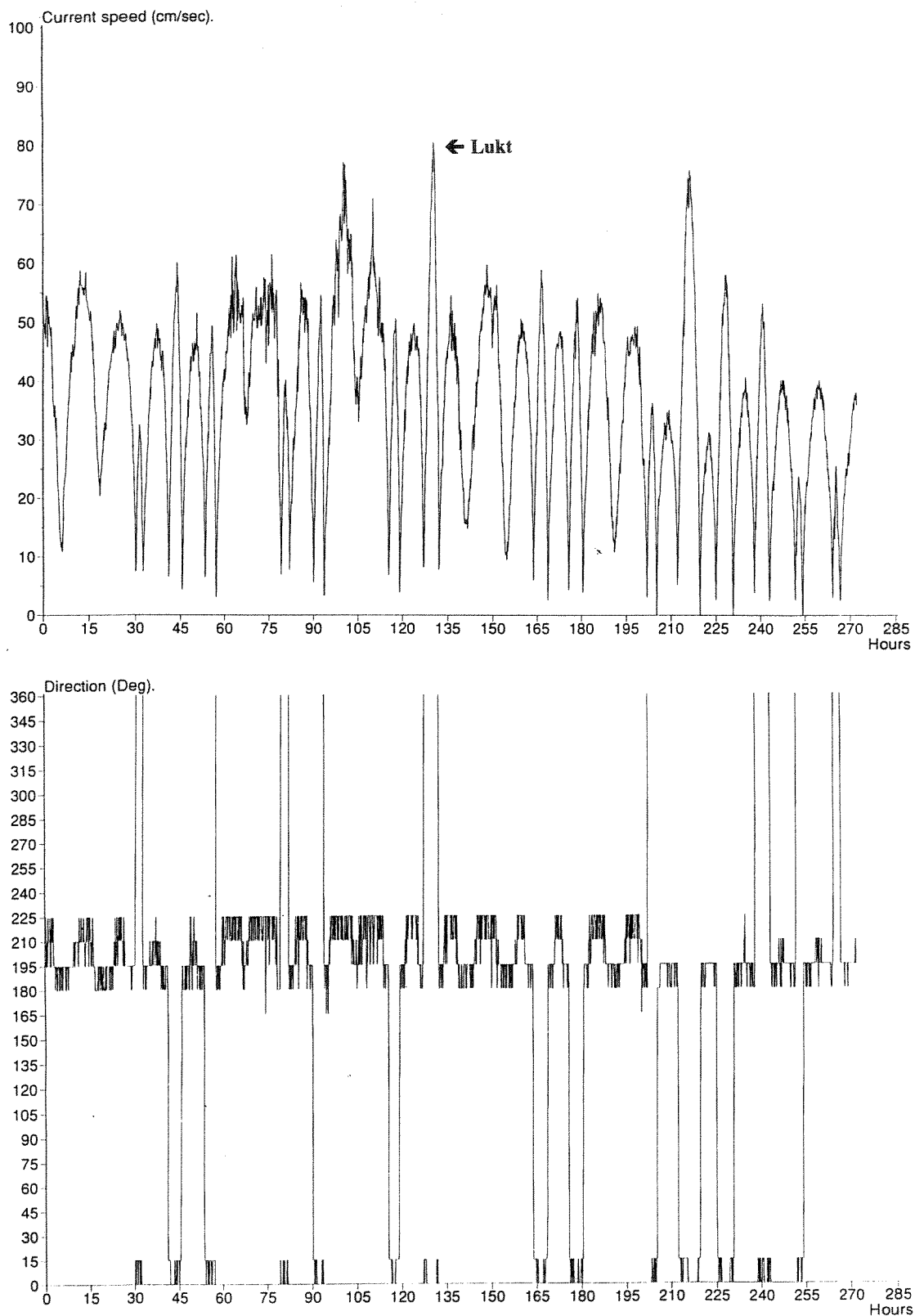
Fig. 3.3b viser en 2 ukers måleserie for strømstyrke og strømrretning i januar. Det framgår at strømmen i denne perioden vekslet inn-ut, men at utgående strøm (retning ca 180 grader) forekom hyppigst. Strømstyrken var oppe i over 80 cm/s i korte perioder. En av disse periodene (20. januar) var assosiert med  $H_2S$  lukt ved kanalen.

## 3.5. Vannstandsmålinger

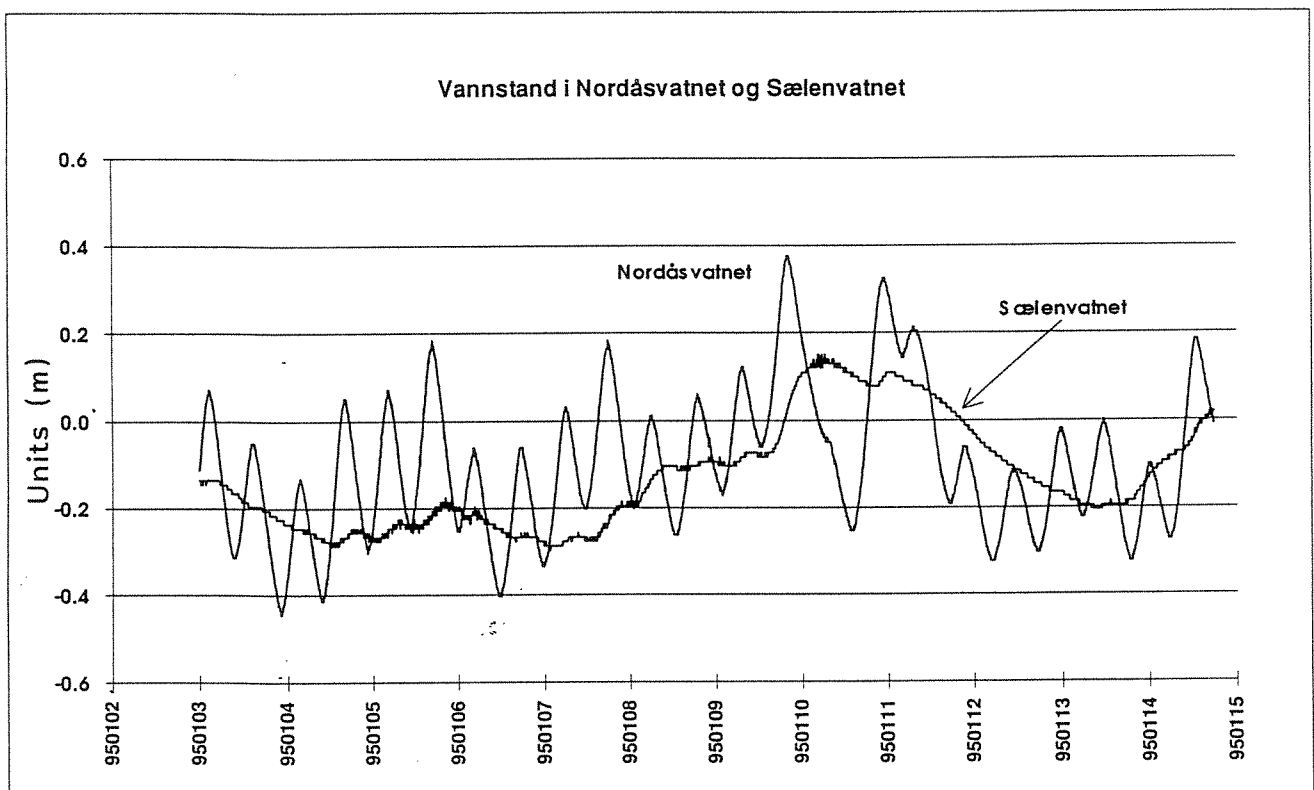
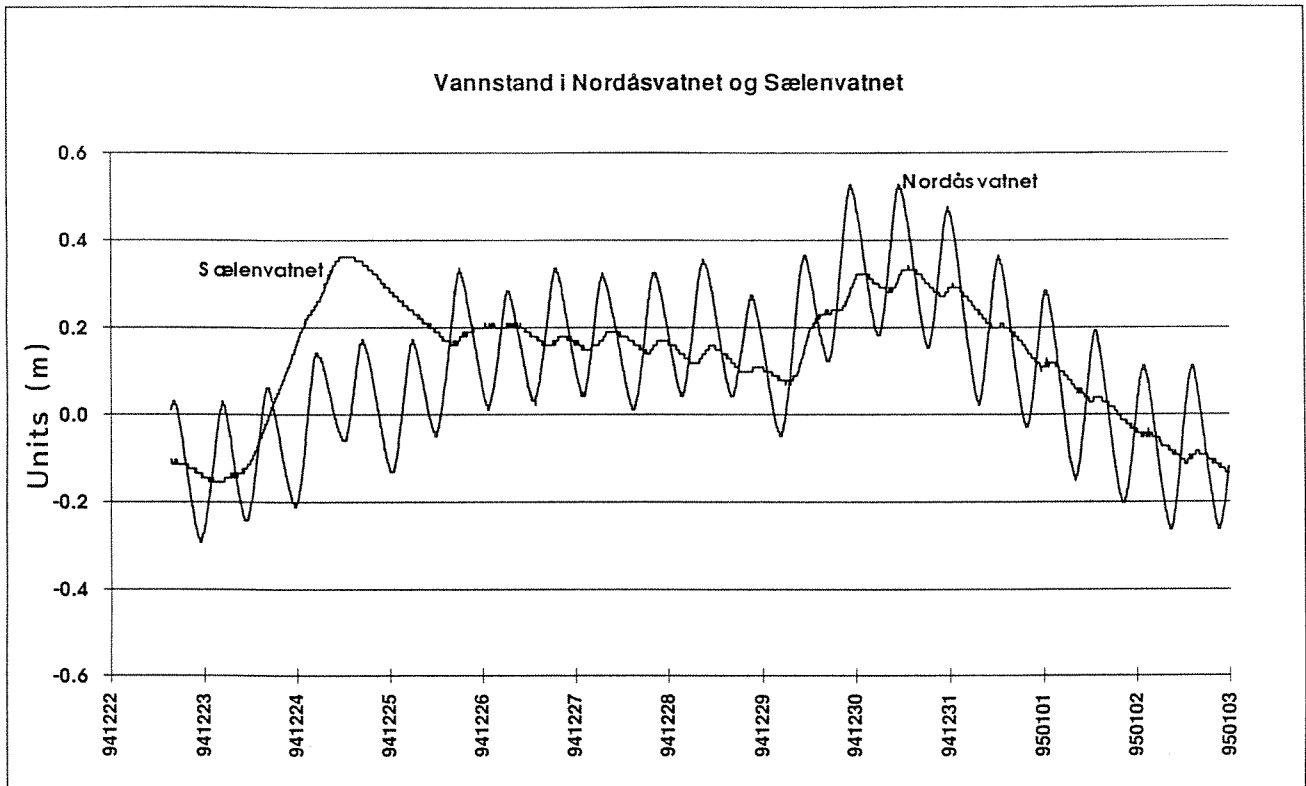
Vannstandsmålinger foregikk kontinuerlig inne i Sælenvatnet, samt ute i Nordåsvatnet, ca 500 m øst for Straume. Fig. 3.4 viser resultater (seriene midlet til felles null-nivå) for perioden 22. desember til 15. januar. Det normale halvdaglige tidevannet dominerer kurvene. Tidevannsforskjellen i Nordåsvannet var om lag 0,5 m i det aktuelle tidsrommet. Inne i Sælenvatnet var det langt mindre halvdaglige variasjoner; rundt 5-6 cm i snitt. Innimellom steg vannstanden i Sælenvatnet med flere desimeter, assosiert med nedbørsepisoder.



**Figur 3.3a.** Målt temperaturutvikling i inn/utstrømmende vann i kanalen i perioden 4. - 13. desember 1994 (øverst) og 13. - 18. desember 1994 (nederst). Varmtvannsepisoden i siste serien var assosiert med  $H_2S$  lukt.



**Figur 3.3b.** Målt strømfart (cm/s) og strømretning i kanalen i perioden 14. - 26. januar 1995. Den kortvarige perioden med ekstra kraftig strøm skjedde tilnærmet samtidig med  $H_2S$  lukt ved kanalen.



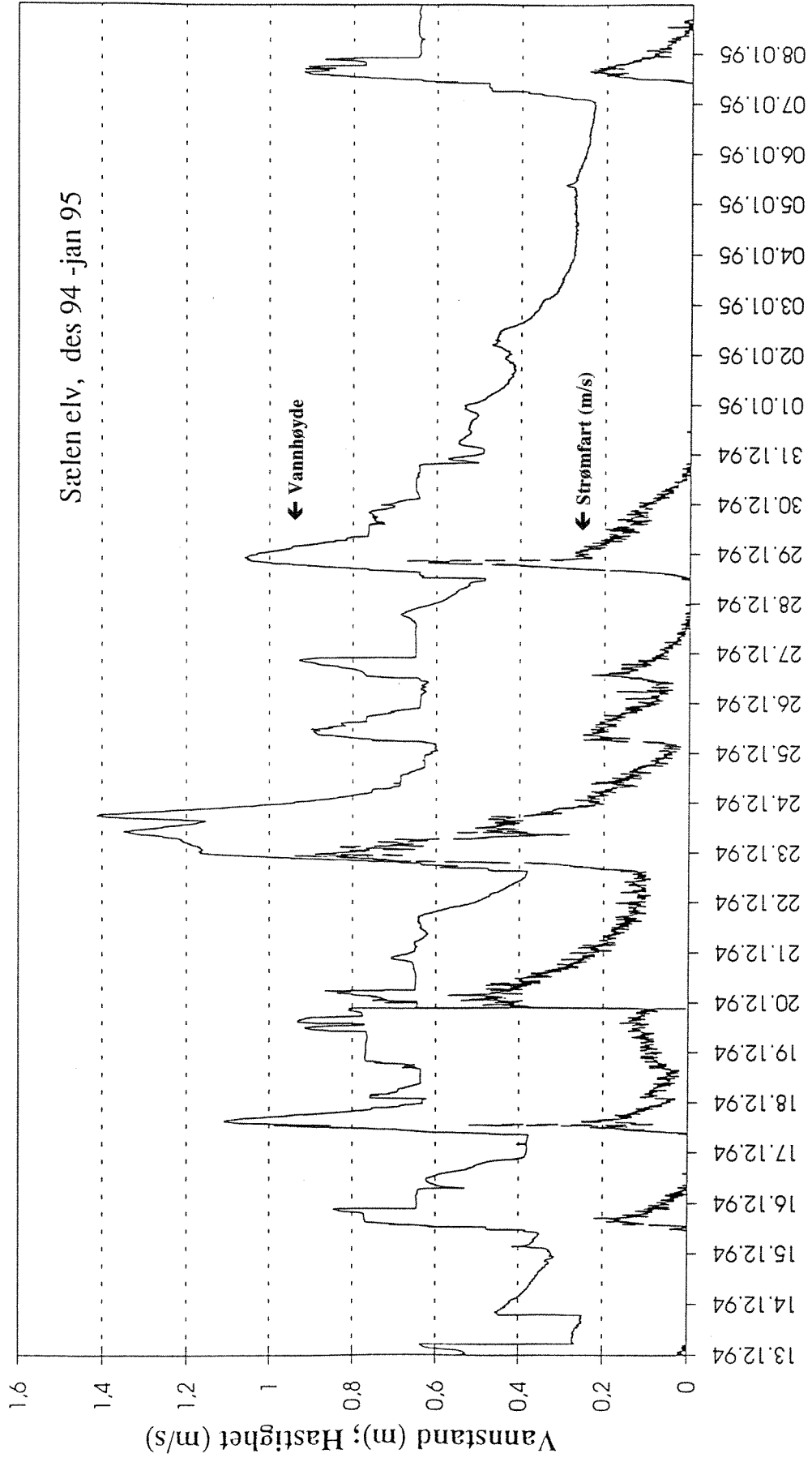
Figur 3.4. Tidsserier av målt vannstand (relativ) i Nordåsvatnet og Sælenvatnet i perioden 22. desember 1994 - 15. januar 1995.

### 3.6. Nedbør og vannføring

Nedbørsdata fra måleperioden blei framskaffet dels av kommunen (data fra Sandsli), og dels fra Vervarslinga på Vestlandet/DNMI (Bergen-Florida). Nedbørsmengdene var som normalt, eller litt over normalen for de aktuelle månedene. Siste uke i januar og første uke i februar hadde frost, med is på Sælenvatnet. Is var det også til andre tidspunkt, men da bare i korte perioder.

I Sælenelva målte vi vannføring (vannhøyde og strømfart) et par hundre meter opp fra munningen til Sælenvatnet. Målingene med 10 minutters måleintervall ga et relativt - ikke absolutt - bilde av ferskvannstilrenningen til Sælenvatnet, og hvor raskt elva vokser og faller ved nedbørsepisoder.

Fig. 3.5 syner et utsnitt av målingene, for perioden 13. desember til 8. januar. Strømfarten lå under deteksjonsgrensen (d.v.s. viser null) deler av perioden. Det framtrer flere kortvarige perioder (1-2 dager) med mye vannføring. Strømfarten har max verdi et par timer før vann-nivået når maksimum. Det kan merkes at episoden med H<sub>2</sub>S lukt 17. desember var assosiert med raskt voksende og relativt høy vannføring, assosiert med mye nedbør (27 mm fra kl 19 17/12 til kl 07 18/12). En slik rask "puls" fra elva kan ha forstyrret grensesjiktet og generert en indre bølge.



Figur 3.5. Målinger av vannføring i Sælenelva i perioden 13. desember 1994 - 8. januar 1995, representert ved vannhøyde og strømningsfart.



## 4. TEKNISKE BEREGNINGER OG VURDERINGER

### 4.1. Ferskvann til dypet

Når utslippsvannet fra Sælenelva (eller Gjeddevatn) strømmer ut av røråpningen, vil det stige noe i vannsøylen, inntil det finner et likevektsnivå med hensyn til egenvekt og oppdrift. I denne oppstigingsfasen (kalt **primærfortynningsfasen**) gjennomgår utslippsvannet en innblanding med omgivende vann, og kontrasten utviskes gradvis med økende tid/distanse.

Utslippsstrålens kinetiske energi gir utslippsvannet noe fart ut fra røråpningen, noe som bidrar til en viss horisontalspredning allerede i startfasen. Denne spredningen er imidlertid liten, i det vannet raskt bremses av turbulens/friksjon. I stedet overtar strømmen i resipienten kontrollen med den videre spredningsprosessen. Innstillingen til innlagersdypet (likevektsdypet) skjer relativt raskt, gjerne på mindre enn 1 minutt. Etter dette skjer den såkalte **sekundærfortynningen**, ved at utslippsvannet spres videre utover i resipienten.

#### Modell og databehov

Vi gir her en kort oversikt over beregningsverktøy og viktige fysiske faktorer i samband med beregningene. Videre spesifiseres viktige input-parametre til beregningene.

Ved hjelp av NIVAs numeriske modell JETMIX (Bjerkeng og Lesjø 1973) har vi beregnet hvordan utslippsstrålen vil oppføre seg. Som utgangspunkt har vi benyttet NIVAs hydrografiske målinger fra 1980-1981, samt noen tilleggsprofiler fra 1990 og 1991 - til sammen 27 profiler. Oversikt over profilnr og måletidspunkt er gitt i tabell 4.1.

Beregningsprogrammet JETMIX er basert på generelt akseptert teori for hvordan vann fra en punktkilde (evt. med diffusorer) oppfører seg i en sjiktet vannmasse i første fasen under primærfortynningen. For generell teori viser vi til tekstbøker innen hydrodynamikk, f.eks. Fischer et al. (1979), samt programdokumentasjonen utarbeidet av NIVA. Formelverket er kontrollert (kalibrert) mot en rekke felteksperimenter.

Viktige inputparametre til programmet JETMIX er stråledimensjon (diameter/geometri, fart), utslippsdyp, rørets vinkel, og densitet (egenvekt) til utslippsvannet. Som resultat gir programmet innlagersdyp og senterfortynning for vannet som slippes ut. I utkanten av strålen er fortynninga større enn i senter. For en statistisk *Gauss* fordeling for fortynninga er forholdet mellom middel og minste (senter) fortynning ca 1,75.

Utslippsstrålen vil gjerne først penetrere til et annet dyp enn det endelige innlagersdypet før den innstiller seg i nøytral likevekt i resipienten. Dette *ekstremdypet* blir også beregnet, med og uten blanding/friksjon.

Siden det dreier seg om ferskvann, vil utslippsvannet være lettere enn det omgivende sjøvann. En vil da kunne forvente at utslippsstrålen stiger oppover i sjøen før innlagring. Dersom sjøen er tilstrekkelig sjiktet i salinitet, kan det skje at utslippsvannet innlagrer seg i et dyp mellom inntak og utslipp. Dette vil avhenge av de aktuelle hydrografiske forhold.

Modellen JETMIX for primærfortynning antar en strømfri resipient. Strømskjær kan teoretisk sett stimulere blanding/fortynning i primærfortynningsfasen (mekanisk turbulens). I praksis vil dette si at den vertikale strålebanen blir noe forkortet (dypere innlagring). Våre beregninger er foretatt uten

strømskjær, og gir dermed et konservativt estimat for primærfortynning og innlagingsdyp. Usikkerheten antas å ligge innenfor 10% for disse størrelsene.

#### Fortynningsgrad nær utslippet

I modellberegningene blir fortynningen av utslippsvannet ved innlagring bestemt. Fortynningen  $S_0$  er der definert som sum av volum for utslippsvann og innblandet sjøvann dividert på utslippsvolumet, ved innlagring. Aktuelle verdier for  $S_0$  varierer avhengig av tid på året, innlagingsdyp, utslippsfluks m.m.

Et dykket utslipp i Sælenvatnet vil bli akselerert oppover med redusert gravitasjon  $g_0' = g \, d\sigma/\sigma$ .  $\sigma$  er densitet for utslippsvannet, og  $d\sigma$  er densitetsforskjell mellom sjøvann og utslippsvann.  $g_0'$  (startakselerasjonen) vil være max  $0,025 \text{ m/s}^2$ .  $g'$  vil vanligvis avta under oppstigningen. Om vi antar lineær reduksjon i  $g'$  ( $g' = g_0' - k(z-D)$ ), og  $g' = 0$  i innlagingsdypet  $D$ , vil oppstigningstiden fra f.eks. 15 m dyp til antatt innlagingsdyp rundt 5 meter være mindre enn 1 minutt.

### 4.1.2. Beregningsgrunnlag

#### 4.1.2.1. Resipienten

Som tidligere nevnt, foreligger det flere måleserier for salinitet og temperatur i ulike dyp i Sælenvatnet. Vi har benyttet Solheims data fra 1956-1957 som har i alt 16 profiler til ulike tidspunkt. Videre har vi supplert med nye målinger fra 1994 (Rådgivende Biologer A/S), samt med NIVAs egne målinger fra desember 1994 til januar 1995. Tabell 4.1 gir en oversikt over profilene. De nyere målingene inkluderer profiler i ulike deler av vatnet (jmfør med kap. 3).

**Tabell 4.1.** Oversikt over hydrografiske profiler som er benyttet i innlagingsberegningene.

Profil nr.	lok.	dato	ant. målinger
1	SEN	560208	14
2	SEN	560312	14
3	SEN	560424	14
4	SEN	560518	14
5	SEN	560621	14
6	SEN	560907	14
7	SEN	561026	14
8	SEN	561208	14
9	SEN	570123	14
10	SEN	570314	14
11	SEN	570424	14
12	SEN	570526	14
13	SEN	570617	14
14	SEN	570719	14
15	SEN	570913	15
16	SEN	571129	15
17	SEN	580224	14
18	INR	940107	22
19	YTR	940107	18
20	INR	940216	16
21	YTR	940216	18
22	INR	940829	16
23	YTR	940829	16
24	SEN	941212	38
25	NOR	950109	12
26	SOR	950109	27
27	SEN	950109	33

#### 4.1.2.2. Utslipppet

I prinsippet kan det tenkes mange utslippskonfigurasjoner. Variablene vil være utslippsdyp, rørdiameter, vannfluks, røråpningens vinkel og diffusor/ikke diffusor.

Vi har i denne omgang valgt å simulere 4 ulike utslippsdyp og tre ulike vannflukser for hvert dyp, som antydnet i tabell 4.2.

**Tabell 4.2.** Oversikt over inngangsdata til innlagringsberegningene

Utslippsdyp	5m, 10m, 15m, 20m
Vannfluks	50 l/s, 90l/s, 140 l/s
Rørdiameter	20 cm
Rørvinkel	0° (horisontalt)
Diffusor	Ingen

#### 4.1.3. Resultater

Tabellene 4.3, 4.4 og 4.5 viser noen resultater av innlagringsberegningene for h.h.v. lav fluks (50 l/s), middels fluks (90 l/s) og høy fluks (150 l/s). Alle disse fluksverdiene bør realistisk sett kunne hentes fra Sælenelva, med forbehold om særskilte tørkeperioder. I en middels situasjon vil det dreie seg om delflukser på ca 10-30% av vannføringen som evt. tas ut og ledes til dypet.

De resultatene som er angitt i tabellene, representerer minste dyp for utslippsvannet, som p.g.a. treghet vil stige noe over likevektsdypet før det synker litt ned igjen til sitt nøytrale innlagringsdyp. Resultatene viser at det alltid er en viss klaring til overflaten, men at det for alternativ med utslipp nær overflaten (5 m, 10 m dyp) kan være tale om små marginer og risiko for lukt ved enkelte tidspunkt, spesielt ved lav vannfluks.

De aktuelle profilene som ga grunnest innlagring (profil nr. 18-22), var alle målt vinteren 1994 (tabell 4.1). Som tidligere nevnt, var det denne vinteren uvanlige hydrografiske forhold og vedvarende lukt. En tilsvarende hydrografisk tilstand kan oppstå igjen, med tilsvarende betingelser for grunn innlagring. Med forutgående verksetting av tiltak som gradvis reduserer hydrogensulfidkonsentrasjonen, kombinert med den forutsatte reguleringen av utslippsfluksen (jmfør med avsnitt 1.6.1), vil en unngå luktepisoder.

Selve innlagringsdypet vil ligge dypere enn minimumsdypene (MIN) som er angitt i tabellene 4.3-4.5. Beregningene viser at dette dypet blir ca 1 m dypere enn minimumsdypene for utslippet i 5 m, og 1,5 - 3 m dypere for de dypere utslippsalternativene.

Fortynningsgraden i senter av "utslippsplumen" ved innlagring er også beregnet. Denne tilsvarende forholdet mellom innblandet resipientvann (saltvann) og ferskvann fra utslippet. Dypest utslipp gir størst fortynning. Høy ferskvannfluks (150 l/s) gir 10-40% høyere fortynning enn lite (50 l/s) utslipp. For 90 l/s utslipp er middelverdiene for fortynning 10x for 5 m utslipp, 16x for 10 m utslipp, 23x for 15 m utslipp og 32x for 20 m utslipp. For minste og største vannfluks er det tale om 10-20% lavere, h.h.v. høyere fortynninger ved innlagring.

Den betydelige medrivningen vil medføre en vesentlig sirkulasjon i vannsøylen. Eksempelvis vil 90 l/s og 15 m utslipp som gir 23x fortynning (voluminnblanding) representere en sirkulasjon på ca 2 m<sup>3</sup>/s, tilsvarende 180.000 m<sup>3</sup>/døgn. Dette utgjør anslagsvis 10% av alt vann dypere enn 10 m i Sælenvatnet

(tabell 2.1). Selv om det vil være tale om en vesentlig grad av resirkulering, vil en raskt oppnå en forbedring av vannkvaliteten i dypere sikt.

**Tabell 4.3.** Øvre (grunneste) nivå for påvirkning av oppstigende vann, 50 l/s fluks, for ulike utslippsdyp.

Utslippsdyp	Dyp for øverste del av plumen (m)		
	MIN	MIDDEL	MAX
5 m	0,30	1,83	2,90
10 m	0,30	3,22	6,40
15 m	0,50	4,42	7,90
20 m	0,60	5,60	10,10

**Tabell 4.4.** Øvre (grunneste) nivå for påvirkning av oppstigende vann, 90 l/s fluks, for ulike utslippsdyp.

Utslippsdyp	Dyp for øverste del av plumen (m)		
	MIN	MIDDEL	MAX
5 m	0,30	2,10	3,40
10 m	0,30	3,72	7,20
15 m	0,40	4,50	8,20
20 m	0,40	5,62	12,80

**Tabell 4.5.** Øvre (grunneste) nivå for påvirkning av oppstigende vann, 150 l/s fluks, for ulike utslippsdyp.

Utslippsdyp	Dyp for øverste del av plumen (m)		
	MIN	MIDDEL	MAX
5 m	0,40	2,33	3,70
10 m	0,40	4,11	7,70
15 m	0,40	4,73	8,60
20 m	0,40	5,90	14,40

## 4.2. Nedpumping av brakkvann/ferskvann

### 4.2.1. Nedpumping av overflatevann

Overflatevannet i Sælenvatnet har tilnærma samme karakteristikk som ellevann. Saliniteten er litt høyere, avhengig av avstand til kanalen og tidspunkt. Resultatene fra de foregående innlagringsberegningene kan derfor i store trekk også benyttes ved evaluering av nedpumping. Noe høyere salinitet (og dermed densitet) i inntaksvannet vil bidra til litt dypere innlagring. Marginene i forhold til påvirkning i overflaten er dermed større enn ved bruk av ellevann.

Nedpumping kan skje ved å plassere en konvensjonell pumpe på en flåte, med vanninntak i overflaten, og utslipp via slange/rør i dypvannet. En kombinasjon av flere flåter/pumper kan også tenkes. Ved å pumpe vannmengder av samme størrelsesorden som for neddykket utslipp, vil overflatekarakteristikken ikke påvirkes i større grad. Det vil være mulig å styre pumpingen (rate, dyp) etter forholdene, evt. med opphold i risikoperioder med tynt overflatelag/svak sjiktning.

Som nevnt i kapittel 1, er det også mulig å utnytte forskjeller i temperatur og salinitet mellom øvre lag og dypvann til å generere strømminger i rør. I Sælenvatnet ville dette prinsippet kunne nyttes til å hente vann fra ca 2 meters dyp (øvre del av pyknoklinen), avkjøle dette mot luft eller overflatevann og så la det synke til et dypere sjikt som tilsvarer den nye densiteten.

Sjikttingsforholdene om vinteren (da denne metoden er mest aktuell p.g.a. avkjølingsbehovet) er for det meste preget av en kontinuerlig økning av salinitet og temperatur fra overflaten til 7-8 m dyp. Brå, trappetrinnsformede overganger (gradienter) kan nok forekomme i rolige perioder, men NIVAs målinger har i alle fall ikke avdekket slik struktur.

Ved videre beregninger er det derfor aktuelt å ta utgangspunkt i gradient-størrelser, i stedet for reine enkle differanser mellom to lag. Vertikal-fordelingen av temperatur og salinitet kan beskrives ved

$$\begin{aligned} T(z) &= T_0 + a(z - z_0) \\ S(z) &= S_0 + b(z - z_0), \end{aligned}$$

der  $a$  og  $b$  er vertikal-gradienter for temperatur og salinitet h.h.v i nivået  $z_0$ .

Den mest realistiske tekniske løsningen er "omvendt-U" fasong med forskjellig lengde på de vertikale rørene, h.h.v.  $h$  og  $H$  (konfigurasjon "c" i fig. 1.4). Aktuelle verdier for  $h$  og  $H$  er 2 m og 6-7 m for forholdene i Sælenvatnet. For gradientene  $a$  og  $b$  er realistiske verdier for vinterhalvåret  $1.5^\circ\text{C}/\text{m}$  og  $2$  (2,5) ppt/m. Optimale verdier for gitt sjiktning kan beregnes, men vi er her ute etter størrelsesordenen på den aktuelle fluksen som kan genereres.

Ved en realistisk dimensjon på flåten (f.eks.  $2 \times 5$  m horisontalflate) med kjøleribber på  $10 \text{ m}^2$  og en lengde på de vertikale rørene på 3 m (inntak) og 5-6 m ("nedløp") vil en kunne opprettholde en vannstrøm på av størrelsesorden  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$  (ca  $10.000 \text{ m}^3/\text{d}$ ) i vinterhalvåret. Et slikt tiltak vil bidra til å lufte sjikt i øvre del av pyknoklinen (ned til 5-6 m dyp). Den angitte fluksen vil kunne erstatte/fornye alt vann i 3-6 m dyp i løpet av 2-3 måneder.

### 4.3. Anvendelse av Aeratoren

Luftinnblanderer skal monteres på en plattform som plasseres på bunnen av vannet, og den står så høyt over bunnen at sedimentet ikke forstyrres under drift. Utskytningsstrålen kan varieres fra horisontal til oppoverskytende ( $0-30^\circ$ ) ved å regulere vinkelen mellom plattformen og røret. For at plattformen skal stå i riktig posisjon og skikkelig forankret på bunnen, er det nødvendig i følge Water Protector A/S at utplasseringen skjer ved hjelp av dykkere.

Aeratoren er svært kraftig og setter derfor store vannmasser i bevegelse. For å skjerme beboerne rundt Sælenvatnet mot lekkasje av hydrogensulfid fra vannmassene, har derfor Water Protector A/S anbefalt å tilsette jernklorid ( $\text{FeCl}_2$ ) den første tiden av utluftningen. Hensikten med tilsetning av jernklorid er at hydrogensulfid og jernklorid reagerer med hverandre og danner jernsulfid som er tungt løselig. Dette vil redusere hydrogensulfidkonsentrasjonen i vannet, og faren for lekkasje av hydrogensulfidgass til atmosfæren reduseres. Men selv med en slik behandling regner Water Protector A/S med fare for en viss lekkasje av hydrogensulfidgass til atmosfæren. Hvis lekkasjen til atmosfæren blir høyere enn det som må ansees som forsvarlig, kan behandlingen midlertidig stanses.

Strategien som Water Protector A/S har valgt, er å starte med Aeratoren plassert i horisontal stilling på ca. 5 meter og samtidig tilsette jernklorid ved minimal lufttilførsel. I følge Water Protector A/S skal dette føre til delvis omblanding av de øvre 10 meterne i Sælenvatnet i løpet av ca. 10 dager samtidig som

disse vannmassene blir tilført jernklorid. Innstillingen av Aeratoren vurderes underveis og styringen gjøres avhengig av resultatene fra vannkvalitetsovervåkingen.

#### **4.3.1. Tilsetning av oksydasjonsmiddel**

Tilsetning av et kjemisk oksydasjonsmiddel som jernklorid eller jernsulfat kan bidra til å fjerne  $H_2S$  både i vann og sedimenter. Slik tilsetning er som nevnt, aktuell i samband med bruk av Aeratoren, som et supplement i starten.

##### Tilsetning av jernsulfat

Vi kjenner ikke til vellykkede forsøk med tilsetning av jern(II)sulfat i stor skala. Metoden blei prøvd i Gøteborgsfjorden i 1970-åra, men positive resultater uteblei (D. Dyrssen, Chalmers/U. i Gøteborg, pers. medd.). Sulfatkrystallene reagerte raskt med det svovelholdige vannet og "falt som småstein" til bunns.

##### Tilsetning av jernklorid

Jernklorid er foreslått av Water Protector A/S tilsatt vannmassene i Sælenvatnet for å binde en del hydrogensulfid ( $H_2S$ ) og på den måten redusere stripping av denne giftige gassen til atmosfæren under kjøring av Aeratoren. Dette stoffet har vært brukt med hell i samband med andre typer restaureringsprosjekter (Anon. 1989). Tilsetning av jernklorid vil føre til utfelling av jernsulfid som er et tungt løselig salt. Reaksjonen mellom jernklorid og hydrogensulfid er pH-avhengig. Bunnvannet i Sælenvatnet har pH nokså konstant rundt 7, og dette er en gunstig pH for å få en effektiv felling.

Jernsulfid er et nærmest svart stoff, og pga. omrøringen som Aeratoren vil forårsake, vil sannsynligvis hele vatnet bli svart og nærmest ugjennomsiktig i behandlingsperioden. Det vil si at hvis en jernkloridbehandling igangsettes om sommeren, vil ingen primærproduksjon kunne foregå i behandlingsperioden p.g.a. lysmangel. Sannsynligvis vil også den autotrofe delen av bakteriefloraen bli skadelidende under en slik behandling. Hvordan dyreplankton og andre organismer vil reagere på jernsulfiden, vites ikke. Sælenvatnet er også et viktig næringsområde for dykkende ender om vinteren. Det vil si at hvis en slik behandling utføres om vinteren, vil området være lite egnet som beiteområde under og en tid etter behandlingen.

Jernsulfiden vil imidlertid før eller senere dels synke til bunns og dels fraktes ut i Nordåsvannet under utstrømming gjennom kanalen fra Sælenvatnet. Der er usikkert hvor lang tid vannet trenger før det igjen er akseptabelt for plankton og andre organismer som jernkloridbehandlingen påvirker. Det er også uklart hvilken effekt denne vannbehandlingen vil ha på bakteriefloraen i Sælenvatnet.

Et viktig punkt i forbindelse med jernkloridtilsetning er at jernsulfid som dannes som en reaksjon mellom jernklorid og hydrogensulfid, virker som en katalysator på reaksjonen mellom oksygen og hydrogensulfid. Men også høy konsentrasjon av frie to-verdige jernioner medfører økt oksydasjonshastighet (Millero 1991). Totalt vil altså jernklorid ha minst to positive effekter - for det første bindes hydrogensulfid ved selve tilsetningen og for det andre fører jernsulfiddannelsen til at tilgjengelig oksygen raskere reagerer med hydrogensulfiden. Resultatet er at lekkasjen av hydrogensulfid til luften reduseres ytterligere pga. av at oksygeneringen av vannet blir mer effektiv med jernkloridtilsetning.

#### 4.4. Anvendelse av Minox-duppen

I beskrivelsen av Minox-duppen er kapasiteten av denne i dagens versjon oppgitt til ca. ca 1 kg oksygen pr 2,5 kWh, eller ca 300 m<sup>3</sup> oksygenert vann pr time. Det siste tallet forutsetter at det er litt oksygen tilstede i vannet som tas inn i duppen. Den oppgitte totalkapasitet tilsvarer at 250 m<sup>3</sup>/time oksygenfritt inntaksvann blir tilført 10 mg/l oksygen. Dette oksygennivået kan være en rimelig målsetting for luftingen, og tilsvarer full oksygenmetning ved ca 15°C.

Det er imidlertid oppgitt at biologisk oksygenforbruk ikke er tatt i betraktning. Det samme gjelder kjemisk oksygenforbruk ved oksydasjon av hydrogensulfid og andre reduserende stoffer som ammonium. I Sælenvatnet er hensikten nettopp å oksydere slike komponenter, og i tillegg tilføre overflatevannet oksygen til et nivå som f.eks. 10 mg/l. Dette oksygenforbruket kan være langt større enn økningen fra 0 til 10 mg/l O<sub>2</sub> og avhenger sterkt av situasjonen i innsjøen og dypet hvor lufteren tar inn vann. Hvis f.eks. vannet som tas inn inneholder 10 mg/l H<sub>2</sub>S, vil dette alene teoretisk forbruke alt tilført oksygen. Imidlertid er bildet mer komplisert, fordi en del av hydrogensulfiden vil stripes til luftboblene og følge disse til overflaten. Gjenværende H<sub>2</sub>S i vannet vil over litt tid oksyderes til sulfat.

## 5. KONKLUSJONER OG ANBEFALING

### 5.1. Vurdering av Aerator fra Water Protector A/S

Sammen med tilbud fra Water Protector A/S til Bergen kommune er det sendt "Technical information report". Informasjon gitt i disse dokumentene har inngått i våre beregninger og ved vurderingen av Aerator-enheten.

#### 5.1.1. Aeratorens effektivitet

I beskrivelsen av Aeratoren oppgis det at denne kan levere ca. 13 kg oksygen pr. hestekrafttime. Dette tilsvarer ca 17,4 kg O<sub>2</sub>/kWh. Det er videre oppgitt at enheten kan innta og fordele kjemikalier i pulverform i vannmassene, med kapasitet ca. 50 kg pr. minutt. Det vil si at ett tonn jernklorid kan suges ned og "skytes" ut i vannmassene i løpet av 20 minutter.

#### 5.1.2. Vurderinger av tilbudet fra Water Protector A/S

NIVA ba i januar 1995 Water Protector A/S om å få presisere noen momenter i tilbudet. Før denne presiseringen kom, var det visse uklarheter spesielt med hensyn på de økonomiske garantier som var gitt til Bergen kommune. Spørsmålet om hvem som skulle være ansvarlige og utførende entreprenører ble ansett som et meget vesentlig punkt å få klarlagt.

Water Protector A/S skal stå som ansvarlig og utførende entreprenører under restaureringen (Vedlegg 3). Firmaet vil dermed også påta seg det fulle ansvar for gjennomføringen av prosjektet og det nødvendige overvåkningsprogram i garantiperioden uten økonomiske tilleggsytelser fra Bergen kommune.

Som vår kommentar til at Water Protector A/S skal være ansvarlig og utførende entreprenør med ansvar også for overvåkingen, bør Bergen kommune ved et eventuelt valg av konseptet til Water Protector A/S framforhandle hvilke elementer som skal inngå i overvåkningsprogrammet, og hvilket omfang dette bør ha. Kontrollmålinger bør tillegges en uavhengig faginstans.

Videre er det presisert at 60-dagers garantien ikke er avhengig av bruk av jernklorid i forbindelse med restaureringen av Sælenvatnet.

Tilbudet fra Water Protector A/S datert 24/1 1995 lyder på 958.100 kr i anskaffelseskostnader for Aeratoren, 130.400 kr i installasjonskostnader og 15.000 kr i drift i de første 60 døgn. Dette utgjør til sammen 1.103.500 kr. Utgifter til den nødvendige miljøovervåkingen (jæmfør garantien) er ikke angitt i tilbudet.

Tilbudet innebærer at Bergen kommune blir eier av Aerator-enheten som kommunen enten kan bruke i andre prosjekter, selge videre eller leie bort til andre problemeiere. Hvis bruken av Aerator-enheten i Sælenvatnet blir vellykket, ligger det et økonomisk potensiale for kommunen her.

#### 5.1.3. Vurdering av "Pengene tilbake"-garantien

Med bakgrunn i de presiseringer som framkom etterhvert, vil vi gi følgende vurdering av "pengene tilbake" garantien (Vedlegg 3) fra Water Protector:



- A. Presiseringen i garantien om at Aerator enheten og utstyret må være forskriftsmessig montert, riktig innstilt og plassert og benyttet etter brukerinstruks blir helt og holdent Water Protector A/S sitt ansvar så lenge de er ansvarlige og utførende entreprenører.
- B. Fordi Water Protector A/S skal være ansvarlige og utførende entreprenører, blir det også deres ansvar å sørge for at Sælenvatnet er fritt for hydrogensulfid ned til 10 meter innen 60 dager etter oppstart av restaureringen.
- C. Garantien er ikke gjort avhengig av at jernklorid benyttes.
- D. Garantien om at Sælenvatnet skal være fritt for hydrogensulfid ned til 10 meter etter 60 dager forutsetter i følge Vedlegg 3 kontinuerlig drift av Aeratoren. Passusen om at det forutsettes kontinuerlig drift må forstås slik at hvis Aeratoren av en eller annen grunn slik som for eksempel for stor lekkasje av hydrogensulfid eller ugunstige værforhold ikke kan kjøres kontinuerlig, så gjelder ikke garantien lenger. Det er nærliggende å anta at en eller annen form for avbrudd vil kunne skje i løpet av de 60 døgnene. Det er derfor klart at for å kunne gardere seg økonomisk, må kommunen sørge for å få en ny og utvetydig presisering på dette punktet.

#### Noen antatte fordeler og ulemper med bruk av Aerator (eller luftinnblander)

FORDELER	ULEMPER
Kraftig	Så kraftig at lekkasjen til atmosfæren kan bli uakseptabel høy
Kan styres til intervallkjøring	Høy pris
Lavt effektbehov i forhold til ytelse	Ingen foreliggende dokumentasjon på at bruk av Aerator kan løse H <sub>2</sub> S-problemer i områder tilsvarende Sælenvatnet
Aeratoren kan selges videre eller leies ut	Stor tilførsel av næringssalter fra bunnvannet, dvs. fare for økt algevekst
Økt tykkelse av oksygenert og produktivt vannlag (ikke H <sub>2</sub> S-lekkasje, økt produktivitet)	Økt tykkelse av oksygenert og produktivt vannlag (økt produktivitet medfører økt sedimentasjon)

## 5.2. Vurdering av dykket ferskvannsutslipp

### 5.2.1. Elvevann

Dykkede utslipp av ferskvann har vært prøvd flere steder tidligere, og resultatene synes være overveiende positive (se avsnitt 1.6.1). Med en moderat dosering kombinert med overvåking av tilstand og endringer i vatnet vil en kunne styre og evt stoppe utslippet i kritiske perioder med lite nedbør.

Dersom en skal nytte Sælenelva og trykk fra fallhøyde aleine, må inntaket legges 3-400 m opp i elva. Eksakt lengde må beregnes. Alternativet er å benytte en pumpe som tar inn vann nær elveutløpet. Da sparer en utgifter til slange/rør oppover i elva. Men på den andre side er en da bundet opp med permanente driftsutgifter.

Utslippet må føres ut til tilstrekkelig dyp (15-20 m). Trykkanomalien som oppstår p.g.a. tetthetsforskjellen, vil medføre en effektiv radiell spredning av det innlagrede vannet. Et grunnere utslipp på 10-15 m dyp med lav fluks vil bidra til å senke sulfidgrensen med 2-4 meter i forhold til i dag.

Ved å ta ut moderate mengder (10-30% av Sælenelvas vannføring) og stenge av utslippet i tørkeperioder, vil det fortsatt være tilstrekkelig ferskvannstilførsel til overflaten til å opprettholde en øvre pyknoklin, tilnærmet som i dag. I perioder med normal vannfluks vil det øvre brakkvannslaget svekkes noe, men det vil etableres en sekundær pyknoklin noe lenger ned, avhengig av utslippsdyp.

Om en velger inntak oppe i Sælenelva, må dette ettersees og evt. reingjøres for kvister m.m. med mellomrom. Erfaringer fra andre steder tilsier at slikt tilsyn er nødvendig. Inntaket kan inkludere en reguleringsmekanisme som hindrer utslipp gjennom røret når vannføringen i elva er liten.

Om en tar vann fra **Gjeddevatn**, må pumpe benyttes uansett. Utslippet vil da lettest kunne legges ut fra vestre del av vatnet. Ulempen med denne løsningen er relativt omfattende etableringskostnader (grøfter m.m.) og permanente driftsutgifter med pumping. I forhold til å benytte vann fra Sælenelva framstår dette alternativet som mindre realistisk.

### 5.2.2. Overflatevann

Direkte nedpumping av overflatevann vil være gjennomførbart praktisk sett, og effekten på resipienten vil bli tilnærmet som ved neddykket ferskvann ved sammenliknbare flukser. Det må legges en el-kabel ut til flåten, og den må ha et visst tilsyn (månedlig?). Alternativet med diffusjonspumpen krever bygging av prototyp og uttesting for å finne eksakte dimensjoneringskriterier.

#### Kostnader

Vi har innhentet kostnadsoverslag fra et rådgivende ingeniørfirma som oppgir følgende for ulike alternativer:

Alternativ	Etableringskostnad	Driftskostnad pr år
Ledning fra 400 m opp i Sælenelva	500.000 kr	-
Ledning fra Gjeddevatn, inkl. grøfter, 30 kW pumpe	800.000 kr	85.000 kr
Nedpumping av overflatevann, med 15 kW pumpe	100.000 kr	55.000 kr

Driftskostnadene vil for alle tre alternativene måtte påplusses kommunens utgifter til ettersyn. Dette antar vi vil dreie seg om en inspeksjon pr. måned.

Nedpumping fra flåte framstår her som det rimeligste på kort sikt, mens inntak i Sælenelva uten bruk av pumpe er rimeligst på lang sikt. For diffusjonspumpen må det framskaffes midler til bygging (størrelsesorden 100.000 kr) og uttesting (størrelsesorden 50-100.000 kr). Fordelen er små driftskostnader i lengden (kun sporadisk ettersyn).

### 5.3. Vurdering av Minox-duppen

Det er vanskelig å forutsi effekten av Minox-duppen med tanke på reduksjon av H<sub>2</sub>S-mengde. Som et rimelig anslag for produsert vann av ønsket kvalitet (dvs. fritt for H<sub>2</sub>S og med gjenværende 10 mg oksygen pr liter) har vi anslått 100 m<sup>3</sup> pr time. Dette forutsetter at vanninntaket ligger like over

grensesjiktet mellom oksisk og anoksisk vann (interfasen) og justeres underveis for å følge variasjoner i dette.

Volumet av de øverste 5 m i Sælenvatnet er ca 2,4 mill. m<sup>3</sup> (tabell 2.1). Med en ideell spredning av vannet fra én Minox-dupp i dette sjiktet vil det teoretisk ta ca. 3 år å luften dette. Dersom gjennomsnittsinhold av H<sub>2</sub>S er høyere enn 10 mg/l, vil dette redusere effekten ytterligere, og det er ikke tatt hensyn til andre reduserende stoffer eller til H<sub>2</sub>S som blir produsert i perioden. Dette oppveies delvis av at de øvre 3 m i dag inneholder rundt 10 mg/l O<sub>2</sub>, og dette er heller ikke tatt hensyn til. Anslaget presentert her, har mange usikkerheter, men det synes klart at 1 enhet av Minox-duppen vil ha svært begrenset effekt på H<sub>2</sub>S-situasjonen i Sælenvatnet i løpet av utviklingsperioden.

Dersom man antar at optimalisering av Minox-duppen lykkes, vil kapasiteten ligge på ca 700 m<sup>3</sup> luftet vann pr. time for en 5 kW enhet. Ifølge Mastrans A/S (muntlig meddelelse) er det sannsynlig at en vil satse på å bygge enheter på 10 kW. En slik enhet vil da ha en effekt på bortimot 1400 m<sup>3</sup> luftet vann pr. time. Med de samme forutsetninger som brukt ovenfor, vil en slik enhet teoretisk kunne luften de øverste 5 m på omtrent 8 mnd. Dersom ambisjonene for lufting er å gjøre de øverste 7 m frie for H<sub>2</sub>S, øker behandlingstiden til minst 10 mnd. Dette er en teoretisk størrelse, og man kan ikke vente ideell spredning av det behandlede vannet. I praksis betyr dette at man må sette flere slike enheter i drift i Sælenvatnet når man går i gang med luftetiltak etter endt utviklingsperiode. For å nærme seg målsettingen i løpet av f. eks. 6 mnd, er det trolig nødvendig med minst 3 optimaliserte Minox-dupper på 10 kW hver.

### **5.3.1. Kostnader som vedrører Minox-duppen**

#### Utviklingsprosjektet

Utgiftene som må dekkes av Bergen kommune i utviklingsperioden, er gitt i tilbudet fra Mastrans A/S. I tillegg kommer installasjonsutgifter for framlegging av elektrisk kabel og tilsyn av utstyret. Videre må det beregnes utgifter til oppfølgende analyser dersom man skal se nærmere på effekten av utstyret i Sælenvatnet, slik det er lagt opp til i prosjektforslaget.

Det er uklart hva som skal omfattes av måleprogrammet, og dette er helt opp til Bergen kommune å bestemme. I tabell 5.1 er det satt opp kostnader på 10.000 kr for hver av fasene. Dette er en grov kalkyle basert på kostnader for innsamling og analyse av én måleserie for oksygen og hydrogensulfid i forskjellige avstander og dyp fra Minox-duppen.

**Tabell 5.1.** Anslag for kostnader som må dekkes av Bergen kommune ved gjennomføring av utviklingsprosjekt med Minox-duppen. I tabellen forutsettes en FoU-bevilgning på 100.000 kr. Dersom denne ikke innvilges, må Bergen kommune dekke også dette beløpet.

	Kostnad, kr	Sum pr fase, kr	Total kostnad, kr
<b>Fase 1</b>			
Minox-dupp	125.000		
Installasjon	50.000		
Tilsyn	15.000		
Overvåking	10.000		
Strøm	4.000	204.000	
<b>Fase 2</b>			
Minox-dupp	100.000		
Installasjon	20.000		
Tilsyn	30.000		
Overvåking	10.000		
Strøm	8.000	168.000	<b>372.000</b>

Mastrans A/S eget bidrag for Fase 1 er ikke stipulert i tilbudet. For fase 2 er den oppgitt til 100.000 kr. Etter utviklingsperioden forblir Minox-duppen Mastrans' eiendom.

#### Oppskalert prosjekt

Utviklingsprosjektet vil ikke kunne føre til en effektiv lufting i Sælenvatnet, og det må derfor være forutsatt at utviklingsarbeidet følges opp med en oppskalert utlufting dersom det oppnås tilfredsstillende resultater av optimaliseringen.

Kostnadene ved et slikt prosjekt er ikke spesifisert hverken i tilbud eller saksutredning. På forespørsel fra NIVA antyder Norolf Henriksen, Mastrans A/S en salgspris for én optimalisert Minox-dupp med en effekt på 10 kW til å ligge rundt 250.000 kr. Siden Mastrans A/S står for produktutvikling (ikke markedsføring og salg) er dette beløpet usikkert. Vi finner det likevel nødvendig å antyde hvilken størrelseorden kostnadene for en utlufting vil ligge på dersom dette alternativet velges, og har derfor satt opp et overslag (Tabell 5.2) basert på innkjøp av tre oppgraderte Minox-dupper. Disse forutsettes brukt gjennom en periode på 6 mnd. Det er uklart om Bergen kommune gjennom utviklingsprosjektet opparbeider seg noen rettigheter eller rabatter ved bruk av Minox-duppen.

**Tabell 5.2.** Anslag for kostnader ved lufting i Sælenvatnet med 3 optimaliserte Minox-dupper over en 6 mnd periode.

	Kostnad, kr
3 Minox-dupper	750.000
Installasjon	80.000
Tilsyn	80.000
Strøm	50.000
Overvåking	80.000
<b>Sum</b>	<b>1.040.000</b>

I dette anslaget er utgifter til drift og overvåking satt skjønnsmessig.

#### Tidsperspektiv

Utviklingsprosjektet, som skissert i tilbudet, vil ta omtrent 12 måneder. Dersom man skal fortsette med lufting etter dette, må de optimaliserte duppene produseres, og deretter kan man starte selve utluftingen i Sælenvatnet. Dette betyr at det vil gå minst 18-20 mnd fra beslutning fattes til luftingen er utført.

Imidlertid er varigheten av utviklingsprosjektet lagt opp slik at Bergen kommune skal få tid til å gjennomføre et overvåkingsprogram i begge fasene. For den tekniske utvikling kan utviklingstiden kortes ned til ca 7 mnd (Norolf Henriksen, Mastrans A/S, på telefonisk henvendelse fra NIVA). Dette betyr at den totale behandlingstiden kan kortes ned til 14-15 mnd.

## 5.4. Samla vurdering

De skisserte løsningene har flere felles likhetstrekk. Vann med en viss hastighet ledes ut i et gitt dyp, enten horisontalt eller vertikalt. Minox-duppen og Aeratoren henter vann i resipienten, og tilfører dette luft/oksygen før det pumpes ut. Den skisserte løsningen for Aeratoren innebærer at vann pumpes ut i samme dyp som det tas inn (vinkel på strålen kan evt. justeres), mens Minox-duppen kan ha forskjellig inntaks- og utløpsdyp.

### 5.4.1. Effektilførsel

Flere av løsningene har en viss hastighet ut av rørendene/dysene slik at det genereres turbulens fra den kinetiske energien. Den kinetiske energien  $P_{KE}$  ved pumperaten  $R$  kan uttrykkes som

$P_{KE}(W) = 8 \rho R^3 / \pi^2 D^4$ , med  $\rho$  som vannets densitet og  $D$  lik rørdiameter.

Med en pumpe rate på 100 l/s og diameter lik 20 cm tilsvarer dette en effekt på ca 500 W som direkte tilføres til turbulens og blanding. Tallet kan relateres til regneeksempelet for krav til destabilisering av vannsøylen i avsnitt 2.2.2 (1,5 kJ/m<sup>2</sup>). Om en regner med hele overflatearealet på 0,6 km<sup>2</sup>, tilsvarer dette en tidsskala på ca 20 døgn før destabilisering skjer. I løpet av denne tiden er overflatelaget i Sælenvatnet utskifta minst en gang slik at destabilisering ved turbulent energitilførsel av nevnte størrelse ikke kan skje i praksis. Dette er betryggende i og med at en total omskifting av vannsøylen (med tilhørende lukt) ikke vil kunne skje ved den nevnte energitilførselen.

500 W turbulent energitilførsel er sannsynligvis et for høyt tall for Minox-duppen, der vann tilsynelatende ledes ut diffust under flåten. Sannsynligvis vil en kunne modifisere metoden (fokusere utløpet i ett punkt) slik at turbulensen økes, hvis dette er ønskelig. Dykket ferskvannsutslipp vil representere turbulent energitilførsel av nevnte størrelsesorden (her vil densitetsforskjellen (oppdriften) medføre ekstra blanding p.g.a. den potensielle energien). Aeratoren har en kraftigere stråle med mye luft i og dermed et høyere turbulensnivå. Ved å rette energien mot øvre del av vannsøylen, vil en uansett unngå total destabilisering.

### 5.4.2. Effektförbruk

Både Minox-duppen og Aeratoren krever elektrisk energi til pumpene. Dette vil også være tilfelle for løsningen med direkte nedpumping av overflatevann og også for nedføring av vann fra Gjeddevatn. Effektbehovet øker i forhold til det dyp det pumpes på.

Minox-duppen er oppgitt å ha et effektförbruk på 5-10 kW v/300 m<sup>3</sup>/time. Pumperaten tilsvarer om lag 90 l/s som var mellomste vannfluksverdi for beregningene omkring neddykka utslipp. Den kinetiske

energien tilsvarer 5-10% (muligens noe konservativt regnet) av den tilførte el-effekten i følge tallene ovenfor.

En del data om Aeratorens effektforbruk og pumperate kan ekstraheres fra den tilsendte informasjonen fra Water Protector A/S. Fra en test av modell W-1C-4 (4" diam.) i USA i 1977 refereres det til et effektforbruk på 13.41 Hk, tilsvarende ca 10 kW. For en 6" diameter enhet, som er tilbudt Bergen Kommune, antas effektforbruket å ligge høyere (15-30 kW?).

En test av en 6" enhet viser verdier opp til 1.300 GPM fluks (tilsv. 80 l/s). Fra en annen test av to stk 4" pluss en 6" enheter refereres det til en total vannfluks på 3.010 kubikkfot/time, tilsvarende ca 23 l/s. Av dette siste tallet kan 6" enheten antas å bidra med halvparten. Det er ikke oppgitt noen vannfluks i tilbudet fra Water Protector A/S. Ut fra de ovenstående tallene kan den antas å ligge et sted mellom 15 og 80 l/s, m.a.o. noe mindre vannfluks, men mye mer luftinnblanding enn for Minox-duppen.

Fra det ovenstående kan det slutes at Minox-duppen og Aeratoren har tilnærmet samme el-behov pr enhet, ut fra de opplysningene vi sitter inne med. For nedpumping av overflatevann antas effektforbruket å ligge på 10-15 kW ved en pumperate på 100 l/s, m.a.o. sammenlignbart med de forannevnte metodene, men mindre enn behovet ved pumping fra Gjeddevatn (avsnitt 5.2.2). For løsningen med elvevann kan energi tas fra fallhøyden, slik at pumper ikke behøves. Også diffusjonspumpen vil fungere uten el-forbruk.

#### 5.4.3. Oksygentilførsel

Aeratoren har i følge opplysningene en langt større teoretisk oksygeneringskapasitet enn Minox-duppen. Minox-duppen vil levere 2-3 kg O<sub>2</sub> pr time. Aeratoren leverer 17,4 kg O<sub>2</sub> pr kWh (antas ved atmosfæretrykk). Med 10 kW blir dette hele 174 kg O<sub>2</sub> pr time. Tallene dreier seg om mengde oksygen i medrevet luft (21% av denne), ikke absorbert oksygen.

I realiteten er nok forskjellen ikke så stor som tallene indikerer. Bare en liten del av innsugingslufta i Aeratoren kan absorberes umiddelbart. Dersom all tilført oksygen blir absorbert i vannet av størrelsesorden 50 l/s som pumpes igjennom, vil en få en konsentrasjon på hele 1.000 mg/l O<sub>2</sub> i dette vannet - noe som er høyst urealistisk.

Det tar tid for oksygen å diffundere fra boblefasen over i vannfasen. Luftboblene forblir i suspensjon i lengre tid, inntil de løses opp eller når overflaten. Det er også en risiko for at Aeratoren vil resirkulere sitt eget vann. Foran enheten vil utslippsvann og bobler hope seg opp. Undertrykk ved innsugningen vil dra vann fra foran utløpet bakover til innsugningen. Dette vil bidra til å redusere den effektive oksygentilførselen.

For et dykket utslipp av elvevann med 100% metning og middel vannfluks (90 l/s) vil oksygentilførselen være av størrelsesorden 4 kg/time. M.a.o. av samme størrelsesorden som for Minox-duppen, men mindre enn for Aeratoren. Men her må bemerkes at for et dykket utslipp dreier all tilførsel seg om oppløst oksygen - ikke bobler.

Ved nedpumping av overflatevann (og også ved benyttelse av diffusjonspumpen) vil oksygentilførselen til det aktuelle dybdesjiktet være av samme størrelsesorden som for elvevannet, muligens noe mindre i perioder da dypvann påvirker og reduserer oksygenkonsentrasjonen i det øverste sjiktet.

#### 5.4.4. Effekt på oksygen og sulfidfordelingen

##### Minox-duppen

Vi har allerede (i avsnitt 4.4 og 5.4) påpekt at en Minox-dupp plassert i Sælenvatnet ikke vil ha nevneverdig positiv virkning på H<sub>2</sub>S fordelingen. Tids-skalaene som blei beregnet, dreier seg om ca 1 år eller lenger selv for å bringe det øverste 5 m tykke laget opp til akseptabelt oksygennivå. Dermed synes denne løsningen med en enhet å være uaktuell også som løsning på kort sikt.

Erfaringsmaterialet når det gjelder Minox-duppen er heller ikke entydig positivt. I en poll av Skjoldafjorden blei det ikke sporet effekt etter knapt ett års drift i 1992-93. Det må imidlertid bemerkes at Skjoldafjorden med sine 1.040 mill m<sup>3</sup> er langt større enn Sælenvatnet.

##### Aeratoren

For Aeratoren vil oksygentilførselen være større enn for en Minox-dupp. Vi tror imidlertid at den reelle tilførselen, d.v.s. bidrag til oppløst oksygen, er langt mindre enn det oppgitte 174 kg/time. Dette dels fordi det luftinnblandete vannet raskt stiger til overflaten og luftes. Selv om en regner konservativt, vil fortsatt den effektive tilførselen være større enn for de andre forslagene. Tidsskalaen for å fjerne H<sub>2</sub>S i det øverste 5 m laget vil være av størrelsesorden 1 måned slik at denne løsningen ut fra teoretisk effekt på oksygen/H<sub>2</sub>S kan betraktes som akseptabel også som løsning på kort sikt. Her må som tidligere nevnt, også andre faktorer vurderes slik som risiko for opptrenging av H<sub>2</sub>S til overflaten p.g.a. den kraftige lokale omrøringen og boble-meddriving.

Det skriftlige materialet vi har fått tilsendt for Aeratoren skriver seg stort sett fra tester i ferskvannsresipienter med moderat sjiktning og lave sulfidkonsentrasjoner i forhold til Sælenvatnet. At materialet kun skriver seg fra 1970-tallet kan virke påfallende, men behøver ikke telle negativt, i det publisering av nyere resultater kan ligge utenfor nyhetsinteressen.

##### Ferskvannstilførsel

Nedføring (pumping) av ferskvann/overflatevann vil tilføre allerede oppløst oksygen over et større dybdesjikt enn de andre forslagene, p.g.a. oppdriften i utslippsvannet. Medrevet resipientvann (med H<sub>2</sub>S) vil kontinuerlig løftes oppover i vannsøylen slik at nytt dypvann stadig må strømme inn mot utslippet.

Effektiviteten pr tilført volumenhet vil være høy p.g.a. fortynningen/innblandingen som skjer i oppstigingsfasen. Ved innlagring dreier det seg om fortynningsfaktorer på fra 10 til 30. Det vil si at for en volumfluks på 90 l/s er fluks av "behandlet" vann av størrelsesorden 10-30 ganger større.

#### 5.4.5. Effekt på sjiktning

Opprettholdelse av en viss sjiktning er en av målsetningene en har blitt enig om. Dette både for å opprettholde et isolerende lag og for at mikrobielle og lysavhengige prosesser med nedbryting av H<sub>2</sub>S kan fortsette. Alle de presenterte løsningene vil til en viss grad modifisere sjiktningen.

For Minox-duppen vil denne effekten være liten, i og med at (tyngre) vann som ledes ut nær overflaten vil synke ned i retning mot sitt inntaksnivå. En viss medrivning vil finne sted, slik at med inntak i nedre del av pyknoklinen vil dette bidra til å gjøre denne mindre skarp (strekker seg over større sjikt). Men etter det vi forstår, dreier det seg om liten utgangshastighet på det vannet som ledes ut, slik at blandingseffekten og effekten på sjiktningen blir liten (for en enhet).

Aeratoren vil også arbeide "lokalt" i vannsøylen. D.v.s. vann tas inn og ledes ut i samme dyp. Dersom den plasseres over pyknoklinen (f.eks. i 2 m dyp), vil effekten bli å løfte sprangsjiktet noe p.g.a.

turbulensen og evt. boblemedrivning. Dette kan bringe H<sub>2</sub>S grenseflaten nærmere overflaten. Men denne forutsettes å bli holdt i sjakk ved oksygentilførsler.

Nedpumping av overflatevann vil bidra til å redusere sjiktningen i perioder, samtidig som H<sub>2</sub>S konsentrasjonene i og under innlagingsdypet reduseres. *En slik løsning vil fortynne dypvannet og dermed gjøre at det hyppigere utskiftes av nytt og tyngre innstrømmende vann i kanalen.* Strømmålingene og vannstandsmålingene viste at innstrømming ved høyvann i Nordåsvannet bare i unntakstilfeller blokkeres av stor ferskvannsutstrømming. Slik utskifting av dypvann bidrar positivt til vannkvaliteten samtidig som sjiktningen re-etableres. Ved å velge løsninger med innlagring i f.eks. 3-5 m, vil det øverste laget med tilnærmet ferskvann opprettholdes.

Nedføring av elvevann følger de samme prinsipper som for nedpumping av overflatevann når det gjelder sjiktningforholdene. Ved moderat vannfluks der bare 10-20% av midlere ferskvannstilførsel fra Sælanelva benyttes (og nedføring opphører ved lav vannføring), vil overflatelaget fortsatt opprettholdes tilnærmet som i dag. Ved tilførsler fra andre kilder (Gjeddevatn) vil betingelsene for opprettholdelse av det øverste laget heller ikke bli endret.

Ferskvannstilførsel til dypet vil medføre gradvis lettere dypvann i stagnasjonsperiodene, noe som vil muliggjøre hyppigere dypvannsutskifting ved innstrømmende tungt vann.

Tilførsel av vann fra Gjeddevatn synes være den beste løsningen, faglig sett, siden dette ikke berører dagens tilførsel til Sælenvatnet i det hele tatt.

## **5.5. Kontroll og overvåking av tilstand**

Uansett metode(r) som velges, vil det kreves en viss kontroll med utviklingen, særlig i starten. For kommunen er dette spesielt viktig dersom Water Protectors løsning (Aeratoren) velges. Denne har sin "pengene tilbake" garanti knyttet til en konkret og målbar effekt. Det beste ville være å overvåke oksygennivået kontinuerlig i noen dyp. Her finnes det skisse til rimelige automatiserte løsninger (Bark m. fl. 1986). Men manuell prøvetaking bør uansett utføres innimellom, som kontroll.

Erfaringene fra målingene vinteren 1995 tilsier at kontinuerlig overvåking (med VHF/radio dataoverføring) med en T-S kjede er en metode som kan benyttes i framtidig overvåking. Først og fremst vil disse målingene gi grunnlag for å bedømme eventuelle endringer i sjiktning over tid.

Måleprogramet bør uansett være så omfattende at en er garantert å sikre seg et godt referansemateriale som kan nyttes ved andre tilsvarende vannforbedringstiltak.



## REFERANSER

Andreae, M. O. og W. A. Jaesche 1992: Exchange of sulphur between biosphere and atmosphere over temperate and tropical regions. I: Sulphur cycling on the continents, SCOPE rapport nr 48, John Wiley & Sons, Chichester.

Anon 1989: Innovative treatment rids lake of foul odor. Public Works, Vol. 120, No. 13, s. 62-63.

Bark, A.W., D. W. Cartwright, C.L. Lovatt og J.M. Watts 1986: A simple and inexpensive monitor for recording oxygen and temperature in lakes and reservoirs. Wat. Res. Vol. 20, No 8.

Berge, F., J. Molvær, G. Nilsen og A. Thendrup 1982: Fjordforbedring. Tiltak for å bedre oksygenforholdene i poller og terskelfjorder. Rapp. nr. 1406, NIVA, Oslo, 119 s.

Bjerkeng, B. og A. Lesjø 1973: Mixing of a jet into a stratified environment. Rapp. nr. O-126/2, NIVA-Oslo.

Bratbak, G. og T.F. Thingstad 1994: Fysisk-Kjemiske målinger i Sælenvatnet. En oppsummering av data fra undersøkelser utført ved Institutt for Mikrobiologi, UiB. Notat, UiB, 28/2 1994, ca 15s.

Børsheim, Y. 1978: Karbonsyklus og svovelsyklus i Sælenvatnet. Hovedoppgave, IMP, UiB.

Glenne, B. og T. Simensen 1963: Tidal current choking in the landlocked fjord of Nordåsvatnet. SARSIA 11: 43-73.

Golmen, L. G. og B. Cushman-Roisin 1992: A self-sustained pump across temperature-salinity gradients in coastal waters. Ocean Engineering, Vol. 19, s 57-74.

Golmen, L.G. 1995: Måling av hydrografi og vannutskifting i Sælenvatnet vinteren 1994/95. Datarapport, NIVA (in prep.).

Hobæk, A., E.A. Lindstøm og K.J. Aanes 1994: Overvåking av ferskvannsresipienter i Bergen kommune i 1993. Rapport nr. 3026, NIVA Oslo/Bergen.

Indrebø, G. 1976: Mikrobiell-økologiske undersøkelser i Sælenvatnet, et permanent lagdelt brakkevannsystem. Hovedoppgave, IMP, UiB.

James, A. M. og M. P. Lord 1992: Macmillan's Chemical and Physical Data. Macmillan Press LTD, London, 565 s.

Johannessen, P. 1985: Byfjordundersøkelsen. Overvåking av fjordene rundt Bergen 1984. Rapp. nr. 20/85, IFM, UiB, 73 s.

Krouse, H. R. og V. A. Grinenko 1991: Stable Isotopes: Natural and Anthropogenic Sulphur in the Environment. SCOPE rapport nr 43, John Wiley & Sons, New York.

Fischer, H. B., E. J. List, R. C. Y. Imberger og N. H. Brooks 1979: Mixing in inland and coastal waters. Academic Press Inc, San Diego, 483 s.

Millero, J.J., S. Hubinger, M. Fernandez og S. Garnett 1987: Oxidation of H<sub>2</sub>S in seawater as function of temperature, pH, and ionic strength. Environ. Sci. Technology, Vol. 21, s. 439-443.

NHL 1983: Vurdering av tekniske tiltak for å bedre vannkvaliteten i Horvereidvatnet og Rotvikvatnet. Rapp. nr.283129, SINTEF/NHL 1989.

NIVA 1995: Supplerende målinger i Sælenvatnet i Bergen vinteren 1994-1995. Datarapport, in prep.

Molvær, J., F. S. Berge og A. Thendrup 1985: Terskelfjorder bør utnyttes bedre: Ny teknikk kan løse oksygenproblemene. Norsk Fiskeoppdrett Nr. 10-85, s. 44-45.

Næs, K., J. Skei og P. Wassmann 1988: Total particulate and organic fluxes in anoxic Framvaren waters. Marine Chemistry Vol. 23, s. 257-268.

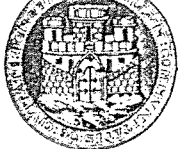
Rådgivende Biologer A/S 1992: Forberedende kartlegging for overvåking av ferskvannsresipienter i Bergen kommune. R.B. Rapport nr 61.

Rådgivende Biologer A/S 1994a: Tilstandsbeskrivelse av Sælenvatnet i Bergen vinteren 1994. R.B. rapport nr 117.

Rådgivende Biologer A/S 1994b: Tilstandsbeskrivelse av Sælenvatnet i Bergen høsten 1994. R.B. rapport nr 127.

Skei, J. 1988: Framvaren - Environmental Setting. I: Marine Chemistry Vol. 23, No. 3-4, s. 209-218.

Vea, J. 1994: Oksygenering av Skjoldafjorden. Rapport nr. RF-30/94, Rogalandsforskning, Stavanger, 20 s.



## Teknisk utbygging

NIVA - Vestlandsavdelingen  
Thormøhlensgt. 55

5008 Bergen

HOB

GOL

NOREK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING Vestlandsavdeling	
J. nr.:	509/94
Sak nr.:	404
Mottatt:	22/11

Deres ref.  
Hobæk

Vår ref.  
SO/so

Arkiv nr.  
VAA-94-SO/so

21. november 1994

**FORSLAG TIL TILTAK I SÆLENVATNET - VURDERING AV SAKSFORHOLD.  
OPPDRAGSBEKREFTELSE.**

Vi viser til møte om saken mandag 14.11.94, Deres tilbud datert onsdag 16.11.94 og til telefonsamtale fredag 18.11.94.

Vi bekrefter herved at NIVA får i oppdrag å :

1. Gi en vurdering av Water Protector's Aerator-løsning for bruk i Sælenvatnet, herunder:
  - eventuelt behov for og konsekvenser av tilstening av jernklorid
  - økonomi: stipulere totalkostnad ved bruk av aeratoren i Sælenvatnet
  - verdien av "pengene tilbake" garantien fra Water Protector

2. Gi en vurdering av VA-seksjonens saksframstilling og forslag til løsning, herunder:
  - en vurdering av tiltak (Minox-duppen) teknisk og økonomisk

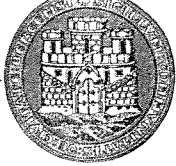
- ( 3. Lage en uttalelse til Water Protector's brev av 05.10.94. )  
Eget notat

Oppdraget skal utføres innenfor en økonomisk ramme av kr. 46.500,- (eks. mva.).

Vurderinger og utarbeidelse av rapport skal være gjennomført innen utgangen av desember 1994.

VANN- OG AVLØPSSEKSJONEN

*Sverre Ottosen*  
Sverre Ottosen  
overing.



## Teknisk utbygging

VANN- OG AVLØPSSEKSJONEN	
VANNFORSKNING	
Vestlandsavdeling	
Jnr.:	150/95
Sak nr.:	0-94239
Mottatt:	9/3

Gol  
Hoe

NIVA - Vestlandsavdelingen  
Thormøhlensgt. 55

5008 Bergen

Deres ref.  
Golmen

Vår ref.  
SO/so

Arkiv nr.  
VAA-95-SO/so

7. mars 1995

**VEDR. SÆLENVATNET -  
UTREDNING AV TILTAK FOR BEDRING AV VANNKVALITETEN.**

Etter "fagmøtet" mandag den 6. mars har VA-seksjonen kommet fram til at følgende metoder fortsatt er aktuelle for "rehabilitering" av Sælenvatnet:

- "friskt" vann føres ned til ønsket dyp
- lufting vha. "Aerator"

Dette betyr at vi ikke anser det aktuelt å pumpe "råttent" vann fra Sælenvatnet ut i Nordåsvatnet.


Vi ber derfor om at NIVA utfører følgende:

- \* "Måleperiode" avsluttes. Det utarbeides en egen rapport som dokumenterer og kommenterer utførte målinger.
- \* NIVA lager en forløpig rapport som tar for seg de ulike positive og negative sidene ved de to aktuelle metodene nevnt over. Rapporten sendes ut på "høring" til andre fagmiljøer for kommentarer / tilføyelser før endelig utgave lages.

Av hensyn til den videre framdrift i arbeidet med "rehabilitering" av Sælenvatnet, vil det være ønskelig at dette utføres så raskt som mulig.

Når det gjelder tilførsel av friskt vann til ønsket dyp, ber vi om at det også vurderes om det er mulig å pumpe vann fra overflaten ned til ønsket dyp (som et alternativ til overføring fra Gjeddevatnet).

VANN- OG AVLØPSSEKSJONEN

  
Sverre Ottosen  
overing.

Vedlegg.

## VEDLEGG 1

**LEVERANDØRGARANTI - ØKONOMISK RISIKO FOR BERGEN  
KOMMUNE UAVHENGIG OPPNÅDD RESULTAT.**

WATER PROTECTOR som Hovedentreprenør og ansvarlig utførende operatør for restaurering av Sælenvatnet gir herved følgende garanti overfor BERGEN KOMMUNE TEKNISK UTBYGGING, VANN OG AVLØPS-SEKSJONEN ved bruk av Aerator-systemet (luftinnblandingsenhet), heretter benevnt som Water Protector / Aqua-Aire Aerator enhet/utstyr/ metode.

Det garanteres herved at innen 60 (seksti) dager etter oppstarting av restaurering skal det øverste sjiktet på ca. 10 meter av vannmassene i Sælenvatnet være fritt for Hydrogensulfidgass.

Vi garanterer videre at vår teknologi vil virke og funksjonere i overensstemmelse med all informasjon som er nedfelt og kunngjort i tilsendt materiell/dokumentasjon.

Denne pengene tilbake garanti forutsetter kontinuerlig drift av Aeratoren.

Dersom ovennevnte garanti ikke oppfylles som stipulert ovenfor, vil det være BERGEN KOMMUNE sitt valg å kansellere kontrakten. Hvis dette blir tilfellet vil WATER PROTECTOR demontere, nedrigge og fjerne aeratoren med tilhørende utstyr og BERGEN KOMMUNE's kontraktsforpliktelser overfor WATER PROTECTOR bortfaller med følgende unntak:

Alle installasjonskostnader som spesifisert i pristilbud blir å belaste BERGEN KOMMUNE, samt eventuelle nedriggingskostnader.

Øvrige garantier gitt i tilbud av 02.06.1994 står ved makt.

---

**NIVA**



**Norsk institutt for vannforskning**

Postboks 173 Kjelsås, 0411 Oslo

Telefon: 22 18 51 00 Fax: 22 18 52 00

ISBN 82-577-2854-3