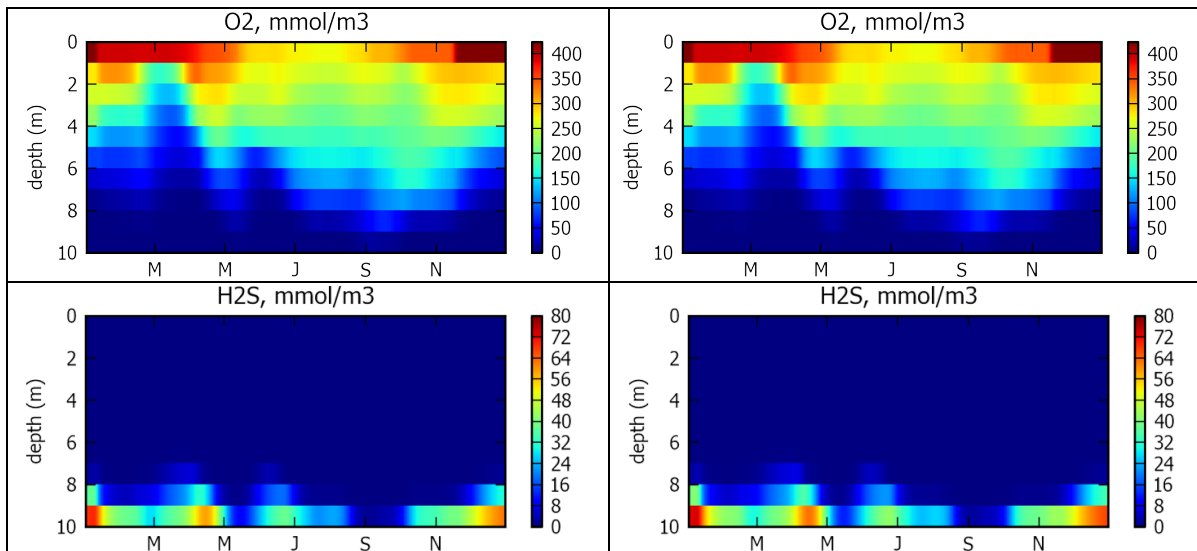


Beregninger og modelleringer av miljøeffekter i Sælenvatnet som følge av utvidelse av Sælenkanalen



Hovedkontor

Gaustadalléen 21
0349 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internett: www.niva.no

NIVA Region Sør

Jon Lilletuns vei 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 37 04 45 13

NIVA Region Innlandet

Sandvikaveien 59
2312 Ottestad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 62 57 66 53

NIVA Region Vest

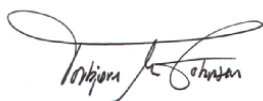
Thormøhlensgate 53 D
5006 Bergen
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 55 31 22 14

Tittel Beregninger og modelleringer av miljøeffekter i Sælenvatnet som følge av utvidelse av Sælenkanalen.	Løpenr. (for bestilling) 7061-2016	Dato 15.07.2016
	Prosjektnr. Undernr. 16195	Sider Pris 22
Forfatter(e) Anna Birgitta Ledang, André Staalstrøm, Phil Wallhead, Evgeniy Yakushev og Torbjørn M. Johnsen	Fagområde Oseanografi	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Hordaland	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Bergen kommune, Vann- og avløpsetaten	Oppdragsreferanse Hogne Hjelle
---	-----------------------------------

<p>Sammendrag</p> <p>I forbindelse med planleggingen av utvidelse av Sælenkanalen har det vært utført beregninger og modelleringer for å finne svar på hvilke effekter utvidelsen vil ha på miljøforholdene i Sælenvatnet. Som basis for arbeidet har Norconsults beregninger av maksimal økning av gjennomstrømning i kanalen på 20 % og hydrografiske målinger i Sælenvatnet gjennomført av NIVA i perioden 2010-16 blitt benyttet. Beregningene viser at kanalutvidelsen vil redusere den maksimale strømningshastigheten til under det halve av hva den er i dag slik at energien tilgjengelig for vertikal blanding av vannmassene i Sælenvatnet reduseres. Samtidig øker blandingseffektiviteten. Det innebærer at grenseflaten mellom oksygenholdig og oksygenfritt vann sannsynligvis påvirkes i liten grad. Modelleringer ved bruk av BROM-modellen ga samme konklusjon, dvs. at kanalutvidelsen i liten grad vil påvirke antallet tilfeller hvor H₂S-holdig vann kommer opp til overflaten. En modellering med 400 % økning i horisontal blandingshastighet viste at grenseflaten mellom oksygenholdig og oksygenrikt vann ville heves med 0,1-0,7 m. Modelleringen er basert på måledata fra Sælenvatnet med data fra perioden 2010-14 inkludert da aeratoren (pumpen) var i drift, og dette kan ha endret den vertikale diffusiviteten i 0 til 10-15 m laget.</p>
--

<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Sælenvatnet 2. Vannutveksling 3. Miljøeffekter 4. Biogeokjemisk modellering 	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Sælenvatnet 2. Water exchange 3. Environmental effects 4. Biogeochemical modelling
--	---



Prosjektleder
Torbjørn M. Johnsen



Forskningsleder
Kai Sørensen

Beregninger og modelleringer av miljøeffekter i Sælenvatnet som følge av utvidelse av Sælenkanalen

Forord

NIVA ble forespurt av Bergen kommune om å gi et tilbud for å gjøre en vurdering av den miljømessige effekten i Sælenvatnet som følge av en planlagt utvidelse av Sælkanalen. Hovedformålet med vurderingene skulle være å utføre beregninger/modelleringer som skulle forsøke å gi svar på i hvilken grad de planlagte utbedringene av Sælkanalen ville påvirke dybden for grenseflaten mellom oksygenholdig vann og vann med hydrogensulfid i Sælenvatnet. I tillegg ønsket en å få en vurdering av om utbedringen av kanalen ville ha en positiv eller negativ effekt på potensialet for opptrengning av hydrogensulfidholdig vann til overflaten i Sælenvatnet.

Kontrakt mellom NIVA og Bergen kommune for gjennomføring av dette arbeidet ble signert 23. februar 2016.

André Staalstrøm og Anna Birgitta Ledang har gjennomført de teoretiske beregningene i forhold til økt maksinnstrømning og endring i vertikal diffusjon. Resultater fra dette arbeidet ble levert som eget notat til Bergen kommune 31. mai 2016, og deler av notatet i revidert form er innarbeidet i denne rapporten.

Phil Wallhead og Anna Birgitta Ledang har hatt ansvaret for å forberede inputfiler til BROM-modellen.

Phil Wallhead og Evgeniy Yakushev har vært ansvarlige for kjøring av BROM-modellen for Sælenvatnet.

Torbjørn M. Johnsen har vært prosjektleder.

Oslo, 15. juli 2016

Torbjørn M. Johnsen

Innhold

Sammendrag	5
Summary	6
1. Innledning	7
2. Beregning av vertikal diffusjon	9
2.1 Hydrografi og oksygenutvikling fra 2010 til 2014 i Sælenvatnet	9
2.2 Strømforhold i kanalen	13
2.3 Blandingsforhold i Sælenvatnet	13
2.4 Oppholdstid i Sælenvatnet	14
3. Modellberegninger av grenseflaten mellom O₂ og H₂S	15
3.1 BROM	15
3.2 Grensebetingelser	15
3.3 Resultater	17
4. Sammendrag og konklusjoner	21
5. Litteratur	22

Sammendrag

Dypvannet i Sælenvatnet i Fyllingsdalen i Bergen har høy konsentrasjon av H₂S (hydrogensulfid). Når tungt vann strømmer gjennom Sælenskanalen og inn i Sælenvatnet kan det hydrogensulfidholdige vannet løftes opp helt til overflaten og komme i kontakt med luft slik at H₂S frigjøres – noe som gir luktproblemer for de som bor nær Sælenvatnet.

Bergen kommune planlegger å utvide store deler av Sælenskanalen med opp til 2 m i bredden og for noen deler av Sælenskanalen senke kanalbunnen noe. Norconsult har beregnet at en slik utvidelse vil kunne føre til at den maksimale gjennomstrømningen i kanalen vil kunne øke med 20 % og at flomvannstanden kan reduseres med ca. 30 cm. I den forbindelse ønsket Bergen kommune å få undersøkt om endringen ville føre til økt vertikal diffusjon og hvordan endringen ville påvirke grensesnittet mellom H₂S og oksygenrikt vann.

Målinger fra 2010 til 2014 i Sælenvatnet viste at det i denne perioden forekom vannutskifting i Sælenvatnet slik at vannmasser hvor det kan forventes H₂S, var blitt hevet høyere opp i vannsøylen. I denne perioden varierte saltholdigheten i 2-5 m sjiktet mellom 3 og 21 ppt. På bakgrunn av saltholdighetsmålingene i overflatevannet i Sælenvatnet og Nordåsvatnet, dvs. det vannet som transporteres fra Nordåsvatnet gjennom Sælenskanalen (0-2 m) og inn i Sælenvatnet, vil det innstrømmende vannet tidvis kunne fortrenge relativt dypt vann i Sælenvatnet. Ved de saltholdigheter som for eksempel ble målt i Sælenvatnet i august 2015, ville det innstrømmende vannet kunne fortrenge dypvann på så store dyp at H₂S-holdig vann i Sælenvatnet kunne heves høyere opp i vannsøylen.

Etter utvidelsen av Sælenskanalen er det beregnet at maksimal strømhastighet gjennom kanalen vil være redusert til 24 cm/s fra middel maksimalhastighet før kanalutvidelsen på 60 cm/s. Å blande vannmasser vertikalt betyr å gjøre arbeid mot tyngdekraften, og dette krever energi. Når strømhastigheten i kanalen reduseres fra 60 til 24 cm/s samtidig som tverrsnittarealet økes 3 ganger, betyr det at tilgjengelig energi for vertikal blanding reduseres med omtrent 50 %. Mesteparten av energien forsvinner til friksjon. Andelen som går med til å blande vannmassene varierer mellom 1 og 15 %. Blandingseffektiviteten styres av forholdet mellom strømhastigheten (u) i Sælenskanalen og hastigheten til en indre bølge (c) i Sælenvatnet, og det ser ut som blandingseffektiviteten øker når forholdet mellom u og c minker. Effekten av redusert tilgjengelig energi for blanding beskrevet over blir nesten balansert av at blandingseffektiviteten øker. På grunn av stor spredning i tallmaterialet så er det høyst usikkert om blandingsforholdene faktisk vil bli bedre eller dårligere etter denne utgravingen.

Beregningene til Norconsult viser at kanalutvidelsen vil øke volumfluksen med 20 %, og dette vil føre til en nedgang i oppholdstiden for vannet i de øvre 5 m på 13 %.

Beregninger ved bruk av BROM-modellen viser at en økning i horisontal blandingshastighet på 20 % mellom vann fra Nordåsvatnet og Sælenvatnet ikke vil påvirke dypet for grenseflaten mellom oksygen- og hydrogensulfidholdig i vesentlig grad. Ved en økning i den horisontale blandingshastigheten på 400 % vil grenseflatene heves med ca. 0,1-0,7 m i følge modellen. En økning i innstrømningen av denne størrelsesorden er ikke realistisk og er kun brukt som et eksempel på hvor stor økningen i innstrømning må være for at en endring av en viss størrelse skal inntreffe.

Modelleringen i BROM er gjort med bakgrunn i hydrografidata fra Sælenvatnet i perioden fra 2010 til 2016 hvor pumpen (aeratoren) i Sælenvatnet har sugd ned og blandet inn luft i vannet og samtidig satt vannet i kraftig bevegelse. Dette kan ha endret den vertikale diffusiviteten i 0 til 10-15 m laget og sørget for en senkning av H₂S-laget. Likevel kan trolig den relative endringen beregnet her kunne relateres til en situasjon uten aerator i drift.

Summary

Title: Calculations and modelling environmental effects in Sælenvatnet caused by expansion of Sælenkanalen

Year: 2016

Authors: Anna Birgitta Ledang, André Staalstrøm, Phil Wallhead, Evgeniy Yakushev and Torbjørn M. Johnsen

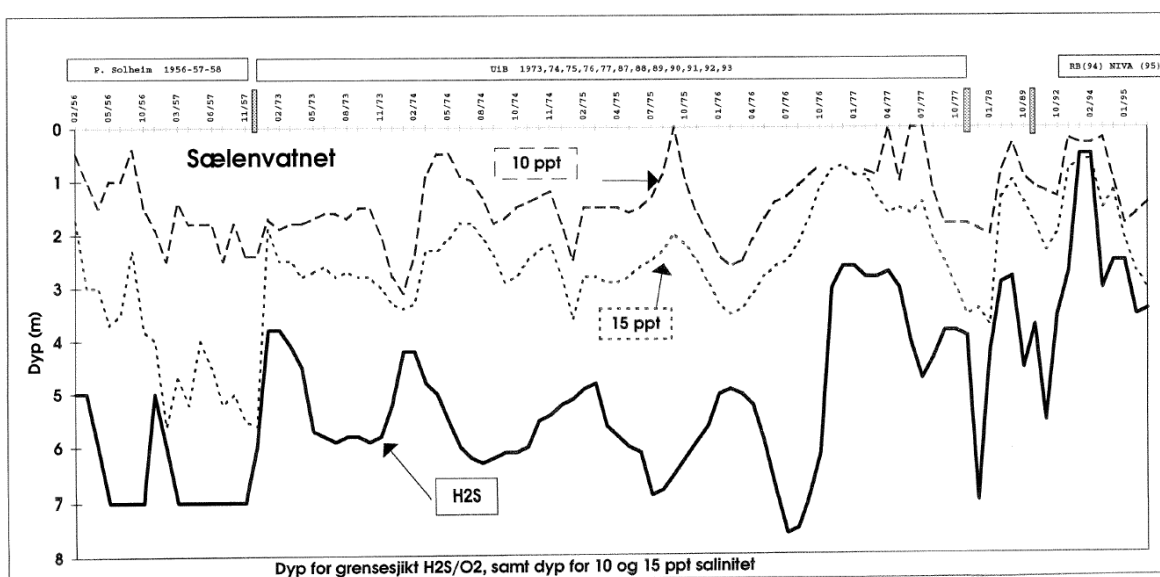
Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 978-82-577-6796-9

The City of Bergen is planning a widening of the channel from Nordåsvatnet to Sælenvatnet where the deep water contains high concentrations of hydrogen sulphide (H_2S). Norconsult has done calculations showing that the widening of the channel will increase the maximum inflow into Sælenvatnet by 20%. NIVA has done calculations and modelling to investigate the environmental effect of this increased inflow into Sælenvatnet. The conclusion is that the widening will have little effect on the conditions in Sælenvatnet.

1. Innledning

Sælenvatnet i Fyllingsdalen i Bergen har dypvann med høy konsentrasjon av H₂S (hydrogensulfid). Den dårlige vannkvaliteten i Sælenvatnet skyldes flere faktorer. Biologisk materiale blant annet fra planktonoppblomstringer i Sælenvatnet sedimenterer og brytes ned, og denne prosessen forbruker oksygen. Når det ikke er mer oksygen tilgjengelig, henter mikroorganismer oksygen fra andre kilder som sulfat fra sjøvann og hydrogensulfid dannes. Hydrogensulfid som dannes i Sælenvatnet, holdes i dypvannet av et sterkt sprangsjikt (pyknoklin). Dette hindrer også vertikal blanding, og dypvannets tetthet endres derfor veldig sakte. Denne tilstanden kan endres ved en innstrømming av nytt tungt vann som da vil fortrenge dypvannet som inneholder H₂S, og løfte dette opp i vannsøylen. Dette gasholdige vannet kan da komme i kontakt med luft og H₂S frigjøres – noe som gir luktproblemer for de som bor nær Sælenvatnet.

Fra 1950-tallet og frem til 1990-tallet hevet H₂S grensesjiktet seg fra å ligge mellom 5-7 m og opp til 2-4 m (**Figur 1**). Det er ikke funnet noen klar sammenheng for hva som var årsak til denne endringen (Golmen m.fl. 1995).



Figur 1. Tidsutvikling av H₂S og 10 og 12 saltholdighet fra 1950-tallet til 1990-tallet. Hentet fra Golmen m.fl. (1995).

Problemer med H₂S-lekkasje fra Sælenvatnet har lenge vært et tema, og alle tiltak i og rundt Sælenvatnet som kan påvirke miljøforholdene positivt der, bør derfor vurderes. I Golmen m.fl. (1995) ble effekten av ulike tiltak for å forbedre vannkvalitet på kort og lang sikt i Sælenvatnet vurdert. De ulike tiltakene som ble vurdert den gang, var dykket utslipp av ellevann, mekanisk blanding (turbulens) i vannet eventuelt med luftinnblanding, kunstig oksygenering ved lufting av dypvann og nedpumping av overflatevann til dypereliggende sjikt. Anbefalingen fra rapporten var å starte med nedpumping av overflatevann som var et rimelig tiltak som raskt kunne igangsettes og deretter etablere et dykket ferskvannsutslipp.

En av metodene for mekanisk blanding av vann med innblanding av luft, som også ble vurdert i Golmen m.fl. (1995), var bruk av en aerator som er en avansert undervannspumpe. Pumpen drar inn luft fra overflaten via slange og skyter vann med innblandet luft ut med stor kraft. På grunn av uavklarte forhold rundt kjøp og drift av aeratoren ble ikke denne løsningen anbefalt. Bergen kommune gikk imidlertid til innkjøp av en slik pumpe og den ble satt i drift i Sælenvatnet våren 2010. I mai 2010 og frem til vinteren 2013/2014 har den vært i drift tilnærmet kontinuerlig, med unntak av vedlikehold og reparasjoner. Etter

reparasjon vinteren 2013/2014 måtte pumpen akutt settes inn som problemløser et annet sted, og den har ikke vært i bruk i Sælenvatnet etter dette.

Bergen kommune planlegger nå å utvide store deler av Sælenkanalen med 2 m i bredden og senke kanalbunnen til kote -1 for noen deler av Sælenkanalen. Norconsult (Holvik, 2011) har beregnet at ved en utvidelse på 2 m og en kanaldybde på kote -1,0 vil dette føre til en økning på 20 % (volum) for maksimalgjennomstrømning samt en reduisering av flomvannstanden med ca. 30 cm. En utvidelse av kanalbredden og en senkning av kanaldybden i Sælenkanalen er også gunstig for de lokale interessene rundt Sælenvatnet fordi det vil føre til at større båter enn i dag kan gå gjennom kanalen.

I dette arbeidet er det forsøkt å gi svar på følgende:

- Vil økt maksimalinnstrømning til Sælenvatnet føre til en økt vertikal diffusjon og dermed en nedgang i tetthet i dypvannet og dermed føre til økt vannutskiftning?
- Vil økt maksimalinnstrømning til Sælenvatnet føre til en sterkere lagdeling og et dypere liggende grensesnitt mellom H₂S og oksygenrikt vann (redox) og dermed føre til at det blir færre tilfeller hvor H₂S-laget kommer opp til overflaten?

Det er tatt utgangspunkt i at volumtransporten i kanalen kan øke med opp til 20 %.

2. Beregning av vertikal diffusjon

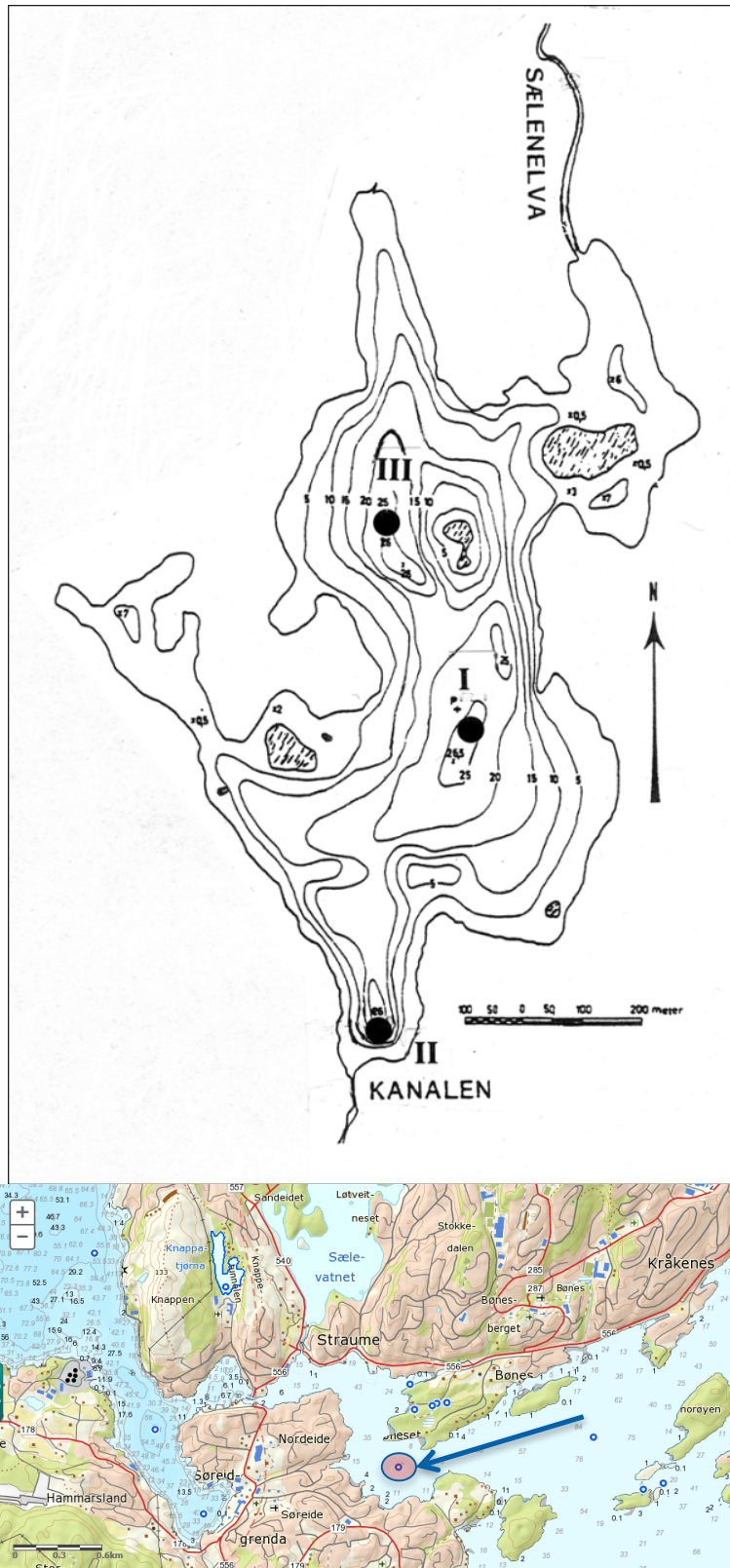
2.1 Hydrografi og oksygenutvikling fra 2010 til 2014 i Sælenvatnet

Hydrografidata fra Sælenvatnet presentert her er målinger som NIVA har utført for Bergen kommune, og hydrografidata fra Nordåsvatnet er blitt gjort tilgjengelig for NIVA av Bergen kommune. Målinger fra Sælenvatnet er fra stasjon I som er vist i **Figur 2**.

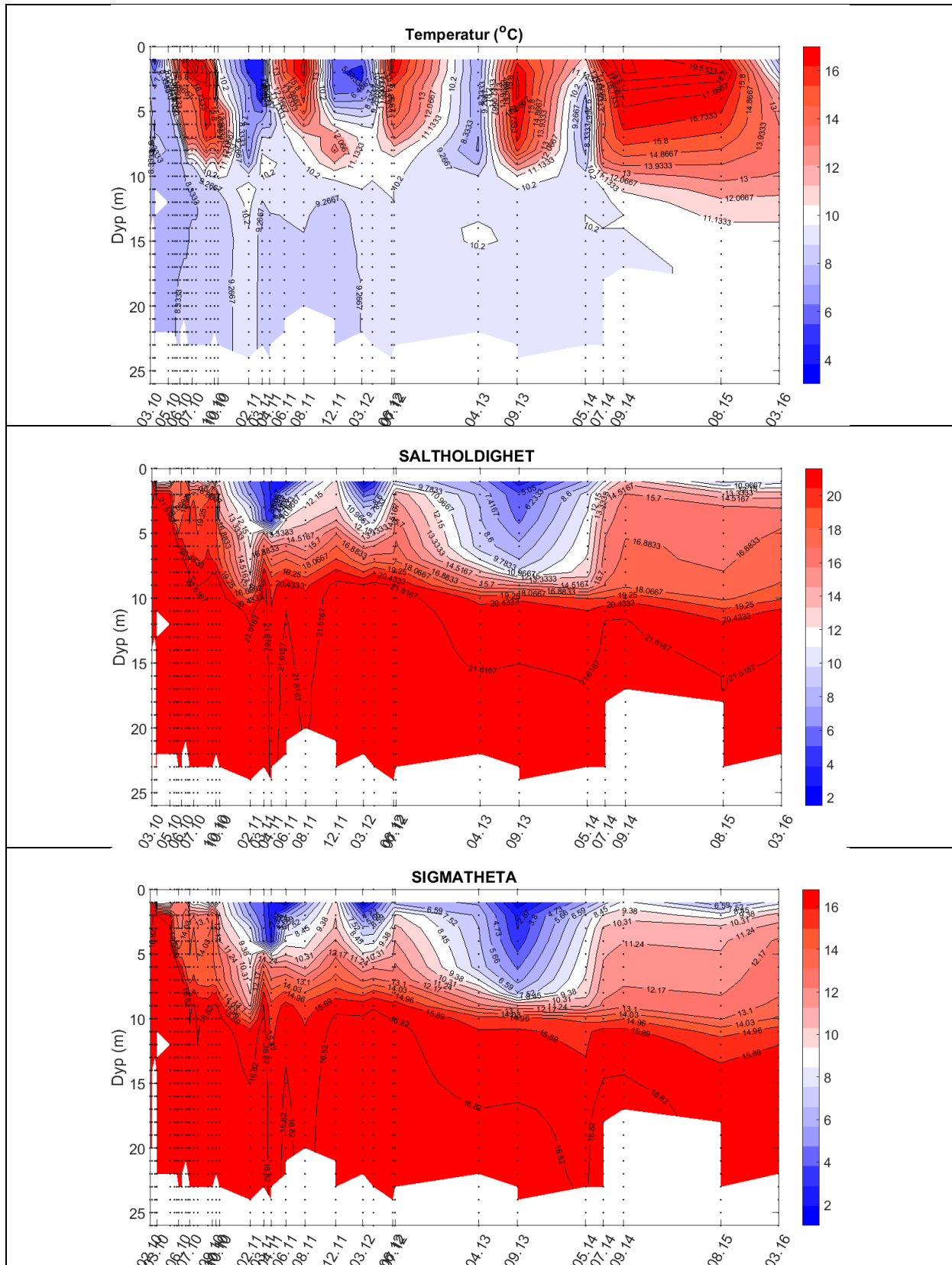
I **Figur 3** er utviklingen av temperatur, saltholdighet og tetthet over dyp og tid fra mars 2010 til mars 2016 i Sælenvatnet presentert. Sesongvariasjonen i temperatur med høyere temperaturer om sommeren og lave temperaturer om vinteren er tydelig. Ettersom temperaturen stiger i overflaten om sommeren, sprer denne varmen seg også nedover i vannsøylen og ned til ca. 10 m. For saltholdighet er det et tydelig ferskvannspåvirket overflatelag. I øvre enden av Sælenvatnet, på motsatt side av Sælenskanalen, er det utløpet fra Sælenuva som bidrar med ferskvann til overflatelaget. Normalt vil ferskvannslaget minke i tykkelse ved økt avstand fra elveutløpet. Gjennom perioden fra 2010 til 2016 finnes saltholdigheter mellom 14 og 21 ppt fra 1 til 7 m dyp. I episodene hvor saltholdigheten er høy nær overflaten, skyldes dette en heving av vannmasser som fører til at vann fra større dyp blir fraktet høyere opp i vannsøylen. Dette kan ofte forklares med vannutskiftning hvor nytt vann strømmer inn og fortrenger gammelt vann som blir presset høyere opp i vannsøylen eller som følge av vindsituasjoner som gir opphopning av overflatevann i en del av Sælenvatnet og en heving av normalt dypere liggende vannmasser i en annen del av bassenget. Ved en slik heving av vannmasser vil det kunne føre til at H₂S-laget blir transportert opp til overflaten, og dette ser ut til å være tilfelle ved flere tidspunkt i perioden 2010 til 2014. Vinteren 2010 var en veldig kald vinter med is på Sælenvatnet, og saltholdigheten er 21 helt opp til 2 m i mars 2010. Ved dyp større enn 10 m er det liten endring i saltholdighet og temperatur, og dette kan forklares ut fra at det er lite vertikalblanding i Sælenvatnet.

Den kalde vinteren 2010 med is på Sælenvatnet hindret gassutveksling med atmosfæren og førte til H₂S-dannelse helt opp til overflaten (**Figur 4**). Grenseflaten mellom oksygenert og H₂S-holdig vann ble etter hvert som isen forsvant i 2010, presset nedover og var i desember 2010 nede på 8 m dyp. I april 2013 måtte en ned til 10 m dyp for å finne H₂S-holdig vann og denne situasjonen var fremdeles gjeldende i april 2016. I perioden mai 2010 fram til april 2014 var aeratoren utplassert i Sælenvatnet og trolig er det kjøringen av denne som har ført til at grenseflaten mellom oksygenert og H₂S-holdig vann ble senket relativt raskt og at det er effekten fra kjøringen av aeratoren som fremdeles påvirker grenseflatens dybde. I mars 2016 var det hypoksiske forhold ved 5 m ($O_2 < 2$ ml/l). Det er få hydrografiske målinger fra 2015, og det er uvisst om det har vært variasjon i grenseflatedybden dette året.

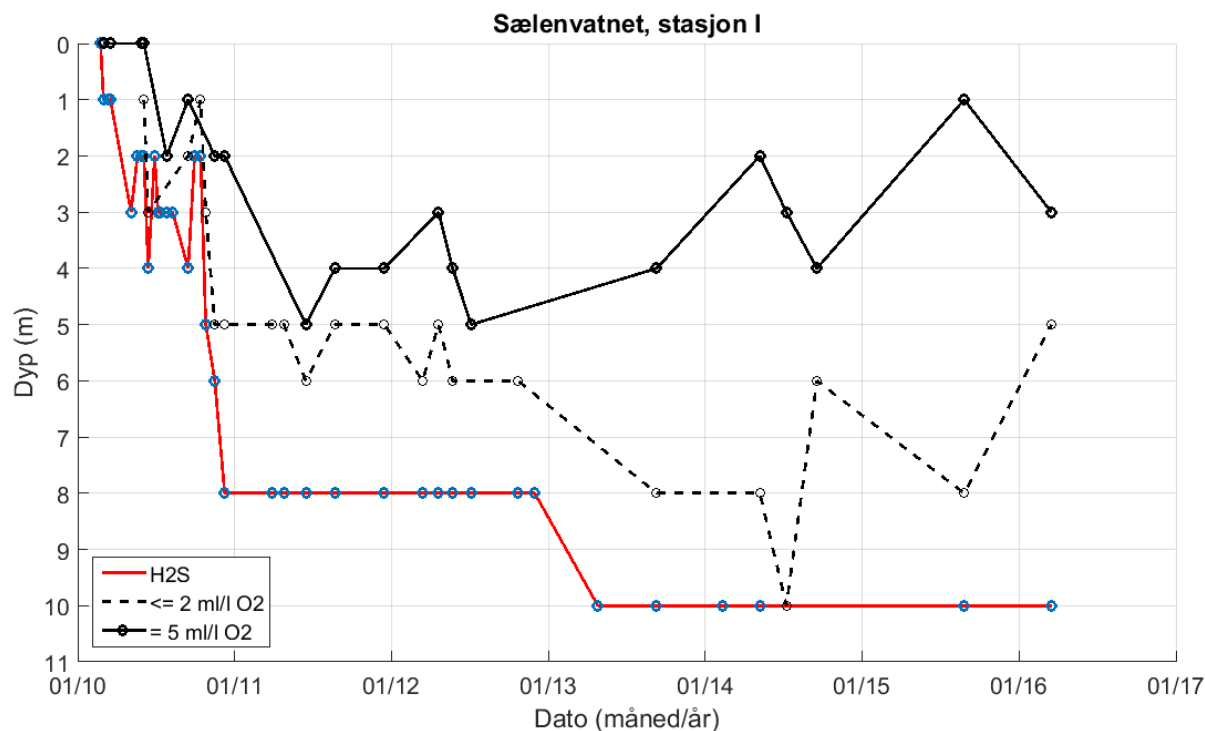
Det dypeste punktet i Sælenskanalen er i den delen som er nærmest Nordåsvatnet, med et dyp mellom 1 og 1,5 m. I **Figur 5** er hydrografi fra Nordåsvatnet i form av saltholdighet og temperatur presentert, og figuren viser at ved dyp mellom 0 og 1,5 m svinger saltholdigheten mellom 2 og ca. 25 ppt. I perioden 2010 til 2014 varierte saltholdigheten mellom 3 og 21 ppt i 2-5 m sjiktet i Sælenvatnet. Målinger av saltholdighet i Nordåsvatnets overflatelag (0-1,5 m), dvs. det vannet som transporteres fra Nordåsvatnet gjennom Sælenskanalen og inn i Sælenvatnet, viser at det innstrømmende vannet tidvis har så høy saltholdighet at det vil kunne fortrenge dypere liggende H₂S-holdig vann i Sælenvatnet. Det H₂S-holdige vannet vil da bli hevet høyere opp i vannsøylen.



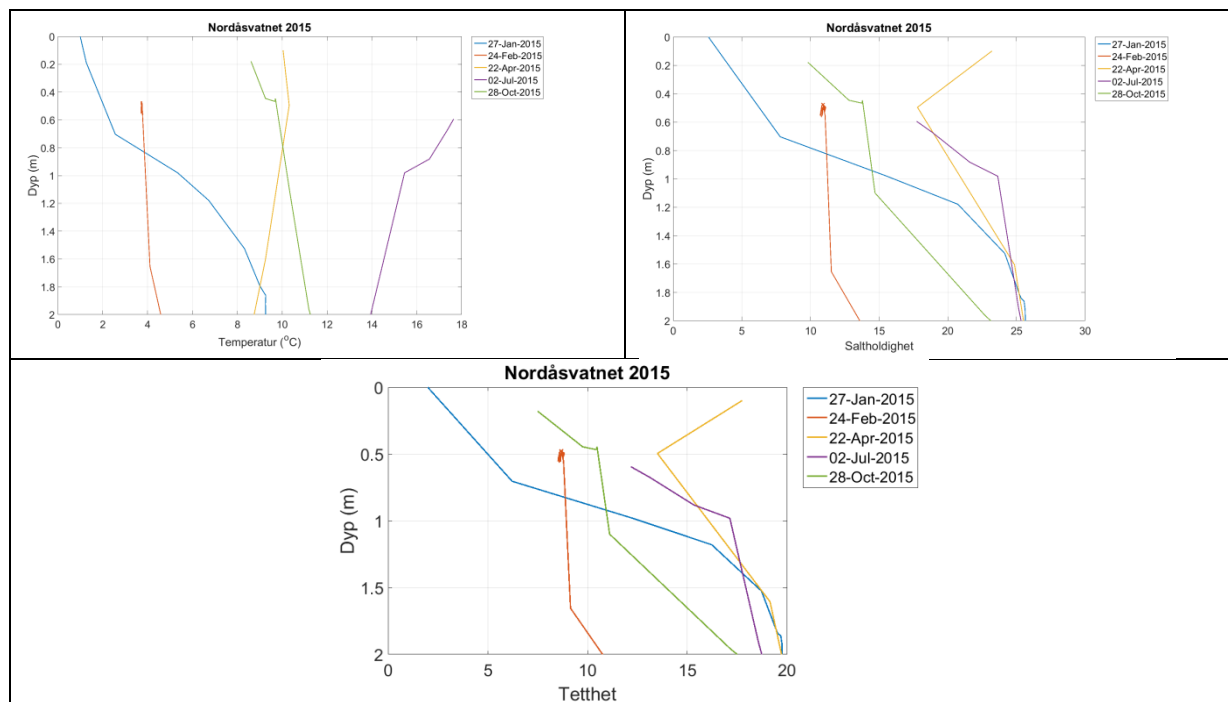
Figur 2. Kart over stasjoner i Sælenvatnet (øverst) og Nordåsvatnet (nederst). I Sælenvatnet er benyttede data fra Stasjon I, mens i Nordåsvatnet er dataene fra stasjonen markert med rød transparent sirkel.



Figur 3. Temperatur, saltholdighet og tetthet i Sælenvatnet fra mars 2010 til mars 2016.



Figur 4. Tidsutvikling i Sælenvatnet for dyp med 5 ml O₂/l, <2 ml O₂/l som er grensen mellom oksiske og hypoksiske forhold og minste dyp for vann med H₂S i perioden fra 2010 til 2016. En avansert pumpe (aerator) var utplassert i Sælenvatnet og i tilnærmet kontinuerlig drift fra mai 2010 til vinteren 2013/14.



Figur 5. Temperatur, saltholdighet og tetthet i øvre lag målt i Nordåsvatnet i 2015.

2.2 Strømforhold i kanalen

I notatet fra Norconsult (Holvik, 2011) hvor den hydrauliske kapasiteten i Sælenkanalen er vurdert før og etter utvidelsen, er det konkludert med at volumtransporten i kanalen vil kunne øke med opp til 20 %. I vårt arbeid er det tatt utgangspunkt i at kanalens vestre bredd graves ut og at tverrsnittet i deler av kanalen blir 3-4 ganger større.

Strøm i Sælenkanalen har blitt målt i den delen av kanalen som skal graves ut (Golmen et al., 1995), og strømforholdene i en før-situasjon er altså kjent. Strømhastigheten er maksimalt 50-70 cm/s, og her tas det utgangspunkt i at maksimalstrømmen i middel er 60 cm/s. Strømhastigheten blir minst 3 ganger mindre på grunn av økt tverrsnittareal. Samtidig motvirkes denne effekten av at 20 % mer vann går gjennom kanalen. Maksimal strømhastighet gjennom kanalen etter utgravning estimeres derfor til 24 cm/s.

2.3 Blandingsforhold i Sælenvatnet

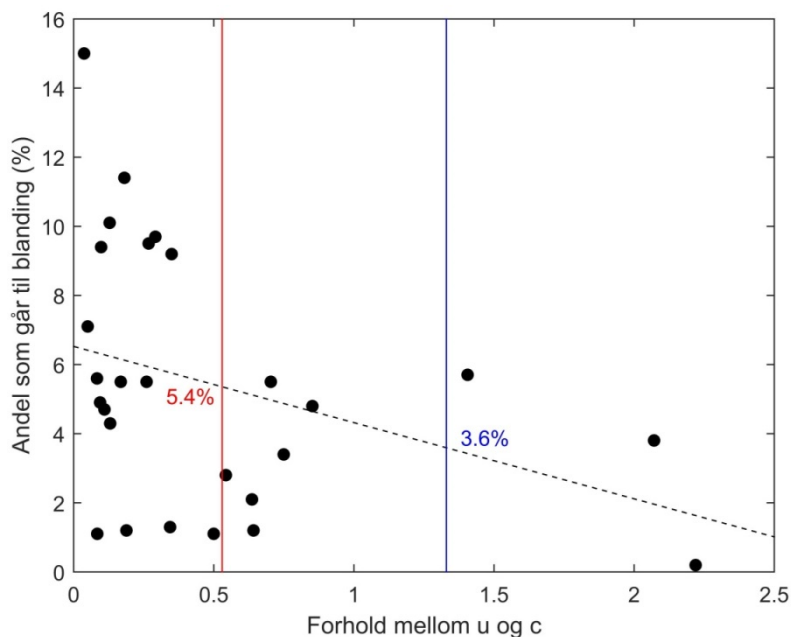
Vannkvaliteten i Sælenvatnet er preget av lav vertikal blanding. Dette gjør at vannmassene under terskeldyp får høy oppholdstid. Dette medfører at alt oksygen i dypvannet brukes opp og at det dannes hydrogensulfid. Tidvis kommer hydrogensulfidholdig vann helt opp til overflata, og dette skaper luktproblemer i området. De lave blandingsforholdene skyldes at vannutvekslingen med området utenfor gjennom den trange og grunne Sælenkanalen er begrenset. I det videre arbeidet vurderes det hvordan blandingsforholdene kan endres når kanalen er utgravd.

Å blande vannmasser vertikalt betyr å gjøre arbeid mot tyngdekraften, og dette krever energi. Denne energien må tas fra bevegelsesenergien til strømmen gjennom kanalen eller fra vinden som blåser over området. Vinden kan, når det blåser kraftig, blande det øverste laget grundig, og det kan settes opp indre bølger på skilleflaten mellom det øvre og nedre laget som kan føre til blanding. I og med at det er konstant H₂S i Sælenvatnet i dag, så tyder dette på at vinden ikke fører til effektiv blanding av vannmassene.

Energien, E , fra strømmen i kanalen som er tilgjengelig for blanding, er proporsjonal med tverrsnittarealet i kanalen, A , og strømhastigheten, u , i kvadrat (Stigebrandt og Aure, 1989).

$$E \sim A \cdot u^2$$

Når strømhastighet i kanalen går fra 60 til 24 cm/s og tverrsnittarealet økes 3 ganger, så betyr det at tilgjengelig energi for vertikal blanding reduseres med omtrent 50 %. Langt i fra all tilgjengelig energi går med til blanding av vannmassene. Størsteparten av energien forsvinner til friksjon. Stigebrandt og Aure (1989) undersøkte 29 fjorder i Møre og Romsdal og fant at andelen av energi (R_r , Richardson-tallet) som går med til å blande vannmassene, varierer mellom 1 og 15 %, avhengig av forholdet mellom strømhastigheten over fjordterskelen (i Sælenkanalen for Sælenvatnet) og fasehastigheten til en indre bølge, c . Denne fasehastigheten er avhengig av sjiktningen og kan anslås til å være omtrent 45 cm/s i Sælenvatnet. Tallmaterialet til Stigebrandt og Aure (1989) er vist i **Figur 6**, og til tross for stor spredning i datamaterialet så tyder det på at blandingseffektiviteten øker når forholdet mellom u og c minker. Dette forholdstallet kan anslås å gå fra ca. 1,33 til ca. 0,53 før og etter utgravning av Sælenkanalen. Det betyr at blandingseffektiviteten vil øke fra 3,6 % til 5,4 % og at effekten av redusert tilgjengelig energi for blanding beskrevet over, nesten blir balansert av at blandingseffektiviteten øker. Det må understrekes at det er stor spredning i tallmaterialet og at det på rent teoretisk grunnlag ikke er mulig å fastslå helt sikkert om blandingsforholdene i vannmassene faktisk blir bedre eller dårligere siden det er to forskjellige effekter som trekker i hver sin retning. Mest sannsynlig blir det liten endring i de vertikale blandingsforholdene etter utgravningen.



Figur 6. Blandingseffektivitet som funksjon av forholdet mellom u (strømhastighet) og c (fasehastigheten til indre bølger), basert på tallmaterialet fra Stigebrandt og Aure (1989). Den stiplede linjen viser en lineær tilpasning til tallmaterialet i figuren. Den blå og røde vertikale linjen angir forholdet mellom u og c , henholdsvis før og etter utgravning av Sælenkanalen.

2.4 Oppholdstid i Sælenvatnet

Gjennom å utvide Sælenkanalen har Norconsult beregnet at dette vil øke volumfluksen fra $2,40 \text{ m}^3/\text{s}$ i dag til $2,85 \text{ m}^3/\text{s}$, som er en økning på 20 %. Etersom grenseflaten mellom oksygenert og H_2S -holdig vann fram til 1990-tallet gjennomsnittlig har lagt på i overkant av 5 m dyp, er det sett på hvordan oppholdstiden for vannsjiktet 0-5 m vil endre seg ved en større fluks. Volumet fra 0 til 5 m er beregnet til å være på $2,43 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ (Golmen m.fl., 1995). Gjennom en tidevannsperiode på ca. 12 timer vil det ved en fluks på $2,40 \text{ m}^3/\text{s}$ være en transport ut og inn Sælenvatnet tilsvarende et volum på $3,3 \cdot 10^4$, mens det for en fluks på $2,85 \text{ m}^3/\text{s}$ vil bli transportert inn og ut et volum på $3,9 \cdot 10^4$. Dette tilsvarer en reduisering av oppholdstiden fra i underkant av 74 tidevannsperioder til 63 tidevannsperioder, altså fra ca. 36 dager til 31,5 dager. Dette medfører en forkortet oppholdstid på ca. 13 %. Ved en minkende oppholdstid vil trolig mindre biologisk materiale være tilgjengelig for nedbrytning – noe som kan bidra til noe mindre produksjon av H_2S .

3. Modellberegninger av grenseflaten mellom O₂ og H₂S

3.1 BROM

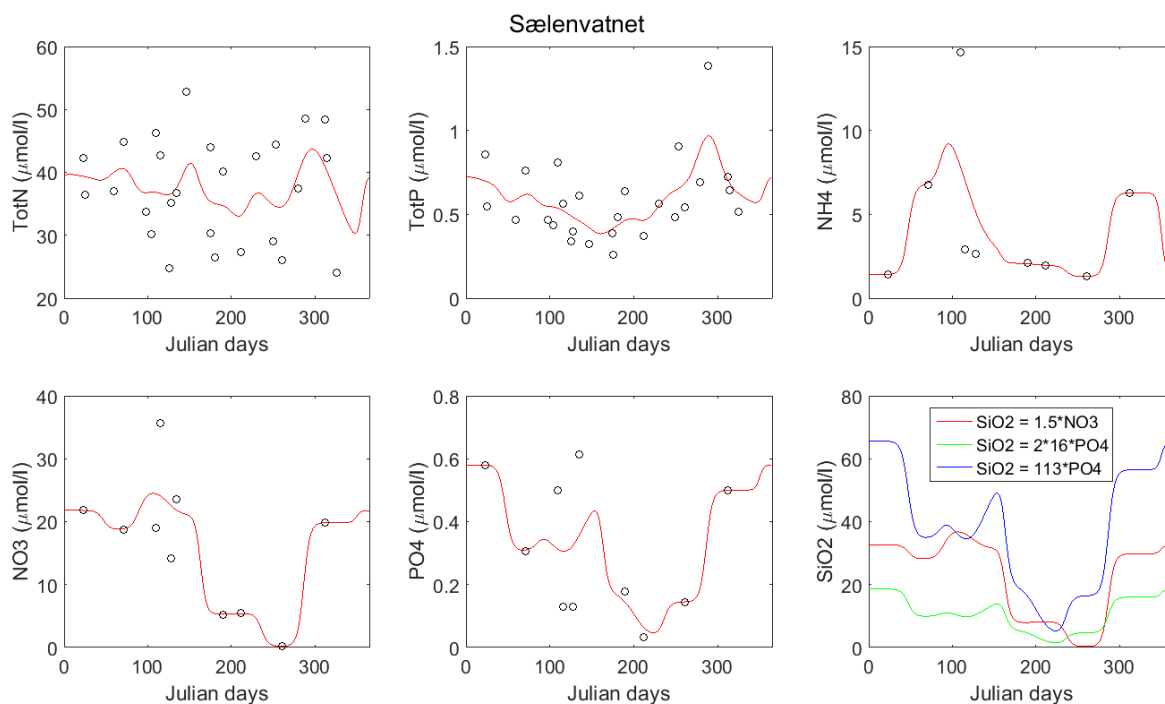
Den en-dimensjonale vertikale transport- og reaksjonsmodellen «Bottom RedOx Layer Model»(BROM) består av to moduler - BROM-biogeokjemi og BROM-transport. BROM-biogeokjemi er basert på «RedOx Layer Model» (ROLM), en modell konstruert for å simulere den grunnleggende biogeokjemiske strukturen i grensesnittet mellom oksygenholdig (oksisk) og anoksisk miljø i vannsøylen i Svartehavet, Østersjøen og norske fjorder (He et al. 2012, Stanev et al. 2014, Yakushev et al. 2006, 2007, 2009, 2011). I BROM-biogeokjemi modulen er antall modellerte forbindelser og prosesser utvidet. BROM behandler sammenkoblede stoff-forbindelser (N, P, Si, C, O, S, Mn, Fe) og angir alt organisk materiale som nitrogen. Dette inkluderer parameterisering av produksjon av organisk materiale (via fotosyntese og kjemosyntese) og nedbrytning av organisk materiale via oksisk mineralisering, denitrifikasjon, metall reduksjon, sulfat reduksjon og metandannelse. For å fremskaffe en detaljert fremstilling av skiftende redoks-betingelser, mineraliseres det organiske materialet i BROM gjennom flere forskjellige elektronakseptorer, og i disse prosessene forbrukes oksygen både under mineralisering av organisk materiale og oksydasjon av forskjellige reduserte forbindelser. Inhiberingen av de enkelte prosessene i henhold til redox-potensialet er parameterisert i BROM ved ulike redoks-avhengige brytere. BROM inneholder også en modul som beskriver karbonat likevekten. Dette gjør at BROM også kan benyttes for å undersøke forsuring og konsekvenser av pH-endringer og biogeokjemiske metningstilstander i vann og sediment. Modulen BROM-biogeokjemi består av 3 biogeokjemiske submoduler - BROM_bio (økologisk modell), BROM_redox (redoks prosesser) og BROM_carb (karbonat systemet).

Den fysiske delen i modulen BROM-transport inkluderer vannsøylen, bunngrensesjiktet og øvre lag av sedimentene på en kontinuerlig måte. Dette gjør det mulig med eksplisitt høyoppløselig representasjon av bunngrensesjiktet og de øvre sedimentene, samtidig som det muliggjør flytting av grensebetingelsene så langt som mulig bort fra disse fokusområdene, dvs. til grensesnittet mellom luft og sjø og dypt ned i sedimentet. BROM er bygd på en eksisterende modulplattform (FABM) og er derfor kodet som et sett med gjenbrukbare "Lego-brikker" som inkluderer en frakoplet transportdriver, dvs. BROM-transport og separate moduler for økologi, redokskjemi, og karbonatkjemi.

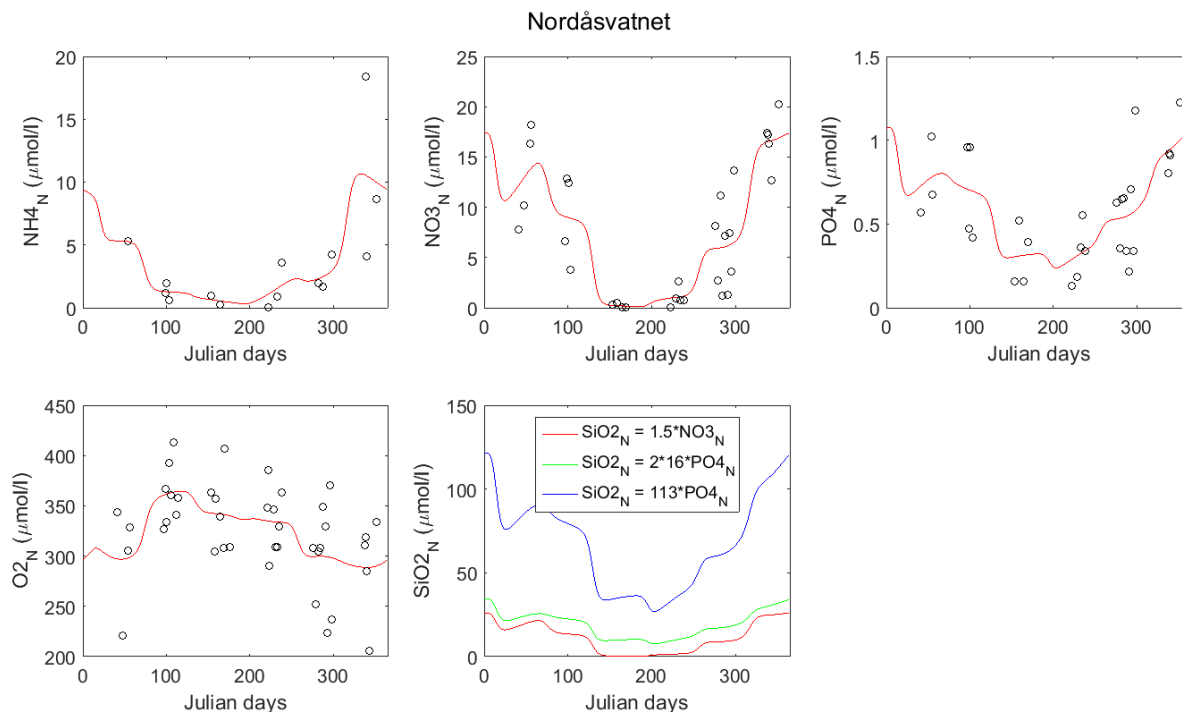
En detaljert beskrivelse av BROM finnes på: <http://www.geosci-model-dev-discuss.net/gmd-2015-239/>.

3.2 Grensebetingelser

For å kunne kjøre BROM-modellen for Sælenvatnet, er det nødvendig med inputdata som hydrografi og næringssalter fra Sælenvatnet. Ettersom feltmålingene tilgjengelig i dag ikke har høy nok oppløsning, hverken tidsmessig eller vertikalt, har feltmålingene gjort over tid blitt samlet og satt sammen til ett klimatologisk år. Disse dataene har blitt interpolert slik at datasettet vil ha målinger for hver dag i året. Dette er gjort for hydrografi og næringssalter fra Sælenvatnet og for næringssalter fra Nordåsvatnet. Data fra Sælenvatnet er fra overvåkning gjennomført av NIVA for Bergen kommune, mens data fra Nordåsvatnet er hentet fra <http://vanmiljo.miljodirektoratet.no/>. For Nordåsvatnet er det benyttet overvåkningsdata fra 1979, 1980-1984, 1990-1994 og 2004. Næringssalter fra overflatelaget i Nordåsvatnet vil i modellen representere næringsstoffene som vil transporteres inn i Sælenvatnet gjennom Sælenskanalen og vil derfor være en grensebetingelse i modellen. Tilsvarende vil næringssalter fra overflatelaget i Sælenvatnet være en grensebetingelse i modellen og også representere bidraget fra Sælanelva. Parameterne for næringssalter som er inkludert er Tot-N, Tot-P, PO₄-P, NO₃-N+NO₂-N, NH₄-N og SiO₂.



Figur 7. Interpolerte næringsstoffs-konsentrasjoner fra overflatelaget (0-3 m) i Sælenvatnet til juliensk dag i løpet av et klimatologisk år ved bruk av Gaussian-Kernel funksjonen. Beregningene er basert på data fra overvåking av Sælenvatnet gjennomført av NIVA for Bergen kommune i perioden 1997-1999, 2000-2002 og 2014.



Figur 8. Interpolerte næringsstoffs-konsentrasjoner for overflatelaget (0-3 m) i Nordåsvatnet til juliensk dag i løpet av ett klimatologisk år ved bruk av Gaussian-Kernel funksjonen. Beregningene er basert på data fra overvåking av Nordåsvatnet fra 1979, 1980-1984, 1990-1994 og 2004. Data er hentet fra <http://vanmiljo.miljodirektoratet.no/>.

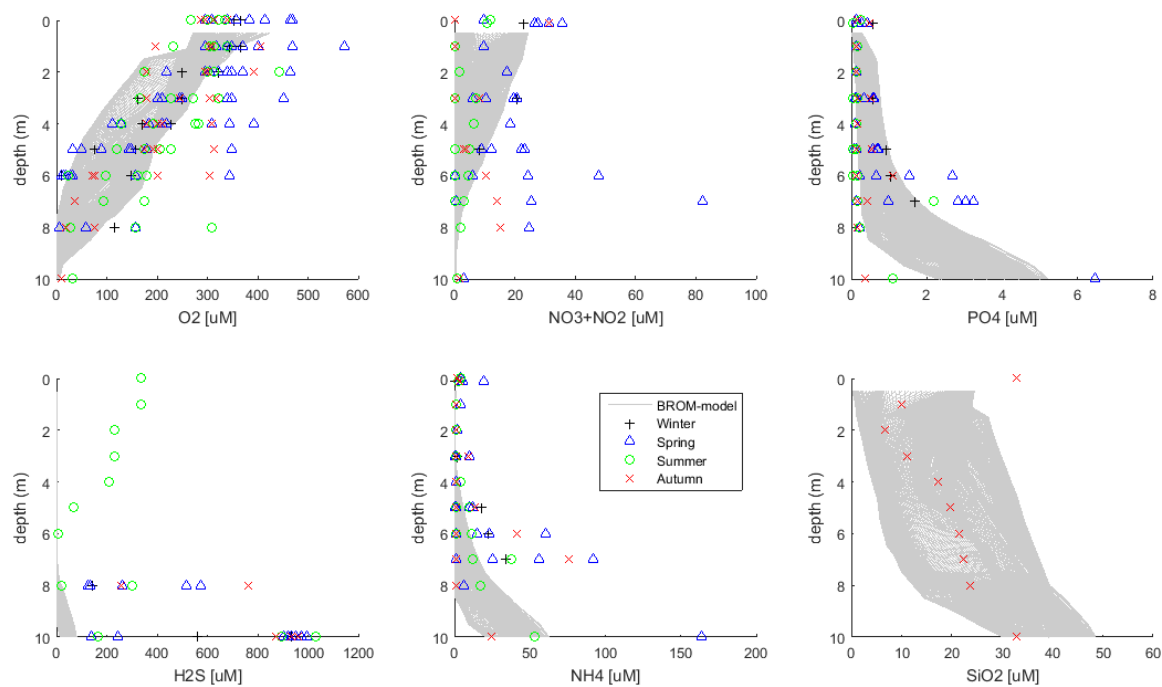
Målsetningen med BROM-modellen er å simulere de grunnleggende biogeokjemiske strukturene i Sælenvatnet og i hovedsak simulere dybden og dybdevariasjonen for grenseflaten mellom oksygenholdig og anoksisk vann gjennom sesongen og fra år til år. Utvekslingen av næringssalter fra kystvann inn gjennom Sælenkanalen og transport av næringssalter ut fra Sælenvatnet ut gjennom kanalen er inkludert i modellen. Prosesser knyttet til isdannelse i Sælenvatnet og sporadiske vintersituasjoner med innstrømming av tungt sjøvann som kan føre til oppstrømning av H₂S-holdig vann i Sælenvatnet, er imidlertid ikke inkludert i modellen. Det er dette fundamentet som har blitt brukt som bakgrunn for de numeriske forsøkene på å beregne hvordan den økte vannutskiftningen gjennom Sælenkanalen vil påvirke dybdeposisjonen for grenseflaten mellom oksygenholdig og anoksisk vann.

3.3 Resultater

BROM har blitt validert mot oksygenmålinger fra Sælenvatnet og tilfredsstilte det overordnede målet om at den skulle gi korrekte simuleringer av de sesongmessige oksygenvariasjonene (konsentrasjonsvariasjoner på ulike dyp). Modellen ga i tillegg tilfredsstillende resultater for dybdefordelingen av PO₄, NO₃+NO₂, NH₄, SiO₂ og H₂S i Sælenvatnet (**Figur 9**).

De sesongmessige variasjonene beregnet i modellen er presentert i **Figur 10**, mens det i **Figur 9** vises at modellen (grå profiler) gjenspeiler tilfredsstillende variasjonen i dypet. Det grå feltet representerer én profil for hver juliensk dag gjennom det klimatologiske året og viser dermed variasjonen gjennom et år i hvert dyp. BROM modellen sin sesongmessige variasjon når ikke opp til like høye maksimumskonsentrasjoner som målingene tatt i Sælenvatnet viser (fargede symboler).

Fordi kun den ferske, labile fraksjon av organisk materiale ble inkludert i kjøringene av BROM, vil de absolutte modellerte konsentrasjonene av H₂S på 10 m være lavere enn resultatene fra målingene.

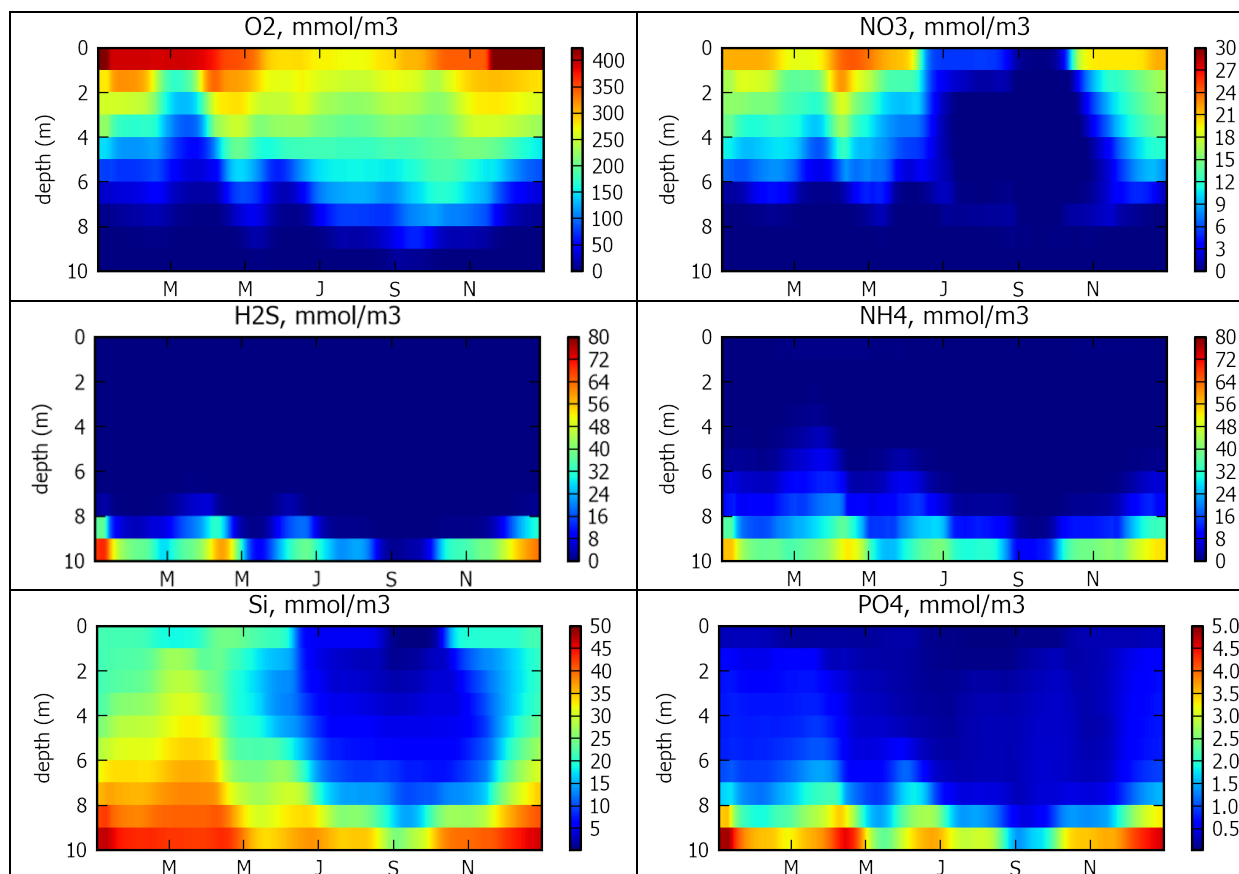


Figur 9. Modellert (grå linjer) og observert (fargede symboler) over sesongmessig variasjon i fordelingen av O₂, NO₃+NO₂, PO₄, H₂S, NH₄ og SiO₂ i Sælenvatnet.

BROM modellen har beregnet de sesongmessige variasjonene av O_2 , H_2S , Sum NO_3+NO_2 , NH_4 og PO_4 i Sælenvatnet gjennom et klimatologisk år (**Figur 10**). Det er kun de øvre 10 meterne av Sælenvatnet som er presentert, ettersom det ved større dyp er hydrogensulfid (H_2S) gjennom hele året. For O_2 er de høyeste konsentrasjonene i overflatelaget som er naturlig på grunn av gass-utvekslingen med atmosfæren over og fordi algene produserer oksygen under primærproduksjonen. Konsentrasjonene er høyest i begynnelsen av året og ved slutten av året. O_2 -laget er grunnest rundt mars. O_2 - H_2S grenseflaten er på sitt dypeste om sensommeren/høsten.

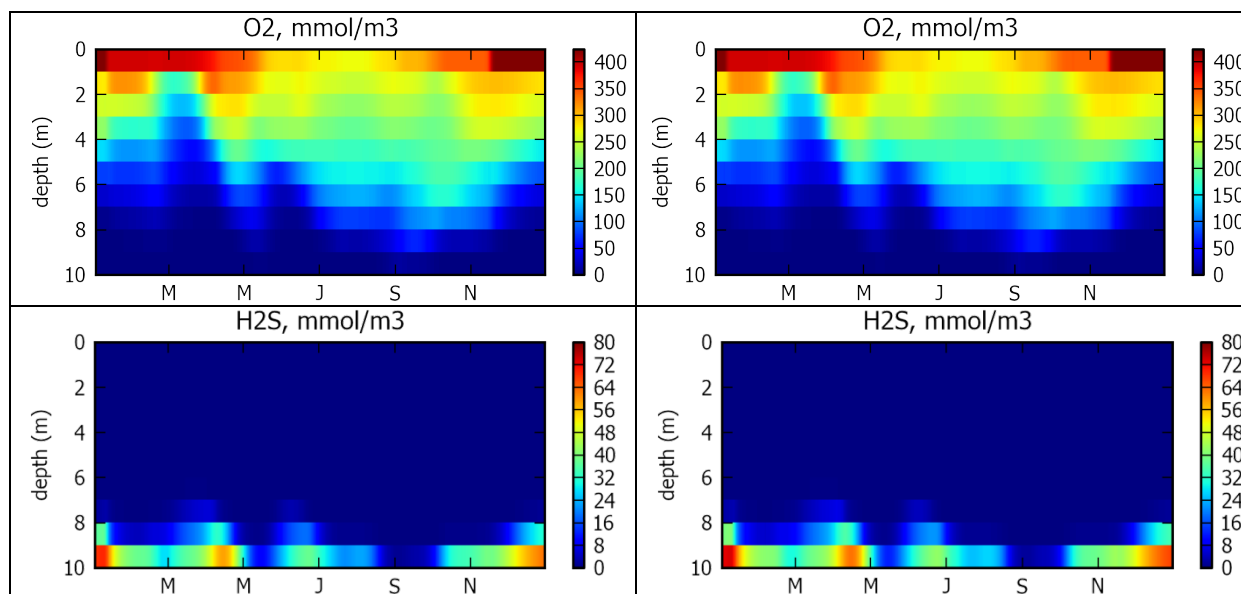
Silikatkonsentrasjonen (SiO_2) når høyest opp i vannsøylen i vårperioden mars-april med påfølgende lav konsentrasjon og liten vertikal utstrekning på høsten. Nitrat-nitritt (NO_3+NO_2) er begrenset til det øvre laget med høyest konsentrasjon og størst vertikal utstrekning om våren. Både ammonium (NH_4) og ortofosfat (PO_4) er begrenset til den nedre delen av 10-metersprofilen, som vil si i den øvre delen av H_2S -laget. I løpet av det klimatologiske året så har begge disse parameterne sin største vertikale utstrekning om våren.

Oppsummert kan en si at modellen simulerte på en tilfredsstillende måte de grunnleggende sesongmessige variasjonene i Sælenvatnet for alle de parameterne som inngikk i simuleringene.

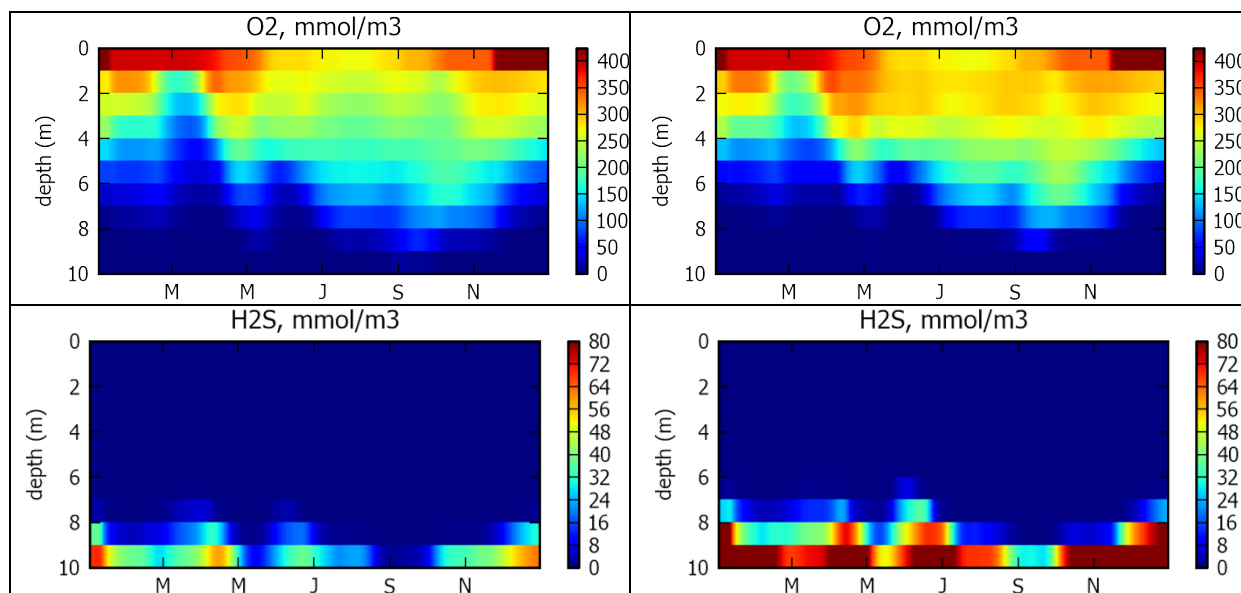


Figur 10. Den sesongmessige variasjonen av O_2 , H_2S , Si , NO_3+NO_2 , NH_4 og PO_4 gjennom et klimatologisk år i Sælenvatnet.

BROM-modellen er så brukt til å modellere utviklingen ved 20 og 400 % økning i den horisontale blandings hastigheten mellom vann fra Nordåsvatnet og Sælenvatnet. En finner da at det er ingen store endringer i hvilket dyp den oksisk-anoksiske grenseflaten befinner seg på når en sammenligner 20 og 400 % økning med dagens situasjon (**Figur 11** og **Figur 12**), men for tilfellet med 400 % økning gir beregningene høyere konsentrasjoner av O_2 i de øvre 4 m og høyere H_2S -konsentrasjoner i H_2S -laget omkring 8-10 m (**Figur 12**).



Figur 11. Sammenligning av den sesongmessige variasjonen av O_2 and H_2S . Dagens situasjon (venstre) og 20 % økt horisontal blandings hastighet (høyre).



Figur 12. Sammenligning av den sesongmessige variasjonen av O_2 and H_2S . Dagens situasjon (venstre) og 400 % økt horisontal blandings hastighet (høyre).

Variasjonen i dyp for hypoksiske forhold ($O_2 = 88 \mu M$), oksygenfritt ($O_2 = 3 \mu M$) og anoksiske forhold ($H_2S = 0,3 \mu M$) er beregnet i **Tabell 1** for dagens situasjon (basis-tilfellet), 20 % økt horisontal blandings hastighet og 400 % økt blandings hastighet mellom vann fra Nordåsvatnet og Sælenvatnet. Ved 20 % økning er det ingen endring av betydning i hvilket dyp disse grenseflatene vil være på. En økning i

horisontal blandingshastighet på 400 % vil gi en endring på ca. 0,1-0,7 m, og grenseflatene vil stort sett bli grunnere i følge beregningene gjort av modellen. En økt tilførsel av vann fra Nordåsvatnet i denne størrelsesorden er imidlertid ikke realistisk og er kun brukt som et eksempel på hvor stor økningen i innstrømning må være for at en skal se en endring av betydning.

Tabell 1. Endring fra dagens situasjon ved en 20 % og 400 % økning i den horisontale blandingshastigheten. Minimumsdyp, gjennomsnittsdyp og maksimumsdyp for 88 μM O_2 (hypoksiske forhold), 3 μM O_2 (oksygenfritt) og 0,3 μM H_2S (anoksiske forhold).

		Basis	20 %	400 %
88 μM O_2	Min	3,6	3,6	4,4
	Gj.snitt	6,1	6,0	6,0
	Maks	8,1	8,1	8,0
3 μM O_2	Min	7,4	7,3	6,6
	Gj.snitt	8,6	8,5	7,8
	Maks	10,0	9,9	9,4
0,3 μM H_2S	Min	8,0	7,9	6,9
	Gj.snitt	9,3	9,2	8,4
	Maks	10,6	10,5	9,9

Modelleringen i BROM er gjort med bakgrunn i hydrografidata fra Sælenvatnet i perioden fra 2010 til 2016. I størstedelen av denne perioden (fra mai 2010 til vinteren 2013/2014) har pumpen (aeratoren) som skyter ut en blanding av luft og vann med stor kraft, vært i drift i Sælenvatnet. Dette kan ha endret den vertikale diffusiviteten i 0 til 10-15 m laget og sørget for en senkning av H_2S -laget. Modellberegningene må derfor antas å representere situasjonen hvor pumpen (aeratoren) er i drift. For å gjøre beregninger av en situasjon uten drift av aeratoren, må det tas utgangspunkt i hydrografi fra Sælenvatnet fra tiden før aeratoren ble tatt i bruk. Likevel kan trolig den relative endringen beregnet her som følge av de benyttede prosentvise økninger i vanninnstrømningen gjennom Sælkanalen, være gyldig også for en situasjon uten aeratoren.

Beregningene fra BROM-modellen kan oppsummeres:

1. I Sælenvatnet er den sesongmessige variasjonen karakterisert med en volumendring av det anoksiske laget og en endring av dybdenivået til redox-grenseflaten. Sulfidgrenselaget varierer i løpet av sesongen med 2,6 m fra 8,0 til 10,6 m (**Figur 10**), og grenseflaten for hypoksiske vann varierer med 3-4 m, fra ca. 4 m til ca. 7-8 m.
2. Den planlagte endringen av Sælkanalen, som vil kunne gi økt maksimal innstrømning til Sælenvatnet, er beregnet til å gi en endring av redox-grenseflaten på 0,1-0,2 m. Dette er ikke signifikant sammenlignet med den beregnede (og observerte) sesongvariasjonen. En modellberegning av en storskala endring ser heller ikke ut til å gi en betydelig endring (**Tabell 1**).
3. Sælenvatnet kan oppleve sporadiske innstrømninger av kaldt, salt og oksygen-rikt vann om vinteren ved gunstige forhold (kald lufttemperatur, is, sirkulasjon/virvling (eddies) og vind) som ikke er parameterisert og inkludert i denne modellen. Slike hendelser kan føre til en fortrenkning av dypvannet i Sælenvatnet og en heving av det hydrogensulfidholdige vannet helt opp til overflaten. Effekten som utvidelsen av Sælkanalen har på slike hendelser, bør også analyseres, da med en mer kompleks modell som inkluderer de fysiske og kjemiske detaljene ved en slik hendelse.

4. Sammendrag og konklusjoner

Sælenvatnet i Fyllingsdalen i Bergen har dypvann med høy konsentrasjon av H₂S (hydrogensulfid). Ved innstrømning av tungt vann kan det gassholdige vannet løftes opp i vannsøylen og komme i kontakt med luft og H₂S frigjøres – noe som gir luktproblemer for de som bor nær Sælenvatnet. Fra 1950-tallet og frem til 1990-tallet hevet H₂S grensesjiktet seg fra å ligge mellom 5-7 m og opp til 2-4 m, men det er ikke funnet noen klar sammenheng for hva som var årsak til denne endringen.

Bergen kommune planlegger å utvide store deler av Sælenkanalen med 2 m i bredden og senke kanalbunnen til kote -1 for noen deler av Sælenkanalen. Norconsult har beregnet at ved en slik utvidelse vil dette kunne føre til en økning på 20 % for maksimalgjennomstrømning samt en reduisering av flomvannstanden med ca. 30 cm. I den forbindelse er det forsøkt å gi svar på om en økt maksinnstrømning vil føre til økt vertikal diffusjon og om en økt maksinnstrømning vil føre et dypereleggende grensesnitt mellom H₂S og oksygenrikt vann (redox).

Målinger fra 2010 til 2014 i Sælenvatnet viste at det i denne perioden forekom vannutskiftning i Sælenvatnet slik at vannmasser hvor det er forventet H₂S, har blitt hevet høyere opp i vannsøylen. I perioden 2010 til 2014 varierte saltholdigheten mellom 3 og 21 ppt i 2-5 m sjiktet i Sælenvatnet. På bakgrunn av saltholdigheten i overflatevannet (0-1,5 m), dvs. det vannet som transporteres fra Nordåsvatnet gjennom Sælenkanalen (0-2 m) og inn i Sælenvatnet, vil det innstrømmende vannet ved for eksempel de saltholdigheter som ble målt i Sælenvatnet i august 2015, kunne fortrenge vann på så store dyp at H₂S-holdig vann kan heves høyere opp i vannsøylen i Sælenvatnet.

Endringen i strømforholdet som følge av utvidelsen av Sælenkanalen er beregnet, og maksimal strømhastighet gjennom kanalen etter utgravning er estimert til 24 cm/s fra middel maksimalhastighet på 60 cm/s. Å blande vannmasser vertikalt betyr å gjøre arbeid mot tyngdekraften, og dette krever energi. I og med at det er H₂S i Sælenvatnet i dag, så tyder dette på at vinden og tidevannet ikke fører til effektiv blanding av vannmassene. Når strømhastigheten i kanalen går fra 60 til 24 cm/s og tverrsnittarealet økes 3 ganger, så betyr det at tilgjengelig energi for vertikal blanding reduseres med omtrent 50 %. Størsteparten av energien forsvinner til friksjon. Andelen som går med til å blande vannmassene, varierer mellom 1 og 15 %. Til tross for stor spredning i datamaterialet, så tyder data på at blandingseffektiviteten øker når forholdet mellom strømhastigheten (u) og fasehastigheten til en indre bølge (c) minker. Dette forholdstallet anslås å gå fra ca. 1,33 til ca. 0,53 før og etter utgravning av Sælenkanalen, og blandingseffektiviteten økes derfor fra 3,6 % til 5,4 %. Effekten av redusert tilgjengelig energi for blanding blir nesten balansert av at blandingseffektiviteten øker. På grunn av stor spredning i tallmaterialet så er det høyst usikkert om blandingsforholdene faktisk vil bli bedre eller dårligere etter kanalutvidelsen, og det vil si at det er vanskelig å si om den planlagte utvidelsen av Sælenkanalen vil redusere tettheten i dypvannet i Sælenvatnet og gi økt vannutskiftning.

En utvidelse av Sælenkanalen vil øke volumfluksen med 20 % etter beregning av Norconsult. En slik økning er beregnet til å kunne føre til en nedgang i oppholdstiden på 13 %.

I en situasjon med en 20 % økning i den horisontale blandingshastigheten viste beregninger fra BROM-modellen at grenseflaten mellom oksygen- og hydrogensulfidholdig vann ikke endres vesentlig og vil i liten grad påvirke antallet tilfeller hvor H₂S-holdig vann kommer opp til overflaten.

En økning i den horisontale blandingshastigheten på 400 % vil gi en endring på ca. 0,1-0,7 m for grenseflatene som stort sett vil bli grunnere i følge beregningene gjort av modellen. En økt innstrømning av denne størrelsesorden er ikke realistisk og er kun brukt som et eksempel på hvor stor økningen i innstrømning må være for å kunne gi en endring av en viss størrelse. Modelleringen i BROM er gjort med bakgrunn i hydrografidata fra Sælenvatnet i perioden fra 2010 til 2016 hvor pumpen (aeratoren) i Sælenvatnet har sugd ned og blandet inn luft i vannet og samtidig satt vannet i kraftig bevegelse. Dette kan ha endret den vertikale diffusiviteten i 0 til 10-15 m laget og sørget for en senkning av H₂S-laget. Likevel kan trolig den relative endringen beregnet her også relateres til en situasjon uten aeratoren i drift.

5. Litteratur

- Golmen, L.G., Hobæk, A., & Johnsen, T.M. 1995. Hydrogensulfid i Sælenvatnet i Bergen, Vurdering av foreslåtte tiltak for å eliminere luktplager. NIVA-rapport 3322-1995, 50 sider.
- He, Y., Stanev, E.V., Yakushev, E. & Staneva, J. 2012. Black Sea biogeochemistry: Response to decadal atmospheric variability during 1960-2000 inferred from numerical modeling, *Mar. Environ. Res.*, 77, 90–102, doi:10.1016/j.marenvres.2012.02.007.
- Holvik, I.S. 2011. Vurdering av hydraulisk kapasitet ved en evt. utvidelse av Sælenkanalen. Norconsult notat 2011-09-04, 11 sider.
- Stanev, E.V., He, Y., Staneva, J. & Yakushev, E. 2014. The Black Sea biogeochemistry: focus on temporal and spatial variability of oxygen, *Biogeosciences Discuss.*, 11(1), 281–336, doi:10.5194/bgd-11-281-2014.
- Stigebrandt, A., & Aure, J. 1989. Vertical mixing in basin water of fjords. *Journal of physical oceanography*, 19(7), 917-926.
- Yakushev, E., Pakhomova, S., Sørensen, K. & Skei, J. 2009. Importance of the different manganese species in the formation of water column redox zones: Observations and modeling, *Mar. Chem.*, 117(1-4), 59–70, doi:10.1016/j.marchem.2009.09.007.
- Yakushev, E. V., Pollehne, F., Jost, G., Kuznetsov, I., Schneider, B. & Umlauf, L. 2006. Redox Layer Model (ROLM): A Tool for Analysis of the Water Column Oxidic/anoxic Interface Processes, Warnemünde.
- Yakushev, E. V., Pollehne, F., Jost, G., Kuznetsov, I., Schneider, B. & Umlauf, L. 2007. Analysis of the water column oxidic/anoxic interface in the Black and Baltic seas with a numerical model, *Mar. Chem.*, 107(3), 388–410, doi:10.1016/j.marchem.2007.06.003.
- Yakushev, E. V., Kuznetsov, I. S., Podymov, O. I., Burchard, H., Neumann, T. & Pollehne, F. 2011. Modeling the influence of oxygenated inflows on the biogeochemical structure of the Gotland Sea, central Baltic Sea: Changes in the distribution of manganese, *Comput. Geosci.*, 37(4), 398–409, doi:10.1016/j.cageo.2011.01.001.

NIVA: Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

NIVA gir offentlig vannforvaltning, næringsliv og allmennheten grunnlag for god vannforvaltning gjennom oppdragsbasert forsknings-, utrednings- og utviklingsarbeid. NIVA kjennetegnes ved stor faglig bredde og godt kontaktnett til fagmiljøer i inn- og utland. Faglig tyngde, tverrfaglig arbeidsform og en helhetlig tilnæringsmåte er vårt grunnlag for å være en god rådgiver for forvaltning og samfunnsniv.



Norsk institutt for vannforskning

Gaustadalléen 21 • 0349 Oslo
Telefon: 02348 • Faks: 22 18 52 00
www.niva.no • post@niva.no