

RAPPORT LNR 4112-99

Vurdering av tiltak for å
sikre vannkvalitet etter
utbygging av E 18 i
senketunnel gjennom
Bjørvika og Bispevika

Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internet: www.niva.no

Sørlandsavdelingen

Televeien 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 37 29 50 55
Telefax (47) 37 04 45 13

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 62 57 64 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5008 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-NIVA A/S

9015 Tromsø
Telefon (47) 77 68 52 80
Telefax (47) 77 68 05 09

Tittel Vurdering av tiltak for å sikre vannkvalitet etter utbygging av E18 i senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika.	Løpenr. (for bestilling) LNR 4112-99	Dato 25.10.99
	Prosjektnr. Undernr. O-99060	Sider Pris 32
Forfatter(e): Morten Schaanning, Birger Bjerkeng, Lars Golmen, Jan Magnusson og Arild Sundfjord	Fagområde 32	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Oslo	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Aas Jakobsen A/S	Oppdragsreferanse Snorre Slappgård
--------------------------------------	---------------------------------------

<p>Sammendrag</p> <p>En senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika vil redusere vannutskiftingen i områdene innenfor. Dårligere vannutskifting kan resultere i oksygenmangel og episodisk fiskedød. Målsettingen med dette arbeidet har vært å vurdere eksisterende planforslag og mulige tiltak for å sikre tilstrekkelig vannkvalitet etter utbygging. Vannutskiftingen vil først og fremst begrenses av skipsstøtvollene som skal anlegges på utsiden av tunnelen. Rapporten skisserer aktuelle tiltak som oppfylling og heving av sjøbunnen innenfor skipsstøtvollene, lavest mulig overhøyde mellom tunneltak og sjøbunn, vannutskifting gjennom skipsstøtvollene via kanaler, rør og permeable masser og nedpumping av ferskvann gjennom diffusorer ved bunnen. Vurderingene er basert på hydrografiske observasjoner utført i Bjørvika sommeren 1999.</p>
--

<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> vannutskifting terskelfjord oksygenmangel hydrografi 	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> water renewal sill fjord oxygen deficiency hydrography
--	--


Morten Schaanning
Prosjektleder

Forskningsleder
ISBN 82-577-3721-6


Bjørn Braaten
Forsknings sjef

Forord

Statens Vegvesen, Oslo, skal bygge veitunnel gjennom Bjørvika og Bispevika i indre Oslo havn. I den forbindelse er NIVA engasjert av Aas-Jacobsen A/S for å foreta en vurdering av effekter på vannkvalitet. Denne rapporten presenterer feltobservasjoner fra Bjørvika sommeren 1999 og gir en vurdering av effekter og behov for tiltak på grunnlag av disse observasjonene og nylig reviderte planer for utbygging. Rapporten vil dels erstatte og dels komplettere notat utarbeidet av NGI og NIVA i juni dette år.

Oslo, 25. oktober 1999

Morten Schaanning

Innhold

Sammendrag	5
1. Innledning.	8
2. Topografi og reviderte planer for skipsstøtvoller og tunnel	9
3. Vannutskiftningen i området.	13
3.1. Måleprogrammet i 1999	14
3.1.1. Siktedyp	14
3.1.2. CTD-observasjoner	14
3.1.3. Måling med T/S kjede	15
3.2. Måleresultater	15
3.2.1. Siktedyp	15
3.2.2. CTD-målinger	17
3.2.3. Oksygen	17
3.2.4. T/S-målinger	20
4. Diskusjon	21
4.1. Beregning av vannutskiftning ut fra de hydrografiske observasjonene.	21
4.2. Transportkapasiteten i kanalene til Bjørvika og Bispevika	22
4.2.1. Innledning - forutsetninger for beregningene	22
4.2.2. Modell for trykkdrevet transport	23
4.2.3. Resultater	25
5. Konklusjoner.	29
5.1. Bjørvika.	29
5.2. Bispevika.	29
5.3. Generelt.	30
6. Forslag til videre oppfølging	31
7. Referanser	32

Sammendrag

Bakgrunn og målsetting

Statens vegvesen, Oslo, planlegger fremføring av E18 i senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika. For å hindre sammenstøt fra skipstrafikken må tunnelen beskyttes med skipsstøtvoller som skal etableres mellom tunnelen og fjorden utenfor. Overkant av skipsstøtvollene vil danne terskler som begrenser utskiftingen av dypvannet innenfor anlegget. Målsettingen med NIVAs engasjement i dette arbeidet har vært å vurdere hvordan de planlagte konstruksjonene vil påvirke vannutskiftingen og oksygenforholdene i området etter utbygging. I teknisk notat fra NGI/NIVA 30.06.99 ble det skissert en del mulige tiltak. I løpet av sommeren er planene revidert på en slik måte at vannutskiftingen vil bli vesentlig bedre. I denne rapporten gjøres en mer inngående vurdering av vannutskiftingen i området basert på målinger utført i Bjørvika i perioden 30.04. til 17.08.99 og de reviderte planene for utbygging.

Målsetting for vannkvalitet etter utbygging

Miljømålene er valgt i henhold til SFT's vannkvalitetskriterier "egnet for fritidsfiske". Denne normen regner et oksygeninnhold i bunnvannet på mer enn 2,5 ml/l for "egnet", og mer enn 4 ml/l for "godt egnet" til fritidsfiske. Målinger utført med sonde sommeren 1999 (se under) indikerte at oksygenforholdene nær bunnen i Bjørvika var noe dårligere enn forventet i forhold til overvåkingsdata fra andre deler av havnebassenget. Det kan ikke forventes at utbyggingen skal bedre forholdene i resipienten i forhold til dagens situasjon. Derfor synes en målsetting på 2,5 mlO₂/l ("egnet") mest realistisk og samtidig tilstrekkelig til å unngå episoder med sjenerende lukt og fiskedød. Fjerning eller tildekking av forurensede sedimenter i Bjørvika og Bispevika antas å medføre en reduksjon av oksygenforbruket lokalt i forhold til dagens nivå, og en generell bedring av vannkvaliteten i fjorden utenfor havnebassenget vil kunne føre til økende oksygeninnhold i tilførselsvannet. For å få et sikrere grunnlag for vurdering av forholdene før utbygging anbefales at oksygenforholdene kartlegges med mer nøyaktige, kjemiske metoder (Winkler-titrering).

Observasjoner sommeren 1999

Målinger utført i Bjørvika viste temperaturvariasjon fra 5 til 20°C. Oppvarmingen denne sommeren gikk helt ned til bunnen på 8 m dyp. Påvirkning fra Akerselva ble observert i et ca 1 m tykt overflatelag med lave saltholdigheter (7-10) over et sprangskikt mellom 1 og 2 m dyp. Denne lagdelingen ble svekket i siste halvdel av juli. Nær bunnen var det også betydelige variasjoner i saltholdighet (16 til 26). Disse variasjonene indikerte god vannutskifting med fjorden utenfor. Siktedypet varierte mellom 1 og 5 meter og oksygenminima målt med sonde i dypvannet varierte mellom 2,3 og 4,4 ml/l. I henhold til SFT's miljøkvalitetskriterier var siktedypet "dårlig" og oksygenforholdene "mindre gode". Målinger av oksygen med sonde er imidlertid usikre og lå 1-2 ml/l lavere enn typiske konsentrasjoner i tilsvarende dyp i Bekkelagsbassenget.

Temperatur- og saltholdighet-sensorer plassert på faste punkter i vannmassen viste korttidsvariasjoner ofte i størrelsesorden 1 dag eller mer. Målingene indikerte gjennomsnittlige transporter på 1,2-1,3 m³/s i dypvannet under 4 m, og karakteristiske utskiftingstider fra mindre enn ett døgn opp til 5-6 døgn.

I tidligere notat har vi beregnet at vannutskifting 2x pr uke ville være tilstrekkelig for å tilfredstille kravet på 4 mlO₂/l. Beregningen var basert på antatt oksygenforbruk i sedimentet på 1 mmolO₂/m²·h og oksygeninnhold 5,6 ml/l i innstrømmende vann. Feltundersøkelsene har vist at utskiftingshastigheten før utbygging ligger omtrent i denne størrelsesorden, men at et mer realistisk scenarie vil være at det innstrømmende vannet ikke inneholder mer enn i snitt ca 4 mlO₂/l. En vannutskifting på 2x pr uke vil med samme forutsetninger forøvrig, gi et oksygen-nivå på ca. 2,5 ml/l på innsiden av

tunnelen. Selv om det antatte oksygenforbruket ble satt noe høyt i forhold til det som kan forventes etter fjerning eller tildekking av de forurensede sedimentene innenfor skipsstøtvollene, vil en i de mest kritiske periodene kunne få mindre enn 4 mlO₂/l i tilførslesvannet. Det synes derfor klart at marginene er små og at akseptable oksygennivåer bare kan opprettholdes dersom utbyggingen skjer uten vesentlig reduksjon av utskiftingshastigheten.

Reviderte utbyggingsplaner

Ifølge de reviderte utbyggingsplanene (per september 1999) skal skipsstøtvollen i Bispevika bygges med overkant på 2m dyp (-2m). Vannutskiftingen skal avhjelpes med en trapesformet kanal med antatt bredde 12 m ved skipsstøtvollen (-2 m) og 3 m ved bunnen (-7,3 m). Kanalen legges delvis innunder kaia på Sorenga. I Bjørvika skal skipsstøtvollens overkant ligge på 4 m dyp over det meste av bukta. Tilsvarende som for Bispevika tenkes vannutskiftingen avhjulpet med en trapesformet kanal langs Bjørvikautstikkeren med bredde 12 m i 4m dyp og 3m ved bunnen. På vestsiden av Bjørvika stiger tunneltaket til 2-3 m dyp. På begge sider etableres skipsstøtvoller med dyp 2m. Dermed dannes to små bassenger som krever separate løsninger for vannutskifting. Selve tunnelen har etter de reviderte planene liten overhøyde i forhold til sjøbunnen innenfor. Det er vanskelig å forutsi effektene av en overhøyde på 1-2 m, men generelt anbefales at overhøyden gjøres så liten som mulig over så store deler av tverrsnittet som mulig.

Vannutskifting gjennom kanalene

Vannutskiftingen vil drives av forholdene i fjorden utenfor skipsstøtvollene ved at det bygges opp horisontale tetthetsgradienter gjennom kanalene. Når tettheten øker på utsiden vil vann presses inn gjennom kanalene. Omvendt vil vann strømme ut gjennom kanalene når tettheten avtar. Jo større tetthetsforskjellene blir, og jo raskere tetthetsforskjellene bygges opp, jo større blir strømhastigheten gjennom kanalene. For å vurdere hvordan kanalene vil påvirke vannutskiftingen i hovedbassengene i hhv Bjørvika og Bispevika, ble det utviklet en beregningsmodell for tetthetsdrevet transport gjennom kanalene. Beregninger med modellen viste at det kan bli vesentlig demping av den del av utskiftningen av vannet under 6 m dyp i Bjørvika som i dag er knyttet til raske svingninger i tetthetsflatene, dvs. med utskiftningsstider 3 døgn eller mindre. Her kan det bli en merkbar reduksjon av utskiftningen. En utskiftningshyppighet på 1 gang per uke bør kunne oppnås, men det er mer tvilsomt om en oppnår 2 ganger pr. uke med den skisserte kanalen alene uten å sirkulere bassenget ved f.eks. nedpumping av ferskvann. En annen mulig løsning er å legge inn rør i bunnen av fyllingen i tillegg til den skisserte kanalen, med til sammen 6 m² tverrsnitt. For Bispevika vil en kanal som skissert gi ganske god utskiftning, og lite demping av vertikale svingninger, og her bør målsettingen om utskiftning 2 ganger per uke være realistisk uten kunstig sirkulasjon. I begge bassenger bør det legges inn nødvendige rørforbindelser under bygging av tunnelen, som forberedelse til nedpumping av ferskvann dersom det skulle vise seg nødvendig.

Konklusjoner

Kanalene med de antatte tverrsnittene synes således å kunne gi en tilfredsstillende løsning med hensyn til vannfornyelsen i Bispevika, og det gjelder også Bjørvika dersom en kan legge inn noen rør i bunnen av nedre del av skipsstøtvollen i tillegg til den skisserte kanalen. Det må imidlertid tas forbehold om at usikkerhetene er betydelige både vedrørende oksygenforbruk og de fysiske beregningene av vannutskiftingen. Dessuten er oksygenforholdene dårlige i utgangspunktet, noe som gjør at det er relativt små marginer før kritisk lave nivåer inntreffer. Det vil derfor være nødvendig å ha en plan for hvordan vannutskiftingen skal kunne bedres dersom det i ettertid viser seg at oksygenforholdene blir uakseptabelt dårlige, og hensiktsmessige tiltak, som f.eks. rørforbindelser for nedpumping av ferskvann fra Akerselva, bør tilrettelegges/forberedes ved bygging av tunnelen.

Den enkleste løsningen vil trolig være pumping av vann fra Akerselva og ut gjennom diffusorer nær bunnen, først og fremst i Bjørvika, men det kan ikke utelukkes at et slikt tiltak også vil bli nødvendig for å oppnå tilfredsstillende vannutskifting i Bispevika.

Forholdene i det lille bassenget innenfor tunnelen vest i Bjørvika vil trolig kunne få en tilfredsstillende vannkvalitet ved en forbindelse gjennom to eller flere rør (diameter 1,2m) gjennom skipsstøtvollen nær bunnen. Forholdene i det lille bassenget på utsiden av tunnelen vil ikke representere noe problem dersom den planlagte kanalen langs kaikanten vest i Bjørvika gjøres tilstrekkelig dyp (-8m).

Prinsipielt kan best mulig vannkvalitet sikres ved

- oppfylling av dype områder der hvor dette er mulig
- overhøyde mellom tunneltak og sjøbunnen innenfor gjøres minst mulig over størst mulig strekning
- kanalene gjennom skipsstøtvollene gjøres så brede som mulig, særlig ved bunnen
- kanalene suppleres så mye som mulig med rørgjennomføringer og/eller permeable masser

Anbefalt overvåking

For å kunne gi sikrere råd før anlegget virkeliggjøres, og kunne følge med eventuelle effekter av tunnelanlegget når det er ferdig, bør det opprettes et overvåkingsprogram snarest slik at en kan få en statistisk sett tilstrekkelig dokumentasjon av forholdene før byggearbeidene starter. Denne overvåkingen bør starte i år 2000. Hensikten er å sikre seg bedre kjennskap til området enn en har i dag, og derved gi grunnlag for å kunne bedømme eventuelle forandringer i miljøet når tunnelen og barrierene er på plass. Et slikt måleprogram vil omfatte observasjoner av siktedyp, sjiktning, oksygen samt måling av strøm over en lengre periode. Oksygen må måles med presisjonsanalyser (Winkler) og ikke bare med sonder.

1. Innledning.

Statens Vegvesen, Oslo, skal bygge veitunnel gjennom Bjørvika og Bispevika i indre Oslo havn. I tidligere NIVA-rapporter (Berge og Molvær, 1994, Sundfjord et al., 1999) og NGI/NIVA-notat (Hauge og Schaanning, 1999) var den viktigste forutsetningen for vurdering av vannkvalitet, at det skulle bygges skipsstøtvoller med seilingsdyp 2 m mellom tunnelen og havneområdet utenfor. I løpet av sommeren 1999 er planene endret slik at skipsstøtvollene kan senkes til 4 m seilingsdyp over det meste av Bjørvika, mens barrieren på 2 m opprettholdes tvers over Bispevika. I tillegg til dette bortfaller den tidligere kanalen med seilingsdyp 4 m inn til Bjørvika så vel som skipsstøtvollen innenfor tunnelen i Bjørvika. Dette medfører et åpnere system med mindre oppstyking til småbassenger mellom tunnelen og skipsstøtvollene.

Skipsstøtvollene vil påvirke vannutskiftingen og gi risiko for stagnerende vannmasser innenfor konstruksjonen. Dette kan føre til oksygenmangel og dannelse av hydrogensulfid (råttent vann) nær bunnen. Fiskedød som følge av oksygenmangel i vannmassene har så sent som i 1995 vært observert i havnebassenget og Bekkelagsbassenget (Magnusson et al., 1996).

Berge og Molvær (1994) fant at vannutskiftingen ville bli redusert både i øvre lag og i dypvannet i de innelukkede områdene. I dypvannet var det antatt at det fort ville oppstå dårlig vannkvalitet, med stor risiko for periodevis dannelse av hydrogensulfid. I øvre lag ble det ikke forventet noen spesiell forverring av forholdene. En del mulige tiltak som kan øke vannutskiftingen ble også vurdert. Den siste utredningen (Sundfjord et al., 1999, Hauge og Schaanning, 1999) beregnet behovet for vannutskifting på grunnlag av estimert oksygenforbruk og en miljømålsetting for oksygen i bunnvannet på minimum 4,0 ml/l. Videre ble det skissert tre alternative tiltak for å avbøte stagnasjonsproblemene:

1. Gjenfylling av de delene av området som ikke får tilfredsstillende utskifting på "naturlig" vis.
2. Direkte utskifting (gjerne ved pumping) av sjøvann inn bak støtvoll/tunnel, eller pumping av vann ut slik at nytt vann strømmer inn over anlegget som kompensasjon.
3. Injeksjon av ferskvann gjennom diffusor ved bunn for å redusere tettheten i bunnvannet og dermed bedre utskiftingen med nytt vann som tilføres utenfra over skipsstøtvollene.

I tillegg ble det vurdert rørgjennomføringer for å løse problemene i flere av de mindre bassengene mellom skipsstøtvollene og tunnelen.

I løpet av våren og forsommeren 1999 er det foretatt målinger i sjøen i Bjørvika for å beskrive forholdene lokalt samt fremskaffe et bedre grunnlag for hydrofysiske beregninger. Både målingene og resultatene av nye beregninger er presentert her, i tillegg til vurdering av det endrete planforslaget med foreslåtte tiltak for sikring av vannkvalitet.

2. Topografi og reviderte planer for skipsstøtvoller og tunnel

Bjørvika og Bispevika er to bassenger i Oslo indre havn som har åpen forbindelse med havnebassenget og fjorden utenfor. Mellom bassengene er utløpet av Akerselva, som er den eneste ferskvannstilførselen i området. Bassengene er 7-9 meter dype og har i dag ingen terskler som begrenser vannutskiftingen.

Prinsippskisse av det reviderte planforslaget for senketunnelen med skipsstøtvoller er vist i Figur 1. Tilsvarende prinsippsskisser av de viktigste tverrsnittene av tunnel og skipstøtvollen gjennom Bjørvika er vist i Figur 2 - Figur 4. Beregnede flateareal og underliggende vannvolum for ulike dyp er vist i Tabell 1. For Bjørvika er maks. dyp angitt til 12,1 m i tabellen, det gjelder et mindre område mellom tunneltraseen og skipsstøtvollen i følge nåværende topografi. En viktig forskjell fra tidligere alternativer er at tunnelen i større grad legges ned i sedimentene slik at overhøyden i forhold til bunnen innenfor er blitt langt mindre over store deler av begge bassengene. I tillegg er skipsstøtvollen senket fra 2 til 4 m dyp i Bjørvika og det er skissert muligheter for å skjære gjennom barrierene med kanaler langs kaikantene.

Bjørvika

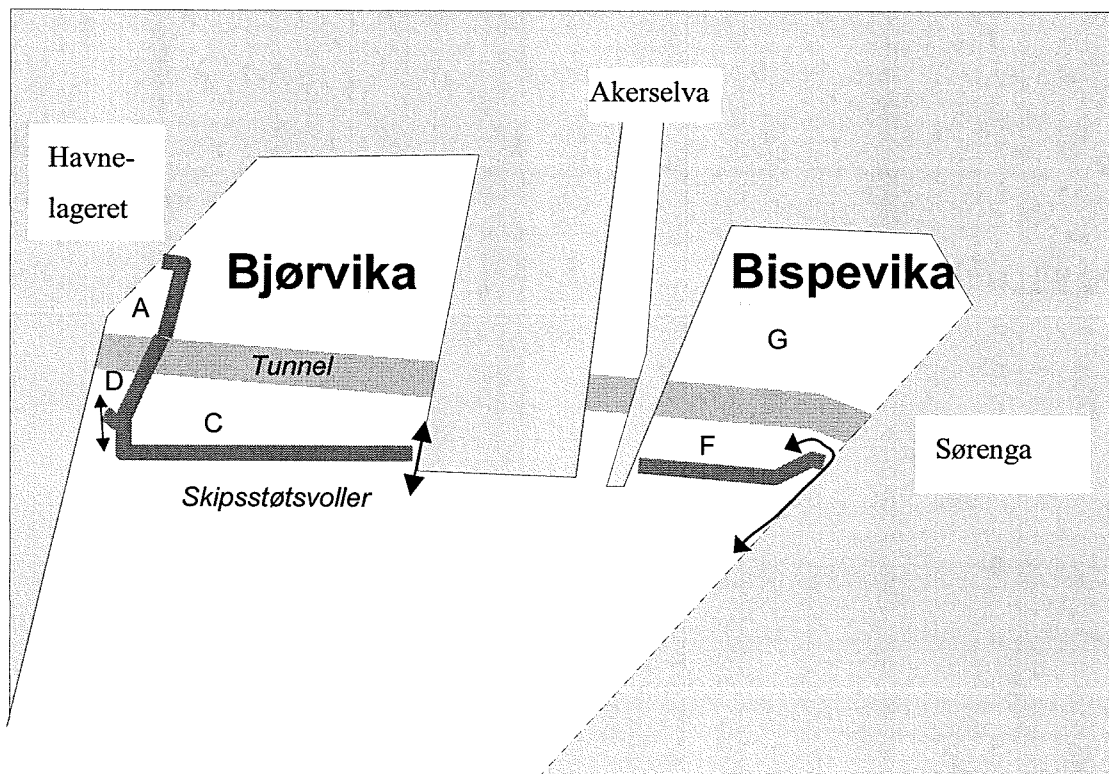
Skipstøtvollen på innsiden av tunnelen i Bjørvika er fjernet helt og dypet ned til overkant av skipstøtvollen er øket fra 2 til 4 m. Tverrsnittsarealet fra overflate til 4 meters dyp (ca. 990 m²) blir lite påvirket av utbyggingen. Utskiftingen i 0-4m laget vil bli tilsvarende lite påvirket.

I tillegg er det skissert muligheter for en kanal inn til Bjørvika ned til ca. 8 meters dyp på østsiden av Bjørvika, delvis innunder kaia. Kanalen vil danne en viktig forbindelse for utskifting av vannmassene i Bjørvika og med det tidligere innelukkede området mellom den ytre vollen og tunnelen. Kanalen ved utstikkeren i øst antas i denne rapporten å bli trapesformet med en bredde på 3 m i 8 m dyp og 12 m i 4 m dyp. Dette gir et tverrsnittsareal på 30 m² for kanalen gjennom skipstøtvollen i Bjørvika.

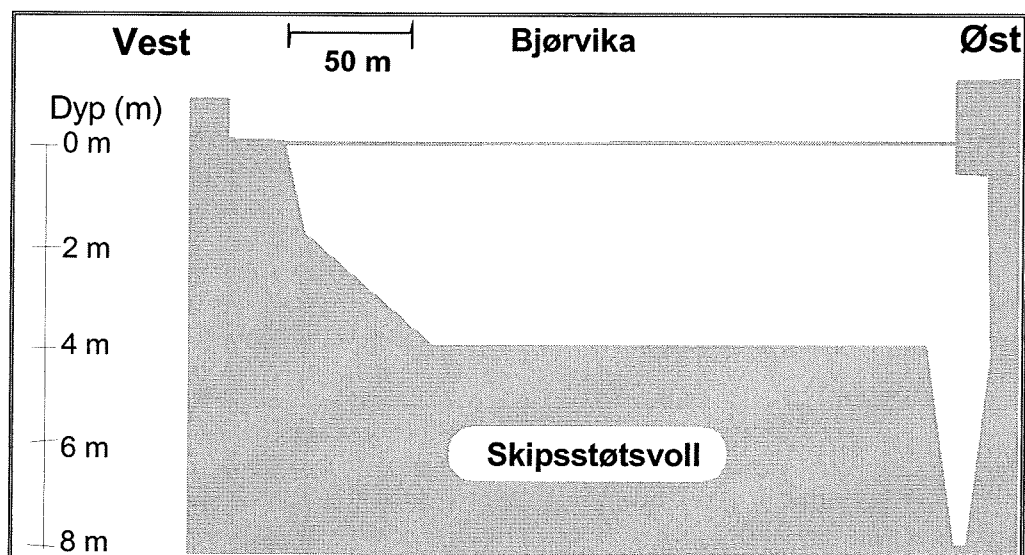
Tverrsnittet over selve tunnelen er vist i Figur 3. Hele tverrsnittsarealet for vanngjennomstrømning over tunnelen er større enn for barrieren og i utgangspunktet blir dimensjonene for skipstøtvollen den begrensende faktoren for gjennomstrømning.

Område C (Figur 1) som tidligere var et problemområde inntengt mellom tunnelen og skipstøtvollen vil nå få en relativt åpen kommunikasjon med resten av Bjørvika og et område B (se Sundfjord et al., 1999) som tidligere lå mellom tunnelen og indre skipstøtvoll bortfaller helt.

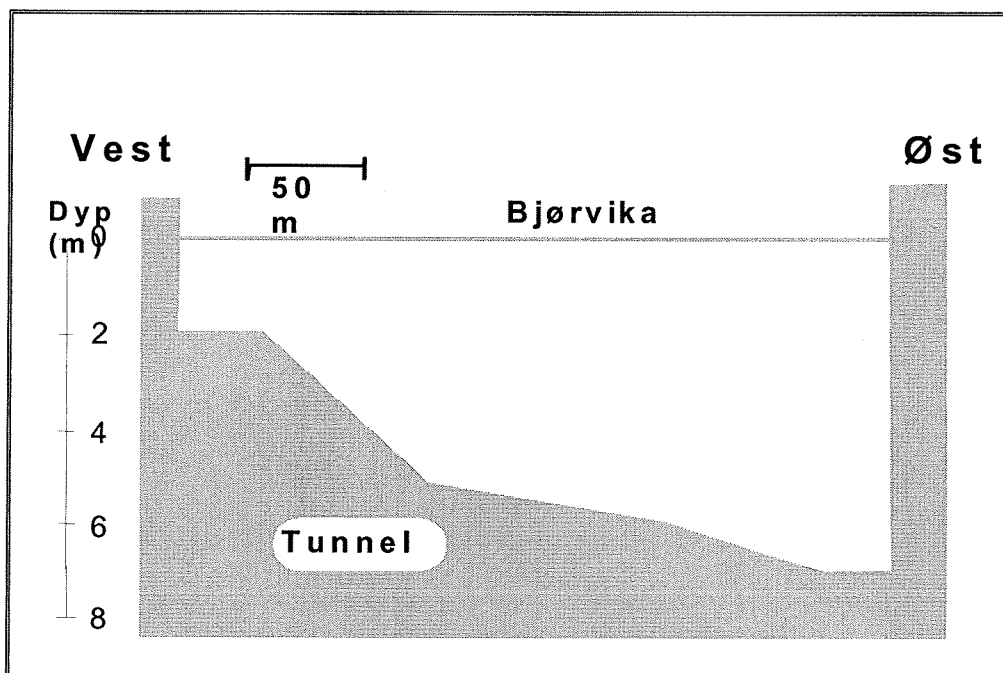
To områder er fortsatt innelukkede "poller". Det er område A og D i Figur 1 som er innelukket av voller opp til 2 meters dyp. Område A har et areal på 1.600 m² og et volum på 11.400 m³ under 2 meters dyp. Det er foreslått at område A forbindes med Bjørvikabassenget gjennom 2 rør nær bunnen med diameter 1,2 m. Område D har et overflateareal på 140 m² og et volum på 1.800 m³ under 2 meters dyp. Det er foreslått at område D forbindes med fjorden utenfor gjennom en kanal nær kaikanten ved Havnelageret.



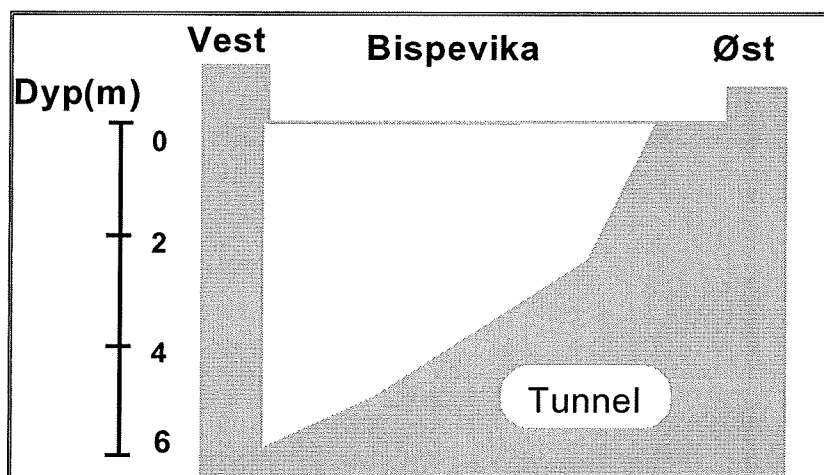
Figur 1. Forenklet skisse av tunnel og skipsstøttsvoller og plassering av kanaler for økt gjennomstrømning (illustrert med piler).



Figur 2. Tverrsnitt av skipsstøttsvollen i Bjørvika med kanal plassert delvis under Bjørvikaautstikkeren. Grov skisse.



Figur 3. Tverrsnitt av tunneltaket gjennom Bjørvika. Grov skisse.



Figur 4. Tverrsnitt over tunnel i Bispevika. Grov skisse.

Tabell 1. Areal- og volumforhold innenfor skipsstøtvollene for Bjørvika og Bispevika for eksisterende plan, beregnet ut fra dagens topografi.

	Dyp (m)	Areal (m ²)	Volum under gitt dyp (m ³)
Bjørvika	0	82 500	514 600
overkant av skipsstøtvoll:	4	68 400	212 800
	6	53 600	90 800
største dyp over tunnelen	7		
kanaldyp:	8	19 500	17 700
	9	5 700	5 100
	10	1 400	1 500
	12.1	0	
Bispevika	0	49 900	258 500
overkant av skipstøtvoll:	2	48 700	159 900
	4	37 000	74 200
største dyp over tunnelen:	6	23 000	14 200
	7	3 800	800
kanaldyp	7.4	0	

Bispevika

Senkingen av tunnelen påvirker også Bispevika. Tverrsnittet over tunnel-taket er vist i Figur 4. Totalt tverrsnittsareal er ca. 390 m², hvorav tverrsnittsarealet under 2.5 meters dyp er på 158 m², og det er åpning ned til 6 m dyp på vestsiden.

Skipsstøtvollen er ikke forandret og med dybde fortsatt på -2 m er det denne som vil begrense vannutskiftingen. Imidlertid er det skissert en kanal inn til området mellom vollen og kaia ved Sørenga (Figur 1). Den skisserte kanalen er i denne rapporten antatt trapesformet med 12 m bredde i 2 m dyp og 3 m bredde ved bunnen (7,4 m dyp). Dette gir et tverrsnittsareal for kanalen gjennom skipsstøtvollen i Bispevika på 40,5 m².

3. Vannutskiftningen i området.

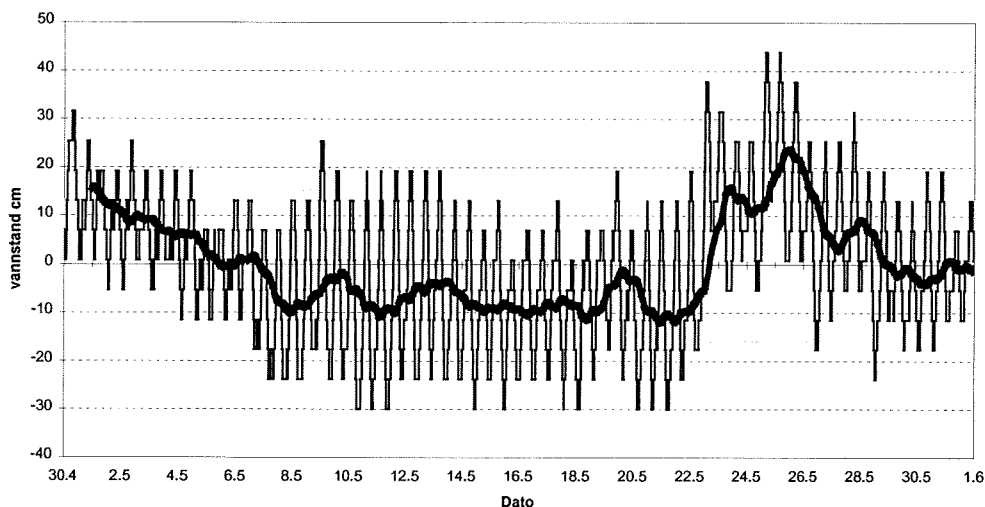
Dagens vannutskiftning styres av forhold i Bunnefjorden og Vestfjorden og påvirkes av tidevann, vind og lufttrykksvariasjoner. Tidevannet bidrar daglig til vannfornyelsen, mens de andre faktorer varierer mindre regelmessig. Tabell 2 viser noen nøkkeltall for vannstandsvariasjonene i indre Oslofjord. Vi har der beregnet amplituder i forhold til normal middelvannstand, siden det er dette som har mest betydning i forhold til vannutskiftningen. (For navigasjonsmessige betraktninger er det ellers vanlig å ta utgangspunkt i lavvannsnivået ved vårjevndøgn som er 31 cm under middelvannstanden i indre Oslofjord.) Høyeste og laveste målte vannstand omfatter den totale variasjonen i vannstand basert på historiske data. Tallene for høyvann/lavvann er basert på tidevannstabellen, og omfatter bare de astronomiske komponentene. Her vil derfor bidrag fra lufttrykksvariasjoner og vind komme i tillegg.

Angitte dyp (-2,0 og -4,0 m) for skipsstøtvollene refererer seg til vårjevndøgn spring lavvann. Midlere seilingsdyp blir derfor større, hhv. 2,31 og 4,31 m. Tidevannsprismet, dvs. volumet av vannet mellom høyvann og lavvann som normalt strømmer inn på fløende sjø bestemmes av høyden mellom middel lavvann og middel høyvann, dvs. 28 cm. Historisk laveste målte vannstand ville gitt seilingsdyp over skipsstøtvollene på bare litt i overkant av 1 m i Bispevika, 3 m i Bjørvika.

Figur 5 viser observerte trykkvariasjoner på fast dyp i forhold til bunn i Bjørvika 1999. De kortperiodiske variasjonene viser vannstandsvariasjoner knyttet til tidevannet, mens den langperiodiske variasjonen er den kombinerte virkningen av tidevann, vind og lufttrykk. Dataene er ikke korrigert for variasjoner i lufttrykk. Slik korreksjon kunne gitt et mer nøyaktig bilde av de faktiske variasjoner i vannstanden i Bjørvika i mai 1999. Lufttrykket varierer med et standardavvik på omtrent $\pm 1.2\%$ og maksimalt 3-4 % fra middelvei (data for Færder 1997). Standardavviket tilsvarer en vannstandsforskjell på 12 cm og maksimalutslaget 30-40 cm.

Tabell 2. Størrelse på ulike amplituder i vannstandsvariasjonen i indre Oslofjord, i forhold til middelvannstanden (verdier beregnet fra Tidevannstabellen, Statens kartverk, Sjøkartverket).

Faktor	Returperiode	Amplitude/utslag
Høyeste målte vannstand	flere år	+ 188 cm
Høstjevndøgn spring høyvann	1 år	+ 31 cm
Middel spring høyvann	14 dgr	+ 18 cm
Middel høyvann	12.5 timer	+ 14 cm
Middel nipp høyvann	14 dgr	+ 10 cm
Middel vannstand	6.25 timer	0
Middel nipp lavvann	14 dgr	- 10 cm
Middel lavvann	12.5 timer	- 14 cm
Middel spring lavvann	14 dgr	- 18 cm
Vårjevndøgn spring lavv.	1 år	- 31 cm
Laveste målte vannstand	flere år	- 105 cm



Figur 5. Variasjon i trykk (som cm vannstand) målt på fast dyp i forhold til bunn i mai 1999 som avvik fra middelverdi for mai 1999, samt 24 timers glidende middel (tykk kurve). Det er ikke korrigert for lufttrykksvariasjoner.

3.1. Måleprogrammet i 1999

For å få bedre informasjon om forholdene i Bjørvika ble det for det første lagt inn ekstra observasjoner i det ordinære miljøovervåkingsprogrammet for indre Oslofjord. Utvidelsen besto i å observere siktedyp, dyp-profil av temperatur og saltholdighet (CTD) ca. en gang i uka i perioden 1.6. til 30.8.1999. I tillegg ble det i mai 1999 satt ut et instrument (T/S-kjede) som måler tilnærmet kontinuerlig vannets temperatur og saltholdighet i fem faste nivåer. Hensikten var å kartlegge korttidsvariasjonene i sjiktningen i området.

3.1.1. Siktedyp

Siktedyp ble målt med Secchi-skive til samme tidspunkter og på samme posisjon som CTD-målingene (Figur 6).

3.1.2. CTD-observasjoner

Vertikalprofiler av sjøens temperatur og saltholdighet midt i Bjørvika ble målt med sonde (Seabird SBE19) i alt 11 ganger i løpet av sommeren 1999 (Figur 6).

Måledatoene var:

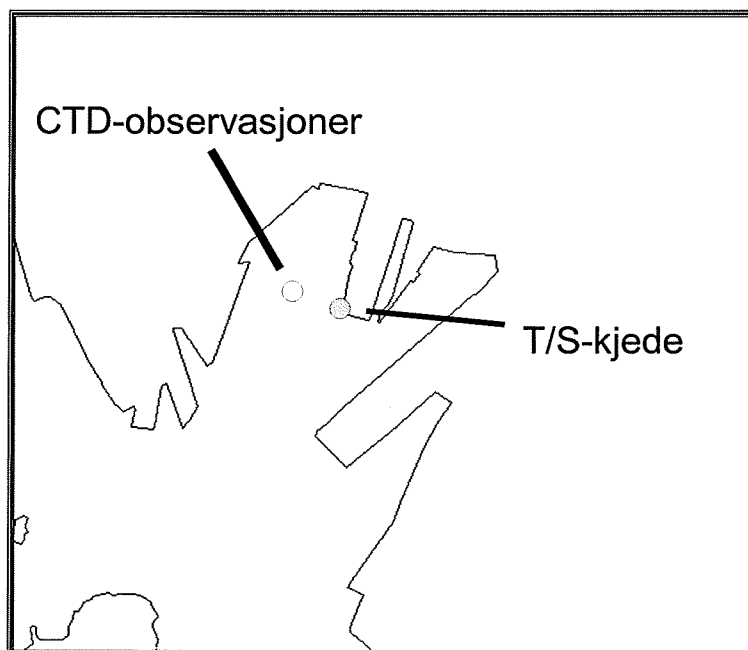
Juni: 1., 8., 16., 23. og 29.

Juli: 6., 21. og 27.

August: 3., 9. og 17.

Målingene ble gjort fra båt, og fra overflaten og til bunn med tette dybdeintervaller.

Sonden registrerte også oksygen.



Figur 6. Grov kartskisse med måleposisjoner for T/S-kjede og hydrografiske profiler (CTD). Siktedyp ble målt på stasjonen for CTD-observasjoner.

3.1.3. Måling med T/S kjede

Målingene ble utført kontinuerlig i perioden 29. april - 3. juni, 1999, fra yttersida av Bjørvika-utstikkeren (Figur 6). Til målingene ble det benyttet en T/S kjede fra Aanderaa instruments. Den måler temperatur og saltholdighet i fem forutbestemte dyp, og i programmerte tidsintervaller. Tidsintervallet var satt til 10 minutter. I tillegg måles trykket i ett dyp, fast plassert i forhold til bunnen. Siden dette dypet er fast i forhold til bunnen, vil trykket (korrigert for variasjoner i lufttrykk) gi et direkte bilde av vannstandsvariasjonene.

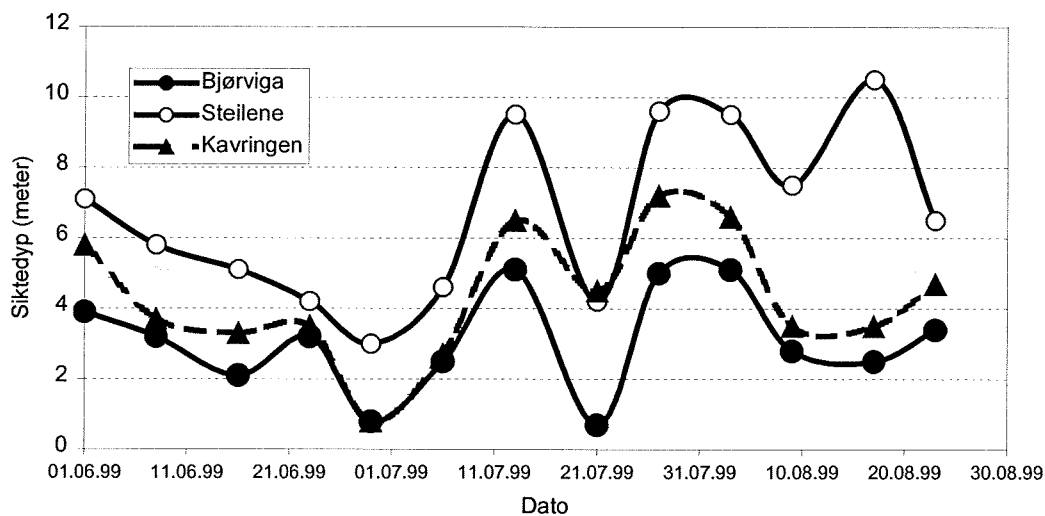
Måledypene for saltholdighet og temperatur var: 0.4 m, 3.5 m, 5.5 m, 7.5 m og 9.4 m. Trykket ble målt i ca 1 m dyp.

3.2. Måleresultater

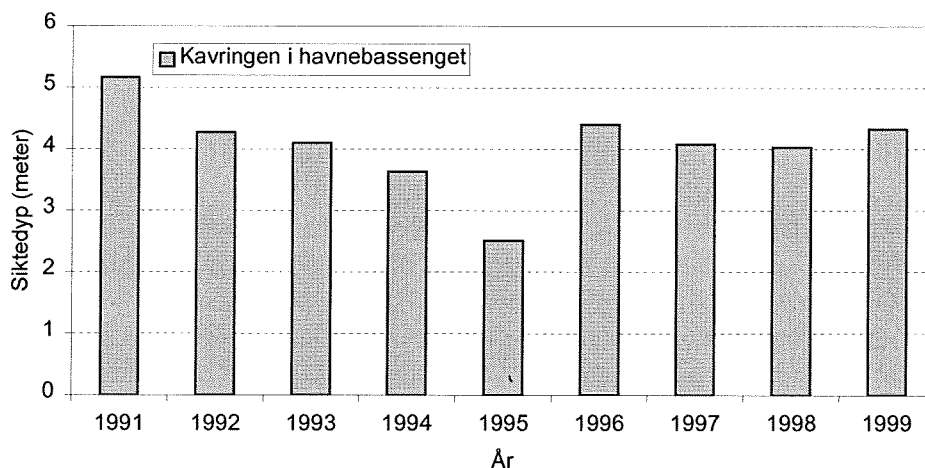
3.2.1. Siktedyp

Resultatene av siktedypsmålingene er vist i Figur 7. Gjennomsnittlig siktedyp sommeren 1999 var 3.1 m. Sammenlignet med SFT's miljøkvalitetskriterier for fjorder (Molvær et al., 1997) var tilstanden dårlig (miljøklasse IV).

Målingene varierte fra mindre enn 1 meter til dypere enn 5 meter. Variasjonen kan skyldes mange faktorer som tilførsel av partikler med flomvann fra Akerselva, algeoppblomstringer, oppvirvling av sedimenter med propeller på større skip. Figur 7 viser at siktedypet i Bjørvika følger siktedypet lengre ut i fjorden men på et lavere nivå.



Figur 7. Siktedypet i Bjørvika 1999, sammenlignet med siktedyp ved Kavringen lenger ute i havnebassenget og Steilene (Vestfjorden).



Figur 8. Gjennomsnittlig siktedyp juni-august ved Kavringen i havnebassenget 1991-99.

Siktedypet er et resultat av innholdet av partikler (i hovedsak leirpartikler og plankton) i overflatevann, og gir samtidig et mål for nedre grense for mulig primærproduksjon (dvs. så langt ned det er tilstrekkelig lys for fotosyntese). Denne nedre grense er omtrent 2.5x siktedyp, hvilket skulle bety at sommeren 1999 varierte primærproduksjonsdypet mellom 2.5 m dyp og bunnen. Gjennomsnittlig siktedyp sommeren 1999 var 3.1 m, dvs. et primærproduksjonsdyp på ca. 7.8 m.

Sommeren 1999 var lite typisk for Oslofjorden. Store nedbørmengder i juni ga ekstra store tilførsler av partikler og næringssalter ved at elvene flommet og avløpsvann fra renseanlegg gikk i overløp. Likevel ble gjennomsnittlig siktedyp i indre Oslofjord (Kavringen) lite forskjellig fra normalt for juli og august (Figur 8). Forutsatt at 1999-forholdene var like representative i Bjørvika som ved Kavringen skulle det gjennomsnittlige siktedypet på 3 m målt denne sommeren, være representativt for Bjørvika i dag. I gjennomsnitt vil fotosyntesesonen derfor gå ned til ca. 7.5 meters dyp, dvs. nesten til bunn.

Dette betyr at forholdene er slik at produksjon av organisk materiale (planteplankton, makro-alger) vil kunne forekomme i nesten hele vannsøylen fra overflate til bunn i Bjørvika og Bispevika.

3.2.2. CTD-målinger

Resultatene av CTD-målingene er vist i Figur 9. Tidsoppløsningen er ca 1 uke. Forholdene i Bjørvika endret seg raskest i begynnelsen av juli og i midten av august. Frem til begynnelsen av juli var det et markert overflatelag ned til ca. 1 m dyp over et ca. 1 m tykt sprangsjikt. Uvanlig stor nedbør i juni var årsaken til de lave saltholdighetsverdiene i perioden (innflytelse av flom i Akerselva). Dette er sannsynligvis også forklaringen på situasjonen omkring den 20 juli. Resten av perioden (august 99) var overflatelaget i Bjørvika mer homogent med svak sjiktning i profilen fra 27. juli. Dette framgår også av temperaturen, som økte gradvis til et maksimum på 20-21 grader i slutten av juli. Figuren viser også at det utover i august måned, kom inn en noe kaldere vannstype med høyere saltholdighet nær bunnen.

Isolinje-plottet for tetthet (σ_t) gjenspeiler variasjonene i saltholdighet og temperatur, med svak sjiktning (lagdeling) i slutten av juli, og sterkest i juni.

Vannutskiftingen kan bedømmes noenlunde ut fra variasjoner fra måletidspunkt til måletidspunkt. Observerte endringer i hydrografi over tid gjenspeiler sannsynligvis endringer i hele indre havnebasseng, og ikke bare Bjørvika. En kan anta at endringer utenfor raskt (i løpet av en dag eller to, eller raskere) forplanter seg inn i Bjørvika, både i overflaten og i dypet. Det framgår av profilene at det ikke var lik situasjon fra uke til uke mellom noen av målingene. Det betyr at det var en viss kontinuerlig utskifting i hele vannsøylen gjennom måleperioden. Evt. stagnasjon kan teoretisk ha skjedd i kortere perioder, på skala fra noen dager og opp til en uke. Resultatene fra T/S-kjeden gir mer informasjon om slike korttidsendringer.

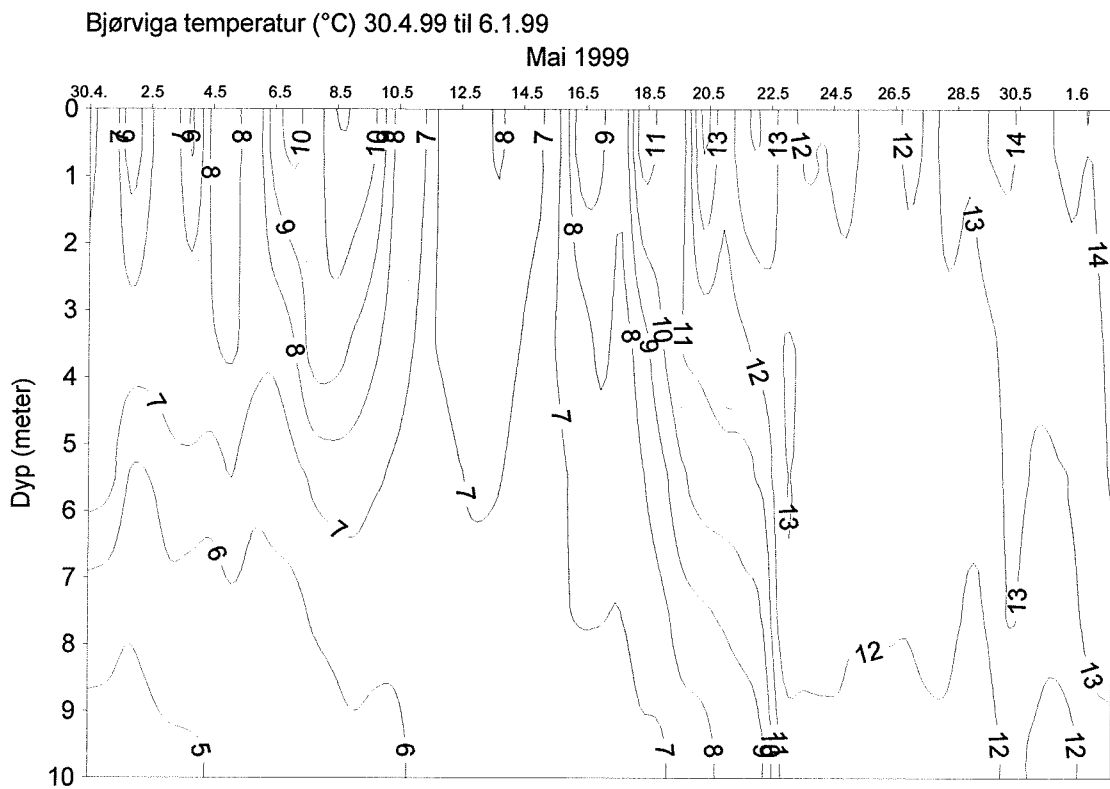
3.2.3. Oksygen

CTD sonden var utstyrt med en YSI oksygensensor. YSI-sonder for observasjoner av oksygen *in situ* i sjøvann er ikke presisjonsinstrumenter og vil kunne avvike betydelig fra reelle forhold. Normalt skal slike observasjoner som et minstekrav kontrolleres med tradisjonelle analyser (Winkler), men det var i utgangspunktet ikke planlagt å måle oksygen i Bjørvika.

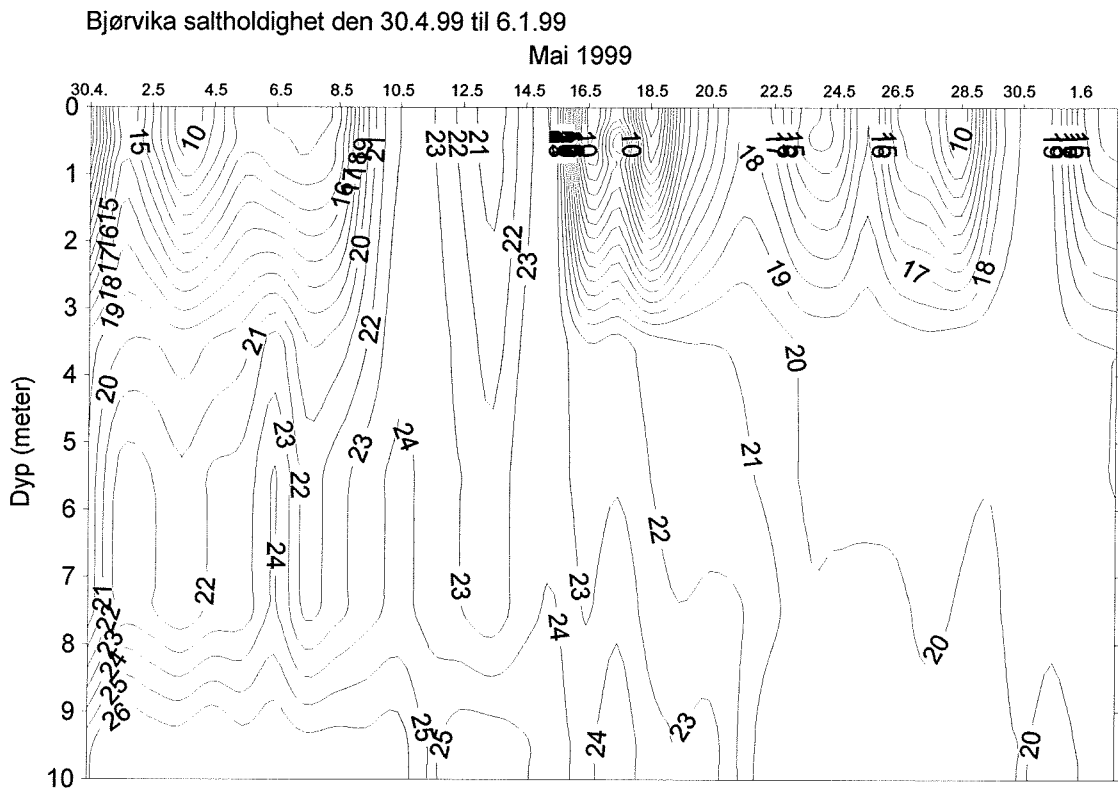
Sonden viste noe lavere oksygeninnhold enn forventet. Nær bunnen (7-8 m dyp) varierte verdiene fra 2,3 til 4,4 ml/l med et gjennomsnitt på 3,2 ml/l. I henhold til SFT's kriterier for klassifisering av tilstand (Molvær et al., 1997) vil verdier mellom 2,5 og 3,5 ml/l tilsvare miljøklasse III "mindre god". Dette må tolkes med varsomhet fordi sondemålinger er usikre.

Overvåkingsdata fra Bekkelagsbassenget fra 1983-97 viser at oksygenkonsentrasjonen på 8 meters dyp varierer mellom 0.5 til 9.5 ml/l over året. 25% av målingene lå mellom 0.5 og 2.8 ml/l. Medianverdi var ca 5 ml/l. På 12 meters dyp var variasjonen mellom 0.4 og 9.4 ml/l, med medianverdi på 3 ml/l.

Sondeobservasjonene fra Bjørvika 1999 lå gjennomgående 1-2 ml/l lavere enn observasjonene fra tilsvarende dyp i Bekkelagsbassenget, men observasjonsperioden var kort og derfor lite representativ. Tar en i betraktning at 25 % av observasjonene fra Bekkelagsbassenget hadde en konsentrasjon mindre enn 2.8 ml/l, kan det ikke utelukkes at sondeobservasjonene er korrekte og viser enten at målingene ble gjort i en dårlig periode eller at det generelt er mindre oksygen i vannmassene i Bjørvika enn i Bekkelagsbassenget.



Figur 10. Temperaturobservasjoner (°C) fra Bjørvika mai 1999. Observasjoner fra T/S-kjede.



Figur 11. Saltholdighetsobservasjoner fra Bjørvika mai 1999. Observasjoner fra T/S-kjede.

En kan fastslå ut fra T/S-målingene at det er vesentlig større endringer i overflatelaget enn dypere ned. I dypet er det imidlertid også korttidsvariasjoner. Korttidsvariasjonene kan ikke knyttes til tidevann. Variasjonene var spesielt tydelige i perioden fra start av måleserien i slutten av april og fram til ca. 22. mai. Deretter oppstod det tilsynelatende en ny situasjon, med svært små, men dog målbare, variasjoner fra 3.5 m og ned.

3.2.4. T/S-målinger

Målingene fremstilt i Figur 10 og Figur 11 viser korttidsvariasjoner (skala timer) i temperatur og saltholdighet. Saltholdigheten er mest interessant fordi variasjonene må reflektere direkte vannutskifting med området utenfor. Temperaturendringer kan i prinsippet skje ved lokal oppvarming/avkjøling uten utskifting, men i et lite avgrenset område som Bjørvika er mesteparten av temperaturforandringene på dyp større enn ca. 4 m sannsynligvis advective på samme måte som saltholdighetsvariasjonene.

Målingene viser sterkest lagdeling i slutten av april, med saltholdighet rundt 7-10 i overflata. Fra da og fram til ca 15. mai økte overflatesaltholdigheten, mens den avtok i dypvannet fra ca. 27 til 25. Deretter tiltok lagdelingen igjen ved at saltholdigheten avtok i overflatelaget ned til 3,5 m.

Nær overflata (øverste sensor) var det etter 15. mai fortsatt hurtige variasjoner i saltholdighet mellom en nedre grense på 7-8 og en øvre grense på 17-18. Disse variasjonene skjedde for det meste innafør tidsrom på 1/2 dag eller hyppigere.

4. Diskusjon

For øvre lag i Bjørvika, dvs. for vann ned til 3-4 meters dyp, vil utskiftingen neppe bli merkbart endret i forhold til dagens situasjon. Vannkvaliteten blir dermed heller ikke vesentlig endret, med unntak av periodisk forringelse i forbindelse med vertikal blanding med dypvann av eventuell dårlig kvalitet. Det samme gjelder i prinsippet for Bispevika ned til 1-2 meters dyp.

På dyp større enn 4 meter i Bjørvika og større enn 2 meter i Bispevika er det risiko for stagnerte vannmasser og oksygensvikt. Tidligere overslagsberegninger (Sundfjord et al., 1999) viste et behov for full vannutskifting 1-2 ganger per uke for å tilfredstille en målsetting på 4 mlO₂/l i dypvannet. Sonden benyttet sommeren 1999, ga konsentrasjoner lavere enn denne målsettingen. Dersom disse målingene kan bekreftes med mer nøyaktige metoder, vil området være mer sårbart i forhold til redusert vannutskifting enn antatt av Sundfjord et al. (1999). På den annen side er det grunn til å forvente at oksygenforbruket vil bli mindre etter fjerning av det forurensede sedimentlaget som vil inneholde mer oksygenforbrukende materiale enn eventuelle tildekkingsmasser og sedimentene under (Konieczny, 1994).

Siktedypsobservasjonene viste at nedre grense for fotosyntesesonen ligger ned mot 6-7 meters dyp. Plantevekst vil således kunne bidra til noe tilførsel av oksygen i løpet av sommeren. På den annen side vil oksygenforbruket i sedimentene under øke når algene dør og synker til bunns.

4.1. Beregning av vannutskifting ut fra de hydrografiske observasjonene.

Endringer i tetthetssjiktningen i havnebassenget, som observert ved hjelp av T/S-kjede og CTD-sonde, vil forplante seg inn til områdene innenfor vollen og tunnelen ved horisontale strømmer. Hvis det hopper seg opp med vann med lav saltholdighet i overflaten, vil tetthetsflatene flytte seg nedover med tiden, som f.eks. i Figur 11 fra 10. mai til 13. mai. Det vil da gå en strøm innover i overflaten, og ut gjennom kanalen på større dyp. Omvendt kan tyngre vann strømme inn i nedre del av tverrsnittet og gi en heving av tetthetsflatene, med strøm ut av området nærmere overflaten. I figuren ses det for perioden 3. til 6. mai i dypintervallet.

Ut fra observasjonene med T/S-kjeden og CTD-sonde kan følgende slutes. CTD-observasjonene viser at vannutskiftingen skjer i gjennomsnitt ca. en gang pr. uke i sommerhalvåret, som er den årstiden som har dårligst vannutskifting. Dette skulle tilsvare følgende transporter i ulike dyp-intervaller for Bjørvika.

0- 4m: 0.5m³/s

4-6 m: 0.3m³/s

6-8 m : 0.2 m³/s

Pga. observasjonsfrekvensen på 1 gang pr. uke må dette betraktes som nedre grense for transporter. Resultatet fra T/S-kjeden, som har bedre tidsopløsning, viser mye raskere skiftninger, og gir høyere transporter. Vannutskiftingstiden varierer fra mindre enn ett døgn opp til 5-6 døgn i mai 1999. Gjennomsnittlige transport blir grovt beregnet:

0-4 m: 2.2 m³/s (varierende fra 5 til 0.8)

4-6 m: $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$ (varierende fra 2.5 til 0.4)

6-8 m: $1.2 \text{ m}^3/\text{s}$ (varierende fra 2.3 til 0.5)

Spørsmålet blir da om det nye tverrsnittsarealet kan bære slike transporter uten at strømmen blir kritisk og begrenser vannutskiftningen.

Begrensende arealer for transport av vann inn til Bjørvika under 4 meters dyp blir kanalen ved utstikkeren i øst. Det vannvolum som skal gjennom kanalen ved en full utskiftning under 4 m dyp er det samlede volumet av vann under dette dypet innenfor barrieren. Det samme gjelder for Bispevika.

Det samlede vannvolumet under 4 meter som trenges å skiftes ut utgjør nå for Bjørvika litt over $210\,000 \text{ m}^3$ (Tabell 1.). Kravet til en utskiftning på et par døgn i snitt gir en transport fra 4-8 meter inn i kanalen på i gjennomsnitt $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$. Tverrsnittsarealet på kanalen inn ved utstikkeren slik den er skissert i dag er ca. 30 m^2 , hvilket betyr strømhastigheter på i størrelsesorden ca. 4 cm/s i siste fase av en innstrømning, når den kan skje i hele tverrsnittet. Økes kravet til å transportere maksimal observerte transporter for disse dyp (dvs. $2.6 \text{ m}^3/\text{s}$, utskifting på 1 døgn) vil hastigheten øke til ca. 9 cm/s . Kravet til hastigheter blir imidlertid større når innstrøm er å forvente på stigende vannstand (tidevann) begrenset til ca. 6 timer (35 cm/s). Slike strømhastigheter er neppe realistiske og transportkapasiteten i kanalen vil bli nærmere vurdert i kap. 4.2.

For Bispevika begrenses vannutskiftningen av den skisserte kanalen i øst. Vannvolumet under 2 meters dyp blir her ca. $160\,000 \text{ m}^3$. Med samme krav som for Bjørvika vil en utskiftning hvert annet døgn i snitt kreve en transport på ca. $0.9 \text{ m}^3/\text{s}$. Med et tverrsnittsareal på 72 m^2 mellom 2 og 8 meters dyp vil dette bety en strømhastighet på 1 cm/s opp mot maksimalt 4 cm/s (krav til at alt vann skal inn på 6 timer). Imidlertid vil tunnelen ikke gi fri innstrømning til dyp større enn 6 meter og effektivt gjennomstrømningsareal blir her redusert til 48 m^2 , og strømhastigheten for å fylle hele indre del av Bispevika vil bli på 3 cm/s .

Beregningene forutsetter enveistransport gjennom kanalene, og ser bare på transporten som gjennomsnitt over innstrømningsperioden og fordelt over hele tverrsnittet. For en innstrømning under en tetthetsflate som hever seg fra like over kanalbunnen og opp mot toppen av skipsstøtvollen vil det derfor kunne bli høyere hastigheter i tidlige faser av innstrømningen. Det avhenger av hvordan kanalvertsnitt og fyllingsvolum innenfor endrer seg med dyp. Beregningene i kap. 4.2 går mer i detalj inn på dette.

4.2. Transportkapasiteten i kanalene til Bjørvika og Bispevika

4.2.1. Innledning - forutsetninger for beregningene

Målingene våren og sommeren 1999 har vist at vertikale bevegelser av tetthetsflatene på tidsskala fra 1 døgn til 1 uke er et viktig trekk ved vannutvekslingen i området. For å unngå forverring av vannkvaliteten innenfor skipsstøtvollene og tunnelen bør disse områdene kunne delta nokså nær fullt ut i slike endringer i tetthetssjiktning utenfor. For å oppnå det, må transportkapasiteten gjennom kanalene og over tunnelen bli så god at de horisontale transportene som er knyttet til heving og senking av tetthetsflater kan drives gjennom kanalen uten horisontale tetthetsgradienter av betydning. Noen forholdsvis enkle overslagsberegninger kan bidra til å belyse dette. Vi betrakter da strøm gjennom de skisserte kanalene og ser på utskiftningen av alt vann innenfor under ett. For både Bjørvika og Bispevika er det skissert en kanal inn på østsiden, som gir utveksling av både området mellom tunnel og skipsstøtvoll og området innenfor tunnelen. Forbindelsen over tunnelen er mye større enn kanalen, i begge de to områdene, og hele området innenfor kanalen betraktes da under ett.

Areal og volum som funksjon av dyp for de to områdene er vist i Tabell 1. I Bjørvika finnes det dypeste området (>10 m dyp) mellom tunneltraséen og skipsstøtvollen på utsiden. Hvis disse partiene blir fylt opp til -8 m blir problemene med bunnvannet mindre, men det er uansett nokså små volumer. Det volumet som ligger under overkant av skipsstøtvollen og som må utveksles gjennom kanalen er altså i Bjørvika ca. $210\,000\text{ m}^3$ (under 4 m), mens det i Bispevika er ca. $160\,000\text{ m}^3$ (under 2m).

Ved beregningene i dette kapitlet ses området innenfor kanalen under ett, og det tas altså ikke i betraktning at største dyp over tunnelen ligger 2-3 m høyere enn dypeste punkt innenfor. Det vil bety at utvekslingen av bunnvannet med tetthetsendringer vil skje noe raskere enn beregnet på utsiden, og litt ekstra forsinket på innsiden av tunnelen, men det har antagelig sekundær betydning for det totale bildet.

Vi tenker oss forenklet en situasjon med to homogene vannlag, med relativt liten tetthetsforskjell. I utgangspunktet ligger grenseflaten mellom de to lagene i underkant av kanaldypet på utsiden, og med hele bassenget innenfor fylt av vann fra det øverste, letteste laget. Dette er selvsagt sterkt forenklet, men det bør representere situasjoner med svingninger i et veldefinert sprangsjikt ganske godt, og iallfall vise grovt hvor stor forsinkelse og demping støtvollene kan forårsake.

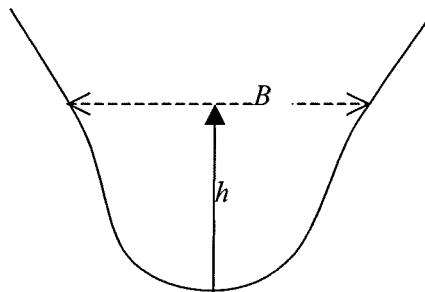
Det antas nå at overflatelaget i løpet av et døgn drives sørover ut av havnebassenget pga. vindpåvirkning, slik at vann fra det litt tyngre underliggende laget bringes opp til i overkant av skipsstøtvollen. Vi ser på hvert av de to områdene for seg. Hvis bassenget innenfor skal følge med i dette, må det gå en innstrøm gjennom kanalen. Transporten ut av bassenget vil skje over hele det store tverrsnittet ovenfor toppen av skipsstøtvollen, og medfører svært små hastigheter og tilsvarende små trykkgradienter. Den vesentlige begrensningen blir transportkapasiteten gjennom kanalen. Det som driver vann gjennom kanalen vil være forskjell i tetthetssjiktning innenfor og utenfor. Hvis grenseflaten mellom lagene heves på utsiden blir det et lite overtrykk i det nedre laget på utsiden, som driver vann inn gjennom kanalen. Omvendt vil en senkning på utsiden gi en trykkgradient ut gjennom kanalen.

4.2.2. Modell for trykkdrevet transport

For å se hvordan transportkapasiteten innvirker på bevegelsen av tetthetsflatene opp og ned settes det opp en enkel modell, som anvendes på et scenario med både heving og senking av tetthetsflaten på utsiden. Vi antar at kanalen har varierende bredde $B(h)$ med høyde h over største dyp i kanalen som i illustrasjonen til høyre, dvs. at strømningsarealet A under høyde h er:

$$A(h) = \int_0^h B(z) dz$$

Det nederste laget står opp til høyde h_1 på utsiden og h_2 på innsiden. Hvis $h_1 > h_2$ vil vannet drives inn gjennom åpningen av trykkgradienten pga. høydeforskjellen. Ved små forskjeller mellom h_1 og h_2 vil hastigheten være gitt direkte av trykkgradienten. Hvis h_2 er under en viss grense vil det gå såkalt kritisk strøm gjennom kanalen, og da vil høyden i det begrensende tverrsnittet stille seg inn slik at transporten blir størst mulig for gitt høyde h_1 .



Generelt vil hastigheten gitt ut fra trykkforskjellen i et tverrsnitt hvor grenseflaten står i høyde h_v være:

$$v = \sqrt{2g \frac{\Delta\rho}{\rho} (h_1 - h_v)}$$

Transporten gjennom arealet $A(h_v)$ blir

$$Q = v(h_v) \cdot A(h_v)$$

Kritisk (begrensende) strømtverrsnitt for gitt høyde h_1 har pr. definisjon en høyde $h_{v,c}$ slik at Q blir størst mulig, det vil si slik at

$$\frac{\partial Q}{\partial h_v} = 0$$

Innsatt uttrykket for v (og forutsatt $h_1 > h_v$) gir det en generell betingelse som kan løses mhp. h_v :

$$2(h_1 - h_v)B(h_v) = A(h_v)$$

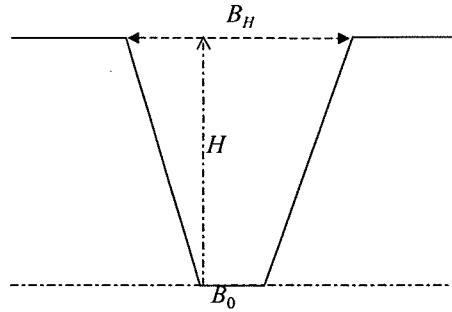
For de skisserte kanalene, med trapesformet tverrsnittsareal med bredde B_0 i bunn, og bredde B_H ved høyde H , gjelder:

$$A(h_v) = \left(B_0 + \frac{1}{2} s h_v \right) h_v$$

$$B(h_v) = B_0 + s h_v$$

hvor

$$s = \frac{B_H - B_0}{H}$$



Når disse uttrykkene innsettes i betingelsen for kritisk strøm, fås

$$2(h_1 - h_v)(B_0 + s h_v) = \left(B_0 + \frac{1}{2} s h_v \right) h_v$$

som etter litt omorganisering kan skrives slik:

$$5s h_v^2 + 2(3B_0 - 2s h_1) h_v - 4B_0 h_1 = 0$$

Løsningen av denne ligningen gir kritisk høyde $h_{v,c}$. Hvis $s=0$ (rektangulært tverrsnitt) gjelder løsningen $h_{v,c} = 2h_1/3$, og hvis $B_0 = 0$ (triangel-tverrsnitt) $h_{v,c} = 4h_1/5$. Generelt for trapesformet tverrsnitt med $s > 0$, $B_0 > 0$ fås løsningen¹:

$$h_{v,c} = \frac{2}{5} h_1 - \frac{3 B_0}{5 s} + \frac{1}{5} \sqrt{\left(3 \frac{B_0}{s} - 2 h_1 \right)^2 + 5 \cdot 4 \frac{B_0}{s} h_1}$$

Akkumulert volum på innsiden vil følge ligningen:

$$\frac{dVol_2}{dt} = Q$$

Så lenge $h_2 < h_{v,c}$ vil det gå kritisk strøm bestemt av h_v , mens det ellers er forskjellen mellom h_1 og h_2 som bestemmer strømmen. Vi har altså:

$$Q = \underbrace{\sqrt{2g \frac{\Delta \rho}{\rho} (h_1 - h_v)}}_v \cdot \underbrace{\left(B_0 + \frac{1}{2} s \cdot h_v \right) h_v}_A \quad \text{hvor} \quad h_v = \max(h_{v,c}, h_2)$$

Overflatearealet på innsiden antas å øke trinnvis lineært med høyde z over maksimalt dyp:

$$F_2(z) = F_{2,i} + (F_{2,i+1} - F_{2,i}) \frac{z - z_i}{z_{i+1} - z_i} \quad \text{for } z_i \leq z < z_{i+1} \quad \text{med } F_{2,0} = 0 \quad \text{for } z_0 = \text{maksimalt dyp}$$

Samlet volum under høyde z er da:

¹ Bare den ene løsningen er fysisk realistisk, dvs. gir $h_{v,c} > 0$.

$$Vol_2(z) = Vol_{2,i} + F_{2,i} \cdot (z - z_i) + \frac{F_{2,i+1} - F_{2,i}}{2(z_{i+1} - z_i)} (z - z_i)^2$$

hvor

$$Vol_{2,i+1} = Vol_{2,i} + \frac{(F_{2,i+1} + F_{2,i})(z - z_i)}{2} \quad \text{med startverdi } Vol_{2,0} = 0$$

Høyden $h_2=z$ kan da beregnes for gitt volum innenfor grensene $[Vol_{2,i}; Vol_{2,i+1}]$ ved å løse ligningen ovenfor mhp. z :

$$\text{Hvis } F_{2,i+1} > F_{2,i}: \quad h_2 = z_i + (z_{i+1} - z_i) \frac{-F_{2,i} + \sqrt{F_{2,i}^2 + 2 \frac{F_{2,i+1} - F_{2,i}}{(z_{i+1} - z_i)} (Vol_2 - Vol_{2,i})}}{F_{2,i+1} - F_{2,i}}$$

$$\text{Hvis } F_{2,i+1} = F_{2,i} \quad h_2 = z_i + \frac{(Vol_2 - Vol_{2,i})}{F_{2,i}}$$

Forløpet ved en innstrømning av tyngre vann beregnes da ved å spesifisere et tidsforløp med økende høyde $h_1(t)$ på utsiden. I regne-eksemplene i neste avsnitt er det antatt en konstant økning over en viss tidsperiode og deretter konstant beliggenhet, dvs:

$$h_1(t) = H_1 \min(1, t/T)$$

hvor H_1 er endelig beliggenhet av grenseflaten og T er den tiden vannet tar på å stige opp til denne høyden.

Transporten Q (volum pr. tidsenhet) inn gjennom kanalverrsnittet beregnes som funksjon av høyden h_1 og integreres til akkumulert volum som funksjon av tid. Beregningen skjer i mange små tidsskritt, og volumet ved hvert tidspunkt brukes til å beregne beliggenheten av grenseflaten på innsiden, og derved hva som blir transporten i neste tidsskritt. Resultatet blir en økende h_2 i tid men med forsinkelse i forhold til h_1 .

For utstrømning brukes den samme modellen, men med h_1 spesifisert til å reduseres over et visst tidsrom, og med h_1 og h_1 byttet om i beregningen av h_2 og Q . Strømmen går nå ut, slik at differensial-ligningen blir:

$$\frac{dVol_2}{dt} = -Q$$

med startverdi for $t=0$ tilsvarende $h_2 = h_1$. Resultatet blir en synkende h_2 , men forsinket i forhold til h_1 .

4.2.3. Resultater

Det er gjort slike beregninger for begge de to innestengte områdene, med topografi og kanalutforming som beskrevet i kap. 2. Det er gjort beregninger for forholdsvis små tetthetsforskjeller mellom øverste og nederste lag: 1,2 og 3 sigma_t-enheter. Tidsrommet for heving eller senking av grenseflaten på utsiden er variert mellom 1 og 3 døgn.

Figur 12 og 13 nedenfor oppsummerer resultatet. De viser hvordan tetthetsflaten innenfor varierer med tid når den utenfor hever seg (figurer til venstre) eller senker seg (figurer til høyre). Hvert figurpar viser forløpet for tre ulike tetthetssjiktninger (1,2 eller 3 sigma_t-enheter) for en bestemt kombinasjon av område (Bjørsvika eller Bispevika) og tidsrom for høyde-ending på utsiden (1,2 eller 3 døgn). Ending i vannstand på utsiden er vist med tykk strek-punkt-linje.

For Bjørsvika fås forsinkelser fra ½ til 1 døgn for en stor heving av vannstanden over 1 til 3 dager, avhengig av hvor stor tetthetsforskjell en regner med og hvor raskt hevingen skjer. Ved rask senking

av tetthetsflatene utenfor er det en betydelig forsinkelse på innsiden. For en senking fra 4 til 8 meters dyp på ett døgn på utsiden vil det ta 2-4 ganger lenger tid å tømme Bjørvika ned til 7 m dyp (høyde 1 m) i forhold til dagens situasjon med åpen forbindelse i full bredde. Responsen varierer relativt lite med hvor raskt tetthetsflaten synker på utsiden, men er selvsagt avhengig hvor sterk tetthetssjiktningen er. Alt i alt innebærer dette at for de korteste episodene i datamaterialet fra sommeren 1999 (1-2 dager) kan det bli en markert dempning i responsen på innsiden. For lengre perioder (3-6 dager) vil den nederste meteren over kanalbunnen (dvs. fra -7 til -8 meter) få redusert utveksling. Forsinkelsen med dempning av responsen gjelder først og fremst de tilfellene hvor dominerende tetthetsflate beveger seg i området 6-8 m dyp, altså like over kanalbunnen. Variasjoner mellom 4 og 6 m dyp vil bli mindre dempet. I beregningene er det ikke tatt hensyn til at tunnelen bare går ned til -7 m, slik at det i realiteten bare er en terskel nr. 2 inn til vannet mellom 7 og 10 m dyp på innsiden. Det innebærer at responsen under 7 m dyp (1 m høyde) blir raskere enn beregnet på utsiden av tunnelen, mens det innenfor tunnelen vil bli dårligere respons under -7 m enn beregnet her.

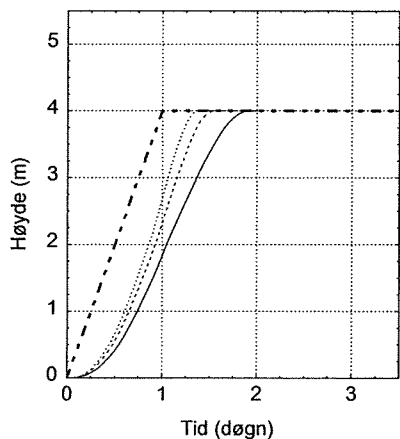
Et mulig tiltak for å bedre vannutskiftningen ned mot bunnen i Bjørvika kan være å legge inn rør gjennom vollen nede ved bunnen for å øke strømtverrsnittet der nede. Det er gjort supplerende beregninger av tilsvarende scenarier som i Figur 12 når kanalen suppleres med rør med samlet tverrsnittsareal 6 m^2 fra 8 og 7 m dyp (eksempelvis 5-6 rør med 1,2 m diameter). Resultatene viser at det da blir en mye raskere respons. Ved heving av tetthetsflaten på ett døgn med en tetthetsforskjell på 1 σ_{t} -enhet (heltrukken kurve øverst til venstre i Figur 12) vil forsinkelsen bli omtrent halvert, og for senking av tetthetsflaten (heltrukken kurve øverst til høyre i Figur 12) vil høyden på innsiden være nede i 0.5 meter etter 2 døgn, i stedet for 1.5 meter som på figuren. De andre resultatene vil bli tilsvarende endret.

For Bispevika vil forholdet mellom volum og strømtverrsnitt være gunstigere enn i Bjørvika, spesielt under 6 m dyp (se Tabell 1), og det er bare mindre forsinkelser på noen få timer ved heving av tetthetsflatene. Ved utstrømning er det en tydelig forsinkelse siste fase av senking av tetthetsflaten ned mot kanaldypet når senkingen skjer i løpet av ett døgn, mens det for episoder av 2-3 døgn varighet ikke er særlig forsinkelse ned til 80 % av kanalhøyden, altså når grenseflaten står 1 m over kanalbunnen på innsiden. Det er også relativt beskjeden forsinkelse ved senking forbi den siste meteren over kanalbunnen. Her bør vannutskiftningen derfor bli ganske god med en kanal som skissert.

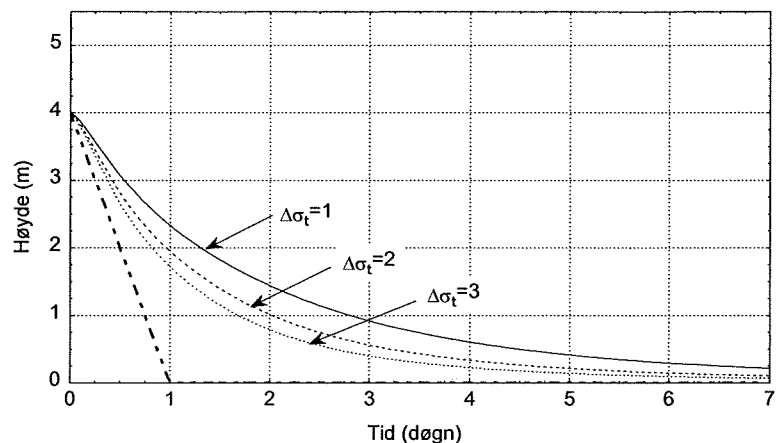
For begge områdene vil det kunne opptre hastigheter på opp mot 15-20 cm/s gjennom kanalen under inn- og utstrømningsfasene. Det ligger en del over det som ble beregnet foran, dels pga. at det under en innstrømning vil være en forsinkelse som er størst i starten og som tas igjen mot slutten av innstrømningen, og delvis fordi det meste av innstrømningen i de modellerte scenarier vil skje fordelt bare over en del av tverrsnittet.

Det er her ikke tatt hensyn til friksjon, som vil kunne minske transportene noe, men til gjengjeld gi bidrag til vertikalblanding. Friksjonen i selve kanalstrømmen er antagelig neglisjerbar, men det vil være avhengig av den hydrauliske ruheten i kanalveggen, om blir større om den bare består av sprengsteinsflater enn om det støpes betongvegger. Den kinetiske energien som utløses ved innstrømning gjennom kanalene vil bli dissipert i hvirvler og turbulens på innsiden og kan gi noe vertikal blanding der. Imidlertid ligger de dypeste områdene i Bjørvika langt unna kanalen, så det er ikke sikkert det vil ha noen betydning for lufting av de dypeste områdene.

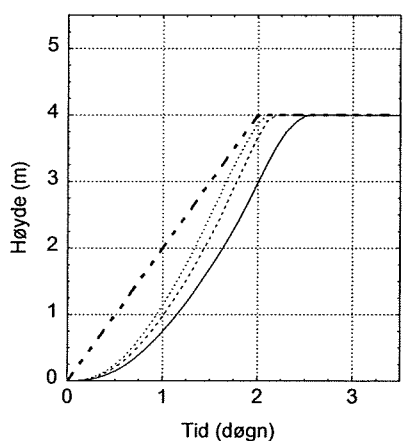
Bjørnvika - heving av tetthetsflate på 1 døgn



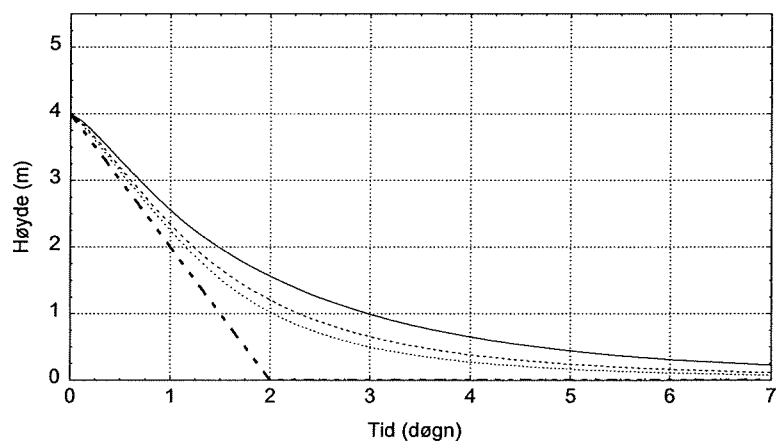
Bjørnvika - senking av tetthetsflate i løpet av 1 døgn



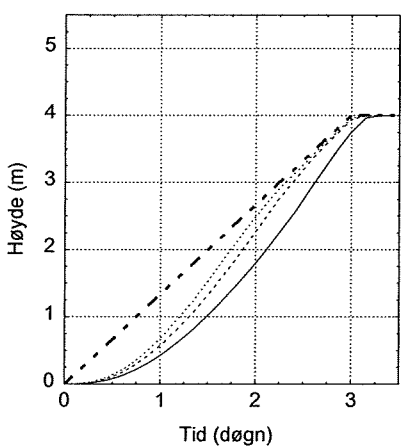
Bjørnvika - heving av tetthetsflate på 2 døgn



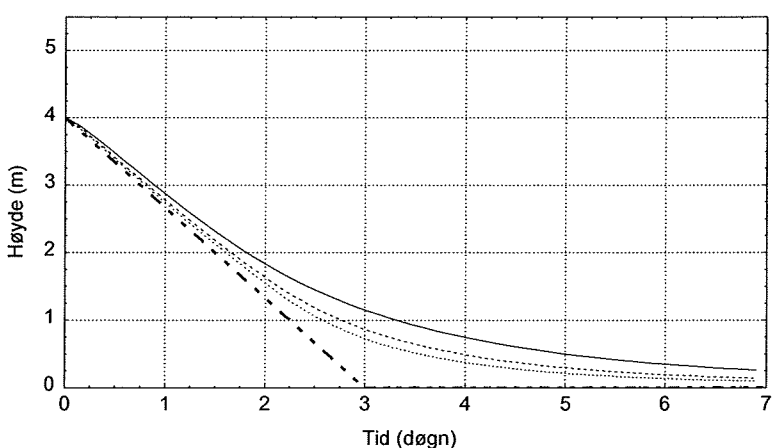
Bjørnvika - senking av tetthetsflate på 2 døgn



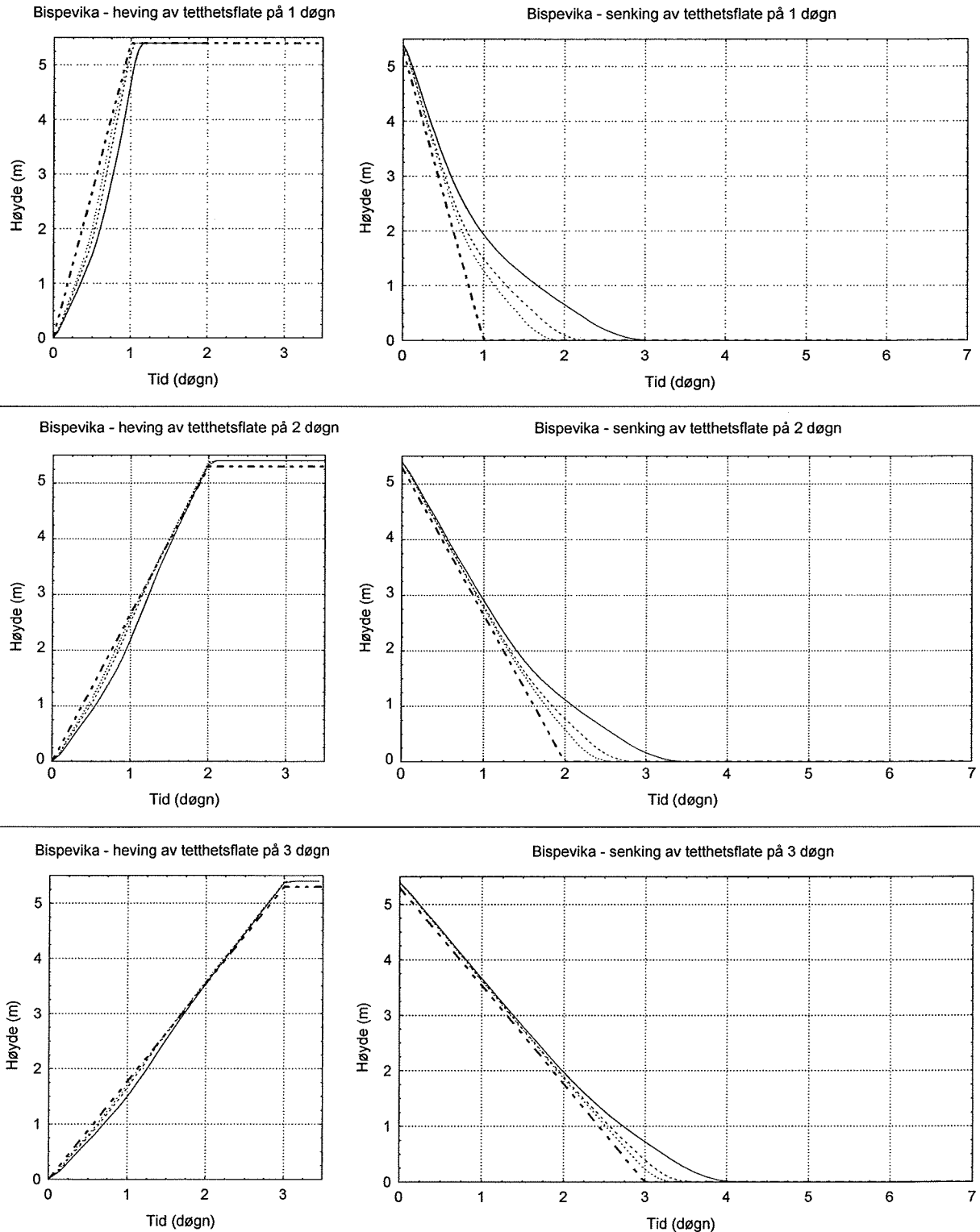
Bjørnvika - heving av tetthetsflate på 3 døgn



Bjørnvika - senking av tetthetsflate på 3 døgn



Figur 12. Modellberegning av respons i Bjørnvika ved heving og senking av tetthetsflaten mellom to homogene lag på utsiden over 1,2 og 3 døgn. Til venstre vises forløp ved heving av tetthetsflaten, og til høyre når tetthetsflaten senker seg. Vertikal akse er høyde i meter over bunnen av kanalen, som er antatt å gå fra -8 til -4 meter. Hver figur viser kurver for tre ulike tetthetsforskjeller (se delfigur øverst til venstre).



Figur 13. Modellberegning av respons i Bispevika ved heving og senking av tetthetsflaten mellom to homogene lag på utsiden over 1,2 og 3 døgn. Til venstre vises forløp ved heving av tetthetsflaten, og til høyre når tetthetsflaten senker seg. Vertikal akse er høyde i meter over bunnen av kanalen, som er antatt å gå fra -7.4 til -2 m dyp. Hver delfigur viser kurver for tre ulike tetthetsforskjeller (se delfigur øverst til venstre i Figur 12).

5. Konklusjoner.

5.1. Bjørvika.

For å sikre at vannutskiftningen og derved vannkvaliteten ikke blir dårligere i Bjørvika enn i dag, må transporten i det minste vedlikeholdes på dagens nivå. Dette forutsetter at transportkapasiteten må være omtrent like stor som dagens. Transportkapasiteten begrenses når tverrsnittsarealet blir så lite at åpningen ikke kan transportere tilstrekkelig store mengder vann ved små trykkforskjeller, dvs. strømhastigheten på vannet blir kritisk og variasjonene på innsiden dempet i forhold til på utsiden.

Mellom overflaten og 4 meters dyp er det liten arealforandring og en forventer ikke noen forandringer i vanntransporten ut/inn i Bjørvika.

Mellom 4 meters dyp og bunn blir transportkapasiteten i kanalen ved Utstikkeren øst i Bjørvika avgjørende for forholdene innenfor både barrieren og tunnelen. Beregningene viser at kanalen kan transportere tilstrekkelig med vann inn i Bjørvika for dypinnstrømningsepisoder som tar 3 døgn eller mer. For raskere innstrømningsepisoder, dvs. hvis tetthetsflatene heves i løpet av 1-2 dager, og svinger raskt tilbake (innenfor ett døgn), vil svingningen, og dermed innstrømmen av vann bli merkbart dempet. Det som vil begrense vannutskiftningen mest er antagelig dyputstrømningsepisodene, dvs. når tetthetsflatene senkes, slik at dypvannet strømmer ut av kanalen. Dette er selvsagt et vesentlig element i den totale vannutskiftningen, som fremkommer ved varierende innstrøm og utstrøm. Senkningen av tetthetsflatene vil bli vesentlig dempet, spesielt for vann under 6 m dyp, hvor endringen må vare flere dager for å gi tilnærmet full respons innenfor. For episoder med hurtigere vannutskiftning vil transportkapasiteten altså ikke være tilstrekkelig. Dempning i dyputstrømning vil i sin tur gi lavere innstrømning når tetthetsflatene igjen heves på utsiden, og resultatet blir en vesentlig demping av den vannutvekslingen som er knyttet til raske vekslinger. En utskiftningsfrekvens på ca. 1 uke ut fra innstrøm/utstrøm kan likevel fortsatt være realistisk, men det vil til en viss grad være det samme vannet som strømmer frem og tilbake, og en vil altså ikke få full effekt i form av oksygenfornyning. En økning av effektivt strømningstverrsnitt i nedre del vil hjelpe mye, f.eks. dersom det kunne legges inn noen rør gjennom nederste del av vollen med tilsammen 6 m² tverrsnitt. Beregninger tyder på at det vil kunne gi akseptable forhold ved naturlig vannutskiftning.

De to avlukkede områdene (D og A) i Bjørvika vil kunne løses som anbefalt tidligere (Sundfjord et al., 1999), dvs. med rørsystemer til område D, med 2 rør med diameter 55 cm eller 4 rør med diameter 38 cm. En kombinert løsning med delvis gjenfylling og rørforbindelser til området innenfor barrieren og havnebassenget bør vurderes.

Område A er ekstra vanskelig å vurdere. Med samme krav til vannfornyelse som i det øvrige bassenget (ca. 1 gang pr 2 døgn), vil et innstrømningsareal på ca. 10 m² bli nødvendig, konstruert som flere rør i ulike dyp. Alternativ til dette er pumping av vann fra A – til havnebassenget. Det bør også vurderes å fylle opp området helt eller delvis.

5.2. Bispevika.

De samme forutsetninger vil i prinsippet gjelde for Bispevika som for Bjørvika, men situasjonen blir litt annerledes pga. annen topografi. For Bispevika vil vannutskiftningen fra overflaten til 2 meters dyp

ikke bli nevneverdig forandret fra dagens situasjon. Med en kanal som skissert på østsiden inn til området mellom barrieren og tunnelen vil området innenfor få tilstrekkelig vannutskiftning. Svingningene i tetthetsflatene vil forplante seg nokså udempet inn i Bispevika, og bare de aller raskeste svingningene vil bli dempet av innsnevringene ved kanalen.

5.3. Generelt.

De gjennomførte beregningene har fortsatt store usikkerheter og det anbefales derfor å gjøre visse forberedelser til forbedringstiltak av vannutskiftningen som kan bli aktuelle hvis de skisserte kanalene ikke skulle være tilstrekkelige. I begge bassengene kan det bli nødvendig å bruke diffusor for å tilføre ferskvann fra Akerselva til bassenget for å forbedre vannutskiftningen (Se Sundfjord et al., 1999, Berge og Molvær, 1994). For å forberede dette bør det legges inn nødvendige rørforbindelser når anlegget bygges, slik at pumping kan iverksettes senere dersom det viser seg å være behov for det. Dette gjelder først og fremst Bjørvika, men det kan ikke utelukkes at det også blir nødvendig med noe nedpumping i Bispevika.

6. Forslag til videre oppfølging

For å kunne gi sikrere råd før anlegget virkeliggjøres, og kunne følge med eventuelle effekter av tunnelanlegget når det er ferdig, bør det opprettes et overvåkingsprogram snarest slik at en kan få en statistisk sett tilstrekkelig dokumentasjon av forholdene før byggearbeidene starter. Denne overvåkingen bør starte i år 2000. Hensikten er å sikre seg bedre kjennskap til området enn en har i dag, og derved gi grunnlag for å kunne bedømme eventuelle forandringer i miljøet når tunnelen og barrierene er på plass. Et slikt måleprogram vil omfatte observasjoner av siktedyp, sjiktning, oksygen samt måling av strøm over en lengre periode. Oksygen må måles med presisjonsanalyser (Winkler) og ikke bare med sonder.

7. Referanser

- Berge, J.A. og Molvær, J. 1994: Miljøvurdering av tre utbyggingsalternativer for E-18 over Bispevika og Bjørvika. Rapp. Nr. 3043, NIVA, Oslo, 20s.
- Hauge, A., og M.Schaanning, 1999. Forurenset sediment og vannkvalitet. Forslag til løsninger. NGI, Teknisk notat 99016, 30.06.99, , 19s + vedlegg.
- Konieczny, R., 1994: Miljøgiftundersøkelser i indre Oslofjord. Delrapport 4. Miljøgifter i sedimenter. Norsk institutt for vannforskning. Rapport nr. 3094.
- Magnusson, J., Lømsland, E.R. og Johnsen, T., 1996. Overvåking av forurensningssituasjonen i indre Oslofjord 1995. Statlig program for forurensningsovervåking. Rapport nr. 661/96. NIVA-rapport l.nr. 3487:96.
- Molvær J., J.Knutzen, J.Magnusson, B.Rygg, J.Skei og J.Sørensen, 1997. Klassifisering av miljøkvalitet i fjorder og kystvann. SFT Veiledning 97:03. TA-1467/1997, 36ss.
- Sundfjord, A., B.Bjerkeng og M. Schaanning, 1999: Tunnelanlegget og mulige konsekvenser for vannutskifting og vannkvalitet. NIVA-notat innarbeidet i: Hauge, A., og M.Schaanning, 1999. Forurenset sediment og vannkvalitet. Forslag til løsninger. NGI, Teknisk notat 99016, 30.06.99, , 19s + vedlegg.