

**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 E18 mellom Festningstunnelen og Ekeberg tunnelen. Tiltak for å sikre vannkvalitet.	Løpenr. (for bestilling) 4250-2000	Dato 15.06.00
	Prosjektnr. Undernr. O-99060	Sider Pris 35
Forfatter(e): Morten Schaanning, Birger Bjerkeng, Jan Magnusson og Arild Sundfjord	Fagområde Oseanografi	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Oslo	Trykket NIVA

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

**Sammendrag**

En senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika vil redusere vannutskiftingen i områdene innenfor tunneltraseen. Målsettingen med dette arbeidet har vært å vurdere eksisterende planforslag og foreslå mulige tiltak for å sikre tilstrekkelig vannkvalitet etter utbygging. Vurderingene har tatt utgangspunkt i at området etter utbygging skal tilfredstille normen "egnet til fritidsfiske". Det er usikkert om oksygenforholdene i utgangspunktet tilfredstiller denne normen og redusert vannutskifting som følge av utbyggingen vil kunne resultere i episoder med oksygenmangel, sjenerende lukt og fiskedød. Behovet for vannutskifting er beregnet både ut fra oksygenbalansebetraktninger og på grunnlag av hydrografiske observasjoner i området sommeren 1999. Rapporten konkluderer at det med de foreliggende planer ikke vil være behov for spesielle tiltak for å sikre vannkvaliteten i Bjørvika. Horisontale rørforbindelser gjennom skipsstøtvollene vil trolig være tilstrekkelig for å sikre vannkvaliteten i et hesteskoformet basseng som skal etableres rundt tunnelen i vestre del av Bjørvika. I Bispevika vil det trolig være nødvendig med andre løsninger f.eks. tilførsler av små mengder ferskvann gjennom diffusorer nær bunnen. Det anbefales å etablere et overvåkingsprogram for å få en statistisk forsvarlig klassifisering av området før utbygging.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. vannutskifting	1. water renewal
2. terskelfjord	2. sill fjord
3. oksygenmangel	3. oxygen deficiency
4. hydrografi	4. hydrography

*Morten Schaanning*

Prosjektleder

Forskningsleder

ISBN 82-577-3874-3

*Bjørn Braaten*

Forskningssjef

## **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 løpende vurdering av effekter av ulike utbyggingsalternativer 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 endelige planer for utbygging. Rapporten bygger på tidligere notat utarbeidet av NGI og NIVA i juni 1999 og NIVA-rapport 4112-99.

Oslo, 15. juni 2000

*Morten Schaanning*

---

# Innhold

Sammendrag .....	5
<b>1. Innledning.....</b>	<b>8</b>
<b>2. Topografi og utbyggingsplaner .....</b>	<b>9</b>
2.1. Vannstandsvariasjoner og kartnullpunkt	9
2.2. Topografi før utbygging	9
2.3. Planer for tunnel og skipsstøtvoller	10
2.4. Heving av sjøbunn	12
<b>3. Behov for vannutskifting .....</b>	<b>13</b>
3.1. Antagelser og forutsetninger	13
3.2. Oksygenforbruk	13
<b>4. Vannutskiftingen i området før utbygging.....</b>	<b>17</b>
4.1. Måleprogrammet i 1999	17
4.1.1. Siktedyp	17
4.1.2. CTD-observasjoner	17
4.1.3. Måling med T/S kjede	17
4.2. Måleresultater	19
4.2.1. Trykkvariasjoner	19
4.2.2. Siktedyp	19
4.2.3. CTD-målinger	20
4.2.4. Oksygen	21
4.2.5. T/S-målinger	21
4.3. Beregnet vannutskifting før utbygging	24
4.4. Transportkapasiteten i kanaler gjennom skipsstøtvollene	25
4.4.1. Innledning - forutsetninger for beregningene	25
4.4.2. Modell for trykkdrevet transport	26
4.4.3. Beregninger for Bjørvika og Bispevika	28
4.4.4. Konklusjoner - trykkdrevet transport gjennom kanaler	32
<b>5. Konklusjoner og anbefalinger .....</b>	<b>33</b>
<b>6. Referanser .....</b>	<b>35</b>

---

## Sammendrag

Statens vegvesen, Oslo, planlegger fremføring av E18 i senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika. For å hindre sammenstøt fra skipstrafikken må utsatte deler av tunnelen beskyttes med skipsstøtvoller. Overkant av skipsstøtvollene vil danne terskler som begrenser utskiftingen av dypvannet innenfor. Målsettingen med NIVAs engasjement i dette arbeidet har vært å vurdere hvordan de planlagte konstruksjonene vil påvirke vannutskiftingen og oksygenforholdene i området etter utbygging.

Den første vurderingen av ulike utbyggingsalternativer for E-18 gjennom Bjørvika og Bispevika ble ferdigstilt i 1994 (NIVA-rapport 3043). To av alternativene dengang var senketunnel på eksisterende bunn og senketunnel nedgravd bak en sjetè (skipsstøtvoll). I løpet av 1999-2000 er det utviklet detaljplaner for senketunnel og skipsstøtvoller og effekter på vannutskifting ved ulike løsninger har vært vurdert i NGI-notat 30.06.99, NIVA-rapport 4112 (25.10.99) og NIVA-notat 13.12.99.

Ifølge utbyggingsplanene som ligger til grunn for denne rapporten kommer tunnelen vestfra ut i Bjørvika ved Plan og bygningsetatens kote -1 m. Ca 100 m lenger ut, ved kote ca -7 m, dukker tunneltaket ned under sedimentoverflaten. Rundt denne delen av tunnelen etableres et hesteskoformet basseng med skipsstøtvoller opp til kote -2 m. Over resten av Bjørvika, fra skipsstøtvollen til Bjørvikautstikkeren vil det gjenstå en åpning på ca 150 m uten installasjoner som begrenser vannutskiftingen. I Bispevika stiger tunnelen fra kote -5 m ved Paulsenkaia til kote -2 m ved Sørenga. Vannutskiftingen i Bispevika vil begrenses av en skipsstøtvoll utenfor tunnelen. Seilingsdypet over vollen blir 2 m med unntak av en ca 5 m bred kanal ned til kote -3,6 m.

Et foreløpig åpent alternativ er å deponere forurensete masser i Bjørvika og Bispevika. Det lanserte konseptet innebærer at de forurensete massene deponeres bak sjetéer som bygges parallellt med og like innenfor tunnelen. Deretter dekkes med rene masser hvorav det øverste laget skal utformes slik at sterke propellstrømmer fra planlagt fergetrafikk i området ikke medfører erosjon i topplaget. Dette alternativet berører vannkvalitetsproblematikken på flere måter. Bunnen vil heves opp til et nivå med bedre vannutskifting, og oksygenforbruket i sedimentene vil bli redusert ved at sedimenter med høyt innhold av organisk materiale erstattes med rene tildekkingsmasser (sand og stein). Et usikkerhetsmoment er hvordan eventuell bruk av grov stein i topplaget kan påvirke oksygenforbruket på lengre sikt. Grov stein kan fungere som en felle for akkumulasjon av organisk materiale og bør i utgangspunktet ikke benyttes i andre områder enn der dette er nødvendig for å unngå erosjon fra sterke propellstrømmer.

Miljømålene er valgt i henhold til SFT's vannkvalitetskriterier "egnethet 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 mlO<sub>2</sub>/l ("egnet") mest realistisk og samtidig tilstrekkelig til å unngå episoder med sjenerende lukt og fiskedød. I det tilfelle oksygeninnholdet i tilførselsvannet blir mindre enn 2,5 mlO<sub>2</sub>/l er tiltakene dimensjonert slik at differensen mellom tilførselsvannet og bassengvannet innenfor skal være mindre enn 1,0 mlO<sub>2</sub>/l. Fjerning eller tildekking av forurensete 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 på sikt 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.

Oksygen forbrukes biologisk ved nedbrytning av organisk materiale i vann og sedimenter. I grunne områder som dette, vil det meste av forbruket foregå nær sedimentoverflaten. I tillegg kan hydrogensulfid som diffunderer oppover fra dypere sedimentlag medføre et ikke ubetydelig "kjemisk" oksygenforbruk i grenseflaten mellom sedimenter og vannmasse. Oksygen tilføres i all hovedsak ved tilførsel av friske vannmasser med høyere innhold av oppløst oksygen. I områder der horisontal utskifting hindres av installasjonene, må tettheten av vannet som strømmer inn over barrieren være større enn tettheten i dypvannet innenfor. I sjøvann er tettheten først og fremst kontrollert av saltholdigheten. Tettheten i bunnvannet reduseres ved ulike former for vertikal blanding som gir oppadrettet transport av salt. I havneområder vil propellstrømmer fra store båter bidra til vertikal omrøring av vannsøylen, men effekten av dette vil reduseres betydelig på innsiden av skipsstøtvollene.

Alger vil lite trolig kunne gi vesentlig netto produksjon av  $O_2$  nær bunnen i Bjørvika og Bispevika. Lavt siktedyp gir dårlige forhold for fotosyntese og oksygen-produksjon fra eventuell algevekst nær bunnen vil på sikt motvirkes av et økende forbruk ved nedbrytning av døde alger på sedimentoverflaten.

Vurderingene i denne rapporten er derfor basert på at konsentrasjonen av oksygen i dypvannet er et resultat av to dominerende prosesser: forbruk i sedimentene og tilførsel via vannutskifting. For beregningene ble det på grunnlag av publiserte verdier fra lignende områder og målinger av oksygenforbruk i sedimenter fra andre deler av Oslofjorden antatt et oksygenforbruk i sedimentene på i beste fall  $0,4 \text{ mmolO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$  i verste fall  $2 \text{ mmolO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ . Beregninger basert på verste fall m.h.t. oksygenforbruk og at differensen mellom tilførselsvannet og bassengvannet ikke skal være større enn  $1 \text{ mlO}_2/\text{l}$  ga et utskiftingsbehov for det hesteskoformete bassenget i Bjørvika på  $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . For Bispevika under kanaldypet (4 m) ble tilsvarende behov for vannutskifting  $0,4 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Målinger utført i Bjørvika sommeren 1999 viste temperaturvariasjoner fra 5 til  $20^\circ\text{C}$ . Oppvarmingen gikk helt ned til bunnen på 8 m dyp. Påvirkning fra Akerselva ga periodevis 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 varierte mellom 2,3 og  $4,4 \text{ mlO}_2/\text{l}$ . I henhold til SFT's miljøkvalitetskriterier var siktedypet "dårlig" og oksygenforholdene "mindre gode". Temperatur- og saltholdighet-sensorer plassert på faste punkter i vannmassen viste korttidsvariasjoner ofte i størrelsesorden 1 dag eller mer. Målingene indikerte gjennomsnittlige transporter på  $1,2\text{-}1,3 \text{ m}^3/\text{s}$  i dypvannet under 4 m, og karakteristiske utskiftingsstider fra mindre enn ett døgn opp til 5-6 døgn.

I et tidligere planforslag ble det foreslått å etablere trapesformete kanaler gjennom skipsstøtvollene som et tiltak for å avhjelpe vannutskiftingen både i Bispevika og Bjørvika. For å vurdere hvordan kanalene ville påvirke vannutskiftingen, ble det utviklet en beregningsmodell for tetthetsdrevet transport gjennom kanaler og horisontale rørgjennomføringer i skipsstøtvollene. Med unntak av den grunne kanalen inn til Bispevika er kanalene utelatt i det endelige planutkastet, men modellen er beholdt i rapporten som et grunnlag for vurdering av de resterende tiltak.

Prinsipielt kan best mulig vannkvalitet sikres ved

- fjerning av oksygenforbrukende masser (sedimenter med høyt organisk innhold)
- oppfylling av dype områder der hvor dette er mulig
- at høyde mellom tunneltak og sjøbunnen innenfor gjøres lavest mulig over størst mulig strekning
- at eventuelle kanaler gjennom skipsstøtvollene gjøres så brede som mulig, særlig ved bunnen
- at skipsstøtvollene åpnes for vannutskifting ved store rørgjennomføringer nær bunnen.
- Bruk av permeable masser vil også kunne bedre vannutskiftingen gjennom skipsstøtvollen, men det er tvilsomt om dette tiltaket alene vil kunne gi tilstrekkelig effekt.

- Tilførsel av ferskvann gjennom diffusorer ved bunnen av bassengene.

Marginene før kritisk lave oksygen-nivå inntreffer er små sammenlignet med usikkerhetene knyttet til forutsetninger og beregninger. Derfor anbefales det at det tilrettelegges for tiltak som etter behov kan iverksettes i ettertid.

I Bjørvika vil ikke forholdene for vannutskifting bli vesentlig dårligere etter den planlagte utbyggingen enn de er idag. Tverrsnittet av åpningen ved tunneltraseen vil bli halvert, men dette vil ikke gi vesentlig reduksjon i utskiftingshyppighet. I tillegg reduseres trolig behovet for vannutskifting ved utfylling for fremtidig bebyggelse i nordøstre hjørne av vika, og eventuell etablering av deponier opp til kote -6.1 m.

I Bispevika vil forholdene bli vanskeligere. Bunnen på innsiden av skipsstøtvollen vil gå ned til ca kote -8 m i to separate dypåler på hver side av tunnelen. Det er lite trolig at kanalen ned til kote -3,6 m vil være tilstrekkelig til å opprettholde vannkvaliteten i disse to dypålene. Tilførsel av små mengder (ca 15 l/s) ferskvann gjennom diffusorer ved bunnen av de to dypålene anses tilstrekkelig for å sikre at vannkvaliteten i Bispevika etter utbygging ikke blir dårligere enn forutsatt.

Heller ikke i det hesteskoformete bassenget rundt tunnelen i Bjørvika er det sannsynlig at naturlig vannutskifting over skipsstøtvollen ved kote -2m blir tilstrekkelig til å opprettholde tilfredstillende vannkvalitet etter utbygging. Det bør vurderes å legge ned horisontale rørgjennomføringer i skipsstøtvollen nær bunnen av bassenget. Totalt tverrsnittareal på ca 10 m<sup>2</sup> antas tilstrekkelig. Dersom det skulle vise seg at vannkvaliteten etter utbygging likevel ikke tilfredstiller miljømålene kan diffusorløsninger tilsvarende de som beskrevet for Bispevika etableres i ettertid.

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 og ikke bare med sonder.

# 1. Innledning

Statens vegvesen, Oslo, planlegger fremføring av E18 i senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika. For å hindre sammenstøt fra skipstrafikken må utsatte deler av tunnelen beskyttes med skipsstøtvoller. Toppen av vollene vil danne terskler som vil begrense vannutskiftingen og øke risikoen for stagnerende vannmasser innenfor konstruksjonen. Dette kan føre til oksygenmangel og dannelse av hydrogensulfid (råttent vann) nær bunnen. Sjenerende lukt vil kunne oppstå under episoder med plutselig vertikal blanding. Fiskedød som følge av oksygenmangel i vannmassene har så sent som i 1995 vært observert i havnebassenget og Bekkelagsbassenget (Magnusson et al., 1996). Målsettingen med dette arbeidet har vært å vurdere effekter av planlagt utbygging på vannutskifting og oksygenforhold, samt foreslå tiltak som kan bidra til å motvirke redusert vannkvalitet på innsiden av installasjonene i Bjørvika og Bispevika.

Den første vurderingen av ulike utbyggingsalternativer for E-18 gjennom Bjørvika og Bispevika ble ferdigstilt i 1994 (Berge og Molvær, 1994). To av alternativene dengang var senketunnel på eksisterende bunn og senketunnel nedgravd bak en sjetè (skipsstøtvoll). I løpet av 1999-2000 er det utviklet detaljplaner for en kombinasjon av disse to alternativene og effekter på vannutskifting er vurdert i flere notat og rapporter (Hauge og Schaanning, 1999, Schaanning et al., 1999, Schaanning og Bjerkeng, 1999).

Denne rapporten bygger på de tidligere rapportene. I forhold til foregående vurdering (Schaanning og Bjerkeng, 1999) er vannutskifting via kanaler gjennom skipsstøtvollene blitt mindre aktuelt og tidligere forslag om å unngå stagnerende forhold ved å heve sjøbunnen har fått fornyet aktualitet gjennom de foreslåtte deponiene for forurensete masser på innsiden av tunnelltraseen.

## 2. Topografi og utbyggingsplaner

### 2.1. Vannstandsvariasjoner og kartnullpunkt

Tabell 1 viser noen nøkkeltall for vannstandsvariasjonene i indre Oslofjord. Tabellen viser beregnede amplituder i forhold til normal middelvannstand, siden det er dette som har mest betydning i forhold til vannutskiftingen. 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.

For navigasjonsmessige betraktninger er det vanlig å ta utgangspunkt i lavvannsnivået ved vårjevndøgn som er 31 cm under middelvannstanden i indre Oslofjord. Bunnkonturene i figur 1 er på samme måte som i sjøkart trukket i forhold til dette nullpunktet. Plan og bygningsetaten i Oslo bruker et nullpunkt som ligger 35 cm over middel vannstand. Koteangivelsen for tunnelen og skipsstøtvollene er basert på dette nullpunktet. Midlere seilingsdyp over skipsstøtvollen på kote -2,0 eller gjennom kanalen i Bispevika på kote -3,6, blir derfor mindre, hhv. 1,7 og 3,3 m. Angitt som bunnkonturer i sjøkartet ville de samme dypene vært hhv. 1,3 og 2,9 m. Historisk laveste målte vannstand ville gitt seilingsdyp over skipsstøtvollene på 0,6 m.

I denne rapporten vil betegnelsen "kote" alltid referere til Plan og bygningsetatens nullpunkt.

**Tabell 1.** Vannstandsvariasjoner i indre Oslofjord (verdier beregnet fra Tidevannstabellen, Statens kartverk, Sjøkartverket) og nullpunkt for ulike kartverk.

<b>Faktor</b>	<b>Returperiode</b>	<b>Amplitude/utslag</b>
Høyeste målte vannstand	flere år	+ 188 cm
Plan og bygningsetatens nullpunkt	-	+ 35 cm
Høstjevndøgn spring høyvann	1 år	+ 31 cm
Middel spring høyvann	14 dgr	+ 18 cm
Middel høyvann <sup>1</sup>	12.5 timer	+ 14 cm
Middel nipp høyvann	14 dgr	+ 10 cm
<b>Middel vannstand</b>	<b>6.25 timer</b>	<b>0</b>
Middel nipp lavvann	14 dgr	- 10 cm
Middel lavvann	12.5 timer	- 14 cm
Middel spring lavvann	14 dgr	- 18 cm
Vårjevndøgn spring lavvann <sup>2</sup>	1 år	- 31 cm
Laveste målte vannstand	flere år	- 105 cm

<sup>1)</sup> Sjøkart kystkontur. <sup>2)</sup> Sjøkart dybdekontur.

### 2.2. Topografi før utbygging

Bjørvika og Bispevika er to bassenger i Oslo indre havn med åpning mot havnebassenget og fjorden utenfor. Bassengene er typisk 7-9 meter dype og har i dag ingen terskler som begrenser vannutskiftingen. Akerselva munner ut mellom de to bassengene. Elva har en normal vannføring på 17,5 m<sup>3</sup>/s.



Eksisterende topografi med inntegnede planer for senketunnelen, skipsstøtvollene og deponiene er vist i Figur 1. Beregnede flateareal og underliggende vannvolum for ulike dyp er vist i Tabell 2. 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.

**Tabell 2.** Areal- og volumforhold innenfor tunneltraseen og skipsstøtvollene for Bjørvika og Bispevika, beregnet ut fra dagens topografi.

	Dyp (m)	Areal (m <sup>2</sup> )	Volum under gitt dyp (m <sup>3</sup> )
Bjørvika	0	82 500	514 600
	4	68 400	212 800
	6	53 600	90 800
	8	19 500	17 700
	9	5 700	5 100
	10	1 400	1 500
	12.1	0	
Bispevika	0	49 900	258 500
	2	48 700	159 900
	4	37 000	74 200
	6	23 000	14 200
	7	3 800	800
	7.4	0	

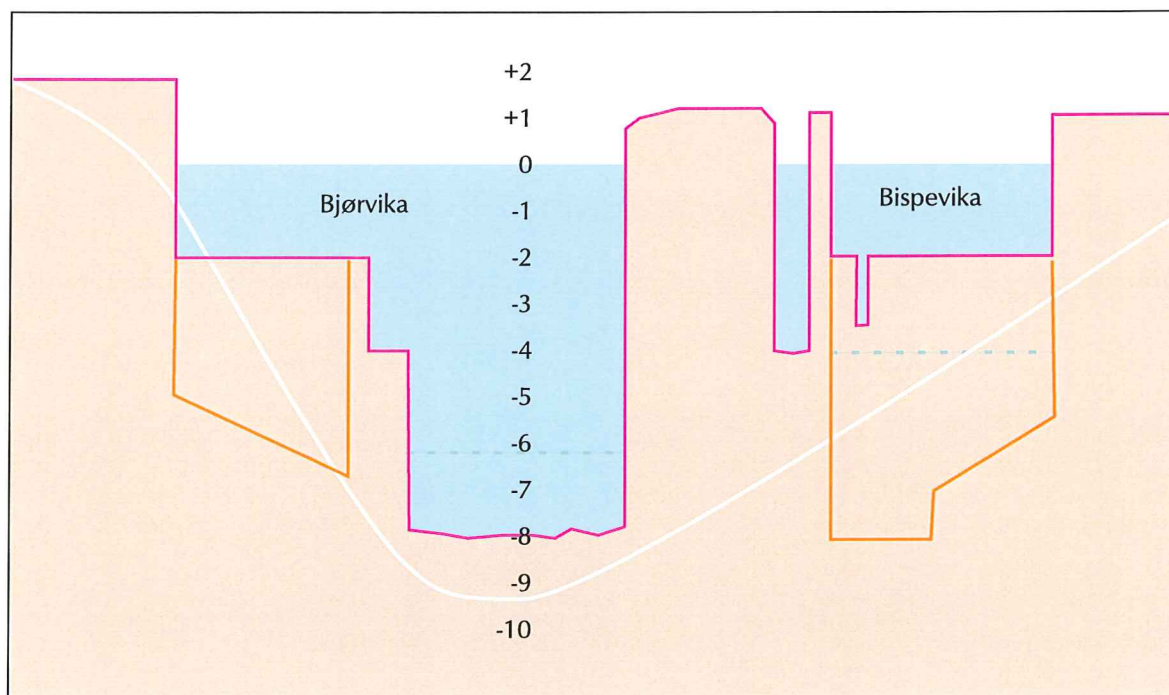
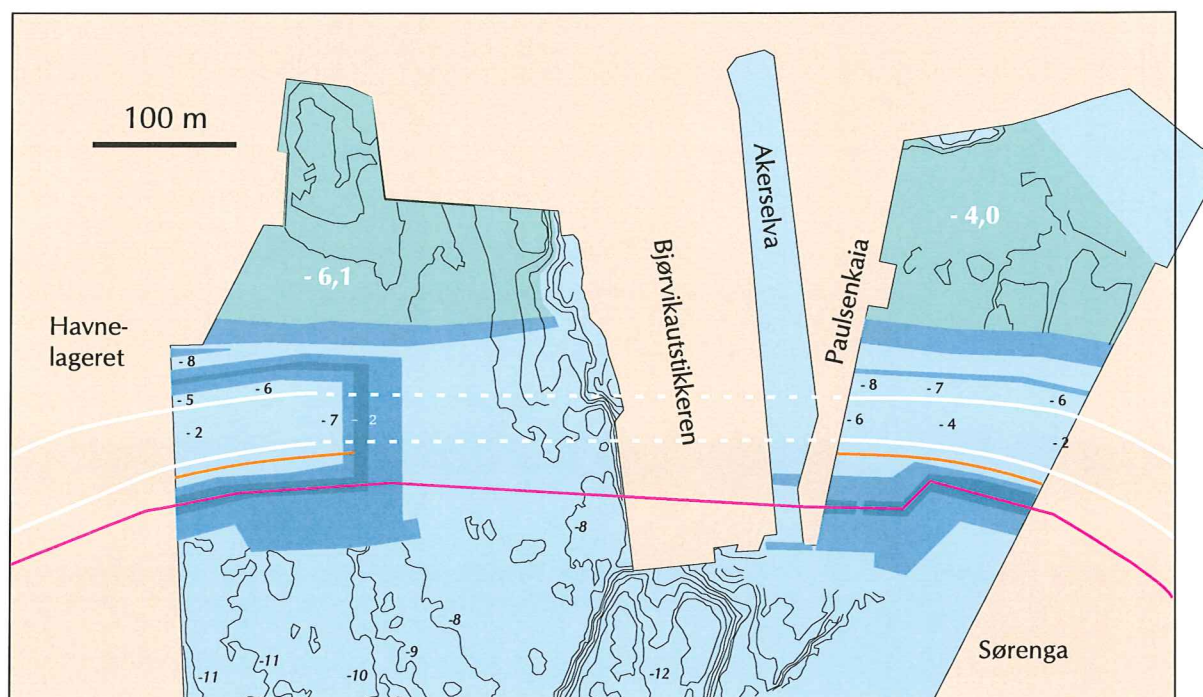
### 2.3. Planer for tunnel og skipsstøtvoller

Under kaia ved Havnelageret kommer tunnelen fra vest inn i Bjørvika. Ved kaikanten ligger taket av tunnelen nær kote -1 m. Ca 100 m fra kaikanten dukker tunnelen ned under sjøbunnen og fortsetter fullstendig nedgravet gjennom resten av Bjørvika (ca 150 m), videre under Bjørvikautstikkeren, Akerselva og Paulsenkaia. Gjennom Bispevika stiger tunnelen fra kote -5 m ved Paulsenkaia til kote -2 m ved Sørenga.

For å skjerme tunnelen mot sammenstøt med store båter bygges skipsstøtvoller som skal ha overkant ved kote -2 m etter setninger i sjøbunnen under vollene. Plan og bygningsetatens koteangivelser definerer nullpunkt i forhold til høstjevndøgn spring høyvann. For indre Oslofjord ligger dette nullpunktet 0,4 m over middel vannstand (Tabell 1). Ved middel vannstand vil seilingsdypet over skipsstøtvollene dermed bli på ca 1,6 m. Bunnkotene i fig. 1 er tegnet i forhold til sjøkartets nullpunkt. Dette er definert i forhold til vårjevndøgn spring lavvann som ligger 0,3 m under middel vannstand.

Den delen av tunnelen som stikker opp over bunnen i Bjørvika omkranses av en hesteskoformet skipsstøtvoll. Innenfor disse vollene vil ytre (østre) ende av bassenget være åpent helt ned til bunnen (kote -7 m). Nærmere Havnelageret danner tunnelen en rygg omgitt av smale renner på hver side ned kote -5 - -7 m.

I Bispevika bygges en tilsvarende skipsstøtvoll tvers over bukta på utsiden av tunnelen. Toppen av vollen skal ligge på kote -2 m med unntak av en smal kanal (for småbåter) ned til kote -3,6 m.



**Figur 1.** Forenklet skisse av tunnel (hvit, stiplet under sjøbunn), skipsstøtvoller (mørk blå) og eventuelle deponier (grønne). Konturer viser eksisterende sjøbunn referert til sjøkart-null. Øvrige dybdeangivelser er angitt i forhold til Plan og bygningsetatens nullpunkt. Snittet nederst viser tunneltaket (hvit linje), snitt gjennom minste tverrsnitt for vannutskifting (rød linje), bassengene mellom skipstøtvollene og tunnelen (gul linje) og bunnivå for deponiene innerst i Bjørvika og Bispevika (grønn stiplet linje).

## 2.4. Heving av sjøbunn

Eksisterende sedimenter i byggeområdet er sterkt forurenset (Koniczny, 1994). Et foreløpig åpent alternativ er å deponere massene som fjernes fra byggegropen bak sjetéer som bygges parallellt med og like innenfor tunneltraseen (fig. 1). Deretter dekkes med geotekstil og ca 1 m rene masser hvorav det øverste laget er planlagt med kornstørrelser opp til ca 10 cm for å unngå erosjon i områder med sterke propellstrømmer. På denne måten heves sjøbunnen til kote  $-6,1$  m i Bjørvika og kote  $-4,0$  m i Bispevika. Dvs oppfylling til dagens dybdekontur 5,4 m i Bjørvika og 3,3 m i Bispevika. Det er uklart hvor denne konturen går gjennom Bispevikas nordøstre hjørne.

Slik oppfylling vil berøre vannkvalitetsproblematikken på flere måter. Først og fremst blir volumene av de vannmassene som skal skiftes ut mindre. Dernest vil oksygenforbrukende materiale i sedimentene bli redusert ved at sedimenter med høyt innhold av organisk materiale erstattes med sand og stein. Dette vil trolig gi redusert oksygenforbruk på kort sikt, men varig redusert oksygenforbruk vil bare kunne oppnås ved at tilførselen av organisk materiale reduseres. Heving av sjøbunnen vil kunne medføre noe sterkere bunnstrøm og dermed redusere akkumuleringen av organiske partikler på toppen av deponiene. Imidlertid vil denne effekten kunne motvirkes av økt sedimentasjon i dypålene nærmere tunnelen.

Et annet usikkerhetsmoment er hvordan kornstørrelser opp til 10 cm vil påvirke akkumuleringen av organisk materiale. En ru steinbunn i et område med små/moderate strømhastigheter langs bunnen kan trolig fungere som en slags sedimentasjonsfelle for organisk materiale. Erfaringer fra slik bunn i nærheten av fiskeoppdrettsanlegg (Schaanning, 1998) har vist dårlig vannkvalitet i hulrom mellom steiner av denne størrelsesorden (høyt innhold av organisk materiale, hydrogensulfid og gassdannelse). Fнокker av organisk materiale antas ha mindre tendens til å akkumulere på en glatt sandbunn der tilsvarende små/moderate strømhastigheter vil føre til resuspensjon og spredning av det oksygenforbrukende materialet.

## 3. Behov for vannutskifting

### 3.1. Antagelser og forutsetninger

Dagens vannutskifting styres av forhold i Bunnefjorden og Vestfjorden og påvirkes av tidevann, vind og lufttrykksvariasjoner. Tidevannet bidrar daglig til vannfornyelsen, mens de andre faktorene varierer mindre regelmessig.

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. I indre Oslofjord er denne høydeforskjellen relativt liten (28 cm, Tabell 1). En serie simuleringer av spredning etter et utslipp av partikler i Bjørvika viste at strømhastighetene i området var svært lave (Rudberg et al 1994). Det vil derfor være relativt lite bevegelsesenergi i vannet som strømmer over tersklene og turbulent nedblanding av vann under 2 m vil være liten. Det er muligheter for periodevis tetthetsdrevet innstrømning til dyp større enn 2 meter (jfr. Berge & Molvær 1994), men det er vanskelig å kvantifisere hvor mye og forutsi når slik utskifting vil inntreffe. Noe vinddrevet nedblanding av vann er også sannsynlig, men en har her samme problem i forhold til kvantifisering og frekvens. I dagens situasjon vil propellstrømmene fra store båter bidra til vertikal blanding, men slik blanding vil bli langt mindre etter etablering av skipsstøtvoller med seilingsdyp i underkant av 2 m. Det er derfor rimelig å anta at regulær, naturlig utskifting av dypvannet bak skipsstøtvollene vil bli svært liten.

Sirkulasjons- og utskiftings-forholdene vil variere med årstidene. Stabiliteten i vannmassene avhenger i stor grad av saltholdighet og temperatur. Om sommeren vil overflatevannet varmes opp mest, slik at dette får lavere tetthet, og sjiktningen i vannmassene blir mer markert. Perioder med sterk vind vil være gunstig, fordi vindfeltet både genererer horisontalstrøm og vertikale bevegelser. Høststormer vil således være gunstig for vannkvaliteten i området. Vannføringen i Akerselva kan være en viktig faktor. Sterk utstrømning av ellevann er gunstig fordi det medfører tildels betydelige strømmer i overflaten. Samtidig vil det lette ferskvannet som tilføres områdene utenfor skipsstøtvollene bidra til at den vertikale lagdelingen blir mer markert og utveksling med dypet hemmes. Totalt sett ser det ut til at sommer/tidlig høst vil være den minst gunstige perioden med hensyn på mulig "naturlig" utskifting av vann i pollene.

### 3.2. Oksygenforbruk

Oksygen forbrukes ved respirasjon og nedbrytning av dødt organisk materiale i vannmassen og på bunnen. I relativt grunne områder som dette antas forbruket i de frie vannmassene å være lite sammenlignet med forbruket ved sedimentoverflaten.

Oksygenforbruket ved sedimentoverflaten er i hovedsak styrt av tilførselen av organisk materiale. Denne bestemmes først og fremst av produksjonsforholdene i overflatelaget. Fysiske forhold (lys, lagdeling) gir lav produksjon om vinteren (oktober-januar), men fra februar/mars til oktober er forholdene normalt gode for vekst av plankton og fastsittende alger. I sommerhalvåret er produksjonen ofte begrenset av tilgang på næringsalter som i dette området vil ha hovedkilder i Akerselva og annen avrenning fra land som kan være spesielt viktig i forbindelse med episodisk utvasking etter nedbør. Resirkulasjon av næringsalter fra nedbrytningsprosesser ved bunnen vil i grunne områder som dette kunne føre til en selvforsterkende eutrofiering med høy primærproduksjon i overflatelaget, høy sedimentasjon av organisk materiale og høyt oksygenforbruk i sedimentene. I tillegg til tilførsel av organisk materiale vil oksygenforbruket stimuleres av høyere temperaturer som i dette området vil kunne inntreffe sent på sommeren og tidlig på høsten.

Organisk materiale sedimenterer ofte i form av store aggregater med lav synkehastighet. Via resuspensjon og horisontal transport vil mye av det organiske materiale som synker ut av overflatelaget i grunne områder omfordes til dypere områder før nedbrytning. Organisk materiale som synker ned i det rolige vannet bak skipsstøtvollene vil vanskelig kunne transporteres videre og skipsstøtvollene vil derfor kunne fungere som en felle for materiale som ellers ville blitt transportert vekk og omsatt i dypere deler av fjorden.

Under eksperimentelt arbeid med sedimenter fra dype lokaliteter i Oslofjorden har det vært målt typisk oksygenforbruk tilsvarende 0,2-0,6 mmolO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>h (Schaanning et al 1996). Etter tilførsel av organisk materiale, f.eks. planteplankton, kan forbruket øke til 1- 2 mmol/m<sup>2</sup>h. Disse ratene ble målt ved å isolere en vannmasse i et kammer over et gitt areal av intakte sedimentflater med naturlig bunnfauna. Ved å skifte ut vannmassen i kammeret kontinuerlig med fluks F (utskiftingshastigheten) kunne sedimentets oksygenforbruk (SOC) beregnes fra differensen i konsentrasjon av O<sub>2</sub> i innløpet (C<sub>i</sub>) og utløpet (C<sub>o</sub>) og det innesluttete sedimentarealet (A) etter ligningen:

$$(C_i - C_o) \cdot F = SOC \cdot A.$$

For gitte konsentrasjoner av oksygen i innløp, gitt areal og gitt oksygenforbruk, kan fluksen (utskiftingsbehovet, vannbehovet) som må til for å oppnå ønsket konsentrasjon av oksygen i kammeret beregnes fra:

$$F = SOC \cdot A / (C_i - C_o)$$

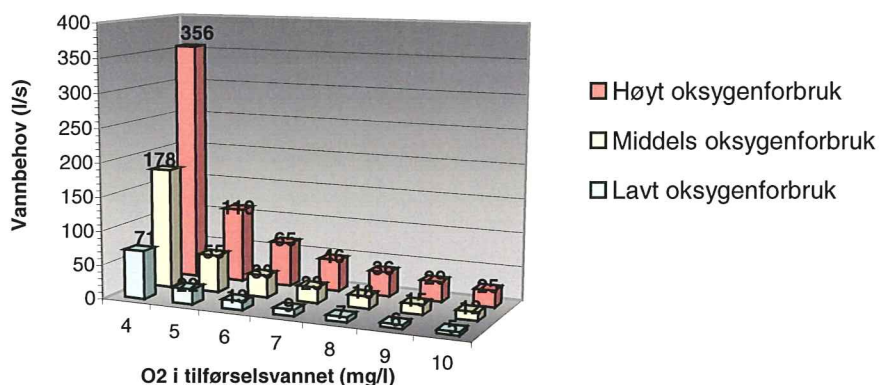
I prinsippet kan samme beregningsmetode anvendes for bassengene bak skipsstøtvollene. Beregningene forutsetter et gjennomblandet basseng (små konsentrasjonsgradienter i vannmassen) og at oksygenforbruket i vannmassen er lite sammenlignet med forbruket ved sedimentoverflaten.

Ved å løse ligningen for ulike konsentrasjoner av oksygen i tilførselsvannet (C<sub>i</sub>) og oksygenforbruk i sedimentene (SOC) kan en få et inntrykk av hvor raskt vannet i bassengene må skiftes ut for å unngå at oksygeninnholdet i vannet blir lavere enn den vedtatte målsettingen (C<sub>o</sub> = 2,5 ml O<sub>2</sub>/l = 3,6 mg O<sub>2</sub>/l).

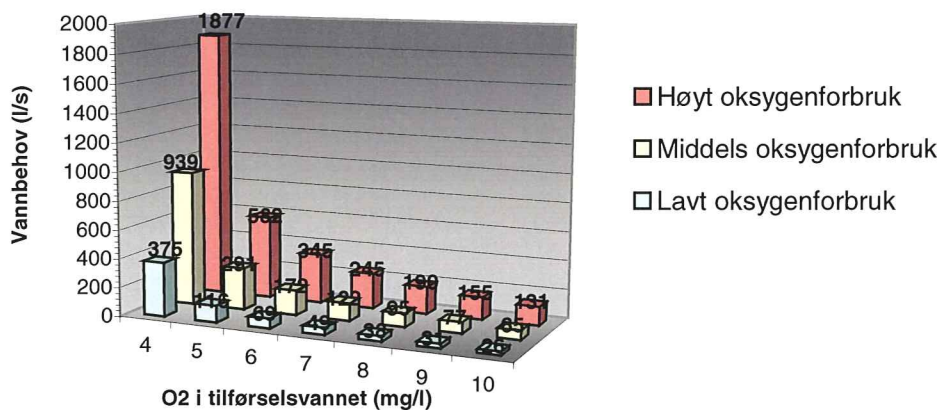
Figur 2 viser beregninger av vannbehovet (F) som må til for å oppnå tilfredstillende oksygenforhold i det hesteskoformede bassenget i Bjørvika og for bassenget bak skipsstøtvollen i Bispevika. Sistnevnte ble beregnet for dyp under 2 m (toppen av skipsstøtvollen) og i tilfelle kanalen kan antas gi tilstrekkelig vanntilførsel til området mellom 2 og 4 m dyp, ble det gjort egne beregninger for bassenget under 4 m dyp. I figuren ble F beregnet for oksygeninnhold i tilførselsvannet (C<sub>i</sub>) mellom 4 og 10 mgO<sub>2</sub>/l og tre nivåer av oksygenforbruk (lav SOC = 0,4 mmolO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>h, middels SOC = 1 mmol O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>h og høy SOC = 2 mmolO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>h). Arealene i de angitte dypene ble multiplisert med en topografisk faktor på 1,25.

Figuren viser at vannbehovet øker sterkt når oksygeninnholdet i tilførselsvannet nærmer seg grenseverdien på 3,6 mg/l. I praksis vil dette kunne tilsvare en periode der oksygeninnholdet i bassengvannet for en kortere periode tillates å bli lavere enn 3,6 mg/l. Dersom kravet midlertidig senkes til C<sub>o</sub> = 1,4 mg/l vil vannbehovet ved C<sub>i</sub> = 4,0 mg/l være mindre enn 20% av vannbehovet ved C<sub>o</sub> = 3,6 mg/l. F.eks. vil vannbehovet til Bispevika (>4m) reduseres fra verste fall (høyt oksygenforbruk) 1,3 m<sup>3</sup>/s til 0,2 m<sup>3</sup>/s dersom en aksepterer en midlertidig reduksjon av oksygeninnholdet til 1,4 mg/l som tilsvarer nedre grense for klasse 3 "mindre egnet" for fritidsfiske. Enda vil det være relativt god margin før bassengvannet blir oksygenfritt og kortere episoder med oksygenverdier noe lavere enn 3,6 mg/l kommer ikke nødvendigvis i konflikt med målsettingen "egnet" fordi denne fastsettes på grunnlag av midlere oksygeninnhold over et lengre tidsrom.

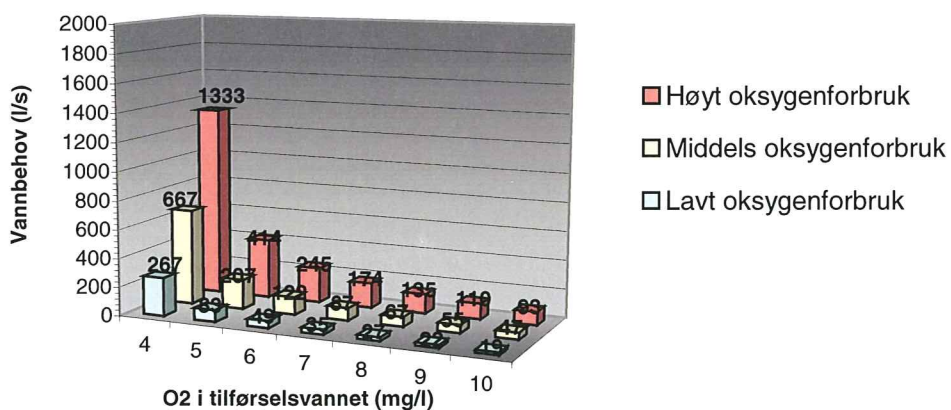
A) Hesteskoformet basseng i Bjørvika (> 2 m)



B) Bispevika (> 2 m)



C) Bispevika (> 4 m)



Figur 2. Beregnet vannbehov (F) for å oppnå tilfredstillende oksygenforhold i bassengvannet bak fremtidig skipsstøtvoll i A) Hesteskoformet basseng i Bjørvika, B) Bispevika under 2 m dyp (skipsstøtvoll) og C) Bispevika under 4 m dyp (kanalen).



En annen interessant egenskap ved bassengene vil være hvor stor utskiftingen må være for å holde en konstant forskjell i oksygeninnholdet mellom bassengvannet og tilførselsvannet. Utbygger har ingen mulighet til å påvirke  $C_i$  og det er pr idag ikke godt dokumentert hvor stor  $C_i$  vil kunne være i det aktuelle området. Det kan derfor være et rimelig krav til utbygger at  $C_i - C_o \geq 1 \text{ mlO}_2/\text{l}$ . Isåfall vil vannbehovene bli som vist i Tabell 3.

Etablering av et eventuelt deponi i Bispevika vil redusere volumet av vannmassen i bassenget, men dette vil ikke påvirke behovet for vannutskifting så lenge oksygenforbruket (SOC) eller arealet ikke blir vesentlig endret. Dersom SOC reduseres f.eks. fra middels til lavt ved en slik omlegging kan reduksjonen i vannbehovet leses direkte fra Figur 2 B eller C.

I perioder med lavere oksygenforbruk eller bedre vannutskifting vil oksygeninnholdet i dypvannet bli større og representere en buffer for perioder med høyt oksygenforbruk og/eller dårlig vannutskifting. Med utgangspunkt i  $8,0 \text{ mgO}_2/\text{l}$ , forbruk  $1 \text{ mmol/m}^2\text{h}$  og ingen vannutskifting, vil det eksempelvis ta 25 dager å tømme oksygenreservene i det hesteskoformete bassenget i Bjørvika. Tilsvarende beregning for Bispevika ( $>4 \text{ m}$ ) ga 33 dager. Grenseverdien på  $3,6 \text{ mg O}_2/\text{l}$  vil passeres etter hhv 14 og 18 dager i de samme to bassengene.

Det må understrekes at dette er svært teoretiske beregninger og hvis mulig anbefales fleksible løsninger som gjør det mulig å justere vanntilførselen etter at utbyggingen er ferdig. Oksygeninnholdet vil i kortere perioder kunne senkes til  $1,4 \text{ mgO}_2/\text{l}$  uten at konsentrasjonen i gjennomsnitt kommer under  $3,6 \text{ mg/l}$ . Både fisk og bunndyr vil normalt tåle slike belastninger over kortere perioder. Scenariene indikerer at det bør planlegges for vannmengder opp mot  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  i Bjørvika-bassenget og opp mot  $2 \text{ m}^3/\text{s}$  for Bispevika.

Tabell 3. Vannbehov ved konstant  $C_i - C_o = 1 \text{ mlO}_2/\text{l}$ .

	Oksygenforbruk:	Lavt	Middels	Høyt
Hesteskoformet basseng i Bjørvika		22	55	110
Bispevika ( $> 4\text{m}$ )		84	211	421
Bispevika ( $>2 \text{ m}$ )		116	291	582

## 4. Vannutskiftingen i området før utbygging

### 4.1. 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.

#### 4.1.1. Siktedyp

Siktedyp ble målt med Secchi-skive til samme tidspunkter og på samme posisjon som CTD-målingene (Figur 3).

#### 4.1.2. 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 3).

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.

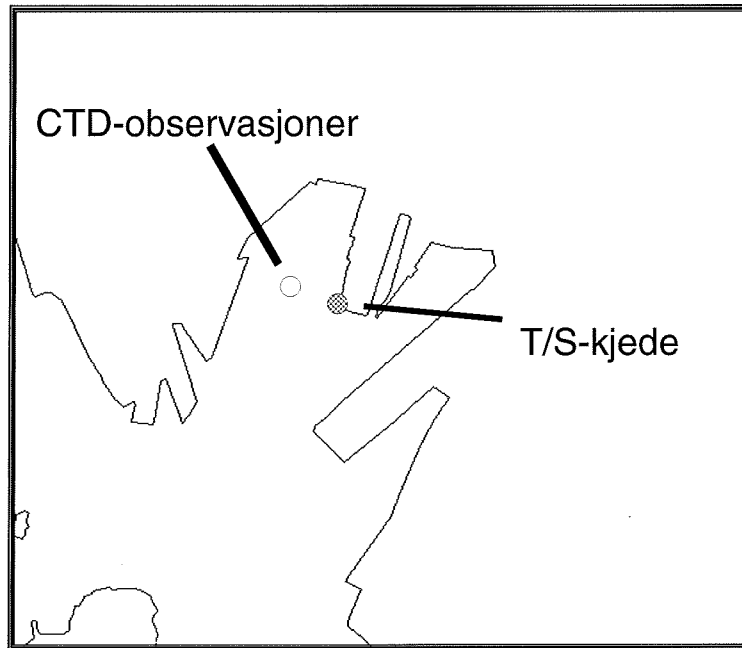
Sonden registrerte også oksygen.

#### 4.1.3. Måling med T/S kjede

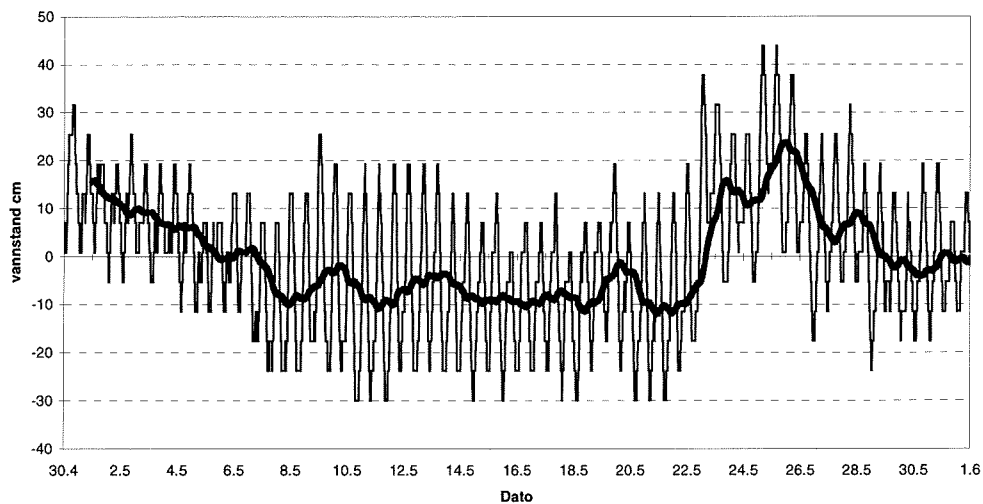
Målingene ble utført kontinuerlig i perioden 29. april - 3. juni, 1999, fra yttersida av Bjørvika-utstikkeren (Figur 3). Til målingene ble det benyttet en T/S kjede fra Aanderaa instruments. Den måler temperatur og saltholdighet i fem forutbestemte dyp, og i programmerte tidsintervaller. Tidsintervallet 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.





**Figur 3.** Grov kartskisse med måleposisjoner for T/S-kjede og hydrografiske profiler (CTD). Siktedyp ble målt på stasjonen for CTD-observasjoner.



**Figur 4.** Variasjon i trykk (som cm vannstand) målt på fast dyp i forhold til bunn i mai 1999 som avvik fra middelvei for mai 1999, samt 24 timers glidende middel (tykk kurve). Det er ikke korrigert for lufttrykksvariasjoner.

## 4.2. Måleresultater

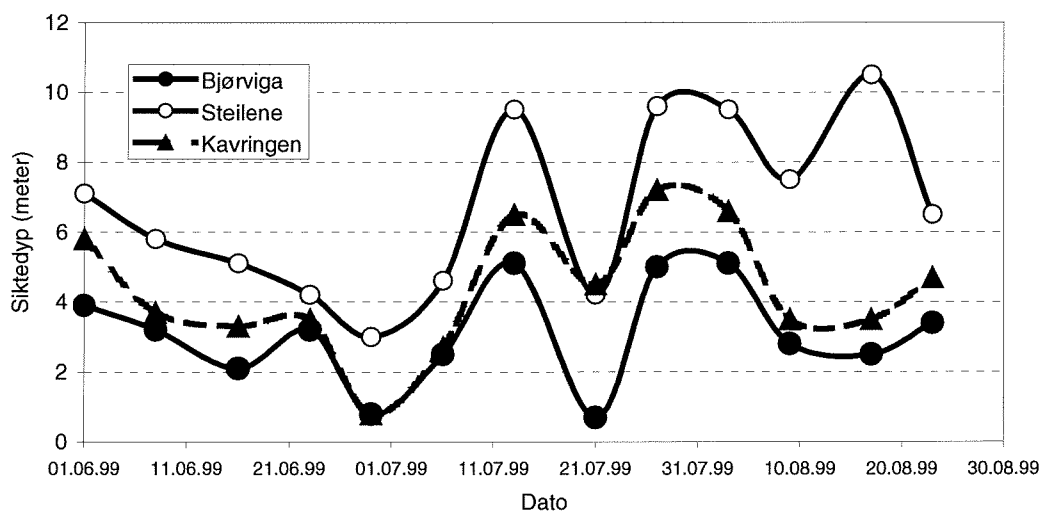
### 4.2.1. Trykkvariasjoner

Figur 4 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.

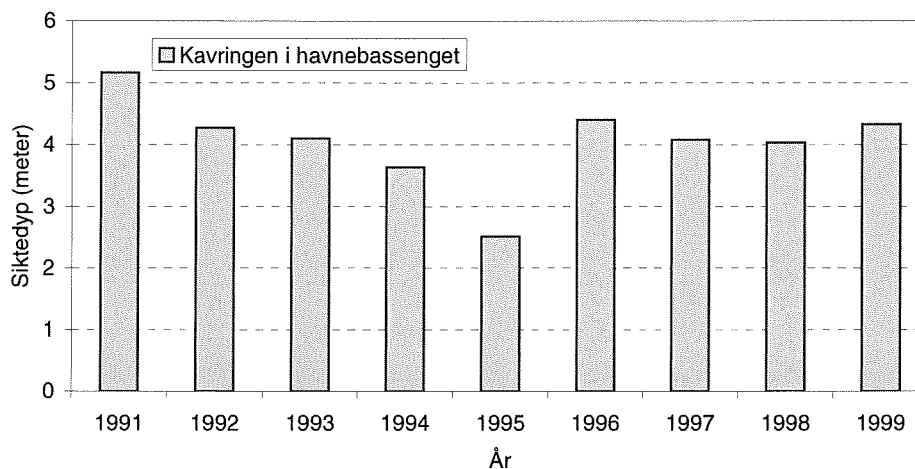
### 4.2.2. Siktedyp

Resultatene av siktedypmålingene er vist i Figur 5. 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 5 viser at siktedypet i Bjørvika følger siktedypet lengre ut i fjorden men på et lavere nivå.



**Figur 5.** Siktedypet i Bjørvika 1999, sammenlignet med siktedyp ved Kavringen lenger ute i havnebassenget og Steilene (Vestfjorden).



**Figur 6.** 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 nedbørsmengder 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 6). 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.

#### 4.2.3. CTD-målinger

Resultatene av CTD-målingene er vist i Figur 7. 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 vanntype med høyere saltholdighet nær bunnen.

Isolinje-plottet for tetthet ( $\sigma_t$ ) 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.

#### 4.2.4. 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.

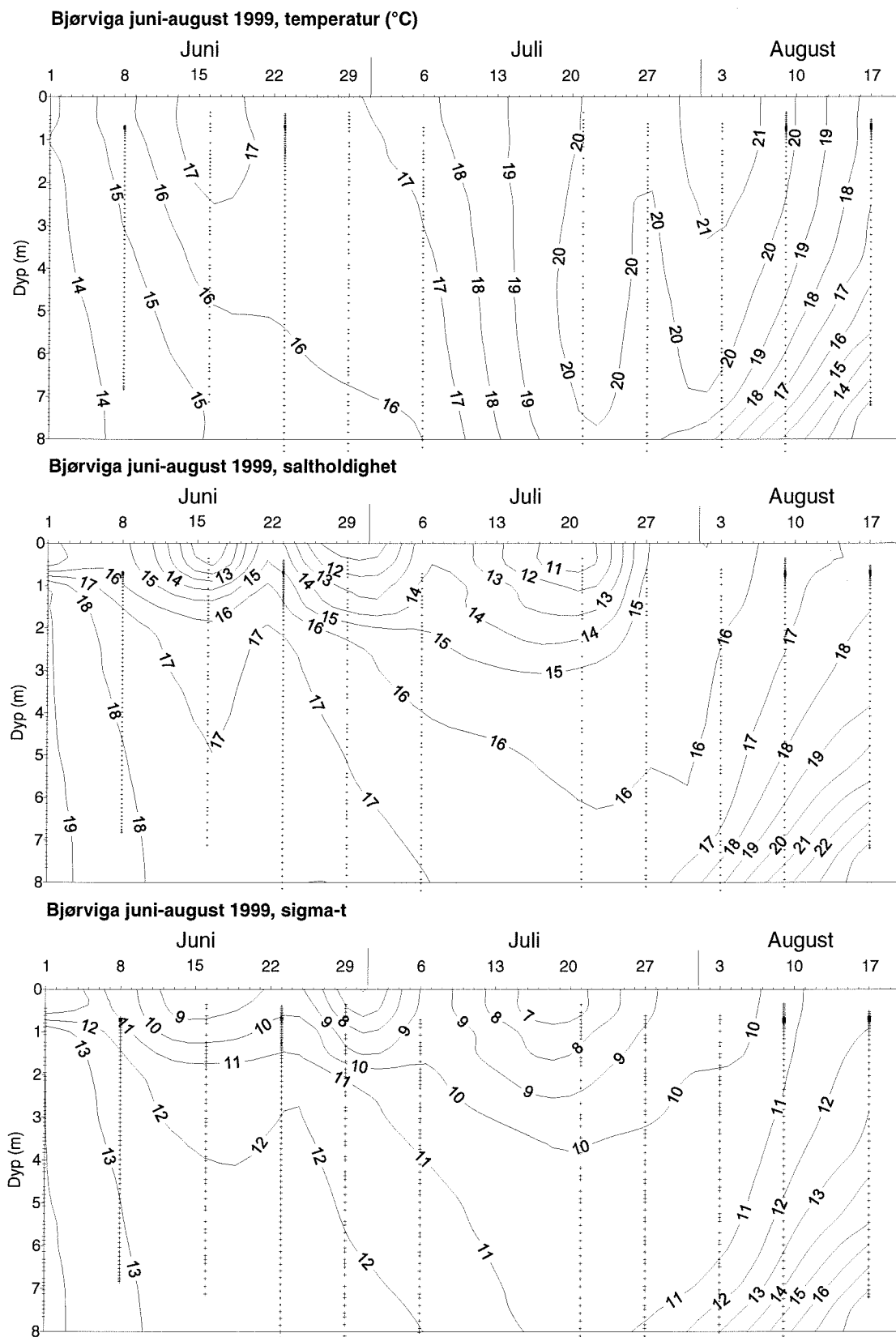
Overvåkingsdata fra Bekkelagsbassenget fra 1983-97 viser at oksygenkonsentrasjonen på 8 meters dyp varierer mellom 0.5 til 9.5 ml/l over året. 25% av målingene lå mellom 0.5 og 2.8 ml/l. Medianverdi var ca 5 ml/l. På 12 meters dyp var variasjonen mellom 0.4 og 9.4 ml/l, med medianverdi på 3 ml/l.

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.

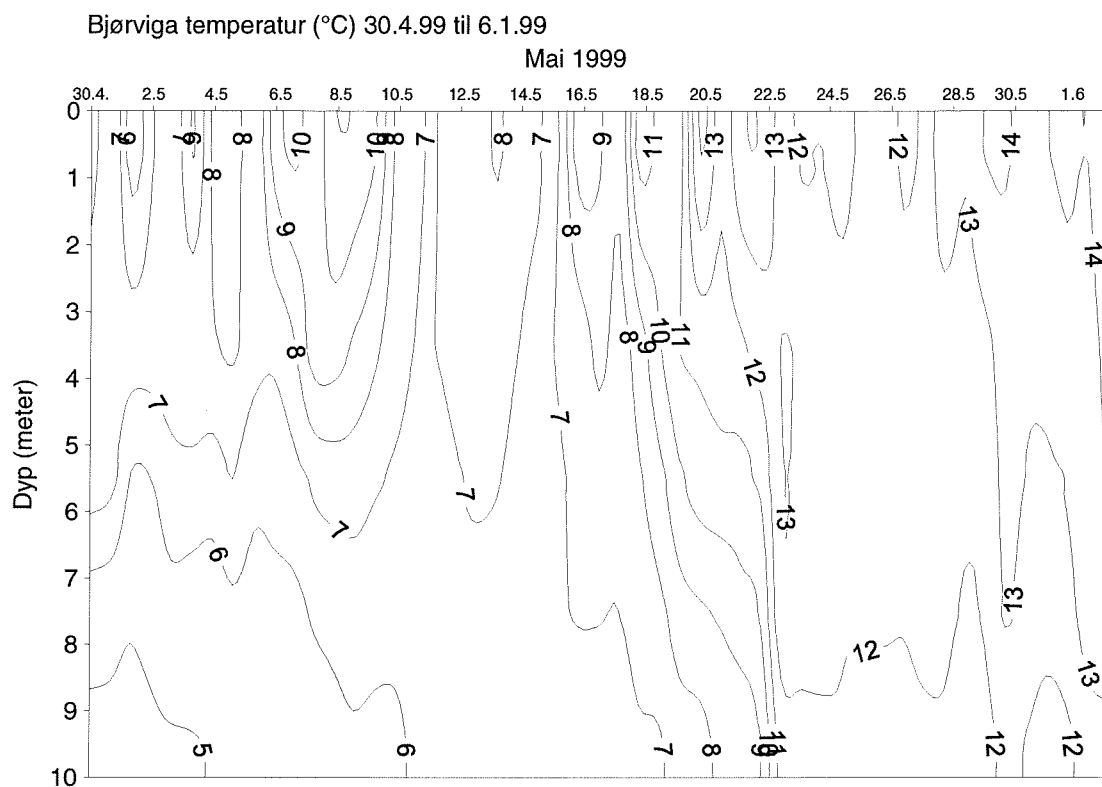
En kan fastslå ut fra T/S-målingene at det er vesentlig større endringer i overflatelaget enn dypere ned. I dypet er det imidlertid også korttidsvariasjoner. Korttidsvariasjonene kan ikke knyttes til tidevann. Variasjonene var spesielt tydelige i perioden fra start av måleserien i slutten av april og 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.

#### 4.2.5. T/S-målinger

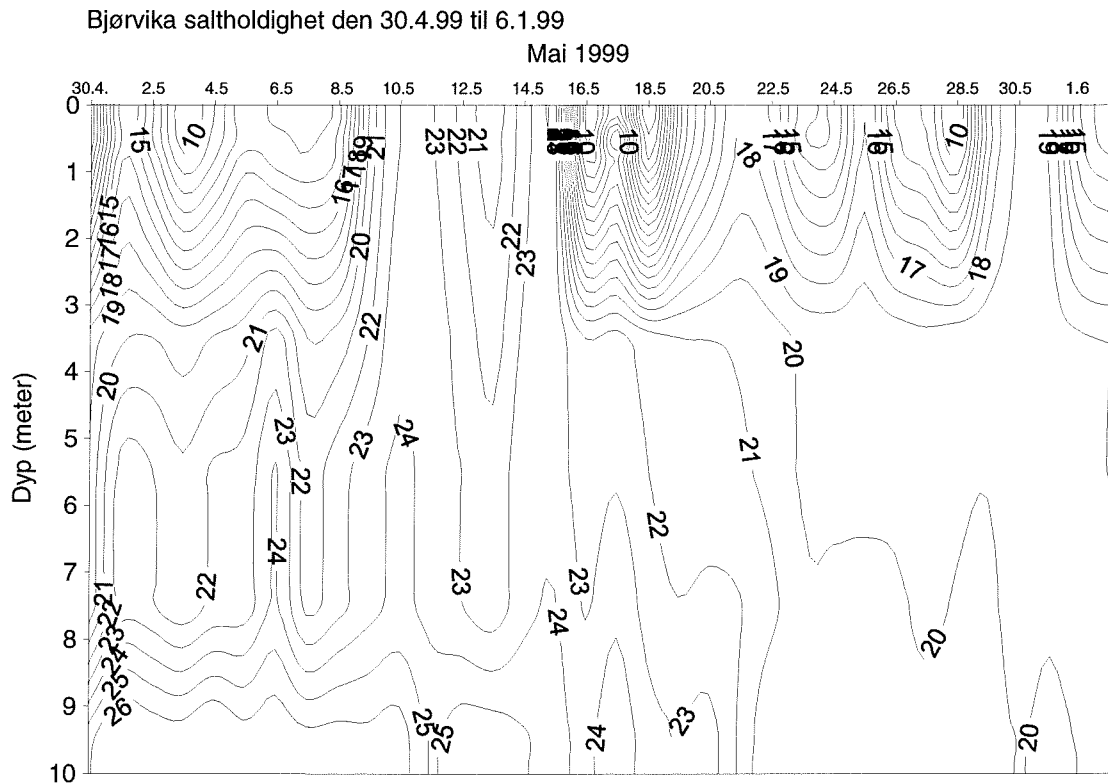
Målingene fremstilt i Figur 8 og Figur 9 viser korttidsvariasjoner (skala timer) i temperatur og saltholdighet. Saltholdigheten er mest interessant fordi variasjonene må reflektere direkte vannutskifting med området utenfor. Temperaturendringer kan i prinsippet skje ved lokal oppvarming/avkjøling uten utskifting, men i et lite avgrenset område som Bjørvika er mesteparten av temperaturforandringene på dyp større enn ca. 4 m sannsynligvis advektive på samme måte som saltholdighetsvariasjonene.



**Figur 7.** Isolinje-framstilling av CTD-måledata for temperatur (øverst), saltholdighet (midten) og sjøvannets densitet (Sigma-t). Målepunkter er vist med vertikale stiplede linjer.



Figur 8. Temperaturobservasjoner (°C) fra Bjørvika mai 1999. Observasjoner fra T/S-kjede.



Figur 9. Saltholdighetsobservasjoner fra Bjørvika mai 1999. Observasjoner fra T/S-kjede.

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.

### 4.3. Beregnet vannutskifting før utbygging

Endringer i tetthetssjiktningen i havnebassenget, som observert ved hjelp av T/S-kjede og CTD-sonde, vil forplante seg inn til områdene innenfor tunnel-traseen ved horisontale strømmer. Hvis det hoper seg opp med vann med lav saltholdighet i overflaten, vil tetthetsflatene flytte seg nedover med tiden, som f.eks. i Figur 9 fra 10. mai til 13. mai. Det vil da gå en strøm innover i overflaten, og ut 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. Figuren indikerer en slik episode i perioden 3. til 6. mai.

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: 0,5 m<sup>3</sup>/s

4-6 m: 0,3 m<sup>3</sup>/s

6-8 m : 0,2 m<sup>3</sup>/s

Pga. observasjonsfrekvensen på 1 gang pr. uke må dette betraktes som nedre grense for transporter. Resultatet fra T/S-kjeden, som har bedre tidsoppløsning, 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 m<sup>3</sup>/s (varierende fra 5 til 0,8)

4-6 m: 1,3 m<sup>3</sup>/s (varierende fra 2,5 til 0,4)

6-8 m: 1,2 m<sup>3</sup>/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 vannutskiftingen.

Begrensede arealer for transport av vann inn til Bjørvika under 4 meters dyp blir tverrsnittet mellom skipsstøtvollen og Bjørvikautstikkeren i øst. Det vannvolum som skal gjennom dette tverrsnittet vil ved en full utskifting under 4 m dyp tilsvare hele det samlede volumet av vann under dette dypet innenfor traseen.

Det samlede vannvolumet under 4 meter innenfor tunnel-traseen i Bjørvika er idag mindre enn 210 000 m<sup>3</sup> (Tabell 2.). Ved eventuell etablering av deponier vil volumet bli noe mindre.

Tverrsnittsarealet under 4 m dyp er ca. 500 m<sup>2</sup>. Kravet til en utskiftning på et par døgn i snitt gir et transportbehov på 1,2 m<sup>3</sup>/s, hvilket tilsvarer strømhastigheter på i størrelsesorden 0,2 cm/s. Økes kravet til å transportere maksimalt observerte transporter under 4 m dyp (2,5 m<sup>3</sup>/s) vil hastigheten øke til ca. 0,5 cm/s. Dersom hele vannvolumet skulle skiftes ut på en tidevannsyklus måtte strømhastigheten opp i 2 cm/s i gjennomsnitt for perioden på 6 timer med stigende vannstand. Dette er forholdsvis lave strømhastigheter og transportkapasiteten gjennom den åpne del av traseen anses derfor være mer enn tilstrekkelig til å opprettholde gode oksygenforhold i vannmassene innenfor traseen.

#### 4.4. Transportkapasiteten i kanaler gjennom skipsstøtvollene

I et ikke lenger aktuelt planforslag skulle det etableres en skipsstøtvoll tvers over Bjørvika i kote -4 m. Vannutskiftingen bak denne skipsstøtvollen og vollen på kote -2 m i Bispevika skulle avhjelpest ved å etablere trapesformete kanaler nær kaikantene i Bjørvika og Bispevika. Det ble i den forbindelse utviklet en modell for å beregne vannutskiftingen gjennom slike kanaler. Kanalene er siden sløyfet og det følgende avsnittet er derfor mindre aktuelt etter siste planrevisjon. Beskrivelsen er imidlertid beholdt uendret fordi den kan ha generell interesse og fordi den kan benyttes til å estimere transporten gjennom småbåtkanalen såvel som gjennom rør ved bunnen av skipsstøtvollene.

##### 4.4.1. 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 dette 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 kanalene uten horisontale tetthetsgradienter av betydning. Noen forholdsvis enkle overslagsberegninger kan bidra til å belyse dette. Vi betrakter da strøm gjennom de tidligere skisserte kanalene og ser på utskiftningen av alt vann innenfor under ett. For både Bjørvika og Bispevika var det skissert en kanal inn på østsiden, som ville gi 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 2. Det volumet som lå under overkant av skipsstøtvollen og som måtte utveksles gjennom kanalen var altså i Bjørvika ca. 210 000 m<sup>3</sup> (under 4 m), mens det i Bispevika fortsatt er ca. 160 000 m<sup>3</sup> (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.



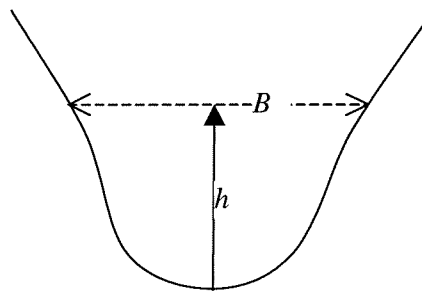
Det antas nå at overflatelaget i løpet av et døgn drives sørover ut av havnebassenget pga. vindpåvirkning, slik at vann fra det litt tyngre underliggende laget bringes opp til i overkant av skipsstøtvollen. Vi ser på hvert av de to områdene for seg. Hvis bassenget innenfor skal følge med i dette, må 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.

#### 4.4.2. 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.  $h_v$ :

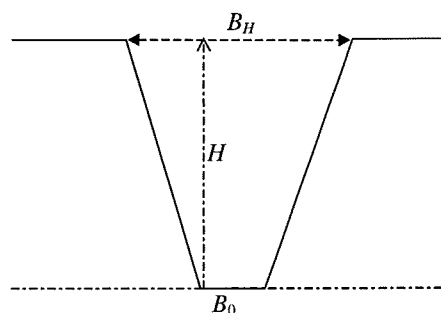
$$2(h_1 - h_v)B(h_v) = A(h_v)$$

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

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

som etter litt omorganisering kan skrives slik:

$$5sh_v^2 + 2(3B_0 - 2sh_1)h_v - 4B_0h_1 = 0$$

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 løsningen<sup>1</sup>:

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

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:

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

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.  $z$ :

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

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

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

Forløpet ved en innstrømming 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 kanaltverrsnittet 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 utstrømming brukes den samme modellen, men med  $h_1$  spesifisert til å reduseres over et visst tidsrom, og med  $h_1$  og  $h_2$  byttet om i beregningen av  $h_v$  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  $h_1$ .

#### 4.4.3. Beregninger for Bjørvika og Bispevika

Det er gjort slike beregninger for begge de to innestengte områdene, med topografi og kanalutforming som beskrevet i tidligere planer. 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 10 og 11 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 (Bjørvika eller Bispevika) og tidsrom for høyde-ændring på utsiden (1, 2 eller 3 døgn). Endring i vannstand på utsiden er vist med tykk strek-punkt-linje.

For Bjørvika 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 av 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 demping 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 demping 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.

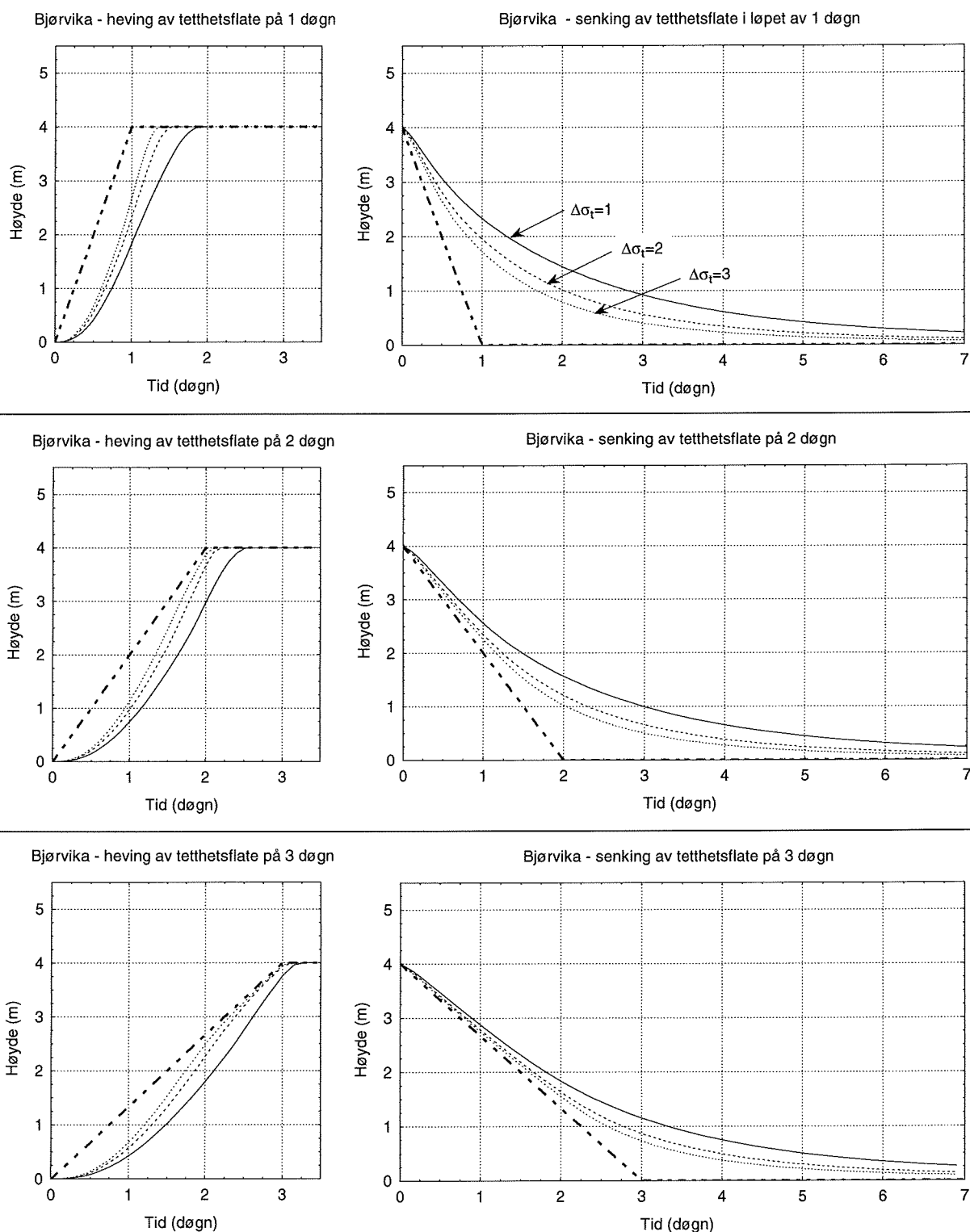
Et mulig tiltak for å bedre vannutskiftningen ned mot bunnen i Bjørvika kan være å legge inn rør gjennom vollen nede ved bunnen for å øke strømtverrsnittet der nede. Det er gjort supplerende

beregninger av tilsvarende scenarier som i Figur 10 når kanalen suppleres med rør med samlet tverrsnittsareal  $6 \text{ m}^2$  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 sigma-enhet (heltrukken kurve øverst til venstre i Figur 10) vil forsinkelsen bli omtrent halvert, og for senking av tetthetsflaten (heltrukken kurve øverst til høyre i Figur 10) 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.

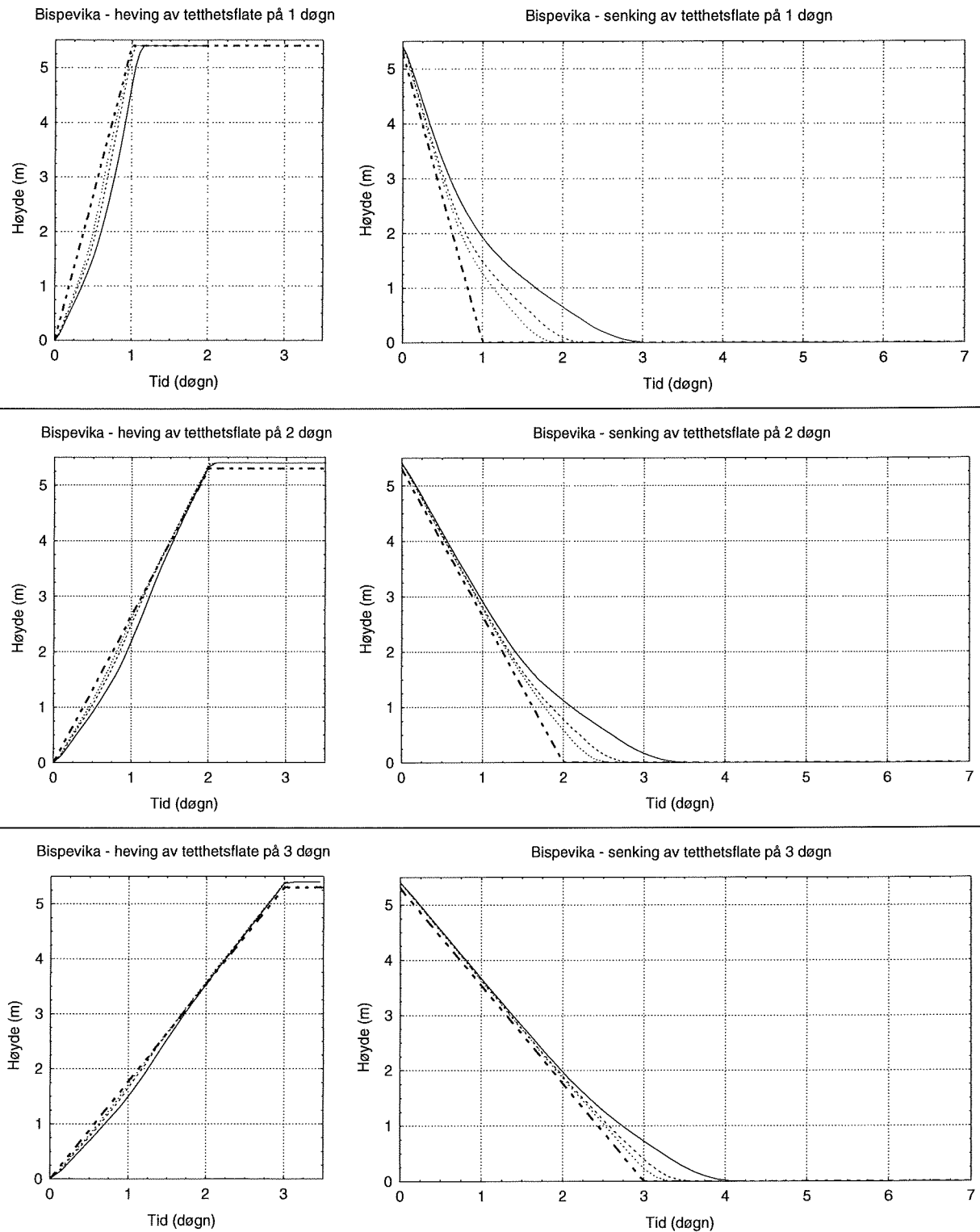
For Bispevika vil forholdet mellom volum og strømtverrsnitt være gunstigere enn i Bjørvika, spesielt under 6 m dyp (se Tabell 2), og det er bare mindre forsinkelser på noen få timer ved heving av tetthetsflatene. Ved utstrømning er det en tydelig forsinkelse i siste fase av senking av tetthetsflaten 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 vannutskiftingen 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, delvis 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. Ruheten 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 vannutskiftingen i de dypeste områdene.



Figur 10. 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 delfigurer øverst til venstre).



Figur 11. 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 10).

#### 4.4.4. Konklusjoner - trykkdrevet transport gjennom kanaler

##### Bjørvika

For å sikre at vannutskiftningen og derved vannkvaliteten ikke blir dårligere i Bjørvika enn i dag, bør transporten 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. Det er tidligere slått fast at med det endelige planforslaget vil dette ikke by på noe problem for de åpne delene av Bjørvika. Resten av dette avsnittet er skrevet under forutsetning av at hele Bjørvika tenkes stengt av skipsstøtvoll ved kote -4 m med en trapesformet kanal som tidligere beskrevet fra toppen av skipsstøtvollen til bunnen.

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 dypstrømningsepisodene, 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 dypstrømning 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 strømmingstverrsnitt i nedre del vil hjelpe mye, f.eks. dersom det kunne legges inn noen rør gjennom nederste del av vollen med tilsammen 6 m<sup>2</sup> tverrsnitt. Beregninger tyder på at det vil kunne gi akseptable forhold ved naturlig vannutskiftning.

##### 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 meter 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. Konklusjoner og anbefalinger

Verken oksygenforbruksberegningene eller de hydrografiske målingene kan gi noe nøyaktig svar på hvor stor vanntilførsel bassengene må ha etter utbygging. De hydrografiske målingene indikerte at dagens vanntransporter gjennom tverrsnittet ved tunneltraseen ligger mellom 0,2 og 1,3 m<sup>3</sup>/s. Modellberegningene for oksygen viste at slike vanntransporter under de fleste forhold vil være tilstrekkelig til å nå målsettingen på 2,5 mlO<sub>2</sub>/l (=3,6 mg O<sub>2</sub>/l) etter utbygging, spesielt dersom det tas med i betraktning at dette kravet gjelder gjennomsnitt for sommersesongen. Oksygenmålingene med sonde indikerte at vannkvaliteten i utgangspunktet ligger ned mot denne grensen, men disse observasjonene er ikke etterprøvet med mer pålitelige metoder. Dersom oksygeninnholdet i tilførselsvannet blir så lavt som 4 mgO<sub>2</sub>/l vil det ved høyt oksygenforbruk i sedimentene være behov for vannmengder fra 0,4 til 1,9 m<sup>3</sup>/s i bassengene diskutert i kapittel 3.2, Figur 2. Oksygeninnholdet i vannet inne i bassengene vil aldri kunne bli større enn den er i tilførselsvannet. Aksepteres en reduksjon på 1,0 mlO<sub>2</sub>/l i forhold til tilførselsvannet ( $C_i - C_o \geq 1 \text{ mlO}_2/\text{l}$ ) vil det i perioder med høyt oksygenforbruk i sedimentene (verste fall) være tilstrekkelig med tilførsel av 0,1 - 0,6 m<sup>3</sup>/s til de ulike bassengene diskutert i kapittel 3.2, Tabell 3.

Det er foreslått ulike tekniske løsninger for å forsyne bassengene med slike vannmengder. Dersom det velges utveksling av dypvannet ved pumping over skipsstøtvollene gjennom rør som forbinder vannmasser i samme dyp på innsiden og utsiden, eller naturlig trykkdrevet transport gjennom kanaler eller horisontale rør gjennom skipsstøtvollene blir vannmengdene i størrelsesorden som beskrevet over. Dersom det antas at naturlige transporthastigheter på 5 cm/s vil kunne oppnås ved hjelp av de trykkvariasjoner som normalt forekommer i området, vil et totalt tverrsnitt på 10 m<sup>2</sup> være tilstrekkelig til å transportere vannmengder på 0,5 m<sup>3</sup>/s. Kanalen i skipsstøtvollen har et areal om lag dobbelt så stort som dette og vil trolig være tilstrekkelig til å forsyne 2-4 m laget i Bispevika med de nødvendige vannmengder. For å unngå at den kinetiske energien i det innstrømmende vannet dissiperer i turbulens og virvler anbefales at hydraulisk ruhet reduseres ved støping av eventuelle kanaler gjennom skipsstøtvollene.

Dersom utskiftingen av dypvannet besørjes ved nedsynking av vann som strømmer inn over kanten av skipsstøtvollene vil dette vannet normalt ha et høyere oksygeninnhold enn vannet som strømmer inn langs bunnen av bassengene. Vannbehovet vil isåfall bli tilsvarende lavere. Dette gjelder i høy grad for bassenget i Bjørvikta der terskeldypet vil bli toppen av skipsstøtvollen ved kote - 2 m, i noe mindre grad Bispevika der kanalen ned til kote -3,6 m vil bli bestemmende for dypvannutskiftingen. Det anses lite sannsynlig at naturlige utskiftinger over disse tersklene vil være tilstrekkelig til å sikre vannkvaliteten i bassengene innenfor. Det anbefales derfor at den naturlige utskiftingen stimuleres ved tilførsel av ferskvann gjennom diffusorer nær bunnen av bassengene. Dette vil særlig være aktuelt i Bispevika der Akerselva enkelt kan utnyttes som ferskvannskilde og der rørgjennomføringer er mindre egnet fordi tunnelen danner en sekundær barriere på innsiden av skipsstøtvollen. For å sikre god vannutskifting i hele bassenget bør diffusorer legges i dypålene på begge sider av tunnelen. Modellberegninger utført av Berge og Molvær (1994) viste at injeksjon av ferskvann ved bunnen av bassengene ville gi tilstrekkelig tetthetsreduksjon til utskifting av et volum tilsvarende 40x den injiserte ferskvannsmengden. For beregningene over skulle dette tilsvare en ferskvannsmengde i størrelsesorden 15 l/s. Sundfjord et. al (1999) beregnet at et ferskvannseseroar med en overhøyde på ca 0,5 m i forhold til fjorden ville være tilstrekkelig til å drive ferskvannet ut gjennom diffusorer på 9 m dyp.

De gjennomførte beregningene har fortsatt store usikkerheter, men løsninger vil alltid kunne etableres i ettertid dersom det viser seg at behovet for vannutskifting i de mest kritiske periodene sent på



sommeren og om høsten, skulle vise seg å være større enn antatt. Dersom det legges inn tilstrekkelig med rørgjennomføringer ved bunnen av det hesteskoformete bassenget i Bjørvika, vil dette trolig være tilstrekkelig til å tilfredstille det anbefalte vannkvalitetskriteriet. I Bispevika er det sannsynlig at diffusorløsninger må etableres.

Eventuelle deponier i Bjørvika og Bispevika vil totalt sett være gunstig i forhold til vannkvalitet. Bunnen heves til dyp med større naturlig vannutskifting og innholdet av oksygenforbrukende materiale i tildekkingsmassene vil være mindre enn i de sedimentene som ligger der idag. Kornstørrelsen i tildekkingsmassene vil kunne ha konsekvenser for fremtidig vannkvalitet. Det er beskrevet kornstørrelser opp mot 10 cm for å unngå erosjon i områder eksponert for sterke propellstrømmer. Det finnes eksempler på at organiske aggregater kan fanges og forårsake redusert vannkvalitet i hulrommene mellom steiner av en slik størrelse. Det bør tas hensyn til dette potensielle problemet ved utformingen av den nye sjøbunnen over deponiene.

For å kunne gi sikrere råd før anlegget virkeliggjøres, og kunne følge med eventuelle effekter av tunnelanlegget når det er ferdig, bør det snarest opprettes et overvåkingsprogram slik at en kan få en statistisk sett tilstrekkelig dokumentasjon av forholdene før utbygging. 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.

## 6. 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 I.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.
- Rudberg, A., Hackett, B. & Røed, L.P. 1994. Miljøgifter i indre Oslofjord. Delrapport 1. Simulering av partikkelspredning fra Oslo havnebasseng. NIVA-rapport nr. 2991, 19 sider.
- Schaanning, M., K.Hylland, R.Lichtenthaler, B.Rygg, 1996. Biodegradation of Anco Green and Novaplus Drilling Muds on Cuttings Deposited in Benthic Chambers. NIVA REPORT SNR 3475-96. 77pp + appendix.
- Schaanning, M.T., 1998. Sediment-miljøet ved oppdrettsanlegg i Lerangsvågen. NIVA-rapport 3919-98. 29 s.
- Schaanning, M.T., B. Bjerkeng, L. Golmen, J. Magnusson og A. Sundfjord, 1999. Vurdering av tiltak for å sikre vannkvalitet etter utbygging av E18 i senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika. NIVA-rapport LNR 4112-99. 32s.
- Schaanning, M. og B. Bjerkeng, 1999. Vurdering av tiltak for å sikre vannkvalitet i Bjørvika og Bispevika etter utbygging av E18. NIVA Teknisk notat 13.12.99. 4s.
- 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.