

RAPPORT LNR 4705-2003

Opera i Bjørvika

Vurdering av vannutskiftning og
vannkvalitet i operaens
nærområde

Hovedkontor

Postboks 173, Kjelsås
0411 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internett: 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
5005 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Akvaplan-niva

9296 Tromsø
Telefon (47) 77 75 03 00
Telefax (47) 77 75 03 01

Tittel Opera i Bjørvika. Vurdering av vannutskiftning og vannkvalitet i operaens nærområde	Løpenr. (for bestilling) 4705-2003	Dato 18.6 2003
	Prosjektnr. Udemnr. 23209	Sider Pris 27
Forfatter(e) Jarle Molvær og Birger Bjerkeng	Fagområde Oseanografi	Distribusjon
	Geografisk område Oslofjorden	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Statsbygg, Pb. 8106 Dep, 0032 Oslo	Oppdragsreferanse
--	-------------------

<p>Sammendrag</p> <p>Den framtidige vannutskiftningen og vannkvaliteten i overflatelag og i dypvann innenfor skipsstøtvollen og under operabygget er vurdert ved bruk av modeller, andre teoretiske beregninger og med bruk av foreliggende data. Støtvollen foran og pilarene under bygget vil ikke i merkbar grad redusere vannutskiftningen eller forringe vannkvaliteten. Episoder med meget dårlige oksygenforhold kan forekomme, men da som følge av en (forbigående) forverring av oksygenforholdene i nordre del av indre Oslofjord.</p>
--

<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Operaen 2. Vannutskiftning 3. Vannkvalitet 4. Modellberegning 	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Opera 2. Water exchange 3. Water quality 4. Model
--	--


Prosjektleder

Forskningsleder
ISBN 82-577-4373-9


Forskningsdirektør

Opera i Bjørvika.

**Vurdering av vannutskiftning og vannkvalitet i
operaens nærområde**

Forord

Den foreliggende vurderingen av framtidig vannfornyelse og vannkvalitet i nærheten av operabygget i Bjørvika er gjennomført for Statsbygg ved bestilling av 24.2.03.

Birger Bjerkeng har utført beregningene av vannfornyelsen i bunnvannet i Bjørvika, mens Jarle Molvær har hatt hovedansvar for de øvrige beregningene og vurderingene samt prosjektledelse.

Oslo, 18.6 2003

Jarle Molvær

Innhold

Sammendrag	5
Summary	6
1. Innledning	7
1.1 Topografi	7
1.2 Utbyggingsplaner	7
1.3 Formål	7
2. Metodikk og data	9
2.1 Metodikk	9
2.2 Data	12
3. Beregninger	16
3.1 Sirkulasjon i overflatelaget	16
3.2 Vannutskiftning i dyplaget	21
4. Vurderinger av vannkvalitet	26
4.1 Overflatelaget	26
4.2 Dypvannet	26
5. Litteratur	27

Sammendrag

Vannkvaliteten i Bjørvikas indre del er bestemt av flere forhold. Vi nevner:

- Vannutskiftningen, som er en helt sentral faktor
- Tilførsler av partikler og forurensende stoffer fra
 - Akerselva
 - Avrenning fra land (utenom Akerselva) samt lokale utslipp
 - Bunnsedimentene
 - Vannmasser utenfor Bjørvika

I denne rapporten vurderes hvordan vannutskiftningen i operaens nærområde kan bli endret og hvilken virkning dette eventuelt kan få for vannkvaliteten.

Vannfornyelsen av overflatelaget i Bjørvikas indre del er i dag relativt dårlig. Fronten på vestsiden av Operabygningen vil stikke ca. 2 m ned i vannet og fungere som en sperring for vannbevegelser på tvers av vikas lengderetning. Imidlertid vil den viktigste vanntransporten foregå i vikas lengderetning og for Bjørvika som helhet vil virkningen av fronten dermed være liten. Nær fronten kan det imidlertid på begge sider oppstå lokale områder med redusert vannfornyelse.

Bygningen skal stå på 174 piler med diameter 0.61 m og innbyrdes avstand 6-12 m. Simuleringene med bruk av modell viser at vannbevegelsene er langsomme og at tilstedeværelsen av piler ikke har merkbar innvirkning på vannfornyelsen under bygget.

De lokale virkningene av vind fra nord-nordøst kan bli noe endret ved at bygningen skjermer deler av Bjørvikas indre del mot vind, dvs. i perioder reduserer vindens bidrag til å øke vannutskiftningen noe.

For vannkvaliteten i overflatelaget i Bjørvika indre del, innenfor støtvollen og under operabygget betyr dette små endringer i forhold til dagens situasjon. Ansamlinger av overflatesøppel ved fronten eller ved pilarene kan bli den mest påfallende endringen

Utskiftningen av dypvannet (her regnet som vannmassen under 2-3 m dyp) vil bli påvirket av støtvollen og av pilarene under bygningen. Beregningene og vurderingene som er foretatt tyder imidlertid på at størrelsen av vannutskiftningen bare i liten grad vil bli redusert pga. at disse konstruksjonene, i hovedsak fordi åpningen mellom støtvollens vestre ende og Langkaia blir tilstrekkelig bred til at vannet kan strømme uhindret ut og inn.

Av dette følger at etter bygning av opera og av støtvoll vil vannkvaliteten i dypvannet i alt vesentlig være som i dag. Når det gjelder oksygenforhold er det imidlertid en klar risiko for episoder med dårlige-meget dårlige forhold innenfor støtvollen. Slike episoder forekommer i forbindelse med situasjoner der det oppstår en (forbigående) forverring av oksygenforholdene i nordre del av indre Oslofjord, og må ventes å kunne forekomme i framtida også.

Summary

Title: Opera in the Bjørvika. A study of future water exchange and water quality in the immediate surroundings.

Year: 2003

Author: Jarle Molvaer and Birger Bjerkeng

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 82-577-4373-9

The opera building in Bjørvika will rest on 174 pillars and to the west have a front extending 2 m into the surface layer. South of the building a 160 m long sub-surface mound up to 2 m depth will be constructed. The present water exchange in Bjørvika is relatively low. The future water exchange and water quality around and under the building have been calculated and estimated by means of models and other theoretical considerations, and compared with the present situation.

The overall conclusion is that the effects on the water exchange and water quality will be small. Episodes with low oxygen concentrations will probably occur, but these are related to periods of low oxygen concentrations in the fjord outside the harbour area.

1. Innledning

1.1 Topografi

Bjørsvika har åpning mot selve havnebassenget og fjorden utenfor (**Figur 1**). Området er typisk 7-9 meter dypt og har i dag ingen terskler som begrenser vannutskiftingen. Akerselva munner ut mellom Bjørsvika og Bispevika og har en gjennomsnittlig vannføring på 17.5 m³/s. Beregnede flateareal og underliggende vannvolum for ulike dyp i Bjørsvika er vist i **Tabell 1**.

Tabell 1. Areal- og volumer innenfor tunneltraséen (se kap. 1.2) for Bjørsvika beregnet etter dagens topografi.

Dyp (m)	Areal (m ²)	Volum under gitt dyp (m ³)
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	

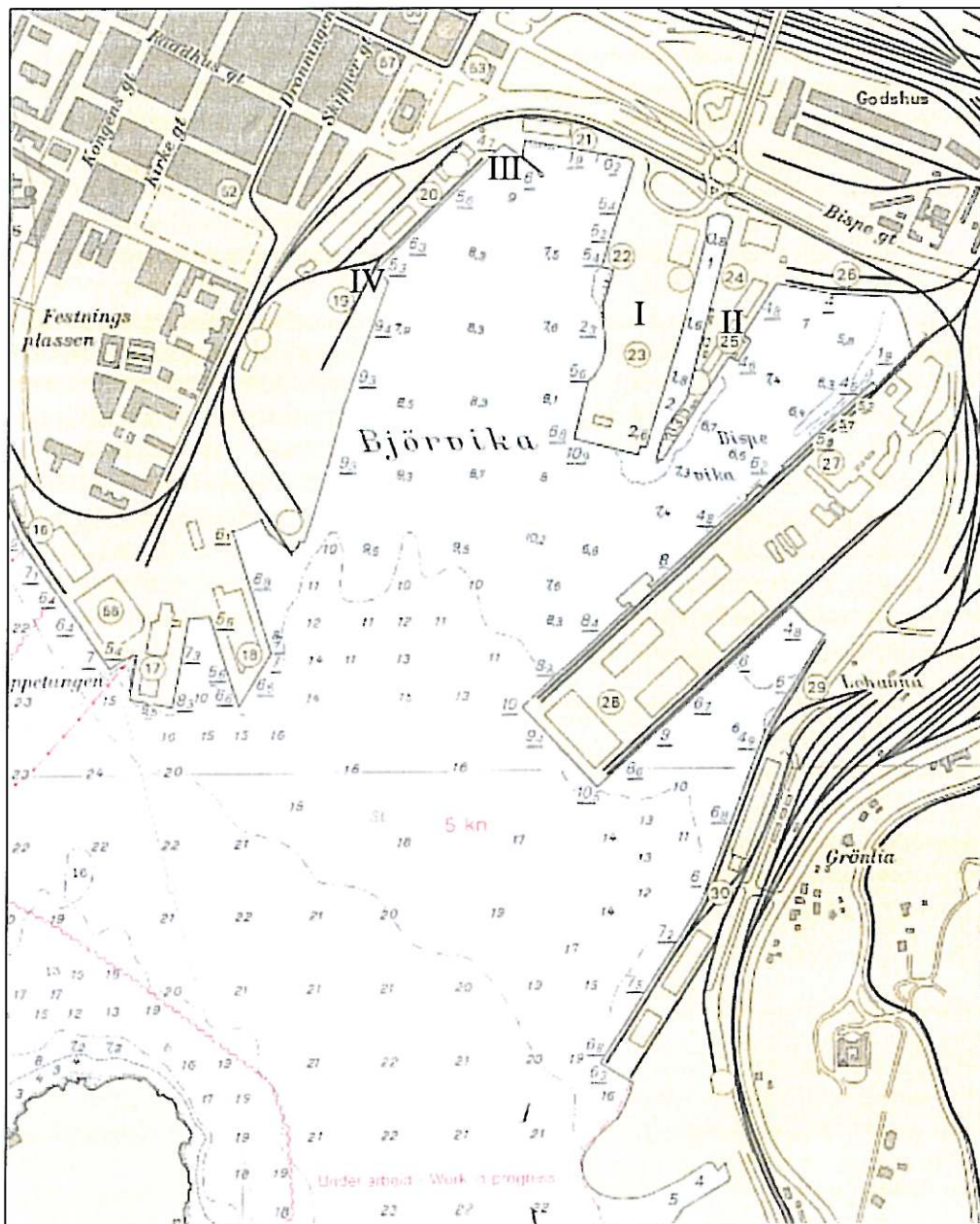
1.2 Utbyggingsplaner

I Bjørsvika skal det gjennomføres to store prosjekter:

- Bygging av ny opera i vika indre del:** Bygningen vil dels stå på den nåværende Bjørsvikautstikkerens indre del, dels vil den stå på et område som fylles ut i Bjørsvika og en stor del av bygningen skal stå på pilarer ute i Bjørsvika. Prosjektet vil endre topografien, sjøbunnen og vannsirkulasjonen i Bjørsvikas indre halvdel gjennom fem forhold:
 - En stor utfylling på vikas østside
 - Plassering av 174 pilarer med diameter 0.61 m og med innbyrdes avstand på 6-12 m
 - Front som stikker 2 m ned i sjøen langs operaens vestsida
 - Fjerning av Palekaiutstikkeren
 - Bygging av skipsstøtvoll opp til 2 m dyp foran operaens sørsida
- Tunnel for E18 mellom Festningstunnelen og Ekeberg tunnelen:** Ved Langkaia på Bjørsvikas vestsida dukker tunnelen ned under sjøbunnen og fortsetter fullstendig nedgravd gjennom resten av Bjørsvika og videre under Bjørsvikautstikkeren, Akerselva og Paulsenkaia. Utenom en kort undersjøisk rampe ved kanten av Langkaia ligger tunnelen i sin helhet under sjøbunnen.

1.3 Formål

Det foreliggende prosjektet skal vurdere i hvilken grad operabygget og skipsstøtvollen endrer vannutskiftingen omkring og under operabygget og dermed kan forverre vannkvaliteten der.



Figur 1. Oslo havn. Dagens situasjon (utsnitt fra sjøkart nr. 452).
 I: Bjørvikautstikkeren, II: Paulsenkaia, III: Palekaia, IV: Langkaia.
 Operabygget vil bli plassert i Björvikas indre og østlige del.

2. Metodikk og data

2.1 Metodikk

Vurderingene gjøres i to deler. Først vurderes hvordan vannsirkulasjonen kan endres pga. operabygningen og skipsstøtvollen, og deretter vurderes eventuelle konsekvenser mht. vannkvaliteten. I det etterfølgende beskrives kort metodikken.

Sirkulasjonen i overflatelaget

For å simulere sirkulasjonen i overflatelaget har vi brukt modellen SMS/RMA-2. Forkortelsen SMS står for "Surface Water Modelling System", som inneholder den numeriske modellen RMA-2. Modellen er laget ved Brigham Young University, Utah, U.S.A., i samarbeid med U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station, og U.S. Federal Highway Administration (ECGL, 1995). RMA-2 er en dynamisk, todimensjonal, dybde-integrert numerisk modell med fri overflate. Modellen beregner løsninger ved hjelp av endelig-element metoden.

Ligninger:

Gruntvannsligningene i RMA-2 er Navier-Stokes ligninger for bevarelse av bevegelsesmengde og volum (volumkonservering).

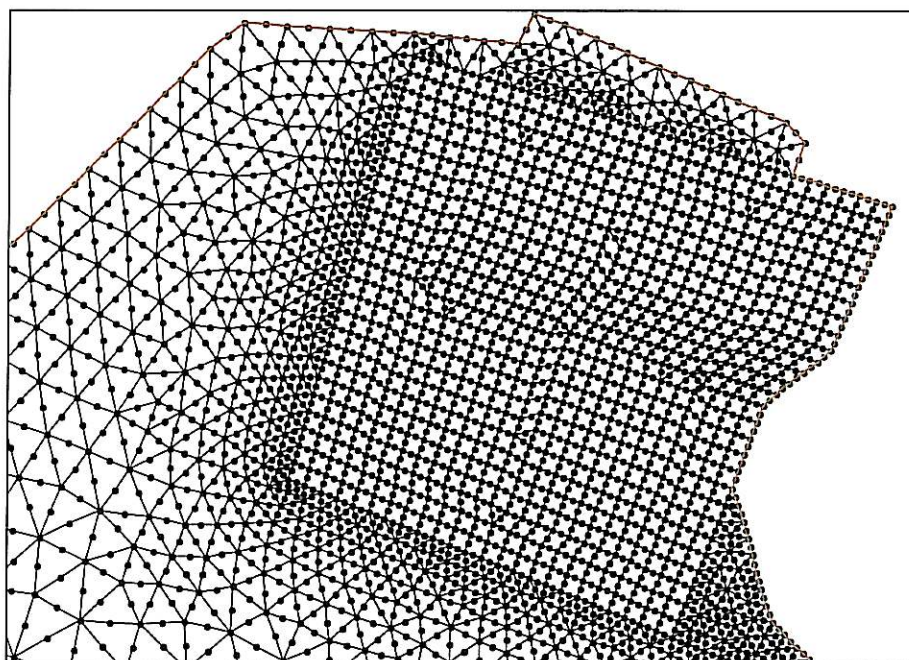
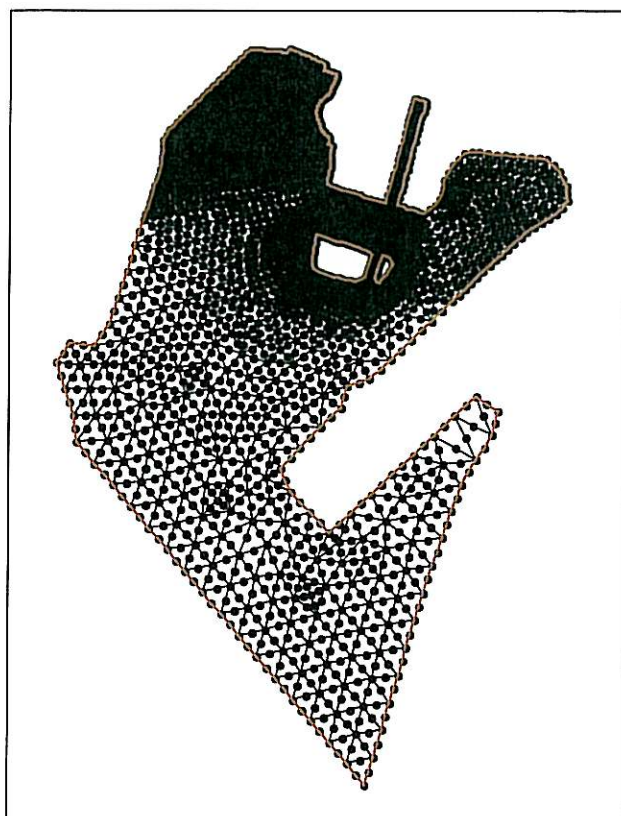
$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial a_0}{\partial x} \right) + fv - \frac{\epsilon_{xx} \partial^2 u}{\rho \partial x^2} - \frac{\epsilon_{xy} \partial^2 u}{\rho \partial y^2} + \frac{gu}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left(\frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial a_0}{\partial y} \right) - fu - \frac{\epsilon_{yx} \partial^2 v}{\rho \partial x^2} - \frac{\epsilon_{yy} \partial^2 v}{\rho \partial y^2} + \frac{gv}{C^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0$$

x =	Distanse i x-retning (positiv mot øst)
y =	Distanse i y-retning (positiv mot nord)
u =	Horisontal strømningshastighet i x-retning
v =	Horisontal strømningshastighet i y-retning
t =	Tid
g =	Tyngdens akselerasjon
h =	Vannndyp
ρ =	Væskens tetthet
ϵ_{xx} =	Normal turbulent utvekslingkoeffisient i x-retning
ϵ_{xy} =	Tangensial turbulent utvekslingkoeffisient i x-retning
ϵ_{yx} =	Tangensial turbulent utvekslingkoeffisient i y-retning
ϵ_{yy} =	Normal turbulent utvekslingkoeffisient i y-retning
C =	Chezy ruhetskoeffisient (Beregnet ut fra Mannings n)
f =	Coriolis parameter

Modelleringen begynner med konstruksjon av et nettverk (grid) med diskrete punkter (dvs. data over posisjon og dyp for punktene i et nettverk, som siden interpoleres til et grid i SMS). **Figur 2** viser nettverket som var utgangspunktet for beregningene – uten pilarer eller andre konstruksjoner. De minste elementene er ca. 16 m² og de største ca. 2000 m², men ved simulering av pilarer og andre konstruksjoner ble det også brukt elementer med areal på 1-4 m².



Figur 2. Nettverket eller gridet som i RMA2-modellen for Bjørvika er utgangspunktet for simulering av overflatesirkulasjon. Øverste figur viser hele området. Merk at tunnelen er gravd gjennom Akerselvas munningsområde. Nederste figur viser nettverket i Bjørvikas indre del. I hver node (avmerket som svart punkt) beregnes høyden over referansedypet, strømretning og strømhastighet. I Figurens nedre del er kvadratene 4mx4 m.

Man må tilegne nettverket en initialtilstand. Dette gjøres ved å legge en horisontal, plan overflate over hele nettverket. Modellen trenger så en del tid ("spin up") på å finne representative løsninger.

Ved hjelp av de topografiske dataene, grenseflatebetingelsene og initialbetingelsene beregner RMA-2 løsninger for hvert tidssteg. Modellen beregner verdier for fart, retning og vannstand i hvert av punktene i gridet.

En slik type modell egner seg til å beskrive sirkulasjonen i overflatelaget i Bjørvika, når man betrakter dette som en vertikal homogen vannmasse over en horisontal, flat bunn. Spesielt vil modellen framheve områder med bakevjer og svak strøm. Videre vil beregningene gi grunnlag for å sammenligne strømstyrke og bakevjedannelse ved plassering av pilarer, operafront og støtvoll. Men man å være forsiktig med å tolke strømhastighetene absolutt, noe som i så fall ville forutsette en grundig kalibrering av modellen.

Utskiftning i dypvannet

Endringer i vannutsiftning som følge av skipsstøtvollen og pilarene under operabygningen blir vurdert i forhold til

- Tidevannsutsiftningen, både ved teoretiske beregninger og ved beskrivelse av sirkulasjonen gjennom modellen SMS
- Teoretiske beregninger av vannutsiftning pga. variasjoner i vannmassenes egenvekt utenfor Bjørvika.

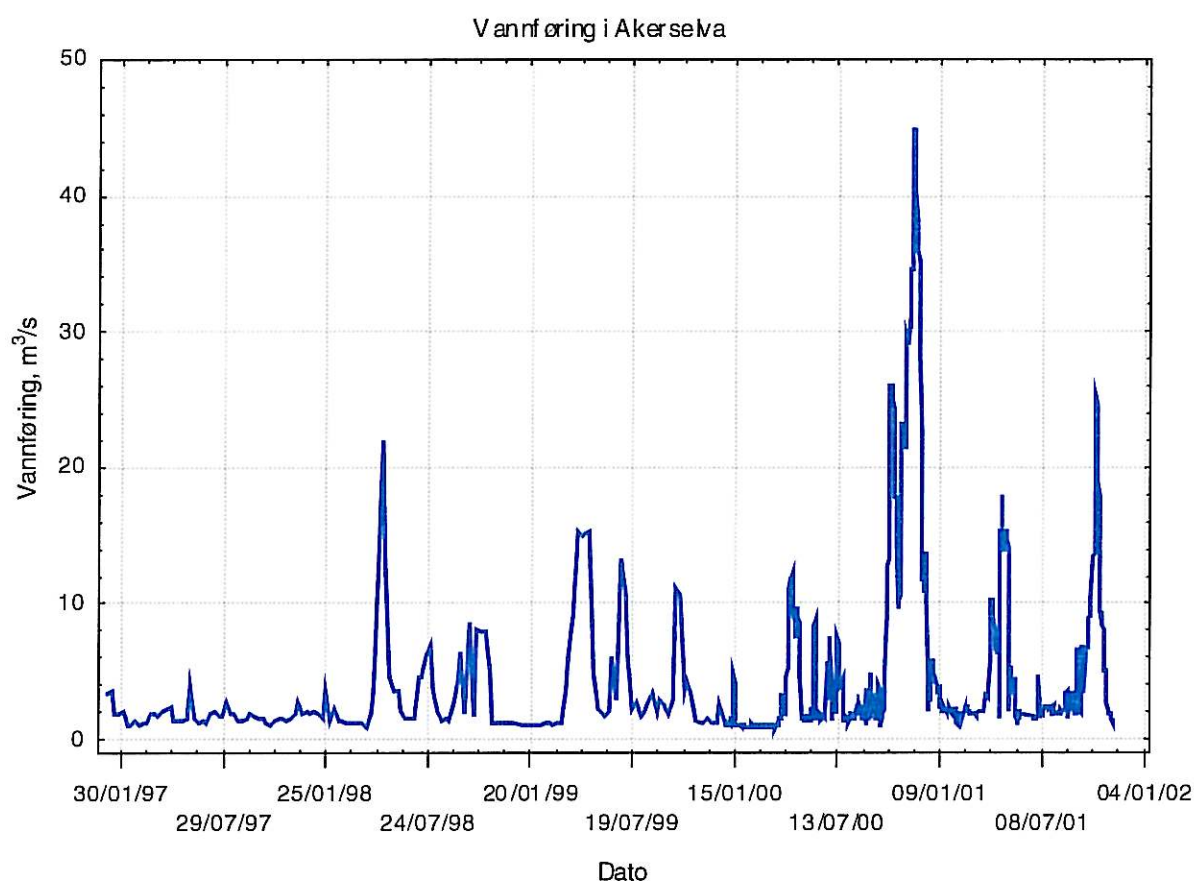
Her vil vi legge til grunn metodikken som ble brukt av Schaanning et al. (2000).

2.2 Data

Vannføring i Akerselva.

Vannføringen varierer gjennom sesongen som følge av varierende nedbørsmengde og snøsmeltingen om våren. Tidsrommet 1997-2001 (med relativt varme vintre) antas å gi et tilnærmet normal bilde av årsvariasjonene, med høy vannføring om våren og til dels om høsten og vanligvis lav vannføring om vinteren og sommeren (**Figur 3**). Høsten 2000 var preget av eksepsjonelt store vannmengder.

Pålagt minstevannføring i Akerselva er $1,5 \text{ m}^3/\text{s}$. Minstevannføringen kan imidlertid ikke opprettholdes i tørre år med høyt kommunalt vannforbruk og i 1996 var vannføringen i perioder bare 200 l/s . Vannføringen i Akerselva vil påvirke hydrografien i det indre havnebasenget, men ved lav vannføring er overflatestrømmene i havneområdet helt dominert av tidevann, vind og lufttrykk.



Figur 3. Vannføring i Akerselva for perioden 1997-2001 (data fra Oslo kommune, Vann- og avløpsetaten)

Inngangsdata til modellen

Det blir simulert strøm i et ca. 2 meter tykt overflatelag. Modellen gir verdier for de turbulente utvekslingskoeffisientene og for bunnfriksjons-koeffisienten Mannings n . Turbulens og friksjon varierer med strøm- og bunnforholdene, og er samtidig en egenskap ved selve bevegelsen. De er følgelig svært vanskelige å bestemme nøyaktig. Oppgitte størrelser på koeffisientene varierer med flere størrelsesordener (ECGL, 1995), uten at beregningsresultatene endrer seg tilsvarende mye.

Bunnfriksjonen (Mannings n) er satt lik 0,020 (tilsvarer moderat "friksjon" mot dypvannet og sider), og økt til 0,025 der hvor bunn dypet er mindre enn 2,5 m.

Strømforholdene i overflatelaget vil oftest være bestemt av ferskvannstilførselen fra Akerselva og av tidevann, vind og den topografiske utformingen av utløpsområdet. De ulike scenariene for disse parameterne er valgt i samråd med Statsbygg.

Ifølge Tidevannstabeller fra Norges Sjøkartverk er den gjennomsnittlige forskjellen mellom høyvann og lavvann i Oslo havn ca. 0,24 m. Tidevannet er halvdaglig. Ved synkende vannstand vil utstrømningen være maksimal, mens ved stigende vannstand kan netto innstrømning være mindre fordi utstrømmende brakkvann og innstrømmende tidevann er motsatt rettet.

For sirkulasjonen i overflatelaget gjøres derfor beregninger med:

- Akerselvas vannføring 2, 10 og 30 m³/s (ikke scenario 3, som gjelder vannmassen under overflatelaget der ferskvannet fra Akerselva befinner seg)
- 12.5 timers tidevann

De fleste av scenariene blir kjørt for vindstille fordi SMS-modellen er relativt lite følsom for vind når den ikke får virke over en meget stor vannflate. Enkelte kjøringar gjøres med vindhastighet 10 m/s fra sørsør-vest.

Som tidligere nevnt vil operaprojektet endre topografien, sjøbunnen og vannsirkulasjonen i Bjørvikas indre halvdel gjennom fem forhold (se kap. 1.2). Utfyllingen på Bjørvikautstikkerens vestsida og fjerning av Palekai-utstikkeren legges inn i modellens beskrivelse av topografien. Pilarene er vanskelig å beskrive godt fordi modellen vanskelig kan kjøres med så liten oppløsning som ca. 0.5 m og samtidig beskrive sirkulære konstruksjoner. Samlet vannareal under Operaen er ca. 11000 m² mens arealet som de 174 pilarene dekker er 51 m², en sammenligning som tyder på at pilarene ikke vil utgjøre noen betydelig hindring for vanngjennomstrømningen. For å anskueliggjøre virkningen av pilarene mht. vanngjennomstrømning har modellen brukt 97 pilarer med areal varierende mellom 0.9 og 1.2 m², dvs. noe færre men større pilarer enn de som er prosjektert. En oversikt over hovedscenarier med varianter er vist i **Tabell 2**.

Modellen vil framheve områder med bakevjer og liten vannfornyelse og de tre scenariene gir dermed grunnlag for å bedømme hvordan støtvoll og operabygningen vil endre vannsirkulasjon og oppholdstid for vannet i Bjørvikas indre del.

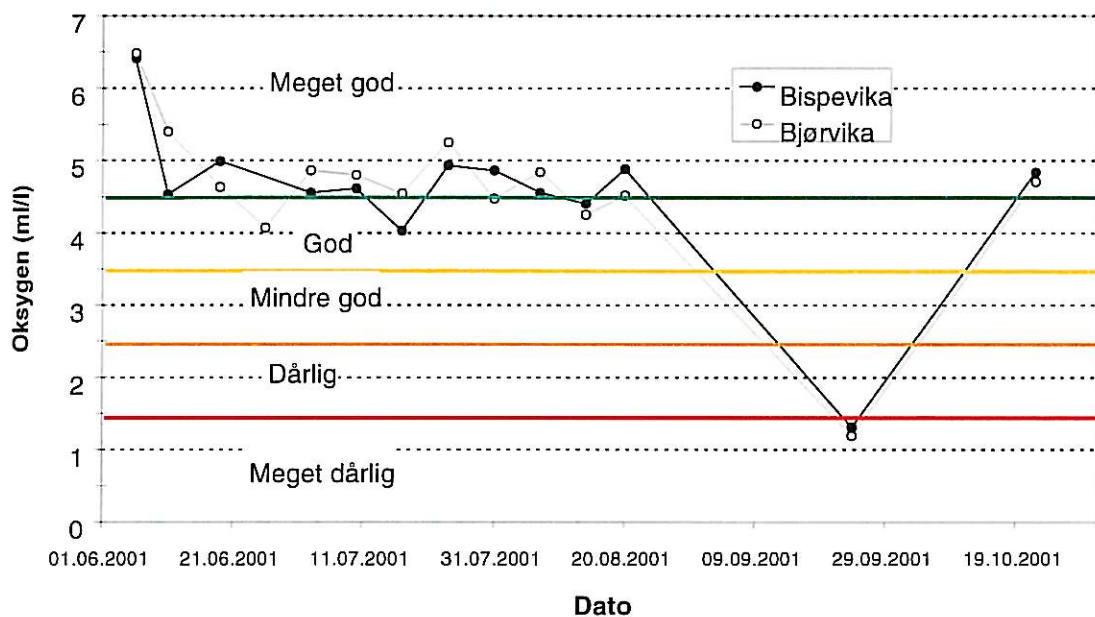
Tabell 2. Hovedscenarier for beregning av sirkulasjon. Vind er bare kjørt med vannføring 10 m³/s og med vindhastighet 10 m/s som tilsvarer frisk bris.

Scenario	Topografi	Vannføring i Akerselva	Tidevann	Vind
S1	Nåværende sirkulasjon i de øverste 2 m	5 m ³ /s	x	x
S2	Forventet sirkulasjon i de øverste 1.5-2 m av vannmassen med tilstedeværelse av støtvoll, rampe og pilarer	2, 10, 30 m ³ /s	x	x
S3	Forventet sirkulasjon mellom støtvollens øvre kant og bunn, med tilstedeværelse av støtvoll og pilarer.		x	

Vannutskiftning og vannkvalitet i Bjørvika

Siden 1999 har det blitt utført målinger av vannkvaliteten i Bjørvika og i 2001 ble det dertil utført en undersøkelse av vannsirkulasjon i forbindelse med utbyggingen av E18 mellom festningstunnelen og Ekeberg tunnelen (Molvær et al. (2002)). I den rapporten beskrives vannsirkulasjon og vannkvaliteten som følger: Ved nåværende forhold fører Akerselva en vel definert vannstrøm ut i fjorden. Både i Bjørvika og i Bispevika skaper dette langsomme hvirvler, som i praksis ofte endres pga. av virkning av vind og tidevann.

Med hensyn til siktedyp og oksygen, og i bedømt i forhold til de norske miljøkvalitetskriteriene er tilstanden Mindre God-Meget Dårlig. Mht. oksygen er forholdene jevnt over Meget Gode, men en kortvarig episode høsten 2001 da oksygenkonsentrasjonen sank til nær 1.5 mlO₂/l (**Figur 4**) gjør at tilstanden likevel må bedømmes som Meget Dårlig (jfr. Molvær et al., 1997). Målinger på stasjoner utenfor havnebassenget viser at oksygenforholdene i Bjørvika og Bispevika i stor grad påvirkes av den generelle tilstanden i nordre del av indre Oslofjord. Siktedypet påvirkes i tillegg av lokal tilførsel av turbid ellevann og periodevis avrenning av partikkelholdig vann fra veinettet.



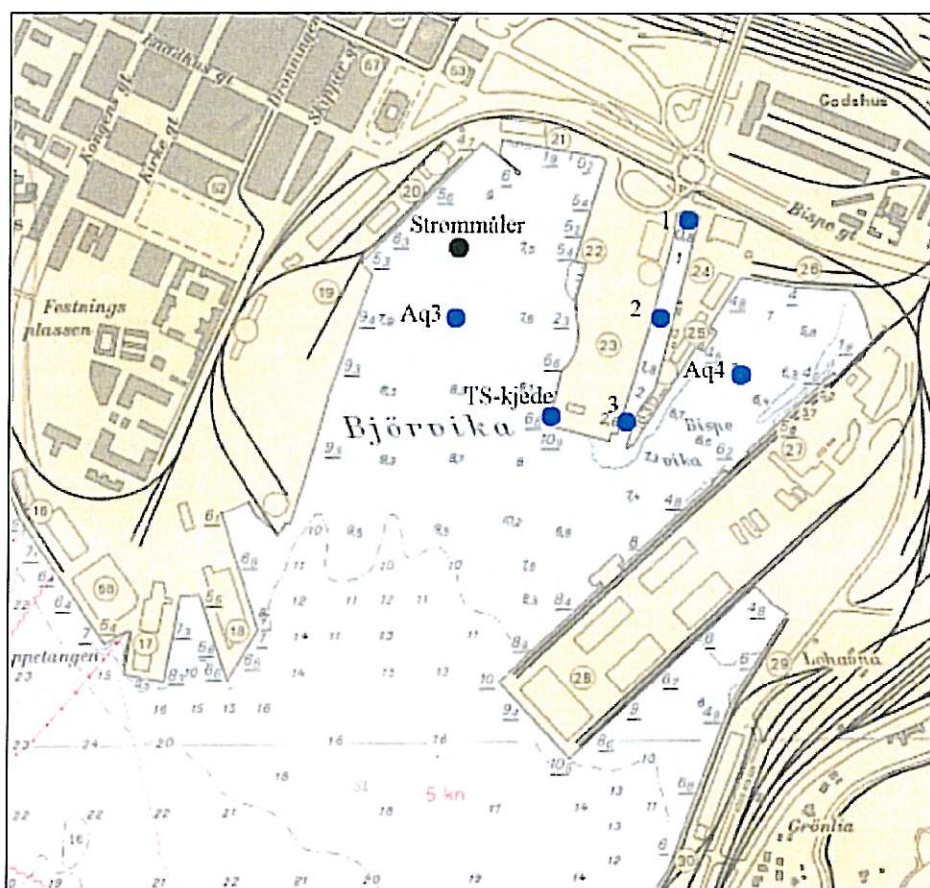
Figur 4. Oksygenkonsentrasjon i Bjørvika og Bispevika i ca. 7 meters dyp juni-oktober 2001 (fra Molvær et al., 2002).

Endringer i tetthetssjiktningen i havnebassenget vil forplante seg inn til Bjørvika gjennom horisontale strømmer. Vann vil strømme innover i overflaten og ut på større dyp, eller omvendt.

Vannfornyelsen mellom overflata og bunn som følge av slike tetthetsvariasjoner er beregnet av Schaanning et al. (2000). Vannutskiftingstiden varierte fra mindre enn ett døgn opp til 5-6 døgn i mai 1999. Gjennomsnittlig transport for hele Bjørvika ble grovt beregnet:

- 0-4 m: 2,2 m³/s (varierende fra 0,8 til 5)
- 4-6 m: 1,3 m³/s (varierende fra 0,4 til 2,5)
- 6-8 m: 1,2 m³/s (varierende fra 0,5 til 2,3)

For hele vannsøylen blir dette 4.7 m³/s, varierende mellom ca. 1.7 m³/s og 10 m³/s, og tilsvarer oppholdstider mellom ca. 0.5 døgn og 3.5 døgn.



Figur 5. Stasjonsnett i Björsvika/Bispevika. TS-kjeden var i bruk i 1999, mens det i 2000 – 2001 ble tatt prøver og gjort målinger ved øvrige stasjonene (fra Molvær et al. 2002).

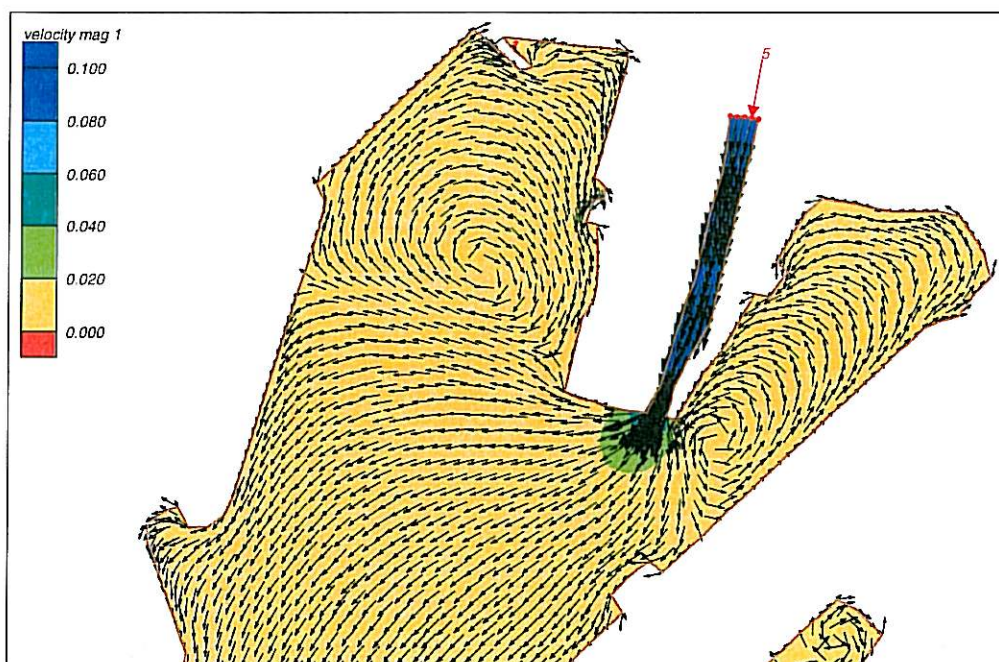
3. Beregninger

3.1 Sirkulasjon i overflatelaget

Scenario 1: nåværende sirkulasjon i 0-2 m dyp og vannføring 10 m³/s i Akerselva

Hovedtrekkene er vist **Figur 6**. Ellevannet flyter raskt gjennom det trange utløpet for så å bre seg utover til begge sider samtidig som hastigheten synker til under 2 cm/s. Både i Bjørvika og i Bispevika opptrer store og langsomme virvler.

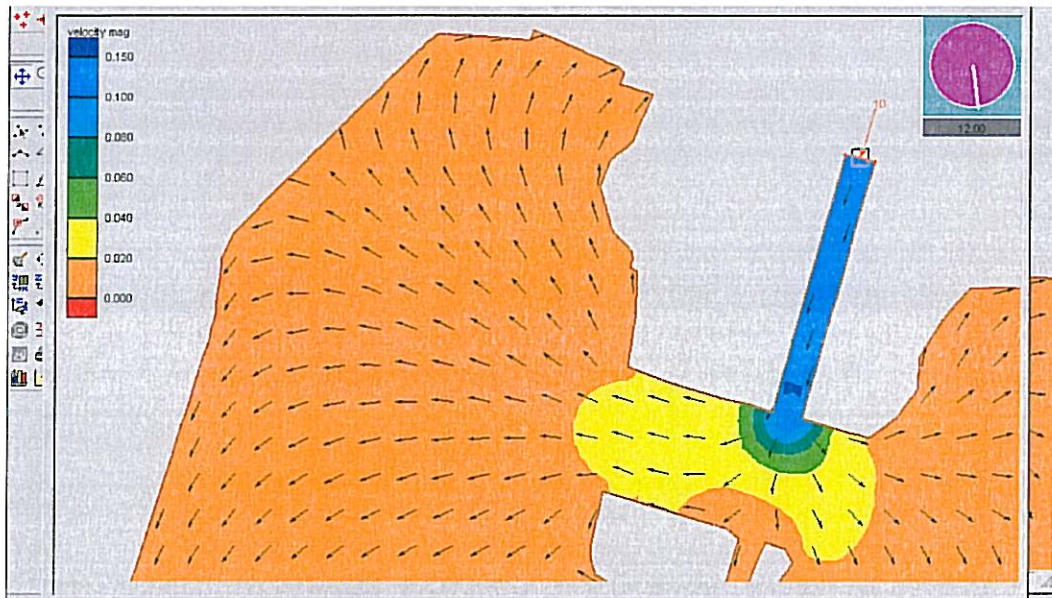
Utenom selve utløpsområdet og bortsett fra flomsituasjoner vil vannbevegelsene som skapes av utstrømningen fra Akerselva oftest være så langsomme at virkningen av skiftende vindforhold og av tidevann i stor grad vil prege sirkulasjonen i overflatelaget.



Figur 6. Simulering av vannsirkulasjon i 0-2 m dyp ved nåværende topografi og en vannføring på 5 m³/s i Akerselva. Det er ingen vind eller virkning av inn- eller utstrømmende tidevann (fra Molvær, Muniz og Magnusson, 2002). Svært svak strøm i overflatelaget. Enhet: m/s.

Scenario 2: Forventet sirkulasjon i 0-2 m dyp

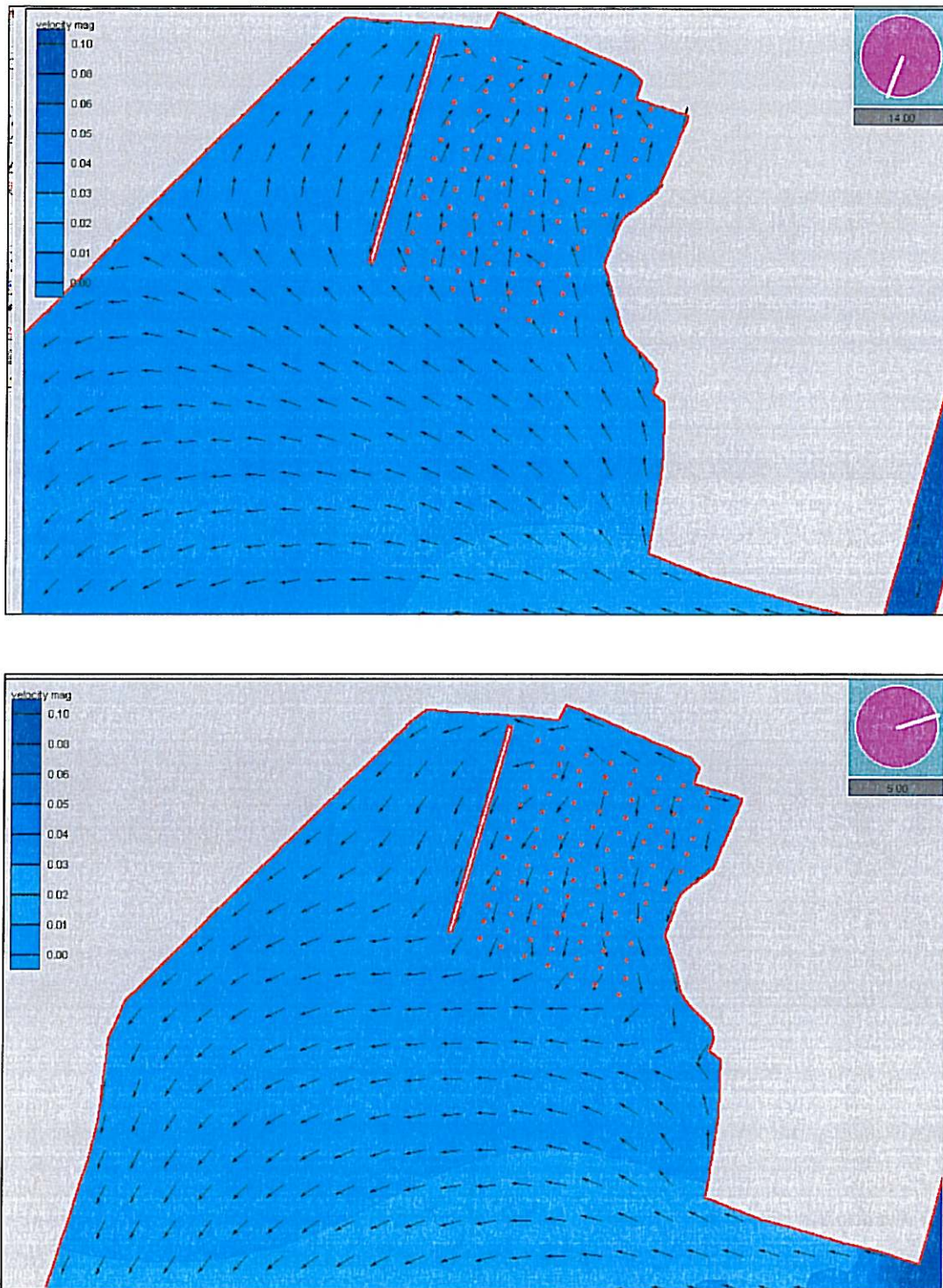
Den forventede sirkulasjonen i Bjørvikas overflatelag beskrives gjennom fire figurer. **Figur 7** beskriver sirkulasjonen ved $10 \text{ m}^3/\text{s}$ slik den blir når tunnelen skjærer gjennom Bjørvikautstikkerens og Paulsenkaiaas søndre deler. Vannbevegelsene er svært langsomme og styres av utstrømningen av vann fra Akerselva, tidevann og vind.



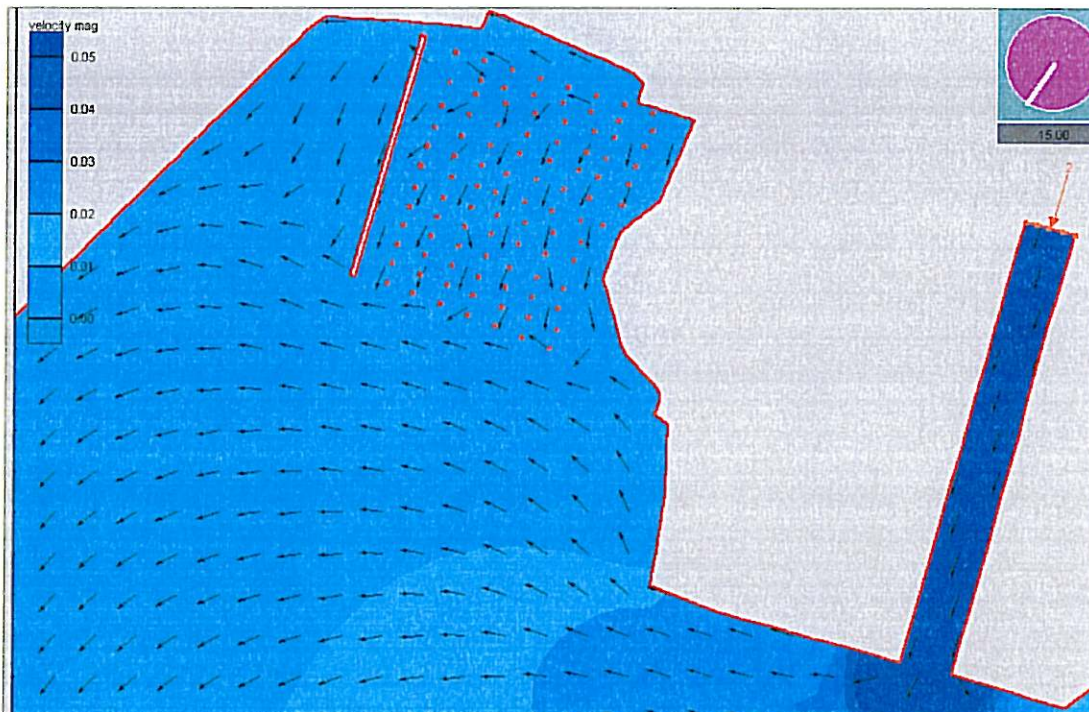
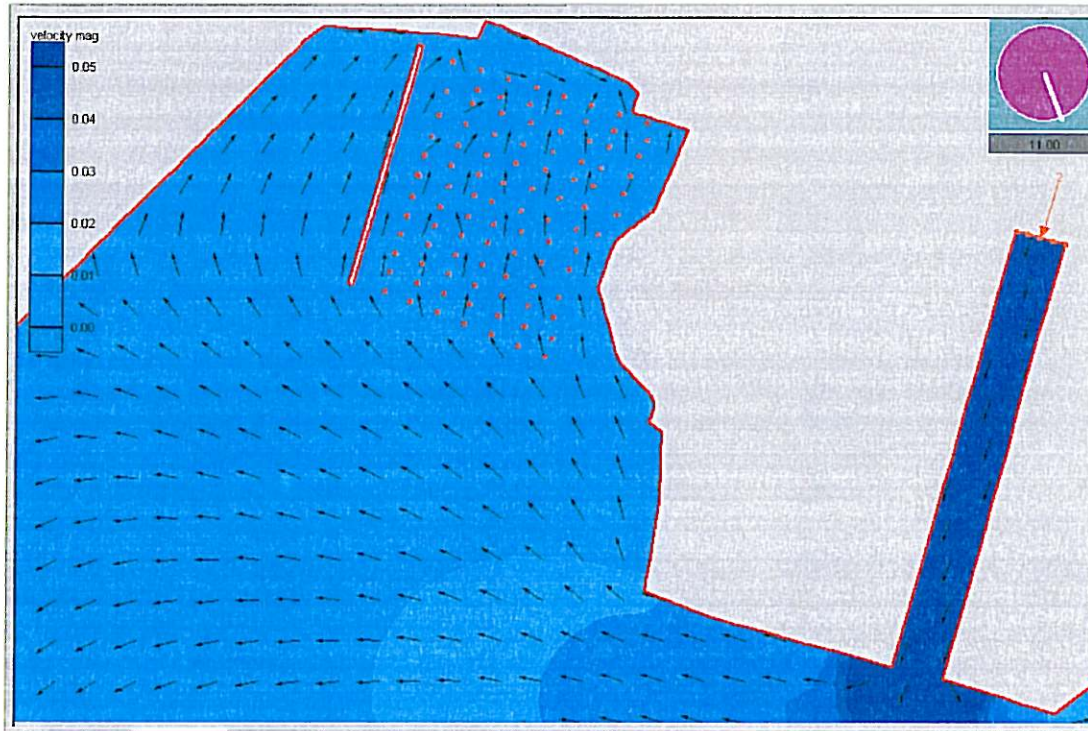
Figur 7. Sirkulasjon ved vannføring $10 \text{ m}^3/\text{s}$ og innstrømmende tidevann. Bjørvikautstikkeren og Paulsenkaia er gjennomskåret av tunnelen. Enhet: m/s.

I **Figur 8** vises sirkulasjonen ved inn- og utstrømmende tidevann, med front på bygningens vestside og med pilarer under bygningen. Vannføringen i Akerselva er $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Strømhastigheten er lav, bare 0.5-1 cm/s eller omkring 0.3-0.6 m/minuttet. Dette er i samme størrelsesorden som for beregningene uten pilarer eller front. Fronten deler Bjørvikas indre del i en østlig og en vestlig del, men dette har ikke avgjørende betydning for vannutskiftningen som i hovedsak skjer i nord-sør retningen.

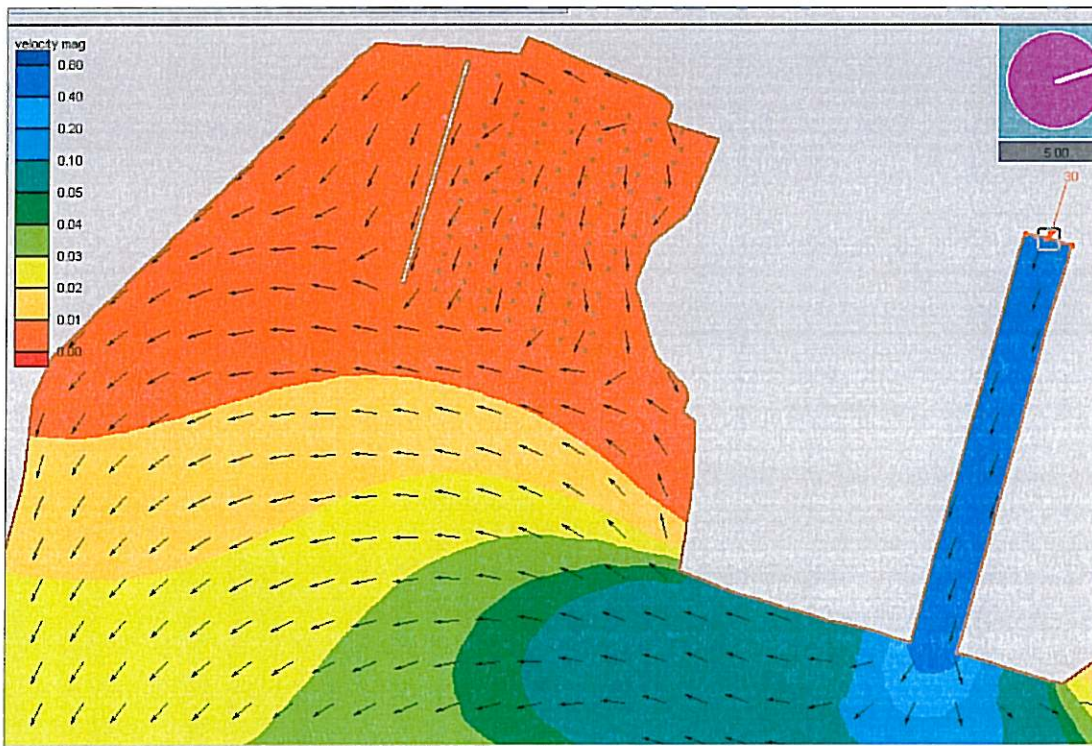
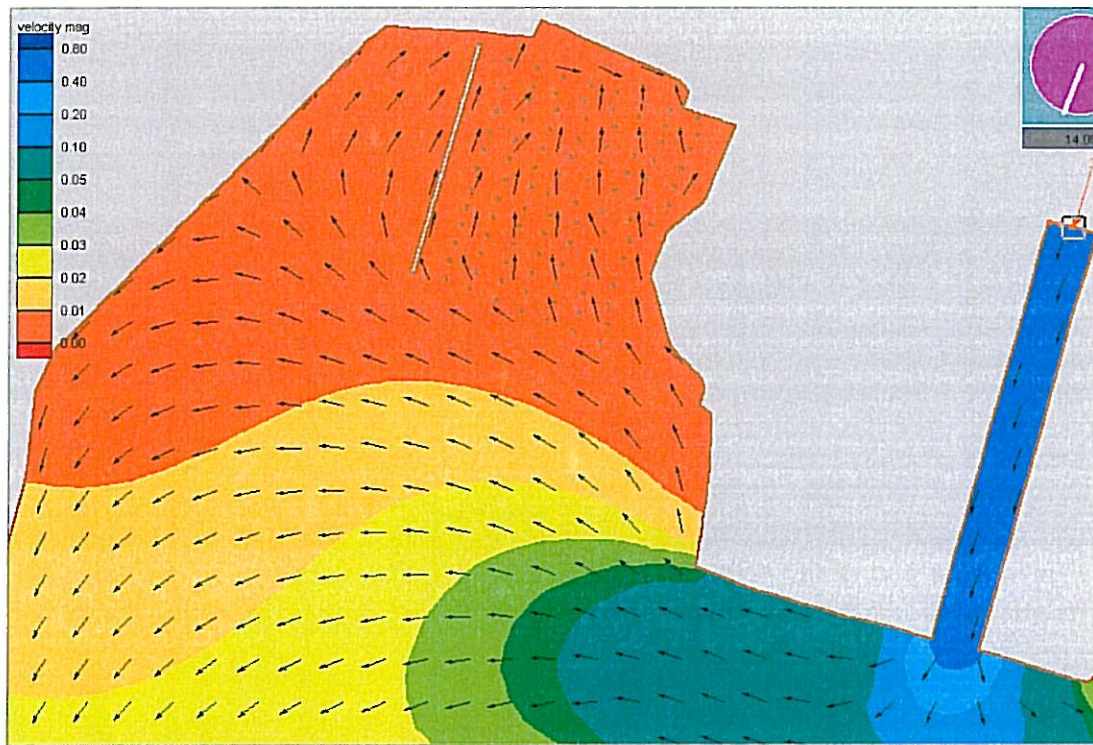
I **Figur 9-10** vises sirkulasjonen ved inn- og utstrømmende tidevann, med front på bygningens vestside og med pilarer under bygningen. Vannføringen i Akerselva er $2 \text{ m}^3/\text{s}$ (**Figur 9**, meget lav) og $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (**Figur 10**, høy). I begge tilfeller er strømhastigheten lav, bare 0.5-1 cm/s eller omkring 0.3-0.6 m/minuttet. Dette er i samme størrelsesorden som for beregningene uten pilarer eller front.



Figur 8. Front og pilarer. Sirkulasjon ved ferskvannstilførsel $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Øverst: stigende vannstand. Nederst: fallende vannstand. Pilarene og støtvollen er ikke noe hinder av betydning. Enhet: m/s.



Figur 9. Front og pilarer. Sirkulasjon ved ferskvannstilførsel $2 \text{ m}^3/\text{s}$. Øverst: stigende vannstand. Nederst: fallende vannstand. Pilarene og støtvollen er ikke noe hinder av betydning. Enhet: m/s.



Figur 10. Front og pilarer. Sirkulasjon ved ferskvannstilførsel $30 \text{ m}^3/\text{s}$. Øverst: stigende vannstand. Nederst: fallende vannstand. Pilarene og støtvollen er ikke noe hinder av betydning. Enhet: m/s.

3.2 Vannutskifting i dyplaget

Vannutskiftingen vurdert ut fra tidevannet

I kap. 2.2 ble den gjennomsnittlige volumtransporten for hele Bjørvika (514600 m³) oppgitt til 4.7 m³/s, men varierende mellom ca. 1.7 m³/s og 10 m³/s. Innenfor tverrsnittet mellom Langkaia og Bjørvikautstikkeren (ca. 900 m² hvor støtvollen ligger) er volumet ca. 163000 m³. For dette vannvolumet blir de tilsvarende transportene:

0-4 m: 0.68 m³/s (varierende fra 0.24 til 1.5)

4-6 m: 0.4 m³/s (varierende fra 0.12 til 0.9)

6-8 m: 0.37 m³/s (varierende fra 0.15 til 0.8)

I sum for hele vannsøylen blir den gjennomsnittlige transporten 1.45 m³/s, varierende mellom 0.53 m³/s og 3.0 m³/s. De tilsvarende oppholdstidene blir ca. 1.3, 3.6 og 0.7 døgn.

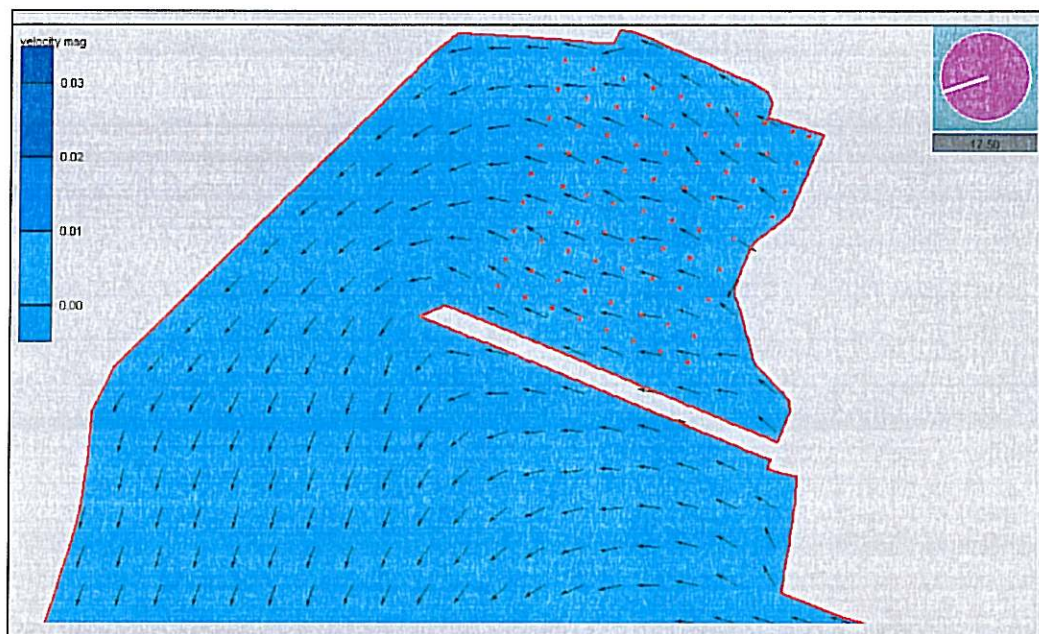
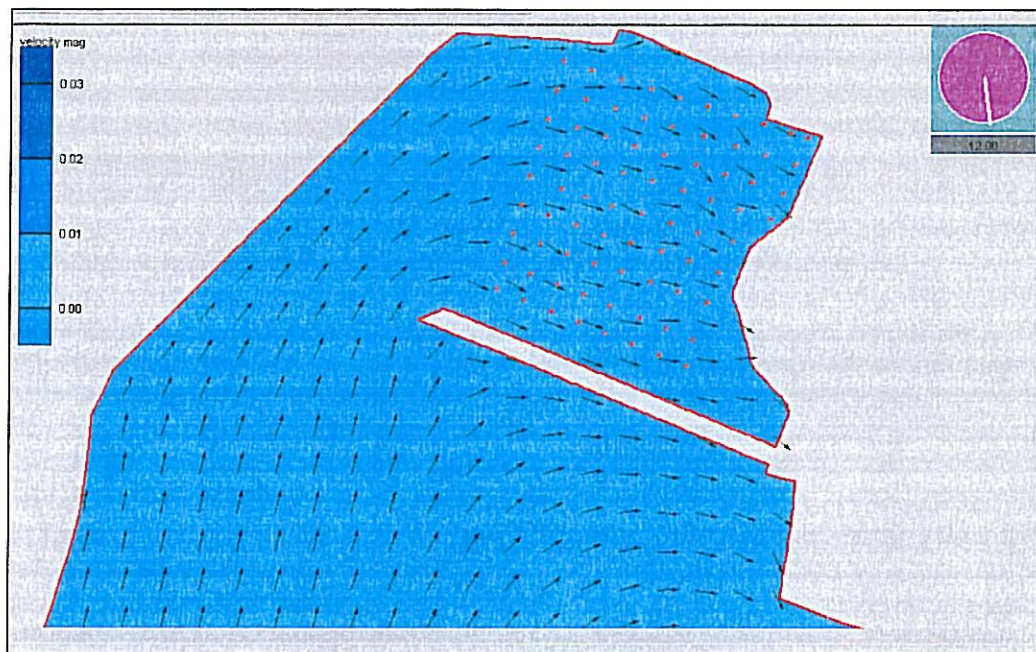
Spørsmålet blir da om arealet av det nye tverrsnittet mellom Langkaia og Bjørvikautstikkeren (ca. 900 m² hvor støtvollen ligger), kan bære slike transporter uten at strømmen blir kritisk og begrenser vannutskiftingen. Arealet av tverrsnittet under 2 meters dyp er ca. 400 m².

Arealet av overflata innenfor det nye tverrsnittet er ca. 25000 m² og når det halvdaglige tidevannet hever (eller senker) vannstanden med typisk 0.24 m over 6 timer (21600 sekund) tilsvarer dette en transport av 6000 m³, som gir en gjennomsnittlig transport av 0.28 m³/s. Fordelt over et tverrsnitt på 900 m² blir den gjennomsnittlige tidevannshastigheten langt mindre enn 1 mm/s. Ved gjennomstrømning på hhv. 1.45 m³/s og 3 m³/s blir de tilhørende gjennomsnittshastighetene 1.5-2 mm/s og 3-4 mm/s.

Det vannvolum som skal strømme gjennom tverrsnittet støtvollen-Langkaia ved en full utskifting under 2 m dyp skal tilsvare det samlede volumet av vann under dette dypet innenfor traseen, eller ca. 115000 m³. Kravet til en utskifting over et par døgn betyr en gjennomsnittlig transport på 0.7 m³/s, hvilket tilsvarer strømhastigheter på i størrelsesorden 2 mm/s. Dette er lave strømhastighet og transportkapasiteten gjennom det nye tverrsnittet vil derfor ikke være noe hinder for å opprettholde en vannutskifting av samme størrelse som før utbygging av støtvoll og opera.

Simulering av strømforhold i 2-8 m dyp med tidevann, støtvoll og pilarer

For å bedømme hvordan støtvollen og pilarene under operaen vil påvirke vannsirkulasjonen er det gjort simuleringer med bruk av SMS-modellen. Tidevannet driver innstrømning og utstrømning og simuleringen er satt opp som om vanddyppet var 5-6 m og toppen av støtvollen lå i overflata. Resultatene er vist **Figur 11**. Som ventet fungerer støtvollen som en sperring for vannbevegelser i nord-sør retningen og inn- og utstrømning vil foregå mellom vollens vestsida og Langkaia.



Figur 11. Simulering av strømretning og strømhastighet med:
Øverste figur: Innstrømmende tidevann
Nederste figur: Utstrømmende tidevann
Enhet: m/s.

Vannutskiftningen beregnet ut fra målte variasjoner i tetthetssjiktningen

Endringer i tetthetssjiktningen i havnebassenget kan i stor grad bidra til vannutskiftningen i Bjørvika. I forbindelse med vurderingen av E18-tunnelen under Bjørvika og Bispevika ble det gjennomført beregninger av hvordan skipsstøtvoller kan virke begrensende på vannutskiftning knyttet til vertikal bevegelse av tetthetsflater (Schaanning et al. 2000).

Ett av de tidlige scenariene for Bjørvika gikk ut på at det skulle bygges en støtvoll opp til 4 m dyp, med en smal trapesformet kanal fra 4 til 8 m dyp for å hjelpe på vannutskiftningen. Kanalen hadde bredde 3 m i 8 m dyp og 12 m i 4 m dyp, dvs. med et totalt tverrsnitt på 36 m². Det ble beregnet hvordan endringer i tetthetsprofilene utenfor kunne forplante seg inn i området innenfor gjennom denne kanalen. Arealet innenfor kanalsen i 4 m dyp var ca. 68400 m². Et eksempel på resultatet av disse beregningene er vist i **Figur 12**. Hver figur viser kurver for tre ulike tetthetsforskjeller (se delfigur øverst. Figurene viser at hvis vannet er sjiktet med en grenseflate mellom to vannmasser med tetthetsforskjell 1-3 sigma_t-enheter og grenseflaten heves eller senkes 4 m i løpet av ett til tre døgn ville høydeforskjellen til venstre) mellom tetthetsflatene innenfor og utenfor ville kunne bli 1-2 meter, slik at variasjonene innenfor kanalen kunne bli forsinket med opp mot ½ til 1 døgn ved heving, og med opp til 2 døgn i siste fase av en senking (se øvre delfigur).

Strøm under 2 m dyp til og fra området rundt Operaen vil skje gjennom en kanal som er ca. 5 til 10 ganger bredere enn den kanalen det ble beregnet for tidligere.

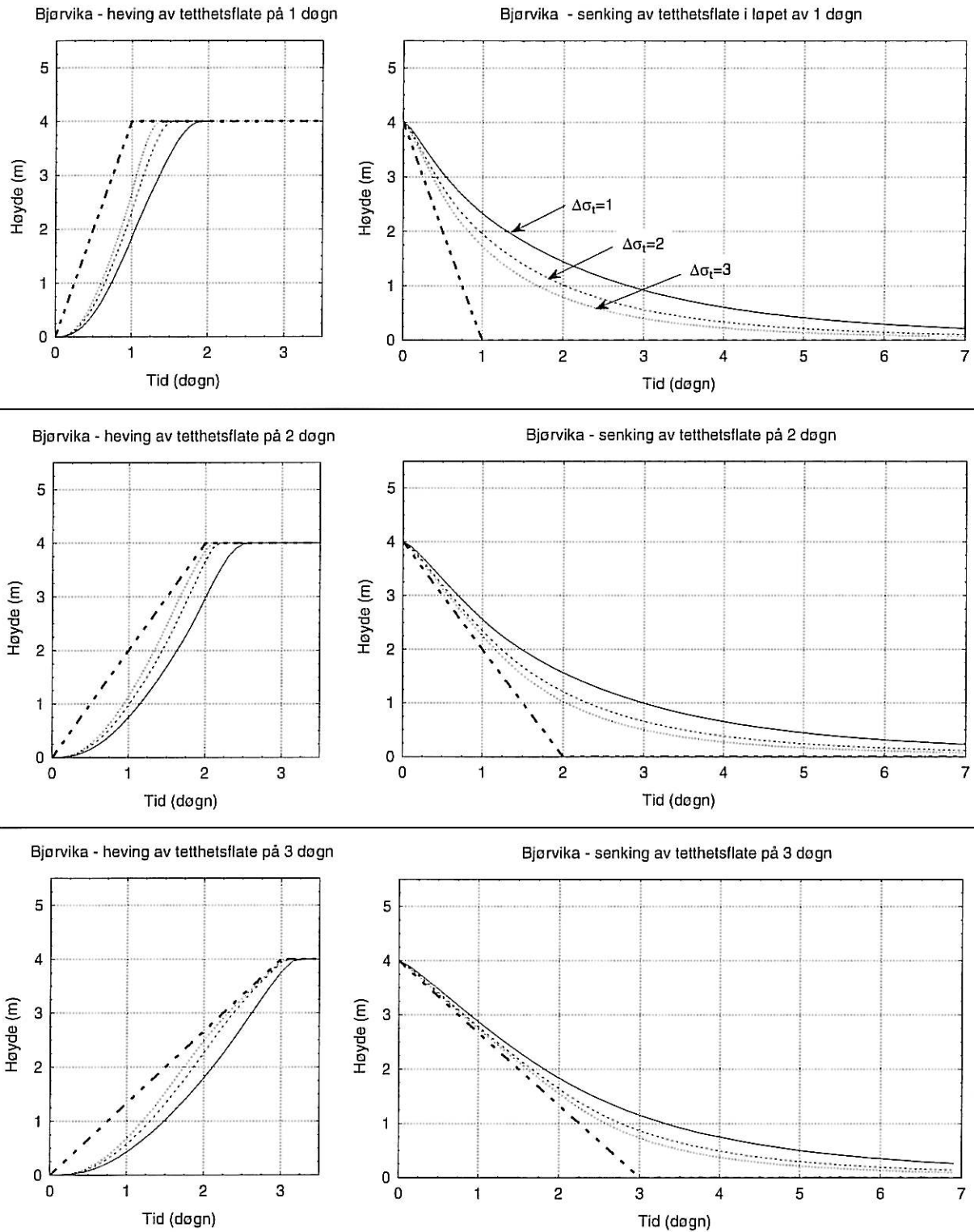
Tabell 3. Bredder i kanal i skipsstøtvoll i tidligere beregninger og bredden mellom støtvoll og Langkaia.

Dyp (m)	Bredde av kanal i skipsstøtvoll utenfor E18-tunnel i Schaanning et al. (2000)	Bredde av kanal inn til området rundt Operaen
2		85
4	20	80
6	11	75
8	6.4	52
9	3	20

Samtidig er det vannvolumet innenfor som skal fornyes gjennom kanalen bare 30-50 % av det som gjaldt ved de tidligere beregningene. Arealet innenfor var satt til 19500 m².

Tabell 4. Arealer i forskjellige dyp innenfor hhv. skipsstøtvoll utenfor E18-tunnel og innenfor kanal til området rundt Operaen.

	Areal av Bjørvika innenfor skipsstøtvoll utenfor E18-tunnel i Schaanning et al. (2000)	Areal innenfor kanal inn til området rundt Operaen
0	82500	24900
2	77300	23350
4	68400	20000
6	53600	17550
8	19500	10300
9	5700	0



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.

Ut fra **Figur 12** kan vi se at hvis forholdet mellom transporten gjennom kanalen og volumet innenfor er ca. 3 ganger større enn for de tidligere beregningene, vil det være tilstrekkelig til at vannstanden innenfor og utenfor følger hverandre godt ved en heving eller senking med 4 m i løpet av ett til tre døgn. Det tilsier en økning i absolutt transport (volum/tid) i forhold til tidligere beregning med opp mot 50 %.

Den strømmen som går gjennom kanalen vil grovt sett være proporsjonal med bredden og med kvadratroten av høydeforskjellen. (Detaljer i Schaanning et al. 2000). Med 5 ganger økt bredde på kanalen vil derfor innstrømningen øke med 50 % selv om høydeforskjellen er ca. 10 ganger mindre, dvs. ca. 10-20 cm.

Ut fra dette overslaget kan vi si at heving eller senking av tetthetsflaten som beskrevet vil gi en forsinkelse på 10-20 cm innenfor kanalen. Dette innebærer ikke noen merkbar reduksjon av tetthetsdrevne vannutskiftninger.

4. Vurderinger av vannkvalitet

På grunnlag av de foregående beregningene av sirkulasjon og vannutskiftning vil vi vurdere vannkvaliteten i overflatelag (0-2 m dyp) og dypvann. De to vannmassene omtales hver for seg.

4.1 Overflatelaget

Vannfornyelsen av overflatelaget i Bjørvikas indre del er i dag relativt dårlig. Vannutskiftningen som skapes av skiftende meteorologiske forhold, bidraget fra tidevann og ferskvannstilførselen fra Akerselva er viktigst. Fronten på vestsiden av Operabygningen vil stikke ca. 2 m ned i vannet og fungere som en sperring for vannbevegelser på tvers av vikas lengderetning. Imidlertid vil den viktigste vanntransporten foregå i vikas lengderetning og for Bjørvika som helhet vil virkningen av fronten dermed være liten. Nær fronten kan det imidlertid på begge sider oppstå bakevjer - lokale områder med redusert vannfornyelse.

Bygningen skal stå på 174 pilarer med diameter 0.61 m og innbyrdes avstand 6-12 m. Simuleringene med bruk av modell viser at vannbevegelsene er langsomme og at tilstedeværelsen av pilarer ikke gjør noen merkbar forskjell.

De lokale virkningene av vind fra nord-nordøst kan bli noe endret ved at bygningen skjerner deler av Bjørvikas indre del mot vind, dvs. i perioder reduserer vindens bidrag til å øke vannutskiftningen noe.

For vannkvaliteten i overflatelaget i Bjørvika indre del, innenfor støtvollen og under operabygget betyr dette små endringer i forhold til dagens situasjon. Ansamlinger av overflatesøppel ved fronten eller ved pilarene kan bli den mest påfallende endringen

4.2 Dypvannet

Utskiftningen av dypvannet (her regnet som vannmassen under 2-3 m dyp) kan bli påvirket av støtvollen og av pilarene under bygningen. De beregningene og vurderingene som er foretatt tyder imidlertid på at størrelsen av vannutskiftningen bare i liten grad vil bli redusert pga. at disse konstruksjonene, i hovedsak fordi åpningen mellom støtvollens vestre ende og Langkaia blir tilstrekkelig bred til at vannet kan strøme uhindret ut og inn.

Av dette følger at etter bygning av Opera og av støtvoll vil vannkvaliteten i dypvannet i alt vesentlig bli som i dag. Når det gjelder oksygenforhold er det imidlertid en klar risiko for episoder med dårlige-meget dårlige forhold innenfor støtvollen. Slike episoder forekommer i forbindelse med situasjoner der det oppstår en (forbigående) forverring av oksygenforholdene i nordre del av indre Oslofjord (jfr. Figur 4) og må ventes å kunne forekomme i framtida også.

5. Litteratur

ECGL 1995: Surface water modeling system, Reference manual. Brigham Young University. Engineering Computer Graphics Laboratory. 368B CB, Provo, Utah, USA. 170 sider.

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, 36 sider.

Molvær, J., Muniz, I.P. og Magnusson, J., 2002. E18 mellom Festningstunnelen og Ekeberg tunnelen. Detalj- og reguleringsplan, etappe1. Vannkvalitet og hensyn til naturmiljøet. NIVA-rapport nr. 4485-2002. 48 sider.

Schaanning, M.T., B. Bjerkeng, J. Magnusson og A. Sundfjord, 2000. E18 mellom Festningstunnelen og Ekeberg tunnelen. Tiltak for å sikre vannkvalitet etter utbygging av E18 i senketunnel gjennom Bjørvika og Bispevika. NIVA-rapport nr. 4250-2000. 35 sider.