

Miljømessige forhold ved kjøleløsning med rør-coil i Oslofjorden for nye Deichmanske hovedbibliotek. Enkel vurdering av temperaturendringer og virkning på nærings salttransport



RAPPORT

Hovedkontor

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

NIVA Region Sør

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

NIVA Region Innlandet

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

NIVA Region Vest

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

NIVA Region Midt-Norge

Høgskoleringen 9
7034 Trondheim
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 73 54 63 87

Tittel Miljømessige forhold ved kjøleløsning med rør-coil i Oslofjorden for nye Deichmanske hovedbibliotek. Enkel vurdering av temperaturendringer og virkning på næringssalttransport	Løpenr. (for bestilling) 6538-2013	Dato 21.5.2013
	Prosjektnr. Undernr. 13188	Sider Pris 29
Forfatter(e) Birger Bjerkeng	Fagområde Oseanografi	Distribusjon
	Geografisk område Oslo	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Oslo kommune, Kulturbyggene i Bjørvika, kontaktperson Per Henrik Gulbrandsen, ÅF Advansia	Oppdragsreferanse 94126898
--	-------------------------------

<p>Sammendrag</p> <p>Det nye Deichmanske hovedbibliotek som skal bygges ved Bjørvika, planlegges med et kjøleanlegg hvor overskuddsvarme føres ut av bygget via en lukket rørsøyfe til kjølecoiler plassert på 14-18 m dyp utenfor Bjørvika, sør for Sørengautstikkeren. Det er gjort en enkel vurdering av mulige effekter ved vanlig drift mht. temperaturendringer og vertikal næringssalttransport. En grov skalering av sirkulasjon gjennom coilene pga. oppvarming i stillestående vannmasser er sett i sammenheng med sannsynlige strømforhold. Ut fra dette anslås at lokal temperaturendring i perioder med lite strøm kan bli opp mot 5 °C som kortvarige pulser i begrensede deler av tidevannssyklusen. Oppvarmingen vil i liten grad føre til vertikal transport av næringssalter til dyp hvor de kan utnyttes til algevekst, men for å minimere påvirkningen bør coilene legges så dypt som mulig, helst på bunndyp 18 m eller mer. Det er ikke gjort noen nærmere biologisk vurdering av temperatureffektene i dette prosjektet, men en foreløpig oppfatning er at tiltaket ikke anses å gi risiko for betydningsfulle miljømessige effekter. Artssammensetning og bestand kan være noe påvirket av temperaturfluktuationene i selve coilområdet og det nærmeste området rundt, men det vil ikke ha noen vesentlig betydning for Bjørvika og Oslo havn som helhet.</p>

<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Kjøleanlegg 2. Oslofjorden 3. Temperatur 4. Bjørvika 	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Cooling system 2. Oslofjord 3. Temperature 4. Bjørvika
---	---



Birger Bjerkeng
Prosjektleder



Kai Sørensen
Forskningsleder



Kristoffer Næs
Forskningsdirektør

**Miljømessige forhold ved kjøleløsning med rør-coil i Oslofjorden
for nye Deichmanske hovedbibliotek**

Enkel vurdering av temperaturendringer og virkning på
næringssalttransport

Forord

Det nye Deichmanske hovedbibliotek som skal bygges ved Bjørvika, planlegges med et kjøleanlegg hvor overskuddsvarmen føres ut av bygget via en lukket rørsløyfe til kjølecoiler som settes ut i fjorden.

ÅF Advansia, som prosjekterer bygget, tok kontakt med NIVA for å få gjort en vurdering av de miljømessige forhold ved en slik løsning, og denne rapporten er resultatet av dette. Arbeidet er utført av undertegnede på oppdrag for Oslo kommune, Kulturbyggene i Bjørvika. Kontaktperson for oppdragsgiver har vært Per Henrik Gulbrandsen, ÅF Advansia.

Prosjektet har vært begrenset til å se på virkningen på temperatur og vannsirkulasjon. Behovet for biologiske vurderinger har vært drøftet med Hartvig Christie og John Arthur Berge ved NIVA, og er omtalt kort i rapporten.

Oslo, 10.6 2013

Birger Bjerkeng

Innhold

Sammendrag	5
Summary	6
1. Bakgrunn og formål	7
2. Teknisk informasjon om planlagt kjøleanlegg	7
3. Kvalitativ beskrivelse av vannsirkulasjon rundt kjølecoilene – grunnlag for enkel vurdering	8
4. Beskrivelse av fjordområdet	9
4.1 Topografi og bunnforhold	9
4.2 Hydrografi – lagdeling av vannmassene	10
4.2.1 Generelt	10
4.2.2 Temperaturforhold	11
4.3 Strømforhold	13
5. Skalering av temperatureffekt lokalt ved kjølecoilene i homogene, stillestående vannmasser	19
6. Skalering av mulig temperaturpåvirkning og økt oppblanding av temperaturpåvirket vann mot overflatelaget ut fra strømhastighet	22
7. Drøfting av resultatene	27
7.1 Temperaturpåvirkning	27
7.2 Næringssaltpåvirkning	27
8. Konklusjon og anbefaling	28
9. Referanser	28
Vedlegg. Sammenheng mellom dimensjonsløs friksjonskoeffisient og Reynolds tall for strøm forbi tverrstilt sylindere	29

Sammendrag

Det nye Deichmanske hovedbibliotek som skal bygges ved Bjørvika planlegges med et kjøleanlegg hvor overskuddsvarmen føres ut av bygget via en lukket rørsløyfe til kjølecoiler som settes ut i fjorden. Kjølecoilene tenkes plassert sør for Sørengautstikkeren utenfor Bjørvika på 14-18 m dyp. En glykolblanding vil sirkulere mellom kjøleanlegget i bygget og kjølecoilene gjennom to ledninger som graves ned i fjordbunnen i Bjørvika.

Beregninger tyder på at ved rolige strømforhold kan lokal temperaturøkning i selve coil-området bli opp til 5 °C i en mindre del av hver tidevannsperiode, i de fasene hvor strømmen er lav. Under de fleste sjikttingsforhold vil det oppvarmede vannet ikke være lett nok til å trenge oppover i vannmassene; det vil holde seg ved bunnen og først spres horisontalt, og bare gradvis blandes opp vertikalt samtidig som det spres over større områder. Gjennomsnittlig over en tidevannsperiode kan det se ut til at strømmen er såpass sterk at den lokale temperaturøkningen ligger innenfor 1 °C lokalt.

Horisontal spredning vil gjøre at temperaturøkning med mer enn 0.5 °C vil være begrenset til et område på anslagsvis 100 x 200 m. I de få tilfellene da varmpåvirket vann kan trenge opp mot 10-12 m eller høyere, vil temperaturøkningen bli redusert fordi vannet samtidig blandes med overliggende vann, og en vil neppe få større lokale temperaturøkninger enn 0.5-1 °C så høyt opp. Ut fra de vurderingene som er gjort i Bjerkeng og Johnsen (2006) vil dette ikke ha noen virkning på f.eks. vandring av fisk mellom Akerselva og fjorden.

Risikoen for opptrengning av næringsrikt vann er størst om vinteren (desember-februar), selv om det da er lavere kjølebehov. Det betyr likevel ikke så mye, fordi produksjonen er lys- og temperaturbegrenset. Ingen situasjoner viser mulig opptrengning helt til overflaten. Ca. 5-10 % av observerte sjiktningssituasjoner gir mulig opptrengning høyere opp enn 10 m, og da bare i korte deler av hver tidevannsperiode.

Resten av året vil opptrengning kunne forekomme bare i meget begrenset del av tiden, og stort sett ikke høyere opp enn til 10-12 meters dyp. Dette kan likevel ha en viss betydning for planteplanktonproduksjonen, og en bør forsøke å minimere det ved å legge coilene så dypt som mulig, helst på bunndyp 18 m.

Det er ikke gjort noen nærmere biologisk vurdering av temperatureffektene i dette prosjektet, men en foreløpig oppfatning er at tiltaket ikke anses å gi risiko for betydningsfulle miljømessige effekter. Under dagens forhold er det antagelig nokså lite liv på bunnen i det aktuelle området. Dersom en lykkes med å forbedre forholdene i Oslo havn slik målet er med på gående tiltak, som f.eks. Midgardsormen som er under bygging, og det blir mer dyreliv i vannmasser og på bunn i området, vil antagelig artssammensetning og bestand være påvirket av temperaturfluktuationene i selve coilområdet og det nærmeste området rundt, fordi arter som er avhengig av stabilt lav temperatur ikke vil etablere seg der. Dette vil være begrenset til et lokalt område og vil ikke ha noen vesentlig betydning for Bjørvika og Oslo havn som helhet.

Det anses ikke påkrevet med mer detaljert modellering av strømming rundt kjølecoilene, men et enkelt program med målinger av temperatur de nærmeste omgivelsene til eksisterende anlegg i relativt stillestående vann kan ha verdi for å etterprøve vurderingene i denne rapporten.

Summary

Title: Environmental aspects of a cooling system with cooling coils in the Oslofjord for the new Deichman Main Library. A simple assessment of temperature changes and effect on nutrient transport.

Year:

Author: Birger Bjerkeng

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 978-82-577-xxxx-x

The new Deichman main library in Oslo at Bjørvika is planned with a closed-circuit cooling system where a glycol-water mixture is pumped through a pipeline to cooling coils placed in the Oslofjord south of Sørenga outside Bjørvika on 14-18 m depth.

Calculations indicate that under calm current conditions the local temperature increase in the coil area may be up to 5 °C in a limited part of each tidal period; when the currents are small. During most situations the density stratification will keep the heated water in the bottom layer, where it will spread horizontally and only gradually be mixed vertically, parallel with dispersion to larger areas. On average the currents seem sufficiently strong to keep the local temperature effect within 1 °C.

Due to horizontal dispersion it may be expected that temperature increase of more than 0.5 °C will be restricted to an area of roughly 100 x 200 m. In the few situations when heated water may rise to 10-12 m depth or higher, the temperature effect will be reduced because of mixing with water closer to the surface, and there will hardly be local temperature changes of more than 0.5-1 °C at those depths. According to assessments in Bjerkeng and Jonsson (2006) this will not impact migration of young fish between the river Akerselva and the fjord.

The risk of nutrient rich heated water being mixed upwards by buoyancy is largest during winter (December- February), even if the required cooling effect is lower, but this is not so important, since there the nutrient concentrations in the surface layer are then already sufficient, and plankton growth is light and temperature restricted. Under no observed circumstances may heated water rise to the surface. About 5-10 % of observed stratifications may give heat-impacted water at 10 m depth or less, and then only in a smaller part of each tidal period.

During the rest of the year, buoyance-induced mixing above coil depth will only occur for a small fraction of observed density profiles, and generally not higher than to 10-12 m depth. This may still give a small contribution to phytoplankton growth, and one should try to minimize it by placing coils as deep as possible, preferable on bottom of 18 m depth.

The report does not include a biological assessment, but a preliminary assumption based on consulting with biologists is that the cooling coils will not give any important environmental effects. At present there is little bottom fauna in the area. If conditions improve, the diversity and abundance will probably be influenced by temperature fluctuations locally in the coil area and in the closest area around it, but this will not be important for Bjørvika and Oslo harbor areas as a whole.

It is not considered necessary to work with a detailed modeling of circulation around the coils, but a simple measurement program for an existing plant in relatively calm, sheltered waters could be of value for checking the assessments made in this report.

1. Bakgrunn og formål

Det nye Deichmanske hovedbibliotek som skal bygges ved Bjørvika, planlegges med et kjøleanlegg hvor overskuddsvarmen føres ut av bygget via en lukket rørsøyfe til kjølecoiler som settes ut i fjorden. En glykolblandet væske vil sirkulere gjennom rørsøyfen og avkjøles i kjølecoilene ved at varmen avgis til omgivende fjordvann.

Kjølecoilene er tenkt plassert på 14-18 m dyp. Den direkte virkningen på miljøet er en lokal oppvarming av vannmassene i dette dypet. Det skal her gjøres en enkel vurdering av de mulige effektene av dette, med en grov skalering ut fra mulig temperaturpåvirkning i sammenheng med den naturlige lagdelingen som er gitt av saltholdighet og temperatursjiktning. Det skal vurderes om temperaturendringene kan bli slik at de har betydning for fisk og andre organismer. I tillegg skal det vurderes om oppdriften pga. oppvarming av vannet kan bidra til vertikal transport av næringsrikt vann oppover til lag hvor det er bedre lysforhold, slik at en får økt produksjon av planteplankton med mulige negative miljøkonsekvenser. Dette vil først og fremst kunne ha betydning om sommeren.

Det skal ut fra dette drøftes om det kan være behov for mer presis modellering av varmeindusert strømning rundt kjølecoilene for å estimere virkningene bedre. Evt. betydning for fisk og andre organismer vil bli helt kort drøftet i lys av tidligere NIVA-rapport LNR. 5284-2006, men det gjøres ikke noen nye biologiske vurderinger.

Bare virkningen under normal drift etter skisserte forutsetninger er vurdert i denne rapporten; konsekvenser av lekkasjer og andre driftsproblemer er ikke behandlet.

2. Teknisk informasjon om planlagt kjøleanlegg

Kjølebehovet er estimert til maksimalt 1.8 MW om sommeren, og ca. 750 kW om vinteren. Det kan også være aktuelt å hente varme fra fjorden om vinteren.

De kjølecoilene som er tenkt brukt, leveres av ABK AS. De består av mange parallelle sløyfer av polyetylenrør, lagt i en sylinderformet ramme (Figur 1). Glykolblandingen fordeles fra et vertikalt fordelerrør, og samles i et returrør, plassert i senter og periferi av coilen. Rørene ligger i mange parallelle spiralførmede horisontale kveiler fra fordelerrør til returrør. Tekniske data for slike coiler er sammenstilt i Tabell 1. Ut fra oppgitt mål kan anslås at det åpne strømtverrsnittet horisontalt og vertikalt gjennom coilen er ca. 50 % av totaltverrsnittet.



Figur 1. Bilde av rørcoil av type CWX fra ABK AS.

Tabell 1. Tekniske spesifikasjoner for rørcoiler av type CWX

Slangediameter	ytre	12	mm
	indre	10	mm
Senteravstand mellom slangene		25	mm
Dimensjoner på CWX-10	Diameter	2,45	m
	Høyde=	2,05	m

Det antas at hver coil av typen CWX-10 i praksis kan ha en kjøle-effekt på ca. 100 kW, og det planlegges brukt 20 slike coiler fordelt over et bunnareal på 20 x 20 m, dvs. at blir frie åpninger på 2-2,5 m mellom coilene.

Kjølecoilene tenkes plassert sør for Sjørengautstikkeren (Figur 2). Glykolblandingen vil sirkulere mellom kjøleanlegget i bygget og kjølecoilene gjennom to ledninger som graves ned i fjordbunnen i Bjørvika. Det antas at det aller meste av varmeavgivelsen vil skje i kjølecoilene, og at varmeovergang mellom rørledningen og bunnen er så begrenset at den ikke har noen betydning.

Glykolblandingen antas å ha inngangstemperatur ca. 30 °C og bli kjølt ned til ca. 17 °C ved passering gjennom kjølecoilene. Hvor mye temperaturen kan bli endret i vannet som omgir slangene inne i coilen, vil være en funksjon av varmeavgivelsen og utskiftningshastigheten på dette vannet. Det er ikke oppgitt noe fra leverandøren om hvor stor temperaturendring det kan bli i fjordvannet som sirkulerer rundt slangene i coilen. I dimensjonerende beregninger fra ABK AS ser det ut til å være antatt at temperaturen til fjordvannet, som er satt til 12 °C, ikke blir vesentlig påvirket sammenlignet med temperaturforskjellen mellom glykolblandingen og fjordvannet.

3. Kvalitativ beskrivelse av vannsirkulasjon rundt kjølecoilene – grunnlag for enkel vurdering

Mellom overflaten og det aktuelle dypintervallet for plassering av coilene vil vannet i fjorden alltid være mer eller mindre stabilt lagdelt pga. temperatur- og saltholdighetsgradienter, men det varierer mye over tid hvor sterk lagdelingen er, og i hvilke dyp den er mest markert. I dypintervallet 14-18 m har vannet som regel en klar stabil tetthetssjiktning, men det kan også være nesten homogent over dette dybdeintervallet. De naturlige strømforholdene rundt coilene vil også variere mye.

Når fjordvannet varmes opp av kjølecoilene blir det lettere og får en oppdrift. Dersom fjordvannet er helt eller nesten homogent over det aktuelle dypintervallet, og det ikke er noen naturlig strøm, vil det stige opp gjennom coilen mens det varmes opp. Når vannet inne mellom rørkeilene blir lettere, oppstår en liten trykkforskjell som trekker nytt vann inn fra sidene. Over coilen vil vannet stige videre, og blande seg inn i vannmassene ovenfor, inntil det eventuelt begrenses av stabil lagdeling høyere opp; da vil det spre seg ut til sidene.

Dersom det er en stabil lagdeling også rundt coilen, med tetthetsforskjell mellom omgivende vann i øvre og nedre del av coilen, kan den vertikale sirkulasjonen bli begrenset. Selv om vannet i nedre del av coilen varmes opp, blir det ikke nødvendigvis lettere enn omgivende vann høyere opp, og det kan bli en sirkulasjon hvor vannet strømmer inn og ut av coilen i horisontale strømmer inndelt i mange lag.

Som regel vil imidlertid det omgivende vannet ikke stå helt stille, men følge de naturlige strømmene i fjorden, og strømme forbi og gjennom rørcoilene. Hastighet og retning vil variere over tid, men hvis den naturlige horisontale gjennomstrømningen er stor i forhold til den vertikale strømmingen som oppvarmingen setter opp gjennom coilen, vil vannet passere mer eller mindre horisontalt gjennom coilen, og varmes opp omtrent like mye i alle dyp. Etter passering vil vannet være litt varmere og lettere, og kan blande seg litt med overliggende vann, men temperatureffekten er da fordelt på en

større volumfluks i utgangspunktet og vertikal blanding og transport vil lettere begrenses av stabil lagdeling i fjorden.

Siden glykolblandingen strømmer parallelt i alle de spiralformede kveilene, vil varmeavgivelsen være ujevnt fordelt over coilens horisontale flate. Den vil være størst i nærheten av fordelerrøret og minst i nærheten av returrøret. Hvor mye vannet blir oppvarmet, vil være avhengig av gjennomstrømningen, som er et resultat av balansen mellom naturlig horisontal strøm, akselerasjon pga. oppdrift og energitap ved turbulens og friksjonstap ved strømmingen forbi rørkveilene.

Det ville være en stor og kompleks oppgave å beregne dette teoretisk. For å beskrive de lokale strømningsforholdene gjennom coilen måtte det eventuelt gjøres målinger på et anlegg i drift eller på fysiske modeller.

I denne rapporten vurderes miljøforholdene i stedet på en enkel måte ved å skalere mulige virkninger av den totale varmeavgivelsen på vannmassene lokalt ved coilområdet som helhet og i et større nærområde.

Vurderingen tar utgangspunkt i at en grunnleggende antagelse: Uansett hvordan strømbildet rundt coilene er, må det antas at vann fra hele det vannlaget coilene berører blir trukket gjennom coilen og opptar varme, altså fra topp av coilene til bunnen. Varmeavgivelsen til fjordvannet er mer eller mindre jevnt fordelt på vann fra alle dyp i dette laget. Dette er opplagt hvis det er sterk sjiktning med horisontale bladstrømmer, og/eller sterk horisontal strøm forbi coilen, men vil også gjelde selv om det er stillestående forhold, og vannet trekkes opp gjennom coilen til toppen.

4. Beskrivelse av fjordområdet

4.1 Topografi og bunnforhold

Figur 2 viser kart over Oslo havn. Bunn dybden i Bjørvika øker fra 6 m inne ved Operatunnelen og skipsvollen til 10-12 m øst for Vippetangen, og derfra øker dybden gradvis mot en renne med 20-21 m dyp som ligger mellom Akershus og Hovedøya. Det aktuelle området for plassering av kjølecoilene er nord for denne renna og sør for Sørengautstikkeren. Det er flere åpne forbindelser mot resten av fjorden ned til ca. 20 m. En forbindelse går vestover til Oslo havn og videre mot fjorden via en åpning vest for Nakholmen. Det er også åpen forbindelse østover via området mellom Hovedøya og Bleikøya og videre mot Bekkelagsbassenget og resten av fjorden gjennom en åpning ned til ca. 26 m dyp mellom Gressholmen og Bleikøya. På vestsiden av Hovedøya mot Lindøya er det åpent ned til 18 m dyp, slik at vannet kan sirkulere rundt Hovedøya. Det er altså et relativt åpent område hvor det ligger topografisk til rette for sirkulering og utskiftning av vann ned til 20 m dyp.



Figur 2. Kart over Oslo havn og området utenfor. Det området hvor det er aktuelt å plassere kjølecoilene er markert som en grå sirkel. Nærliggende målestasjoner for hydrografi er vist med blå kvadrater. Kartet viser detaljert dybdeinformasjon, men med ganske liten skrift; de viktigste terskeldypene for åpningene mot resten av fjorden er vist spesielt med større typer og i mørk rød skrift. (Kart fra www.gislink.no; Kartgrunnlag Norge Digital og Geovekst)

4.2 Hydrografi – lagdeling av vannmassene

Siden 1973 har NIVA utført overvåking av forholdene i fjorden på oppdrag for Fagrådet for vann- og avløpsteknisk samarbeid i Indre Oslofjord. Et hovedelement i denne overvåkingen er innsamling av data om hydrografi (temperatur, saltholdighet og oksygen) og hydrokjemi. Programmet har 6 årlige hovedtokt, stort sett i februar, april, mai, august, oktober og desember. De senere år har dette vært supplert med ukentlige tokt i månedene juni-august, hvor hydrokjemi bare tas i overflaten, men hydrografi i dypprofiler. Overvåkingsrapportene er tilgjengelig på www.niva.no, se f.eks. Berge et al. 2012. Nedenfor brukes utvalgte resultater fra dette programmet, i hovedsak fra perioden 2004-2012.

4.2.1 Generelt

Vannmassene mellom overflaten og 20 m er som regel klart lagdelt med økende tetthet mot dypet, men det varierer hvor sterk lagdelingen er. Lagdelingen er styrt både av saltholdighet og temperatur. Saltholdigheten vil stort sett alltid være noe lavere i overflaten, og øke mot dypet. Dette er styrt av ferskvannstilrenningen, både til Oslofjorden generelt og til Bjørvika lokalt gjennom Akerselva og Alnaelva.

Om vinteren er overflatevannet kaldt, og temperaturene øker mot dypet, og det er relativt små vertikale forskjeller i saltholdighet. Nettoresultatet er at det som regel er en ganske svak lagdeling mellom 5 og 20 m.

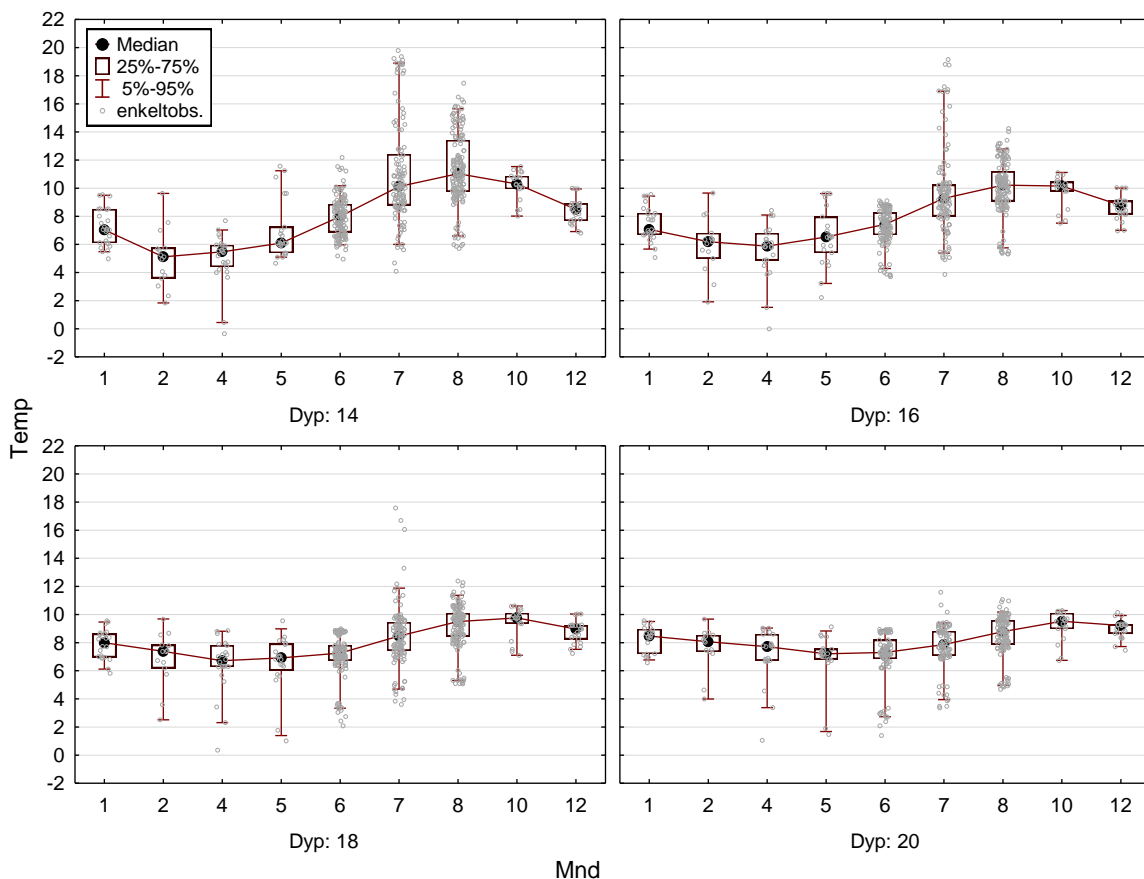
Om sommeren blir overflatelaget varmet opp, og da bidrar både saltholdighet og temperatur til stabil lagdeling. Saltholdighetsforskjellene er også større om sommeren, og det gjør at lagdelingen er mye sterkere om sommeren enn om vinteren. Da er det som regel en klar lagdeling i området 5-20 m.

4.2.2 Temperaturforhold

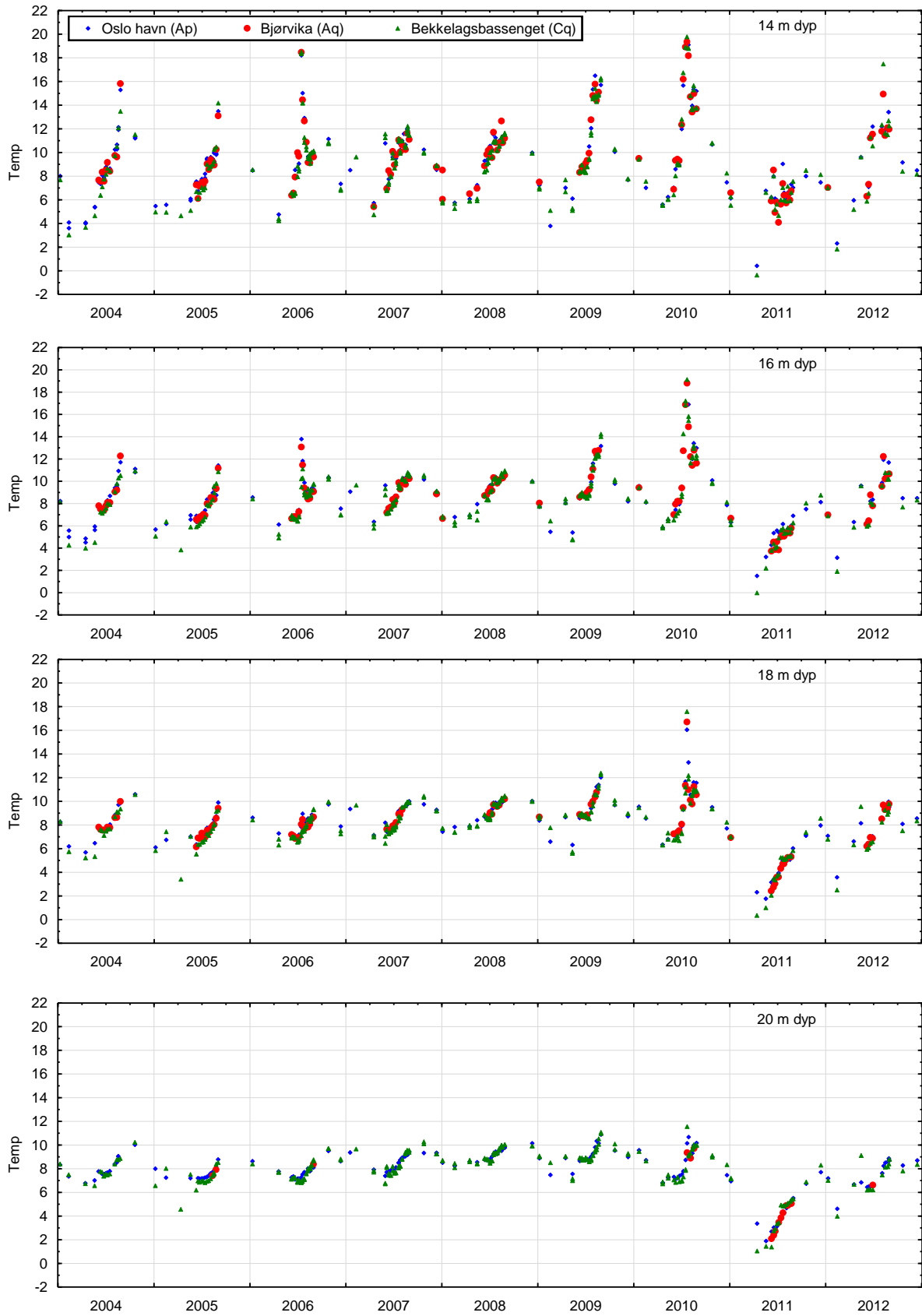
Kjølecoilene ønskes plassert i et dyp hvor det er mest mulig stabile temperaturforhold. Som bakgrunn for dette beskrives her temperaturforholdene nærmere. Det er derfor interessant å se spesielt på temperaturforholdene.

Data er i hovedsak hentet fra overvåkningsstasjonene Aq2 sør for Bjørvika, Ap2 i vestre del av Oslo havn, og Cq1 i Bekkelagsbassenget (sør for området vist i kartet). Stasjon Aq2, som ligger nærmest det aktuelle plasseringsområde for kjølecoilene, er bare inkludert i måleprogrammet i januar og i de ukentlige sommertoktene i juni-august. Data fra andre stasjonene er derfor tatt med for å komplettere bildet for andre tider på året. Pga. isforhold er stasjon Aq3 inne i Bjørvika noen ganger tatt lenger sør enn vist på kartet og derfor ned til 14 m dyp eller mer, og slike data er tatt med.

Figur 3 oppsummerer temperaturdata fra området statistisk på månedsbasis. Den mest kritiske måneden er juli, da bare 18 og 20 m dyp har temperaturer under 12 °C for 95 % av observasjonene (Statistikken er basert på litt ulikt utvalg av stasjoner for ulike tidspunkter, og er derfor ikke helt balansert). I det aktuelle dypintervallet fra 14 til 18 m er temperaturen lavest om vinteren eller våren og høyest sent på sommeren og om høsten. Økende dyp gir mer stabile temperaturforhold.



Figur 3. Årstidsvariasjon for temperatur på ulike dyp i Bjørvika, Oslo havn og Bekkelagsbassenget (Stasjoner Aq2, Aq3, Ap2, Ap3 og Cq1), basert på data fra 2004-2012. Statistikken er gruppert på måned, og rådata er vist innenfor hver måned med randomisert plassering langs den horisontale akselen.



Figur 4. Temperaturvariasjoner på utvalgte dyp (14-20 m) i Oslo havn, Bjørvika og Bekkelagsbassenget for perioden 2004-2012.

Det er også variasjoner fra år til år. Figur 4 viser hvordan temperaturen på ulike dyp har variert innenfor og mellom år i perioden 2004-2012. Figuren bekrefter at det ikke er noen vesentlige forskjeller mellom stasjonene i det dypintervallet som er vist, fra 14 til 20 m dyp, og alle stasjonene som er tatt med kan derfor representere forholdene sør for Bjørvika.

På 14 m dyp varierer temperaturen ganske mye, både gjennom året og fra år til år. Sommer-temperaturen blir ofte 15 °C eller mer, og var oppe i 20 °C i 2010. På 16 m dyp er det mer stabil årstidsvariasjon og sommertemperaturene er vanligvis under 13 °C, men det kan bli nesten 20 °C. På 18 m dyp bli temperaturen som regel ikke særlig over 10 °C; unntaket er somrene 2009 og 2010 da den kom opp i hhv. 12 og 18 °C. Først på 20 m dyp ligger alle temperaturene under 12 °C.

Vintertemperaturene ligger vanligvis rundt 4-5 °C på 14 m dyp, det øker med dypet til stort sett 7 °C eller mer på 20 m dyp, men uansett dyp kan det forekomme vintertemperaturer ned mot 0 °C.

Ut fra disse data kan det se ut som 20 m er det beste, og 18 m akseptabelt, for å få stabile driftsforhold for et kjøleanlegg. En måtte imidlertid noe lenger sør enn det området som er pekt ut som det aktuelle for å få optimalt dyp 20 m. Dersom kjølecoilene kan legges så langt sør at en iallfall kommer ned i 18 m bunndyp, vil det være en fordel ut fra driftsmessige forhold.

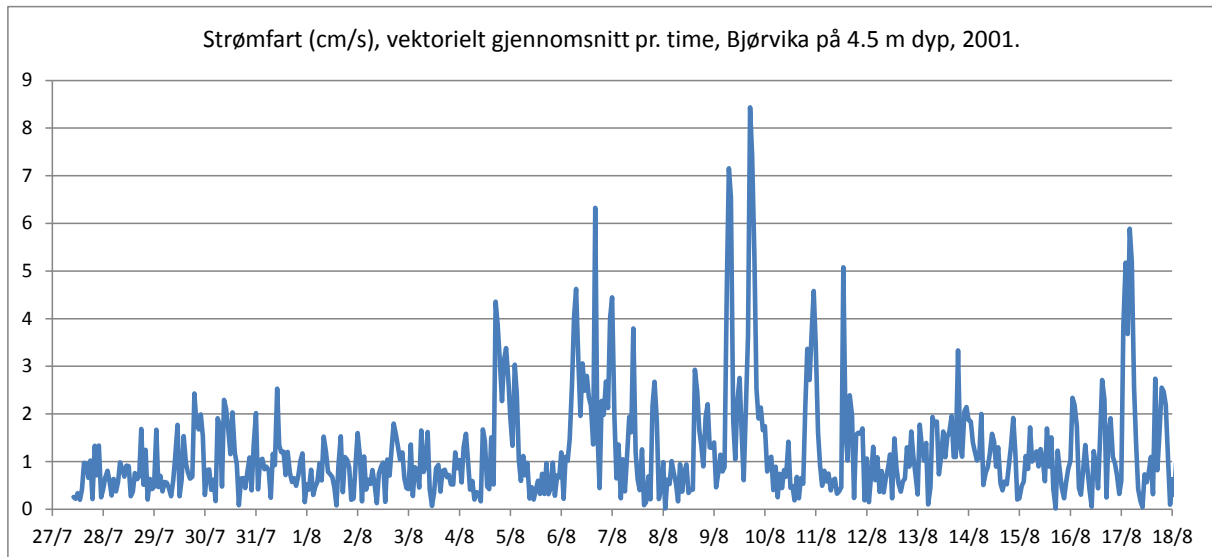
4.3 Strømforhold

For å si noe om hvordan temperaturpåvirkningen fra kjølecoilene vil bli, må en ta i betraktning hvor raskt vannet i nærområdet blir spredt og skiftet ut ved utveksling med resten av fjorden. Det er ikke gjort så mye strømmålinger i dette området, og det som er gjort er ikke direkte relevant for den aktuelle problemstillingen. Det finnes noen strømmålinger i overflatelaget inne i Bjørvika fra 2001 (Christie et al. 2006), og det ble også målt strøm i Bekkelagsbassenget i 2005 forbindelse med prøvedumping av masser ved Malmøykalven (Schaanning et al. 2006). Disse målingene kan ikke uten videre anvendes som representative for strømmen sør for Sørenga, men de kan likevel gi nyttig generell bakgrunnsinformasjon om hva slags strømstyrker en kan regne med.

Generelt vil strømbildet være sammensatt av estuarin sirkulasjon, strøm drevet av vannstandsvariasjoner pga. tidevann og lufttrykkendringer, samt horisontale strømmer knyttet til endringer i lagdeling som forplanter seg fra resten av fjorden, i stor grad på grunn av skiftende vindpåvirkning på overflatelaget. Alle disse drivende kreftene kan gjøre seg gjeldende ned til det aktuelle dypet for plassering av kjølecoiler og også på langt større dyp.

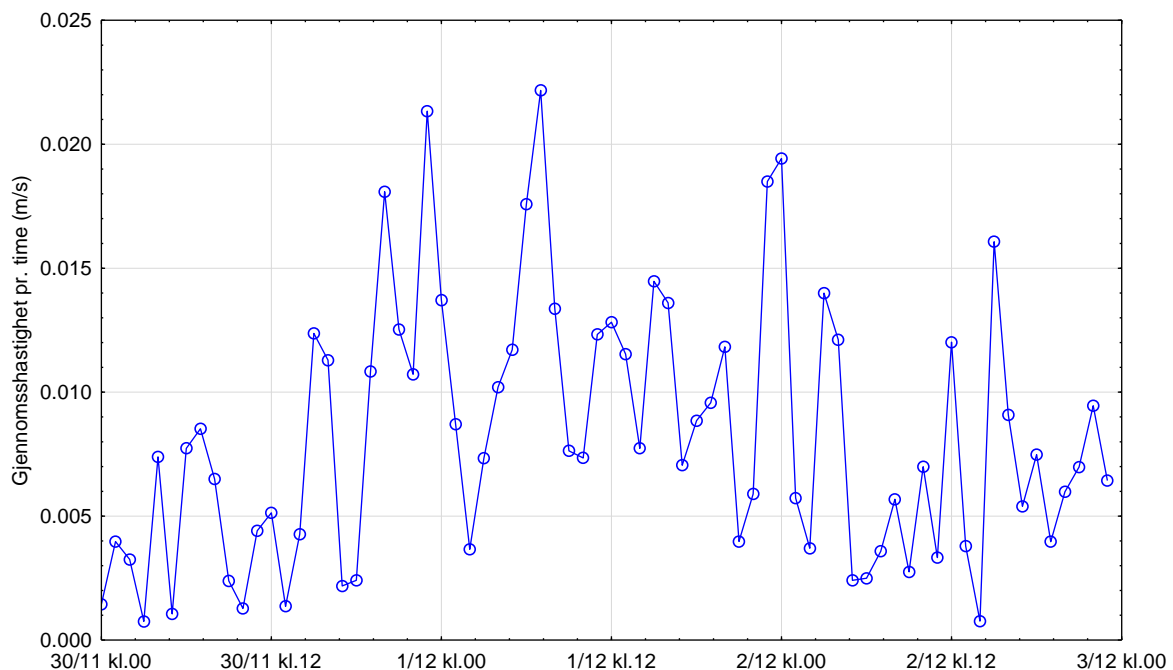
Ferskvannstilrenningen fra Akerselva og Alnaelva vil gi netto strøm av brakkvann ut av området (typisk i de øvre 2-5 m), med motsatt rettede kompenserende strømmer under brakkvannslaget som erstatter det vannet som blander seg opp i brakkvannet. Dette kan også gi sekundær sirkulasjon på enda større dyp. Vinddrevne horisontale bevegelser i overflatelaget som gir endringer i tykkelsen av overflatelaget vil sette opp kompenserende strømmer under sprangsjiktet, og tidevannet kan sette opp interne bølger i sprangsjiktet som også gir strømmer på undersiden. Pendlende strømmer pga. f.eks. tidevann kan ha en restkomponent i én retning, som kan gi en effektiv fornyelse av vannmassene under sprangsjiktet i området.

Figur 5 viser resultat av strømmålingene i Bjørvika i 2001. Det er beregnet vektorielt gjennomsnitt pr time, og figuren viser strømstyrken for dette gjennomsnittet uansett retning. Dette er det mest relevante målet på effektiv transport forbi området med kjølecoiler hvis det har en utstrekning på ca. 20 m. Resultatet viser at strømmen ofte er 1 cm/s eller mindre, noen ganger helt ned mot 0, og det forekommer hyppig timemidler på 0,1 til 0,2 cm/s.



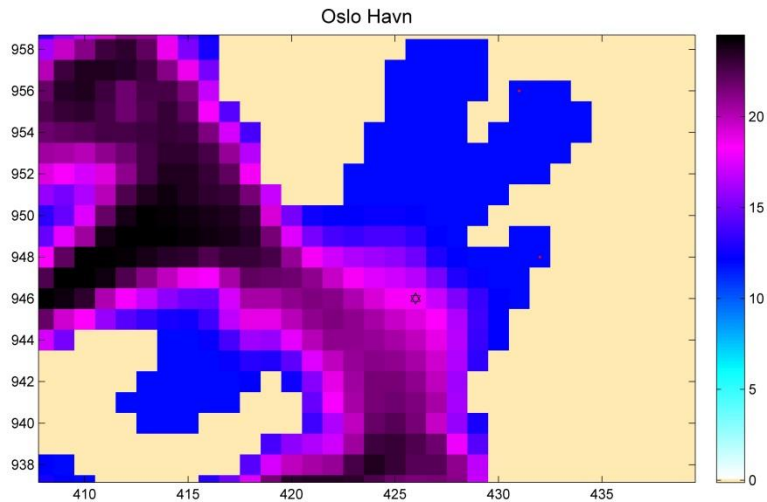
Figur 5. Strømstyrke (cm/s) på 4.5 meters dyp i Bjørvika juli/august 2001, her vist som vektorielt gjennomsnitt pr. time (data beskrevet i Christie et al. 2006)

Figur 6 viser tilsvarende resultater fra strømmålinger på 71 m dyp i Bekkelagsbassenget i 2005 for den delen av måleserien fra 71 m dyp i Malmøykalven for den perioden da strømmene var lavest (for detaljer om målingene se Schanning et al. 2006). De viste strømstyrkene indikerer netto bevegelse i hovedretningen for hver time, når fluktasjoner fram og tilbake i løpet av en time blir tatt hensyn til. Timeverdiene varierer sterkt både på kort og lang sikt, med 0.1 m/s som minimum, og et gjennomsnitt på 0.8 m/s. Også på dette dypet er det en tydelig variasjon med tidevannsperioden på 12.5 timer.



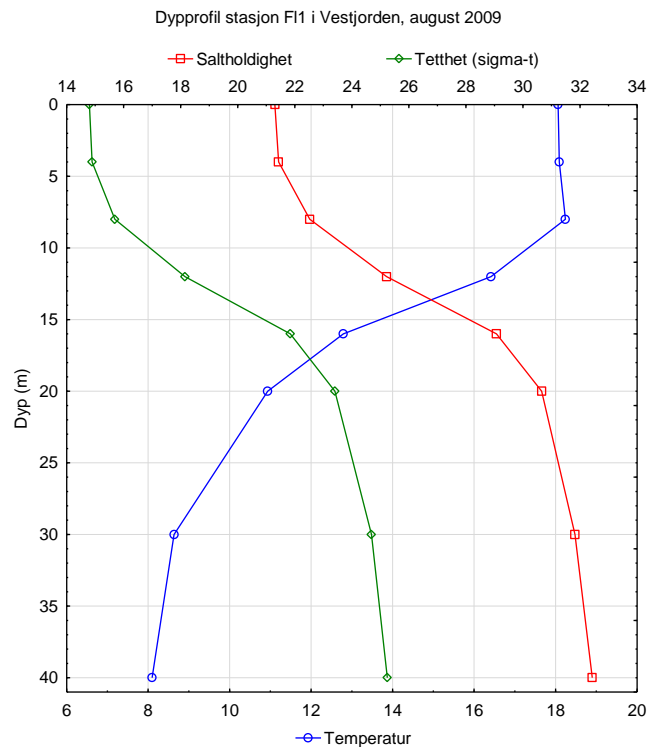
Figur 6. Strømstyrke (m/s) på 71 m dyp i Bekkelagsbassenget vist som vektorielt timegjennomsnitt for strøm (basert på målinger beskrevet i Schaaning et al. 2006).

For å få et grunnlag for å skalere størrelsen på strømmen forbi kjølecoilene er det også sett på resultater fra en numerisk 3-dimensjonal modell (ROMS) som er satt opp for indre Oslofjord og brukes i forskningsprosjektet Fjordmix (NIVA og met.no). Fra denne modellen er det hentet ut en kort serie med beregnet strøm forbi det aktuelle området for kjølecoiler (André Staalstrøm, pers. medd.). Posisjonen er vist med en stjerne i Figur 7.



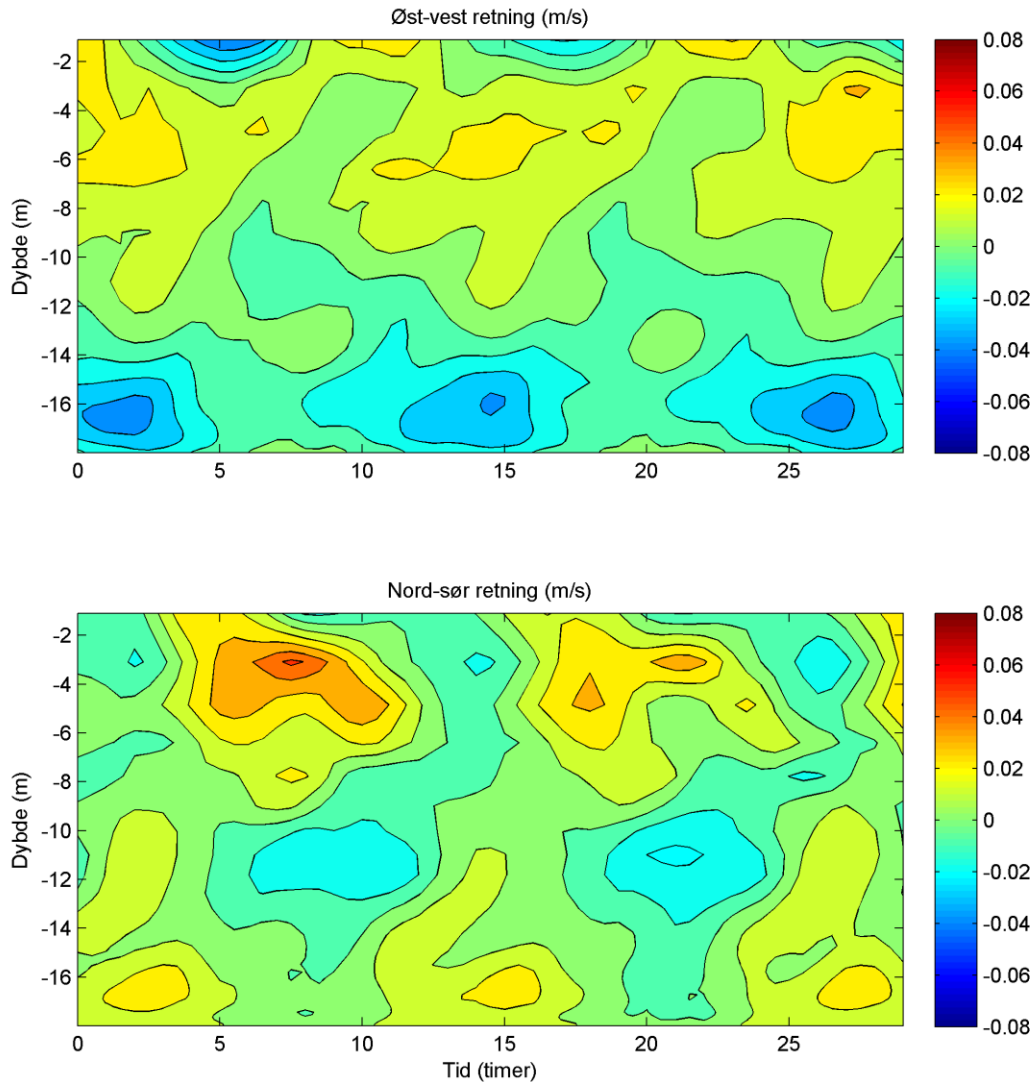
Figur 7. Kart som viser modellrepresentasjonen av Oslo havn for de modellkjøringene som er brukt. Den posisjonen det er hentet ut strøm for er markert med stjerne. Fargeskalaen viser dypet, som er ca. 18 m for den benyttede modellruten.

Serien dekker bare et tidsrom på 29 timer, men det er tilstrekkelig til å vise tidevannspulsingen i strømmen i området. Simuleringen er gjort med konstant ferskvannstilførsel $4.7 \text{ m}^3/\text{s}$ fra Akerselva og $1.37 \text{ m}^3/\text{s}$ fra Alnaelva og med en lagdeling som i en observert profil fra Vestfjorden, vist i Figur 8 (stasjon F11, august 2009, André Staalstrøm, pers. medd.). Tidevannsamplituden var satt til 21.5 cm, som er en del større enn gjennomsnittet over månefasene.



Figur 8. Tetthetsprofil brukt i modellsimulering av strøm

Det mest interessante trekket i disse resultatene er en pulserende bunnstrøm mot nordvest, med hastigheter som varierer mellom 0 og 4 cm/s (Figur 9). Bunnstrømmen har en tykkelse på ca. 3 m. Midt i renna på 20 m lenger sør viser modellen en enda sterkere bunnstrøm strøm i samme retning (ikke vist her), omtrent like tykk, og altså dypere, og strømmen i det planlagte coilområdet er da i periferien av denne strømmen. Tetthetsprofilen viser et ca. 10 m sprangsjikt sentrert rundt 12-13 m dyp, og bunnstrømmen er da i nedre del av dette sprangsjiktet. En slik strøm vil gi ganske effektiv utveksling av bunnlaget i dette området, med gjennomsnittlig strøm opp mot 2 cm/s. Selv i de dyp hvor modellstrømmen er sterkere mot nordvest vil det være perioder på 3-5 timer hvor strømmen er mindre enn 5 mm/s, og 1-2 timer hvor den er meget lav, ca. 1 mm/s.

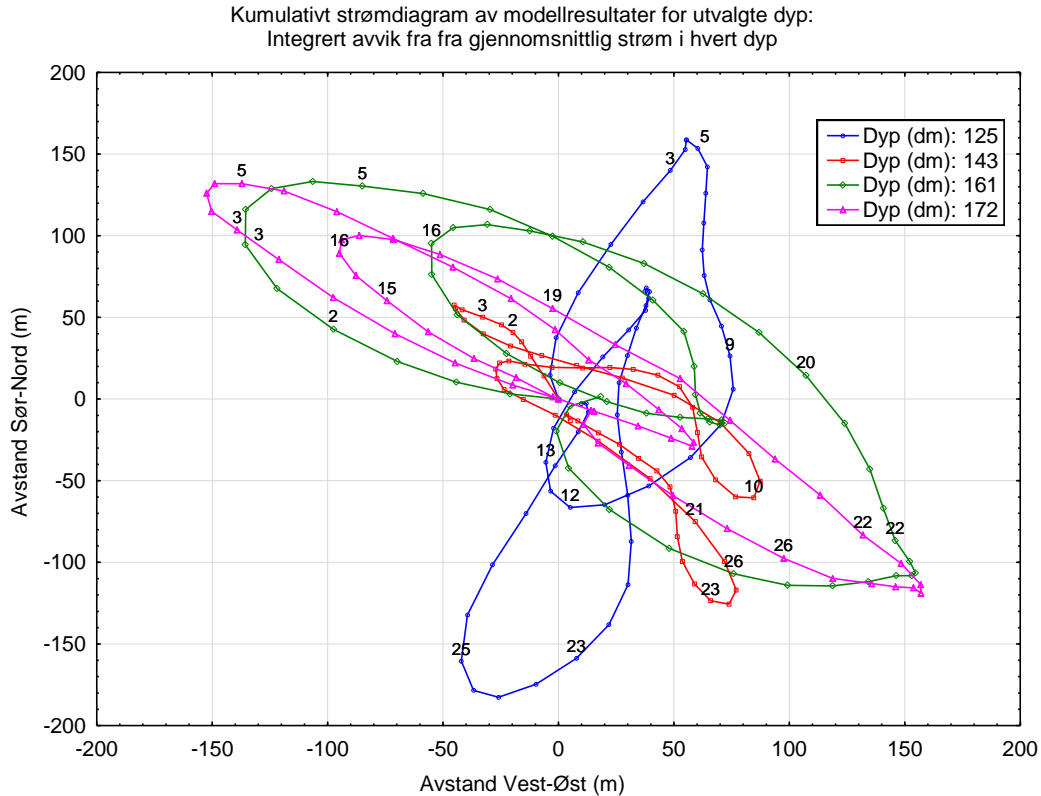


Figur 9. Modellberegninger av strøm over 29 timer i det punktet som er vist i Figur 7. Den øverste del viser strøm mot øst, og den nedre del strøm mot vest. Mellom 14 og 18 m dyp beregner modellen en strøm mot nordvest; det vises av at østlig og nordlig komponent er negativt korrelert.

Imidlertid er dette bare et kort beregnet strømførsløp for en bestemt situasjon mht. tetthetssjiktning og ferskvannstilførsel. Det er et modellresultat som ikke er verifisert ved sammenligning med målinger, og det er ikke utelukket at strømmene er noe preget av startbetingelsene for simuleringen. De må derfor bare ses som et eksempel på hvordan strømmen kan være, uten at vi kan si noe om hvor vanlig et slikt strømbilde er. For å få vite mer om strømførholdene i området, må det eventuelt gjøres strømmålinger.

Selv om den beregnede gjennomsnittsstrømmen i de forskjellige dypene er situasjonsbestemt og ikke kan legges til grunn for en generell vurdering av forholdene, kan den beregnede variasjonen rundt gjennomsnittet være omtrent riktig beskrevet. Denne variasjonen er i hovedsak knyttet til tidevannet, som alltid er til stede, selv om styrken varierer gjennom månefasene. Figur 10 viser integralet over tid av redusert strøm, beregnet ved å trekke fra gjennomsnittsstrømmen i hvert dyp. Kurvene viser hvordan vannet i hvert dyp ville bevege seg i forhold til en rettlinjert jevn bevegelse fra startpunkt til

sluttspunkt hvis strømmen varierte på samme måte i alle posisjoner. Noen punkter er merket med tiden i timer. Det er altså ikke en reell strømbane, men er likevel egnet til å vise hvordan vannet pendler med tidevannet. Hvis vi tenker oss en situasjon uten reststrøm, men bare tidevannspendling, vil vannet antagelig bevege seg rundt med avstander av samme størrelse som de som er vist på figuren.



Figur 10. Kumulativt strømdiagram for redusert strøm ved det aktuelle kjølecoil-området beregnet av ROMS-modellen (ref. André Staalstrøm pers. medd.). Kurvene viser variasjon i strøm rundt gjennomsnittet i hvert dyp, slik at hver kurve begynner og ender i punktet (0,0). Utslagene indikerer hvor mye vannet pendler med tidevannet, men er ikke reelle strømbaner. Tidsforløpet er markert ved å sette inn tiden i timer for et utvalg av punktene.

Strømmen er selvfølgelig bare beregnet, men strømstyrken ligger godt innenfor det som er målt i Bjørvika på 4 m dyp og på 70 m dyp i Malmøykalven Midlere strømhastighet i modellresultatene for 10-18 m dyp varierer fra 0.7 til 1.2 cm/s, og det er omtrent det samme som er målt i disse tilfellene.

Figuren tyder på at vannet vil bevege seg fram og tilbake over avstander på 100 til 300 m i løpet av en tidevannsperiode på ca. 12.5 timer hvis det er lite eller ingen reststrøm. Hvis kjølecoilene står plassert i et område på 20 x 20 m, vil ikke det vannet som passerer coilene i én tidevannsfase komme nøyaktig tilbake ved etterfølgende motgående fase, og utslagene i Figur 10 kan derfor ses som et rimelig mål på hvor stort område det påvirkede vannet vil spre seg over pr. tidevannsfase. Som et realistisk anslag kan vi anta at avgitt varme i løpet av et halvt døgn vil være fordelt over et område på 100 x 200 m bare på grunn av naturlig tidevannsdrevet strøm, altså over 20 000 m².

5. Skalering av temperatureffekt lokalt ved kjølecoilene i homogene, stillestående vannmasser

Hvis det ikke er noe naturlig strøm i fjorden, vil den lokale temperaturøkningen i kjølecoilområdet bare begrenses av den sirkulasjonen som settes opp av den oppdriften selve oppvarmingen skaper. Vannet trekkes inn i coilene fra siden, og stiger opp pga. den oppdriften som skapes av oppvarmingen. Jo større oppdriften er, jo større vil gjennomstrømningen bli, og siden temperaturøkningen er omvendt proporsjonal med vanngjennomstrømningen, vil det være et balansepunkt hvor det er likevekt mellom oppvarming og gjennomstrømning. Balansen er påvirket av energitap pga. hvirvler og turbulens når vannet passerer forbi slangene som bremses.

En grov skalering av gjennomstrømningen kan gjøres ved å estimere de kreftene som virker på vannet. Det må understrekes at det bare er en meget forenklet betraktning som ikke tar hensyn til den faktiske geometrien og noe reelt strømmønster, men bare er en grov tilnærming ut fra omtrent de dimensjoner som de ulike kreftene kan ventes å virke over.

Hvis vannet får en midlere temperaturøkning ΔT vil oppdriften, som kraft pr. volum, være:

$$f_B = -\frac{\partial \rho}{\partial T} \Delta T \cdot g \quad (\text{kgm/s}^2/\text{m}^3)$$

Her er g = gravitasjonskonstanten 9.81 m/s^2 . Vann med saltholdighet 30 har $-\partial \rho / \partial T = 0.16 \text{ kg/m}^3/\text{°C}$ ved temperatur 10 °C , og det øker med temperatur til $0.20 \text{ kg/m}^3/\text{°C}$ når temperaturen øker til 14 °C . I beregningene brukes $0.18 \text{ kg/m}^3/\text{°C}$. Både varmeavgivelse og volumfluks må ventes å øke oppover gjennom coilen, så det er ikke opplagt hvordan ΔT vil variere med høyden.

Hvis det ikke er noe energitap, og vannet i gjennomsnitt akselereres av denne kraften over en virkningslengde (høyde) H_b , blir hastigheten U gitt av ligningen

$$\frac{1}{2} \rho \cdot U^2 = f_B \cdot H_b$$

Hvis vannet strømmer gjennom et areal A med denne hastigheten, blir volumfluks $Q = A \cdot U$, og det tilsvarer en temperaturøkning på omtrent $\Delta T = W / (c \cdot \rho \cdot Q)$ hvor c er varmekapasiteten for sjøvann, ca. . Ved å kombinere disse ligningene får vi

$$\Delta T = \frac{W}{c \cdot \rho \cdot Q} = \frac{W}{c \cdot \rho \cdot A \sqrt{-\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} 2 \Delta T \cdot g H_b}}$$

som kan skrives:

$$\Delta T = \left(\frac{W}{c \cdot A} \right)^{\frac{2}{3}} \left(-2 \rho \frac{\partial \rho}{\partial T} \cdot g H_b \right)^{-\frac{1}{3}}$$

Strømhastigheten kan da beregnes som $U = W / (A \cdot c \cdot \rho \cdot \Delta T)$.

For en enkelt coil med $W = 100 \text{ kJ/s}$, og $A = 2.36 \text{ m}^2$ som fritt horisontalt strømtverrsnitt (50 % av totalt areal med 2,45 m diameter) og $H = 1 \text{ m}$ som typisk akselerasjonslengde (halve høyden av coilen, og ca. halve radius), får vi:

$$\Delta T = \left(\frac{100000}{4015 \cdot 2.36} \right)^{\frac{2}{3}} (2 \cdot 1023 \cdot 0.18 \cdot 9.81 \cdot 1)^{-\frac{1}{3}} = 0.31 \text{ °C}$$

$$U = \frac{100000}{(2,36 \cdot 4015 \cdot 1023 \cdot 0,31)} = 0,033 \text{ m/s}$$

Denne beregningen kan anslå en nedre grense for temperaturøkningen dersom det ikke er noe naturlig strøm forbi coilene, som gjelder dersom strømningsmotstand ved friksjon kan neglisjeres. Det kan være at det likevel er beregnet for lavt, fordi det undertrykket som skapes lokalt i coilen pga. oppvarming delvis motvirkes av et overtrykk som må dannes lenger opp i vannsøylen for å spre vannet ut til sidene, slik at det ikke blir så stor oppstrømning som beregnet her. Men selv om effektiv akselerasjonshøyde H reduseres til halvparten, altså til 0.5 m, vil temperaturøkningen bare øke med en faktor $2^{1/3}=1,26$, dvs. 0.39 °C.

Imidlertid er det ikke realistisk å neglisjere strømningsmotstanden forbi slangene inne i coilen. For å få et begrep om hva det har å si, kan vi ta utgangspunkt i en strøm med hastighet U forbi en sylinder med sirkelformet tverrsnitt og diameter D på tvers av strømrørningen. Hvis strømmen går parallelt og med samme hastighet i et stort strømtverrsnitt i forhold til sylinderdiameteren, gir sylinderen en motstand (*drag*) mot strømrørningen. Drag-kraften F_D pr. løpemeter av sylinderen (med enhet kgm/s/m) kan beregnes som funksjon av strømhastigheten ved ligningen:

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 D$$

C_D er en dimensjonsløs 'drag'-koeffisient som er en funksjon av Reynolds tall $Re = U \cdot D/\nu$ hvor ν er kinematisk viskositet $1,351 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ved temperatur ca. 10 og salinitet 30 (Sharqawy et al. 2010).

Friksjonsmotstanden gjelder for én enkelt sylinder på tvers i en bred strøm, og det er ikke opplagt hvordan det kan anvendes hvis det er flere slanger som ligger ganske tett sammen, som i kjølecoilene. For å skalere virkningen grovt antar vi at virkningen er additiv. Hvis slangekveilene gir strømmotstand som tverrstilte sylindere med diameter 12 mm, og ligger med senteravstand $L = 25 \text{ mm}$ både på tvers av og i strømrørningen, slik at antallet slanger på tvers av strømrørningen er $n = 1/L$ pr lengde-enhet på tvers av rørens lengderetning, både på tvers og på langs av strømrørningen. Da vil motstanden som kraft pr volum være

$$f_D = \frac{F_D}{L^2} = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 D \frac{1}{L^2} \quad (\text{kgm/s}^2/\text{m}^3)$$

Hvis vi nå antar at all energitilførsel pga. oppdriften går med til å overvinne friksjonen eller energidissipasjonen ved passering av slangene, får vi:

$$-\frac{\partial \rho}{\partial T} \Delta T \cdot g \cdot H_b \equiv -\frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{W}{(c \cdot \rho \cdot A \cdot U)} \cdot g \cdot H_b = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho U^2 D \frac{1}{L^2} \cdot H_f$$

Her er H_f virkningslengden for friksjon, som kan være noe større enn høyden H_b , fordi også den horisontale dimensjonen inngår til en viss grad; hvor mye avhenger av detaljene i strømmønsteret.

For å prøve å sikre mot å underestimere energitapet brukes hastigheten i de innsnevrede tverrsnittene forbi slangene til å beregne tapet, dvs. vi bruker ca. halve total-arealet på samme måte som ovenfor. Ved å omorganisere ligningen får vi

$$U = \left(-\frac{\partial \rho}{\partial T} \frac{W}{(c \cdot \rho \cdot A)} \frac{H_b}{H_f} \cdot g \frac{2L^2}{C_D \cdot \rho \cdot D} \right)^{1/3}$$

Hvis vi antar at $H_f = 2 H_b$, og ellers bruker tallverdiene ovenfor, blir resultatet

$$U = \left(0,18 \frac{100000}{(4015 \cdot 1023 \cdot 2,36)} \cdot 9,81 \frac{0,025^2}{C_D \cdot 1023 \cdot 0,012} \right)^{1/3}$$

Siden C_D er en funksjon av Re , og derved av U , må det itereres til en riktig løsning, ved å beregne U , finne ny Re og justere C_D , inntil størrelsene stemmer innbyrdes. I dette tilfelle er en brukbar løsning $U = 0,008$ m/s, som gir $Re \approx 70$ og $C_D \approx 2,0$ (se Vedlegg). Det er i overgangsområdet mellom laminær og turbulent strøm, med dannelse av større hvirvler på baksiden av de tverrstilte rørene.

Denne hastigheten, anvendt på et tverrsnittsareal $2,36 \text{ m}^2$ gir en temperaturøkning

$$\Delta T = W / (c \cdot \rho \cdot A \cdot U) = 1,3 \text{ }^\circ\text{C}$$

Antagelig er dette et mer realistisk anslag for lokal temperaturøkning dersom det ikke er strøm i resipienten.

Beregningene over gjelder for en enkelt coil ved liten sjiktning. For 20 coiler som f.eks. er arrangert i 5 rader á 4 coiler vil det bli en noe mer begrenset gjennomstrømning med tilsvarende høyere temperaturøkning, fordi tilgangen på nytt vann fra sidene er begrenset. Imidlertid vil 14 av de 20 coilene stå ut mot de frie vannmassene, mens bare 6 coiler er helt omkranset av andre coiler, så effekten av det vil neppe være særlig stor. En øvre grense på $2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ for lokal temperaturøkning burde ligge på den sikre siden.

Beregningene gjelder primært for en situasjon med lite sjiktning, slik at vannet strømmer opp gjennom hele coilens høyde. Hvis det er sterk sjiktning, kan det i stedet bli flere horisontale separate strømmer inn i ulike høyder. Det blir en mer komplisert situasjon som det ikke er så lett å gjøre en grovskalering av. Lagdelingen kan redusere vertikal akselerasjon av vann pga. oppvarming og oppdrift, men samtidig vil lagdelingen gjøre at også den energien som brukes til vertikal homogenisering av vann inne mellom slangene i coilen gi overtrykk og gravitasjonsdrevet horisontal strøm ut til omkringliggende vannmasser. Det mest realistiske for å kartlegge strømmønster kan være å gjøre målinger.

6. Skalering av mulig temperaturpåvirkning og økt oppblanding av temperaturpåvirket vann mot overflatelaget ut fra strømhastighet

Som drøftet ovenfor i kapittel 3 er det grunn til å anta at temperaturpåvirkningen er fordelt på alle dyp i det laget kjølecoilene står. Total kjøleeffekt er angitt til $W=1.8$ MW, dvs. 1800 kJ/s. Dette kan antas å være fordelt over et areal på 20 x 20 m, og i et lag som er 2 m tykt, altså over et volum $V=800$ m³. For sjøvannet kan varmekapasiteten settes til $c=4015$ J/kg/°C, og egenvekten $\rho=1023$ kg/m³. Det kan tenkes at flere kjølecoiler sammen gir større virkningen enn en enkelt coil alene (kapittel 5), hvis det samme vannet delvis passerer gjennom flere coiler. Derfor gjøres her en skalering av den totale effekten i området.

Hvis vannet står stille og samler opp varme, gir det en økning av temperatur (T) pr. tidsenhet (t) i dette volumet på

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{W}{c \cdot \rho \cdot V} = \frac{1.8 \cdot 10^6}{4015 \cdot 1023 \cdot 800} = 0.00055 \text{ [}^\circ\text{C /s]}$$

Det tilsvarer ca. 2 °C /time. For relativt lave strømhastigheter i intervallet 2-5 mm/s blir oppholdstiden ca. 1-2.5 timer, slik at det kan være realistisk å regne med en temperaturøkning opp mot på 2-5 °C lokalt i coilområdet hvis vannet er så sterkt sjiktet at det blir liten vertikal blanding selv etter oppvarming, men slik at det står stille og samler opp avgitt varme fra enkeltcoilene. Hvis den lokale temperaturpåvirkningen blir særlig mye større enn det, vil kjøleeffekten bli vesentlig begrenset. For en sannsynlig gjennomsnittlig strømhastighet på ca. 10 mm/s vil den lokale temperatureffekten bli innenfor 1 °C.

Hvis vi ser på en tidevannsperiode på 12,5 timer, med vekslende strøm forbi coilområdet innenfor en avstand på 100-200 m, og regner med at varmen som avgis i løpet av et slikt tidsrom blir spredt over et areal på 20 000 m², og fortsatt over en lagtykkelse 2 m, vil temperaturøkningen i dette området kunne bli 0.5 °C.

Dette gjelder hvis det oppvarmede vannet holder seg i et 2 m tykt sjikt ved bunnen og bare spres ved naturlige strømmen. Vertikal blanding vil etter hvert bidra til å fordele temperaturøkningen over en større tykkelse, og temperaturendringen blir da lavere.

Lokalt i coilområdet kan det også bli en økt vertikal blanding med vannet ovenfor pga. at oppvarmingen gjør vannsøylen ustabil. Hvis sjiktningen er svak, kan temperaturøkningen gjøre at det oppvarmede vannet fra bunnelaget blir lettere enn vannet over, og da kan det skje en rask vertikal blanding, med homogenisering av vannet opp til et visst dyp ovenfor coilområdet. Jo større den lokale varmepåvirkningen er, jo mer omfattende blir den vertikale homogeniseringen. Det vil bety at temperatureffekten blir vesentlig mindre enn det som beregnes teoretisk for et 2 m tykt sjikt, fordi den fordeles raskere over et større volum. Det vil i sin tur gjøre at den også spres seg mer effektivt med horisontale strømmen i ulike retninger i forskjellige dyp.

Det oppvarmede vannet kan også bli spredt horisontalt mer enn det som tilsvarer naturlig strøm i resipienten. Det vil særlig gjøre seg gjeldende hvis det er stillestående vann, altså liten eller ingen naturlig strøm, og den naturlige tetthetssjiktningen har en viss størrelse. Hvis vannet som stiger opp gjennom coilen blir oppvarmet og samtidig blandes internt, slik at en får en sky av oppvarmet vann rundt coilen med god intern blanding, vil det hydrostatiske trykket inne i skyen bli litt større enn ute i den naturlige tetthetsprofilen, og skyen vil da spres ut til sidene ved en gravitasjonsdrevet egenspredning, uavhengig av de naturlige strømmene.

Hvor høyt opp en kan få vertikal homogenisering lokalt i coilområdet kan beregnes for konkrete hydrografiske profiler, gitt som tabeller med måleverdier for dyp, temperatur og saltholdighet. Det gjøres på følgende måte:

- ❖ Først beregnes gjennomsnittlig tetthet for et 2 m tykt lag ved det aktuelle dypet for coilene, etter homogenisering, og med en temperaturøkning som beregnet ovenfor ut fra en rimelig lokal oppholdstid.
- ❖ Deretter sammenlignes tettheten av dette laget med den naturlige tettheten i nærmeste overliggende punkt.
 - Hvis tettheten i det overliggende dypet er større enn i det homogene laget under, blir vannet fra toppen av laget og opp til målepunktet inkludert i det homogene laget, og det beregnes ny gjennomsnittlig temperatur, saltholdighet og tetthet. Så gjentas prosedyren med neste målepunkt.
 - Hvis det homogene laget har større tetthet enn målepunktet ovenfor avsluttes beregningen.

Hensikten med denne beregningen er først og fremst å se på faren for opptrengning av oppvarmet vann til overflatelaget, hvor en kan risikere økt primærproduksjon ved tilførsel av næringsrikt vann nedenfra. Det viktigste resultatet er derfor hvor langt opp det homogeniserte laget kan strekke seg.

I denne beregningen brukes et redusert datasett, for å få en mer reell statistikk uten skjevheter pga. ulikt stasjonsutvalg ved ulike tidspunkter (flere stasjoner samme dato må betraktes som replikate målinger av samme situasjon). For månedene januar, juni, juli og august brukes bare data fra Aq2. For de andre månedene brukes data fra Cq1. På den måten får vi bare én profil fra hver dato.

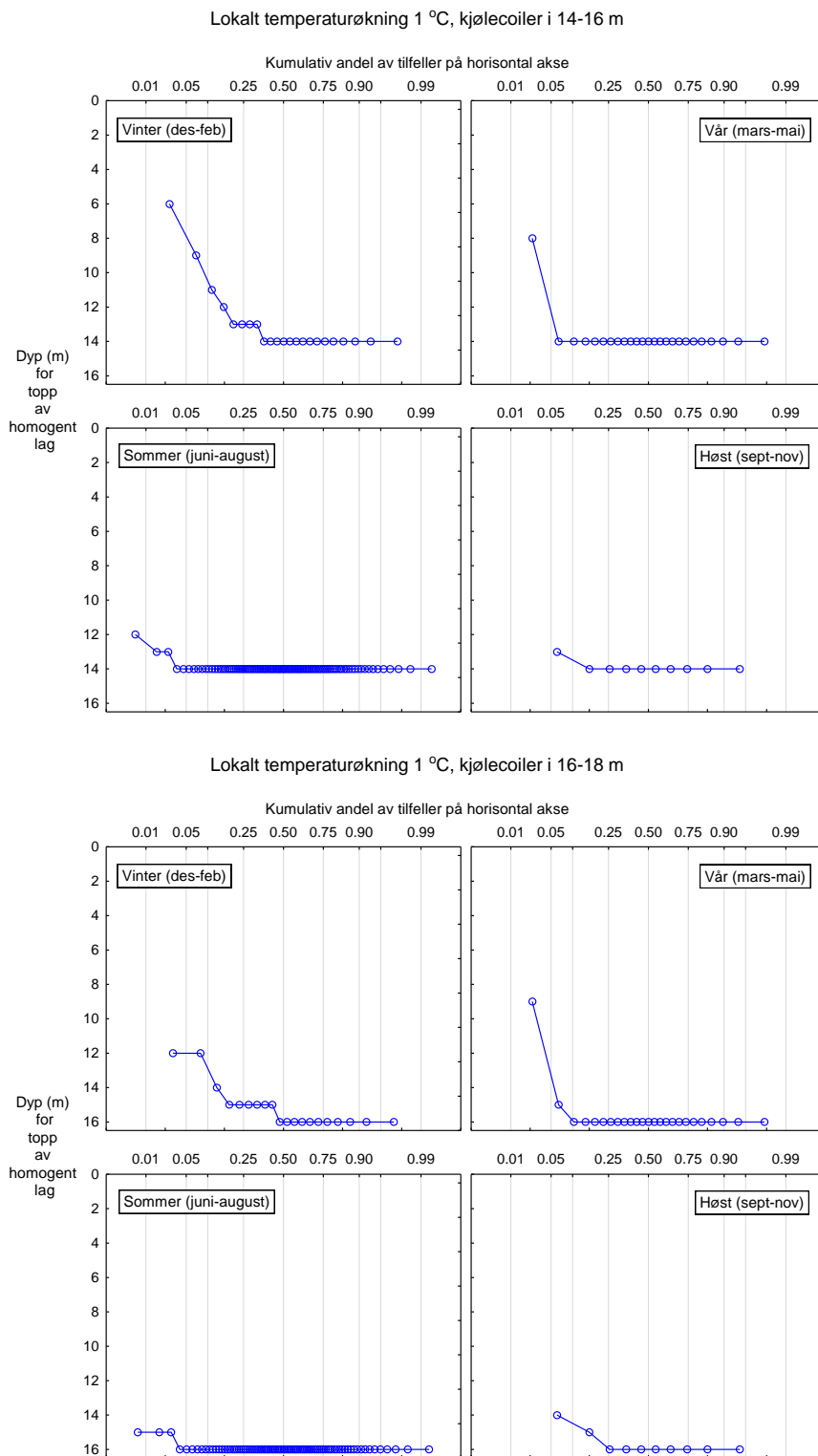
Figur 11 til Figur 13 viser frekvensfordeling for beregnet mulig opptrengningsdyp, for ulike antagelser om plasseringsdyp og lokal temperaturpåvirkning. De tre figurene viser resultatet for en lokal temperaturøkning over hele coilområdet på hhv. 1, 2 og 5 °C. Øverste halvdel del av hver figur viser resultatet hvis kjølecoilene plasseres på bunn dyp 16 m, altså i laget fra 14 til 16 m dyp, og nederste del resultatet for plassering på 18 m bunn. For hver kombinasjon av temperaturøkning og plasseringsdyp er resultatene vist i fire enkeltgrafer med oppdeling etter årstid. Langs topp-aksen i hver graf angis kumulativ andel av tilfeller med mulig opptrengning til eller forbi angitt dyp. For oppvarming med 1 °C og plassering i laget 14-16 m er det f.eks. 3 profiler som gir beregnet mulig opptrengning høyere enn 14 m om sommeren; det tilsvarer mindre enn 5 % av profilene. For oppvarming med 5 °C beregnes mulig opptrengning til 13 m eller høyere opp i ca. 50 % av tilfellene, men bare 10 % kan gå til 12 m eller høyere.

Figurene hvor stor andel av tetthetsprofilene som er slik at en kan få opptrengning, men også i disse situasjonene vil det være slik at temperaturpåvirkningen blir innenfor 1 °C i det meste av tidevannssyklusen, slik at den andelen av *tiden* en kan ha opptrengning er mye mindre enn det som vises i Figur 12 og til Figur 13 viser.

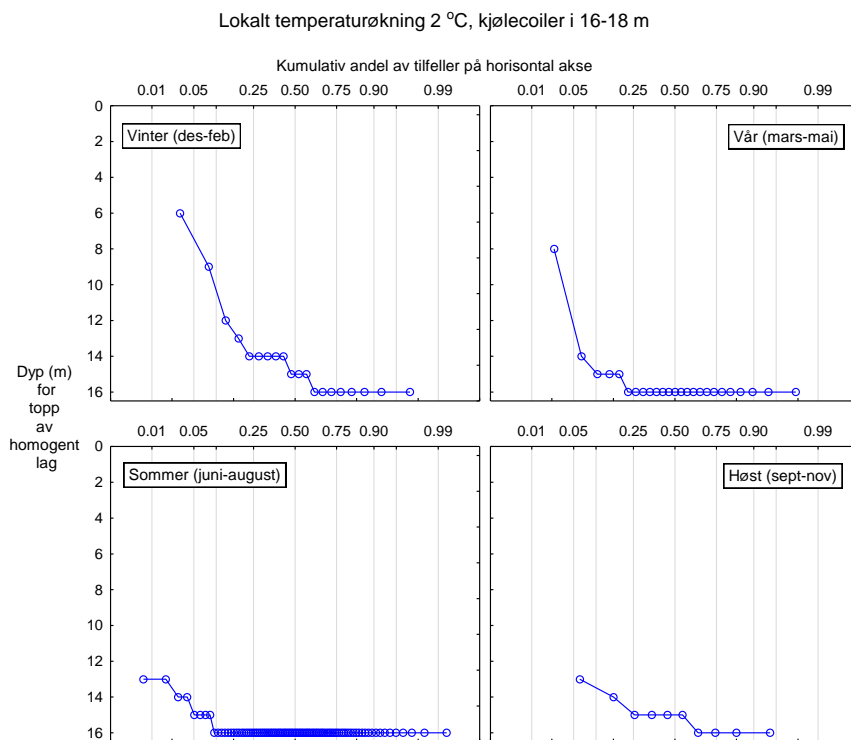
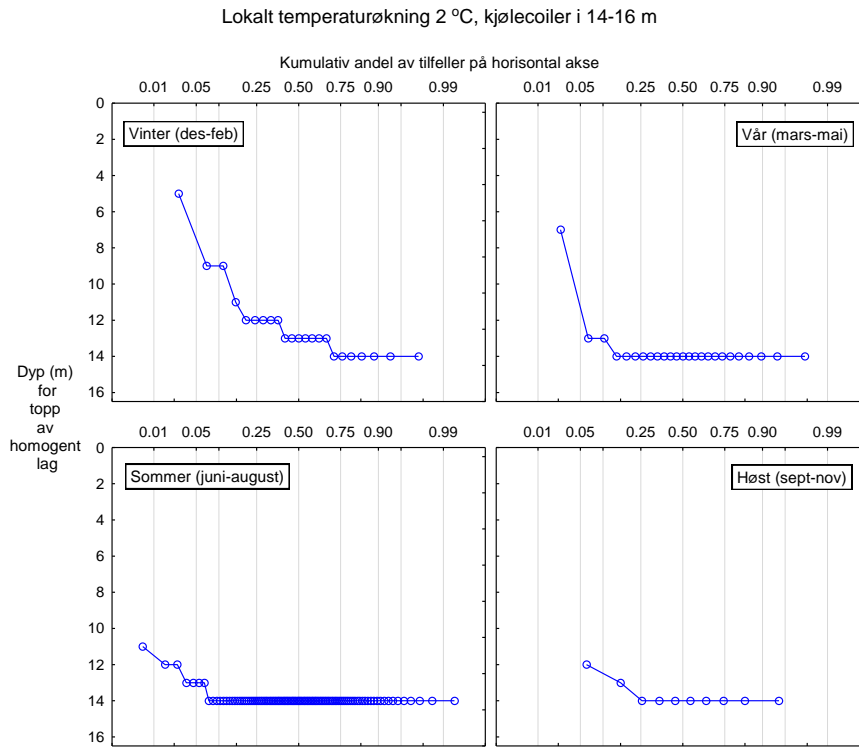
Størst risiko for å få vann høyt opp ved gitt varmeutvikling ser vi om vinteren, da sjiktningen ofte er lavest. Da vil imidlertid kjølebehovet være mindre enn det som er lagt til grunn her, og temperaturøkningen og opptrengning av temperaturpåvirket vann tilsvarende mindre. Hvis vi antar at den lokale temperaturpåvirkningen ligger innenfor 2 °C om vinteren, er det bare Figur 11 og Figur 12 som er aktuelle for vinterperioden, og det vil si at opptrengning til 10 m dyp eller høyere opp bare vil kunne opptre i ca. 5-10 % av sjiktningssituasjonene, og da bare som korte pulser i en mindre del av tiden.

Resten av året vil opptrengning høyere enn til 12 m dyp kunne forekomme i svært få tilfeller. For det meste vil det oppvarmede vannet holdes effektivt nede av stabil tetthetssjiktning og bli liggende innenfor den nærmeste meteren ovenfor toppen av kjølecoilene. Om sommeren gjelder dette mer enn 90 % av tilfellene. Oppvarmingen kan likevel bety noe økt vertikalblanding over tid fordi

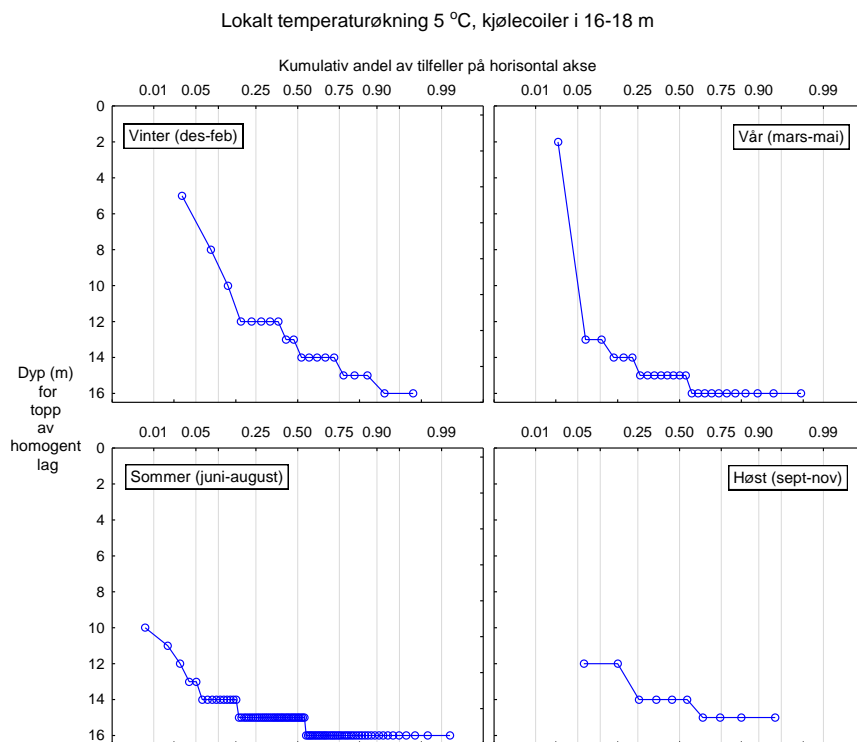
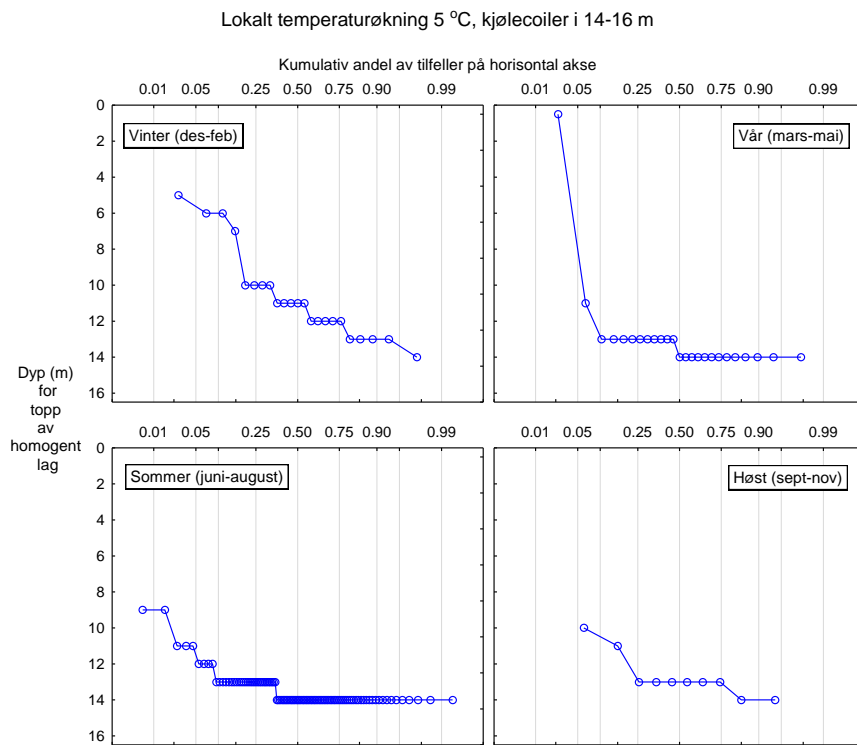
tetthetsgradienten blir mindre, men dette skjer gradvis og parallelt med at vannet spres utover i resten av fjorden, slik at temperaturpåvirkningen samtidig blir mer og mer uvesentlig.



Figur 11. Frekvensfordeling av øvre grense for homogenisert velblandet lag pga. ustabilitet fra lokal temperaturøkning med 1 °C. Øverst for plassering av kjølecoil på bunndyp 16 m dyp, nederst for plassering på 18 m.



Figur 12. Frekvensfordeling av øvre grense for homogenisert velblandet lag pga. ustabilitet fra lokal temperaturøkning med 2 °C. Øverst for plassering av kjølecoil på bunndyp 16 m dyp, nederst for plassering på 18 m..



Figur 13. Frekvensfordeling av øvre grense for homogenisert velblandet lag pga. ustabilitet fra lokal temperaturøkning med 5 °C. Øverst for plassering av kjølecoil på bunndyp 16 m dyp, nederst for plassering på 18 m..

7. Drøfting av resultatene

7.1 Temperaturpåvirkning

Beregningene som er gjort her tyder på at i tidsrom med rolige strømforhold, bare med tidevannsdrevet strøm, kan den lokale temperaturpåvirkningen i det området på ca. 20 x 20 m hvor kjølecoilene står plassert bli opp til 5 °C i korte perioder i hver tidevannsperiode, i de fasene hvor strømmen er lavest. Under de fleste sjiktningsforhold vil det oppvarmede vannet ikke være lett nok til å trenge direkte opp mot overflatelaget; det vil holde seg ved bunnen og først spres horisontalt, og bare gradvis blandes opp vertikalt samtidig som det spres over større områder.

Gjennomsnittlig over en tidevannsperiode kan det se ut til at strømmen er såpass sterk at den lokale temperaturvirkningen ligger innenfor 1 °C lokalt. Horisontal spredning vil gjøre at sannsynlig temperaturpåvirkning for et område på anslagsvis 100 x 200 m vil ligge innenfor 0.5 °C.

I de få tilfellene da varmepåvirket vann kan trenge opp mot 10-12 m eller høyere, vil temperaturpåvirkningen bli redusert fordi vannet samtidig blandes med overliggende vann, og en vil neppe få større lokale temperaturendringer enn 0.5-1 °C så høyt opp. Ut fra de vurderingene som er gjort i Bjerkeng og Johnsen (2006) vil dette ikke ha noen virkning på f.eks. vandring av fisk mellom Akerselva og fjorden.

7.2 Næringssaltpåvirkning

Opptrenngning av temperaturpåvirket vann oppover i vannmassene vil bidra til å fordele varmpåvirkningen over et større volum og gjøre temperaturendringene mindre merkbare lokalt, men kan i prinsippet være uheldig fordi det bringer næringsrikt vann opp i lag hvor det kan utnyttes til økt algevekst.

Som resultatene ovenfor viser, er risikoen for opptrenngning av næringsrikt vann størst om vinteren, selv om det er lavere kjølebehov om vinteren, men da betyr det ikke så mye, fordi det uansett er nok næringsalter, og produksjonen er lys- og temperaturbegrenset. Ingen situasjoner viser mulig opptrenngning helt til overflaten, og temperatureffekten vil være sterkt redusert pga. fortykning. Ca. 5-10 % av sjiktningssituasjonene gir mulig opptrenngning høyere opp enn 10 m.

Resten av året vil det forekomme bare i meget begrenset del av tiden, og stort sett ikke høyere opp enn til 10-12 meters dyp. Dette kan likevel ha en viss betydning for planteplanktonproduksjonen, og en bør forsøke å minimere det.

Rest-konsentrasjonene av næringsalter i Bjørvika-området om våren og sommeren er lave ned til 4-8 m dyp fordi tilgjengelige næringsalter er utnyttet til algevekst, mens det kan være igjen betydelige mengder ubrukte næringsalterreserver på 12 og 16 m dyp fram til og med mai (Bjerkeng og Johnsen 2006). I august er fosfatkonsentrasjonene lave også på 12 m dyp, og de øker gradvis ned til 20 m dyp, mens nitratkonsentrasjonene fortsatt er ganske høye på 12 m, selv om de er mindre enn i mai.

Oppblanding av vann fra 14-18 m dyp opp i 10-12 m nivå vil derfor kunne føre til noe økt algevekst. Selv om det bare vil skje i relativt sjeldne tilfeller, og antagelig bare i kortvarige pulser innenfor hver tidevannsperiode, kan en situasjon med slike pulser ha en viss varighet, og det bør derfor søkes minimert ved å legge coilene så dypt som mulig, helst på bunndyp 18 m eller mer.

8. Konklusjon og anbefaling

Ut fra en enkel vurdering ser det ut til at plassering av kjølecoiler sør for Sjøengautstikkeren vil ha ganske begrenset miljømessig betydning, både mht. temperaturpåvirkning og næringsalt-transport til overflatelaget. For å minimere påvirkningen bør coilene legges så dypt som mulig, helst på bunndyp 18 m eller mer.

Det er ikke gjort noen nærmere biologisk vurdering av temperatureffektene i dette prosjektet, men en foreløpig oppfatning er at tiltaket ikke anses å gi risiko for betydningsfulle miljømessige effekter. Under dagens forhold er det antagelig nokså lite liv på bunnen i det aktuelle området. Dersom en lykkes med å forbedre forholdene i Oslo havn slik målet er med på gående tiltak, som f.eks. Midgardsormen som er under bygging, og det blir mer dyreliv i vannmasser og på bunn i området, vil antagelig artssammensetning og bestand være påvirket av temperaturfluktuationene i selve coilområdet og det nærmeste området rundt, fordi arter som er avhengig av stabilt lav temperatur ikke vil etablere seg der. Dette vil være begrenset til et lokalt område og vil ikke ha noen vesentlig betydning for Bjørvika og Oslo havn som helhet.

Det anses ikke påkrevet med mer detaljert modellering av strømming rundt kjølecoilene, men et enkelt program med målinger av temperatur de nærmeste omgivelsene til eksisterende anlegg i relativt stillestående vann kan ha verdi for å etterprøve vurderingene i denne rapporten.

9. Referanser

Berge, J.A., Amundsen, R., Bergland, K., Bjerkeng, B., Gitmark, J., Holt, T.F., Hylland, K., Johnsen, T.M., Kroglund, T., Ledang, A.B., Lømsland, E.R., Magnusson, J., Rohrlack, T. og Sørensen, K., 2012. Overvåking av indre Oslofjord i 2011. NIVA-rapport 6371-2012, ISBN-978-82-577-6106-6.

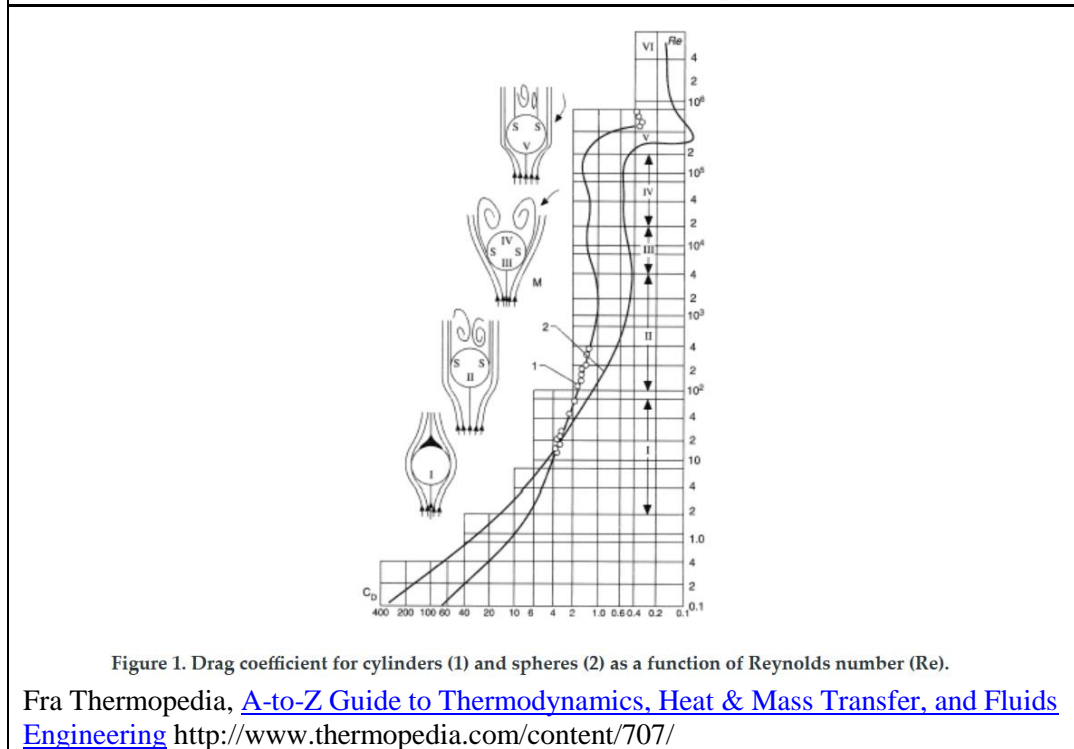
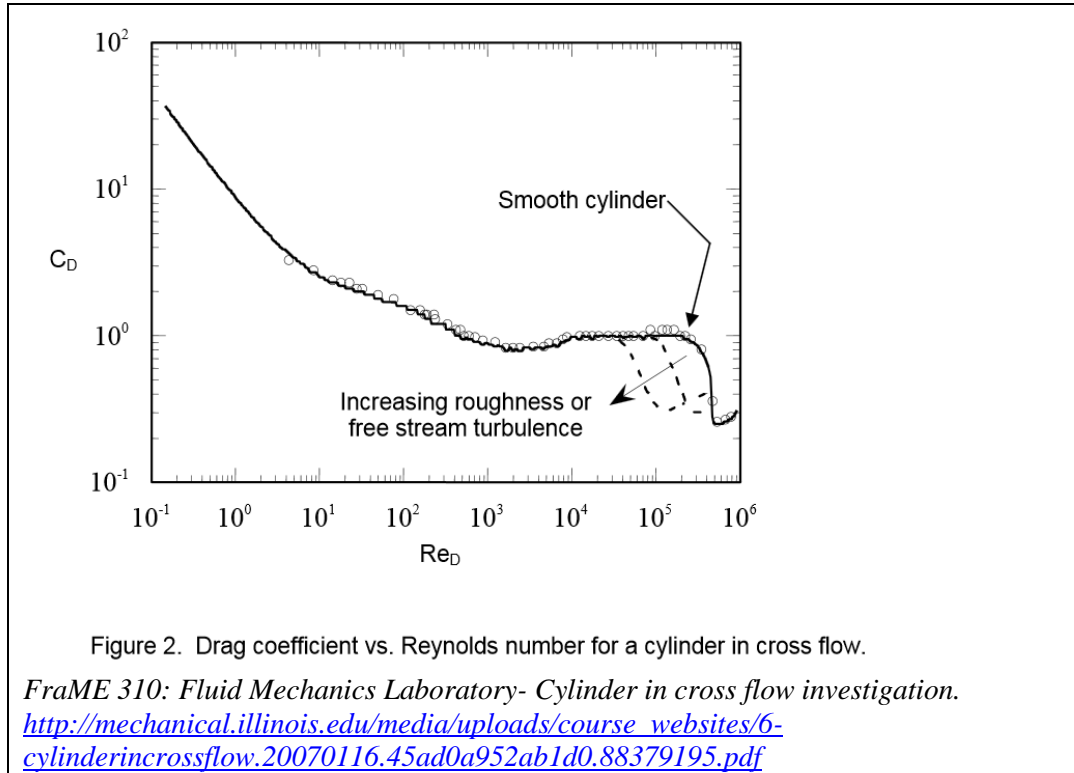
Bjerkeng, B. og Jonsson, B., 2006. Vurdering av tekniske og miljømessige forhold vedr. inntak og utslipp av kjølevann ved Akerselvas nedre del. NIVA-rapport 5284-2006, 29 sider.

Christie, H., Fredriksen, S., Magnusson, J. og Rueness, J., 2006. Marinbiologiske forbedringer i Bjørvika/Bispevika. Vurdering av muligheter. NIVA-rapport 5237-2006, 29 sider.

Schaanning, M., Bjerkeng, B., Helland, A., Høkedal, J., Sørensen, K., 2006. Dypvannsdeponi Malmøykalven, Undersøkelser av partikkel- og miljøgiftspredning under prøvedumping. NIVA-rapport 5221-2006, ISBN 82-577-4942-7. 44 sider + appendiks.

Mostafa H. Sharqawy, John H. Lienhard V and Syed M. Zubair, Thermophysical Properties of Seawater: A Review of Existing Correlations and Data, Desalination and Water Treatment, 2010. http://web.mit.edu/seawater/Seawater_Property_Tables.pdf

Vedlegg. Sammenheng mellom dimensjonsløs friksjonskoeffisient og Reynolds tall for strøm forbi tverrstilt sylinder



NIVA: Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

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



Norsk institutt for vannforskning

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