

Beregning av muligheten for oppvirvling av deponerte sedimenter på dypt vann i Bekkelagsbassenget under en dypvannsfornyelse



Strømmåler settes i sjøen.

Norsk institutt for vannforskning

RAPPORT

Hovedkontor

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

Sørlandsavdelingen

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

Østlandsavdelingen

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

Vestlandsavdelingen

Nordnesboder 5
5005 Bergen
Telefon (47) 55 30 22 50
Telefax (47) 55 30 22 51

Midt-Norge

Postboks 1264 Pirsenteret
7462 Trondheim
Telefon (47) 73 87 10 34 / 44
Telefax (47) 73 87 10 10

Tittel Beregning av muligheten for oppvirvling av deponerte sedimenter på dypt vann i Bekkelagsbassenget under en dypvannsfornyelse.	Løpenr. (for bestilling) 5035-2005	Dato 30.6.2005
	Prosjektnr. Undernr. O-25104	Sider Pris 29
Forfatter(e) Jan Magnusson Birger Bjerkeng Jarle Molvær	Fagområde Oseanografi	Distribusjon Fri
	Geografisk område Oslo	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Oslo Havn KF	Oppdragsreferanse Torild Jørgensen
---	--

Sammendrag Det er gjennomført strømmålinger nær bunn i Bekkelagsbassenget under en større dypvannsfornyelse for å se på muligheten for oppvirvling av sediment ved slike situasjoner. Resultatene viser at det er liten sannsynlighet for oppvirvling av sedimenter i deponiområdet, selv i år med stor dypvannsfornyelse.
--

Fire norske emneord 1. Dypvannsfornyelse 2. Bunnstrøm 3. Sedimenterosjon 4. Bekkelagsbassenget	Fire engelske emneord 1. Deep water exchange 2. Bottom currents 3. Sediment erosion 4. Bekkelagsbassenget
---	--



Jan Magnusson
Prosjektleder



Dominique Durand
Forskningsleder
ISBN 82-577-4737-8



Merete Ulstein
Ansvarlig

O-25104

**Beregning av muligheten for oppvirvling av deponerte
sedimenter på dypt vann i Bekkelagsbassenget under en
dypvannsfornyelse**

Forord

I sluttkommentaren (2003) fra Statens forurensningstilsyn (SFT) til Havnevesenets konsekvensutredning (2001) for deponering av forurenset bunnsediment ved Malmøykalven, påpekte SFT at det var behov for ”nærmere undersøkelser/dokumentasjon av strømforholdene på deponeringstedet” før det fattes vedtak knyttet til evt. gjennomføring av tiltaket. Bakgrunnen var en mulig risiko for at sterk strøm ved dypvannsfornyelser kan føre til oppvirvling og spredning av bunnsedimenter.

Norsk institutt for vannforskning har på oppdrag av Oslo havn KF gjennomført strømmålinger i Bekkelagsbassenget under en større dypvannsfornyelse i tidsrommet februar - april 2005. Foreliggende rapport beskriver resultatene fra undersøkelsen.

Oslo, 30.6.2005

Jan Magnusson

Innhold

Sammendrag	5
1. Innledning	7
1.1 Bakgrunn for undersøkelsen	7
1.2 Formål	8
2. Feltarbeid og data	8
3. Resultater	11
3.1 Observasjoner av dypvannsfornyelsen vinteren 2005	11
3.2 Resultater fra strømmålingene	14
3.2.1 Terskelområdet vest Malmøykalven	14
3.2.2 Terskelområdet sør Langøya	16
3.2.3 Målinger fra overflaten til 65 meters dyp i Bekkelagsbassenget	18
3.2.4 Målinger ved bunn i Bekkelagsbassenget	20
4. Risiko for oppvirvling av sedimenter i Bekkelagsbassengets deponiområde.	22
5. Konklusjoner	25
6. Litteratur	26
Vedlegg A. Strømmåler nr. 4: metodikk og databehandling	27

Sammendrag

For å vurdere muligheten for oppvirvling av sedimenter i et planlagt deponiområde ved Malmøykalven (Bekkelagsbassenget) under en dypvannsfornyelse ble det gjennomført strømmålinger fra slutten av februar til begynnelsen av april 2005. Av spesielt interesse var hastigheten og turbulensen ved bunnen.

I observasjonsperioden var det en større dypvannsfornyelse i hele indre Oslofjord, som også omfattet Bunnefjorden. Dypvannsfornyelsen var betydelig større enn vanlig i Bunnefjorden, ved at den fornyet vann helt ned til bunn på vel 150 meters dyp. Bunnefjorden har normalt en så stor dypvannsfornyelse bare hver 3-4 år.

Dette medførte også en stor dypvannsfornyelse i Bekkelagsbassenget. Den hadde allerede startet ved utsettingen av strømmålerne den 24.2, men tiltok i styrke i tidsrommet 3.-15.3. Det ble observert innstrømmende vann helt frem til begynnelsen av april, men innstrømningen var ikke like stor i slutten av perioden. Strømmålinger rett innenfor tersklene ved Malmøykalven og Langøya, ca. 1 meter over bunn på 43 meters dyp, viste også stor innstrømning i måleperioden.

To strømmålere ble plassert i utkanten av deponiområdet for å gi informasjon om turbulensen ved bunnen i deponiområdet. Valg av sted ble også gjort for å sikre maksimalt mulig turbulens, i det en ikke på forhånd kan vite om årets dypvannsfornyelse skulle bli liten, middels eller stor.

Strømhastighet ble målt hver meter fra ca. 2 meter over bunnen (fra 65 m til ca 10 meter under overflaten). Strømhastighetene var lave og for 90 % av observasjonene var hastigheten mindre enn 6 cm/s og i ca. 1 % av observasjonene over 8 cm/s. Flest observasjoner var i intervallet 2-3 cm/s.

En strømmåler ble plassert 1 meter over bunn i samme område. Som følge av en lekkasje ble ikke datafangsten optimal og observasjoner måtte utelukkes. Totalt ble 65 % av observasjonene ansett som gode. Gjennomsnittshastigheter over 5 sekunder var innenfor 2-3 cm/s i det meste av tiden, og med maksimumsverdier på ca. 5 cm/s.

Ut fra tilgjengelig litteratur om resuspensjonsforsøk ligger grenseverdien for oppvirvling av relativt lett sediment med stort vanninnhold (tetthet 1.1 kg/liter) i intervallet 0.1-1 Pa (N/m²). De laveste verdiene er funnet i ferskvann, og noen resultater viser at sedimenter i sjøvann er mer stabile. De verdier for bunnstress som kan beregnes ut fra hastighetsfluktuationene (på strømmåleren 1 meter over bunnen) varierte fra 0.001 til 0.2 Pa. Generelt viste svært få registreringer et bunnstress større enn 0.1 Pa. Det er derfor lite sannsynlig at de strømhastighetene som ble målt under innstrømningen kan føre til oppvirvling av sedimenter, selv om det ikke helt kan utelukkes. Dertil må en ta i betraktning at dette gjelder for et område (i utkanten av deponiområdet) der innstrømninger over terskelen fører til større strømhastighet enn sentrale deler av deponiområdet.

Hovedkonklusjonen er dermed at det er liten sannsynlighet for oppvirvling av sedimenter i deponiområdet, selv i år med stor dypvannsfornyelse.

Lekkasje i en av strømmålerne medfører en viss (unødvendig) usikkerhet i datagrunnlaget.

1. Innledning

1.1 Bakgrunn for undersøkelsen

Konsekventutredningen for dypvannsdeponiet ved Malmøykalven (2001) ble godkjent av Statens forurensningstilsyn (SFT) i 2003 etter tilleggsutredninger. I sluttokumentet ble det påpekt fra SFT at det var et behov for nærmere undersøkelse/dokumentasjon av strømforhold på deponeringsstedet. Spesialet gjaldt dette strøm under en dypvannsfornyelse.

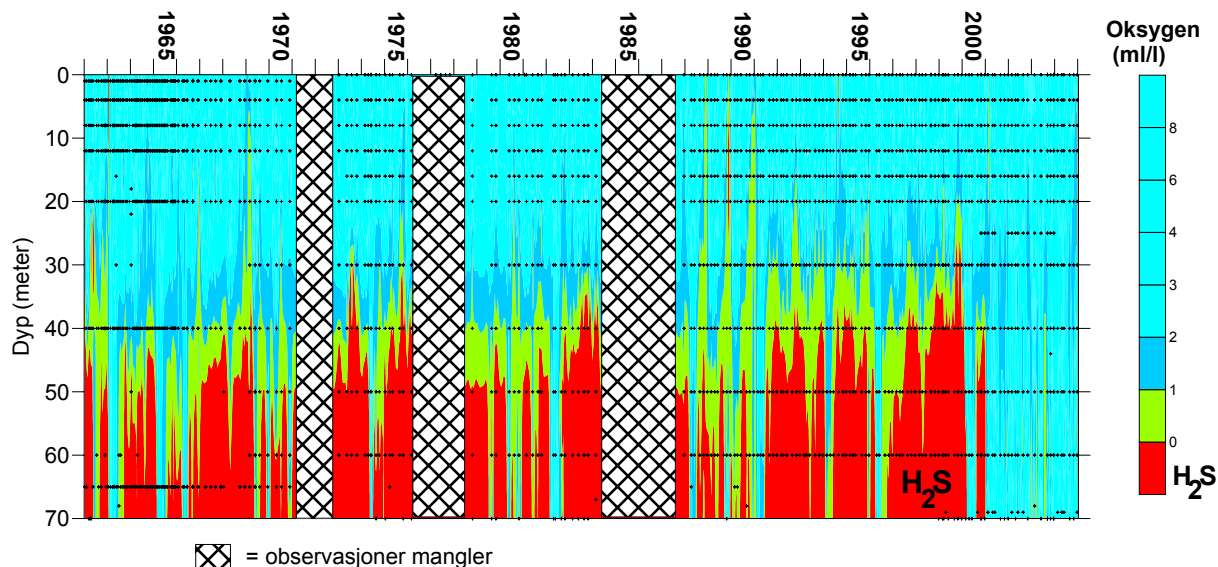
På oppdrag fra Oslo Havnevesen utførte NIVA i 1998 en undersøkelse av strømforholdene på det potensielle deponiområdet for sedimenter fra Bjørvika/Bispevika ved Malmøykalven i Bekkelagsbassenget (Skei, m.fl., 1999,). Det ble målt meget lav strømhastighet like over bunnen (ca. 70 meters dyp). Undersøkelsene ble imidlertid foretatt i en periode med stagnante forhold i bassenget, da dette var den mest vanlige situasjonen. I slike perioder er det således så lave strømhastigheter ved bunn at det ikke vil foreligge noen risiko for oppvirvling av deponerte sedimenter. Imidlertid kan situasjonen være annerledes ved en stor dypvannsfornyelse i fjorden.

Store dypvannsfornyelser i Bekkelagsbassenget inntreffer relativt sjelden. **Figur 1** viser oksygenkonsentrasjonen i Bekkelagsbassenget og deponiområdet i tidsrommet 1962-2004. I figuren er bare konsentrasjoner mindre enn 2 ml/l vist i detalj. Hydrogensulfidholdig vann, som representerer perioder med stagnante vannmasser, dominerer i de dypere delene av bassenget frem til 2001. Av og til blir dypvannet tilført oksygenrikere vann ved dypvannsfornyelser, men som figuren viser er det relativt sjelden at de når helt ned til bunns.

Etter høsten 2001 er det ikke observert hydrogensulfidholdig vann i Bekkelagsbassenget og oksygenkonsentrasjonene i vannmassen mellom 30-50 meters dyp er gjennomgående høyere enn tidligere (Magnusson m.fl., 2005). Forandringen skyldes at det nye Bekkelaget renseanlegg fra 2001 fører rensset avløpsvann ut på ca. 50 meters dyp i bassenget. Dette betyr at bassenget tilføres ca 1 m³/s ferskvann på 50 meters dyp, og at dette ferskvannet stiger mot overflaten ved innblanding av sjøvann. Egenvekten på denne "blandingsvannmassen" øker mens den stiger og den når til slutt et dyp (ca. 30 meters dyp) hvor den har samme egenvekt som omkringliggende vannmasser. Der innlagres avløpsvannet.

Tilførselen av ferskvann reduserer egenvekten på sjøvannet mellom 30-50 meters dyp, og øker sannsynligheten for at tyngre vann kan strømme inn over tersklene til Bekkelagsbassenget. Herved tilføres ikke bare vann fra Vestfjorden/Bunnefjorden, men Bekkelagsbassenget tilføres også oksygen i disse innstrømmende vannmasser. Imidlertid er oksygenkonsentrasjonen fortsatt meget lav fra bunn til ca. 50 meters dyp og det foreligger fortsatt mulighet at alt oksygenet i denne vannmassen periodevis kan forsvinne igjen.

I 2002 ble det utarbeidet et notat over frekvens, omfang og tidspunkt for dypvannsfornyelser i indre Oslofjord og Bekkelagsbassenget for Oslo Havnevesen (Magnusson, 2002). Variasjonen fra år til år var store. De største strømmene i bunn av Bekkelagsbassenget vil være i år med stor dypvannsfornyelse over kort tid. I år hvor dypvannsfornyelsen skjer i episoder vil tilførselen av vann skje så langsomt at bunnstrømmen blir beskjedne. Imidlertid er det ikke foretatt strømmålinger på bunn i bassenget under en dypvannsfornyelse, og den kompliserte topografien gjør at det er vanskelig å kunne si hvilken vei dypvannet tar og hvor store strømhastighetene kan bli. Til dette kreves observasjoner.



Figur 1. Oksygenobservasjoner i Bekkelagsbassenget (Cq 1) 1962-2004. Prikkene i figuren markerer enkeltobservasjoner i dyp og tid.

1.2 Formål

Formålet med dette prosjektet var å framskaffe opplysninger om strømhastigheten nær bunnen i Bekkelagsbassenget under en dypvannsfornyelse. Hensikten var å bruke resultatene til beregninger og vurderinger for å avgjøre om slike innstrømninger medfører en risiko for at sedimenter oppvirkles og spres.

2. Feltarbeid og data

Tre strømmålere ble plassert ut i Bekkelagsbassenget den 24.2.2005 og en fjerde strømmåler ble satt ut den 2.3.2005. Plasseringen av de ulike strømmålerne er vist i **Figur 2**. Hovedinformasjonen om målingsprogrammet er oppsummert i **Tabell 1**. Samtlige strømmålere ble tatt opp den 6.4.2005. Foreliggende rapport omhandler dermed observasjoner av strøm foretatt i tidsrommet 24.2.-6.4.2004.

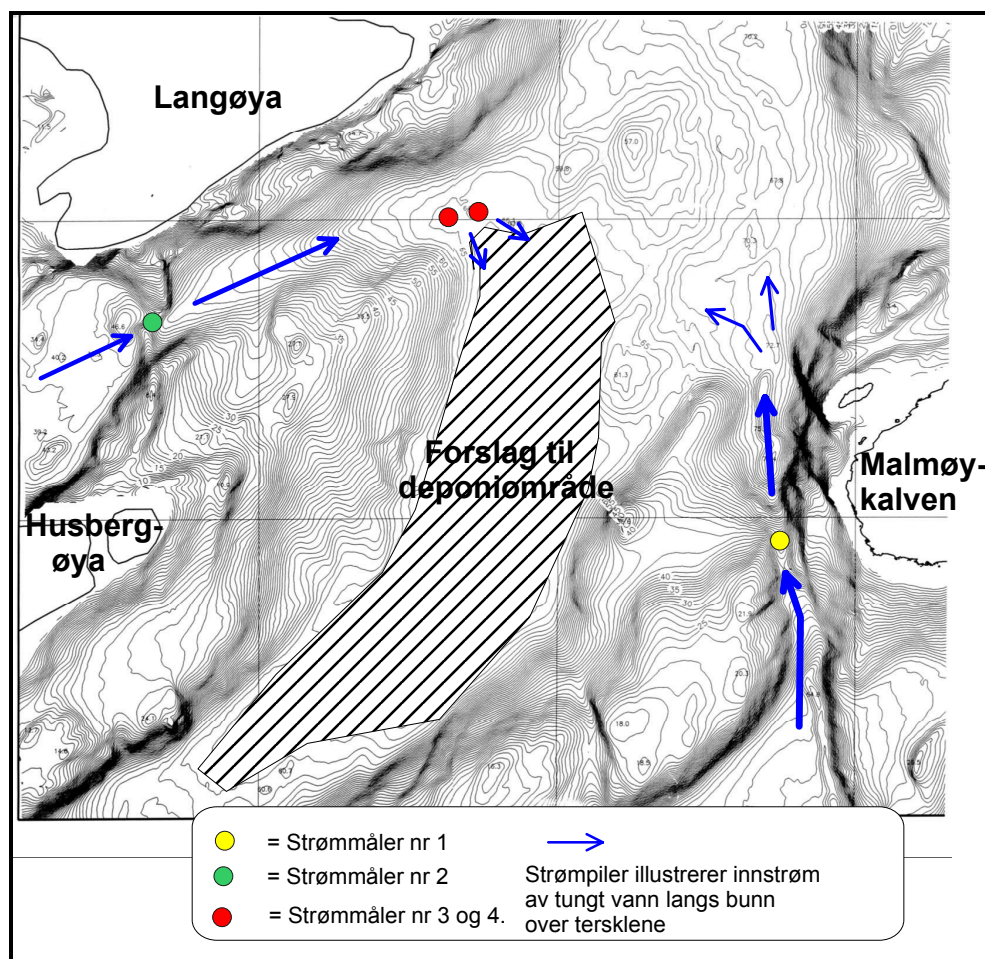
To av strømmålerne ble plassert litt innenfor to av tersklene til bassenget. Tanken var å fange opp karakteristika på det vann som danner nytt bunnvann ved en dypvannsfornyelse. En strømmåler ble plassert 1 meter over bunn i den smale dyprennen ved Malmøykalven (SAIV, måler nr. 1) litt på innsiden av terskelen på 42 - 43 m dyp. Dyprennen er 43 m dyp og meget smal, men er det største terskeldypet inn til Bekkelagsbassenget. Nytt tungt dypvann som strømmer inn her vil følge bunnkonturen og først gå nordover innen det kan strømme inn over deponiområdet. Den smale munningen begrenser transporten av vann. Dypvann som kommer denne veien vil følge bunn og ettersom kanalen langs bunn øker i tverrsnitt vil hastigheten på bunnstrømmen avta. Etter hvert som vannet når deponidyp på ca 70 meter vil det flyte ut i bredden og hastigheten avta betydelig innen det når deponiområdet.

Vann som kommer inn over den grunnere terskelen mellom Langøya og Husbergøya har kortere vei til deponiområdet. For å få observert maksimal strømhastighet på innstrømmende vann omtrent ved terskeldyp ble derfor en strømmåler (RCM-9, måler nr. 2) plassert en meter over bunn i en innsnevring av en dyprenne som leder ned i Bekkelagsbassenget.

Strømmålerne nr. 3 og 4 ble plassert nær hverandre i nordre enden av deponiområdet, litt før bunnstrømmen kan flyte ut i bredden over deponiområdet. Måler nr. 3 ble plassert på ca. 66-67 meters bunndyp, for å observere strømmen mellom 65 meters dyp og opp til ca. 10 meters dyp i 1 meters intervaller. Måler nr. 4 ble plassert på 65 meters dyp for å observere bunnær turbulens (ca. 1 meter over bunn). Plasseringen ble valgt for å kunne få observert maksimal turbulens ved bunn, spesielt hvis dypvannsfornyelsen hadde blitt mindre enn den nå ble. Det innstrømmende vannet vil ha lavere hastigheter når tverrsnittsarealet øker og vannet når sentrale deler av deponiområdet.

Dessverre sviktet to av strømmålerne. Strømmåler nr. 2 (RCM-9), sviktet i datalagringsenheten, slik at resultater foreligger bare i deler av perioden. Dette fremgår av **Figur 3**, hvor temperaturdata fra tre av målerne er presentert. Observasjoner fra RCM-9 finnes i begynnelsen av observasjonsperioden samt noe i slutten. Strømmåler nr. 4 (Nortek Vektormåler) viste seg å ha hatt vannlekkasje. Måleren - som var nyoverhålt - ble etterpå sendt til produsenten og en stor del av observasjonene kunne fås ut. Dataserien ble nøye vurdert og gransket for å kunne fjerne ikke-korrekte data. Detaljer i behandlingen er beskrevet i vedlegg A.

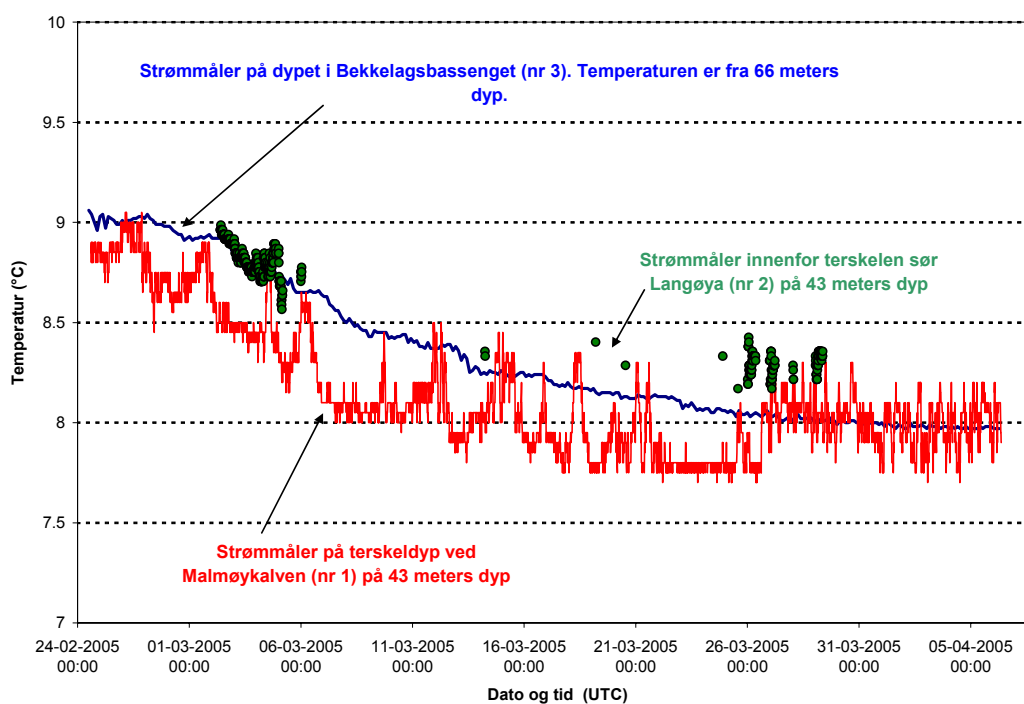
Både ved utsetting og ved innhenting av målerne ble det observert profiler av temperatur og saltholdighet (SEABIRD; Seacat CTD) i bassenget og utenfor tersklene. Videre er tilsvarende observasjoner fra overvåkingsprogrammet for indre Oslofjord blitt benyttet.



Figur 2. Plassering av strømmålere.

Tabell 1. Oppsummering av strømmålingsprogrammet.

Strøm- måler nr.	Strømmåler navn	Utsettingsdato og tid (UTC*)	Opptagsdato og tid	Observasjons intervall	Anm.
1	SAIV rotor måler	24.2.2005	6.4.2005	10 min	Måledyp= 43m
2	RCM-9 (Aanderaa)	2.3.2005	6.4.2005	10 min	Måledyp = 43m Svikt i datalagringen
3	ADP (500 kHz NORTEK ADCP)	24.2.2005, 09:30	6.4.2005	10 min, hver 30 min	Måledyp = 10- 65m, hver meter
4	Vector (NORTEK)	24.2.2005	6.4.2005	Burst mode: 8 Hz i 5 sek hver 3 minutt.	Måledyp=65m lekkasje

**Figur 3.** Temperatur målt av strømmålerne nr. 1, 2 og 3.

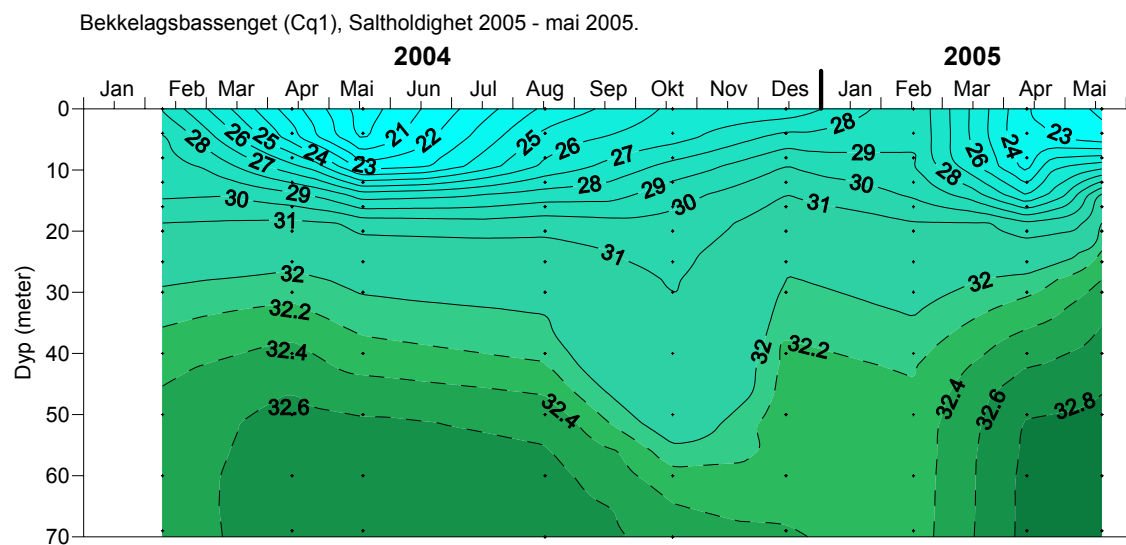
* UTC= Universal Time, Coordinated. I praksis tilsvare det Greenwich Mean Time.

3. Resultater

3.1 Observasjoner av dypvannsfornyelsen vinteren 2005

Gjennom kommunenes overvåkingsprogram og Fagrådet for indre Oslofjord følges regelmessig fjordens hydrografi. Observasjoner fra dette programmet i 2004-2005 viser at sesongens dypvannsfornyelse i Bekkelagsbassenget startet i desember 2004 (**Figur 4 - Figur 5**). Neste større dypvannsfornyelse kom i slutten av februar 2005.

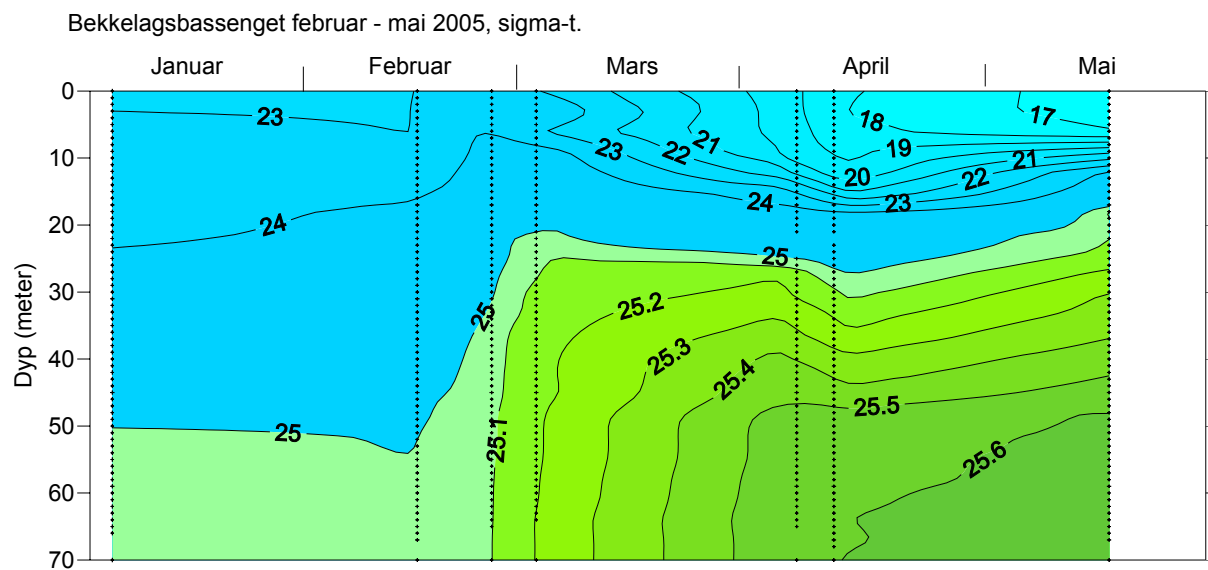
For indre Oslofjord var dypvannsfornyelsen i februar/april 2005 større enn normalt. Det betyr at observasjonsperioden for strømmålingene dekket en periode med stor dypvannsfornyelse i fjorden.



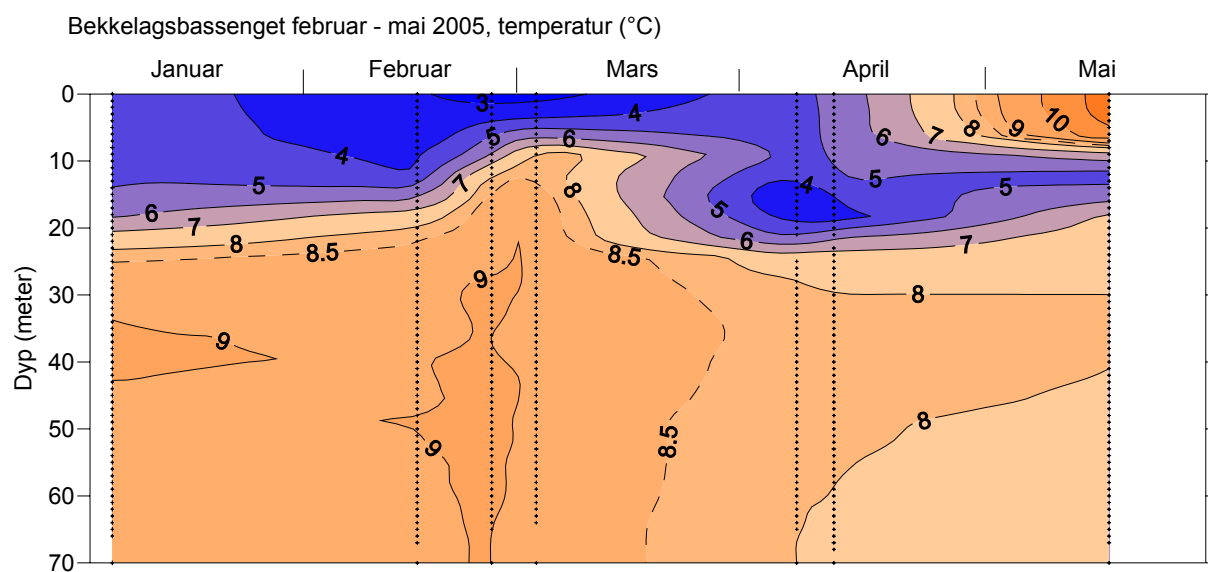
Figur 4. Saltholdighet i Bekkelagsbassenget (Cq1) februar 2004 til mai 2005. Data fra overvåkingsprogrammet for indre Oslofjord.

I perioden januar- mai 2005 ble det tatt ekstra CTD-observasjoner (observasjoner av temperatur, saltholdighet med sonde) i Bekkelagsbassenget ved utsetting og kontroll av strømmålerne. Resultatene er sammenstilt i **Figur 5 - Figur 8** **Figur 7**, hvor også observasjoner fra overvåkingsprogrammet for indre Oslofjord er brukt. De viser at dypvannsfornyelsen startet omtrent samtidig eller litt før strømmålerne ble satt ut 24. februar. Nye observasjoner en uke senere viste at dypvannsfornyelsen fortsatte. Da strømmålerne ble tatt opp i slutten av april var fornyelsen mer eller mindre slutt.

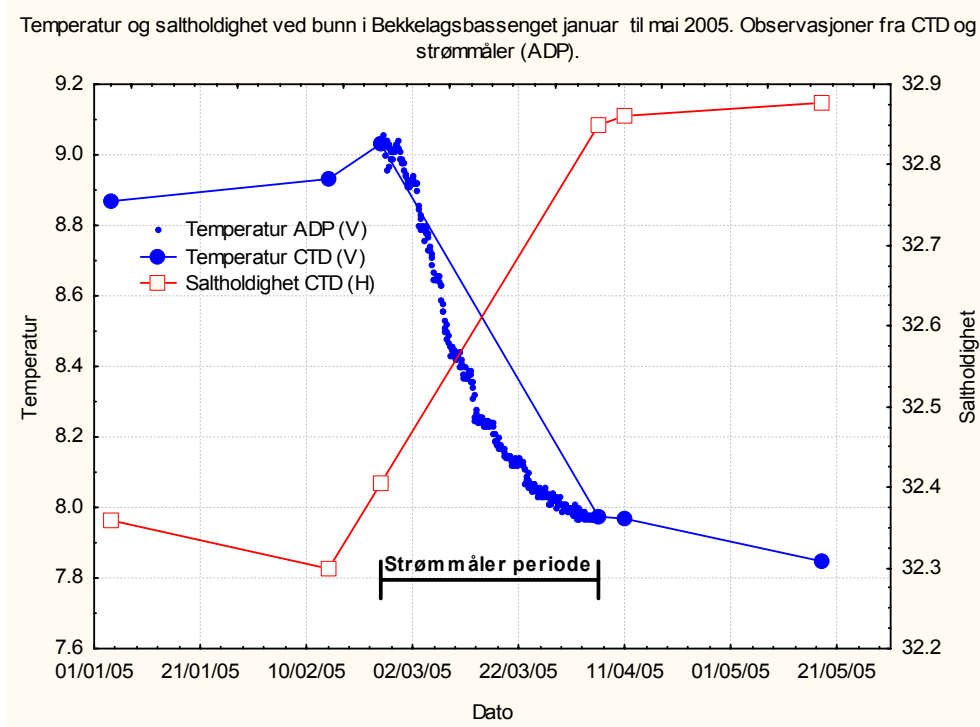
Ut fra målsetningen med prosjektet var dermed observasjonsperioden optimal.



Figur 5. Egenvekten ($\sigma_t = \text{egenvekt} \cdot 1000 - 1$) på vannet i Bekkelagsbassenget fra januar til mai 2005. Økningen under ca. 20 m dyp viser en stor dypvannsfornyelse fra midten av februar og til slutten av mars.



Figur 6. Temperaturen i Bekkelagsbassenget fra januar til mai 2005. Dypvannsfornyelsen førte kaldere vann inn i bassenget.



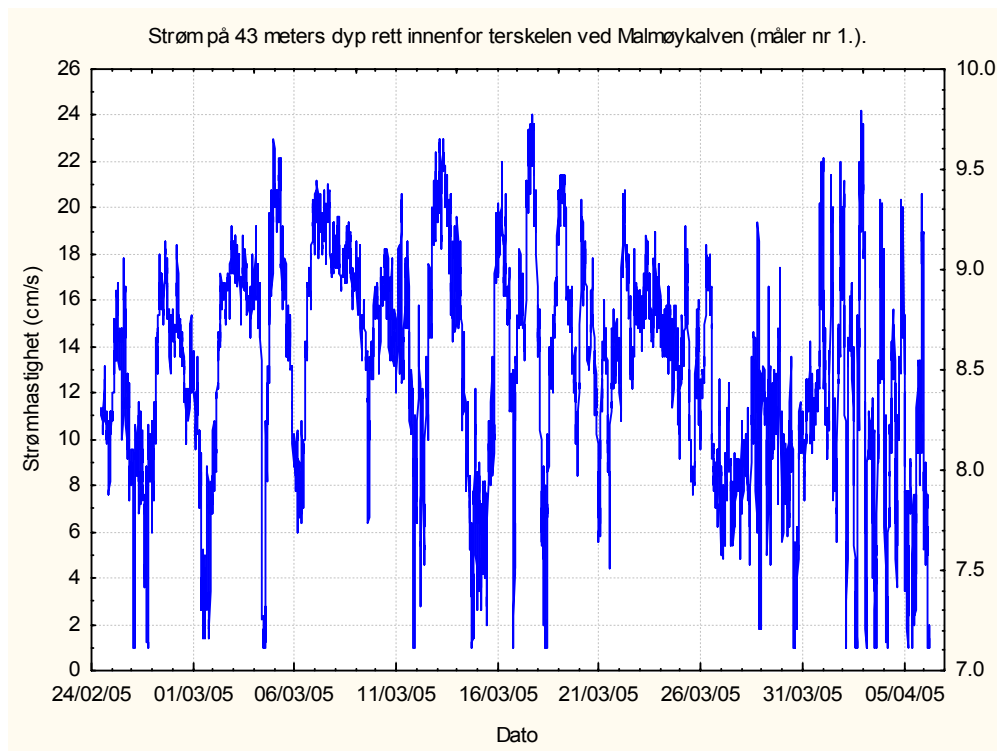
Figur 7. Saltholdighet og temperatur på dypvannet i perioden januar til mai 2005. Observasjoner fra CTD og strømmålere (ADP). Endringene fra midten av februar til slutten av mars viser forløpet av en dypvannsfornyelse av vann med relativt høy saltholdighet og avtakende temperatur.

3.2 Resultater fra strømmålingene

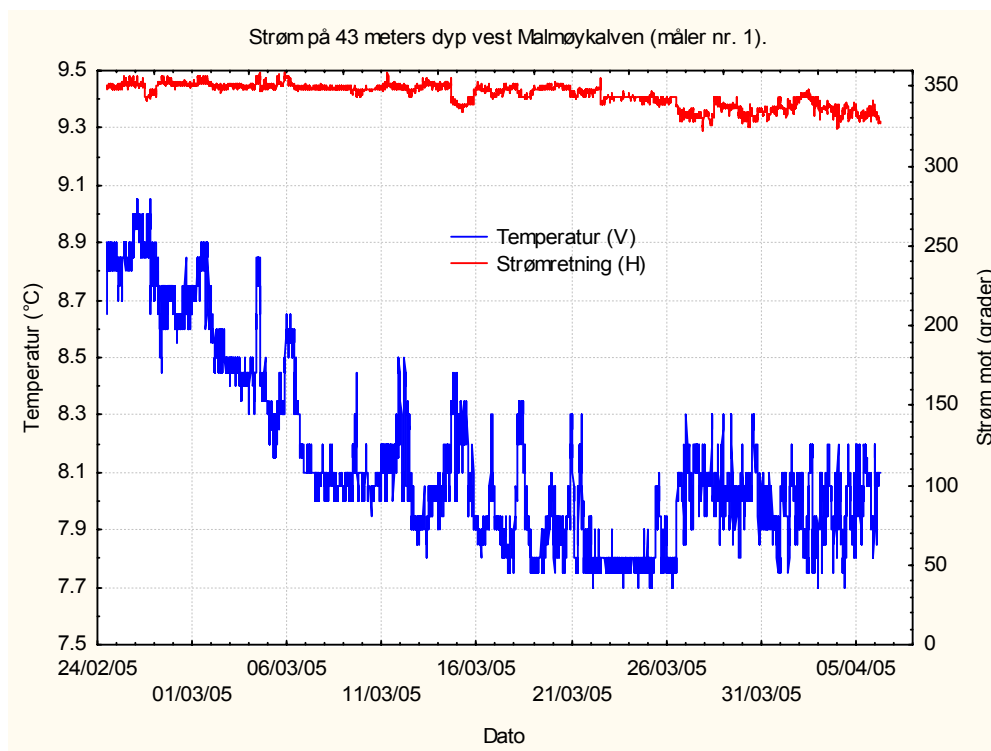
3.2.1 Terskelområdet vest Malmøykalven

Strømmåler nr. 1, plassert på 43 meters dyp straks innenfor den dypeste terskelen til Bekkelagsbassenget (**Figur 2**), viste inngående strøm i hele perioden. Maksimale strømhastigheter (midlet over 10 minutter) var omkring 20 cm/s (**Figur 8**) med retning inn i bassenget (nord) mens styrken varierte med bl.a. tidevannet (**Figur 9 - Figur 10**). Målingene bekrefter dermed at dette var et tidsrom med stor innstrømning av nytt vann til bassenget.

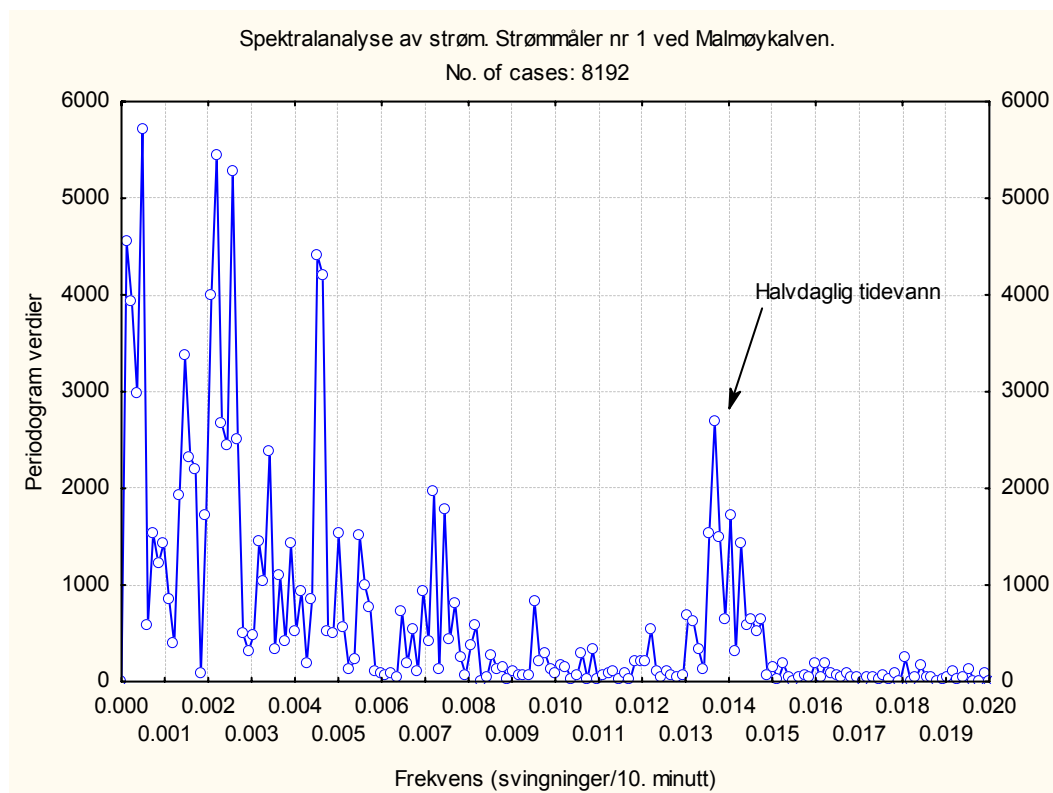
Bredden på denne kanalen som fører inn til bassenget er 10 – 85 meter mellom 43 meters dyp (bunn) og 34 meters dyp, således et meget begrenset tverrsnittsareal (**Figur 2**). Transportkapasiteten mellom 34 meters dyp og bunn i denne kanalen begrenser hvor mye vann pr. tidsenhet som kan tilføres bassenget.



Figur 8. Strømhastighet 1 meter over bunn innenfor terskelen vest Malmøykalven i tidsrommet 24.2 - 6.4.2005.



Figur 9. Strømretning og vanntemperatur 1 meter over bunn innenfor terskelen vest Malmøykalven i tidsrommet 24.2 – 6.4.2005. Strøm mot nord-nordvest i helt tidsrommet.



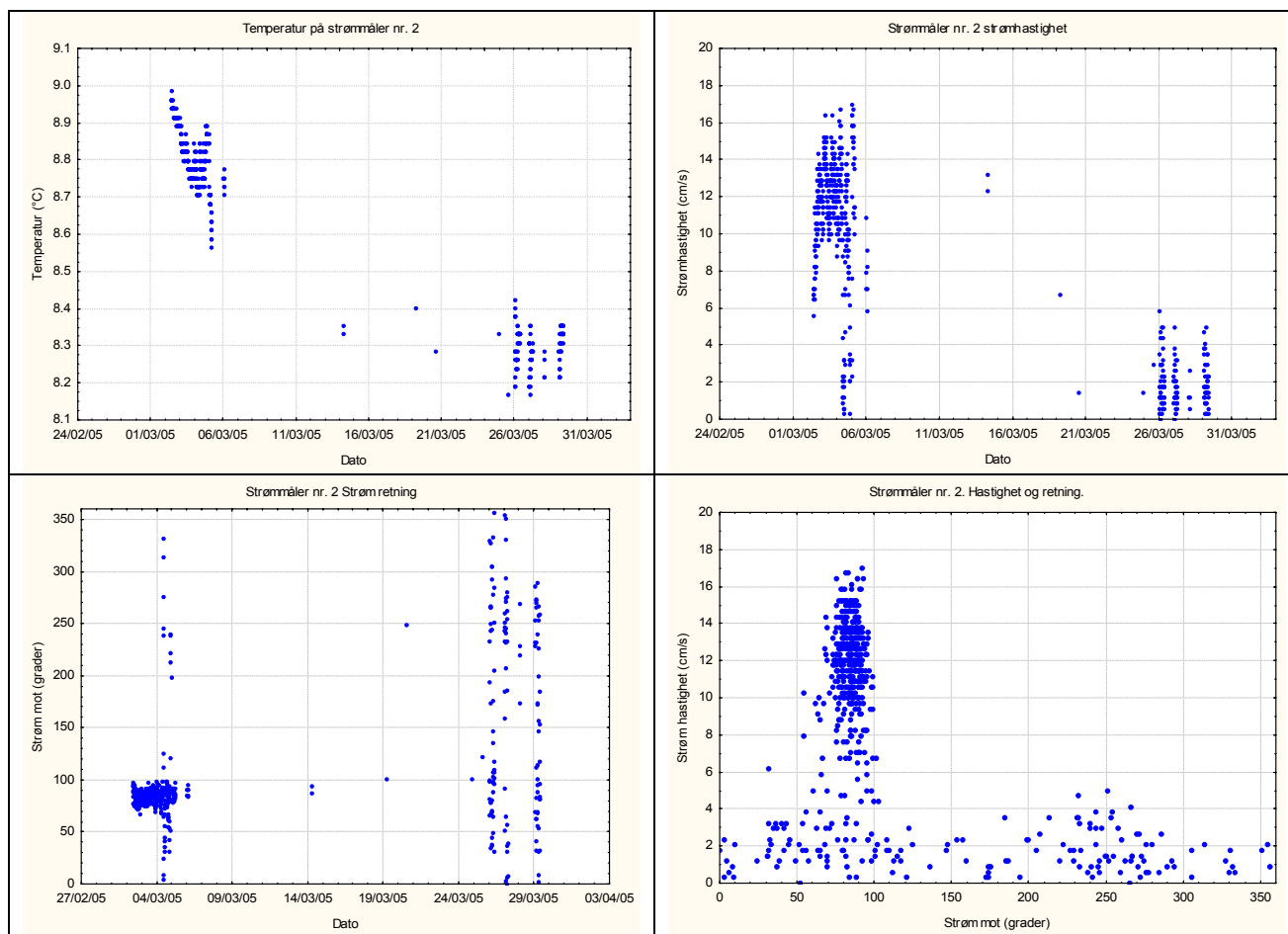
Figur 10. Spektralanalyse av strømhastigheten på måler vest Malmøykalven.

3.2.2 Terskelområdet sør Langøya

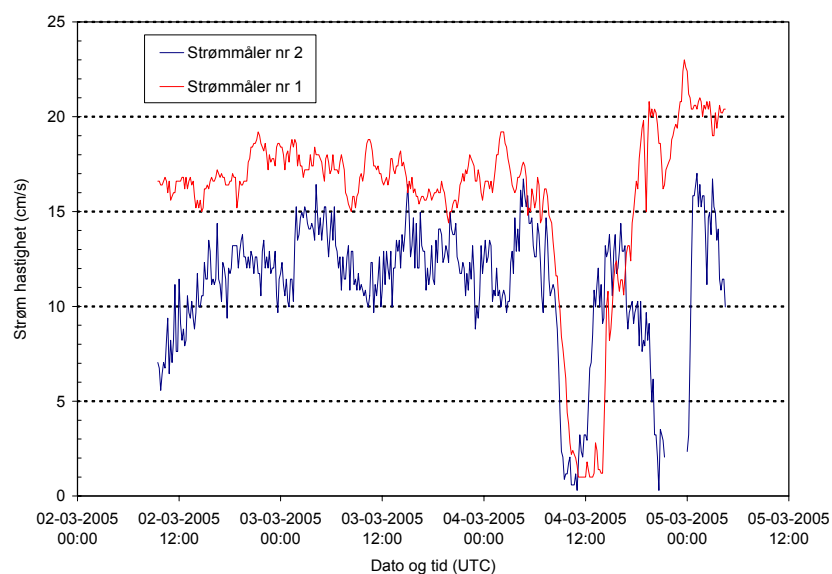
Strømmåler nr. 2 ble plassert på 43 meters dyp innenfor terskelen (som er på ca. 33 - 34 meters dyp) mellom Langøya og Husbergøya (**Figur 2**). Her er en smal åpning som leder inn i bassenget. Åpningen har hovedretning inn bassenget møt øst (ca. 70-80 grader i forhold til nord). Strømmåleren ble plassert her for å kontrollere innstrømningen fra nordre del av Bunnefjorden. Fra åpningen leder den dyprenne ned mot de dypeste delene av bassenget. Rennet utvider seg noe etter den smale delen hvor strømmåleren stod plassert.

Som allerede nevnt fungerte datagringsenheten i strømmåleren ikke hele tiden. Imidlertid var det en sammenhengende periode med observasjoner fra 2.3 til den 6.3.2005. Alle data er vist i **Figur 11**. I begynnelsen av observasjonsperioden er strømmen rettet inn i bassenget, dvs. dypvannsfornyelsen er i gang. I slutten av observasjonsperioden varierer strømmen i ulike retninger, samtidig som strømhastighetene er betydelig lavere. Sammenlignet med strømmåleren nr. 1, som også viste innstrøm i denne siste del av observasjonsperioden, var dypvannsfornyelse ikke lenger stabil over den grunnere terskelen sør Langøya. En sammenligning av strømmen ved de to tersklene er vist i **Figur 12** og **Figur 13**. Strømhastigheten er noe lavere ved Langøya, enn ved Malmøykalven, men det er ikke de store forskjellene når det er innstrømning av tungt vann begge steder.

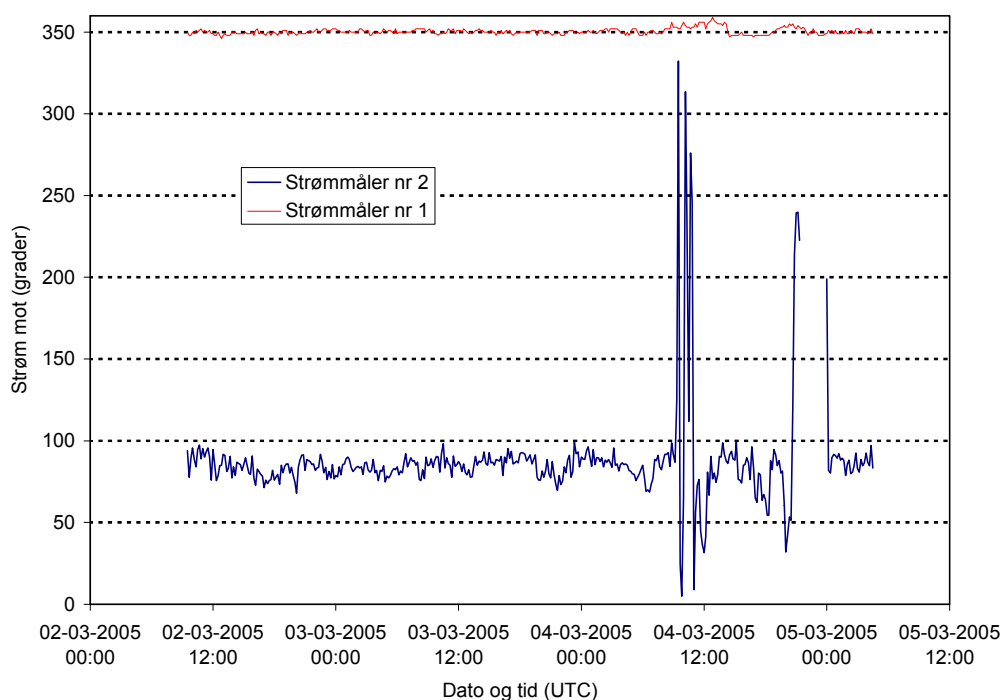
Konklusjonen fra disse observasjonene er at når den dypere kanalen ved Malmøykalven har nådd sin transportkapasitet mellom ca. 34 - 43 meters dyp, vil vannet begynne å strømme over den grunnere terskelen ved Langøya og ned i Bekkelagsbassenget. Dette skjer således bare når dypvannsfornyelsen i indre Oslofjord er så stor at kanalen ved Malmøykalven ikke har tilstrekkelig transportkapasitet for det tyngre vannet som skal danne nytt dypvann i Bekkelagsbassenget. I mer moderate tilfeller, med langsommeren og mindre dypvannsfornyelse vil hovedinnstrømningen sannsynligvis i hovedsak skje gjennom kanalen ved Malmøykalven



Figur 11. Observasjoner fra strømmåler nr. 2 sør Langøya på 43 meters dyp. Temperatur, strøm hastighet og retning.



Figur 12. Strømhastigheter i tidsrommet 2 - 5.3.2005 på strømmåler nr. 1 (Malmøykalven) og strømmåler nr. 2 (Langøya).

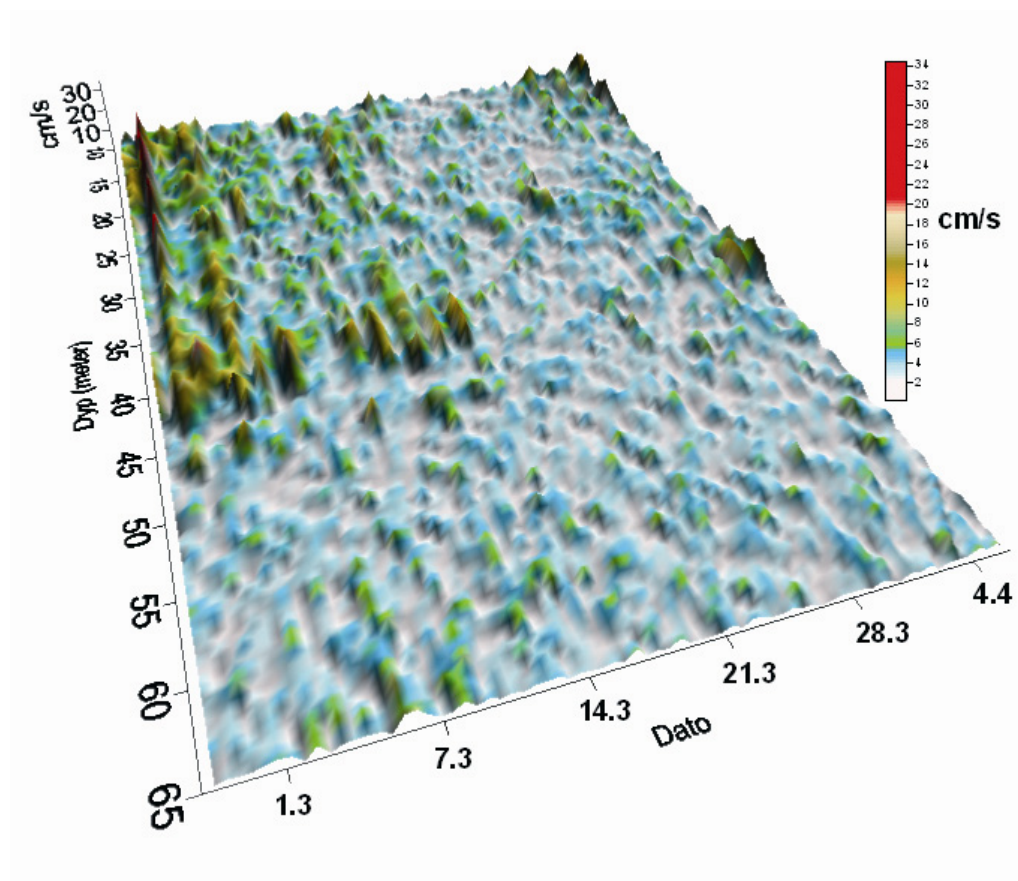


Figur 13. Strømretninger i tidsrommet 2.-5.3.2005 på strømmåler nr. 1 (Malmøykalven) og strømmåler nr. 2 (Langøya). Retningene viser innstrømmning over begge tersklene.

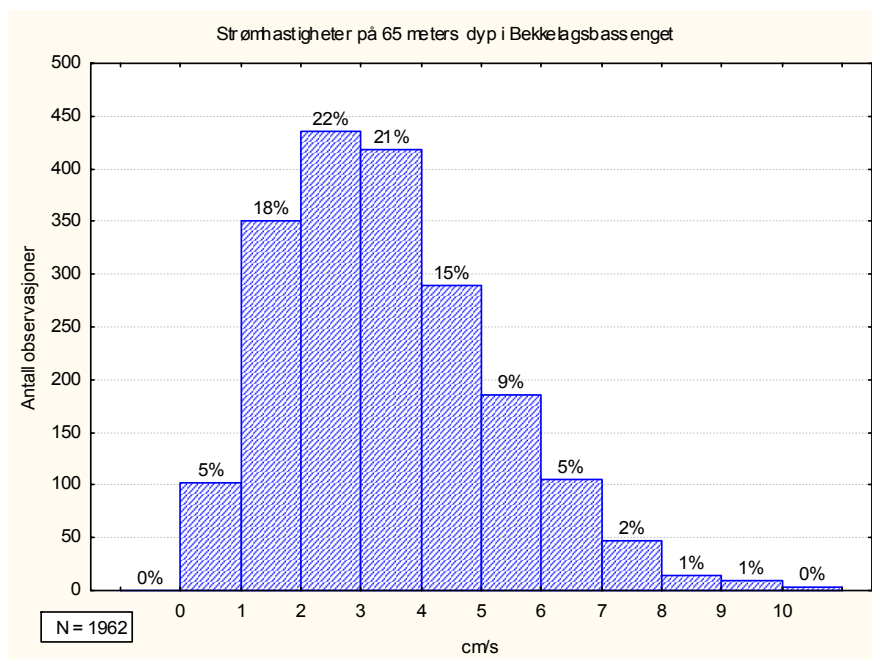
3.2.3 Målinger fra overflaten til 65 meters dyp i Bekkelagsbassenget

En NORTEK ADP (ADCP-strømprofilmåler) ble satt ut på 67 meters dyp i bassenget (måler nr. 3, **Figur 2**). Strømmåleren observerte strøm i 1 meters intervaller fra 65 meters dyp til ca. 10 meter under overflaten. Den registrerte middelstrøm over 10 minutter 1 gang hver halvtime.

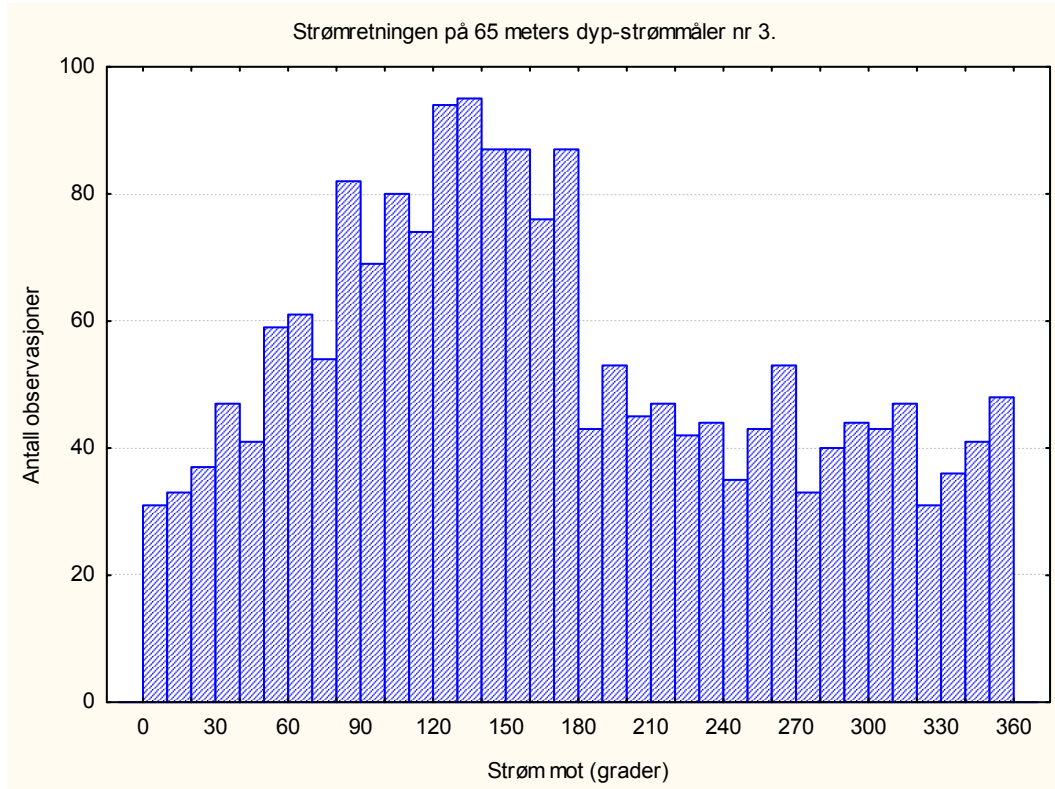
Generelt var strømstyrken lav i Bekkelagsbassengets dypvann og nær bunn, mens det var betydelig høyere strømhastigheter ved terskeldyp (ca. 40 meters dyp) samt høyere opp i vannmassene (**Figur 14**). Strøm inn i bassenget (mot 90 til 200 °) dominerte ved bunn og de største hastighetene ble målt i første halvdel av observasjonsperioden og helt i slutten. For 90 % av observasjonene var hastigheten (uansett retningen på strømmen) mindre enn ca. 6 cm/s (**Figur 15**). Strømretningen var også nært korrelert fra 55 meter dyp til bunn, dvs. omtrent samme retningsfordeling som strømmen på 65 meters dyp (**Figur 16**). Den dekomponerte strømhastigheten (i retning 130 °, dvs. innstrøm) bekrefter at fornyelsen av det bunnære vannet var størst i begynnelsen av observasjonsperioden. Ved bunn (65 meters dyp) var den inngående strømmen størst i den perioden da også temperaturen sank kraftigst (**Figur 17**).



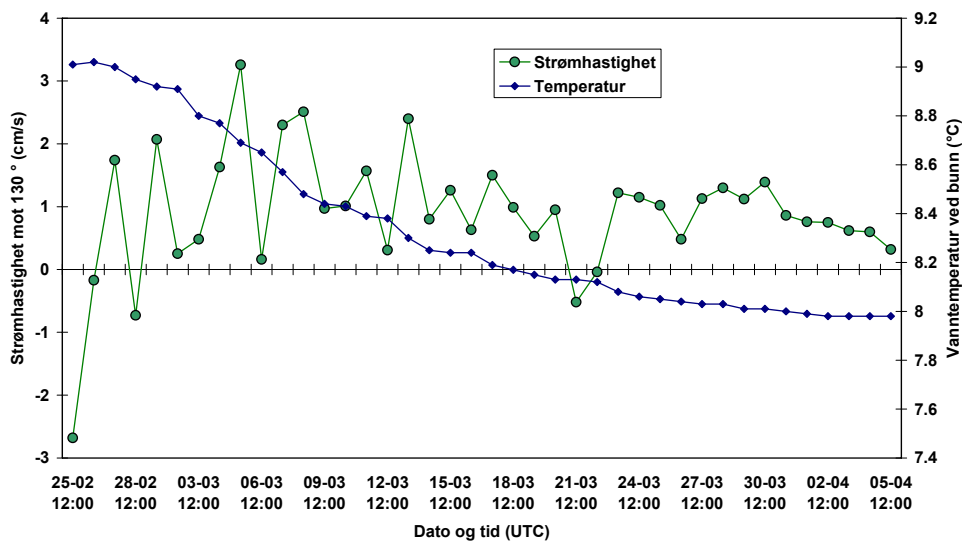
Figur 14. Strømhastighet observert på ulike dyp med strømmåler nr. 3 (ADP-Nortek) 24.2-6.4.2005. Dato er langs x-aksen, Dyp langs y-aksen og strømhastigheten langs z-aksen. Farveskalaen viser også strømhastigheten.



Figur 15. Observasjoner av strømhastighet fordelt i intervaller på 1 cm/s opp til 10 cm/s på 65 meters dyp i Bekkelagsbassenget (strømmåler nr. 3).



Figur 16. Observasjoner av strømretning fordelt på 10-graders intervaller på 65 meter dyp i Bekkelagsbassenget (strømmåler nr. 3).



Figur 17. Døgnmiddel av bunnstrømmen på 65 meters dyp dekomponert mot 130 °, samt vannets bunntemperatur (strømmåler nr. 3).

3.2.4 Målinger ved bunn i Bekkelagsbassenget

Strømmåler nr. 4 ble plassert ut 1 meter over bunn, ved siden av strømmåler nr. 3 (**Figur 2**). Hensikten med denne måleren var å undersøke hvor sterk bunnstrømmen er ved en dypvannsfornyelse, og dermed bedømme risikoen for oppvirvling av sedimenter. Den ble således plassert i utkanten av det

planlagte deponiområdet, der hvor bunnstrømmen fortsatt er relativt smal (topografisk begrenset), innen den flyter ut i bredden over deponiområdet med lavere hastigheter (kraftig økende tverrsnittsareal). Sett ut fra formålet med strømmålingene var dette den viktigste måleren.

Måleren var nyoverhelt, men fikk en lekkasje og fungerte derfor ikke helt som den skulle. Det gjelder særlig trykk og temperatur, men også strømmålingene viser en del store utslag med et mønster som tyder på instrumentfeil. Vedlegg A beskriver hvordan dataene ble gjennomgått, gale verdier fjernet eller korrigert, og de gjenstående data analysert. Om ukorrigerte data nevner vi bare kort:

Temperaturen viste 9.85 °C i ca. 3 timer etter utsetting, men begynte å fluktuere sterkt fra kl. 14:39, og viser deretter unormale forløp gjennom hele serien*.

Trykket og retningsdata viste at målerriggen ble satt på bunnen på 64.4 m dyp 24. februar kl. 10:18 med kompassretning 50° på bunn med ca. 8° helning. Retningene holdt seg omtrent konstante frem til kl. 13:54, men deretter begynte både kompassretning og helningsmål å variere litt frem og tilbake. Omtrent samtidig begynte også registrert trykk å fluktuere, og sank mot 20 m mot slutten av serien. Alle disse fluktuasjonene antas å skyldes at vanninntrengningen, har gitt problemer med elektronikken.

Ca. 99 % av de horisontale strømhastighetene lå innenfor 0.15 m/s i absoluttverdi, mens tilsvarende andel av vertikale hastigheter hadde absoluttverdier innenfor 0.05 m/s, men det forekom noen helt urimelig høye verdier på opp i 2 m/s for horisontal strøm og 0.35 m/s for vertikal strøm. Nærmere inspeksjon av en del måleperioder viste at slike verdier forekom som isolerte registreringer av svært høy hastigheter i enkeltmålinger, mens resten av målingene lå i et normalt intervall. Ved å filtrere data ut fra andre kriterier for kvalitet av målingene ble alle disse verdiene fjernet (se Vedlegg A). Ca. 65 % av registreringene ble betraktet som gode, og brukt til å beregne turbulens og bunnstress.

* Temperaturen måles internt i instrumentet til bruk ved prosessering av signaler, og vil ikke helt tilsvare temperatur i vannet omkring.

4. Risiko for oppvirvling av sedimenter i Bekkelagsbassenget deponiområde.

Godkjente resultat fra strømmåler nr. 4 (Nortek 2000), plassert 1 m over bunn i utkanten av deponiområdet, er brukt for å beregne strømmens bunnstress. Turbulent Reynolds stress τ langs østlig og nordlig retning vil være gitt ved middelverdien av hastighetsfluktuationene rundt gjennomsnittsverdier:

$$\tau_{\text{Øst}} = \rho \overline{U'_{\text{Øst}} U'_{\text{Opp}}} \quad \text{og} \quad \tau_{\text{Nord}} = \rho \overline{U'_{\text{Nord}} U'_{\text{Opp}}}$$

hvor $U'_i = U_i - \bar{U}_i$.

For midling over en burst har vi da for stress i østlig retning:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{Øst}} &= \rho \overline{U'_{\text{Øst}} U'_{\text{Opp}}} \\ &= \rho \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (U_{\text{Øst}} - \bar{U}_{\text{Øst}}) (U_{\text{Opp}} - \bar{U}_{\text{Opp}}) \\ &= \rho (\bar{W}_{\text{Øst,Opp}} - \bar{U}_{\text{Øst}} \bar{U}_{\text{Opp}}) \end{aligned}$$

hvor

$$\bar{W}_{\text{Øst,Opp}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_{\text{Øst}} U_{\text{Opp}}$$

og for nordlig retning tilsvarende:

$$\tau_{\text{Nord}} = \rho (\bar{W}_{\text{Nord,Opp}} - \bar{U}_{\text{Nord}} \bar{U}_{\text{Opp}})$$

Disse stress-estimatene beregnes direkte ut fra de statistiske målene fra hver burst. De to stress-estimatene fra hver måleperiode blir så kombinert vektorielt:

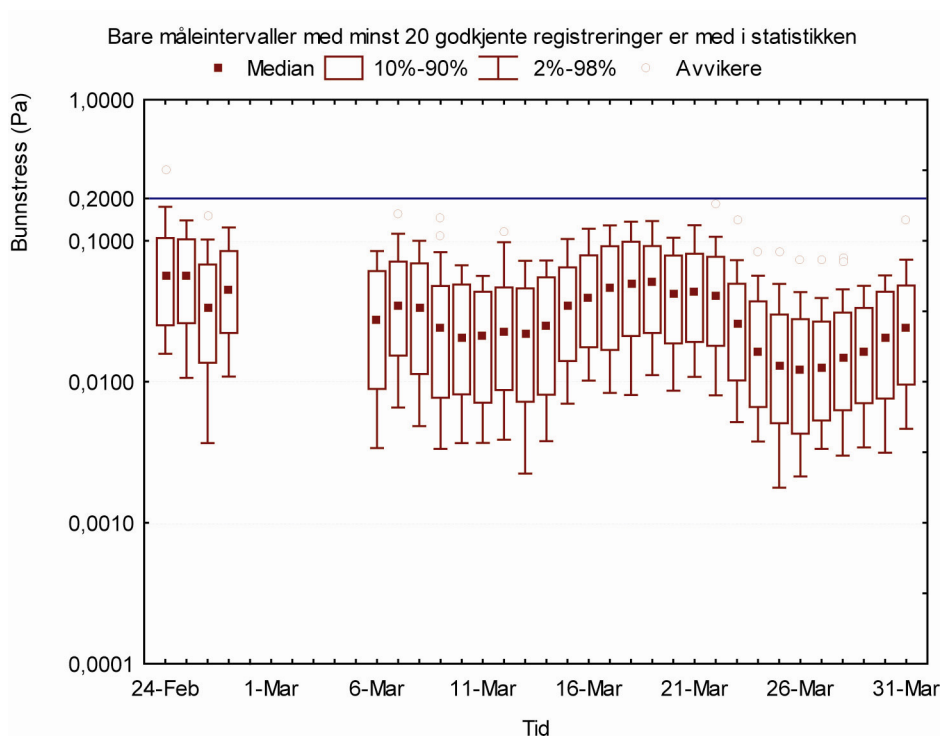
$$\tau = \sqrt{\tau_{\text{Øst}}^2 + \tau_{\text{Nord}}^2}$$

Et tidligere studium av tilgjengelig litteratur om resuspensjonsforsøk (Bjerkeng og Molvær 2002) konkluderer med at grenseverdien for oppvirvling av relativt lett sediment med stort vanninnhold (tetthet 1.1 kg/liter) ligger i området 0.1 til 1 Pa*. De laveste verdiene er funnet i ferskvann, og noen resultater viser at sedimenter i sjøvann er mer stabile.

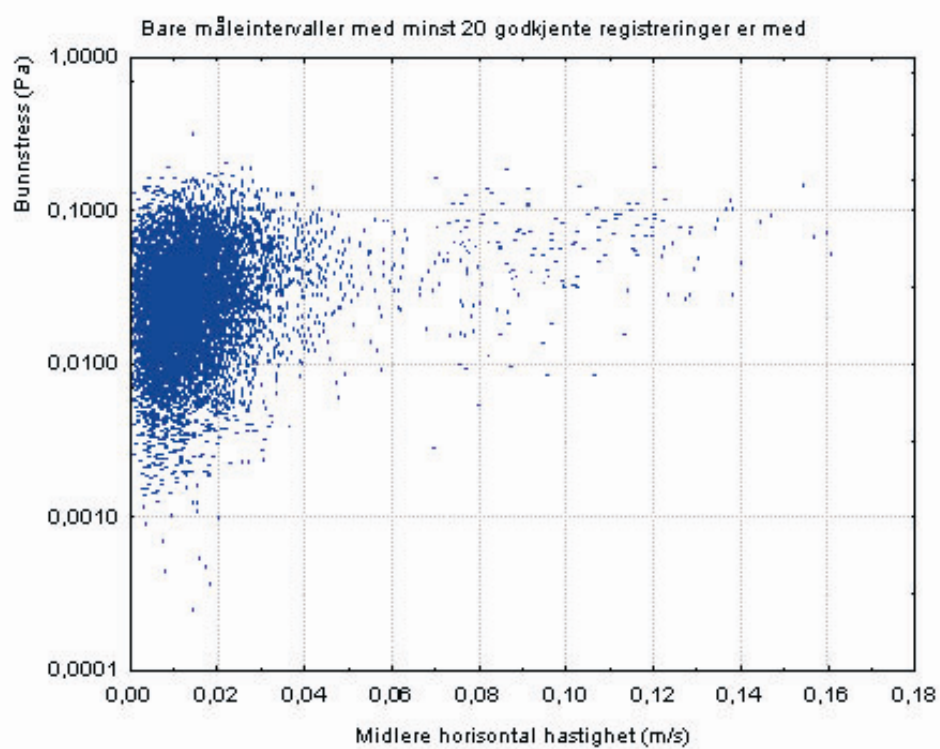
Figur 18 viser beregnet bunnstress for hvert hele døgn. I alle døgn er 90 % av verdiene under 0.1 Pa, og bare en eneste ekstremverdi overstiger 0.2 Pa. **Figur 19** viser beregnet bunnstress som funksjon av horisontal hastighet midlet over 5 sekunder. I følge denne figuren gir høyere hastigheter ikke høyere maksimalverdier for bunnstress, men mindre forekomst av lave bunnstressverdier. **Figur 20** viser kumulativ fordeling av bunnstress ved tre ulike intervaller av horisontal hastighet, begge deler som middelverdier over 5 sekunders måleperioder. Det er lite trolig at de strømhastighetene som ble målt under innstrømningen skal gi særlig resuspensjon av sedimenter, selv om det ikke helt kan utelukkes.

* Med hastigheter i m/s og tetthet $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$, får verdiene for stress enheten Newton/m² som også kalles Pascal (Pa).

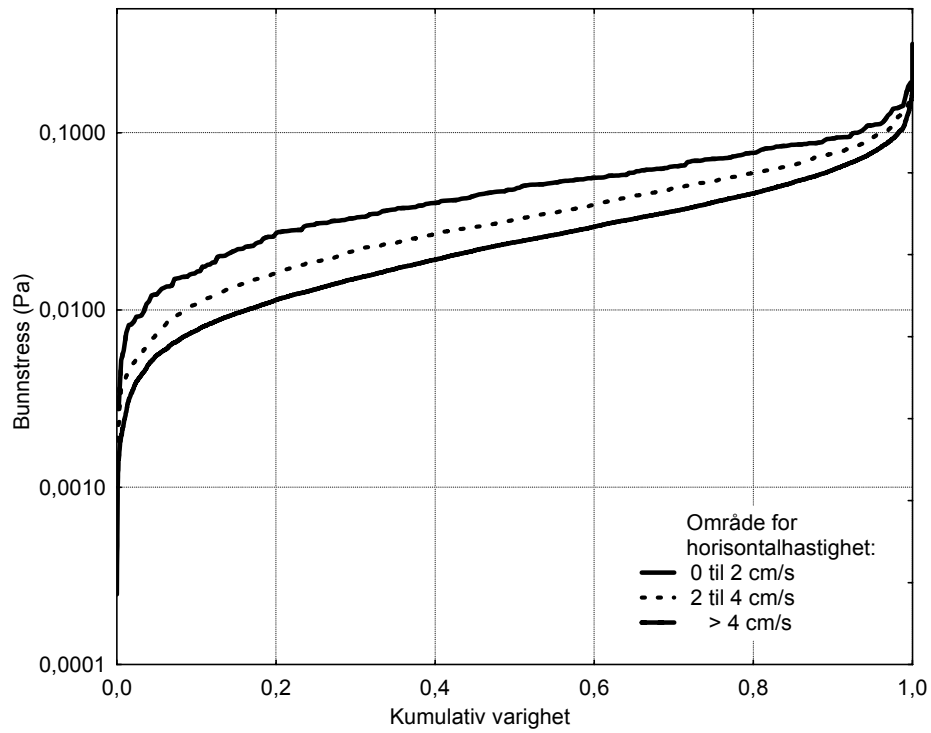
En sikkerhetsmargin for denne konklusjonen ligger i at målerne var plassert i et område (i utkanten av deponiområdet) hvor strømhastigheten skal være større enn i det planlagte deponiområdet.



Figur 18. Fordeling av beregnet bunnstress som funksjon av tid.



Figur 19. Bunnstress mot gjennomsnittlig strømhastighet



Figur 20. Fordeling av bunnstress i tre områder for horisontalhastighet, med tilpasning til ekstremfordeling.

5. Konklusjoner

Strømmålere plassert nær bunnen i Bekkelagsbassenget viste lave strømhastigheter under en dypvannsfornyelse som fant sted i februar-april 2005. Dette til tross for at dypvannsfornyelsen var uvanlig stor og effektiv og omfattet hele indre Oslofjord. I Bunnefjorden ble til eksempel det hydrogensulfidholdige dypvannet skiftet ut helt ned til bunn (ca. 150 m), noe som bare skjer hvert 3-4 år.

Midlere strømhastigheter, ca 2 meter over bunn, under dypvannsfornyelsen i Bekkelagsbassenget varierte omkring 2-3 cm/s, med enkelte verdier opp mot 8 cm/s. For 90 % av observasjonene var hastigheten lavere enn 6 cm/s.

En måler som var plassert 1 m over bunnen for å registrere turbulens direkte, målte strøm 8 ganger pr sekund over 5 sekunders perioder som ble gjentatt med 3 minutters mellomrom. Gjennomsnittshastigheter over 5 sekunder var innenfor 2-3 cm/s i det meste av tiden, og med maksimumsverdier på ca. 5 cm/s.

Sannsynligheten for oppvirvling av sediment kan vurderes i forhold til størrelsen av bunnstresset som genereres av strømmen. Bunnstresset er beregnet til å variere mellom 0.001 og 0.2 Pascal (N/m^2). I perioden med store gjennomsnittshastigheter varierte stresset fra 0.05 til 0.2 Pa. Generelt viste svært få registreringer et bunnstress større enn 0.1 Pascal.

Ut fra tilgjengelig litteratur om resuspensjonsforsøk ligger grenseverdien for oppvirvling av relativt lett sediment med stort vanninnhold (tetthet 1.1 kg/liter) mellom 0.1 og 1 Pa. De laveste verdiene er funnet i ferskvann, og noen resultater viser at sedimenter i sjøvann er mer stabile. Det er derfor lite sannsynlig at de strømhastighetene som ble målt under innstrømningen kan føre til oppvirvling av sedimenter, selv om det ikke helt kan utelukkes. Dertil må en ta i betraktning at målerne var plassert i et område (i utkanten av deponiområdet) der innstrømninger over terskelen vil føre til større strømhastighet enn sentrale deler av deponiområdet.

Hovedkonklusjonen er dermed at det er liten sannsynlighet for oppvirvling av sedimenter i deponiområdet, selv i år med stor dypvannsfornyelse.

Lekkasje i en av strømmålerne medfører en viss (unødvendig) usikkerhet i datagrunnlaget.

6. Litteratur

Bjerkeng, B. og Molvær, J., 2002. Oppvirvling og spredning av forurenset sediment på grunn av skipstrafikk. Litteraturstudium og feltundersøkelser i Kristiansand havn. SFT-rapport TA 1869/2002, NIVA-rapport 4545.

Magnusson, J., 2002. Dypvannsfornyelser i Bekkelagsbassenget. Norsk institutt for vannforskning. Notat av 15.11.2002. O-21369.

Magnusson, J., Andersen, T., Amundsen, R., Berge, J.A., Bjerkeng, B., Gjørøster, J., Johnsen, T., Lømsland E.R., Paulsen, Ø., Schøyen, M., 2005. Overvåking av forurensnings situasjonen i indre Oslofjord 2004. Norsk institutt for vannforskning. Rapport nr. 5024.

Oslo havnevesen, 2001. Konsekvensutredning, PBL. §33-2. Dypvannsdeponi for forurenset bunnsediment ved Mamløykalven, Oslo havnedistrikt.

Skei, J., Magnusson, J., Eek, Espen., Eggen, A., Hauge, A., 1999. Strømundersøkelser og sedimentkvalitet i dypbassenget vest for Malmøykalven, Indre Oslofjord. Norsk institutt for vannforskning og Norges geotekniske institutt. NIVA-rapport nr. 4019.

Vedlegg A. Strømmåler nr. 4: metodikk og databehandling

Måleprinsippet

Strømmåleren bruker Doppler-prinsippet til beregning av strømhastighet og retning (Nortek 2000). Lydpulser sendes ut i en retning, og ekkoet fra partiklene i et lite målevolum (noen få cm³) fanges opp av sensorer som står rettet på skrå inn mot målevolumet i tre forskjellige retninger. Dette brukes til å beregne 3-dimensjonal hastighet. Signalstyrken i ekkoet er et halvkvantitativt mål for partikkelmengden (ulike typer partikler kan gi ulikt ekko). Fordi alle de tre strålene fanger opp ekko fra det samme lille målevolumet, kan den måle over svært korte intervaller. Målehyppigheten kan varieres fra 1 til 64 Hz (ganger pr sekund) ved kontinuerlig måling. Den kan også innstilles på å måle med en slik frekvens over et kortere tidsrom, med en lengre pause mellom hvert måletidsrom ("Burst"-måling). Måleren registrerer også kompassretning, helning og trykk*.

Instrumentet består av et målehus med datalogger og sensorer for registrering av kompassretning og helning, og en måleprobe forbundet til målehuset med en kabel slik at den kan plasseres fritt i forhold til målehuset. Det ble satt ut montert i en rigg som sto fast plassert på bunnen på ca. 65 m dyp[†]. Målehuset var plassert normalt med kabel til proben rettet nedover med proben rettet oppover, slik at den målte strømmen ca. 15 cm over toppen av riggen, ca. 1 m over bunnen. Strømdata ble logget i XYZ-koordinater, dvs. i et koordinatsystem relativt til måleproben, med proben rotert 180° rundt X-retning i forhold til standard plassering beskrevet i instrumentmanualen. Strømkomponentene ble etterpå konvertert til geografiske koordinater (ENU: East-North-Up) ut fra registreringene av kompassretning og helning.

Måleren var stilt inn til å måle i "burst" modus med frekvens 8 Hz over korte intervaller på 5 sekunder og med opphold på 3 minutter mellom hver måleperiode. På den måten ga den et bilde av kortperiodiske fluktuasjoner i strømmen, samtidig som batterikapasiteten holder til målinger over mer enn en måned.

Innlesing, filtrering og korreksjon av data

Etter at måleren var tatt opp var det umulig å få kontakt med loggeren for å lese ut registrerte data. Den ble levert til Nortek, som oppdaget at årsaken var at det hadde trengt vann inn i måleren. Nortek greide likevel å hente ut data fra loggeren. Det viste seg at den hadde registrert data fra den ble startet 23. februar kl. 15:00:01 frem til 27. februar kl. 07:21:06. Så var det et opphold i dataloggingen på mer enn en uke til 6. mars kl. 18:36:06; deretter ble data logget normalt til 5. april kl. 15:36:02, da minnekapasiteten var fylt opp.

Pga. vanninntregning har måleren ikke fungert helt som den skulle. Det gjelder særlig trykk og temperatur, men også strømmålingene viser en del store utslag med et mønster som tyder på instrumentfeil.

Temperaturen viste 9.85 °C i ca. 3 timer etter utsetting, men begynte å fluktuere sterkt fra kl. 14:39, og viser deretter unormale forløp gjennom hele serien. Trykket og retningsdata viste at målerriggen ble satt på bunnen på 64.4. m dyp 24. februar kl. 10:18 med kompassretning 50° på bunn med ca. 8° helning. Retningene holdt seg omtrent konstante frem til kl. 13:54, men deretter begynte både kompassretning og helningsmål å variere litt frem og tilbake. Omtrent samtidig begynte også registrert

* Måleren registrerer også temperatur, men det er bare intern måling i instrumentet til bruk ved prosessering av signaler, og gir ikke temperatur i vannet omkring.

[†] I følge registreringer i starten av måleserien, se nedenfor.

trykk å fluktuere, og sank mot 20 m mot slutten av serien. Alle disse fluktuasjonene antas å henge sammen med vanninntrengningen, som har gitt problemer med elektronikken.

Ca. 99 % av de horisontale strømshastighetene ligger innenfor 0.15 m/s i absoluttverdi, mens tilsvarende andel av vertikale hastigheter har absoluttverdier innenfor 0.05 m/s, men det forekommer noen helt urimelig høye verdier på opp i 2 m/s for horisontal strøm og 0.35 m/s for vertikal strøm. Nærmere inspeksjon av en del måleperioder viser at slike verdier forekommer som isolerte registreringer av svært høy hastigheter i enkeltmålinger, mens resten av målingene ligger i et normalt intervall.

Hver registrering av strøm inkluderer signal-støyforhold (SNR) og korrelasjon for de tre lydretningene som registreres i tillegg til selve strømkomponentene. Hvis SNR og korrelasjon er lave bør målingen i følge Nortek filtreres vekk, da resultatene i så fall er upålitelige. Hvis vertikal strømshastighet er høy, vil ikke horisontal dekomponering være riktig. Strømshastighet vil fortsatt være riktig, men retningen er ikke pålitelig.

I et forsøk på å hente ut brukbare data er enkeltmålinger av strøm filtrert ut fra et sett test-kriterier, basert på rådene fra Nortek og etter visuell inspeksjon av data. Målinger lukes ut hvis det for noen av de primære måleretningene er signal/støy-forhold <2 , eller hvis korrelasjonen er <50 . *Med dette settet av kriterier godtas 363005 registreringer av totalt 555004 (65%), og første måleperiode som har godkjente data er rett etter at måleren satt på bunnen i følge trykk- og retningssensorene (se nedenfor).* Disse kriteriene viser seg meget effektive i å fjerne registreringer med unormalt store strømshastigheter. I tillegg legges det inn som selvstendig kriterium at absoluttverdi av horisontale strømkomponentene skal være ≤ 0.2 m/s og absoluttverdi av vertikal strøm ≤ 0.1 m/s, men det fjerner bare 12 registreringer i tillegg. Etter filtrering har bare ca. 25 % av måleperiodene (bursts) fullt sett av 40 aksepterte registreringer, mens ca. 50 % av intervallene har 36 eller flere registreringer. Det gjøres også et utvalg etter tidspunkt, idet bare data fra og med 24. februar kl. 10:20, etter at måleren var plassert på bunnen, inkluderes.

I beregning av strømshastighetene inngår lydshastighet i vann og regnes ut ved hjelp av temperatur. Siden temperatur har sviktet, blir dette ikke helt korrekt. Beregnet lydshastighet varierer fra 1423 til 1561 m/s. Strømdata kunne korrigeres ved å dele på logget (beregnet) lydshastighet og multiplisere med en mer pålitelig konstant lydshastighet hentet fra starten av serien, men det betyr ikke mye, og er ikke gjort her.

Konvertering og beregning av statistikk

Konvertering til geografiske koordinatretninger

Etter at data er filtrert på denne måten konverteres strømmen fra XYZ-koordinater til geografiske koordinater ENU (East North Up) ved å bruke data for kompassretning og helning fra instrumentet. Ved konverteringen tas det hensyn til at proben er snudd i forhold til målehuset. Det er valgt å bruke en konstant kompassretning på 50° , som ble registrert helt i starten av måleserien, til å transformere alle data, mens helningen er hentet fra datafilen og varierer litt gjennom serien – det gir små virkninger i forhold til å bruke konstante helningsverdier.

Akkumulering av statistikk for hver måleperiode

For hver burst akkumuleres så på filtrerte data en del statistiske mål som forberedelse til å beregne turbulens og bunnstress. I det følgende betegner U_i strømshastighet, med retning $i = \text{Øst, Nord, Opp}$, mens k er godkjent registrering nr. innenfor måleperioden.

Følgende statistiske mål beregnes for hver måleperiode:

- Antall godkjente registreringer N (vil variere fra burst til burst)
- Gjennomsnittlig østlig, nordlig og vertikal oppadrettet strøm:

$$\bar{U}_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_{i,k} \quad , i=\text{Øst, Nord, Opp}$$

- Gjennomsnitt av alle 2.ordens ledd for strømhastighet:

$$\bar{W}_{i,j} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_{i,k} U_{j,k} \quad , i,j=\text{Øst, Nord, Opp}$$

- Gjennomsnitt av signalstyrke og signal/støy-forhold.

På grunnlag av dette beregnes bunnstress som beskrevet i kapittel 4.

Vektorielt gjennomsnitt av midlere horisontale strømhastigheter beregnes som:

$$U = \sqrt{\bar{U}_{\text{Nord}}^2 + \bar{U}_{\text{Øst}}^2}$$