

**Oppvirvling og spredning av forurenset sediment på grunn av
skipstrafikk**

Litteraturstudium og feltundersøkelser i Kristiansand havn

Forord

SFT inviterte i 2001 utvalgte miljøer til å foreslå prosjekter for å innhente kunnskap og erfaring fra arbeid med forurensete sedimenter i ulike områder. Fylkesmannen i Vest-Agder ble tildelt midler til et prosjekt om oppvirvling av forurensete sedimenter på grunn av skipstrafikk.

Den foreliggende rapporten beskriver resultatet av et litteraturstudium på erosjon og oppvirvling av sedimenter på grunn av skipstrafikk, samt feltarbeid som ble utført i Kristiansand havn høsten 2001 for å måle slik oppvirvling og spredning. Formålet med arbeidet har vært å beskrive hvilken betydning oppvirvling av forurensete havnesedimenter har for miljøgiftsituasjonen i Kristiansandsfjorden, men det gir også forbedret grunnlag for å vurdere problemet i andre havner. Arbeidet er utført av NIVA på oppdrag fra Fylkesmannen i Vest-Agder. Rapporten er forfattet av Birger Bjerkeng og Jarle Molvær ved NIVA.

SFT, Oslo, mai 2002

Trond Syversen
Assisterende SFT-direktør

Innhold

Sammendrag	6
1. Innledning	13
2. Formål	14
3. Angrepsmåte, og omfang og gjennomføring	15
4. Materiale og metoder	17
4.1 Grunnlag for litteraturstudiet	17
4.2 Beskrivelse av området - topografi og sedimentforhold	17
4.3 Data om vannmassene i Kristiansand havn.....	19
4.3.1 Strømforhold og oppholdstid	19
4.3.2 Tetthetssjiktning - trykkforhold	19
4.4 Skipstrafikken i Kristiansand havn	20
4.5 Feltarbeid i oktober 2001	20
4.5.1 Meteorologiske data i måleperioden	22
4.5.2 Instrumenter	22
4.5.3 Vannprøver.....	25
5. Litteraturstudium - Sedimenterosjon	26
5.1 Generelt om erosjon og oppvirvling av sedimenter pga. strøm og bølge-påvirkning	26
5.2 Sedimenters motstand mot erosjon	27
5.2.1 Kritisk skjærspenning for partikler i ikke-koheasive sedimenter - Shields kurve.	27
5.2.2 Kritisk skjærspenning av koheasive sedimenter	29
5.3 Sammenheng mellom skjærspenning og strømhastighet	32
5.4 Erosjonsstabilitet angitt direkte som kritisk strømhastighet eller turbulensnivå over bunn.....	34
5.5 Oppsummering	35
6. Strøm og turbulens fra skipstrafikk	38
6.1 Propellstrøm	38
6.1.1 Impuls og energi-betraktninger for strøm gjennom propell.....	39
6.1.2 Vannjet	42
6.1.3 Beregning av fri turbulent stråle etter propell eller vannjet.	43
6.2 Innsuging mot propell	46
6.3 Strømning rundt skip i bevegelse	47
7. Direkte målinger av oppvirvling av sedimenter pga. skipstrafikk	48
7.1 Målinger ved skipsmanøvrering i Oslo havn	48
7.2 Måling ved skips-passering i Buffalo River, New York.....	49
7.3 Måling av partikkeloppvirvling pga. vind og skipstrafikk i Duluth-Superior Havn..	49
7.4 Målinger i Hamilton havn, Lake Ontario	50
7.5 Virkning av skip på sedimenter i Kanawha River, West Virginia, U.S.A.	51
7.6 Oppvirvling og sediment-transport i forbindelse med skipsbevegelser ved marinestasjonen San Diego, USA.	51
7.7 Måling av miljøeffekter av passasjerfartøy i skjærgården på Åland i Østersjøen	52
7.8 Oppsummering av tidligere målinger beskrevet i litteraturen	52

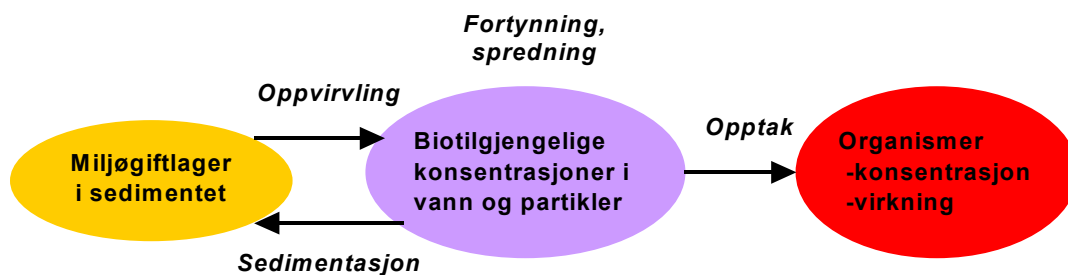
8.	Beregninger ut fra sedimentdata og litteraturstudium	53
8.1	Variasjon i sedimentegenskaper i Kristiansand havn	53
8.1.1	Sammenheng mellom ulike sedimentegenskaper	53
8.1.2	Beregning av sediment-tetthet	54
8.1.3	Sammensetning av finfraksjon for utvalgte sedimentprøver	56
8.2	Betydning av lagdeling i vannmassene for påvirkning fra propellstrøm	56
8.3	Vurdering av erosivitet/stabilitet for sedimentene i Kristiansand havn	57
8.4	Oppvirvling ved reversering av hovedpropell fra større skip	61
8.5	Konklusjoner	62
9.	Feltarbeidet i oktober 2001	63
9.1	Meteorologiske data	63
9.2	Oversikt over skipsanløp i måleperioden	64
9.3	Målinger ved Elkems kai	65
9.3.1	Selvregistrerende instrumenter	66
9.3.2	Måling ved båtanløp 11.10 2001	71
9.4	Målinger ved fergekai 11. oktober 2001	77
9.5	Målinger ved Falconbridge 11. til 30. oktober	81
9.5.1	Opplysninger om eksisterende utslipp fra Falconbridge	81
9.5.2	Selvregistrerende instrumenter	81
9.5.3	Måling ved båtanløp 12.10 2001	91
9.5.4	Måling ved båtagang 13.10 2001	103
9.5.5	Båtanløp 16.-28. oktober	106
9.5.6	Målinger ved båtanløp til Falconbridgekaien av <i>Sark Trader</i> 29. oktober	106
9.5.7	Målinger ved anløp av Lake Charles 30. oktober	110
10.	Sammenfattende vurderinger	119
10.1	Generelt	119
10.2	Elkemkaia	119
10.3	Fergehavna	120
10.4	Falconbridge	120
11.	Anbefalinger	123
11.1	Anbefalinger mht tiltak	123
11.2	Anbefalinger for senere undersøkelser	123
12.	Litteratur	125
Vedlegg 1. Sediment-tetthet og kornfordeling i Kristiansand havn		128
Vedlegg 2. Statistikk for skipstrafikk til Kristiansand havn		131
Vedlegg 3. Tekniske data om skip som trafikkerer Kristiansand havn		133
Vedlegg 4. Analysemetoder for vannprøver		136
Vedlegg 5. Analyseresultater for vannprøver		137
Vedlegg 6. Primærbearbeiding av data fra RCM9, ADP og CTD		139
Vedlegg 7. Bearbeiding av dyp-profiler fra NORTEK vektormåler (11.-12. oktober)		140

**Vedlegg 8. Bearbeiding av data fra vektormåleren satt ut i rigg på bunnen
(Falconbridge 12-30 oktober) - forstyrrelse av magnetfeltet 143**

Sammendrag

Mange miljøgifter har en utpreget tendens til å bindes til partikler og danne forurensete bunnsedimenter. Slike bunnsedimenter er et av våre største gjenværende lokale og nasjonale miljøproblem (SFT, 2000). Grunnen til dette er at de forurensete sedimentene kan frigjøre miljøgifter både gjennom oppvirvling og spredning, ved "utlekking" og gjennom akkumulering i sedimentlevende organismer som igjen kan være føde for fisk og skalldyr av konsummessig viktighet. Havneområder er i særlig fokus i den sammenheng. Områdene har gjennom årene blitt tilført miljøgifter ved utslipp fra mangeartede industri, fra befolkning, samt ved avrenning fra landarealer, samtidig som områdene ligger skjermet med begrenset vannutskiftning. Sedimentene i havneområdene utsettes ofte for sterk erosjon knyttet til skipsbevegelser, slik at partikler virvles opp i vannmassen. Siden sedimentlageret av miljøgifter ofte er stort, kan påvirkningen vedvare i lang tid selv om de direkte utslippene er stoppet eller redusert, og dette kan hindre den forventede forbedringen i området, og gi videre spredning over større områder.

Viktige prosesser knyttet til oppvirvling av forurensete sedimenter kan oppsummeres i figuren under:



Det er sparsomt med data som belyser viktigheten av sedimentoppvirvling i forurensningssammenheng. Dette prosjektet er derfor gjennomført for å begynne arbeidet med å fylle dette kunnskapshullet.

Prosjektet har hatt som formål å skalere problemet med oppvirvling av forurensete sedimenter pga. skipstrafikk, med Kristiansandsområdet som studieområde. Prosjektet tar sikte på å kartlegge hvilke områder som er mest utsatt for oppvirvling av sedimenter og kvantifisere grad av oppvirvling og grad av spredning av partikler (influensområdets størrelse, mengde av partikler).

Prosjektet omfatter:

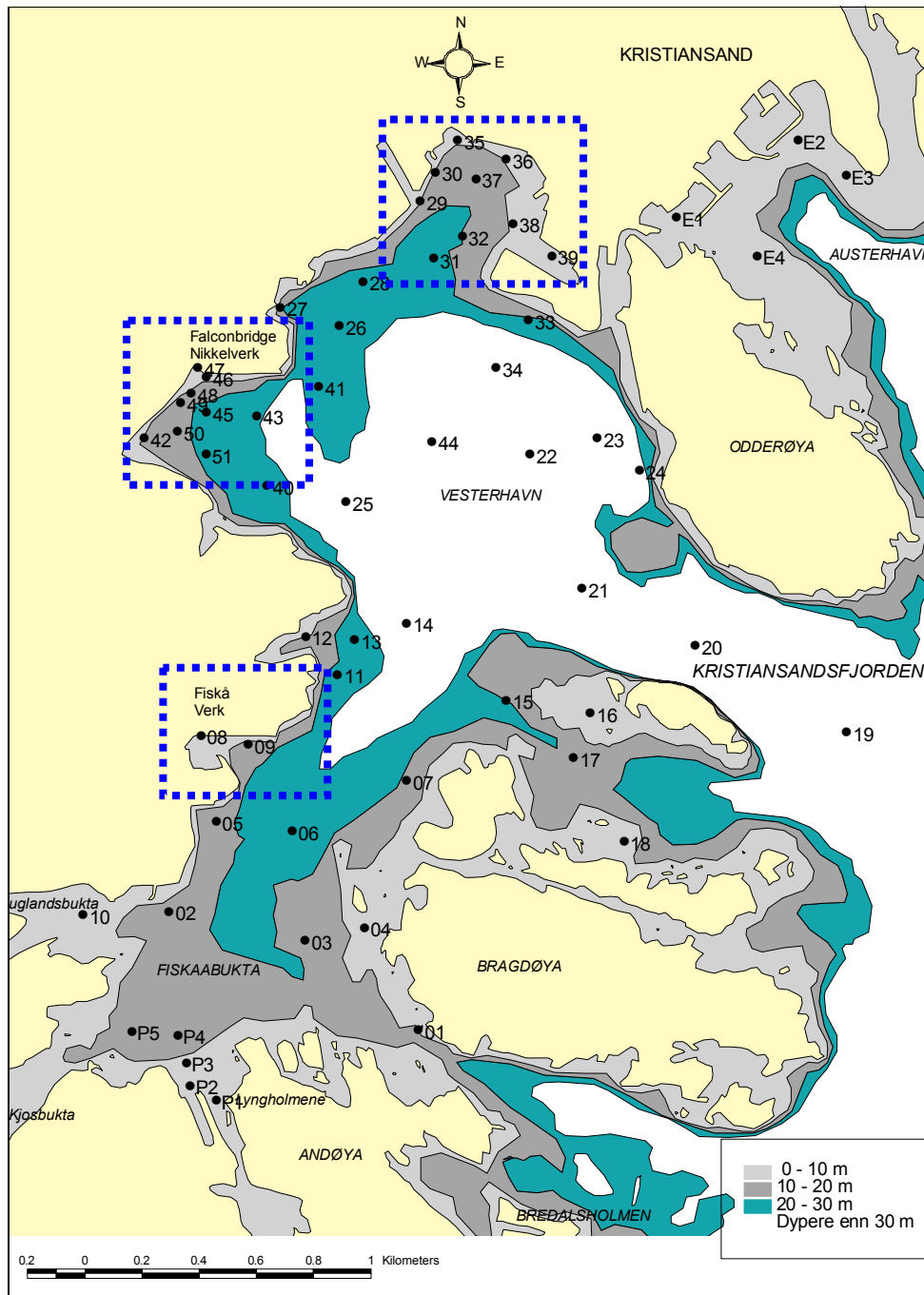
1. En systematisk litteraturgjennomgang knyttet til resultater fra feltmålinger, eksperimenter, beregningsmetoder og modellbeskrivelser når det gjelder erosjon av sedimenter, både generelt og knyttet til skipstrafikk.
2. Feltnålinger i Kristiansandsfjorden for å:
 - a. Gi generell kunnskap om oppvirvling av forurensete sedimenter fra skipstrafikk
 - b. Fremskaffe faktisk kunnskap om oppvirvling av forurensete bunnsedimenter fra skipstrafikk i Vesterhavna spesielt
 - c. Gi nødvendige data til kalibrering og etterprøving av modeller.

På bakgrunn av feltnålingene er det gjort anslag for hvor mye partikler som virvles opp ved utvalgte skipsanløp i Vesterhavna i Kristiansand. Det er vurdert hva dette betyr sammenlignet

med andre årsaker til forhøyet partikkelinnhold i vannmassene, slik som variasjon i vindstyrke eller avrenning fra land.

Kristiansandsfjorden (Vesterhavn) er valgt fordi dette er et område med sterkt forurensete bunnsedimenter og hvor de i disse dager planlegges og gjennomføres tiltak. Det er også gjennomført risikovurderinger knyttet til de forurensete sedimentene som må sees i sammenheng med foreliggende prosjekt.

Feltmålingene i Vesterhavn omfatter havneområdet til Elkem ASA (Fiskå verk) og Falconbridge Nikkelverk A/S, samt det nordlige havneområdet.



Litteraturstudiet

Litteraturstudiet oppsummerer generell kunnskap fra litteratur om erosjon og oppvirvling av sedimenter pga. strøm, turbulens og bølger, og om hvordan strøm og turbulens genereres av skipstrafikk. Dette kombineres med konkrete data for Kristiansand havn mht. sedimentenes miljøgiftinnhold og sammensetning, skipstrafikken samt tekniske data om skipene, strøm- og utskiftningsforhold langs havnestrekningene, og data om salt, temperatur og tetthetsprofiler i Vesterhavna. Ut fra dette er det gjort en vurdering av hvilke områder av havna som er mest utsatt for erosjon og oppvirvling.

Kohesive sedimenter (med stort innslag av fine partikler bundet sammen av vedhengskrefter) har større motstand mot oppvirvling enn for tilsvarende løse partikler. Målt kritisk friksjon eller skjærspenning, dvs. den minste kraften som skal til for å rive løs partikler, varierer fra 0.1 til 5 Pa^{*}. Sediment-tettheten kan generelt variere mye, først og fremst som funksjon av vanninnholdet. En del eksperimentelle resultater tyder på at de kreftene som skal til for å erodere sedimentet er proporsjonale med tetthetsforskjellen mellom vann og sediment, men med en koeffisient som kan variere iallfall med en faktor 10 avhengig av sedimentegenskaper. Noen undersøkelser viser at sedimenter som består av en blanding av leire/silt og sand har vesentlig større erosjonsmotstand enn både rent fint sediment og ren sand. Noen resultater viser også at stabiliteten øker med saltholdighet. Det er imidlertid stor variasjon i resultater i forhold til slike enkle sammenhenger, og derfor ikke mulig å sette opp gode modellbeskrivelser av erosjonsmotstand som funksjon av enkle sedimentegenskaper på dette grunnlaget.

Økt erosjonsmotstand med saltholdighet kan stemme med tidligere feltmålinger knyttet til skipsbevegelser, hvor det i ferskvann er observert partikkelkonsentrasjoner på 100-300 mg/l, i sjøvann fra 1 til 5 mg/l, og i Østersjøen, som har lav saltholdighet ca. 30 mg/l. Det er for få resultater til å si sikkert om dette virkelig er en effekt av saltinnhold.

De erosjonskreftene sedimentet utsettes for, er forårsaket av strøm og turbulens ved bunnen, og vil generelt øke med kvadratet av typisk hastighet nær bunnen. Påvirkning fra skipstrafikk kan skje i vannstrømmen ut fra propeller, når strålen river med seg omkringliggende vannmasser og vokser i omkrets, slik at nedre del av strålen når ned mot bunnen. Det kan også tenkes i forbindelse med innsuget til propellen, når skip ligger omtrent stille og bruker propellen kraftig. Da kan det være vanskelig å forutsi hvordan virkningen blir; det kan oppstå konsentrerte strålerør som står mot bunnen og gir kraftig erosjon. Endelig kan en tenkes seg at kompensasjonsstrømmer pga. skipets bevegelser i trange eller grunn farvann kan gi strøm langs bunnen som påvirker sedimentene.

Det ser ut til at skjærspenningen ved samme midlere hastighet er høyere for turbulente propellstråler, hvor turbulensen genereres av store hastighetsforskjeller i vannet, enn for bunnstrøm med turbulens pga. friksjon mot bunnen.

Ved å kombinere eksperimentelle resultater for kritisk turbulent friksjon med sammenhenger mellom friksjon og strømhastighet, kan det anslås at fine sedimenter typisk vil virvles opp når hastigheten overstiger 0.1 til 1 m/s. Den konkrete grenseverdien i hvert tilfelle vil avhenge av

* 1 Pascal= 1 Newton/m²

sedimentegenskaper og type strøm. En må regne med at påvirkning fra skipstrafikk ofte gir større strømhastigheter enn dette.

Spesielt ved reversering av propell når skip legger til kai, hvor propellstrømmen går inn under skipet i et begrenset tverrsnitt mellom skipet og bunnen, må det antas å bli kraftig påvirkning på bunnen. Det er f.eks. anslått at større skip (20-40 000 tonn) med dypgang 10 m om reverserer hovedpropellen og sender propellstrømmen inn under skipet kan antagelig gi bunnstrømmer på 6 m/s over bunnområder på ca. 15 m dyp.

En kan ut fra dette ikke si sikkert at sedimentene noe sted i havneområdet er stabile mot erosjon fra de påvirkninger en må regne. I det offentlige havneområdet i nord er sedimentene relativt stabile i forhold til mindre båter, men kan eroderes av de største skipene som trafikkerer der, bl.a. de store fergene. Ved industri kaiene er sedimentene lettere, bare ca. 10-20 % tyngre enn vann, og antagelig mer utsatt for oppvirvling også av mindre båter. Siden bruk av propeller ved manøvrering kan være avhengig av vind og strøm, kan det tenkes at vindpåvirkning også vil medføre spesielt sterk påvirkning fra skipspropeller, slik at det blir en direkte kobling mellom de to typene påvirkning, som kan øke betydningen av en slik interaksjon.

Feltmålingene i Kristiansand havn

Feltundersøkelsene i oktober 2001 var konsentrert om områdene utenfor Falconbridge Nikkelverks hovedkai i Vesterhavn, og utenfor Elkem ASAs hovedkai i Fiskaabukta. Begge steder er det relativt grunt, og bunnsedimentene er sterkt forurenset, og det anses derfor å være en klar risiko for oppvirvling av miljøgifter pga. skipsanløp. Det ble også gjort noen målinger ved ferjeleiet i Vesterhavns nordøstre del. Det meste av feltarbeidet ble gjennomført utenfor hovedkaia til Falconbridge, fordi dette var av spesiell interesse i forbindelse med planlegging av tiltak.

Når skipene legger til kai vil deres bevegelsesmengde overføres til vannet som en bevegelse videre innover, dvs. i motsatt retning av den skipet kom fra. Ved avgang vil båtens propell måtte skyve vann i motsatt retning av den retningen båten går i, dvs. også da innover i kaiområdet. For Elkem og Falconbridge vil det si vestover inn i de to buktene, og for fergepiren nordvestover mot de innerste områdene ved piren.

Stort sett vil derfor oppvirvling fra skipstrafikk til kaier i disse områdene kunne gi en transport av partikler innover i områdene, men også en spredning på tvers ut fra kaia. Det gjelder spesielt for anløp til industri kaiene assistert av taubåt, som kan gi en sekundær spredning utover fra kaia.

Feltmålingene ved industri kaiene viste sterk oppvirvling lokalt rundt kaia, i en kort periode etter anløp og avgang av store båter, men det var ingen generell og langvarig økning av partikkelmengden i vannet i et større område etter skipsbevegelser.

Elkemkaia

Målingene fra de selvregistrerende instrumentene som var plassert langs kaia viste ingen utslag i strøm eller partikkelstyrke som kan settes i forbindelse med skipsanløp, dvs. at den har vært så kortvarig og lokal at den ikke ble registrert av målerne (tidsoppløsning 5 og 20 minutter). Partikkelinnholdet varierte, men ikke spesielt knyttet til skipsbevegelser.

Ved anløpet av en mindre båt ble det direkte observert og målt oppvirvling av partikler i den indre del av bukta da båten reverserte hovedpropellen etter å ha bakkert inn langs kaia. Det kan

anslås at i størrelsesorden 100 kg partikler ble virvlet opp ved dette båtanløpet. Hvis en går ut fra en anløpsfrekvens på ca. 40 pr. år, og samme oppvirvling hver gang, gir det samlet 4 tonn partikler pr. år, eller ca. 8 m³ vått sediment, hvis det antas et partikkelinnhold på ca. 0.5 kg pr. liter i sedimentet. Fordelt på en sedimentflate på 10*200 meter (forskjellige anløpssteder langs kai) gir det en akkumulert erodert tykkelse på 0.4 cm/år. Et bidrag fra containerbåtene vil komme i tillegg.

Fergehavna

Målingene her viste omtrent dobbelt så stort partikkelinnhold i hele vannsøylen som ved en tilsvarende måling utenfor Falconbridge omtrent samtidig. Den mest rimelige forklaringen på dette er at det skyldes akkumulert virkning av skipsbevegelser i løpet av foregående timer. Det ble påvist høyt partikkelinnhold i propellstrømmen fra baugpropellene ved en fergeavgang, men ingen særlig økning av partikkelinnhold rundt fergepiren ellers, hverken ved denne avgangen eller ved et senere anløp.

Falconbridgekaia

Her ble det observert betydelig oppvirvling av partikler i en ganske kort periode rett etter anløp og avgang av to store båter, med dypgang ca. 10 meter og hvor taubåt assisterte ved anløpene. Høyt innhold av partikler ble målt på 15-19 m dyp sammen med kraftige strømmer (opp mot 0.5 m/s) ca. 10-20 m sør for skipssiden, ved baugen og ut for midten av skipet. Det antas at dette skyldes oppvirvling pga. reversering av hovedpropellen ved oppbaking, hvor strømhastigheter i propellstrømmen under skipet anslås å kunne komme opp mot 6 m/s over en bunn på ca. 15 m. Det må antas å gi en partikkelsky som er konsentrert under båten og etterhvert spres videre utover. Direkte feltmålinger fra båt ble bare gjort ved anløp av disse skipene. Med båten liggende ved kai etter anløpet begrenses muligheten til å kartlegge en slik sky. Det ville lettere kunne gjøres etter en skipsavgang.

Taubåtene som skjøv skipene inn mot kai, spesielt inne ved baugen av skipet, bidro til å spre forurensete sedimenter sørover fra kaiområdet ved at taubåten trakk inn vann med partikler i sin propellstrøm. Bruk av baugpropell må antas å kunne gi samme effekt. Partikkelskyene viste en tendens til å akkumuleres i den vestlige del av bukta. Det så ikke ut til at taubåtene forårsaket noe oppvirvling av sedimenter lenger ute i Hanneviksbukta.

Ved anløp av en mindre båt ble det observert høy turbiditet i skarpt avgrensede sjikt i et par punkter sør og sørøst for båten ca. 1 time etterpå, men målingene utgjør ikke noe sammenhengende bilde av en partikkelsky, og det er ikke sikkert grunnlag for å si om det skyldes oppvirvling fra skipsanløpet, eller om det kan ha med eksisterende utslipp å gjøre.

I ettertid er det blitt klart at det finnes flere utslipp fra bedriften i kaiområdet. Når det gjelder partikkelinnholdet i vannet generelt, er det klart at det delvis henger sammen med disse utslippene. Noen registreringer av moderat forhøyet partikkelinnhold i avgrensede områder og dypintervaller ser ut til å skyldes slike utslipp. Det er funnet visse tegn til at vind og nedbør kan ha betydning, men det er ikke påvist helt klare sammenhenger; påvirkningen fra de eksisterende utslippene kan ha kamuflert dette. Resultatene gir ikke noe godt grunnlag for å kvantifisere betydningen av ulike faktorer.

Når det gjelder mengden av partikler som virvles opp og spres pga. slike båtanløp, har vi bare et ufullstendig grunnlag for å anslå dette.

Mengden som ble spredd av taubåten ved anløp av de store skipene kan estimeres ut fra målte konsentrasjoner i propellstrømmen etter taubåten til en samlet partikkelmengde på ca. 100 kg. Et alternativt estimat, basert på partikkelkonsentrasjon og utbredelse av skyen av partikkelholdig vann ca. 1 time etter at taubåten var ferdig, gir et anslag på 180 kg partikler. Den mengden som ble spredt utover kan ha vært en del større. Hvis oppvirvlet mengde anslås til opptil 400 kg partikler samlet for anløp og avgang, vil dagens anløpsfrekvens på ett til to anløp i måneden av store båter (15 - 45 000 tonn) bety en akkumulert oppvirvlet mengde på 5 til 10 tonn partikler pr. år. Hvis det regnes med en viss oppvirvling, f.eks. ca. 100 kg partikler, også ved hvert av de ca. 40 anløp av mindre båter pr. år, kan den totale mengden bli opp mot 10 til 15 tonn partikler pr. år.

Med et gjennomsnittlig nikkelinhold på 5000 µg/g gir det totalt en oppvirvlet nikkelmengde på ca. ca. 50 til 75 kg pr. år pga. båtanløp. Dagens utslipp fra Falconbridge er estimert til 770 kg/år, og utlekkingen fra sedimentene er estimert til ca. 700-900 kg/år. Den mulige påvirkningen fra oppvirvling ligger derfor innenfor 10 % av begge de to nevnte transportene, og derfor antagelig innenfor 10 % av total belastning, enten en betrakter oppløst mengde i vannet, biotilgjengelighet av miljøgifter i sedimenter, eller spredning av partikler. .

Det indikerer at oppvirvling pga. båttrafikk ikke er noe dominerende bidrag til spredning av forurensning fra Falconbridge i dag, iallfall ikke når det gjelder et metall som nikkel. Andre vurderinger må gjøres for andre stoffer. Det må presiseres at ved en høyere anløpsfrekvens ville bidraget bety mer. Etter en overdekning ellers i Hanneviksbukta vil oppvirvling fra kaiområdene bety relativt mer som sekundær tilførsel av miljøgifter fra sedimentene, og som kilde for spredning av miljøgifter.

Anbefalinger mht. tiltak i kaiområdene

De observasjonene som er gjort tyder på at den primære oppvirvlingen ved båtanløp til de to industri kaiene skjer i en relativt kort og konsentrert puls når båtene reverserer hovedpropellen inne ved kai ved ankomst, og når propellen startes opp for fullt for å akselerere båten ved avgang. Hvis båtene går inn til kai uten å snu, vil propellstrømmen sendes inn under båten, og kan gi en konsentrert turbulent strøm mot bunnen. Hvis båtene snur og bakker inn langs kaia vil propellstrømmen gå vekk fra båten men kan til gjengjeld komme nærmere grunnområder innenfor kaia. I begge tilfeller vil det være en tendens til at forurensete sedimenter fraktes videre innover i området, selv om det også kan bli noe spredning utover, avhengig av strømmer og synkehastighet.

Bruk av taubåter som legger de store båtene på plass trekker antagelig i hovedsak opp partikler som er virvlet opp av hovedpropellen. Dersom de bidrar med egen oppvirvling ser det ut til at det skjer i innsugingen til propellen, og ikke i den turbulente propellstrømmen etter taubåten. Også slik oppvirvling vil derfor antagelig skje under eller helt nær båten. Taubåtene vil imidlertid bidra til at oppvirvlede partikler spres mye mer enn de ellers ville gjort. Den eneste måten å hindre det på, vil være å hindre oppvirvling rett under eller nær skipet.

Ut fra en skjønnsmessig vurdering vil vi anbefale at dersom en skal legge betongdyne på bunnen, bør denne dekke et område som strekker seg langs hele det kaiområdet som skal brukes, og i en bredde som tilsvarer 1.5 ganger bredden på de største båtene som skal anløpe. Om dette er et praktisk tiltak, er ikke vurdert i denne rapporten. Det kan tenkes praktiske vanskeligheter med en slik løsning. Hovedpoenget er at en overdekning inne ved kaia må dimensjoneres slik at den motstår de kraftige påvirkninger en kan få pga. propellstrøm inn

under de største båtene, dvs. anslagsvis 6 m/s. I en avstand av ca. 30 m fra kaia bør overdekningen tåle i allfall hastigheter på ca. 0.5 m/s.

Fordi oppvirvlingen synes å være knyttet til kraftig kjøring av hovedpropellen for å stoppe båten inne ved kai, eller akselerere ved avgang, bør det også vurderes om det er mulig å redusere oppvirvlingen ved en mer forsiktig manøvrering.

Erfaringer fra feltarbeidet

En viktig erfaring fra feltarbeidet i dette prosjektet er at det kan være vanskelig å gjennomføre et slik måleprogram etter en helt fast plan ved industrikaier, fordi prognosene for tidspunkter for skipsanløp og avgang kan forandre seg ganske mye selv kort tid i forveien. Det kan da bli vanskelig å sikre at en får målt på de hendelser en ideelt sett ville ønske innenfor en bestemt avgrenset feltmålingsperiode, selv om en som i dette prosjektet forsøker å justere feltperioden til skipsanløp på ganske kort varsel.

Dersom en kan få det til, vil det generelt være en fordel å legge feltmålingene til avgang, fordi en da kan bevege seg fritt rundt i området og måle inn partikkelskyen bedre. Ved anløp er det selvsagt mye mer begrensede muligheter til å kartlegge en partikkelsky som virvles opp under og rundt skipet når det legger til kai. Feltmålinger ved avgang av større skip fra industrikaiene ble ikke oppnådd ved dette prosjektet.

En mulighet for å verifisere om det virkelig foregår en slik oppvirvling, kunne være å inspisere bunnen med miniubåt eller dykker etter båtavgang. Så kraftige propellstrømmer som det er snakk om her, bør gi synlige spor på bunnen. Det kan muligens gi grunnlag for direkte kvantifisering, og kan være aktuelt å vurdere ved fremtidige undersøkelser.

1. Innledning

Mange miljøgifter har en utpreget tendens til å bindes til partikler og danne forurensete bunnsedimenter. Slike bunnsedimenter er et av våre største gjenværende lokale og nasjonale miljøproblem (SFT, 2000). Grunnen til dette er at de forurensete sedimentene kan frigjøre miljøgifter både gjennom oppvirvling og spredning, ved "utlekking" og gjennom akkumulering i sedimentlevende organismer som igjen kan være føde for fisk og skalldyr av konsummessig viktighet. Havneområder er i særlig fokus i den sammenheng. Områdene har gjennom årene blitt tilført miljøgifter ved utslipp fra mangeartet industri, fra befolkning, samt ved avrenning fra landarealer, samtidig som områdene ligger skjermet med begrenset vannutskiftning. Sedimentene i havneområdene utsettes ofte for sterk erosjon knyttet til skipsbevegelser, slik at partikler virvles opp i vannmassen. Siden sedimentlageret av miljøgifter ofte er stort, kan påvirkningen vedvare i lang tid selv om de direkte utslippene er stoppet eller redusert, og dette kan hindre den forventede forbedringen i området, og gi videre spredning over større områder.

Bunnsedimentene i de indre deler av Kristiansandsfjorden og da særlig Vesterhavn-området er forurenset, til dels meget sterkt forurenset, av metaller og organiske miljøgifter. Situasjonen er dokumentert gjennom flere undersøkelser siden begynnelsen på 1980-tallet og da spesielt under det såkalte Statlig program for forurensningsovervåking. Det vises til Knutzen et al. (1998) for en nærmere oppstilling av de forskjellige undersøkelsene.

Våren 2001 ble det foretatt en kartlegging av forurensningssituasjonen i sedimentene i Kristiansand havn ved analyse av ca. 50 sedimentprøver. Resultatene ble rapportert i en egen NIVA-rapport (Næs og Rygg 2001).

Forurensningssituasjonen i Kristiansandsfjorden har medført at det lokale næringsmiddeltilsynet har frarådet konsum av all fisk og skalldyr fanget innenfor syd-/sydøstspissene av Odderøya - Dybingen - Braggdøya - Andøya, og videre frarådet å spise lever av torsk fanget innenfor Dvergøya - Flekkerøya. Tilrådingen er basert på resultater fra undersøkelsene gjennomført i 1992. Årsaken er sjømatens innhold av klororganiske stoffer, primært dioksiner og PCB-forbindelser med dioksinlignende virkning (fremst non-orto PCB), selv om også heksaklorbenzen, oktaklorstyren m.fl. kan bidra.

Forurensete sedimenter som ligger på grunt vann, er utsatt for oppvirvling som følge av strømmer og turbulens fra skipsbevegelser (propellstrømmer/vannjet, strømninger rundt skip i bevegelse, oppankring), i forbindelse med anleggsarbeid (havneutbygging, nedlegging av kabler etc.) og ved spesielle vær-situasjoner eller hydrografiske situasjoner (springflo, storm, konsentrerte strømmer i forbindelse med vannutskiftninger).

Miljørisiko knyttet til oppvirvling av forurensete sedimenter er i første rekke:

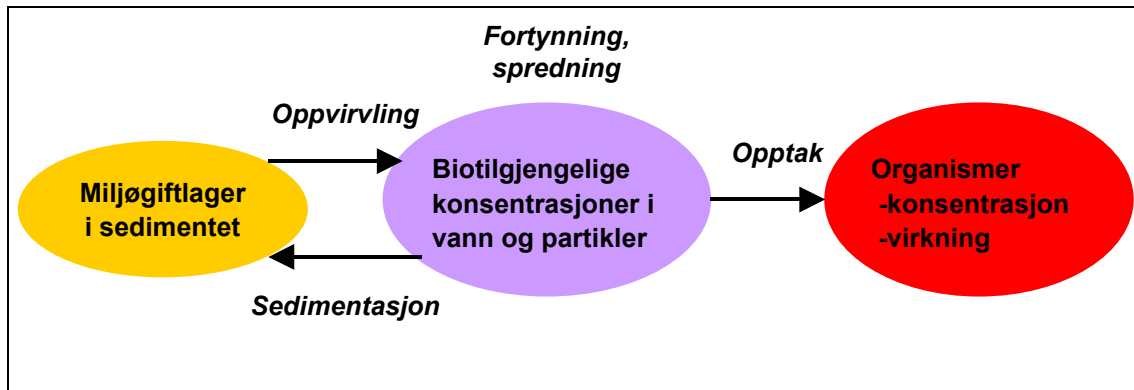
- Fare for spredning av forurensete partikler fra et sterkt forurenset område til et mindre forurenset eller rent område.
- Fare for at partikkelbundet forurensning frigjøres fra partiklene (f.eks. ved desorpsjon) og blir mere biotilgjengelig.
- Det motvirker gradvis overdekking av forurenset sediment med nytt materiale ved å blande sedimentene.

2. Formål

Det er sparsomt med data som belyser viktigheten av sedimentoppvirvling i forurensnings-sammenheng. I myndighetenes satsning på tiltak mot forurensete sedimenter (jfr. Stortings-melding nr. 12, 2000) representerer det kunnskapshull som må dekket. Det er derfor gjennomført et pilotprosjekt for å avhjelpe dette.

Dette prosjektet er rettet mot de fysiske prosesser omkring oppvirvling og spredning, dvs. de to sirklene til venstre i Figur 1.

Figur 1. Generell skisse av noen viktige prosesser i forbindelse med oppvirvling av forurensete bunnsedimenter.



Hovedmålsettingen er få skalert problemet med oppvirvling av forurensete sedimenter pga. skipstrafikk i Kristiansandsområdet. Dette søkes oppnådd gjennom følgende delmål:

1. Kartlegge hvilke områder som er mest utsatt for oppvirvling av sedimenter.
2. Forsøke å kvantifisere grad av oppvirvling og grad av spredning av partikler (influensområdets størrelse, mengde av partikler).

3. Angrepsmåte, og omfang og gjennomføring

Generelt er det flere måter å angripe problemet på, med ulike krav til økonomiske og tidsmessige rammer:

1. Bruk av eksisterende feltdata fra aktuelt område og generell kunnskap fra litteratur om andre undersøkelser.
2. Nye feltstudier av spredning.
3. Eksperimentelt arbeid på sedimentprøver.
4. Modellberegninger med støtte i et eller flere av punktene ovenfor.

Det arbeidet som er rapportert her omfatter de to første punktene:

3. **En systematisk litteraturgjennomgang:** Litteraturstudiet tar for seg resultater fra feltmålinger, eksperimenter, beregningsmetoder og modellbeskrivelser når det gjelder erosjon av sedimenter, både generelt og knyttet til skipstrafikk. Resultatene er knyttet sammen med data om sedimentene i Kristiansand havn i en vurdering av hvor erosive eller stabile sedimentene er i de forskjellige deler av havna.
4. **Feltemålinger:** Hensikten med feltemålinger er å framskaffe:
 - d. Faktisk kunnskap om oppvirvling av forurensete bunnsedimenter fra skipstrafikk i Vesterhavn
 - e. Generell kunnskap om oppvirvling av forurensete sedimenter fra skipstrafikk
 - f. Nødvendige data til kalibrering og etterprøving av modeller.

På bakgrunn av feltemålingene er det gjort anslag for hvor mye partikler som virvles opp ved noen skipsanløp og hvor mye dette betyr sammenlignet med andre årsaker til oppvirvling. Spesielt er det forsøkt vurdert om oppvirvling fra bunn eller partikkelinnhold i vannmassene også kan knyttes til variasjon i vindstyrke eller avrenning fra land.

Kristiansfjorden (Vesterhavn) er valgt fordi dette er et område med sterkt forurensete bunnsedimenter og hvor de i disse dager planlegges og gjennomføres tiltak. Det er også gjennomført risikovurderinger knyttet til de forurensete sedimentene som må sees i sammenheng med foreliggende prosjekt.

Planen var at feltemålingene skulle omfatte havneområdet til Elkem ASA, Falconbridge Nikkelverk A/S samt ferjehavna. Av ferjer var det spesielt oppvirvling av bunnsedimenter i forbindelse med ankomst og avgang av "Silvia Ana" som var aktuelt. Praktiske forhold førte imidlertid til at feltarbeidet først kunne begynne etter at "Silvia Ana" hadde avsluttet sine ruter for sesongen. I samråd med Fylkesmannen i Vest-Agder ble dermed feltemålingene konsentrert om skipsanløp/-avganger ved de to nevnte bedriftene, men med to måleserier i ferjehavna.

Vi takker Harald Eik og Finn Resmann (Falconbridge Nikkelverk A/S) og Nils Dag Drivdal (Elkem ASA) som ved planleggingen og gjennomføringen av feltarbeidet besvarte alle våre henvendelse og ønsker om opplysninger vedr. båtanløp. Ved Kristiansand havnevesen takkes Tom Egon Hansen som dyktig og velvillig stilte opp både tidlig og sent for å føre "Negro".

Ved NIVA var Jarle Molvær hovedansvarlig for planleggingen og gjennomføringen av feltarbeidet. Tom Chr. Mortensen deltok i feltarbeidet 12. oktober. Birger Bjerkeng har utført litteraturstudiet, deltok i feltarbeidet, og har hatt hovedansvaret for bearbeiding og rapportering også av feltnålingene.

4. Materiale og metoder

4.1 Grunnlag for litteraturstudiet

Litteraturstudiet, som finnes nedenfor i kapitlene 5 til 8, kombinerer generell kunnskap fra litteratur med konkrete data for Kristiansand havn. Når det gjelder konkrete data for Kristiansand havn er det bygd på:

- Sedimentenes miljøgiftinnhold og sammensetning (kornstørrelsesfordeling, vanninnhold, innhold av organisk karbon) på de forskjellige havnestrekningene fra undersøkelsen tidligere i år (Næs og Rygg 2001). Dette er supplert med mer detaljerte kornfordelingsanalyser på finfraksjonen for utvalgte sedimentprøver.
- Tilgjengelige data for skipstrafikken for de forskjellige havnestrekningene (hyppighet, data om skip som trafikkerer havnene), samt tekniske data om skipene, i den grad det har vært mulig å skaffe.
- Strømforhold langs havnestrekningene og i aktuelt spredningsområde. NIVA har tidligere målt strøm på 20-40 m dyp i Vesterhavn (Molvær 1990) og fra 16 m og opp i Hannevikbukta (Næs og Molvær 1999). Målingene gir et grunnlag for å anslå strømhastighetene, inkludert variasjon i tid, men ikke noe fullstendig bilde av sirkulasjonen i havna, spesielt ikke for de øvre 10-20 meter, som er mest aktuelt.
- Data om salt, temperatur og tetthetsprofiler i Vesterhavna. Slike data foreligger først og fremst fra basisundersøkelsen av Kristiansandsfjorden 1981-1984 (Molvær et al. 1986), men det finnes også noe eldre data fra 1968-69 og dessuten data fra 1990 for en stasjon (Molvær 1990). Molvær et al. (1986) har anslått oppholdstiden til vannmassene ut fra disse dataene.

Disse data er beskrevet i etterfølgende avsnitt i dette kapitlet, eller mer detaljert i vedlegg bakerst i rapporten.

Slike data er forsøkt kombinert med eksisterende kunnskap om erosjon og oppvirvling av sedimenter pga. strøm, turbulens og bølger, og om hvordan strøm og turbulens genereres av skipstrafikk, for å anslå hvilke områder av havna som er mest utsatt for erosjon og oppvirvling. Også direkte målinger av oppvirvling knyttet til skipstrafikk drøftes, bla. resultatene fra NIVAs undersøkelser i Oslo havn (Magnusson 1995).

For litteraturstudiet har vi fått verdifull informasjon fra Aage Berg og Erik Lehn ved MARINTEK* i Trondheim, Knut Minsaas ved NTNU i Trondheim, Rolf Svensson ved Kamewa Water Jets, Leif Vartdal ved Rolls-Royce Marine AS i Ulstein, Arne Mjøs i Johan G. Olsen North Sea AS og Einar Hansen i Color Line.

Analyse av kornfordeling er utført av Geogruppen AS ved Polarmiljøsenderet i Tromsø.

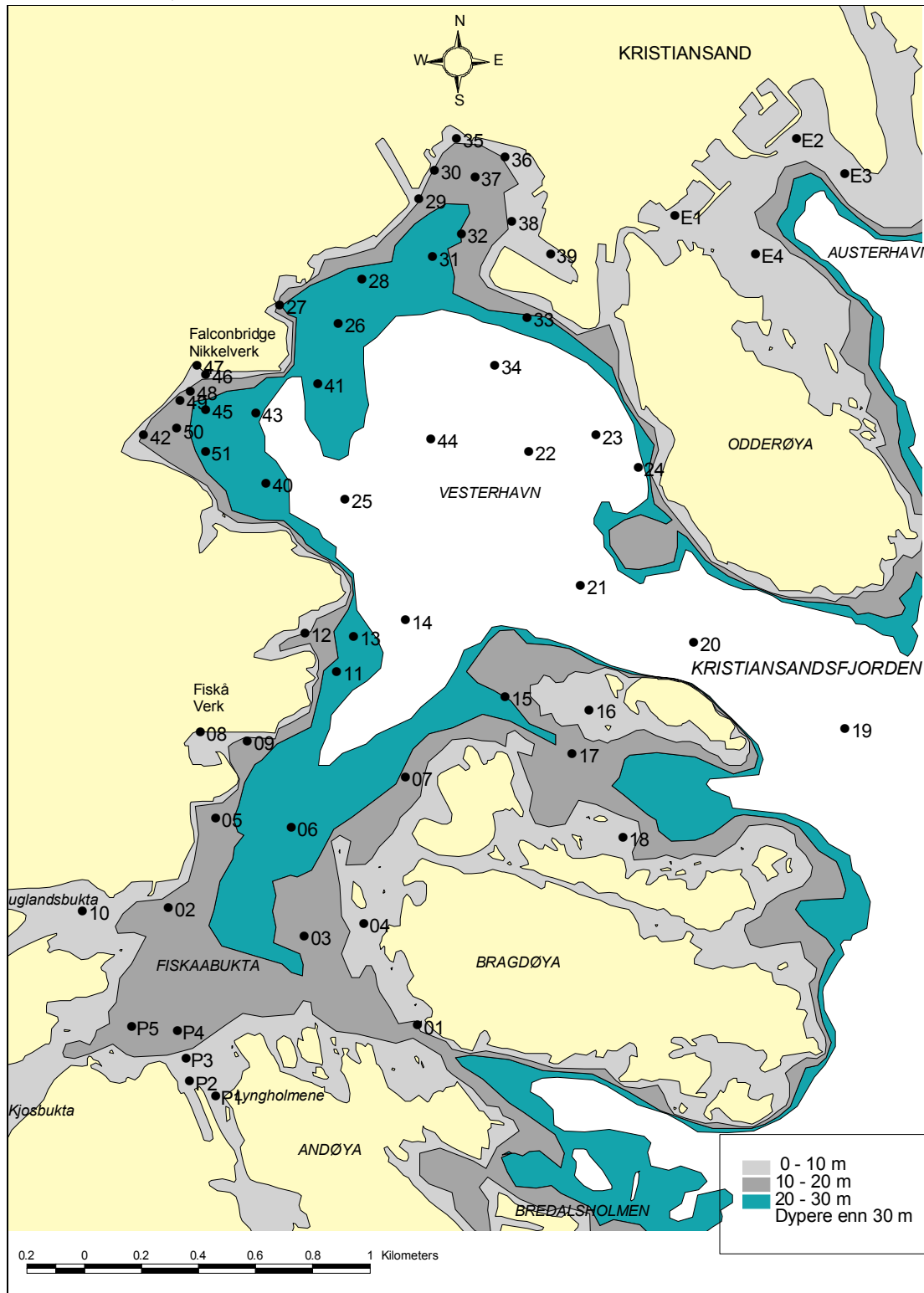
4.2 Beskrivelse av området - topografi og sedimentforhold

Bunntopografien i Vesterhavn er karakterisert av et relativt smalt innløp med dyp på ca. 70 m i sørøst, et vidt område med dyp på 30-50 m i sentrale deler, og relativt grunne områder (0-20

* MARINTEK: Norsk Marinteknisk Forskningsinstitutt

m) i nord, nordvest – vest og i sør (Figur 2). Kartet viser også hvor det ble tatt sedimentprøver våren 2001.

Figur 2. Kart over Vesterhavn og Fiskaabukta med stasjonsplasseringer i Kristiansand havn ved sedimentundersøkelsen våren 2001.



Fra Næs og Rygg (2001)

I det meste av den nordlige del av Vesterhavn, dvs. nord for linjen Lagmannsholmen - Rundingen, er sedimentene relativt grove, med finfraksjonen (<63 µm) mellom 15 og 35 % (analysert på snittet 0-2 cm). Helt inne ved ferjeleiet, hvor Silvia Ana legger til, er finfraksjonen enda mindre, bare 4 %. Det tyder på at det her skjer spesielt sterk erosjon av bunnen. Sedimentet her ligner på det grove og kompakte sedimentet i Østerhavn (Ø2-Ø4), og skiller seg fra forholdene ellers i Vesterhavna. Sedimentene på østsiden, ved Caledonienkaia og Lagmannskaia (Sedimentstasjon 38 og 39) avviker motsatt vei, her utgjør finfraksjonen ca. 60 %. I hele det nordlige området er sedimentene kompakte og lite vannholdige, også i de øverste 2 cm, med et tørrstoffinnhold på 60 - 77 %. TOC-innholdet er relativt lavt, 0.3-3 %, men det er sterk positiv korrelasjon mellom vanninnhold og innhold av TOC.

De fleste sedimentprøvene fra Fiskaabukta inneholder mye fine partikler (finfraksjon 50-80 %), og har et høyt vanninnhold (tørrstoffinnhold 13-30 %). Prøvene fra kaiområdet til Elkem (Fiskå verk) avviker fra dette generelle bildet, med en finfraksjon på 21 % innerst ved stasjon 8, og et tørrstoffinnhold på 40-50 % ved begge stasjonene (8 og 9).

Hanneviksbukta (stasjon 42, 43 og 45) og området utenfor (stasjon 25, 41 og 26) har noe av den samme sedimenttypen som i Fiskaabukta, med 55 til 67 % av tørrstoffet i finfraksjonen, og et høyt vanninnhold (tørrstoffinnhold på 19 til 28 %).

De tre stasjonene nærmest land ved Myrodden og Geitholmen kommer i en mellomstilling, med finfraksjon 29-35 % og tørrstoffinnhold 27-31 %, mens sedimentene i de dypere, åpne delene av Kristiansandsfjorden er finere (50-78 % i finfraksjonen) men også mer kompakte (tørrstoffinnhold 27-50 %).

4.3 Data om vannmassene i Kristiansand havn

4.3.1 Strømforhold og oppholdstid

Det er målt strøm i Vesterhavna ved to anledninger. Høsten 1990 ble det målt strøm i området vest for Odderøya og nordvest for Dybingen, på 25, 30 og 40 m dyp (Molvær 1990). Maksimal strømhastighet varierte fra 20 til 40 cm/s på de forskjellige målepunktene, og 60-95 % av registreringene viste hastigheter innenfor 0-5 cm/s. Figurframstilling for en av stasjonene på 30 m dyp viser at strømmen med få unntak lå innenfor 10 cm/s. Høsten 1998 ble det målt strøm i Hanneviksbukta i forbindelse med et forsøk med overdekking av sedimenter, i et område hvor bunn dyppet er ca. 20 m. På 17 m dyp, ca. 3 m over bunnen, varierte strømmen mellom 0 og 13 cm/s, og ca. 80 % av registreringene var innenfor 5 cm/s. Alle disse resultatene gjelder gjennomsnittsstrøm midlet over noen minutter, dvs. at turbulens og bølgepåvirkning ikke er med.

4.3.2 Tetthetssjiktning - trykkforhold

Som del av basisundersøkelsen av Kristiansandsfjorden i 1982-1984 ble lagdelingen målt både i Austerhavn og i Vesterhavn - Fiskaabukta (Molvær et al. 1986). Strøm og lagdeling i Vesterhavna ble også målt over en stor del av året 1990 i forbindelse med vurdering av utslipp fra Odderøya renseanlegg (Molvær 1991). I september 1998 ble det målt strøm og lagdeling i

Hanneviksbukta i forbindelse med et forsøk med overdekking av sedimenter (Næs og Molvær 1999). Målingene viser en varierende lagdeling. I overflaten kan saltholdigheten komme ned i 5, men typiske verdier ligger mellom 15 og 30. Sprangsjiktet ligger som regel omkring 5 meters dyp.

Ut fra strømmålinger og vekslinger i saltholdighet over tid er oppholdstiden i overflatelaget (0-5 m dyp) anslått til å variere fra noen få timer og opp til 5 døgn, med 1-2 døgn som det vanligste (Molvær et al. 1986). For dypvannet kan oppholdstiden komme ned i 2-3 dager, men vil typisk være omkring 1-2 uker.

4.4 Skipstrafikken i Kristiansand havn

Via Fylkesmannens miljøvernnavdeling har vi fått statistisk oversikt over skipstrafikken til Kristiansand havn, fordelt på 16 offentlige og 8 private kaiområder. En detaljert oversikt er gitt i Vedlegg 2, og en del tekniske detaljer i Vedlegg 3.

Det meste av trafikken til de offentlige havneområdene går helt nord i havna, til cruisepiren og ferjekaia rett sør for jernbanestasjonen, og til de innerste kaiområdene på østsiden, ved Lagmannsholmen. De største båtene legger til på sydsiden av Cruisekaia. Gjennomsnittlig størrelse er 22 000 bruttotonn, og det er anløp to ganger daglig. Ferjeleiet innerst har anløp både av Color Lines hurtigbåt til Hirtshals, Silvia Ana, og av de andre båtene til Color Line.

DFDS trafikkerer ruten Göteborg - Newcastle via Kristiansand med "Princess of Scandinavia", på 22500 bruttotonn. Med de rutene som gjelder sommeren 2001 gir dette 5 anløp pr. uke.

Kaiene innenfor Lagmannsholmen (Caledonienkaia og Lagmannskaia) har ialt ca. 700 anløp pr. år av båter på i gjennomsnitt 5.000 og 8.000 bruttotonn. Trafikken vil være størst i sommerhalvåret, i høysesongen for ferjene.

For de fleste industriområdene er båtene i gjennomsnitt på ca. 2000-3000 bruttotonn. Falconbridge har også anløp av større båter på 25.000-45.000 bruttotonn, med dypgang ca. 10 meter. Det skjer 1-2 ganger pr. måned i følge opplysninger fra bedriften.

I forbindelse med feltarbeidet har vi fått oversikt over båtanløp til Elkems og Falconbridges kaier for de respektive måleperiodene. En oversikt over dette er gitt i kapittel 9.2 i sammenheng med presentasjon av resultatene fra feltmålingene.

4.5 Feltarbeid i oktober 2001

Feltundersøkelsene har vært konsentrert om to grunne områder hvor bunnsedimentene er sterkt forurenset og hvor det anses å være en klar risiko for at oppvirvling fra skip:

- Området utenfor Falconbridge Nikkelverks hovedkai i Vesterhavn
- Området utenfor Elkem ASAs hovedkai i Fiskaabukta.

I tillegg ble det gjort målinger ved ferjeleiet i Vesterhavns nordøstre del.

Fylkesmannen i Vest-Agder var spesielt interessert i å få undersøkt forholdene utenfor hovedkaia til Falconbridge i forbindelse med planlegging av tiltak der, og det meste av feltarbeidet ble derfor gjennomført i dette området.

Feltundersøkelsen omfattet:

- Måling av strømhastighet og retning med tre ulike instrumenter, som alle baserer seg på Doppler-effekt for lydsignaler reflektert fra partikler, dvs. frekvensendring pga. partiklenes bevegelse.
- Saltholdighet og temperatur i dyp-profiler og som tidsserie fra en av strømmålerne.
- Måling av variasjoner i partikkelinnhold ved:
 - Turbiditet, som er et standardisert mål på lysspredning
 - Signalstyrke for lydrefleksjon til strømmålerne
 - Transmisjon (lysgjennomtrengning)

Disse indirekte måtene å måle partikkelinnhold på gir bare en semikvantitativ bestemmelse, fordi signalene er avhengig både av mengde og egenskaper til partiklene. I tillegg ble det også tatt en del vannprøver for direkte bestemmelse av partikkelinnhold.

Feltarbeidet foregikk i perioden 6. til 30. oktober, med to hovedtokt hhv. 11-12. oktober og 29.-30. oktober.

Figur 3. Oversikt over feltarbeidet i Kristiansandsfjorden i oktober 2001

Task	October																														
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31				
Elkem Fiskå: Måleperiode	2 instr. utenfor kaia 																														
Båtanløp																															
Feltarbeid med prøvetaking																															
Falconbridge: Måleperiode	Hele tidsrommet: 2-3 autom. reg. instrumenter på bunnen utenfor h.kai 																														
Båtanløp																															
Feltarbeid med prøvetaking																															

Den 6. oktober ble det satt ut to selvregistrerende strømmålere utenfor Elkems kai i Fiskaabukta.

Ved det første feltarbeidet 11. og 12. oktober ble det gjort målinger i alle de tre områdene. Den første dagen ble det først gjort målinger og tatt vannprøver i forbindelse med et skipsanløp til Elkem-kaia. Deretter ble strømmålerne flyttet til området ved Falconbridge, og det ble gjort målinger fra båt både der og i fergehavna, det siste i forbindelse med fergeavgang

og anløp. Om morgenen og formiddagen 12.oktober ble det gjort målinger ved Falconbridge i forbindelse med et skipsanløp, og en tredje strømmåler ble satt ut før feltarbeidet ble avsluttet.

Det avsluttende feltarbeidet ble gjort 29. og 30. oktober. Da ble målingene konsentrert om Falconbridge hvor det ble målt i forbindelse med to skipsanløp, og de selvregistrerende instrumentene ble tatt opp på ettermiddagen den 30. oktober.

4.5.1 Meteorologiske data i måleperioden.

Fra hele måleperioden finnes vindmålinger gjort ved Falconbridge. Vindmåleren er ifølge opplysninger fra bedriften plassert høyt på østre del av fabrikkområdet mellom E39 og Østre Kai.

Vindhastighet og retning er gitt med middelverdier over ca. 20 minutters intervaller fra 10.oktober kl.20:35 og ut den aktuelle måleperioden. Dette er supplert med data gitt som enkeltregistreringer hvert 6. minutt fra 29. september til 29. oktober. Data er koblet til én serie ved at det er beregnet middelverdier over 18 minutter (3 registreringer) for den perioden hvor det bare finnes 6.minutters verdier.

Data er registrert med lokal sommertid, og tidspunktene er korrigert til UTC-tid*. I følge opplysninger fra Falconbridge er alle tidspunkter lokal tid, dvs. med justering tilbake 1 time kl. 02.00 den 28. oktober ved opphør av sommertid. Enkeltregistreringene hvert 6. minutt har løpende klokkeslett uten uregelmessigheter rundt dette tidspunktet. Fra Falconbridge er det opplyst at 6 verdier her antagelig er skrevet over. I datafilen er derfor alle tidspunkter frem til og med 28.oktober kl. 0:54 justert til UTC ved å trekke fra to timer, mens senere tidspunkter er justert med 1 time. Det gir et gap på en time i disse dataene.

Døgnverdier av nedbør er registrert av Falconbridge hver arbeidsdag kl. 7:30. Det tallet som er oppgitt for en bestemt dato i datamaterialet gjelder fra kl. 7.30 til 7:30 neste morgen. For helgene er det oppgitt en samle verdi for perioden fra fredag morgen til neste avlesning mandag morgen.

4.5.2 Instrumenter

Nortek Acoustic Doppler Profiler (ADP)

I østre ende av Elkem ASAs og Falconbridges hovedkai ble det utplassert en Nortek ADP 500 kHz strømmåler som bruker Doppler-prinsippet til å måle strømhastighet og strømretning i flere vannsjikt (Nortek 1998). Doppler-målingene er basert på at lydsignaler som sendes ut fra instrumentet reflekteres av partikler i vannet, og ekkoet registreres i instrumentet. Styrken på retursignalet (amplituden) er en indikasjon på hvor mye partikler det er i vannet. Ved å sende ut lydsignaler på skrå oppover i tre retninger, og registrere frekvensendringer i ekkoet fra partikler som beveger seg med vannet i forskjellig avstand fra måleren, beregner strømmåleren horisontal strømhastighet og retning i forskjellige dyp. Signalet som sendes fra

* Universal Time Coordinated. Tilsvarende for praktiske formål Greenwich Mean Time. Ligger to timer etter norsk sommertid, og en time etter norsk normaltid.

instrumentet, vil alltid svekkes med økende avstand fra måleren slik at i utgangspunktet vil målecellene som ligger nærmest instrumentet, gi det sterkeste ekkoet. Dersom det er mer reflekterende materiale i de øvre cellene, vil dette altså kunne detekteres fra amplituden til signalet. Det er også mulig å følge utviklingen i et gitt dyp over tid – dersom partikkelmengden øker vil dette gjenspeiles i signalstyrken.

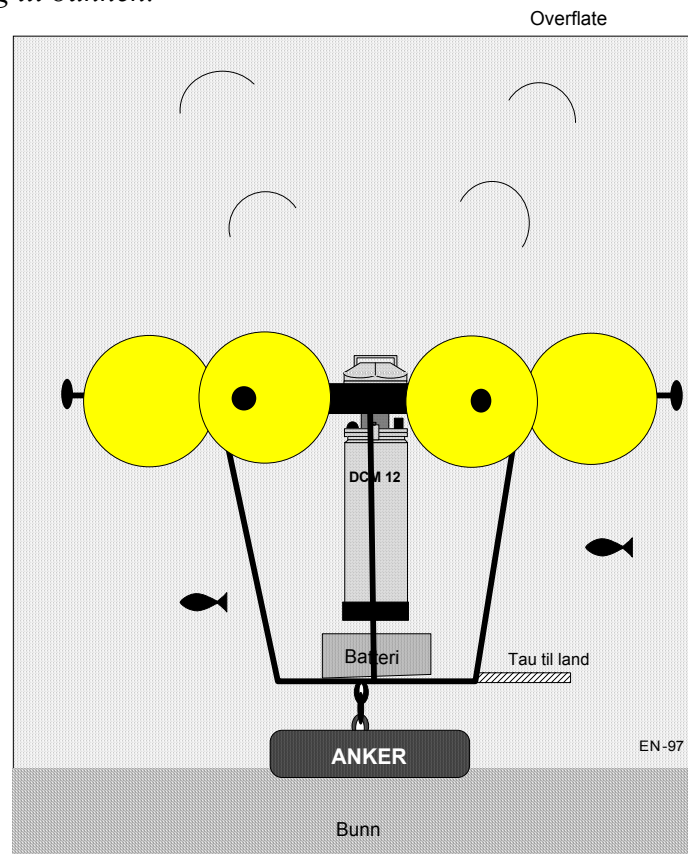
Måleren registrerte strømmen i 55 dybdeceller, med hhv. 0.4 og 0.5 m tykkelse i de to måleseriene (Elkem og Falconbridge). Fordi måleren bruker lydsignaler fra en ganske stor måleflate i hvert dyp, må den midle over en lengre periode. Det ble brukt et midlingsintervall på 20 minutter.

Instrumentet stod oppankret i en ramme på bunnen (Figur 4). I tillegg til forankringssystemet og instrumentets egen høyde er det en ”blindsone” rett over sensoren. Dessuten vil de øverste 1-2 m vil alltid være preget av mye forstyrrelse fra overflaten (det genereres mye refleksjon/støy av lydbølger her), og målingene herfra er usikre og bør neglisjeres.

Noen av spesifikasjonene for Nortek ADP 500 kHz strømmåler er oppgitt til:

Fart, målebredde:	± 10 m/s
Fart, oppløsning:	0.1 cm/s
Fart, nøyaktighet:	$\pm 1\%$ av målt fart, $\pm 0,5$ cm/s
Retning, nøyaktighet:	$\pm 0.5^\circ$

Figur 4. Skisse som viser en ADP ultralyd strømmåler montert i et rammeverk med oppdriftsbøyer og forankring til bunnen.



Aanderaa Instruments RCM9 strømmåler

Utenfor midtre del av Elkems kai og deretter utenfor vestre ende av Falconbridges kai ble utplassert en selvregistrerende Aanderaa Instruments RCM9 strømmåler. Måleren var plassert ca. 1 m over bunn, opphengt i undervannsbøye med forankring i lodd på bunnen. RCM9 er en ultralyd strømmåler som bruker Dopplerprinsippet til beregning av horisontal strømhastighet og retning, men bare i det dypet måleren er plassert i. Den registrerer dessuten temperatur, saltholdighet og turbiditet*. I dette prosjektet er registrering av turbiditeten av stor betydning. Måleren har ingen utvendig bevegelige deler.

Målenøyaktigheten for de enkelte sensorene er oppgitt til:

Konduktivitet:	± 0.1 mmho/cm
Temperatur:	± 0.05 °C
Retning:	$\pm 5^\circ$
Hastighet:	± 2 cm/s eller $\pm 2\%$ av hastigheten. Den høyeste av disse gjelder.
Laveste detekterbare hastighet:	0.5 cm/s
Turbiditet:	2% av full skala. Måleområde 0.1-20 FTU

Måleren var innstilt på å logge en gang pr. 5 minutt.

Nortek Vektormåler

Denne strømmåleren bruker også 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 om 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 trykk og temperatur. Den måleren som ble brukt var dessuten påmontert en turbiditetssensor av type Seapoint SA1V.

Vektormåleren ble brukt på to forskjellige måter:

Under feltarbeidet 11-12. oktober ble den brukt profilerende, dvs. at den senkes ned gjennom vannsøylen, og gir en dypprofil. Fordi det ikke var praktisk mulig å ankre opp båten, blir ikke strømdata meningsfylt fra disse målingene (de vil like mye gjenspeile båtens bevegelser). Det ble da brukt kontinuerlig måling med frekvenser fra 4 til 32 ganger pr. sekund.

Fra 12. til 30. oktober sto den utplassert utenfor Falconbridge, i en rigg som sto fast plassert på bunnen på ca. 19 m dyp. Den var da innstilt på å måle i "burst" modus, med frekvens 32 Hz, over korte intervaller på 2/3 sekund, og med en hvileperiode på 1-2 minutter mellom hvert måleintervall.

* Standardisert mål på lysspredning fra partikler

Transmisjonsmåler

Transmisjonsmålinger ble utført for å bestemme tilstedeværelse og spredning av oppvirvlede partikler. Målingene beskriver hvor mye en lysstråle svekkes over en gitt distanse i vannet, og denne svekningen har oftest en nær sammenheng med partikkelkonsentrasjonen.

Transmisjonsmålinger ble derfor brukt til å få en direkte beskrivelse av partikkelmengden i vannmassene og hvordan de fordelte seg i vertikalen. Dette var også grunnlag for innsamling av vannprøver. Målingene ble foretatt med et transmisjonsmeter (Q-instrument) med bølgelengde 660 nm (rødt lys).

Sonde for måling av CTD-profiler (konduktivitet og temperatur) med turbiditet mellom overflate og bunn

En Sea-Bird Electronics SBE-19 (SeaCat) CTD-sonde (konduktivitet, temperatur, dyp) med påmontert turbiditetssensor av type Seapoint SA1V ble benyttet for målinger av vertikalprofiler. Sonden registrerte 2 ganger pr. sekund og lagrer data internt.

Nedfiringshastigheten ble avpasset slik at man fikk målinger med 0.2-0.3 m intervall.

4.5.3 Vannprøver

Det ble tatt i alt 32 vannprøver for analyse av partikkelinnhold. Vannprøvene ble innsamlet med en Limnos 2 liters vannhenter. Prøvene ble tappet på 1 liters plastflasker.

Prøvene ble tatt i tilknytning til CTD-profiler (se ovenfor), og prøvedypene ble valgt ut på basis av turbiditetsmålinger med vektor-måler (11-12.10) og transmisjonsmålinger (29. og 30. oktober). Prøvevolumet på 1 liter ble delt i to delprøver á 500 ml. Den ene delprøven ble analysert for Suspendert tørrstoff og gløderest (STS, SGR) ved filtrering på glassfiberfilter med porevidde 0.45 μm . Den andre halvdelen av hver prøve ble analysert for totalt suspendert materiale (TSM) ved filtrering med nucleoporfilter med porevidde 0.4 μm . Noen av TSM-prøvene ble valgt ut for analyse av nikkelinhold for å få indikasjon på graden av forurensning i de oppvirvlede partiklene, spesielt for oppvirvling i Hanneviksbukta hvor sedimentene har høye nikkilverdier (Næs og Rygg 2001). Analysemetodene er beskrevet i Vedlegg 4.

TSM og STS skal ideelt gi omtrent samme verdi. Resultatene som er gjengitt i Vedlegg 5 viser til dels stor forskjell i resultatene av de to analysene for samme prøve. Det kan tenkes å skyldes at det var vanskelig å få homogene delprøver mht. partikkelinnhold, fordi det til dels var store, klart synlige partikler i prøvene. Samlet partikkelinnhold kan derfor beregnes som gjennomsnitt av de to målene på partikler. Gløderest regnes om i prosent av STS, og det beregnes en justert absoluttverdi basert på gjennomsnittet av partikkelinnholdet.

5. Litteraturstudium - Sedimenterosjon

Dette kapitlet gir en oversikt over en del litteratur om erosjon og oppvirvling av sedimenter knyttet til strøm, bølger og turbulens generelt. Sedimentene i Kristiansand havn er ganske finkornet, og det er derfor lagt vekt på litteratur om undersøkelser av erosjon av finkornet, kohesivt sediment. De fleste av disse undersøkelsene gjelder strøm langs bunnen, hvor turbulensen dannes ved friksjon mellom det strømmende vannet og bunnen, og er basert på grensesjikt betraktninger. Det finnes også en del undersøkelser som tar for seg bølgepåvirkning.

5.1 Generelt om erosjon og oppvirvling av sedimenter pga. strøm og bølge-påvirkning

Faren for at sedimenter skal eroderes og virvles opp avhenger for det første av forholdene i vannmassene, dvs. hvor mye strøm og bølger en har nede ved bunnen, og for det andre av sedimentets egenskaper mht. til å stå i mot de kreftene det påvirkes av.

Påvirkningen kvantifiseres ved friksjonen mellom vannet og sedimentet, som en skjærspenning ("shear stress": i denne rapporten anvendt om kraft pr. flateenhet tangentielt langs sedimentflaten). Denne skjærspenningen er knyttet til turbulens i vannet pga. bunnfriksjonen. Skjærspenningen τ (kraft/areal) ved bunnen uttrykkes ofte som friksjonshastighet U_* (lengde pr. tidsenhet) definert ved

$$U_*^2 = \frac{\tau}{\rho}$$

hvor ρ er vannets tetthet.

I litteraturen finnes data for skjærspenningen som funksjon av strømhastighet, bølger og turbulens bestemt empirisk under forskjellige forhold. Sammenhengen mellom skjærspenning og hastighetsprofil i turbulent strømning over hydraulisk ru bunn kan beskrives ved at hastigheten U som funksjon av avstand z over bunnen er gitt ved

$$U = \frac{U_*}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0}$$

hvor κ er von Karmans konstant 0.4, og z_0 er et mål på ruheten, empirisk bestemt til $z_0 = D/30$ hvor D er typisk størrelse på ujevnheter, f.eks. partikkeldiameter eller høyde på formasjoner i overflaten.

Sedimenters erosjonsbestandighet beskrives ved en kritisk skjærspenning, dvs. den spenningen som gir begynnende oppvirvling, enten for enkeltkorn for grovere sedimenter (sand) eller for sedimentet som helhet for såkalt kohesive sedimenter som har betydelig innslag av silt og leire.

Kapittel 5.2 beskriver en del resultater fra litteratur om sedimenters erosjonsbestandighet. Sammenhengen mellom skjærspenning (eller friksjonshastighet) og strømhastighet er

behandlet i kap. 5.3, mens kap. 5.4 refererer noen undersøkelser hvor erosjonsstabilitet er beskrevet direkte ved kritisk strømhastighet. Det som er funnet, blir oppsummert i kap. 5.5.

5.2 Sedimenters motstand mot erosjon

Det foreligger mange undersøkelser av erosjon av sediment ut fra strøm og bølgepåvirkning. Slike undersøkelser tar vanligvis sikte på dels å bestemme kritisk skjærspenning, og også å finne sammenhengen mellom økende erosjonsrate eller erosjonsdyp og økende skjærspenning ut over den kritiske verdien. Det siste er knyttet til at det ofte er økende fasthet og erosjonsbestandighet nedover i sedimentet.

For grovt, ikke-kohesivt sediment er det egenskapene til hvert enkeltkorn som har betydning for oppvirvlingen, og det er da spesielt størrelsen og tettheten (egenvekten) til de mineralske partiklene som har betydning. For finere sediment vil kritisk spenning være bestemt av hvor godt sedimentet henger sammen (kohesivitet) og av den totale tettheten av vått sediment (*Bulk density* ρ_b , eller *Mud Density* ρ_m). Oppvirvling av partikler behandles i kap. 5.2.1 og av kohesive sedimenter i kap. 5.2.2, i begge tilfeller med fokus på kritisk skjærspenning.

5.2.1 Kritisk skjærspenning for partikler i ikke-kohesive sedimenter - Shields kurve.

For grove sedimenter, som stort sett består av sand (partikler $>63 \mu\text{m}$), kan det defineres en dimensjonsløs skjærspenning θ hvor friksjonshastigheten U_* inngår:

$$\theta = \frac{\tau}{g(\rho_s - \rho)D} = \frac{U_*^2}{gD} \frac{\rho}{(\rho_s - \rho)}$$

hvor g er gravitasjonskonstanten, ρ_s og ρ er tettheten av hhv. sandkornene og vannet, og D er kornstørrelse (ekvivalent diameter). Kritisk skjærspenning θ_c beskrives vanligvis i et såkalt Shields diagram som funksjon av lokalt Reynolds tall

$$\text{Re}_* = \frac{U_* D}{\nu}$$

hvor ν er kinetisk viskositet for vann. I den original Shields-kurven (se f.eks. Dyer 1986) avtar θ_c omvendt proporsjonalt med Re_* for $\text{Re}_* < 3$ som $\theta_c = 0.1/\text{Re}_*$, og det gir for kritisk friksjonshastighet U_{*c}

$$U_{*c} = \left(0.12 g \nu \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}}$$

uavhengig av kornstørrelse. I følge Dyer (1986) er dette resultatet ikke verifisert, og Dyer gjengir alternative beskrivelser, hvor kritisk friksjonshastighet avtar med partikkelstørrelse, bl.a. har White (1970) funnet en sammenheng ut fra forsøk med kvarts- og glass-partikler, som ser ut til å være gyldig for $\text{Re}_* < 5$:

$$U_{*c} = \left(0.06g\sqrt{vD} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{\frac{2}{5}}$$

For $Re_* > 3$ flater kurven for $\theta(Re_*)$ ut til et minimum på ca. 0.03 omkring $Re_* = 10$, og derfra øker θ_c langsomt med Re_* med et forløp opp til $Re_* = 400$ som i følge Liou og Herbich (1976) kan beskrives ved

$$U_{*c} = \left(0.02gD \cdot \left(\frac{D}{v} \right)^{0.183} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right)^{\frac{1}{1.817}}$$

For høyere verdier av Re_* er θ_c omtrent konstant 0.06, dvs. at vi har

$$U_{*c} = \sqrt{gD \frac{(\rho_s - \rho)}{\rho}}$$

Med $g=9.81 \text{ m/s}^2$, $v=1.4 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ og en typisk tetthet $\rho_s = 2.6$ på partiklene fås resultatene i Tabell 1. Kurven til White (1970) gir kritiske spenninger ned mot 0.01 Pa* for partikler på størrelse med leirepartikler, økende til ca. 0.1 Pa for partikler rundt grensen for finfraksjonen, og opp til rundt 0.5-1 Pa for partikler med diameter omkring 1 mm.

Tabell 1. Sammenhengen mellom økende partikkelstørrelse og kritisk hastighet og skjærspenning for partikler med tetthet 2.6 ganger vannets tetthet

		Re_*	D μm	U_{*c} m/s	τ_c Pa	θ_c
White (1970)	$Re_* < 10$	0.0013	0.5	0.004	0.01	1.659
		0.007	2	0.005	0.02	0.722
		0.078	15	0.007	0.05	0.216
		0.43	62.5	0.010	0.09	0.092
		2.82	300	0.013	0.17	0.036
Shields	$Re_* < 3$	2.99	<300	0.014	0.19	0.040
		10.3	750	0.019	0.37	0.031
	0	102	3 000	0.048	2.3	0.047
		413	7 000	0.083	6.8	0.060
	$Re_* > 400$	412	7 000	0.082	6.8	0.060
		3658	30 000	0.171	29.1	0.060
	22260	100 000	0.312	97	0.060	

* enhet for trykk eller spenning: 1 Pa = 1 Newton m^{-2}

5.2.2 Kritisk skjærspenning av kohesive sedimenter

For finere sediment vil som nevnt den kritiske skjærspenningen være bestemt av hvor godt sedimentet henger sammen (kohesivitet), av den totale tettheten av vått sediment (*Bulk density* ρ_b , eller *Mud Density* ρ_m). En del artikler angir direkte kritiske verdier for skjærspenning ut fra forsøk eller feltmålinger på kohesive sedimenter.

Zreik et al. (1998) har gjort erosjonsforsøk med ferske, kohesive leire-sedimenter, suspendert i vann og utfelt på bunnen av forsøksrenna, og konsolidert over 2 til 19 døgn. Forsøkene ser ut til å være gjort med ferskvann. De rapporterer begynnende erosjon ved skjærspenninger i området 0.1 - 0.3 Pa.

De Vries (1992) har målt erosjon av fint, kohesivt sediment i en ca. 500 m bred kanal ved Mare Island Strait i California. Sedimentene hadde en sandfraksjon på ca. 12 % og en finfraksjon 88 %. Skjærspenningen ble beregnet ut fra hastighetsprofilen ved bunnen, ved tilpasning til logaritmisk profil. De Vries viser et eksempel på målte hastigheter som funksjon av avstand fra bunn målt over intervallet fra 8 til 100 cm over bunnen, tilpasset den logaritmiske strømprofilen som er beskrevet i kap. 5.1. Ut fra et figureksempel hos de Vries (1992) kan hydraulisk ruhet ved bunnen estimeres til $z_0 = 0.24$ cm. Kritisk skjærspenning ("stress") ble bestemt ut fra sammenhengen mellom skjærspenning og konsentrasjon i vannet over sedimentet til ca. 0.15 Pa (1.5 dynes/cm²), og gjennomsnittlig skjærspenning rett før erosjon begynte var 0.08 Pa (0.8 dynes/cm²).

Bedford og Lee (1994) angir en kritisk skjærspenning 0.13 Pa (1.3 dynes /cm²) for sediment med median kornstørrelse $d_{50} = 65$ μm , altså for sedimenter med 50 % av tørrstoffet i finfraksjonen.

Drake og Cacchione (1989) angir kritisk spenning 0.7 dyn/cm², dvs. 0.07 Pa, for naturlig sediment bestående av leiresedimenter med innslag av 10 % sand på kontinentalsokkelen utenfor California.

Mitchener og Torfs (1996) beskriver resultater av erosjonseksperimenter med sedimenter som funksjon av blandingsforholdet sand:slam. For slam fra Hong-Kongbukta fant de kritiske skjærspenninger ved bunnen på omkring 0.1 Pa, det økte til opp mot 0.2 Pa når det ble tilsatt 50 % sand (median diameter 230 μm). Forsøk med naturlig slam fra Scheldt-estuariet i Belgia, viste kritiske verdier på omkring 0.3 Pa for omtrent ren sand med opptil 3 % slam, økende til ca. 1.5 Pa ved 6 % slamtilsetning, og ca. 1.8 Pa for 10-15 % slam. Fra Mehta (1988) refererer de formelen for skjærspenning (stress) τ_c :

$$\tau_c = \zeta \cdot (\rho_b - \rho_w)$$

hvor ρ_b , ρ_w er tetthet av hhv. sediment og vann. Koeffisienten ζ angis til ca. 1 Pa g⁻¹cm³ for kohesivt sediment. For vanlige sediment-tettheter på 1.2 til 2.0 g/cm³ vil det si kritiske skjærspenninger fra 0.2 til 1 Pa. Mitchener og Torfs har funnet ζ i området 9-37 for slam fra Scheldt-estuariet i kunstige blandinger med sandinnhold fra 18 til 53 %, og antar det henger sammen med at sand stabiliserer sedimentene. Det er ikke oppgitt hvilke sediment-tettheter det gjelder for. For kunstige blandinger av slam og sand angir de et optimalt sand-innslag mellom 50 og 70 %, dvs. at erosjonsmotstanden da er størst. For ren sand vil oppvirvlingen reguleres av dynamikken for enkeltpartikler, som beskrevet i kap. 5.2.1. Overgangen til kohesivt sediment ligger i følge Mitchener og Torfs (1996) i området 3-15 % slaminnslag, og ved 15 % slam eller mer kan en regne at sedimentet er kohesivt.

Mitchener og Torfs gir også en empirisk formel for kritisk bunnstress for erosjon av kunstige blandinger av sand og leire som funksjon av tettheten på vått sediment ("Bulk density") ved :

$$\tau_c = 0.015(\rho_b - \rho_w)^{0.73}$$

med tetthet av sediment og vann (ρ_b , ρ_w) i kg/m^3 og stress τ gitt som Pa. For sediment-tetthet 1200 til 2000 kg/m^3 gir det kritisk spenning fra 2.5 til 4 Pa.

De resultatene som refereres av Mitchener og Torfs (1996) viser eller ganske stor spredning (typisk 1 dekade) noe som henvises til ulikheter i sedimentstruktur. De har også sammenstilt en del resultater for naturlig sediment. Her varierer kritisk skjærspenning mellom 0.04 og 5 Pa, med mye mindre klar sammenheng med sandinnholdet. Den kritiske skjærspenningen ser ut til å være mye bedre korrelert med sedimentets totale tetthet (våtvekt); kritisk spenning ligger mellom 0.04 og 1 Pa for våtvekter mellom 1200 og 1600 kg/m^3 og fra 0.1 til 5 Pa for våtvekt $1800\text{-}2000 \text{ kg/m}^3$. Verdiene varierer med opptil en dekade for målinger på sediment fra ett sted. Ruhet (z_0) for rent slam og ren sand angis til hhv. 0.2 og 0.4 mm, og ca. 0.7 mm for en blanding av slam og sand. Den høyere verdien skyldes at blandingen lettere bevarer irregulariteter i overflaten.

Torfs et al. (2001) har undersøkt kritisk erosjons-friksjon for konsoliderte* blandinger av fine og grove partikler i renneforsøk. De undersøkte blandinger av sand (median kornstørrelse $230 \mu\text{m}$) med hhv. naturlig slam (median kornstørrelse $25 \mu\text{m}$) og fine leirpartikler (kaolinit, $2 \mu\text{m}$ og montmorillitt, $8 \mu\text{m}$). For ren sand angir de skjærspenning 0.35 Pa. Tilsetning av finpartikler innenfor ca. 5 % økte ikke erosjonsmotstanden, men for høyere finfraksjoner øker skjærspenningen for blandingene omtrent lineært med andel i i finfraksjon, og var 1-2.5 Pa for finfraksjon 20 % (vekt) og 1.2-3 Pa for finfraksjon 30 %.

Gularte et al. (1980) har målt erosjon av kohesive sedimenter i renneforsøk, som funksjon av vanninnhold og saltholdighet i porevannet. Sedimentmaterialet var en blanding av like mengder silt og leire (illitt), uten innslag av sand. Kritisk skjærspenning varierte mellom 0.03 og 0.27 Pa. Den avtok med økende vanninnhold, og økte med saltinnholdet opp til saltholdighet 10. Omtrentlige verdier, lest ut av figurer i artikkelen, er oppsummert i Tabell 2. Den kritiske spenningen økte progressivt med saltholdigheten opp til 10, og avtok markert når vanninnholdet økte fra 70 % til 80 %. En erosjonsrate på $10^{-5} \text{ kg/m}^2/\text{s}$ opptrådte ved spenninger på 0.1 Pa ved saltholdighet opp til 5, men krevde 0.3-0.4 Pa for saltholdigheter 7.5 eller mer. Det ble ikke målt ved høyere saltholdigheter enn 10. Til sammenligning har en vanligvis saltholdighet opp mot 20-30 i Kristiansand havn.

* Detaljer ikke oppgitt

Tabell 2. Målt kritisk skjærspenning (N/m^2) for fint, kohesivt sediment (50 % silt, 50 % leire) som funksjon av saltholdighet og vanninnhold i sedimentet.

		Vanninnhold (%)			
		50	60	70	80
Saltholdighet	2.5	0.07	0.065	0.06	0.03
	5	0.09	0.08	0.08	0.04
	7.5	0.20	0.15	0.13	0.08
	10	0.26	0.27	0.21	0.13

Mitchener og O'Brien (2001) har studert sesongvariasjon i kritisk skjærspenning for erosjon i en slambanke i Severn Estuary i England. Sedimentene var meget finkornet, med median kornstørrelse varierende fra 1.8 til 5 μm for de forskjellige prøvene. Glødetap på tørrstoffet ble målt til mellom 8 og 12 % for de prøvene som representerte ferske sedimenter, de anslår at ca. 30 % av dette er organisk stoff, og hvis organisk karbon er ca. 45 % av organisk stoff skulle det tilsvare ca. 1.5 % TOC. Resultatene deres viste avtagende kritisk spenning med økende vanninnhold, angitt som % av tørrstoff*, fra ca. 0.35 Pa for lavt vanninnhold, ned mot 0.1 Pa for svært vannholdige sedimenter. En analyse av deres resultater, inkludert tre verdier som de ikke tok med fordi ikke alle tre replikater var målt, gir resultatet vist i figur 1. Hverken kornstørrelse, mengde kolloidalt organisk stoff eller glødetap bidro til å forklare variasjonen bedre når de blir tatt med som tilleggsvariabel til vanninnholdet i multippel regresjon. De to siste er delvis korrelert med vanninnhold, og gir derfor en viss sammenheng med kritisk spenning når de brukes som forklaringsvariabel alene, men det ser ut til at det er variasjon i vanninnhold som egentlig har betydning. Vanninnhold er oppgitt å være korrigert for en saltholdighet på 25, uten at det er gitt data for saltholdighet. Verdiene til Gularte et al. (1980) for saltholdighet 10 ligger innenfor variasjonsområdet i figuren.

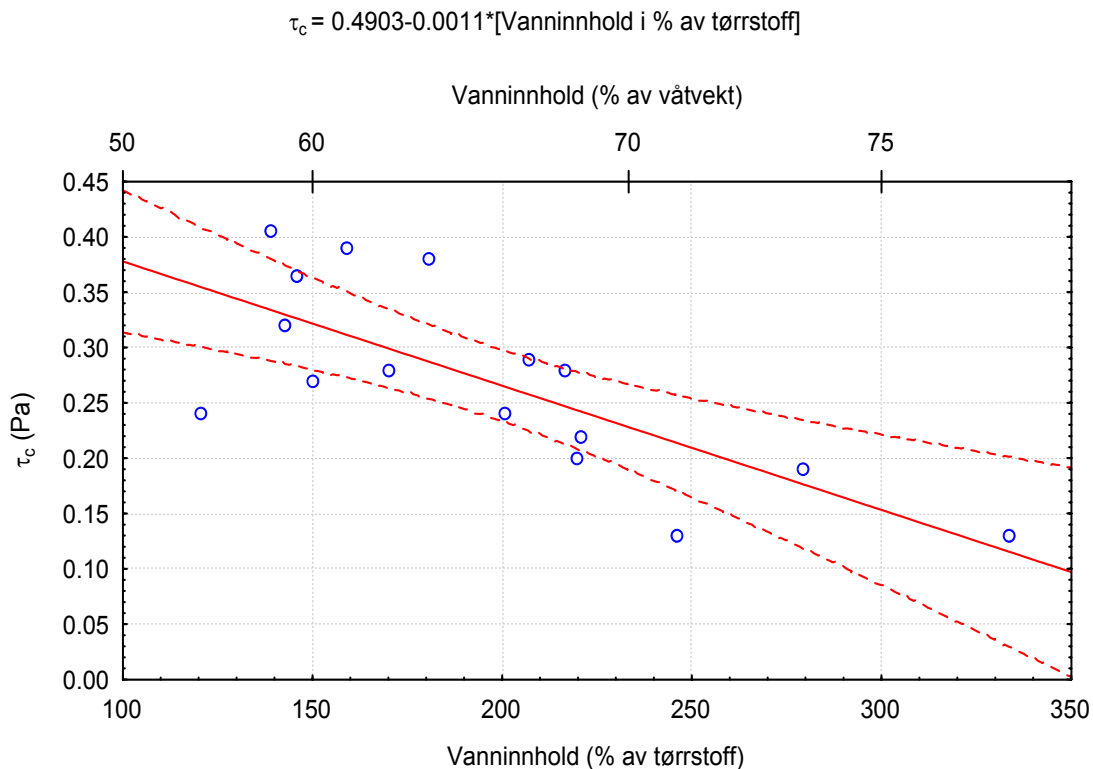
Mitchener og O'Brien har også oppgitt egenvekt på vått sediment (bulk density). Stort sett er kritisk spenning proporsjonal med forskjell i tetthet mellom sediment og vann, og data passer med en koeffisient $\zeta = 0.94 \text{ Pa g}^{-1} \text{ cm}^3$ i ligningen

$$\tau_c = \zeta \cdot (\rho_b - \rho_w)$$

Det stemmer bra med koeffisienten fra Mehta (1988) som ble referert ovenfor på side 29.

* En analyse av resultatene deres viser at vanninnholdet definert på denne måten gir en noe bedre lineær sammenheng med skjærspenning enn vanninnhold målt som % av vått sediment, altså som 100-Tørrstoff-%.

Figur 1. Sammenheng mellom kritisk skjærspenning og vanninnhold i sedimentet.



Data fra Mitchener og O'Brien (2001)

5.3 Sammenheng mellom skjærspenning og strømhastighet

For å kunne beregne faren for oppvirvling må hastighet eller turbulens nær bunnen brukes som grunnlag for å beregne skjærspenninger.

For relativt grove partikler, dvs. strøm over ru bunn, angir Liou og Herbich (1976) friksjonshastighet U_* som funksjon av midlere strømhastighet 1 m over bunnen (U_1):

$$U_* = k \cdot U_1 \quad \text{med } k = 0.0547 = \sqrt{0.003}$$

Blaauw og van de Kaa (1978) bruker en tilsvarende formel for sammenhengen mellom skjærspenning τ og hastighet U langs bunnen. De angir at dette gjelder hastighet ved bunnen. Formelen er

$$\tau = c_f \frac{1}{2} \rho U^2$$

hvor c_f er friksjonskoeffisienten, dvs. det dimensjonsløse forholdet mellom friksjon (kraft/flate) og spesifikk kinetisk energi i strømmen. En sammenligning med Liou og Herbichs ligning gir

$$k = \sqrt{c_f/2}$$

Ut fra eksperimenter med propellstrøm over en bunn med partikler med median diameter 5.45 mm fant Blaauw og van de Kaa (1978) c_f i området 0.06- 0.11, tilsvarende $k=0.17$ og 0.23. Dette er vesentlig høyere enn det Liou og Herbich brukte. Forklaringen på denne forskjellen er nok at Blaauw og van de Kaa ikke brukte hastigheten 1 m over bunn, men i stedet en beregnet strålehastighet i selve bunndypet, ut fra modellen for fri turbulent propellstrøm uten begrensning av bunnen. Denne beregnede hastigheten representerer antagelig den reelle hastigheten mye nærmere bunnen enn 1 m.

Blaauw og van de Kaa foreslår en lavere verdi for c_f , i området 0.02 - 0.03 hvis det i stedet for gjennomsnittshastighet U brukes en effektiv hastighet som vektet sum av U og de turbulente hastighetsfluktuasjonene U' i strømretning:

$$U_{eff} = U + 3U'$$

Både Liou og Herbich (1976) og Blaauw og van de Kaa (1978) anvender formlene på oppvirvling i periferien av en turbulent propellstrøm. I følge data i Blaauw og van de Kaa (1978) er ytterkantene av propellstrømmen mer turbulente i forhold til midlere strømhastighet enn en vanlig strøm med bunnfriksjon, med U'/U omtrent 0.6, mens det typiske er 0.3 midt i strålen. For turbulente strømprofiler angir Davies (1972) en verdi 0.3 nær veggen for rørstrømning, mens Dyer (1986) viser en figur med verdier omkring 0.5 i grensesjiktet basert på laboratorieforsøk*. Ut fra dette skulle U_{eff} generelt være ca. 2 ganger middelstrøm U , men ca. 3 ganger middelstrømmen i utkanten av en turbulent stråle.

Sammenhengen mellom hastighet og spenning for turbulent strømning som ble gitt i på side 26 kan skrives om til en sammenheng mellom bunnfriksjon og strøm i dyp z fra bunn:

$$\tau_0 = \rho \cdot c \cdot U^2 \quad \text{med} \quad c = \left(\frac{\kappa}{\ln(z/z_0)} \right)^2$$

hvor ρ er vannets tetthet. Konstanten c ses å tilsvare k^2 og $c_f/2$ ovenfor. Dyer (1986) refererer resultater etter Soulsby (1983) hvor verdier på koeffisienten c oppgis til 0.0022, 0.003 og 0.0026, og 0.0047 for hhv. slam, blanding slam/sand og ren sand og grus. Det gir k fra 0.047 til 0.069, altså omkring den k -verdien Liou og Herbich (1976) bruker for ganske grove partikler†. Ligningen til Dyer (1986) gjelder jevn strøm langs bunnen. For utkanten av turbulent stråle, hvor intensiteten av turbulensen er større, kan det være bedre å beregne en teoretisk hastighet ved bunn dvs. den hastighet en ville hatt hvis strålen spredte seg uhindret av en bunn, og anvende Blaauw og van de Kaas koeffisient, som tilsvarer $c = 0.03$ til 0.055.

For en stråle rettet på skrå nedover mot bunnen må det antagelig også regnes en høyere koeffisient, siden hele strålen da har en hastighetskomponent mot bunnen. Det er ikke funnet noen eksisterende modeller for dette ved litteraturstudiet som er gjort hittil.

* Både Davies og Dyer viser figurer hvor U' kommer opp i maksimalt 2 ganger friksjonshastigheten i grensesjiktet, altså ca. 10 % av midlere strømhastighet 1 m over bunnen.

† De kritiske partikkelstørrelsene Liou og Herbich (1976) beregner er for store med en faktor 30 pga. en feil i benyttede enheter, men selv etter korreksjon for dette dreier det seg om meget grove partikler (opp til 1 til 2 fot).

5.4 Erosjonsstabilitet angitt direkte som kritisk strømhastighet eller turbulensnivå over bunn.

Andre forfattere har ikke beregnet kritisk skjærspenning, men oppgir i stedet resultatene som kritiske verdier for hastighet eller turbulens over bunnen.

Otsubo og Muraoka (1987) har målt sammenheng mellom resuspensjon og vind i 2 m dyp område i en innsjø, med sedimenter som inneholder relativt mye organisk stoff (glødetap ca. 18%), og har vanninnhold 25-50 % (oppgett som 50-100 % av tørrvekt). De anslår en kritisk vindhastighet 5.5 m/s for begynnende erosjon, dvs. anslagsvis 0.2 m/s vannhastighet (anslått som 3 % av vindhastigheten).

Black (1992) refererer en formel fra Miller et al. (1977) for kritisk strømhastigheter 1 m over bunnen for erosjon som funksjon av kornstørrelse for sandpartikler (ikke-kohesivt sediment): ca. 0.17-0.3 m/s for fin sand (diameter 65 μm), og 0.26-0.42 m/s for grovere sand med partikkeldiameter 0.25 mm. RMS* terskelhastigheter er hhv. 0.12 m/s og 0.18 m/s for de to kornstørrelsene. Det tilsvarer koeffisient k i området 0.03 til 0.18 i ligningen $U_* = k \cdot U_1$ fra kap. 5.3, altså omkring eller noe over den verdien Liou og Herbich (1976) oppga. Det er ikke oppgitt om dette er i ferskvann eller sjøvann, men det er anvendt i et modellarbeid for marine områder.

Dolphin and Green (1997) angir kritiske verdier for konstant strømhastighet og signifikant orbitalhastighet for bølger for to ulike kornstørrelser. For kornstørrelse 20 μm er de kritiske verdiene hhv. 0.2 og 0.06 m/s, og for 200 μm hhv. 0.3 og 0.13 m/s. Hvis det antas kritiske friksjonshastigheter U_* som i tabell 1, tilsvarer dette en koeffisient k i området 0.035 til 0.12 i ligningen $U_* = k \cdot U_1$.

Li og Parchure (1998) angir følgende formel for oppvirvling av bunnslam, dvs. for innblandingsrate (E , mengde pr. tid og areal) inn i en bunnstrøm som funksjon av karakteristikk av induserte bølger ved bunnen:

$$E = \alpha_6 \rho_m u_b \left(\frac{Ri_{gc}^2}{Ri_g} - Ri_g \right) \text{ for } Ri_g < Ri_{gc}$$

uttrykt som funksjon av globalt Richardson-tall for bølgebevegelsen:

$$Ri_g = \frac{\delta g \frac{\rho_m - \rho}{\rho_m}}{(\Delta u)^2}$$

Her er

$$\delta = \sqrt{2\nu v/\omega} = \text{tykkelsen av viskøst grensesjiktet for bølgene}$$

og

* (Root Mean Square) Kvadratrot av midlere kvadrat

ν = kinematisk viskositet for vann

ω = bølgenes vinkelhastighet (= frekvens/ 2π)

ρ_m = slammets tetthet

ρ = vannets tetthet

u_b = bølgeindusert strømhastighet nær bunnen, dvs. i kanten av grensesjiktet

Δu = absoluttverdi av maksimal forskjell i bølgehastighet over grenseflaten vann-slam

g = gravitasjonskonstanten (9.81 m s^{-2})

Konstanten α_6 er bestemt empirisk til $2 \cdot 10^{-6}$. Forfatterne angir at den er stedsspesifikk og representerer en skalerings-effekt knyttet til Reynolds-tallet. Målinger viser at oppvirvlingen avtar raskt når Ri_g overstiger 0.03, og opphører helt når $Ri_g = 0.043$, dvs. at kritisk verdi Ri_g ligger i dette området. For bølger med frekvens 1 s^{-1} blir grensesjiktet δ ca. 1.2 mm. For sediment med tetthet $\rho_m = 1.5\rho$ blir den kritiske hastighetsforskjellen $\Delta u = 0.4 \text{ m/s}$, mens den for lett sediment med $\rho_m = 1.1\rho$ blir $\Delta u = 0.16 \text{ m/s}$

5.5 Oppsummering

En del resultater for fine, kohesive sedimenter viser relativt lave kritiske skjærspenninger, i området 0.07 til 0.3 Pa. Dette kan likevel være anslagsvis 10 ganger større enn for tilsvarende fine enkeltpartikler.

De kildene som tar for seg sediment-tetthet spesielt har stort sett funnet at kritisk spenning øker mer eller mindre proporsjonalt med tetthetsforskjellen mellom vann og sediment. Sediment-tettheten kan generelt variere mye, først og fremst som funksjon av vanninnholdet. For sterkt vannholdige sedimenter (70-80 %), som vil ha lav tetthet, ser det ut til at en kan regne med kritiske spenninger i den nedre del av variasjonsområdet, dvs. omkring 0.1 til 0.2 Pa. For en del resultater i litteraturen er ikke sedimentenes tetthet angitt.

Mange av resultatene gjelder fine sedimenter, som består av ren leire og silt, uten innslag av sand, eller med svært lite sand. Noen undersøkelser viser at sedimenter som består av en blanding av leire/silt og sand har større erosjonsmotstand enn både rent fint sediment og ren sand. Noen resultater kan tyde på at kritisk skjærspenning kan være opp til 10-40 ganger større for slike blandinger, og det finnes resultater opp mot 5 Pa, men det er også referert resultater på 0.2 Pa for en 50-50 % blanding av fint sediment og sand.

Som retningsgivende antas at kritisk skjærspenning for fine sedimenter øker proporsjonalt med tetthetsforskjellen, med en proporsjonalitetsfaktor omkring $1 \text{ Pa g}^{-1} \text{ cm}^3$. Hvis sedimentet stabiliseres med sand antas at dette kan øke til 10-40 $\text{Pa g}^{-1} \text{ cm}^3$, men bare som en øvre grense; hva som kan oppnås virker usikkert ut fra de foreliggende resultater fra litteraturen. Det betyr at det må gjøres mer direkte studier på et gitt finkornet sediment for å vurdere i hvor stor grad tilsetning av sand kan bidra til å stabilisere sedimentet.

Noen resultater viser også at stabiliteten øker med saltholdighet, og iallfall noen av de laveste resultatene gjelder ferskvann. Erosjonsmotstanden målt som kritisk skjærspenning ser ut til å kunne øke med en faktor 3-4 i sjøvann i forhold til ferskvann. Det kan forklare noen forskjeller i eksperimentelle resultater, men de typiske verdiene som er nevnt ovenfor må antas å gjelde for sjøvann, slik at en heller må regne med lavere verdier i ferskvann.

Ut fra dette legges det her til grunn at kritisk skjærspenning τ_c øker med sedimentets tetthet i forhold til vannets tetthet ved sammenhengen

$$\tau_c = \zeta \cdot (\rho_b - \rho_w)$$

men at koeffisienten ζ kan variere iallfall fra 1 til 10 Pa g⁻¹cm³ avhengig av sedimentenes sammensetning og egenskaper, bla. ser det ut som den øker med saltholdigheten i porevannet uten at det funnet nok opplysninger i litteraturen til å kvantifisere dette sikkert.

Den faktiske skjærspenningen vil være en funksjon av turbulensen i grensesjiktet over bunnen, og generelt øke med kvadratet av hastigheten U nær bunnen, etter en formel:

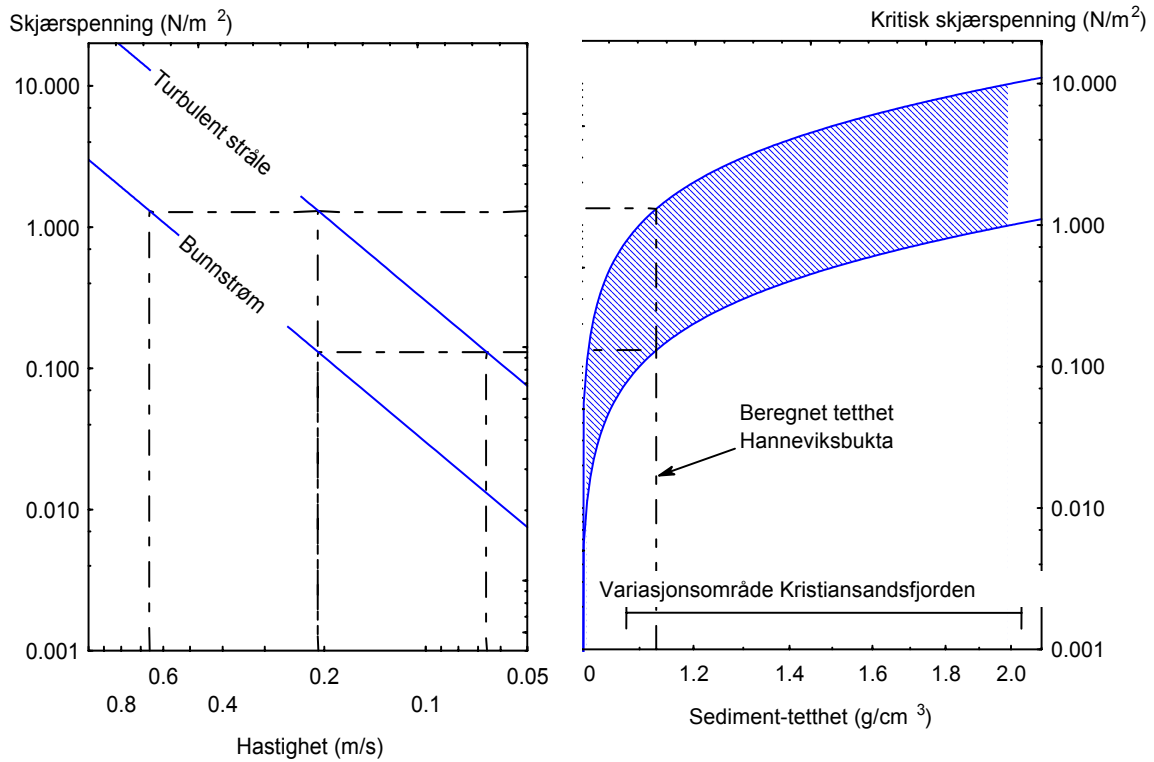
$$\tau_0 = \rho \cdot c \cdot U^2$$

Hvor ρ er vannets tetthet, mens c er en empirisk koeffisient. Ut fra de resultatene som er funnet i litteraturen, ser det ut til at skjærspenningen er høyere for turbulente stråler, som fra en propell, hvor turbulensen genereres av store hastighetsforskjeller i vannet, enn for strøm langs bunnen hvor turbulensen genereres av friksjon mot bunnen. For bunnstrøm knyttes oppgitte koeffisienter ofte til hastigheten 1 m over bunnen, med en koeffisient $c = 0.003$. For turbulente stråler ser det ut til at koeffisienten kan være iallfall 10 ganger større, men da muligens knyttet til den hastigheten strålen ville hatt i bunnypet uten bunnens begrensning.

Ved å kombinere de to sammenhengene kan en i prinsippet med utgangspunkt i et gitt sediment finne ut hvilken strømhastighet i en bunnstrøm eller turbulent stråle som vil gi begynnende erosjon og oppvirvling av sedimentet. Dette er vist grafisk i Figur 5. Høyre del av figuren viser variasjonsområdet for kritisk skjærspenning som funksjon av sediment-tetthet avgrenset av de to verdiene av ζ . Venstre del av figuren har samme vertikale akse, og de to inntegnede linjene viser sammenhengen mellom skjærspenning og strømhastighet for hhv. bunnstrøm og turbulent stråle. For gitt sediment-tetthet kan en finne et rimelig område for kritisk skjærspenning, og så gå horisontalt bort i venstre del av figuren, og lese av kritisk hastighet ut fra hvor kurvene der skjærer de horisontale linjene som avgrenser variasjonsområdet for skjærspenning. De stiplede linjene viser dette med beregnet sediment-tetthet for Hanneviksbukta som eksempel (Se mer om sediment-tetthet i Kristiansandsfjorden i kapittel 8.1.2).

Figuren oppsummerer hovedtrekkene i det som er funnet i litteraturen, og viser hva som kan være et rimelig variasjonsspenn for sammenheng mellom sediment-tetthet og hastigheter. Det fremgår at kritiske verdier for hastigheter nær bunnen iallfall kan variere mellom 0.1 og 1 m/s, avhengig av sedimentegenskaper og type strøm. Det skal understrekes at de sammenhengene som er funnet har store usikkerheter, og at det variasjonsområdet som er lagt inn i Figur 5 ikke omfatter det mest ekstreme resultatene fra litteraturen.

Figur 5. Variasjonsspenn for sammenheng mellom sediment-tetthet, kritisk skjærspenning og strømhastighet ut fra litteraturstudium. Legg merke til at alle aksene er logaritmiske, dvs. at samme avstand mellom to punkter betyr samme forholdstall mellom verdiene.



6. Strøm og turbulens fra skipstrafikk

Dette kapitlet drøfter hvordan skipstrafikk kan generere strøm og turbulens som kan erodere sedimenter, og beskriver noen empiriske modeller som spesielt tar for seg propellstrøm og oppvirvling. Det gis også et kort sammendrag av resultater fra tidligere undersøkelser av erosjon og oppvirvling fra skip som er beskrevet i litteraturen.

Skipsbevegelser kan tenkes å medføre erosjon og oppvirvling av sedimenter på tre forskjellige måter.

- *Utstrømning fra propell eller vannjet*
- *Innsugning til fremdriftsenhet (propell eller vannjet).*
- *Strømning rundt et skip i bevegelse for å kompensere forflytningen av det nedsenkede volumet.*

6.1 Propellstrøm

Vannet ut fra en propell eller vannjet går ut som en turbulent stråle med en rotasjonskomponent som tilføres fra propellen. Strålen river med seg omkringliggende vannmasser pga. viskositeten i vannet, og vokser i omkrets bakover fra propellen, samtidig som bevegelsesenergien i strålen gradvis tapes ved overgang til virvler og turbulens. Hvis det er forholdsvis grunt, kan den nedre del av strålen nå ned mot bunnen selv om strålesenter holder seg omtrent i propelldypet, og gi erosjon av partikler fra sedimentet.

I nærheten av faste flater, som f. eks. en bunn i grunt farvann, eller under en skipsbunn, vil det oppstå undertrykk mellom strålen og flaten, slik at den trekkes mot flaten og vil gå langs den (pers. medd. fra Leif Vartdal ved Rolls-Royce Propulsion Ulsteinvik, og Erik Lehn, MARINTEK i Trondheim). Dette kan antagelig under gitte forhold øke påvirkningen på bunnen vesentlig i forhold til hva som beregnes teoretisk ved en horisontal stråle.

Et skip som går inn til kai med baugen først vil reversere hovedpropellen både når det legger til og når det bakker ut fra kai. Da vil propellstrømmen sendes inn under skipet, og begrenses både av skipsbunnen og av fjordbunnen. I et relativt grunt kaiområde må det føre til en mer konsentrert stråle og sterkere hastigheter ved bunnen enn for en fri propellstråle ut fra skipet.

Hvis propellen trekker inn vann fra større dyp i lagdelte vannmasser, vil den turbulente strålen antagelig også av den grunn tendere mot å synke noe ned i retning av det dypet hvor vannet hører hjemme tetthetsmessig. Det gjelder antagelig særlig når skipet bakker inn ved anløp, og også når det senere går ut fra kai med baugen først.

Det er kjent at innsuget av vannet til propellen kan danne roterende strålerør som står mot skipssiden eller bunnen (Personlig meddelelse fra Aage Berg ved MARINTEK, Trondheim), men vi har ikke noe informasjon om dette er noe som opptrer bare sjelden eller om det er relativt vanlig. Det er rimelig å tro at det kan skyldes rotasjon i de vannmassene propellen trekker vann fra. Propellen eller turbinen tilfører også vannet en rotasjon, og det kan tenkes å gi en avbøying av strålen ut fra propellen som er vanskelig å forutsi, spesielt hvis strålen møter fysiske begrensninger. I slike tilfeller kan det være vanskelig å beregne hvilke bunndyp som påvirkes.

Vi har tilgjengelig to beskrivelser av propellstrøm fra skip og oppvirvling av sedimenter. Liou og Herbich (1976) beskriver en modell som tar utgangspunkt i et skip som beveger seg slik at det er ubegrenset innstrømning av vann inn mot propellen med skipets hastighet. Deres beskrivelse er ikke direkte knyttet til eksperimentelle resultater. Alle hastigheter beskrives her relativt til skipets fart, og modellformuleringen er bare beregnet på skip i fart. Blaauw og van de Kaa (1978) beskriver en beslektet modell, formulert slik at den også kan beregne propellstrøm for skip som ligger omtrent stille (Bollard pull, særlig brukt om taubåter), eller f.eks. for baug-propeller som brukes til å dreie skipet. De beskriver også modellforsøk som grunnlag for parametrisering av modellen.

Den videre spredning og fortykning av propellstrømmen og påvirkningen på bunn-sedimentene beskrives i prinsippet likt av begge modellene, men med praktiske og numeriske forskjeller som beskrives nærmere nedenfor.

Når det gjelder beskrivelsen av propellstrømmen, tar begge modellene utgangspunkt i vanlig tilgjengelige ytelsesdata for propeller, og kan da beregne volumstrøm og hastighet ut fra propellen ved en gitt driftssituasjon. Modellen til Liou og Herbich inneholder en del omregningskonstanter pga. at enhetene ikke følger SI-systemet. Det beskrives ikke her. De har gjort et par feil, for det første ved å regne strålehastigheten i forhold til skipet som grunnlag for turbulent strålespredning, i stedet for å se på hastigheten i forhold til de stillestående vannmassene omkring, og for det andre ved å blande sammen spesifikk tetthet og spesifikk gravitasjon. Deres numeriske resultater blir derfor ikke riktige. Modellbeskrivelsen nedenfor bygger på en sammenligning av de to modellene, og er først og fremst basert på Blaauw og van de Kaa (1978).

Begge modellene beskriver et sirkulært stråletverrsnitt som vokser i omfang bakover fra propellen på grunn av turbulent blanding mot omgivelsene, etter en viss kontraksjon rett bak propellen. Siden vannoverflaten (eller skipsbunnen ved reversert propell) utgjør en grense for spredningen oppover, vil propellstrømmen etterhvert måtte spre seg bare nedover og til sidene, og da må en tro at karakteristikken endres, kanskje ved at spredningen blir som for en halv stråle med dobbel vannføring. Etterhvert vil også bunnen kunne virke begrensende på spredningen. Det behandles ikke av de modellene som er funnet i litteraturen.

6.1.1 Impuls og energi-betraktninger for strøm gjennom propell

Modellene bygger på at propellen betraktes som en skive med diameter D som beveger seg med hastighet V_A i forhold til de upåvirkede vannmassene omkring. Sett i forholdet til skipet kan dette betraktes som at vannet strømmer forbi med hastighet V_A . Når propellen roterer og skyver vannet bakover, gir den et undertrykk rett foran propellen, og et overtrykk på baksiden.

Vannmengden pr. tidsenhet (Q) gjennom propellen er

$$Q = (V_A + V_1)A_0$$

hvor V_1 er hastighetsøkningen inn mot propellen som tilsvarer undertrykket, altså hastigheten i propellskiven i forhold til vannmassene omkring skipet, og propellskivens areal er

$$A_0 = \pi(D/2)^2$$

For en åpen propell vil overtrykket på baksiden av propellen gi en ytterligere akselerasjon av vannet, samtidig med at trykket reduseres og utlignes med vannmassene omkring. Strålen blir altså ytterligere akselerert i forhold til hastigheten gjennom propellskiven, og volumbevaringen krever da at stråletverrsnittet trekker seg sammen tilsvarende.

I en viss avstand fra propellen vil trykket være som før, dvs. at overtrykket er omsatt i kinetisk energi. Hvis hastigheten i forhold til vannmassene betegnes V_2 , er tilført impuls til vannet pr. tidsenhet gitt ved

$$\frac{dP}{dt} = \rho Q V_2$$

hvor ρ er vannets tetthet. Denne impulsoverføringen må være skyvkraften (T) i propellen, dvs.

$$T = \rho Q V_2$$

Med det omkringliggende vannet som koordinatsystem vil kraften utføre et arbeid både på vannet og på båten, proporsjonalt med hhv. vannhastighet og båtens (propellens) hastighet.

Arbeidet på båten er

$$W_A = T \cdot V_A$$

mens arbeidet utført på vannet* er:

$$W_v = T \cdot V_1$$

Arbeidet på vannet må tilsvare tilførselen av kinetisk energi til vannet pr. tidsenhet, dvs.

$$W_v = \rho Q \frac{1}{2} V_2^2 = \rho Q V_2 \cdot \frac{V_2}{2} = T \frac{V_2}{2}$$

Ved å kombinere de to uttrykkene for arbeidet på vannet fås†:

$$V_2 = 2V_1$$

* I tillegg til akselerasjonen bakover vil propellen også tilføre vannet et dreiningsmoment, eller en rotasjon rundt stråleaksen. En del av motoreffekten vil gå med til dette. Det bidrar ikke til fremdriften, og inngår ikke i ligningene som er satt opp her. Egentlig danner propellen en hvirvel ut fra hvert propellblad, som til sammen blir en turbulent stråle. Fordi rotasjonen også danner sentrifugalkrefter, vil det bli et fallende trykk inn mot senter av strålen, som bidrar til å holde vannet samlet i en stråle. Rotasjonen vil gi større turbulens enn for en vanlig trykkdrevet stråle

† De to modellformuleringene vi har tatt utgangspunkt i bruker båten som koordinatsystem, og tilskriver vannet all bevegelse. Da settes det totale arbeidet lik endringen av den kinetiske energien i vannet når hastigheten endres fra V_A til $V_A + V_2$. Formlene blir litt mer kompliserte, men resultatet er det samme.

Ved å sette inn i ligningen for T fås et 2.grads uttrykk i V_1 :

$$T = \rho(V_A + V_1)A_0 2V_1$$

som gir en løsning $V_1 > 0$:

$$V_1 = \sqrt{\left(\frac{V_A}{2}\right)^2 + \frac{T}{2\rho A_0}} - \frac{V_A}{2}$$

Hvis skyvkraften er gitt, kan hastigheten beregnes direkte av denne formelen.

Hvis total effekt $W = W_A + W_v$ er gitt, kan V_1 finnes av formelen

$$W = T(V_A + V_1) = \rho A_0 (V_A + V_1)^2 2V_1$$

For skip i bevegelse må det løses som en 3.gradsligning, men hvis skipet ligger omtrent stille, vil innsugningshastigheten til propellen kunne bli:

$$V_1 = \left(\frac{W}{2\rho A_0}\right)^{\frac{1}{3}}$$

De to nevnte modellene er knyttet til følgende to dimensjonsløse koeffisienter, hvor n er omdreininger pr. sekund (dvs. $n = \text{RPM}/60$):

$J = \frac{V_A}{nD}$	Hastighetskoeffisient eller fremdriftskoeffisient dvs. forholdet mellom skipets hastighet og propellens periferihastighet.
$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4}$	Skyvkraft-koeffisient, dvs. forholdet mellom skyvkraft og omdreiningsmoment for propellen.

Propellytelsen beskrives ofte empirisk ved å angi koeffisienten K_T som funksjon av J , med maksimum når $J=0$, dvs. når båten ligger stille.

Den praktiske beregningsgangen ut fra slike opplysninger kan være:

- For gitt hastighet V_A , propelldiameter D og omdreiningstall n beregnes J , og ut fra det finnes K_T fra den empiriske sammenhengen.
- Skyvkraften T beregnes ut fra definisjonen av K_T .
- Hastighetene V_1 (og $V_2 = 2V_1$) beregnes direkte ut fra løsningen av 2.gradsligningen ovenfor. Denne ligningen kan også uttrykkes direkte av K_T , dvs.:

$$V_2 = \sqrt{V_A^2 + K_T \frac{8n^2 D^2}{\pi}} - V_A$$

Det er vanlig med propeller med konstant omdreiningshastighet og varierende helning på propellbladene (pitch). Koeffisientene brukes fortsatt, men det vil da være en separat kurve for koeffisienten $K_T(J)$ for hver helning.

I følge Liou og Herbich (1976) er det også vanlig å oppgi en effektivitets-koeffisient η som forholdet mellom nytteeffekt (effekt på båten) og total effekt på vann + båt:

$$\eta = \frac{V_A}{(V_A + V_1)}$$

For den åpne propellen er altså $V_1 = V_2/2$, og det betyr at strålediameteren i det kontraherte tverrsnittet hvor trykket er utlignet vil være

$$D_0 = \frac{D}{\sqrt{2}}$$

For en skjermet (ducted) propell, som f.eks. i en baugpropell som er montert i en tunnel med en konstant diameter, oppgis i følge Blaauw og van de Kaa en skyvkoeffisient K_T som funksjon av J både med skjerm (dps) og uten (prop). Hastigheten V_2 etter kontraksjon beregnes som ovenfor ved å bruke $K_{T(prop)}$. Hastigheten V_1 i propelltverrsnittet, som gir volumgjennomstrømmingen, og dermed kontraksjonen av strålen, som beskrevet ovenfor, beregnes ved:

$$V_1 = \frac{4n^2 D^2 K_{t(dps)}}{\pi V_2} - V_A$$

For alle oppnåelige hastigheter V_A må åpenbart koeffisientene være slik at $V_1 > 0$. For $V_A=0$ er i følge Blaauw og van de Kaa $V_1=V_2$ for en skjermet propell, det tilsvarer at $K_{T(dps)}=2 \cdot K_{T(prop)}$. Det betyr at det ikke skjer noen kontraksjon etter propellen, slik at $D_0 = D$. Det er bekreftet ved pers. medd. fra Knut Minsaas, NTNU.

Hvis motoreffekten er oppgitt, kan skyvkraften T uttrykkes ved en empirisk sammenheng

$$T = Koeff \cdot (W \cdot D)^{2/3}$$

hvor W er effekt, og D er diameter. For tunnelpropell er $Koeff = 72$ hvis skyvkraften oppgis i kg^* , effekten i hestekrefter og diameter i m. For dysepropell er $Koeff = 100$. (pers. meddelelse Knut Minsaas ved NTNU i Trondheim).

6.1.2 Vannjet

Forholdet er i prinsippet det samme for en vannjet, selv om det da er en turbin som akselererer vannet. For et vannjet-fartøy i full fart vil inntakshastigheten på vannet være noe mindre enn

* 1 kg skyvkraft tilsvarer 9.81 Newton

skipets fart (SSPA, rapport 7937-1). Vannjeten forsynes da med vann av skipets bevegelse, og driver skipet fremover ved å akselerere vannet bakover. Vannets hastighet bakover vil typisk være omtrent to ganger skipets hastighet. Turbinen pumper vannet bakover og bygger opp et trykk på baksiden, som så akselerer vannet. Som for propeller vil en del av motoreffekten gå med til å sette vannet i rotasjon, som ikke gir fremdrift, men som øker turbulensen og kan endre karakteristikken til den turbulente strålen i forhold til en vanlig trykkdrevet stråle ut av et rør.

Ved manøvrering i havn brukes mindre manøvreringsenheter. Når båten ligger omtrent stille kan en regne med at all energien i disse enhetene går til å akselerere vannet. Dersom enten effekt W , maksimalt trykk p etter turbinen, eller skyvkraft T er oppgitt sammen med vannfluks Q , kan hastighet V i strålen beregnes ut fra sammenheng mellom utført arbeid og kinetisk energi:

$$\frac{W}{Q} = p = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \quad \text{alternativt} \quad T = \rho Q V$$

dvs.

$$V = \sqrt{\frac{2W}{\rho Q}} = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad \text{alternativt} \quad V = \frac{T}{\rho Q}$$

Hvis to av de tre størrelsene W , p , T er oppgitt kan både vannfluks og hastighet beregnes.

Strålediameter D ved denne hastigheten er gitt ved

$$D = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V}}$$

Manøvreringsenhetene på en vannjet er slik at strålen kan avbøyes til siden eller på skrå nedover og bakover. Avgjørende for virkningen på bunnsedimentene er hvordan dette brukes. I følge opplysninger fra rederiet rettes strålene til siden ved manøvrering av Silvia Ana i Kristiansand havn.

6.1.3 Beregning av fri turbulent stråle etter propell eller vannjet.

Utgangspunktet for den videre beregningen av propellstrømmen er altså en stråle med diameter D_0 og gjennomsnittshastighet V_2 , omtrent homogent over hele tverrsnittet. I de to refererte modellene beskrives den på samme måte som en rent trykkdrevet turbulent stråle, dvs. at rotasjonskomponenten neglisjeres. Slike stråler har en etableringssone hvor hastighetsfordelingen gradvis endres til Gauss-fordeling. Innenfor en viss avstand x fra utgangspunktet vil stråletverrsnittet ha en kjerne hvor den opprinnelige hastigheten gjelder, med lineært avtagende radius $r_0 = D_0/2 - cx$, mens det rundt denne kjernen er et overgangslag med Gauss-fordeling av hastigheten i strømtverrsnittet. Hastigheten i overgangslaget (for $r > r_0$) er da gitt ved

$$V(x, r) = V_0 \cdot \exp\left(-\frac{1}{2} \left(r - \frac{D_0}{2} + cx\right)^2 / (cx)^2\right)$$

I avstand $x_0 = D_0/(2c)$ vil hele strålen være Gauss-fordelt, og fra da av vil stråleradius øke med avstand, og senterhastigheten avta tilsvarende, slik at impulsen bevares. Hastigheten er da gitt ved

$$V(x, r) = V_0 \frac{D_0}{2cx} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{2(cx)^2}\right)$$

Tetthetssjiktning og den begrensningen som vannoverflate og bunn utgjør vil etterhvert modifisere denne sirkulære løsningen, men den gjelder så lenge propellstrømmen har relativt høy restenergi, og inntil den har fått så stor radius at den møter de fysiske begrensningene.

I følge Blaauw og van de Kaa (1978) er etableringssonen for en propellstråle ca. 2.8 ganger strålediameteren D_0 , dvs. omtrent halvparten av en turbulent stråle uten rotasjon, dvs. at koeffisienten $c = 0.18$.

For å vurdere sediment-erosjon er det strømmen i en viss vertikal avstand r under senter av strålen som er av interesse, først og fremst relativt nær bunn. I en sjiktet vannmasse må også den vertikale forflytningen av strålen tas hensyn til når en skal velge hvilken r -verdi som er interessant. Den horisontale avstanden x som gir maksimal strøm i gitt radius r fra strålesenteret finnes ved å sette

$$\frac{dV(r, x)}{dx} = 0$$

Hvis det antas at den interessante radien r er større enn $D/2$, vil hastigheten for gitt r øke med x gjennom etableringssonen. For den etablerte sonen finnes at maksimal strøm for gitt r opptrer ved horisontal avstand $x_{\max} = r/c$ etter propellen, og at den maksimale strømhastigheten er:

$$V(r)_{\max} = V_0 \frac{D_0}{2r} e^{-0.5} \cong 0.3 \frac{D_0}{r} V_0$$

Hvis det er en viss kritisk hastighet V_{cr} for erosjon av sedimentene, kan vi da beregne hvilket dyp en må ha under strålesenteret for at denne hastigheten ikke skal overskrides:

$$H = 0.3D_0 \frac{V_0}{V_{cr}}$$

I følge denne modellen har koeffisienten c ikke betydning for hvor stor den maksimale påvirkning på et visst bunndyp blir, men bare for i hvilken avstanden bak propellen påvirkningen er størst.

Aage Berg ved MARINTEK (pers. medd.) beskriver en alternativ modell basert på empirisk tilpasning til målinger bak arbeidende propell:

$$r_s = 0.39D_0 + 0.0875x$$

$$U_m = \frac{U_0}{0.89 + 0.149x/D_0}$$

hvor

- x = avstand bak propellen
- r_s = propellstråleradius ved avstand x
- U_m = senterhastighet i avstand x
- D_0 = strålediameter ved $x=0$
- U_0 = hastighet i senter av propellskiven

Radius r_s er definert som den avstand fra strålesenter hvor hastigheten er halvparten av senterhastigheten.

Når det gjelder bruk av kritisk hastighet for bunnstrøm i forbindelse med propellstrøm må en ta hensyn til at ytterkantene av propellstrømmen er mer turbulente i forhold til midlere strømhastighet enn en vanlig strøm med bunnfriksjon. I følge data i Blaauw og van de Kaa (1978) er relativ turbulens, dvs. forholdet U'/U mellom hastighetsfluktuasjon og midlere hastighet, ca. 0.6 i de ytre delene av strålen, mens den er ca. 0.3 midt i strålen, omtrent som i grensesjiktet for rørstrømning (Davies 1972). Det kan bety at kritisk hastighet bør regnes litt lavt i forhold til det som er bestemt ved bunnstrømmer generelt, fordi en må regne med relativt sterkere påkjenninger på bunn enn for vanlig bunnstrøm. Se ellers kap. 5.3 angående dette.

I grunt farvann vil propellstrømmen etterhvert kunne fylle ut hele vannsøylen fra overflate til bunn, og bevegelsesenergien etterhvert tapes ved horisontal spredning og friksjon mot bunnen. Det samme gjelder enda sterkere for propellstrøm inn under skipet ved reversering av hovedpropell. Da kan det være mer relevant å se på gjennomsnittshastigheten i det tverrsnittet strålen antas å fylle i det punktet hvor den vertikale utstrekningen møter de fysiske begrensningene og hastighetene homogeniseres vertikalt som avgjørende for om det blir oppvirvling. Det kan f.eks. virke rimelig å bruke en gjennomsnittshastighet i et kvadratisk tverrsnitt mellom øvre og nedre begrensning, altså før strålen spres videre ut mot sidene.

De modellene som er beskrevet her gjelder i en homogen resipient, og er særlig anvendbar i ferskvann og i kystfarvann som er lite påvirket av ferskvann. I en lagdelt vannmasse vil propellstrømmen representere en mer eller mindre homogenisert vannmasse, med en tetthet som tilsvarer blandingstettheten i det vannet som ble trukket inn til propellen. Tetthetsforholdene vil gi propellstrømmen en gravitasjonsdrevet spredning utover mot sidene, og det vil bidra til å begrense den vertikale utbredelsen av propellstrømmen, og derved også påvirkningen på bunn dyp som ligger dypere enn lagdelingen.

6.2 Innsuging mot propell

Som beskrevet foran kan hastigheten i propellverrsnittet V_1 beregnes ut fra data om effekt eller skyvkraft og skipets fart. Hastigheten tilsvarer et undertrykk rett foran propellen på

$$\Delta p = \rho \frac{V_1^2}{2}$$

Vannet trekkes inn mot propellen pga. dette undertrykket, som settes opp når vannet skyves bakover gjennom propellen eller turbinen.

Hvordan denne innsugingen foregår er vanskelig å forutsi. Spesielt når propell eller vannjet brukes for å akselerere eller dreie skip som ligger stille eller har lave hastigheter, kan det oppstå en "skypumpe"-effekter i innsuget, slik at det kan bli et roterende strålerør mot skipssiden eller mot bunnen, hvor vannet trekkes i en virvelbevegelse inn mot propellen. (Personlig meddelelse fra Aage Berg ved MARINTEK, Trondheim). I det siste tilfelle kan det gi oppsuging av partikler som så spres med propellstrømmen. Det er rimelig å tenke seg at det skyldes rotasjonskomponenter i de naturlige strømmingene i den vannmassen vannet trekkes fra. En kan tenke seg at skipets propeller ved begrensende topografi selv bidrar til å sette opp en slik rotasjon i vannmassene omkring på grunn av utstrømningen fra propellen, eller som reaksjonsstrømmer rundt skipet pga. den volumforskyvningen skipets bevegelser forårsaker. I følge Aage Berg har "skypumpe"-effekten hysteres, dvs. at når den først er oppstått, vedlikeholder den seg selv, og for at den da skal opphøre, kreves reduksjon av påvirkningen under det punktet hvor det oppsto. I prinsippet vil det samme skje i en vannjet.

I prinsippet kan en tenke seg at lagdelingen i resipienten skulle kunne begrense hvilke dyp det kan trekkes vann fra, men det ser ikke ut til å bety så mye i praksis. Undertrykket i propellverrsnittet er vanligvis mye større enn det som skal til for å trekke opp vann fra selv ganske store dyp. Realistiske vannhastigheter på 2, 4 og 8 m/s inn mot propellverrsnittet tilsvarer undertrykk på hhv. 2.000, 8.000 og 32.000 Pa. Til sammenligning vil tetthets-sjiktningen i Kristiansandsfjorden gi et mottrykk på typisk 500 Pa, og maksimalt ca. 2000 Pa når vann trekkes fra 20-40 m dyp opp til 2 m dyp. Det vil si at det kan trekkes opp vann fra slike dyp med ganske stor hastighet i innsuget til propellen. En beregning av det tetthetsbestemte mottrykket i Kristiansandsfjorden er vist i 8.2.

Dersom det oppstår roterende strålerør (skypumpe-effekt), er det vanskelig å beregne hvor store hastighetene kan bli langs bunnen. En nedre grense for strømhastighet ved bunnen kan beregnes ved å se på innstrømning uten rotasjon, mer eller mindre radielt inn mot propellen fra den ene siden. Da er det naturlig å anta at tverrsnittet øker proporsjonalt med avstanden inn mot propellen, samtidig som både undertrykket og hastigheten avtar. Hvis den svake dempende virkningen av tetthetsjiktningen neglisjeres, kan strømmen langs bunnen ha en hastighet som tilsvarer vanntransporten fordelt på et halvsirkelformet tverrsnitt med radius omtrent lik bunndypet (hvis avstand fra vannflaten til propellen er mye mindre enn bunndypet). For dyp H har vi da at strømmen langs bunnen kan komme opp i :

$$V_H = \frac{V_1 \pi \frac{D^2}{4}}{\pi \frac{H^2}{2}} = V_1 \frac{D^2}{2H^2}$$

Hvis $V_1 = 8$ m/s, og diameter er 3.6 m, som en kan ha for de store fergene, må en ha dyp $H > 10$ m for å komme under en hastighet på 0.5 m/s, og dyp 22 m for å komme under 0.1 m/s. Det vil si at jevn innsuging fra alle kanter kan gi erosjon av fint kohesivt sediment ned til 10-15 m dyp, men neppe under 20 meters dyp. Dersom det oppstår roterende strålerør mot bunnen gjelder ikke slike begrensninger.

6.3 Strømning rundt skip i bevegelse

Når skipet går, vil strømmingene være konsentrert i kjølvannet, som en strøm bakfra og fra sidene inn mot båten, som skaper bølger og turbulens. De volumforskyvningene som bevegelse av store skip medfører vil i en sterkt begrenset topografi inne ved kaia antagelig kunne settes opp kompensierende strømmer i hele det tilgjengelige strømtverrsnittet rundt skipet, også under skipet, som kan påvirke sedimentene.

7. Direkte målinger av oppvirvling av sedimenter pga. skipstrafikk

7.1 Målinger ved skipsmanøvrering i Oslo havn

Høsten 1994 ble det utført en enkel undersøkelse av oppvirvling av sedimenter i Oslo havn ved manøvreringen til fergene til DFDS og Stena Line ved Vippetangen (Magnusson 1995). Disse fergene er omtrent sammenlignbare med de ordinære fergene som anløper Kristiansand. Innholdet av suspenderte partikler ble målt som lyssvekning, turbiditet (lysspredning) og delvis også ved direkte analyse av partikkelinnhold i vannprøver.

Det ble ikke tatt prøver av sedimentene, men prøver som var tatt to år tidligere (Konieczny 1994) viste at overflatesedimentene utenfor Akershuskaia og andre nærliggende kaiområder, fra bunn på 6 - 26 m dyp, var relativt finkornede (27-87 % < 63 µm, stort sett mellom 60 og 75 µm). Sedimentene fra 20-25 m dyp hadde relativt høyt vanninnhold (11-23 % tørrstoff), mens de grunnere sedimentene var mer kompakte (40-73 % tørrstoff). Alt i alt er sedimentene nokså sammenlignbare med de en har i deler av Kristiansand havn (Beskrevet i 4.2).

Da DFDS Crown of Scandinavia bakket ut fra kai, ble det målt en viss økning i lyssvekningen, men så lite at det er usikkert om det er noen propell-effekt. Derimot var det en relativt klar økning i lyssvekningen under 8 meters dyp da en ferge fra Stena Line bakket inn på DFDS-kaia ca. 1.5 time senere. Det ble samtidig registrert en mulig mindre påvirkning opp til ca. 4 meters dyp, men ikke opp mot overflaten, hvor partikkelinnholdet fra før var høyere. Det ble bare målt like etter ankomst, og ikke verifisert med vannprøver. I forbindelse med at en ferge byttet kaiplass, og lå en stund ved kai med propellen i gang, ble det målt kraftig økning av lyssvekningen under 5 meters dyp, og det ble nå verifisert med direkte målinger av suspendert tørrstoff. Anslått økning i partikkelkonsentrasjon er 0.8 mg/l. Utviklingen ble også fulgt over tid, og etter et par timer var konsentrasjonene tilbake til bakgrunn, dvs. sedimentert og/eller spredt med naturlige strømmer. Kornfordeling på oppvirvlede partikler ble ikke målt.

Resultatene tyder på at partikkelpåvirkningen er begrenset oppover til et vanddyb som omtrent tilsvarer skipsbunnen, det vil også si underkant av propellstrømmen. Dert er ikke sikkert det gjelder generelt, oppstigningen av partikler kan også tenkes å være begrenset av lagdelingen i vannmassene. Påvirkning opp til skipsbunnen kan ellers være konsistent med oppvirvling både fra innsugingen til propellen og turbulens i propellstrømmen. Hvis en vesentlig del av innsugingen trekkes fra litt større dyp, vil den homogeniserte propellstrømmen synke ned igjen til et midlere dyp hvor den hører hjemme tetthetsmessig, og gi partikkelpåvirkning der, og ikke nær overflaten, selv om oppvirvlingen skjer i selve innsugingen. Hvis det er turbulensen i strømmen ut fra propellen som gir oppvirvling, vil det gi seg mest utslag i nedre del av propellstrømmen. Resultatene antyder et maksimum omkring hhv. 10 m dyp og 7 m dyp.

Mengden partikler som er virvlet opp er anslått til 40 til 160 kg ved denne skipsavgangen, ut fra observerte konsentrasjoner. Det er ikke basert på måling av skyens horisontale utbredelse, men basert på at arealet skjønsmessig anslått til å ligge mellom 9000 og 35000 m², og med vertikalfordeling fra 6 til 11 m dyp.

Resultatene viser at skipsmanøvrering kan gi en merkbar, om enn kortvarig oppvirvling av sedimenter, som ikke nødvendigvis er synlig fra overflaten, men likevel kan ha betydning for

resirkulering av miljøgifter til vannmassene. En kan derfor ikke slutte fra det som er direkte synlig på overflaten til hvor store miljøeffekter skipene har.

7.2 Måling ved skips-passering i Buffalo River, New York.

Pettibone et al. (1996) har målt sedimentinnhold og bakterieinnhold i Buffalo River ved passering av et stort lasteskip (lengde 196 m, dypgang 7.3 m). Målingene ble gjort i en 124 m bred kanal. Vannprøver ble tatt ca. 20-30 m fra bredden på hver side. Det er oppgitt at propellen har vært ca. 1 m over bunnen.

Før passasjen var partikkelkonsentrasjonene i området 3.4 til 6 mg/l, og det meste av det suspenderte partikkelvolumet hadde kornstørrelser i området 10 til 150 µm. Rett etter at skipet var passert, økte partikkelkonsentrasjonen til ca. 100 mg/l midt i kanalen, og det meste av materialet besto da av partikler fra 150 til 400 µm. Partikkelkonsentrasjonen sank deretter gradvis, men var fortsatt ca. 20 mg/l etter 135 minutter. Det drøftes ikke i hvilken grad forløpet etterpå skyldtes lokal nedsynkning og i hvilken grad det var restkonsentrasjoner etter oppvirvling og utsynkning lenger opp i elva. I følge artikkelen gikk skipet oppover i elva og la til kai.

7.3 Måling av partikkeloppvirvling pga. vind og skipstrafikk i Duluth-Superior Havn.

Erdmann et al. (1994) har målt partikkelkonsentrasjoner i vannsøylen i havna i Duluth i Lake Superior i USA. Det ble målt både på tidspunkter da konsentrasjonene ikke forventes å være influert av skipstrafikk, og etter passering av åtte skip av lengder 115 til 305 m, dypgang 6.7 til 8.5 m, og lastekapasitet 26 000 til 69 000 tonn. Motorkraft på propellaksel er oppgitt til å variere fra 3 000 til 13 000 KW. Sedimentkonsentrasjoner er målt som profiler ned til 10 m dyp, som må antas å være relativt nær bunndypet.

Laveste konsentrasjoner er 5 til 10 mg/l. For de profilene som ikke er influert av skipspasseringer, varierer konsentrasjon midlet over dyp fra 7 til 70 mg/l, og det er en ganske klar sammenheng mellom sedimentkonsentrasjon og vind fra sørøst* midlet over foregående 6 timer, etter en formel

$$C = 7.03W^{1.08}$$

hvor C er konsentrasjon i mg/l og W er vindhastighet. Maksimal konsentrasjon tilsvarer altså vindhastigheter omkring 10 m/s. Avviket er innenfor 30 - 40 %.

Konsentrasjonene rett før skipspassering varierer mellom 7 og 55 mg/l. Økning i sedimentkonsentrasjon pga. skipspassering varierer fra ikke detekterbart til 300 mg/l, uten noen vesentlig sammenheng med skipsstørrelse, eller med hva konsentrasjonen var på forhånd. Ut fra utviklingen av sedimentprofilene over tid etter skipspassering ble det beregnet synkehastigheter fra 0.08 til 0.25 cm/s. Hvis vi antar tetthet på partiklene ca. 2.6 g/cm³, tilsvarer det partikler med effektiv diameter omkring 30-80 µm (Dyer 1986).

* Mer eller mindre i lengderetningen for kanalen

Forfatterne henviser til tidligere studier som har påvist at turbulens skapt av overflatebølger kan virvle opp sedimenter fra 60 til 180 m bunndyp, men gir ingen enkeltheter om dette. Det gjelder da antagelig ferskvann uten nevneverdig tetthetssjiktning.

7.4 Målinger i Hamilton havn, Lake Ontario

Irvine et al. (1997) har målt konsentrasjoner av suspendert sediment i tilknytning til skipsbevegelser inn i et slipp-område i Hamilton Havn, i Lake Ontario, Canada. De målte på 5 skip, med lengder ca. 215 m, og 8.3 til 9.4 m dypgang.

Bakgrunnsverdier for turbiditet var i gjennomsnitt 11 NTU*, og bak skipene ble i gjennomsnitt målt ca. 90 NTU i grunt område (8 til 9.5 m bunndyp) og 16 NTU der det var dypere. Variasjonen var stor, med standard-avvik omtrent lik gjennomsnittet, dvs. omtrent en faktor 2-3 i forhold til gjennomsnittet.

Målingene viste at oppvirvlingen kan ha ganske begrenset utstrekning. Ved ett tilfelle ble det målt høy turbiditet i propellstrømmen 20 m bak skipet, både fra 0 til 3 m dyp (200 NTU) og fra 5 til 10 m dyp (200 NTU), mens det var lavere verdier (omkring 40 NTU) omkring 4 m dyp. Forfatterne antar det skyldes virvler i propellstrømmen. Lenger bak båten, dvs. 50 til 100 m bak, var turbiditeten lavere, omkring 50 NTU. Ved et annet tilfelle ble det målt høyest turbiditet nær overflaten (300 NTU) og ca. 200 NTU fra 3 til 6 m dyp, avtagende til 40 NTU nær bunnen.

Basert på direkte partikkelmålinger i vannprøver finner de en dobbelt-logaritmisk regresjon mellom turbiditet NTU og partikkelinnhold C i mg/l som kan skrives:

$$C = 4.47 NTU^{0.644}$$

korrigert for skjevhet ("bias") pga. logaritmisk transformasjon slik at den skal gi aritmetisk middel av C ved gitt turbiditet. Sammenhengen er illustrert i Tabell 3.

Tabell 3. Sammenheng mellom turbiditet og partikkelinnhold målt i tilknytning til skipsbevegelser i Hamilton Havn, i Lake Ontario, Canada.

NTU	mg/l
5	13
10	20
20	31
50	56
100	87
200	136
300	176

(Fra Irvine et al. 1997)

* 1 NTU: Nephelometric turbidity unit = 1 FTU (Formazine Turbidity Unit)

Rett bak de to skipene var det suspendert ca. 1 300 g pr. m² i vannsøylen integrert fra overflate til bunn. Forfatterne henviser til tidligere målinger av tetthet av vått sediment, varierende mellom 1.1 og 1.7 g/cm³, altså i omtrent samme intervall som i Kristiansand havn. Hvis partiklens tetthet (densitet) er omkring 2.5 g/cm³, vil det tilsvare et tørrstoffinnhold i sedimentet på mellom 0.17 og 0.8 g per cm³ vått sediment. Det betyr at den suspenderte partikkelmengden skulle tilsvare hhv. 1.6 og 6.5 mm vått sediment*, fra et tilsvarende areal. Siden en må regne med horisontal spredning, kan det i virkeligheten være dypere oppvirvling fra et mindre areal.

7.5 Virkning av skip på sedimenter i Kanawha River, West Virginia, U.S.A.

Kuo et al. (1989) beskriver målinger av oppvirvling pga. skipstrafikk, i hovedsak sleping av kull-lektene, i Kanawha River i West Virginia. Bunnen er oppgitt å bestå av sand/grus. Arbeidet bygger på målinger utført av U.S. T.V.A (1988), og sammenligner målte partikkelkonsentrasjoner med verdier beregnet av en modell for sammenhengen mellom strøm, vindgenererte bølger, divergerende bølger, vannbevegelser induisert av slepet, og propellstråle fra slepebåtene. Det er propelleffekten som gir størst konsentrasjoner (opp mot 300 mg/l), men også vannbegelsene rundt slepet har betydning, spesielt bakevjen i kjølvannet bak slepet. Bare hovedresultatene beskrives, for ytterligere detaljer henvises til Kuo et al. (1988).

7.6 Oppvirvling og sediment-transport i forbindelse med skipsbevegelser ved marinestasjonen San Diego, USA.

Sutton et al. (1998) beskriver resultatet av feltundersøkelser for å måle mengden suspenderte partikler i vannmassene før og etter skipsmanøvrer assistert av slepebåter ved kaiområdene ved marinestasjonen i San Diego Bay, California. Konsentrasjon og omfang av partikkelskyen ble målt ved hjelp av lystransmisjon, som ble regnet om til tørrstoffkonsentrasjonen ved en eksponensiell sammenheng som ble bestemt ut fra kalibrering mot vannprøver hvor partikkelinnholdet ble målt direkte. Det ble gjort en detaljert kartlegging ved at transmisjonsmåleren ble slept rundt 2 m under overflaten, både før og rett etter skipsankomst eller avgang, ved 5 forskjellige anledninger. Størrelsen på skipene er ikke angitt, men det ble brukt 2 eller 3 slepebåter hver gang. Alle målingene ble gjort innenfor et tidsrom av 45 minutter fra flo eller fjære, altså ved relativt lave strømhastigheter.

Bakgrunnskonsentrasjoner varierte fra 1.7 til 6.6 mg/l, og konsentrasjonsøkningen rett etter en skipsankomst eller avgang varierte fra 0.9 til 5 mg/l. Partikkelskyenes areal varierte mellom 0.25 og 0.44 km², og total mengde suspenderte partikler var mellom 4 og 20 tonn. Mengden er beregnet ved å anta at konsentrasjonen representerer gjennomsnittet over vannsøylen. Dette nevnes som en usikkerhetsfaktor, selv om et antall vertikalprofiler viste nokså uniform fordeling. Nærmere opplysninger om topografien er ikke gitt.

Det er oppgitt at havna har ca. 150 skipsbevegelser pr. måned, og det er estimert at total resuspensjon pga. skipstrafikk er ca. 15 000 tonn pr. år, og at det er ca. 3 ganger mer enn det

* Forfatterne anslår ca. 1 mm, men det ser ut til at de har anvendt verdiene for "bulk density" som om de gjaldt partikkelinnholdet.

som resuspenderes pga. stormer. Ut fra modellsimuleringer oppgis det at partikler med diameter $>100 \mu\text{m}$ stort sett vil sedimentere innenfor havneområdet, mens partikler på $20 \mu\text{m}$ vil kunne spres over en 5 km radius ved sterke tidevannsstrømmer.

7.7 Måling av miljøeffekter av passasjerfartøy i skjærgården på Åland i Østersjøen

Svartström og Lindholm (2000) har undersøkt variasjoner i vannkvalitet før og etter endring i trafikk mønsteret ved Langnäs havn på Åland fra mai til juli 1999. En nybygd havn ble tatt i bruk for passasjertrafikk fra 1. juli 1999. Store passasjerfartøy svinger ute på redene og bakker inn i havnen. Det ble observert at der skipene dreier 180° ble det revet opp en stor sediment-sky av suget fra propellene. Overflatetemperaturen sank markant, og partikkelkonsentrasjonen økte fra bakgrunnskonsentrasjoner 5-8 mg/l til ca. 40 mg/l. Etter at skipstrafikken startet, ble temperaturforskjellen mellom overflatevann og dypvann redusert med ca. 50 % ved Langnäs, sammenlignet med en referansestasjon, mens det før hadde vært omtrent samme forskjell begge steder. Skipstrafikken vil rive opp sedimenter samtidig som vannmassene blandes vertikalt. Denne blandingen vil i sin tur sett opp horisontale strømmer. Svartström og Lindholm nevner det ikke spesielt, men i en sjiktet vannmasse vil partikkelskyen antagelig spres utover i et mellomstjikt pga. gravitasjonsdrevet strøm, noe sterkere enn de naturlige strømmene i området.

7.8 Oppsummering av tidligere målinger beskrevet i litteraturen

De fleste av de studiene som er omtalt, gjelder ferskvann. Her varierte observerte partikkelkonsentrasjoner pga. skipsbevegelser mellom 100 og 300 mg/l.

For Østersjøen, som har relativt lav saltholdighet, er det referert en konsentrasjonsøkning på ca. 30 mg/l.

Fra marinebasen i San Diego er det observert konsentrasjonsøkninger på opp mot 5 mg/l ved skipsbevegelser som ble assistert av slepebåt.

Fra havna i indre Oslofjord er det målt relativt lave verdier, $<1 \text{ mg/l}$ for fergebevegelser, omtrent som de laveste rapporterte verdiene fra San Diego.

De refererte resultatene viser en tilsynelatende saltgradient, slik at sedimentene virvles opp vesentlig mindre i sjøvann enn i ferskvann. En skal ikke legge for mye vekt på det, siden det for noen av studiene ikke er gitt data om bunntopografi og skipsstørrelser eller sediment-sammensetning, slik at det er vanskelig å vite om situasjonene er sammenlignbare. Imidlertid stemmer den tilsynelatende trenden med det som er funnet i de studiene av sediment-erosivitet som har sett på saltholdighet som forklaringsvariabel (Kapittel 5).

8. Beregninger ut fra sedimentdata og litteraturstudium

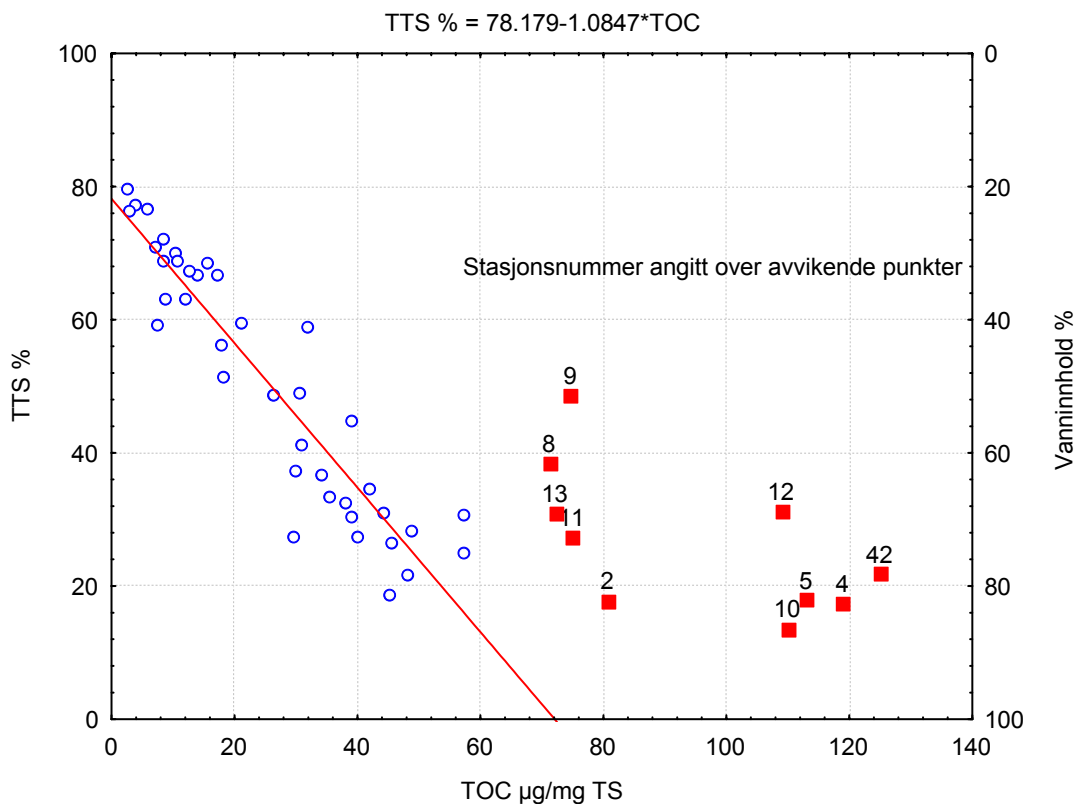
8.1 Variasjon i sedimentegenskaper i Kristiansand havn

Som beskrevet foran i kap. 4.2 varierer sedimentenes egenskaper mellom ulike deler av det havneområdet. Ut fra litteraturstudiet ser det ut til at sedimentenes tetthet er en viktig parameter for å vurdere sedimentenes erosivitet, og tettheten henger igjen i stor grad sammen med vanninnhold og innhold av organisk stoff.

8.1.1 Sammenheng mellom ulike sedimentegenskaper

For sedimentprøvene fra Kristiansandsfjorden er det generelt en klar sammenheng mellom vanninnhold, innholdet av organisk karbon og andelen i finfraksjon. Økende mengde organisk karbon henger sammen med økende finfraksjon, og høyere vanninnhold. For de fleste stasjoner er det en klar lineær sammenheng mellom innhold av organisk stoff og vanninnhold (Figur 6). Sedimenter med lite organisk karbon har et tørrstoffinnhold på 80 %, og det avtar lineært med økende TOC-innhold ned til ca. 20 % ved 50 µg TOC pr. mg tørrstoff. Sedimentene i grunnområdene i de sørvestre delene av fjorden avviker fra dette ved å ha et mye høyere TOC-innhold (70-125 µg/mg tørrstoff), men en mindre finfraksjon, i forhold til vanninnholdet.

Figur 6. Sammenheng mellom innhold av organisk stoff (TOC: totalt organisk karbon) og tørrstoffinnhold (TTS) i sedimentprøvene fra Kristiansand havn våren 2001.



En lineærregresjon av tørrstoffinnholdet mot andel i finfraksjon og TOC-innhold for hele materialet, inkludert de avvikende punktene i plottet, forklarer ca. 90 % av den totale variansen, og gir følgende sammenheng:

$$[\text{Vanninnhold (\% av totalvekt)}] = 22 + 0.424 \cdot [\% \text{ finfraksjon}] + 0.348 \cdot [\text{TOC } \mu\text{g/mg}]$$

8.1.2 Beregning av sediment-tetthet

Sediment-tettheten kan beregnes ut fra sediment-sammensetningen. For sedimentene fra Kristiansandsfjorden (Næs 2001) er tørrstoff-andelen angitt som % av total vekt (TTS), og innholdet av organisk karbon (TOC) som andel ($\mu\text{g/mg}$, eller ‰) av totalt tørrstoff.

Den samlede tettheten av vått sediment kan da beregnes som det inverse av spesifikt volum, gitt som vektet sum av de spesifikke volumer for de tre komponentene, ved denne formelen:

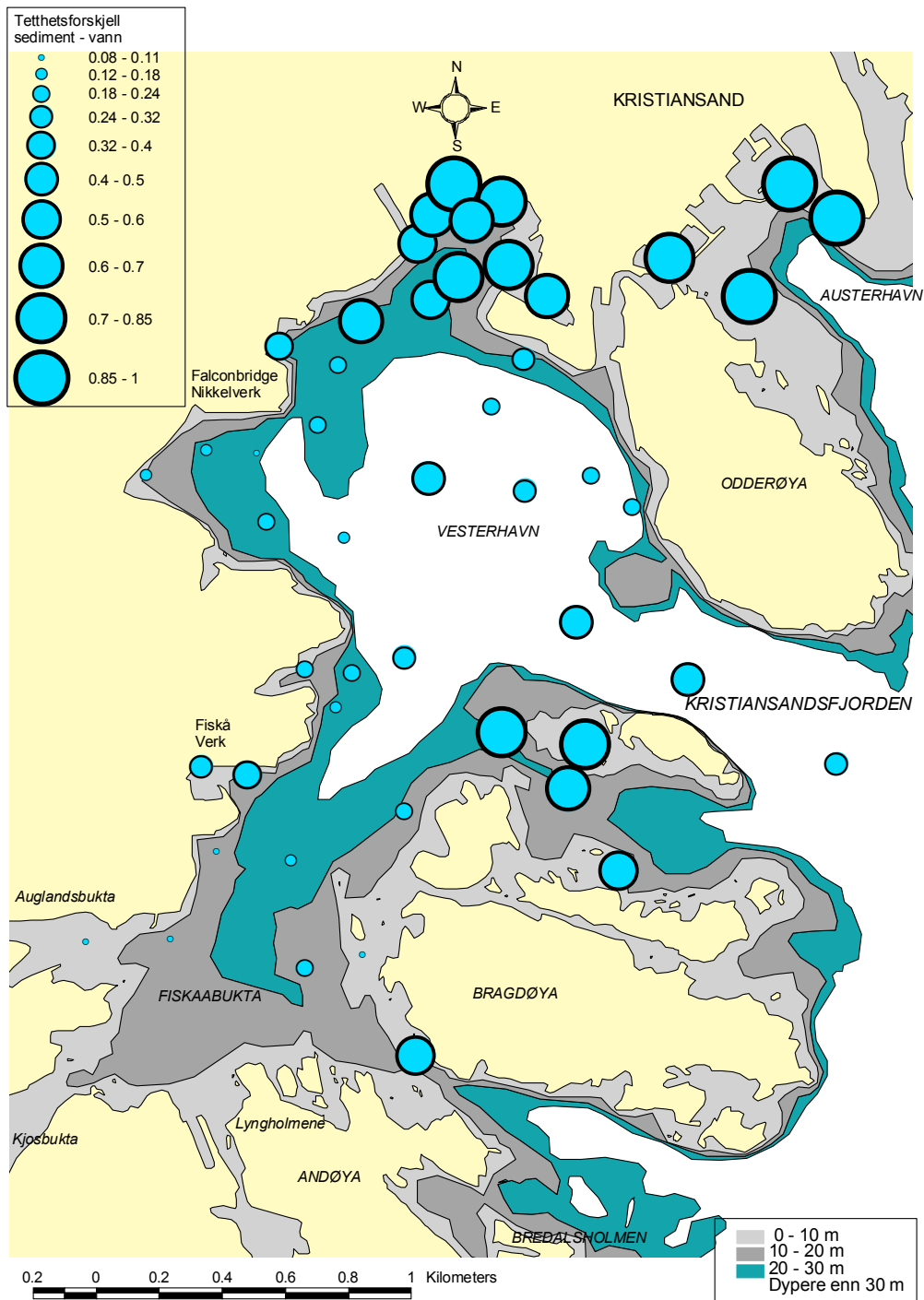
$$\rho_b = \frac{100}{\frac{(100 - TTS)}{\rho} + \frac{TTS \cdot (1 - TOC / 450)}{\rho_m} + \frac{TTS \cdot TOC / 450}{\rho_{org}}}$$

Det er her antatt at TOC utgjør 45 % av samlet vekt av organisk stoff. I denne formelen er ρ spesifikk tetthet for vann (satt til 1.025 g/cm^3), mens ρ_m og ρ_{org} tetthet av mineralske partikler og organisk stoff. Det er vanlig å anta $\rho_m = 2.65$ (kvarts), og $\rho_{org} = 1.3 \text{ g/cm}^3$ (Eisma 1993). I formelen er det antatt at ρ_{org} gjelder korrigert for vanninnhold. dvs.

$$\rho_{org} = \frac{\text{vekt av organisk stoff}}{\text{totalt volum} - [\text{vekt av vann}] \cdot \rho_w}$$

Tettheten av sedimentene i overflaten er beregnet av formelen ovenfor, ut fra tørrstoffinnhold og innhold av organisk karbon. Resultatene er vist i Figur 7. Hver sedimentprøve er markert med en sirkel hvor radius er proporsjonal med forskjellen fra vannets tetthet. De minste sirklene angir tetthet omkring 1.1 g/cm^3 , og de største ca. 2.0 g/cm^3 . Figuren viser klart at sedimentene i Hanneviksbukta og Fiskaabukta er mye lettere enn i den nordlige del av havna, og derfor mer utsatt for oppvirvling under ellers like forhold, dvs. ved samme påvirkning fra vannbevegelser og turbulens ved bunnen.

Figur 7. Kart over Kristiansand havn med beregnet sediment-tetthet for stasjonene fra Næs og Rygg (2001). Størrelsen på sirklene indikerer tetthetsforskjell mellom vått sediment og vann ($\rho_b - \rho_w$) med enhet g/cm^3 .

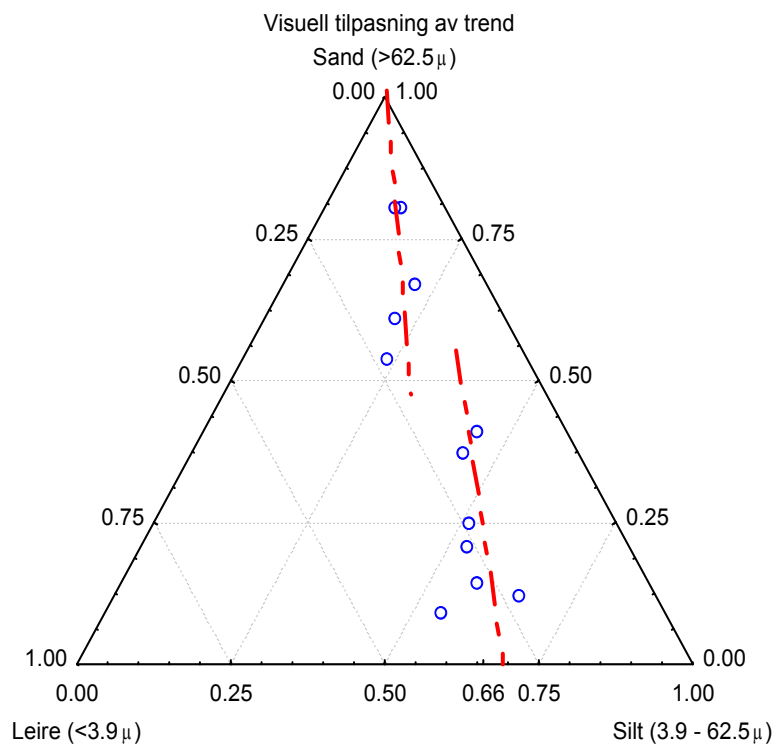


8.1.3 Sammensetning av finfraksjon for utvalgte sedimentprøver

Av det materiale som ble innsamlet av Næs (2001) er 12 prøver plukket ut for nærmere kornfordelingsanalyse, dvs. oppsplitting av finfraksjonen i silt og leire. Resultatet er vist i Figur 8 og gjengitt i Vedlegg 1, Tabell 10. Figuren viser at forholdet mellom silt og leire i finfraksjonen varierer relativt lite, uavhengig av hvor stor finfraksjonen er. For de prøvene som ble plukket ut er det slik at de som inneholder mer enn 50 % sand har en finfraksjon som består av ca. 50-60 % silt og resten leire, mens de prøvene som har mindre sand inneholder ca. 70 % silt og 30 % leire.

Ut fra dette er det ikke funnet grunnlag for å trekke dette inn i vurderingen av erosivitet av sedimentene.

Figur 8. Ternærplott forfordeling mellom sand, silt og leire for utvalgte sedimentprøver fra Kristiansandsfjorden



8.2 Betydning av lagdeling i vannmassene for påvirkning fra propellstrøm

Sterk lagdeling kan i prinsippet ha betydning for hvor dypt propellstrømmen kan nå, og også begrense hvilket dyp innsugningen til propell eller vannjet kan skje fra. For å kvantifisere dette for Kristiansandsfjorden er tilgjengelige data for stasjon V1, som ligger midt i Vesterhavna, gjennomgått (se kapittel 4.1 for en omtale av datagrunnlaget). For hver dybdeprofil er det beregnet hvilket undertrykk eller sug som skal til for å trekke opp vann fra et gitt dyp z_1 opp til et realistisk propelldyp z_0 . For en tetthetsprofil $\rho(z)$ er dette trykket gitt ved

$$p_0 = g \left(\rho(z_1)(z_1 - z_0) - \int_{z_0}^{z_1} \rho(z) dz \right)$$

hvor g er gravitasjonskonstanten. Trykkforskjellen p_0 er det undertrykket som skal til for å bringe opp vann fra dyp z_1 til z_0 med neglisjerbar hastighet, og den kinetiske energien i propellterrsnittet vil komme i tillegg, slik at det totale undertrykket i propellterrsnittet hvis vannet har hastighet V relativt til omkringliggende vannmasser blir.

$$p = p_0 + \rho(z_1) \frac{V^2}{2}$$

Hvis gjennomsnittlig undertrykk foran propellen er gitt som p , kan formelen brukes til å beregne hastigheten i propellterrsnittet som funksjon av hvilket dyp vannet er trukket fra.

I følge de tilgjengelige hydrografidata fra Kristiansand havn kreves et undertrykk på 60 - 2000 Pa for å trekke opp vann fra relativt stort dyp (≥ 30 m), avhengig av hvor sterkt tetthetssjiktningen er, og dette vil variere over tid. For 50 % av de observerte tetthetsprofilene vil nødvendig trykk ligge mellom 200 og 800 Pa. Ut fra tilgjengelige data om skip som trafikkerer havna er det beregnet at suget foran propellen er i størrelsesorden 15 til 20 kPa, altså mer enn 7 ganger det som kreves for å trekke opp vann fra stort dyp med lav hastighet, selv ved sterkeste sjiktning. Det betyr at tetthetssjiktningen ikke i noe tilfelle begrenser hvilke dyp propellen kan trekke vann fra.

Derimot kan lagdeling i overflaten bidra til å begrense vertikal utbredelse av propellstrøm, og holde den nær overflaten, dersom det vannet som suges inn har en stor andel fra overflate-laget. Det kan bety at påvirkning på bunnen blir mindre enn beregnet for homogen resipient, som er det modellene foran er tenkt å gjelde for.

8.3 Vurdering av erosivitet/stabilitet for sedimentene i Kristiansand havn

Som grunnlag for å vurdere oppvirvlingspotensialet i Kristiansand havn er det gjort en trinnvis beregning.

Data for de innsamlede sedimentprøvene er brukt til å anslå kritisk skjærspenning τ_c for oppvirvling ut fra de resultatene som er samlet i litteraturen. Det er gjort ved å beregne sediment-tettheten som beskrevet i kap. 8.1.2 og deretter beregne kritisk skjærspenning $\tau_c = \zeta \cdot (\rho_b - \rho_w)$ med to verdier for ζ , nemlig 1 og 10 Pa $g^{-1}cm^3$ (se kap. 5.5). Ut fra de resultatene som foreligger er det rimelig å anta at den laveste verdien er et forsiktig estimat for erosjonsmotstanden til kohesive sedimenter i sjøvann, men den høyeste verdien kan også tenkes å være omtrent riktig. Figur 7 viser hvordan tetthetsforskjellen mellom vått sediment og vann varierer i Kristiansand havn. Kartet viser at de letteste og minst stabile sedimentene finnes midt i havneområdet, og langs vestsiden av fjorden, rundt industrikanalene til Falconbridge og Elkem, mens de er tyngre og antagelig mer stabile i det nordre havneområdet, dvs. bl.a. ved fergekanalene.

For å vurdere hvor erosjonsutsatte sedimentene er, må det anslås hvilke skjærspenninger som kan opptre pga. skipstrafikk i de aktuelle bunndypene. Det tas da utgangspunkt i sammenhengen mellom strømhastighet u og skjærspenning som er beskrevet i kap. 5.3. sammenhengen mellom kritisk skjærspenning τ_c og kritisk hastighet V_{cr} er:

$$V_{cr} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho \cdot c}}$$

hvor koeffisienten c kan ha verdi 0.003 for bunnstrøm (V_{cr} = hastighet 1 m over bunn), eller 0.03-0.055 for turbulent propellstråle (V_{cr} = hastighet langs strålen nede ved bunnen).

Det er valgt noen typiske propellstrømmer for de båtene som trafikkerer havna, og så er det beregnet hvilke bunnstrømmer, og derved skjærspenninger, slik propellpåvirkning kan gi ut fra bunndyp for de forskjellige sedimentprøvene. For hver sedimentprøve beregnes maksimal hastighet i bunndypet i løpet av en propellpassering, som funksjon av strålehastighet og diameter, etter de formlene som er beskrevet i kap. 6.1.3.

Ut fra de tekniske data for skip i Vedlegg 3 er det satt opp noen typiske propellstråledata i Tabell 4. Tabellen viser også koeffisienter for beregning av største hastighet ved bunn som funksjon av bunndyp etter de enkle betrakningsmåtene for propellstråle i kap. 6.1.3:

$$V_{bunn} = \frac{K_1}{H} \text{ med koeffisient } K_1 = 0.3 \cdot D_0 \cdot V_0$$

og for innsug mot propell i kap. 6.2:

$$V_{bunn} = \frac{K_2}{H^2} \text{ med koeffisient } K_2 = V_1 D^2 / 2$$

Tabellen gir også beregnede største hastigheter ved bunn som ligger hhv. 10 og 20 m dypere enn propellakselen.

For eksemplene i tabellen ligger de beregnede hastighetene fra 1 m/s og nedover mot noen få cm/s. Det er propellstrømmen som vil gi størst påvirkning i følge denne beregningen, som altså ikke tar hensyn til muligheten for roterende strålerør i innsuget til propellen.

Ut fra denne beregningene er det valgt å se på de enkelte sedimentprøvene i forhold til påvirkning fra propellstrøm med K_1 10 og 2.5 (dvs. omtrent hovedpropell og baugpropell i tabellen). Påvirkningen fra taubåt vil ligge et sted i mellom.

Tabell 4. Beregning av hastighet ved bunn for ulike propelltyper ved fri propellstrøm og for jevnt fordelt innsuging til propellen

	Kontrahert stråle bak propellen					Sug inn mot propellen				
	Diameter (m)	Hastighet (m/s)	K_1 (m ² /s)	V_{bunn} (m/s)		Diameter (m)	Hastighet (m/s)	K_2 (m ³ /s)	V_{bunn} (m/s)	
				H=10 m	H=20 m				H=10 m	H=20 m
Hovedpropell (Christian IV) (propellakse i 3.5 m dyp)	2.7	12.1	9.8	1	0.5	3.6	6.8	44	0.44	0.11
Baugpropell	1.8	4.2	2.3	0.23	0.11	1.8	4.2	6.8	0.07	0.02
Taubåt (propellakse i 2.15 m dyp)	1.65	10	5.0	0.5	0.25	2.2	5.7	13.8	0.14	0.035

For hver sedimentprøve er det beregnet et mål på erosivitet ved å kombinere kritisk hastighet gitt av sedimenttettheten med anslått hastighet ut fra bunndypet der hvor sedimentene er tatt. Beregnet påvirkning gjelder for tetthetshomogen resipient, og uten at det tas hensyn til fysiske begrensninger oppover. Lagdeling kan bidra til svakere påvirkning (mindre hastighet ved gitt bunndyp), mens begrensninger oppad (vannoverflate eller skipsbunn) kan gi større påvirkning nedover. Beregningen er derfor bare orienterende, og tjener mest til å rangere sedimentene mht. faren for oppvirvling, og gi en viss idé om hvor erosive de er.

For hver valgt typisk propellstrøm er det beregnet en dimensjonsløs overskuddsspenning

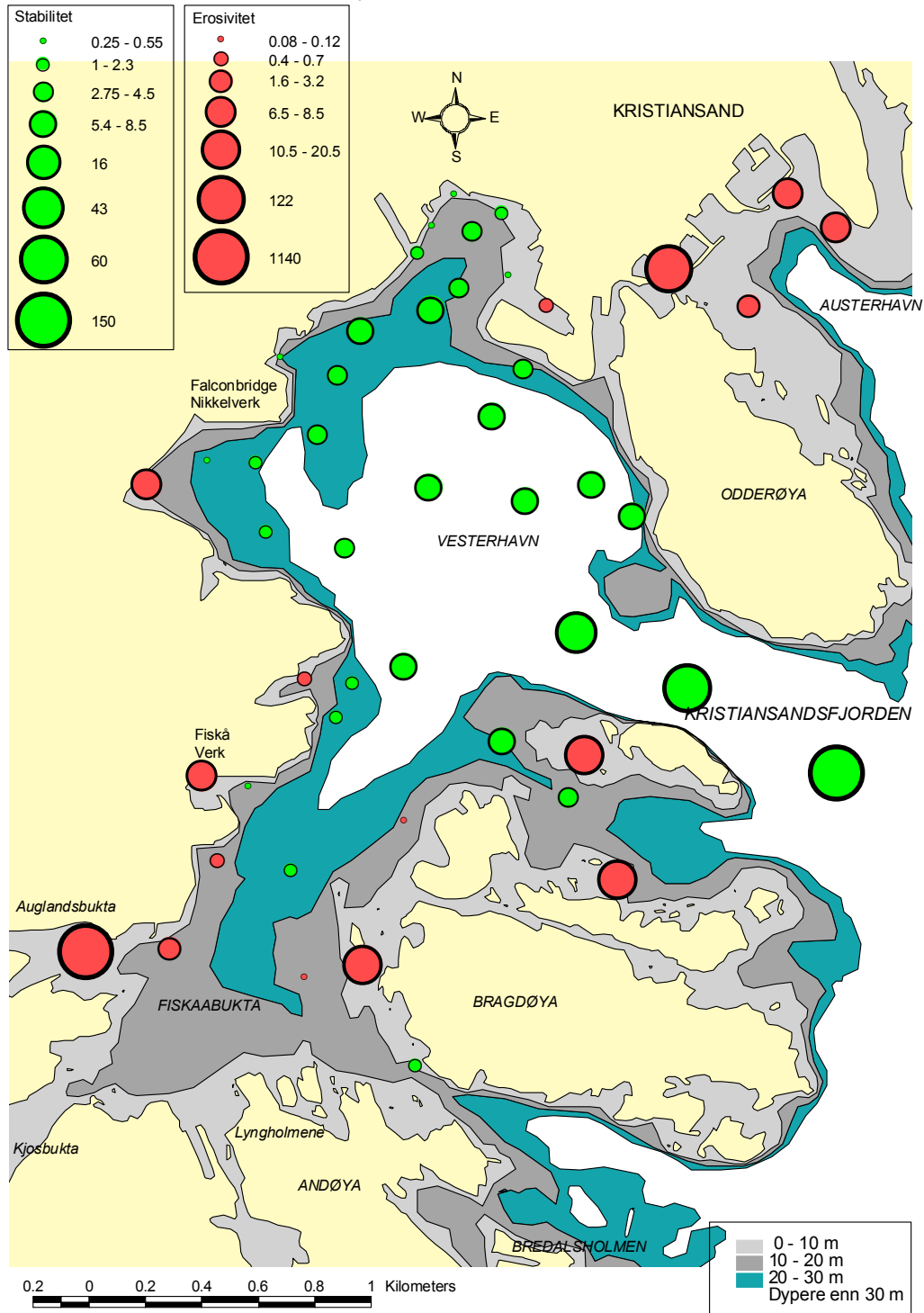
$$T = (\tau - \tau_c) / \tau_c = \left(\frac{V_{bunn}}{V_{cr}} \right)^2 - 1$$

De sedimentene hvor overskuddsspenningen er langt under 0 må vurderes som stabile i forhold til forventet påvirkning, mens verdier >0 indikerer mulig oppvirvling. Mengden som kan virvles opp vil være omtrent proporsjonal med T .

Resultatet er avhengig av hvilke antagelser som gjøres. For hovedpropellen på et stort skip, som for Christian IV, og ut fra den største koeffisienten c for sammenheng mellom skjærspenning og hastighet ved bunn, dvs. for turbulent stråle, kan skjærspenningen bli mange ganger større enn den kritiske på stort sett alle stasjonene. Det betyr at ingen av sedimentstasjoner sikkert kan sies å være stabile mot oppvirvling. Det gjelder uansett hvilken av de to alternative verdiene på ζ som velges i ligningen for kritisk skjærspenning.

For en baugpropell, og med den største verdien på koeffisienten ζ , blir $T < 0$ for en del av sedimentene, som da kan anslås å være mindre utsatt for oppvirvling. Figur 9 viser hvordan sedimentstasjonene kan rangeres som mer eller mindre utsatt for oppvirvling ut fra en slik beregning, hvor både dyp og tetthet tas i betraktning. Beregningen gjelder for turbulent stråle, dvs. med største koeffisient c i sammenhengen mellom hastighet og skjærspenning.

Figur 9. Kart over Kristiansand havn med beregnet indikasjon på hvor utsatt sedimentene er for oppvirvling ut fra bunndyp og sediment-tetthet for stasjonene i Næs og Rygg (2001) ut fra forhold mellom kritisk skjærspenning τ_c og faktisk skjærspenning τ . Gjelder påvirkning fra turbulent stråle fra baugpropell 4 m under overflaten, og med koeffisient $\zeta = 10 \text{ Pa g}^{-1} \text{ cm}^3$. Grønne sirkler: stabilt. Størrelsen angir grad av stabilitet som $(\tau_c - \tau)/\tau_c$. Røde sirkler: vil bli virvlet opp. Størrelsen angir $(\tau - \tau_c)/\tau_c$ og kan ses som mål på erosjonsrate.



De grønne markeringene viser sedimenter som har $T < 0$. Størrelsen på de grønne markeringene viser stabilitet angitt ved $(-T/T + 1) = (\tau_c - \tau)/\tau$. Jo større symbolene er, jo større er sikkerhetsmarginen mht. erosjon i en slik situasjon.

De røde markeringene viser stasjoner som har $T \geq 0$, og størrelsen på symbolene øker med økende T . Jo større de røde symbolene er, jo mer vil sedimentene bli virvlet opp av en slik påvirkning.

Stabiliteten beregnet på denne måten er i stor grad bestemt av vanddypet, og gir derfor et annet bilde enn ved bare å se på tettheten. Kartet viser at sedimentene i nordre del av havna er relativt stabile, i første rekke selvsagt i de dypere områdene, og mindre stabile i de søndre delene og langs land på vestsiden, bl.a. ved industri kaiene og sør i Fiskaabukta. Mye av forskjellen henger som sagt sammen med vanddypet, men det er også forskjell mellom områdene for stasjoner som ligger på samme dyp. Sedimentene i de søndre delene og ved industri kaiene vil kunne eroderes (rød sirkel eller liten grønn sirkel) ved påvirkning fra baugpropell som angitt, mens det kreves større påvirkning for å erodere sedimentene i de nordlige delene, bl.a. rundt ferge kaiene.

Det må understrekes at beregningene bare gir et omtrentlig bilde at oppvirvlingspotensialet i Kristiansand havn, og med stor usikkerhet. De kan gi en omtrent riktig rangering av sedimentene etter hvor utsatt de er for oppvirvling fra en gitt type skipsbevegelse, men beregningene er selvsagt usikre mht. absoluttverdier, og tar ikke hensyn til mulige effekter m.h.t. rotasjon i innsugningen, variable tetthetsforhold i resipienten etc. Inndelingen i stabile og erosive sedimenter i figuren gjelder bare for de gitte forutsetninger, som et eksempel, og er i virkeligheten bare en inndeling av sedimentene som mer eller mindre erosive.

8.4 Oppvirvling ved reversering av hovedpropell fra større skip

Som nevnt foran kan på virkning fra store propellere tenkes å gi oppvirvling på alle stasjonene. Spesielt gjelder det for propellstrøm som sendes inn under skipet ved reversering av hovedpropell inne ved kai over relativt grunne bunnpartier. Her er det rimelig å tro at påvirkningen på bunnen kan bli mye sterkere enn beregnet for fri propellstråle bakover, spesielt for store skip. Som eksempel kan en tenkes seg et lasteskip på 30-40 000 tonn dødvekt, med en motoreffekt på ca. 14 000 kW, dvs. ca. 20 000 HK, og en hovedpropell med ca. 5 m diameter. en slik båt vil typisk ha en dypgang på ca. 10 m, og en bredde på 25-30 m. Ved full motorkraft kan en regne en skyvkraft T på ca. 2 090 000 Newton ut fra formelen for T på side 42 når koeffisienten for dysepropell brukes, og det gir en hastighet på 7.2 m/s gjennom propellverrsnittet etter formelen for V_1 som funksjon av T på side 41. Propellverrsnittet er 20 m². Det gir en mulig volumstrøm på ca. 140 m³/s. Som beskrevet på side 41 vil hastigheten raskt øke til omtrent det dobbelte, samtidig som tverrsnittsarealet innskrenkes til ca. halve propellverrsnittet. I dette punktet vil altså arealet være ca. 10 m² og hastigheten ca 14 m/s. Deretter vil strålen rive med seg vann og øke i volumfluks, og avta i hastighet igjen. Når et skip som går rett inn langs kai og stoppes ved å reversere hovedpropellen, vil propellstrømmen sendes inn under båten. Hvis bunn dypet er 15 m, vil da propellstrømmen bli begrenset til et 5 m tykt sjikt mellom skipsbunnen og fjordbunnen. Maksimal påvirkning på bunnen kan vi vente opptrer der hvor strålen støter på den vertikale begrensningen, men før den spres horisontalt ut til sidene.

Hvis vi antar homogen hastighet i et gjennomstrømningsareal på ca. $5 \cdot 10$ meter under båten, gir impulsbevaringen en hastighet på

$$V = 14(m/s) \sqrt{\frac{10m^2}{5 \cdot 10m^2}} = 6.2 \text{ m/s.}$$

Dette vil antagelig forekomme i et relativt begrenset område, men selv når strålen fyller ut hele skipets bredde vil hastigheten kunne være 4 m/s. Hastighetene ligger langt over kritiske hastigheter for sedimentet, og en slik stråle kan tenkes å grave opp sedimentet og danne groper i bunnen, som siden kan fylles med fint sediment som vil virvles opp ved senere skipsanløp. Det må presiseres at disse hastighetene bare er anslag bygd på sterkt forenklede forutsetninger, men de bør gi en omtrent øvre grense for mulig strømhastighet over bunnen ved anløp av større skip.

8.5 Konklusjoner

Den studien som er foretatt, viser at det er store usikkerhetsfaktorer i en teoretisk vurdering av hvilke påvirkninger fra skip som vil gi oppvirvling av sedimenter. Ut fra de opplysninger som er fremkommet kan en ikke si sikkert at sedimentene noe sted i havneområdet er stabile mot erosjon fra de påvirkninger en må regne med i Kristiansand havn. Imidlertid er det regionale forskjeller. I det offentlige havneområdet i nord er sedimentene relativt stabile i forhold til mindre båter, men kan eroderes av de største skipene som trafikkerer der, bl.a. de store fergene. Ved industrikanalene er sedimentene lettere, og antagelig langt mer utsatt for oppvirvling også av mindre båter.

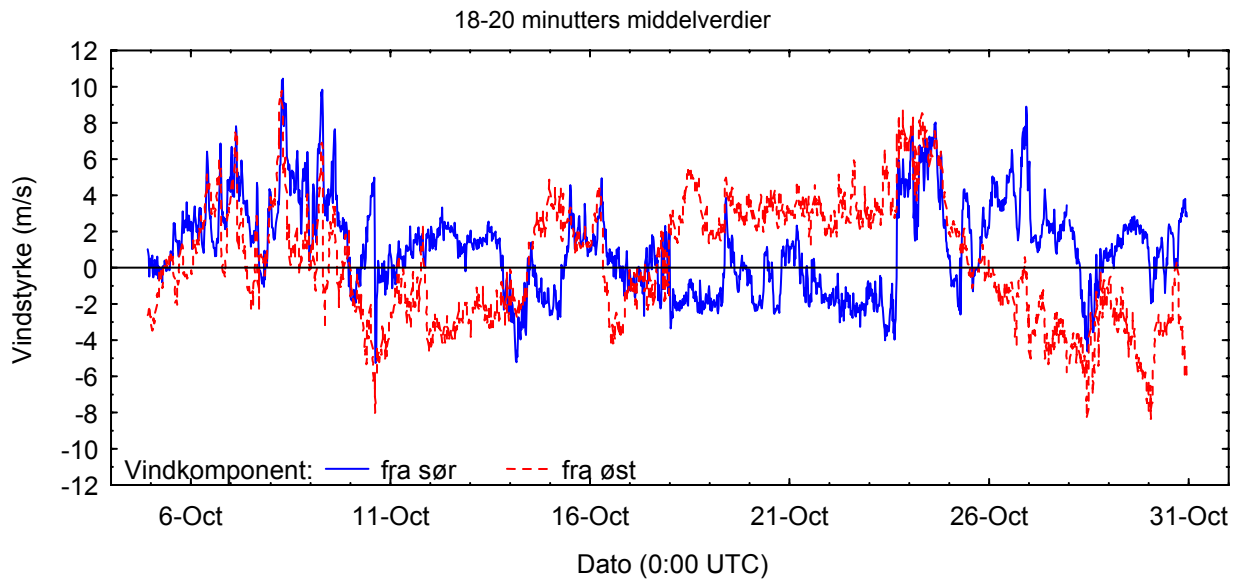
Det må også nevnes at det selvsagt kan være interaksjon mellom vindpåvirkning og påvirkning fra båttrafikk. Siden bruk av propeller ved manøvrering kan være avhengig av vind og strøm, kan det tenkes at vindpåvirkning også vil medføre spesielt sterk påvirkning fra skipspropeller, slik at det blir en direkte kobling mellom de to typene påvirkning, som kan øke betydningen av en slik interaksjon.

9. Feltarbeidet i oktober 2001

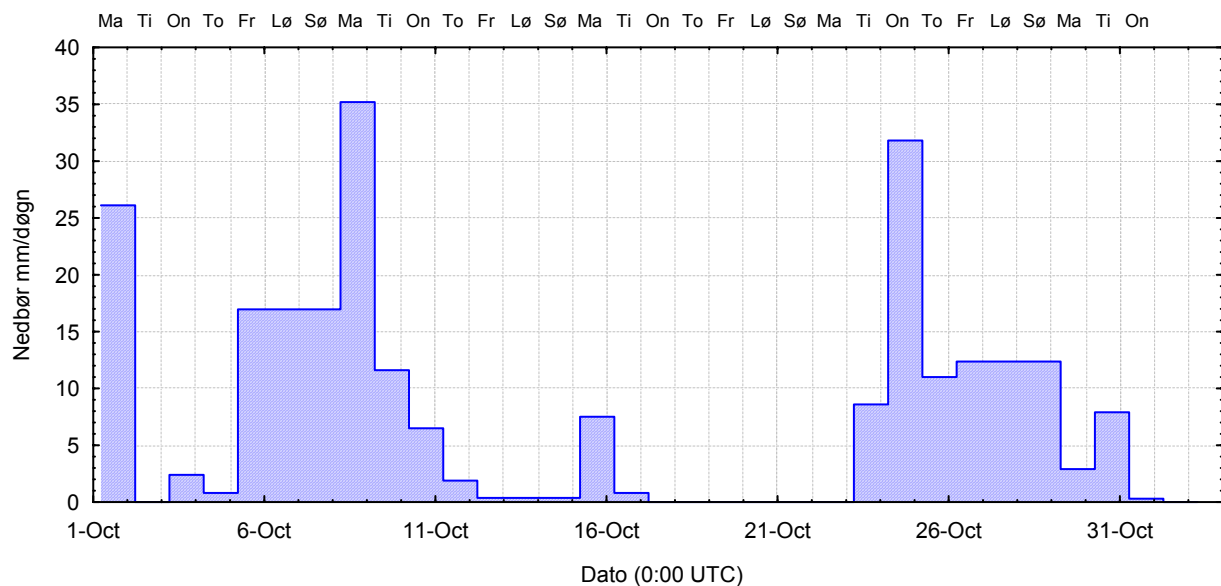
9.1 Meteorologiske data

Figur 10 og Figur 11 viser data for vind og nedbør i måleperioden, basert på data fra Falconbridge.

Figur 10. Vindstyrke dekomponert til nordlig og østlig retning, 20-minutters middelerverdier målt av Falconbridge



Figur 11. Døgnverdier for nedbør målt ved Falconbridge. Fra fredag morgen til mandag morgen er avlest totalverdi fordelt på tre døgn. Søylene er knyttet til avlesningstidspunkt, justert til UTC. Ukedag er vist på toppaksen



9.2 Oversikt over skipsanløp i måleperioden.

For Elkem ASA var det to båtanløp i måleperioden, ett den 8. oktober, mens målerne sto ute, og ett 11. oktober, under det første feltarbeidet. Tabell 5 og Tabell 6 viser oversikt over skipsbevegelser ved hhv. Elkem ASA og Falconbridge i de aktuelle måleperiodene. Dato og klokkeslett i de venstre kolonnene er basert på opplysninger fra bedriftene. Dette er supplert med notater gjort under NIVAs feltarbeid med nøyaktig tidsangivelse. For skipsbevegelsene mellom 12. og 29. oktober viser Tabell 6 nøyaktige tidspunkter i kursiv, basert på NIVAs notater. De er fastsatt ut fra observerte endringer i magnetfeltet når skipene ligger ved kai, som det er redegjort for sist i Vedlegg 8.

Tabell 5. Skipstrafikk ved Elkem ASA 6-11.10 2001.

Dato	Kl.	Skip	Ankomst	Kommentar	NIVA-notater (lokal tid)	Tid UTC
8.10	08:40	Freya	Ankomst	Tankbåt, ca. 2000 tonn. La til helt ytterst på kaia		6:40
	16:20		Avgang			14:20
	10-11	Containerbåt	Avgang			8-9
	13-14	Containerbåt	Ankomst			11-12
10.10	10-11	”	Avgang			8-9
	13-14	Containerbåt	Ankomst			11-12
11.10	10-11	”	Avgang			8-9
	13-14	Containerbåt	Ankomst			11-12
		Northern Lurnes	Ankomst	Ca. 3000 tonn. Dypgang: 5.5 m. Vendte ute i havna og bakket inn langs kaia. Reverserte hovedpropell.	Anløp kl. 14:45-14:49	12:50

Basert på opplysninger fra Nils Dag Drivdal ved Elkem ASA

Tabell 6. Skipstrafikk ved Falconbridge Nikkelverk 10-30.10 2001. For ankomst gjelder tiden når siste trosse var på plass. For avgang gjelder tiden når siste trosse ble kastet.

Opplysninger fra bedriftens logg					NIVAs tidsangivelser fra feltarbeidet og ut fra vektormåler.	Tid UTC
Dato	Kl.	Skip	Ankomst / avgang	Kommentar		
12.10	0700	Federal Welland	Ankomst	Mattebåt, 28000 tonn. En taubåt. Baugpropell. Feltarbeid	Båten på plass ved kai kl. 06:30	04:30
13.10	1300	”	Avgang		Fra kai kl. 14:13	12:13
16.10	1300	CT Sky	Ankomst	Syrebåt. Ingen taubåt. Brukte østre del av hovedkaia.	På plass ved kai kl. 12:59	10:59
17.10	0130	”	Avgang		Fra kai kl. 01:39	16. okt 23:39
19.10	21.00	M/V Wani	Ankomst	Syrebåt.	Til kai kl. 21:12	19:12
21.10	0840	”	Avgang	Lastet ferdig	Fra kai kl. 08:43	06:43
29.10	1420	Sark Trader	Ankomst	Syrebåt, 4900 tonn. Tom ved ankomst. Ingen taubåt. Brukte østre del av hovedkai	Båten inn til kai kl. 1400, første trosse i land 1404	13:00
30.10	0920	”	Avgang	Lastet ved avgang	Båten fra kai kl.0936	08:36
	1100	Lake Charles	Ankomst	Mattebåt 16500 tonn. To taubåter. Ingen baugpropell. Feltarbeid ved ankomst	Båten på plass ved kai kl. 1021	09:21

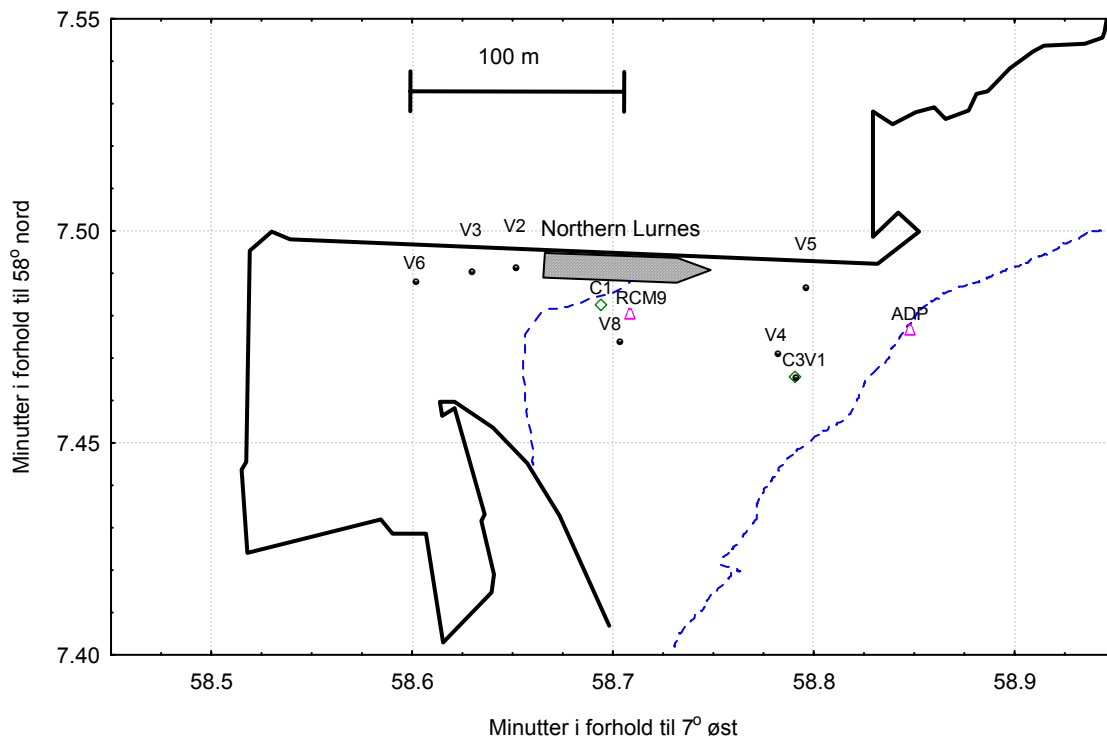
Opplysninger fra Falconbridge Nikkelverk v/Harald Eik på grunnlag av bedriftens logg over skipstrafikk ved hovedkaia, supplert med egne notater fra feltarbeidet.

9.3 Målinger ved Elkems kai

To selvregistrerende strømmålere sto utplassert fra 6. oktober til 11. oktober. I følge opplysninger fra Elkem var det to skipsanløp i perioden, i tillegg til fast trafikk med containerbåter til den ytterste kaia ut mot havnebassenget i nordøstlig retning. *Freya* på ca. 2000 tonn ankom 8. oktober kl. 6:40 UTC med avgang kl.14:20 UTC samme dag i følge opplysninger fra bedriften, og *Northern Lurnes fra Wilson Rederi* (3700 tonn dødvekt), ankom 11. oktober kl. 12:50 UTC. I tillegg var det trafikk med containerbåt.

Ankomsten til Northern Lurnes ble observert av NIVA under feltarbeidet, slik at tidsangivelsen her er nøyaktig. Det ble gjort målinger av sjiktning og partikkelinnhold i forbindelse med dette skipsanløpet. Figur 12 viser posisjon for de utplasserte instrumentene (RCM9 og ADP), samt CTD-profiler C1 og C3, og vektormålinger V1 – V8 tatt i forbindelse med det siste skipsanløpet. Disse målingene beskrives nærmere i kap. 9.3.2.

Figur 12. Kart over området ved Elkems kai med måleposisjoner angitt.



9.3.1 Selvregistrerende instrumenter

Figur 13 viser hastighet i østlig og nordlig retning målt av RCM-9, sammen med variasjoner i turbiditet, i måleperioden fra 6. oktober til 11. oktober. Tidspunkt for båtbevegelser er også markert. Stort sett varierer turbiditeten rundt ca. 0.5 FTU, som kan betraktes som en normal lav bakgrunnsverdi, og opp mot 1, som også ligger innenfor et normalt variasjonsområde. En del topper forekommer, på opptil 2 FTU, men ingen virkelig kraftig økning av partikkelkonsentrasjonen.

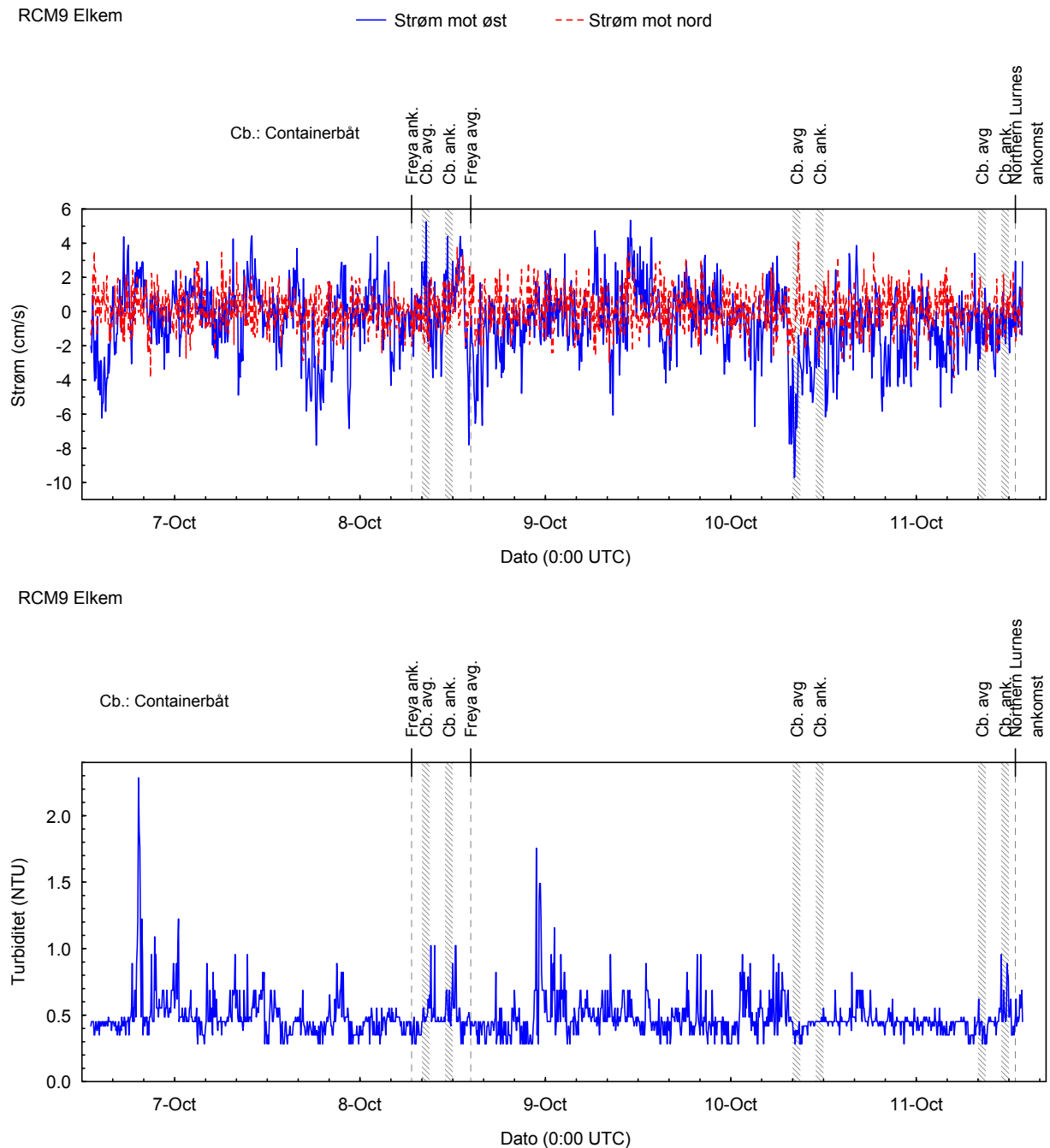
Det er ingen tydelige utslag i instrumentene hverken på turbiditet eller strøm som kan settes i sammenheng med skipsanløp. De største turbiditetstoppene forekommer til andre tidspunkter enn tiden for rapporterte skipsbevegelser. I tiden rundt de to skipsanløpene til hovedkaia er det ingen utslag å se. Noen mindre topper forekommer omkring tid for avgang og ankomst av containerbåt 8. oktober, men utslagene ligger godt innenfor det som også forekommer ellers, så det er ingen spesiell grunn til å tro at det har med båtbevegelsene å gjøre. Strømmen har heller ingen spesielle utslag i forbindelse med båtanløpene.

Figur 14 viser at det er en viss sammenheng mellom turbiditet og strømretning, på den måten at høy turbiditet stort sett ikke forekommer ved markert strøm mot vest, dvs. når strømmen går innover i bukta langs kaia. Det ser derfor ut til at turbiditetstoppene har opprinnelse innenfor eller sør for denne måleposisjonen, men hva som fremkaller dem er usikkert.

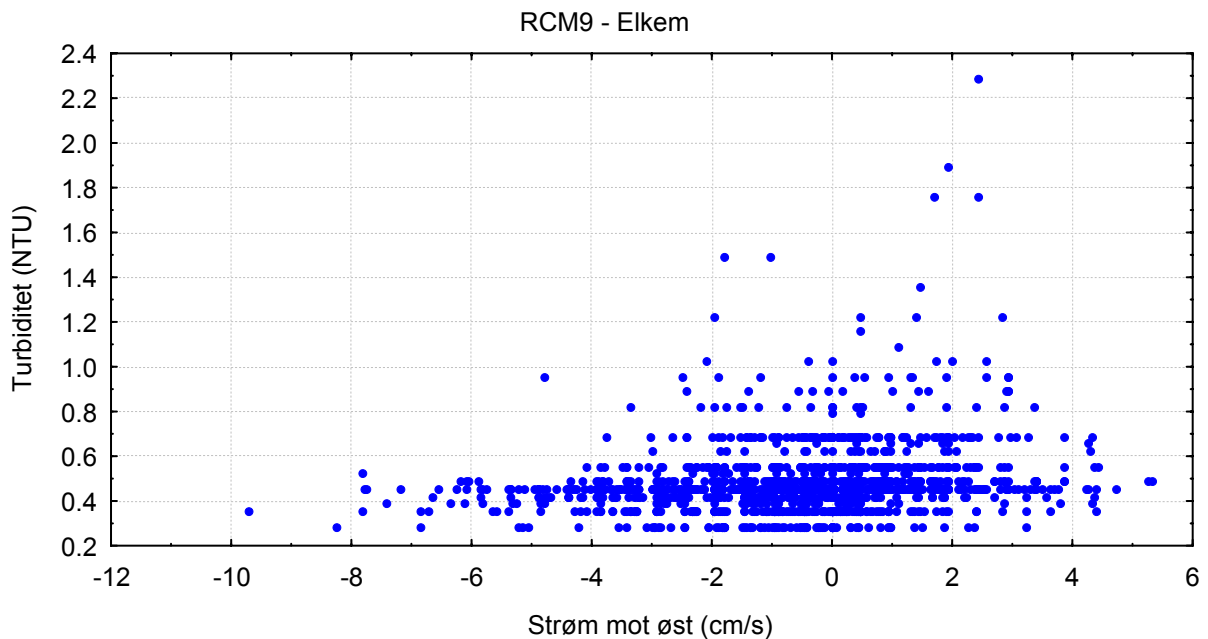
Det kan være en sammenheng med været. Vinden er dominerende sørøstlig frem til slutten av 9. oktober, og dreier deretter vestlig (Figur 15). Turbiditetstoppene er mindre og færre fra midt på dagen 10. oktober sammenlignet med tidligere, og det kan bety at vind fra sør og øst gir mer partikler enn vind fra vest. Selv om det altså kan se ut til å være en tilknytning til

forskjell i vind mellom lengre perioder, er det ikke så god sammenheng med vind rett før de markerte toppene i turbiditeten forekommer. Det kan også tenkes en sammenheng med nedbør (Figur 11). I perioden 5. til 8. oktober kom det relativt mye nedbør. Fordelingen i perioden fra fredag 5. til søndag 7. oktober er usikker, fordi det bare ble avlest en samle verdi mandag morgen, så det kan godt ha vært en nedbørtopp den 6. oktober. Det kan derfor ikke utelukkes at turbiditetstoppene om kvelden 7. oktober og natt til 9. oktober kan ha sammenheng med partikler i avrenning f.eks. fra kaia.

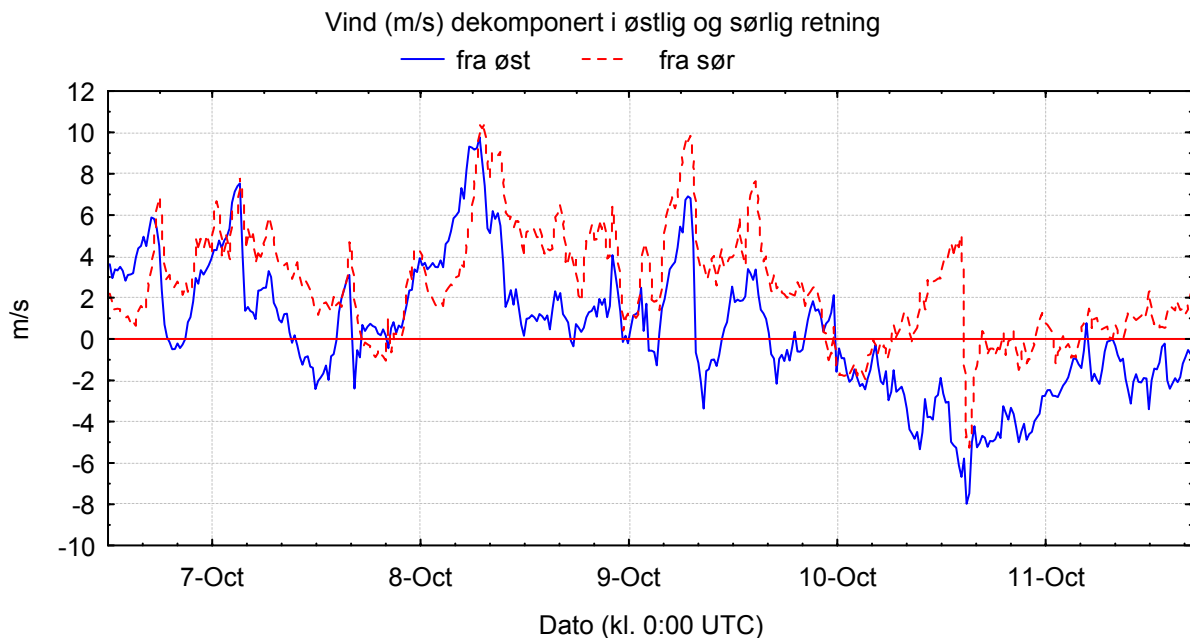
Figur 13. Målinger av strøm og turbiditet med RCM9 nær bunnen utenfor Elkems kai 6-11.10 2001 på 10-15 m dyp.



Figur 14. Sammenheng mellom strømkomponent i øst-vest retning og turbiditet målt av RCM9 6. - 11. oktober.



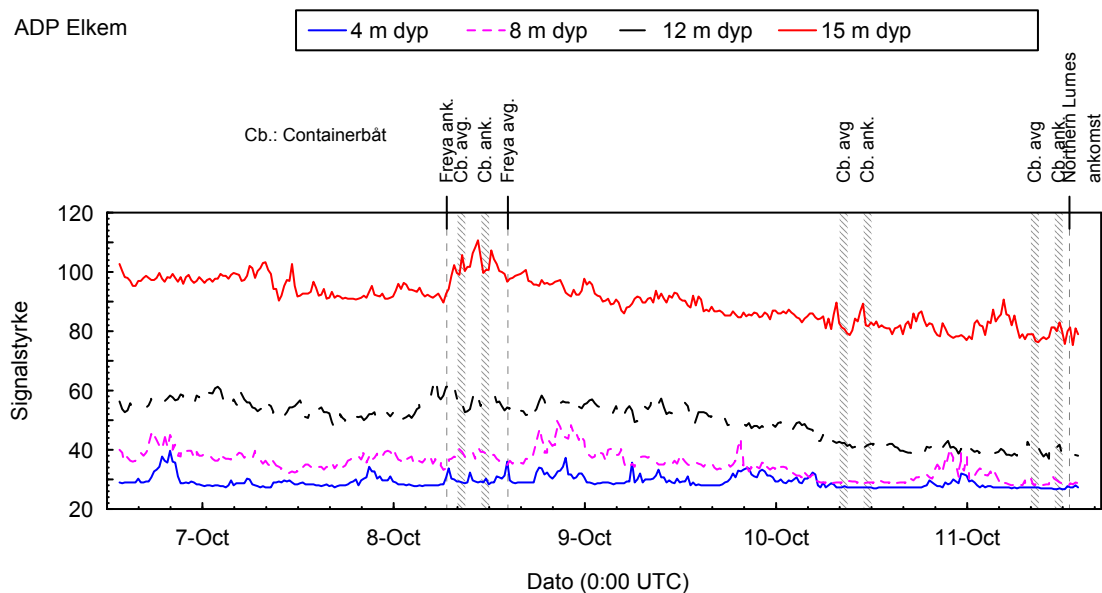
Figur 15. Vind ved Falconbridge under målingene ved Elkems kai 6.- 11. oktober



Det andre instrumentet, Norteks ADP strømmåler, med en tidsoppløsning på 20 minutter, var plassert på ca. 17 m dyp rett sør for østenden av kaia på ca. 17 m dyp. Data herfra viser ingen spesielle utslag ved skipsanløpene, alle variasjonene fremtrer som mer eller mindre tilfeldige.

Signalstyrken (Figur 16) har en økning i perioden rundt Freyas ankomst og avgang, hvor det også er en containerbåt som går og kommer, men variasjonene er ikke sterkere enn det som også forekommer ellers, så det kan være et sammenreff. Ved ankomsten av Northern Lurnes er det ingen utslag i signalstyrke, selv om de fra før ligger på et lavere nivå enn ved skipsbevegelsene den 8. oktober. Signalstyrken er lavere i perioden fra midten av 10. oktober, det stemmer kvalitativt med turbiditeten som er målt av RCM-9.

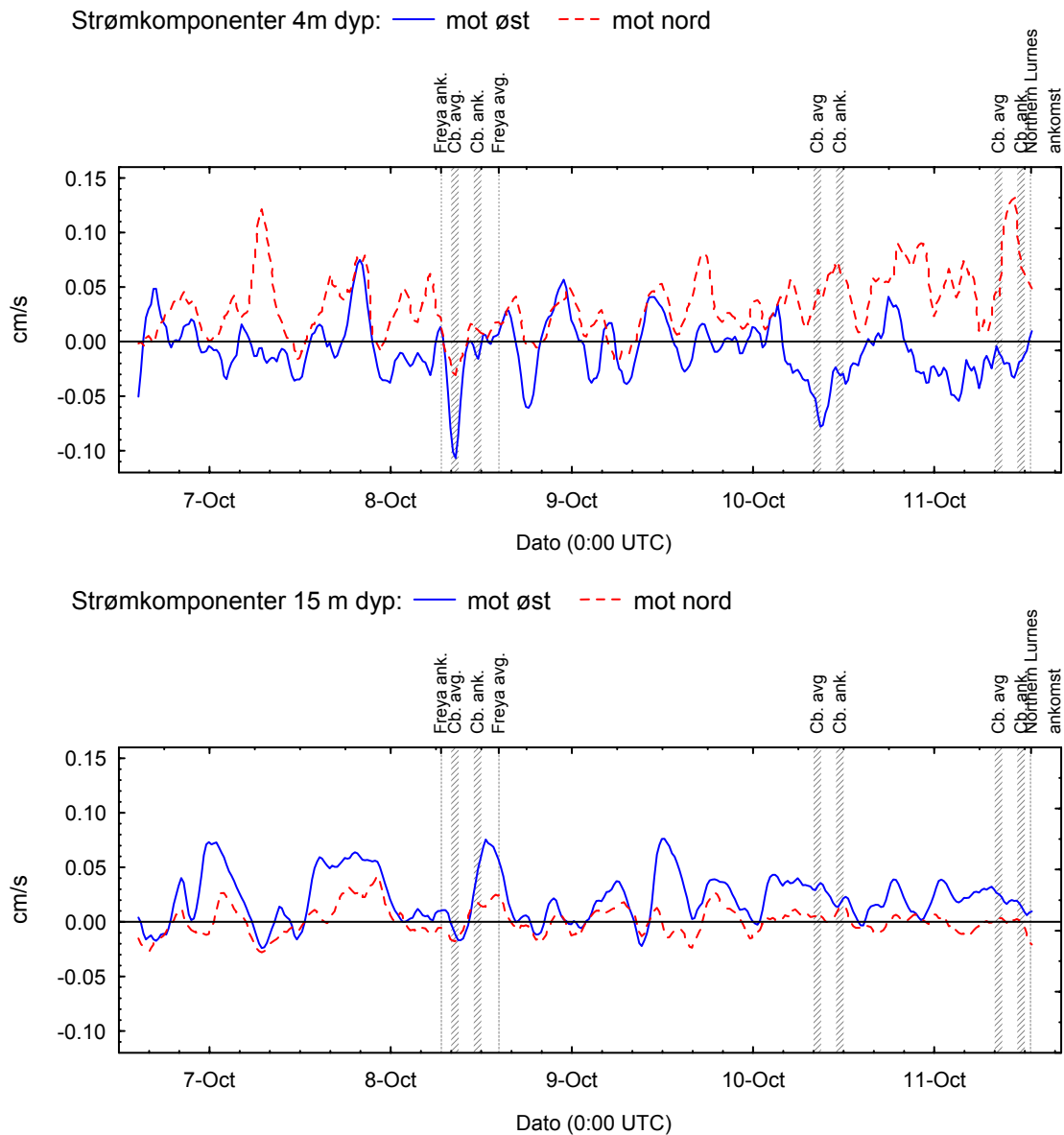
Figur 16. ADP-registrering ved Elkem, signalstyrke fra 4 forskjellige dyp



Enkeltdata for strømstyrke viser ingen spesielle utslag ved båtanløpene i forhold til variasjonene ellers. Ut fra angitt standardavvik for målingene fremgår det at korttidsvariasjonene generelt er uttrykk for unøyaktighet i hastighetsbestemmelsen*, og ikke kan tolkes som reelle variasjoner. Ved å midle over 6 datapunkter, dvs. 2 timer, fås et mer reelt signal, hvor målefeilene er redusert ved midling, mens hovedtrekkene i tidsvariasjonen er bevart. Midlet strøm er gjengitt i Figur 17 for 15 m dyp. Det ser ikke ut til å være noen åpenbar sammenheng hverken med vind eller partikkelinnhold målt som signalstyrke.

* Strømhastigheten er beregnet av måleren ut fra måling på partikler, midlet både over areal og over tid, og beregningen inkluderer et estimat for nøyaktigheten.

Figur 17. ADP –registrering i ca. 4 og 15 m dyp ved Elkem. Løpende middelerdi over 6 enkeltregistreringer, dvs. over 2 timer.



Det ser altså ut til at skipstrafikken ikke har noen stor virkning på hvordan partikkelkonsentrasjonene i området ved Elkemkaia varierer, men at andre årsaker (vind, nedbør, strøm, avrenning, eventuelle utslipp) har mer å si. Det må understrekes at det ikke utelukker at båtanløp er viktig for mobilisering og spredning av forurensete sedimenter. Det ble observert kortvarig og lokal ganske sterk oppvirvling ved skipsanløp 11. oktober til Elkem av båten *Northern Lurnes*. Det beskrives nærmere nedenfor i kap. 9.3.2. Denne oppvirvlingen har tydeligvis bare påvirket konsentrasjonene lenger inn, og ikke influert på partikkelkonsentrasjonene i instrumentposisjonene.

Hvis variasjonene i turbiditet og signalstyrke pga. av andre årsaker skyldes partikler som har mye mindre miljøgiftinnhold, f.eks. ved avrenning fra land, kan båtanløp likevel være viktig for spredning av miljøgifter. Hvis variasjonene pga. andre årsaker henger sammen med

oppvirvling fra bunn, er det imidlertid grunn til å tro at båtanløp er mindre viktig som årsak til spredning av miljøgifter.

9.3.2 Måling ved båtanløp 11.10 2001

Båten var Northern Lurnes på ca. 3000 tonn, med dypgang 5.5 m. Den snudde ute i havna og bakket inn langs kai kl. 1445 lokal tid (1245 UTC), og reverserte hovedpropellen i det den var på plass ved kaia. Det var synlig oppvirvling av sedimenter i området vest for båten (Figur 18).

Figur 18. Skipsanløp ved Elkem 11.10 2001



Posisjon for målingene er vist ovenfor i Figur 12 (side 66). Tabell 7 gir en mer detaljert beskrivelse av forløpet. Vektorprofilene V2 og V3 ble tatt i propellturbulensen rett vest for båten hhv. 4 og 7 minutter etter båtanløpet. Det ble samtidig tatt vannprøver (S2 til S4). Deretter ble det tatt vektorprofiler øst for båten, i posisjon V4 og V5, og så på vestsiden igjen ved V6, med vannprøve (S5). En vektormåling V7 ble tatt på vei til V8, som dannet avslutning på måleserien. Analyseresultene for vannprøvene er vist i Vedlegg 5.

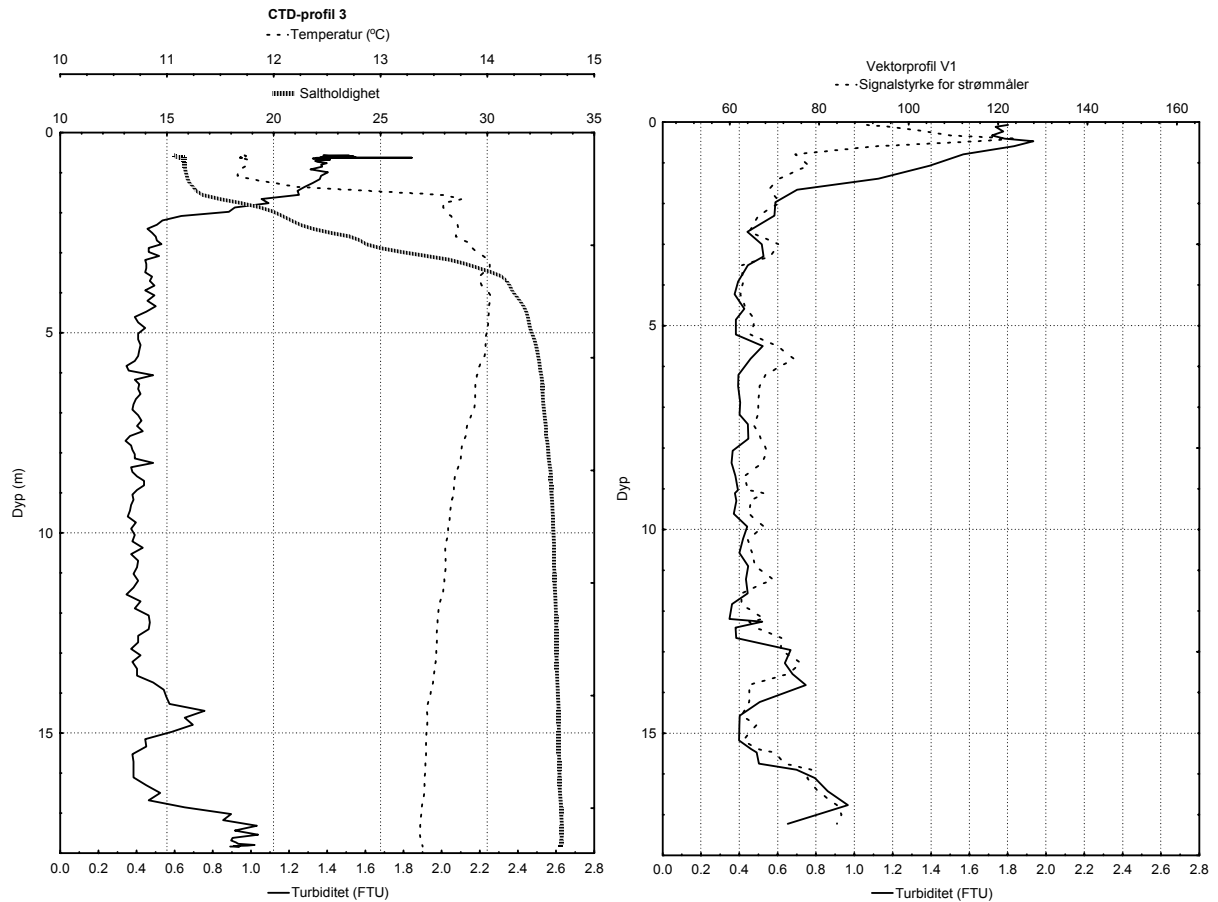
Tabell 7. Oversikt over målinger (CTD, vektor og vannprøver ved Elkems kai 11.oktober)

kl. (UTC)	SeaCat -profil	Vannprøve Nr	Dyp (m)	Vektor- profil	Kommentarer
11:19	C3	S1	10	V1	Bakgrunnskonsentrasjoner før båtanløp
12:35					"Northern Lurnes" ankommer havneområdet.
12:45					Snur ute på havna, bakker inn langs kaia. Northern Lurnes stopper med hovedpropell, sender vann bakover med tydelig oppvirvling (bilde)
12:49		S2 S3	7 10	V2	Måler i propellstrømmen rett vest for Northern Lurnes, synlig bunnfall i vannprøvene
13:02				V3	Måler i propellstrømmen litt lengre inn. Ikke turbiditetsmåling
13:04		S4	10		
13:09				V4	Måler i området øst for båten
13:11				V5	“
13:17		S5	7		Synlig partikkelinnhold i vannprøven
13:17				V6	Går med sonde ca. 0.5 m under overflaten passerer posisjon, stopper og måler dyp-profil
13:26				V7	går videre med sensor i overflaten til innerst i bukta, og tar ny profil
13:31				V8	Avslutter registrering

Ca. 1 ½ time før skipsanløpet ble det tatt en CTD-profil (C3) og en profil med vektormåleren (V1) (Figur 19). Turbiditeten er høyere i de øverste to metrene med større ferskvannsinnslag, men har ellers jevne verdier rundt 0.4 FTU ned til 14 m, og noe høyere verdier igjen (0.8-1 FTU) ned mot bunnen, omtrent som samtidig målt på RCM9 (Figur 13). CTD- og vektormåleren gir omtrent samme profil med den omregningen fra voltstyrke til turbiditet som er brukt for turbiditetsmåleren fra vektormåleren (se Vedlegg 6). Siden omregningen er basert på data fra Falconbridge, indikerer det at sammenhengene kan brukes generelt. Signalstyrken fra strømmåleren i vektorprofil V1 ser også ut til å gi en rimelig god indikasjon på partikkelinnholdet målt som turbiditet, i allfall i nedre deler av profilen. Samtidig ble tatt en vannprøve fra 10 m dyp (S1). Analysene av vannprøven ga sprikende resultater^{*}; 0.32 mg/l TSM, og 3.6 mg/l STS. For sammenligning med turbiditet brukes gjennomsnittet på 1.96 mg/l. Ut fra dypet skulle det tilsvare turbiditet ca. 0.4 FTU.

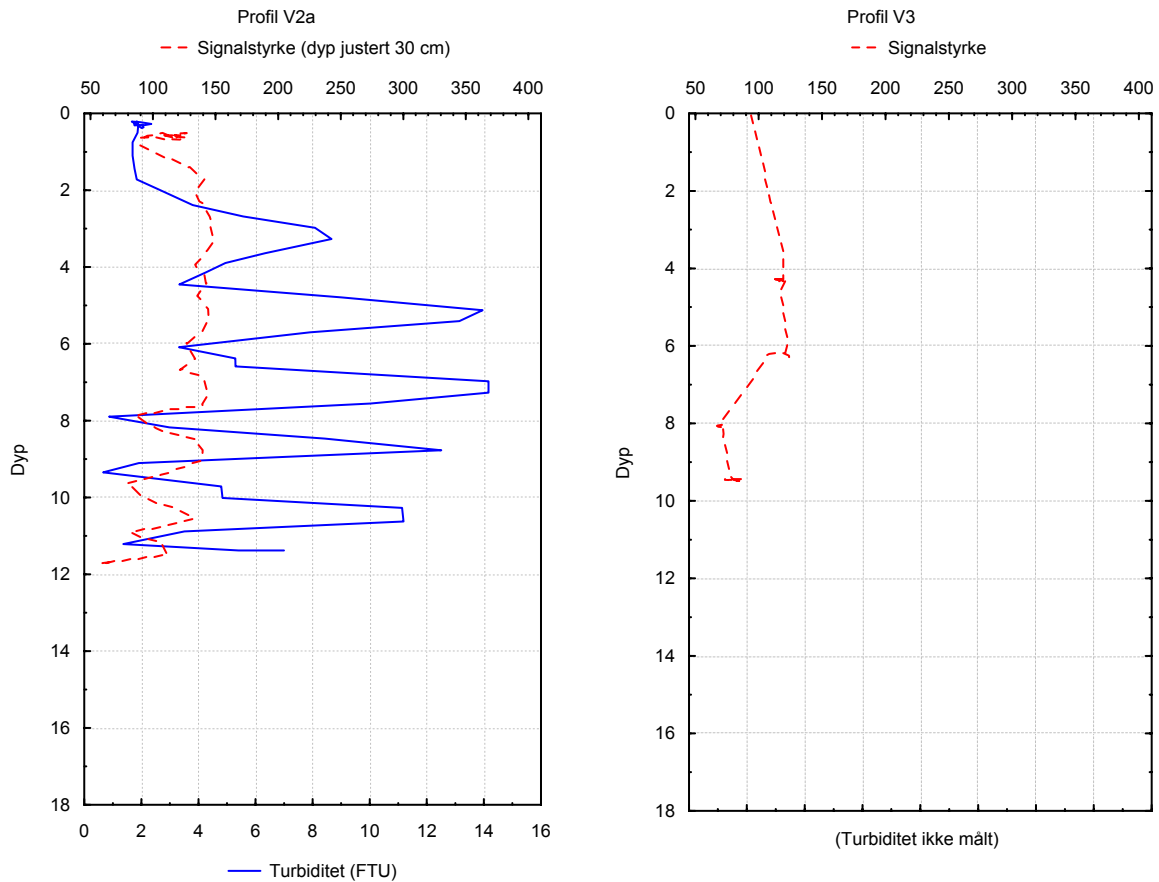
* Det var ikke nok vann til reanalyse

Figur 19. CTD-profil og vektor-profil utenfor Elkem før båtanløp 11. oktober



I det skipet reverserte hovedpropellen kl. 12:45 UTC, kunne partikler observeres visuelt i propellstrømmen. Resultatet av målinger i propell strømmen er vist i Figur 20. Profil V2 ble målt ganske nær akterenden av skipet noen få minutter etterpå med turbiditetssensoren stilt til måleområde 0- 12.5 FTU. Turbiditetssensoren slo ut til maksimum i måleområdet for alle de høyeste toppene i plottet, og de representerer derfor minimumshøyde på toppene. Pga. midlingsprosedyren er noen av toppene likevel brakt noe under maks grensen i plottet. Profilen viser sterkt varierende utslag med dyp, til dels i topp av måleområdet, og til dels ned mot 1-2 FTU. Samme type mønster går igjen i signalstyrken, selv om utslagene er mindre. Det ser ut til at denne profilen er tatt i en vannmasse hvor propellstrømmen ikke er homogenisert, slik at det er store vertikale variasjoner, antagelig knyttet til raske tilfeldige fluktuasjoner. Profilen beskriver da et tilfeldig utsnitt gjennom en vannmasse hvor det skjer raske endringer over tid, og ikke noen spesiell lagdeling. Profil V3 ble tatt litt lenger vest, altså lenger unna båten, ennå noen minutter senere. Signalet fra turbiditetssensoren var skrudd av ved en feil, slik at det bare er amplituden (signalstyrken) fra strømmåleren som indikerer partikkelinnhold. Profilen indikerer forhøyet partikkelinnhold ned til 6-7 meters dyp. Etter skipsanløpet ble det målt 7 vektorprofiler (V2-V8).

Figur 20. Vektorprofiler (turbiditet og signalstyrke) i propellstrømmen få minutter etter anløp av Northern Lurnes. For V2 er turbiditetstoppene kuttet av ved FTU 13 (se drøfting i teksten). Bokstav a angir første kjøring nedover fra overflaten - en del av profilene ble gjentatt, og da er det plukket ut enkeltkjøringer, se Vedlegg 6.

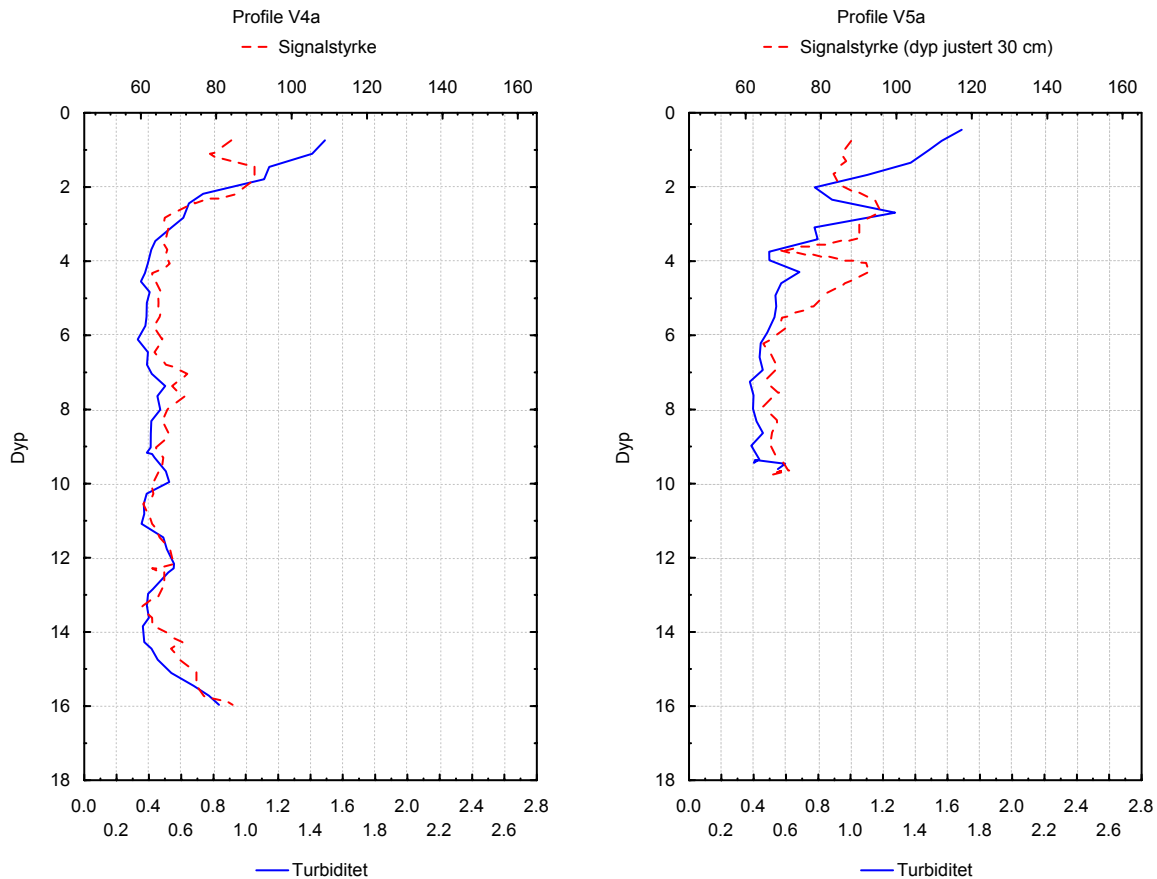


Det ble også tatt vannprøver i tilknytning til profilene. Vannprøve S2, som ble tatt omtrent samtidig* med profil V2a på 7 m dyp, viste en partikkelkonsentrasjon på 5 mg/l som TSM og 4 mg/l som STS, mens S3 fra 10 m dyp hadde en svært høy partikkelkonsentrasjon med ca. 60 mg/l TSM og 65 mg/l STS. Fordi denne vannmassen er lite homogen, og preget av raskt skiftende virvler og tilfeldige fluktuasjoner, er det ikke mulig å sammenligne dette direkte med turbiditetsmålingene eller signalstyrken, men forskjellen i partikkelinnhold mellom prøven fra 7 og 10 m er forklarlig som tilfeldige variasjoner innenfor den målte profilen, når det tas i betraktning at måleren viste maksimalt utslag, slik at turbiditeten kan ha vært mye høyere enn målt. Helt røft kan en middelkonsentrasjon på ca. 20-40 mg/l anslås i denne profilen, med turbiditet 8-10 FTU, ut fra det fluktuerende område i profil V2. Ved prøvetakingen ble det observert visuelt at partikkelinnholdet sank ut ganske raskt, slik at vannhenteren måtte ristes under uttapping. Vannprøve S4 ble tatt på 10 m dyp samtidig med vektorprofil V3. Den inneholdt 1.8 - 2 mg/l (TSM, STS), dvs. 1.9 som middelværdi, og ut fra sammenligning av profil V2 og V3 kan turbiditeten anslås til 1.5 FTU.

* dvs. innenfor noen få minutter (vanligvis innenfor 5 minutter)

Det ble også målt i området øst for båten (Figur 21, se posisjoner i Figur 12), ca. 20 til 25 minutter etter båtanløpet. Profilmålingene viste ingen særlige spor av oppvirvling – bortsett fra noen mulige små utslag rundt 3-5 meter i profil V5a, men det var samme økning mot bunnen, antagelig den samme økningen som målt før anløpet. Det ble ikke tatt vannprøver her.

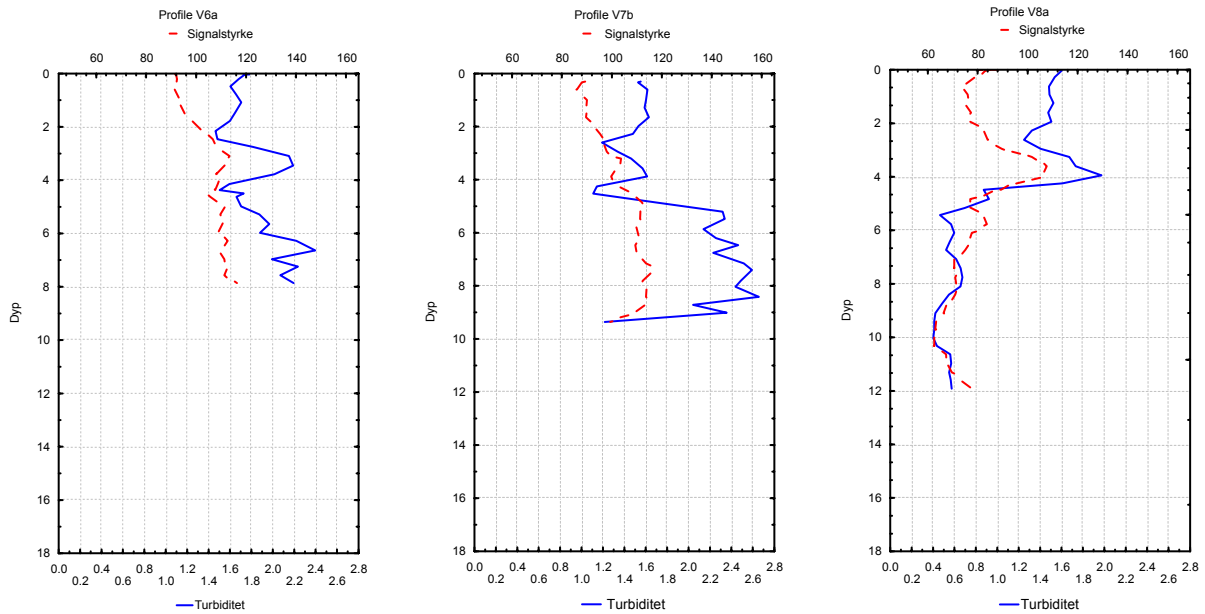
Figur 21. Vektorprofiler i området øst for Northern Lurnes 20-25 minutter etter båtanløp.



Deretter ble det igjen målt i området vest for båten, i det området hvor propellstrømmen hadde beveget seg (Figur 22). Profil V6 ble målt 30 minutter etter anløpet, posisjon er vist på kartet i Figur 12. Profil V7 ble målt i omtrent samme område 10 minutter etter V6, men uten at nøyaktig posisjon ble notert. Her er det fortsatt en merkbar påvirkning, iallfall fra 2 meter og nedover, men med lavere turbiditet (bemerk endring av skala mellom Figur 20 og Figur 22). Samtidig med profil V6 ble det tatt en vannprøve (S5) på 7 m dyp, den hadde 3.85 mg/l TSM og 4.8 mg/l STS. Beregnet turbiditet i profil V6 er 2 til 2.4 FTU. I tilknytning til profil V7 ble det også målt nær overflaten i forskjellige posisjoner rundt i dette området. Resultatene viste turbiditet omkring 1.6 til 1.8 FTU.

For profil V8, litt øst for baugen på båten, var det en viss påvirkning å spore rundt 4 meters dyp, med turbiditet opp mot 2 FTU, mens turbiditeten var ned mot det normale dypere ned. Det kan skyldes at den partikkelholdige skyen som først akkumulerte vest i bukta, etterhvert spredte seg østover i dette dypet pga. gravitasjonsdrevet spredning, mens kompensasjonsvann uten partikler strømmet inn dypere ned.

Figur 22. Vektorprofiler vest for Northern Lurnes (V6a) ca. 30 minutter etter båtanløp. Profil V7b er tatt i omtrent samme område ca. 40 minutter etter båtanløpet.



Hvis en ut fra disse målingene skal prøve helt grovt å anslå omtrent hvor stor mengde partikler som ble virvlet opp ved dette båtanløpet, kan det anslås at partikkelskyen samler seg i et område på omkring 100*50 m, og med konsentrasjoner på 3-5 mg/l (tilsvarende omtrent 2 FTU). Hvis tykkelsen av skyen antas å være ca. 5 m (profil V3 og V7), gir det en partikkelmengde på rundt 100 kg. Det må understrekes at dette bare er et helt grovt overslag, som gir omtrent størrelsesorden for oppvirvlet mengde partikler. Målingene gir ikke noe sikkert grunnlag for å si hvor langt utover dette sprer seg. Det er også knyttet spesifikt til det aktuelle anløpet, hvor båten snudde og reversert inn mot kai, slik at propellpåvirkningen kommer relativt langt inn langs kaia. Hvis båtene går rett inn uten å snu, vil hovedpropellen reverseres over noe dypere bunn langs østre del av kaia*, men til gjengjeld vil da skipsbunnen presse propellstrømmen nedover, og derved kanskje gi sterkere strøm langs bunnen.

Målingene viser at skipsanløpet mest bidrar til å sende partikler innover i bukta, og antagelig ikke direkte til å spre dem utover til andre områder. Den økningen i partikkelkonsentrasjonen som ble observert ned mot bunnen i flere profiler kan tenkes å skyldes oppvirvling knyttet til vind, og det kan bidra til å spre sedimentene rundt i bukta over tid, også uten medvirkning fra skipstrafikk, men det kan tenkes at skipstrafikken bidrar til å sirkulere sedimentene internt i bukta, slik at de også lettere virvles opp av vind. Hva som er viktigst i en total sammenheng, er vanskelig å si ut fra disse målingene. Hvis vi antar et bunnareal på 200*300 m, og en forhøyet konsentrasjon med ca. 1 mg/l den nærmeste meteren over bunnen (økning mellom 0.5 og 1 FTU), vil partikkelmengden som befinner seg i et slikt bunnsjikt være ca. 60 kg. Figur 13 viser at slike konsentrasjoner forekommer relativt hyppig, flere ganger i døgnet. Det er ca. halvparten av det som ble anslått for skipsoppvirvlingen, men begge anslagene er så røffe at vi bare kan si at de er omtrent sammenlignbare i størrelse. Hvis partiklene i bunnsjiktet skyldes oppvirvling pga. vind og bølger, kan det bety like mer enn oppvirvling pga. skip, fordi det må antas å forekomme oftere. På den annen side kan det være at den

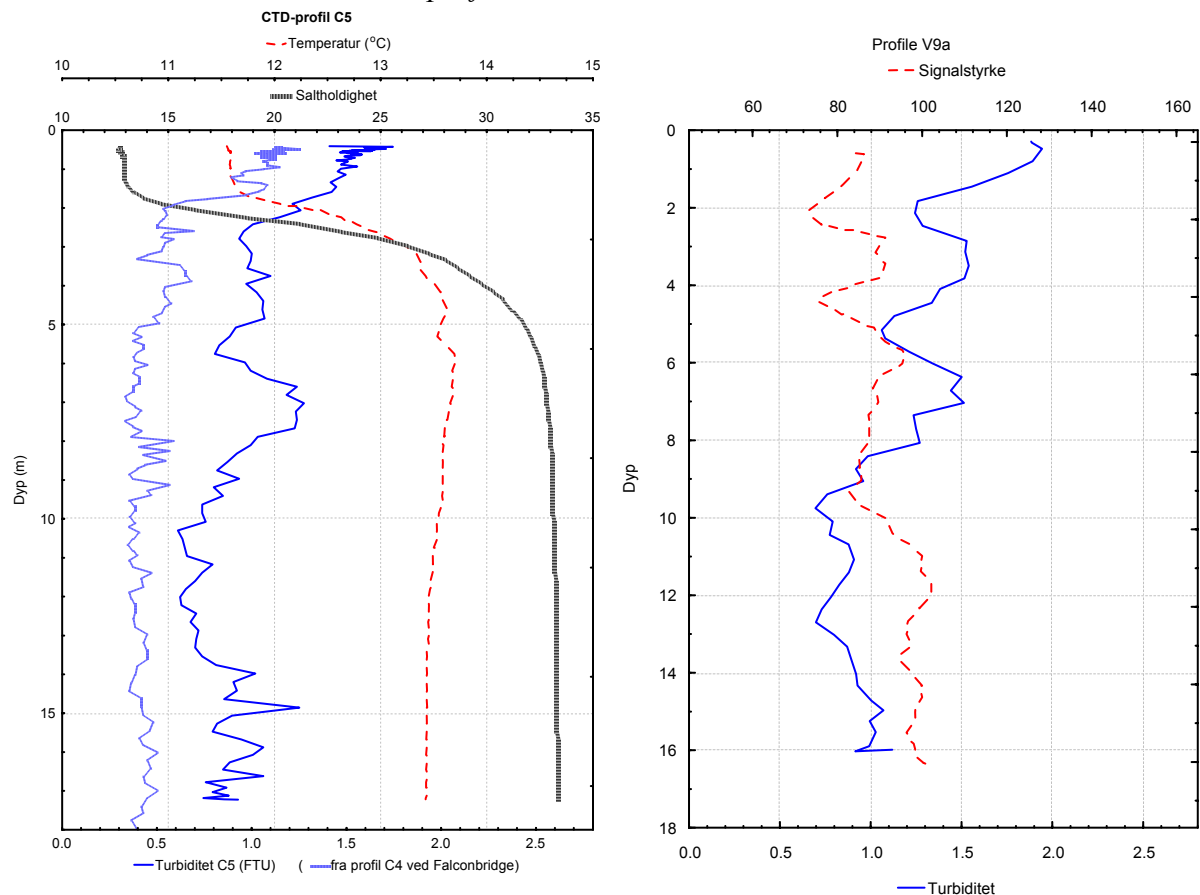
* Det er basert på sjøkart – om bunnforholdene fortsatt er slik vites ikke

oppvirvlingen skipstrafikken gir er en viktig faktor i en sirkulering av sediment, ved å spre det fra kaiområdet og utover i indre del av bukta og gi tilførsler av løst sediment som lettere virvles opp av vind og bølger. I så fall kan erosjon og oppvirvling pga. skipstrafikk ha betydning også for den oppvirvlingen som skjer eller i bukta av naturlige årsaker.

9.4 Målinger ved fergekai 11. oktober 2001

Om ettermiddagen 11. oktober ble det gjort målinger rundt fergepiren i forbindelse med skipsbevegelser der. Rett før *Princess of Scandinavia* gikk fra kai kl. 18:18 lokal tid (1618 UTC) ble det målt en CTD-profil C5 (kl. 18:00 lokal tid), og vektorprofil V9 (kl. 18:15) (Figur 23). Målingene ble gjort øst for ytre ende av fergepiren. Skipet lå langs vestsiden av piren, med baugen sørøver. De to turbiditetsprofilene stemmer godt overens med hverandre for den beregningsformelen som er brukt for vektormåleren. Et mindre avvik mellom 2 og 5 meters dyp kan være reelt, siden det er et kvarter mellom profilene. Målingene er gjort i influensområdet for baugpropellene fra *Princess of Scandinavia*, og det er mulig den har ligget med propellene igang da profilen V9a ble tatt. Signalstyrken for strømprøben ses å reflektere variasjon i partikkelinnholdet målt som turbiditet innenfor enkelte deler av profilen (0-4 m, 10-14 m), men forholdet forskyver seg mellom de forskjellige delene av profilene.

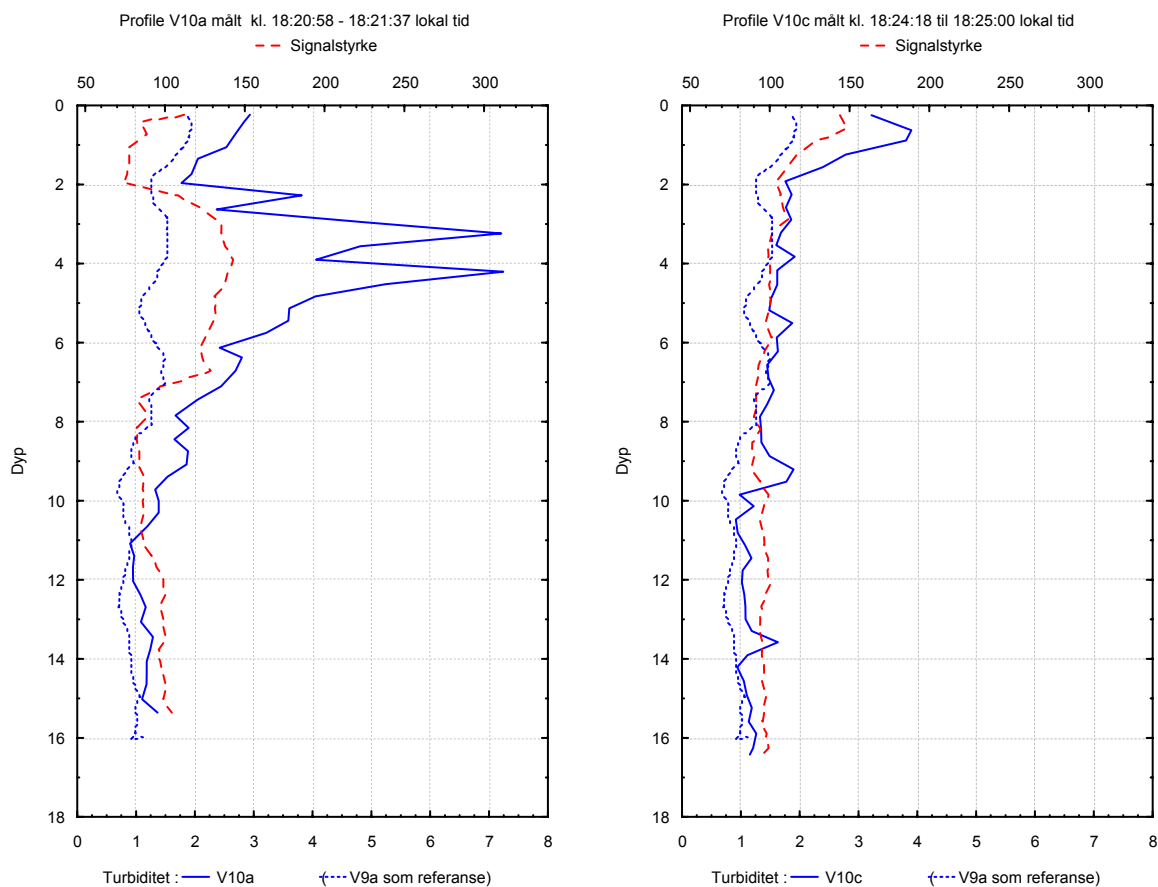
Figur 23. Målinger øst for Fergepiren før *Princess of Scandinavia* gikk fra kai. CTD-profil C5 ble målt kl.18:00 lokal tid, vektorprofil V9a rundt kl.18:15.



Turbiditeten i brakkvannslaget er omtrent som ved Elkemkaia tidligere på dagen før båtanløpet der, rundt 1.5 til 2, mens den i dypere lag (10-16 m) er 0.8 til 1.0, omtrent det dobbelte av hva det var ved Elkemkaia. Turbiditeten fra profil C4, som var tatt ved Falconbridge et kvarter før C5, er med som referanse i Figur 23. Det hadde ikke vært noe trafikk ved Falconbridgekaia den dagen, slik at profil C4 kan betraktes som en bakgrunnsverdi. Det ser altså ut til at det nordlige havneområdet har et høyere partikkelinnhold gjennom hele vannmassen enn lenger ute. En vannprøve (S7) fra 15 m dyp som ble tatt samtidig med C5 hadde partikkelinnhold 1.44 mg/l som TSM og 4.0 mg/l som STS, og det ble observert synlige partikler i prøven. Dette kan f.eks. være resultat av oppvirvling ved fergens ankomst et partimer tidligere. Turbiditeten på 15 m i profil C5 er ca. 1 FTU.

I forbindelse med avgangen ble det tatt nye profiler med vektormåleren. Profil V10 ble tatt på samme sted som V9, men rett etter at det var satt full fart på baugpropellene for å skyve skipet ut fra piren. Målingen ble gjort i det området som mottok propellstrømmen fra baugpropellene, og det ble tatt to profiler med 3-4 minutters mellomrom (Figur 24). Den første målingen, som ble gjort innen tre minutter etter at skipet var gått fra kai, viser klart forhøyet turbiditet mellom 2 og 6 m dyp, med noe spor av økt turbiditet også lenger ned mot 10-11 m dyp. Profil V10c, som ble tatt 4 minutter senere, viser bare en svak økning, relativt likt fordelt over hele dypet. Baugpropellene ser altså ut til å ha gitt markert oppvirvling i en lokalisert sky som har drevet forbi målestedet i løpet av noen få minutter.

Figur 24. Vektorprofiler (V10) i området for propellstrøm fra Princess of Scandinavia ved avgang 11. oktober kl. 18:18 lokal tid. Merket endret turbiditetsskala i forhold til tidligere plott.

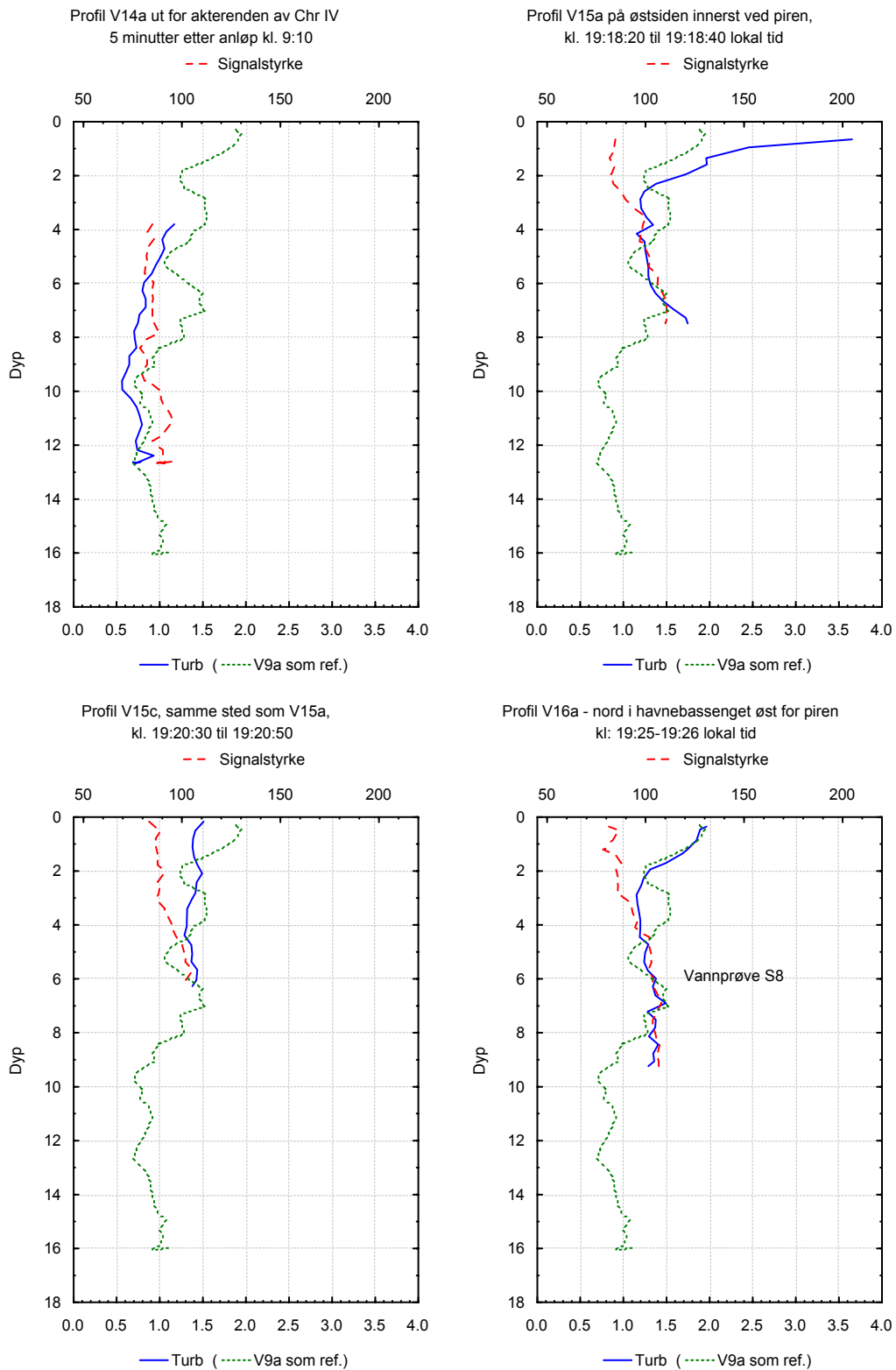


En annen profil V11 ble tatt innerst på vestsiden av piren, der skipet hadde ligget. Også her ble det målt to ganger, med ett til to minutters mellomrom (V11a, V11c), ca. 10 minutter etter at båten hadde gått. Turbiditeten her er opp mot 50 % høyere enn profil 9 mellom 2 og 8 m dyp, men det er ingen sjikt med markert høyere turbiditet. Det kan altså ha skjedd en viss, svak oppvirvling her, men siden profil V9 var tatt lenger ut i bassenget, er det ikke sikkert at det har vært noen endring i tid innerst.

Vektorprofiler V14, V15 og V16 ble målt rundt *Christian IV* rett etter at den la til på vestsiden av fergepiren kl. 19:05 (17:05 UTC). Noen slike profiler er vist i Figur 25. Ingen av dem viser noe vesentlig høyere turbiditet enn det som ble målt før *Princess of Scandinavia* gikk (profil V9a gjengitt som referanse) unntatt helt i overflaten for V15a, hvor turbiditeten er høyere enn i profil V9a. Profil V15a ble imidlertid tatt lengre inn i havna, og det kan skyldes andre påvirkninger. Signalstyrken øker ikke på samme måte som turbiditeten i overflaten i profil V15a. Det samme ses i mange andre profiler, og det indikerer at partiklene i overflaten ikke reflekterer lyd på samme måte som lenger ned. Det kan f.eks. skyldes at overflaten er mer dominert av organisk stoff. En ny kjøring på samme sted like etter ga mer homogene forhold. Det ble tatt en vannprøve (S8) på 6 m dyp samtidig med V16. Den hadde partikkelinnhold ca. 2 mg/l, og turbiditeten i følge profilen var ca. 1.3 FTU.

Det er derfor ikke grunnlag for å si at det var noen vesentlig oppvirvling av partikler i forbindelse med dette anløpet. Sett i sammenheng med CTD-profilene fra Elkem og Falconbridge samme dag gir de observerte profilene likevel grunnlag for å si at partikkelinnholdet i det nordlige havneområdet er klart høyere enn lenger sør mot Fiskaabukta. Det kan tenkes at mange skipsbevegelser i denne delen av havna gjennom dagen har gitt en restkonsentrasjon av partikler i dypere lag selv om påvirkningen fra hver enkelt hendelse ikke er så stor. Det var heller ikke mer enn et par timer siden *Princess of Scandinavia* hadde anløpt da profil C5 ble tatt. Det regnes ikke med at det nordlige havneområdet er mer påvirket av utslipp enn andre deler av havneområdet (Jens Peter Sødal hos Fylkesmannen i Vest-Agder, pers. medd.), så det er antagelig mest rimelig å sette det forhøyete partikkelinnholdet i forbindelse med den akkumulerte virkningen av skipsbevegelser.

Figur 25. Vektorprofiler fra fergehavna 11.oktober etter anløp av Christian IV



9.5 Målinger ved Falconbridge 11. til 30. oktober

I denne perioden var det flere båtanløp til Falconbridgekaia (se Tabell 6 på side 65). Selvregistrerende instrumenter sto plassert ut hele perioden 11-30 oktober. Det ble gjort feltarbeid med målinger og innsamling av vannprøver i to omganger, først i forbindelse med utsetting av instrumenter 11. og 12. oktober, og deretter før instrumentene ble plukket opp, 29. og 30. oktober.

Resultatene som beskrives nedenfor viser flere indikasjoner på partikkelpåvirkning fra eksisterende utslipp. I ettertid er det ut fra disse resultatene kommet opplysninger om utslipp fra Falconbridge som er viktige for tolkningen av dem. Disse opplysningene blir derfor oppsummert i 9.5.1.

9.5.1 Opplysninger om eksisterende utslipp fra Falconbridge

I følge brev fra Falconbridge (22. feb. 2002) har bedriften flere utslipp. Bedriften tar inn sjøvann ($60\,000\text{ m}^3/\text{døgn}$) til kjøling fra 25 m dyp i et inntak ca. 100-150 m nord for den østre enden av kaia. Kjølevannet slippes ut sammen med regnvann og prosessvann i flere utslipp som kan ha betydning for partikkelinnholdet i måleområdet og for tolkningen av data.

Det største utslippet finnes i Kolsdalsbukta, ca. 300 m nord for og utenfor kaiområdet. Her går det ut ca. $30\,000\text{ m}^3/\text{døgn}$. Utslippet består av kjølevann + prosessvann og regnvann. Utslippsdyp er ikke oppgitt. Dette utslippet er neppe det mest aktuelle som kilde for påvirkning av partikkelinnholdet sør for kaia.

Rett nord for østre ende av kaia er det imidlertid et hovedavløp fra ML-anlegg med ca. $6000\text{ m}^3/\text{døgn}$. Det er oppgitt at 4 mindre rosteovner kjøres batchvis, og at hver ovn har en driftssyklus som innebærer en hurtig trykkøkning på et visst tidspunkt og dette inntreffer bl.a. jevnlig rundt midnatt. Det er opplyst at støv som eventuelt slipper gjennom forutgående rensetrinn vil havne i sjøvannscrubber som går til hovedavløpet. Bedriften gjennomfører et måleprogram på denne prosessen.

Det er også en utslippsledning ut fra kaia, ca. 100 m øst for den vestre enden av kaia, ut til et utslippspunkt ca. 90 m sør for kaia. Ut fra bunnforholdene må dette utslippet ligge på ca. 20 m dyp. Her er det oppgitt å gå ut ca. $17\,000\text{ m}^3/\text{døgn}$. Her er det bl.a. utslipp av H_2S .

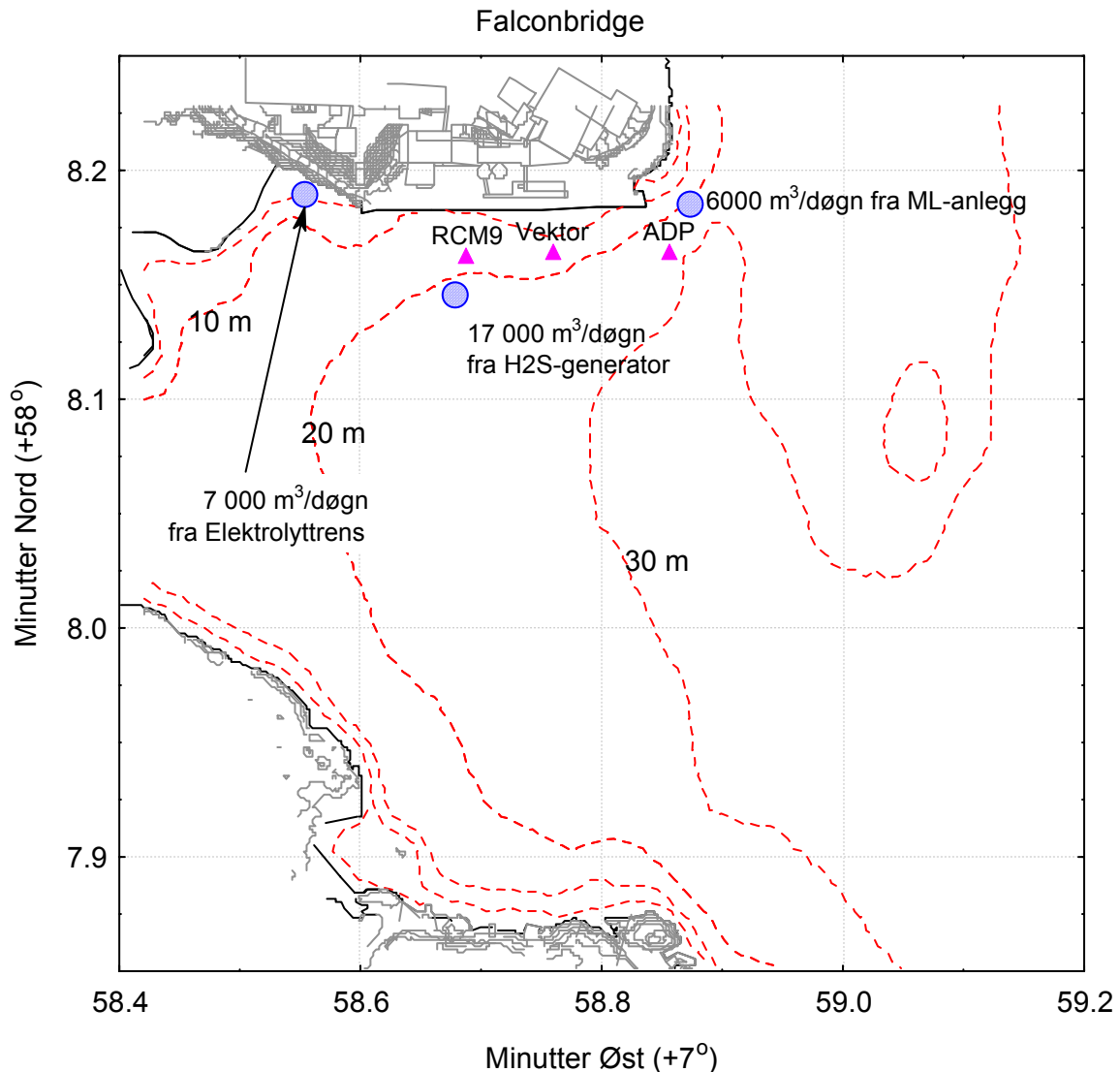
Innerst helt nordvest i Hanneviksbukta er det utslipp av ca. $7\,000\text{ m}^3/\text{døgn}$, fra elektrolytrens.

Posisjonene for disse tre utslippene er angitt nedenfor på kartet i Figur 26 sammen med plasseringen av instrumenter.

9.5.2 Selvregistrerende instrumenter

Figur 26 viser plasseringen av de tre selvregistrerende instrumentene utenfor Falconbridge i perioden 11. til 30. oktober.

Figur 26. Måleposisjoner for selvregistrerende instrument utenfor Falconbridge 11.- 30. oktober . Omtrentlige posisjoner for de tre viktigste utslippene er også tegnet inn.



Nortek ADP var i følge trykksensoren plassert med målehodet på ca. 24.7 dyp rett sør for den østre enden av kaia, 2.4 m over bunndypet som altså var ca. 27 m. Dette dypet stemmer også med signalstyrken, som hadde maksimum for cellen 24.5 m fra måleren. RCM-9 sto utenfor den vestre del av kaia, med måleren omkring 15 m dyp, ca. 1 m over bunnen. Disse to målerne ble plassert ut om ettermiddagen 11. oktober. Vektormåleren ble brukt til dypprofilmålinger av partikkelinnhold fra båt under feltarbeidet 11. og 12. oktober, og ble deretter satt ut mellom de to andre målerne 12. oktober kl. 12:57 (UTC) i en rigg fast plassert på bunn. Vektormåleren var plassert med trykksensoren på ca. 19 m dyp. Slik måleren var plassert vil det si innenfor 10 cm fra bunnen. Måledypet for turbiditet var ca. 85 cm over bunn, og for strøm ca. 1.15 m over bunn m.

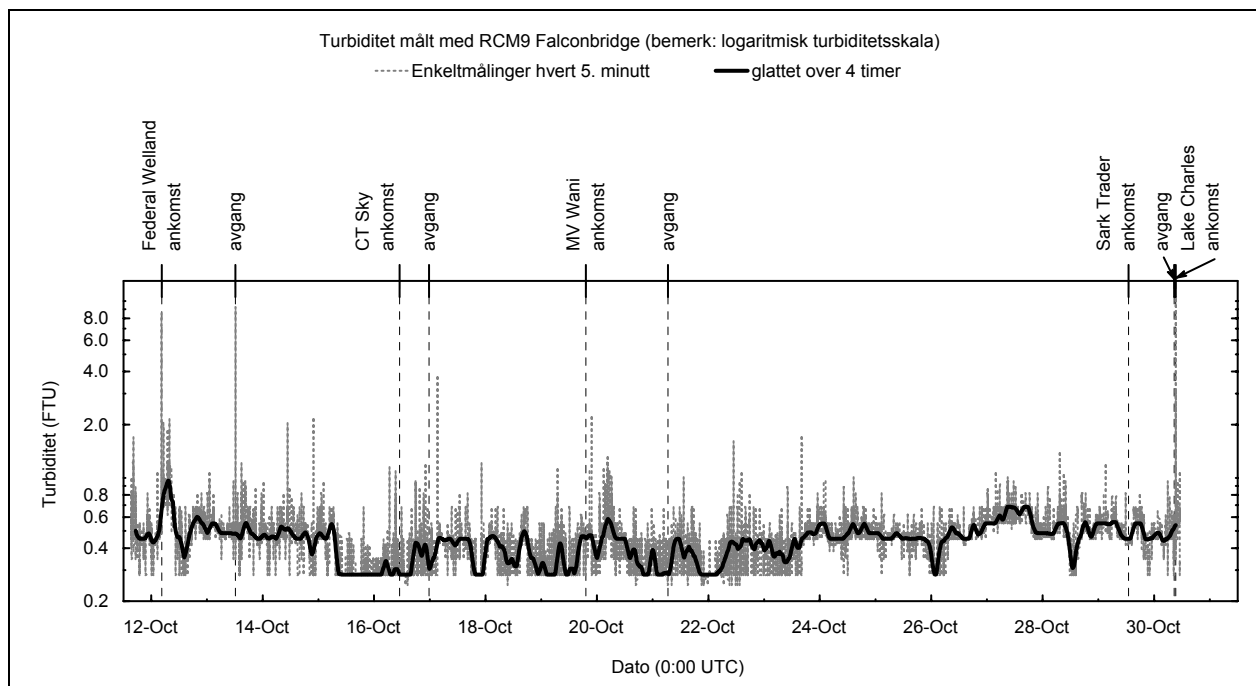
ADP og RCM 9 ble tatt opp og avlest 12.oktober om formiddagen, og deretter satt ut igjen på omtrent samme sted. Vektormåleren ble tatt opp for korreksjon av innstilling 18.oktober og satt ut igjen på omtrent samme sted. Bortsett fra dette sto målerne ute til 30. oktober.

RCM-9

Tidsserien for turbiditet og strømhastighet fra RCM-9 ved Falconbridge vises i Figur 27 og Figur 28. Tidspunkt for båtankomster og avganger er avmerket. Figurene viser både enkeltregistreringer hvert 5. minutt og glattede kurver uten de markerte toppene*. Det er brukt logaritmisk skala for å vise variasjonene mellom de store toppene bedre. Ved ankomst og avgang av den første store båten, Federal Welland, var det et stort utslag i både turbiditet (10x) og hastighet (3x). For de mindre båtene i perioden 16. til 30. oktober er det ingen spesielle utslag i turbiditet, men topper i hastighet for noen av tilfellene. Ved ankomst av *Lake Charles*, den andre store båten, er det igjen et kraftig utslag både i turbiditet og strøm.

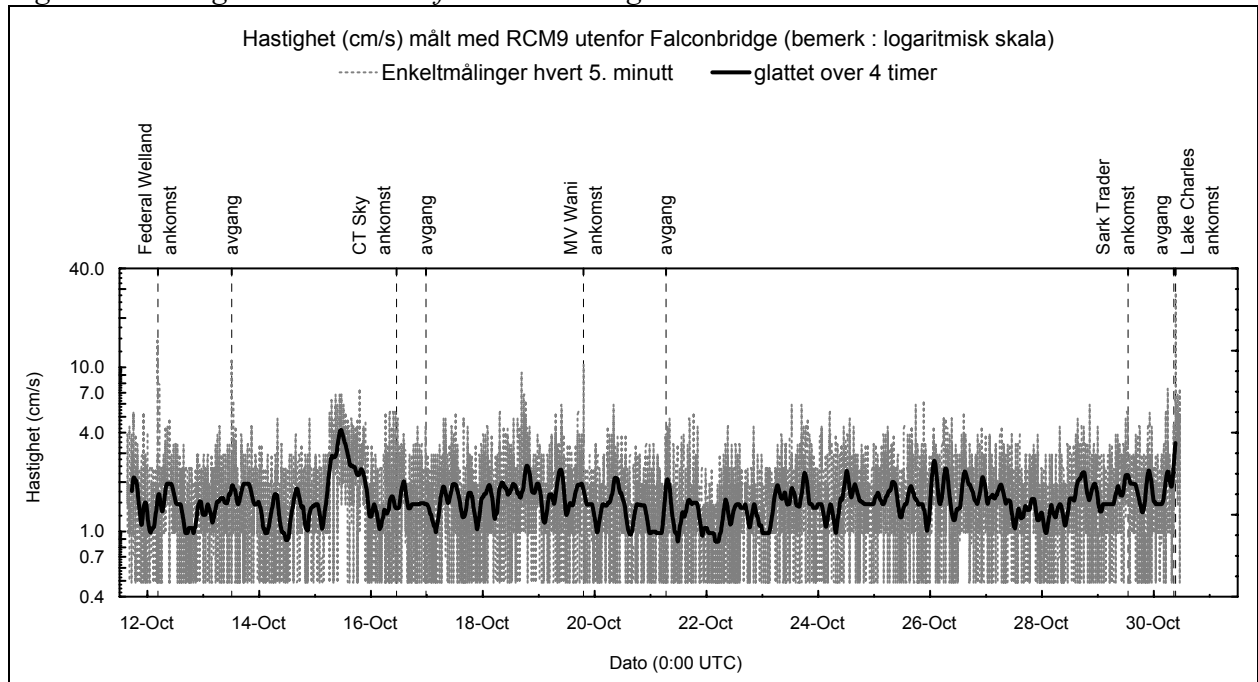
Turbiditeten viser ellers fluktuasjoner av forskjellig varighet. Gjennomsnittlig turbiditet over 4 timer er relativt høy frem til 15. oktober og fra 24 oktober, og med få enkeltregistreringer på minimumsverdi. Den er lavere frem til 24. oktober, og spesielt lav 15. – 16. oktober og natt til 22. oktober. Bortsett fra disse to korte periodene forekommer helt kortvarige episoder med høyere turbiditet i hele serien. Strømmen er skiftende, uten noen spesielt dominerende retning, og med styrke innenfor 10 cm/s, stort sett mindre enn 5 cm/s. For hastigheten er det liten forskjell mellom deler av perioden, men 15. oktober er strømhastigheten spesielt høy som middel over noen timer, mens det er lav turbiditet.

Figur 27. Målinger av turbiditet utenfor Falconbridge med RCM9



* Først glidende median over 24 registreringer for å fjerne kortvarige topper, deretter glidende middel for å jevne ut forløpet i forhold til den grove oppløsningen i målingene.

Figur 28. Målinger av strøm utenfor Falconbridge med RCM9



Nortek ADP

Denne måleren sto fra 11. til 12. oktober midt på dagen på ca. 22 m dyp, og innstilt som for Elkem-serien*, dvs. med celleavstand 40 cm. Ved slutten av feltarbeidet ble den tatt opp, lest av og satt ut igjen, og sto da på ca. 24-24.5 m dyp frem til 30. oktober, innstilt med celleavstand 50 cm.

Tabell 8 viser hvilke måleceller (gitt ved avstand fra måleren) som har omtrent samme dyp fra overflaten, basert på trykkdata justert for lufttrykk (antatt 0.2 dBar) og omregning til dyp for tetthet ca. 24 ($\sigma\text{-t}^\dagger$).

* Måleren ble bare flyttet, men ikke stoppet og startet på nytt.

† $\sigma\text{-t} = (\text{tetthet i kg/m}^3) - 1000$

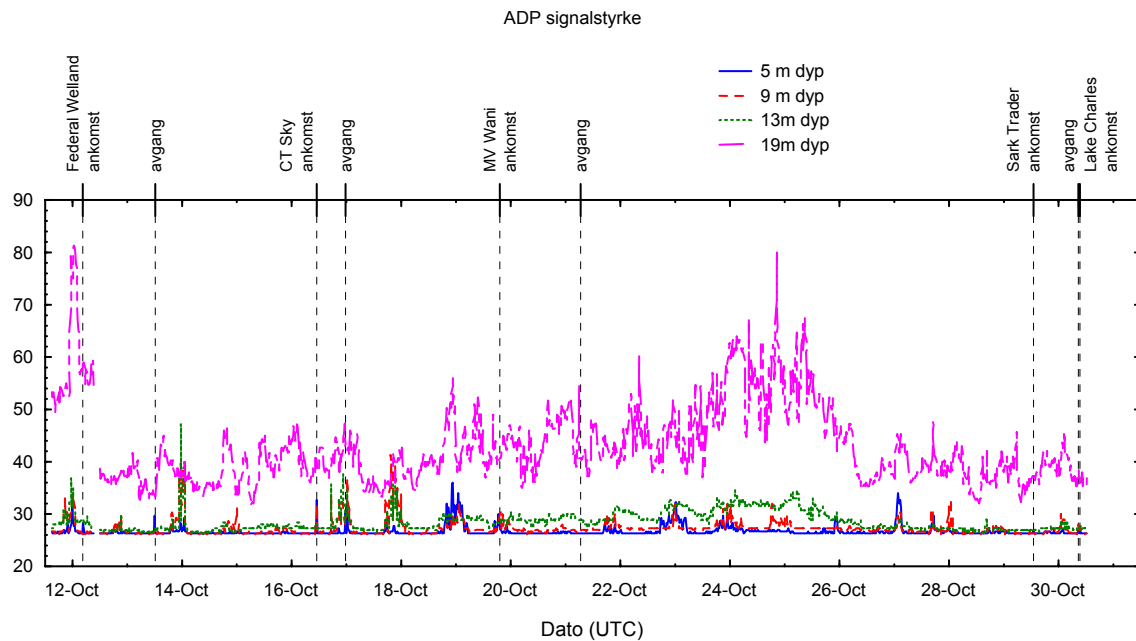
Tabell 8. Sammenlignbare måleceller ved de to måleperiodene for ADP ved Falconbridge.

11-12.okt		12-30.okt	
Anslått dyp for måleren: 21.9 m		Anslått dyp for måleren: 24.6 m	
celle-avstand fra måleren (m)	dyp under midlere vannstand (m)	celle-avstand fra måleren (m)	dyp under midlere vannstand (m)
18.8	3.08	21.5	3.11
16.8	5.08	19.5	5.11
14.8	7.08	17.5	7.11
12.8	9.08	15.5	9.11
10.8	11.08	13.5	11.11
8.8	13.08	11.5	13.11
6.8	15.08	9.5	15.11
4.8	17.08	7.5	17.11
2.8	19.08	5.5	19.11
0.8	21.08	3.5	21.11

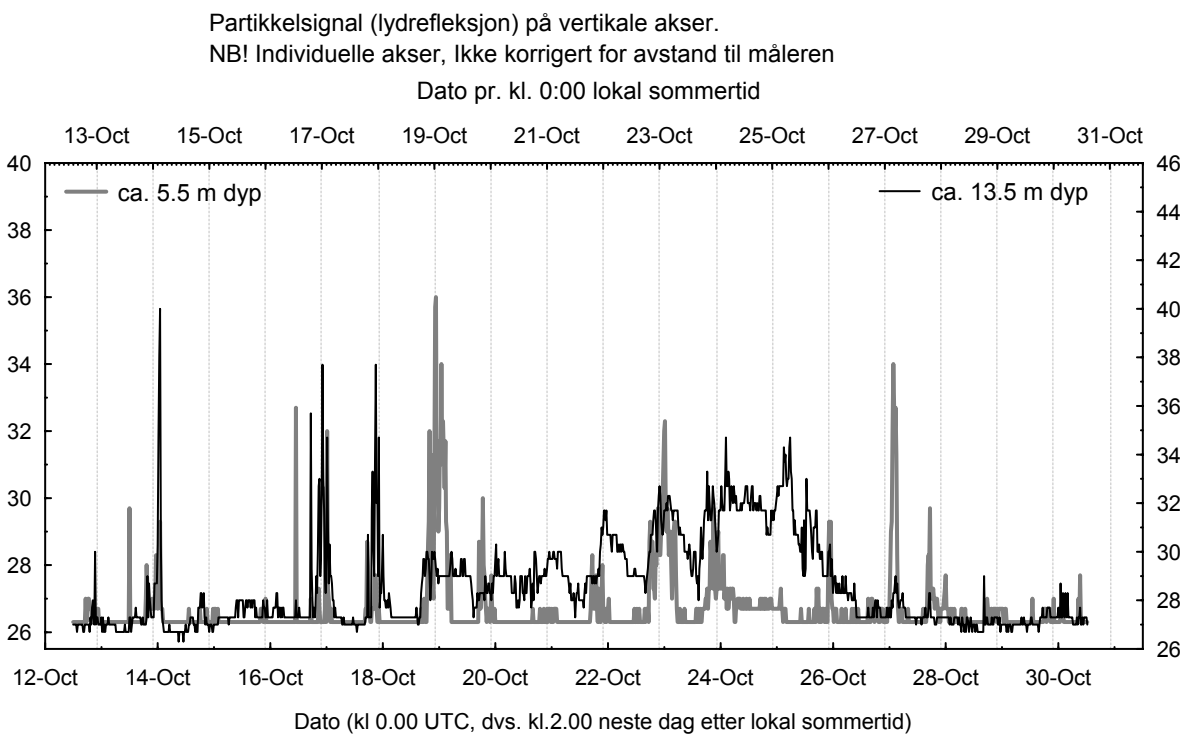
Figur 29 viser signalstyrke på noen utvalgte dyp. Signalstyrken varierer normalt omvendt proporsjonalt med avstanden fra måleren, og er derfor høyest nær måleren, uten at det betyr høyere partikkelkonsentrasjon. Variasjonene innenfor hvert dyp kan brukes som indikasjon på endring i partikkelinnholdet, men må skaleres i forhold til avstanden dersom en vil sammenligne estimer for partikkelkonsentrasjon på forskjellige dyp. At det er høyere signal for samme dyp det første døgnet skyldes at måleren da sto høyere, slik at avstanden er kortere.

Figuren viser at signalstyrken høyt opp i vannmassen (5 og 9 meters dyp) har en markert periodisitet på omkring ett døgn. Toppene er konsentrert til perioden rundt midnatt gjennom hele serien, uten noen forskyvning. Hvis det var heldaglig tidevann som slo ut gjennom varierende strømforhold, ville en vente en forskyvning på ca. 1 time pr. døgn. En nærliggende tanke er at det kan skyldes lokale utslipp som er konsentrert til kveldstid, og altså ikke har noe med oppvirvling fra bunnen å gjøre. I følge opplysninger fra Falconbridge er dette mulig i forbindelse med utslippet nord for østenden av kaia, ganske nær det stedet ADP-måleren sto plassert (Kap. 9.5.1). Døgnvariasjonene er enda tydeligere i Figur 30 hvor tidsvariasjonene i signalet på 5 m dyp (19.5 m over måleren) er sammenstilt med signalet fra 13 m (11.5 m over måleren). Signalet på 5 m dyp har ganske skarpe topper rundt midnatt, mens det på 13 m dyp er tendens til en mer langvarig topp hvert døgn, med forsinket ettervirkning i forhold til signalet i 5 m dyp.

Figur 29. Signalstyrke registrert av ADP utenfor Falconbridge på utvalgte dyp



Figur 30. Partikkelsignal for ADP-måleren fra 5 og 13 m dyp ved Falconbridge.



For 19 m og 13 m dyp, dvs. hhv. rundt 4 og 9 m over måleren, eller 6 og 11 m over bunnen, varierer signalet både på kort og lang sikt. Perioden fra 23. til 26. oktober skiller seg ut ved å ha mye høyere midlere signalstyrke enn før og etter*. Det har derfor sannsynligvis vært mer

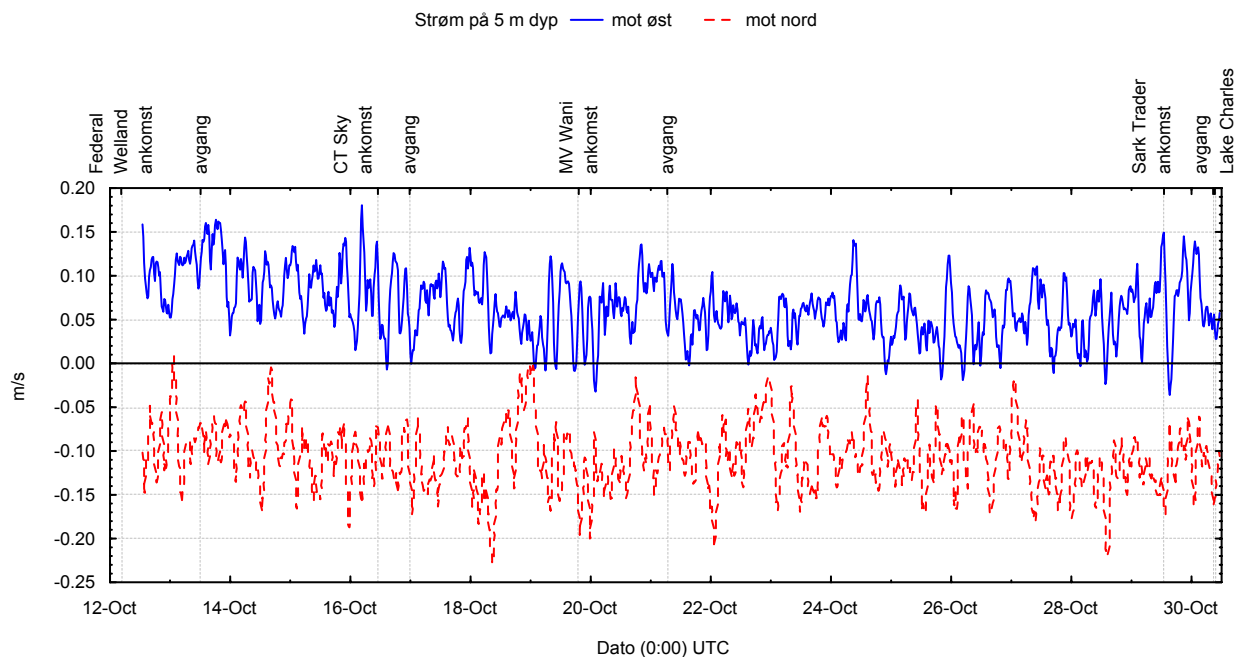
* Den høye signalstyrken det første døgnet skyldes at måleren sto høyere opp slik at 19 m dyp er nærmere måleren.

partikler i vannet i denne perioden rundt 13 til 19 meters dyp. I tillegg til dette er det en mer kortvarig fluktuasjon med episoder innenfor døgnet som i stor grad ser ut til å være koblet med toppene høyere opp i vannsøylen, og som det derfor er rimelig å sette i forbindelse med lokale utslipp. Perioden fra 23. til 26. oktober med høy signalstyrke på 13 og 19 m dyp har ikke spesielt høye topper i signalet fra 5 og 9 m dyp, slik en kunne vente dersom det var partikler fra samme utslipp som ga både disse toppene, og en mer varig påvirkning på dypere lag gjennom nedsynkning. Den mer langvarige økningen i partikelmengde i perioden fra 23. til 26. oktober ser derfor ut til å ha andre årsaker.

Strømstyrken på 5 og 13 m dyp er vist i Figur 31 og Figur 32. Som for Elkem er det ingen utslag i strømstyrke knyttet til skipsanløpene, og estimert usikkerhet i enkeltverdier for strømhastighet indikerer at enkeltutslagene på 20 minutters tidsskala uansett ikke er pålitelige. Derfor er det valgt å la figurene vise 2 timers løpende middelveier som i større grad kan antas å vise et reelt signal.

På 5 meters dyp ser det ut til å ha vært dominerende strøm mot sør-sørøst i hele perioden. Det kan se ut til at det har foregått en sirkulasjon med klokka rundt Hanneviksbukta nær overflaten, med strømhastigheter opp mot 15-20 cm/s. De kortperiodiske fluktuasjonene i midlet strømhastighet i figuren kan være knyttet til tidevannsvariasjoner.

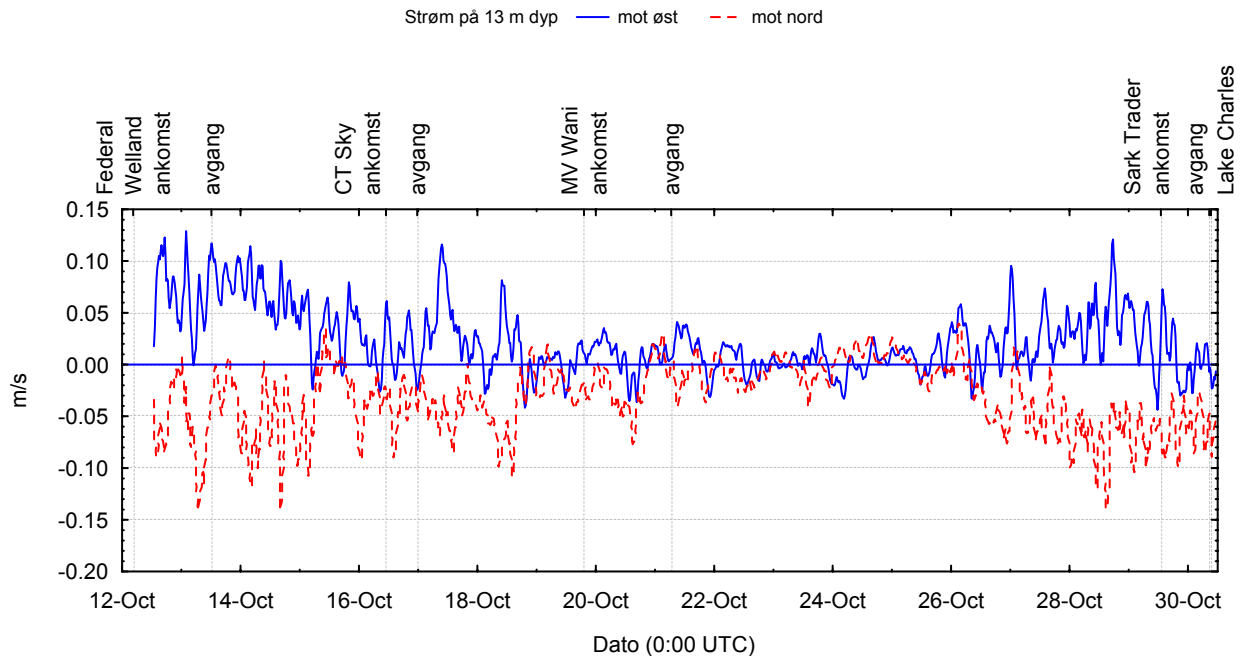
Figur 31. Strøm på 5 m dyp registrert av ADP strømmåler utenfor Falconbridge



Dypere ned, på 13 m dyp, går strømmen i samme retning i begynnelsen og slutten av perioden, mens beregnet strøm i tiden 20-26. oktober, da det var mye partikler i vannet, er mye lavere. Det er usikkert om dette er reelt. En mulighet er at de høye partikkelkonsentrasjonene nettopp er forårsaket av lite spredning pga. av lav strømhastighet. De beregnede midlede strømhastighetene er imidlertid av samme størrelse som estimert usikkerhet for enkeltverdier og varierer i tid på samme måte. Dersom det er slik at lavt partikkelinnhold gir unøyaktighet i strømhastighet både i form av fluktuasjoner og som

midlere forskyvning over lengre tid, kan variasjonene i midlet strømhastighet bare være en refleksjon av varierende partikkelmengde og altså varierende nøyaktighet.

Figur 32. Strøm på 13 m dyp registrert av ADP strømmåler utenfor Falconbridge

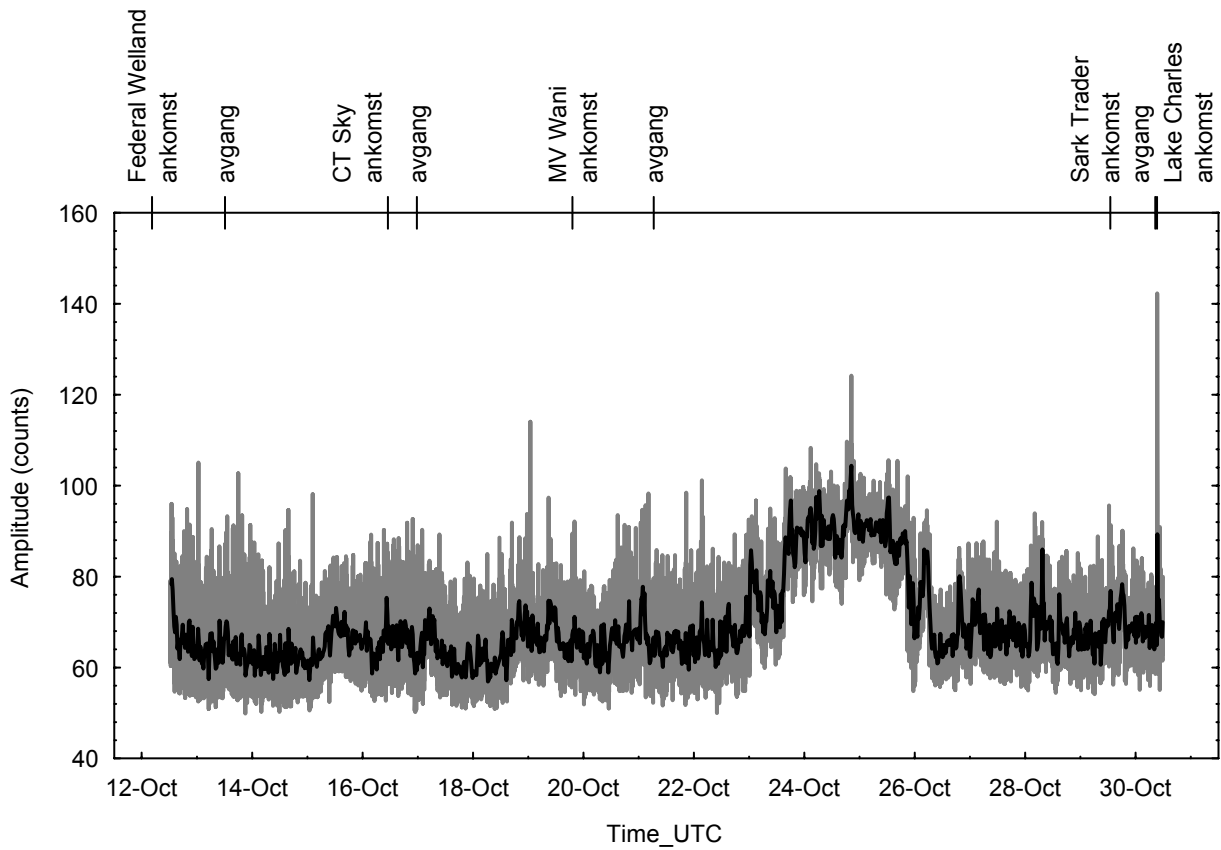


Nortek vektormåler

Denne måleren sto plassert mellom de to andre målerne fra 12. til 30. oktober, fast montert i en rigg som sto på bunnen. Logging av helning og kompassretning viser at måleren har stått meget stabilt. Signalstyrke og strømhastighet er vist i Figur 33 og Figur 34. I perioden 23-26. oktober er signalstyrken høyere enn før og etter, noe som indikerer høyere partikkelinnhold i denne perioden, og det er noen skarpe kortvarige topper, men bortsett fra Lake Charles' ankomst er de ikke spesielt knyttet til skipsbevegelser. Strømhastigheten i øst-vest-retning har skarpe topper ved begge de to observerte bevegelsene av store båter med taubåt (Federal Wellands avgang, Lake Charles ankomst), men ellers er det lite sammenheng mellom skipsbevegelser og de dominerende variasjonene i strøm.

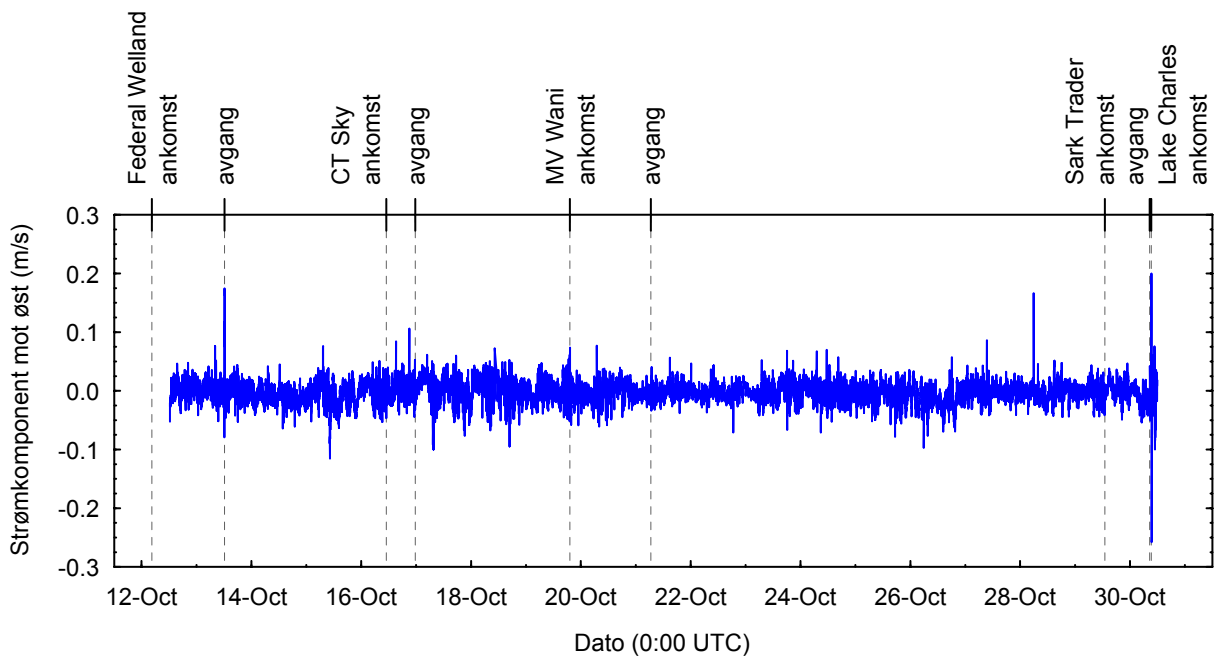
Turbiditetsmåleren på vektormåleren, som registrerte fra 18. oktober til 30 oktober, gikk i topp på måleområdet i den samme perioden hvor ADP-en viste forhøyet signalstyrke, noe som skulle indikere at turbiditeten har vært opp mot 20 FTU eller mer. Dette virker usannsynlig høyt, selv om det faller sammen med den perioden hvor partikkelsignalet på 13-19 m dyp var høyt også fra ADP. Det høye turbiditetssignalet vedvarte helt til målerene ble tatt opp av vannet, selv om det var noe variasjoner på slutten. Vi har derfor valgt å ikke basere oss på turbiditetsverdiene fra langtidsserien fra vektormåleren. Det skal imidlertid ikke utelukkes at det kan være en effekt av utslippene i området, med et ganske stort utslipp i området vest for Norteks vektor-måler. Det ble imidlertid ikke observert noe spesielt mye høyere turbiditet i denne perioden på RCM9, som også ligger ganske nær utslipp.

Figur 33. Signalstyrke registrert av vektormåleren 12.-30. oktober ved Falconbridge.



Figur 34. Strømkomponent øst-vest registrert av vektormåleren 12-30.oktober ved Falconbridge.

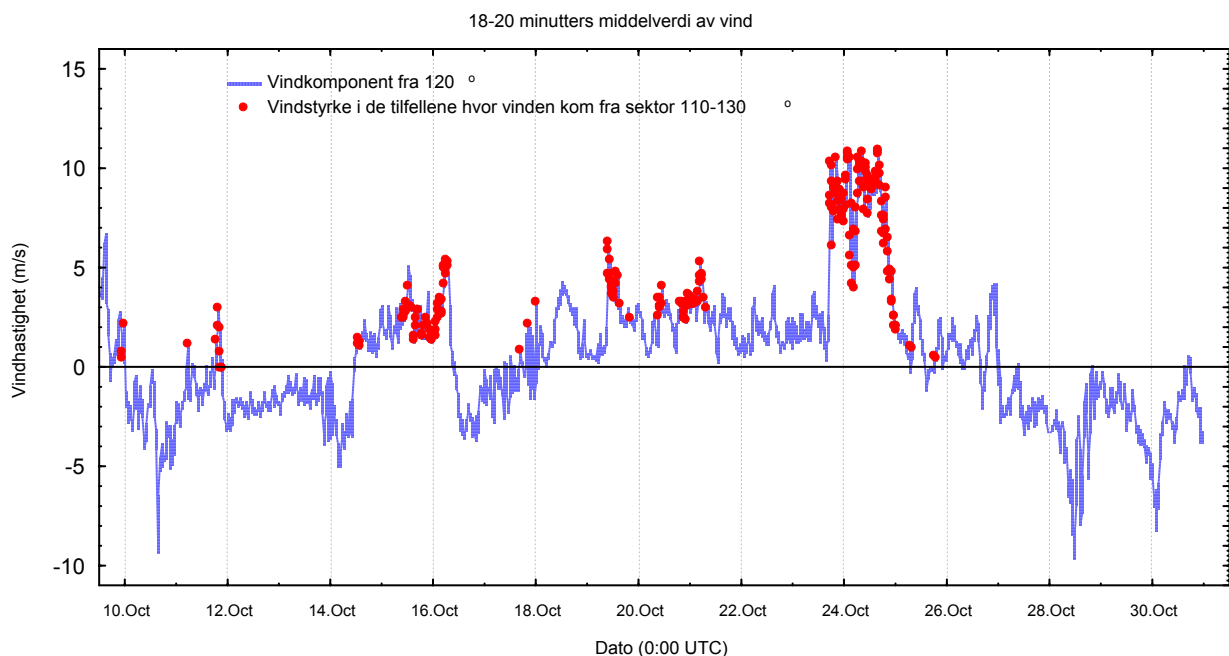
Strøm målt av vektormåler ved Falconbridge



Tidsseriene som helhet viser altså mer eller markerte variasjoner som ikke ser ut til å henge sammen med skipsanløp. Alle de tre målerene gir indikasjon på en økning i partikkelinnhold fra 24-25. oktober. Mens RCM-9 innerst i bukta har høy turbiditet helt til målingene avsluttes 30. oktober, synker signalstyrken tilbake til tidligere verdier for ADP og vektormåler.

En mulig årsak til slik variasjon i partikkelkonsentrasjoner kunne være påvirkning fra vind, ved strøm og bølger som gir turbulens ved bunnen. Figur 35 viser hvordan vinden har variert gjennom måleperioden. Kurven viser vindkomponent fra 120 °, som er den retningen hvor vinden får størst virkningslengde (fetch) inn mot Hanneviksbukta. Punktene markerer de tilfellene da vindretningen er mellom 110 og 130 °, og viser total vindstyrke for disse tidspunktene. Natten og formiddagen 24. oktober skiller seg ut med særlig kraftig vind fra den kritiske retningen, og må forventes å gi mer bølger og turbulens i Hanneviksbukta enn ellers. Det faller ganske godt sammen med økningen i signalstyrke for vektormåleren. ADP-måleren har også et maksimum i signalstyrke på stort dyp i denne perioden, men har også forhøyde nivåer i perioden før dette. Denne måleren var plassert så langt øst at den kan være mer påvirket f.eks. av partikkeltransport nordfra enn de andre målerne. Når det gjelder RCM-9 lengst vest, har den et litt annet variasjonsmønster. Turbiditeten er høy i perioden med kraftig vind fra sørøst, men det kan se ut til å være en viss sammenheng med høy turbiditet også i perioder hvor vinden kommer fra nordvest, mens den er lav i perioder med relativt svak vind (mindre enn 5 m/s) fra sørøst. Et grundigere studium må eventuelt til for å se om dette er statistisk holdbart, og antagelig ville det kreve data for en lengre periode, eller gjentatte målinger over flere perioder.

Figur 35. Vind i måleperioden ved Falconbridge. Tidsintervallet er utvidet til å inkludere de to siste døgn før måleperioden.



Dersom det er en sammenheng med vind, skyldes det neppe lokal påvirkning på bunnen ved målerne. Vektormåleren måler strøm i korte pulser (innenfor ett sekund) hvert minutt eller hvert 2. minutt. Dersom vinden ga økt turbulens og bølger burde det gi mer variabel strøm fra

puls til puls. Det er ingen spor av slikt i data fra vektormåleren. En mulighet er at vindskapte bølger gir oppvirvling av partikler i strandsonen, eller f.eks. på grunnområdet under selve kaia, og at dette spres seg utover langs bunnen. En annen mulighet kunne være at vinden gir oppvirvling av materiale fra et sted på land, med påfølgende avsetning på vannflaten på steder som ligger i le for vinden.

Det kan også være en sammenheng med nedbør, som har gitt utvasking av partikler fra land, f.eks. fra kaiområdene, med påvirkning også på dypere vann når partiklene synker ut. Som drøftet på side 66 er det en mulig overensstemmelse mellom nedbørtopper og turbiditetstopper for målingene ved Elkem uka før.

Også for målingene ved Falconbridge er det delvis sammenfall mellom høyt partikkelinnhold og nedbør (Figur 11 side 63) og høyt partikkelinnhold. Det var opphold noen dager i starten av måleperioden, og 14.-16. oktober kom ca. 10 mm nedbør til sammen, med det aller meste 15. oktober*. I perioden 23-30. oktober kom det en del nedbør, mest konsentrert den 24. oktober med 32 mm, og dessuten 36 mm med ukjent fordeling over helgen 26-28. oktober. Dette faller bare delvis sammen med indikasjonene på økt partikkelinnhold. Turbiditeten ved RCM9 var generelt høy i nedbørperioden fra 24. oktober, men den var relativt lav i nedbørperioden 14.-16. oktober, og avtok i løpet av 15. oktober, da det var en del nedbør. Vektormåleren viser høy signalstyrke i perioden 24.-26. oktober, som godt kan ha vært den mest nedbørrike perioden, dersom nedbøren i helgen kom den 26. For signalstyrke fra ADP er det en særlig høy topp 24. - 26. oktober, men også en tidligere økning fra 19. til 24. oktober som ikke kan kobles til nedbør.

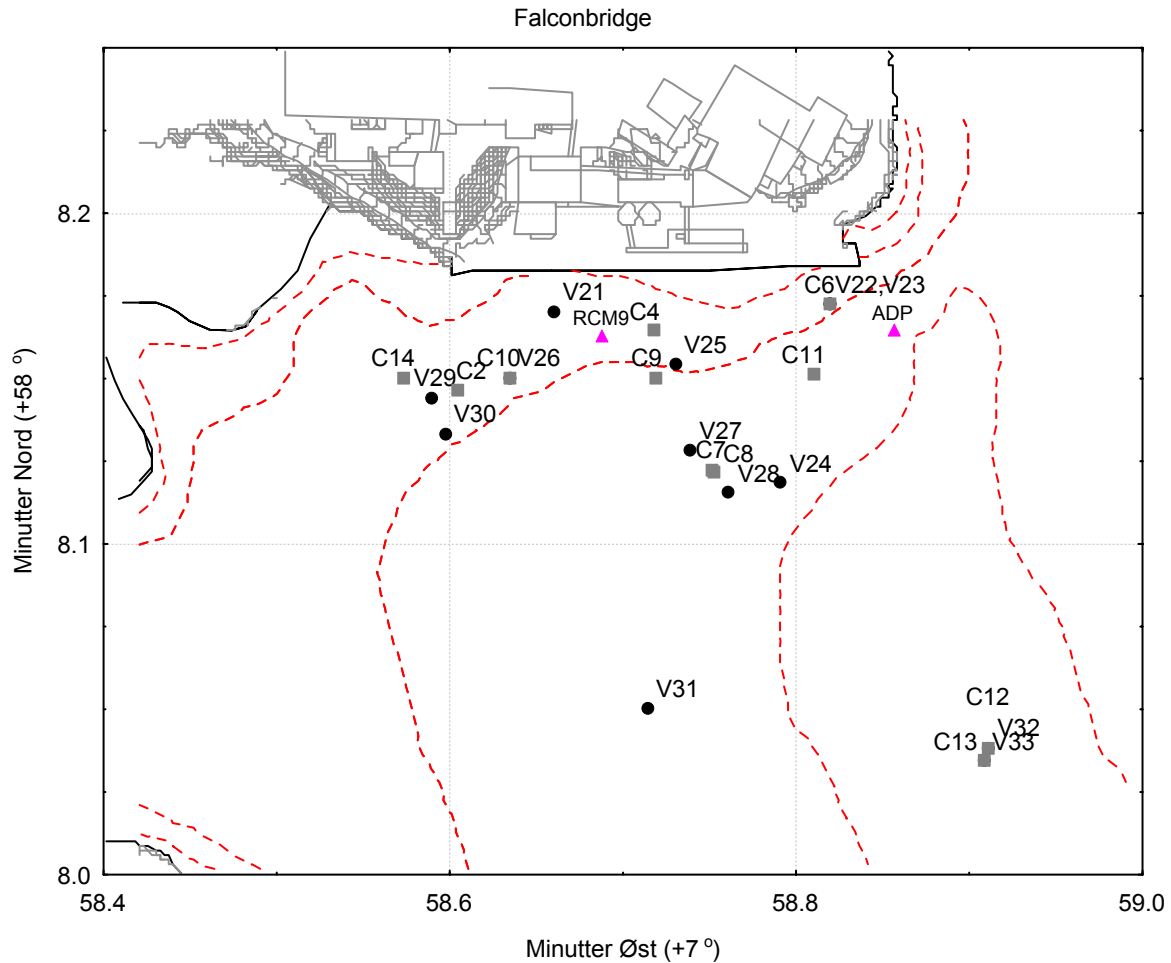
En tredje mulighet er som nevnt at variasjonene i partikkelinnhold henger sammen med de lokale utslippene og ikke har noe med oppvirvling fra bunnen å gjøre. Vi har ingen detaljerte opplysninger om utslippene i perioden, så det må foreløpig stå som et åpent spørsmål. Som det fremgår foran har signalstyrken fra ADP en døgnvariasjon som kan peke i den retning (Figur 29 og Figur 30).

9.5.3 Måling ved båtanløp 12.10 2001

Den 12. oktober ankom Federal Welland. Det er en mattebåt på 28 000 tonn. Ved denne ankomsten ble det gjort en rekke målinger og observasjoner fra båt, samtidig som to av de selvregistrerende instrumentene (RCM-9 og ADP) samlet data. Vektor-strømmåleren ble brukt til dybdeprofilerende målinger fra båt ved denne ankomsten, og det ble også tatt en serie CTD-profiler. Posisjonene er vist på Figur 36, sammen med posisjon for CTD-profil C2 som var tatt 6. oktober.

* 24-timers periode fra 7:30 om morgenen lokal tid.

Figur 36. Kart over måleposisjoner for CTD-profiler og vektorprofiler ved Falconbridge 6.oktober (C2) og 12. oktober

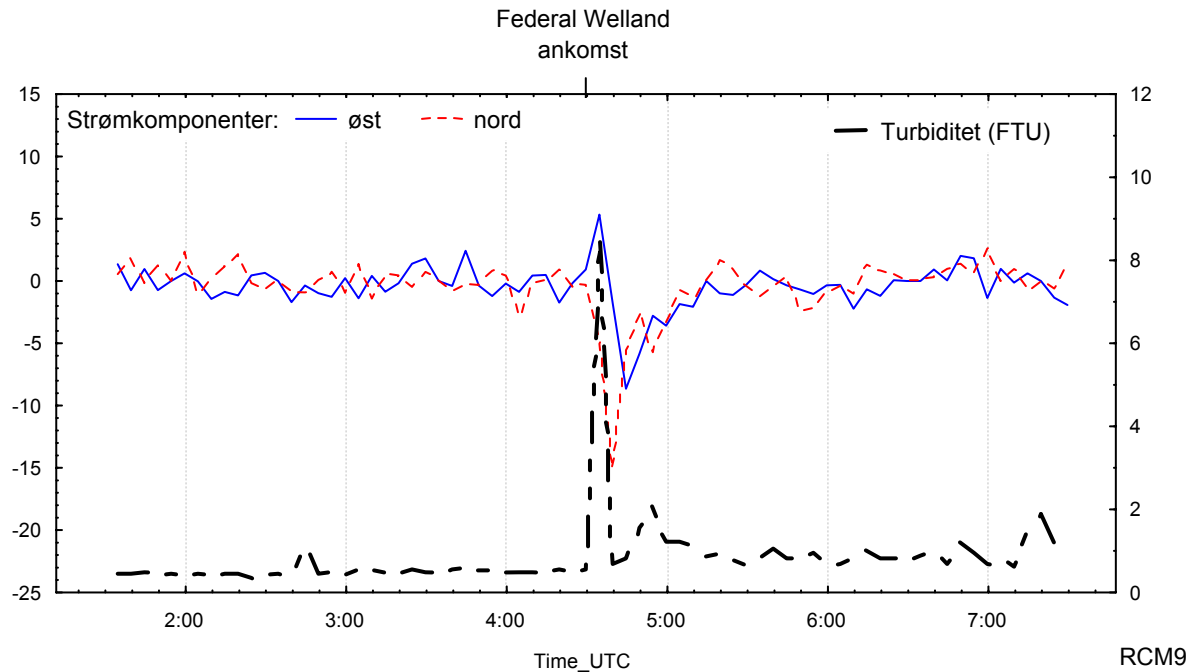


Før ankomsten ble det gjort en del målinger med SeaCat CTD (C6, V21-V23) for å kartlegge bakgrunnsverdier for sjiktning og partikkelinnhold. Det ble også tatt to vannprøver. Båten gikk rett inn langs kaia, assistert av en taubåt, og la til langs den østre delen av kaia kl.6:30 lokal tid (04:30 UTC). Baugen gikk nesten inn mot den posisjonen RCM-9 var plassert i (kart). Da båten var på plass, la taubåten seg med baugen mot skipssiden nokså langt fremme, litt på skrå, med hekken mot sør/sørvest, og skjøv Federal Welland inn mot kaia, ved å gå med tilsynelatende full propellkraft. Propellstrømmen gikk i retning sør/sørvest. Dette pågikk i anslagsvis 10 minutter. I denne perioden ble det målt i kjølvannet fra taubåten. Det var ikke praktisk mulig å ankre opp for strømmålinger, men det ble gjort målinger av sjiktning og partikkelinnhold med SeaCat, og av partikkelinnhold (signalstyrke og turbiditet) med vektormåleren. Det ble også tatt ytterligere 5 vannprøver for å kalibrere instrumentmålingene, med måledyp valgt ut på basis av vektorprofilene som ble lest av direkte.

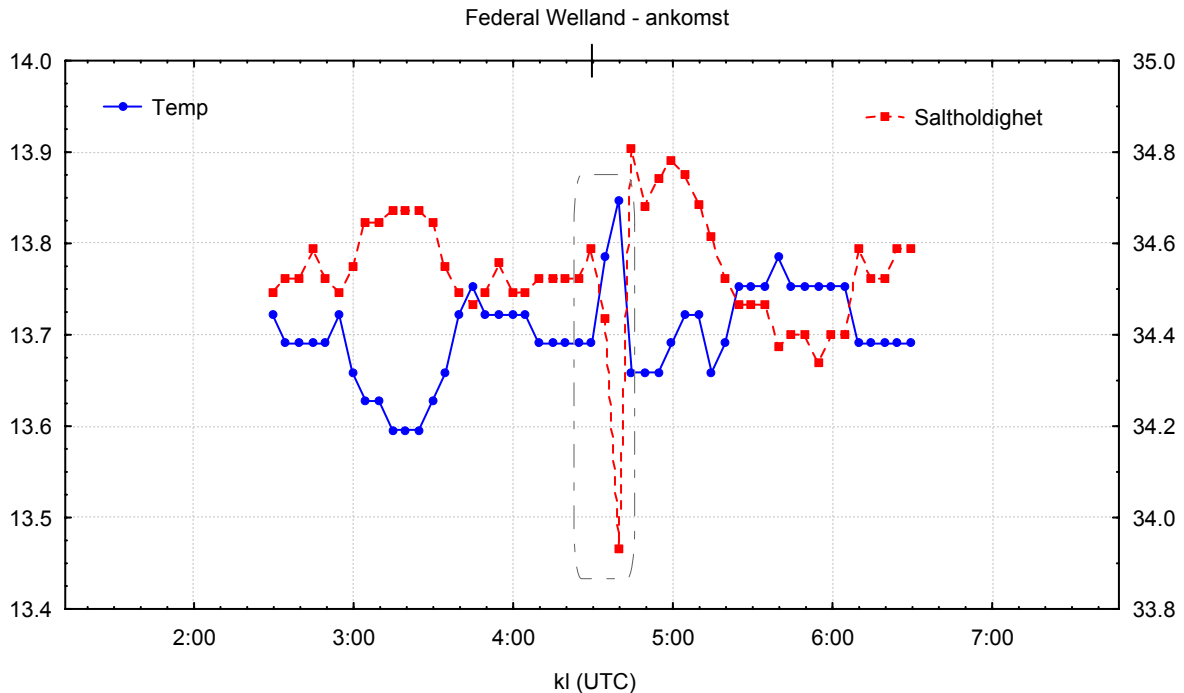
De selvregistrerende instrumentene viser et klart utslag i det båten legger til kai. Figur 37 viser hvordan strøm og turbiditet varierte ved RCM-9 på 15 m dyp utenfor den vestre del av kaia i forbindelse med båtanløpet. Akkurat i det båten legger til kai opptrer det en strømpuls først i sørøstlig retning, deretter dreierende mot sørvest, med hastigheter på 10-20 cm/s. Strømstyrkene er tilbake til det normale etter 20 til 25 minutter. Rett etter båtanløpet øker

også partikkelinnholdet markert, til en turbiditet omkring 8 FTU, fra en bakgrunnsverdi på ca. 0.5 FTU. Siden data er registrert hvert 5. minutt, og toppen vises bare som en enkeltstående høy verdi, betyr det at maksimal turbiditet kan ha vært en god del høyere. Det samme gjelder hastighetsutslaget. Turbiditetstoppen kommer samtidig med den første sørøstlige strømmen, men før den kraftigere sørligere strømpulsen som følger. Turbiditeten øker i en ny sekundær topp ca. 25 minutter etter båtanløpet, samtidig med at strømmen avtar. Ca. to timer etter båtanløpet er turbiditeten fortsatt ca. 50 % høyere enn på forhånd.

Figur 37. Strømhastighet og turbiditet målt med RCM-9 på 15 m dyp omkring tiden for ankomst av Federal Welland 12. oktober.



Figur 38. Saltholdighet og temperatur målt med RCM-9 på 15 m dyp omkring tiden for ankomst av Federal Welland 12. oktober (avmerket på toppaksen). Saltholdigheten er antagelig ca. 1.3 enheter for høy (se drøfting i teksten).

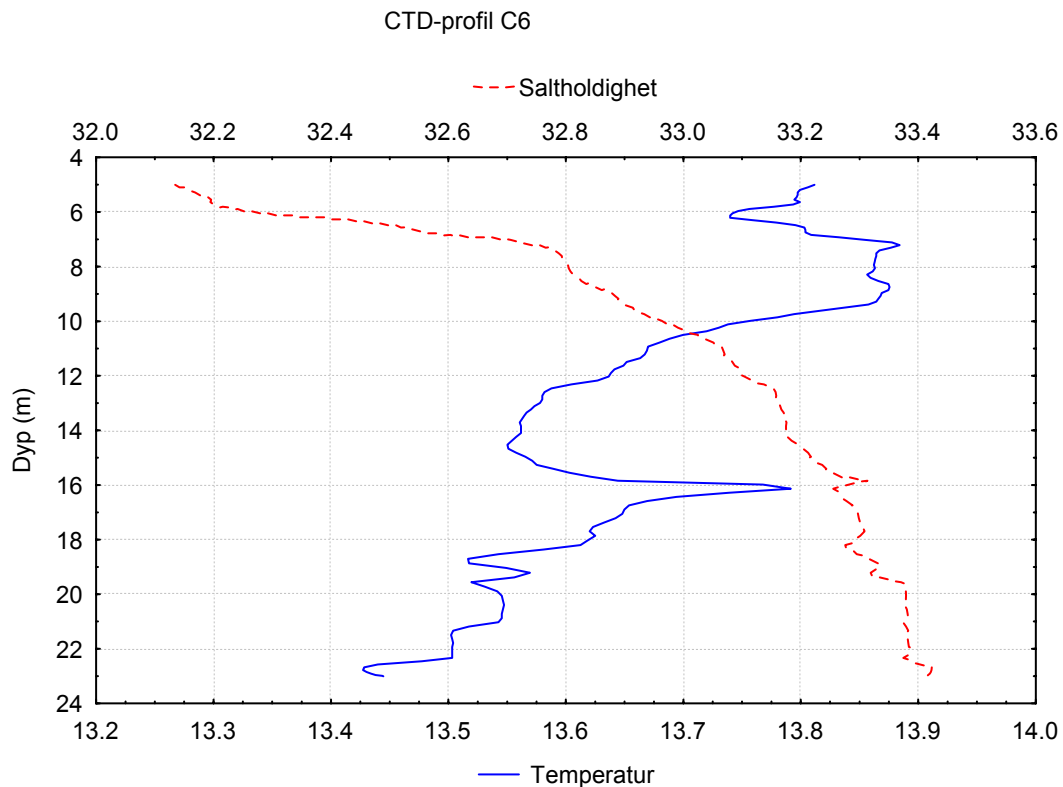


I etterkant av den første strømpulsen og turbiditetstoppen viser data fra RCM-9 en kortvarig økning i temperatur på 0.15 °C og reduksjon i saltholdighet på 0.4 i det strømmen dreier i sørlig retning (Figur 38). Det representerer en vertikal forskyvning, som kan anslås ved å sammenligne med CTD-profil C6, som ble tatt ved Falconbridge-kaia en halv time tidligere (Figur 39). Absoluttverdiene stemmer ikke så godt overens, i det saltholdigheten fra RCM-9 ligger 1.3 enheter over CTD-profilen, som må regnes som den mest pålitelige verdien. Også temperaturen fra RCM-9 kan se ut til å avvike noe. Hvis det er konstante avvik mellom instrumentene, kan likevel størrelse og retning på endringene sammenlignes. Det ser da ut til at endringene fra kl. 4:30 til 4:40 UTC (markert med ramme i Figur 38) er noenlunde konsistent med forskjellen i CTD-profilen fra 15 m til 10-12 m dyp og deretter til 7 m dyp, dvs. at det har skjedd en forskyvning av vannmasser nedover. Turbiditetstoppen blir borte samtidig med at vannet fra 10 m dyp flyttes ned omkring målerdypet på 15 m koblet til en sørlig strøm. Det ser altså ut til at en vannmasse med saltholdighet tilsvarende 10 m dyp i uforstyrret dybdeprofil har passert måleren i sørøstlig retning, og samtidig er blitt presset nedover, og har fortrent en partikkelholdig vannmasse. Etter at sjiktningen svingte tilbake var turbiditeten ca. dobbelt så stor som før, men langt lavere enn den kortvarige toppen. Det betyr at det har vært en ganske lokal, sterkt konsentrert påvirkning i et mindre volum som fremkommer i den kortvarige toppen, og den sekundære lavere toppen kan være et resultat av at denne vannmassen strømmer tilbake sterkt fortynt med omkringliggende vann.

RCM9-måleren lå litt vest for taubåten, og fordi turbiditetstoppen er så kortvarig, er det lite trolig at den stammer fra propellstrømmen til taubåten, som arbeidet inntil kl. 4:45 UTC i følge feltnotatene, og ga partikler vesentlig i de øvre 10 m av vannsøylen (se nedenfor). Det er heller rimelig å tro at det kan være partikler som er virvlet opp enten av hovedpropellen på Federal Welland da den reverserte og sendte vann vestover inn under båten. Som beregnet i kap. kan det bli hastigheter på 6-7 m/s ved bunnen i en slik situasjon i den aktuelle situasjonen, med dypgang 10 m og bunndyp ca. 15 m (se 8.4 side 61). Eventuelt kan det også

tenkes oppvirvling pga. strømmer ved bunnen som dannes som reaksjon på de bølgene skipet danner rundt seg når den siger inn langs kaia og så stopper. Det er likevel mest naturlig å anta at det er propellstrømmen inn under båten som har virvlet opp partikler, og at de fluktuasjonene vi ser i målingene med RCM9 viser hvordan denne skyen etterpå flytter seg og spres som en del av slike reaksjonsstrømmer rundt skipet, som dynamiske reaksjon knyttet til overflatebølger rundt båten.

Figur 39. Salt og temperatur som funksjon av dyp for CTD-profil C6 12. oktober kl. 3:54 UTC



For ADP-måleren som sto plassert i østenden av kaia og målte i profil fra 22 m og opp mot overflaten, er det ingen spesielle signaler å se i strømstyrke eller signalstyrke i forbindelse med anløpet. Det er riktignok et svakt signal i form av høyere signalstyrke rundt 9 m dyp, men ikke noe mer enn det som forekommer i tilsvarende svingninger også ellers.

De mest interessante dybdeprofilene som ble målt ved dette båtanløpet er vist i Figur 40 til Figur 43.

Dagen før, den 11. oktober kl. 17.45 UTC, var det tatt en CTD-profil, C4, med en tilhørende vannprøve (S6) fra 7 m dyp. CTD-profilen, som ikke vises her, var omtrent som C6, med nokså homogen turbiditet rundt 0.4 FTU fra 5 til 18 m dyp, men med topper opp mot 0.6 FTU i 9 og 8 m dyp. Vannprøven hadde noe høyt partikkelkonsentrasjoner 1.9-2 mg/l (TSM,STS), og gløderesten utgjorde 40 %. Det har i ettertid blitt klart at prøvepunktet ligger relativt nært et utslipp fra Falconbridge på ca. 17 000 m³/s, som går ut på ca. 20 m dyp ca. 90 m sør for kaia. Forklaringen på avviket mellom vannprøven og CTD-profilen kan være at målingene er gjort i utkanten av utslippsskyen, og at de små posisjons- og tidsforskjellene det er mellom

CTD-profilen og vannprøven kombinert med vannets bevegelser kan ha medført at CTD-profilen er tatt utenfor skyen av utslipp, mens vannprøven er tatt innenfor.

CTD-profil C6 og vektorprofiler V21-V23 ble tatt før ankomst av båten. Turbiditeten er ca. 2 FTU i brakkvannslaget, dvs. de to øverste metrene, men ligger ellers nokså konstant på en bakgrunnsverdi 0.4-0.5 FTU dypere ned. I vektorprofilene er signalstyrken omtrent konstant hele veien, dvs. at det bare er lysspredningen som avviker i overflatelaget, mens de lydreflekterende partiklene ser ut til å ha mer konstant konsentrasjon. Vannprøve S9, med 0.5-1.2 mg/l partikler, ble tatt samtidig med V21 på 10 m dyp hvor turbiditeten var ca. 0.5 FTU.

CTD-profil C7 er tatt 10 minutter etter anløp, i propellstrømmen fra taubåten som arbeidet med å skyve Federal Welland inn på plass. Fra overflaten ned til 11 m dyp er det høy og sterkt varierende turbiditet rundt 3 FTU. Vi ser også at saltholdigheten fluktuerer frem og tilbake, og ikke øker monotont med dypet. Det viser at profilen er tatt gjennom en vannmasse preget av raske skiftninger pga. virvelbevegelser. Partikkelkonsentrasjonen ser ut til å være størst for det letteste vannet. Gjennomsnittlig saltholdighet i det partikkelpåvirkede sjiktet er 27-28, som tilsvarer en blanding ned til 7-8 meters dyp av vannsøylen fra C6. Vektorprofil V24, som ble tatt i kjølvannet til taubåten et par minutter før, viser enda høyere turbiditet, rundt 6 FTU, i de øvre 5-6 meter, og i denne profilen er også signalstyrken høyere i dette laget, dvs. at turbiditeten har økt pga. lydreflekterende partikler. To vannprøver (S11, S12) som ble tatt i 1 og 15 m rett etter og omtrent på samme sted som C7, viste ikke spesielt høye partikkelkonsentrasjoner, .

CTD-profil C8 er tatt på samme sted som C7 10 minutter senere, da taubåten nokså nylig var ferdig. Stabil sjiktning har stilt seg inn igjen, og det partikkelpåvirkede sjiktet, som nå har relativt homogen saltholdighet rundt 26, er mer konsentrert mot overflaten enn i C7. Vannprøve S13 fra 1.5 m dyp hadde partikkelinnhold opp mot 3 mg/l, men relativt lavt nikkelinhold.

CTD-profilene C9 og C10 er tatt lenger vest og nord ennå 10 minutter senere. CTD-profilene viser forhøyet turbiditet dypere ned enn før, i vann med saltholdighet 32-33. Det kan være den partikkelskyen som passerte RCM9 like etter anløpet i strøm utover og nedover langs bunnen, som diskutert foran. Den siste profilen i Figur 40, C11, er tatt lenger øst og ca. 30-35 minutter etter at taubåten var ferdig med å arbeide. Her er forholdene omtrent som før båtanløpet, men med spor av forhøyet partikkelinnhold omkring 5 m dyp, ved saltholdighet 32.

En vannprøve (S14) på 9.5 m samtidig med C9 hadde partikkelinnhold 1.2-2 mg/l (TSM,STS). Dette er likevel lavere enn det som ble målt på omtrent samme dyp i punkt C4 dagen før (vannprøve S6), dvs. uten påvirkning fra skipsanløp, så partiklene kan ikke entydig knyttes til skipsoppvirvlingen, de kan også være et resultat av utslippet fra Falconbridge. Vektorprofil V25 (Figur 42) ble tatt samme tid og sted som C9, og har omtrent samme forløp, men ennå høyere turbiditet etter den valgte omregningen (Vedlegg 7). Turbiditeten på profil V25 viser en typisk klokkeformet profil (Gauss-fordeling) med senter i 13 m dyp. Det gjør det nærliggende å anta at det er resultat av en innlagret avløpssky. Dypet stemmer også godt med forløpet av profil C9 og C10. Det kan ikke utelukkes at de høye turbiditetene her skyldes utslipp og ikke oppvirvling. Alle de profilene som viser forhøyet partikkelkonsentrasjon under 10 m dyp ligger i nærområdet for utslippet fra H2S-generatoren (kapittel 9.5.1).

Figur 43 viser vektorprofiler lenger sør og vest ca. en time etter anløpet. Disse profilene viser generelt høyere turbiditet enn før anløpet, men jevnere fordelt med dypet, iten noen markerte

topper. En vannprøve, S15, ble tatt på 9.5 m dyp midt mellom de to profilene. Denne prøven hadde noe høyere partikkelinnhold enn det som kan regnes som naturlig bakgrunn, 1.2- 2.5 mg/l, og dessuten ganske høyt nikkelinhold, ca. 3000 µg/g, som er omtrent på linje med overflatesedimentene i Hanneviksbukta.

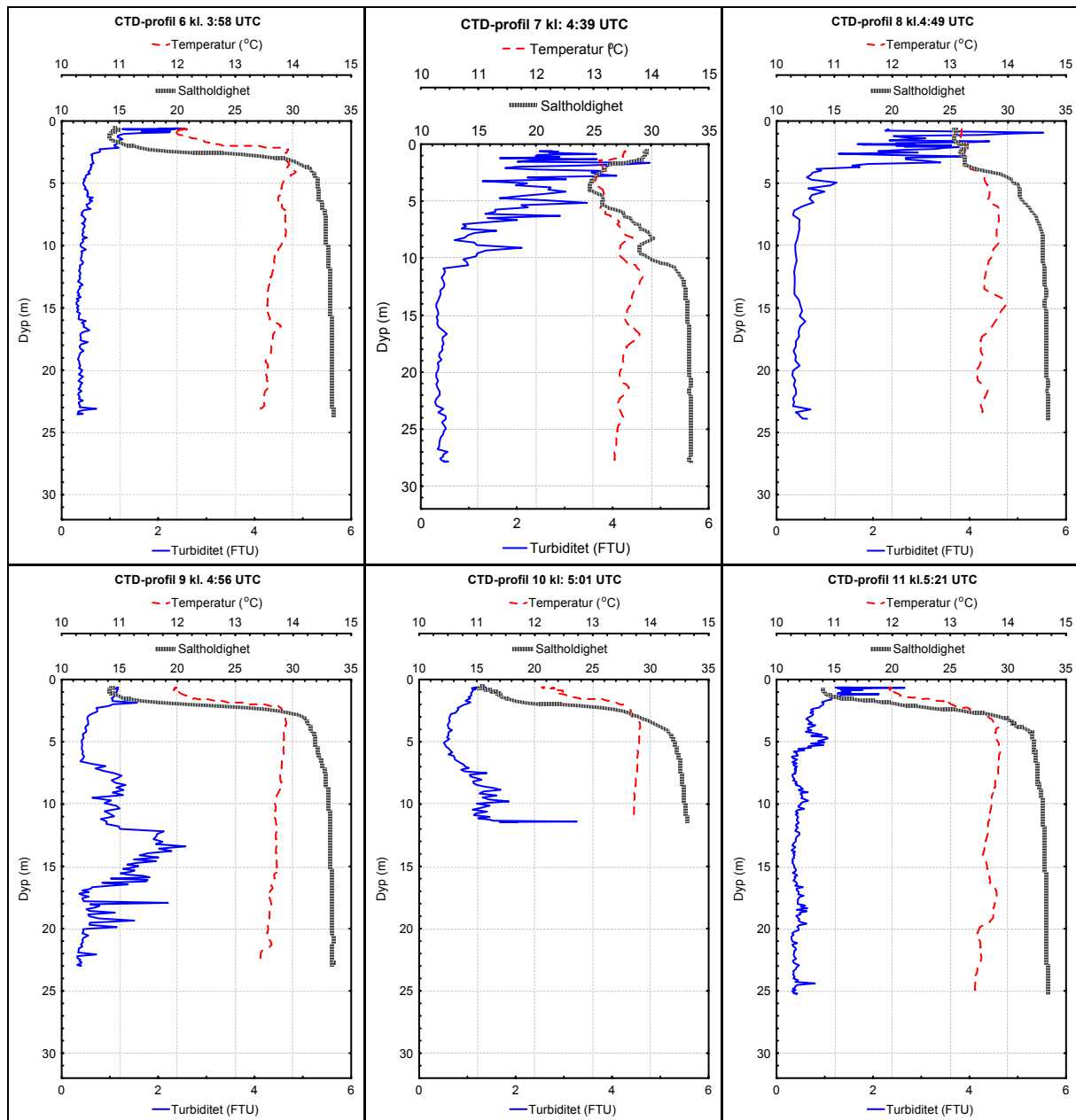
Det ble også målt i en posisjon ca. 400 m sørøst for der taubåten hadde ligget, for å se om spredningen av partikkelskyen kunne spores her. Det ble først målt litt før kl. 6:00 UTC (C12, V32) og samme sted ble besøkt et par timer senere, (C13, V33). I tillegg ble det da tatt en CTD-profil C14 lengst inn i bukta.

Figur 44 viser hvordan turbiditeten varierer med saltholdigheten under brakkvannslaget for disse siste 4 CTD-profilene. Profil C6 fra før båtanløpet er tatt med som referanse. Profilene C12 og C13, som er tatt langt sør for kaia, men med to timers mellomrom, er nokså like, og begge har lavere turbiditet enn C6. Det samme gjelder V32 og V33, som ble tatt samme sted. Ingen av disse profilene er vist her. Det ser altså ut til at partikler som er virvlet opp fra båtanløpet ikke kan spores så langt ut. Profil C6 har en liten turbiditetstopp rundt saltholdighet 32.5.

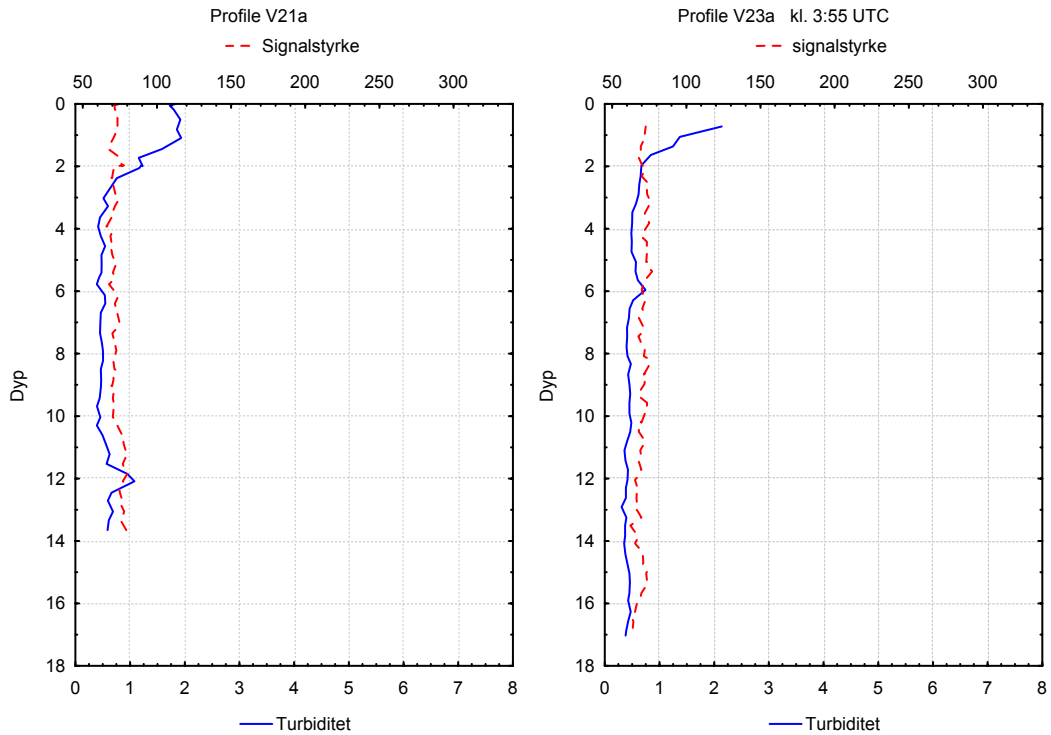
Profilene C11 og C14, som er tatt lenger nord, i kaiområdet, men med tre timers mellomrom, har høyere turbiditetsverdier enn C6 for saltholdighet >31.5, For profil C14 gjelder det helt ned, mens C11 har lav turbiditet rundt saltholdighet 32.5. Det forhøyede turbiditeten i C11 og C14 forekommer for lavere saltholdighet enn den partikkelskyen som ble observert i C9 og C10, og viser derfor mer sannsynlig utslag av partikler som har sedimentert til større dyp fra det partikkelholdige sjiktet som ble dannet av propellstrømmen etter taubåten.

Dersom toppene i C9, C10 og V25 viser spor etter utslipp kan det selvsagt også gjelde de lavere toppene og C11 og C14.

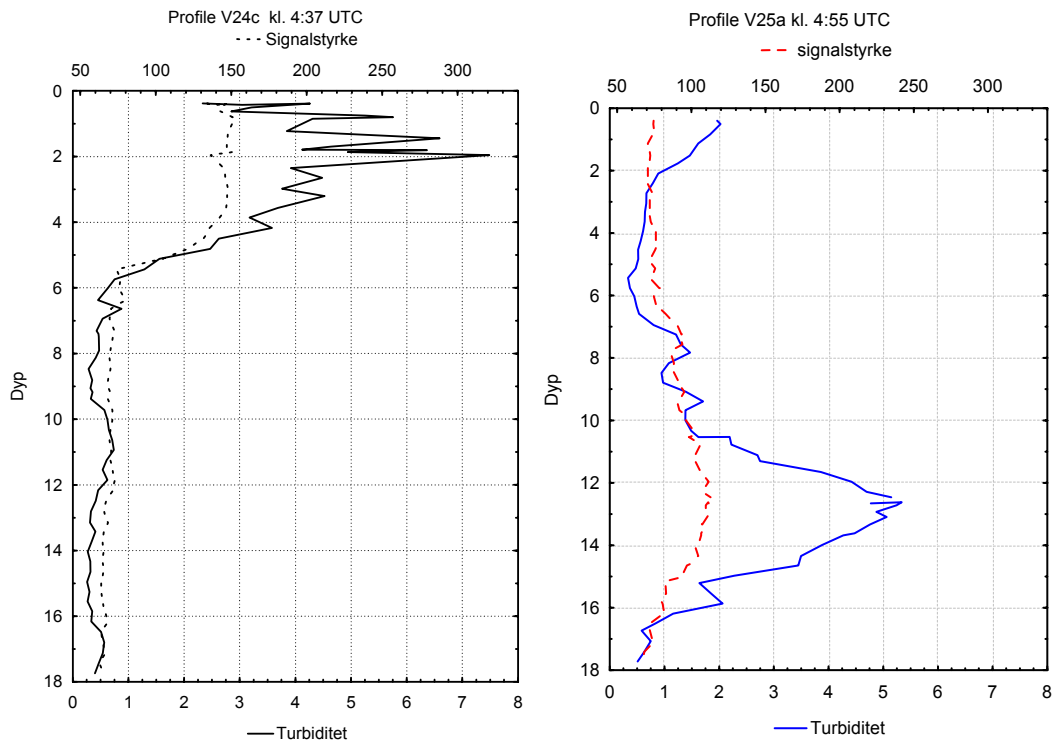
Figur 40. CTD-profiler i tiden omkring anløp av Federal Welland 12. oktober; en halv time før (profil 6), under og etter anløpet i området bak taubåt (profil 7 til 10) og sør for akterenden av skipet ca. en time etter anløpet (profil 11).



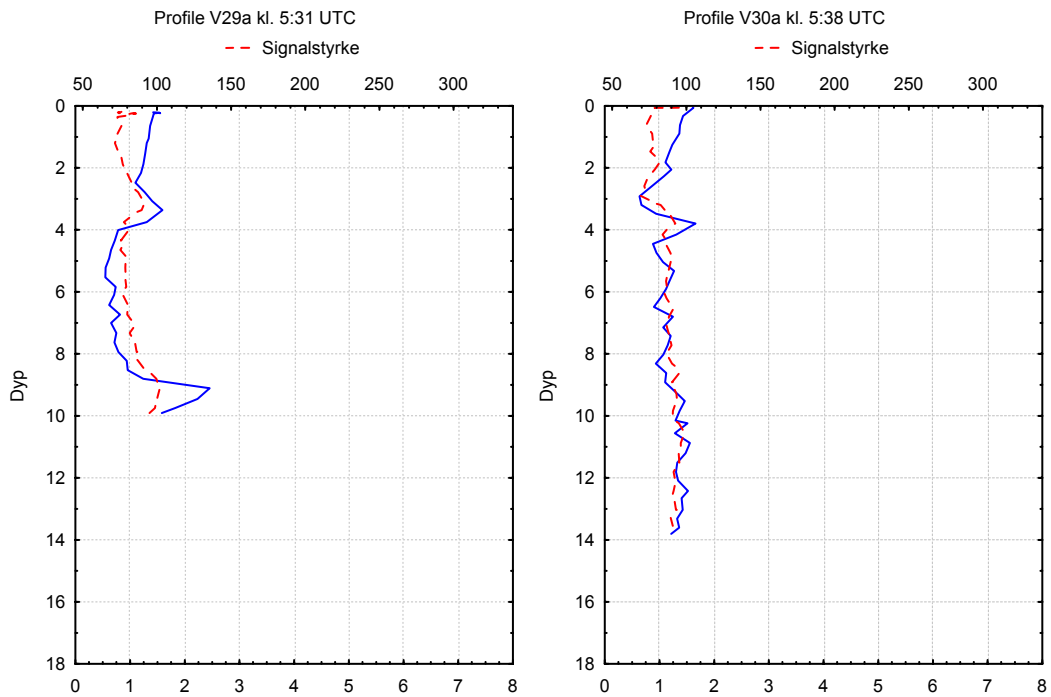
Figur 41. Vektor-profiler målt langs Falconbridgekaia før Federal Wellands ankomst 12. oktober NB! Bemerk andre skalaer enn Figur 40.



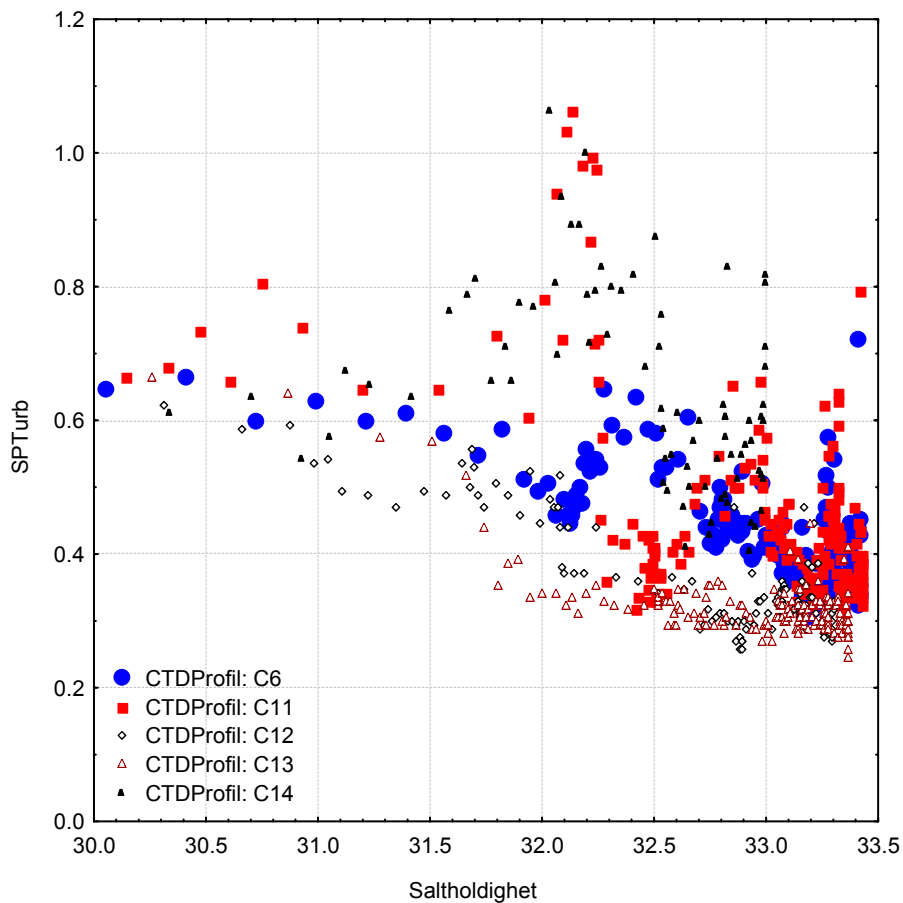
Figur 42. Vektorprofiler tatt i område bak arbeidende taubåt (V24a) rett etter anløp av Federal Welland 12. oktober og noe senere lenger inn mot kaia (V25)



Figur 43. Vektorprofiler tatt sør for vestenden av Falconbridgekaia en time etter anløp av Federal Welland



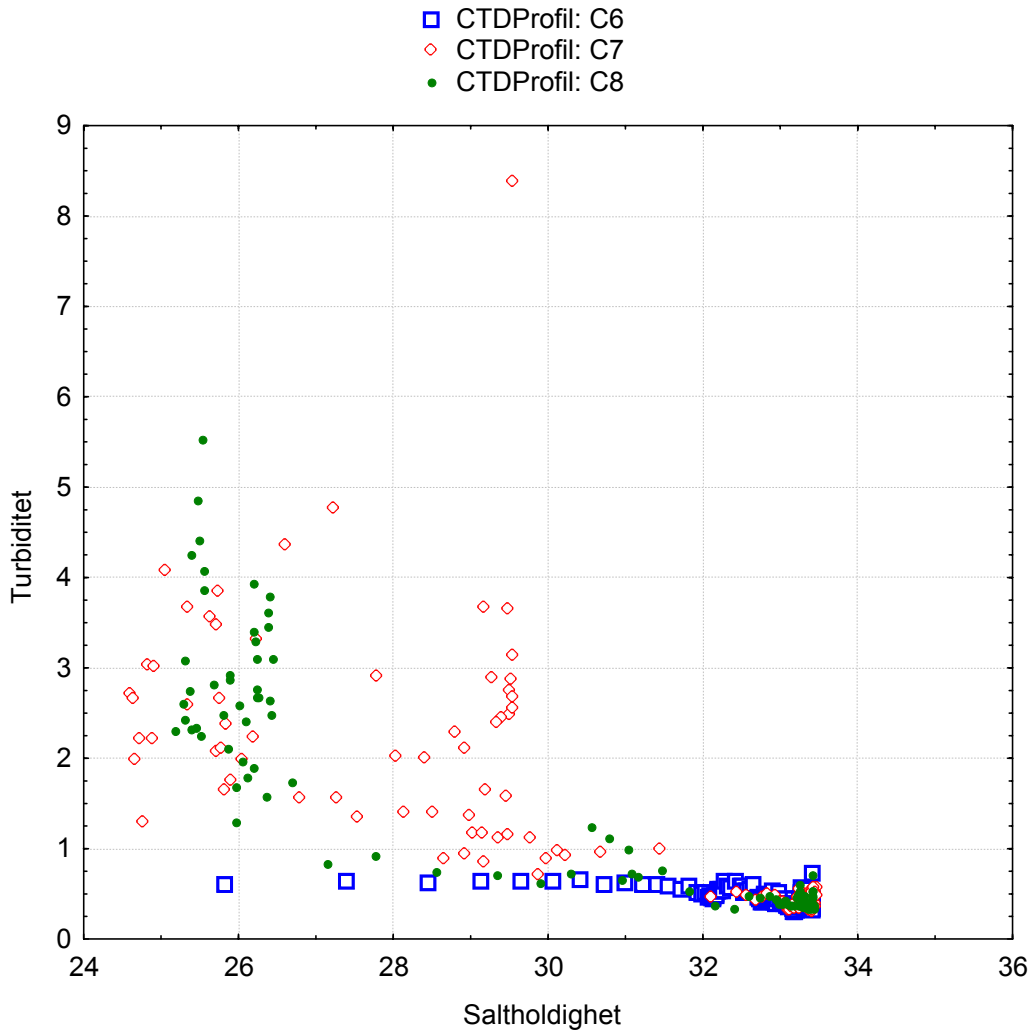
Figur 44. Sammenheng mellom turbiditet og saltholdighet for avsluttende CTD-profiler ved Falconbridge 12. oktober.



I den grad partikkelkonsentrasjonene kan knyttes til oppvirvling ser det altså ut som partikler er virvlet opp fra sedimentene på to måter ved dette anløpet. For det første en oppvirvling rundt baugen på båten, antagelig da hovedpropellen til Federal Welland ble reversert og sendte propellstrømmen fremover under båten. Det ga en kortvarig stor turbiditet og en svakere, og noe mer langvarig forhøyelse av turbiditeten på 15 m dyp ved RCM9. Muligens gjenfinnes dette også i senere CTD-profiler (C9, C10) og vektorprofiler (V25) i det samme området, men det er også mulig at de markerte toppene i disse profilene skyldes eksisterende utslipp fra Falconbridge. Partiklene i disse profilene var konsentrert til vann med saltholdighet rundt 33.

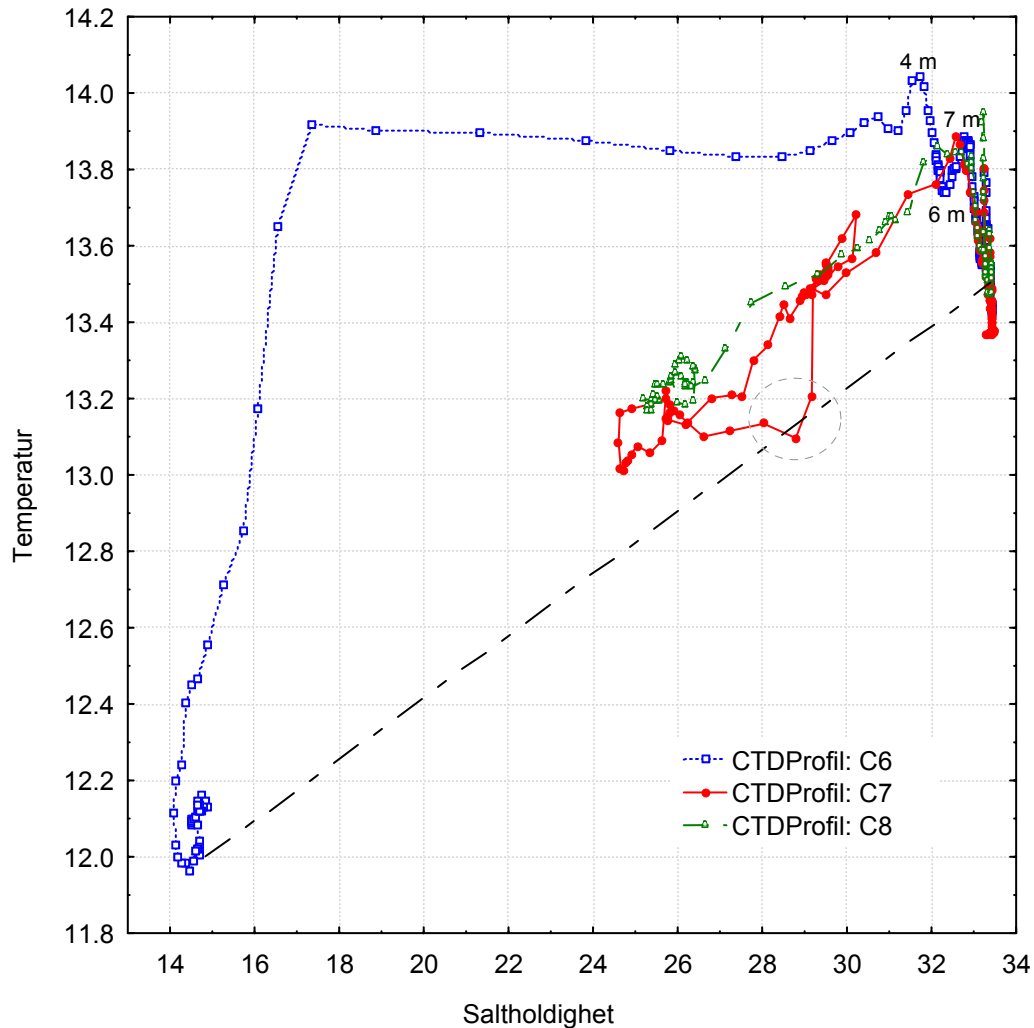
For det andre var det de partiklene som ble observert i propellstrømmen fra taubåten. Propellstrømmen fra taubåten hadde en midlere saltholdighet som tilsier at den var hentet fra vannsøylen ned til ca. 10 m dyp. Turbiditet målt i propellstrømmen lå stort sett innenfor 6 FTU. Det virker ikke som oppvirvlingen har skjedd i selve propellstrømmen ved at den har berørt bunnen. Ved alle målingene i propellstrømmen fra taubåten var denne begrenset nedover til 5-10 m dyp, med et uberørt lag under det. CTD-profilen fra propellstrømmen før den er homogenisert (C7) viser sterkt forhøyet turbiditet ved saltholdighet 24.5 til 29.5 med bare en liten økning ned til saltholdighet 32, og ingen endring under det (Figur 45). Dersom partiklene var virvlet opp ved at propellstrømmen vokste i omfang og berørte bunnen, ville vi vente at partiklene hadde særlig høy konsentrasjon i nedre del av propellstrømmen, og mest ved høy saltholdighet, og at det var partikler også i de dypeste lagene i C7 og C8. Det er ikke tilfelle.

Figur 45. Turbiditet som funksjon av saltholdighet i propellstrømmen fra taubåten ved ankomst av Federal Welland 12. oktober



Hvor partiklene kom fra kan belyses ytterligere ved å se på sammenhengen mellom temperatur og saltholdighet i de tre profilene C6 før skipsanløpet, og C7 og C8 i propellstrømmen fra taubåten (Figur 46 viser). I dette TS-diagrammet ligger punktene fra propellstrømmen i C7 og C8 stort sett langs en rett linje mellom punktene for overflatevannet i C6 ($T \cong 12$, $S \cong 15$) og fra ca. 6-7 m dyp ($T \cong 13.8$, $S = 32-33$), men kan også være dannet ved blanding av vann fra dyp mellom 0 og 4 m og dypere ned fra C6. I profil C7 er det noe vann nær overflaten (ca. 2 m dyp) som har temperatur 13.1-13.2 og saltholdighet 28-29. Dette vannet kan bare dannes ved blanding av vannmasser fra C6 hvor vann fra 15 m eller dypere inngår som en hovedbestanddel (60-70 %). I virkeligheten vil det selvsagt være mer komplekse blandinger av vann fra forskjellige dyp. Profilene sett i sammenheng tyder imidlertid på at propellstrømmen i stor grad består av vann som trekkes opp fra ca. 15 m. Det betyr at partikkelkonsentrasjonene i propellstrømmen fra taubåten meget vel kan komme fra den partikkelskyen med turbiditet >8 som ble observert ved RCM9 rett etter anløpet. Det er ikke nødvendig å regne med noe egen oppvirvling i propellstrømmen fra taubåten for å forklare partikkelkonsentrasjonene, og som nevnt foran er det heller ikke rimelig å tro.

Figur 46. TS-diagram for profiler CTD-profiler C6-C8. Stiplet linje viser hvordan i innsirklede punktene i C7 kan dannes ved blanding av vann fra overflaten og fra dypere lag i C6.



Det ser altså ut til at oppvirvling primært har skjedd under eller rundt skipet da det la til kai, enten i den strømmen hovedpropellen sendte fremover under skipet da den ble reversert, eller av strømninger som oppsto fordi skipet skjøv unna vann inne langs kaia. Propellen på taubåten har så suget vann, dels fra sidene i overflatelaget, men også under bunnen av Federal Welland, og har derved trukket opp partikkelholdig vann fra ca. 15-20 m dyp og spredt det sørvestover i Hanneviksbukta nær overflaten i sin propellstrøm. Det er selvfølgelig også mulig at det i tillegg virvles opp partikler i den strømmen propellen setter opp under bunnen på skipet når den suger inn vann. Uansett vil dette bety at oppvirvlingen skjedde like ved eller under skipet, innenfor 10-20 meter fra kaia, og ikke lengre ute i propellstrømmen fra taubåten.

9.5.4 Måling ved båtavgang 13.10 2001

Federal Welland forlot kaia neste dag. Endringen av magnetfeltet på vektormåleren viser at båten forlot kaia kl. 14:13 lokal tid, dvs. 12:13 UTC. Det er ikke mulig å se noe spesielt i data fra ADP-måleren i forbindelse med avgangen, men begge de to innerste selvregistrerende instrumentene ga klart utslag i strømbildet på dette tidspunktet.

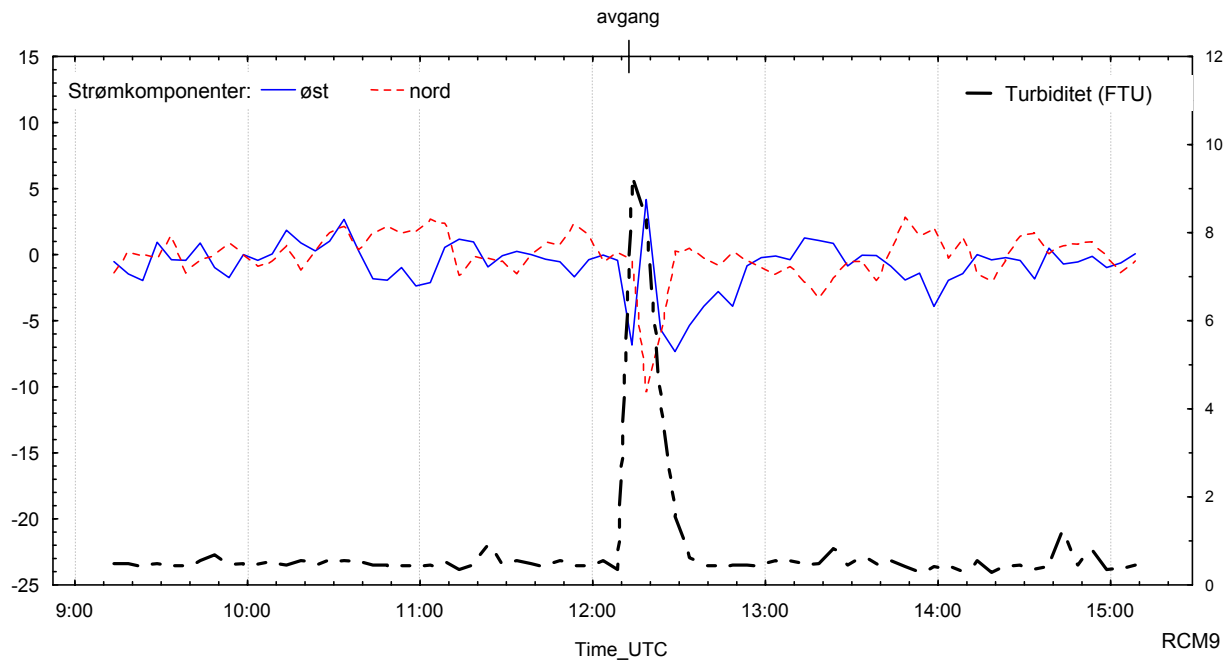
Figur 47 viser strøm og turbiditet fra RCM9. En kort strømpuls mot vest akkurat ved tidspunktet for avgang faller sammen med en brå økning av turbiditeten til ca. 9. Den etterfølges av en større strøm mot sørøst, mens turbiditeten holder seg høy, og en strøm fra vest, som dempes i løpet av 30 minutter. Turbiditeten er tilbake til det normale ca. 20 minutter etter avgangen.

Figur 48 viser strøm og signalstyrke fra vektormåleren i samme tidsrom. Like før skipet legger fra kai ses en kort strømpuls (8cm/s) mot vest i ca. ett minutt, og deretter en østlig strøm (17 cm/s) som varer ca. 5 minutter, og deretter dreier nordøst før den dør ut. Den etterfølges av varierende svak strøm mot nordvest i den etterfølgende halvtimen, men denne strømmen er ikke sterkere enn at den kan skyldes andre ting, slike strømmer forekommer også ellers i tidsserien fra denne måleren. Det er ingen spesielle utslag på signalstyrken i forbindelse med disse strømmene. Signalstyrken er relativt lav i perioden med strøm mot øst, og blir høyere når strømmen snur mot nordøst og dør ut, men variasjonsmønsteret skiller seg ikke fra det en har også i perioder utenom skipsbevegelsene, hverken i størrelse eller varighet av topper, så det kan være tilfeldig. Data fra vektormåleren indikerer iallfall ingen tilsvarende økning i partikkelinnhold som RCM9 lenger vest, så det ser ikke ut til at partikkelskyen har spredt seg østover.

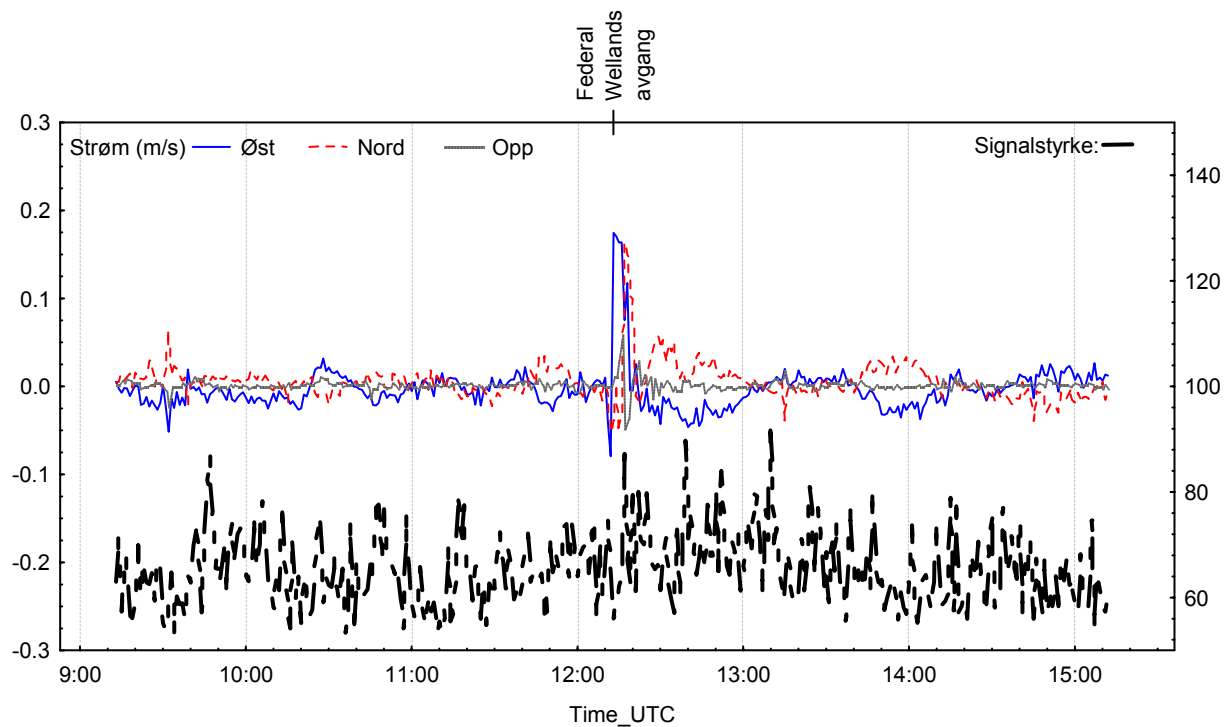
Samtidig med den østlige strømmen viste vektormåleren en kortvarig økning av temperatur i forhold til den generelle trenden rundt tidspunktet for avgangen, mens RCM9 viste en kortvarig økning av temperatur og en reduksjon i saltholdigheten. Det betyr at strømmen henger sammen med en midlertidig senking av tetthetsflatene, dvs. en midlertidig opphopning av vann med lavere tetthet over målerne.

Den første strømpulsen mot vest i de to instrumentene er antagelig påvirkningen fra propellstrømmen i det båten går, og det ser ut til at oppvirvling av partikler skjer i den forbindelsen. Det at vektormåleren viser en strømpuls mot vest rett før avgang, mens RCM9 viser det omtrent samtidig med avgangen, skyldes nok bare ulikt loggingsintervall (hhv. 1 minutt og 5 minutter) og evt. forskjell i tidsoppløsning på selve målingen. Den østlige strømpulsen viser antagelig påvirkning fra den strømmen en vil få inn mot skipet bakfra når det går ut av kaiområdet. Partikler ser ut til å være virvlet opp inne ved den vestre del av kaia, men ikke ha gjort seg gjeldende ut mot den østre halvdel.

Figur 47. Strøm og turbiditet målt av RCM9 i tidsrommet rundt Federal Wellands avgang.



Figur 48. Strøm og signalstyrke registrert av vektormåler i tidsrommet rundt Federal Wellands avgang 13. oktober.



9.5.5 Båtanløp 16.-28. oktober

I denne perioden, mens de registrerende instrumentene sto utplassert, var det anløp av noen mindre båter, men det er ingen tegn til oppvirvling av partikler ved disse anløpene. Alle anløp og avganger er tidsbestemt gjennom endring i magnetfeltet på vektormåleren (Vedlegg 8). Heller ikke ved tidspunktene imellom MV Wanis ankomst og avgang hvor magnetfeltet viser tegn til skipsbevegelser var det noe uvanlig å se på målerregistreringene.

Ved MV Wanis ankomst, 19. oktober kl. 19:12 UTC i følge magnetfeltet, viste RCM9 et utslag i hastighet, med strøm mot nordvest over ca. 10-15 minutter, noe større og mer langvarig enn de nærmeste timene før og etter. Ved avgangen 21. oktober viste RCM9 strøm mot sørøst i 20 minutter etterpå, men ikke spesielt sterk i forhold til ellers. Vektormåleren har en helt kortvarig topp i signalstyrke (partikkelinnhold) akkurat ved anløpstidspunktet for MV Wani, men ikke større enn hva som forekommer også ellers i perioden, og ikke noe særlig utslag på strøm.

Hverken ved ankomst eller avgang av MV Wani var det noe utslag på turbiditeten målt av RCM9, og den var ved begge disse tidspunktene ganske lav på forhånd.

Ankomst og avgang for CT Sky vises tydelig på vektormålerens magnetfelt, men ellers er det ingen tegn til uvanlig strøm eller partikkelkonsentrasjon.

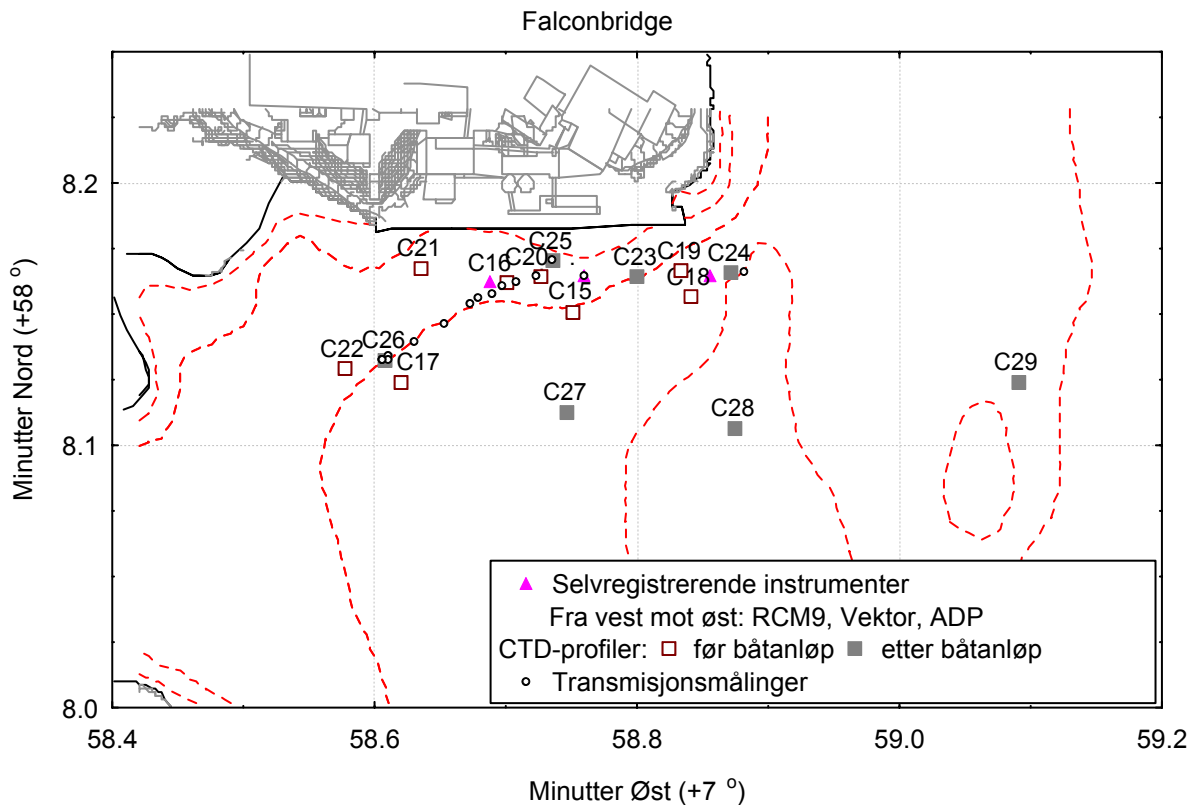
Det er altså ikke registrert noen oppvirvling av partikler ved anløpene av de mindre båtene til Falconbridge på de instrumentene som var satt ut.

9.5.6 Målinger ved båtanløp til Falconbridgekaia av Sark Trader 29. oktober.

Sark Trader er en syrebåt på ca. 4900 tonn. Den gikk inn uten assistanse av taubåt, og la til kai kl. 13.00 UTC. Den gikk direkte inn langs kaia og la til ved østre del av kai, og stoppet ved å reversere hovedpropellen. De selvregistrerende instrumentene viste ingen spesielle utslag, hverken på strøm eller partikkelsignal.

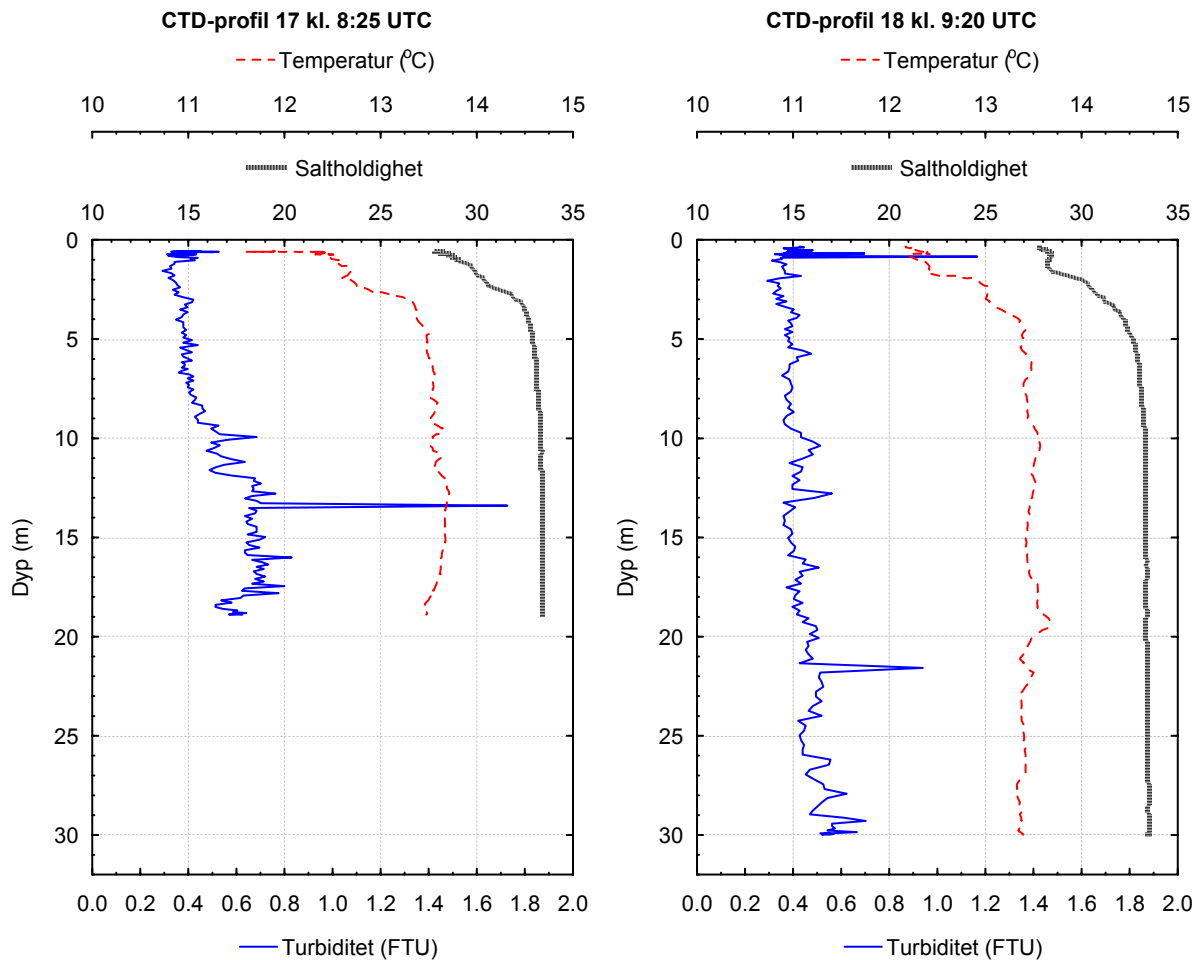
I tiden før båtanløpet ble det tatt 8 CTD-profiler rundt i Hanneviksbukta, sammen med noen vannprøver. Disse data gir et bilde av hvordan partikkelinnholdet kan variere uten påvirkning fra båtanløp. Etter båtanløpet ble det tatt 9 CTD-profiler og 8 vannprøver. Kart som viser plassering av profilene er vist Figur 49.

Figur 49. Kart over registrerende instrumenter og CTD-profiler 29. oktober i tiden rundt ankomst av Sark Trader. Posisjon for transmisjonsmålinger etter båtanløp er også vist.



Først ble det tatt 4 profiler kl. 7:40 til 9:20 UTC, C15, C16 og C18 langs kaia, og C17 ut for vestenden av kaia, lenger sør. Det var en svak lagdeling, med et 2 m tykt brakkvannslag med saltholdighet 28 og temperatur 12.5 °C over et sprangsjikt fra 2 til 5 m dyp, og derfra og nedover nokså homogene vannmasser. Turbiditeten var ca. 0.4 FTU fra overflaten og ned til saltholdighet 33.2, med en økning opp mot 0.8 FTU dypere ned, mest markert på profil C17 lengst vest. I tilknytning til C16 ble det tatt to vannprøver, F1 og F2, på hhv. 1 og 20 m dyp. De hadde begge partikkelinnhold omkring 1.1 mg/l som middel av TSM og STS, men mye lavere TSM enn STS. Profil C17 og C18 er vist i Figur 50.

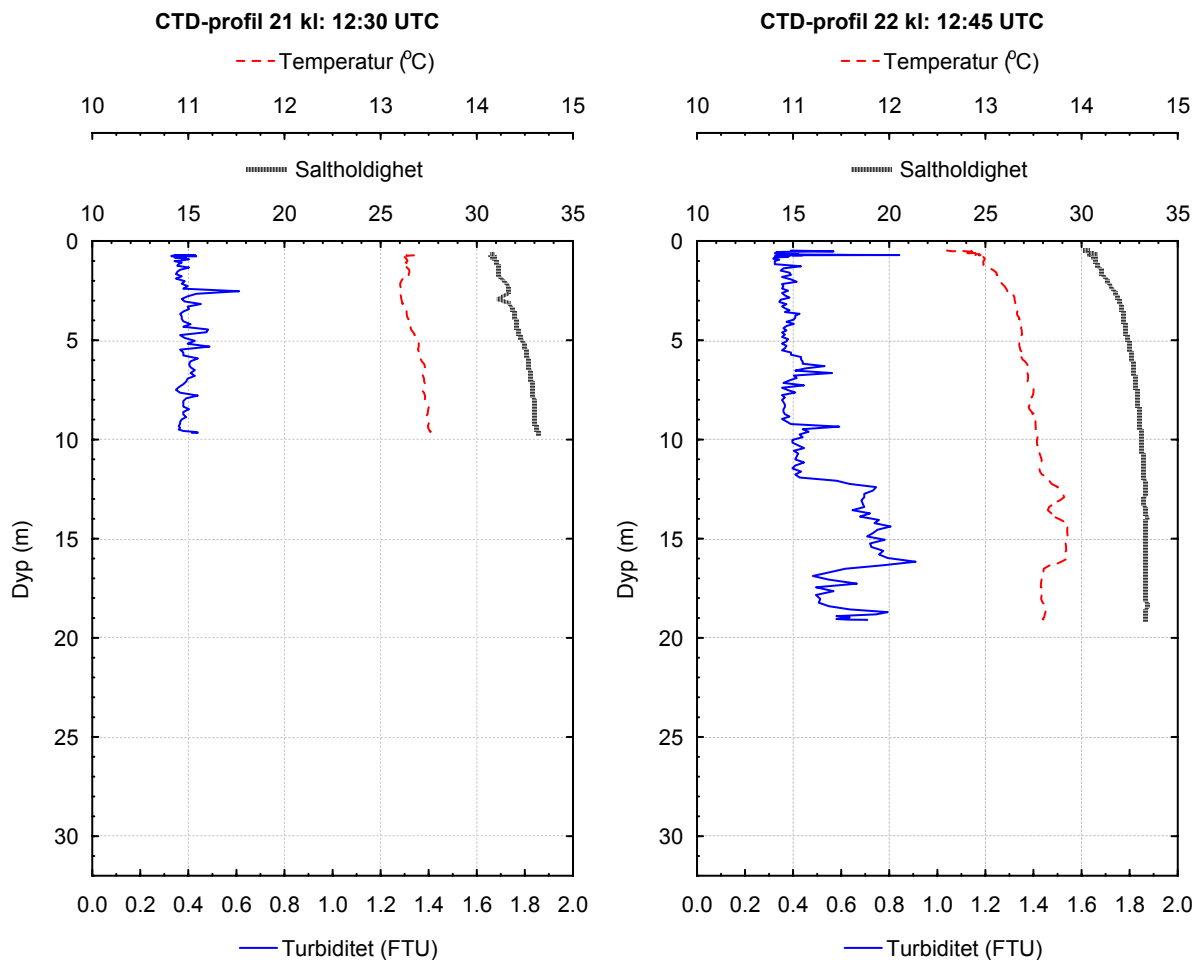
Figur 50. CTD-profiler C17 og C18 tatt om morgenen 29. oktober utenfor Falconbridge-kaia



Ytterligere 4 CTD-profiler ble tatt litt senere, i timen før anløpet av Sark Trader (C19-C22). De tre første profilene hadde turbiditet rundt 0.4 FTU i alle dyp, bortsett fra noe høyere verdier i den øverste meteren, og enkelte små topper opp mot 0.5 FTU. Profil C22 langt vest i Hanneviksbukta hadde samme forløp ned til 7 m dyp, men derfra og ned var turbiditeten 0.7-0.8 FTU i et skarpt avgrenset til 12 m dyp, og så lavere igjen dypere ned. Det ble ikke tatt vannprøver på disse profilene. Profilene C21 og C22 er vist i Figur 51.

De to profilene C17 og C22 var like på den måten at de høyere turbiditetsverdiene finnes i en vannmasse med høyere saltholdighet og høyere temperatur som er lagret inn mellom kaldere og mindre salt vann. Variasjonene i temperatur og saltholdighet er små, men det ser ut til det forhøyede partikkelinnholdet er knyttet til en bestemt vannmasse. Profilene ligger ca. 100 m vest for utslippspunktet sør for Falconbridgekaia, dvs. utslippet fra H₂S-generatoren. Det er derfor rimelig å anta at det er partikler fra dette utslippet vi ser i profilene som en innlagret vannmasse. Turbiditeten holder seg innenfor 0.8 FTU i disse profilene.

Figur 51. CTD-profiler C21 og C22 tatt nærmeste halvtime før anløp av Sark Trader



I timen etter båtanløpet ble det tatt en del transmisjonsmålinger, og 7 CTD-profiler (C23-C29), og det ble tatt vannprøver ved tre av CTD-profilene. En transmisjonsprofil ved baugen på båten 6 minutter etter anløp viste ingen variasjon i transmisjon fra overflaten til 14 m dyp.

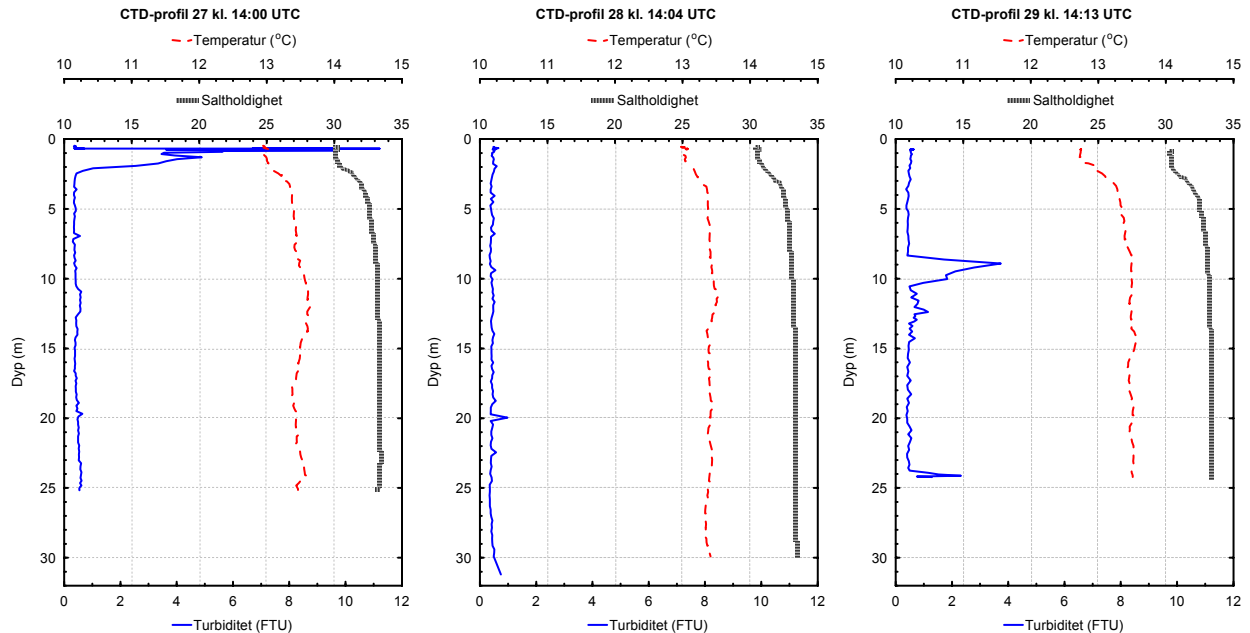
CTD-profilene C23, som ble tatt 10 minutter etter båtanløp sør for midten av båten viste forhøyet turbiditet (opp mot 1.2 FTU) i de øvre 4 meter, og sterkt varierende med dyp. Profil C24, som ble tatt 20 minutter etter båtanløpet sørøst for hekken på båten, hadde høyere turbiditet fra 2 til 5 m dyp, (ca. 0.7 FTU, med noen få registreringer rundt 1.0 FTU). Dypere ned viste disse profilene bakgrunnsverdier for turbiditet.

Det ble tatt 3 vannprøver samtidig med C24, på 6, 2 og 10 m dyp. Prøven på 2 m dyp hadde partikkelinnhold 2 mg/l (STS), men her mangler TSM-verdien. Profil C25 som ble tatt vest for baugen en halv time etter anløp, og C26 lenger mot sørvest, viste ingen spesiell påvirkning av partikler (noen få høye verdier helt i starten av profil C26 kan være forstyrrelse av vannflaten).

Profilen C27, som ble tatt 1 time etter båtanløpet lenger sør i Hanneviksbukta, viste derimot sterkt forhøyet turbiditet (4 FTU) i de øvre 2 meter, men ikke noe vesentlig endring dypere ned. Profil C29 som ble ennå 13 minutter senere langt øst for kaia, viste en skarpt avgrenset partikkeltopp opp mot 4 FTU mellom 8 og 11 meters dyp. Både profil C27 og C29 hadde også noe forhøyet turbiditet mellom 11 og 13 m dyp (0.6-0.7 FTU), men det er et ganske

svakt signal, og altså ikke høyere enn det som ble observert før båtanløpet. Profil C28, som ble tatt mellom disse to både mht. plassering og i tid, viser ingen partikkelpåvirkning. (Figur 52)

Figur 52. Avsluttende CTD-profiler ved målinger 29. oktober, ca. 1 time etter båtanløp



Det er kanskje rimelig å tro at de høye verdiene på C23, C24, C27 og C28 er resultat av oppvirvling. Det kan tenkes at båten først har reversert hovedpropellen, og så kjørt forover for å stramme trosser og derved har sendt partikkelholdig vann østover i propellstrømmen. Målingene gir ikke noe bilde av en partikkelsky. CTD-profilene kunne ikke leses av underveis, men ble først tilgjengelig før etter at feltarbeidet var avsluttet, så det ble ikke gjort supplerende målinger. Det ble også gjort en hel del transmisjonsmålinger etter anløpet (Figur 49), uten at det ble funnet spesielle utslag som tydet på forhøyet partikkelkonsentrasjon*.

Konklusjonen må være at anløpet av Sark Trader sannsynligvis har gitt en viss oppvirvling, med mulig spredning utover i Hanneviksbukta, men det er for lite datagrunnlag for å kvantifisere dette.

9.5.7 Målinger ved anløp av Lake Charles 30. oktober

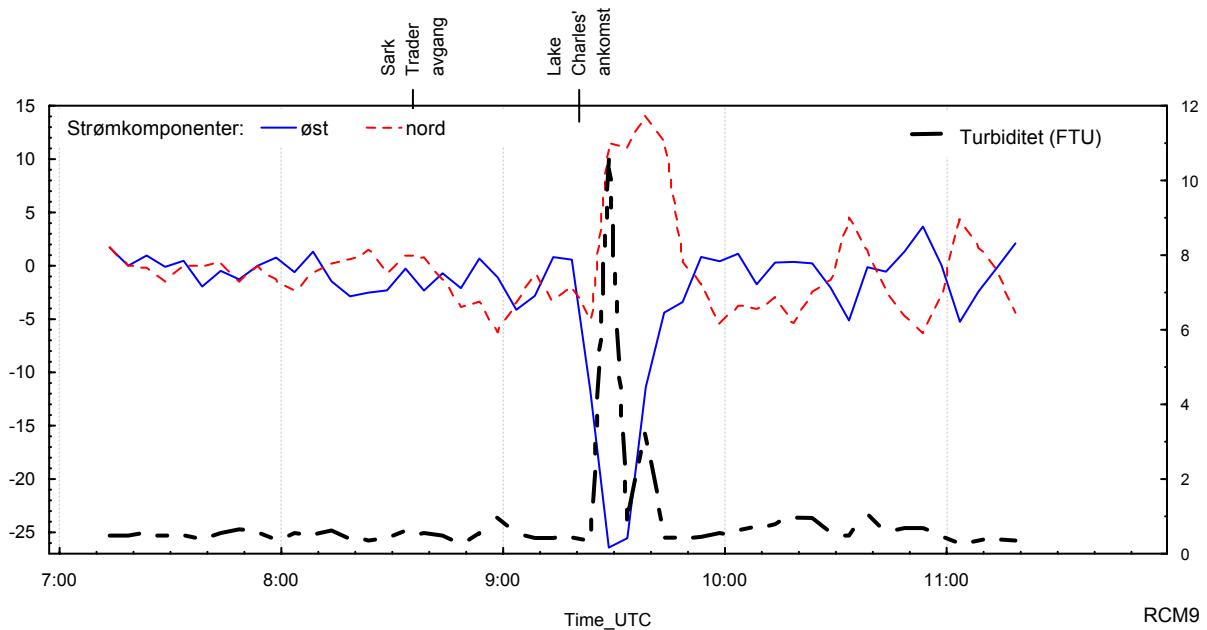
Det siste observerte båtanløpet var da mattebåten Lake Charles (ca. 16 500 tonn) ankom 30. oktober. Sark Trader hadde da bakket ut fra kai ca. 40 minutter tidligere. Lake Charles ble assistert av to taubåter, og la til kai kl. 9:20 UTC i følge notater tatt under feltarbeidet. Endring av kompassretningen på vektormåleren viser at Lake Charles begynte å forstyrre magnetfeltet kl. 9:18 UTC, og var helt på plass ved kai kl. 9:30. Det meste av endringen i magnetfeltet kom fra 9:21 til 9:28. Lake Charles gikk inn langs kaia uten å snu, og reverserte

* Drift i signalet over tid pga. sviktende batteri gjør det litt vanskelig å tolke resultatene, men det er ingen tegn til spesielle utslag bortsett fra den jevne driften.

hovedpropellen for å stoppe. Begge taubåtene la seg på tvers inn mot siden av skipet og skjøv det inn mot kai ved å gå med full propell; den ene ved baugen, den andre ganske langt bak.

Figur 53 viser strøm og turbiditet målt av RCM9 ved dette skipsanløpet. Data fra RCM9 viser en strøm mot nordvest, ca. 0.3 m/s, altså innover i bukta og på skrå inn mot kaia, som varer i 15-20 minutter etter skipsanløpet. Dette må være en del av den strømmen hovedpropellen har sendt fremover under båten da den ble reversert, evt. i kombinasjon med bølgebevegelser rundt båten. Turbiditeten øker raskt i begynnelsen av strømpulsen til tilsvarende verdier som ved ankomst og avgang av Federal Welland, men synker raskt igjen, har en ny kortvarig mye lavere topp, og når tilbake til verdiene fra før anløpet etter 20-25 minutter.

Figur 53. Strøm og turbiditet målt av RCM9 ved ankomst av Lake Charles 30. oktober



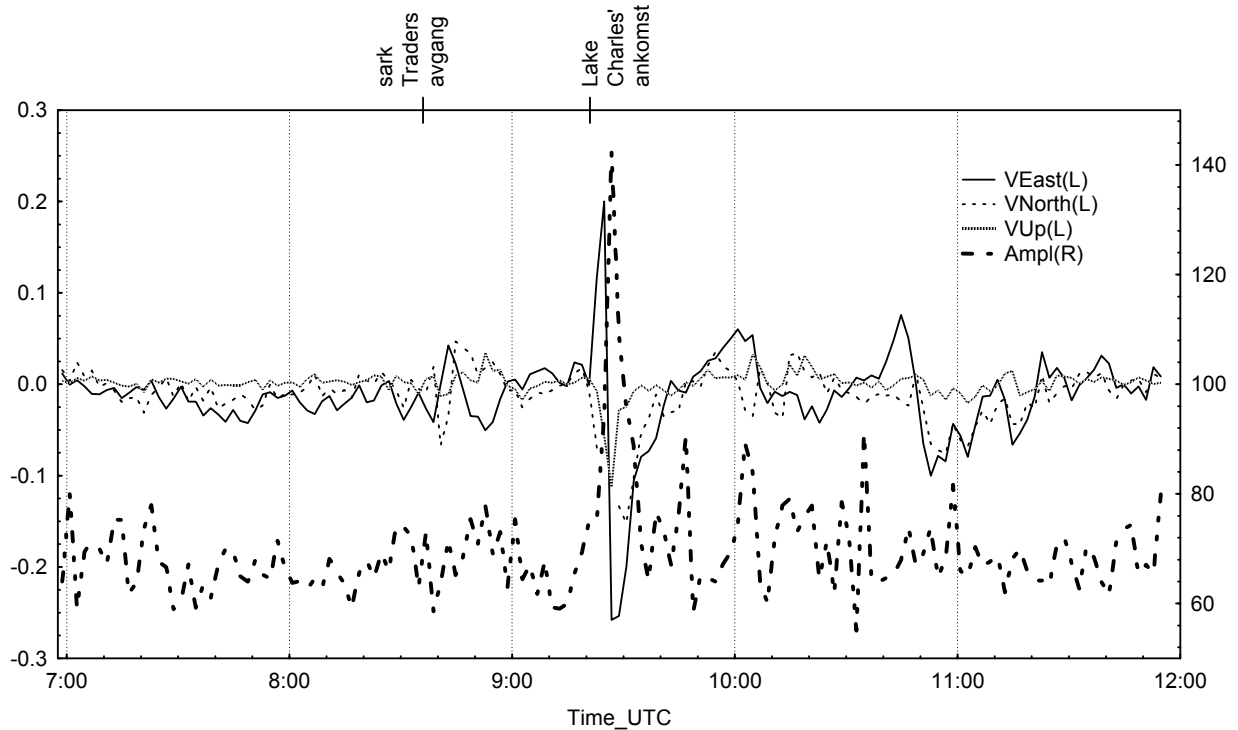
Figur 54 viser tilsvarende data fra vektormåleren. Her var det først en kortvarig strøm mot øst/sørøst, opp til ca. 0.15 m/s, i løpet av de første to minuttene. Det kan være en kompensasjonsstrøm knyttet til at skipet som siger inn mot kaia skyver vannet i de øverste 10 metrene innover mot vest. I løpet av de neste 5 minuttene økte strømstyrken til 0.5 m/s mens den dreide med klokken, først mot sør, og så videre til sør/sørvestlig retning. Samtidig økte signalstyrken (partikkelinnholdet) til et maksimum. Strømmen hadde også en komponent rettet nedover i denne perioden, samtidig som temperaturkurven viste en senkning med ca. 0.05 grader i forhold til det generelle svingningsmønsteret.* Det bekrefter en nedoverrettet strøm, siden temperaturen avtar svakt mot overflaten.

I løpet av det neste kvarteret dreide strømmen ved vektormåleren noe mer vestlig og minsket så gradvis, mens signalstyrken ble tilsvarende redusert. Dette var den perioden hvor

* Temperaturen fra vektormåleren ligger ca. 0.5 grader over det CTD-profilene viser, men variasjonene over tid bør være omtrent riktige.

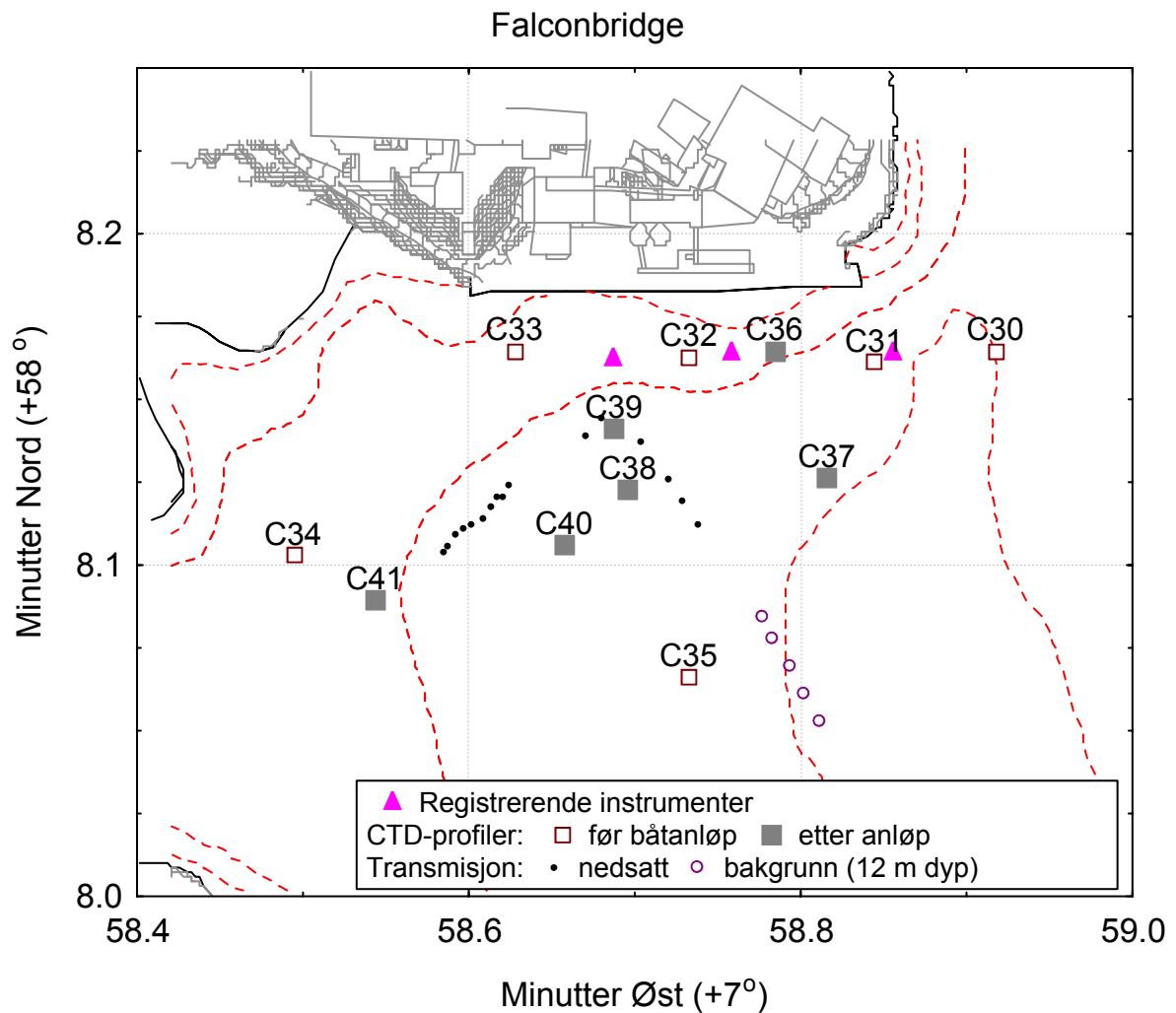
slepebåtene jobbet. Vektormåleren var plassert i nærheten av der den bakerste slepebåten lå, antagelig noe vest for denne båten.

Figur 54. Strøm og signalstyrke målt av vektormåleren i tiden rundt Lake Charles' ankomst 30. oktober



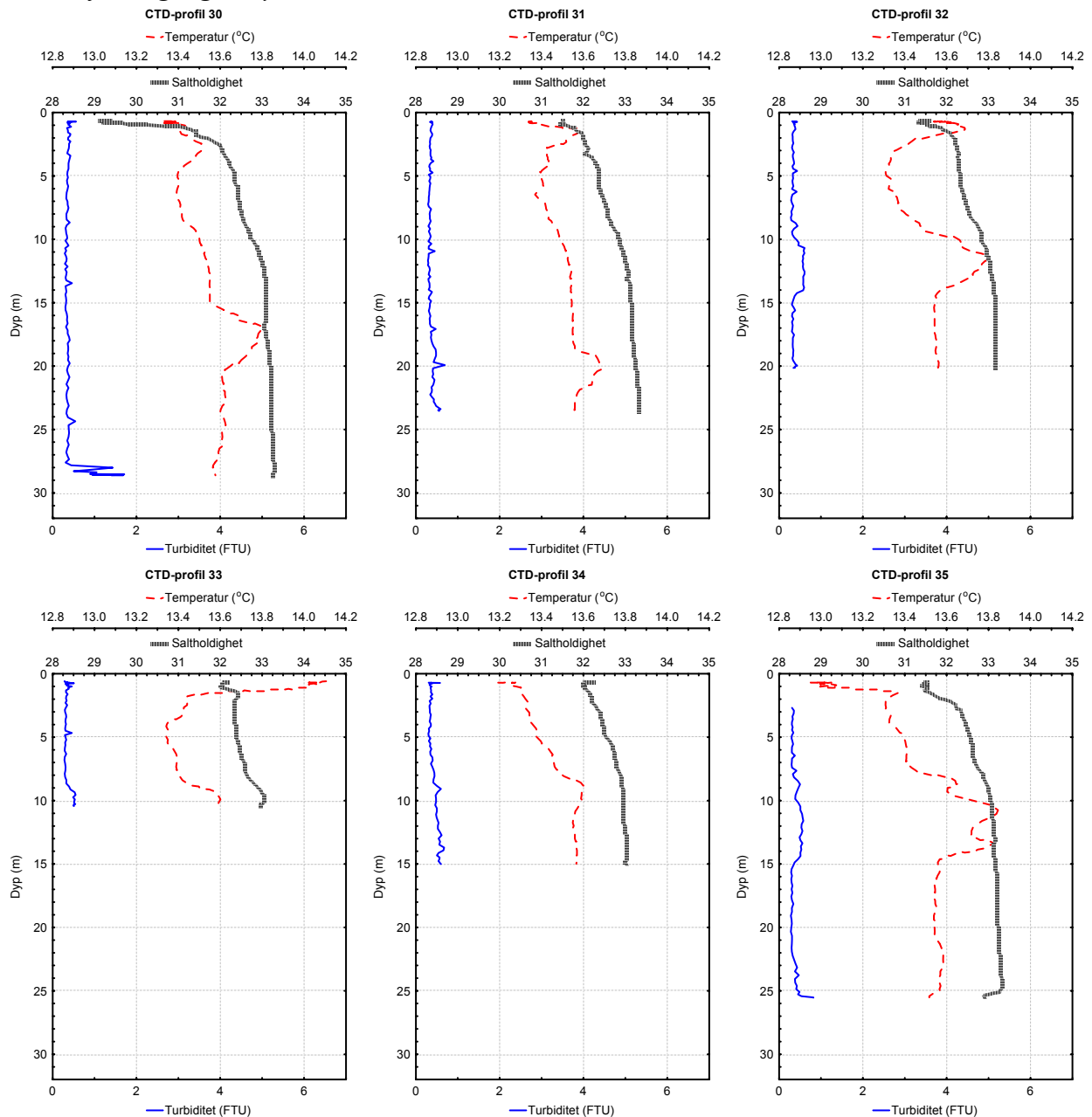
Det ble også målt en hel del CTD-profiler denne dagen, både før Sark Traders avgang, i kjølvannet etter Sark Trader like etter at den hadde gått, og etter at lake Charles hadde lagt til. Det ble også gjort en del transmisjonsmålinger. Måleposisjonene er vist i Figur 55.

Figur 55. Kart med måleposisjoner 30. oktober



Profil C30 til C35 ble målt før Sark Trader gikk fra kai. Det er svak sjiktning, og turbiditeten er stort sett rundt 0.5, men de fleste profilene viser et sjikt med litt forhøyet temperatur, og fra og med profil C32 også forhøyet turbiditet, for saltholdighet fra 32.8 til 33.2, beliggende mellom 10 og 15 m dyp. Dette er antagelig påvirkning fra utslippet sør for kaia, som innlagres i litt ulikt dyp til forskjellige tider.

Figur 56. CTD-profiler (Temperatur, saltholdighet, turbiditet) målt ved Falconbridge 30. oktober før avgang av syrebåt Sark Trader



Figur 57 viser en CTD-profil som er tatt rett etter at Sark Trader var gått i det område hvor den hadde ligget (C36), og noen profiler tatt etter Lake Charles' ankomst (C37-C419).

Profil C36 viser ustabiliteter, og representerer en vannmasse som ennå er i kraftig bevegelse etter propellstrøm og kjølvann. Det er noen turbiditetstopper opp i over 1, men ikke virkelige høye konsentrasjoner, og ikke i det vannet med saltholdighet ca. 33 som er bragt opp i 6 m dyp.

C37 ble målt sørøst for den ytterste (østre) taubåten mens den arbeidet. Det tetthetshomogene sjiktet fra 2 til 7 m dyp er antagelig vann fra propellstrømmen. Det er ingen økning i

partikkelkonsentrasjonen her. Det er derimot tydelig i profil C38, som er tatt i kjølvannet bak den innerste taubåten som lå ved baugen, som ved Federal Wellands anløp den 12. oktober. Det tetthetshomogene sjiktet fra 3 til 12 meter er propellstrømmen, og her er turbiditeten økt til 2-3 FTU for det meste, med noen registreringer opp mot 7 FTU. De andre profilene er målt etter at taubåten var ferdig, i økende avstand sørvestover fra der den hadde ligget. De viser alle en klart økt partikkelkonsentrasjon, men nå på større dyp. Sett i sammenheng ser det ut til at de turbiditetsverdiene neppe kan forklares av at de profilene hvor det forekommer ligger nærmere et utslipp, se f.eks. profil C34 sammenlignet med C41. I hovedsak er det antagelig forårsaket av oppvirvling fra skipsanløpet. Det ble også tatt flere vannprøver i propellstrømmen og i sammenheng med etterfølgende CTD-profiler. Vannprøvene fra propellstrømmen viser høyt partikkelinnhold, ca. 5 mg/l og med høyt nikkelinhold, slik det er funnet i sedimentet. Også vannprøven fra den avsluttende profilen, C41 hadde høyt nikkelinhold, selv om partikkelinnholdet her var ned mot mer naturlig forekommende verdier.

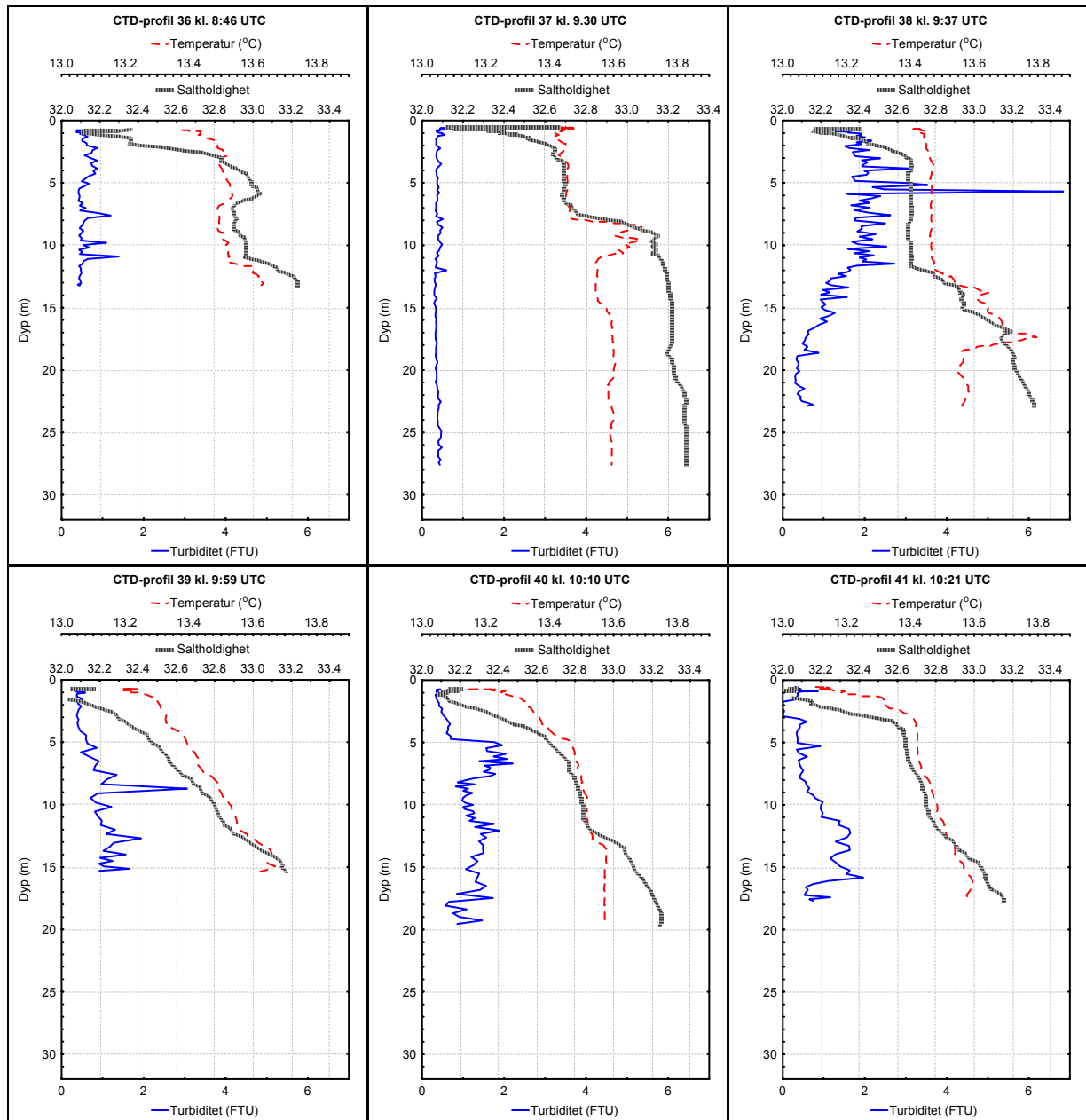
Figur 58 viser sammenhengen mellom turbiditet og saltholdighet for de profilene som er tatt etter skipsanløpet, som et forsøk på å klarlegge om endringen skyldes forflytning av vannmasser eller at partiklene synker i vannet.

I profil C37 er turbiditeten noe høyere for saltholdighet 32.2 til 32.4, dvs helt i overflaten (se Figur 57), men ligger ellers på bakgrunnsverdier. I kjølvannet bak den arbeidende taubåten (C38) er det en partikkelsky med høyest konsentrasjoner fra saltholdighet 32.2 til 32.8. De mange punktene ved saltholdighet 36.65 i C38 representerer dybdesjiktet 5 til 10 m, som var helt tetthetsmessig homogent, og antagelig er selve propellstrømmen. I profil C39, tatt 20 minutter senere, er partikkelskyen borte fra dette saltholdighetssjiktet, og det er nå konsentrert mellom saltholdighet 32.6 og 33.2. Ca. 80 minutter senere, i profil C41, ligger partikkelskyen med overkant omkring saltholdighet 32.8, men med omtrent samme nedre grense som før. At C41 mangler punkter mellom saltholdighet 32.1 og 32.5 skyldes at turbiditetsmåleren da ga null-verdier som er forkastet som målinger. De høyeste partikkelkonsentrasjonene finnes i den homogene del av propellstrømmen og lenger opp, og ikke i underkant, som en ville vente hvis oppvirvlingen kom ved at propellstrømmen til taubåten berørte bunnen. På samme måte som ved anløpet til Federal Welland er det også nå et uberørt sjikt under propellstrømmen.

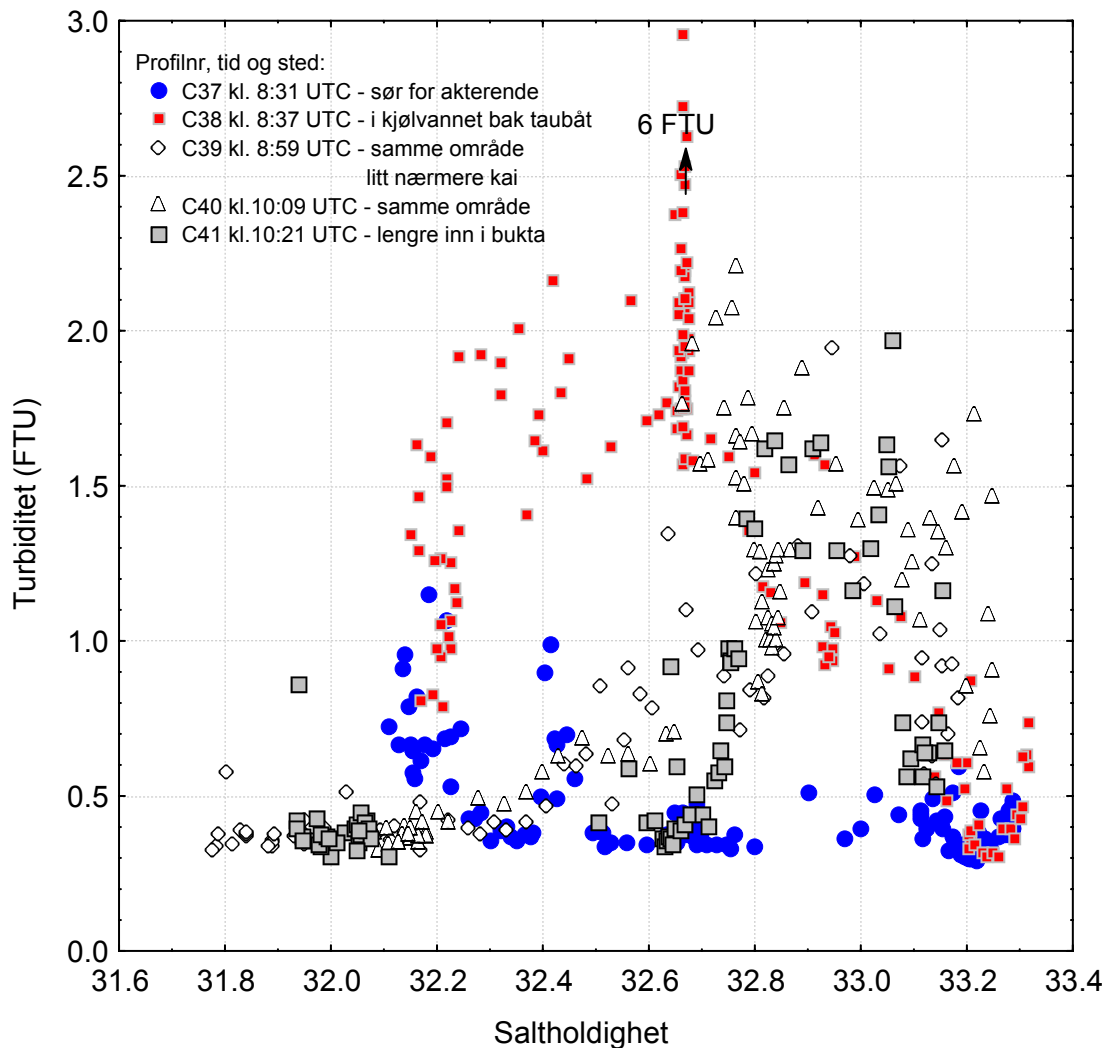
Det kan være nærliggende å anta at den store reduksjonen av partikkelkonsentrasjon fra C38 til C39-C41 i vann med saltholdighet 32.2-32.6 skyldes at partiklene har sunket ned. Ved vannprøvetakingen ble det observert ganske rask utsynking i prøvetakeren av de største, synlige partiklene (anslagsvis 1 meter pr. minutt), men det er ikke sikkert det representerer hovedmassen av partikler. Hvis det var en så rask utsynking, ville en vente at også nedre grense av skyen skulle flytte seg mer nedover fra profil til profil, men det ser ikke ut til å ha skjedd i så stor grad.

Det kan derfor også tenkes at endringen i turbiditetsprofil over tid som vises Figur 57 skyldes at propellstrømmen, som utgjorde de øvre lag av profil C37 og C38, hadde drevet sørover ut av området da de senere profilene ble målt, og at disse lagene er erstattet av nytt vann uten partikler som har strømmet inn fra øst.

Figur 57. CTD-profiler (Temperatur, saltholdighet, turbiditet) tatt rett før (C36) og etter anløp av Lake Charles til Falconbridge 30. oktober.



Figur 58. Turbiditet om funksjon av saltholdighet i CTD-profiler målt i Hanneviksbukta etter ankomst av Lake Charles 30. oktober



For å prøve å anslå en midlere synkehastighet på partiklene ut fra profilene kan en eventuelt se på den nedre delen, hvis en antar at forflytningen i forhold til saltholdighet her er uttrykk for nedsynkning. Figur 57 kan meget røft oppsummeres som at midtpunkt i nedre del av profilen har flyttet seg fra saltholdighet 32.9 til 33.1 i løpet av 30-40 minutter (fra C38 til C40-41). Det tilsvarer en dybdeforskjell på 2-3 m. Ut fra dette kunne en anslå en midlere synkehastighet på 3 til 6 meter pr. time. Dette er selvfølgelig bare en løs antydning.

TS-diagrammer* viser at profilene C30-C35 fra før Sark Traders avgang har omtrent likt TS-forløp mellom saltholdighet 32.4 (i 5-7 m dyp) og 32.8 (8-10 m dyp). Dypere ned, dvs. for saltholdighet >32.8, vises den temperaturøkningen som ble nevnt ovenfor, generelt sett konsentrert til saltholdighet rundt 33.1, men varierende i størrelse og beliggenhet på saltholdighetsskalaen fra profil til profil. Høyere opp, dvs. i de øverste 5-7 m, varierer disse profilene mye mer i forhold til hverandre, dvs. at det er markerte horisontale forskjeller i

* Ikke vist i rapporten

sammensetningen av vannet. Profilene C31-C33, langs kaia, har varmere overflatevann enn profilene lenger øst og sør. Det indikerer påvirkning fra et utslipp nordvest i Hanneviksbukta.

Profilene C38-C41, som ble tatt etter anløp av Lake Charles, direkte i propellstrømmen fra taubåten eller i det potensielle influensområdet, er mye mer like innbyrdes i overflatelaget. Ut fra TS-diagrammene kan overflatevannet være dannet av en blanding av vann fra dypere lag med overflatevann fra C34 eller C35 tatt langt vest og sør i Hanneviksbukta. Dypere ned (saltholdighet 32.2 til 32.8m dvs. 2 til 10 m dyp) har profil C38-C41 omtrent identisk forløp med profil C34 og C35 fra om morgenen før båtavgang og anløp.

Det homogene laget i C38, med temperatur ca. 13.48 og saltholdighet 32.65, kan være dannet ved en homogenisering av vann fra C32 og C33 hentet fra 0 til 15 meters dyp, men kan også være en blanding av overflatevann med sammensetning omtrent som i C35 og C34 og vann hentet fra enda større dyp. Det er vanskelig å si noe bestemt om hvilke dyp propellstrømmen henter vann fra, men det er rimelig å tro at strømbildet er omtrent som ved Federal Wellands anløp, da det ble påvist at det mest sannsynlig er en dominans av vann fra 15 m dyp i propellstrømmen. Det er konsistent med data, selv om det ikke er den eneste mulige forklaringen på observasjonene.

Mot slutten av feltarbeidet ble det gjort en del transmisjonsmålinger ved at transmisjonsmåleren ble slept rundt i 10-11 m dyp med stadige avlesninger. På Figur 55 er måleposisjonene vist, og det er indikert hvor det ble funnet nedsatt transmisjon og hvor det ikke var noe spesielt utslag. Det var også målt noe på forhånd uten å finne spesielle utslag, og det er derfor mest sannsynlig et resultat av oppvirvlede partikler og ikke utslippet i området.

Det antas derfor at det også i dette tilfelle kan være slik at den primære oppvirvlingen har skjedd da hovedpropellen ble reversert og sendte en turbulent strøm fremover under båten. Det har gitt en partikkelsky som vi kan se i data fra RCM9 og vektormåleren, med turbiditet over 10. Propellen på den innerste taubåten har så sugd inn vann fra under båten, og derved trukket opp vann med partikler i propellstrømmen, og har spredt det utover i Hanneviksbukta. Eventuelt kan dette også ha gitt mer oppvirvling, men da sannsynligvis i innsugingen under skipet, og ikke i propellstrømmen fra taubåten.

10. Sammenfattende vurderinger

10.1 Generelt

Når skipene legger til kai vil deres bevegelsesmengde måtte overføres til vannet som en bevegelse videre innover, dvs. i motsatt retning av den skipet kom fra. Det kan skje ved at skipet bruker sin egen hovedpropell, eventuelt i kombinasjon med at en taubåt stopper skipet og skyver den på plass. Det siste kan også gi en transport på tvers ut fra kaia. Ved avgang vil båtens propell måtte skyve vann i motsatt retning av den retningen båten går i, eventuelt kombinert med at baugpropeller eller taubåt trekker båten ut fra kai og sender vann på tvers inn mot kaia. I begge tilfelle vil propellstrømmen normalt ha en nettovirkning i å sende vann innover i kaiområdet. For Elkem og Falconbridge vil det si vestover inn i de to buktene, og for fergepiren nordvestover mot de innerste områdene ved piren.

Selve båtens bevegelser i vannet vil skyve vann innover ved ankomst og utover ved avgang. De strømmene som settes opp rundt båten, særlig når den anløper og skyver vann foran seg i en bølge inn mot land, kan tenkes å gi oppvirvling av partikler og deretter en transport utover når bølgene slår tilbake. Det ble observert tegn til en slik bevegelse ved RCM9-måler ved anløpet av de to store båtene (Federal Welland og Lake Charles), men selve oppvirvlingen ved Falconbridgekaia har mest sannsynlig blitt forårsaket av propellstrøm inn under båtene. Slik propellstrøm kan få hastigheter på 6 m/s for en båt som stikker ca. 10 m over bunn på 15 m dyp.

Stort sett vil derfor oppvirvling fra skipstrafikk til kaier i disse områdene kunne gi en transport av partikler innover i områdene, men også en spredning på tvers ut fra kaia, spesielt for anløp til industrikaiene med taubåt, som observert 12. og 30. oktober. Imidlertid ble det også ved ett anløp av en mindre båt til Falconbridge (Sark Trader 29. oktober) observert markert høyere partikkelkonsentrasjoner nokså langt sørøst for skipet en time etter anløp, og det kan tyde på at det også kan skje en spredning utover. En mulig forklaring er at dette skipet har brukt hovedpropellen til å gå innover for å stramme trossene etter at de var lagt ut. Hvis det skjer, vil oppvirvlede sedimenter også kunne transporteres av propellstrømmen ut fra kaiområdet utover i havna, for Elkem og Falconbridge vil det si mot øst ut i Kristiansandsfjorden.

10.2 Elkemkaia

Målingene fra de selvregistrerende instrumentene som sto plassert langs kaia viser ingen utslag i strøm eller partikkelstyrke som kan settes i forbindelse med skipsanløp, dvs. at den i såfall har vært så kortvarig at den ikke ble registrert av målerne, som hadde en tidsopløsning på hhv. 5 og 20 minutter. Turbiditeten som mål på partikkelinnholdet utenfor kaia, registrert med RCM9-måleren, varierte sterkt, med markerte og kortvarige topper, men ikke på tidspunkter hvor det ble rapportert skipsbevegelser. Også ADP-måleren viste variasjoner i signalstyrke fra partikler over tid, men ikke spesielt knyttet til skipsbevegelser.

Dette gjelder også ved anløpet av en mindre båt som ble observert den 11. oktober (Northern Lurnes). Her ble det direkte observert og målt oppvirvling av partikler i den indre del av bukta da båten reverserte hovedpropellen etter å ha bakket inn langs kaia. Det kan anslås at i størrelsesorden 100 kg partikler ble virvlet opp ved dette båtanløpet. Hvis en går ut fra en

anløpsfrekvens på ca. 40 pr. år, og samme oppvirvling hver gang, gir det samlet 4 tonn partikler pr. år, eller ca. 8 m³ vått sediment, hvis vi går ut fra et partikkelinnhold på ca. 0.5 kg pr. liter i sedimentet. Fordelt på en sedimentflate på 10*200 meter (forskjellige anløpssteder langs kai) gir det en akkumulert erodert tykkelse på 0.4 cm/år. Et bidrag fra containerbåtene vil komme i tillegg.

10.3 Fergehavna

Målingene her om ettermiddagen 11. oktober viste omtrent dobbelt så stort partikkelinnhold i hele vannsøylen som ved en tilsvarende måling utenfor Falconbridge omtrent samtidig. Den mest rimelige forklaringen på dette er at det skyldes akkumulert virkning av skipsbevegelser i løpet av foregående timer. Det ble påvist høyt partikkelinnhold (som turbiditet) i propellstrømmen fra baugpropellene til *Princess of Scandinavia* da den gikk fra kai kl. 18:18 UTC, men ingen særlig generell økning av partikkelinnhold rundt fergepiren ellers, hverken ved denne avgangen eller da *Christian IV* anløp 45 minutter senere.

10.4 Falconbridge

Ved denne kaia ble det observert betydelig oppvirvling av partikler ved anløp av de to store båtene, med dypgang ca. 10 meter og hvor taubåt assisterte ved anløpet. Her registrerte de to innerste instrumentene kraftige strømmer på 15-19 m dyp med stor oppvirvling av partikler i en ganske kort periode rett etter anløp og avgang. Disse instrumentene var plassert ca. 10-20 m sør for skipssiden, ved baugen og ut for midten av skipet. Signalet er konsistent med en oppvirvling pga. reversering av hovedpropellen ved oppbaking, med mulige strømhastigheter opp mot 6 m/s over bunnen på ca. 15 m. Instrumentene har sannsynligvis vært plassert i ytterkanten av den partikkelskyen dannet under båten, og målingene gir ikke grunnlag for å beregne omfanget av en slik primær partikkelsky under båten. Direkte feltmålinger fra båt ble bare gjort ved anløp av disse skipene, og det var derfor ikke mulig å kartlegge nærmere disse partikkelskyene, som må antas å ha blitt dannet under skipet. Instrumentene viste samme type oppvirvling ved avgang (Federal Welland 13. oktober). Med direkte målinger ved en avgang ville en lettere kunne kartlegge den konsentrerte partikkelskyen bedre.

De supplerende målingene som ble gjort i området sør for båtene etter anløp viser at når skipet skyves inn til kai av taubåt, spesielt inne ved baugen av skipet, vil det bidra til å spre forurensete sedimenter sørover fra kaiområdet ved at taubåten trekker inn vann med partikler i sin propellstrøm. Det kan være kombinert med egen oppvirvling i innsugingen til propellen, som delvis vil hente vann under skipet, og kanskje også fra innersiden av skipet, dvs. inne under kaia. Det ser ikke ut til at taubåtene forårsaket noe oppvirvling av sedimenter lenger ute. Federal Welland hadde baugpropell, men vi registrerte ikke at den var i bruk. Dersom den brukes ved anløp, vil den kunne gi spredning av oppvirvlede partikler på samme måte som taubåten.

Ved et mindre båtanløp 29. oktober ble det observert høy turbiditet i skarpt avgrensede sjikt i et par punkter sør og sørøst for båten ca. 1 time etterpå, men målingene utgjør ikke noe sammenhengende bilde av en partikkelsky, og det er ikke sikkert grunnlag for å si om det skyldes oppvirvling fra skipsanløpet, eller om det kan ha med eksisterende utslipp å gjøre.

I ettertid er det blitt klart at det finnes flere utslipp fra bedriften i kaiområdet. Flere CTD-profiler viser forhøyet turbiditet opp mot 0.8-1 FTU i avgrensede områder og dypintervaller som ser ut til å skyldes slike utslipp, men de profilene som er tatt etter skipsanløp, og som viser turbiditet på 2 FTU eller mer, må antas å vise virkning av oppvirvling. Det er lagt til grunn ved vurderingene her.

Partikkelholdig vann i forbindelse med skipsanløp viser også i Hanneviksbukta en tendens til å akkumuleres i den vestlige del av bukta, selv om det ved ett avløp også ble observert høyere partikler sørøst for kaiområdet.

Når det gjelder partikkelinnholdet i vannet generelt, er det klart at det delvis henger sammen med eksisterende utslipp fra bedriften. Det er funnet visse tegn til at vind og nedbør kan ha betydning, men det er ikke påvist helt klare sammenhenger. Resultatene gir ikke noe godt grunnlag for å kvantifisere betydningen av ulike faktorer. Påvirkningen fra eksisterende utslipp kan ha kamuflert dette. Også for Hanneviksbukta kan det tenkes at løst sediment som virvles opp av skip og spres utover i bukta spiller en rolle også for den resuspensjonen som skjer knyttet til vinddrevne strømmer.

Når det gjelder mengden av partikler som virvles opp og spres pga. slike båtanløp, har vi bare et ufullstendig grunnlag for å anslå dette.

Mengden som spres av taubåten kan estimeres ut fra målte konsentrasjoner i propellstrømmen. I følge Vedlegg 3 kan propellstrømmen bak taubåten settes til $21.5 \text{ m}^3/\text{s}$ når den arbeider for fullt. Hvis det antas at dette har økt til det dobbelte pga. medrivning frem til de stedene det ble målt, og at taubåten arbeidet i ca. 10 minutter, blir total volumstrøm forbi målepunktene ca. $26\,000 \text{ m}^3$. Ved Lake Charles' anløp var høyeste målte partikkelkonsentrasjon i propellstrømmen 6 mg/l , og gjennomsnittet ligger rundt 4 mg/l . Det gir en samlet partikkelmengde på ca. 100 kg.

En annen måte å estimere oppvirvlet mengde på er å se på utbredelsen av skyen av partikkelholdig vann, målt med transmisjonsmåler. I tiden da profil C39 til C41 ble målt ble det også gjort et sveip med transmisjonsmåler, som viste nedsatt transmisjon i et område på anslagsvis $150 \times 300 \text{ m}$. Med tykkelse på skyen ca. 5 m gir det et volum på i størrelsesorden $180\,000 \text{ m}^3$. Legger vi til grunn en partikkelkonsentrasjon på ca. 1 mg/l , eller 1 g/m^3 , fås et anslag på 180 kg partikler. Siden dette representerer partikkelmengden ca. 1 time etter at taubåten var ferdig, kan den mengden som ble spredt utover være en del større.

Hvis vi ut fra disse betraktningene anslår en oppvirvlet mengde på opptil 400 kg partikler for et skipsanløp, som samlet oppvirvling ved anløp og avgang, kan det for ett til to anløp i måneden av store båter (15 - 45 000 tonn) antydes en akkumulert oppvirvlet mengde på 5 til 10 tonn partikler pr. år. Hvis vi ut fra målingene ved Sark Traders anløp antar at det også skjer en viss oppvirvling ved anløp av de mindre båtene, f.eks. ca. 100 kg partikler pr. anløp, og regner 40 slike anløp i året, kan den totale mengden bli opp mot 10 til 15 tonn partikler pr. år. Går vi ut fra et gjennomsnitt på $5000 \text{ } \mu\text{g/g}$ for nikkelinholdet, blir total oppvirvlet nikkelmengde pr. år pga. båtanløp ca. 50 til 75 kg.

I følge Skei et al. (2002) slipper Falconbridge fortsatt ut 770 kg Ni pr. år, og utlekkingen fra sedimentene i Hanneviksbukta er estimert å være av samme størrelse (700 til 900 kg/år). Estimert spredning av nikkel i sedimentet pga. skipstrafikken til Falconbridge er innenfor 10 % av hvert av disse bidragene. Det indikerer at oppvirvling pga. båttrafikk ikke er noe

dominerende bidrag til spredning av forurensning fra Falconbridge, iallfall ikke når det gjelder et metall som nikkel. Det gjelder enten vi betrakter oppvirvlingen som en kilde for nikkel til Hanneviksbukta i tillegg til tilførsene fra land, eller som en mulig kilde til utlekking fra partikler til vann, som et tillegg til utlekkingen fra sedimentene i Hanneviksbukta som helhet. Andre vurderinger må gjøres for andre stoffer.

11. Anbefalinger

11.1 Anbefalinger mht tiltak

De observasjonene som er gjort tyder på at den primære oppvirvlingen ved båtanløp til de to industrikaiene skjer i en relativt kort og konsentrert puls når båtene reverserer hovedpropellen inne ved kai ved ankomst, og når propellen startes opp for fullt for å akselerere båten ved avgang. Hvis båtene går inn til kai uten å snu, vil propellstrømmen sendes inn under båten, og kan gi en konsentrert turbulent strøm mot bunnen. Hvis båtene snur og bakker inn langs kaia vil propellstrømmen gå vekk fra båten men kan til gjengjeld komme nærmere grunnområder innenfor kaia. I begge tilfeller vil det være en tendens til at forurensete sedimenter fraktes videre innover i området, selv om det også kan bli noe spredning utover, avhengig av strømmer og synkehastighet.

Bruk av taubåter som legger de store båtene på plass trekker antagelig i hovedsak opp partikler som er virvlet opp av hovedpropellen. Dersom de bidrar med egen oppvirvling ser det ut til at det skjer i innsugingen til propellen, og ikke i den turbulente propellstrømmen etter taubåten. Også slik oppvirvling vil derfor antagelig skje under eller helt nær båten. Taubåtene vil imidlertid bidra til at oppvirvlede partikler spres mye mer enn de ellers ville gjort. Den eneste måten å hindre det på, vil være å hindre oppvirvling rett under eller nær skipet.

Ut fra en skjønnsmessig vurdering vil vi anbefale at dersom en skal legge betongdyne på bunnen, bør denne dekke et område som strekker seg langs hele det kaiområdet som skal brukes, og i en bredde som tilsvarer 1.5 ganger bredden på de største båtene som skal anløpe. Dette har vært fremme som en mulig løsning, men om det er et praktisk tiltak, er ikke vurdert i denne rapporten. Det kan tenkes praktiske vanskeligheter med en slik løsning. Hovedpoenget er at en overdekning inne ved kaia må dimensjoneres slik at den motstår de kraftige påvirkninger en kan få pga. propellstrøm inn under de største båtene, dvs. anslagsvis 6 m/s. I en avstand av ca. 30 m fra kaia bør overdekningen tåle i allfall hastigheter på ca. 0.5 m/s.

Fordi oppvirvlingen synes å være knyttet til kraftig kjøring av hovedpropellen for å stoppe båten inne ved kai, eller akselerere ved avgang, bør det også vurderes om det er mulig å redusere oppvirvlingen ved en mer forsiktig manøvrering.

11.2 Anbefalinger for senere undersøkelser

En viktig erfaring fra feltarbeidet i dette prosjektet er at det kan være vanskelig å gjennomføre et slik måleprogram etter en helt fast plan ved industrikaier, fordi prognosene for tidspunkter for skipsanløp og avgang kan forandre seg ganske mye selv kort tid i forveien. Det kan da bli vanskelig å sikre at en får målt på de hendelser en ideelt sett ville ønske innenfor en bestemt avgrenset feltmålingsperiode, selv om en som i dette prosjektet forsøker å justere feltperioden til skipsanløp på ganske kort varsel.

Dersom en kan få det til, vil det generelt være en fordel å legge feltmålingene til avgang, fordi en da kan bevege seg fritt rundt i området og måle inn partikkelskyen bedre. Ved anløp er det selvsagt mye mer begrensede muligheter til å kartlegge en partikkelsky som virvles opp under og rundt skipet når det legger til kai. Feltmålinger ved avgang av større skip fra industrikaiene ble ikke oppnådd ved dette prosjektet.

En mulighet for å verifisere om det virkelig foregår en slik oppvirvling, kunne være å inspisere bunnen med miniubåt eller dykker etter båtavgang. Så kraftige propellstrømmer som det er snakk om her, bør gi synlige spor på bunnen. Det kan muligens gi grunnlag for direkte kvantifisering, og kan være aktuelt å vurdere ved fremtidige undersøkelser.

12. Litteratur

- Knutzen, J., K. Næs, L. Berglind, E.M. Brevik, N. Følsvik, Aa. Biseth og M. Schlabach, 1998. Overvåking av miljøgifter i sedimenter og organismer fra Kristiansandsfjorden 1996. NIVA Rapport løpenr. 3833, 181 s.
- Næs og Molvær (1999): Forsøk med tildekking av sedimenter i Hanneviksbukta, Kristiansand. NIVA-rapport løpenr. 4010-99
- Næs og Rygg (2001): Tiltaksplan for opprydding i forurensete sedimenter i Kristiansandsfjorden. Kartlegging av konsentrasjoner i sedimentet i 2001 samt kartfremstilling av resultater fra tidligere undersøkelser. NIVA-rapport løpenr. 4371-2001, 43 sider.
- SFT (2000): Miljøgifter i norske fjorder. Ambisjonsnivå og strategi for arbeidet med forurenset sjøbunn. TA-1774/2000. Oslo. 80 sider.
- Bedford, K.W & Lee, J. (1994): Near-bottom sediment response to combined wave-current conditions Mobile Bay, Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research. C. Oceans*, vol. 99, no. C8, s. 16161-16,177.
- Blaauw, H.G. & van de Kaa, E.J. (1978): Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manouvering ships. 7th International Harbour Congress, Antwerpen, 22-28 May, 1978.
- Black, K.P. (1992): Evidence of the Importance of Deposition and Winnowing of Surficial Sediments at a Continental Shelf Scale.
- Davies, J.T. (1972): Turbulence Phenomena. An introduction to ddy Transfer of Momentum, Mass, and Heat, particularly at interfaces. Academic Press. 412 sider.
- DeVries, J.W (1992): Field Measurements of the Erosion of Cohesive Sediments. *Journal of Coastal Research*, vol 8, no. 2, s. 312-318
- Dolphin, T.J & Green, M.O. (1997): Sediment Dynamics of an Estuarine "Turbid Fringe". Australasian Coastal and Ocean Engineering Conf., Christchurch (New Zealand), 7-11 Sep 1997, Pacific Coasts and Ports '97. Proceedings Volume 1., Centre for Advanced Engineering, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, Sep 1997, pp. 113-118
- Dyer, K.R. (1986): Coastal and Estuarine Sediment Dynamics. John Wiley & Sons. 342 sider.
- Eisma, D. (1993): Suspended Matter in the Aquatic Environment. Springer-Verlag. 315 sider
- Gularte, R.C., Kelly, W.E. og Nacci, V.A. (1980): Erosion of cohesive sediments as a rate process. *Ocean Engineering*, vol. 7, s. 539-551.
- Konieczny, R. (1994): Miljøgiftundersøkelser i indre Oslofjord. Delrapport 4. Miljøgifter i sedimenter. NIVA-rapport nr. 3094. SFT Overvåkningsrapport nr. 561/94) TA nr. 1074/1994. 134 sider.
- Liou, Y og Herbich, J.B. (1976): Sediment Movement Induced by Ships in Restricted Waterways. Texas A&M Univ. report NO TAMU-SG-76-209/98
- Li, Y. og Parchure, T.M. (1998): Mudbanks of the Southwest Coast of India. VI: Suspended Sediment Profiles. *Journal of Coastal Research*, vol. 14, no, 4, s. 1363-1372.
- Magnusson, J. (1995): Vurdering av effekt fra propellstrøm fra fartøy på sedimenter i Oslo havn. NIVA-rapport 3218, 18 sider.

- Mehta, A.J. (1988): Laboratory studies on cohesive sediment deposition and erosion. In: Dronkers and Van Leussen (Ed.), *Physical Processes in estuaries*. Springer-Verlag, s. 427-445.
- Miller, M.C., McCave, I.N. og Komar, P.D. (1997): Threshold of sediment motion under unidirectional currents. *Sedimentology*, vol. 24, s. 507-527.
- Mitchener, H.J. og O'Brien, D.J. (2001): Seasonal variability of sediment erodibility an properties on a macrotidal mudflat, Peterstone Wentloge, Severn Estuary, UK. In *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes* (Ed: McAnally, W. og Mehta, A.J.), Elsevier, s. 301-322.
- Mitchener, H. og Torfs, H. (1996): Erosion of mud/sand mixtures. *Coastal Engineering* vol. 29, s. 1-25.
- Molvær, J. (1990): Utslipp fra Odderøya renseanlegg. Vurdering av innlagring, spredning og miljøeffekter. NIVA-rapport 2530, 26. sider.
- Molvær, J., Solheim, H.I. og Källqvist, T. (1986): Basisundersøkelse av Kristiansandsfjorden, Delrapport V. Vannutskiftning og vannkvalitet. NIVA-rapport nr. 1993, 78 sider.
- Næs, K. og Molvær, J. (1999): Forsøk med tildekking av sedimenter i Hanneviksbukta, Kristiansand. NIVA-rapport nr. 4010, 46 sider.
- Næs, K. og Rygg, B (2001): Tiltaksplan for opprydding i forurensete sedimenter i Kristiansandsfjorden. Kartlegging av konsentrasjoner i sedimentet i 2001 samt kartfremstilling av resutater fra tidligere undersøkelser. NIVA-rapport 4371, 43 sider.
- Otsubo, K. og Muraoka, K. (1987): Field studies on Physical Properties of Sediment and Sediment Resuspension, in Lake Kasumigaura. *Jap.J.Limnol.*, vol. 48, s. 131-138.
- Soulsby, R.L. (1983): The bottom boundary layer of shelf seas. In Johns, B. (Ed.), *Physical Oceanography of Coastal and Shelf Seas*, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Chapter 5.
- Torfs, H., Jiang, J. og Mehta, A.J. (2001): Assessment of erodibility of fine/coarse sediment mixtures. In *Coastal and Estuarine Fine Sediment Processes* (Ed: McAnally, W. og Mehta, A.J.), Elsevier, s. 109-123.
- White, S.J. (1970): Plane bed thresholds of fine-grained sediments. *Nature*, vol. 228, s. 152-153.
- Zreik, D.A., Krishnappan, B.G., Germaine, J.T, Madsen, O.S og Ladd, C.G. (1998): Erosional and Mechanic Strengths of Deposited Cohesive Sediments. *Journal of Hydraulic Engineering*, nov. 1998, s. 1076-1085.
- Drake, D.E og Cacchione, D.A. (1989): Estimates of the suspended sediment reference concentration (Ca) and resuspension coefficient (γ_0) from near-bottom observations on the Californian Shelf. *Continental Shelf Research*, Vol. 9, no. 1, s. 51-64.
- SSPA, rapport 7937-1: Jet Propulsion. SSPA Maritime Consulting
- Pettibone, G.W, Irvine, K. N. og Monahan, K. M. (1996): Impact of ship passage on bacteria levels and suspended sediment characteristics in the Buffalo River, New York. *Wat. Res.*, vol. 30, no. 10, s. 2517-2521.
- Erdmann, J.B, Stefan, H.G, Brezonik, P.L. (1994): Analysis of wind and ship-induced sediment resuspension in Duluth-Superior Harbour. *Water Resources Bulletin*, vol. 30, no.6, s. 1043-1053.

Irvine, K.N, Droppo, I.G., Murphy, T.P og Lawson, A. (1997): Sediment Resuspension and Dissolved Oxygen Levels Associated with Ship Traffic: Implications for Habitat Remediation. *Water Qual. Res. J. Canada*, 1997, vol. 32, no. 2, s.421-437.

Kuo, C.Y, Jordan, D.M. , Ying K.J., Loganathan, G.V. and Furry, J.C (1989): Vessel induced Physical Effects in a Navigational Channel. National Conference on Hydraulic Engineering, New Orleans, 1989. Proc. ed. by M.A. Ports. ISBN O-87262-719-5. s. 975-980.

Kuo, C.Y, D.M.Jordan, K.J. Ying and G.V. Loganathan (1988). "Vessel induced Physical Effects Related to Navigation Changes on the Kanawha River, West Virginia". Report to the U. S. Army Corps of Engineers. department of Civil Engineering, Virginia Polytechnical Institute and State University, Blacksburg, Virginia.

Nortek (1998): ADP Firmware Manual ver. 2.4/2.5. 27 sider. www.nortek-as.com

Nortek (2000): Vector, Operations Manual, nov. 2000, 36 pages. www.nortek-as.com

Sutton, D., Chadwick, B. and Richter, K. (1998): Mass loading and subsequent baywide transport of sediment resuspension during tug assisted ship movements at the Naval Station San Diego. In: "Taking a Look at California's Ocean Resources: An Agenda for the Future" (ed. Magoon et al.), vol. 2, pp. 1735-1741 ASCE, Reston, VA (USA). ISBN 0784402973.

Svartström, M og Lindholm, T. (2000): Miljöeffekter av passagerfartyg i skärgården utenför Langnäs hamn på Åland. *Vesitalous* 6/2000, s. 38-40.

U.S. T.V.A (1988). "Measurement of Tow-induced Physical Effects Related to Navigation Changes of the Marmet Pool, Kanawha River, West Virginia" Report No. WR28-1-900-212. U.S. Tennessee Valley Authority.

Vedlegg 1. Sediment-tetthet og kornfordeling i Kristiansand havn

Tabell 9. Sammenfatning av data fra Næs og Rygg (2001) for sedimentene, med beregnet tetthet ut fra målt vanninnhold, tørrstoffinnhold og finfraksjon, som beskrevet i kapittel 8.1.2.

Stasjon	Sedsjikt	TTS %	% < 63 mm	TOC (% tørrstoff)	Beregnet sediment- tetthet (g/cm ³)	Vanndyp (m)	Påvirket lag (cm)	Posisjon (grader med desimaler)	
								Nord	Øst
01	0-2 cm	59.2	16	7.6	1.60	15	5	58.1168	7.9861
02	0-2 cm	17.8	81	80.7	1.13	15	30	58.1205	7.9712
03	0-2 cm	31	70	44.3	1.25	16	10	58.1197	7.9793
04	0-2 cm	17.4	58	119	1.12	8	35	58.1200	7.9828
05	0-2 cm	17.9	77	113	1.13	18	20	58.1233	7.9741
06	0-2 cm	24.8	73	57.2	1.19	27	20	58.1230	7.9785
07	0-2 cm	30.6	59	57.2	1.24	16	12	58.1247	7.9853
08	0-2 cm	38.4	21	71.2	1.30	8	20	58.1260	7.9731
09	0-2 cm	48.6	58	74.7	1.40	16	20	58.1258	7.9759
10	0-2 cm	13.6	48	110	1.10	3.5	20	58.1205	7.9661
11	0-2 cm	27.3	35	74.9	1.20	28	12	58.1280	7.9812
12	0-2 cm	31.2	39	109	1.22	15	15	58.1292	7.9794
13	0-2 cm	31	29	72.2	1.24	26	10	58.1290	7.9822
14	0-2 cm	34.6	50	41.9	1.28	38	20	58.1297	7.9853
15	0-2 cm	72	28	8.4	1.82	22	2	58.1272	7.9913
16	0-2 cm	69.9	7	10.4	1.77	6	2	58.1267	7.9963
17	0-2 cm	63.1	41	12.2	1.65	20	2	58.1253	7.9953
18	0-2 cm	56.3	20	17.9	1.54	6	2	58.1228	7.9982
19	0-2 cm	37.2	64	29.8	1.31	138	2	58.1262	8.0114
20	0-2 cm	48.9	43	30.5	1.44	77	15	58.1288	8.0025
21	0-2 cm	51.4	36	18.2	1.48	62	18	58.1307	7.9957
22	0-2 cm	36.6	63	34.3	1.30	49	25	58.1348	7.9927
23	0-2 cm	27.2	78	29.7	1.22	42	25	58.1353	7.9967
24	0-2 cm	33.2	67	35.4	1.27	34	25	58.1343	7.9992
25	0-2 cm	26.5	67	45.7	1.21	36	30	58.1333	7.9817
26	0-2 cm	30.3	66	39.1	1.24	29	35	58.1388	7.9813
27	0-2 cm	44.9	45	39.2	1.38	15	15	58.1395	7.9778
28	0-2 cm	63.1	35	8.9	1.66	23	10	58.1402	7.9828

Stasjon	Sedsjikt	TTS %	% < 63 mm	TOC (% tørrstoff)	Beregnet sediment- tetthet (g/cm3)	Vanddyp (m)	Påvirket lag (cm)	Posisjon (grader med desimaler)	
								Nord	Øst
29	0-2 cm	59	23	31.8	1.56	17	10	58.1427	7.9862
30	0-2 cm	66.7	15	14	1.71	12	10	58.1437	7.9870
31	0-2 cm	59.6	35	21	1.59	27	2	58.1410	7.9869
32	0-2 cm	68.8	22	10.7	1.75	20	2	58.1417	7.9886
33	0-2 cm	41.1	65	30.8	1.35	27	30	58.1390	7.9925
34	0-2 cm	32.4	55	38	1.26	41	20	58.1375	7.9906
35	0-2 cm	77.1	4	4	1.93	11	1	58.1447	7.9883
36	0-2 cm	68.9	21	8.3	1.76	16	1	58.1440	7.9913
37	0-2 cm	67.2	19	12.6	1.72	19	1	58.1435	7.9895
38	0-2 cm	70.8	58	7.1	1.80	12	0	58.1420	7.9916
39	0-2 cm	66.8	58	17.1	1.71	10	0	58.1410	7.9939
40	0-2 cm	28.2	60	49	1.22	28	25	58.1338	7.9771
41	0-2 cm	27.2	61	40.2	1.22	30	20	58.1370	7.9801
41	15-18 cm	61.7	62	13	1.63			58.1370	7.9801
42	0-2 cm	21.8	55	125	1.15	10	50	58.1355	7.9692
43	0-2 cm	18.7	57	45.4	1.15		130	58.1360	7.9765
43	60-62 cm	38.2	95	13.5	1.33	30	70	58.1360	7.9765
44	0-2 cm	48.8	72	26.4	1.44	42	30	58.1353	7.9868
44	20-22 cm	68.8	64	31.8	1.72			58.1353	7.9868
45	0-2 cm	21.5	61	48.3	1.17		150	58.1362	7.9734
45	30-32 cm	28.2	98	23.2	1.23			58.1362	7.9734
45	Overgang leire	46.9	85	22.1	1.42	22		58.1362	7.9734
Ø1	0-2 cm	68.4	36	15.6	1.74	4	2	58.1422	8.0013
Ø2	0-2 cm	79.5	2	2.7	1.99	6	2	58.1447	8.0085
Ø3	0-2 cm	76.7	1	6	1.92	6	2	58.1435	8.0114
Ø4	0-2 cm	76.4	2	2.8	1.92	7	2	58.1410	8.0061

Tabell 10. Resultat av kornfordelingsanalyser på utvalgte prøver

Kornfordelingsanalyser på delprøver (0-2 cm sjikt)

Delprøve analysert	% leire	% silt	% pelite	% total sand	median diameter i fin-fraksjon (μm)	median diameter totalt (μm)
St 12B	22.7 %	23.6 %	46.3 %	53.7 %	32.8	>63
St 26A	26.5 %	52.8 %	79.3 %	20.7 %	9.9	18
St 29A	7.1 %	12.5 %	19.6 %	80.4 %	40.6	>63
St 2B	36.2 %	54.6 %	90.8 %	9.2 %	6	8.2
St 31A	11.8 %	21.2 %	33.0 %	67.0 %	37.3	>63
St 32A	8.2 %	11.2 %	19.4 %	80.6 %	40.7	>63
St 39A	14.7 %	44.4 %	59.1 %	40.9 %	8.2	48.1
St 40B	22.0 %	65.8 %	87.8 %	12.2 %	9.5	11.6
St 42B	17.9 %	21.1 %	39.0 %	61.0 %	35.4	>63
St 44A	23.9 %	51.5 %	75.3 %	24.7 %	17.7	25.6
St 6B	27.9 %	57.9 %	85.8 %	14.2 %	10.4	13.8
St 9A	18.8 %	43.9 %	62.8 %	37.2 %	19.5	42.8

(Analysert av Geogruppen AS)

Vedlegg 2. Statistikk for skipstrafikk til Kristiansand havn*Tabell 11. Generell oversikt over skipstrafikk*

Kaiområde		Antall anløp i år 2000	Sum bruttotonn	Gjennomsnittlig bruttotonn
Offentlig havneområde				
0	Reden	55	276 628	5 030
1	Ferjeleiet - Hampa	371	5 581 373	15 044
12	Fiskerikai	115	6 746	59
13	Odderøykaia	395	1 226 034	3 104
16	Oljekaia	110	235 926	2 145
1A	Cruise kai syd	722	15 870 309	21 981
1B	Cruise kai nord	337	2 660 615	7 895
1C	KMV dokk	3	5 224	1 741
2	Smiths kai	9	70 504	7 834
20	Lagmannskaia	311	2 512 936	8 080
21	Agderkaien	88	153 231	1 741
22	Korsvik industrikai	15	16 776	1 118
2A	KMV Nord	3	1 900	633
2B	KMV Syd	9	9 509	1 057
3	Kystterminalen	106	209 515	1 977
6	Moes brygge	148	21 221	143
9	Caledonienkaia	379	1 920 080	5 066
Private kaier				
109	Statoil	72	140 029	1 945
110	Falconbridge	56	461 883	8 248
120	Elkem Fiskå verk	224	488 306	2 180
130	Lumber	11	23 650	2 150
135	Promeco	8	21 284	2 661
150	Texaco - Kroodden	36	49 959	1 388
170	Vige	77	129 062	1 676
190	Hunfos fabrikker Ålefj.	9	6 337	704
Sum		493	1 320 510	2 679

Tabell 12. Statistikk for skipstrafikk til Falconbridge

Type	Tonnasje (dødvekt)	Maks. dyptgående (m)	Antall pr. år (ca.)	Laster/losser ved:
Mattebåter	25.000-45.000	10	18	Vestre kai
USA-båter	4.000-8.000	7	10	Østre kai
Svovelsyrebåter	3.000-7.000	7	20	Vestre kai
Sodabåter	3.000-4.000	5	12	Vestre kai
Saltsyrebåter	2.500-3.000	5	3-4	Østre kai
SUM			59	

(Kilde: Finn Resmann, FalconBridge)

Tabell 13. Statistikk for skipstrafikk til Elkem - Fiskå

Båt-type, rederi, skipsnavn	Størrelse, brutto-tonn	Antall anløp pr. år	Kommentarer:
-	40.000- 60.000	4	bukseres med taubåter
Kystrutene, Stavanger linjefart A/S	1.000-2.000	40	"kommer inn med fullt kok i sjøen"
Wilson og Jebsen	3.000-6.000		mellomklasse mht. oppvirvling
Ågesen Partners, "Elvita"	1.300	1300	
Lekter	-	-	Trafikk internt i havna med containere

(Kilde: Nils Dag Drivdal, Elkem)

Vedlegg 3. Tekniske data om skip som trafikkerer Kristiansand havn

Silvia Ana, Color Line - hurtigbåt med vannjet.

Silvia Ana er på 7500 bruttotonn, 125 m lang og 19 m bred. I følge opplysninger fra rederiet har båten 5 fremdriftsenheter (thrusters), men bare 4 av dem brukes ved manøvrering i havnen.

Ved ankomst i havna vil båten ifølge opplysninger fra rederiet dreies rundt omtrent 90° midt i det nordlige havneområdet rett ut for Lagmannsholmen, dvs. litt vest for sedimentstasjonene 31 og 32. Her er det ca. 25 m dypt. Deretter bakker den inn mot cruisekaia på skrå fra sørøst. Denne manøvreringen må antas å bruke de små vannjetene i stor grad, og med en del reversering. Ved avgang går båten ca. 50 m sideveis ut fra kaia, og deretter ut av havna med et par kursendringer på ca. 90° i området nord og vest for Lagmannsholmen.

Ved full kraft passerer det 1.2 m³/s gjennom hver enhet.

Effekten er oppgitt til max. 5500 kW for hver av de 4 enhetene som brukes i havna (5500 kJ/s = 5500 kNm/s.) Hvis alt dette blir omsatt i kinetisk energi i utløpsstrålen, vil det gi en utgangshastighet for strålen på 67 m/s. Med en virkningsgrad på ca. 50 % vil det tilsvare en hastighet 47 m/s, og 10 % virkningsgrad vil tilsvare 20 m/s. I følge opplysninger fra rederiet vil utslippsstrålen gå ut horisontalt, evt. avbøyd til siden for manøvrering, men ikke rettet nedover.

Christian IV, Color line

Skipet er på 22.000 brutto tonn, og har en dypgang på 5.8 meter, en bredde på 24.7 meter og en lengde 153.4 meter. Maks. fart er 20 knop. Skipet har to propeller med diameter 3.6 m, plassert med senter 3.5 m under overflaten. Maskinkraften (effekten) på hver propell er ca. 10.400 hk (=7750 kW) . Propellen går med konstant omdreining, og skyvkraften varieres med å endre helningen på propellbladene. Skyvkraft som effekt kan regnes å variere fra null og til ca. 65 % av motorkraften.

For skip som ligger stille, eller går i langsom fart, kan vi regne at propellens effektoverføring til vannet er omtrent lik motoreffekten. Maksimal effektoverføring til vannet (W) fra hver propell blir da omkring 5040 kW. Med en kontraksjonskoeffisient bak propellen på 0.75 blir kontrahert tverrsnitt $A_0=5.7 \text{ m}^2$, og hastigheten i det kontraherte tverrsnittet bak propellen blir ca. 12.1 m/s, beregnet etter formelen

$$V_1 = \left(\frac{2W}{\rho A_0} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Hastigheten i propelltverrsnittet blir ca. 6.3 m/s, dvs. at suget inn mot propellen er 23 kPa, beregnet etter formelen

$$\Delta p = \rho \frac{V^2}{2}$$

Dette er mer enn nok for å trekke opp vann fra ganske store dyp i innsugingen til propellen. Skulle det oppstå roterende strålerør inn mot propellen, er det ingen praktisk begrensning for hvor dypt det kan nå. Hvor ofte det vil opptre, og hvor dypt det kan nå i praksis, er ikke kjent.

MS Skagen, Color Line

Skipet er på 12.300 brutto tonn, og har en dypgang på 5.0 meter, en bredde på 20 meter og en lengde 130 meter. Maks. fart er 19 knop. Samlet maskinkraft er 16000 hk.

Båter med anløp til Elkem - Fiskaabukta

Via Finn Mjøs hos Johan G.Olsen North Sea AS er det innhentet noe opplysninger fra Fednav International limited, et canadisk rederi som anløper med større båter, 20-50.000 tonn, ca. 20 ganger pr. år:

- Hovedpropell: "Fixed pitch 5 blade", Diameter 5.3 m. Andre relevante data er ikke oppgitt.
- Typisk karakterisikk av baugpropell (Nakashima propeller Co.):
- "Controllable pitch"
- Diameter 1.8 m
- Rotasjonshastighet: 295 rpm = 4.92 omdreininger pr. sekund
- Nominell skyvkraft: 12 tonn (=12000·9.81= 118000 N)

Vedlagt kurve $K_T(J)$ for baugpropellen viser en koeffisient $K_T=0.285$ ved laveste $J=0.2$. Med oppgitt diameter og omdreiningshastighet tilsvarer det en hastighet på 1.8 m/s for propellen i forhold til vannmassene omkring. Kurven kan ekstrapoleres lineært til $J=0$ og gir da $K_T=0.36$. De to verdiene for koeffisienten kan regnes om til skyvkraft på hhv. 75 000 og 94 000 Newton. Propellen antas montert i en tunnel, slik at strålediameter blir 1.8 m, og beregnet skyvkraft tilsvarer da vannhastigheter på hhv. 3.0 og 4.2 m/s i forhold til vannet omkring.

Taubåter

De større skipene bukses av taubåter. Via firmaet *Bugser og Bjergning* som opererer taubåter i Kristiansand har vi fått følgende data for en fast stasjonert taubåt "Beni" (Bjørn Johnsrud, pers. medd):

- Lengde 25.3, 6.7 m bred, maks dypgang 3.5 m
- Motorkraft 1900 HK, dvs. 1400 kW
- Maks. trekk/skyv-kraft angis til 22 tonn
(102 g pr. Newton, slik at 22 tonn tilsvarer $22\ 000 \cdot 9,81 = 216\ 000$ Newton)
- Propelldiameter 2.2 m, sitter med nedre kant i 3.25 m dyp, dvs. propellaksel 2.15 under overflaten.

Skyvkraften (T) tilsvarer impulsoverføring til vannet (taubåtens hastighet antas liten), og hvis strålen kontraheres med en faktor a i forhold til propelldiameter, har vi for vannets hastighet V i kontrahert tverrsnitt etter formler gitt ovenfor:

$$T = \rho QV = \rho \pi \frac{(aD)^2}{4} V^2$$

eller

$$V = \frac{2}{aD} \sqrt{\frac{T}{\rho\pi}}$$

Antas kontraksjon $a=0.75$, gir det en hastighet 10 m/s og en volumstrøm 21.5 m³/s i kontrahert tverrsnitt bak propellen. Det gir en effektoverføring til vannet på 1080 kW, dvs. en virkningsgrad på 77 % av motorkraften.

Hastigheten i propelltvverrsnittet er 5.65 m/s, og det tilsvarer et sug inn mot propellen på 16 kPa.

Vedlegg 4. Analysemetoder for vannprøver

STS/L, SGR/L: Suspendert tørrstoff og gløderest NIVA-metode nr. B 2

Prøven filtreres gjennom glassfiberfilter Whatman GF/C, som på forhånd er glødet ved 480 °C i 20 timer, tørket ved 105 °C og veiet. Det suspenderte tørrstoffet i prøven representeres ved filterets vektøkning. Filteret glødes ved 480 °C og gløderesten bestemmes gjennom veiing. Vektreduksjonen ved glødingen er glødetapet.

Måleusikkerhet ca. 0.5 mg/l (standardavvik) ved 20-50 mg/l.

Referanser: NS-EN 872 Bestemmelse av suspendert stoff. Metode med filtrering gjennom glassfiberfilter. 1996, 1. utgave. + NS 4733. 1983, 2. utgave.

TSM Totalt suspendert materiale NIVA-metode nr. B 4

Nucleopore kapillærfiltre med porevidde 0.4 µm tørkes ved 40 - 50 °C i to timer, og taraen bestemmes ved veiing på mikrovækt utstyrt med ionekilde. Prøven filtreres gjennom et slikt filter, som igjen tørkes ved 40 - 50 °C i to timer før det veies på mikrovækt.

Tørrstoffet representeres ved vektøkningen. Standardavvik ca. 0.36 mg/l

Referanser: Standard methods 1989, 17th. Ed., 2540 D: Total suspended solids dried at 103 – 105 °C.

Ni grafittovn atomabsorpsjon NIVA-metode nr. E 2

En passende mengde prøve (20-50 µl), konservert med salpetersyre, overføres til et grafitrør som oppvarmes elektrotermisk. Ved trinnvis øking av temperaturen etter et program tilpasset for hvert enkelt metall, gjennomføres tørking, foraskning og atomisering. Som lyskilde benyttes en hulkatodelampe, der katoden inneholder det metallet som skal bestemmes, eller en elektrodøs lampe (EDL). Lampene avgir et linjespektrum som er spesifikt for lampen og det metallet som skal bestemmes. Lyset absorberes selektivt av dette elementets atomer når det passerer gjennom den atomiserte prøven. Metallkonsentrasjonen bestemmes ved å jevnføre prøvens absorbans med kjente kalibreringsløsningers absorbans.

Perkin-Elmer atomabsorpsjonsspektrometer modell 2380, tilkoblet grafittovn av typen HGA 500 og prøveveksler AS 40.

Referanser: Norsk Standard, NS 4780. Metaller i vann, slam og sedimenter. Elektrotermisk atomisering i grafittovn. Generelle prinsipper og retningslinjer. 1. Utg. 1988. NS 4781.

Vedlegg 5. Analyseresultater for vannprøver

Dato	kl. (UTC)	Prøve nr.	Dyp (m)	Område	Prøvested, med kobling til CTD-profiler og vektorprofiler	TSM (mg/l)	STS (mg/l)	SGR (mg/l)	Ni (µg/g)	Anslått turb FTU*
11.okt	11:19	S1	10	Elkem	ved C3 og V1, før skipsanløp.	0.32	3.6	2.6		0.4
	12:50	S2	7		I propellstrømmen vest for Northern Lurnes, ved V2	5.02	4.0	2.0		10 [†]
		S3	10			61.2	64.8	53.8	134	
	13:04	S4	10		I propellstrømmen fra Northern Lurnes, ved V3	1.83	2.0	0.8		1.5
	13:17	S5	7		I propellstrømmen fra Northern Lurnes, ved V6	3.85	4.8	2.8		2.2
	15:45	S6	10	Falconbridge	Rett ut for midten av kaia, ved C4 (Figur 36)	2.09	4.2	1.6		0.4
	16:00	S7	15	Fergepir	I fergehavna, ved C5	1.44	4.0	2.4	312	1.0
	17:27	S8	6		Etter ankomst av Christian IV, ved posisjon V16	1.76	2.6	1.2		1.3
12.okt	03:47	S9	10	Falconbridge	Før ankomst av Federal Welland, ved V21	0.53	1.2	<0.2		0.45
	03:54	S10	15		Før ankomst av Federal Welland, ved C6	0.38	0.8	<0.2		0.35
	04:39	S11	1		I propellstrømmen fra taubåt, ved C7	0.71	1.4	<0.2		2.5
		S12	15			0.42	1.2	0.2		0.35
	04:49	S13	1.5		I propellstrøm fra taubåt, ved C8	0.72	3.0	1.2	515	3.0
	04:56	S14	13		Ved C9	1.16	2.0	0.8		2
	05:38	S15	9.5		mellom V29 og V30	1.17	2.6	0.6	3066	1.5
	08:07	S16	3		Samtidig med avsluttende profil på V33	0.39	2.6	0.2		
29.okt	08:04 08:10	F1	1	Falconbridge	ved C16	0.43	1.6	0.2		
		F2	20			0.28	2.0	2.0		
	13:20 - 13:25	F3	6		ved C24	0.52	<0.2	<0.2		
		F4	2				2.0	1.4		
		F5	10			0.28	0.2	<0.2		
	13:32 - 13:40	F6	13		ved C25	0.40	1.6	1.0		
		F7	10			0.24	0.82	0.82		
		F8	6			0.26	2.6	2.2		
		F9	2			0.25	3.0	2.4		
	13:45	F10	8		ved C26	0.23	2.0	2.0		
30.okt	09:28	F11	8	Falconbridge	Sør for akterenden av Lake Charles, ved C37	0.22	<0.2	<0.2		

* Basert på CTD-profil eller vektorprofil

† For middelverdien av de to vannprøvene, se kap. 9.3.2

Vedlegg 6. Primærbearbeiding av data fra RCM9, ADP og CTD

RCM9

Data fra RCM9 er renset ved å fjerne registreringer fra starten eller slutten av hver serie, og som er fra utsettingen eller opphenting. Ellers er det ikke gjort noen ytterligere primærbearbeiding av disse data for presentasjon og analyse

ADP

Data fra ADP er renset ved å fjerne registreringer fra starten eller slutten av hver serie, og som er fra utsettingen eller opphenting. Ellers er det ikke gjort noen ytterligere primærbearbeiding av disse data før dataanalyser og grafisk presentasjon.

SeaCat CTD

Data foreligger som en serie binære filer. Disse er først konvertert til tekstfiler og justert som anbefalt for profiler med pumping av vann gjennom instrumentet (lavpassfilter med tidskonstanter: 0.5 sekunder for konduktivitet og 2 sekunder for trykk., samt fremskyving av temperatur med 0.5 sekunder i forhold til andre data).

Filene er deretter gjennomgått manuelt, og registreringer fra innstillingsfasen i starten er fjernet inntil det er stabile verdier på konduktivitet, fluorescens og turbiditet. Data fra hevingen klippes også vekk, slik at bare data fra senkingen av instrumentet. Data på slutten av senkefasen fjernes hvis de viser klare tegn til at instrumentet har virvlet opp partikler fra bunnen, dvs. at det er forhøyet turbiditet eller fluorescens over tid med måler stående på bunnen, etter en startfase med normalt lave verdier ved bunnen. Bare de første normale registreringene på maksimalt dyp er da tatt med.

Dyp er beregnet ut fra ved å justere trykket for lufttrykk og korrigere for tetthet. Lufttrykk er anslått ut fra fordeling av registreringer i luft på slutten av seriene. Alle profilene samme dag er justert til samme lufttrykk, og det er da valgt den dominerende verdien. Variasjonene innenfor en dag er ikke signifikante i forhold til måleoppløsningen som tilsvarende 9 cm vannsøyle).

Vedlegg 7. Bearbeiding av dyp-profiler fra NORTEK vektormåler (11.-12. oktober)

Når det gjelder profilmålingene, som ble tatt fra båt, er ikke hastighetsdata brukt. Siden det ikke var mulig å ankre opp båten, og den var litt vanskelig manøvrerbar, vil målte hastigheter være dominert av båtens bevegelser. Bare turbiditetssignalet, og midlere signalstyrke fra de tre strømprobene brukes. Måleren registrerer også temperatur, men kalibreringen her er usikker, og det er valgt å ikke bruke det i særlig grad.

Stort sett brukes bare målinger under senking av instrumentet, eller med instrumentet i fast dyp over en viss tid. Det siste vil kunne fremkomme som horisontale streker i vertikalplottene av turbiditet eller signalstyrke mot dyp.

Data er gjennomgått, og profilene inspisert manuelt, og registreringer som er i eller over vannflaten, eller viser påvirkning fra bunnen er fjernet. Registreringer i eller over vannflaten kjennetegnes av analogsignal fra turbiditetssensor omkring bakgrunnsverdi 150, og /eller signalstyrke nær bakgrunn (ca. 45) samtidig som trykk er nær lufttrykk), og av at signalstyrke og turbiditetssignal har et ganske markert maksimum ved passering av vannflaten som skyldes interferens med selve vannflaten, og ikke har noe med partikkelinnholdet å gjøre. Registreringer nær bunn viser stor forskjell i signalstyrke, med en eller flere stråler nær bakgrunnsverdi (45), ofte innledet og avsluttet av en skarp topp i det instrumentet treffer bunnen eller blir løftet opp fra bunnen.

Data er glattet ved at det først er tatt løpende 5-punkts median gjennom sammenhengende sekvenser av målinger for å fjerne en del enkeltstående avvikende verdier. Deretter er data aggregert slik at det er beregnet middelverdier pr. 0.5 sekunder eller 10 cm dyp, avhengig av hva som gir den fineste oppløsningen. Trykk er korrigert for lufttrykk basert på data fra registreringer som helt klart er i luft for hver profil. der det mangler er foregående profil brukt. Trykket er regnet om til dyp (m) ved korreksjon mot tetthetsprofil basert på CTD-profilene fra disse dagene, med lineær interpolering imellom. Følgende profil er brukt:

Vanntrykk	Tetthet (sigma-t)
0	10
2.5	18
5	24
10	24.5
30	25

Turbiditetssensor på vektormåler

Turbiditetssensoren koblet til vektormåleren gir et signal opp til ca. 33000 ved maks utslag, dvs. ved topp av det valgte måleområdet. Profil-målingene ble gjort med to ulike innstillinger av følsomheten på turbiditetssensoren, med øvre grense for turbiditet hhv. 12.5 FTU og 62 FTU. Det ble gjort noen parallelle kjøringene av måleren, dvs. på omtrent samme sted og tid, med de to måleområdene, for å kalibrere dem mot hverandre. Profil V12 og V13 var testkjøringene hvor måleren ble holdt en stund i luft, og en stund under vann men nær overflaten, med måleområde for turbiditetssensoren satt til hhv. 62 og 12.5 FTU. I tillegg ble profil V22, V23 og V29 kjørt to ganger, med skifte av måleområdet mellom de to kjøringene.

Medianverdier er beregnet for V12 og V13 over og under vann, og for de andre profilene pr dybdemeter, og sammenlignet i Figur 60. Det er en lineær sammenheng mellom signalene, med et forholdstall 6:1, og uten noe signifikant avvik fra ren proporsjonalitet. Signalet i luft er 150 ved begge innstillingene, og er en nedre grense for signalet, men ligger ikke som et tillegg til de signalene en får i vann. Forholdstallet avviker signifikant fra nominelt forholdstall 4.96.

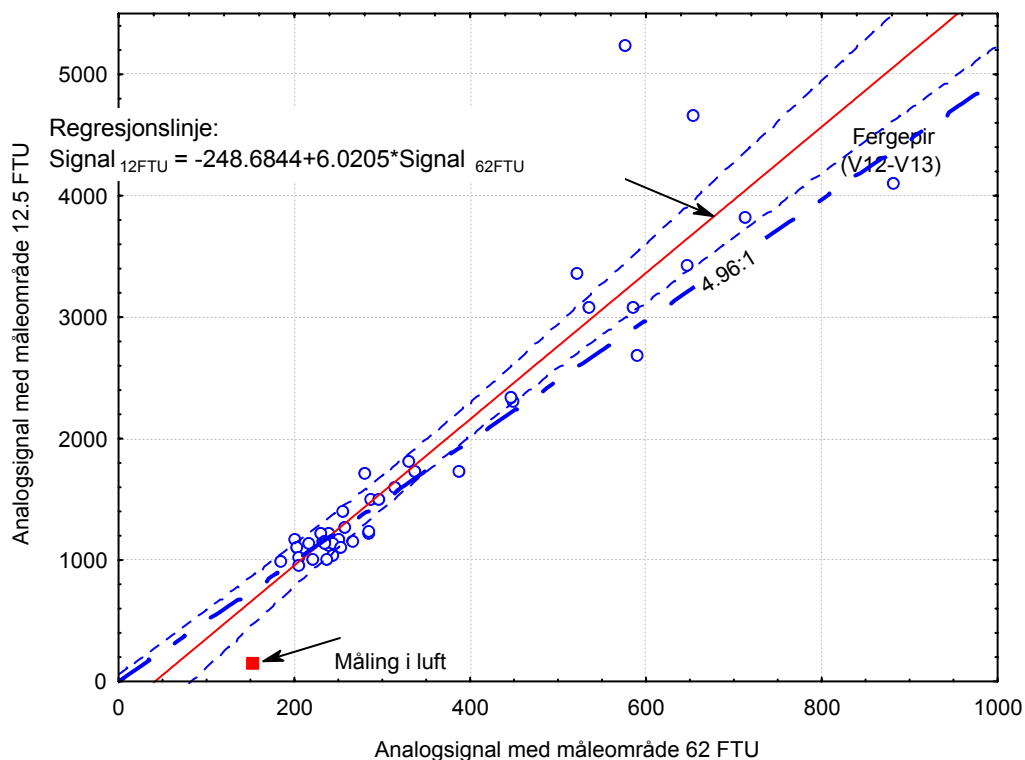
Vektor-profil V23 ble tatt omtrent samtidig og på samme sted som CTD-profil C6. En sammenligning mellom CTD-profilen og de to kjøringene av vektorprofilene gir resultat som vist i Figur 61. For måleområdet 12.5 FTU er det ikke signifikant avvik fra ren proporsjonalitet, mens det er det for måleområdet 62 FTU, men i begge tilfelle kan det være et avvik som tilsvarer en bias på 100 i analogsignal. Til omregningen av analogsignalene er det derfor valgt å bruke:

$$FTU = 0.000431 \cdot (S_{12.5} - 100) \text{ for målinger med måleområde 12.5 FTU}$$

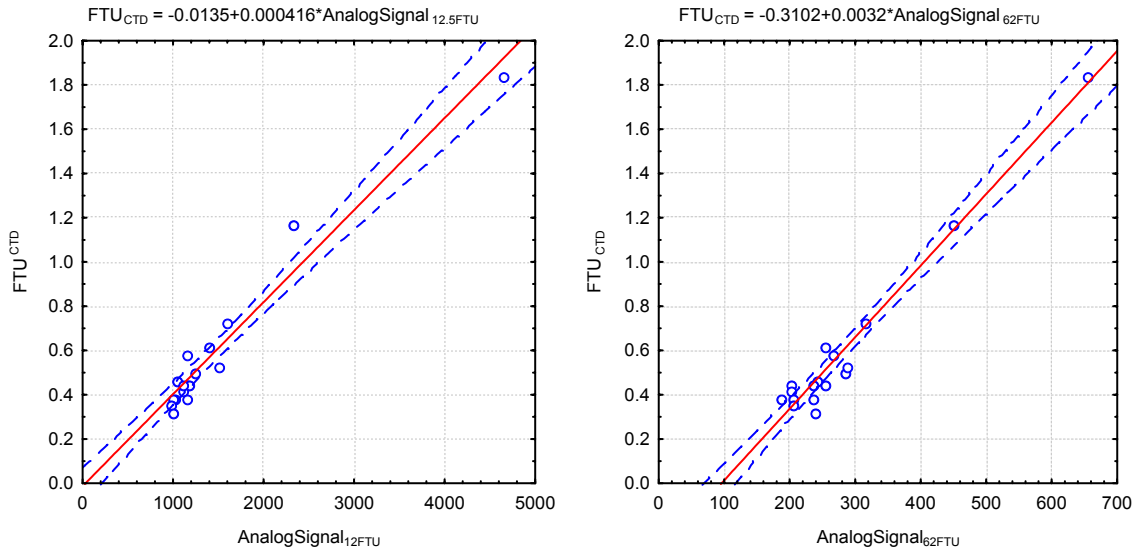
$$FTU = 0.00329 \cdot (S_{62} - 100) \text{ for målinger med måleområde 62 FTU}$$

Bemerk at denne omregningen er basert på data fra målingene ved Falconbridge, med en nokså spesiell type partikler. Det er derfor usikkert hvor godt de gjelder andre typer sedimenter.

Figur 60. Sammenligning av signal (voltstyrke) fra turbiditetssensoren ved innstilling til måleområde 12.5 og 62 FTU. Plottet viser sammenheng mellom medianverdier innenfor samme dybdemeter for parallelle kjøringene av samme profil med ulikt måleområde. Tynne stiplede kurver viser 95% konfidensbånd rundt lineær-regresjon. Tykk stiplede strek viser ren proporsjonalitet med nominell faktor 4.96 = 62/12.5.



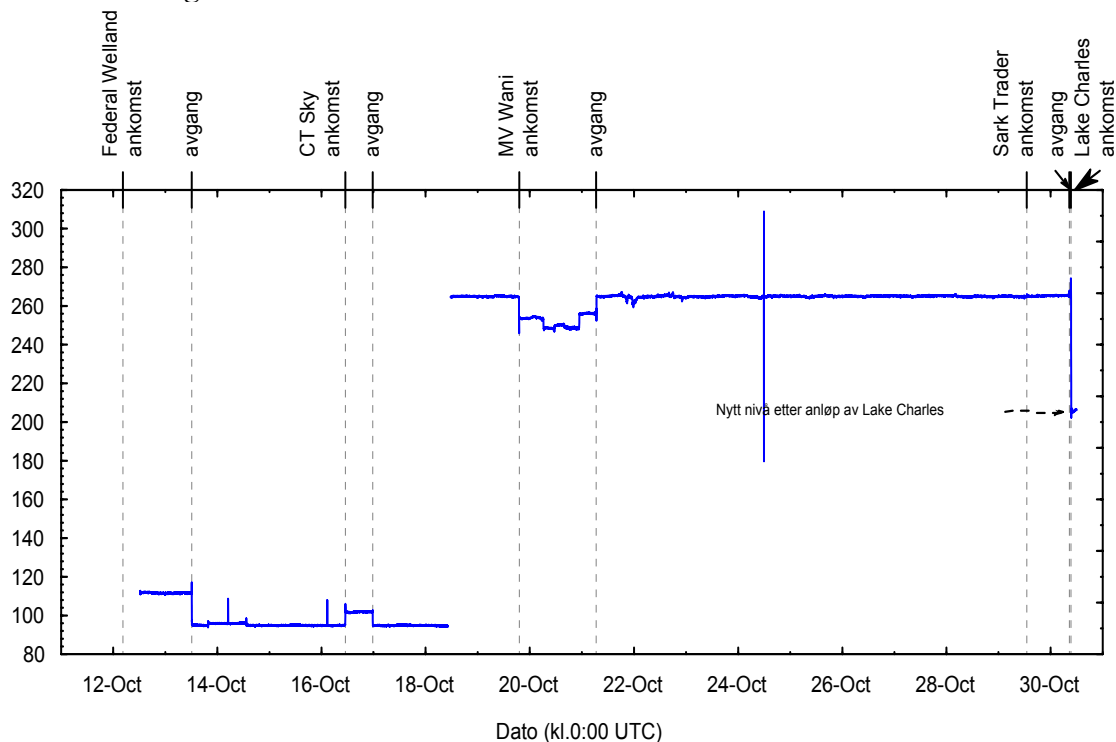
Figur 61. Sammenligning av analogsignalet fra turbiditetssensoren på vektormåleren (V23 a og b) med kalibrert turbiditet fra CTD-profil tatt samme tid og sted (C6). Medianverdier pr. dybdemeter er brukt til sammenligningen.



Vedlegg 8. Bearbeiding av data fra vektormåleren satt ut i rigg på bunnen (Falconbridge 12-30 oktober) - forstyrrelse av magnetfeltet

Vektormåleren ble satt ut 12. oktober i posisjon som vist i Figur 26. Den måler i et svært lite volum, og kan derfor også måle over meget korte tidsintervaller. Måleren benytter kompassretningen til å beregne strømretningen ut fra signalene i de tre probene, og logger også kompassretningen. Siden måleren sto på bunnen skulle den holde seg helt konstant. Imidlertid viste kompassretningen noe avvik. Tidsforløpet er vist i Figur 62, med tidspunkt for de forskjellige båtankomstene og avgangene avmerket. Det viser seg at de fleste av skipene har påvirket magnetfeltet, og derved endret kompassretningen så lenge de har ligget ved kai. Det gir også en nøyaktig tidfesting innenfor 2 minutter av avgangene og ankomstene. Federal Welland og CT Sky har dreid magnetfeltet mot urviseren (kompassretningen dreier mot høyre), mens MT Wani og Lake Charles har gitt motsatt utslag. Hvilken vei utslaget går vil variere med hvor båten legger seg i forhold til måleren. Sark Trader har ikke gitt noe utslag på kompassretningen, men både anløp og avgang foregikk under feltarbeidet og klokkeslettet ble observert direkte. Ut fra figuren ser det også ut til at det kan ha vært et anløp fra 13. oktober kl. 20:00 UTC til 14. oktober kl. 13:30 UTC som ikke er rapportert, og at det har vært skipsbevegelser 20. oktober kl. 06:20, 11:30, 16:00 og 23:00 UTC, iallfall er det små endringer i magnetfeltet ved disse tidspunktene av samme type som de rapporterte skipsbevegelserne. Det er også en liten variasjon omkring midnatt til 22. oktober, og noen enkeltstående avvikende verdier som kan være rene 'spikes' i instrumentet.

Figur 62. Kompassretning registrert av NORTEK vektormåler ved Falconbridge 12-30. oktober.



Måleren var innstilt på å logge hastighet regnet om til nordlig, østlig og vertikal komponent (koordinatsystem ENU) ut fra kompassretning og helning. Siden magnetfeltet endret seg underveis, blir denne beregningen feil. I tillegg var riggen laget slik at proben er rotert 180° rundt X-retningen i forhold til det omregningen går ut fra. Hastighetene er derfor tilbakeberegnet til XYZ-koordinater ut fra dette, og med det varierende magnetfeltet, og så regnet tilbake til ekte ENU-koordinater ved hjelp av den faste kompassretningen som er identifisert av dataserien: 95.8° frem til 18. oktober, og 264° etterpå.



Statens forurensningstilsyn (SFT)
Postboks 8100 Dep, 0032 Oslo
Besøksadresse: Strømsveien 96

Telefon: 22 57 34 00
Telefaks: 22 67 67 06
E-post: postmottak@sft.no
Internett: www.sft.no

Utførende institusjon Norsk institutt for vannforskning	Kontaktperson SFT Anne Kathrine Arnesen Bjørn Bjørnstad	ISBN-nummer 82-7655-451-2
--	---	------------------------------

NIVA-løpenr. 4545-02	Avdeling i SFT Lokalmiljøavdelingen	TA-nummer 1869/2002
-------------------------	--	------------------------

Oppdragstakers prosjektansvarlig: Dag Petter Sødal, Fylkesmannen i Vest-Agder	År 2002	Sidetall 144	SFTs kontraktnummer
---	------------	-----------------	---------------------

Utgiver SFT	Prosjektet er finansiert av SFT
----------------	------------------------------------

Forfatter(e) Birger Bjerkeng (NIVA) Jarle Molvær (NIVA)

Tittel - norsk og engelsk
Oppvirvling og spredning av forurenset sediment på grunn av skipstrafikk. Litteraturstudium og feltundersøkelser i Kristiansand havn.
(Erosion and dispersion of polluted sediments caused by ship traffic. Literature study and field measurements in Kristiansand harbour)

Sammendrag – summary

Basert på litteraturstudiet, ved å kombinere eksperimentelle resultater for kritisk turbulent friksjon med sammenhenger mellom friksjon og strømhastighet, kan det anslås at fine sedimenter typisk vil virvles opp ved hastigheter som overstiger grenseverdier mellom 0.1 og 1 m/s. Grenseverdiene vil avhenge av sedimentegenskaper og type av strømpåvirkning. Disse hastighetsgrensene ligger godt innenfor det en må regne med av påvirkning fra skipstrafikk.

Feltmålinger ved to industrikaier i Kristiansand havn viste sterk oppvirvling lokalt rundt kaia, i en kort periode etter anløp og avgang av store båter, men det var ingen generell og langvarig økning av partikkelmengden i vannet i et større området etter skipsbevegelser.

Pga. begrenset anløpsfrekvens er det anslått at oppvirvling av partikler har relativt liten betydning for total partikkelmengde og mengde miljøgifter i vannmassene sammenlignet med direkte tilførsler og utlekking fra sediment i bukta i dagens situasjon. Etter en overdekking ellers i Hanneviksbukta kan oppvirvling fra kaiområdene uten tiltak der bidra vesentlig til sekundær tilførsel av miljøgifter fra sedimentene. Målingene i den nordlige fergehavnen indikerer at partikkelinnholdet i vannet der var omtrent fordoblet i forhold til området ellers, antagelig som akkumulert virkning av mange skipsbevegelser, men det ble ikke registrert store endringer ved enkeltbevegelser.

(Based on a literature study, combining experimental results for critical turbulent friction with

relations between friction and current velocities, it is estimated that fine sediments typically will be eroded by currents exceeding from 0.1 to 1 m/s. The limit will depend on sediment properties and type of current. These critical currents are well within what must be expected due to ship traffic.

Field measurements at the quays of two industrial plants in Kristiansand Harbour showed strong local resuspension of sediment locally around the ships for a short time after arrival, but no general or lasting increase in particle content in the water over larger areas after ship movements.

Due to a limited frequency of ship traffic, the resuspension of particles due to ships is of relatively minor importance for total amount of particles and amount of micropollutants in the water compared to direct discharge and leaching from bottom sediments in the larger polluted area. After sediments in the surrounding area have been covered, the resuspension by ships may constitute an important secondary source of micropollutants from the sediment.

Measurements in the northern ferry harbour indicate that the the concentration of suspended particles there was doubled relative to the larger harbour area, probably as cumulative effect of many ship movements, but no large changes were observed as direct result of single events.)

4 emneord:
Sedimenter
Skipstrafikk
Oppvirvling
Miljøgifter

4 subject words
Sediments
Ship traffic
Erosion
Micropollutants