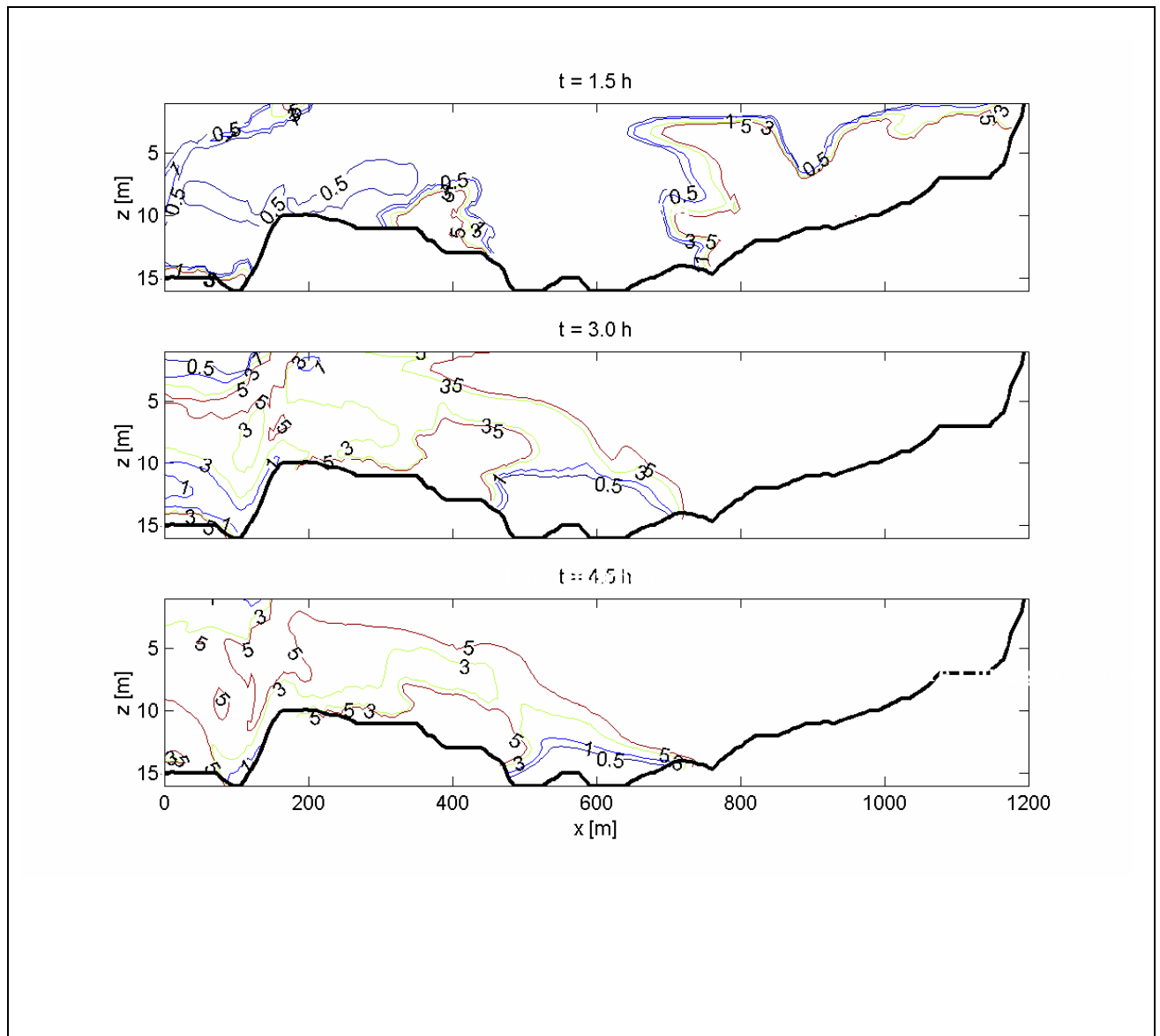


# Modellering av miljøgift - og partikkeltransport i Vågen, Bergen havn

## Delrapport tiltaksplan forurensede sedimenter Fase 2.



**Hovedkontor**

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

**Sørlandsavdelingen**

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

**Østlandsavdelingen**

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

**Vestlandsavdelingen**

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

**Midt-Norge**

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

Tittel <b>Modellering av miljøgifttransport i Vågen, Bergen havn</b>	Løpenr. (for bestilling) 5055-2005	Dato 20/07-2005
	Prosjektnr. Undernr. O-25066	Sider Pris 37
Forfatter(e) Frode Uriansrud Petter Stenstrøm	Fagområde Miljøgifter	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Hordaland	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Fylkesmannen i Hordaland	Oppdragsreferanse Håkon Kryvi
--	----------------------------------

**Sammendrag**

I forbindelse med tiltaksplan for opprydding av forurensede sedimenter i Bergen havn, ble det utført modellering og måling av vann- og partikkeltransporten i Vågen, Bergen havn. I tillegg ble det analysert miljøgifter i nysedimentert materiale og vann. Disse undersøkelsene danner grunnlaget for beregning av hvor mye miljøgifter som transporteres fra Vågen og ut i Byfjorden. Modelleringene viser at vindstyrken har stor betydning for resuspensjon og transport av partikler i Vågen. Ved svak vind og bare tidevannspåvirkning fås en viss resuspensjon av finpartikler (silt) på de mest utsatte områdene, men denne resuspensjonen er lokal og spredningen er liten. For de grovere partiklene (fin sand og grovere) kreves vindhastigheter opp mot 15 m/s for å få en betydelig resuspensjon og transport. Forurensede partikler som avsettes på eller på utsiden av terskelen vil ved tidevannsstømmer eroderes og enten transporteres ut av Vågen eller inn i akkumulasjonsbassenget på innsiden av terskelen. Retningen vil avhenge av retningen til den dominerende bunnstrømmen.

Nysedimentert materiale i Vågens indre del er markert til meget sterkt forurensset og gjenspeiler det som tidligere er observert i overflatesedimentene. I Vågens ytre del hadde nysedimentert materiale lavere miljøgiftkonsentrasjoner enn i indre del (ubetydelig til markert forurensset). Til tross for de høye miljøgiftkonsentrasjonene i sedimentene, ble det ikke påvist forhøyede miljøgiftkonsentrasjoner i vannmassene.

Under forutsetning av at det er lite vind inn Vågen og relativt svake strømmer (<5-8 cm/s, vannstrømt) viser beregninger at det per døgn spres 0,09-0,1 g PCB<sub>7</sub>, 178-282 g bly, 137-193 g kobber og 2,7-2,8 g kvikksølv fra Vågen til de utenforliggende områdene i Byfjorden. Denne fluksen kan i perioder øke betydelig (med en faktor på 100) som følge av erosjon av forurensede sedimenter.

<p>Fire norske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Modellering</li> <li>2. Miljøgifttransport</li> <li>3. PCB</li> <li>4. Metaller</li> </ol>	<p>Fire engelske emneord</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Modelling</li> <li>2. Contaminant sediment transport</li> <li>3. PCB</li> <li>4. Metals</li> </ol>
---	---



Prosjektleder  
Frode Uriansrud

Forskningsleder  
Kristoffer Næs



Ansvarlig  
Øyvind Sørensen

Bergen havn tiltaksplan forurensede sedimenter Fase II

Modellering av miljøgifttransport i  
Vågen, Bergen havn

Delrapport tiltaksplan forurensede sedimenter  
Fase 2

## Forord

Dette delprosjektet er gjennomført på oppdrag av Fylkesmannen i Hordaland i forbindelse med tiltaksplan forurensede sedimenter Fase 2 i Bergen havn. NIVA har sammen med COWI og NGI gjennomført kartlegging og vurderingen av Bergen havn som inngår i tiltaksplan forurensede sedimenter i Bergen havn. Den foreliggende delrapporten er gjennomført av NIVA og beskriver partikkeltransporten i Vågen, Bergen havn. I tillegg til modelleringer av partikkeltransporten er det gjennomført beregninger av hvor mye miljøgifter som transporteres ut av Vågen, samt undersøkelser av miljøgiftkonsentrasjoner i vannmasser og nysedimentert materiale.

Kontaktperson hos Fylkesmannen har vært Håkon Kryvi. Fra NIVA har Petter Stenström hatt ansvaret for arbeidet knyttet til modellering og utvikling av modellverktøyet. Frode Uriansrud har vært prosjektleder. Andre som har vært involvert i prosjektet, er Svein Otto Halland (Aanderaa), Runar Ryssdal (Høgskulen i Sogn og Fjordande) og Fridtjof Ulleland (Høgskulen i Sogn og Fjordande)

Alle takkes for innsatsen.

Bergen, 1/8-2005

*Frode Uriansrud*

---

# Innhold

<b>Sammendrag</b>	<b>5</b>
<b>Summary</b>	<b>7</b>
<b>1. Bakgrunn og målsetting</b>	<b>8</b>
1.1 Bakgrunn	8
1.2 Målsetning	9
<b>2. Material og metode</b>	<b>9</b>
2.1 Feltarbeid	9
2.1.1 Sedimentfeller	9
2.1.2 CTD-målinger	10
2.1.3 Vannprøver	11
2.1.4 Strømmålinger	12
2.2 Kjemiske analyser	14
2.2.1 Vannprøver	14
2.2.2 Sedimentfeller	14
2.3 Strømmodellering (MITgcm)	14
2.4 Sedimenttransportmodellen (MITgcm-sed)	15
2.5 Beregning av total spredning av miljøgifter fra Vågen til Byfjorden	16
2.5.1 Beregning av mengden miljøgifter som transporteres med partikler ut av Vågen	16
<b>3. Resultater</b>	<b>18</b>
3.1 Strømmodellering	18
3.2 Modellering av partikkeloppvirvling (MITgcm-sed)	20
3.3 Strømmålinger	23
3.4 Partikler i vannmassene	27
3.5 Sedimentfeller	32
3.6 Miljøgifter i vann	33
3.7 Transport av miljøgifter fra Vågen og ut i Byfjorden	33
3.7.1 Beregning av partikkelbundet miljøgifttransport ( <i>Fpart</i> )	33
3.7.2 Beregning av total miljøgiftfluks fra Vågen til Byfjorden.	35
<b>4. Konklusjon</b>	<b>36</b>
<b>5. Anbefalinger</b>	<b>36</b>
<b>6. Referanser</b>	<b>36</b>

---

## Sammendrag

Det er for tiden stor nasjonal fokus på tiltak mot forurensede fjord- og havnesedimenter. I den sammenheng utarbeides det nå tiltaksplaner i 16 prioriterte områder, deriblant Bergen havn. Tiltaksplanen for Bergen havn inkluderer både Puddefjorden og Vågen som er to separate fjordsystemer. I denne undersøkelsen er fokuset rettet mot Vågen, der de indre delene er meget sterkt forurenset av metaller, PCB, TBT og PAH.

Tiltak for å begrense effekter av forurensede sedimenter er kostnadskreven. Det er derfor viktig at betydningen av de forurensede sedimentene med hensyn på spredning vurderes. I denne forbindelse har fylkesmannen i Hordaland besluttet å gjennomføre en vurdering av hvor mye forurensing som kan transporteres fra Vågen og ut i Byfjorden.. Dette gjøres ved en kombinasjon av modeller og direkte målinger. Det er utviklet en egen sedimenttransportmodell for Vågen som beskriver strømningsmønsteret og partikkeltransporten i området.

Dette delprosjektet inngår i Fase 2 tiltaksplan for forurensede sedimenter Bergen havn. Fylkesmannen i Hordaland har engasjert NIVA til å være faglig ansvarlig i utarbeidelsen av denne vurderingen.

### Hovedkonklusjoner

Hovedkonklusjonene fra undersøkelsen er:

- Modellingene viser at vindstyrken har stor betydning for resuspensjon og transport av partikler i Vågen. Ved svak vind (bare tidevannspåvirkning vind og tidevann er forskjellig, endre) fås en viss resuspensjon av finpartikler (silt) på de mest utsatte områdene (terskelen og Vågens ytre del), men denne resuspensjonen er veldig lokal og spredningen er liten. For de grovere partiklene (fin sand og grovere) kreves vindhastigheter opp mot 15 m/s for å få en betydelig resuspensjon og transport.
- De kvantitative resultatene av modelleringene er usikre. De beregnede konsentrasjonene er trolig overestimerer. Dette først og fremst fordi tilgangen på løse sedimenter på bunn antatt å være ubegrenset. I virkeligheten blir de mest utsatte områdene skrappt ren for løse partikler under en storm.
- Forurensede partikler som avsettes på eller på utsiden av terskelen vil ved tidevannsstømmer eroderes og enten transporteres ut av Vågen eller inn i akkumulasjonsbassenget på innsiden av terskelen. Retningen vil avhenge av retningen til den dominerende bunnstrømmen. Denne effekten forsterkes ved økt vindpåvirkning..
- Nysedimentert materiale i Vågens indre del er markert til meget sterkt forurenset og gjenspeiler det som tidligere er observert i overflatesedimentene. I Vågens ytre del hadde nysedimentert materiale lavere miljøgiftkonsentrasjoner enn i indre del (ubetydelig til markert forurenset).
- Til tross for de høye miljøgiftkonsentrasjonene i sedimentene ble det ikke påvist forhøyede miljøgiftkonsentrasjoner i vannmassene.
- Under forutsetning av det er lite vind inn Vågen og relativt svake strømmer (<5-8 cm/s vannstrøm) viser beregninger at det per døgn spres 0,09-0,1 g PCB<sub>7</sub>, 178-282 g bly, 137-193 g kobber og 2,7-2,8 g kvikksølv fra Vågen til de utenforliggende områdene. Denne fluksen kan i perioder øke betydelig som følge av erosjon av forurensede sedimenter Denne fluksen er noe lavere enn de beregnede utslipp i kg pr år fra renseanleggene i Bergen kommune , men kan være viktig lokalt ved at relativt store mengder miljøgifter kommer ut i et begrenset areal.

- Det anbefales å gjennomføre registreringer av partikkelmengde i vannmassene gjennom en lengre tidsperiode for å verifisere resultatene fra modellen.. Dette bør gjøres i høst/vinterhalvåret på grunn av økt stormaktivitet på denne årstiden.

## Summary

Title: Contaminant transport modelling in Vågen, Bergen harbour.

Year: 2005

Author: Frode Uriansrud and Petter Stenström

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

At present there is a strong national focus on the need for remedial actions against contaminated harbour sediments and action plans are under development in 16 prioritised areas. Among them are Vågen, Bergen harbour. Bergen harbor has historically received pollutants from sewage outlets and industrial activities in the city centre. Today the concentrations in the sediments of e.g. PAH, TBT, PCB, Pb, Cu and Hg are high. The highest contaminant concentrations are located in the inner basin.

A three-dimensional, non-hydrostatic model has been set up to study the water circulation in the harbor under different forcing scenarios. A sediment sub-model has been implemented that accounts for settling, resuspension, advection and diffusion of particles. The primary goal has been to quantify the rate of resuspension and the transport out from the harbor to the adjacent fjord.

Main conclusions:

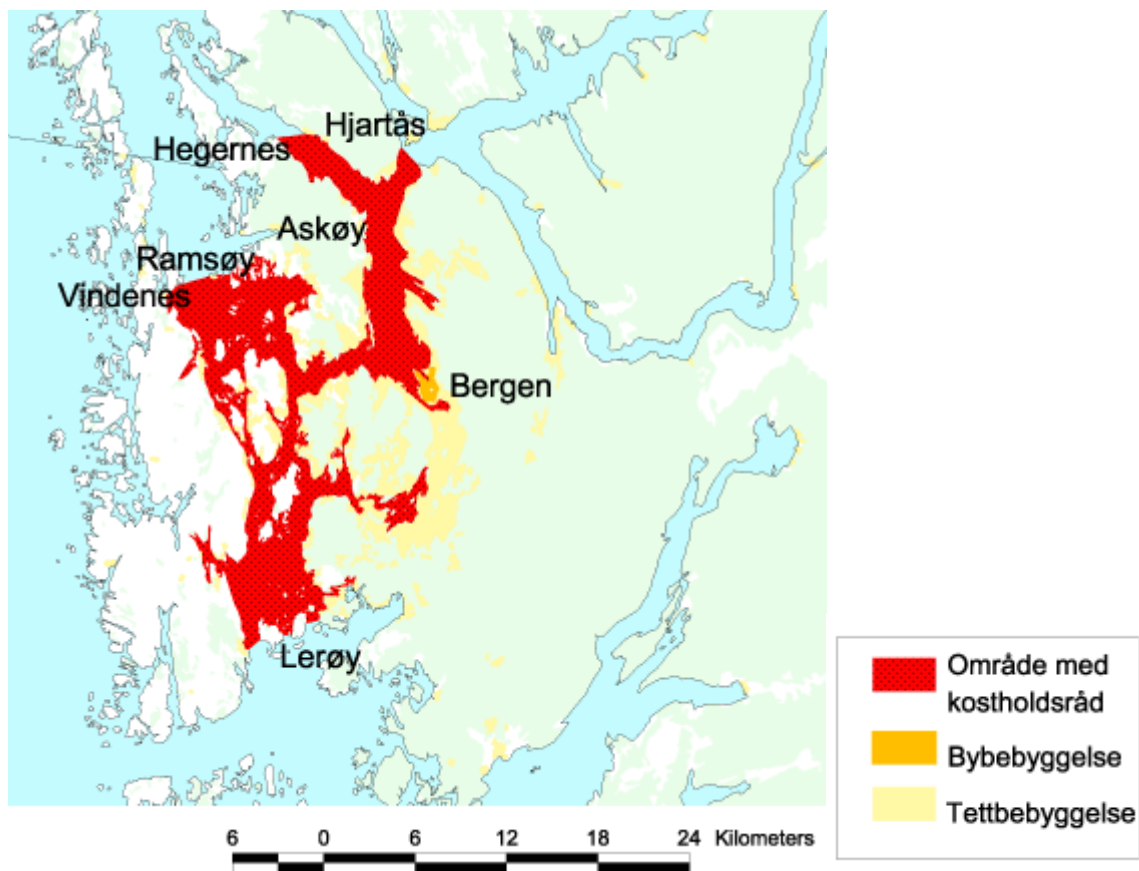
- The three-dimensional, non-hydrostatic model (MITgcm-sed) shows that the wind has strong effect on resuspension and transport of contaminated particles. At weak winds and tidal exchange only fine particles (silt and clay) at the most exposed areas are eroded. At wind speeds of 15 m/s, sand and the most contaminated sediments in the inner harbor are eroded.
- The quantitative results from the modelling are uncertain. The estimated particle concentrations in the water at 15 m/s are presumably overestimates because the supply of contaminated sediments in the model is unlimited.
- Contaminated particles that settle outside the sill in calm periods are transported either into the accumulation basin or out of the Vågen area. The direction depends on tidal movement and wind speed.
- Recently accumulated sediments in the inner Vågen are highly contaminated while recently accumulated sediments in the outer part of Vågen had lower contaminant concentration. This reflects the earlier observed contaminant concentration in surface sediments.
- Despite high contaminant concentrations in surface sediments only low contaminant concentrations were observed in the water.
- Higher particle concentrations were observed in the surface and bottom water
- Estimates show that under low wind speeds the contaminant transport per day (24 hours) from Vågen to the surrounding area is 0,09-0,1 g PCB<sub>7</sub>, 178-282 g lead, 137-193 g copper and 2,7-2,8 g mercury



# 1. Bakgrunn og målsetting

## 1.1 Bakgrunn

Det er for tiden stor nasjonal fokus på tiltak mot forurensede fjord- og havne sedimenter. I denne sammenheng utarbeides det nå tiltaksplaner i 16 prioriterte områder, deriblant Bergen havn. Tiltaksplanen for Bergen havn inkluderer både Puddefjorden og Vågen som er to separate fjordsystemer. I denne undersøkelsen er fokuset rettet mot Vågen, der de indre delene er meget sterkt forurenset av metaller, PCB, TBT og PAH. På grunnlag av forurensningen av PCB-forbindelser i organismer har myndighetene utstedt kostholdsråd knyttet til konsum av fisk og skalldyr fanget i området (Figur 1)



**Figur 1.** Område med kostholdsråd rundt Bergen

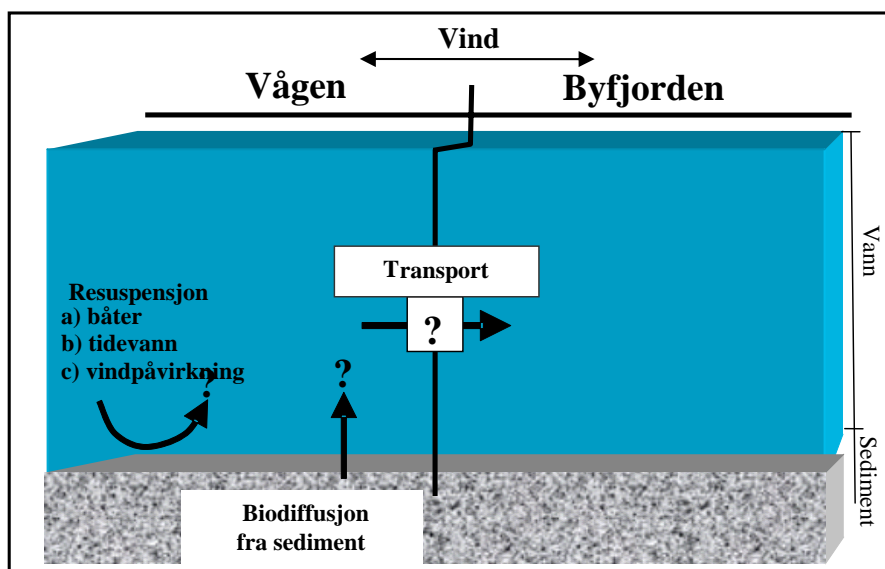
Forurensningen av metaller og klorerte forbindelser skyldes i hovedsak utslipp via kloakkavløp og industriaktivitet i området. Kloakkavløpene skal i dag være sanert.

Tiltak for å begrense effekter av forurensede sedimenter er kostnadskrevenende. Det er derfor viktig at betydningen av de forurensede sedimentene med hensyn på spredning av miljøgifter. I denne forbindelse har fylkesmannen i Hordaland besluttet å gjennomføre en vurdering av hvor mye forurensning som kan transporteres fra Vågen og ut i Byfjorden. Prosjektet inngår som en del av Fase 2 tiltaksplan for forurensede sedimenter Bergen havn. Fylkesmannen i Hordaland har engasjert NIVA til å være faglig ansvarlig i utarbeidelsen av en slik vurdering

## 1.2 Målsetning

*Målsetningen med denne undersøkelsen har vært å skalere spredningen av PCB, kvikksølv, bly og kadmium fra de meget sterkt forurensede områdene i Vågen til området utenfor (Byfjorden).*

Figur 2 gir en oversikt over spredningsveiene som ønskes kvantifisert i forbindelse med spredning av miljøgifter fra Vågen. Bidragene fra direkte utlekking fra sedimentene (Fdiff) og oppvirvling fra båttrafikken (Fskip) hentes fra tidligere utførte beregninger i området (NGI Teknisk notat: Risikovurdering, Bergen havn, Vedlegg G). Effekten av naturlig fysiske prosesser som tidevann og vind illustreres ved modellering.



Figur 2. Prosesser som kvantifiseres i forbindelse med beregning av spredning fra Vågen.

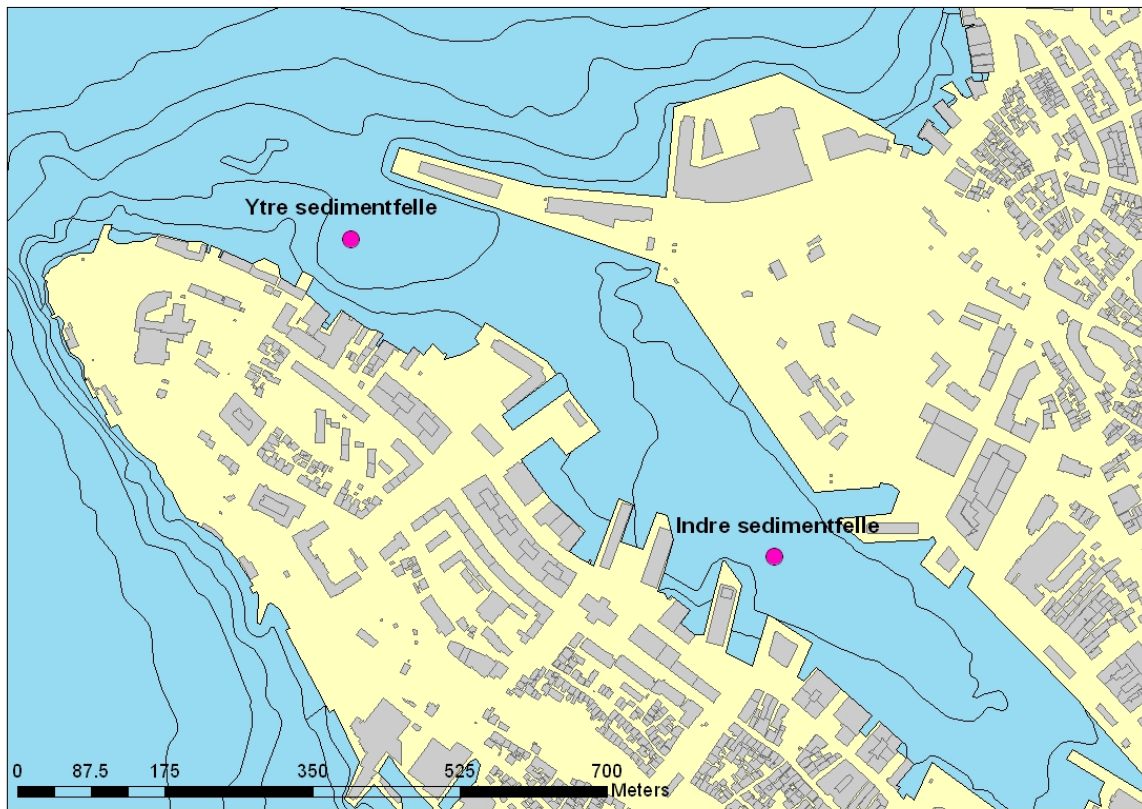
## 2. Material og metode

### 2.1 Feltarbeid

Feltarbeid ble gjennomført i perioden fra 11/2-2005 til 8/4-2005. Det ble målt strømstyrke og retning, partikkelmengde i vannmassene, sedimentasjon og miljøgiftkonsentrasjoner i vannmassene.

#### 2.1.1 Sedimentfeller

Sedimentfeller som fanger opp partikler som sedimenterer, sto ute i perioden fra 11/2-05 til 8/4-05. Figur 3 viser plasseringen av sedimentfellene i Vågen. Sedimentfellene ble plassert ut ca. 1 meter over sedimentoverflaten. Det ble gjort for redusere muligheten for å fange opp partiklene som transporteres i bunnvannet. Sedimentfellene ble satt ut for å få miljøgiftkonsentrasjonen i nysedimentert materiale.



**Figur 3.** Plassering av sedimentfeller i Vågen, Bergen havn.

### 2.1.2 CTD-målinger

Sjiktningen i Vågen ble undersøkt ved flere tidspunkter med en Saiv SD-204 CTD-sonde. 5 stasjoner (Våg CTD-1-5, Figur 4) ble prøvetatt 2 ganger per dag ved følgende datoer. :

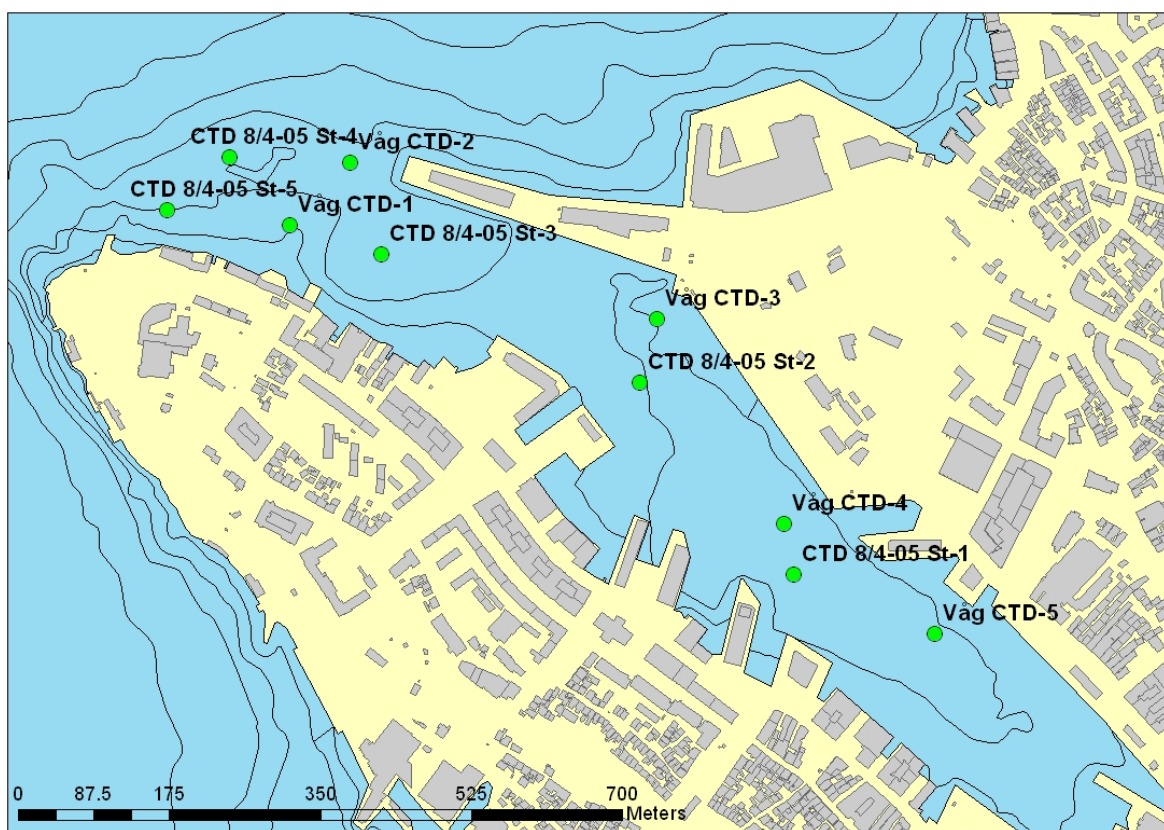
- 13.04.2005
- 07.04.2005
- 30.03.2005
- 17.03.2005
- 10.03.2005

I tillegg ble det tatt CTD-profiler på ytterligere 5 stasjoner under innhenting av strømmålere (CTD 8/4-05 St 1-5, Tabell 1). Dette for å få et bedre datagrunnlaget for modelleringen.

Tabell 1 gir en oversikt over posisjoner og dyp for CTD-stasjonene.

**Tabell 1.** Oversikt over prøvetatte CTD-stasjoner.

CTD-stasjoner	Nord	Øst	Dyp (m)
Våg CTD-1	60°24.066	5°18.368	8
Våg CTD-2	60°24.107	5°18.439	18
Våg CTD-3	60°24.020	5°18.837	10
Våg CTD-4	60°23.897	5°19.012	15
Våg CTD-5	60°23.834	5°19.209	12
CTD 8/4-05 St 1	60°23.866	5°18.211	15
CTD 8/4-05 St 2	60°23.980	5°18.820	11
CTD 8/4-05 St 3	60°24.051	5°18.485	13
CTD 8/4-05 St 4	60°24.106	5°18.287	12
CTD 8/4-05 St 5	60°24.071	5°18.212	12



**Figur 4.** CTD-stasjoner i Vågen i perioden fra 11/2 til 8/4 2005.

Saiv CTD-sonden har sensorer for å registrere dyp, temperatur, saltholdighet og turbiditet og var innstilt på registrering hvert sekund. Ved å senke den langsomt fra overflata og til bunn fikk man registrering med ca. 0,5 m intervall. En økning i turbiditet er en rimelig sikker indikasjon på økt partikkelinnhold i vannmassen. Sondens sensor for måling av turbiditet var kalibrert i forhold til ISO-standard og verdiene uttrykkes i FTU (Formazin Turbidity Units). Måleintervallet som ble benyttet var 0-62,5 FTU. Tabell 2 viser sondens målenøyaktighet. Hydrografidataene ble brukt til kalibrering av den hydrodynamiske modellen.

**Tabell 2.** SD-204-sonden. Parametere og presisjon.

Parameter	Usikkerhet
Temperatur	$\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
Saltholdighet	$\pm 0,1\text{‰}$
Turbiditet	$<2\%$ FTU

1 FTU = 1 NTU (NTU brukes som enhet på turbiditetssensorene som var montert på strømmålerene).

### 2.1.3 Vannprøver

Vannprøver for analyse av totalt suspendert materiale (TSM) ble samlet inn med en Limnos vannhenter ved to tidspunkt (10/03-2005 og 8/4-2005). Tabell 3 og Figur 6 gir en oversikt over stasjonene der det ble samlet inn vannprøver. Alle vannprøvene ble analysert for total suspendert materiale (gravimetrisk metode) ved NIVAs laboratorium. I tillegg ble det på stasjon Nr. 2 (5 meters vanddyb) fra ytre del av Vågen analysert miljøgifter (polyklorerte bifenyler ( $\text{PCB}_7$ ), kvikksølv (Hg), bly (Pb), krom (Cr), kadmium (Cd)).

**Tabell 3.** Oversikt over vannprøver tatt i forbindelse med feltarbeidet februar til april 2005.

Vannprøver	Nord	Øst	Vann dyp (m)	Dato
St. 1 0,5 m	60°24.066	5°18.368	8	10.03.2005
St. 1 4 m	60°24.067	5°18.369	8	10.03.2005
St. 1 8 m	60°24.068	5°18.370	8	10.03.2005
St. 3 0,5 m	60°24.020	5°18.837	11	10.03.2005
St. 3 5 m	60°24.021	5°18.838	11	10.03.2005
St. 3 10 m	60°24.022	5°18.839	11	10.03.2005
Nr. 1 7 m	60.23.862	5.18.995	15	08.04.2005
Nr. 2 5 m	60°23.987	5°18.834	11	08.04.2005
Nr. 3 5 m	60.24.060	5.18.466	18	08.04.2005

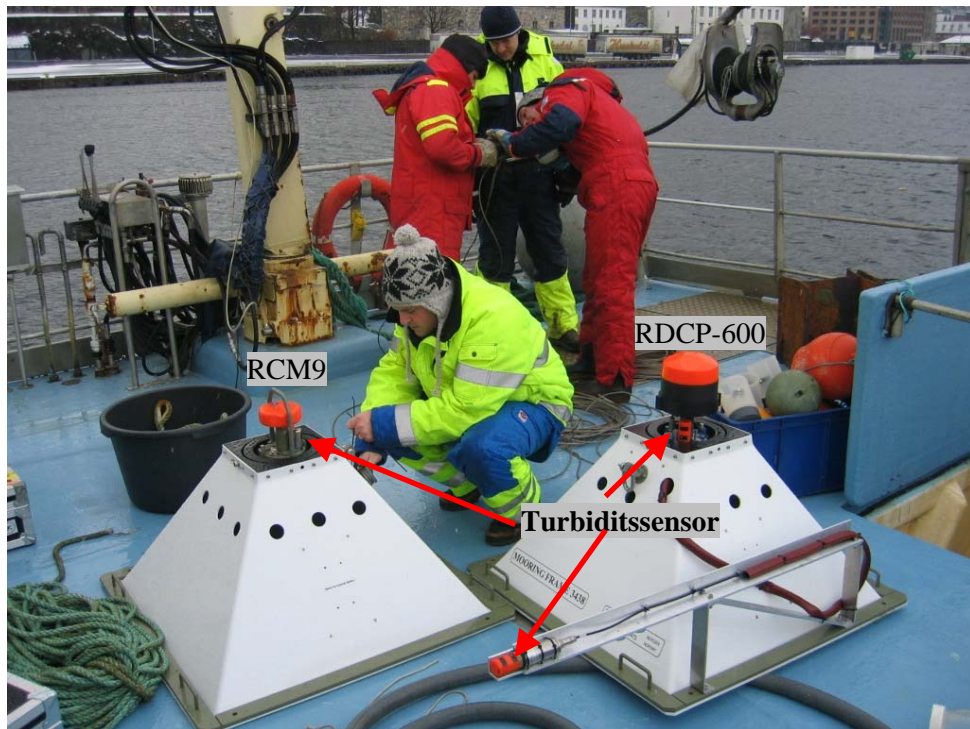
### 2.1.4 Strømmålinger

Langtidsregistreringer av strøm og turbiditet ble gjort for å dekke et tidsrom på ca. 2 måneder. En Aanderaa RCM9 og en Aanderaa RDCP-600 ble plassert ut i tidsrommet fra 11/2-05 til 8/14-05. RCM9-måleren gir informasjon om strømhastighet, strømrøtning, turbiditet, temperatur og saltholdighet i forhåndsinnstilte tidsintervaller på et dyp, mens RDCPen registrerer strømhastighet og retning i flere vannlag. Styrken på retursignalet til RDCPen gir også en indikasjon på mengden partikler i vannmassene.

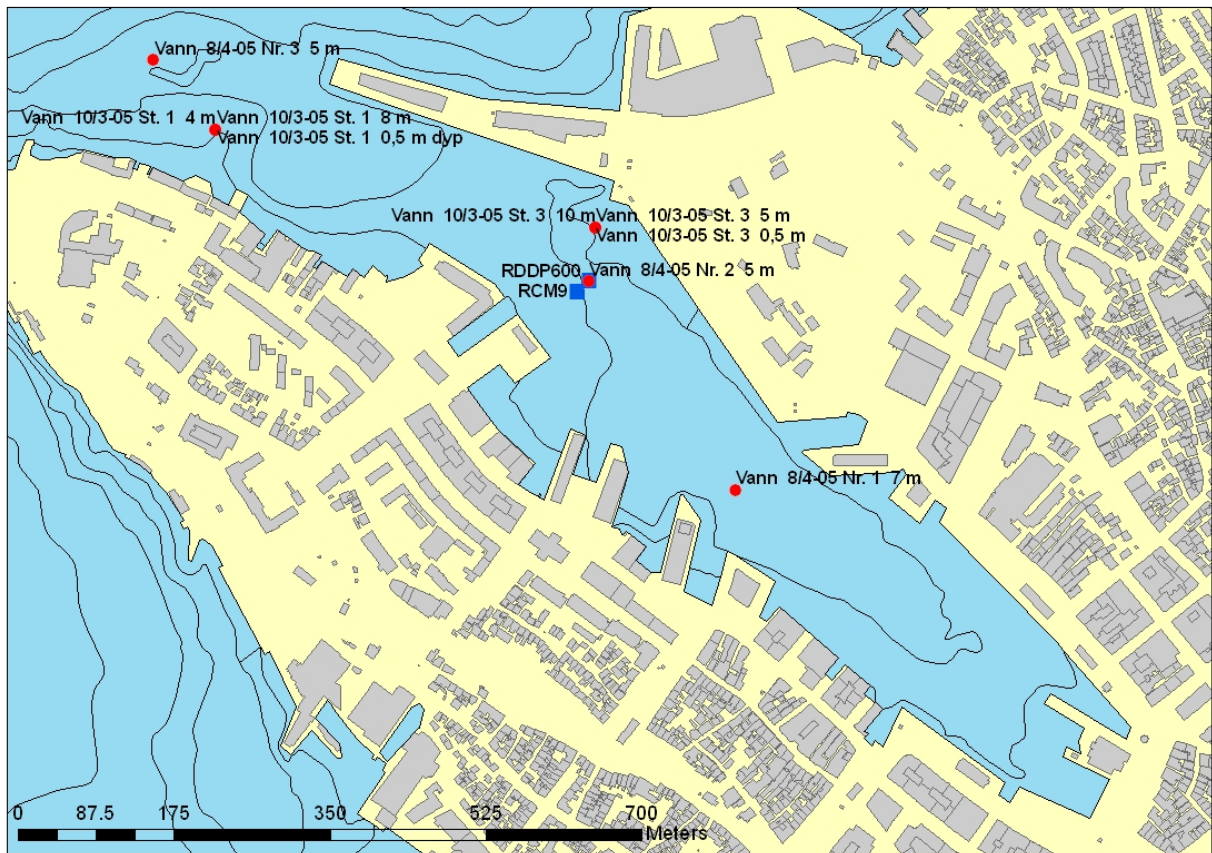
RCM9-måleren ble plassert ca. 1 m over bunnen på 11 meters dyp på terskelen (Figur 6) og gjorde registreringer med 10 minutters intervall. Den registrerte strømrøtningen og styrken er en middelvei gjennom en måleperiode på 10 minutter, mens turbiditetsmålingene er et øyeblikksbilde med en registrering på et tidspunkt.

RDCP-600 strømmåleren ble satt ut i 11 m dyp og registrerte med 10 minutters intervall. Måleren har 3 registreringssensorer. Den ene sensoren ble innstilt på registrering i 20 stk. 0,5 m tykke vannlag (celler) mellom overflaten og bunn. Cellene overlappet hverandre med 50 %. En annen registrerte 10 stk. 1 m tykke vannlag og den tredje registrerte i bunnvannet (2-4 m oversedimentoverflaten). På RDCPen ble det montert 2 turbiditetssensorer. En ved RDCP-hodet og på en ekstra holder ca. 1 meter til side på rammen (Figur 5). Sensoren ved RDCP-hodet sto ca 1 meter over bunnen, mens sensoren på den ekstra holderen sto ca. 15 cm over sedimentoverflaten. Dette ble gjort for å undersøke forskjellen i partikkelmengde i den nedre meteren.

Plasseringen av de ulike instrumentene er vist i Figur 6.



Figur 5. Oppsett RCM9 og RDCP600 instrumenter på tokt februar 2005.



Figur 6. Plassering av sedimentfeller, strømrigger og stasjoner for vannprøver i Vågen.

Tabell 4 viser koordinatene (WGS84) der strømmålere ble plassert.

**Tabell 4.** Oversikt over koordinater der strømmålingsutstyret ble satt ut

Instrument	Nord	Øst	Dyp (m)
RDDP600	60°23.987	5°18.834	11
RCM9	60°23.980	5°18.820	11

## 2.2 Kjemiske analyser

De kjemiske analysene som ble gjennomført er beskrevet i det følgende. Alle analyser ble utført på NIVAs laboratorium etter standard, akkreditert metode (ihht. NS-EN45001 og ISO/IEC Guide 25).

### 2.2.1 Vannprøver

Vannprøver ble hentet opp ved to tidspunkter (Tabell 3) og analysert med hensyn på TSM (totalt suspendert materiale). I tillegg ble vannprøven fra 5 m dyp fra ytre del av Vågen analysert med hensyn på kvikksølv (Hg), bly (Pb), krom (Cr), kadmium (Cd) og PCB<sub>7</sub>.

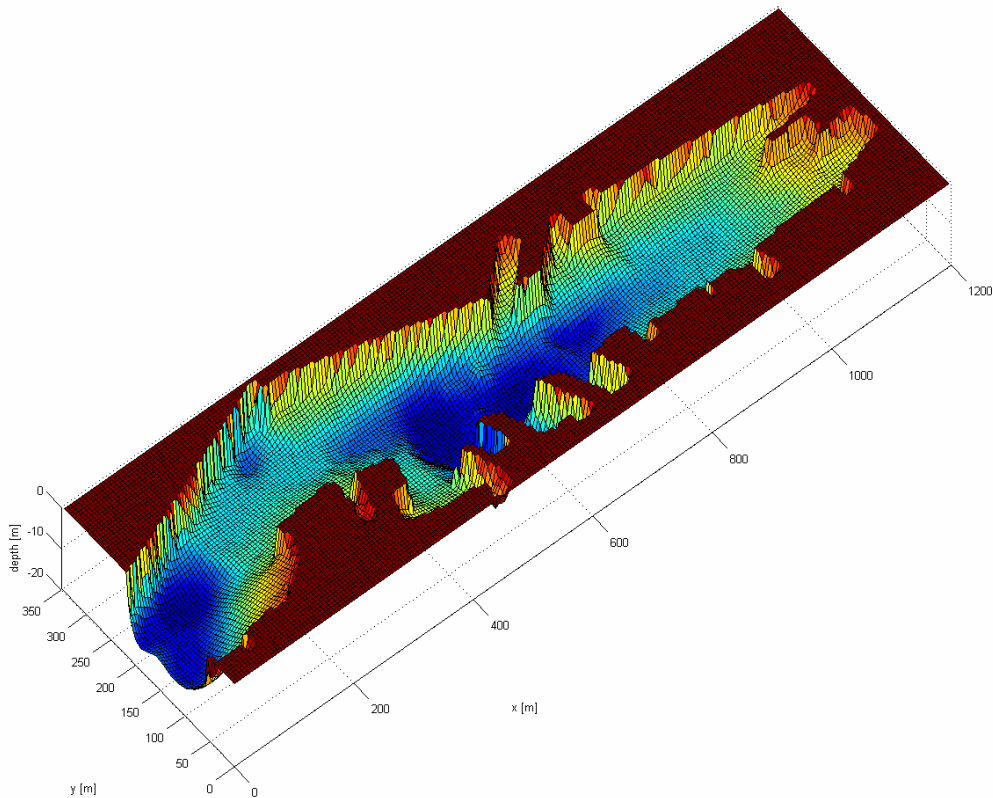
### 2.2.2 Sedimentfeller

Materialet fra sedimentfellene (Vågen indre og Vågen ytre) ble analysert med hensyn på TOC (total organisk stoff), polyklorerte bifenyler (PCB<sub>7</sub>), kvikksølv (Hg), bly (Pb), krom (Cr) og kadmium (Cd).

## 2.3 Strømmodellering (MITgcm)

Den tredimensjonale generelle sirkulasjonsmodellen MITgcm (Marshall et al, 1997) ble brukt for å beregne strømmningen i Vågen. Modellen løser de fullstendige (ikke-hydrostatiske) Navier-Stokes ligninger med endelig volum-metoden (finite volume method).

For beregningene ble Vågen delt inn i bokser, med dimensjonene 5\*5\*0.5 m (Figur 7). Modellområdet ble også forlenget 2 km ut i Byfjorden, Dette ble gjort for å få grensebetingelsene et godt stykke bort fra modellområdet, slik at støy fra ufullstendige grensebetingelser ikke skal forstyrre resultatene i det sentrale området, samt for å gi vinden en tilstrekkelig lang avstand for å generere strøm i overflaten.



**Figur 7.** Nettverk (grid) for modelleringene. Nettverket har 240\*70\*40 noder. Den horisontale oppløsningen er 5 m og den vertikale 0.5 m.

De turbulente prosesser som skjer på en mindre skala enn de enkelte gridvolumene (subgrid processes), må parametriseres. Dette ble gjort ved et såkalt Smagorinsky-skjema som anpasser den turbulente viskositeten og diffusiviteten til den sjiktning og de strømhastigheter som modellen beregner (se f eks Stenström, 2003).

På den åpne grensen mot Byfjorden ble et såkalt Orlanski-vilkår brukt. Vilkåret tillater bølger som kommer innefra modellområdet å passere grensen uten at reflekteres, samtidig som f eks tidevannbølger kan genereres på grensen (Stenström, 2003).

Modellen ble drevet av en tidevannsamplitude på  $\pm 0.3$  m samt av varierende vind (Tabell 5).

Beregningene ble gjort for et døgn, det vil si to tidevannssykluser. Sedimenttransportmodellen (se nedenfor) ble initiert etter en tidevannssyklus, slik at en tidevannssyklus ble brukt for "spin-up".

## 2.4 Sedimenttransportmodellen (MITgcm-sed)

En sub-modell ble implementert i MITgcm for å beskrive transport av partikler. Modellen beskriver transport (adveksjon og diffusjon) av sedimenter på samme måte som for salt, men i tillegg har sedimentene en synkehastighet, slik at de i stillestående vann vil sedimentere på bunn. Grensevilkåret ved bunn gir resuspensjon av partikler hvis vannhastigheten ved bunn er større enn en gitt kritisk hastighet og sedimentasjon ellers (Kuhrt et al, 2004, Zheng et al, 2003).

Sedimenttransportmodellen gir en sterkt forenklet beskrivelse av sedimenttransportprosessene, og tar ikke hensyn til interaksjon mellom partikler og biologiske prosesser.

Modellen tar heller ikke hensyn til partikler tilført fra land via avløpsvann eller overvann. Dette medfører høyere modellerte partikkelkonsentrasjoner i bunnvannet, mens det i virkeligheten også kan forekomme høye partikkelkonsentrasjoner i overflatevannmassene.



Modellen tar ikke heller hensyn til den ekstra resuspensjon som inntreffer ved fartøysanløp grunnet propelloppvirvling.

Det er lagt inn en enkel begrensing på resuspensjonshastigheten gjennom at konsentrasjonen i vannet nærmest bunn ikke tillates å overskride et gitt verdi,  $10 \text{ g/m}^3$ . Dette er nødvendig ettersom det i modellen antas at tilgangen på løse sedimenter er ubegrenset.

Tre ulike miljøpåvirkninger ble modellert, ett med kun tidevannspåvirkning og to med tidevanns og vindpåvirkning, (8 og 15 m/s vindhastighet inn fjorden). I tillegg ble to ulike sedimenttyper brukt (Tabell 1).

**Tabell 5.** Modellparametrer for de ulike simuleringene.

Vind [m/s]	Tidevann [m]	Sedimenttype	Kritisk bunnstrøm [cm/s]	Synkehastighet [cm/s]
0	±0.3	Fin sand	1.4	0.5
8	±0.3	Fin sand	1.4	0.5
15	±0.3	Fin sand	1.4	0.5
0	±0.3	Silt	0.7	0.005
8	±0.3	Silt	0.7	0.005
15	±0.3	Silt	0.7	0.005

## 2.5 Beregning av total spredning av miljøgifter fra Vågen til Byfjorden

Transport av miljøgiftene PCB<sub>7</sub>, kvikksølv, bly og kadmium fra Vågen til byfjorden beregnes ved å legge sammen bidragene fra biodiffusjon ( $F_{diff}$ ), skipsoppvirvling ( $F_{skip}$ ), og transporten av partikkelbundne miljøgifter ( $F_{part}$ ) etter følgende ligning:

$$Total\text{-transport} = F_{diff} + F_{skip} + F_{part}$$

der

$F_{diff}$  = Direkte transport av løste miljøgifter fra sediment til vann (Biodiffusjon). Disse tallene er hentet fra tidligere beregninger i Vågen (NGI Teknisk notat: Risikovurdering, Bergen havn, Vedlegg G). Vi antar at alle miljøgifter som transporteres ut av sedimentene via biodiffusjon, transporteres ut av Vågen.

$F_{skip}$  = Mengden miljøgifter som transporteres ut av Vågen som følge av skipsoppvirvling. Disse tallene er hentet fra tidligere beregninger i Vågen (NGI Teknisk notat: Risikovurdering, Bergen havn, Vedlegg G). Vi antar at det beregnede bidraget fra skipsoppvirvling, transporteres ut av Vågen.

$F_{part}$  = mengden miljøgifter som transporteres med partikler ut av Vågen (se 2.5.1).

### 2.5.1 Beregning av mengden miljøgifter som transporteres med partikler ut av Vågen

Mengden suspendert materiale bestemmes ut fra analyser av totalt suspendert materiale (TSM) i vannprøver med støtte fra turbiditetsmålinger og resultater fra sedimenttransportmodellen. Tabell 6 gir en oversikt over vannutskiftning, miljøgiftkonsentrasjonen i det suspenderte materiale og mengden suspendert materiale som er benyttet i beregningen av  $F_{part}$ . Under forhold med sterk vind (15 m/s) benyttes gjennomsnittlig miljøgiftkonsentrasjon i overflatesedimentene fra indre del av Vågen som mål på miljøgiftkonsentrasjonen i partikler i suspensjon. Grunnen er at sterk vindpåvirkning trolig vil erodere de meget sterkt forurensede sedimentene i indre del av Vågen.

Den typiske transporten av forurensing med partikler fra Vågen og ut i Byfjorden kan beregnes ved ligningen:

$$F_{part} = V * TSM * c$$

Der

- V= volumtransporten ( $m^3/døgn$ ). Denne beregnes på grunnlag av vannvolum og oppholdstid.
- TSM= konsentrasjonen av suspendert materiale ( $g/m^3$ ) i vannmassen. Dette baseres på målte verdier og resultater fra sedimenttransportmodellen.
- c = miljøgiftkonsentrasjon i suspendert materiale.

**Tabell 6.** Oversikt over inngangsdata til beregning av miljøgiftfluksen vra vågen med partikler( $F_{part}$ )

Vannutskifting:	7 $m^3/s$ ved kun tidevannspåvirkning
	16 $m^3/s$ ved svak vind (8 m/s))
	60 $m^3/s$ ved svak vind (15 m/s)
Karakteristisk konsentrasjon av TSM:	0,5 $g/m^3$ ved kun tidevannspåvirkning
	1 $g/m^3$ ved svak vind (8 m/s)
	5 $g/m^3$ ved sterk vind (15 m/s)
Karakteristisk miljøgiftkonsentrasjoner	kun tidevannspåvirkning data fra ytre sedimentfelle (Tabell 8)
	ved svak vind (8 m/s) data fra ytre sedimentfelle (Tabell 8)
	ved sterk vind (15 m/s) gjennomsnittlig miljøgiftkonsentrasjoner i indre del av Vågen (Data fra tiltaksplan forurensede sedimenter fase II)

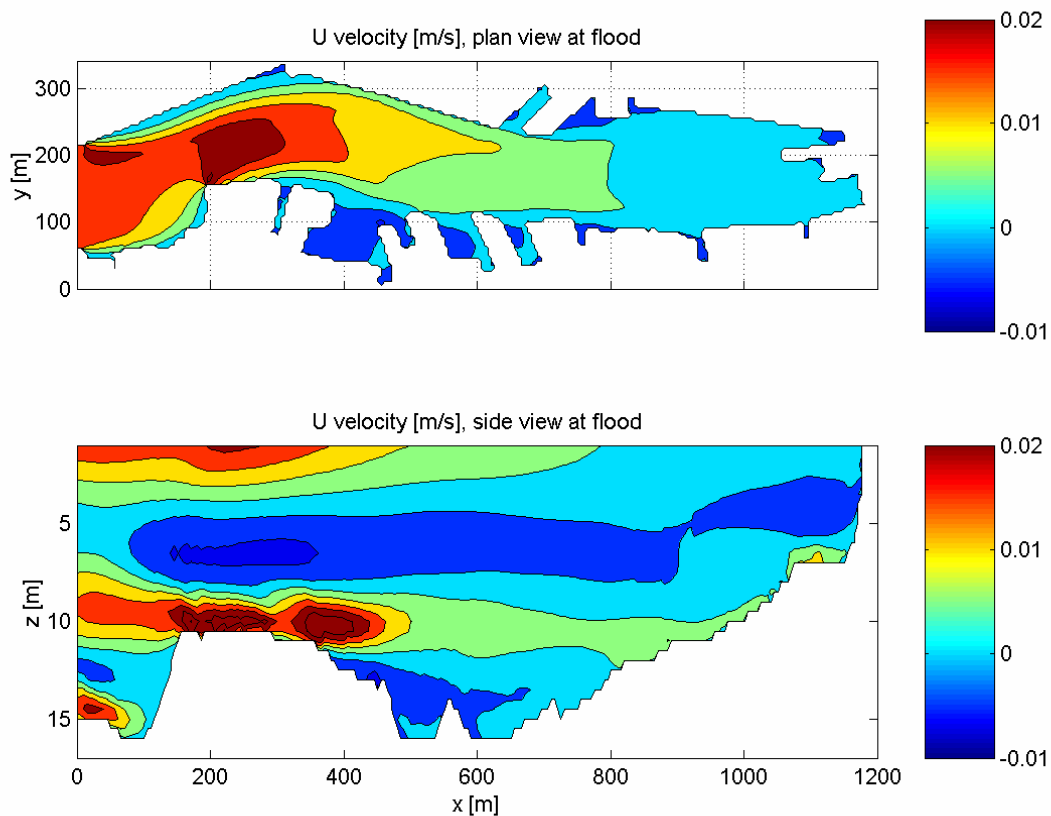
## 3. Resultater

### 3.1 Strømmodellering

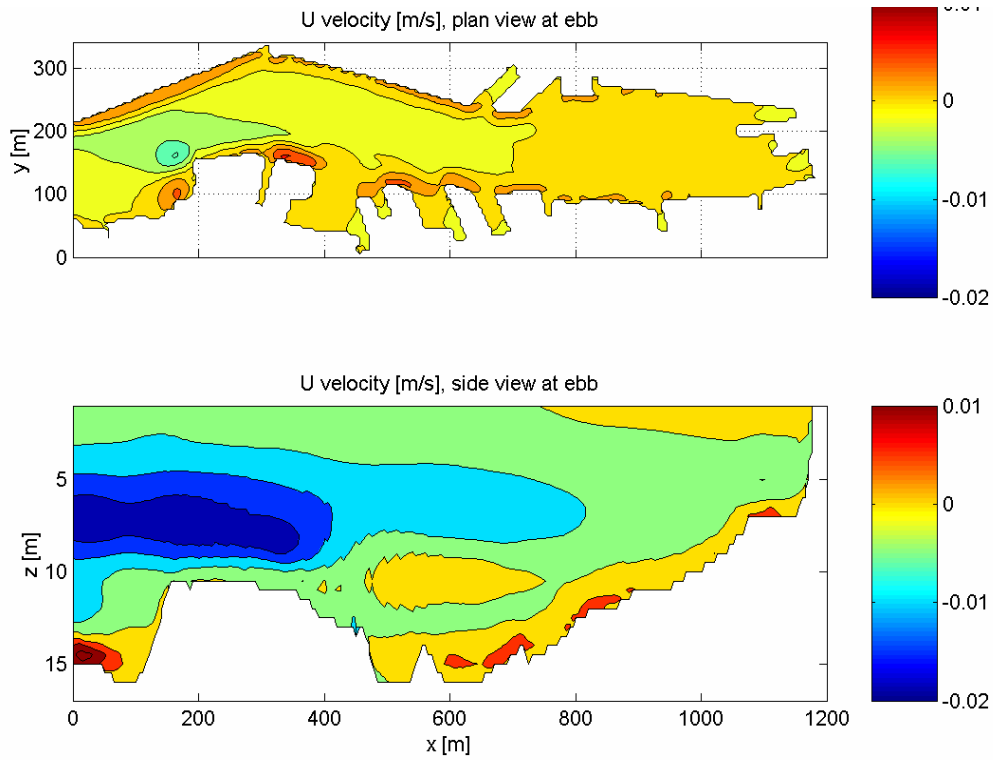
Figur 8 og

Figur 9 viser det modellerte strømningsmønsteret ved kun tidevannspåvirkning. Tidvannet gir opphav til svake strømmer i størrelsesorden 2 cm /s. I en flat kanal uten bunnfriksjon er tidevannsstrømmen konstant med dypet. Topografien og bunnfriksjonen gjør bildet mer komplisert slik at en får variasjoner i dypet, og i enkelte tilfeller en motgående strøm i dypet. Nettostrommen er til tross for dette inn i Vågen ved flo sjø (Figur 8) og ut av Vågen ved fjære sjø (Figur 9). Ved kun tidevannspåvirkning blir hastighetene lengst inn i Vågen lik null.

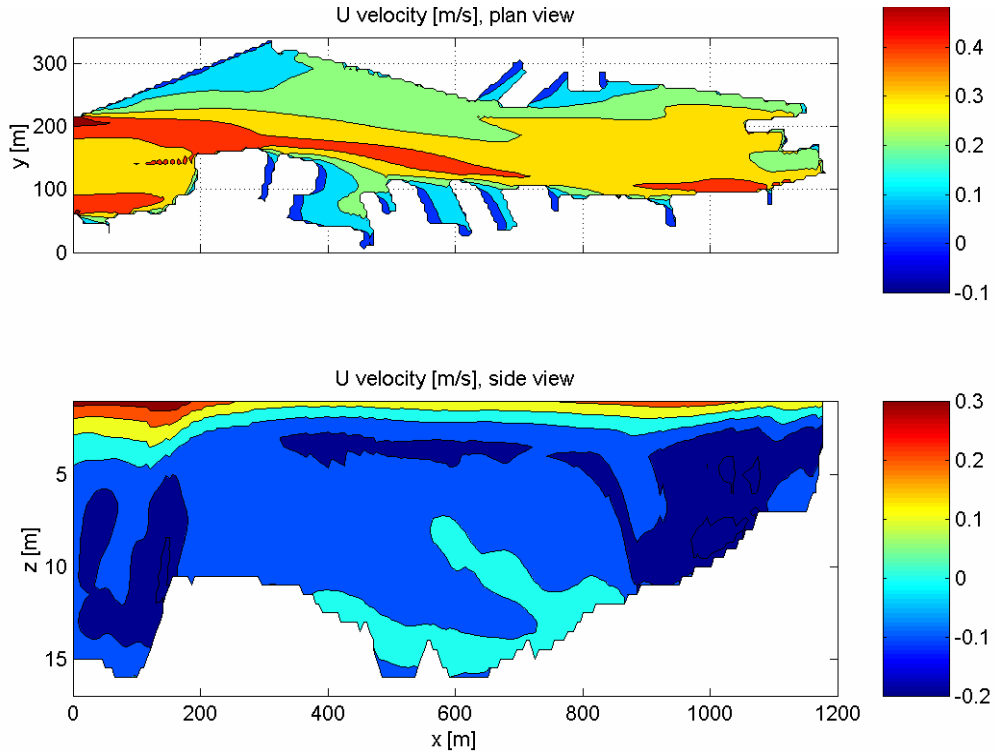
Figur 10 viser det modellerte strømningsbildet ved tidevannspåvirkning og sterk vind inn Vågen (15 m/s). Vinden gir opphav til en tynn overflatestrøm inn Vågen som i sin tur gir opphav til en utadgående kompensasjonsstrøm i bunnvannet. Kompensasjonsstrømmen er tykkere og har lavere hastigheter enn overflatestrømmen. Kompensasjonsstrømmen vil til tross for dette transportere store mengder suspendert materiale ut av Vågen.



**Figur 8.** Strømhastighet i m/s ved kun tidevannspåvirkning (ingen vind) i Vågen. Figuren viser forholdene ved flo sjø (netto transport inn Vågen, positiv retning). Maksimal hastigheter oppstår over terskelen der tverrsnittarealet er minst.. Hastighetene er dog lavere med ca. 2 cm/s på terskelen. Innerst i Vågen står i prinsippet vannet stille.



**Figur 9.** Strømhastighet i m/s ved kun tidevannspåvirkning (ingen vind) i Vågen. Figuren viser forholdene ved fjærende sjø (netto transport ut Vågen, negativ retning).

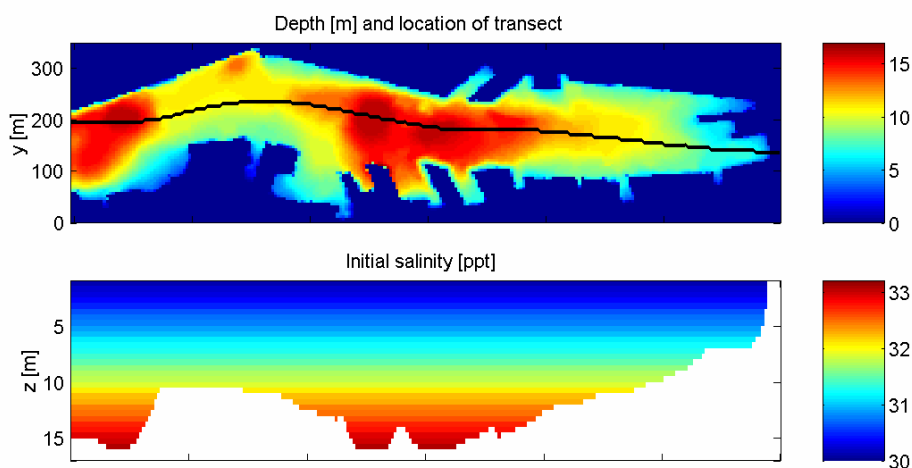


**Figur 10.** Strømhastighet i m/s ved tidevannspåvirkning og sterk vind (15 m/s fra nord vest inn Vågen) i Vågen. De vindgenererte hastighetene dominerer sterkt. Maksimale hastigheter opp mot 50 cm/s oppstår i en tynn innadgående strøm i overflaten. Kompensasjonsstrømmen i bunnvannet er

betydelig tykkere enn overflatestrømmen, samtidig som hastighetene i de utadgående bunnvannet er noe lavere (10-20 cm/s).

### 3.2 Modellering av partikkeloppvirvling (MITgcm-sed)

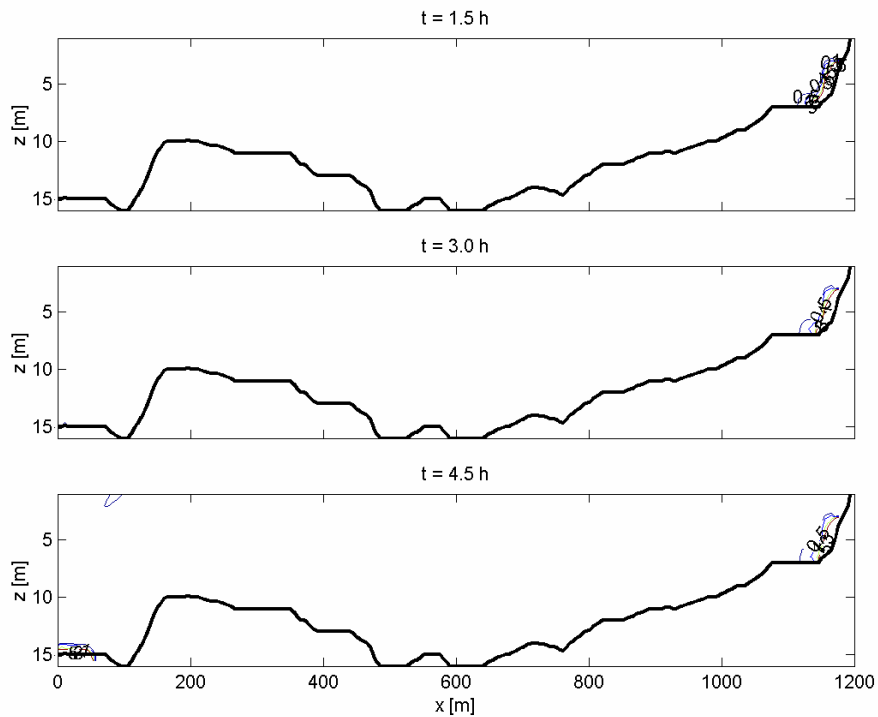
Resultatene fra modelleringene av sedimenttransport er presentert i figurene 12-16 nedenfor. Samtlige resultater er plottet langs transektet som vises i Figur 11 og som tilsvarer den dypeste passasjen fra Byfjorden og inn til Vågsbunnen.



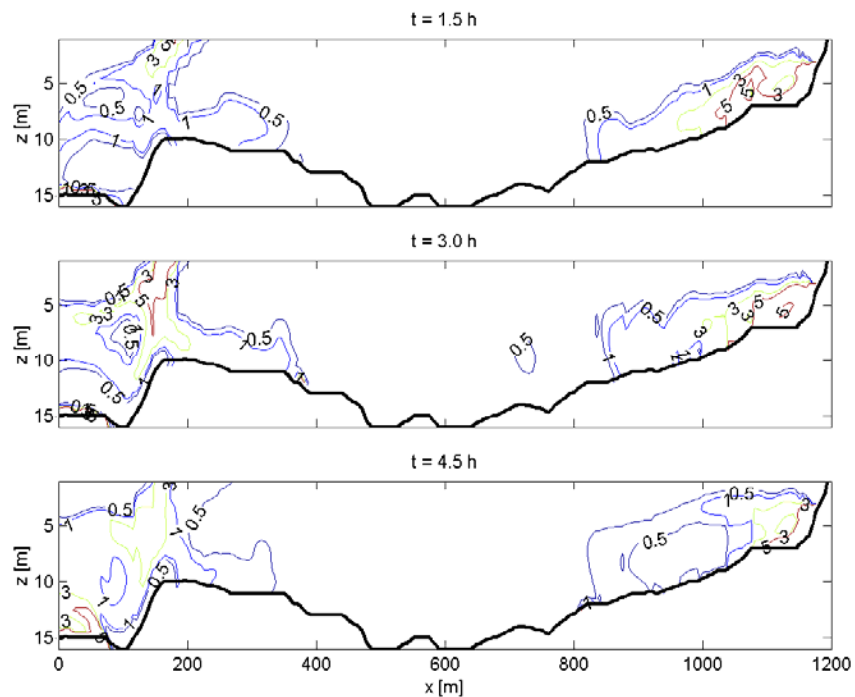
**Figur 11.** Øverst: Topografi og det transektet som alle vertikale snitt er plottet etter. Nederst: Saltholdighet (sjiktning) ved modelleringenes begynnelse.

For sedimenter av typen fin sand kreves høye vindhastigheter, opp mot 15 m/s (Figur 13), for at partiklene skal holdes i suspensjon. Ved lavere vindhastigheter fås en viss resuspensjon lengst inn i Vågen, men partiklene sedimenterer straks igjen og spres ikke (Figur 12).

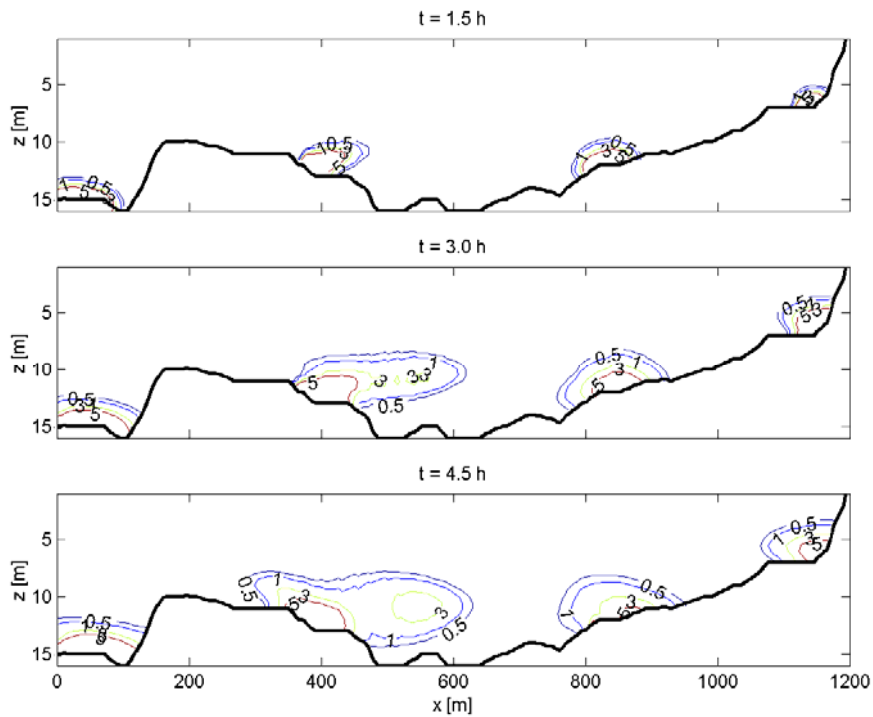
For finpartikler fås spredning også ved lavere vindhastigheter (Figur 15). Også i tilfellet med kun tidevannspåvirkning (Figur 14) fås viss resuspensjon av finpartikler, men spredningen blir forholdsvis lokal og transporten ut fra Vågen blir liten. Med sterk vind (Figur 16) fås svært høye konsentrasjoner av finpartikler, over  $5 \text{ g/m}^3$ , i store deler av vannsøylen. Transporten ut fra Vågen har også betydning i dette tilfellet. I virkeligheten fås antagelig lavere konsentrasjoner ettersom tilgangen på finpartikler på bunn er begrenset.



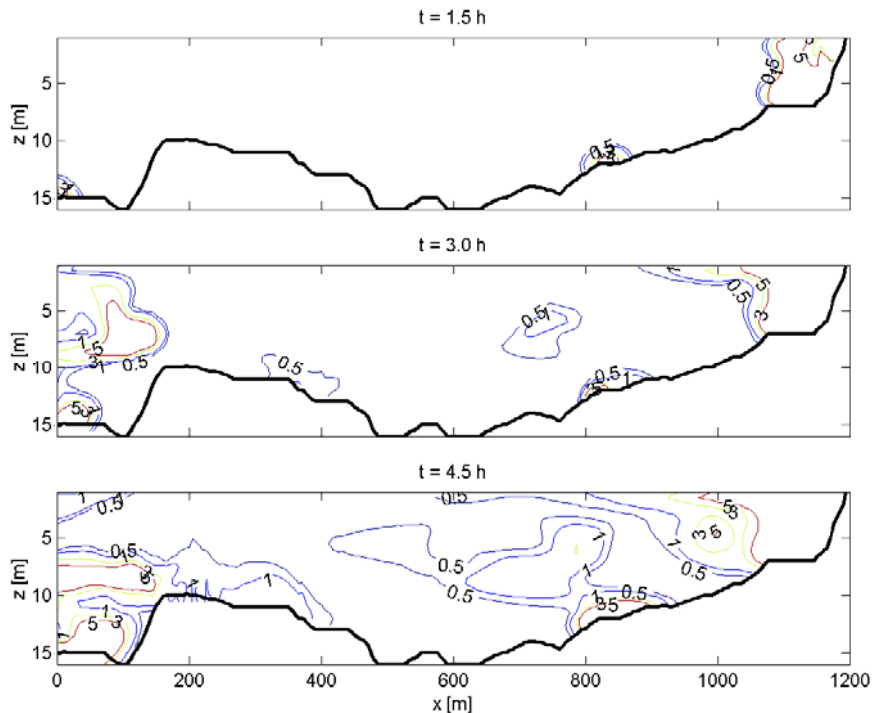
**Figur 12.** Konsentrasjon [g/m<sup>3</sup>] av sedimenter 1.5, 3.0 og 4.5 timer etter sedimenttransportmodellens initiering. Partiklene motsvarer fin sand med kritisk skjærhastighet 1.4 cm/s og sedimentasjonshastighet 0.5 cm/s. Vinden er 8 m/s inn i Vågen. Resuspenderte partikler finnes kun i ett begrenset område lengst inn for denne vindstyrke.



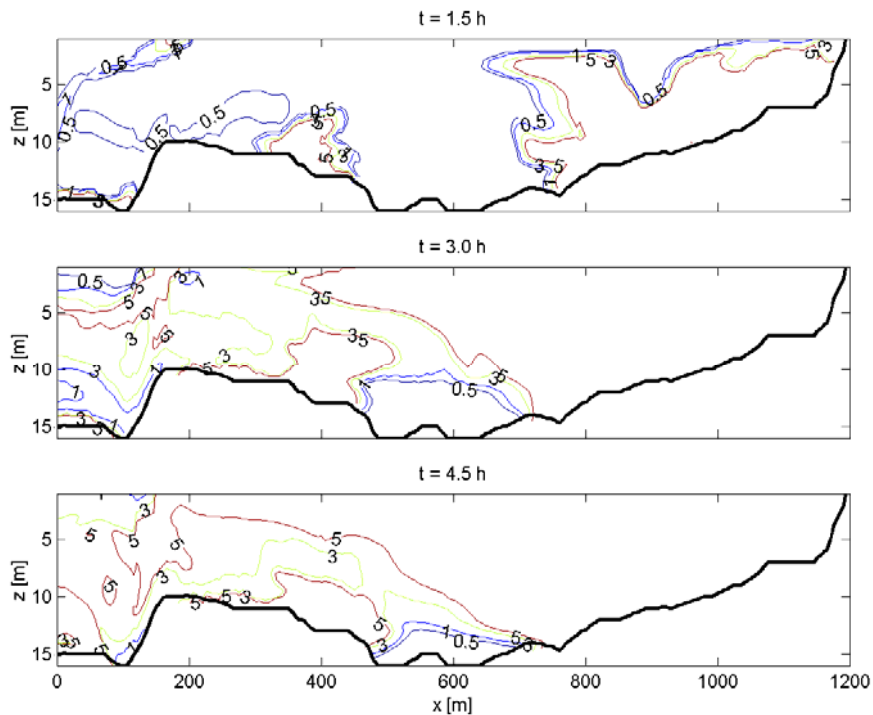
**Figur 13.** Konsentrasjon [g/m<sup>3</sup>] av sedimenter i vannmassene etter modellering i 1.5, 3.0 og 4.5 timer. Partiklene motsvarer fin sand med kritisk skjærhastighet 1.4 cm/s og sedimentasjonshastighet 0.5 cm/s. Vinden er 15 m/s inn i Vågen.



**Figur 14.** Konsentrasjon [g/m<sup>3</sup>] av sedimenter 1.5, 3.0 og 4.5 timer etter sedimenttransportmodellens initiering. Finpartikler (non-settlable) med kritisk skjærhastighet 0.7 cm/s og sedimentasjonshastighet 0.005 cm/s. Kun tidevann (ingen vind).



**Figur 15.** Konsentrasjon [g/m<sup>3</sup>] av sedimenter 1.5, 3.0 og 4.5 timer etter sedimenttransportmodellens initiering. Finpartikler (non-settlable) med kritisk skjærhastighet 0.7 cm/s og sedimentasjonshastighet 0.005 cm/s. Vinden er 8 m/s inn Vågen.



**Figur 16..** Konsentrasjon [ $\text{g/m}^3$ ] av sedimenter 1.5, 3.0 og 4.5 timer etter sedimenttransportmodellens initiering. Finpartikler (non-settlable) med kritisk skjærhastighet 0.7 cm/s og sedimentasjonshastighet 0.005 cm/s. Vinden er 15 m/s inn Vågen.

### 3.3 Strømmålinger

Målingene som beskriver vannmasser og strømningsforholdene i Vågen ble utført i en periode på 60 dager. Datamaterialet er svært stort og vi velger derfor å presentere hovedtrendene. For noen av parametrene er det valgt å se nærmere på utvalgte tidsperioder.

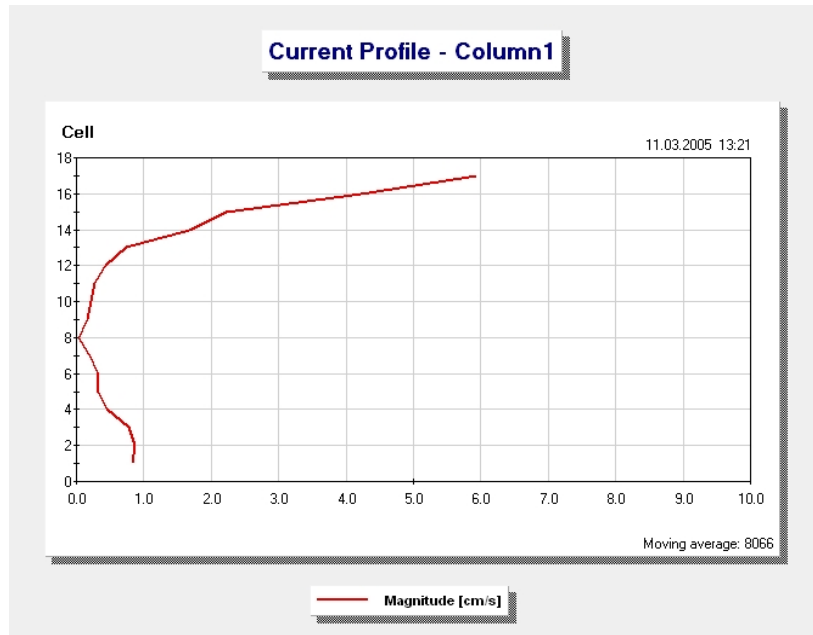
Strømmålingene vil sammen med den hydrodynamiske modelleringen (MITgcm) beskrive strømforhold, vannutskifting og vannsirkulasjonen i Vågen. Dette vil være en viktig parameter ved beregningen av hvor mye miljøgifter som transporteres ut av Vågen.

Strømmålingene viser at overflatevannmassene har en gjennomsnittshastighet på ca. 6 cm/s (Figur 17) med en dominerende retning nordvest/sørøst ( $330$  og  $130^\circ$ ) inn fjorden (Figur 19). Maksimal registrert strømhastighet i overflatevannmassene var ca. 70 cm/s med en retning inn Vågen ( $145^\circ$ ). Strømregistreringene er en middelvei gjennom en 10 minutters måleperiode.

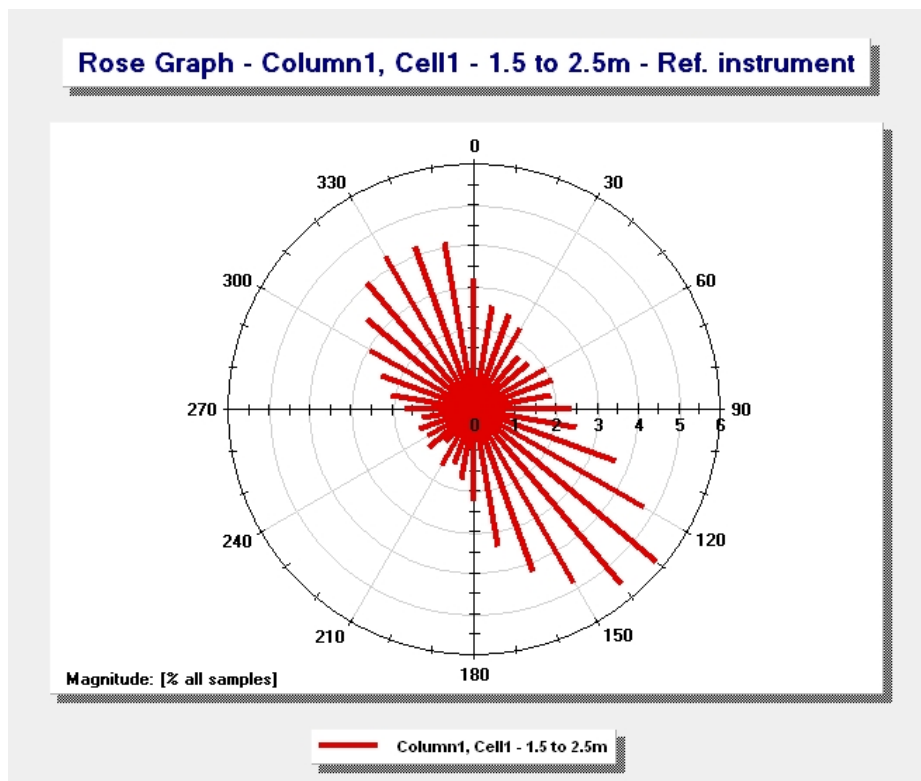
Bunnvannet (ca. 1-2 m over sjøbunn) hadde i måleperioden en gjennomsnittshastighet på ca. 1 cm/s og dominerende retning nordvest/sørøst ut fjorden (Figur 18). Maksimal registrert strømhastighet i bunnvannmassene var ca. 19 cm/s med en retning inn Vågen ( $145^\circ$ ).

Gjennom hele måleperioden på 2 måneder hadde overflatevannmassene generelt høyere strømhastigheter enn bunnvannet (Figur 20). I overflaten varierte strømhastighetene generelt mellom ca 20 og 50 cm/s, mens strømhastigheten i bunnvannet generelt var lavere enn 10 cm/s.

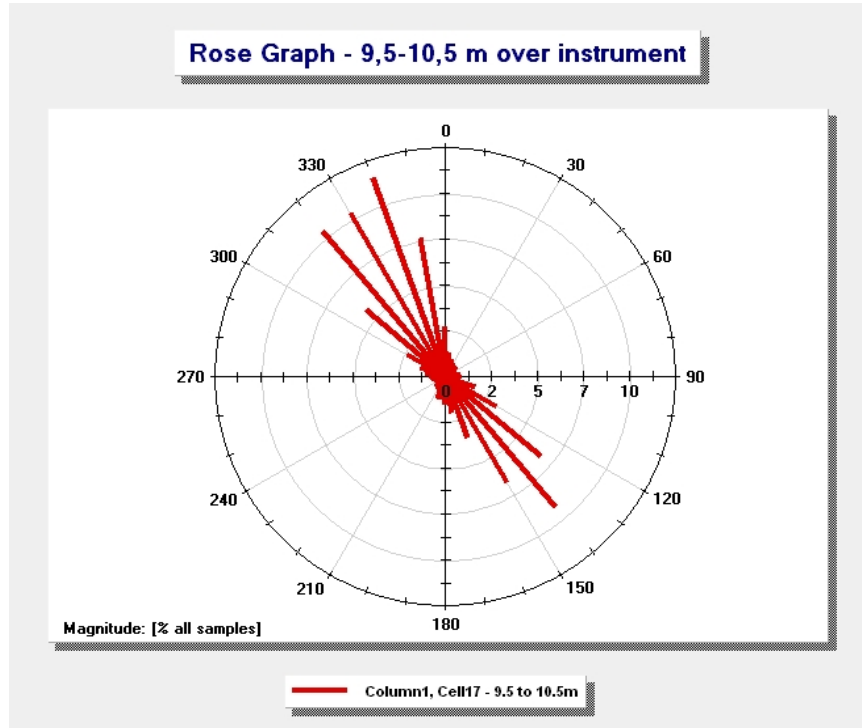




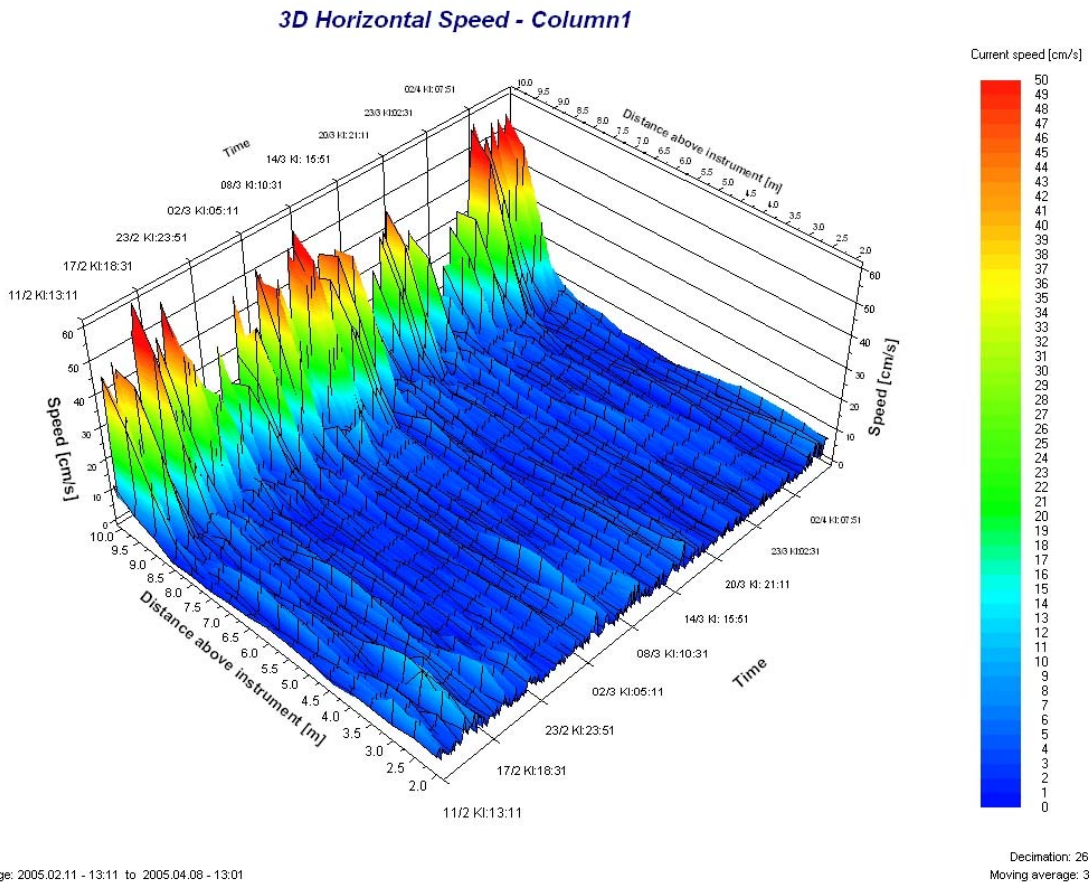
**Figur 17.** Gjennomsnittlig strømstyrke gjennom hele måleperioden på 2 mnd. Cell 1 er ca 2 meter over bunnen, mens Cell 18 er overflatevannmassene (0-0,5 m vanddyp).



**Figur 18.** Dominerende strømretning i bunnvannmassene. Dominerende retning inn Vågen (ca 140°).

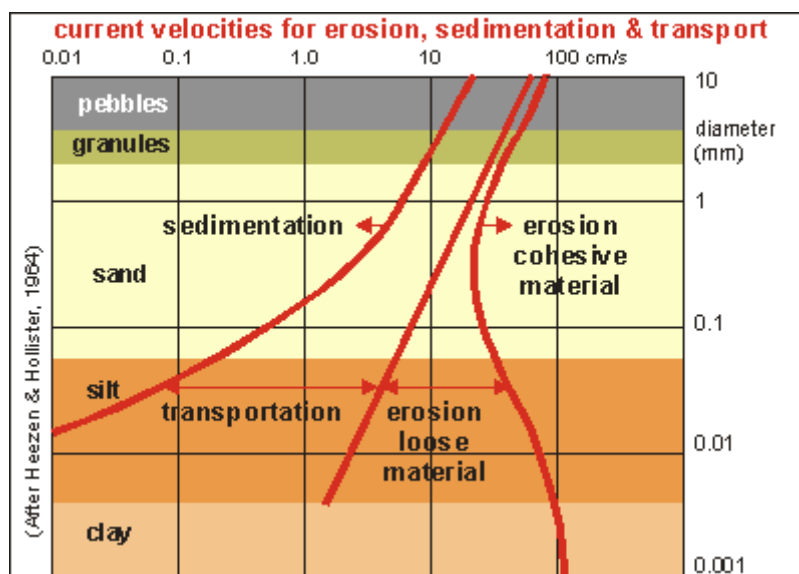


**Figur 19.** Dominerende strømretning i overflatevannmassene. Dominerende retning ut Vågen (ca 330°).

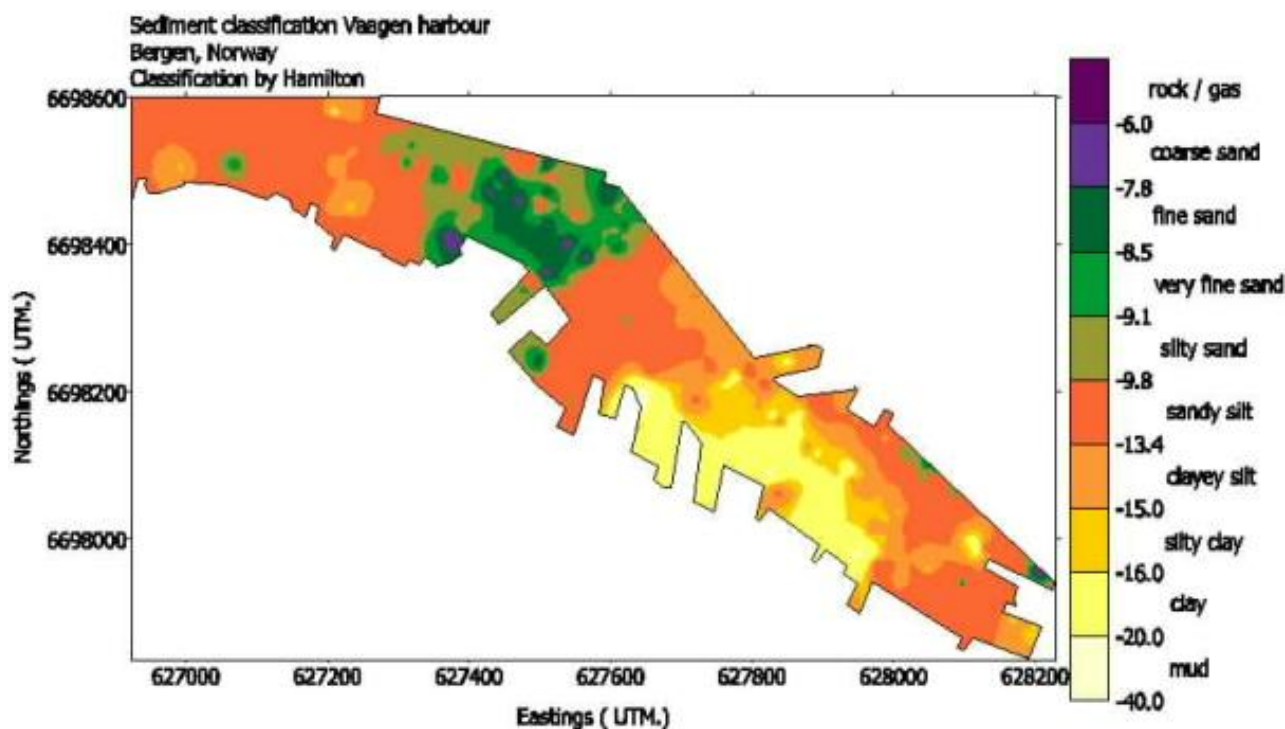


**Figur 20.** Horisontal strømshastighet gjennom hele måleperioden fra 11/2-05 til 8/4-05. Ulike farge indikerer ulik strømshastighet (rød = ”sterk” strøm, blå = ”svak” strøm). Det forekommer enkelte perioder der strømshastigheten i overflatevannmassene er mye sterkere enn i bunnvannet.

De observerte strømhastighetene på terskelen i Vågen medfører i mange tilfeller at den kritiske skjærstyrken til finkornige sedimenter (silt og leire) overskrides (Tabell 5). Figur 21 illustrerer sammenhengen mellom strømhastighet og erosjon av sedimenter og viser at erosjon av finsand skjer allerede ved strømhastigheter på ca. 10 cm/s. Med de målte strømhastighetene i bunnvannet vil en da forvente at sedimentene på terskelen består av partikler grovere enn fin sand. Seismiske undersøkelser i Vågen (Figur 22) har vist at sedimentene på terskelen i Vågen hovedsakelig består av fin til grov sand. Observasjonen av bunnstrømmer sterkere enn 10 cm/s og grove sedimenter på terskelen indikerer at området ved terskelen er et erosjonsområde og at det ikke avsettes finpartikulært materiale (silt og leire) her.



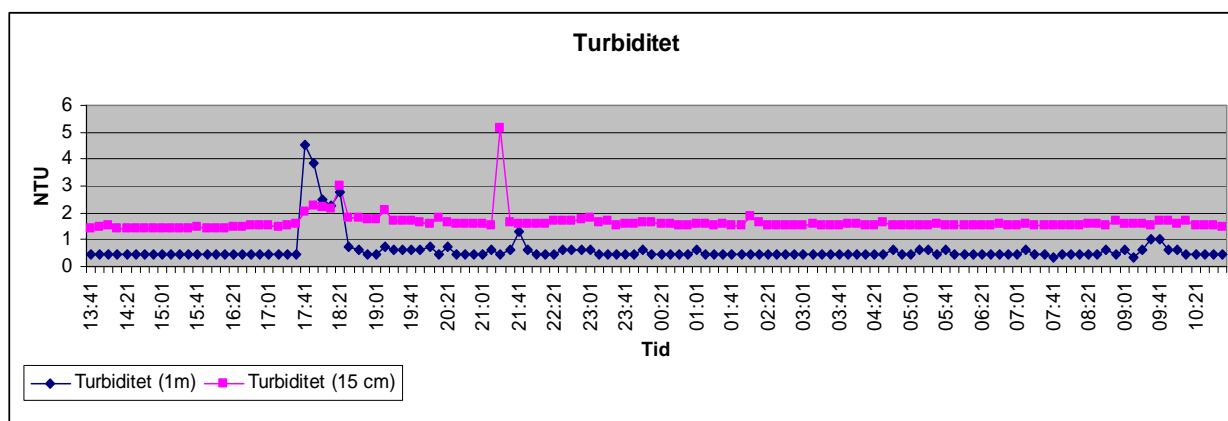
**Figur 21** Sammenhengen mellom erosjon av sedimenter (vist som kornstørrelse) og strømhastighet (figur hentet fra [www.poemsinc.org/oceano/seasand.htm](http://www.poemsinc.org/oceano/seasand.htm)).



**Figur 22.** Klassifisering av ulike typer sedimenter i Vågen, Bergen havn. Figuren er laget av GeoCom v/Taco Wever på bakgrunn av seismiske data tatt under tokt februar 1998 (Wever 1998).

### 3.4 Partikler i vannmassene

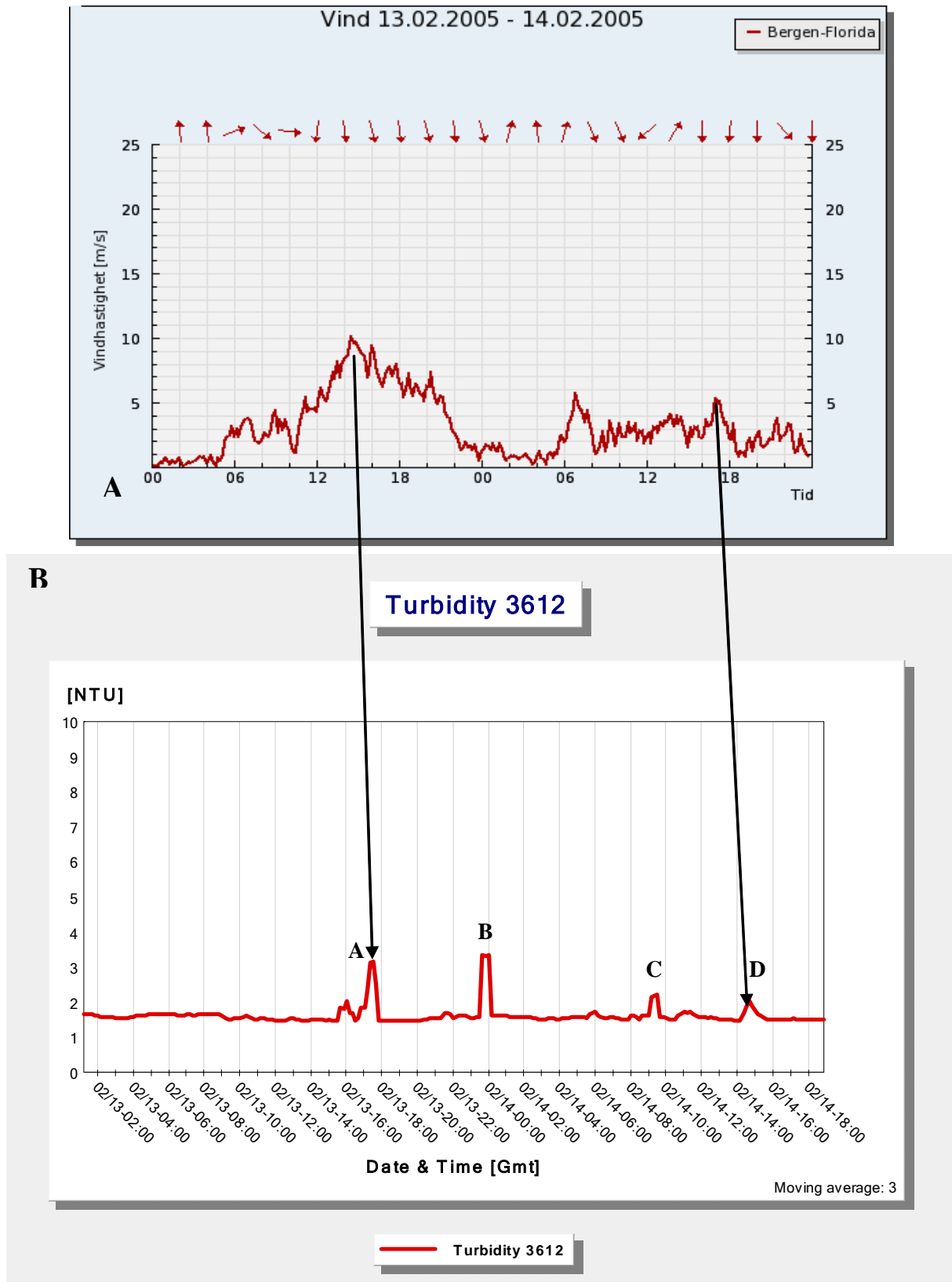
Mengden partikler i vannmassen ble kontinuerlig målt med turbiditetssensorer gjennom hele måleperioden fra 11. februar til 8. april. Generelt var partikkelinnholdet i vannmassene ca. 15 cm over sedimentene høyere enn ca. 1 meter over sedimentene (Figur 23). I løpet av hele måleperioden på 60 dager ble det registrert en rekke turbiditetstopper. Detaljstudier av en 2 døgns periode fra 13/2-05 til 14/2-05 viser at de observerte turbiditetstopperne i noen tilfeller kommer samtidig med en økning i strømhastighet og vindhastighet (toppene A og D, Figur 24). Statistiske analyser av korrelasjon mellom turbiditetsøkninger og sterke strømmer i bunnvannet for hele datasettet på 60 dager gir en svak positiv korrelasjon (0,02). Noe av forklaringen på den svake korrelasjonen kan være at mange av turbiditetstopperne er feilmålinger. I perioder med mye nedbør og dermed avrenning fra landområdene kan partikler transporteres inn i Vågen og føre til økt turbiditet, men dette trenger ikke gi utslag på økt strømhastighet i bunnvannet. I tillegg kan oppvirvling av løse sedimenter som følge av båttrafikk forekomme i dette området. Båttrafikken i Vågen er stor noe som kan føre til mange turbiditetstopper. Datasettet er ikke analysert med tanke på å knytte sammen turbiditetstopper og båtaktivitet. Dette var heller ikke målet med undersøkelsen.



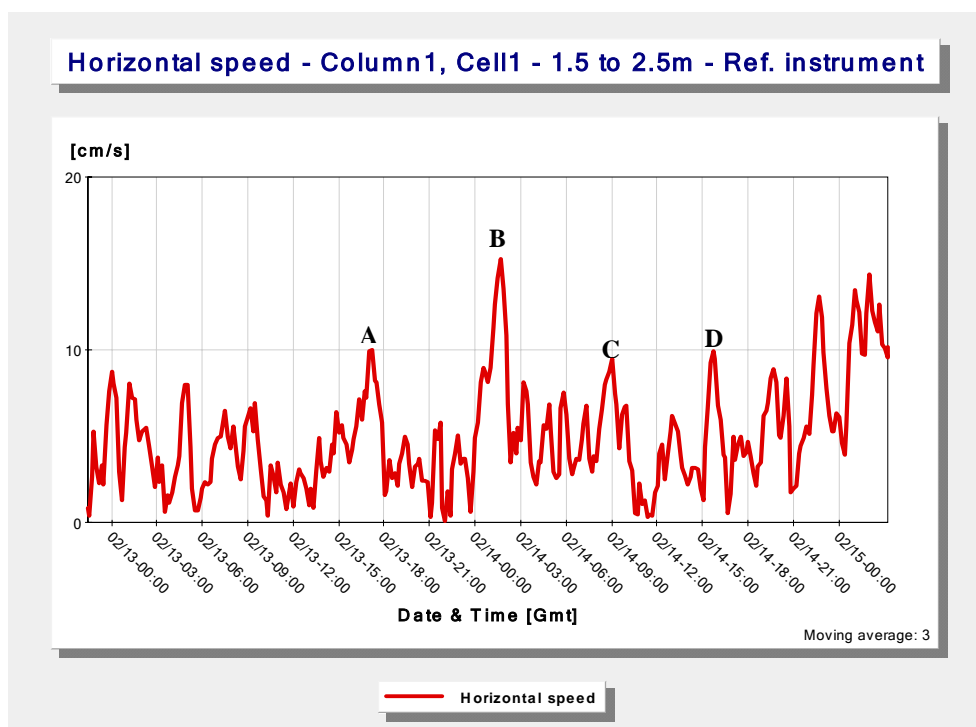
**Figur 23.** Turbiditetsdata i tidsrommet fra 9/3-08 kl 13:41 til 10/3-05 kl 10:21.

Signalstyrkeprofilen som gir en indikasjon på mengden partikler i vannmassene (**Figur 26**), viser at det er høyest partikkelmengde i overflatevannmassene og i bunnvannet. Denne observasjonen støttes også av turbiditetsprofilene fra CTD-målingene i Vågen. Signalstyrkeprofilen viser også at det i perioder forekommer høyere partikkelmengder i hele vannsøylen.

Turbiditetsprofiler målt på 5 stasjoner med CTD ved forskjellig tidspunkt viser jevnt over relativt lav turbiditet (0,5-1 FTU) med generelt noe høyere verdier i overflatevannmassene og bunnvannet. Ved enkelte av målingene ble det observert en økning i turbiditet midt i vannsøylen. Partikkelinnholdet i bunnvannet var også generelt høyere i bunnvannet i ytre del av Vågen enn i indre del (**Figur 27**, **Figur 28**). Den observerte økningen i turbiditet i overflatevannmassene kan skyldes økt tilførsel av turbid ferskvann fra overflateavrenning og/eller overløp fra gamle kloakktløp.

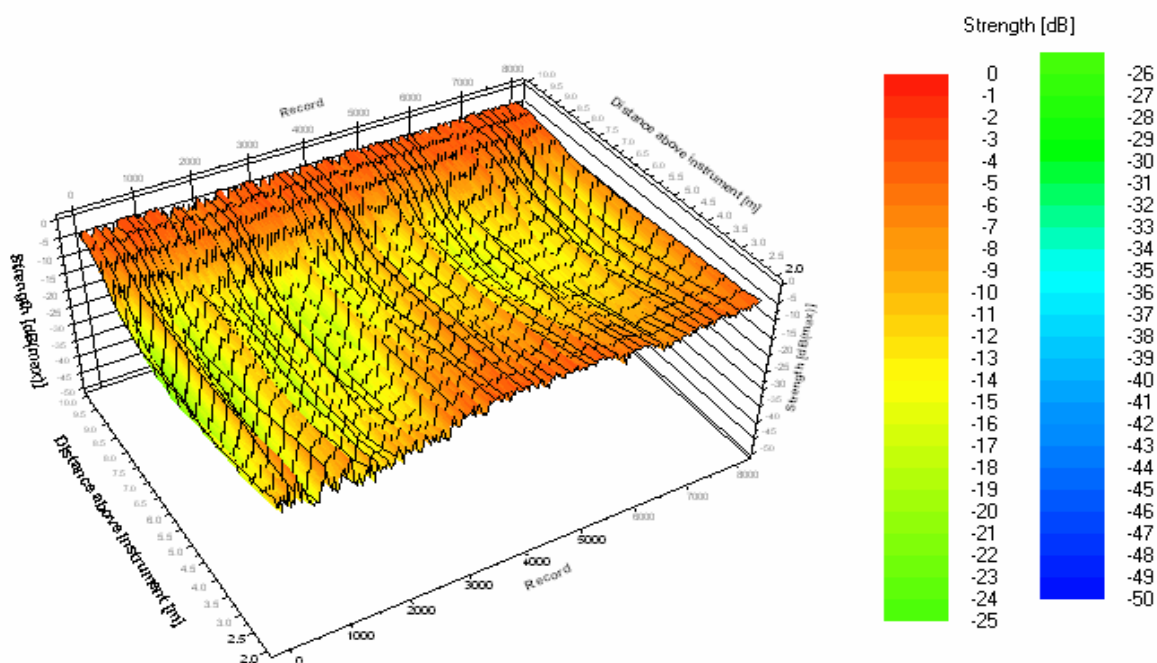


**Figur 24.** Sammenhengen mellom vindhastighet (A) og turbiditet (B) i perioden 13-14/2-2005. 2 av de observerte turbiditetstoppene oppstår samtidig med perioder med vind rettet inn Vågen.



**Figur 25.** Strømforholdene ved i bunnvannet i perioden fra 13/2-05 kl 00.00 til 15/2-05 kl 00.00. Målingene er gjort ca. 1,5 cm over sedimentene. Bokstavene A, B, C og D representerer de sammen toppene som er vist i figur 24.

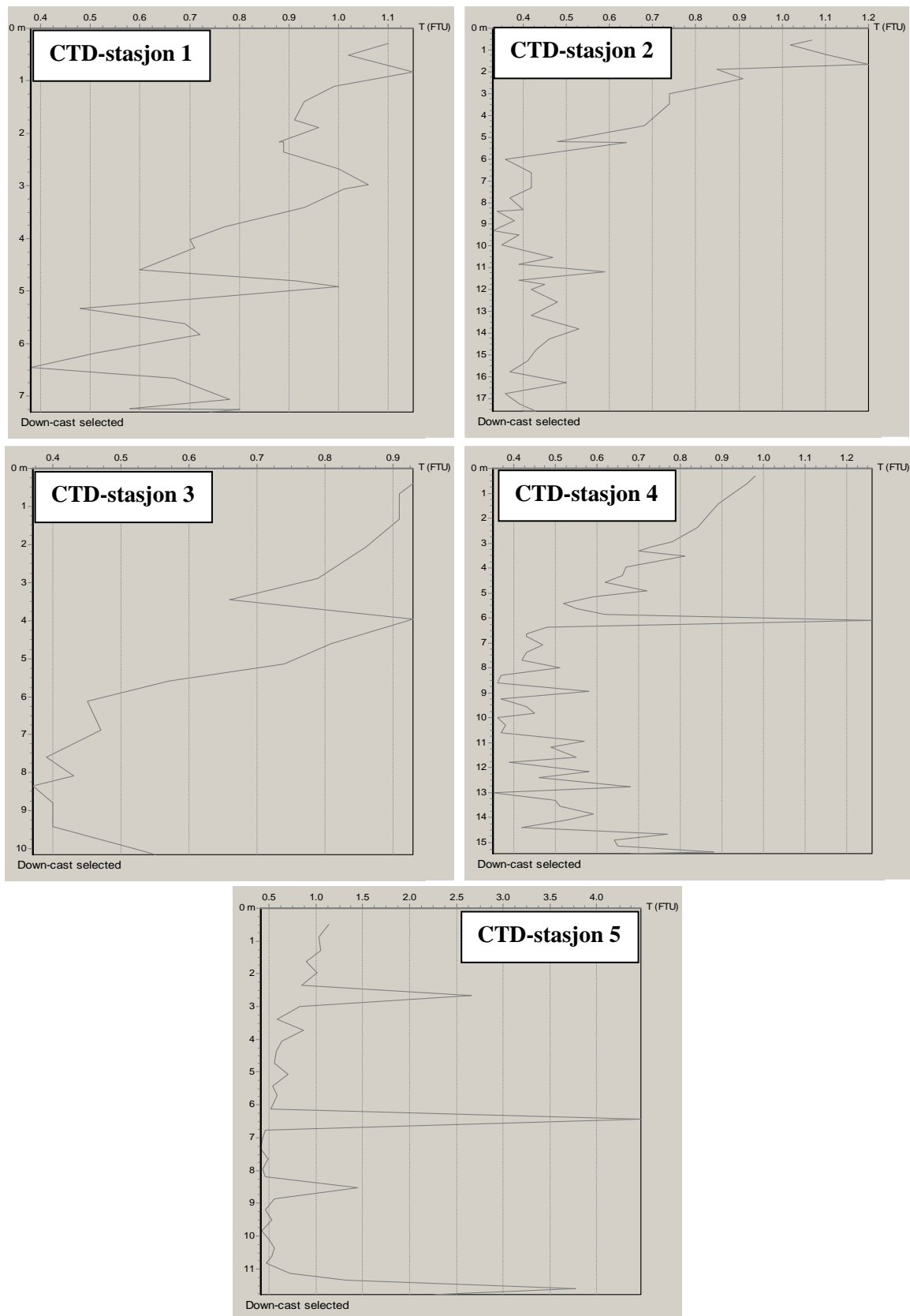
### Signal strength - Column1



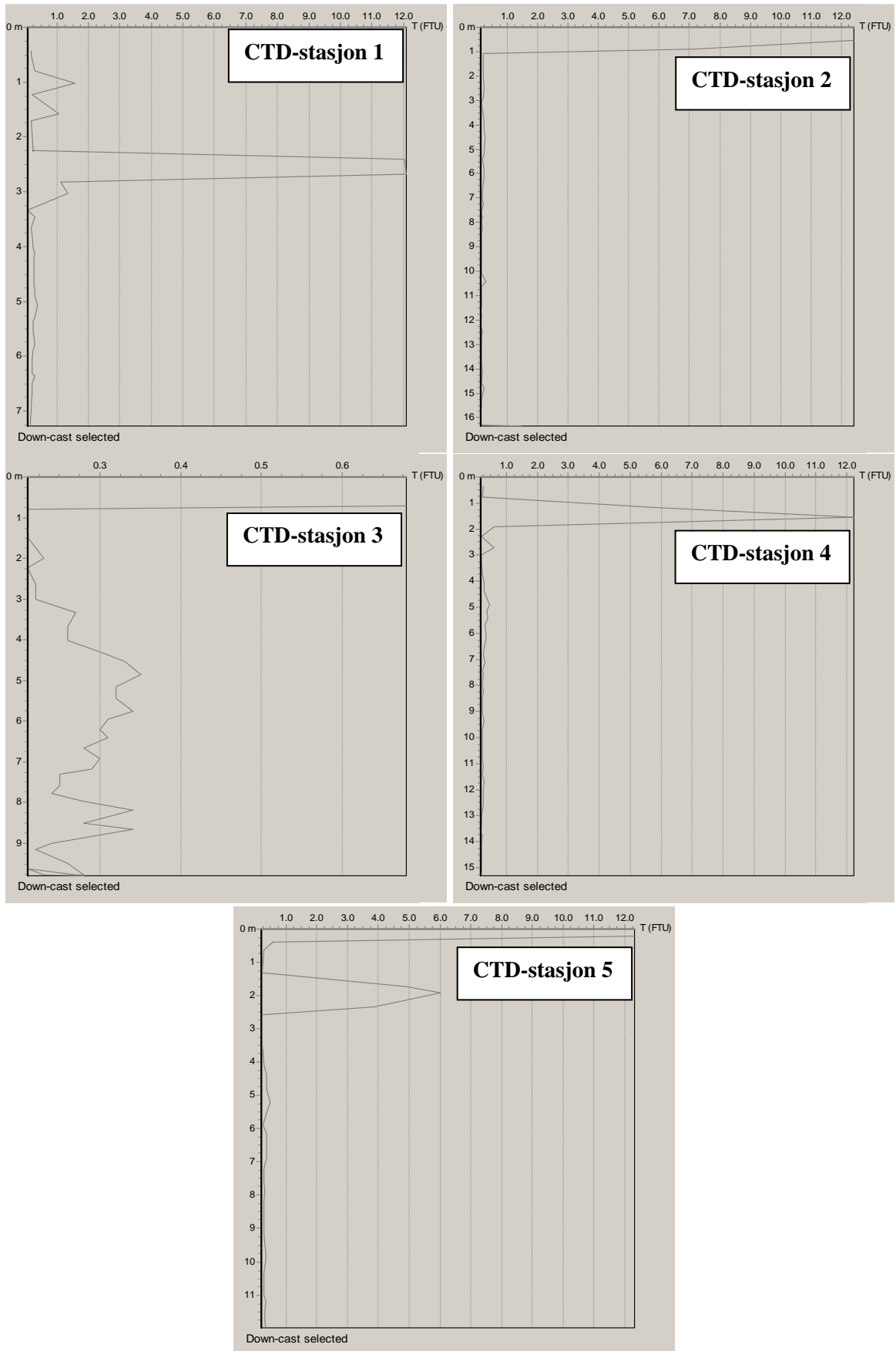
Time range: 2005.02.11 - 13:11 to 2005.04.08 - 13:21

Decimation: 26  
Moving average: 1

**Figur 26.** Signalstyrkedata gjennom hele vannsøylen fra RDCP 600 i gjennom hele måleperioden fra februar til april. Med positive tall indikerer mer partikler i vannmassene. Signalstyrken er en indikasjon på mengden av partikler i vannmassen. Størst mengde partikler i de 1-2 øverste meterne, er sannsynligvis partikler fra overvann/overløp.



Figur 27. Turbiditetsprofil fra stasjonene i Vågen 17/3-05.



Figur 28. Turbiditetsprofiler på stasjonene i Vågen 30/3-05.



I kyst- og havneområder er det vanlig å måle konsentrasjoner av suspendert materiale (som TSM) i intervallet 0,5-1 mg/l. De fleste prøvene som ble tatt i Vågen viser verdier mindre enn 1 mg/l. Bare en av prøvene viste konsentrasjoner over 1 mg/l (1,38 mg/l overflatevannmassene 10/3-05). Tabell 7 gir en oversikt over mengden partikler i vannmassen.

**Tabell 7.** Analyseresultater for TSM i vannprøver fra Bergen havn.

Stasjon	Vanndyp (m)	TSM (mg/l)
St. 1 0,5 m	0.5	1.38
St. 1 4 m	4	0.62
St. 1 8 m	8	0.47
St. 3 0,5 m	0.5	0.50
St. 3 5 m	5	0.63
St. 3 10 m	10	0.40
Nr. 1 7 m	7	0.81
Nr. 2 5 m	5	0.73

### 3.5 Sedimentfeller

Sedimentfeller som fanger opp partikler som bunnfeller, ble plassert på to lokaliteter (en i ytre del og en i indre del av Vågen) i perioden fra 11/-2005 til 8/4-2005. Materialet i sedimentfellene ble analysert med hensyn på PCB<sub>7</sub>, kvikksølv, bly, kadmium, kobber og krom.

Kjemisk analyse av partiklene fra sedimentfellen fra indre del av Vågen (indre A og B) viste at nyakkumulerte materiale er sterkt forurenset med hensyn på PCB<sub>7</sub>, meget sterkt forurenset med hensyn på kvikksølv og markert forurenset med hensyn på bly, kobber og kadmium. Partiklene som akkumulerte i sedimentfellen fra ytre del av Vågen var markert forurenset med hensyn på PCB<sub>7</sub>, kvikksølv og bly og moderat til lite forurenset med hensyn på kadmium, krom og kobber. Denne trenden med høyere miljøgiftkonsentrasjoner i indre del av Vågen er den sammen som tidligere er observert i overflatesedimentene.

**Tabell 8** gir en oversikt over analyseresultatene fra sedimentfellene.

**Tabell 8.** Miljøgifter i partiklene som sedimenterer i indre og ytre deler av Vågen. Klassifisert i henhold til miljøkvalitet i fjorder og kystfarvann (Molvær et al. 1997).

Stasjon	PCB <sub>7</sub> µg/kg	Cd µg/g	Cr µg/g	Cu µg/g	Hg µg/g	Pb µg/g	Mengde materiale i fellene (g)
Ytre A Vaagen	47.50	0.3	32.5	107	1.78	188	3,9 g
Indre A Vågen	175.00	1.0	62.8	291	6.89	397	4,6 g
Indre B Vågen	150.00						4,8





	I. Ubetydelig-lite forurenset		II. Moderat forurenset		III. Markert forurenset		IV. Sterkt forurenset
	V. Meget sterkt forurenset		Ikke i klassifiseringssystem				

### 3.6 Miljøgifter i vann

Vannprøven som ble samlet inn 8/4-05 fra ytre deler av Vågen viste at PCB<sub>7</sub>-konsentrasjonen i vannmassene var under deteksjonsgrensen (<0,5 ng/l for de ulike kongenerene, ubetydelig til lite forurenset). For de fleste metallene var vannmassene ubetydelig til lite forurenset. Sink og kvikksølv var de eneste metallene med målbare konsentrasjoner (Tabell 9). Vannmassene i ytre delene av Vågen var markert forurenset med hensyn på sink.

**Tabell 9.** Analyseresultater miljøgifter i vannmassene i ytre deler av Vågen.

Stasjon	CB101 ng/l	CB118 ng/l	CB138 ng/l	CB153 ng/l	CB180 ng/l	CB28 ng/l	CB52 ng/l
Nr. 3 5 m Dyp	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5	<0.5
	Cd mg/l	Cu mg/l	Hg ng/l	Pb mg/l	TSM mg/l	Zn mg/l	
Nr. 3 5 m Dyp	<0.002	<0.002	1.0	<0.02	0.42	0.008	

 I. Ubetydelig- lite forurenset	 II. Moderat forurenset	 III. Markert forurenset	 IV. Sterkt forurenset
 V. Meget sterkt forurenset	 Ikke i klassifiseringssystem		

### 3.7 Transport av miljøgifter fra Vågen og ut i Byfjorden

#### 3.7.1 Beregning av partikkelbundet miljøgifttransport (*Fpart*)

Beregning av hvor mye miljøgifter som transporteres fra Vågen og ut i Byfjordene basert på vannutskifting, mengden partikler i vannmassene og miljøgiftkonsentrasjonen i disse partiklene. De grunnleggende data i beregningene er:

- Vannutskifting:
  - 7 m<sup>3</sup>/s ved kun tidevannspåvirkning
  - 16 m<sup>3</sup>/s ved svak vind (8 m/s))
  - 60 m<sup>3</sup>/s ved svak vind (15 m/s)
- Karakteristisk konsentrasjon av TSM:
  - 0,5 g/m<sup>3</sup> ved kun tidevannspåvirkning
  - 1 g/m<sup>3</sup> ved svak vind (8 m/s))
  - 5 g/m<sup>3</sup> ved sterk vind (15 m/s)
- Karakteristisk miljøgiftkonsentrasjoner
  - kun tidevannspåvirkning data fra ytre sedimentfelle (Tabell 8)
  - ved svak vind (8 m/s) data fra ytre sedimentfelle (Tabell 8)
  - ved sterk vind (15 m/s) gjennomsnittlig miljøgiftkonsentrasjoner i indre del av Vågen (Data fra tiltaksplan forurensede sedimenter fase II).

Beregninger kan tyde på at det til vanlig er en transport av partikler ut av Vågen på 300-1400 kg/døgn. En del av dette suspenderte materialet er stoff som transporteres inn i bukta gjennom vannutvekslingen med Byfjorden og som deretter føres ut av Vågen igjen. Antas det at omkring halvparten av partiklene, blir den netto transporten ut av bukta 150-700 kg/døgn (ca 7,5 tonn partikler per døgn ved vind på 15 m/s).

Legger man til grunn en netto partikkeltransport på 150 - 700 kg per døgn ut av Vågen og at partiklene har de miljøgiftkonsentrasjoner som tilsvarende det som ble registrert i sedimentfellen fra ytre

Vågen (Tabell 8) gir dette en samlet transport av partikkelbundet forurensing fra Vågen og ut i Byfjorden per døgn på ca. 0,007- 0,03 g PCB<sub>7</sub>, 0,2-0,045 g kadmium, 22-5 g krom, 26-130 g kobber, 0,25-1,25 g kvikksølv og 10-44 g bly per døgn (Tabell 10). Hvor langt det miljøgiftene transporteres vil være avhengig av strømforholdene i området. Dette fordi en ved lavere strømhastigheter trolig får sedimentasjon av de forurensete partiklene. Når vannmassene kommer ut i byfjorden vil trolig strømhastigheten avta og mye av partiklene sedimentere. Hvor mye partikler som transporteres inn i Vågen vil også avhenge av hvor mye partikler som får anledning til å sedimentere. Det er knyttet relativt stor usikkerhet til slike fluksberegninger ved at det er mange faktorer som virker inn på vannutskifting, partikkelmengden i vannmassene og miljøgiftkonsentrasjonen i partiklene.

Kombinasjonen økt vannutskifting (60 m<sup>3</sup>/s ved 15 m/s vind inn fjorden) og store mengder partikler i suspensjon (5 g/m<sup>3</sup>) har trolig stor innvirkning på miljøgifttransporten fra Vågen og ut i Byfjorden (opp til 100 ganger høyere døgntransport ved sterk vind sammenlignet med partikkelfluksen ved middels vind). Dette forutsetter at vinden har en viss varighet. Ved sterk vind vil de mest forurensete sedimentene i indre del av Vågen eroderes og dermed transporteres ut. Ved en vannutskifting på 60 m<sup>3</sup>/sek, en partikkelmengde i vannmassene på 5 g/m<sup>3</sup> (modellert) og en miljøgiftkonsentrasjon som tilsvarer overflatesedimentene i de indre sedimentasjonsbassenget (PCB<sub>7</sub> = 300 µg/kg, Hg= 10 mg/kg og Pb=600 mg/kg) viser beregninger at det i løpet av et døgn kan transporteres ca. 13000 kg partikler ut Vågen. Dette tilsvarer en transport av PCB<sub>7</sub> på ca. 4 g, 130 g kvikksølv og 7,5 kg bly (Tabell 10).

**Tabell 10.** Fluks av partikkelbundne miljøgifter (*F<sub>part</sub>*) ut av Vågen ved ulike strømforhold.

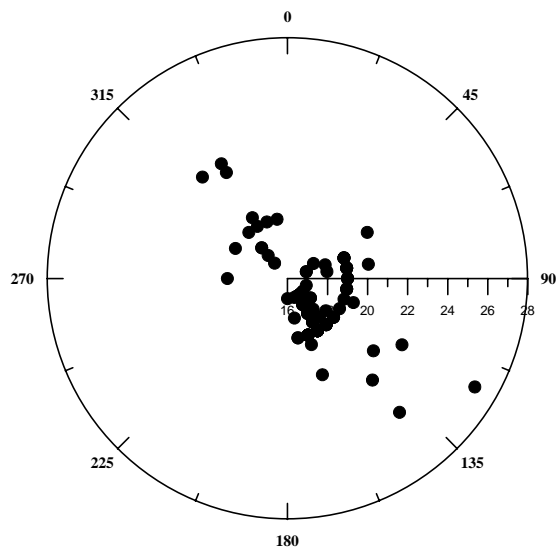
Stoff	Sterk vind (15 m/s) Vannutskifting (60 m <sup>3</sup> /s)*	Svak vind (8 m/s) Vannutskifting (16 m <sup>3</sup> /s)**	Ingen vind Vannutskifting (7 m <sup>3</sup> /s)***
PCB <sub>7</sub>	4 g/døgn	0,03 g/døgn	0,007 g/døgn
Kvikksølv	130 g/døgn	1,2 g/døgn	0,25 g/døgn
Bly	7,5 kg/døgn	130 g/døgn	26 g/døgn
Kadmium	-	0,2 g/døgn	0,045 g/døgn
Krom	-	22 g/døgn	5 g/døgn
Kobber	-	73 g/døgn	17 g/døgn

\*Benyttet høyere miljøgiftkonsentrasjoner i partiklene fordi det ved sterk vindpåkvikning eroderes sedimenter med høyere miljøgiftkonsentrasjoner.

\*\* Benyttet miljøgiftkonsentrasjoner fra sedimentfellene i ytre del av Vågen og en partikkelmengde i vannmassene på 1 g/m<sup>3</sup>.

\*\*\* Benyttet miljøgiftkonsentrasjoner fra sedimentfellene i ytre del av Vågen og en partikkelmengde i vannmassene på 0,5 g/m<sup>3</sup>

Disse episodene med sterk vind inn Vågen forekommer relativt sjelden. En analyse av vinddata fra 1957 og frem til 2001, indikerer at hovedmengden vindepisoder der vindstyrken har vært over 17 m/s, har en sørøstlig retning, men det har også vært enkelte perioder med sterke nord-nordvestlige vinder (Figur 29). Den høyest registrerte vindstyrken er på 22,6 m/s. Varigheten på disse episodene med sterk vind vil være avgjørende for hvor mye partikler som transporteres ut.



**Figur 29.:** Dominerende vindretning fra 1957 og frem til 2001, der vindstyrken er større enn 17 m/s. (DNMI data fra Fredriksberg (1957-1983) og Florida på Nygårdshøyden (1983-2001)). Noen av de registrerte punktene med nord-nordvestlige vinder er innen samme døgn og vil derfor komme ut som separate punkter.

### 3.7.2 Beregning av total miljøgiftfluks fra Vågen til Byfjorden.

For å beregne den totale fluksen av miljøgifter fra Vågen til Byfjorden er det nødvendig å trekke inn data fra andre forurensingskilder i området. Total transport av miljøgiftene PCB<sub>7</sub>, kvikksølv, bly og kobber beregnes ved å legge sammen bidragene fra biodiffusjon (Fdiff), skipsoppvirvling (Fskip), og naturlig erosjon som følge av strømmer (Fpart, se punkt 3.6.1) etter følgende ligning:

$$\text{Total-transport} = F_{\text{diff}} + F_{\text{skip}} + F_{\text{part}}$$

Bidragene fra Fdiff (middelverdi) og Fskip (middelverdi) hentes fra tidligere beregninger i Vågen (NGI-tekinsk notat, Risikovurdeing i Bergen havn, Vedlegg G).

Under forutsetning av at det er lite vind inn Vågen og relativt svake strømmer (<5-8 cm/s) viser beregninger at det per dag spres 0,09-0,1 g PCB<sub>7</sub>, 178-282 g bly, 137-193 g kobber og 2,7-2,8 g kvikksølv fra Vågen til de utenforliggende området. Denne fluksen kan i perioder øke betydelig som følge av erosjon av forurensede sedimenter (se avsnitt 3.6.1 og 3.5).

**Tabell 11.** Oppsummering av totalflukser fra Vågen til Byfjorden. Det antas at bidragene fra diffusjon (Fdiff) og skipsoppvirvling (Fskip) i sin helhet transporteres ut av Vågen (bidragene fra skipsanløp er trolig overestimert da partikler virvlet opp som følge av båtaktivitet trolig raskt vil sedimentere). Bidragene fra Fdiff (middelverdi) og Fskip (middelverdi) er hentet fra tidligere beregninger i Vågen (NGI-tekinsk notat, Risikovurdeing i Bergen havn).

Stoff	Fdiff (g/døgn)	Fskip (g/døgn)	Ppart (g/døgn)	Total spredning fra Vågen pr. døgn (g)
PCB <sub>7</sub>	0.02	0.04	0.03-0.07	0.09-0.13 g
Pb	40	112	26-130	178-282 g
Cu	43	77	17-73	137-193 g
Hg	0.89	1.73	0.25-1.2	2.7-2.8 g

## 4. Konklusjon

- Modellingene viser at vindstyrken har stor betydning for resuspensjon og transport av partikler i Vågen. Ved svak vind og tidevannspåvirkning fås en viss resuspensjon av finpartikler (silt) på de mest utsatte områdene (terskelen og Vågens ytre del), men denne resuspensjonen er veldig lokal og spredningen er liten. For de grovere partiklene (fin sand og grovere) kreves vindhastigheter opp mot 15 m/s for å få en betydelig resuspensjon og transport.
- De kvantitative resultatene av modelleringene er usikre. De beregnede konsentrasjonene er trolig overestimerer. Først og fremst fordi det i dette tilfellet er tilgangen på løse sedimenter på bunn antatt å være ubegrenset. I virkeligheten blir de mest utsatte områdene skrappt ren for løse partikler under en storm. Sedimentfordelingskartene for Vågen viser at det fra terskelen og utover er relativt grove sedimenter. I tillegg er det grove sedimenter flere steder langs kaiområdene på østsiden av Vågen. Disse områdene vil i mindre grad bidra med partikler til vannmassene ved sterk vind fordi områdene jevnlig utsettes for erosjon enten ved båttaktivitet eller sterkere bunnstrømmer.
- Forurensede partikler som avsettes på eller på utsiden av terskelen vil ved tidevannsstømmer eroderes og enten transporteres ut av Vågen eller inn i akkumulasjonsbassenget på innsiden av terskelen. Retningen vil avhenge av retningen til den dominerende bunnstrømmen. Denne effekten forsterkes ved økt vindpåvirkning..
- Nysedimentert materiale i Vågens indre del er markert til meget sterkt forurensset og gjenspeiler det som tidligere er observert i overflatesedimentene. I Vågens ytre del hadde nysedimentert materiale lavere miljøgiftkonsentrasjoner enn i indre del (ubetydelig til markert forurensset).
- Til tross for de høye miljøgiftkonsentrasjonene i sedimentene ble det ikke påvist forhøyede miljøgiftkonsentrasjoner i vannmassene.
- Det ble påvist økt mengde partikler i bunnvannet (ca. 0-1 meter over sedimentene) og i overflatevannmassene.
- Under forutsetning av det er lite vind inn Vågen og relativt svake strømmer (<5-8 cm/s) viser beregninger at det per døgn spres 0,09-0,1 g PCB<sub>7</sub>, 178-282 g bly, 137-193 g kobber og 2,7-2,8 g kvikksølv fra Vågen til de utenforliggende områdene. Denne fluksen kan i perioder øke betydelig som følge av erosjon av forurensede sedimenter

## 5. Anbefalinger

- Det anbefales å gjennomføre registreringer av partikkelmengde i vannmassene gjennom en lengre tidsperiode for å verifisere resultatene fra modellen. Dette bør gjøres i høst/vinterhalvåret på grunn av økt stormaktivitet på denne årstiden.

## 6. Referanser

Kuhrts, C., W. Fennel og T. Seifert, 2004. Model studies of transport of sedimentary material in the western Baltic. *J. of Marine Systems* 52, 167-190.

- Marshall, J., A. Adcroft, C. Hill, L. Perelman and C. Heisey, 1997. A finite-volume incompressible Navier Stokes model for studies of the ocean on parallel computers. *J. Geophys. Res.*, 102, 5753-5766.
- Stenström, P., 2003. Mixing and recirculation in two-layer exchange flows. *J. Geophys. Res.*, 108(0), 3256, doi:10.1029/2002JC001696.
- Zheng, L., C. Chen, M. Alber og H. Liu, 2003. A modeling study of the Satilla River Estuary, Georgia. II: Suspended sediment. *Estuaries Vol. 26, No. 3*, p. 670–679.
- Næs, K., Mølvær, J., Ruus, A., Uriansrud, F., in prep. Risikovurdering av PAH-kilder i nærområdet til Elkem i Fiskåbukta, Kristiansandsfjorden. O-24204. NIVA-rapport. I trykk.
- Uriansrud, F., 2001: Microbial mats as erosion preventers in the Bergen harbour area, West Norway. (Mikrobielle matter som hindrer erosjon av sedimenter i Bergen havn, Vest-Norge) Master-Thesis Department of Earth Science, University of Bergen, May 2001, 127 pp., 38 Figures, 06 Tables, Appendix on CDROM.
- Wever, T.P.A., 1999. Seismic interpretation of H-Sense data and sub-bottom characterisation using chirp sonar technology. *Memoirs of the Centre of Engineering Geology in the Netherlands*, No. 177. Cand. scient. Thesis, TUDelft, Delft, 43 pp.