

Hovedkontor

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

Sørlandsavdelingen

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

Østlandsavdelingen

Sandvikaveien 41
2312 Ottestad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 62 57 66 53

Vestlandsavdelingen

Postboks 2026
5817 Bergen
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 55 23 24 95

NIVA Midt-Norge

Postboks 1266
7462 Trondheim
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 73 54 63 87

Tittel Kirkebukten – Konsentrasjoner av metaller og organiske miljøgifter i sedimentene, avgrensning av tiltaksområde og vurdering av risiko for rekontaminering	Løpenr. (for bestilling) 5530-2008	Dato 29.02.2008
	Prosjektnr. Undernr. O-27298	Sider Pris 29
Forfatter(e) Bent Barman Skaare, Henning Wehde, Arild Sundfjord	Fagområde Sedimenter	Distribusjon Fri
	Geografisk område Hordaland	Trykket CopyCat

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

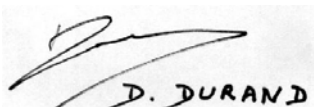
Sammenheng

I forbindelse med ”Bergen havn – Tiltaksplan fase II” ble det forelått å gjøre tiltak mot de forurensede sedimentene i Bergen havn. En del av forslaget gikk ut på at pilotiltak skulle gjennomføres i Kirkebukten. Denne rapporten presenterer resultater fra et prosjekt med mål om å kartlegge konsentrasjonen av ulike miljøgifter i Kirkebukten, samt å vurdere faren for rekontaminering av området etter et eventuelt pilotiltak. Det ble samlet inn sedimentprøver fra seks stasjoner i og rundt Kirkebukten. Analysene viser at konsentrasjonene av metaller ligger fra tilstandsklasse I til IV i SFTs risikoveileder og at alle stoffgruppene av organiske miljøgifter (organiske tinnforbindelser, PAH og PCB) finnes i konsentrasjoner tilsvarende tilstandsklasse V ved flere av stasjonene. Resultatene fra simuleringene med modellsystemet SMS indikerer at det er et stort potensiale for rekontaminering etter en eventuell opprydning av Kirkebukten. På bakgrunn av dette anbefaler vi at pilotiltak ikke gjennomføres, men at opprensingen i hele Puddefjorden gjøres i én omgang.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. Forurensede sedimenter	1. Contaminated sediments
2. Miljøgifter	2. Contaminants
3. Tiltak	3. Remediation
4. Rekontaminering	4. Recontamination



Bent Barman Skaare
Prosjektleder



Dominique Durand
Forskningsleder



Jarle Nygard
Fag- og markedsdirektør

Kirkebukten –

Konsentrasjoner av metaller og organiske miljøgifter i sedimentene, avgrensning av tiltaksområde og vurdering av risiko for rekontaminering

Forord

Arbeidet beskrevet i denne rapporten er gjort av Norsk institutt for vannforskning (NIVA) på oppdrag for Fylkesmannen i Hordaland. I "Bergen havn – Tiltaksplan fase II" ble det foreslått å gjøre pilottiltak for opprydding av forurensede sedimenter i Kirkebukten. Dette prosjektet har hatt som målsetning å vurdere faren for rekontaminering av Kirkebukten etter et eventuelt pilottiltak. I tillegg har det vært NIVAs jobb å vurdere hvordan tiltaksområdet i Kirkebukten skulle avgrensnes.

Vurderingen av faren for rekontaminering har vært todelt. NIVA har fokusert på faren for rekontaminering fra andre deler av Puddefjorden, mens COWI har tatt for seg faren for rekontaminering fra kilder på land.

NIVAs prosjekt har vært ledet av forsker Bent Barman Skaare. I tillegg har forsker Anders Hobæk, forsker Thorbjørn Johnsen, forsker Henning Wehde, forskningsleder Dominique Durand og forsker Arild Sundfjord vært viktige for gjennomføringen av prosjektet. Oddmund Soldal har vært kontaktperson for COWI, og Håkon Kryvi har vært prosjektleder for Fylkesmannen i Hordaland.

Oslo, 12. mars 2008

Bent Barman Skaare
Prosjektleder

Innhold

Sammendrag	5
Summary	6
1. Introduksjon	7
1.1 Målsetning	7
1.2 Modellering	8
2. Material og metoder	9
2.1 Prøvetaking	9
2.2 Kjemiske analyser	9
2.3 Modellering av rekontamineringsfare	9
2.3.1 Modellsystemet SMS	9
2.3.2 Oversikt over scenariene: avgrensning av området, tidevann og vindpådrag	11
3. Resultater og diskusjon	16
3.1 Konsentrasjon av miljøgifter i Kirkebukten	16
3.2 Fare for rekontaminering av Kirkebukten	19
3.2.1 Sirkulasjonsmønster i Kirkebukten og Puddefjorden	19
3.2.2 Potensiale for rekontaminering	24
4. Konklusjon	28
5. Referanser	29

Sammendrag

NIVA har på oppdrag fra Fylkesmannen i Hordaland undersøkt konsentrasjonen av miljøgifter i Kirkebukten i Puddefjorden. Siden Fylkesmannen i Hordaland og SFT planlegger pilottiltak mot de forurensede sedimentene i Puddefjorden i dette området, har prosjektet også inkludert vurdering av faren for rekontaminering av Kirkebukten fra andre deler av Byfjorden samt en vurdering av arealet for pilottiltaket.

Sedimentene i Kirkebukten er sterkt til meget sterkt forurenset med hensyn på flere organiske miljøgifter, men tilstanden i bukten er bedre med hensyn på metaller. Det er en tendens til at sedimentene langs land er noe mindre forurenset enn de som er noe lenger fra land.

For å vurdere faren for rekontaminering av sedimentene i Kirkebukten har vi benyttet flere moduler i modellsystemet "Surface Water Modeling System" (SMS). Det er gjort simuleringer for ulike tidevanns- og vindscenarier for å dekke de miljøforhold som kan forventes å ha størst innvirkning på Puddefjorden. Modellene viser at sirkulasjonsmønsteret og konsentrasjon av forurenset materiale i vann gjør at det er en reell fare for rekontaminering etter et eventuelt tiltak. De numeriske beregningene av transport av miljøgifter fra andre deler av fjorden viser at det etter et pilottiltak kan forventes høye konsentrasjoner, både i ytre og indre del av Kirkebukten.

På bakgrunn av disse modellene, samt de undersøkelser som viser at hele Puddefjorden inneholder sterkt forurensede sedimenter, anbefaler vi derfor at pilottiltak ikke gjennomføres, men at opprensingen i hele Puddefjorden gjøres i én omgang.

Summary

Title: Kirkebukten – concentrations of metals and organic pollutants in the sediments, limiting the area of action and estimation of the risk of recontamination

Year: 2008

Author: Bent Barman Skaare, Henning Wehde, Arild Sundfjord

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: 978-82-577-5265-1

NIVA has investigated the concentration of pollutants in Kirkebukten which is a part of Puddefjorden in Bergen. The municipality is together with the Norwegian Pollution Control Authorities planning a pilot-scale action to clean up the contaminated sediments in the Puddefjorden. Therefore this project has also included an estimation of the risk of recontamination of the area from other parts of the Byfjorden after an action has taken place.

The sediments in Kirkebukten are strongly polluted with respect to organic pollutants, but the status of the sediments in the area is better with respect to metal pollution. The tendency is that the sediments close to shore are less polluted as compared to the ones a little bit further from shore.

To examine the risk of recontamination of the sediments in Kirkebukten we have used the "Surface Water Modeling System" (SMS). Simulations for various wind- and tidal-episodes have been conducted in order to cover the conditions which are expected to mostly affect the area. The models show the circulation of the water and the concentration of the contaminated particles in the water make the chance for recontamination genuine. The numerical calculations regarding transport of pollutants from other parts of the fjord show that high supply of pollutants must be expected, both to the inner and outer parts of the Kirkebukten.

Based on these results, together with the investigations that show large concentrations of pollutants in all of Puddefjorden, we recommend that the pilot scale actions should not be carried out, but rather that the cleaning up of the whole Puddefjorden is done simultaneously.

1. Introduksjon

På bakgrunn av rapporten "Bergen havn – Tiltaksplan fase II" (Soldal et al., 2005) har Fylkesmannen i Hordaland og SFT planer om å gjennomføre et pilotprosjekt i forbindelse med opprensning av forurensede sedimenter i Bergen havn. I tråd med forslagene i rapporten skal pilotprosjektet gjennomføres i Kirkebukten (**Figur 1**). Fylkesmannen i Hordaland har i den forbindelse engasjert NIVA for å undersøke konsentrasjonen av miljøgifter i Kirkebukten og faren for rekontaminering av bukten etter et pilottiltak. Prosjektet er utført parallelt med COWIs arbeid med å vurdere faren for rekontaminering av Kirkebukten fra land.

1.1 Målsetning

Målsetningen med prosjektet har vært å dokumentere dagens konsentrasjoner av metaller og organiske miljøgifter i sedimentene i Kirkebukten, samt å vurdere faren for rekontaminering av bukten etter gjennomføring av pilottiltak. Dette skal også bygge opp under en vurdering av avgrensingen av eventuelle tiltak. "Bergen havn – Tiltaksplan fase II" (Soldal et al., 2005) tok ikke stilling til hvilken type tiltak som skulle gjennomføres i Kirkebukten, og det var derfor i utgangspunktet tenkt at denne rapporten også skulle anbefale enten mudring eller tildekking av sedimentene i Kirkebukten. På bakgrunn av at NIVAs opprinnelige tilbud, som inneholdt prøvetaking og analyser av kjerneprøver i fra Kirkebukten ikke ble gjennomført, er det vanskelig å vurdere spørsmålet om mudring.



Figur 1. Kart utsnitt som viser Puddefjorden. Kirkebukten er skravert.

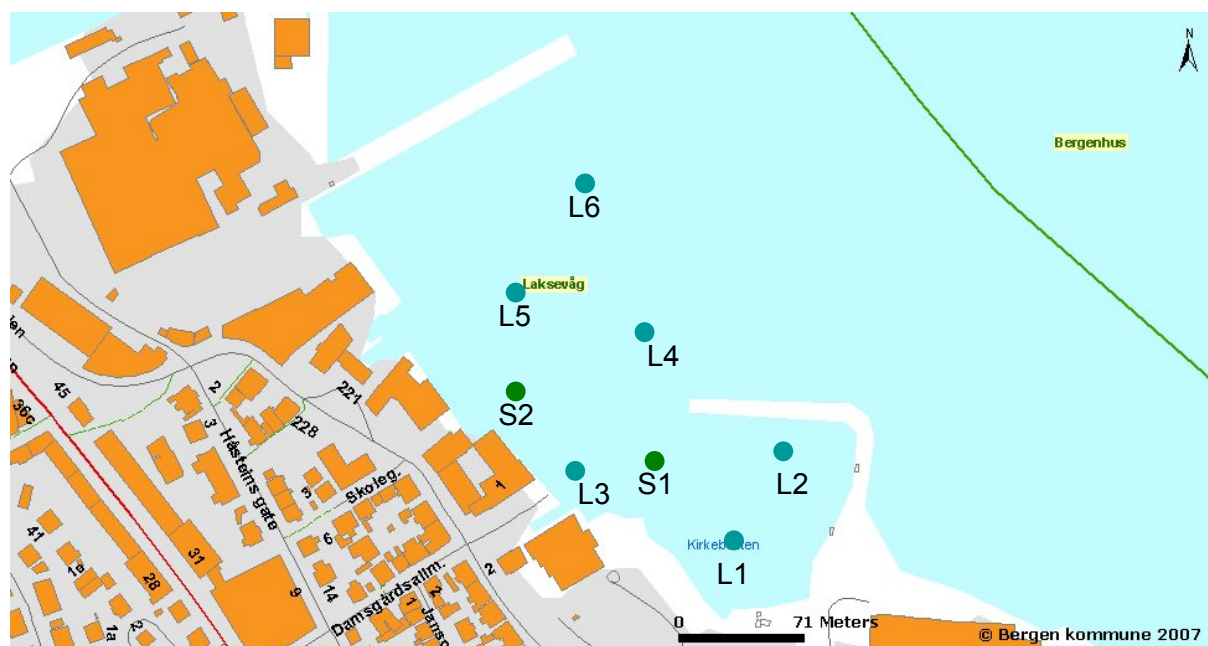
1.2 Modellering

Området vi har sett på i dette arbeidet er grunt med vandyp på under 30 m. Transport av sediment og forurensning skyldes hovedsakelig vinddrevet strøm og bølger som opptrer samtidig med tidevannsstrøm. Når det er sterk vind skapes det turbulens som bryter ned stabiliteten i vannsøylen. Resuspensjon av sediment er derfor mest sannsynlig i perioder med sterk vind. I Kirkebukten er det vind fra nordlig retning som har mest effekt, og det er også ved nordlig vind at de sterkeste vindepisodene forekommer. For å simulere strøm- og bølgeklimate har vi her brukt modellsystemet SMS (Surface Water Modeling System – US ACE, 2006). Først er det gjort simuleringer av sirkulasjon som skyldes vind og tidevann. Basert på resultatene herfra er så spredning og konsentrasjon av forurensning i ulike deler av Puddefjorden beregnet. Ut fra dette kan også potensialet for transport av forurenset materiale inn i Kirkebukten kvantifiseres. Resuspensjon av sedimenter som funksjon av vinddrevne bølger er estimert med en bølgemodell. En kort beskrivelse av de ulike modellmodulene som er brukt, er gitt i kap. 2.3. Det er gjort scenariesimuleringer for kombinasjoner av to ulike tidevannsforhold og tre vindstyrker.

2. Materiale og metoder

2.1 Prøvetaking

Prøvetaking av sedimenter med grabb ble foretatt i Kirkebukten den 13.07.2007. Denne dagen ble det også satt ut sedimentfeller. Disse ble hentet opp 23.08.2007.



Figur 2. Kartet viser posisjonene hvor grabbprøver ble tatt (L1 – L6) og hvor sedimentfeller ble satt ut (S1 og S2) i Kirkebukten.

2.2 Kjemiske analyser

Grabbprøvene som ble tatt i Kirkebukten ble analysert med hensyn på kornstørrelse ($>63 \mu\text{m}$), TOC, metaller, PAH, TBT og PCB. Prøvene fra sedimentfellene ble analysert for TOC, TN og kornstørrelse ($>63 \mu\text{m}$).

2.3 Modellering av rekontamineringsfare

For å simulere strøm- og bølgeklimate som påvirker potensialet for rekontaminering er modellsystemet SMS benyttet. Tre ulike moduler er brukt:

1. Det generelle sirkulasjonsmønsteret er simulert med modulen RMA2
2. Transport av forurensning er beregnet med RMA4
3. Effekt av bølger på resuspensjon er estimert med modulen STWAVE

For å gi et overordnet innblikk i hvordan modellsystemet fungerer, er oppbygning og bruk av de ulike modulene kort beskrevet under.

2.3.1 Modellsystemet SMS

SMS er et grafisk brukergrensesnitt for utvikling, bruk og analyse av modeller. Systemet inneholder blant annet verktøy for å sette opp det geografisk bestemte nettverket det skal gjøres beregninger i, og her defineres det hvilke drivkrefter som skal være med i simuleringene. SMS benytter så ulike modellmoduler som hver for seg gir svar på ulike problemstillinger. SMS inneholder også verktøy for å analysere og visualisere modellresultatene.

Modulen RMA2

RMA2 er en todimensjonal hydrodynamisk modell, som simulerer gjennomsnittlig horisontal strøm i hele vannsøylen i et nettverk av beregningspunkt. Dette nettverket kan bestå av celler med ulike geometrisk form og er derfor godt egnet for å gjøre simuleringer i områder med kompleks topografi. I tillegg til strøm regner den også ut vannstand basert på Navier-Stokes-ligningene ("bevegelsesligningene"). Effekten av bunnfriksjon er formulert gjennom Mannings ligning, og responsen på turbulens kvantifiseres gjennom bruk av viskositetskoeffisienter. Situasjoner med enten konstante eller tidsvarierende drivkrefter kan simuleres.

Utviklingen av RMA2 har pågått siden 1970-tallet (US ACE, 2006), og modellen har vært brukt blant annet til å beregne vannstandsendringer og sirkulasjon rundt øyer, broer og andre konstruksjoner, og i estuarier og elver med flere forgreninger. RMA2 er designet for å kunne beregne effekter av fysiske inngrep og endringer i topografi, også i områder lenger unna selve inngrepene. Viktige forutsetninger for at modellresultatene skal være gyldige er at vertikalbevegelsene i vannmassene er mye mindre enn de horisontale strømmene, og at strømfeltene i et gitt punkt er mer eller mindre vertikalt homogene. Det forutsettes også homogene vannmasser (med hensyn på temperatur og salinitet), og at overflaten kan bevege seg fritt. En oversikt over moduloppbygningen er gitt i **Figur 3**.

Modulen RMA4

RMA4 (US ACE, 2005) er en numerisk vannkvalitets-transportmodell, og kan benytte samme horisontale nettverk av beregningspunkt som RMA2. De stoffene man skal beregne transport av må ses på som jevnt fordelt vertikalt. Konsentrasjoner av inntil seks ulike stoffer kan beregnes samtidig. Disse kan enten være konservative (den totale mengden i området er konstant), eller gis egenskaper der de brytes ned over tid. I tillegg til horisontal transport som funksjon av strøm beregnes også effekten av diffusjon (spredning). Alle typer stoffer som enten er løst i vann eller har tilnærmet nøytral oppdrift (samme egenvekt som vannet) kan simuleres. Modellen er utviklet for å vurdere hvordan ulike fysiske prosesser påvirker fordeling av forurensning i ulike miljøer, og for å beskrive hvor effektive ulike avbøtende tiltak vil være.

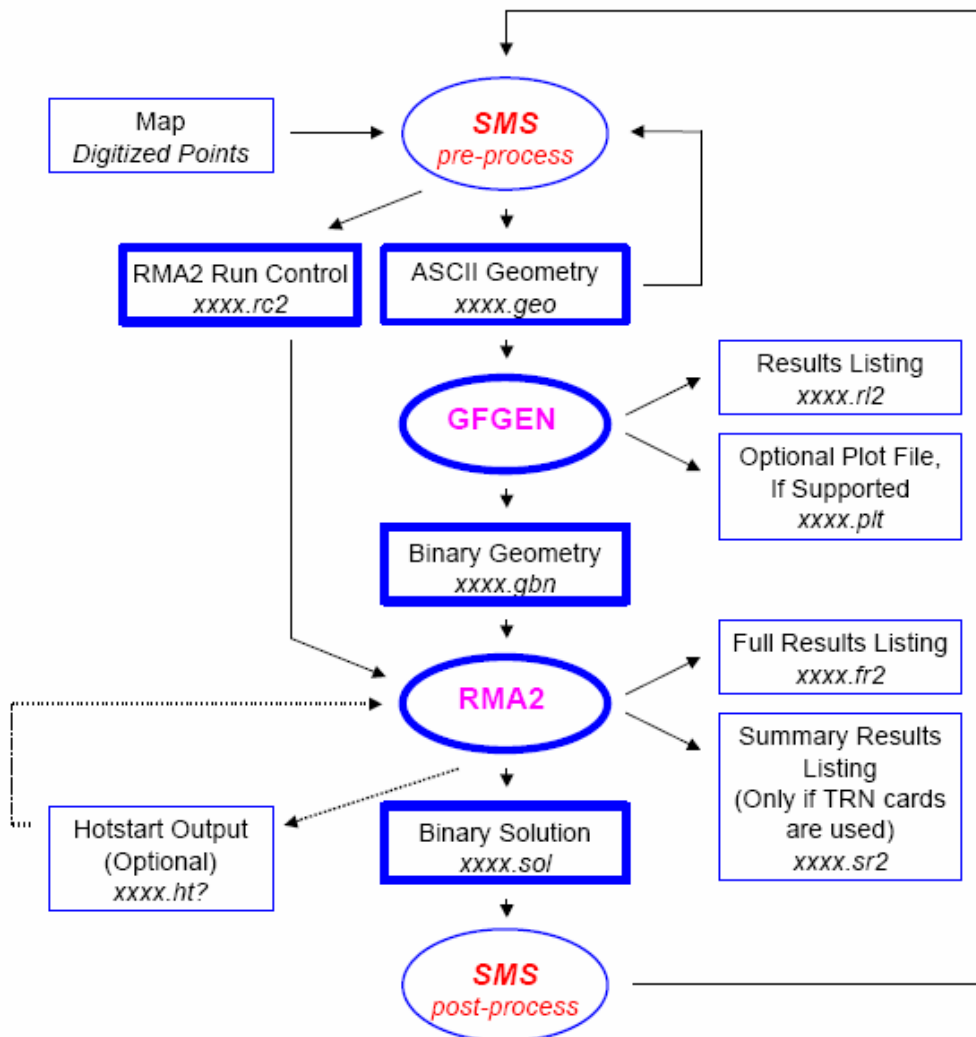
STWAVE

STWAVE (McKee Smith et al., 2001) beregner hvordan bølger bygges opp og fordeles i kystnære strøk. Bølgeforplantning påvirkes av:

- Bunntopografi,
- fysiske installasjoner,
- vannstandsvariasjon,
- strøm drevet av tidevann,
- vind,
- bølgene selv.

STWAVE beregner fordeling av bølger med ulike perioder og høyder (det vil si en spektralmodell). Det beregnes stasjonære løsninger, det vil si at vinden som driver bølgene må være konstant over et gitt tidsrom.

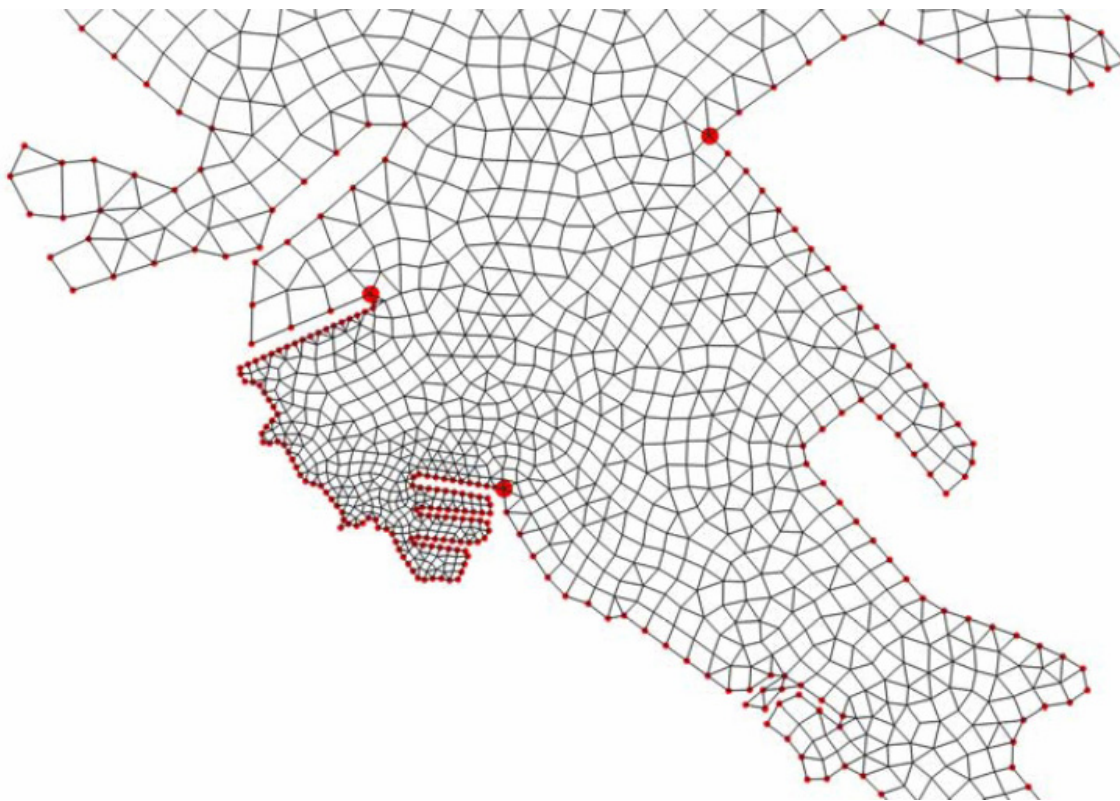
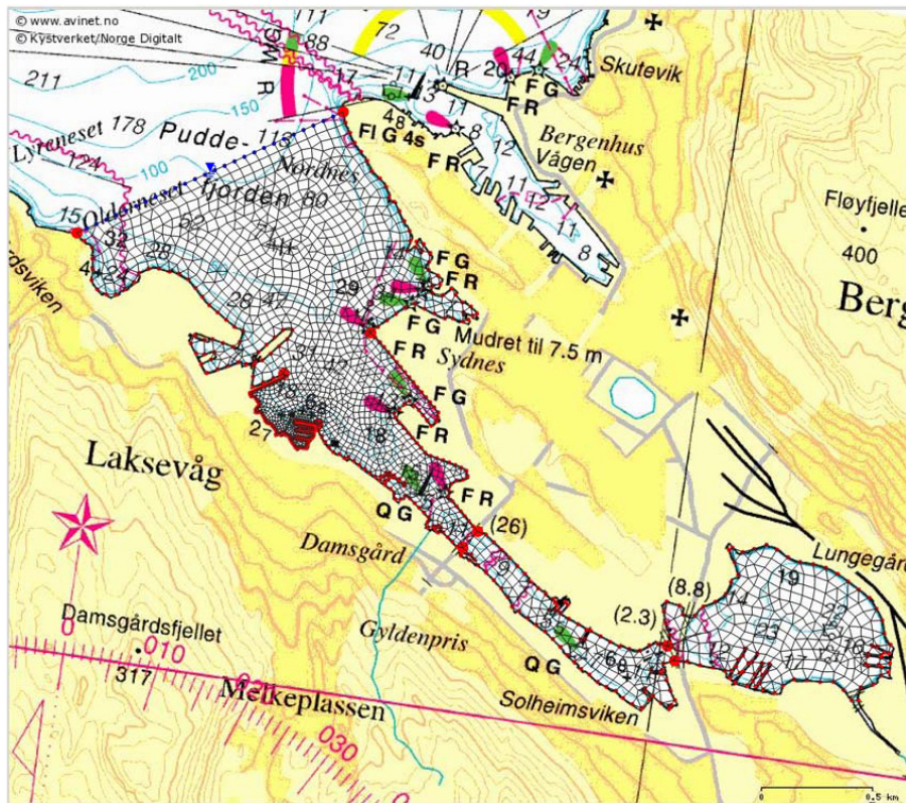
The following flow chart illustrates the RMA2 modeling process. Items with bold borders are required, others are optional.



Figur 3. Flytdiagram for RMA2 modulen. Beregningene med RMA2 gir grunnlag for videre analyse med modulene RMA4 og STWAVE.

2.3.2 Oversikt over scenariene: avgrensning av området, tidevann og vindpådrag

Om vinteren er det ofte sterk vind og avkjøling av overflatevannet. Vannsøylen vil da bli tilnærmet homogent blandet, slik at forutsetningene for å benytte SMS vil være oppfylt. For å simulere sirkulasjon i Kirkebukten må også de tilgrensende områdene tas med i beregningene. For at tidevannsstrømmen forbi Kirkebukten skal bli realistisk har vi tatt med hele indre Puddefjorden og Store Lungegårdsvann. Modellsimuleringene er gjort i nettverket som er vist i Figur 4a. Den horisontale oppløsningen er relativt grov i deler av området, mens det er mer finmasket i selve Kirkebukten og det umiddelbare nrområdet (Figur 4b).



Figur 4.a, b: Modelloppsett for Kirkebukten/Puddefjorden. Nettverket av beregningspunkt for hele simuleringsområdet er vist i øverste del og det finmaskede oppsettet for Kirkebukten i nedre del.

Tidevann

Informasjon om vannstandsvariasjon som skyldes tidevann er hentet fra Statens Kartverk, Sjøkartverket. Det er brukt to ulike scenarier for simuleringene:

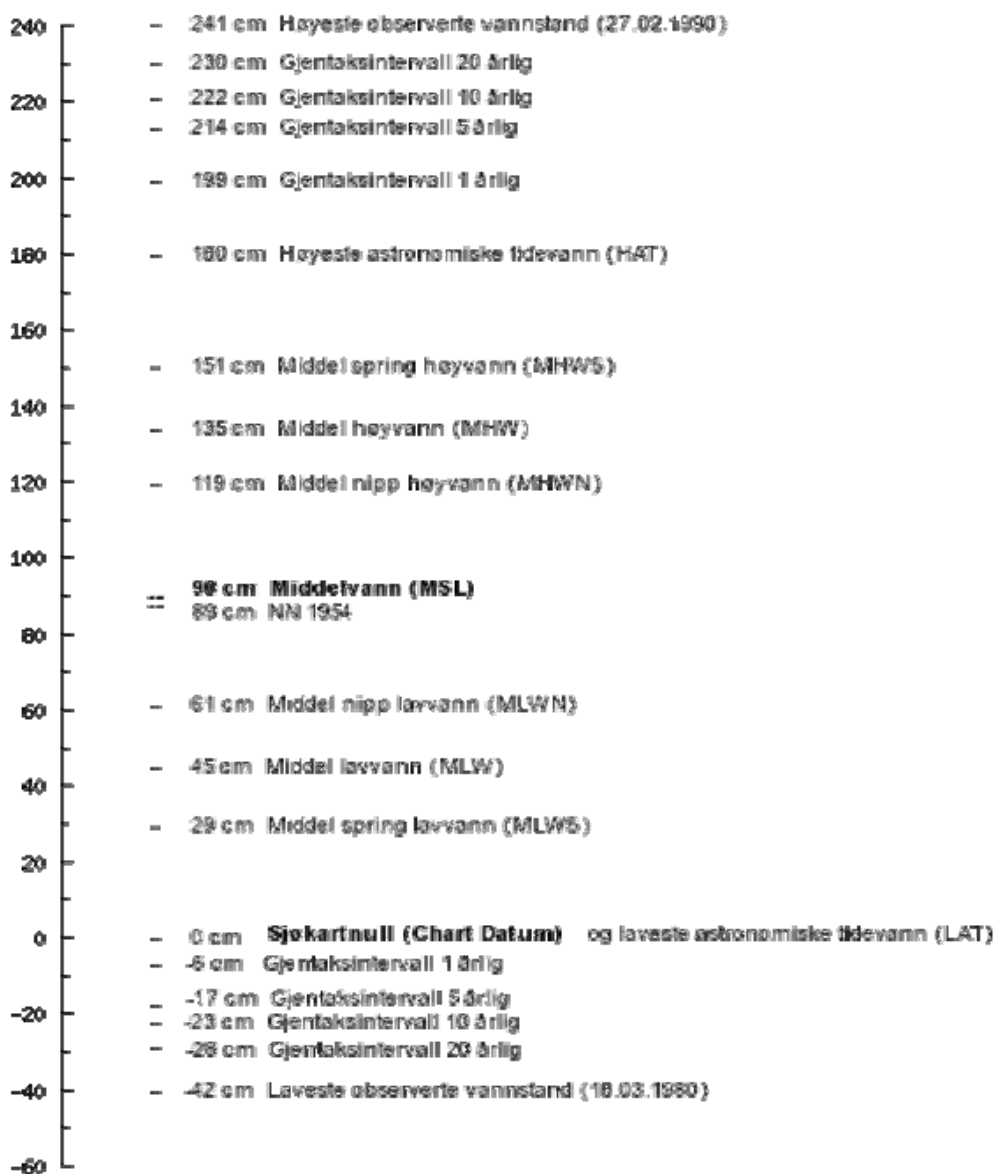
1) middel spring tidevann (forskjellen mellom middel spring høyvann og lavvann (MHWS-MLWS)), og

2) største astronomiske tidevannsforskjell (høyeste/laveste astronomiske tidevann (HAT-LAT))

En oversikt over vannstands nivåer for Bergen (Statens Kartverk, Sjøkartverket) er vist i **Figur 5**.

Modellen er kjørt for to tidevannsperioder (~49 timer).

BERGEN



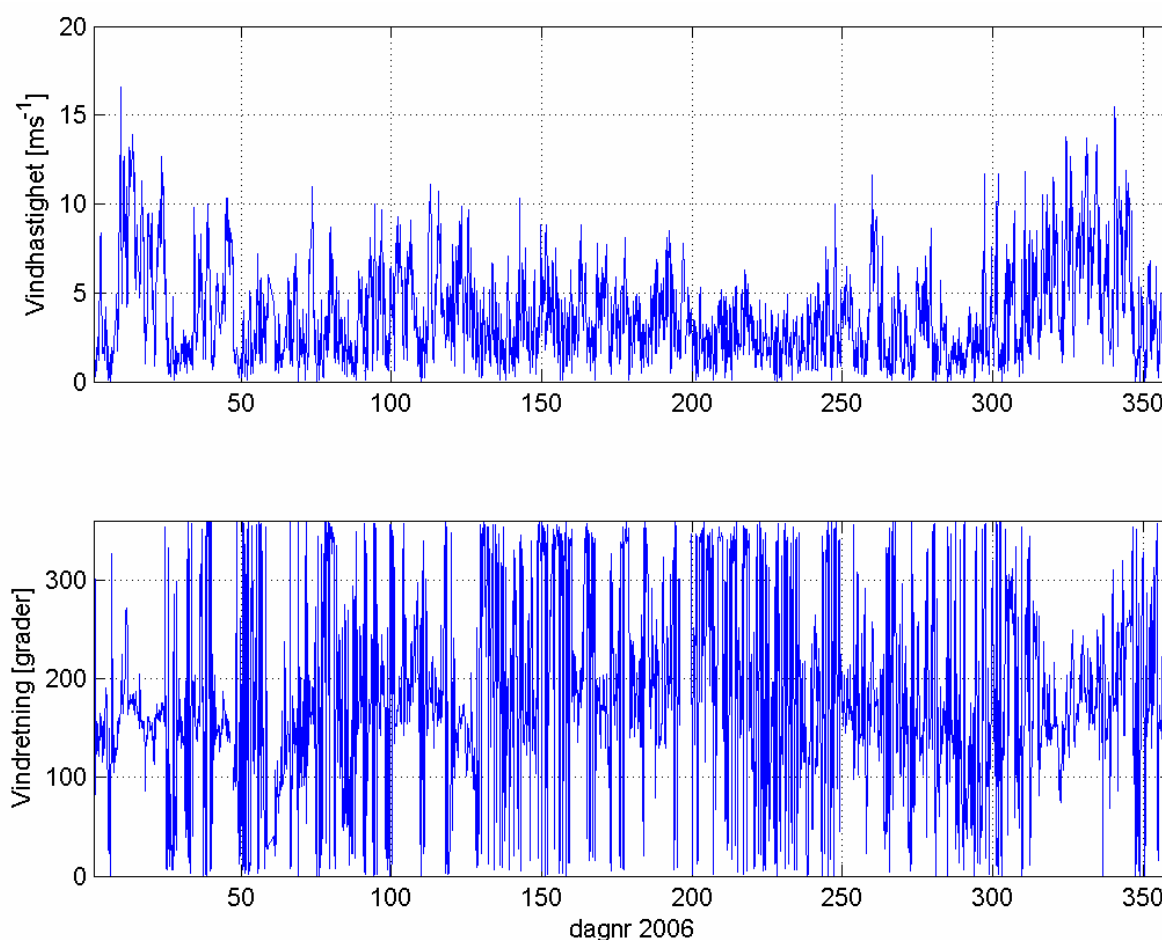
Figur 5. Observert og beregnet vannstand for Bergen. I simuleringene har vi brukt forskjellen mellom middel spring høyvann og lavvann (MHWS-MLWS) og høyeste/laveste astronomiske tidevann (HAT-LAT) (kilde: Statens Kartverk, Sjøkartverket).

Meteorologisk pådrag

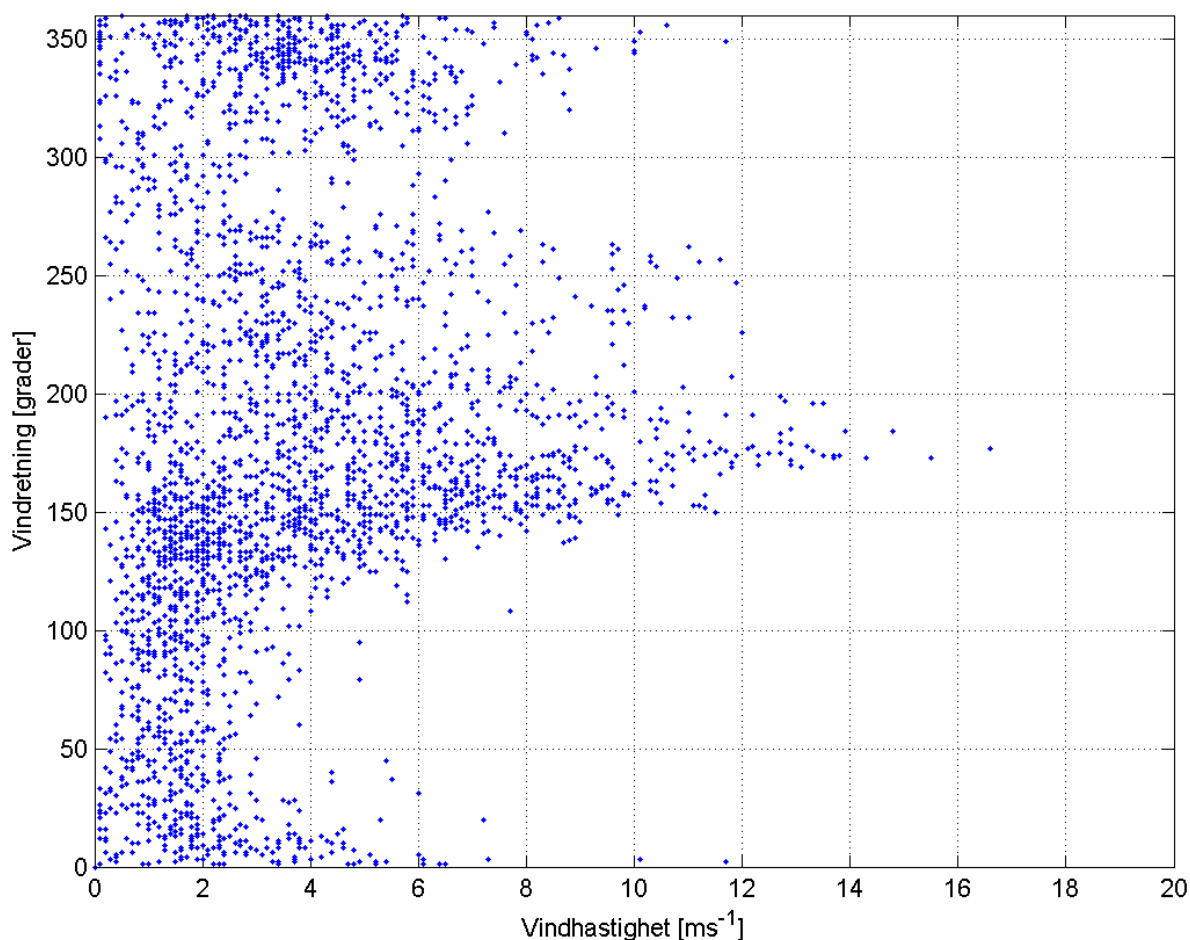
I tillegg til tidevannsdrevet sirkulasjon påvirkes strømmene i området av de dominante værforholdene. Vinddata er hentet fra Met.no. Følgende værforhold er simulert for å illustrere ulike scenarier:

- 1) ingen vind
- 2) varierende vind fra januar 2006
- 3) varierende vind fra januar 2006, men modifisert med lengre perioder med sterk nordavind.
Dette ble gjort for å beregne effekten av mulige langvarige episoder med sterk vind, som kan ha en bestemt påvirkning på sirkulasjonen.

Vindhastighet og -retning for 2006 er vist i Figur 6. Figur 7 viser forekomsten av sterk vind som funksjon av retning. Som det fremgår av denne figuren er det oftest sterk vind fra nord, og det er derfor vi har tatt med scenarie 3 - for å dekke eventuelle episoder med vind sterkere enn det som ble målt i 2006 (men altså bare for den mest dominante retningen).



Figur 6. Vindhastighet (øverst) og -retning (nederst) for Bergen havn, 2006. Vindretning 180 grader betyr nordlig vind.



Figur 7. Vindhastighet og -retning plottet mot hverandre. Sterk vind opptrer oftest for nordlige vindretninger (rundt 180 grader).

Scenarier

For å dekke ulike kombinasjoner av påvirkning av tidevann og vind er det kjørt til sammen syv modellscenarier. Hver av de to tidevannssituasjonene (middel spring og astronomisk maks/min) ble begge simulert i kombinasjon med tre scenarier for meteorologisk påvirkning (ingen vind, 2006-vind og 2006-vind modifisert med lengre perioder med nordlig vind). I tillegg ble det gjort simuleringer med spring tidevann og 2006-vind modifisert med sterkere vind fra vest, for også å få illustrert effekter av vindens retning. **Tabell 1** gir en oversikt over de ulike kombinasjonene det er gjort modellsimuleringer for.

Tabell 1. Oversikt over ulike scenarier for kombinerte effekter av tidevannsstrøm og vind.

Scenarienavn	Tidevann	Vind
Spring+ModVind	Middel spring tidevann	2006-vind modifisert fra nord
Spring+Vind	Middel spring tidevann	2006-vind
Spring_uVind	Middel spring tidevann	Ingen vind
Ekstrem+ModVind	Maks/min astronomisk tidevann	2006-vind modifisert fra nord
Etrem+Vind	Maks/min astronomisk tidevann	2006-vind
Extrem_uVind	Maks/min astronomisk tidevann	Ingen vind
Spring+ModDir	Middel spring tidevann	2006-vind modifisert fra vest

3. Resultater og diskusjon

Resultatene og diskusjonen som presenteres i dette kapitlet er delt i to. I første del presenteres dagens situasjon med tanke på miljøgifter i sedimentene i Kirkebukten. I andre del presenteres resultatene fra modelleringen med hensyn på rekontamineringsfare etter en opprydning i området. En oversikt over prøvetakingspunktene samt det som ble observert under prøvetakingen er gitt i Tabell 2

Tabell 2. Beskrivelse av prøvetakingen ved de seks stasjonene.

Stasjon	Dyp (m)	Kommentarer
L1	3	Svært finkornet, svart sediment. Betydelig H ₂ S lukt.
L2	8	Finkornet svart sediment.
L3	2.5	Sand og småstein. Sandflekker innimellom sterkt tangbevokst bunn. Mye tang.
L4	10	Finkornet svart sediment. Svak H ₂ S-lukt. En del store skjell (O-skjell, blåskjell). Litt olje/tjære i sedimentet.
L5	8.5	Svært mange bomskudd og hard bunn. Mye slagg på bunnen. Mye døde skjell observert sammen med mye makroalger (sukkertare, tang og andre algearter). Prøvetatt sediment inneholdt fragment av skjell. Noe småstein. Sedimentoverflaten var brun med hvite skjellfragment. Under overflaten var sedimentet mørkere.
L6	20	Finkornet, svart sediment som inneholdt små sandpartikler. Litt "oljeaktig" under sedimentoverflaten.

3.1 Konsentrasjon av miljøgifter i Kirkebukten

Resultatene fra analysene av sedimentprøver fra Kirkebukten er gitt i Tabell 3 – Tabell 7. Tabell 3 viser mengde tørrstoff, finstoff og totalt organisk karbon (TOC) i sedimentene i Kirkebukten. Det er generelt lite organisk karbon i sedimentene, men det er en tendens til at stasjonene inne i småbåthavnen (L1 og L2) har de høyeste TOC-verdiene. Det er store forskjeller i kornfordelingen i sedimentene. L2 inneholder høyest andel av partikler under 63 µm. En årsak til dette kan være finpartikulært materiale som kommer ut med kloakkutslipp innenfor L1. Dette passer også med at L1 har en lavere andel finpartikulært materiale enn L2. Både L3 og L5 har meget lavt innholdt av finpartikulært materiale. Dette kan også henge sammen med tilførsel fra kloakk, og at det finpartikulære i kloakken ikke sedimenterer så nær land i dette området. De tilsvarende verdiene for L4 og L6 er lavere enn både L1 og L2.

Konsentrasjonene av metaller og organiske miljøgifter er vurdert opp imot klassifiseringen av forurensede sedimenter i SFTs klassifisering av miljøtilstand (Molvær et al. 1997) (Tabell 4 - Tabell 7). Sedimentprøvene viser at konsentrasjonene av de fleste metallene ligger innenfor tilstandsklasse I til III (fra ubetydelig – lite forurenset til markert forurenset) i det meste av Kirkebukten. Unntakene er konsentrasjonene av sink og bly i L6 samt kvikksølv i L2, L4 og L5. Disse verdiene ligger innenfor rammene av tilstandsklasse IV (sterkt forurenset).

Tabell 3. Tabellen oppsummerer mengde tørrstoff, finstoff og totalt organisk karbon (TOC) i sedimentprøvene fra Kirkebukten.

		L1	L2	L3	L4	L5	L6
Tørrstoff	%	31.1	30.5	59.7	37.4	64.1	46.8
Finstoff <63 µm	%	39.6	66.3	3.2	31.4	8.2	28.5
Totalt Organisk Karbon	g/100g	9.7	7.4	2.9	4.2	2.8	3.6

Tabell 4. Tabellen viser konsentrasjonen av ulike metaller i sedimentprøvene fra Kirkebukten. Fargene beskriver tilstandsklassen sedimentprøvene befinner seg i i forhold til det aktuelle metallet. (Blå – tilstandsklasse I, Grønn – tilstandsklasse II, Gul – tilstandsklasse III, Orange – tilstandsklasse IV, Rød – tilstandsklasse V). Tilstandsklasse I representerer sedimenter som er ubetydelig – lite forurenset, mens tilstandsklasse V representerer sedimenter som er meget sterk forurenset.

		L1	L2	L3	L4	L5	L6
Arsen, As	mg/kg TS	9.3	17	4.9	17	14	20
Kadmium, Cd	mg/kg TS	0.96	1.3	0.5	0.8	0.31	2.1
Bly, Pb	mg/kg TS	130	140	72	220	320	800
Kobber, Cu	mg/kg TS	120	230	89	250	260	670
Krom, Cr	mg/kg TS	24	60	22	78	240	190
Nikkel, Ni	mg/kg TS	15	21	7.9	17	12	180
Sink, Zn	mg/kg TS	390	490	210	420	480	3300
Kvikksølv, Hg	mg/kg TS	0.25	3.6	0.87	4.5	5.9	2.6

Konsentrasjonene av PAH var generelt i høyere tilstandsklasser enn tilfellet er for metallene (Tabell 5). Benzo(a)pyren og summen av PAH (16) er de som blir klassifisert. Benzo(a)pyren har konsentrasjoner i tilstandsklasse V i alle prøver utenom L1 hvor konsentrasjonen tilsvarer tilstandsklasse IV. PAH(16) er i tilstandsklasse V (meget sterkt forurenset) i L2, L4 og L6. L3 og L5 har konsentrasjoner i tilstandsklasse IV og L1 har PAH(16)-konsentrasjon i tilstandsklasse III.

Tabell 5. Tabellen viser konsentrasjonen av ulike polyaromatiske hydrokarboner (PAH) i sedimentprøvene fra Kirkebukten. Fargene beskriver tilstandsklassen sedimentprøvene befinner seg i i forhold til den aktuelle forbindelsen. (Blå – tilstandsklasse I, Grønn – tilstandsklasse II, Gul – tilstandsklasse III, Orange – tilstandsklasse IV, Rød – tilstandsklasse V).

		L1	L2	L3	L4	L5	L6
Acenaften.	mg/kg TS	<0.01	0.16	0.07	0.35	0.19	0.92
Acenaftylen.	mg/kg TS	0.03	0.16	0.12	0.29	0.16	1.5
Antracen.	mg/kg TS	0.06	0.59	0.3	0.96	0.55	4.9
Benzo(a)antracen.	mg/kg TS	0.26	1.9	0.8	2.7	1.7	7.5
Benzo(a)pyren.	mg/kg TS	0.29	1.9	0.85	2.9	1.7	6.2
Benzo(b)fluoranten.	mg/kg TS	0.29	2	0.8	2.9	1.7	5.8
Benzo(g,h,i)perylene.	mg/kg TS	0.22	1.2	0.57	2	1.1	3.4
Benzo(k)fluoranten.	mg/kg TS	0.26	1.6	0.72	2.5	1.4	5.1
Crysen.	mg/kg TS	0.29	1.9	0.82	2.7	1.7	6.4
Dibenzo(a,h)antracen.	mg/kg TS	0.06	0.33	0.15	0.53	0.31	0.98
Fenantren.	mg/kg TS	0.16	2	0.85	3.2	1.9	19
Fluoranten.	mg/kg TS	0.48	3.6	1.7	5.6	3.4	19
Fluoren.	mg/kg TS	0.03	0.2	0.08	0.4	0.2	2.6
Indeno(1,2,3,cd)pyren.	mg/kg TS	0.26	1.5	0.67	2.4	1.3	4.5
Naftalen.	mg/kg TS	0.03	0.07	0.02	0.11	0.06	0.3
Pyren.	mg/kg TS	0.42	3.3	1.5	4.8	3	14
Sum PAH(16)	mg/kg TS	3.2	22	10	35	20	100

Sedimentene i Kirkebukten er sterkt påvirket av organiske tinnforbindelser (Tabell 6), og konsentrasjonene av TBT tilsvarer tilstandsklasse V (meget sterkt forurenset) for alle prøvene.

Tabell 6. Tabellen viser konsentrasjonen av ulike organiske tinnforbindelser i sedimentprøvene fra Kirkebukten. Fargene beskriver tilstandsklassen sedimentprøvene befinner seg i i forhold til den aktuelle forbindelsen. (Blå – tilstandsklasse I, Grønn – tilstandsklasse II, Gul – tilstandsklasse III, Orange – tilstandsklasse IV, Rød – tilstandsklasse V).

		L1	L2	L3	L4	L5	L6
<i>Dibutyltinn, DBT</i>	µg/kg TS	400	480	210	1600	656	1000
<i>Monobutyltinn, MBT</i>	µg/kg TS	200	200	97	230	82	123
<i>Tributyltinn, TBT</i>	µg/kg TS	450	730	370	3100	3360	3380
<i>Trifenyltinn, TPT</i>	µg/kg TS	23	16	13	140	58.4	109
<i>Monofenyltinn, MFT</i>	µg/kg TS					6	17
<i>Tetrabutyltinn, TetraBT</i>	µg/kg TS					79.5	156

Konsentrasjonene av PCB er også høye (**Tabell 7**). PCB (7)-konsentrasjonene i sedimentene varierer fra tilstandsklasse III (L1, L3 og L5) til tilstandsklasse V (L2 og L6).

Tabell 7. Tabellen viser konsentrasjonen av ulike polyklorinerte bifenylyl (PCB)-forbindelser i sedimentprøvene fra Kirkebukten. Fargene beskriver tilstandsklassen sedimentprøvene befinner seg i i forhold til den aktuelle forbindelsen. (Blå – tilstandsklasse I, Grønn – tilstandsklasse II, Gul – tilstandsklasse III, Orange – tilstandsklasse IV, Rød – tilstandsklasse V).

		L1	L2	L3	L4	L5	L6
<i>PCB 101</i>	mg/kg TS	0.005	0.101		0.026	0.013	0.06
<i>PCB 118</i>	mg/kg TS	0.005	0.075	0.011	0.026	0.012	0.056
<i>PCB 138</i>	mg/kg TS	0.011	0.051	0.016	0.035	0.011	0.062
<i>PCB 153</i>	mg/kg TS	0.006	0.041	0.011	0.026	0.007	0.041
<i>PCB 180</i>	mg/kg TS	0.004	0.014	0.006	0.018	0.005	0.02
<i>PCB 28</i>	mg/kg TS	0.005	0.007	0.007	0.017	0.008	0.034
<i>PCB 52</i>	mg/kg TS	0.002	0.071	0.007	0.017	0.013	0.051
<i>PCB(7) Totalsum</i>	mg/kg TS	0.038	0.36	0.069	0.165	0.069	0.324

Generelt var de tre prøvene som ble tatt av overflatesedimenter lengst fra land (L2, L4 og L6) mer påvirket av miljøgifter enn de prøvene som ble tatt langs land. Forurensningsproblemet er størst med hensyn på organiske miljøgifter. Tilstandsklassene for disse er generelt høyere enn for metaller.

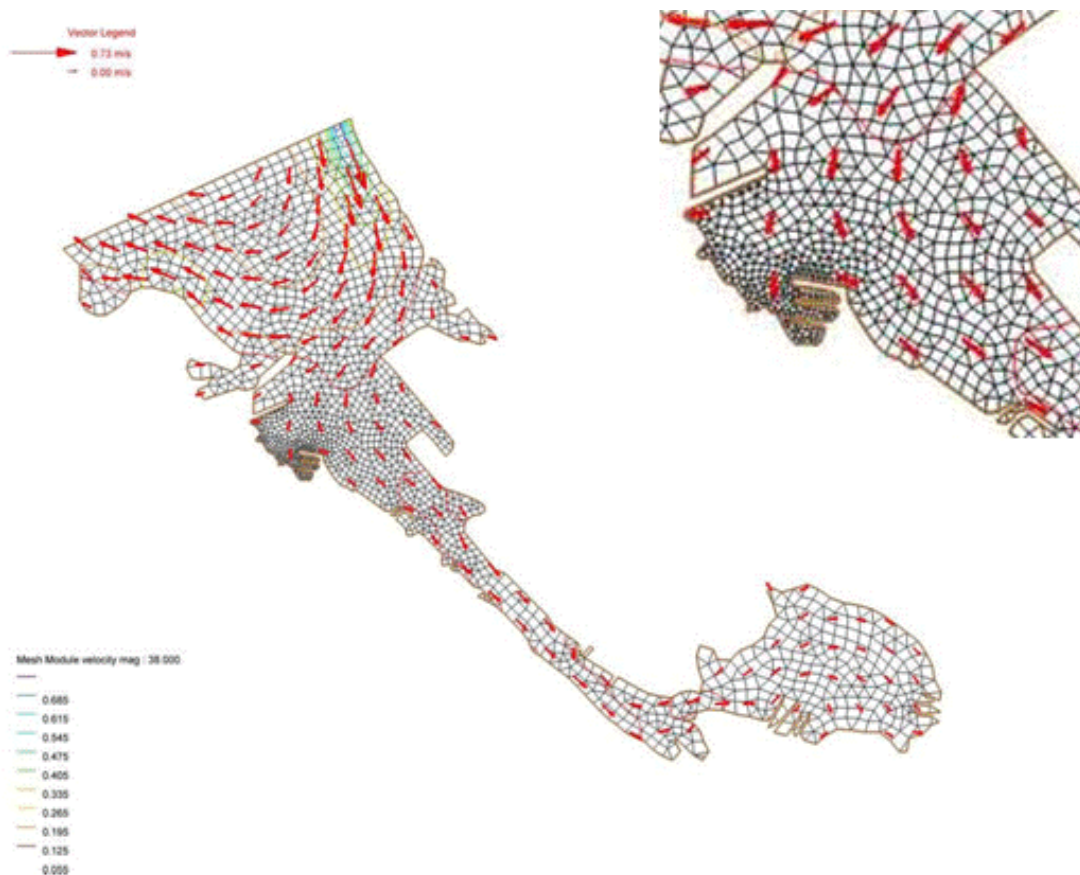
3.2 Fare for rekontaminering av Kirkebukten

For å vurdere potensialet for at Kirkebukten skal rekontamineres etter pilottiltak, er det nødvendig å kjenne sirkulasjonsmønsteret i området, altså om det kan forventes at forurenset materiale kan transporteres fra andre deler av Puddefjorden og inn i Kirkebukten. I det følgende presenteres resultater fra simuleringer med SMS-modellsystemet.

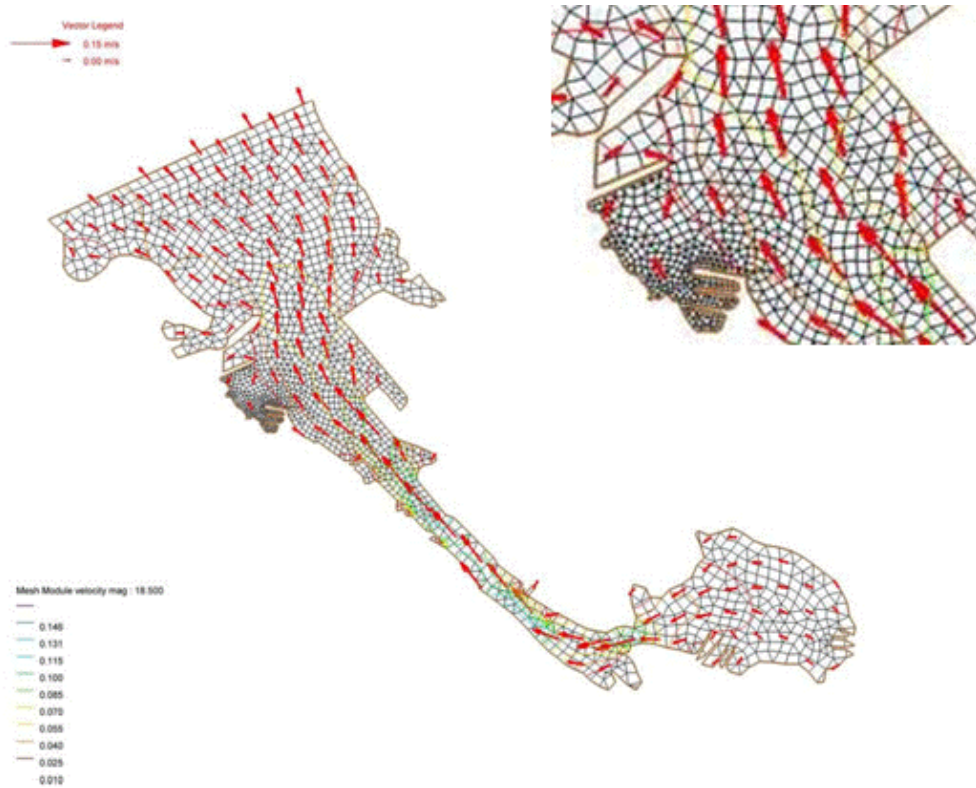
3.2.1 Sirkulasjonsmønster i Kirkebukten og Puddefjorden

Sirkulasjonen i Puddefjorden varierer mye og kan være svært kompleks. Sirkulasjonsmønsteret på et gitt tidspunkt styres primært av fasen og styrken på tidevannsstrømmen, i kombinasjon med atmosfærisk pådrag. Figur 8a-e viser et utvalg ulike sirkulasjonsmønstre (øyeblikksbilder) for ulike kombinasjoner av drivkrefter. Analyse av simuleringresultatene viser at strømmen ikke alltid er sterk selv om tidevannsdrevet vannstandsvariasjon eller vind er på sitt sterkeste. Sterk strøm opptrer også på ulike steder i fjordsystemet. Figurene viser eksempelvis forekomst av relativt sterk strøm i:

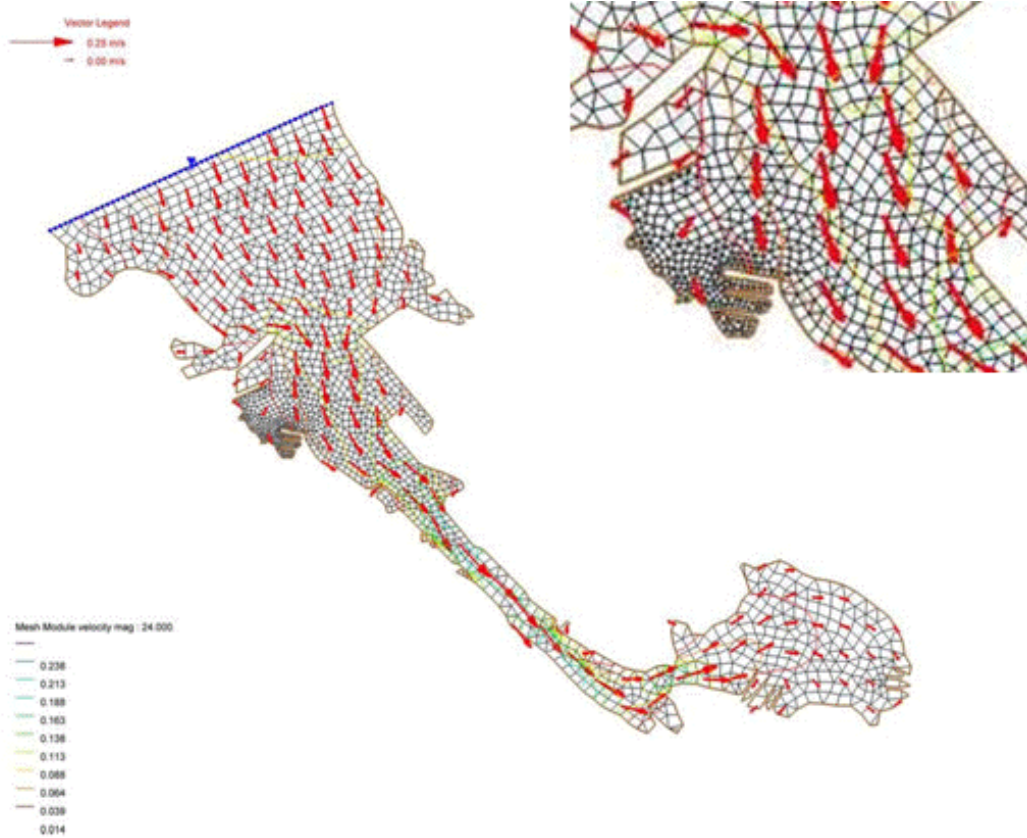
- den nordøstre åpningen til Puddefjorden. I dette tilfellet er det sterk strøm bare i den ytre, åpne delen av fjorden. (Eksempel fra scenariet Spring+ModVind)
- kanalen mellom indre Puddefjorden og Store Lungegårdsvann, her rettet ut i Puddefjorden. (Eksempel fra scenariet Spring+Vind)
- kanalen mellom indre Puddefjorden og Store Lungegårdsvann, her rettet inn i Store Lungegårdsvann. (Eksempel fra scenariet Ekstrem+ModVind)
- kanalen mellom indre Puddefjorden og Store Lungegårdsvann, her rettet ut i Puddefjorden. Dette scenariet er vist for å illustrere at maksimal strømstyrke kan være av samme størrelse enten vinden er ”vanlig” eller ekstra sterk. (Eksempel fra scenariet Ekstrem+Vind)
- den nordvestre åpningen. Her illustreres muligheten for at kontaminert vann fra området ved ubåtbunkeren ved Nordrevågen kan komme inn til Kirkebukten. (Eksempel fra scenariet Spring+ModDir)



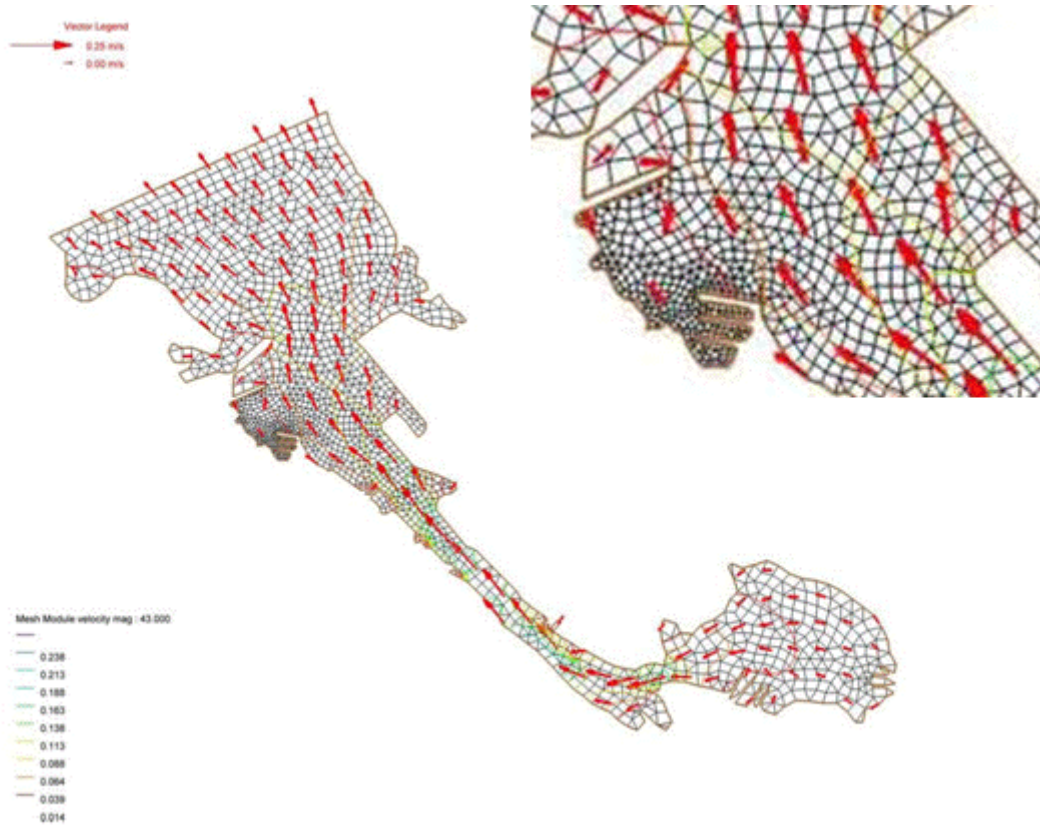
Figur 8a: Øyeblikksbilde av sirkulasjonsmønsteret i Puddefjorden etter 38 timer med simulering for scenariet Spring+ModVind. Det er sterkst strøm ($0,73 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) i den nordøstre delen av modellområdet.



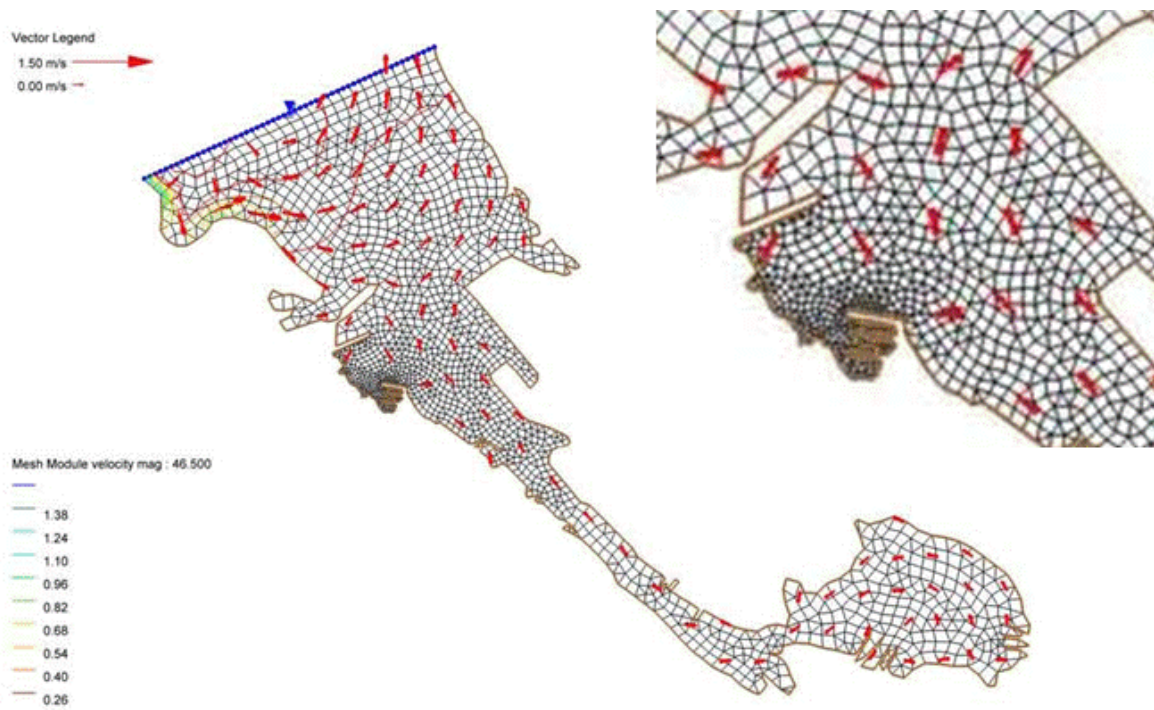
Figur 8b: Øyeblikksbilde av sirkulasjonsmønsteret i Puddefjorden etter 18,5 timer med simulering for scenariet Spring+Vind. Det er sterkst strøm ($0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) i kanalen mellom indre Puddefjorden og Store Lungegårdsvann, rettet ut i Puddefjorden.



Figur 8c: Øyeblikksbilde av sirkulasjonsmønsteret i Puddefjorden etter 24 timer med simulering for scenariet Ekstrem+ModVind. Det er sterkest strøm ($0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) i kanalen mellom indre Puddefjorden og Store Lungegårdsvann, her rettet inn i Store Lungegårdsvann.



Figur 8d: Øyeblikksbilde av sirkulasjonsmønsteret i Puddefjorden etter 43 timer med simulering for scenariet Ekstrem+Vind. Det er sterkeste strøm ($0,25 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) i kanalen mellom indre Puddefjorden og Store Lungegårdsvann, her rettet ut i Puddefjorden



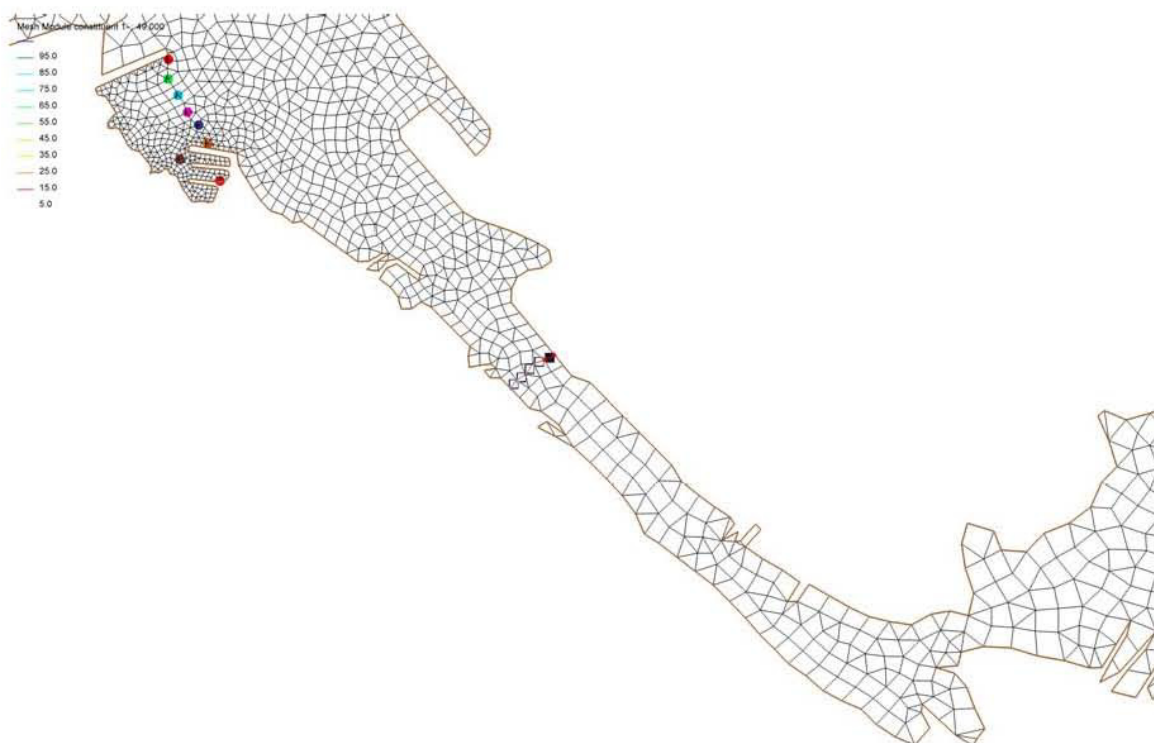
Figur 8e: Øyeblikksbilde av sirkulasjonsmønsteret i Puddefjorden etter 46,5 timer med simulering for scenariet Spring+ModDir. Det er sterkeste strøm ($1,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$) i den nordvestre delen av modellområdet.

3.2.2 Potensiale for rekontaminering

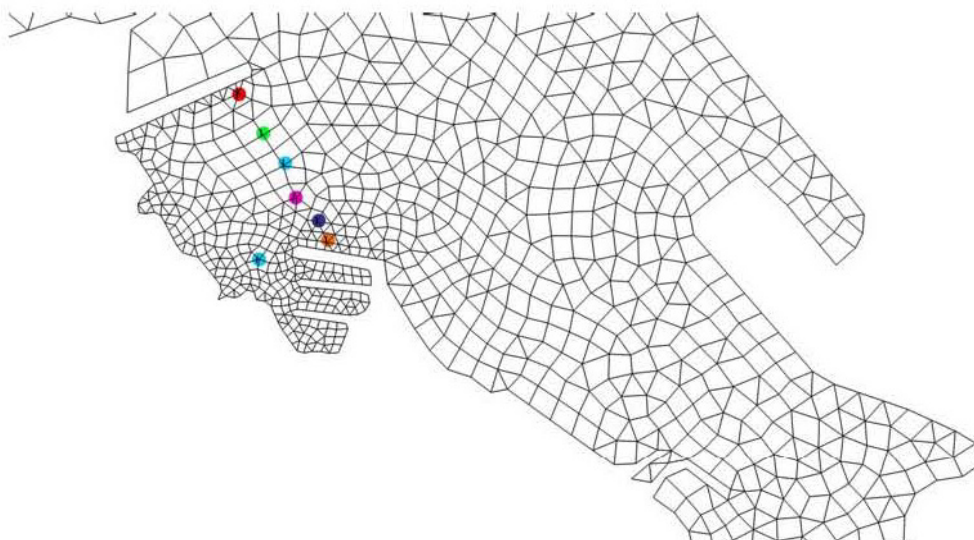
Potensialet for rekontaminering av Kirkebukten etter pilotiltak er vurdert ved hjelp av modulen RMA4. Denne bruker resultatene fra RMA2 - de simulerte sirkulasjonsmønstrene ved de ulike scenariene. Basert på dette beregnes konsentrasjon av et gitt stoff som transporteres og spres fra et angitt kildeområde. Modulen STWAVE er brukt for å vurdere i hvilke områder det er størst mulighet for resuspensjon av sedimenter på grunn av turbulens som drives av vind og strøm. Simuleringene med STWAVE viser økning i bølgegenerert turbulens nær land og ved tersklene i de trangere delene av fjorden. Resultatene fra nær land, som viser høyt potensiale for resuspensjon, er i tråd med målingene som viser lavere grad av forurensning i prøvene tatt nærmest land. De planlagte målingene av turbiditet i fase 2 av prosjektet vil kunne bekrefte om det er sterk turbulens også ved tersklene i indre deler av fjorden (Mobilitet av miljøgifter i Puddefjorden, prosjekt nr. 07856).

To kilder for spredning av forurensning presenteres her som eksempler på potensialet for rekontaminering. Det ene kildeområdet er i den ytre delen av Puddefjorden, slik at påvirkning fra det større, ytre området kan vurderes. Den andre kilden er lengre inne i Puddefjorden, der sterk strøm i tilknytning til grunne områder gir et stort potensiale for erosjon/resuspensjon av sedimenter. Plassering av dette kildeområdet er vist i Figur 9. Stedene der resulterende konsentrasjoner beregnes i Kirkebukten er vist med prikker i Figur 10. Punkt 1-6 er ved åpningen til Kirkebukten, mens punkt 7 er i indre del av bukten. For begge de to kildeområdene ble det gjort konsentrasjonsberegninger for to ulike tilførsler:

- 1) konstant tilførsel over en lengre periode.
- 2) korttidstilførsel med "utslipp" i løpet av 2,5 time.



Figur 9. Plassering av kildeområdet i indre del av Puddefjorden.



Figur 10. Lokaliseringen av de syv punktene hvor konsentrasjonen av miljøgifter er beregnet ut ifra modul RMA4. Punktene 1 (rød) til 6 (orange) ligger i innløpet til Kirkebukten. Punkt 7 ligger i den indre delen av bukten.

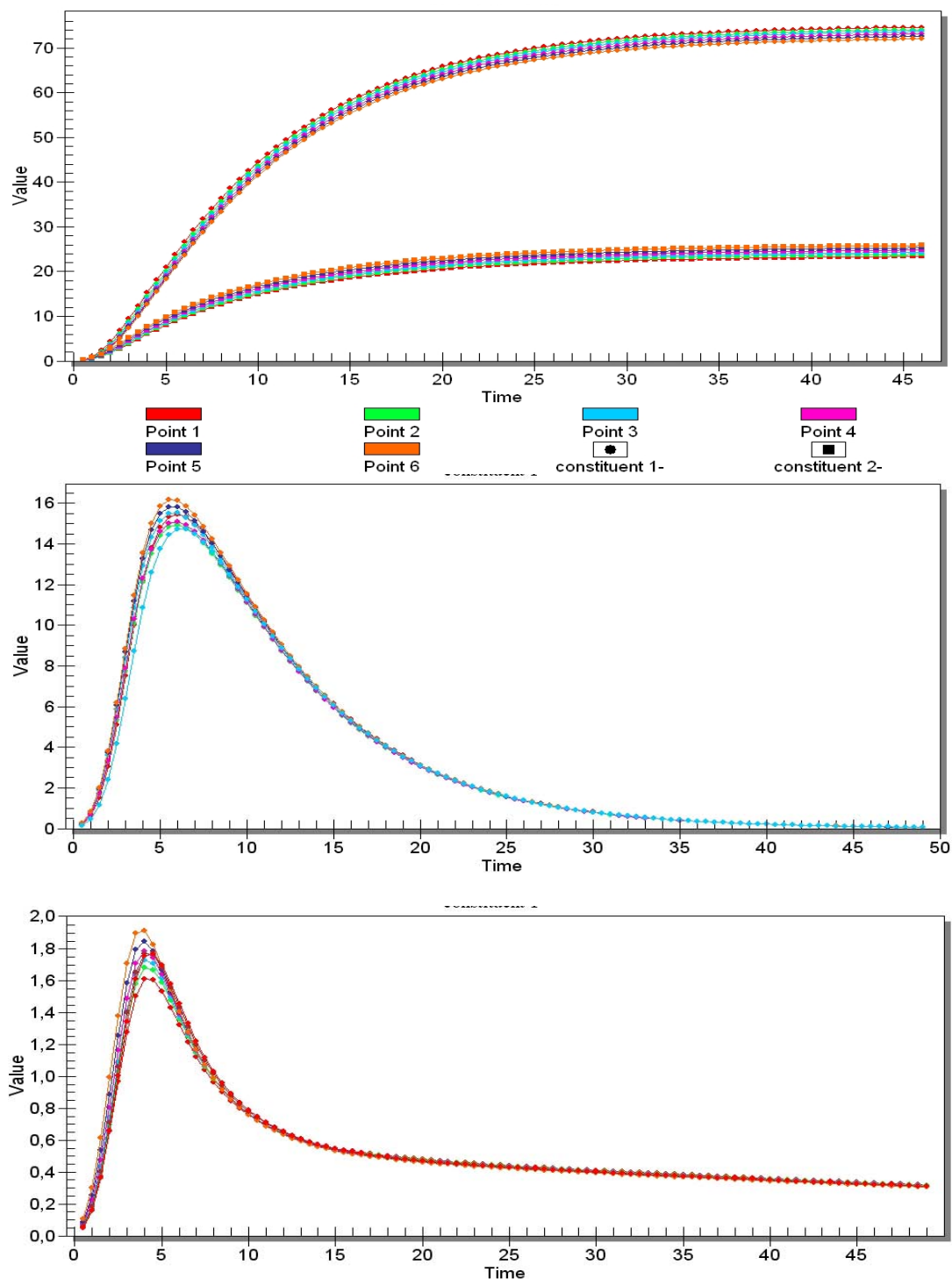
Utslipp over en lengre periode:

Figur 11a viser resultater fra simulering med scenariet Spring+ModDir. I dette eksempelet øker mengden forurenset vann som kommer til Kirkebukten med tiden, og etter to tidevannsperioder er beregnet konsentrasjon på over 70% når kilden er i ytre del av Puddefjorden og ca 20% for kilden i kanalen i indre del av fjorden. Det er ingen vesentlig forskjell mellom indre og ytre del av Kirkebukten – når det først kommer kontaminert vann til åpningen vil dette også finne veien inn i bukten. Konsentrasjonene som angis for hvert punkt er andelen vann som har passert gjennom det angitte kildeområdet.

Resultatene for de andre scenariene for tidevannsstrøm og vind er av samme størrelsesorden. Alle simuleringene viser at mengden forurenset vann som når inn i Kirkebukten er minst når kilden er i indre del av Puddefjorden. Ingen av scenariene viser null sansynlighet for rekontaminering fra de to kildeområdene.

Korttidstilførsel:

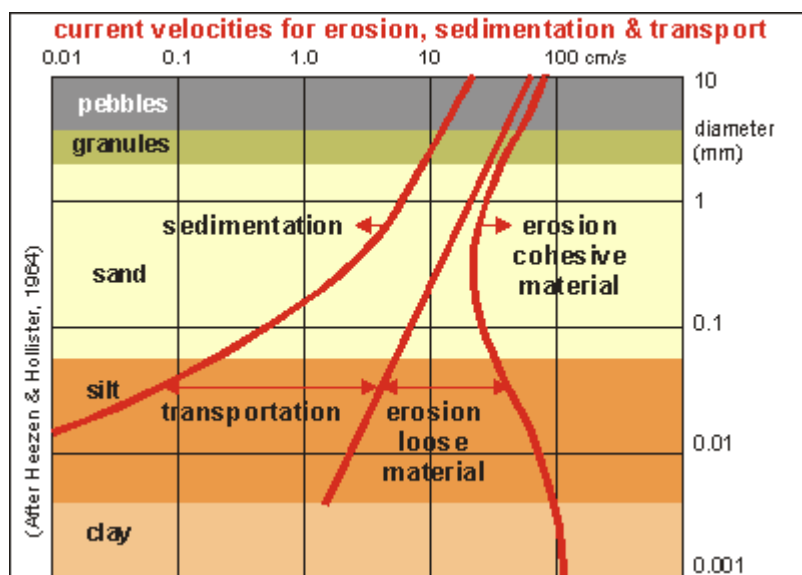
Figur 11b,c viser resultater fra simuleringer av tilførsel i løpet av 2,5 timer. Her er utviklingen svært ulik for de to kildeområdene. Kontaminert vann som kommer fra ytre del av Puddefjorden vil skiftes ut med annet vann etter relativt kort tid, mens ved tilførsel fra indre del vil konsentrasjonen i Kirkebukten være jevn over mye lengre tid. Som for det langvarige utslippet viser også korttidscenariene at det kun er det små forskjeller mellom indre og ytre del av Kirkebukten.



Figur 11a,b,c: Tidsutvikling for konsentrasjon av forurenset vann for punktene 1-7 i Kirkebukten (se **Figur 10** for plassering av punktene). Den øverste figuren viser konsentrasjoner ved langvarig spredning fra ytre del av Puddefjorden (linjer med prikker, det høyeste konsentrasjonsforløpet) og fra kanalen i indre del (firkanter, de laveste verdiene). Den midtre figuren viser resultater for korttidsutslipp fra ytre del, og den nederste figuren viser spredning av korttidsutslipp fra indre del.

Simuleringer viser at det er stor sannsynlighet for at forurenset vann fra forskjellige regioner kan nå Kirkebukten-området. Sannsynligheten for dette er avhengig av vekselvirkninger mellom

tidevannsbevegelse og vindforhold. Sammenheng mellom strømhastigheter, erosjon, transport og sedimentasjon er gitt ved den såkalte Hjulstrømsammenheng (Figur 12). Med simulerte strømmer av mer enn $25 \text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ innenfor kanalregionen og for den ytre del av Puddefjorden, blir sedimentet erodert og spredt til Kirkebuktenområdet. Mengden av forurensede stoffer som blir spredt til Kirkebuktenområdet er avhengig av varigheten av episodene med erosjon og av transport av forurensede stoffer fra utenfor Puddefjord-området.



Figur 12: Sammenheng mellom strømhastighet, erosjon, transport og sedimentasjon (Kilde: <http://www.seafriends.org.nz/enviro/soil/>)

I Bergen havn er en vanlig konsentrasjon av sediment i vann på $5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ (Uriansrud og Stenstrøm, 2005). Ut i fra denne konsentrasjonen er mengden av sediment som har blitt sendt inn i Kirkebukten estimert til 2100 kg pr. dag fra en permanent sedimentkilde som ligger i den ytre del av Puddefjorden og 720 kg fra kanalen i Puddefjorden. For kortsiktige erosjonsbegivenheter på 2.5 timers lengde er mengden av forurenset sediment som blir sendt inn i Kirkebuktenområdet estimert til 555 kg fra ytre Puddefjord og 62 kg fra kanalen i Puddefjorden. Strømhastighetene innenfor Kirkebuktenområdet er vanligvis relativt små. Derfor er potensialet for erosjon av sediment i Kirkebukten lite. Potensialet for forurenset stoff som kan bli transportert inn i området er beskrevet over. I tilfelle en erosjonsbegivenhet, er tidshorizonten for transport tilsvarende en tidevannssyklus. På grunn av den lave strømhastigheten inne i Kirkebuktenområdet vil de forurensede sedimentene som blir transportert inn i Kirkebukten sedimentere her.

4. Konklusjon

Hovedformålet med dette prosjektet har vært å kartlegge den nåværende forurensningstilstanden inne i Kirkebukten, og vurdere potensialet for rekontaminering av området etter den foreslåtte pilotrensingen der.

Analysene av sedimentprøver fra Kirkebukten viser at konsentrasjonene av de fleste metaller i området ligger i tilstandsklasse I til III (fra ubetydelig – lite forurenset til markert forurenset) basert på SFTs system for miljøkvalitet. Unntakene fra dette er kvikksølv som finnes i konsentrasjoner tilsvarende sterk forurensning (tilstandsklasse IV) ved tre prøvestasjoner, samt sink og bly som har konsentrasjoner tilsvarende samme tilstandsklasse i én sedimentprøve. For de organiske miljøgiftene er konsentrasjonene enda høyere, og konsentrasjoner tilsvarende tilstandsklasse V (meget sterkt forurenset) ble observert for alle stoffgruppene (organiske tinnforbindelser, PAH og PCB).

Det er gjort numeriske simuleringer med 2-dimensjonal modellen SMS (Surface Modelling system), for å vurdere faren for rekontaminering av Kirkebukten etter at denne er renset. Ulike scenarier som drives av vind og tidevann er simulert for å dekke ulike sirkulasjonsregimer som vil påvirke spredning av forurensning i Puddefjorden. Resultatene fra simuleringene med SMS indikerer at det er et stort potensiale for rekontaminering etter en eventuell opprydning av Kirkebukten. Alle de ulike scenariene for vind og tidevann støtter denne konklusjonen. Dersom forurensning virvles opp i én del av Puddefjorden vil en viss andel av dette transporteres inn i Kirkebukten. Hvor stor mengde forurensning som transporteres inn i Kirkebukten avhenger av værforhold og tidevannsfase, og av hvor i Puddefjorden kilden til rekontamineringen er lokalisert.

Det anbefales derfor å vurdere å rense hele Puddefjorden i én operasjon istedenfor sekvensielt, og da med oppstart i Kirkebukten. Dersom Fylkesmann i Hordaland og SFT skulle finne det nødvendig å teste ut tiltaksmetoder ved hjelp av pilotiltak i Kirkebukten, anbefaler vi at dette prosjektet gjøres så lite og billig som mulig siden det er store muligheter for at området rekontamineres.

Innenfor rammen av dette prosjektet er det indikert områder med potensiale for resuspensjon av mulig forurenset materiale. I neste del (Mobilitet av miljøgifter i Puddefjorden, prosjekt nr. 07856) vil det bli gitt en mer detaljert vurdering, gjennom bruk av tre-dimensjonalt modellverktøy og et utvidet måleprogram.

5. Referanser

- McKee Smith, J., Sherlock, A.R., Resio, D.T., 2001: STWAVE Steady-State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE, Version 3.0, US Army Corps of Engineers (ACE), Engineer Research and Development Center - Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory
- Molvær, J., Knutzen, J., Magnusson, J., Rygg, B., Skei J., Sørensen, J., 1997. Klassifisering av miljøkvalitet i fjorder og kystfarvann. Veiledning. SFT. TA no. TA-1467/1997. 36 s.
- Soldal, O., Oen, A., Kibsgaard, A., Uriansrud, F., Lindholm, O., Godøy, O., Jartun, M., Ottesen, R.T., 2005. Bergen havn – Tiltaksplan fase II. COWI. 46 s.
- Uriansrud, F, Stenstrøm, P., 2005, Modellering av miljøgifttransport I Vågen, Bergen havn, Delrapport til tiltaksplan forurensede sedimenter Bergen havn Fase 2. NIVA Rapport LNR 5055-2005.
- US ACE, 2005: Users Guide To RMA4 WES Version 4.5, US Army, Engineer Research and Development Center - Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory.
- US ACE, 2006: Users Guide To RMA2 WES Version 4.5, US Army, Engineer Research and Development Center - Waterways Experiment Station, Coastal and Hydraulics Laboratory.

NIVA: Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

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



Norsk institutt for vannforskning

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