

# Bruk av modeller for kyststrømmer og fjord-sirkulasjon for lokalisering av oppdrettsanlegg

Av T. A. McClimans

T. A. McClimans er ansatt ved Norsk hydroteknisk laboratorium (NHL) og Norges tekniske høyskole (NTH).

## Sammendrag

Eksempler fra forfatterens erfaringer i resipientundersøkelser er brukt for å gi innsikt i de fysiske forhold i ulike bassenger fra halvlykkede poller til åpent farvann. Vekt er lagt på bruk av modeller. Behovet for videreutvikling av kunnskaper om fysiske forhold som er relevant til lokalisering av oppdrettsanlegg er vurdert.

## 1. Lokalisering av oppdrettsanlegg

Fisekoppdrett er utbredt i norske fjorder og kystfarvann. Lokalisering av de første anleggene var ofte tatt på skjønn, mens utviklingen har ført til mer og mer inngående forarbeid spesielt med hensyn på miljøforholdene både før og etter etableringen. Fysiske størrelser som vind, bølger, strøm og is er forhold som er viktige for trygg konstruksjon og lokalisering av et anlegg. Vannutskiftning og -kvalitet er også viktig for produksjonsforhold i oppdrettsnæringen. Det er visse minimumskrav som må tilfredsstilles for å unngå driftsproblemer og konflikter med andre brukere av havet. Grove, og ofte konservative anslag over fysiske forhold og vannkvalitet kan av og til utelukke potensielt gode lokaliteter.

Ofte dreier det seg om manglende kunnskaper om de virkelige utskiftningsforhold, sirkulasjonsmønstre og muligheter for tiltak som kan bedre de fysiske forholdene.

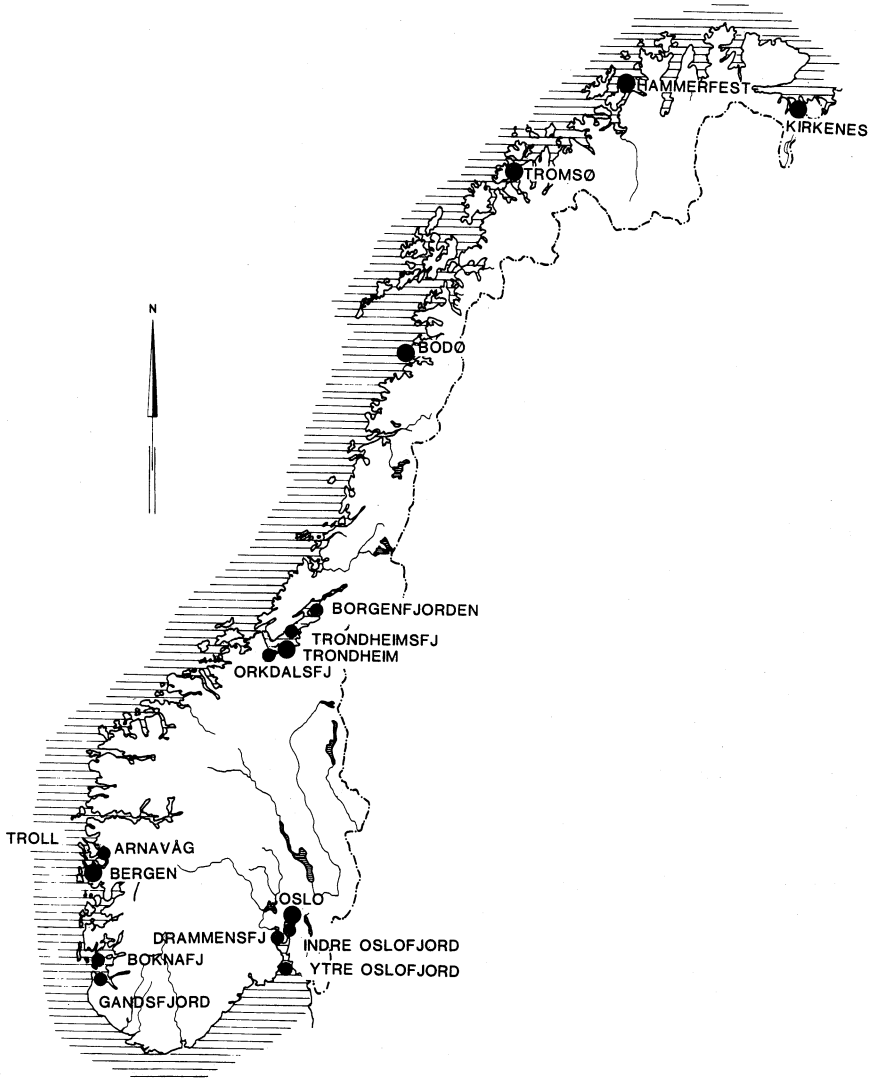
I de senere år er det innarbeidet bruk av mer avansert modellverktøy for mer nyanserte vurderinger av lokale forhold og bæreevnen til vannresipienter. I det følgende vil jeg trekke fram eksempler fra min egen erfaring for å illustrere hvor viktig dette kan være for oppdrettsnæringen. Et kart over aktuelle områder er vist på Figur 1.

## 2. Topografiske forskjeller

For resipientvurderinger innførte Jacobson, et al (1982) en grei måte å klassifisere de ulike vannområdene langs kysten:

- Poller
- Åpne fjorder
- Skjærgårder

I utgangspunktet vil de fleste tro at poller ikke egner seg til oppdrett, men tidlig i dette århundret var det utstrakt bruk av poller til østersdyrking. Borgenfjorden (McClimans, 1973) hadde en meget produktiv flyndreoppdrett. Enkelte poller har en så god utveksling



Figur 1. Oversiktskart over relevante resipientundersøkelser.

drevet av tidevann at bæreevnen for oppdrett bør være betraktet som god så lenge vannet utenfor pollen ikke er sterkt belastet fra andre kilder (McClimans, 1978).

Drammensfjorden og Indre Oslofjorden oppfører seg på mange måter som poller med begrenset bæreevne. Dette skyldes kombinasjoner av relativt grunne terskler og smal munning mot Ytre Oslofjord. Overflatelaget i Drammensfjorden har en vesentlig fordel med gjennomstrømning av vann fra Drammenselva.

Ytre Oslofjord er et eksempel på en åpen, bred fjord med dyp terskel. Her er vannutskiftningen sterkt påvirket av fluktuasjoner i Skagerrak, forårsaket av regionale vinder og lokal vinddrift av overflatelaget. Lenger ute i Skagerrak er det åpen kyst uten nevneverdig topografisk styring. Her begrenser jordens rotasjon spredningen av vannet mot åpent hav ved å danne en kyststrøm.

Skjærgårder er topografisk sett de mest kompliserte resipienter å modellere. De har vesentlig mer strandsone enn tilsvarende store resipienter. I de fleste tilfeller er tidevannet en dominerende og sikker utskiftningsmekanisme som ved Trømsøområdet (Næser, et al. 1975). Nyere utviklinger innen endelig elementers teknikker (Utnes, 1988) vil kunne spille en viktig rolle i modellering av vannkvalitet i skjærgårder.

### 3. Viktige fysiske prosesser

Bæreevnen til en resipient er avhengig av volumet, næringstilførsler og utskiftningsprosesser drevet av vind, tidevann og ferskvannstilførsler. I mer åpne resipienter som Boknafjorden er fluktuasjoner i det eksterne tetthetsfeltet dominerende for vannutskiftning. I

Gandsfjorden (Jacobson et al, 1983) er utskiftning på grunn av fluktuasjoner i kyststrømmen mange ganger større enn tidevannsprismen. Store utskiftninger er også observert i Trondheimsfjorden. Vannkvalitet (oksygen, næringsstoffer, m.m.) med og uten oppdrettsanlegg er også avhengig av småskala fluktuasjoner (turbulens), som er svært vanskelig å modellere.

### 4. Modeller

Vurdering av bæreevnen til sjøresipienter er ofte basert på feltmålinger og bruk av modeller av svært ulike typer. I Tabell I er ført opp en liten oversikt over modelltyper.

Boksmodeller tar imot integrert (midlet) data og beregner midlere tilstander i resipientavsnittet som de representerer. Oppholdstiden i Arnavåg ble behandlet med slike betraktninger (Jacobson, et al, 1983). Endringen av saltholdigheten i Borgenfjorden på grunn av variasjoner i Trondheimsfjorden ble behandlet som en boksmodell for beregning av oppholdstiden i en blindpoll (McClimans, 1973). En meget avansert boksmodell med mange koblinger er MAKRILLEN, som beregner blant annet saltholdighet og vanntransport i Kattegat—Skagerrak (Stigebrandt, 1984).

Boksmodellen kan sees som byggeklosser for større flerdimensjonale modeller, men koblingen mellom ledene må da inkludere både masse og impuls (kraft) balanser.

En-dimensjonale modeller var tatt i bruk tidlig i utviklingen av regnemaskiner. Det er ofte disse modellene som er brukt når en modell skal sammenlignes med en analytisk teori (for kalibrering). For tidsavhengige horisontale

Tabell 1. *Modelltyper brukt i fysiske resipientvurderinger.*

Modelltype	Essensen	Fortrinn
Boks	Budsjettbetraktning i veldefinerte resipient-avsnitt	Billig i bruk
1-Dim.	Beregner kontinuerlige fordelinger i lengde eller dybde der variasjoner i de andre to retninger kan midles.	Forholdsvist billig regnemaskinmodell for beregning av parametre i et estuarium, vindblandet fjord og sesongendringer i vertikalen.
2-Dim.	Beregner koblingen enten i horisontalplanet (tidevannsbølger) eller i vertikalplan (indre bølger).	Tilstrekkelig nøyaktig for grunnvannsbølger (tidevann) i skjærgårder og sokler.
3-Dim.	Beregner den virkelige verden.	Tilsvarende mest de aktuelle målte verder i felten og i laboratoriet.
Laboratorie	Småskala simulering av de viktigste fysiske drivkrefter og randbetingelser.	Høy oppløsning.

modeller (langs en elv eller brakkvannslag ut en fjord) må bølgeforplantningen av trykksignaler simuleres. For modeller i vertikalen er det ofte utvekslingsalgoritmer som er mest kritisk. I bearbeidningen av felldata må tverrsnittsmidlingen tas hensyn til.

To-dimensjonale modeller kom i bruk i 60-årene. Et gjennombrudd for modellering av forhold i tidevannsdrevne resipienter kom med Leendertses (1967) rapport som var dokumentasjon av en modell for alles eie («folkevogna» for resipientforskere). Modellen midler fordelingen i vertikalen og beregner vannets egenskaper i det

horisontale planet. Mange varianter av modellen er utviklet gjennom årene, inkludert de som ble brukt i Tromsøundet (sterkt ulineært) (McClimans og Gjerp, 1979) og Ytre Oslofjorden (vind- og tidevannsdrevet drift) (Gjerp, et al. 1981).

Tre-dimensjonale numeriske hydrodynamiske modeller simulerer i prinsipp virkeligheten som vi opplever den. Det er imidlertid nødvendig å innføre mange forenklinger av naturen for å kunne beregne fysiske prosesser innenfor plass og tidskapasitet av de mest avanserte superdatamaskiner. En modell som skal beregne samtlige fysiske

størrelser i 100 beregningspunkter i hver retning kan kreve like mye tid i en superdatamaskin som prosessene tar i naturen. Under disse forhold er det umulig å bruke slike modeller prognostisk. Storskalaprosesser som har lengre tidsskalaer lar seg modellere prognostisk i en viss grad med dagens regnemaskiner. Et eksempel er beregningen av utviklingen av virvler i en kyststrøm (James, 1988). En vurdering av de mulige forenklinger er derfor kritisk for økonomien og nytteverdien av modellsimuleringer.

Laboratoriemodeller er nødvendigvis tre-dimensjonale. Vanligvis må vi regne med en oppløsning som tilsvarer flere millioner beregningspunkter i en numerisk modell. Når dette er sagt, har laboratoriemodeller visse begrensninger med hensyn til viskositet, overflate-spenning, varmeavgang og kjemiske og biologiske prosesser. Laboratoriemodeller har vært mye brukt for kalibrering av teorier og numeriske hydrodynamiske modeller. Den nyere utviklingen innen laboratoriemodell-teknikk er å opprette en kommunikasjon til datamaskinen, slik at ulike modelltyper kan kjøres i lag.

## 5. Dagens kunnskapsnivå

Våre kunnskaper om resipientforhold, fysiske prosesser og modellering er basert på erfaringer med prosjekter som er utført for mange oppdragsgivere. Et utvalg av eksempler med navn er vist på Figur 1. Nedenfor vil jeg redegjøre for lærdom vi har høstet med disse eksemplene.

**Borgenfjorden** (McClimans, 1973) er en tidevannsdominert poll. Det sydlige bassenget like innenfor innløpet er godt

blandet, slik at en boksmodell er berettiget. Kalibreringen av modellen ble gjort på grunnlag av tidevannsdempning (energitap ved innløpet) og utvekslingsforhold. Dette ble regulert med strupningen ved broen ved innløpet. Masseutveksling ble bergnet fra partikkelutvasking i en laboriemodell. En enkel boksmodell med vannutskifting modellert som et effektivitetstall ganger tidevannsprisemen forklarte både felt- og laborieriedata. Effektiviteten for denne pollen er ca. 0,25. Dette synes å være rimelig for en poll der ekskursjonslengden av vannet i innløpet er av samme størrelsesorden som lengden av bassenget.

**Arnavåg** (Jacobson, et al. 1983) er en poll med en så stor munning at tidevannsstrømmene ikke makter å bryte ned lagdelingen. Med litt over 1/2 km<sup>2</sup> overflateareal og fjellpartier i omegnen er vinden heller ikke en viktig drivmekanisme. En gjennomstrømning av mindre enn 10 m<sup>3</sup>/s ferskvann ble modellert som et tynt overflatelag hvis tykkelse er kontrollert ved en smal munning til den ytre fjorden. Oppholdstiden av ferskvannet var beregnet til mindre enn en tidevannsperiode. Tetthetsfluktuasjoner i den ytre fjorden forårsaket variasjoner i dette tallet og er viktig for utskiftingen av vannmassene i mellom- og dypere lag. Oppholdstiden til vannet ned til terskeldyp (7 m) ble beregnet til ca. 1 uke ved å ta hensyn til longitudinale (tidevannsdrevne) utvekslingsprosesser som modellert i Borgenfjorden. Utskiftingstiden til vannet under terskeldyp ble anslått til 2—4 måneder på grunnlag av felldata. Arnavåg har liten bæreevne for avfall fra oppdrettsanlegg.

**Drammensfjorden** (Steen og McClimans, 1979) har et kraftig sprangsjikt i terskeldypet. Bunnvannet egner seg ikke for fisk. En kraftig gjennomstrømning av elven blir kontrollert ved Svelvikundet. En enkel dynamisk (boks) modell med hydraulisk kontroll ved Svelvik beskriver tykkelsen godt. En analytisk modell kalibrert til laboratorieforsøk (McClimans, 1979) beskriver saltholdigheten i elveplumen både i Drammensfjorden og syd for Svelvik, der utstrømningen ligner en elvemunning. Her gir både gjennomstrømningen (med mye friskt vann) og bunnvannsutskiftningen en god bæreevne. Vinters tid, derimot, byr på problemer med kulde og is som begrensningsfaktorer.

**Indre Oslofjorden** (Stigebrandt, 1976) er ikke så lukket som Drammensfjorden. Ferskvannstilførselen utenfor Drøbakterskelen (Drammenselva og Glomma) og innenfor bassenget fører til en trelags sirkulasjon som byr på modellproblemer. Tidevannsstrømmer over terskelen fører til indre bølger langs sprangsjiktet, som kan øke vannutvekslingen lenger inne i bassenget. Vind og skipsfart kan også bidra vesentlig til blandingsenergi i bassenget. En endimensjonal modell ble brukt for å beregne sesongendringer i det vertikale temperaturprofil (Audunson, et al, 1976) men felldata tyder på at fjordens tilstand bør modelleres tredimensjonalt på grunn av store punktbelastninger og bassengets størrelse.

**Tromsøundet** (McClimans og Gjerp, 1979) ble modellert både i laboratoriet og i en todimensjonal hydrodynamisk modell (Leendertse, 1967; Hodgins, 1977). Området er en skjærgård som er

dominert av kraftige tidevannsstrømmer. Modellene ble testet mot hverandre (nesten uten kalibrering) for å konstatere at blandings- og utskiftningsprosesser er meget effektive og at jordens rotasjon hadde liten innvirkning på de kraftige strømmene. En sammenligning med drivmarkørbaner i felten viste at laboratoriemodellen med sin store romlige oppløsning maktet å simulere bakevjer rimelig godt. Dette er en meget følsom prøve for en modell.

**Ytre Oslofjord** (Gjerp, et al, 1981) ble modellert for oljedrift. En utvikling av Leendertses (1967) todimensjonale modell til en redusert tyngdemodell (lagdelt) ble drevet av ferksvannskilder og vind. Dette området er så pass dypt og åpent at bunntopografi har liten virkning på et tynt brakkvannslag. Modellering av oljedrift og andre farlige stoffet kan være viktig både for lokalisering og driften av oppdrettsanlegg i mer åpne områder. Modeller kan også brukes prognostisk i en varslings-tjeneste.

**Trollfeltet** (McClimans, 1985) ligger i åpent hav, men får av og til kraftige strømmer fra kyststrømmen. Modellresultater fra både laboratoriet og 3-dimensjonale numeriske modeller (James, 1988) viser store instabiliteter i denne strømmen, som er sterkt påvirket av jordrotasjon. Slike avanserte modeller krever input i form av felldata eller beregninger. Inngangsdata for dynamisk modellering av fluktuasjoner i kyststrømmen er fått ved multi-boksmodellen MAKRILLEN. Dette arbeidet har ført til en operativ varslings-tjeneste (Hansen og McClimans, 1987).

**Gandsfjorden** (Jacobson, et al, 1983) er påvirket av fluktuasjoner i kyststrømmen. Utskiftningen av vannet ned til ca. 50 m dyp er flere ganger større enn tidevannsprisken på grunn av langperiodiske tetthetsfluktuasjoner. Fjorden har en rimelig god bæreevne, men er i nærheten av et stort befolknings-senter.

**Boknafjorden** (McClimans, et al, 1987) er også sterkt påvirket av fluktuasjoner i kyststrømmen. Fjorden er så bred at kystvann strømmer inn på sørsiden og ut på nordsiden styrt av jordens rotasjon. Dessuten strømmer alle ferskvannskilder mot klokken i dette bassenget. Prosessen er simulert i en laboratoriemodell og en 3-dimensjonal numerisk modell er planlagt.

**Trondheimsfjorden** (Jacobson, 1983) har også en sirkulasjon mot klokken. Utskiftningsforholdene i Trondheimsfjorden er svært gode på grunn av hyppige utvekslinger med den fluktuerende kyststrømmen langs kysten og tidevannsstrømmer. Fjorden er imidlertid så stor at bølger gjør det vanskelig å lokalisere fiskeoppdrettsanlegg.

**Orkdalsfjorden** (McClimans, 1980) er en sidearm til Trondheimsfjorden, som er modellert i laboratoriet. Fjordarmen er svært åpen og jordrotasjonen styrer Orklaelveplumen. Elvevannet er styrt mot venstre, men slår tvers over fjorden (mot høyre) ca. 3 km fra elvemunningen. Det samme skjer med Drammenselva i Drammensfjorden. Vannet i en stor bakevje på høyre side av elvemun-

ningen har en forholdsvis lang (lokal) oppholdstid som muligens vil kunne begrense nytteverdien av området til oppdrettsanlegg. Overflatevannet er dessuten forholdsvis ferskt.

## 6. Utviklingsbehov

Modeller gir et kosteffektivt alternativ til omfattende feltmålinger i vurderingen av fysiske forhold for lokalisering av oppdrettsanlegg. Avanserte modeller for detaljsimulering har allikevel behov for nøyaktige kalibreringsdata. Modeller bør derfor brukes også til styringen av feltmåleopplegg.

Det er en rask utvikling innen tredimensjonale hydrodynamiske modeller. De stiller store krav til økt kunnskap om horisontale utvekslingsprosesser, indre bølger, tidsvariasjoner m.m. Det er behov for modeller som kan simulere strømforholdene i komplisert topografi over et større område (skjærgård).

Det er også en utvikling i fysisk-biologiske modeller (Stigebrandt, 1983; Slagstad, 1987) som er viktige verktøy for vurdering av produksjonsforhold og belastninger. Denne utviklingen har avslørt på nytt behovet for samarbeid mellom biologer og fysikere og et behov for kommunikasjon mellom modeller av ulike typer.

Gode, kalibrerte modeller gir muligheter for varsling av faretruende hendelser i havet (Hansen og McClimans, 1987). Dagens løsninger er ofte sammensnekrede løsninger av hyllevarer fra tidligere vellykkede anvendelser. For å komme riktig i mål med avanserte varslingsystemer bør vi satse mer på basiskunnskaper enn tilfellet er i dag.

## LITTERATUR

- Audunson, T., Land, J. og Rye, H. (1976): Computations of the temperature response of stratified sill fjords to cooling-water discharges. VHL Meddelelser 15E: 22—49.
- Gjerp, S. A., Oldervik, O., Næser, H. og Rye, H. (1981): A two-dimensional, two-layer numerical model for the dynamics of stratified coastal water masses and its application to Oslofjorden. I *The Norwegian Coastal Current*. Red. R. Sætre og M. Mørk. II: 459—482.
- James, I. D. (1988): Experiments with a numerical model of coastal current and tidal mixing fronts. *Cont. Shelf. Res.* (I trykk).
- Jacobson, P. (1983): Physical oceanography of the Trondheimsfjord. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*. 26: 3—26.
- Jacobson, P., McClimans, T. A. og Thendrup, A. (1983): Vurdering av rensekrav for sjøresipienter. Del 1: Dominerende prosesser i fjorder og kystfarvann. NHL-rapport STF60 A83033.
- Hansen, S. E. og McClimans, T. A. (1987): Forecasting currents in coastal waters. ASCE Fifth Symposium on Coastal and Ocean Management. Proceedings, 2864—2876.
- Hodgins, S. (1977): An improved computational method for the shallow water wave equations based on the Leendertse (1967) finite difference scheme. NHL-rapport STF60 A77058.
- Leendertse, J. J. (1967): Aspects of a computational model for long period water wave propagation. The RAND Corporation. Santa Monica. Memo RM-5294-PR.
- McClimans, T. A. (1973): Physical oceanography of Borgenfjorden. K. Norske Vidensk. Selsk. Skr. 2, 1—43.
- McClimans, T. A. (1978): On the energetics of tidal inlets to landlocked fjords. *Mar. Sci. Comm.* 4: 121—137.
- McClimans, T. A. (1979): On the energetics of river plume entrainment. *Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics*. 13: 67—81.
- McClimans, T. A. (1980): River plume studies in a rotating basin. NHL-rapport STF60 A80108.
- McClimans, T. A. (1985): Troll Field engineering studies. Oceanographic support work Stage 2: Summary Report. NHL-rapport STF60 F85093 (Fortrolig).
- McClimans, T. A. og Gjerp, S. A. (1979): Numerical study of distortion in a Froude model. *Proc. 16th Coastal Eng. Conf. III*: 2887—2904.
- McClimans, T. A., Nilsen, J. H., Eidnes, G., Steen, J. E. og Gjerp, S. A. (1987): En preliminær vurdering av de fysiske konsekvenser av dykket utslipp av spillvarme fra gasskraftverk ved Kårstø. NHL-rapport STF60 F87004 (Fortrolig).



- Næser, H., Audunson, T. og McClimans, T. A. (1975): Resipientundersøkelser ved Tromsø. Spredning og fortykning av avløpsvann i området. Resultater fra modellforsøk. NHL-rapport STF60 F75042. (Fortrolig).
- Slagstad, D. (1987): A 4-dimensional physical model of the Barents Sea. SINTEF rapport STF48 F87013.
- Steen, J. E. og McClimans, T. A. (1979): Tokt til Drammensfjorden 20.—21. mai 1977. Datarapport. NHL-rapport STF60 A79063.
- Stigebrandt, A. (1976): Vertical diffusion driven by internal waves in a sill fjord. J. Phys. Ocean. 6: 486—495.
- Stigebrandt, A. (1983): Vurdering av rensekrav for utslipp av kommunalt avløpsvann til sjøresipienter. Rapport 3. Om bestämning av et kloakutsläpps influensområde. NIVA-rapport 81006. II.1472.
- Stigebrandt, A. (1984): Troll Field engineering studies: Oceanographic support work — Task Report 3. A model for the estuarine circulation in the Skagerak. OTTER rapport STF88 F84017 (Fortrolig).
- Utnes, T. (1988): A finite element solution of the shallow water wave equations. (Under utførelse).

**Samfunnsteknikk er et tverrfaglig konsulentfirma med spesialkompetanse innenfor områdene**

- **Vannbehandling**
- **Slambehandling**
- **Avløpsrensing**
- **Avfallsbehandling**



**SAMFUNNSTEKNIKK A/S**

RÅDGIVENDE INGENIØRER OG ARKITEKTER

OSLO - BERGEN - GOL - HAMAR - MOSS - AURLAND

Hovedkontor: Gjerdrumsv. 12 - 0486 Oslo 4. Tlf.: 02 - 18 19 40