

Resipientundersøkelser ved Tromsø

Av Tore Audunson og Harald Næser

Tore Audunson er ansatt som gruppeleder ved Vassdrags- og havnelaboratoriet. Han har eksamen fra Michigan Tech. Univ., USA, maskinlinjen 1967 og Ph.D. fra Cornell Univ. 1972.

Harald Næser er ansatt som forsker ved Vassdrags- og havnelaboratoriet. Han er cand.real. fra Universitetet i Oslo, 1972 med mekanikk hovedfag.

Foredrag holdt i Norsk Forening for Vassdragspleie og Vanhygiene 16. oktober 1975.

Innledning.

Som vi vet, slippes det ut avløpsvann i stor utstrekning både langs kysten (til sjøen) og i innlandet (til innsjøer og elver). Det er ingen tegn i tiden som tyder på at omfanget av slike utslipp vil avta. Snarere tvert om. Vi klumper oss stadig tettere sammen, og strømmen av avløpsvann øker både fra industrien og private. Dette har selvfølgelig resultert i strengere krav både til kvaliteten av avløpsvannet, og til vurderingen av de konsekvenser slike utslipp vil kunne ha for forholdene i vannet som avløpet føres ut i (resipienten).

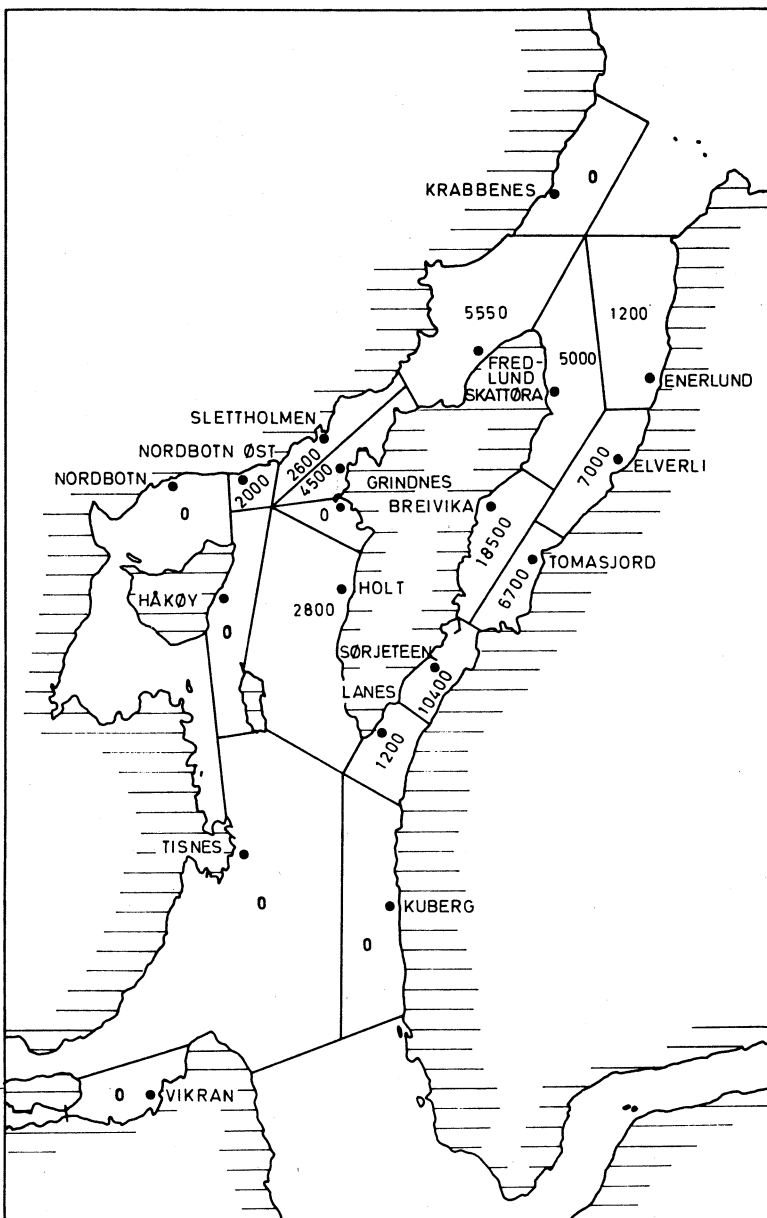
Kontroll av forurensningsproblemer forutsetter en best mulig forståelse av de strømnings- og blandingsfenomener som opptrer i vannmassene rundt utslippet. De fysiske (strøm, temperatur, saltholdighet) og biologisk/kjemiske forhold i et vannområde er knyttet nær sammen, og undersøkelser av begge inngår derfor ofte i en resipientvurdering. I av-

grensede områder kan imidlertid rene fysiske eller rene biologisk/kjemiske undersøkelser gi tilstrekkelig informasjon.

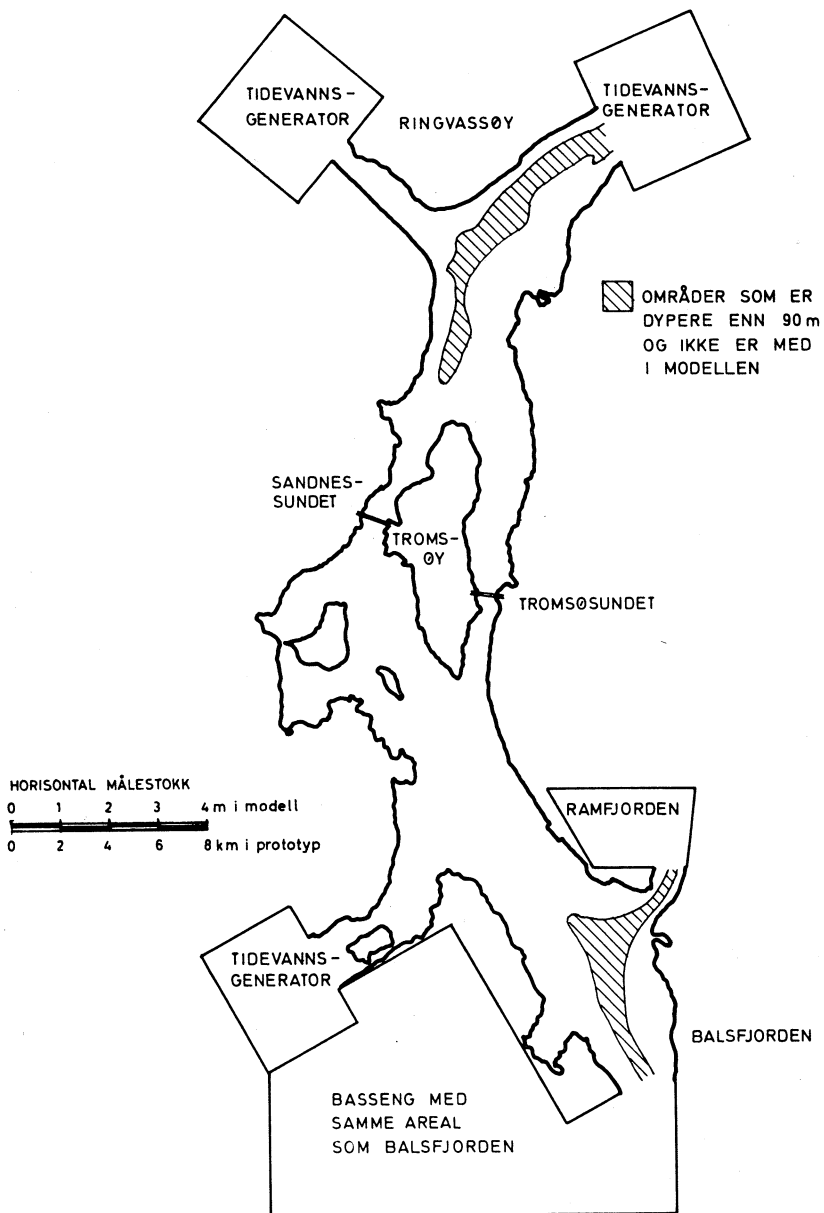
Et felles trekk ved utslipp til kyst- og innlandsresipienter er at vannet kan transportere forurensninger fra et tettsted i kommunen til et annet, og eventuelt videre til nabokommunene. Det siste medfører ofte at flere kommuner (langs et vassdrag, rundt en fjord) med fordel kan gå sammen om en større og mer komplett undersøkelse av resipienten. Et slikt opplegg kan redusere undersøkelseskostnadene for den enkelte kommune.

I det følgende skal vi se nærmere på den resipientundersøkelse som Vassdrags- og havnelaboratoriet har gjennomført for Tromsø kommune. Hovedhensikten med undersøkelsen har vært å klarlegge hvorledes eksisterende og planlagte kloakkutslipp spres og fortynnes i området. Det er det storstilte og noe langsiktige spredningsmønster som her er av interesse.

De områder som det har vært aktuelt å vurdere utslipp fra, er vist i figur 1, og figuren antyder også stør-



Figur 1. Utslippsteder med antall personekvivalenter for hvert område.



Figur 2. Oversikt over modellen.

relsen av de utslipp som kan komme på tale. VHL's undersøkelse omfatter transport, spredning og fortykning av avløpsvann i området. Vi har altså ikke behandlet de biologiske forhold i forbindelse med utslippet, eller sjøområdet. Kjennskap til de fysiske forhold er imidlertid en nødvendig forutsetning for vurderinger av biologisk og renseteknisk art.

I en fysisk modell er det vanskelig å gjenskape forholdene i områder med sterk lagdeling*) eller på steder hvor vind-drevne strømmer dominerer. Ved vurdering av kommunens problemer og av resultater fra feltmålinger i området, fant vi allikevel at en laboratoriemodell ville være det beste middel til å belyse forholdene. Grunnen til dette er at strømningsforholdene ved Tromsø er dominert av tidevannsstrømmer, som lett lar seg gjenskape i modell, og at vannmassene i området store deler av året er godt blandet uten noen fremtredende lagdeling. Derfor vil forholdene bare unntaksvis ligge så vel til rette for fysiske modellforsøk som i Tromsøområdet. Norske fjorder er ellers svært «individualistiske», og resultater fra et område kan ikke uten videre overføres til et annet.

Ofte må forholdene vurderes helt og holdent på grunnlag av feltmålinger. Slike undersøkelser vil i regelen være tidkrevende, og resultatene er ofte bare orienterende. Bygging og kalibrering av en modell krever også relativt omfattende undersøkelser i felten. De er dessuten nødvendige

*) Med lagdeling menes tetthetsforskjeller i vertikal retning på grunn av at saltinnholdet øker med dybden.

for å kunne bedømme modellens gyldighetsområde.

De fysiske forhold omkring et utslipp studeres i økende omfang ved matematiske beregninger. Regnearbeidet er omfattende og forutsetter bruk av datamaskin. Det kan nevnes at resultatene fra Tromsømodellen har vært nyttig til å vurdere kvaliteten av beregninger av strømforholdene i området. For resipienter med utpreget lagdeling har imidlertid utviklingen av slike beregninger bare såvidt begynt.

Beskrivelse av modellen.

Modellen omfattet et 40 km langt område av fjordsystemet rundt Tromsøy, se oversiktskart i figur 2. Området er forbundet med havet gjennom tre sund, Grøtsund og Kvalsund i nord og Rystraumen i sydvest. Videre er det forbundet med to fjordarmer, Balsfjorden og Ramfjorden. I modellen var disse bare representert med korrekt overflateareal, slik at de vannvolumer som ble ført inn og ut av fjordene ved stigende og synkende tidevann, ble korrekt reproduert i modellen.

Modellen ble bygget fortrukket, dvs. med forskjellige målestokk i horisontal og vertikal retning. Horisontalmålestokken var 1 : 2000, vertikalmålestokken 1 : 200. Dette vil si at en 100 m lang kyststripe var 5 cm lang i modellen, mens en vanndybde på 100 m var 50 cm. Erfaringen har vist at en slik fortrekning av modellen ikke fører til noen vesentlig forvanskning av strømbildet, så lenge vannet stort sett beveger seg horisontalt. Fortrukne modeller brukes som et kompromiss mellom de motstri-

dende krav om økonomi (liten modell) og god målenøyaktighet (stor modell).

Tidevannsbevegelser styres vesentlig av treghets- og tyngdekrefter. En modell som skal gjenskape slike bevegelser må «kjøres» etter den såkalte Froudes modellov. Modellovene stiller visse krav til sammenhengen mellom målestokkene for lengder, høyder og tid. Karakteristisk for Froudes modellov er at hastighetsmålestokken er lik kvadratroten av høydemålestokken, $U = \sqrt{H}$, og tidsmålestokken er lik den horisontale lengdemålestokk dividert med hastighetsmålestokken, $T = L/U = L/\sqrt{H}$.

I modellen er den maksimale tidevannsforskjell 1,5 cm. Dette tilsvarer en tidevannsforskjell på 3 m ved Tromsø. Med de valgte målestokker svarer 25 sekunder i modellen til om lag 1 time i Tromsø, og strømhastigheten i modellen er ca. $1/14$ av strømhastigheten ved Tromsø. Dette med-

fører at en tidevannsperiode (12 timer 25 min.) gjennomløpes på 5 min. 17 sek i modellen.

I de sund som åpner mot havet, var det i modellen plassert tidevannsgeneratorer som styrte vannstandsvariasjonene og dermed skapte de trykkforskjeller som drev strømmene i området. Grunnlaget for regulering av generatorene var data fra målinger høsten 1973. Reguleringsystemets virkemåte er vist i fig. 3.

Modellens evne til å gjenskape strømforholdene i Tromsøsundet er illustrert i figur 4, hvor nord- og sydgående overflatestrømmer, observert av Mosby i 1943, er sammenlignet med modellstrømmer for tilsvarende situasjon. En annen prøve på modellens riktighet vises i figur 5, hvor strømhastigheter målt i modell og prototyp gjennom halvannen tidevannsperiode er sammenlignet.

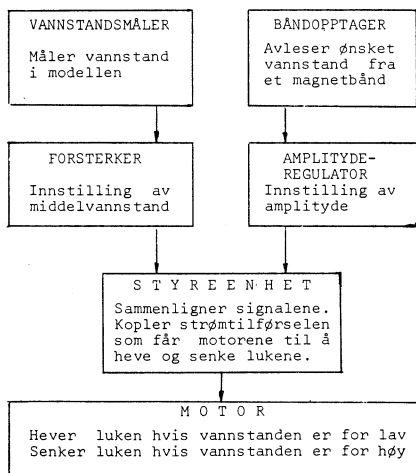
Ved vurdering av modellen har vi også hatt stor hjelp fra lokalkjente personer. Hvis de «kjente seg igjen» på modellen, var alt bra; hvis ikke, kunne vi som regel finne feilen gjennom samarbeid.

Tidevannsforskjellen varierer over måneden. Vi fant det derfor nødvendig å utføre forsøk med et gjennomsnittlig største (2,5 m) og et gjennomsnittlig minste tidevann (1,5). Her refereres en del resultater fra 2,5 m-forsøkene.

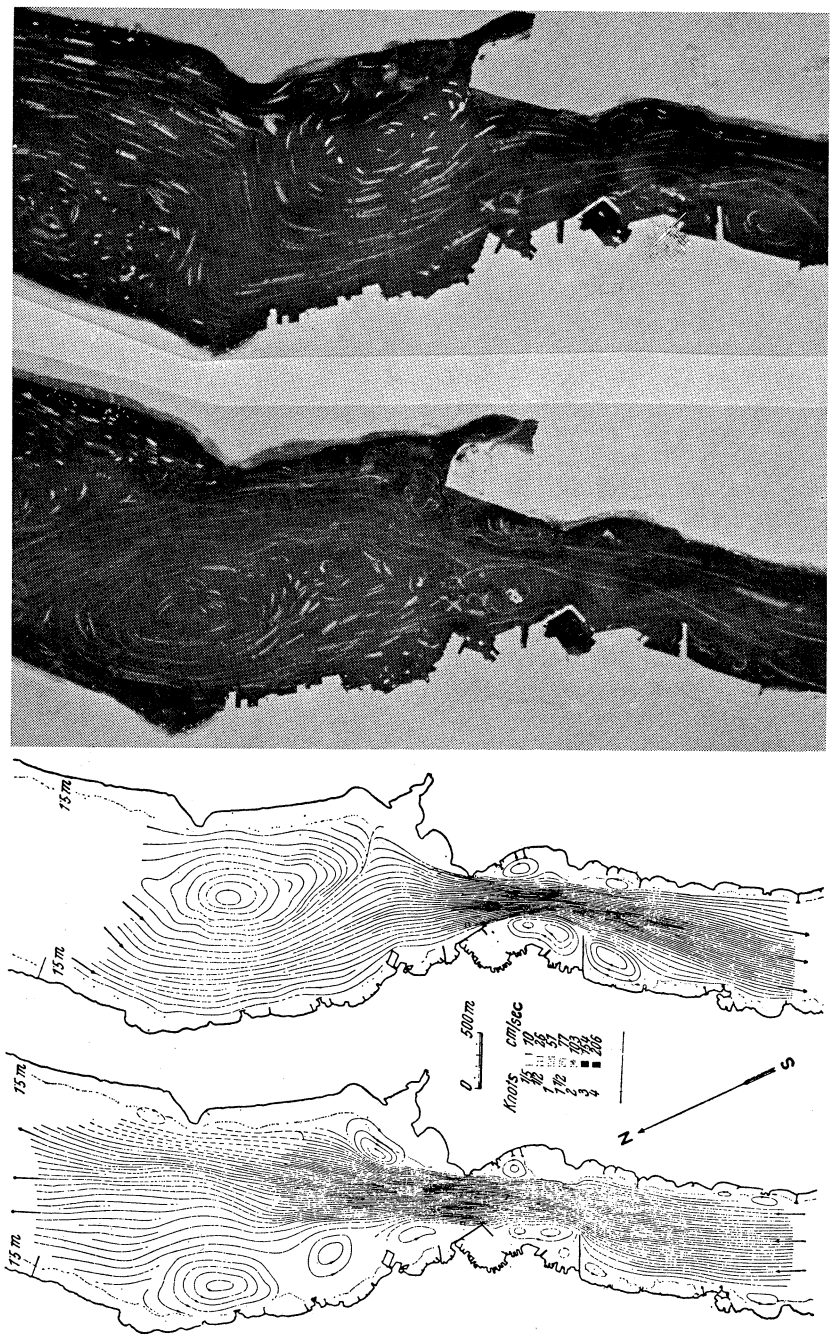
Spredningsforsøk.

Som nevnt, var hovedhensikten med modellen å undersøke hvordan kloakkutslipp spres og fortynnes i området.

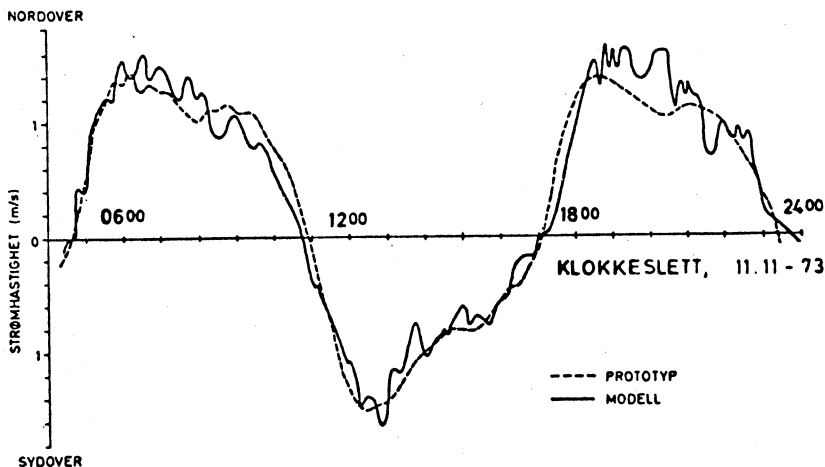
Et generelt forhold ved utslipp til



Figur 3. Reguleringsystemet.



Figur 4. Sammenligning mellom Mosbys feltmålinger (a, b) og modellen (c, d).



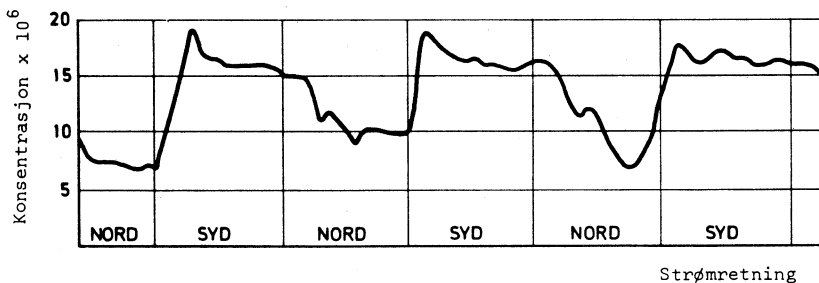
Figur 5. Sammenligningen av hastigheten målt ved Tromsø havn.

sjøområder med tidevannsdominerte strømforhold er at utslippets fortynning vil variere gjennom tidevannsperioden. De høyeste konsentrasjoner kan ventes når strømmen er svak, dvs. ved strømvending. Dette fenomenet ble også observert i modellen. Figur 6 illustrerer hvorledes en slik ansamling av avløpsvann med høyere konsentrasjon føres sydover gjennom Tromsø-sundet fra Breivika. Kurven viser målte konsentrasjoner

av et spesielt sporstoff gjennom tre tidevannsfaser. Det fremgår at konsentrasjonen varierer rundt en mer eller mindre konstant middelvei, og bestemmelsen av denne middelveien var et av hovedmålene for undersøkelsen.

Spredningen av utslippsvannet ble studert med tre forskjellige hjelpemidler, overflateflottører, fargestoff og fluorescerende sporstoff.

Flottører ble sluppet ut med jevne



Figur 6. Konsentrasjon i Tromsøsundet ved utslipp fra Breivika.

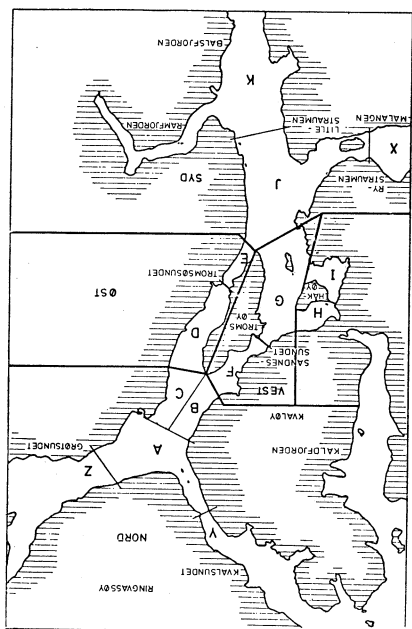


Fig. 7. *Oppdeling av området ved kuleutslipp.*

mellomrom fra ett utslippssted av gangen gjennom en hel tidsvannsperiode. Antall flottører i hvert av de områdene som er vist i figur 7, ble notert regelmessig. Resultatene er gitt i kurver som viser antall flottører i de enkelte områder til enhver tid. Stigende kurver betyr at området får tilført flottører, synkende kurver av flottører forsvinner. Det taggete kurveforløpet avspeiler hvordan tidevannet fører flottører ut og inn av området. Antall flottører i de enkelte områder gir kvantitativ informasjon om den relative fordeling av utslippsvannet.

Tiden fra utslippet starter til første

observasjon av flottører i et område antyder transporttiden fra utslipps-tiden til det betraktede området. At områdene etter hvert tømmes for flottører viser at det foregår en netto transport ut av området. En stasjonær utslippsituasjon vil derfor etter hvert føre til en langsomt fluktuerende likevektsskonsentrasjon av avløpsvann i de forskjellige områder. Denne likevektsskonsentrasjonen kan bestemmes fra kurven ved addisjon av antall flottører som finnes i området etter hver tidsvannsperiode, inntil området er tomt.

Fargestoff ble sluppet ut kontinuerlig, og spredningen nær utslippsstedet kartlagt ved fotografering. Ved hjelp av disse bildene kunne det

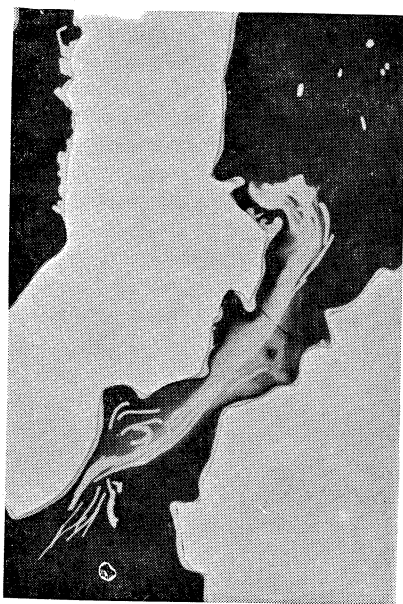
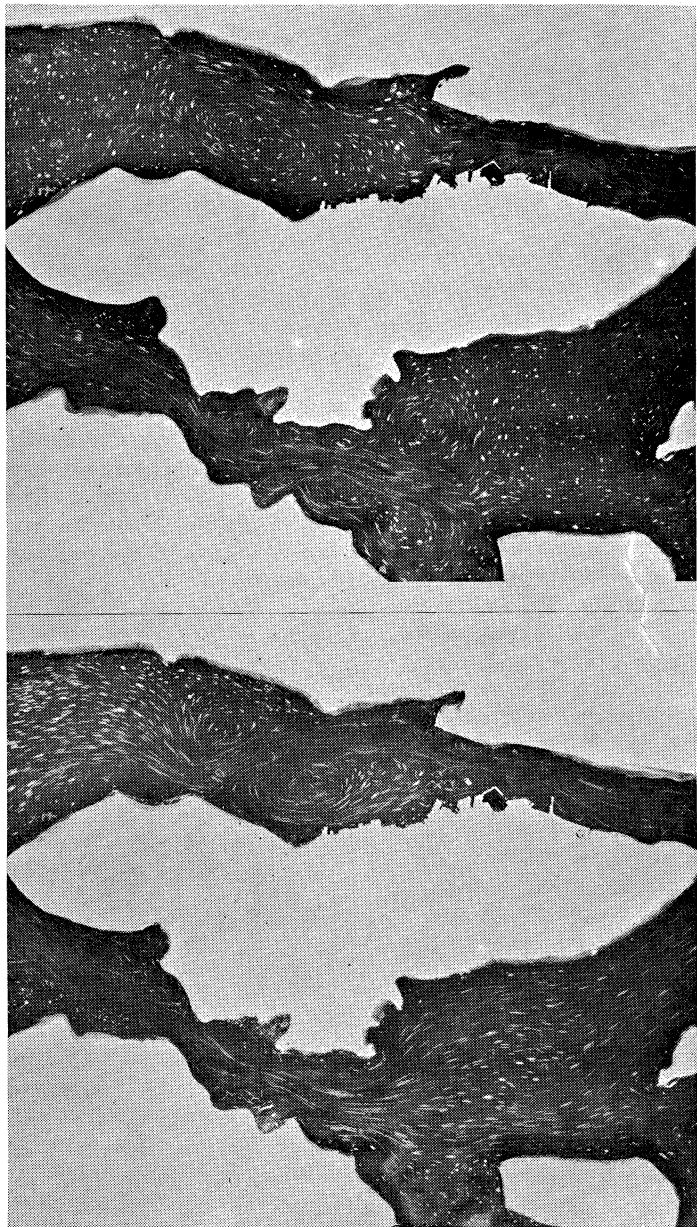


Fig. 8. *Utslipp av flottører og fargestoff i Sandnessundet.*



Figur 9. Strømførhold én time etter lavvann.

Figur 10. Strømførhold én time etter høypann.

spredningsbildet som flottørforsøkene hadde gitt, verifiseres.

Figur 8 viser en samtidig fordeling av flottører og fargestoff ved nordgående strøm for et utslipp ved Sandnessundet på Tromsøyas vestside.

Fluorescerende utslipp muliggjør direkte målinger av fortyningen. Disse målingene ble også sammenlignet med flottørforsøkene, og det viste seg å være god overensstemmelse.

Noen resultat fra forsøkene.

Strømmene rundt Tromsøya skifter retning flere ganger i døgnet på grunn av tidevannet. Et utslipp til dette området vil derfor være utsatt for en viss «bumerang»-effekt, som medfører at utslippsvannet først føres vekk og senere i større eller mindre grad tilbake mot utslippsstedet igjen. Videre kan utslippssteder, som under en halvdel av tidevannsperioden har en effektiv borttransport, etter strømvinging være lite egnet fordi det da dannes strømhvirvler som fører til opphoping av avløpsvannet, eller fordi avløpsvannet føres inn til områder hvor slik påvirkning ikke er ønsket. Hvis nettostrømmen i området er liten, vil avløpsvannet kunne bli liggende og pendle frem og tilbake forbi utslippsstedet, mens det brer seg ut fra kysten som en voksende sky.

I figur 9 ser vi et bilde av strømførholdene rundt Tromsøya ved nordgående strøm. Bildet er tatt omlag 1 time etter lavvann. Små lokale hvirvler langs land i begge sund og to store hvirvler i Breivika sees tydelig.

Situasjonen en time etter høyvann

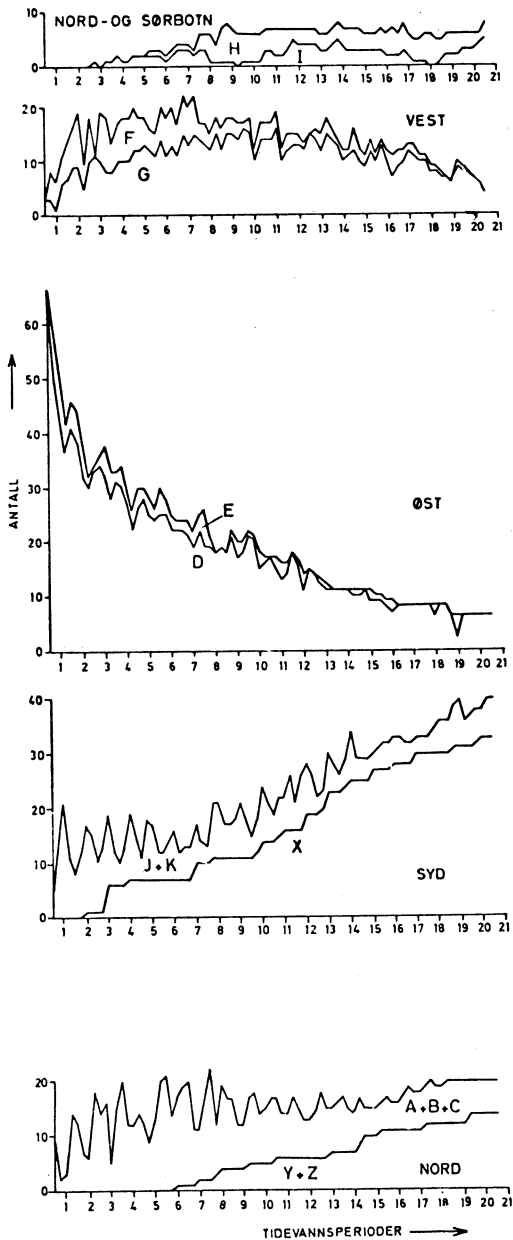
fremgår av figur 10. Strømmen er da sydoverrettet (dvs. nedover på figuren). Den bakevjen som før fantes i Breivika er vasket vekk. Flere lokale hvirvler kan imidlertid nå observeres bak fremstikkende moloer i selve Tromsøsundet. En bakevje i bukta syd for Grindnes synes også på bildet.

Resultater fra to av flottørforsøkene er vist i figur 11 og 12. Figur 11 viser fordeling av flottører etter utslipp i Breivika. Vi ser at etter utslippsområdet (ØST) tømmes for flottører, øker antallet i de øvrige, særlig i SYD, hvor de fleste etter hvert går ut av modellen. Området VEST fylles først med flottører og tømmes deretter langsomt. Ellers spres flottørene etter hvert over hele fjordområdet.

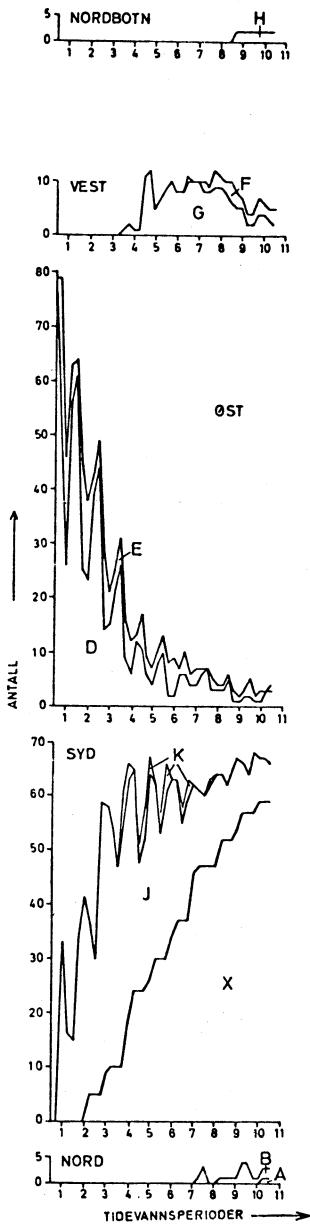
Tilsvarende resultat fra et utslipp på Tomasjord er vist i figur 12. Her føres flottørene raskere ut av området (ØST) og ut av modellen (områdene X, Y og Z).

Basert på flottørforsøk og fargeforsøk har vi satt opp en oversikt over transportveien i fjordområdet, og resultatene er i grove trekk fremstilt i fig. 13. Pilene på kartet antyder typiske transportveier i området, og lengden av pilene angir transportlengden i løpet av en tidevannsperiode.

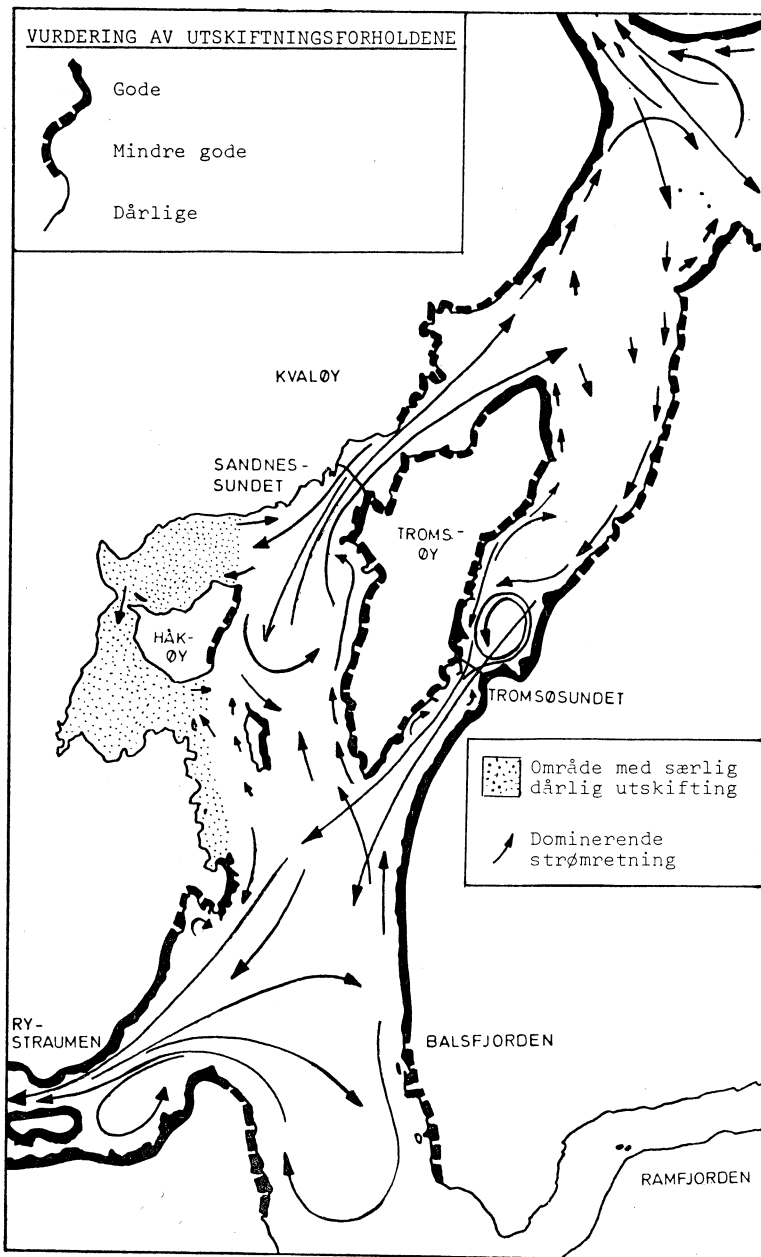
Ved å trekke opp landkonturene på forskjellige måter har vi markert de gunstigste områdene (tykk sammenhengende strek), de mindre gunstige områdene (tykk stiplet strek) og de ugunstigste områdene (tynn strek). Graderingen bygger først og fremst



Figur 11.
Fordeling av flottører fra Brevika.



Figur 12. Fordeling av flottører fra Tomasjord.



Figur 13. Skjematisk sammendrag av forsøksresultatene.

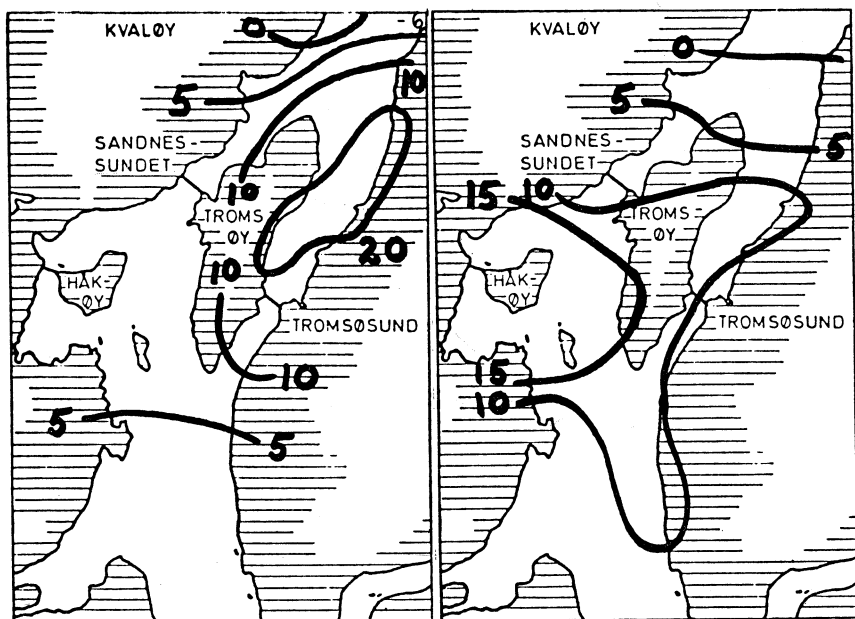
på vurdering av transport- og fortyngningsforholdene.

For eksempel vil utslipp fra området like nord for Tromsøbrua føres sydover gjennom Tromsøsundet og forbi sydspissen av Tromsøya. En del av avløpsvannet føres rundt sydspissen av øya og nordover Sandesundet. Forsøkene tyder imidlertid på at mesteparten vil gå mot fjordområdet utenfor munningen av Rystraumen, og derfra videre ut av området. Det faktum at strømvingning mot vest i Rystraumen finner sted omlag tre timer etter strømvingning mot syd i Tromsøsundet, er medvirkende til en effektiv borttransport av avløpsvann fra dette området.

Utslipp fra områdene syd for Tromsøbrua ble også ført raskt bort fra området. De kraftige bakevjene, særlig langs Tromsøya, medfører at kloakkledninger i dette området må føres godt ut fra land for at opphoping av avløpsvann i buktene omkring utslippstedet kan unngås.

I Sandnessundet er det ved sydoverrettet strøm en bakevje like syd for det trangeste området. I denne situasjon fanges utslippsvann fra et utslipp på Grindnes opp av denne bakevjen og holdes igjen der. Bakevjen tømmes når strømmen dreier mot nord igjen. Et utslipp fra Grindnes vil derfor stort sett gå nordover.

Et spørsmål av særlig interesse ved



a) Konsentrasjon i område D

b) Konsentrasjon i område G

Figur 14. Konsentrasjon $\times 10^6$ i områdene D og G fra ett enkelt, kontinuerlig utslipp på 10 000 pe. Kurvene gjelder for 2,5 m tidevannsforskjell.

resipientvurderinger er hvilke mengder med «rent» vann som er tilgjengelig for fortykning av avløpsvannet. I en elv, hvor strømretningen er konstant, lar dette seg i regelen lett besvare. I sjø eller fjordområder er derimot bestemmelse av netto vannutskiftning oftest et vanskelig spørsmål. Spørsmålet er: Hvor mye av forurensningen som føres sydover gjennom Tromsøundet ved en tidevannssituasjon, kommer tilbake etter strømvending? Dette vil da være et mål for den effektive vannutskiftningen i området. For Sandnessundområdet kan en stille lignende spørsmål.

Med støtte i modellforsøkene har vi funnet at den midlere effektive vannutskiftning i Tromsøundområdet er av størrelsesorden $2500 \text{ m}^3/\text{s}$. For Sandnessundet fremkom et lignende tall. Man kan merke seg at disse tallene er vesentlig høyere enn den netto vannutskiftning som kan beregnes fra strømmåleobservasjoner. Dette henger sammen med topografien i området, og med for-

$$\frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{300} \cdot 5 \cdot 10^{-6} = 4 \cdot 10^{-11}, \text{ dvs. } 4 \cdot 10^{-5} \text{ mg/l.}$$

Tilsvarende tall må beregnes for alle utslippssteder rundt området og resultatene summeres. Spørsmålet blir da om de konsentrasjoner som

skjellen i tidspunkt for strømvending, f.eks. i Tromsøundet og Rystraumen.

Til slutt skal vi se på hvilke konsentrasjoner som kan anslås ut fra forsøkene for de undersøkte områder. Konsentrasjonen er angitt som liter avløpsvann pr. liter sjøvann i et gitt område.

I figur 14 er noen av disse resultatene oppsummert. Her er angitt hvilke konsentrasjoner vi kan vente øst (fig. 14 a) og vest (fig. 14 b) for Tromsøya (område D og C i fig. 7). 10 000 personekvivalenter*) har vært utgangspunkt for beregningene. For eksempel, hvis vi slipper ut avløpsvann fra 10 000 personer på en av linjene merket 5 i fig. 14 a, blir konsentrasjonen i Breivika 5×10^{-6} , dvs. 5 ppm. På dette grunnlag kan konsentrasjonen av hver av komponentene som finnes i avløpsvannet beregnes. Antar vi for eksempel at fosfatinnholdet i utslippet over er 2,5 g pr. person pr. døgn, blir fosfatkonsentrasjonen i området

fremkommer kan anses som skadelige eller uheldige, og derved må betraktes som forurensning i henhold til «lov om vannforurensning».

*) I denne undersøkelsen er
1 personekvivalent = 300 l/døgn.

Ref.: Mosby, H.: Strømmålinger i Tromsøundet. 1940/41.