

# NIVA - RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning  NIVA

Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd

Postadresse:  
Postboks 333, Blindern  
Oslo 3

Brekke 23 52 80  
Gaustadalleen 46 69 60  
Kjeller 71 47 59

|                           |
|---------------------------|
| Rapportnummer:<br>0-78006 |
| Undernummer:<br>II        |
| Løpenummer:<br>1400       |
| Begrenset distribusjon:   |

|  |                                   |
|--|-----------------------------------|
| Rapportens tittel:<br>Strøm- og spredningsstudier i Tyrifjorden. Rapport nr. 2 | Dato:<br>28. juli 1982            |
|  | Prosjektnummer:<br>0-78006        |
| Forfatter(e):<br>Torulv Tjomsland  | Faggruppe:                        |
|  | Geografisk område:<br>Buskerud    |
|  | Antall sider (inkl. bilag):<br>61 |

|   |                                  |
|---|----------------------------------|
| Oppdragsgiver:<br>Miljøverndepartementet, Oslo kommune, Akershus- og Buskerud fylkeskommuner. | Oppdragsg. ref. (evt. NTNF-nr.): |
|---|----------------------------------|

Ekstrakt:

Spredningsforløpet av et radioaktivt sporstoff ( $^{82}\text{Br}$ ) i de sentrale delene av Tyrifjorden ble kartlagt over en periode på ett døgn. Spredningsforløpet ble simulert ved å nytte matematiske strøm- og spredningsmodeller. Overensstemmelsen mellom beregnede og observerte verdier var tilfredsstillende for praktisk bruk.

Spredningen av koliforme bakterier fra Storelva ble simulert ved de matematiske modellene. Områdene innen noen km fra Storelva's utløp er de mest utsatte. I ekstreme tilfeller ved vedvarende sterk vind mot sør, kan de sentrale delene av Tyrifjorden og de ytre delene av Holsfjorden bli påvirket.

Tyrifjorden's bunn ble inndelt i erosjons- og sedimentasjonsområder for tungmetaller ved å nytte teoretiske betraktninger. De høyeste tungmetall-konsentrasjonene finnes ventelig i det sentrale dypbassenget og i Steinsfjorden.

|                                |
|--------------------------------|
| 4 emneord, norske:             |
| 1. Tyrifjorden                 |
| 2. Buskerud                    |
| 3. Strøm- og spredningsstudier |
| 4. Matematiske modeller        |

|                                   |
|-----------------------------------|
| 4 emneord, engelske:              |
| 1. Tyrifjorden                    |
| 2. Buskerud                       |
| 3. Current and dispersion studies |
| 4. Mathematical modelling         |

Prosjektleder:

*Torulv Tjomsland*

Seksjonsleder:

*Hans Holten*

For administrasjonen:

*Arne Ljøvde*

ISBN 82-577-0518-7

NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING

OSLO

0-78006

STRØM- OG SPREDNINGSSTUDIER I TYRIFJORDEN

Rapport nr. 2

Oslo, 28. juli 1982

Prosjektleder: Torulv Tjomsland

Medarbeidere: Brynjar Hals

*John B. Dahl*

*Odd Tøllan*

For administrasjonen: Einar Lagset

| INNHOLD   | Side |
|---|------|
| 1 SAMMENDRAG  | 5    |
| 1.1 Innledning  | 5    |
| 1.2 Spredningsstudier, bruk av radioaktivt sporstoff                                    | 5    |
| 1.3 Simulert spredning av koliforme bakterier fra Storelva                              | 9    |
| 1.4 Regional fordeling av tungmetaller i sedimentene                                    | 11   |
| 2 INNLEDNING  | 13   |
| 3 SPREDNINGSSTUDIER VED BRUK AV RADIOAKTIVT SPORSTOFF                                   | 14   |
| 3.1 Metodikk  | 14   |
| 3.2 Resultater  | 15   |
| 4 SIMULERING AV STOFFUTSLIPPETS SPREDNINGSFORLØP MED<br>MATEMATISKE MODELLER            | 21   |
| 4.1 Innledning  | 21   |
| 4.2 Simulering av strømforholdene den 22.-23. aug. 1981                                 | 21   |
| 4.3 Simulering av spredningsforløpet til stoffutslippet<br>22.-23. aug. 1981            | 26   |
| 5 SIMULERT SPREDNING AV KOLIFORME BAKTERIER FRA STORELVA                                | 31   |
| 5.1 Innledning  | 31   |
| 5.2 Simulerte bakterikonsentrasjoner  | 32   |
| 5.3 Diskusjon   | 43   |
| 6 REGIONAL FORDELING AV TUNGMETALLER I SEDIMENTENE                                      | 44   |
| 6.1 Innledning  | 44   |
| 6.2 Resuspensjon p.g.a. bølgeaktivitet  | 44   |
| 6.3 Skråningsbetinget erosjon, transport og akkumulasjon                                | 48   |
| 6.4 Endelig inndeling av Tyrifjorden i erosjons-, transport-<br>og akkumulasjonsområder | 50   |
| 7 REFERANSER  | 54   |
| VEDLEGG A: MATEMATISK STRØMNINGSMODELL  |      |
| VEDLEGG B: MATEMATISK SPREDNINGSMODELL  |      |

FIGURER

|   | Side |
|---|------|
| 1.1-1 Dybdekart   | 6    |
| 1.2-1 Observert spredningsforløp  | 7    |
| 1.2-2 Observerte og simulerte konsentrasjoner etter ca ett døgn                             | 8    |
| 1.3-1 Simulert spredning av koliforme bakterier   | 10   |
| 1.4-1 Tungmetallene vil ventelig sedimentere i det sentrale dypbassenget og i Steinsfjorden | 12   |
| 3.2-1 Vindhastighet i observasjonsperioden  | 16   |
| 3.2-2 Temperaturprofil i sentrum av sjøen   | 16   |
| 3.2-3 Observert spredningsforløp  | 17   |
| 3.2-4 Skyen forflyttet seg relativt raskt også etter at vinden hadde stilnet                | 19   |
| 3.2-5 Eksempel på mengden av måledata som konsentrasjonskurvene ble tegnet på grunnlag av.  | 20   |
| 4.2-1 Simulerte strømmer kl. 1630   | 23   |
| 4.2-2 Simulerte horisontale strømhastigheter i observasjonsperioden                         | 25   |
| 4.3-1 Observerte konsentrasjoner kl. 1615-1650. Simulerte konsentrasjoner kl. 1630.         | 27   |
| 4.3-2 Observerte konsentrasjoner kl. 2040-2115. Simulerte konsentrasjoner kl. 21.           | 28   |
| 4.3-3 Observerte konsentrasjoner kl. 1030-1230. Simulerte konsentrasjoner kl. 12.           | 29   |
| 5.2-1 Simulert strøm - vind mot nord: 6 m/s   | 33   |
| 5.2-2 Simulert strøm - vind mot nord: 6 m/s   | 34   |
| 5.2-3 Simulerte vertikale strømhastigheter  | 35   |
| 5.2-4 Simulerte konsentrasjoner av koliforme bakterier                                      | 35   |
| 5.2-5 Simulert strøm - vind mot øst: 6 m/s  | 37   |
| 5.2-6 Simulert strøm - vind mot øst: 6 m/s  | 38   |
| 5.2-7 Simulerte vertikale strømhastigheter  | 39   |
| 5.2-8 Simulerte konsentrasjoner av koliforme bakterier                                      | 39   |
| 5.2-9 Simulert strøm - vind mot sør: 7 m/s  | 40   |

|   | Side |
|---|------|
| 5.2-10 Simulert strøm - vind mot sør  | 41   |
| 5.2-11 Simulerte vertikale strømhastigheter   | 42   |
| 5.2-12 Simulerte konsentrasjoner av koliforme bakterier   | 42   |
| 6.2-1 Beregning av vindens største effektive strøkretning   | 45   |
| 6.2-2 Maksimale effektive strøklengder  | 46   |
| 6.2-3 Erosjon og akkumulasjon som følge av bølgeaktivitet   | 47   |
| 6.3-1 Skråningsbetinget erosjon, transport og akkumulasjon  | 49   |
| 6.4-1 Tungmetallene vil ventelig sedimentere i det sentrale dypbassenget i Steinsfjorden                    | 51   |
| 6.4-2 Observerte verdier av kvikksølv og organisk karbon i bunnsedimentene. (Tyrifjord-undersøkelsen 1981.) | 52   |

#### TABELLER

|   |    |
|---|----|
| 3.2-1 Skyens utbredelse som funksjon av tiden | 19 |
|---|----|

## 1 SAMMENDRAG

### 1.1 Innledning

Prosjektet er utført av Norsk institutt for vannforskning (NIVA). Kostnadene er dekket av Miljøverndepartementet, Oslo kommune, Akershus og Buskerud fylkeskommuner.

Hensikten var å studere strøm og spredning av stoff i Tyrifjorden. Arbeidsmetoden har vært å kombinere matematiske strøm- og spredningsmodeller med registreringer i felt.

Tyrifjordens areal er ca. 134 km<sup>2</sup>. Bassenget fra Nordfjorden til sør i Hølsfjorden har dybder på over 280 m (fig. 1.1-1).

Ca. 90% av vanntilførslene kommer via Storelva til Nordfjorden. Utløpet er ved Vikersund i den sør-vestlige delen av innsjøen.

### 1.2 Spredningsstudier, bruk av radioaktivt sporstoff

Det ble foretatt et sporstoffutslipp av det radioaktive sporstoffet brom (<sup>82</sup>Br) i sentrum av Tyrifjorden. Spredningsforløpet ble kartlagt i ett døgn.

Hensikten var å nytte dataene til å teste de matematiske strøm- og spredningsmodellene samt å få generell kunnskap om spredning av stoff i innsjøen.

Stoffet ble i løpet av ett døgn spredd over et område på ca. 3 km<sup>2</sup> (fig. 1.2-1). Sentrum av skyen forflyttet seg ca. 3 km fra doseringsstedet. Kun en liten del av stoffmengden trengte gjennom sprangsjiktet i ca. 7 m's nivået. Vinden blåste overveiende mot øst. I de 3 første timene var vindstyrken nær 9 m/s 10 m over vannflaten. Etter ca. 8 timer var hastigheten redusert til ca. 1 m/s.

Spredningsforløpet ble simulert ved å nytte matematiske strøm- og spredningsmodeller. De simulerte konsentrasjonsverdiene ga et realistisk bilde av virkeligheten (fig. 1.2-2).

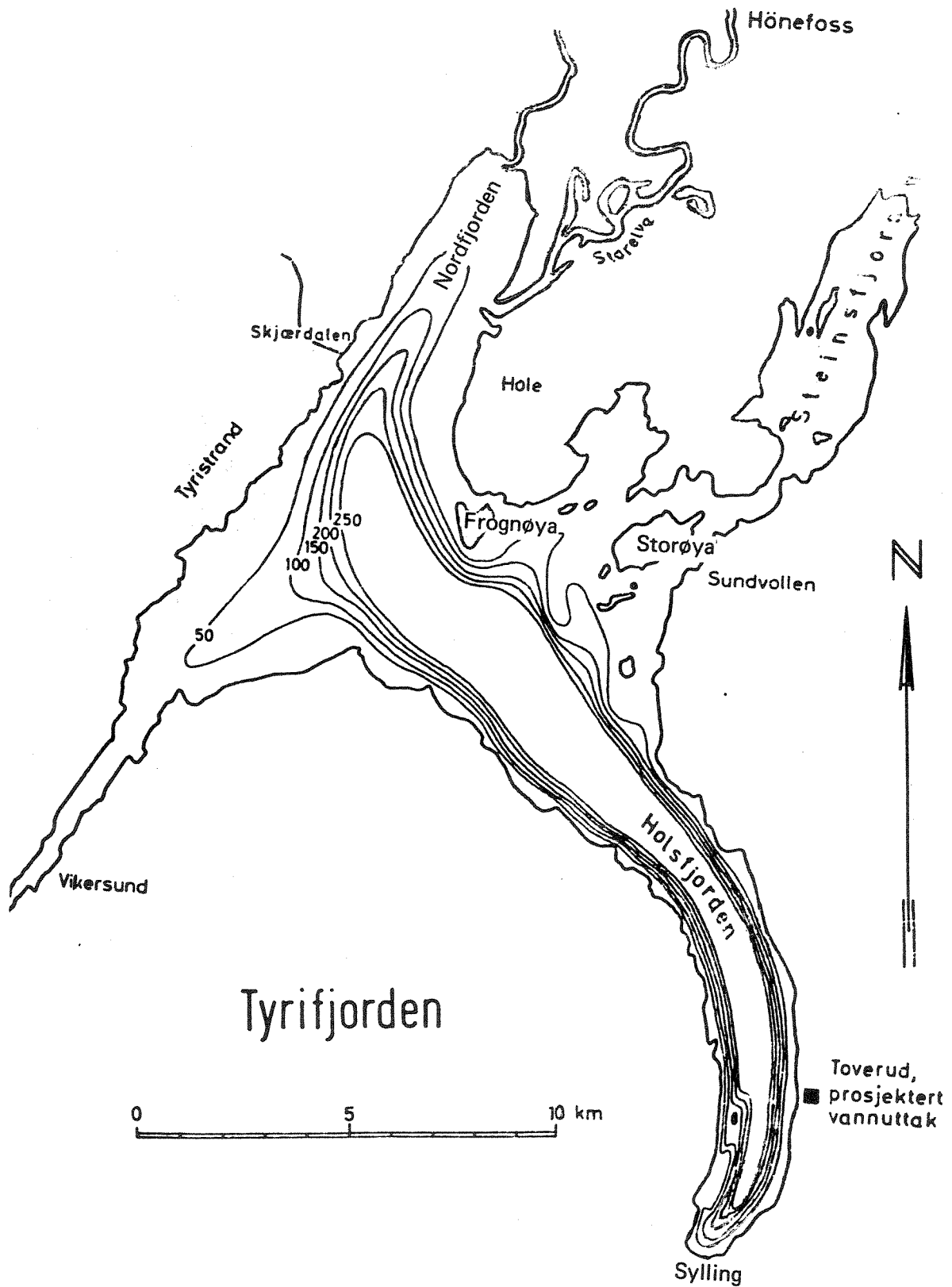


Fig. 1.1-1 Dybdekart

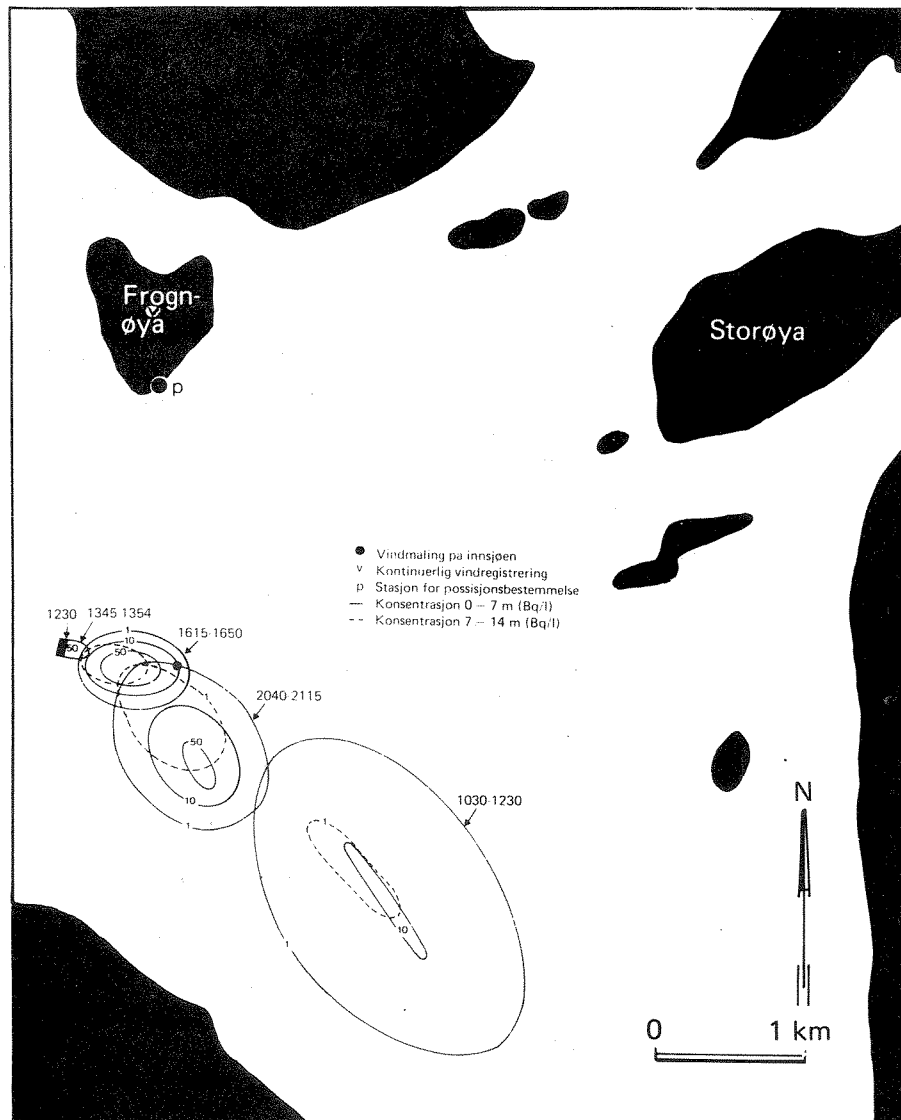


Fig. 1.2-1 Observert spredningsforløp.



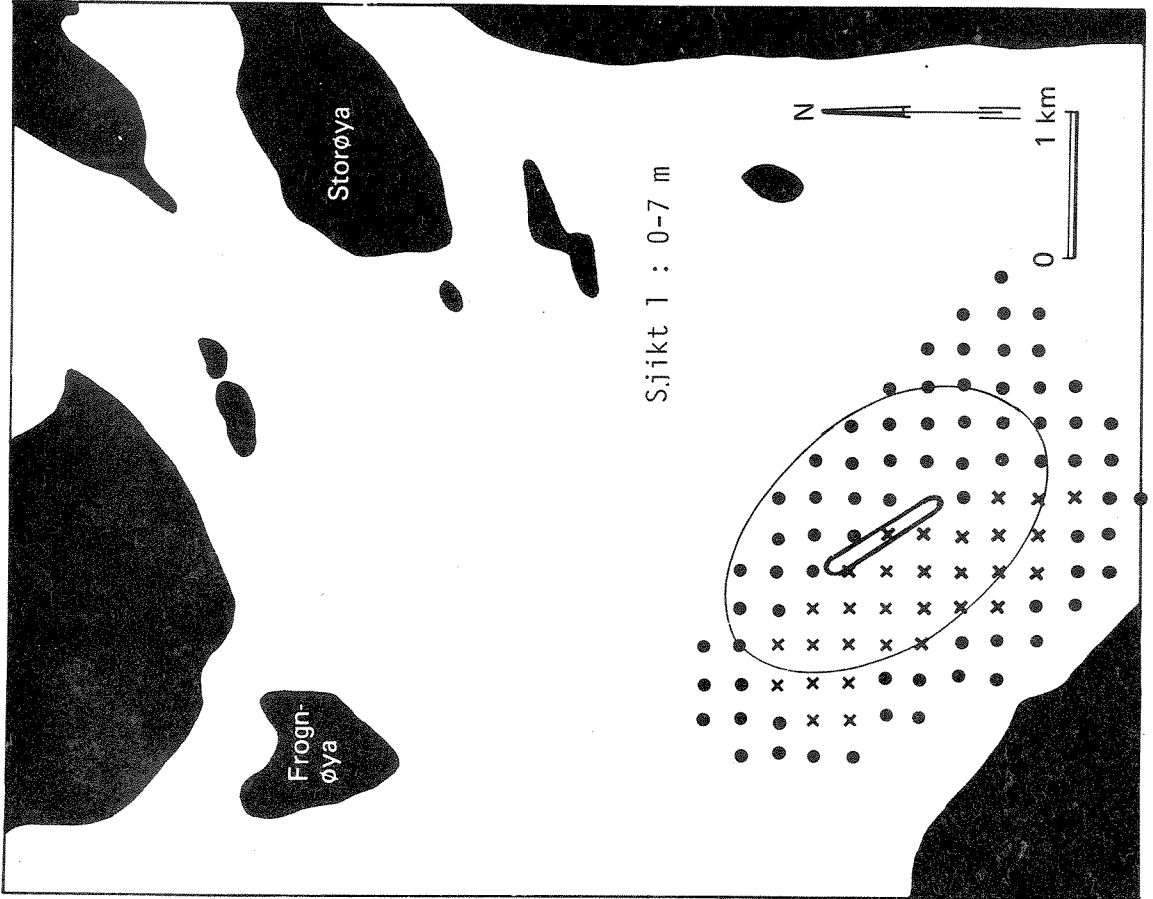
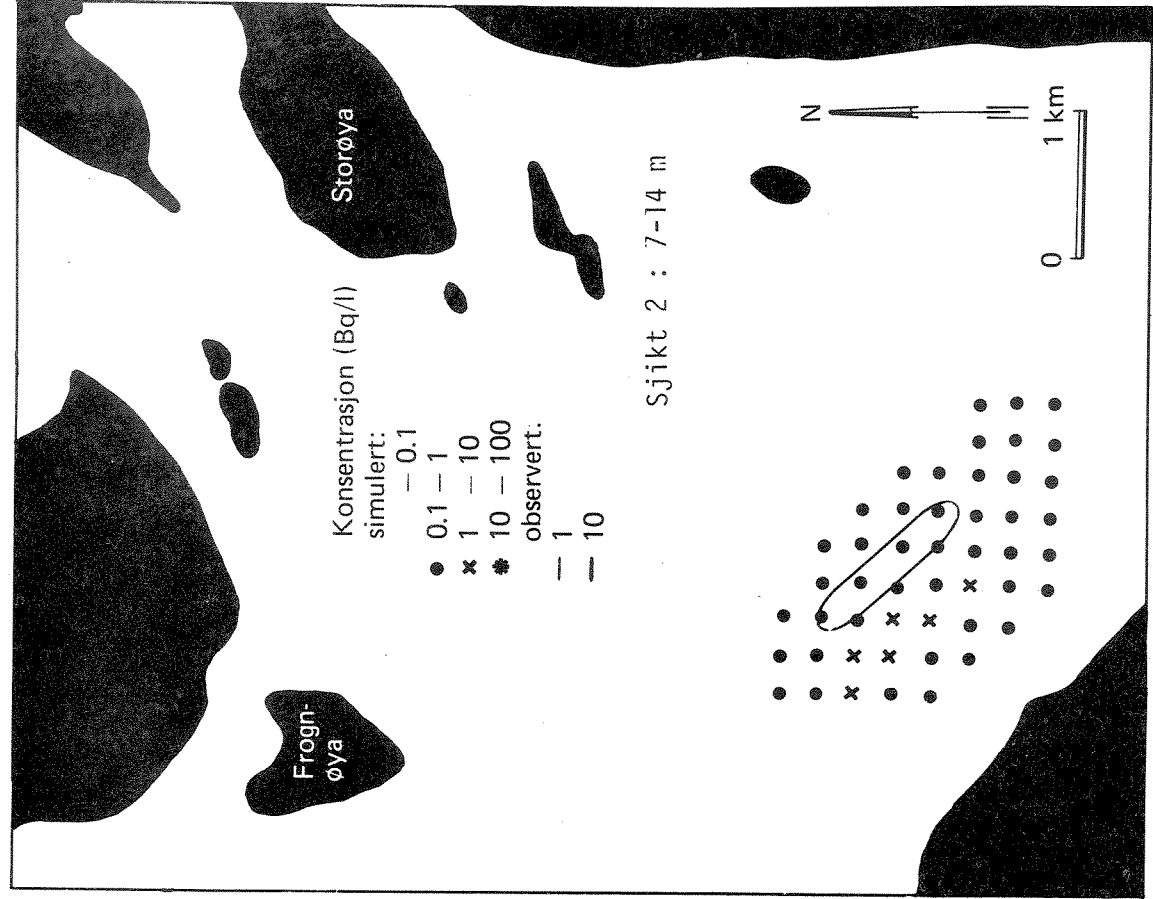


Fig. 1-2-2 Observerte og simulerte konsentrasjoner etter ca. ett døgn.

### 1.3 Simulert spredning av koliforme bakterier fra Storelva

Sykdommer som i vårt klima kan spres ved vann, skyldes fortrinnsvis bakterier, virus m.m. fra avføringen til mennesker og varmblodige dyr. Koliforme bakterier er en indikator på slik forurensning. De største tilførslene av koliforme bakterier kommer til Tyrifjorden via Storelva. Vi ønsket å få kjennskap til i hvilken grad de ulike delene av innsjøen kunne tenkes å bli påvirket av disse tilførslene. Videre var vi interessert i å vite om bakterier som stammer fra Storelva kunne påvirke vannkvaliteten ved det planlagte vannuttaket til Asker og Bærum vannverk ved Toverud i Holsfjorden.

Vi antok at tilførslene av koliforme bakterier fra Storelva var nær de største verdiene som er blitt observert. Spredningsforløpet ble simulert for de mest fremherskende vindretningene (fig. 1.3-1).

Hovedmengden av Storelva's tilførsler til innsjøen vil vanligvis forringe vannkvaliteten i områdene mellom utløpet og Frognøya (vind mot øst og mot sør). I ekstreme tilfeller ved vedvarende vind mot sør, kan de sentrale delene av innsjøen og de ytre delene av Holsfjorden bli påvirket ifølge beregningene. Vannet i det planlagte drikkevannsuttaget ved Toverud i Holsfjorden vil neppe bli influert av koliforme bakterier fra Storelva.

Ved vind mot nord, kan strendene i Nordfjorden forventes å bli sterkt påvirket av forurensninger fra Storelva. Ved andre vindretninger, synes påvirkningen der å være liten.

Tyristrand-Vikersund-området på vestsiden av Tyrifjorden kan bli noe utsatt for bakterieforurensning fra Storelva ved vind mot sør og eventuelt også ved vind mot vest. Fortynningseffekter indikerer at det er liten sannsynlighet for at det f.eks. skal oppstå problemer med badevannskvaliteten på grunn av dette.

Simuleringene gir et inntrykk av den største horisontale utbredelsen som bakteriene fra Storelva kan forventes å få. Reelle konsentrasjonsfordelinger vil rimeligvis ligge innenfor de områder som simuleringen skisserer.

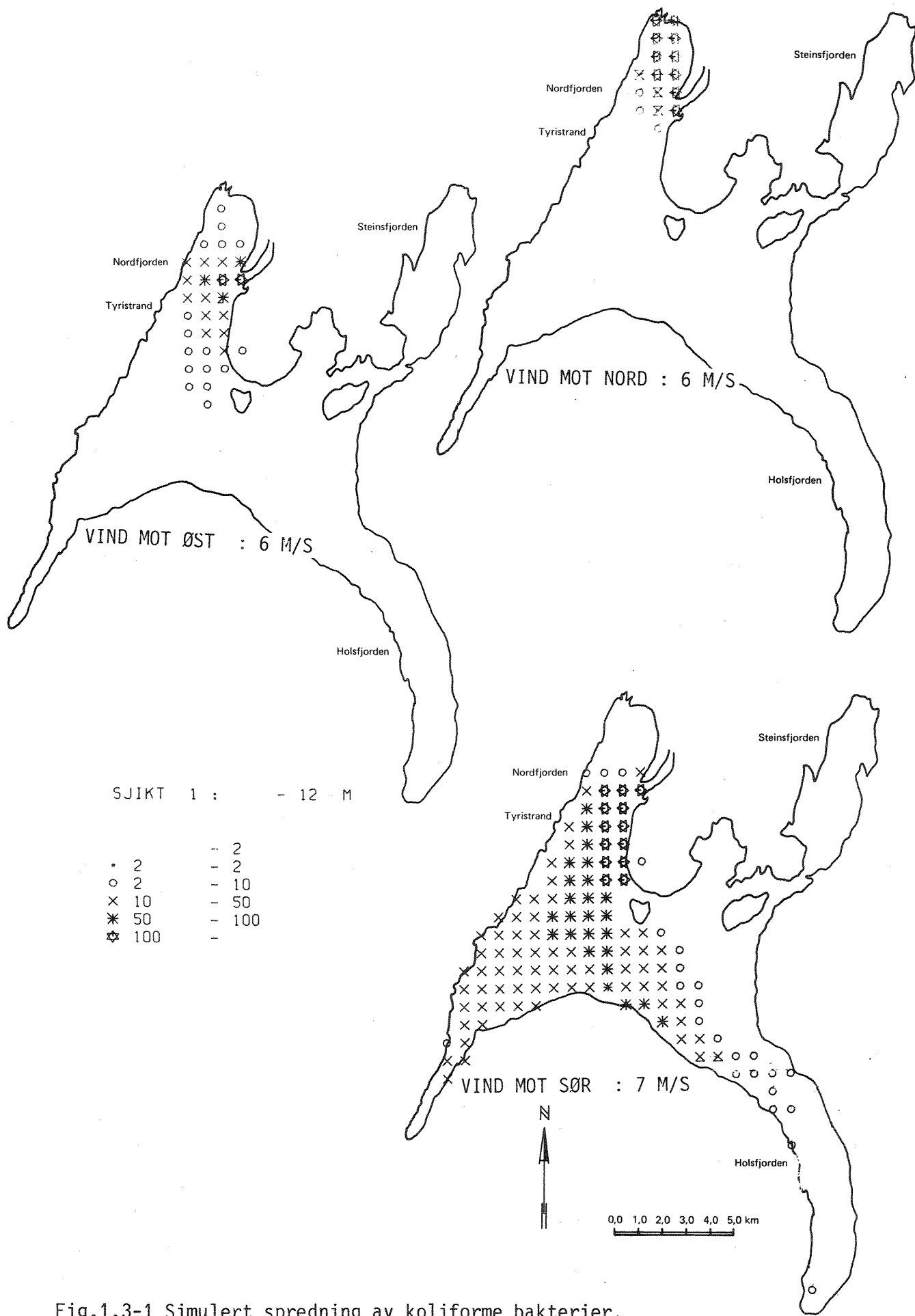


Fig.1.3-1 Simulert spredning av koliforme bakterier.

Beregningene antyder at en neglisjerbar andel av bakteriene ble transportert dypere ned enn til 24 m. Varierende vindstyrke og retning samt små temperaturgradienter i dybderetningen kan øke transporten i vertikal retning og dermed forårsake høyere konsentrasjoner enn simuleringene antydte.

#### 1.4 Regional fordeling av tungmetaller i sedimentene

Kvikksølv og andre tungmetaller blir fortrinnsvis bundet til små partikler (silt og leire) og til organisk materiale. Dette materialet sedimenteres hovedsakelig i områder med liten hydrodynamisk aktivitet og der bunnforholdene hindrer videre transport. Partikler som har sedimentert i strandsonen eller i grunne områder, vil kunne bli resuspendert på grunn av bølgeaktivitet. Selv meget små strømhastigheter langs bunnen er tilstrekkelig til å erodere og transportere partiklene dersom bunnen er tilstrekkelig skrånende.

Tyrifjorden ble inndelt i erosjon, transport og akkumulasjonsområder ved teoretiske betraktninger og effekter som skyldtes bølgeaktivitet og bunntopografi (fig. 1.4-1).

Fint materiale som tilføres Tyrifjorden, vil ifølge fig. 1.4-1 hovedsakelig sedimentere i dypbassenget i de sentrale delene av innsjøen, i enkelte lommer i Tyristrand-Vikersund-området, nordenfor øyene: Frognøya, Storøya m.fl. og i Steinsfjorden.

De mest utsatte erosjonsområdene finner vi i Nordfjorden, i Tyristrand-Vikersund-området og langs skråningene mot det sentrale dypbassenget.

De største konsentrasjonene av kvikksølv og andre tungmetaller i sedimentene skulle følgelig fortrinnsvis være lokalisert til de nevnte sedimentasjonsområdene. Observasjoner av kvikksølv i bunnsedimentene tyder på at kartet (fig. 1.4-1) gir et realistisk bilde av virkeligheten.

Inndelingen i erosjons- og akkumulasjonsområder gjelder først og fremst tungmetallene kvikksølv, bly, cadmium, kobber, sink m.fl.. Imidlertid har også f.eks. næringssaltene fosfor og nitrogen tendens til å følge det samme utbredelsesmønsteret. En betydelig del av en innsjøes fosforinnhold i de fri vannmassene kan bli tilført fra bunnsedimentene ved resuspensjon i erosjonsområdene.

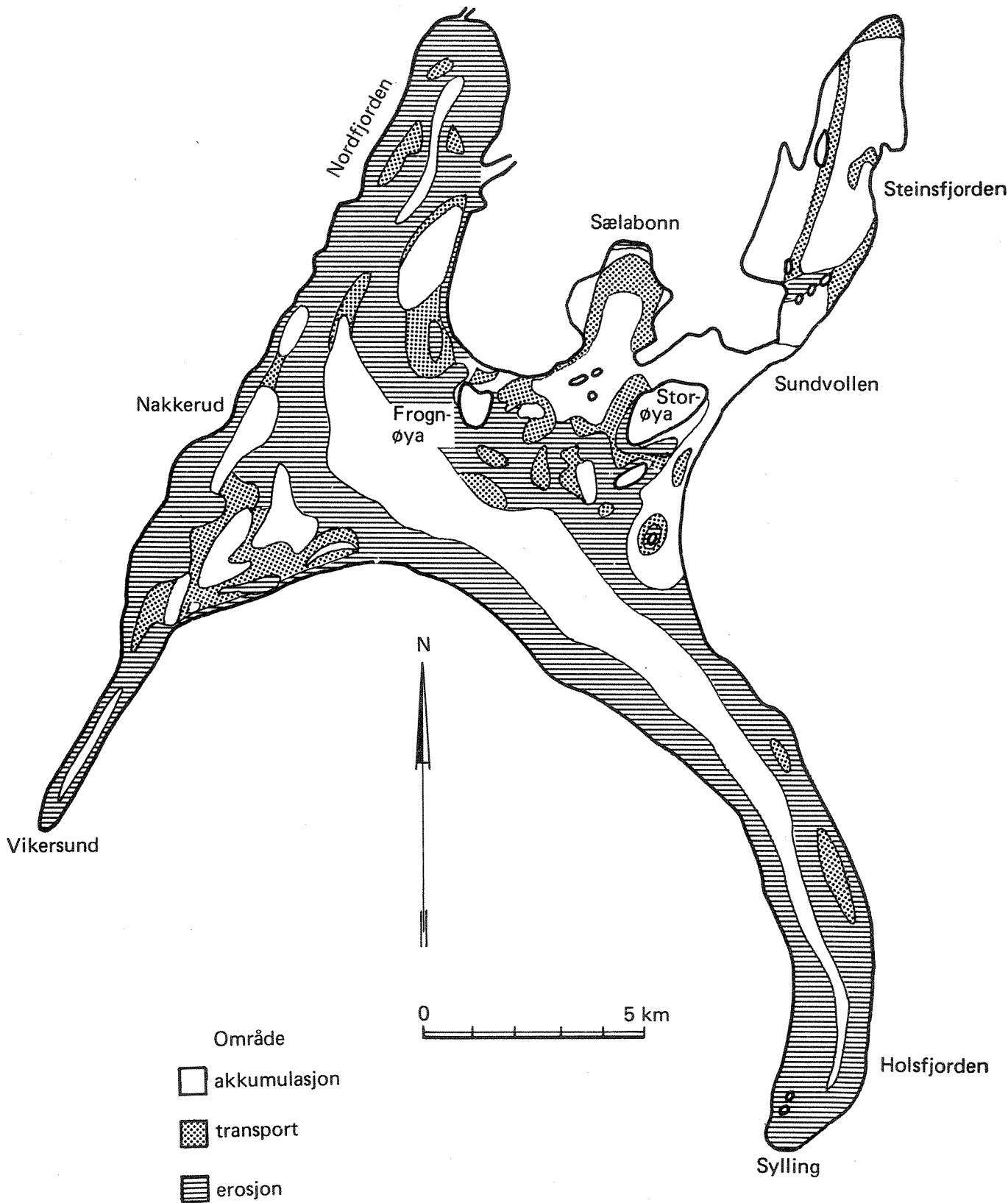


Fig. 1.4-1 Tungmetallene vil ventelig sedimentere i det sentrale dypbassenget og i Steinsfjorden.

## 2 INNLEDNING

Denne rapporten er et bidrag til et omfattende studie av Tyrifjorden hvor formålet var å gjennomføre de nødvendige undersøkelser, planlegging og tiltak for å sikre Tyrifjorden for vannforsyning og andre brukerinteresser. Prosjektet er samordnet via Tyrifjord-utvalget. Finansieringen skjer ved bidrag fra Miljøverndepartementet, Oslo kommune, Akershus og Buskerud fylkeskommuner.

Hensikten med denne delen av undersøkelsen var å studere strøm og spredning av stoff i Tyrifjorden. Arbeidsmetoden har vært å kombinere feltregistreringer med bruk av matematiske strøm- og spredningsmodeller.

Vi har tidligere foretatt simuleringer av karakteristiske strømsystemer i Tyrifjorden (Tjomsland 1980). Resultatene ble verifisert mot registreringer i sjøen. I denne rapporten har vi lagt vekt på å studere hvordan stoff som tilføres sjøen blir spredd.

Norsk institutt for vannforskning (NIVA) er ansvarlig for strøm- og spredningsundersøkelsene. Institutt for energiteknikk (IFE) har bidratt med hjelp til å gjøre sporstoffforsøk hvor det ble benyttet en radioaktiv isotop.

Tyrifjordens areal er ca. 134 km<sup>2</sup>. Et sammenhengende basseng med dybder på over 280 m går fra Nordfjorden i nordvest til sørlige deler av Holsfjorden (fig.1.1-1). Bassengets U-form vitner om erosjon av istidens breer. I de øvrige delene av innsjøen er dybdene sjelden over 50 m. I områdene mot Vikersund og i Steinsfjorden er dybdene under 20 m.

Ca. 90% av årlig vanntilførsel til Tyrifjorden kommer via Storelva. Ca. 5% kommer fra Sokna. Begge elvene munner ut i Nordfjorden. Tyrifjordens utløp er i sørvest ved Vikersund.

### 3 SPREDNINGSSTUDIER VED BRUK AV RADIOAKTIVT SPORSTOFF

Den radioaktive isotopen brom ( $^{82}\text{Br}$ ) ble dosert i sentrum av Tyrifjorden. Spredningsforløpet ble fulgt over en periode på ca. ett døgn. Hensikten med forsøket var å nytte dataene til å teste matematiske strøm og spredningsmodeller samt å få generell kunnskap om spredning av stoff i innsjøen.

#### 3.1 Metodikk

Spredningsforløpet av bromisotopen ( $^{82}\text{Br}$ ) er representativt for stoffer som blir oppløst i vann og dermed følger vannets bevegelse.  $^{82}\text{Br}$  har en halveringstid på 35,4 timer.

Isotopen ble transportert til utslippsstedet i form av en løsning av vann og ammoniumbromid. Denne løsningen ble dosert i vann som ble pumpet fra innsjøen på ca. 1 m's dyp og blandet inn i de turbulente vannmassene ved båtens propell.

Doseringen fant sted i sentrum av Tyrifjorden. Sporstoffets bevegelse i vannet ble fulgt ved å måle strålingsintensiteten ved en scintillasjonsdetektor med pulsteller. Målingene ble utført av 2 hurtiggående båter.

Båtenes posisjon ble bestemt ved hjelp av LASER avstandsmåler og vinkelavlesning. Denne stasjonen ble plassert på sørenden av Frognøya (fig. 1-1). Walkie talkies ble benyttet for kommunikasjon. Posisjonene ble fortløpende tegnet inn på et kart. Dette var til stor hjelp for å manøvrere båtene på en hensiktsmessig måte i forhold til sporstoffskyen.

For å lette kartleggingen av sporstoffet, ble det samtidig satt ut strømkors og tilsatt fargestoffet rhodamin-B. Vannets temperatur ble målt i et dybdesnitt nær doseringsstedet. I tillegg til de kontinuerlige vindregistreringene på Frognøya, ble det tatt enkelte vindmålinger midtfjords i løpet av måleperioden.

### 3.2 Resultater

Den 22. august 1981 mellom kl. 12.05 og kl. 12.30 ble det radioaktive stoffet  $^{82}\text{Br}$  dosert i overflatevannet nær sentrum av Tyrifjorden. Mengden tilsvarte en stråling på  $10^{11}\text{Bq}$ .

Det var meget liten vind i de siste 2,5 døgnene før doseringen fant sted. På Frognøya registrerte vindmåleren under 1 m/s og under 1,5 m/s i gjennomsnitt for de henholdsvis siste 2,5 døgn og de siste 12 timene før forsøkets start; dvs. at det i hvert fall i overflatesjiktene var neglisjerbare strømhastigheter under doseringen. Under forsøket ble vinden målt ved en bøye i sentrum av sjøen. Disse verdiene relatert til 10 m over vannoverflaten, var ca. 3 ganger høyere enn registreringene på Frognøya viste ved sterk vind. Ved lave hastigheter var forskjellene små (fig. 3.2-1).

Ca. kl. 13 økte vindstyrken 10 m over vannoverflaten til nær 9 m/s. Bølgene kunne bli over 3 m høye. Mellom kl. 16 og kl. 20 avtok vindhastigheten gradvis fra 8 m/s til ca. 1 m/s. Retningen var meget stabil fra vest mot øst.

Vanntemperaturen ble målt i et dybdesnitt nær doseringsstedet, mens det fortsatt var rolige vindforhold. Over sprangsjiktet på ca. 7 m's dyp var temperaturen nær  $17,5^{\circ}\text{C}$  (fig. 3.2-2). Under sprangsjiktet var temperaturen ca.  $13,5^{\circ}\text{C}$  ned til 12 m's dyp. Deretter avtok verdiene jevnlig med dypet til nær  $4^{\circ}\text{C}$ . Fig. 3.2-3 viser stoffutslippets spredningsforløp. Isolinjene representerer middels konsentrasjonsverdier i de øverste 7 meterne dvs. over sprangsjiktet (heltrukkede linjer) og i 7-14 m's sjiktet (stiplede linjer).

Sporstoffet ble ved doseringen fordelt jevnt over et område på ca.  $150 \cdot 150$  m i de øverste 2 meterne.

Kl. 14 var utbredelsen i vindretningen ca. 250 m. Stoffet var fordelt i de øverste 4 meterne.

Fram til omtrent kl. 16.30 hadde sentrum av skyen forflyttet seg ca. 500 m mot sørøst fra doseringsstedet; dvs. noe til høyre for vindretningen. Utbredelsen var ca. 800 m og 500 m, henholdsvis i sørøstlig



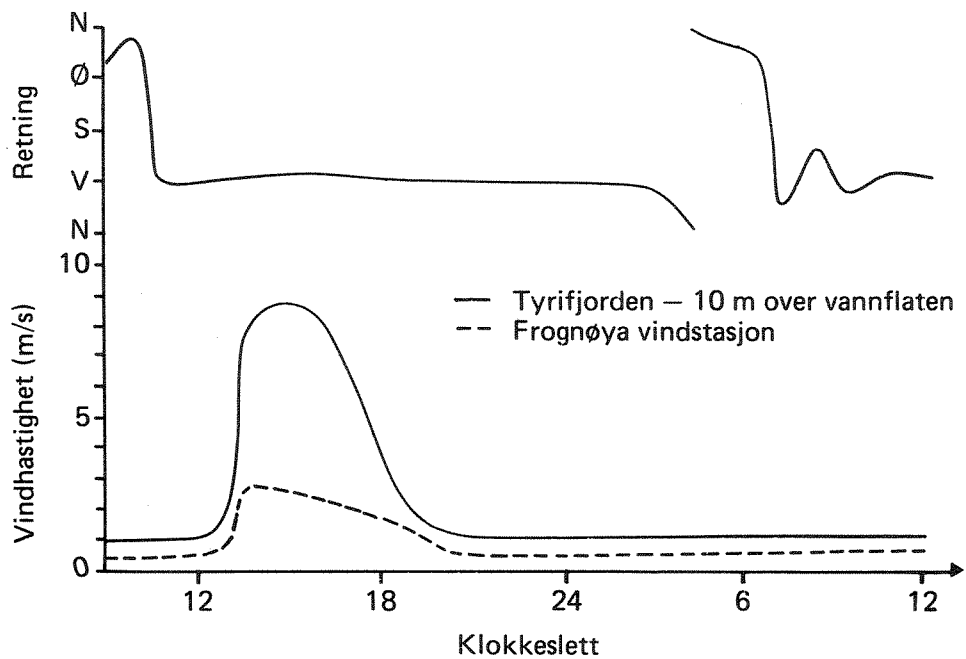


Fig. 3.2-1 Vindhastighet i observasjonsperioden.

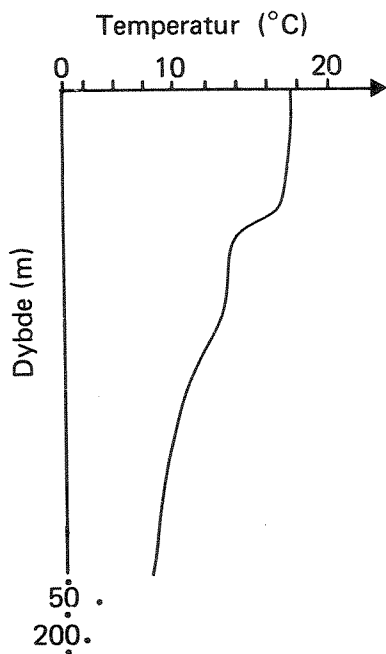


Fig. 3.2-2 Temperaturprofil i sentrum av sjøen.

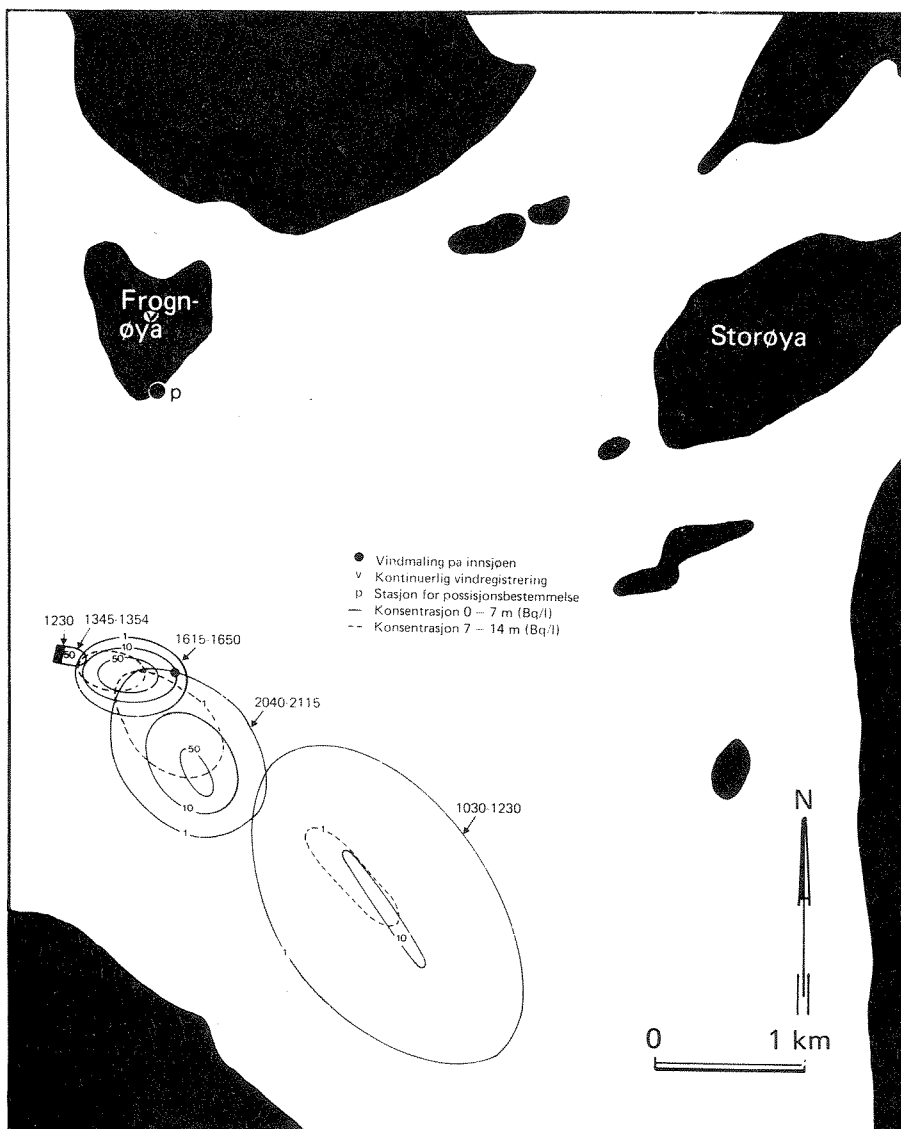


Fig. 3.2-3 Observert spredningsforløp.

og nordøstlig retning. Konsentrasjoner på over 50 Bq/l ble registrert. Stoffet var overveiende jevnt fordelt i de øverste 7 meterne; dvs. over sprangsjiktet.

Ved 21 tiden hadde sentrum av skyen beveget seg ytterligere ca. 750 m mot sørøst. Skyens tverrsnitt var over 1 km. De høyeste konsentrasjonene var over 50 Bq/l. En relativt liten andel av stoffmengden hadde trenget gjennom sprangsjiktet. Vindstyrken avtok i denne perioden. Skyens transporthastighet var likevel av samme størrelsesorden som tidligere.

Neste dag ved 12-tiden hadde sentrum av skyen beveget seg ca. 1,5 km videre i sørøstlig retning. Størrelsen var da omkring 2,5 og 1,5 km i henholdsvis sørøstlig og nordøstlig retning. Stoffet var godt blandet over sprangsjiktet. Dypere enn 10 m ble det ikke påvist noe stoff. Vindstyrken var i denne perioden meget liten, under 1 m/s. Retningen var overveiende mot øst, men var langt mindre stabil enn dagen før.

Spredningen av et stoffutslipp skjer advektivt og ved turbulens. Det er ingen klar grense mellom disse to transportformene. Den advektive transporten kan tolkes som transport i strømmens hovedretning. Forflytningen av stoffskyens sentrum skyldes hovedsakelig denne transportformen. Avvik fra strømmens hovedretning kan betegnes som turbulent strømning. Vannet beveger seg i en rekke virvler av ulik størrelsesorden. Disse bevegelsene endres også stadig med tiden. Stoffets spredning i vannet, dvs. vekk fra skyens sentrum kan tolkes som turbulent spredning.

Sentrum av skyen økte farten fra ca. 2 cm/s i starten til drøye 5 cm/s i løpet av de 4 første timene. Ettersom tiden gikk, ble hastigheten redusert til nær 2 cm/s (tabell 3.2-1). Tregheten i vannmassene medførte at transporthastigheten fortsatt økte noen timer etter at vindstyrken begynte å avta, og videre ble den redusert meget langsomt til tross for at det etterhvert ble nesten vindstille forhold (fig. 3.2-4).

Tabell 3.2-1. Skyens utbredelse som funksjon av tiden.

| Klokkeslett | Tid fra doseringens slutt<br>timer | Avstand fra doseringssted<br>km | Hastigheten til skyens sentrum<br>cm/s | Ekvivalent radius<br>m | Spredningshastighet<br>cm/s |
|-------------|------------------------------------|---------------------------------|--|------------------------|-----------------------------|
| 12.30       | 0                                  |                                 | 1,8                                    |                        |                             |
| 14.00       | 1,5                                | 0,1                             |  | 97                     |                             |
| 16.00       | 4,0                                | 0,6                             | 5,5                                    | 340                    | 2,7                         |
| 21.00       | 8,5                                | 1,3                             | 4,3                                    | 550                    | 1,2                         |
| 12.00       | 23,5                               | 2,8                             | 2,5                                    | 990                    | 0,8                         |

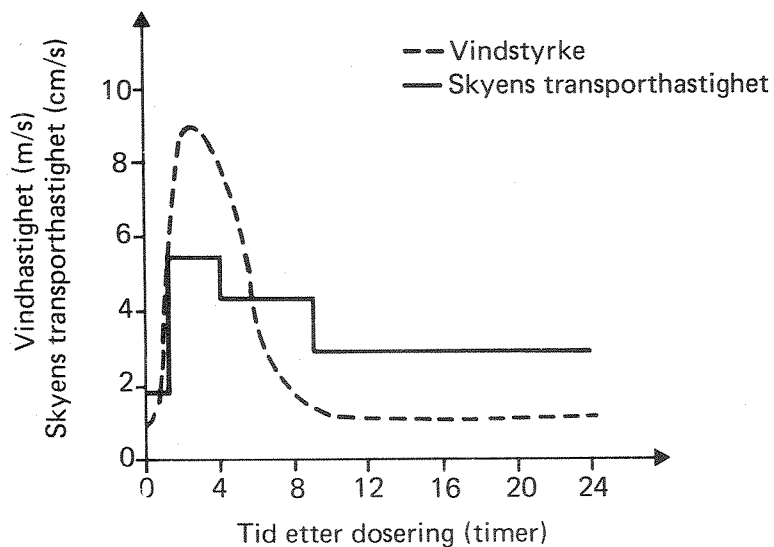


Fig. 3.2-4 Skyen forflyttet seg relativt raskt også etter at vinden hadde stilnet.

Arealet av skyen med konsentrasjon over 1 Bq/l økte fra ca. 0,03 km<sup>2</sup> 1,5 timer etter doseringen til ca. 3 km<sup>2</sup> ved målingenes slutt dagen etter (tabell 3.2-1). Dersom skyen hadde hatt en sirkulær form, ville dette tilsvart en økning av radien fra ca. 100 m til 1 km i det tilsvarende tidsrommet. Endringen av denne radien med tiden gir et mål for spredningshastigheten til skyen. Spredningshastigheten avtok fra ca. 2,7 cm/s til ca. 0,8 cm/s i løpet av måleperioden (Tab. 3.2-1). En tilsvarende utvikling ble funnet ved spredningsforsøk på dypt vann i Oslofjorden (Dahl 1973). Spredningshastighetene var imidlertid flere ganger større i Tyrifjorden. Dette p.g.a. overflateutslipp og større vindstyrke som medfører større strømhastighet og økt turbulent spredning av stoffet. Avtagende spredningshastighet med tiden har selvsagt også samband med avtagende vindstyrke mens forsøket pågikk.

Stoffet ble etter noen timer godt blandet i vannmassene over sprangsjiktet hvor tetthetsforholdene var nær homogene. Tetthetsgradienten gjennom sprangsjiktet virket som en effektiv barriere for videre transport i dybderetningen.

Kartet over spredningsforløpet (fig. 3.2-3) ble tegnet på grunnlag av målepunkter i noen snitt gjennom skyen (fig. 3.2-5). Tildels høye bølger og rask forflytning av stoffet gjorde det ikke mulig å gjennomføre en detaljert kartlegging hvor det ble tatt hensyn til lokale konsentrasjonsvariasjoner og små utbuktninger p.gr.a. varierende turbulente strømvirvler. Konsentrasjonskurvenes eliptiske form på fig. 3.2-3 gir derfor uttrykk for en noe grov beskrivelse av virkeligheten. Konsentrasjoner på 1 Bq/l er nær instrumentenes nedre målegrense. Dette gjør at utbredelsen av skyen, og da særlig ved avslutningen av forsøket, må antas å være noe usikker.

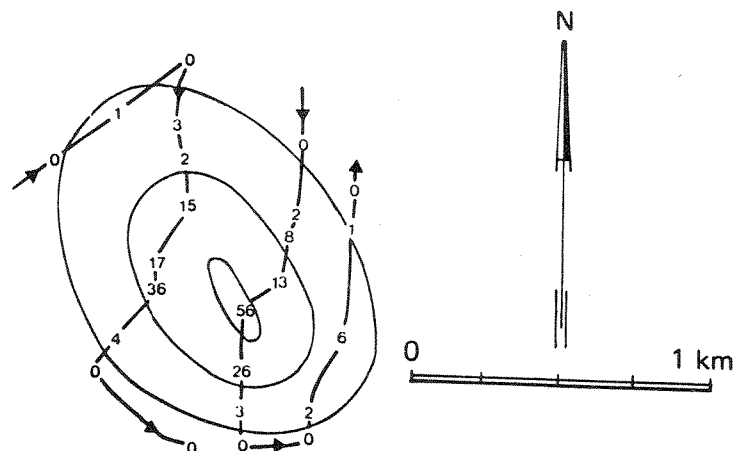


Fig. 3.2-5. Eksempel på mengden av måledata som konsentrasjonskurvene ble tegnet på grunnlag av.

## 4 SIMULERING AV STOFFUTSLIPPETS SPREDNINGSFORLØP MED MATEMATISKE MODELLER

### 4.1 Innledning.

Matematiske modeller kan være et nyttig hjelpemiddel til å forutsi spredningsforløpet av ulike stoffer som tilføres en innsjø. Fordelen med å nytte matematiske modeller er at man kan simulere strøm-, temperatur- og spredningsforhold for en vilkårlig valgt vind, inn- og utløps vannføring, temperaturtilstand, tilførsler og ved eventuelle endringer i innsjøens form. Resultatet kan oppnås raskt og til relativt lave kostnader.

For å dokumentere modellenes pålitelighet samt å stipulere enkelte koeffisienter, er det nødvendig å teste dem mot feltobservasjoner.

Vi har tidligere innen prosjektet simulert strømforholdene i Tyrifjorden ved ulike vindretninger (Tjomsland 1980). Sammenligninger med observasjoner viste at modellberegningene ga et realistisk bilde av virkeligheten. Vi ønsket nå å teste påliteligheten av spredningsmodellen mot stoffutslippet som ble omtalt i forrige kapittel.

### 4.2 Simulering av strømforholdene den 22.-23. august 1981.

Strømmene blir satt igang av vinden samt trykkforskjeller på grunn av vannføring i elvene og temperaturforskjeller. Når bevegelsen først er kommet igang, blir den påvirket av jordrotasjonen, friksjon mot bunnen og de eksisterende trykkrefter. Disse prosessene blir beskrevet av et sett differensiallikninger. Tilnærmede løsninger av likningene blir bestemt ved hjelp av elektronisk databehandling.

For en mer utførlig beskrivelse av modellens oppbygning og fysiske relevans, henvises til vedlegg A.

Ved simuleringens start ble vannmassene antatt å være i ro. Innsjøen ble delt inn i følgende 4 sjikt: 0-7 m, 7-14 m, 14-28 m og 28-bunn. For å begrense regnemaskintiden ble største dybde antatt å være 75 m. Dermed må vi forvente at de simulerte verdiene i bunnsjiktet blir noe misvisende. Ved start ble temperaturen i sjiktene satt til henholdsvis 17,5, 13,5, 10,5 og 4,5 °C (jfr. fig. 3.2-2). Strømmene ble beregnet

suksessivt fremover i tiden i de sentrale delene av Tyrifjorden ved å nytte vindhastighetene 10 m over vannflaten som det går fram av fig. 3.2-1. Vannutvekslingen med resten av innsjøen ble stipulert ut fra mindre detaljerte simuleringer som omfattet hele Tyrifjorden. Resultatene ble beregnet med en tetthet på 250 · 250 m i horisontalplanet.

Fig. 4.2-1 viser de simulerte strømmene kl. 16.30 dvs. etterat vinden hadde blåst i 4 timer.

Vannet i overflatesjiktet (0-7 m) beveget seg overveiende mot sørøst, dvs. noe til høyre for vindretningen. Hastigheter på over 10 cm/s var vanlige. Strømmene ble stadig mer avbøyd mot høyre med økende dybde. I bunnsjiktene var retningen omtrent motsatt av i overflaten. Dette har sammenheng med jordrotasjonen og friksjonskreftene. Fenomenet passer med teorien med betegnelsen "Ekman's spiral".

De vertikale strømmene var størst langs med strendene (fig. 4.2-2). I de sentrale delene hvor stoffutslippet fant sted var verdier under 0,1 mm/s vanligst i 7 m's nivået ifølge modellberegningene.

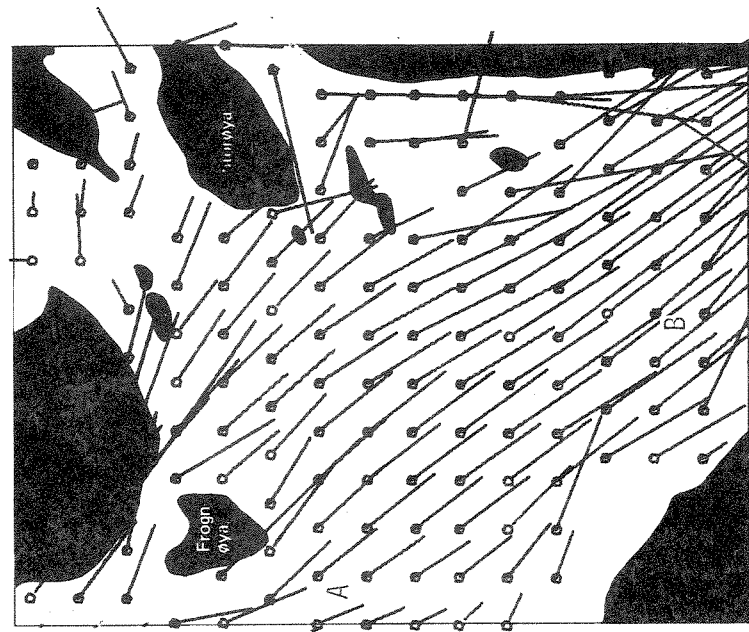
Fig. 4.2-2 viser hvordan de simulerte strømmenes hastighet og retning varierte i løpet av et døgn i to dybdesnitt i sjøen. Dybdesnittenes plassering er vist på fig. 4.2-1. Strømhastighetene i overflatesjiktet oppnådde maksimale hastigheter kort tid etter at vinden stilnet. I de dypere liggende sjiktene økte hastighetene fortsatt i flere timer. Det har sammenheng med vannmassenes treghet.

Etter ett døgn var strømhastigheter på 5-10 m/s vanlige nær overflaten. I de dypere liggende sjiktene beveget vannet seg med hastigheter som overveiende var under 5 cm/s. Strømretningene i de to øverste sjiktene var stort sett som etter 4 timer (fig. 4.2-1).

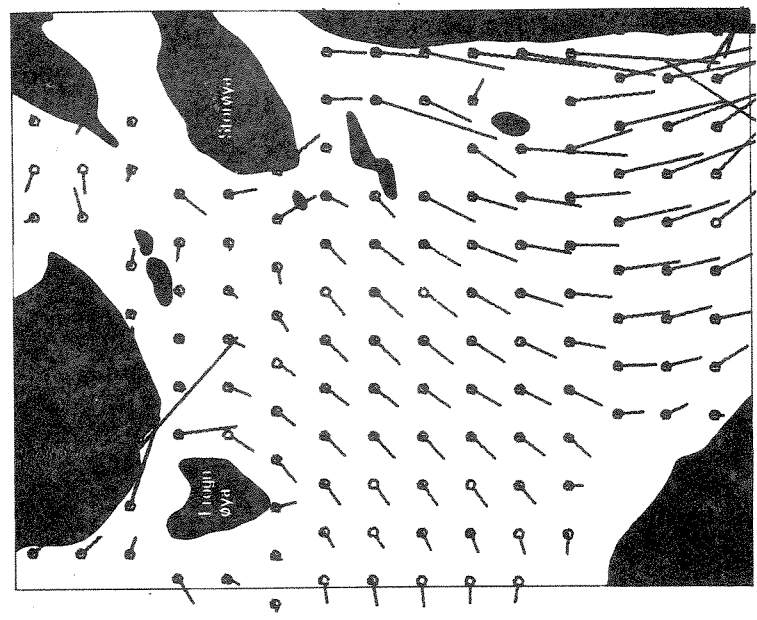
Som nevnt ble største dybde antatt å være 75 m. De simulerte strømmene ble derfor rimeligvis noe misvisende i de sentrale dypområdene. Vi har derfor utelatt presentasjonen av disse resultatene. Denne feilen vil ventelig ha liten betydning for resultatene i de to øverste sjiktene hvor sporstoffet ble transportert.

SJIKT 1 .0 - 7.0 M SJIKT 2 7.0 - 14.0 M

5 CM/S : — 5 CM/S : —



horizontal strøm



horizontal strøm

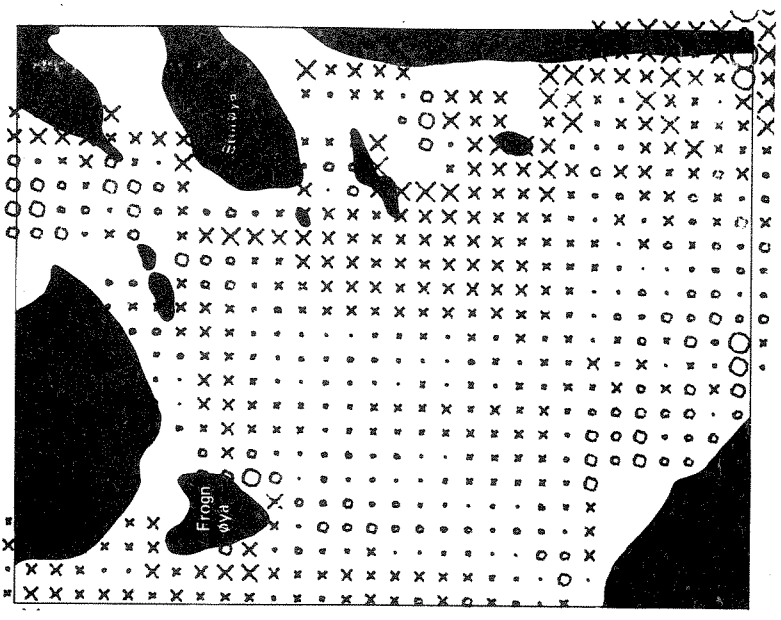
Fig. 4.2-1 Simulerte strømmer kl. 1630.



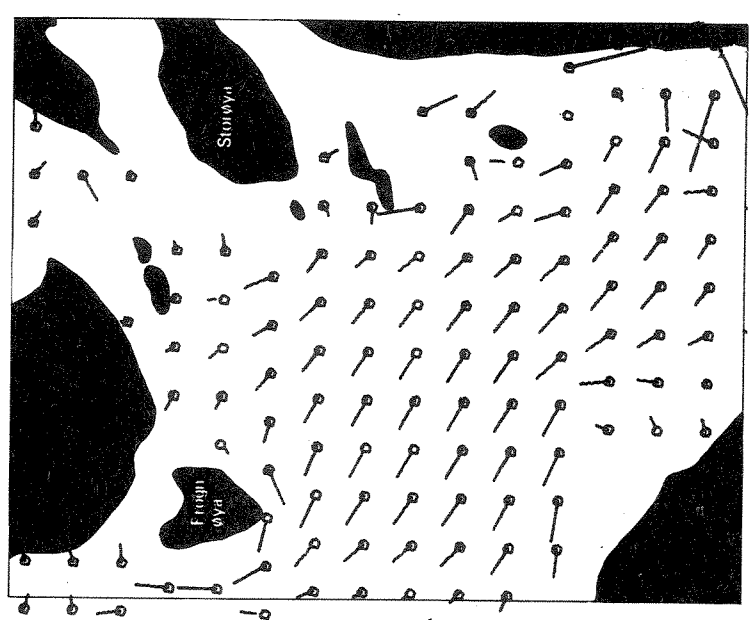
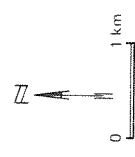
NIVAFLETE NR 1 : 7 M  
 HASTIGHET SYMBOLENE ER  
 FLATEPRØRSJØNALE  
 ° OPPOVER RETTET STRØM - 0.2 MM/S  
 x NEDOVER RETTET STRØM - 0.2 MM/S

SJIKT 3 14.0 - 28.0 M

5 CM/S : —



vertikal strøm



horisontal strøm

Fig. 4.2-1 forts.

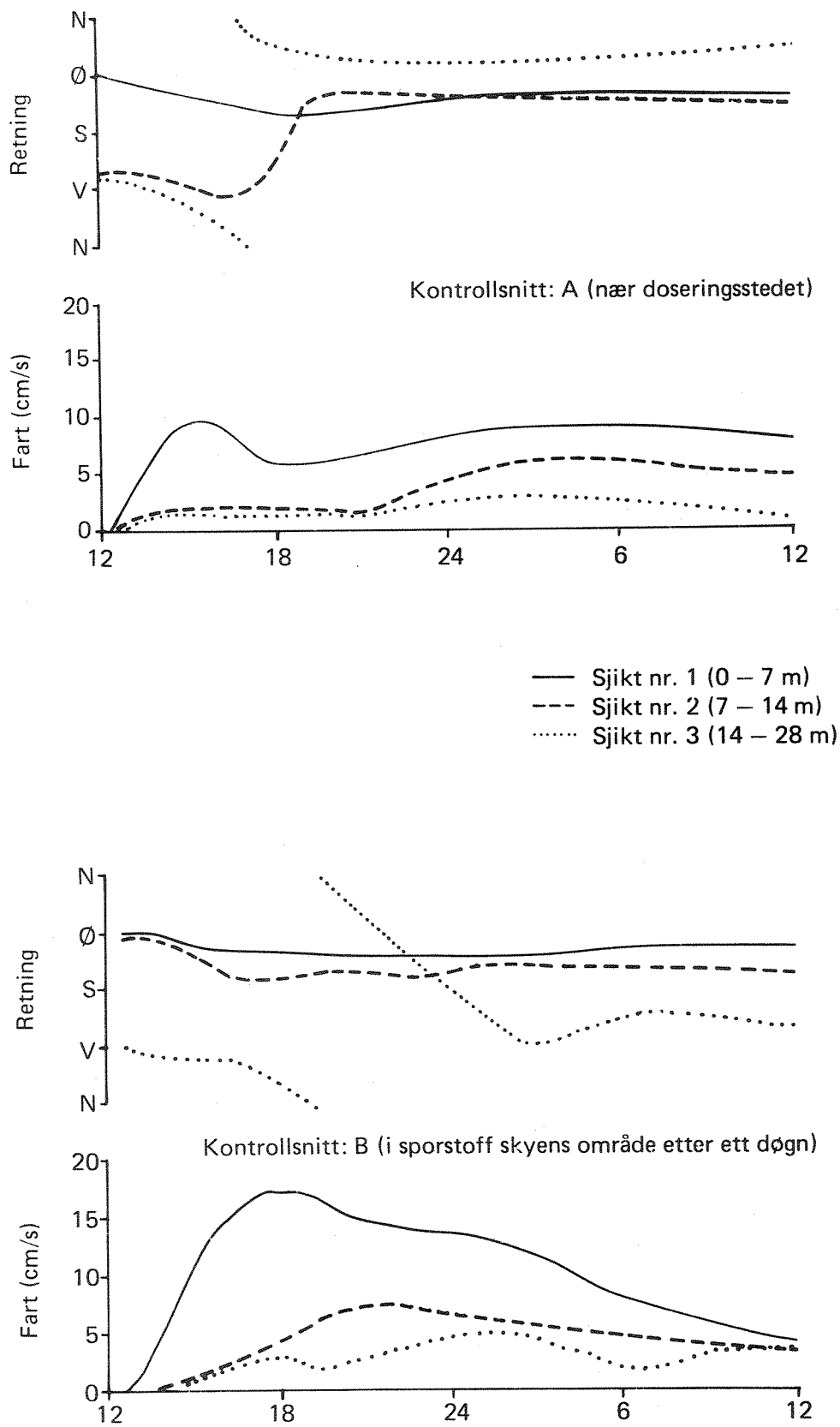


Fig. 4.2-2 Simulerte horisontale strømhastigheter i observasjonsperioden.

#### 4.3 Simulering av spredningsforløpet til stoffutslippet 22.-23. aug. 1981

Spredningen av et stoffutslipp i en innsjø skjer som nevnt advektivt og ved turbulens. For brom ( $^{82}\text{Br}$ ) må vi også ta hensyn til at stoffet forsvinner i overensstemmelse med en halveringstid på 35,4 timer. Disse prosessene ble beskrevet ved en differensiallikning som ble løst numerisk ved hjelp av elektronisk databehandling. For en nærmere beskrivelse av spredningsmodellen henvises til vedlegg B.

Strømningsmønsteret i området ble antatt å være i overensstemmelse med strømningsmodellens resultater (jfr. avsnitt 4.2). Stoffets spredning ble simulert suksessivt fremover i tiden. De beregnede konsentrasjonene representerte verdiene i celler med horisontal utbredelse på  $250 \cdot 250$  m. I dybderetningen ble cellene avgrenset av nivåflater i dypene 7 m, 14 m, 28 m og bunn. Cellenes størrelse var den samme som ved simuleringen av strømmene.

Ved simuleringen ble stoffet fordelt jevnt innen den cellen hvor det ble tilført, dvs. innen et overflateareal på  $250 \cdot 250$  m. For å få en best mulig overensstemmelse med observasjonsdataene ved simuleringens start, ble dette tidspunktet satt til kl. 14 (se fig. 3.2-3).

Den simulerte utbredelsen av stoffskyen kl. 16.30 viste rimelig god overensstemmelse med observasjonsverdiene (fig. 4.3-1). Modellen spredde imidlertid stoffet over et noe for stort område og maksimumskonsentrasjonene var lavere enn de observerte. Svært lite av stoffet hadde trengt gjennom sprangsjiktet. Dette var i samsvar med observasjonene.

De simulerte verdiene kl. 21 viste også rimelig god overensstemmelse med observasjonsdataene (fig. 4.3-2). Tendensen til at simuleringens verdiene hadde lavere maksimumsverdier og en større romlig utbredelse i forhold til de observerte, gjaldt fortsatt.

Kl. 12 dagen etter hadde den simulerte stoffskyens romlige utbredelse omtrent samme størrelse som den observerte (fig. 4.3-3). Avstanden fra doseringsstedet var også godt gjengitt. Beliggenheten av den simulerte skyen var ca. 500 m for langt mot sørvest i forhold til den observerte.

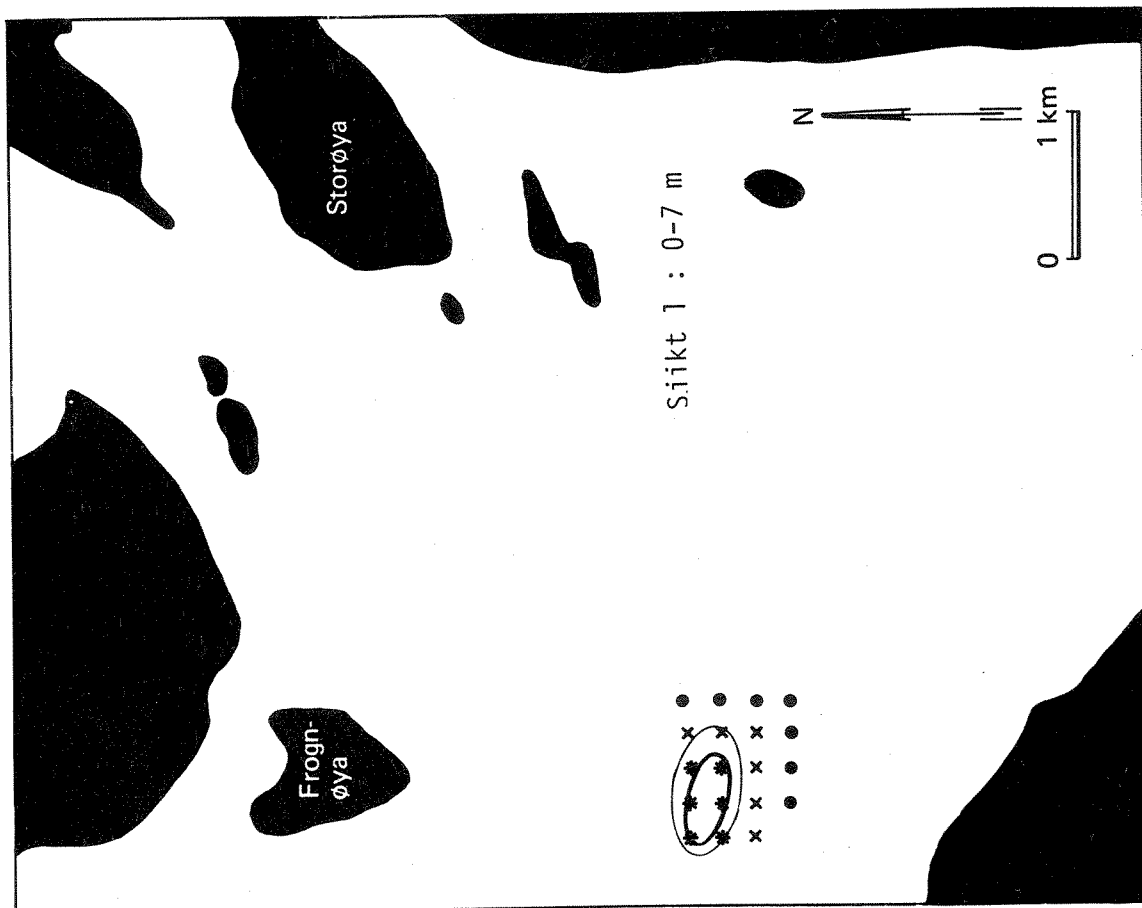
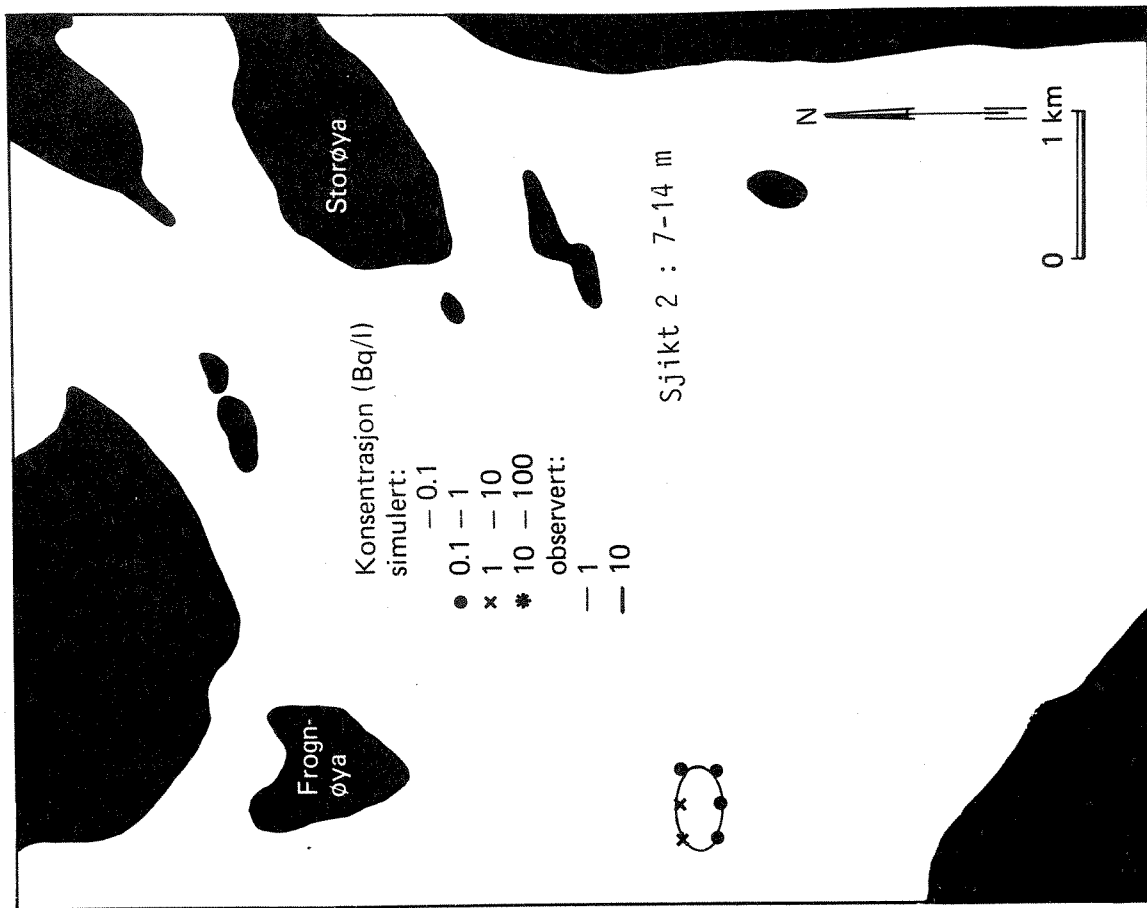


Fig. 4.3-1 Observerte konsentrasjoner kl. 1615-1650. Simulerte konsentrasjoner kl. 1630.

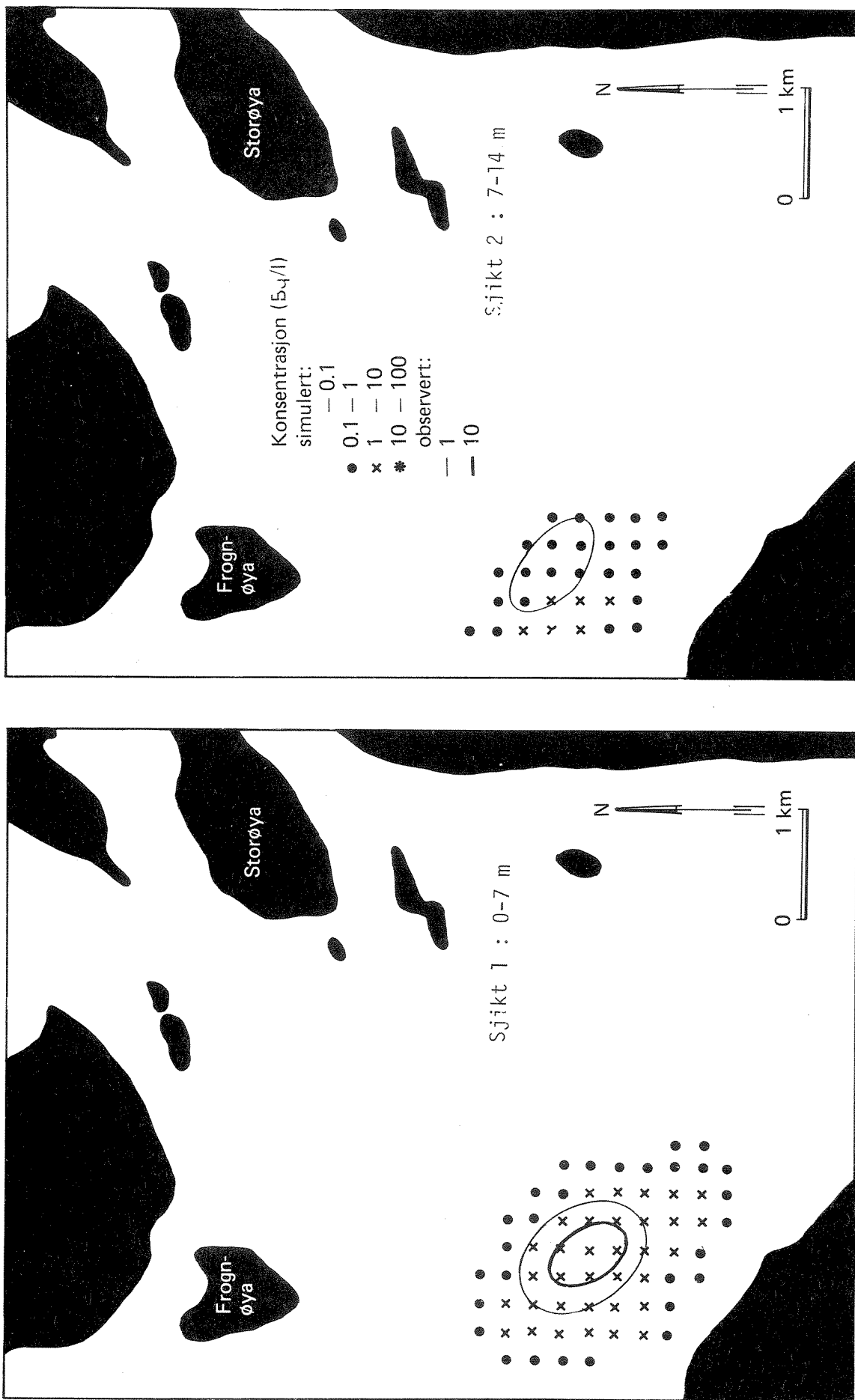


Fig. 4.3-2 Observerte konsentrasjoner kl.2040-2115. Simulerte konsentrasjoner kl. 21.

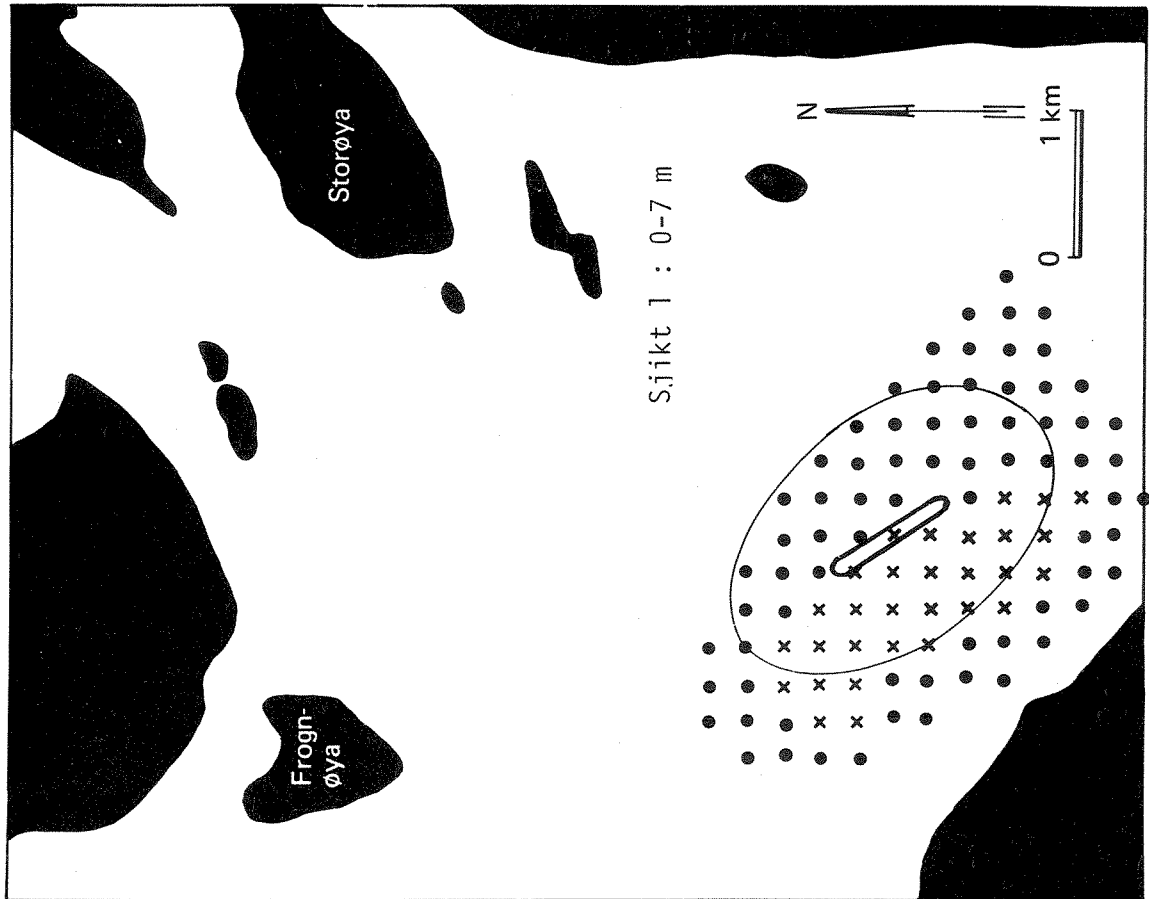
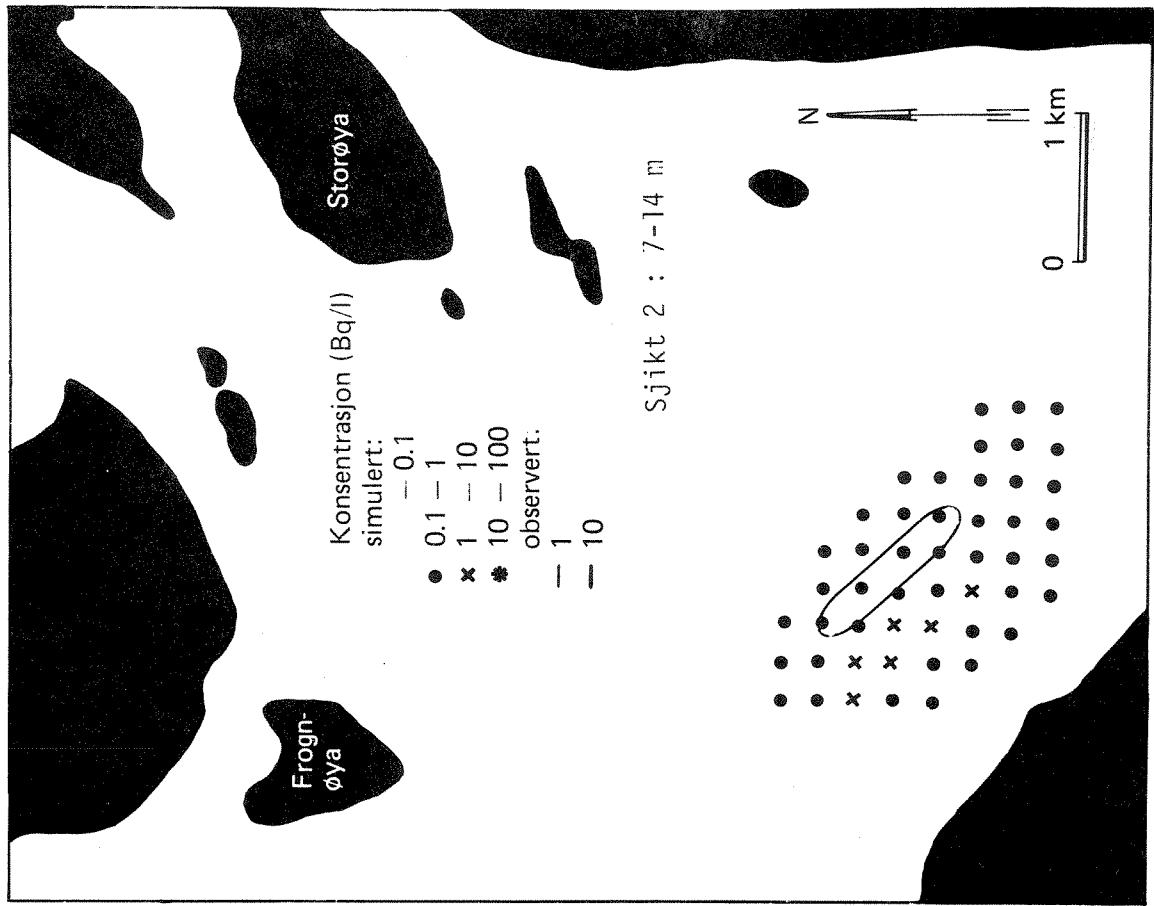


Fig. 4.3-3 Observerte konsentrasjoner kl. 1030-1230. Simulerte konsentrasjoner kl. 12.

Modellberegningene viste at over 80% av den gjenværende stoffmengden befant seg over sprangsjiktet. Dette virker rimelig i forhold til observasjonene.

Et karakteristisk trekk var at den simulerte stoffskyen hadde lavere maksimumskonsentrasjoner og ble spredd over et større område enn den observerte skyen i det første halve døgnet. Ved avslutningen av forsøket var forskjellene mye mindre. Det skyldes fortrinnsvis størrelsen på de cellene som spredningsforløpet ble beskrevet med. Når noe av stoffet blir transportert inn i en celle, blir det i modellen umiddelbart jevnt fordelt i hele cellen. I simuleringens første fase var cellenes horisontale utbredelse (250 · 250) relativt stor i forhold til skyens utbredelse, noe som resulterte i en relativt grov beskrivelse av virkeligheten. Med økende utbredelse av skyen med tiden, ble nøyaktigheten i modellens beskrivelse bedre.

Redusert cellestørrelse ville rimeligvis ført til en noe bedre overensstemmelse mellom simulerte og observerte verdier. Imidlertid ville regnemaskintiden/kostnadene økt betydelig. Cellenes størrelse ble bestemt ut fra en avveining mellom fysiske resonnementer og regnemaskintid/økonomi.

Eksperimentet viste at de matematiske modellene var egnet til å beskrive spredningsforløpet av stoffet på en, i de fleste henseender, tilfredsstillende måte.

## 5 SIMULERT SPREDNING AV KOLIFORME BAKTERIER FRA STORELVA

### 5.1 Innledning

Sykdommer som i vårt klima kan spres med vann, skyldes fortrinnsvis bakterier, virus m.m. fra avføringen til mennesker og varmblodige dyr. Koliforme bakterier er en indikator på slik forurensning. Når bakteriene kommer ut i vannet, vil de etter en tid dø. Hvor stor del av sjøen som blir påvirket av bakteriene blir følgelig et samspill mellom tilførsler, bakterienes levedyktighet og strømningsforhold.

Godt drikkevann skal ifølge helsemyndighetenes krav inneholde mindre enn 1 koliform bakterie pr. 100 ml. Kvalitetskravet til badevann er på 50 E.koli pr. 100 ml.

De største tilførslene av koliforme bakterier til Tyrifjorden kommer via Storelva. Vi ønsket å få kjennskap til i hvilken grad de ulike delene innsjøen kunne tenkes å bli påvirket ved disse tilførslene. I Holsfjorden er det planlagt et drikkevannsuttak. Vi var interessert i å vite om koliforme bakterier fra Storelva kunne påvirke vannkvaliteten der.

Vi ønsket å beregne spredningsforløpet for enkelte karakteristiske vindforhold. De mest fremherskende vindretningene er mot nord, mot sør og mot øst. Vi har tidligere i undersøkelsen simulert karakteristiske strømningsmønstre ved de nevnte vindretningene. Sammenligninger med feltregistreringer viste at beregningene ga et realistisk bilde av virkeligheten (Tjomsland, 1980).

Antall koliforme bakterier som dør pr. tidsenhet ( $\frac{\partial c}{\partial t}$ ) antas å være proporsjonal med bakteriekonsentrasjonen i vannet ( $c$ ):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = -kc$$

Karakteristisk verdi for dødsratekoeffisienten,  $k$ , er i intervallet 0,5-2 pr. døgn (Chen 1972). Koeffisienten er avhengig av temperatur, lysforhold m.m.. Vi valgte  $k = 1$  pr. døgn. Dette tilsvarer at halvdelen av bakteriene er levende etter 17 timer i vann. Etter 55 timer er antallet redusert til tiendeparten.



Konsentrasjoner på over 500 termostabile koliforme bakterier pr. 100 ml har blitt observert i Tyrifjorden ved Storelvas utløp. Ved modellberegningene ble konsentrasjonen der satt lik 1000 koliforme bakterier pr. 100 ml. Spredningsforløpet ble så simulert for følgende situasjoner:

1. Vind mot nord på 6 m/s 10 m over vannflaten
2. Vind mot øst på 6 m/s 10 m over vannflaten
3. Vind mot sør på 7 m/s 10 m over vannflaten.

Vindens styrke og retning ble antatt å være konstant over hele sjøen.

Temperaturer i vannet tilsvarte en sommersituasjon. I sentrum av sjøen ble temperaturforholdene antatt å være:

|             |   |        |
|-------------|---|--------|
| 0-12 m      | : | 13 °C  |
| 12-24 m     | : | 9 °C   |
| 24-36 m     | : | 6 °C   |
| 36 m - bunn | : | 4,5 °C |

Temperaturen i vannet fra Storelva ble antatt å være 13 °C.

## 5.2 Simulerte bakteriekonsentrasjoner

Ved konstante strømforhold vil bakteriekonsentrasjonene etter noen døgn nærme seg en likevektsituasjon. Antall bakterier som tilføres er da lik det antallet som dør.

### Spredning med vind mot nord.

Fig. 5.2-1, 2 og 3 viser det horisontale og vertikale strømningsmønster etter ett døgn med konstant vindpåvirkning på 6 m/s mot nord. Vannet i overflatesjiktet (0-12 m) strømmet hovedsakelig nordover. Karakteristiske hastigheter var mellom 5 og 15 cm/s. I de dypere liggende sjiktene var bevegelsen i stor grad rettet mot sør.

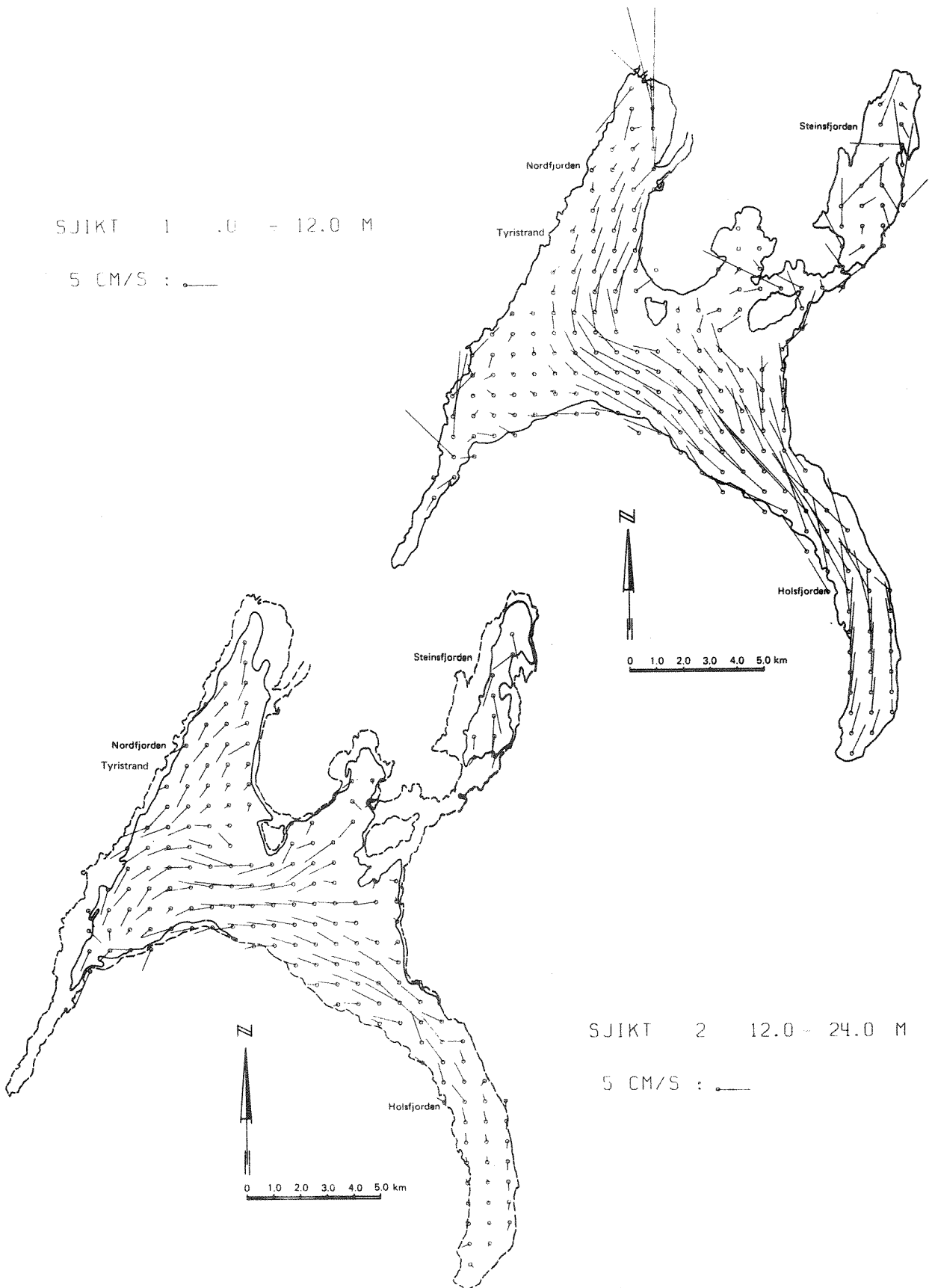


Fig. 5.2-1. Simulert strøm - vind mot nord: 6 m/s

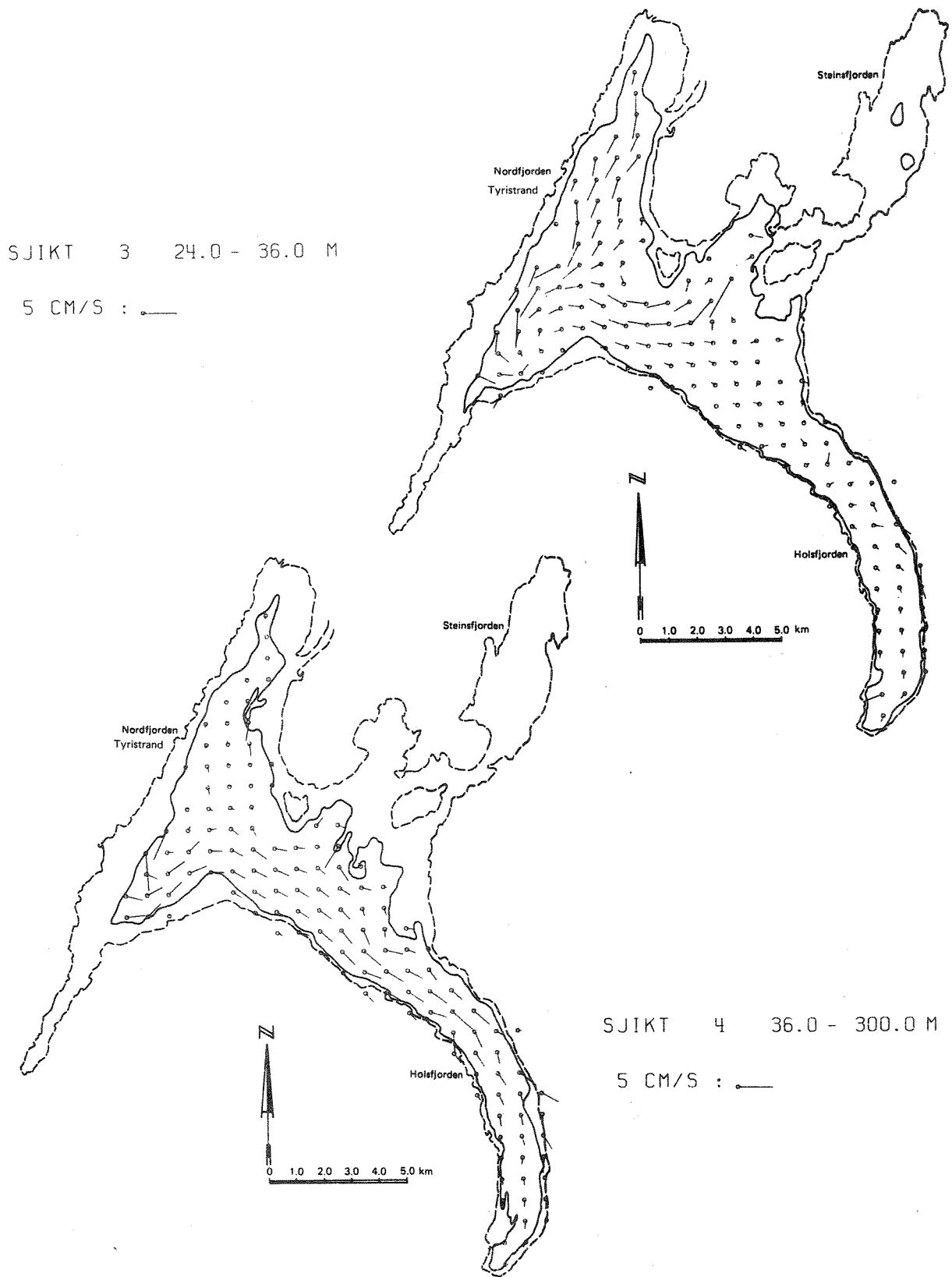


Fig. 5.2-2 Simulert strøm - vind mot nord: 6 m/s

NIVÅLITE NR 1 - 12 M

HÅRTIGHET SYMBOLENE ER FLATEPROPORTSIONALE.  
 ○ OPPOVER RETTET STRØM - 0.2 MM/S  
 × NEDOVER RETTET STRØM - 0.2 MM/S

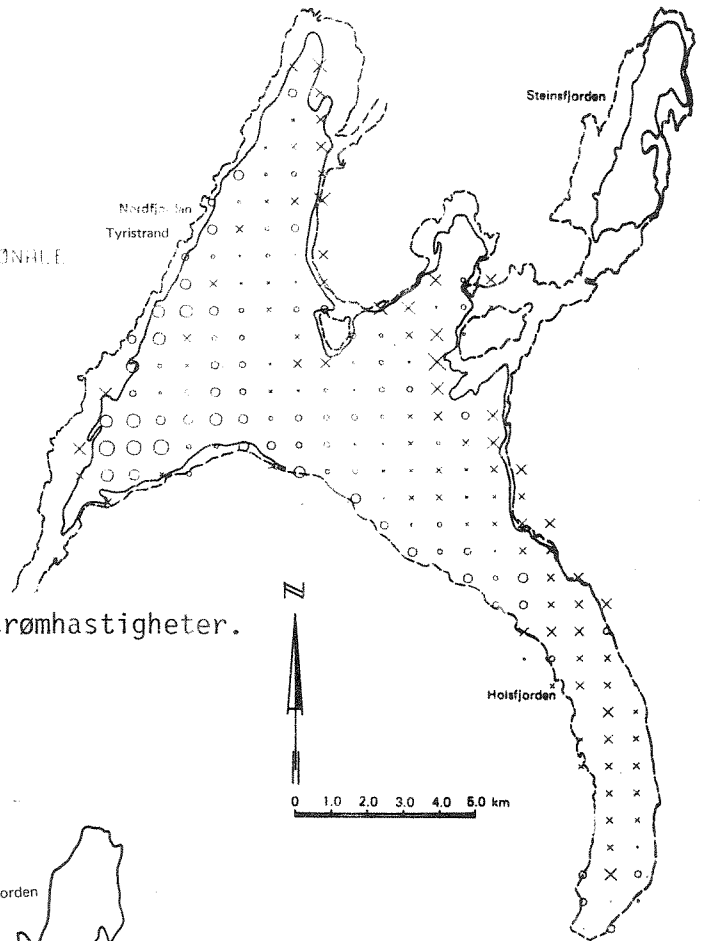
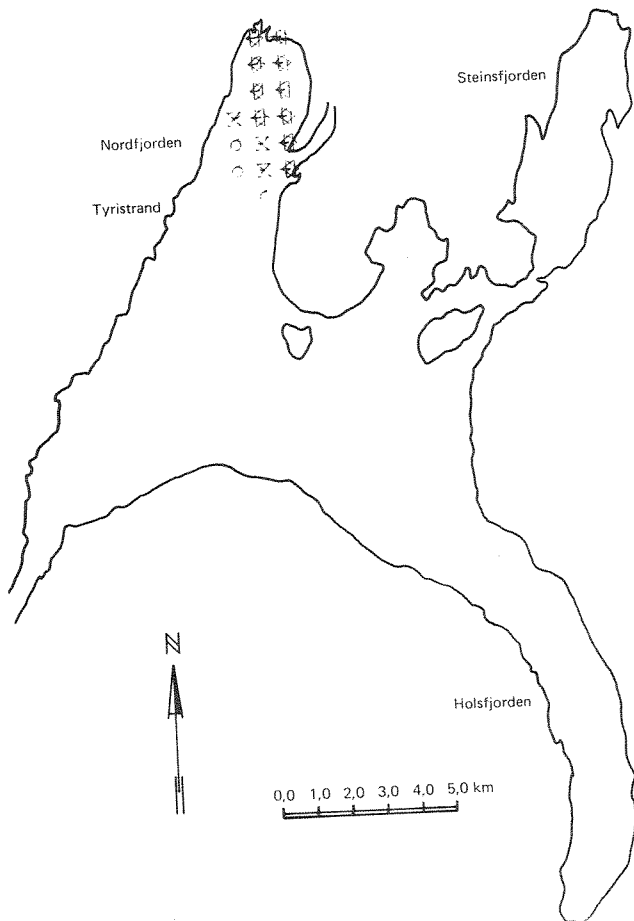


Fig. 5.2-3 Simulerte vertikale strømhastigheter.



SIKT 1 : - 12 M

- |   |     |   |     |
|---|-----|---|-----|
| ○ | 1   | - | 1   |
| × | 10  | - | 10  |
| * | 50  | - | 50  |
| ⊠ | 100 | - | 100 |

Fig.5.2-4 Simulerte konsentrasjoner av koliforme bakterier.

Bakteriene ble spredd med overflatestrømmen fra Storelva og innover i Nordfjorden (fig. 5.2-4). Konsentrasjoner på over 100 kolibakterier pr. 100 ml var vanlige. Nedadrettede strømmer i nordenden, førte bakteriene ned mot bunnen. Under 12 m's nivået ble de så transportert i sørøstlig retning. Verdier over 1 kolibakterie pr. 100 ml ble ifølge beregningene spredd til ca. 6 km fra Storelva. Dypere enn 24 m var det konsentrasjoner i intervallet 1-10 kolibakterier pr. 100 ml ca. 2 km fra Storelva.

#### Spredning med vind mot øst.

Fig. 5.2-5,6 og 7 viser strømningsmønsteret etter ett døgn med konstant vindpåvirkning på 6 m/s mot øst.

I overflatesjiktet strømmet vannet overveiende mot sørøst. I Nordfjorden var hastighetene sjelden over 3 cm/s. I de dypereliggende lag var bevegelsen fortrinnsvis rettet i motsatt retning av overflatestrømmene.

Bakteriene ble overveiende spredd sørover langs den vestlige delen av Nordfjorden (fig. 5.2-8). Konsentrasjonene avtok raskt med transportavstanden. Verdier over 1 kolibakterie pr. 100 ml ble ifølge beregningene spredd til ca. 6 km fra Storelva's utløp. Kun neglisjerbare mengder ble blandet inn i vannmassene dypere enn 24 m.

#### Spredning med vind mot sør.

Fig. 5.2-9, 10 og 11 viser strømningsmønsteret etter ett døgn med konstant vind mot sør på 7 m/s.

I overflatesjiktet strømmet vannet hovedsakelig sørover. Hastigheter på opp til 20 cm/s var vanlige i Nordfjorden. I 12-24 m's sjiktet var bevegelsen fortrinnsvis rettet mot sør og øst. I bunnsjiktet gikk strømmene overveiende nordover.

Bakteriene ble spredd sørover i Nordfjorden og videre både mot Vikersundområdet og mot Holsfjorden (fig. 5.2-2-12). I overflatesjiktet ble verdier over 50 og 1 kolibakterie pr. 100 ml ifølge simulerin-

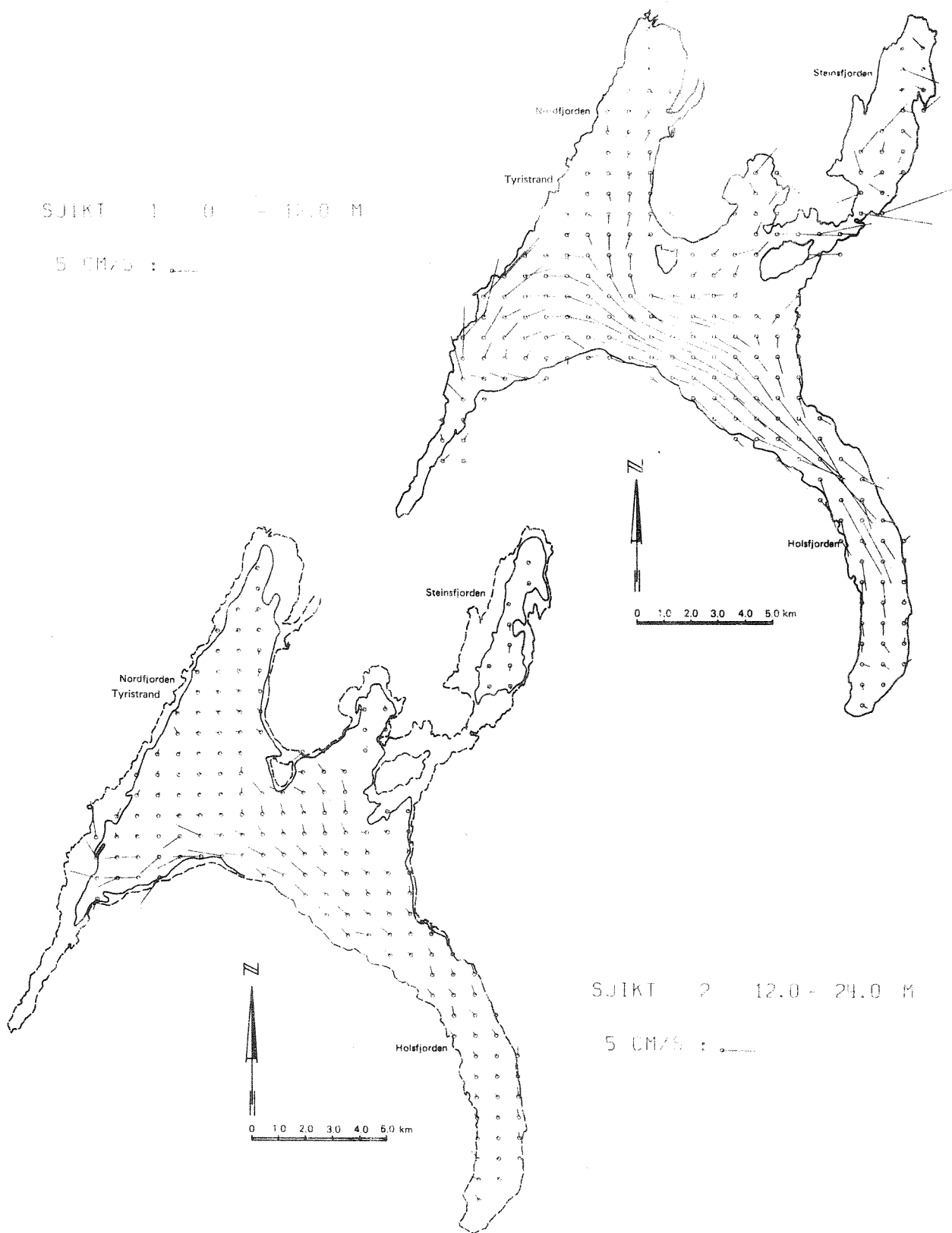


Fig. 5.2-5 Simulert strøm - vind mot øst: 6 m/s

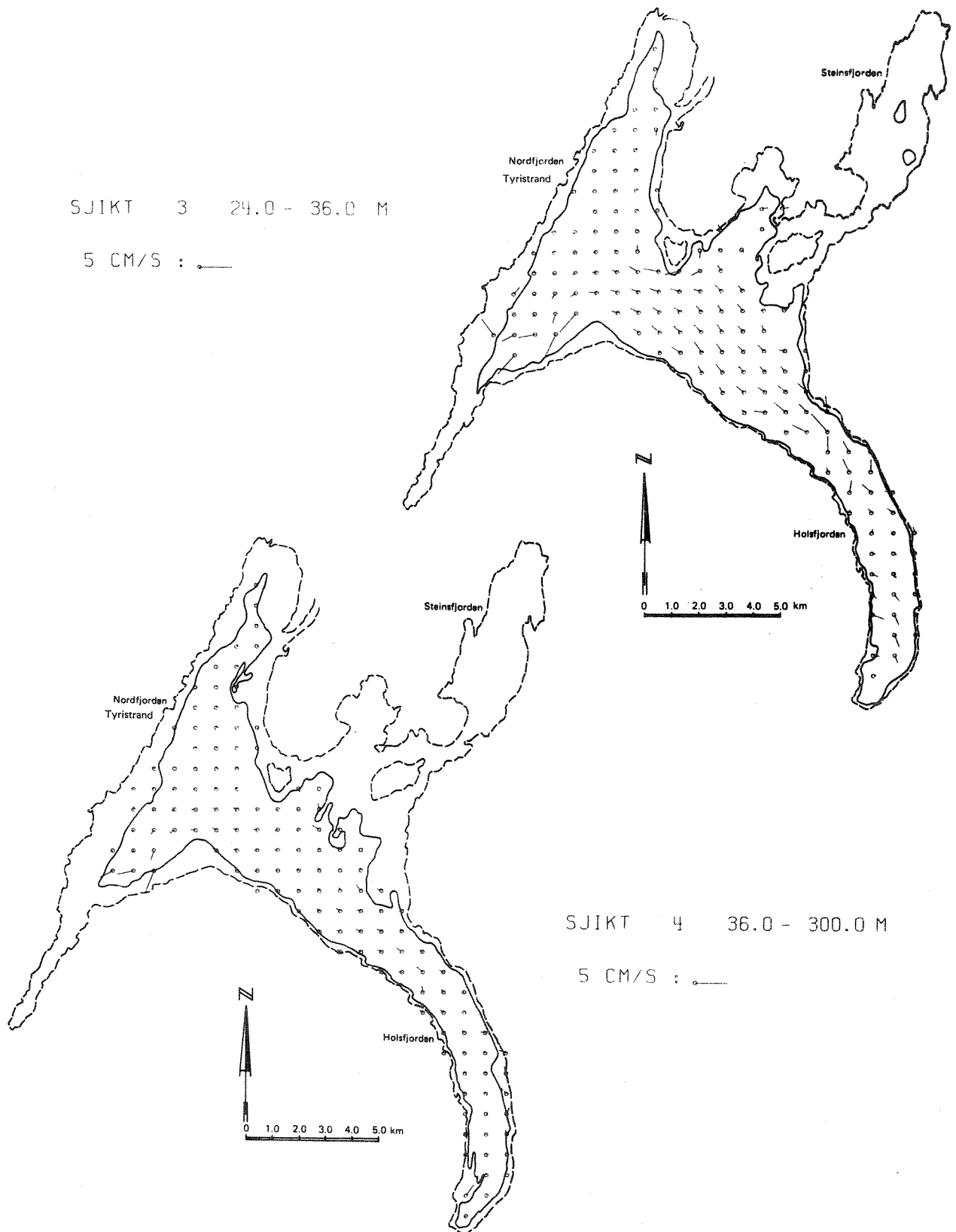


Fig. 5.2-6 Simulert strøm - vind mot øst: 6 m/s

SIKTELATE NR 1 : 12 M

HASTIGHET SYMBOLER ER FLATEPROPORTIONALE  
 ○ OPPOVER RETTET STRØM = 0.2 MM/S  
 × NEDOVER RETTET STRØM = 0.2 MM/S

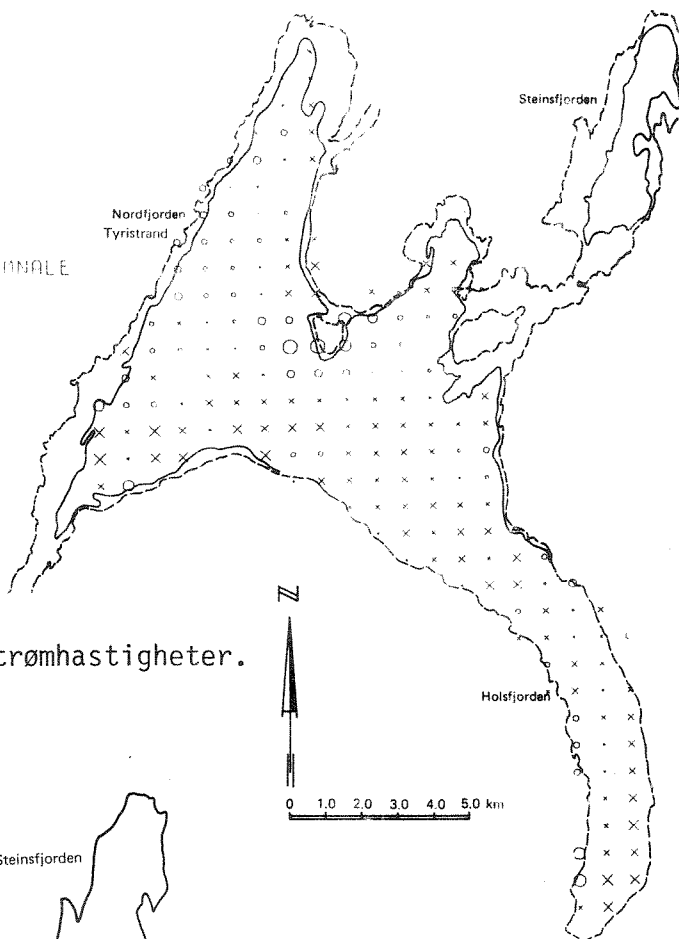
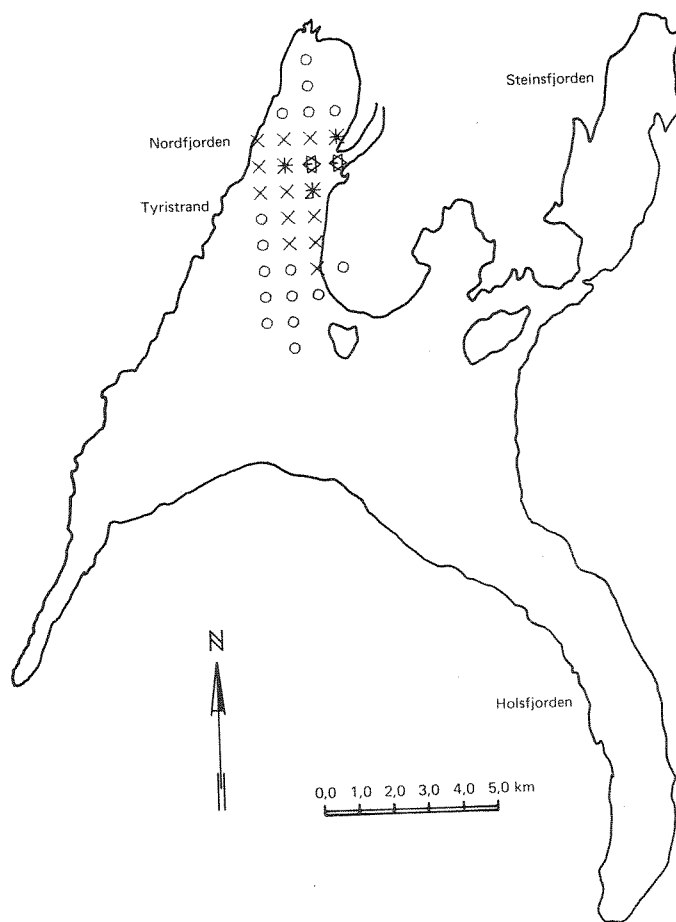


Fig. 5.2-7 Simulerte vertikale strømhastigheter.



SJIKT 1 : - 12 M

|   |     |   |     |
|---|-----|---|-----|
| • | 1   | - | 1   |
| ○ | 1   | - | 10  |
| × | 10  | - | 50  |
| * | 50  | - | 100 |
| ◇ | 100 | - |     |

Fig. 5.2-8 Simulerte konsentrasjoner av koliforme bakterier.



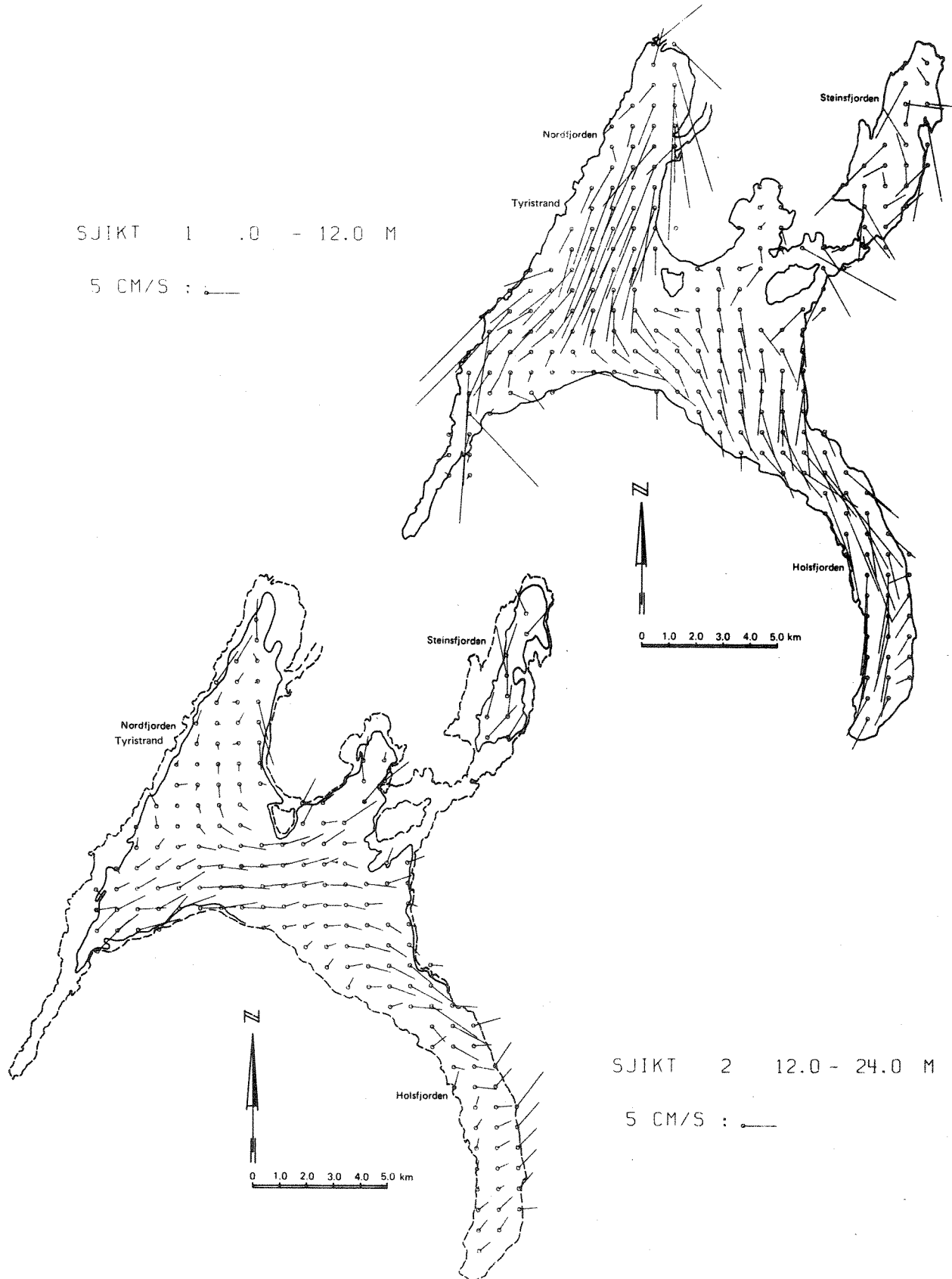


Fig. 5.2-9 Simulert strøm - vind mot sør: 7 m/s

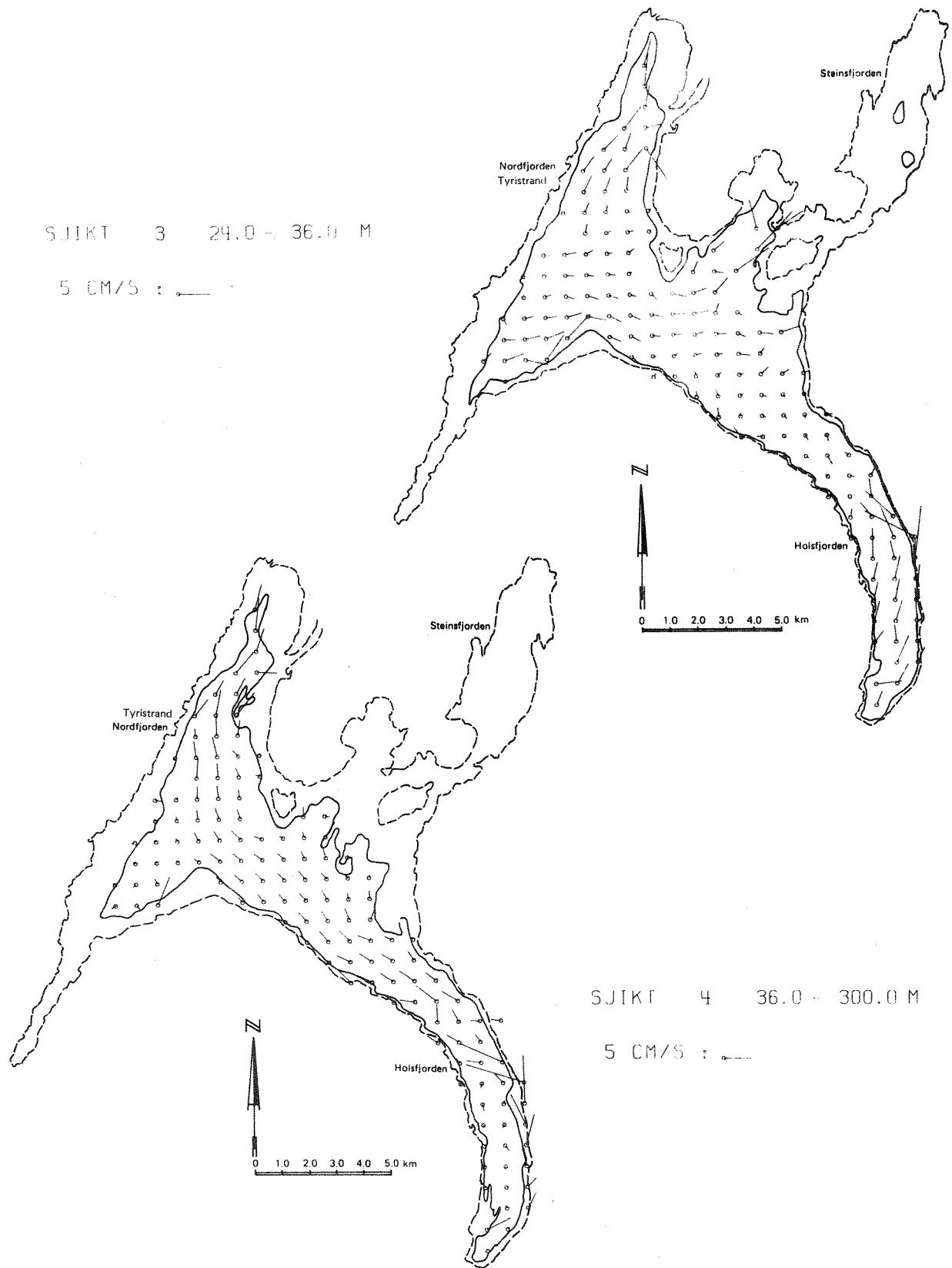


Fig. 5.2-10 Simulert strøm - vind mot sør: 7 m/s

NIVÅ: 12 M

HASTIGHET SYMBOLENE ER FLATEPROPORTSJONALE  
 O OPFOVER RETTET STRØM - 0.2 MM/S  
 X NEDOVER RETTET STRØM - 0.2 MM/S

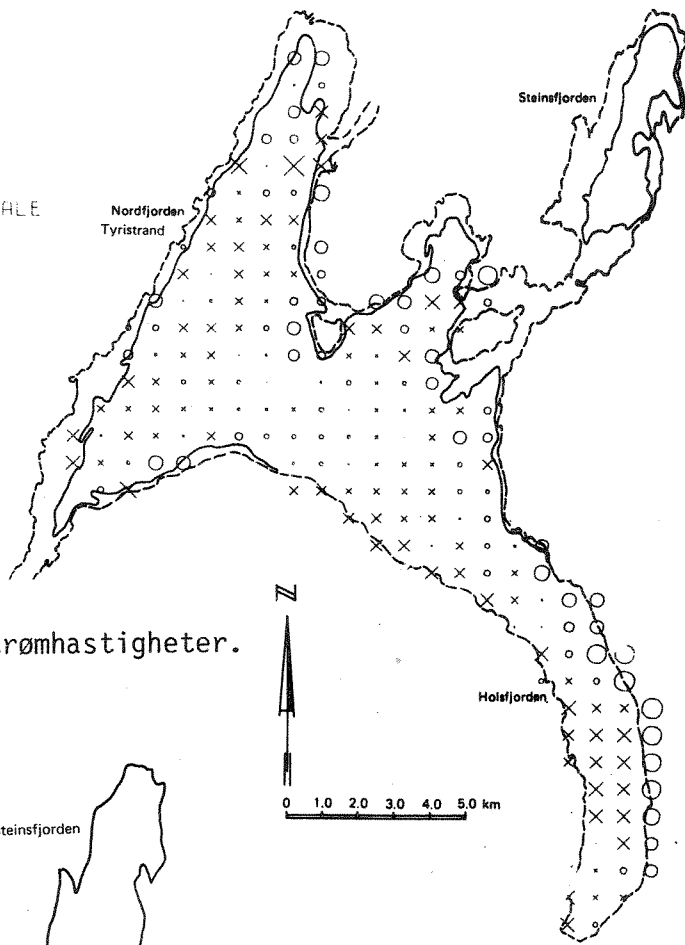
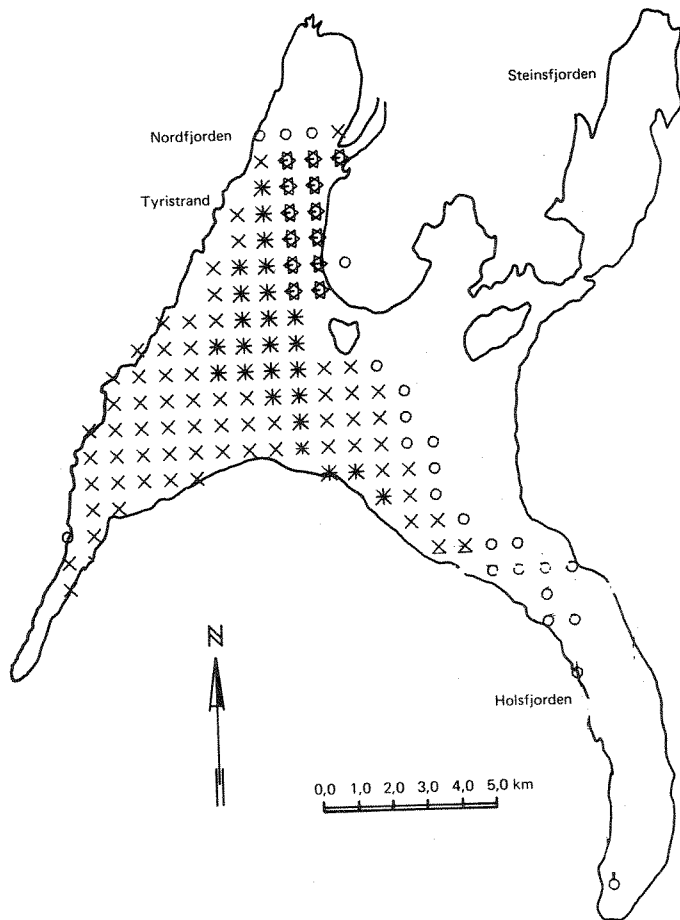


Fig. 5.2-11 Simulerte vertikale strømhastigheter.



SJIKT 1 : - 12 M

- 2 - 2
- 2 - 10
- × 10 - 50
- \* 50 - 100
- ☆ 100 -

Fig. 5.2-12 Simulerte konsentrasjoner av koliforme bakterier.

gene funnet i henholdsvis 8 og 18 km's avstand fra Storelva. I 12-24 m's nivået var alle konsentrasjoner under 10 kolibakterier pr. 100 ml. I de dypereliggende vannmassene var bakterieinnholdet neglisjerbart.

### 5.3 Diskusjon

Innholdet av koliforme bakterier ved Storelva kan i perioder være for høyt til å tilfredsstille helsemyndighetenes krav til badevann.

Ved vind mot nord kan vannet langs strendene i Nordfjorden ifølge modellberegningene forventes å bli sterkt påvirket av forurensninger fra Storelva. Ved andre vindretninger synes påvirkningen der å være liten.

Områdene på vestsiden av Tyrifjorden ble ifølge beregningene påvirket av bakterier fra Storelva ved vind mot sør. De sjeldent forekommende vinder mot vest vil rimeligvis også ha en slik effekt. Fortynnings-effekter indikerer at det f.eks. er liten sannsynlighet for at det skal oppstå problemer med badevannskvaliteten.

Hovedmengden av Storelva's tilførsler til innsjøen vil forringe vannkvaliteten i områdene mellom utløpet og Frognøya.

I ekstreme tilfeller ved vedvarende sterk vind mot sør, kan de sentrale delene av sjøen og de ytre delene av Holsfjorden ifølge beregningene bli påvirket. På østsiden av Holsfjorden ved Toyerud er det planlagt et drikkevannsuttak for Asker og Bærum vannverk. Det synes som om dette vannet ikke vil bli påvirket av koliforme bakterier fra Storelva.

Simuleringene gir et inntrykk av den største horisontale utbredelsen som bakteriene fra Storelva kan forventes å få ved de ulike vindretningene. Vindobservasjoner fra Frognøya viser at vindstyrken sjelden overskrider tilsvarende 6 m/s 10 m over vannflaten i mange timer av gangen. Vindretningen endres vanligvis også mye i løpet av et døgn. Reelle konsentrasjonsfordelinger vil derfor rimeligvis ligge innenfor de områdene som simuleringene skisserer.

Simuleringene antyder at en neglisjerbar andel av bakteriene ble transportert til under 24 m's nivået. Varierende vindstyrke og retning kan sette opp vertikale strømninger og dermed påvirke dyplagene i større grad. Videre vil små temperaturgradienter i dybderetningen øke transporten i vertikal retning.

## 6 REGIONAL FORDELING AV TUNGMETALLER I SEDIMENTENE

### 6.1 Innledning

I forbindelse med Tyrifjord-undersøkelsen er det utgitt rapporter som omhandler tungmetaller, organisk stoff m.m.. I disse rapportene er det lagt vekt på undersøkelser av kvikksølv. Tilførsler, innholdet i de frie vannmasser og i sedimentene, økologiske effekter m.m. har blitt diskutert. I denne rapporten har vi ved teoretiske betraktninger gjort et forsøk på å bestemme hvor i innsjøen tungmetaller som tilføres Tyrifjorden hovedsakelig vil sedimentere.

Kvikksølv og andre tungmetaller blir fortrinnsvis bundet til små partikler (silt og leire) og til organisk materiale (Håkanson 1977). Den regionale fordelingen av tungmetallene i innsjøens sedimenter er derfor nært knyttet til sedimentasjonsprosessene til slikt materiale.

Disse små partiklene sedimenterer fortrinnsvis i områder med liten hydrodynamisk aktivitet og hvor bunnforholdene hindrer videre transport. Partikler som har sedimentert i strandsonen eller i grunne områder vil kunne bli resuspendert på grunn av bølgeaktivitet. Selv små strømhastigheter langs bunnen er tilstrekkelig til å erodere og transportere partiklene dersom bunnen er tilstrekkelig skrånende.

### 6.2 Resuspensjon p.g.a. bølgeaktivitet.

Bølgene forplanter seg med hastighet, høyde og bølgelengde, avhengig av vindens hastighet, vindens strøklengde og av dybdeforholdene.

De enkelte vannpartiklene som bølgen består av, beveger seg ideelt i eliptiske baner i et vertikalplan i bølgens forplantningsretning (Horizontal forflytning skyldes strøm). Er det tilstrekkelig grunt, kan denne eliptiske bevegelsen føre til erosjon i bunnsedimentene. Bølgen har dessuten en eroderende virkning når den bryter i strandsonen.

Bølgenes størrelse er avhengig av vindens strøklengde på vannoverflaten. Vi antar at bølgenes største erosjonsaktivitet i et punkt inntreffer for de vindretningene som har den største tilhørende effektive strøk-

lengde. Den største effektive strøklengden ble beregnet ved å ta hensyn til vindens strøklengder i den skjønsmessig mest vindutsatte sektor på  $84^{\circ}$ . Den matematiske formuleringen er gitt ved (Beach Erosion Board 1972):

$$\text{Effektiv strøklengde} = \frac{\sum x \cos \alpha}{\sum \cos \alpha}$$

$x$  er strøklengden med retning  $\alpha$  fra den største strøklengden. Vinkelen  $\alpha$  økes med  $6^{\circ}$  ad gangen innen en sektor på  $42^{\circ}$  på hver side av hovedretningen (fig. 6.2-1).

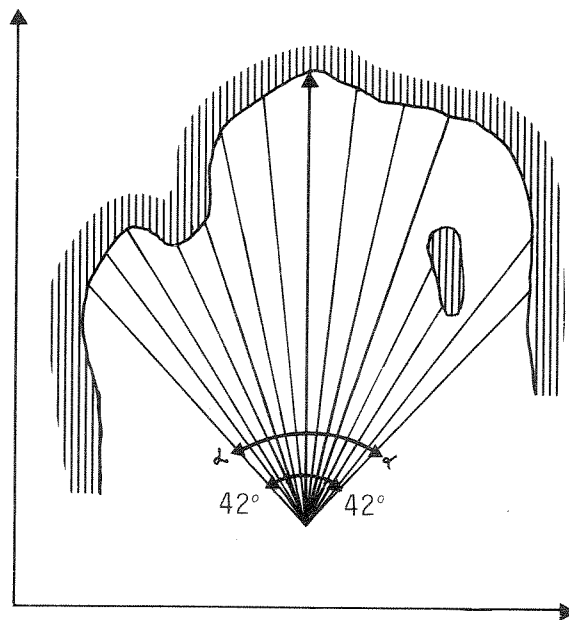


Fig. 6.2-1. Beregning av vindens største effektive strøkretning.

De største effektive strøklengdene i Tyrifjorden har vi i Nordfjorden og i de sentrale delene av innsjøen. De minst vindutsatte områdene finnes i innsjøens sørender, i Steinsfjorden og i øyområdene sør for denne (fig. 6.2-2).

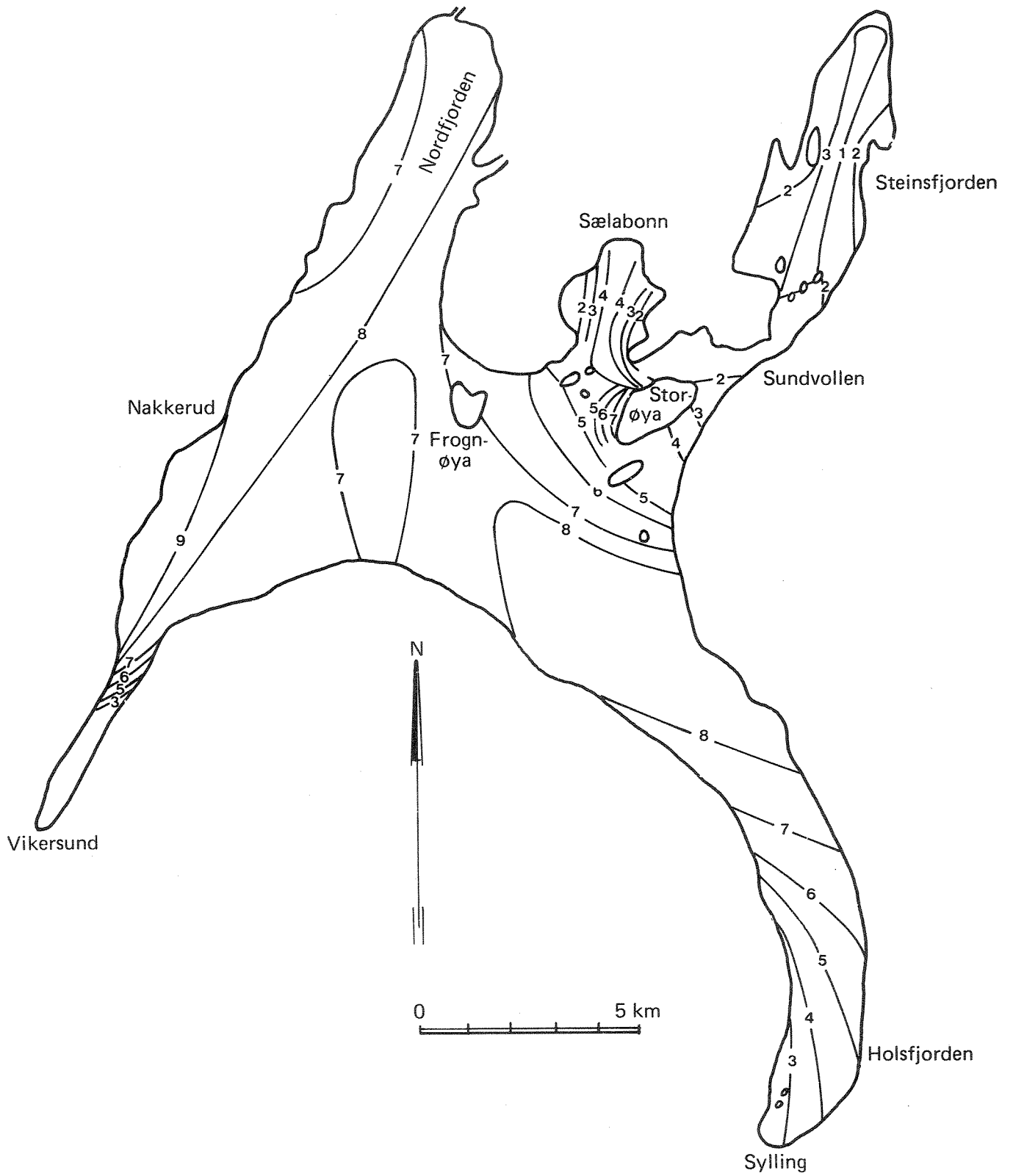


Fig. 6.2-2 Maksimale effektive strøklengder.

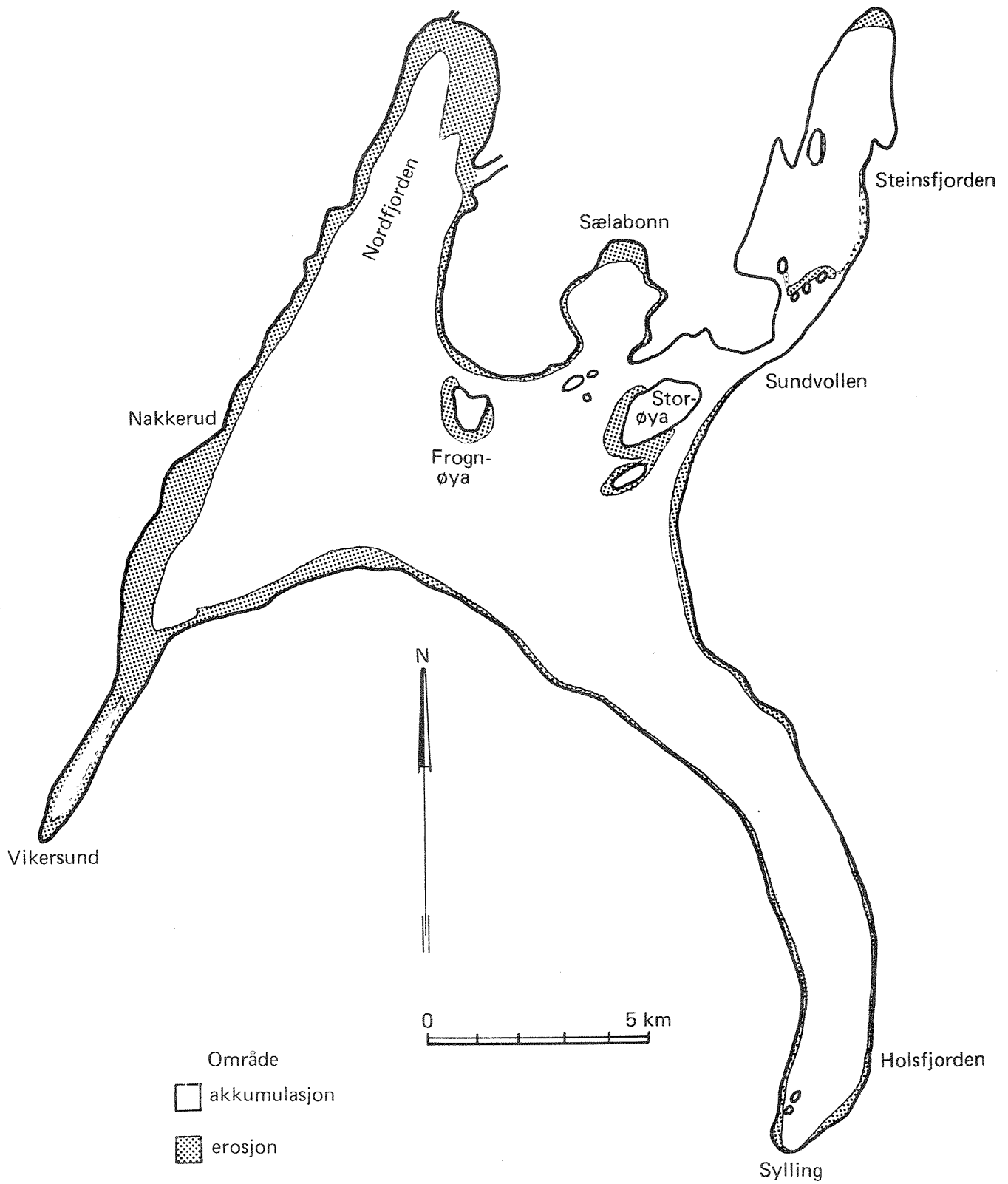


Fig. 6.2-3 Erosjon og akkumulasjon som følge av bølgeaktivitet.



Vi antar en vindstyrke på 10 m/s 10 m over vannflaten for å være blant de høyeste som regelmessig inntreffer. Ved å nytte denne vindhastigheten samt kartet over maksimale effektive strøklengder (fig. 6.2-2) kan vi ut fra erfaringstabeller finne bølgenes høyde (H), lengde (L) og periode (T) (Beach Erosion Board 1972).

Den maksimale horisontale hastigheten til vannpartiklene (u) i bølgen ved bunnen kan da beregnes ved:

$$u = \frac{\pi h}{T} \cdot \frac{1}{\sinh\left(\frac{2\pi}{L} h\right)}$$

Maksimum dyp (h) hvor bølgene kan bevege sedimentene med kornstørrelse (D) ble bestemt ved følgende formel (Komar, 1975):

$$\frac{\rho u^2}{(\rho_s - \rho) qD} = 0,21 \left[ \frac{H}{D \sinh\left(\frac{2\pi h}{L}\right)} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad D < 0,5 \text{ mm}$$

$\rho$  : vannets tetthet

$\rho_s$  : sedimentets tetthet

De områdene som synes mest utsatt for resuspensjon p.g.a. bølgeaktivitet er Nordfjorden, Nakkerud-Vikersund-området, langs Holsfjordens strender, på sørsiden av Storøya, Frognøya m.fl., Sælabonn og nordenden av Steinsfjorden (fig. 6.2-3).

### 6.3. Skråningsbetinget erosjon, transport og akkumulasjon

Silt og leirpartikler er meget lett bevegelige og sedimenterer vanligvis ikke permanent med mindre bunnens skråninger er meget små.

Håkanson(1977) delte på grunnlag av feltobservasjoner Vånern inn i følgende dynamiske soner:

|           |                     |
|-----------|---------------------|
| gradient  | dynamisk sone       |
| 0-5%      | akkumulasjonsområde |
| 5 - 7,5%: | transportområde     |
| 7,5%:     | erosjonsområde.     |

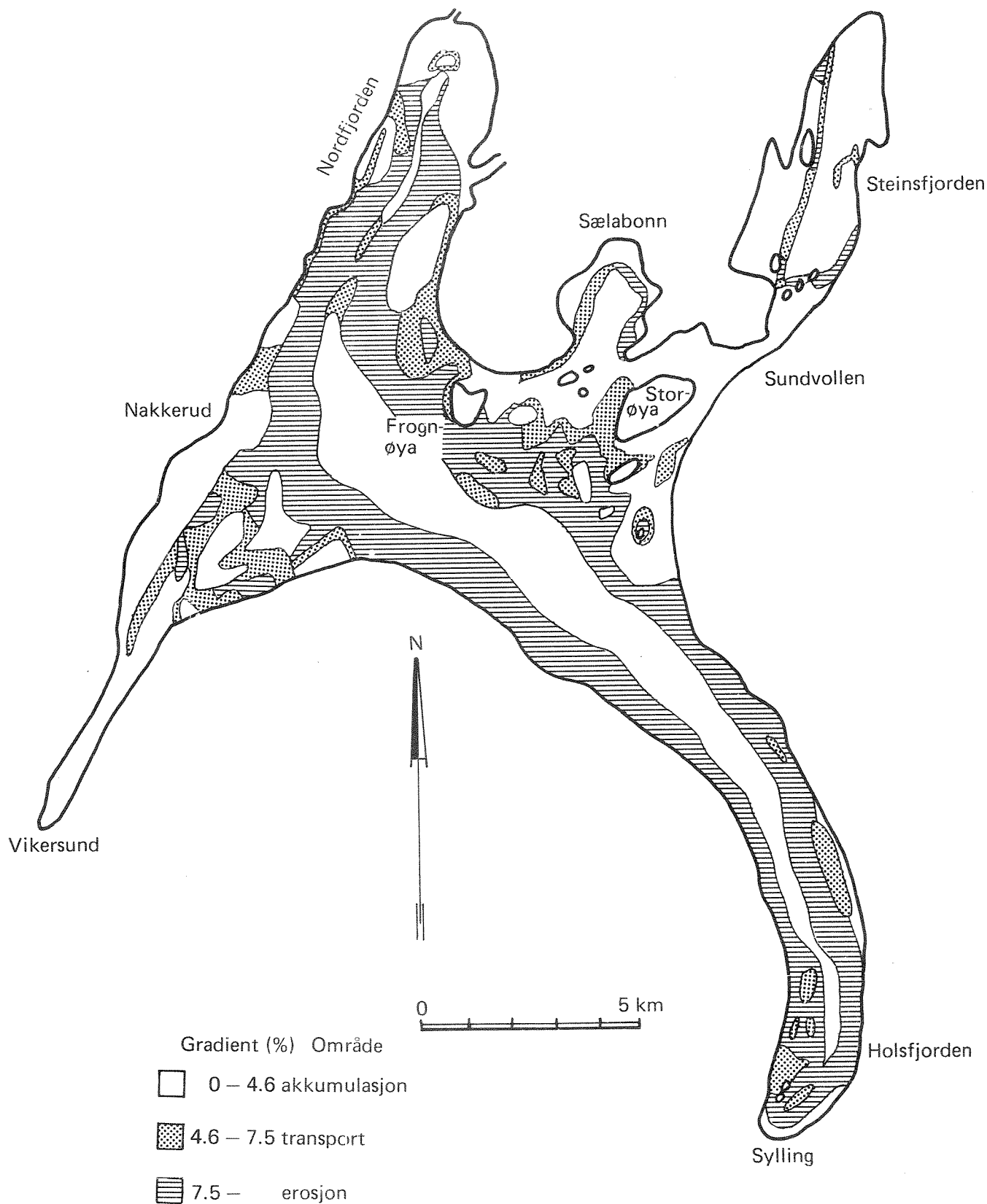


Fig. 6.3-1 Skråningsbetinget erosjon, transport og akkumulasjon

Inndelingen i Tyrifjorden ble gjort på grunnlag av dybdekart i målestokk 1:25.000 med dybdekotor på 5 og 10 m og deretter for hver 20. meter (opploddet av NVE i 1977).

Sannsynlige akkumulasjonsområder med hensyn til bunnens skråningsforhold finner vi fortrinnsvis i det sentrale dypbassenget, i nordenden av Nordfjorden, i området Tyristrand-Vikersund, nord for øyene Frognøya-Storøya og i Steinsfjorden. De mest utsatte erosjonsarealene er lokalisert til områdene rundt det sentrale dybdebassenget (fig. 6.3-1).

#### 6.4 Endelig inndeling av Tyrifjorden i erosjons-, transport- og akkumulasjonsområder.

---

Ved å sammenholde effektene p.g.a. bølgeaktivitet (fig. 6.2-3) og som følge av bunnstrømmer (fig. 6.3-1) får vi en endelig inndeling av Tyrifjorden i erosjon, transport og akkumulasjonsområde for silt og leirpartikler (fig. 6.4-1).

Fint materiale som tilføres Tyrifjorden, vil ifølge figuren hovedsakelig sedimentere i dypbassenget i de sentrale delene av innsjøen, i enkelte lommer i Nordfjorden og i Tyristrand-Vikersund-området, nordenfor øyene: Frognøya, Storøya m.fl. og i Steinsfjorden. De mest utsatte erosjonsområdene finner vi i Nordfjorden i Tyristrand-Vikersund-området og langs skråningene mot det sentrale dypbassenget.

Resuspensjon av sedimenter har blitt studert ved Nakkerud, noen km sør for Tyristrand (Tyrifjordundersøkelsen 1981). Vinder blåste med opptil 9 m/s målt på Frognøya fra sørøst, dvs. langs maksimum strøkretning. Bunnsedimentene ble resuspendert ned til et dyp på ca. 10 m. Denne utbredelsen viste god overensstemmelse med de teoretiske betraktningene vi her har gjort (fig. 6.2-2). I forbindelse med undersøkelsen ved Nakkerud, ble det også visuelt observert turbid vann i nordenden av Nordfjorden og mellom Storøya og Sundvollen. Fig. 6.4-1 indikerer også resuspensjonsområder i Nordfjorden. Mellom Storøya og Sundvollen var imidlertid tilpasningen dårlig.

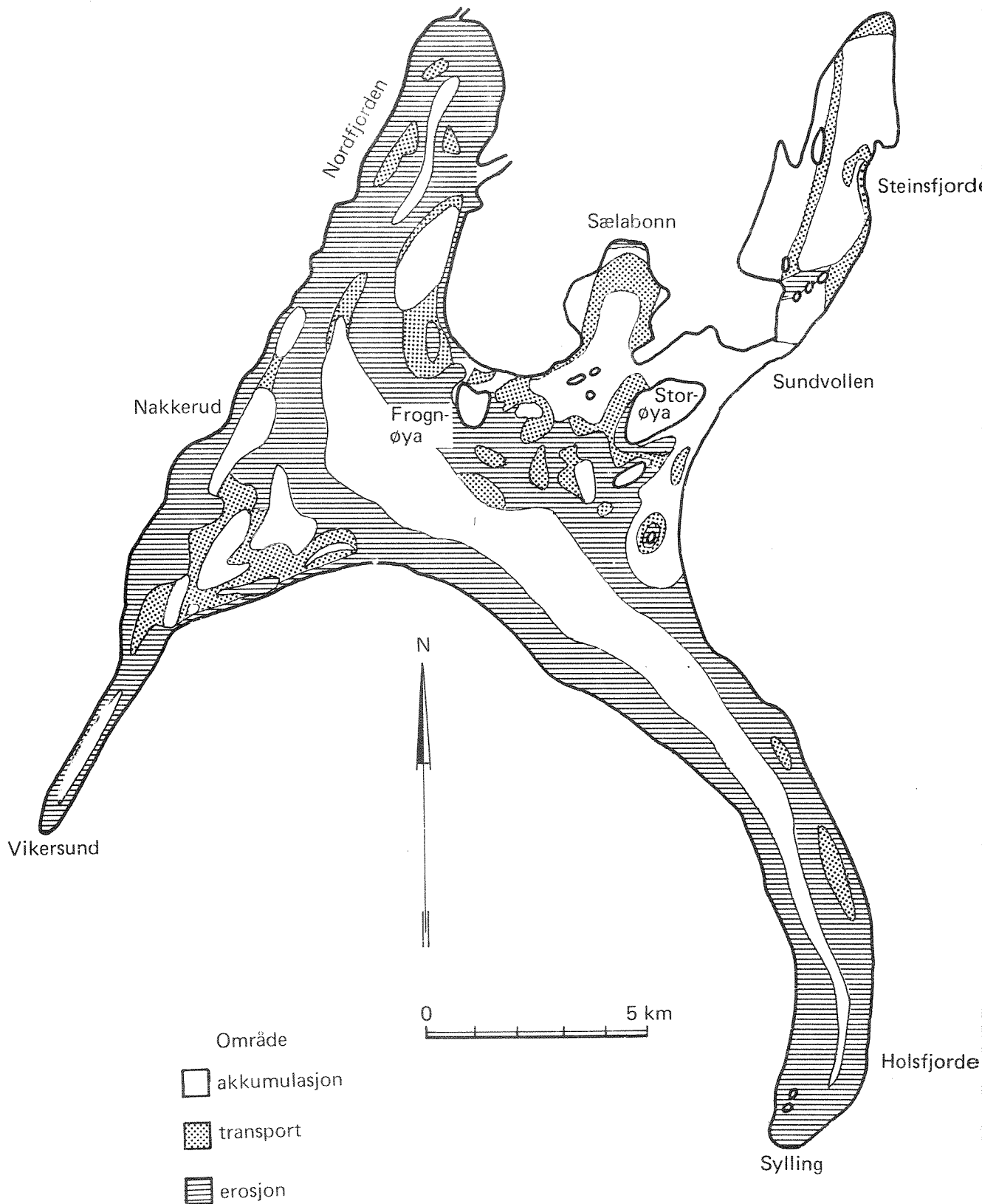


Fig. 6.4-1 Tungmetallene vil ventelig sedimentere i det sentrale dypbassenget og i Steinsfjorden.

Som nevnt, har vi antatt at kvikksølv og andre tungmetaller fortrinnsvis blir bundet til silt og leirpartikler samt organisk stoff. De største kvikksølvkonsentrasjonene i sedimentene skulle følgelig være lokalisert til akkumulasjonsområdene.

Midlere kvikksølvkonsentrasjon i det forurensede sjiktet (6-8 m) av sedimentene ble registrert i 15 punkter (Tyrifjordundersøkelsen 1981). Den regionale utbredelsen av kvikksølvet i sedimentene (fig. 6.4-2) stemte i meget stor grad med de teoretiske beregningene vi her har gjort.

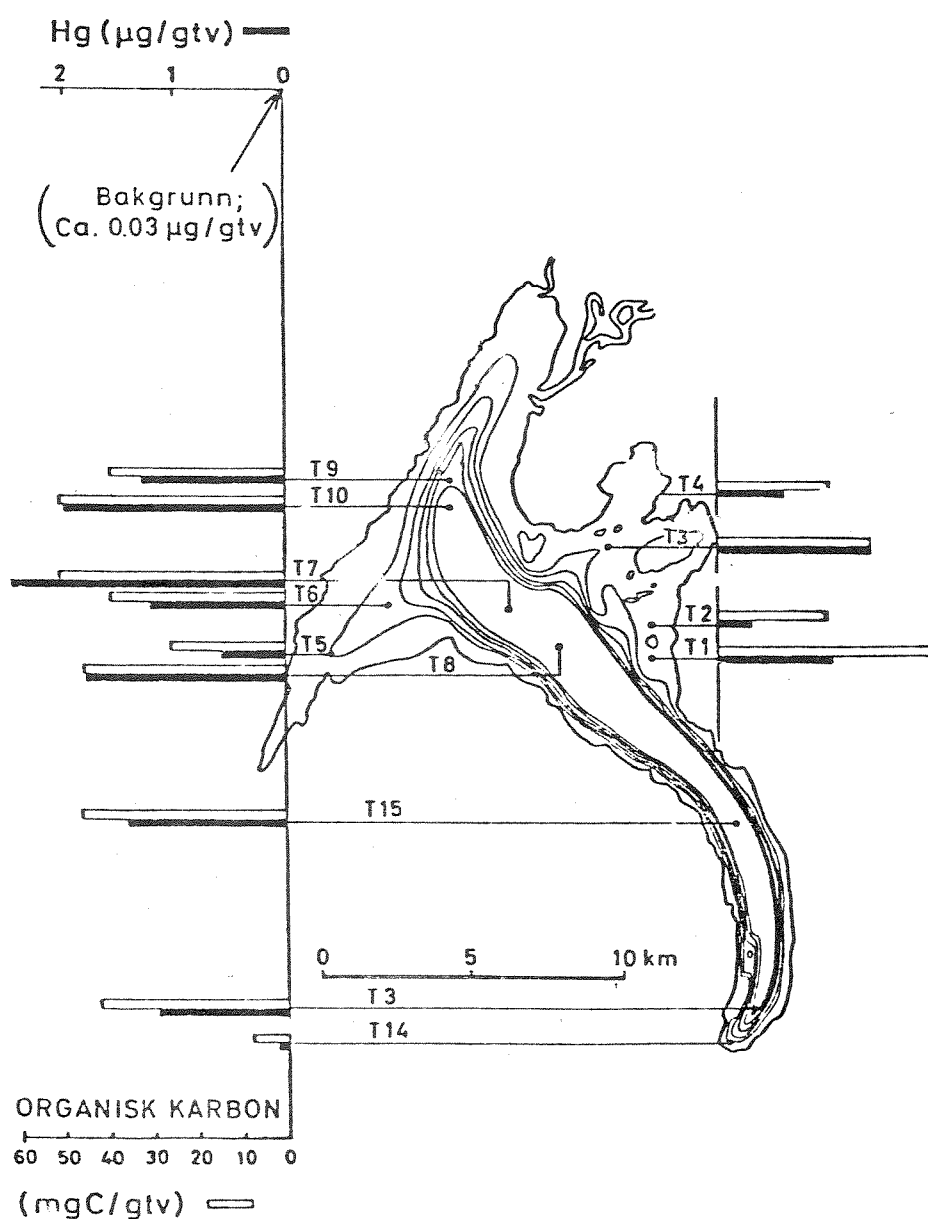


Fig. 6.4-2 Observerte verdier av kvikksølv og organisk karbon i bunnsedimentene (tyrifjordundersøkelsen 1981).

Det synes som om at inndelingen av Tyrifjorden i erosjon, transport og akkumulasjonsområder gir et realistisk bilde av virkeligheten.

Kartet kunne trolig bli enda mer pålitelig ved å ta hensyn til reelle vindstyrker og dominerende vindretninger. Videre ville en mer detaljert kartlegging av bunntopografien ha gunstig virkning.

Inndelingen i erosjons- og akkumulasjonsområder gjelder først og fremst tungmetaller som kvikksølv, bly, cadmium, kobber, sink m.fl. Imidlertid har f.eks også næringssaltene fosfor og nitrogen tendens til å følge det samme utbredelsesmønster (Håkanson 1977). En betydelig del av en innsjøs fosforinnhold i de frie vannmassene kan bli tilført fra bunnsedimentene ved resuspensjon i erosjonsområdene (Lam 1979).

7 REFERANSER

- Beach Erosion Board 1972: Waves in inland reservoirs. Technical Memoir 132, Beach Erosion Board Corps of Engineers, Washington, DC.
- Chen and Orlob 1972: Ecologic simulation for aquatic environments. Water Resources Engineers final report to office of Water Resources Research,
- Dahl, J. 1973: Undersøkelse av diffusjon og spredning av avløpsvann i forbindelse med planlagt hovedkloakkutslipp i Vestfjorden, Røyken kommune. Institutt for energiteknikk, Kjeller.
- Håkanson, L. 1977: The influence of wind, fetch and water depth on the distribution of sediments in Lake Vänern, Sweden. Canadian Journal of Earth Sciences, vol. 14,
- Komar, P.D. and Miller, M.C. 1975: On the comparison between the threshold of sediment motion under waves and unidirectional currents with a discussion of the practical evaluation of the threshold. J. Sed. Petrology, v. 45.
- Tjomsland, T, 1980: Strøm og spredningsstudier i Tyrifjorden. Rapport nr. 1, Norsk institutt for vannforskning, Oslo.
- Tyrifjord-undersøkelsen 1980, årsrapport, Tyrifjord-utvalget, Fylkeshuset, Drammen.
- Tyrifjord-undersøkelsen 1981, Kvikksølv i Tyrifjorden - data og diskusjon, fagrappport nr. 7, Tyrifjord-utvalget, Fylkeshuset, Drammen.

## VEDLEGG A. MATEMATISK STRØMNINGSMODELL

### A.1 Innledning

Med en matematisk modell menes et system av likninger og funksjonssamband som beskriver et aktuelt problem. Et eksempel er lengde = hastighet · tid ( $s = v \cdot t$ ). Det system som beskriver strømforholdene i en innsjø, er naturligvis betydelig mer komplisert og er ikke mulig å løse eksakt. Ved hjelp av elektronisk databehandling kan imidlertid tilnærmede løsninger bestemmes. Disse kan være akseptable for praktisk bruk.

Fordelene ved å nytte matematiske modeller er at man kan simulere strømmingene for vilkårlig valgt vind, inn- og utløpsvannføringer, temperaturtilstand og ved eventuelle endringer i innsjøens form. Resultatene kan oppnås raskt og til relativt lave kostnader. Ulempene er de til dels høye utviklingskostnader og vanskeligheter med å verifisere modellberegningene med feltmålinger.

### A.2 Modellenes matematiske og fysiske oppbygging

Det blir her gitt en kort innføring i modellenes oppbygging. For en mer fullstendig gjennomgåelse, henvises til Simons 1973 og Tjomsland 1978.

Modellen er utviklet av J. Simons ved Canada Centre for Inland Waters og modifisert ved NIVA.

#### Inngangsdata:

Vindens styrke og retning, vannføring og temperatur i sjøens tilløp og utløp, innsjøens temperatursjiktning samt data om dybdeforholdene.



Resultater:

Horisontal strømhastighet og -retning, vertikal strømhastighet og temperatur.

Innsjøen deles inn i celler. I horisontalplanet er overflaten inndelt i kvadrater. Vertikalt er innsjøen inndelt i fire sjikt. Resultatene blir regnet ut for hver celle.

Den matematiske formuleringen er gitt ved:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = f \cdot v - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial u}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial u}{\partial z}) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -f \cdot u - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} (A_H \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (A_H \frac{\partial v}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (A_V \frac{\partial v}{\partial z}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial x} (uT) - \frac{\partial}{\partial y} (vT) - \frac{\partial}{\partial z} (wT) + \frac{\partial}{\partial x} (K_H \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (K_H \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (K_V \frac{\partial T}{\partial z}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -g\rho \quad (5)$$

- $u, v,$  : hastighetskomponenter i horisontalplanet langs x- og y-aksene  
 $t$  : tid  
 $w$  : hastighetskomponent i vertikalretning (z)  
 $f$  : corioliparameteren  
 $p$  : trykkraft  
 $T$  : temperatur  
 $\rho$  : tetthet  
 $A_H, A_V$  : koeffisienter for turbulent diffusjon av bevegelse i henholdsvis horisontal og vertikal retning  
 $K_H, K_V$  : koeffisienter for turbulent diffusjon av varme i henholdsvis horisontal og vertikal retning

Likningssystemet beskriver horisontale akselerasjoner (Newton's 2. lov, likn. 1 og 2), varmens konservering (likn. 3), massens konservering (kontinuitetslikningen, likn. 4) og hydrostatisk trykkfordeling (likn. 5).

Bevegelseslikningene (likn. 1 og 2) skal være oppfylt for hver celle og beskrive hvordan strømhastighetene varierer innen området. Krefter som påvirker en celle kan f.eks. være vind og friksjon eller skjærkrefter mellom cellene (fig. A.2-1). Vind, tilløps- og utløpsvannsføringer kan f.eks. bevege vannet slik at overflaten blir noe skråstilt. Dermed påvirkes cellen for trykkkrefter i helningens retning (barotrop trykk). Videre vil tetthetsdifferenser på grunn av temperaturforskjeller føre til trykkgradienter (baroklint trykk). Når bevegelsen først er kommet i gang, blir den avbøyd til høyre for bevegelsens retning på grunn av jordrotasjonen.

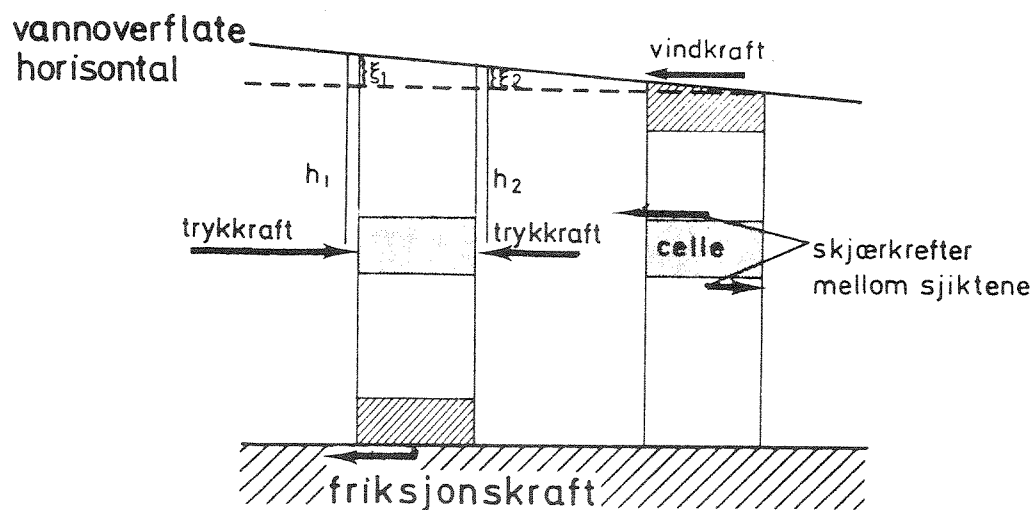


Fig. A.2-1 Eksempel på krefter som påvirker bevegelsen

En annen variabel som i vesentlig grad påvirker strømmingene er turbulens. Med turbulens menes uregelmessige virvellignende bevegelser som kan observeres i ethvert vassdrag. Forståelsen av turbulens er foreløpig mangelfull. Beskrivelsen av den turbulente utveksling bygger ikke på like grunnleggende fysiske lover som de andre variable. I denne modellen beskrives turbulensen ved hjelp av konstante utvekslingskoeffisienter. Koeffisientene blir bestemt ut fra erfaring.

Kontinuitetslikningen (likn. 4) uttrykker at for hver indre celle skal den inngående vannmengde være lik den utgående. Dette nyttes til å beregne vertikale hastigheter. For overflatecellene kan volumet variere ved at overflatenivået endres. For eksempel vil vannoverflaten høynes der hvor det er konvergerende strømmer og omvendt.

Modellen er tredimensjonal, men kun de to horisontale bevegelseslikningene blir løst. Vertikale hastigheter blir beregnet ved å nytte kontinuitetslikningen. Først bestemmes totaltransport ved å integrere likningssystemet fra overflaten til bunnen. Deretter beregnes hastighetsdifferansene mellom sjiktene. Fra den totale transport og hastighetsdifferansen finnes så transporten til de enkelte sjiktene. Denne fremgangsmåten er valgt på grunn av beregningsmessige fordeler fremfor f.eks. å løse likningene for et sjikt av gangen.

Likningene blir løst numerisk ved "finit differans"metoder. De variable ( $u$ ,  $v$ ,  $T$  m.fl.) blir beregnet med jevne tidsintervall ( $\Delta t$ ) fremover i tiden. Det vil si at med kjennskap til situasjonen ved tiden  $t$  blir nye verdier beregnet for hver celle ved tiden  $t + \Delta t$ . Tidsintervallet bestemmes ved:

$$\Delta t \leq L / \sqrt{2 g H_{\max}}$$

hvor  $L$  er rutenettets lengde og  $H_{\max}$  innsjøens største dybde.

Sjøens inndeling i celler og plassering av de variable er vist i fig. A.2-2.

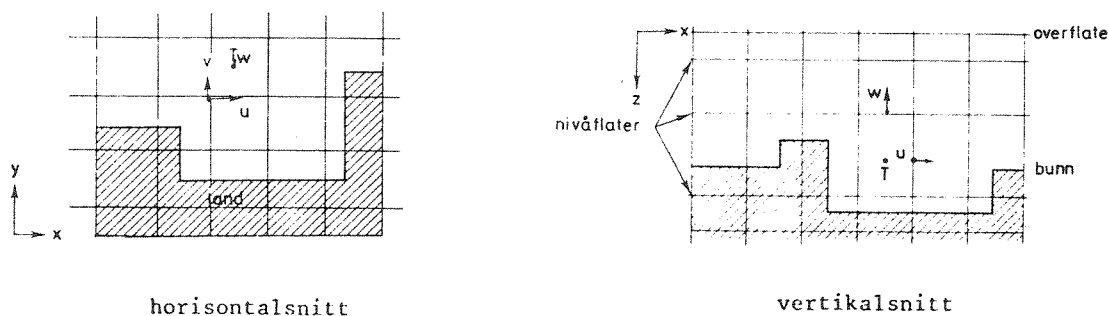


Fig. A.2-2 Sjøens inndeling i celler og plassering av variable

For hver celle må datamaskinen lagre informasjon. Ved tredimensjonale modeller blir vanligvis celleantallet så stort at kun datamaskiner med meget stor hukommelse kan benyttes. Ved spesielle programmeringsteknikker og filhåndtering er EDB-programmet omarbeidet slik at modellen kan kjøres på NORD 10 som er en mellomstor datamaskin. Antall celler som sjøen deles opp i er i praksis ubegrenset. Begrensningen ligger vanligvis i regnemaskintid og tilhørende kostnader.

### A.3 Usikkerhet - feilkilder

Modellen er basert på at de variable kan beskrives ved en deterministisk (lovmessig) og en stokastisk (tilfeldig) komponent. Bevegelser med stor utstrekning blir beregnet ved å nytte velkjente fysiske lover. Turbulente virvler med mindre utstrekning enn rutenettets oppløsning blir beskrevet ved hjelp av empiriske konstanter. Valg av disse konstantene vil følgelig være en kilde til usikkerhet. Videre vil detaljrikdommen i resultatene øke med avtagende rutenettstørrelse. I praksis blir dette valgt ved en avveining mellom regnemaskintid/økonomi og fysiske resonnementer.

De advektive ledd er utelatt i bevegelseslikningene. Dette fører til feil dersom hastighetsendringene er store. Denne feilen er vanligvis liten i forhold til betydningen av feilstipulerte koeffisienter for turbulent utveksling (Simons 1973).

Videre vil valg av koeffisienter i forbindelse med vindens skyvkraft på vannoverflaten, friksjon mot bunnen m.m. føre til en viss usikkerhet.

Til tross for de mange feilkilder og usikkerhetsfaktorer, kan beregningene være tilfredsstillende til praktisk bruk.

Avvik mellom innleste og registrerte verdier kan skyldes begrensninger i modellen. Imidlertid kan manglende kjennskap til vindens fordeling over sjøen være avgjørende. Dette utgjør trolig den største usikkerhetsfaktoren ved verifiseringen.

## Referanser:

Simons, T.J., 1973. Development of three-dimensional numerical models of Great Lakes. Scientific Series No. 12, Canada Centre for Inland Waters.

Tjomsland, T., 1978. Simulering av strømminger i Mjøsa med en tredimensjonal matematisk modell. Norsk institutt for vannforskning, Oslo.

## VEDLEGG B. MATEMATISK SPREDNINGSMODELL

Modellen er utviklet ved NIVA.

## Inngangsdata:

Strømningshastigheter fra strømningsmodellen.

Dybder og tilførsler av stoff samt eventuelt konsentrasjonsfordelinger i sjøen ved simuleringens start.

## Resultat:

Konsentrasjonsfordelingen i sjøen som funksjon av tiden.

Den matematiske formuleringen er gitt ved:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \underbrace{\frac{\partial(uHc)}{H \cdot \partial x}}_1 - \underbrace{\frac{\partial(vHc)}{H \cdot \partial y}}_2 - \underbrace{\frac{\partial(wc)}{\partial z}}_3$$

$$+ \underbrace{\frac{\partial}{H \cdot \partial x} [HK_{xy} \frac{\partial c}{\partial x}]}_4 + \underbrace{\frac{\partial}{H \cdot \partial y} [HK_{xy} \frac{\partial c}{\partial y}]}_5 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} [K_z \frac{\partial c}{\partial z}]}_6 + \lambda C + S$$

c : konsentrasjon

t : tid

u, v, w : hastigheter i hhv. x, y og z retning

H : dybde

$K_{xy}$ ,  $K_z$  : turbulent diffusjonskoeffisient i hhv. horisontal (x, y) og vertikal (z) retning

$\lambda$  : koeffisient som uttrykker svinnraten (død, sedimentasjon mm.)

S : kilder - tilførsler/fjerning av stoff

Leddene i 1-3 uttrykker konsentrasjonsendring i hhv. x-, y- og z-retning på grunn av transport i strømmens hovedretning. Leddene 4-6 kan tolkes som konsentrasjonsendring som følge av virvler med mindre utstrekning enn rutenettets oppløsning. Den matematiske formuleringen er analog til varmetransport fra høy mot lav temperatur. Dersom stoffet som spres ikke er konservativt (bestandig), antas det at stoffmengden som forsvinner/skapes er proporsjonal med konsentrasjonen (ledd 7). Ledd 8 (kilder) gir uttrykk for tilførsler av stoff eller eventuelt fjerning av stoff i spesielle celler. Tilførsler via elver blir f.eks. behandlet som kilder.

Koeffisientene for turbulent utveksling ( $K_{xy}$ ,  $K_z$ ) og "svinnkoeffisienten" ( $\lambda$ ) blir bestemt utfra erfaring.

Likningen blir løst numerisk ved "finit differens" metoder. Med kjennskap til forholdene ved tiden,  $t$ , blir konsentrasjonsfordelingen for samtlige celler beregnet ved tiden  $t + \Delta t$ .

Inndelingen av sjøen i celler, strømhastigheter mm., fås fra strømningsmodellen.