

NORSK INSTITUTT FOR VANNFORSKNING

Blindern

O-78006

STRØM OG SPREDNINGSSTUDIER I TYRIFJORDEN

Rapport nr. 1

Blindern, 6. mars 1980

Saksbehandler: Torulv Tjomsland

Medarbeider: Brynjar Hals

Instituttetsjef: Kjell Baalsrud

NIVA - RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning  NIVA

Norges Teknisk-Naturvitenskapelige Forskningsråd

Postadresse: Brekke 23 52 80
Postboks 333, Blindern Gaustadalleen 46 69 60
Oslo 3 Kjeller 71 47 59

Rapportnummer: 0-78006
Undernummer:
Løpenummer: 1191
Begrenset distribusjon:

Rapportens tittel: Strøm og spredningsstudier i Tyrifjorden. Rapport nr. 1.	Dato: 6. mars 1980
	Prosjektnummer: 0-78006 03
Forfatter(e): Torulv Tjomsland	Faggruppe:
	Geografisk område: Buskerud
	Antall sider (inkl. bilag): 45

Oppdragsgiver: Miljøverndepartementet, Oslo kommune, Akershus og Buskerud fylkeskommuner	Oppdragsg. ref. (evt. NTNf-nr.):
--	----------------------------------

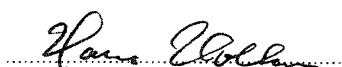
Ekstrakt:

Rapporten omhandler strøm- og spredningsforhold i Tyrifjorden. Registreringsdata av strøm, temperatur og vind blir presentert. Strømmingsmønsteret som følge av tre ulike vindretninger ble simulert ved en tredimensjonal matematisk modell. Videre ble spredningsforløpet av et tenkt utslipp simulert ved en matematisk spredningsmodell.

4 emneord, norske:
1. Tyrifjorden
2. Strøm og spredning
3. Feltregistreringer
4. Matematiske modeller

4 emneord, engelske:
1.
2.
3.
4.


Prosjektleders sign.:


Seksjonsleders sign.:


Instituttetsjefs sign.:

ISBN 82-577-0252-8

INNHOLDSFORTEGNELSE

Side:

1. INNLEDNING	4
2. FELTREGISTRERINGER	4
2.1.1 Tyrifjorden	4
2.1.2 Instrumentering	6
2.2 Resultater	7
2.2.1 Vind	7
2.2.2 Strøm	7
2.2.3 Temperatur	14
2.3 Diskusjon	14
3. MATEMATISK STRØMNINGSMODELL	17
3.1 Innledning	17
3.2 Modellens matematiske og fysiske oppbygging	17
3.3 Usikkerhet - feilkilder	21
4. SIMULERING AV STRØM	22
4.1 Simulert strøm - vind mot nord	22
4.2 Simulert strøm - vind mot øst	28
4.3 Simulert strøm - vind mot sør	28
4.4 Diskusjon	37
5. SPREDNING AV STOFF	38
5.1 Matematisk spredningsmodell	38
5.2 Simulert spredning - vind mot sør	39
6. REFERANSER	45

FIGURFORTEGNELSE

	Side:
2.1-1 Tyrifjorden - dybdekart og plassering av registreringsutstyr	5
2.3-2 Registreringsutstyr	6
2.2-1 Vind - Frognøya	8
2.2-2 Strøm - sentrum: 6 m	9
2.2-3 Strøm - sentrum: 30 m	10
2.2-4 Strøm - Tyristrand: 5 m	11
2.2-5 Strøm - Tyristrand: 30 m	12
2.2-6 Temperatur-registreringer i Nordfjorden	13
2.3-1 Bevegelser forårsaket av vindpåvirkning og en påfølgende indre seiche i en hypotetisk to-lagret innsjø hvor friksjonen er neglisjert	15
2.3-2 Spektralanalyser	16
3.2-1 Eksempel på krefter som påvirker bevegelsen	19
3.2-2 Sjøens inndeling i celler og plassering i variable	20
4.1-1 Simulert strøm - vind mot nord: 6 m/s	24
4.1-2 Simulert strøm - vind mot nord: 6 m/s	25
4.1-3 Simulerte vertikale strømhastigheter	26
4.1-4 Sammenlikning mellom observerte og simulerte verdier	27
4.2-1 Simulert strøm - vind mot øst: 6 m/s	29
4.2-2 Simulert strøm - vind mot øst: 6 m/s	30
4.2-3 Simulerte vertikale strømhastigheter	31
4.2-4 Sammenlikning mellom observerte og simulerte verdier	32
4.3-1 Simulert strøm - vind mot sør: 7 m/s	33
4.3-2 Simulert strøm - vind mot sør: 7 m/s	34
4.3-3 Simulerte vertikale strømhastigheter	35
4.3-4 Sammenlikning mellom observerte og simulerte verdier	36
5.2-1 Simulert konsentrasjonsfordeling etter ett døgn	40
5.2-2 Simulert konsentrasjonsfordeling etter ett døgn	41
5.2-3 Simulert konsentrasjonsfordeling etter to døgn	42
5.2-3 Simulert konsentrasjonsfordeling etter to døgn	43

1. INNLEDNING

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

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

Den praktiske gjennomføringen av feltarbeidet ble ledet av Brynjar Hals, NIVA.

Rapporten gir en kortfattet teoretisk innføring i de matematiske modellenes oppbygging og virkemåte. Lesere uten særinteresser kan eventuelt hoppe over disse avsnittene. Hovedpoengene i rapporten vil imidlertid kunne oppfattes ved kun å studere figurene. Problemstillinger i tilknytning til spredning av stoff vil bli vurdert nærmere i en senere rapport.

2. FELTREGISTRERINGER

2.1.1 Tyrifjorden

Tyrifjordens areal er ca. 134 km². Formen kan sammenliknes med en skjev H (fig. 2.1-1). Et sammenhengende basseng med dybder på over 280 m går fra Nordfjorden i nordvest til sørlige deler av Holsfjorden. I de øvrige delene av innsjøen er dybdene sjelden over 50 m. I områdene mot Vikersund og i Steinsfjorden er dybdene under 20 m.

Hovedbassenget ble utformet ved erosjon av istidens breer. Breens hovedløp fortsatte dengang via Sylling gjennom Lierdalen.

Ca. 90 prosent av årlig vanntilførsel til Tyrifjorden kommer via Stor-elva. Det nest største tilløpet er Sokna (ca. 5 prosent). Begge elvene munner ut i Nordfjorden. Tyrifjordens utløp er i sørvest ved Vikersund.

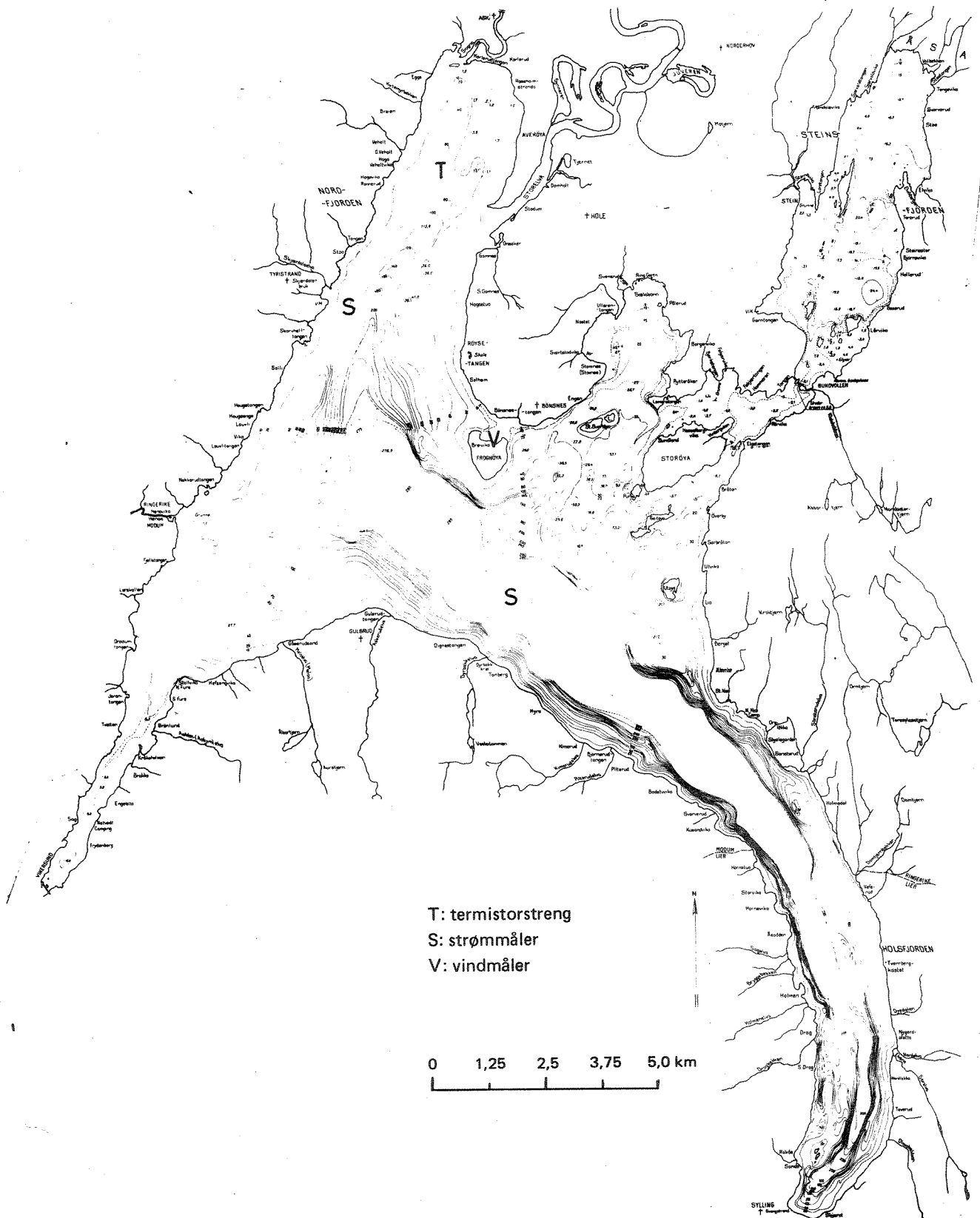


Fig. 2.1-1 Tyrifjorden - dybdekart og plassering av registreringsutstyr

2.1.2 Instrumentering

I perioden 5. august til 1. oktober 1978 var det plassert utstyr for registrering av vind samt strøm og temperatur i innsjøen (fig. 2.1-1).

I Nordfjorden ble temperaturen registrert med 5 meters mellomrom fra overflaten til 50 m's dyp (fig. 2.1-2a). Det var 40 minutter mellom hver måling.

Ved Tyristrand og nær sentrum av innsjøen ble strømmens fart og retning samt vanntemperatur registrert over og under sprang-sjiktet på hhv. 6 m og 30 m under overflaten (fig. 2.1-2b). Det var 20 min. mellom hver registrering.

Utstyr for registrering og lagring av data var av typen "Aanderaa" Instruments.

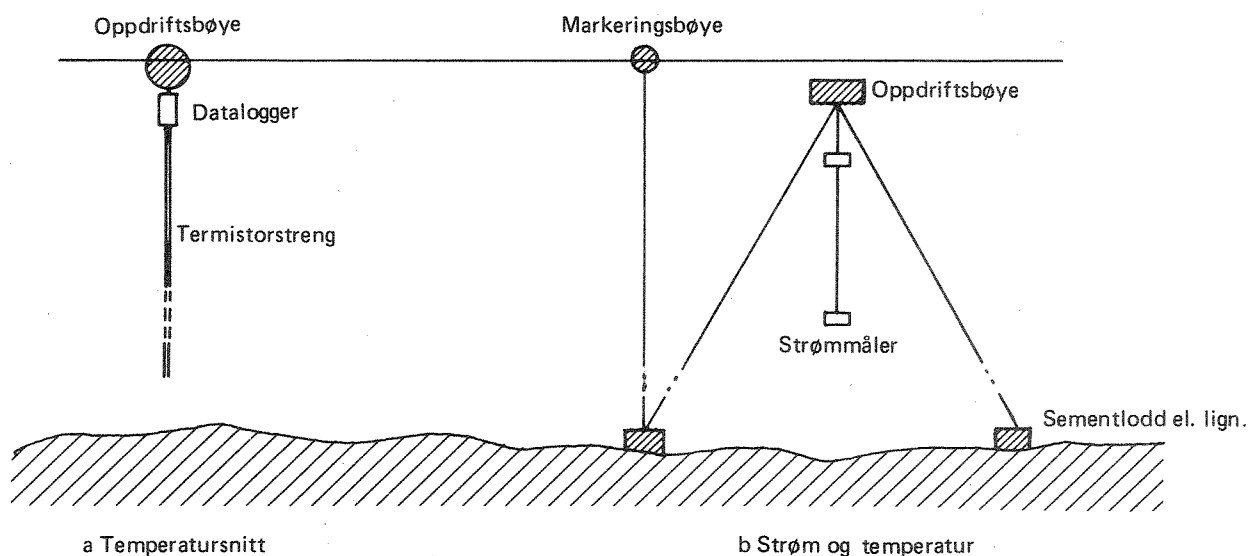


Fig. 2.1-2 Registreringsutstyr

Vindens fart og retning ble registrert kontinuerlig på Frognøya.

2.2 Resultater

2.2.1 Vind

Fig. 2.2-1a gir et inntrykk av vindens styrke og retning i måleperioden. Diagrammet viser at både fart og retning vanligvis varierte mye i løpet av et døgn.

Høyeste registrerte vindhastighet med varighet på en time, var 8 m/s (fig. 2.2-1d). Ca. 40 prosent og 65 prosent av registreringen var mindre eller lik henholdsvis 1 m/s og 2 m/s.

Størstedelen av tiden blåste vinden mot (30 prosent), sør (22 prosent) og mot øst (14 prosent) (fig. 2.2-1b). Fig. 2.2-1c uttrykker hvor stor luftmasse som er blitt transportert i de ulike retningene. Ca. halvparten av den totale transport hadde retning mot nord. Dvs. at hastighetene rettet mot nord, var overveiende større enn i de øvrige retningene.

Vindmåleren var plassert på jordbruksarealene til gårdsbruket på Frognøya. Høyden over bakken og vannoverflaten var henholdsvis 5 m og ca. 35 m. Plasseringen synes gunstig med tanke på å representere hele Tyrifjorden med en stasjon. Skogsområder innen en avstand på ca. 100 m og enkeltstående trær og bygninger kan imidlertid i en viss grad ha påvirket resultatene. Vindhastigheten blir lavere enn over fri overflate.

2.2.2 Strøm

Strømmenes fart og retning endret seg vanligvis fra time til time. Bare unntaksvis var forholdene noenlunde stabile over en periode på et døgn (fig. 2.2-2a,-3a,-4 og -5).

I sentrum av sjøen var de største registrerte hastighetene i 6 m nivået 35 cm/s (fig. 2.2-2d). Ca. 35 prosent av tiden var hastighetene mindre eller lik 2 cm/s. Forøvrig var verdier i intervallet 10 cm/s - 15 cm/s dominerende. På 30 m's dyp (fig. 2.2-3) var også hastigheten mellom 10 cm/s og 15 cm/s mest vanlig. Verdier under 2 cm/s fant sted i mindre grad enn nær overflaten. Dette tyder på at de vindstille periodene sjelden var tilstrekkelig lange til at vannhastigheten i 30 m's dybde avtok mot 0.

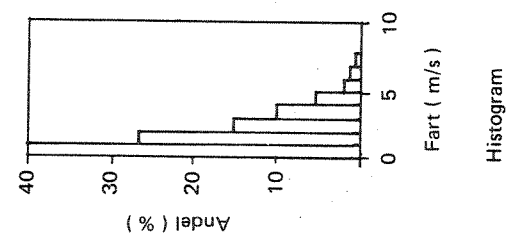
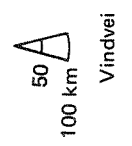
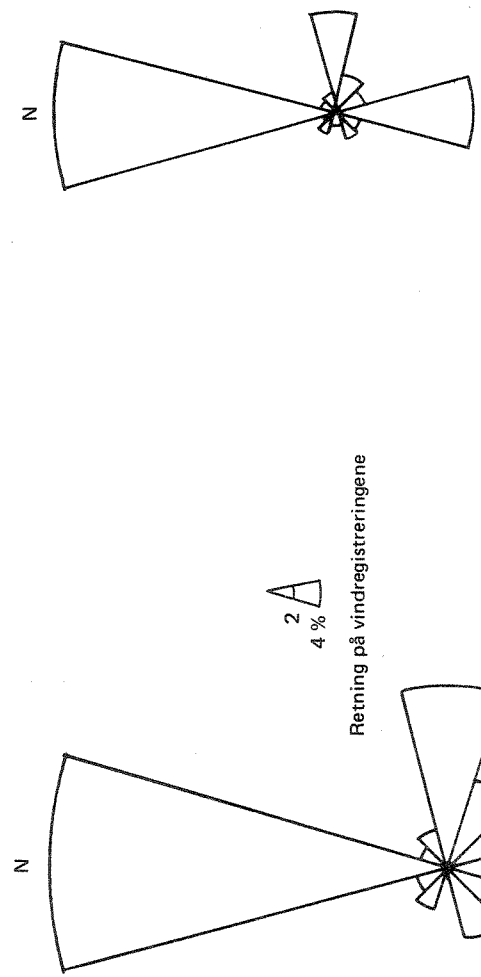
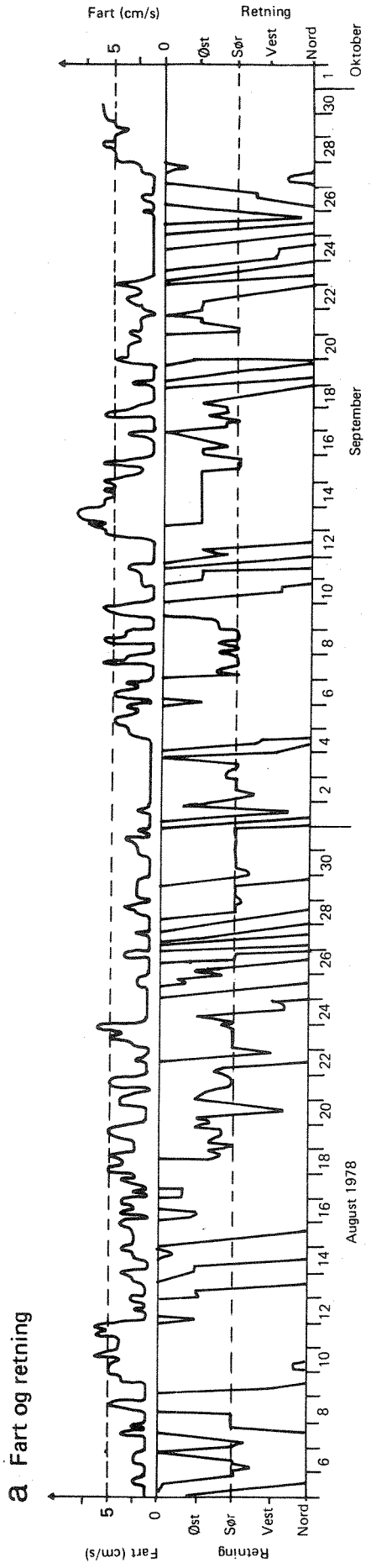
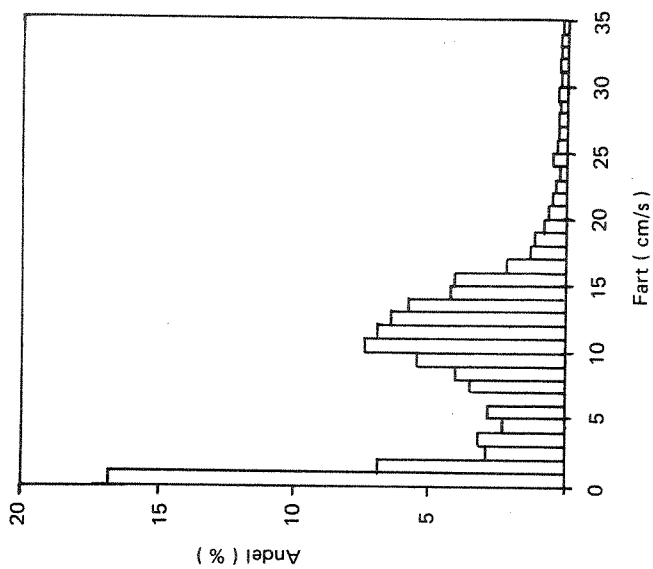
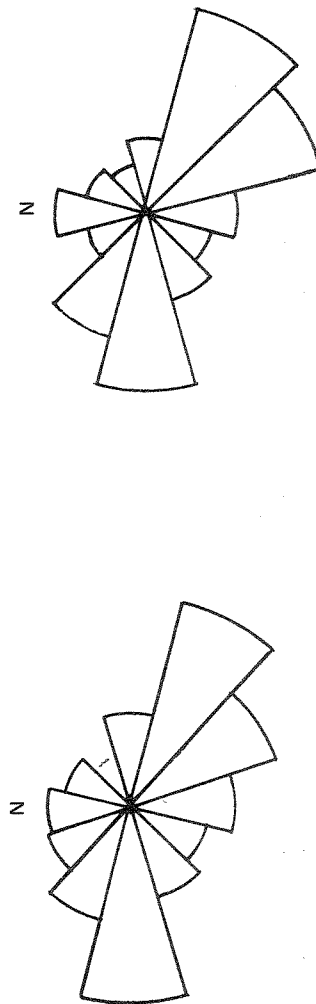
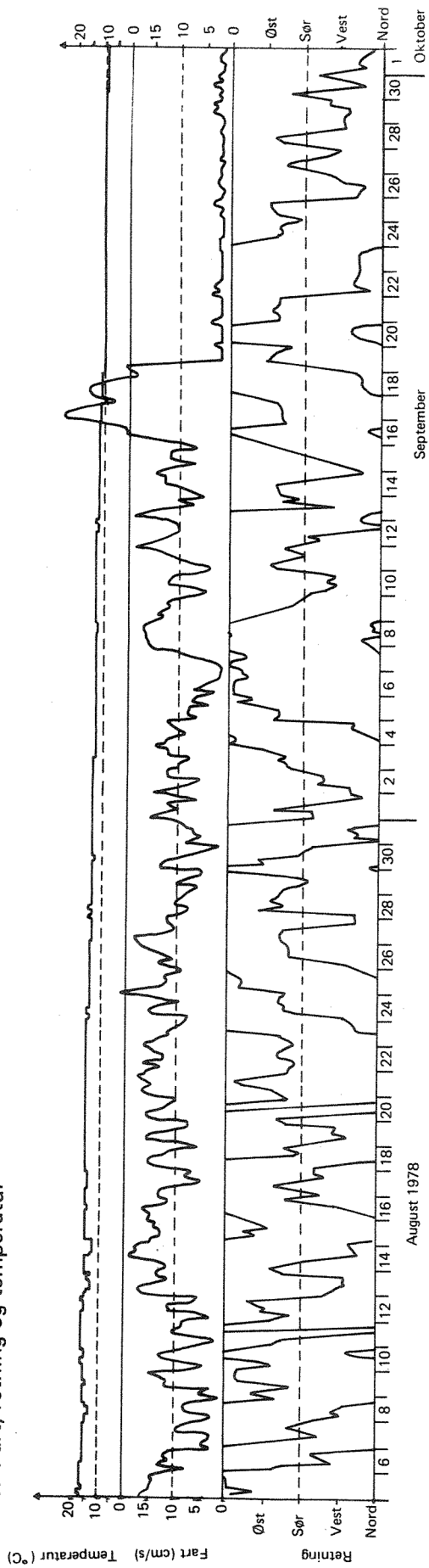


Fig. 2.2-1 Vind - Frognøya

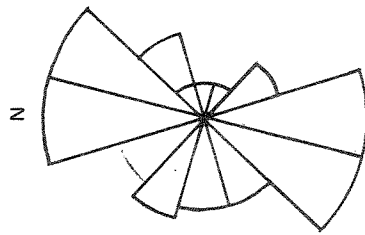
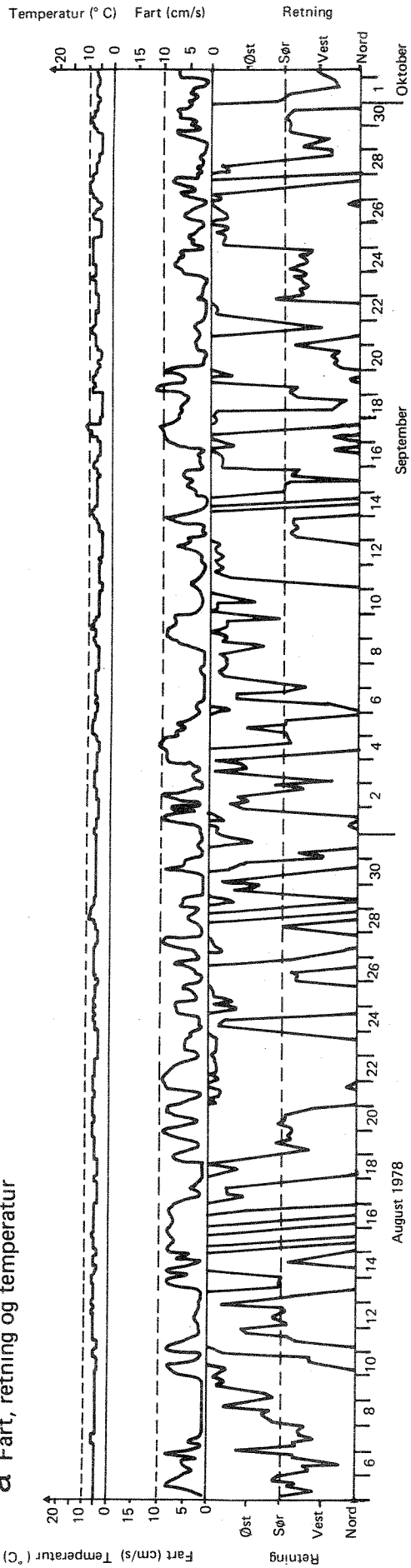
a Fart, retning og temperatur



Histogram d

Fig. 2.2-2 Strøm - sentrum 6 m

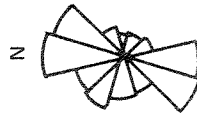
a Fart, retning og temperatur



2
4 %

Retning på strømregistreringene

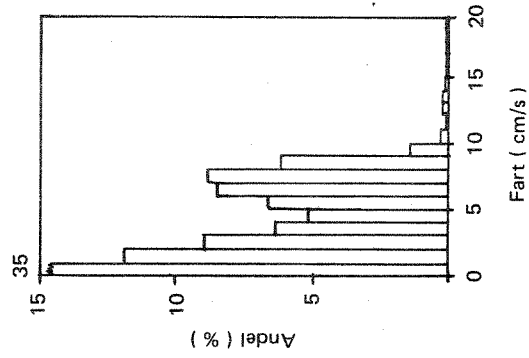
b



10
20 km

Strømvei

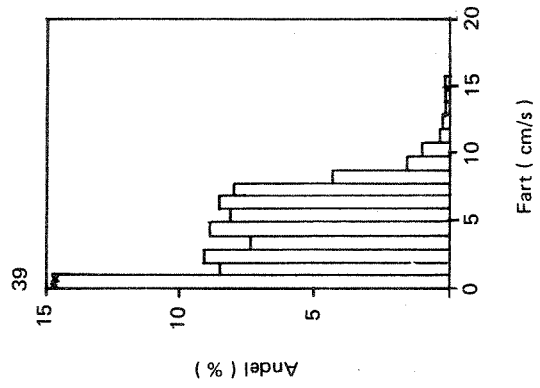
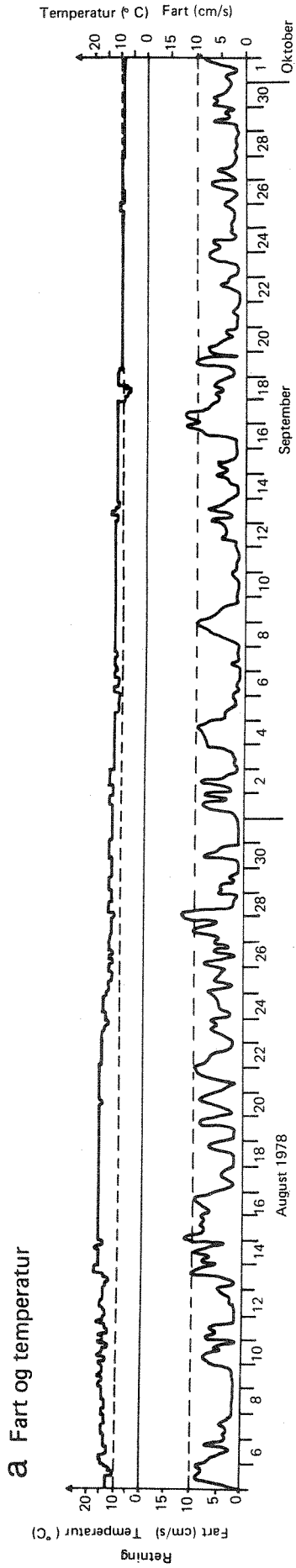
c



Histogram

d

Fig. 2.2-3 Strøm - sentrum: 30 m

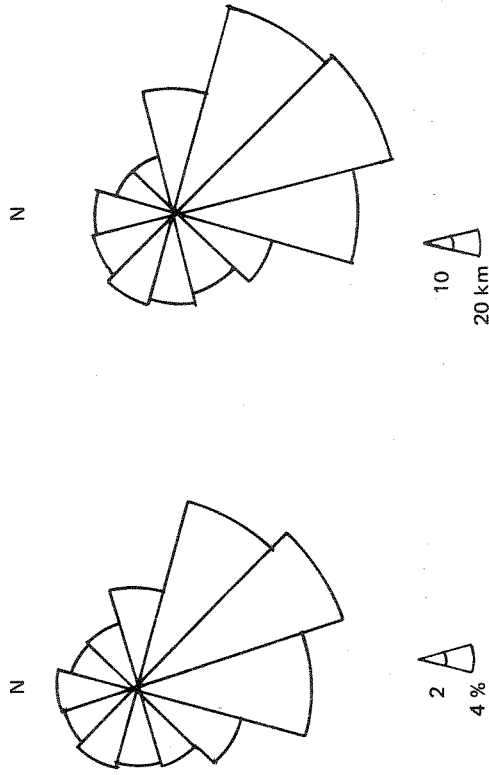
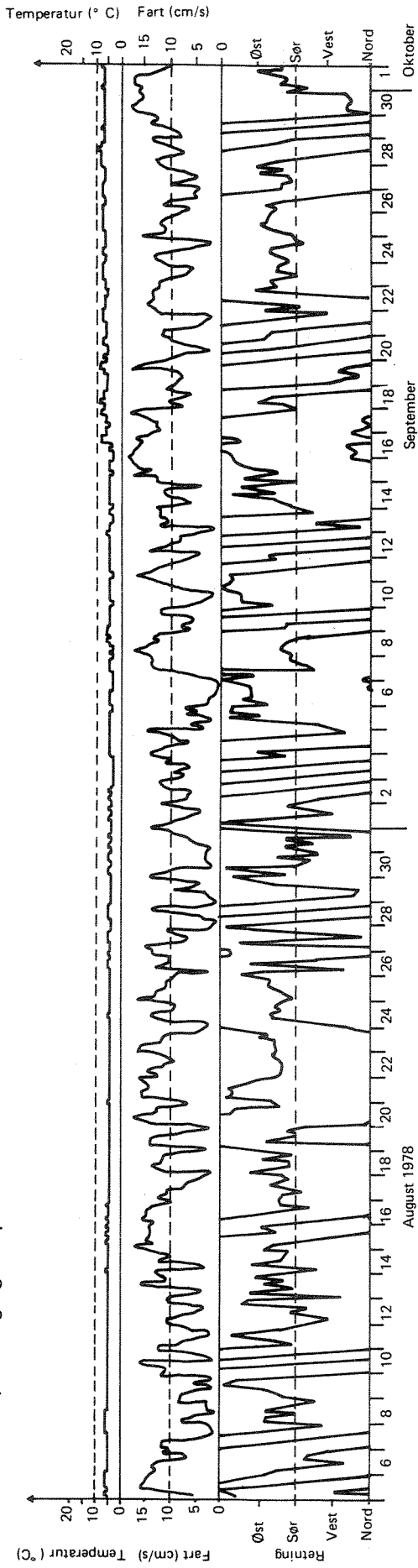


Histogram

b

Fig. 2.2-4 Strøm - Tyrstrand: 5 m

a Fart, retning og temperatur

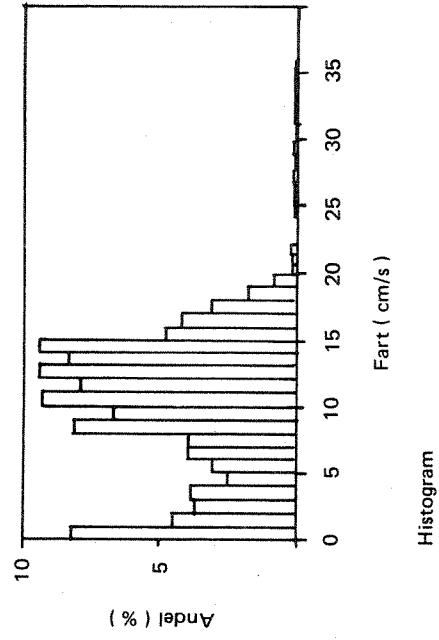


Retning på strømregistreringene

b

Strømvei

c



d

Fig. 2.2-5 Strøm - Tyrstrand: 30 m

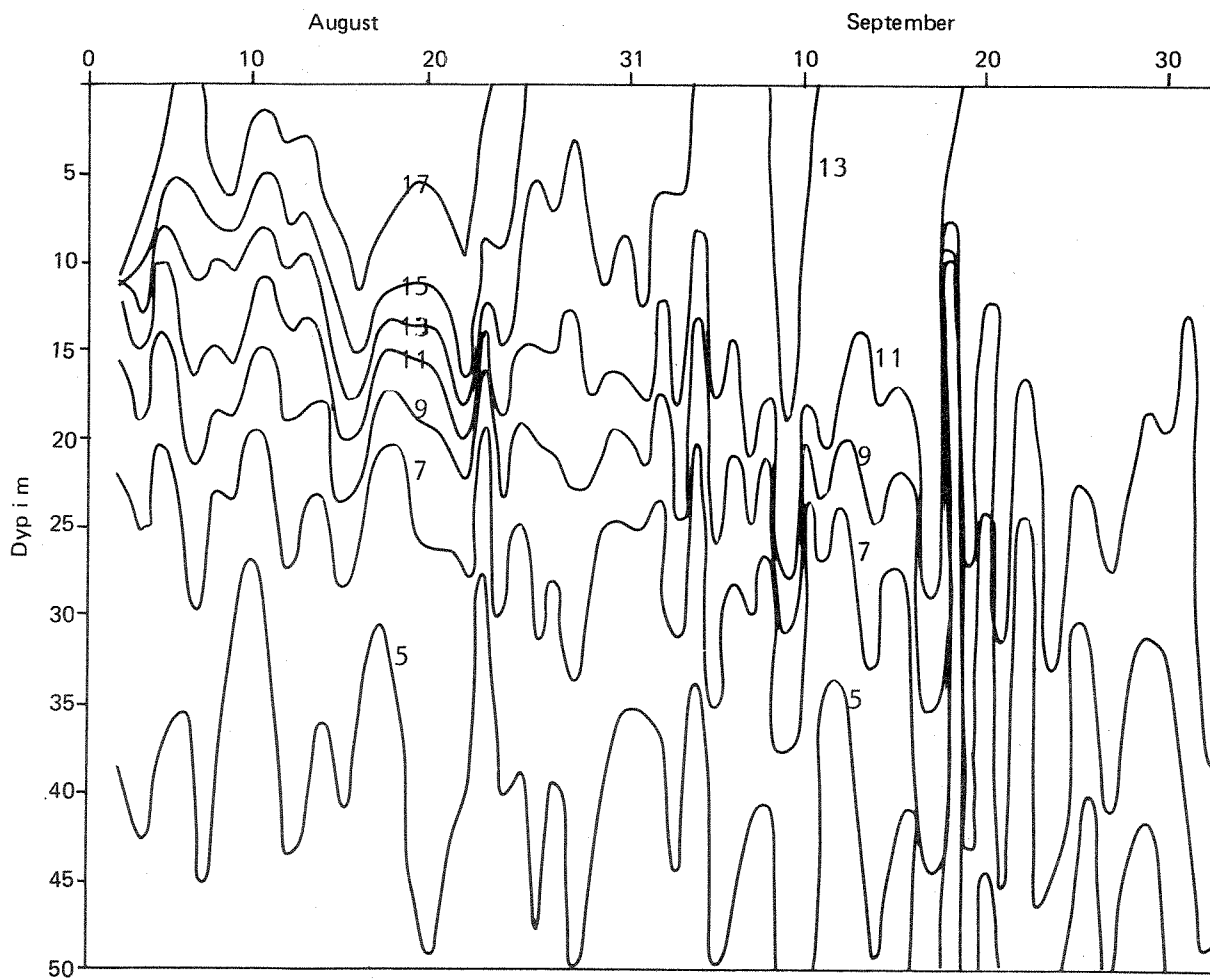


Fig. 2.2-6 Temperatur-registreringer i Nordfjorden

De dominerende strømretningene i overflaten var mot vest (fig. 2.2-3b, c). Strømretningen avvek mye fra vindens retning. Det ser ut som at vind mot nord førte til overflatestrøm mot vest, mens vind mot øst og sør var årsak til sørvestlig vannbevegelse. Forholdet må i stor grad skyldes innsjøens form. På 30 m's dyp strømmet vannet overveiende mot sør og sørøst.

Ved Tyristrand var hastighetene noe lavere enn i de sentrale deler (fig. 2.2-4, 5). I 6 m's nivået var kvaliteten på de retistrerte strømretningene dårlig, og resultatene er ikke fremstilt. På 30 m's nivået strømmet vannet i størst grad mot nord og nord-nordvest og mot sør og sør-sørvest. Dvs. langs hovedretningen på denne delen av innsjøbassenget.

2.2.3 Temperatur

Temperaturen i 6 m's nivået avtok fra ca. 18 °C til nær 10 °C i løpet av observasjonsperioden (fig. 2.2-2a, 4a).

På 30 m's dyp varierte temperaturen mellom 5 °C og 10 °C (fig. 2.2-3a, 5a). De høyeste verdiene forekom i september.

Temperaturregistreringene i nordvestlige del av Tyrifjorden er vist på fig. 2.2-6. Temperaturen endret seg ofte med flere grader i løpet av noen døgn. Endringene forekom langt hyppigere og var større enn i de ovenfornevnte punktobservasjonene.

2.3 Diskusjon

Dersom overflatevannet strømmet fra land, vil dypereliggende og kaldere vann bevege seg mot overflaten (upwelling). Vedvarende vind mot sør vil f.eks. føre til upwelling i nordlige deler av Tyrifjorden. Oppstuvning av vannet i sørlige deler fører dermed til nedadrettede bevegelser (downwelling) og tilhørende oppvarming av dyplagene. Ved vind mot nord gir det samme resonnement motsatt rettet vertikale strømretninger langs endene av innsjøen. De hyppige og store temperaturendringene som ble registrert i Nordfjorden (fig. 2.2-6), kan i stor grad forklares ved upwelling og downwellingeffekter.

Dersom en jevn vind blåser over en lagdelt sjø (se fig. 2.3-1), blir vannet i det øvre laget ført i vindens retning. Overflaten blir skråstilt med

stigning i vindretningen. Dette forårsaker en returstrøm i de dypere lag, slik at sprangsjiktet får en stigning i motsatt retning av overflaten.

Når vinden opphører, settes det igang bølgebevegelser.

Etter C.H. Mortimer

↓ betegner knutelinjen

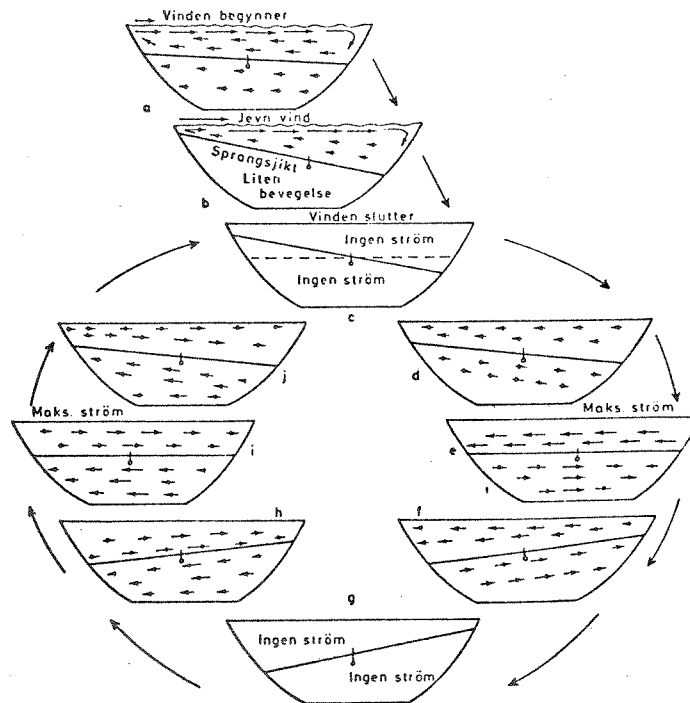


Fig. 2.3-1 Bevegelser forårsaket av vindpåvirkning og en påfølgende indre seiche i en hypotetisk to-lagret innsjø hvor friksjonen er neglisjert.

Fluktasjonene i de registrerte hastighetenes størrelse og retning, samt temperaturene hadde ofte ikke noen umiddelbar tilknytning til vindobservasjonene. F.eks. ble det på 30 m's dyp ofte registrert strømhastigheter i intervallet 5-10 cm/s i vindstille perioder hvor hastighetene nær overflaten var under 2 cm/s. Dette tyder på eksistensen av indre bølgebevegelser. Bølgebevegelserne vil være størst i perioder med et velutviklet sprangsjikt. De vil da kunne ha stor betydning for vannutskiftning og spredning av stoff. Fenomenet vil ventelig i liten grad finne sted senhøstes og om vinteren.

For å finne eventuelle periodiske fenomen i måledataene ble det foretatt spektralanalyse av strømhastighetene i sentrum av sjøen og av vindstyrken. Enkelte "powerspektrum" er vist i fig. 2.3-2. Dersom kurven har en topp, indikerer dette at hastighetenes størrelse har tendens til å gjentas med en periodelengde som er angitt på den horisontale akse.

Vindens styrke hadde tendens til å variere i en syklus på ett døgn (fig. 2.3-2a). Dette kan ha sammenheng med oppvarming og avkjøling om henholdsvis dagen og natten og tilhørende "solgangsvind". Svingninger med kortere perioder var ikke signifikante. Energi som ikke kan forklares som periodiske (støy) blir tillagt de lengste bølgelengdene som det blir undersøkt på. De høye verdiene med periode på ca. 12 døgn, har derfor neppe fysisk relevans.

I sentrum av sjøen i 6 m's nivå, ble det ikke påvist klare periodiske fenomen. En svak tendens kunne imidlertid spores for en periodelengde på ett døgn (fig. 2.3-2b). Den eneste påvirkelige periodisitet for hastighetene på 30 m's dyp, var på ett døgn (fig. 2.3-2c). Dette antyder en viss sammenheng mellom periodisitet i vind og strøm.

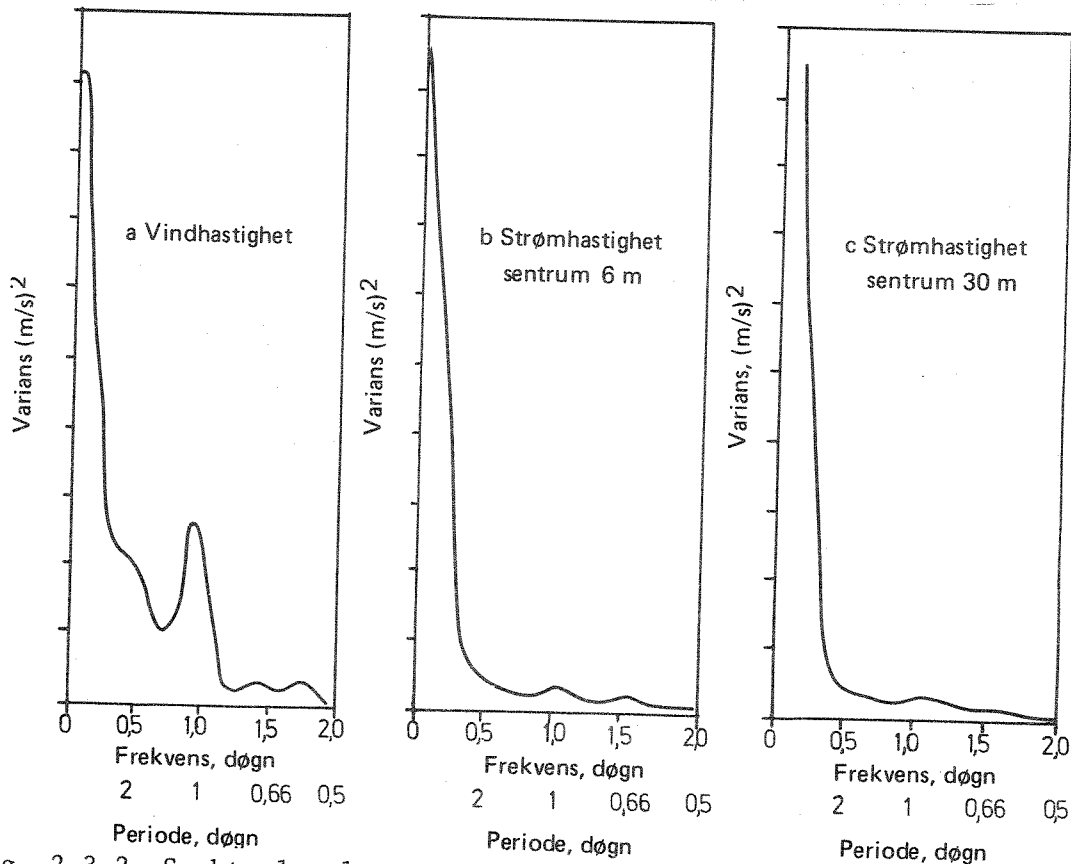


Fig. 2.3-2 Spektralanalyser

Disse resultatene tyder på at stående bølger (seicher) i liten grad fant sted i observasjonsperioden. Tyrifjorden har en meget uregelmessig form. Indre bølgebevegelser vil ventelig reflektere mot strendene på en komplisert måte og dø ut uten å kunne spores som periodiske fenomen.

3. MATEMATISK STRØMNINGSMODELL

For å få et inntrykk av hvordan strømningsmønsteret i visse situasjoner er fordelt over sjøen, ble det benyttet en tredimensjonal matematisk modell.

3.1 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. Ettersom teknikken er ny, mangler også for en stor del den verdifulle erfaring som oppnås ved praktisk bruk.

3.2 Modellenes matematiske og fysiske oppbygging

Det blir her gitt en kort innføring i modellenes oppbygging. For en 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
- ρ : 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. 3.2-1). 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.

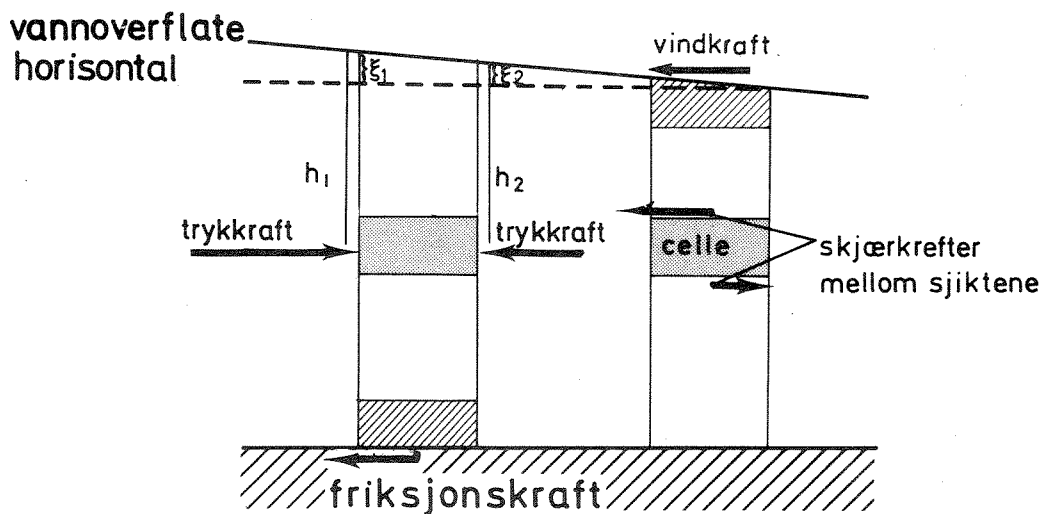


Fig. 3.2-1 Eksempel på krefter som påvirker bevegelsen

En annen variabel som i vesentlig grad påvirker strømmingene er turbulens. Med turbulens menes uregebundne 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 differanse" metoder. De variable (u, v, T m.fl.) blir beregnet med jevne tidsintervall (Δt) fremover i tiden. Det vil si at med kjennskap til situasjonen ved tiden t blir nye verdier beregnet for hver celle ved tiden t + Δt . 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. 3.2-2.

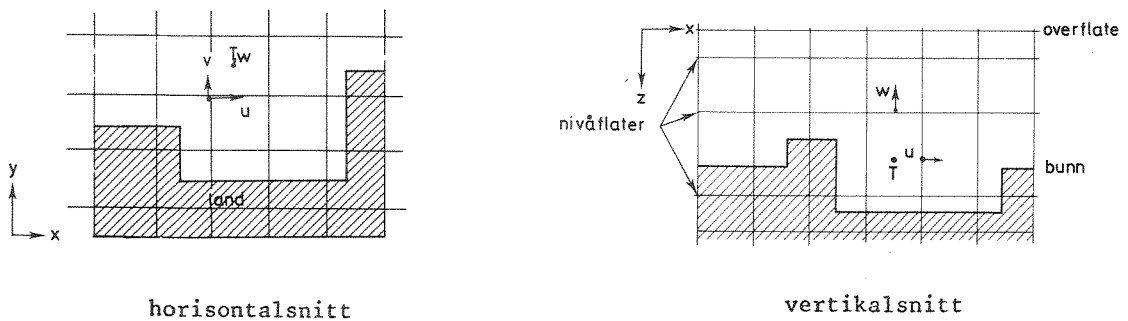


Fig. 3.2-2 Sjøens inndeling i celler og plassering av variable

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.

3.3 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 advective 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.

Modellen er verifisert mot feltregistreringer i en rekke ulike type sjøer som f.eks.:

Lake Ontario i Canada (Simons 1975), i Vänern (Simons 1977) og Kösen (Wittmiss 1978) i Sverige og Mjøsa (Tjomsland 1978). Ved samtlige undersøkelser ble modellresultatene funnet å gi overensstemmelse med virkeligheten.

4. SIMULERING AV STRØM

Sjøen ble delt opp i fire sjikt: 0-12 m, 12-24 m, 24-36 m, 36 m - bunn. Hovedvekten blir derfor lagt på å beregne strømmene i de øverste 36 metrene.

I horisontalplanet var rutenettstørrelsen: 750 · 750 m.

Strømningsmønsteret ble simulert for vindens tre hovedretninger; mot nord, sør og øst.

Det ble antatt at vindens styrke og retning var konstant over hele sjøen.

Ved simuleringenes start ble det antatt at overflaten var horisontal og alle hastigheter var lik 0 (kald start).

Følgende inngangsdata var felles for samtlige simuleringer:

Tilløpsvannføring via Storelva: $130 \text{ m}^3/\text{s}$ med temperatur $13 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tilløpsvannføring via Sokna: $20 \text{ m}^3/\text{s}$ med temperatur $13 \text{ }^\circ\text{C}$.

Utløpsvannføring ved Vikersund: $150 \text{ m}^3/\text{s}$.

Øvrige tilløp ble neglisjert.

I inngangsdataene ble valgt i overensstemmelse med feltregistreringer i september 1978.

4.1 Simulert strøm - vind mot nord

Vinden ble antatt å blåse med 6 m/s 10 m over vannoverflaten. Vannets temperatur i de 4 sjiktene var: $13 \text{ }^\circ\text{C}$, $9 \text{ }^\circ\text{C}$ og $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$. Fig. 4.1-1,2 viser det simulerte horisontale strømningsmønster etter 24 timer med konstant vindpåvirkning.

Vannet i overflatesjiktet beveget seg hovedsakelig nordover. Strømmen fulgte overveiende hovedbassengets lengderetning. Karakteristiske hastigheter var her mellom 5 cm/s og 15 cm/s. I de grunne områdene nær Vikersund og i Steinsfjorden ble det dannet virvler. Disse synes å være lokalisert

til bassenger (fig. 2.1-1). I sjikt nr. 2 (12-24 m) strømmet vannet i hovedtrekk mot Vikersund fra alle de tre øvrige hovedgrenene som Tyrifjorden består av. Dominerende hastigheter var mellom 2 cm/s og 5 cm/s. Også mellom 24 og 36 m strømmet vannet mot Vikersund fra de nordlige delene av Sjøen. Her var hastigheter på ca. 3 cm/s vanlige. I øvrige deler av sjøen var hastighetene oftest under 2 cm/s. I bunn-sjiktet gikk strømmene i store trekk motsatt av bevegelsen i overflatesjiktet.

Transport av vannmasser mot nord gjorde at vannoverflaten hullet mot vindens retning. Nivået i sør var opptil 2 cm lavere enn i nord.

I sørlige områder var strømmende i 36 m's nivået gjerne rettet oppover (upwelling). I nord var bevegelsen nedadrettet (fig. 4.1-3a). De største hastighetene fant sted langs stredene. Verdier rundt 1/10 mm/s var vanlig. Forløpet har sammenheng med fralandsstrøm og upwellingseffekt samt økt trykk og downwelling i motsatt ende av sjøen. I 12 m's nivået var mønsteret noe mer komplisert (fig. 4.1-3a).

Vannets temperaturfordeling var knyttet til de vertikale strømmene. Oppadrettede strømmer førte til at kaldt vann fra bunnsjiktet ble blandet inn i overflatesjiktene. De motsatte forhold gjorde seg gjeldende der bevegelsen var nedadrettet. I uowellingsområdene i sør var temperaturen i de tre øverste sjiktene opp til 6 °C lavere enn i nordlige deler.

Inngangsdataene til modellen var i rimelig grad i overensstemmelse med feltregistreringene omkring 10. september 1978. Beregningene ble derfor sammenliknet med måledata for denne perioden.

De simulerte verdiene oppnådde noenlunde stabilitet etter 24 timer. (fig. 4.1-4). De presenterte resultatene synes derfor å gi et representativt bilde av strømmingsystemet ved stabil vind mot nord.

I de sentrale deler var de registrerte hastighetene langt større enn de simulerte. Forøvrig synes simuleringresultatene å gi et realistisk bilde av virkeligheten.

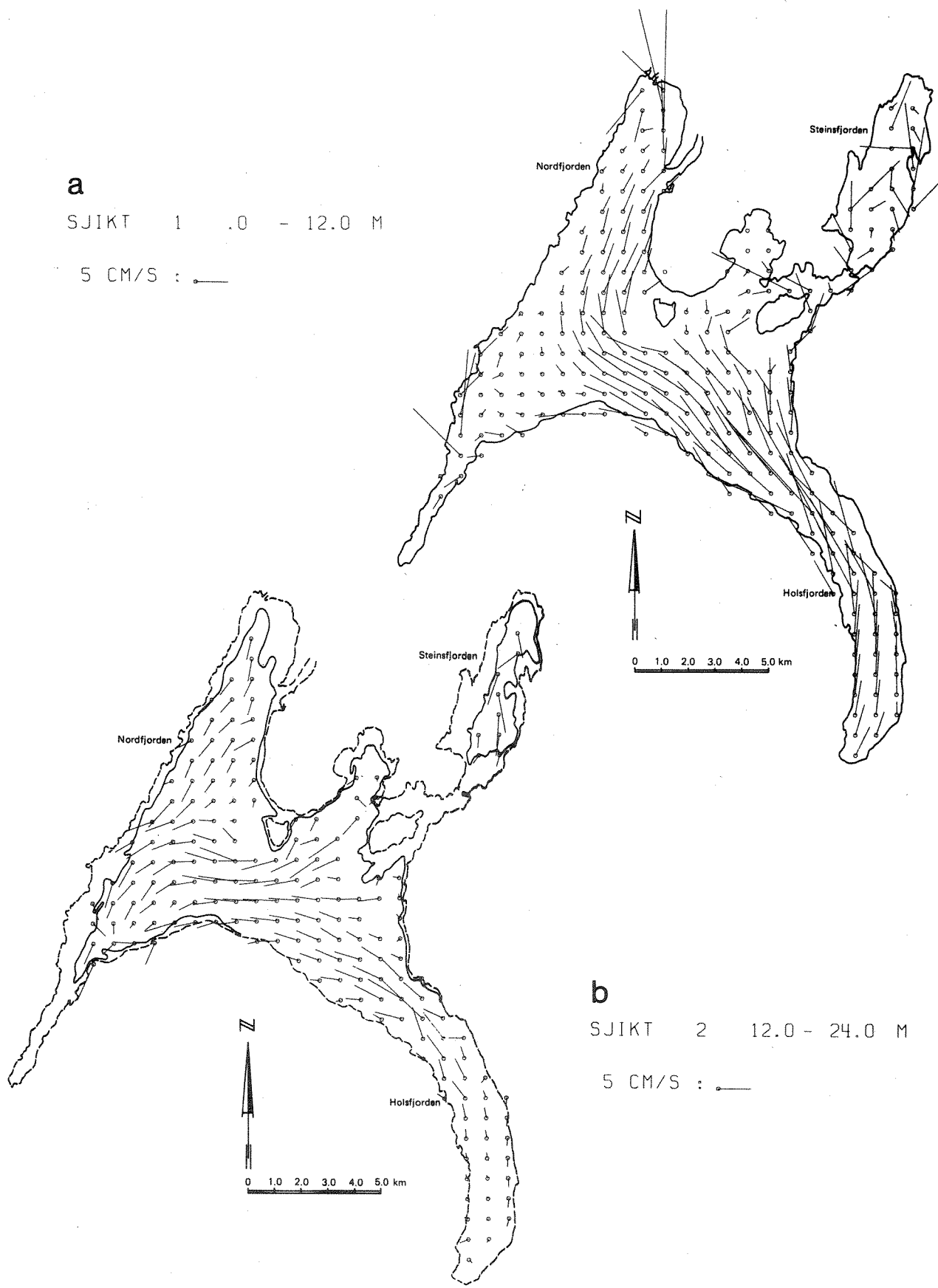


Fig. 4.1-1 Simulert strøm - vind mot nord: 6 m/s

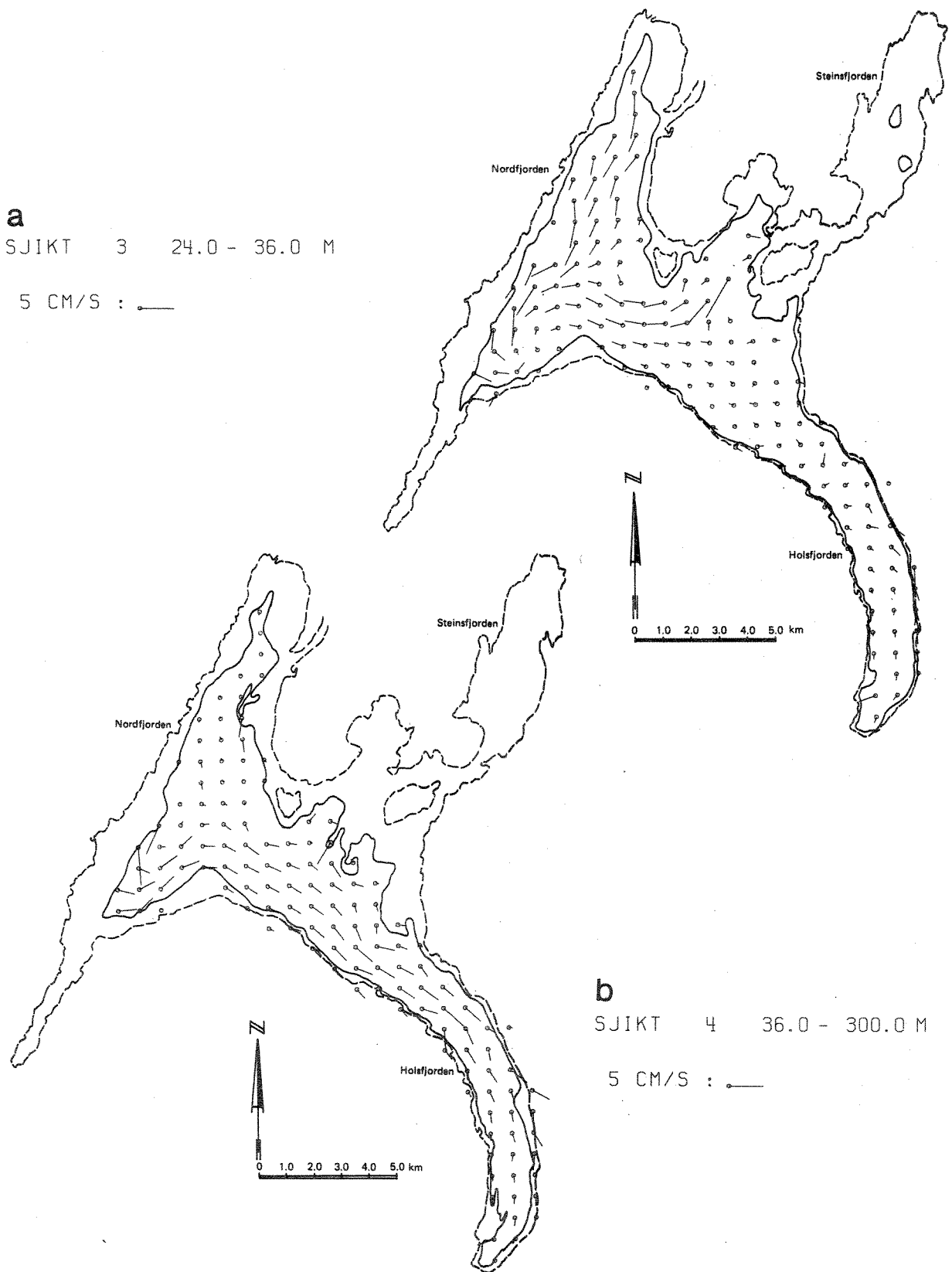


Fig. 4.1-2 Simulert strøm - vind mot nord: 6 m/s

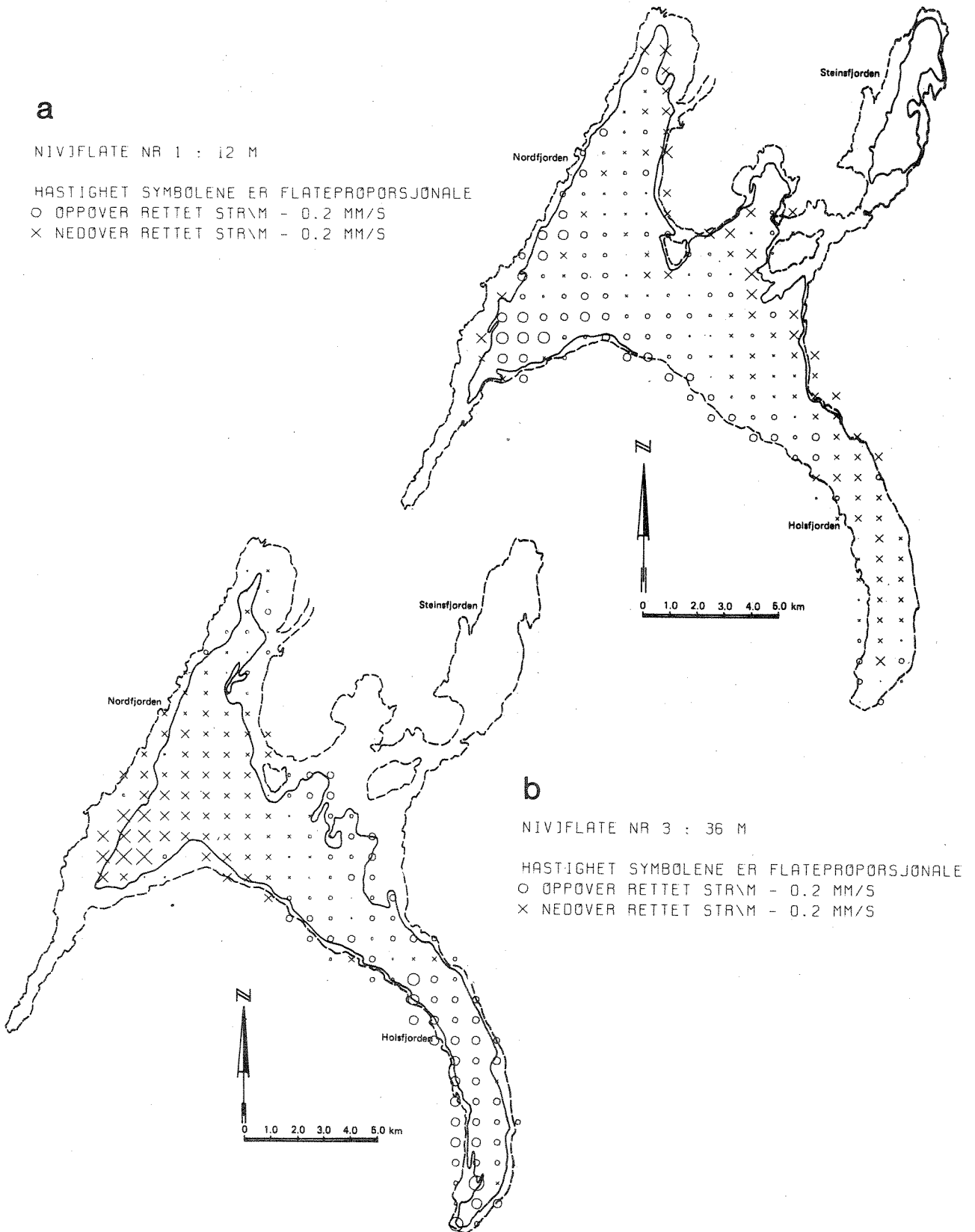


Fig. 4.1-3 Simulerte vertikale strømhastigheter

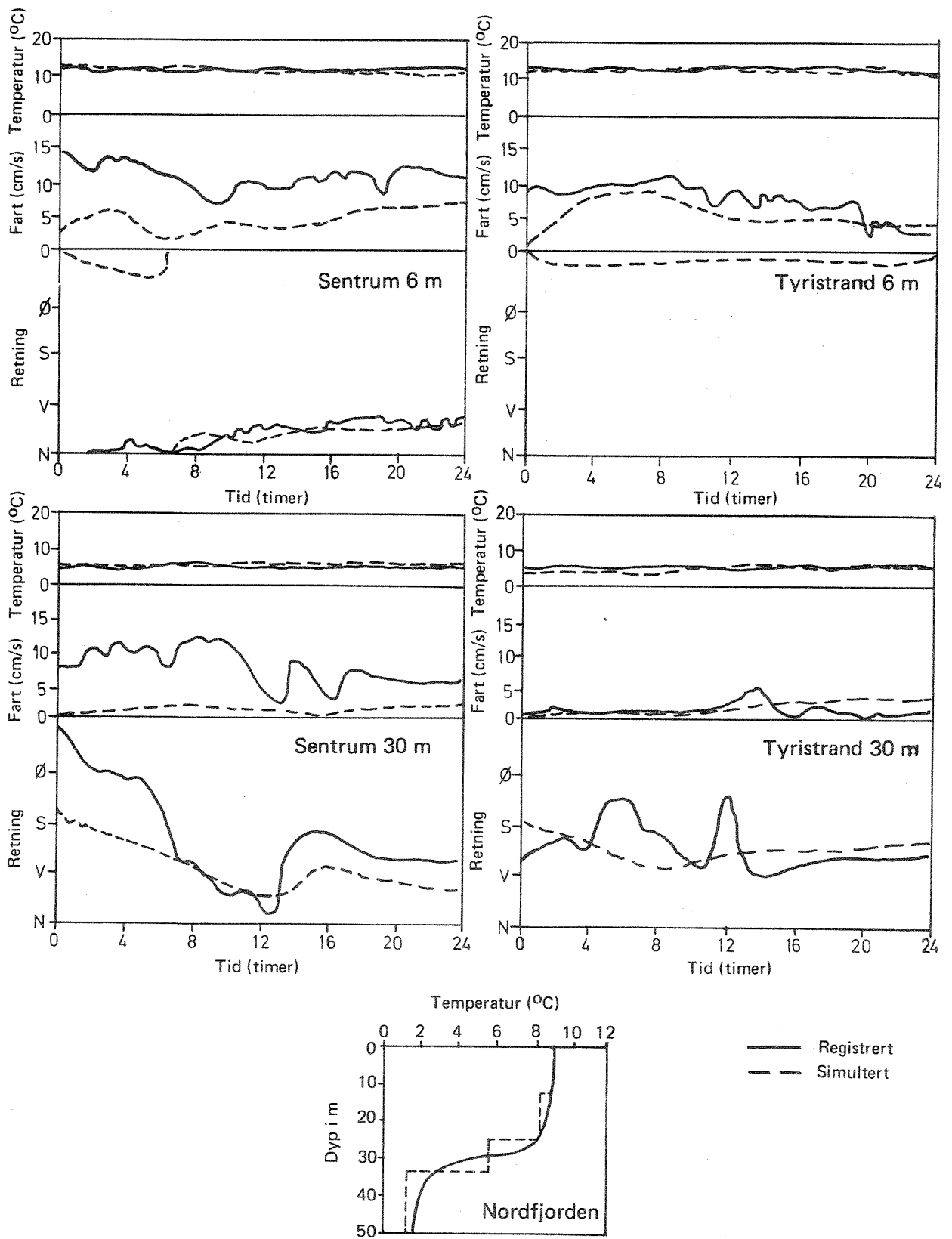


Fig. 4.1-4 Sammenlikning mellom observerte og simulerte verdier

4.2 Simulert strøm - vind mot øst

Vinden ble antatt å blåse mot øst med 6 m/s 10 m over vannoverflaten. Vanntemperaturer i de fire sjiktene var: 13 °C, 9 °C, 6 °C og 4,5 °C.

Fig. 4.2-1,2 viser det simulerte horisontale strømningsmønster etter 24 timer med konstant vindpåvirkning.

I sjøens hovedbasseng strømmet vannet i overflatesjiktet til høyre for vindens retning, dvs. mot øst og sør. Dette skyldes jordrotasjonen av bøyende kraft, samt innsjøens form. I Steinsfjorden dannet det seg en rekke virvler. I de tre dypeste sjiktene hadde bevegelsen overveidene en nordlig komponent. Hastighetene avtok med dybden.

Vannoverflatens nivå avtok fra sør mot nord og fra øst mot vest.

Oppadrettede strømmen fant gjerne sted i nord og langs vestsiden av sjøen. Nedadgående bevegelser var knyttet til sør og østlige deler (fig. 4.2-3).

Vannet i de tre øverste sjiktene kunne i upwellingsområdene være opp til 6 °C kaldere enn i downwellingsområdene.

Inngangsdataene til modellen var i rimelig grad i overensstemmelse med feltregistreringene omkring 19. september 1978.

De simulerte verdier i 6 m's nivå samt temperaturnivået i nordvest, viste relativt god overensstemmelse med registreringsdataene (fig. 4.2-4). På 30 m's dyp var imidlertid de registrerte hastighetene tildels høyere enn de simulerte, og retningene var svært avvikende.

4.3 Simulert strøm - vind mot sør

Vinden ble antatt å blåse mot sør med 7 m/s 10 m over vannoverflaten. Vanntemperaturen i de fire sjiktene var ved simuleringens start: 16 °C, 9 °C, 6 °C og 4,5 °C. Forøvrig var forholdene som angitt tidligere.

Fig. 4.3-1, 2 viser det simulerte horisontale strømningsmønster etter 24 timer med konstant vindpåvirkning.

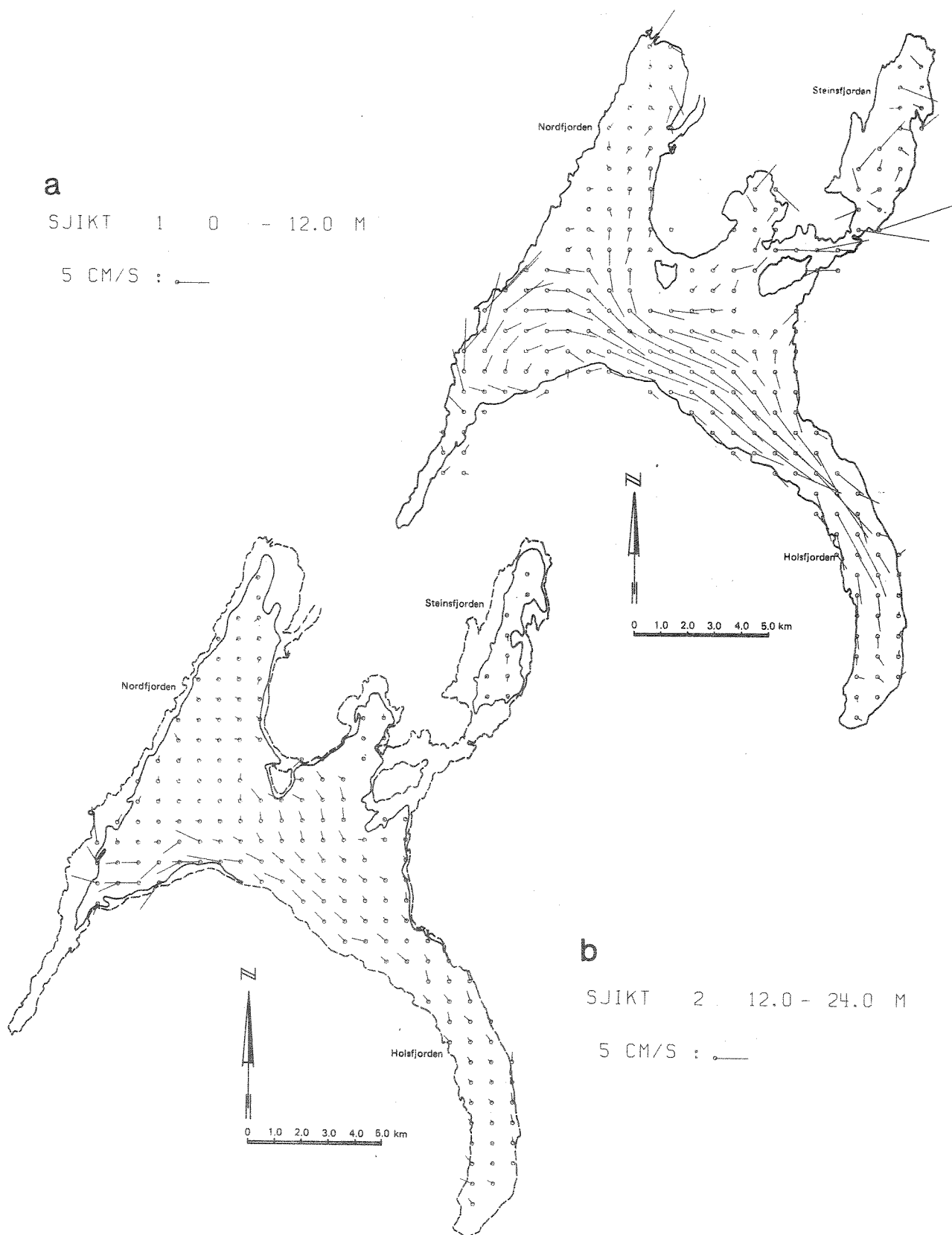


Fig. 4.2-1 Simulert strøm - vind mot øst: 6 m/s

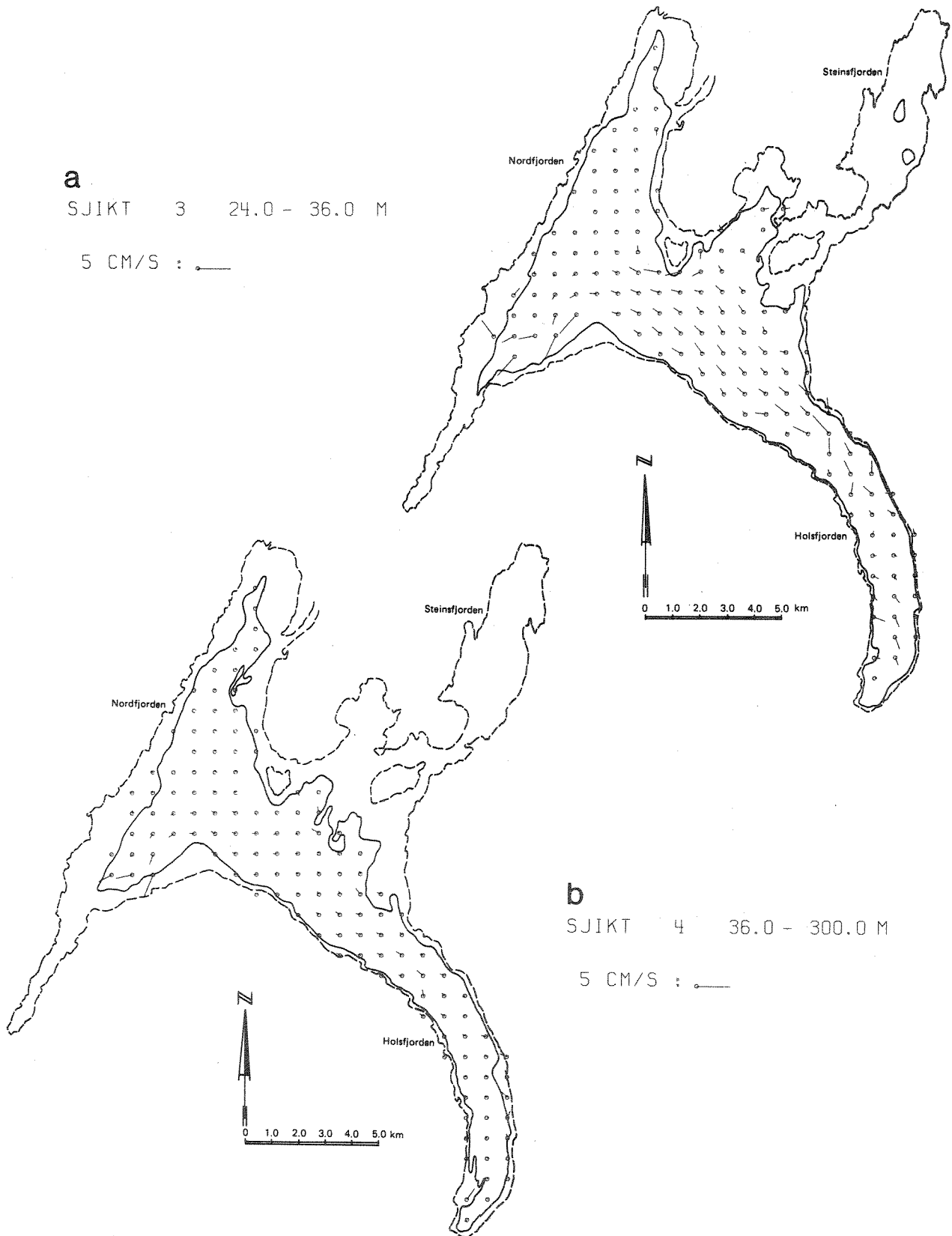


Fig. 4.2-2 Simulert strøm - vind mot øst: 6 m/s

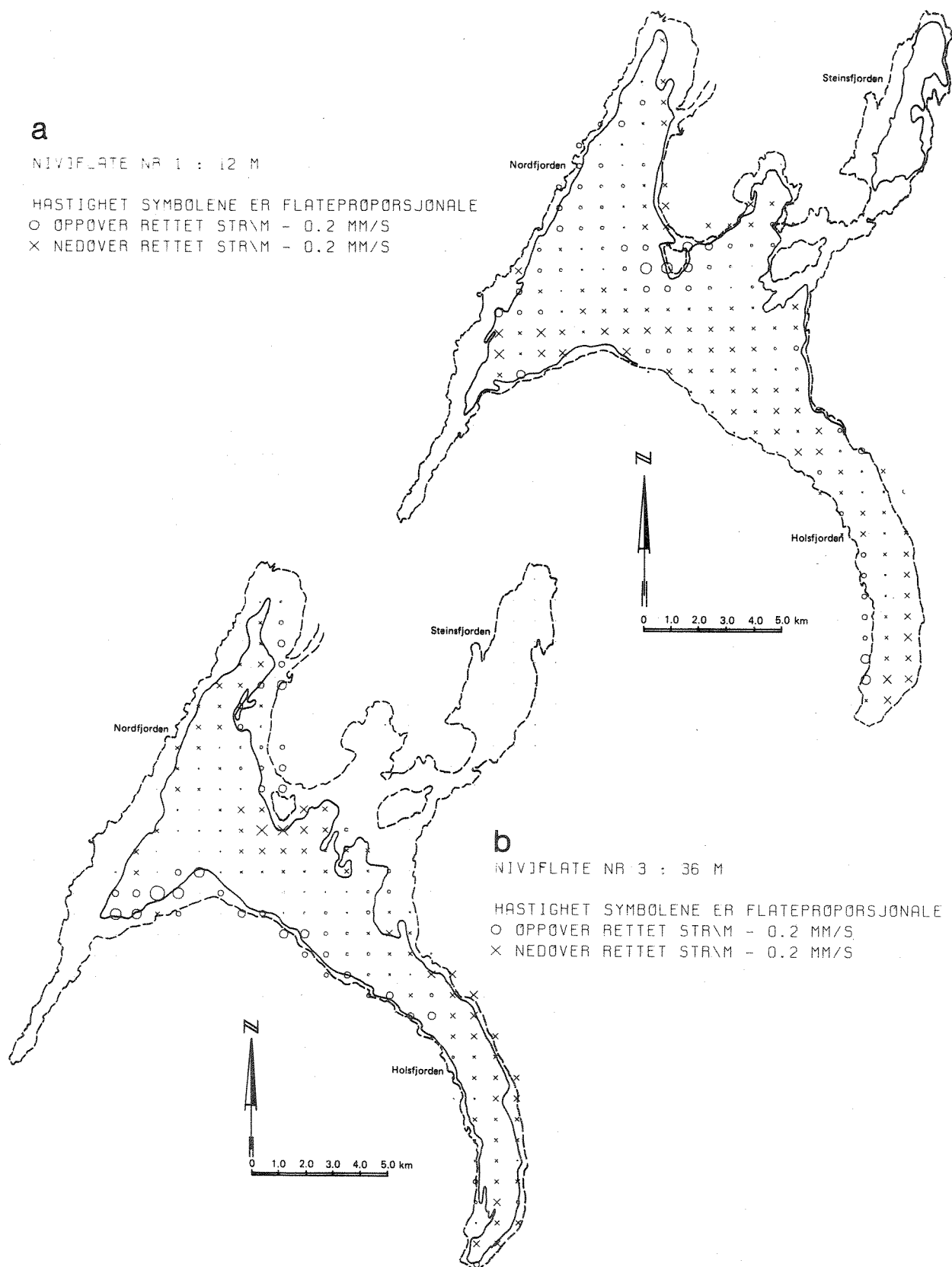
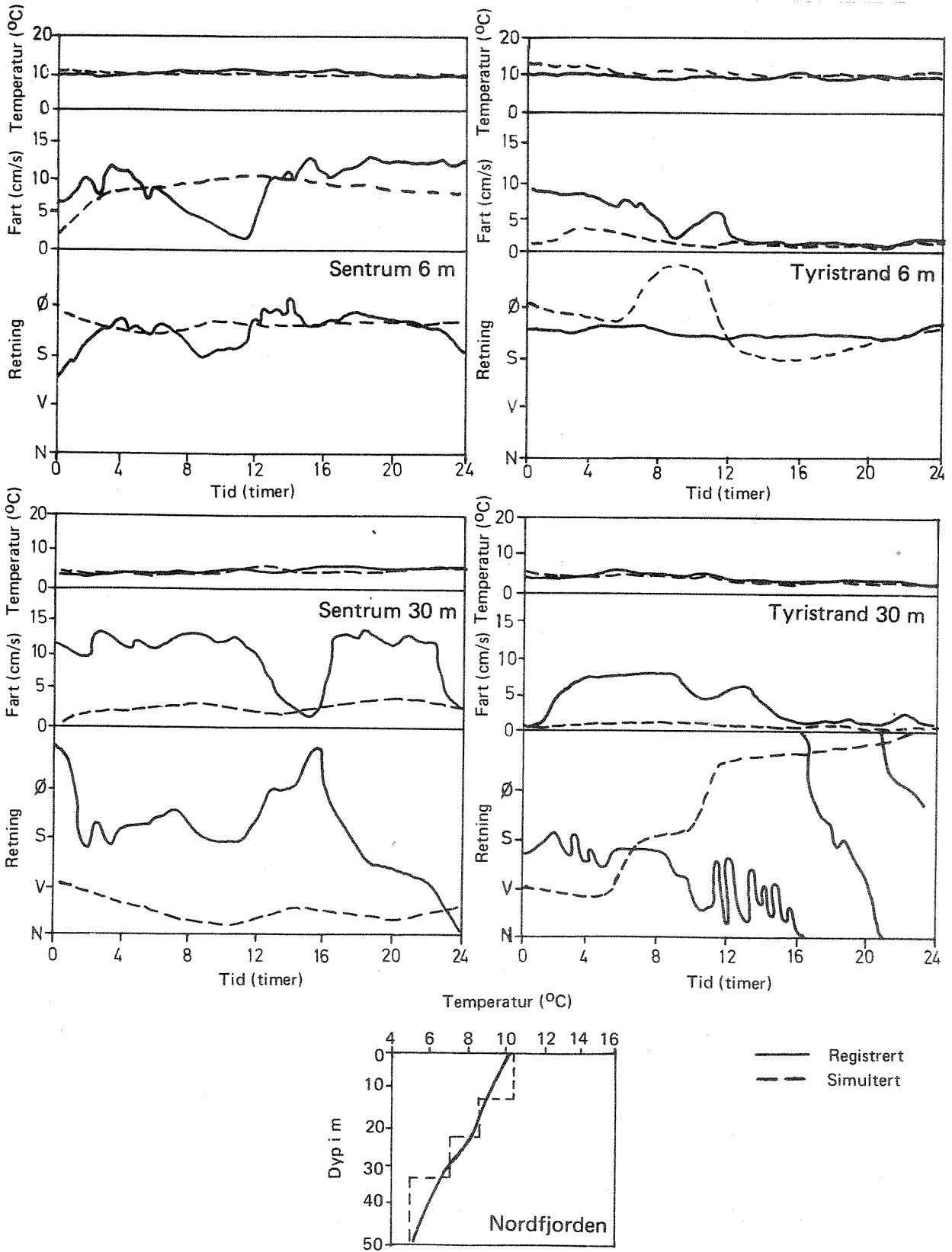


Fig. 4.2-3 Simulerte vertikale strømhastigheter



4.2-4 Sammenlikning mellom observerte og simulerte verdier.

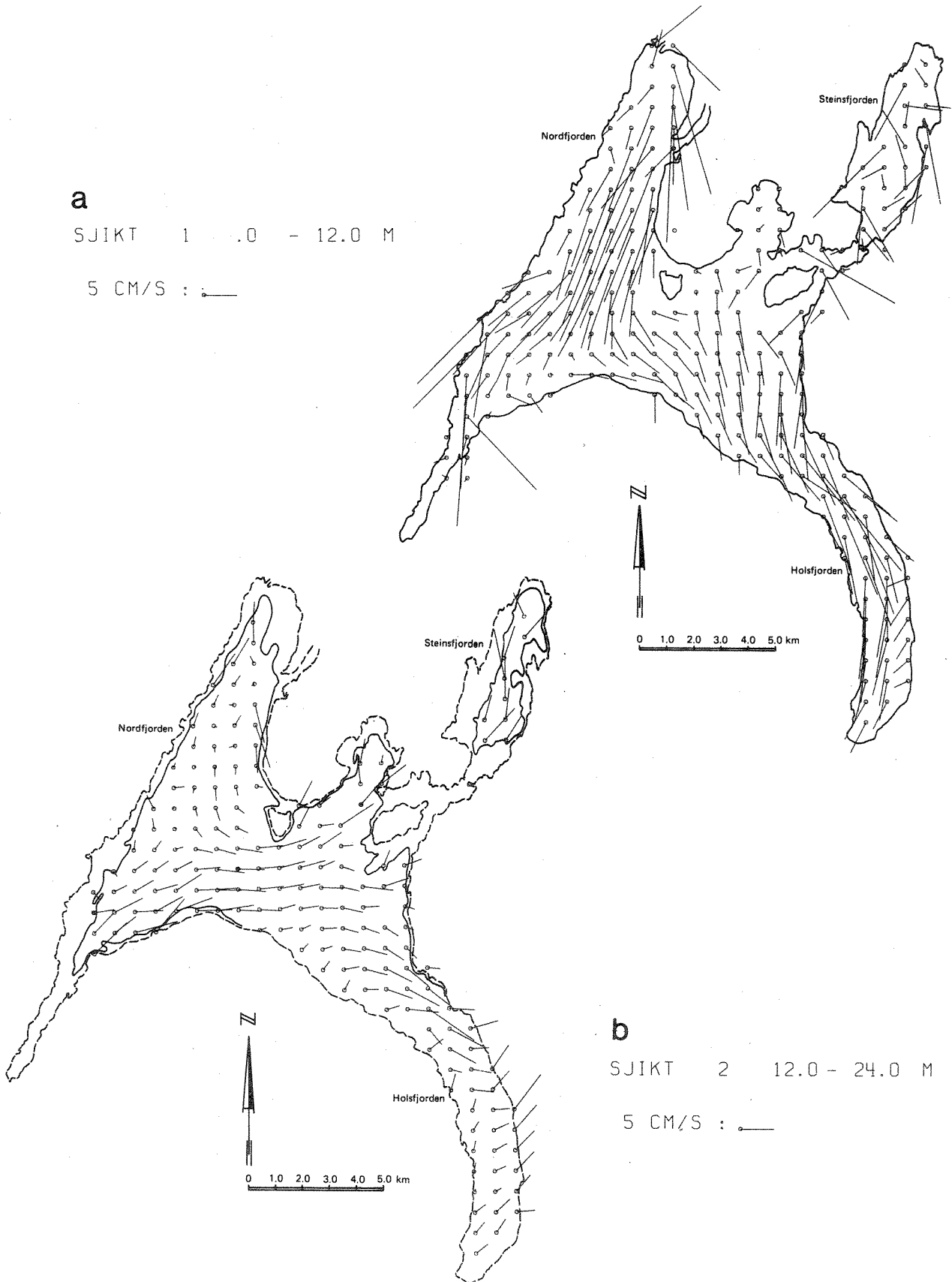


Fig. 4.3-1 Simulert strøm - vind mot sør: 7 m/s

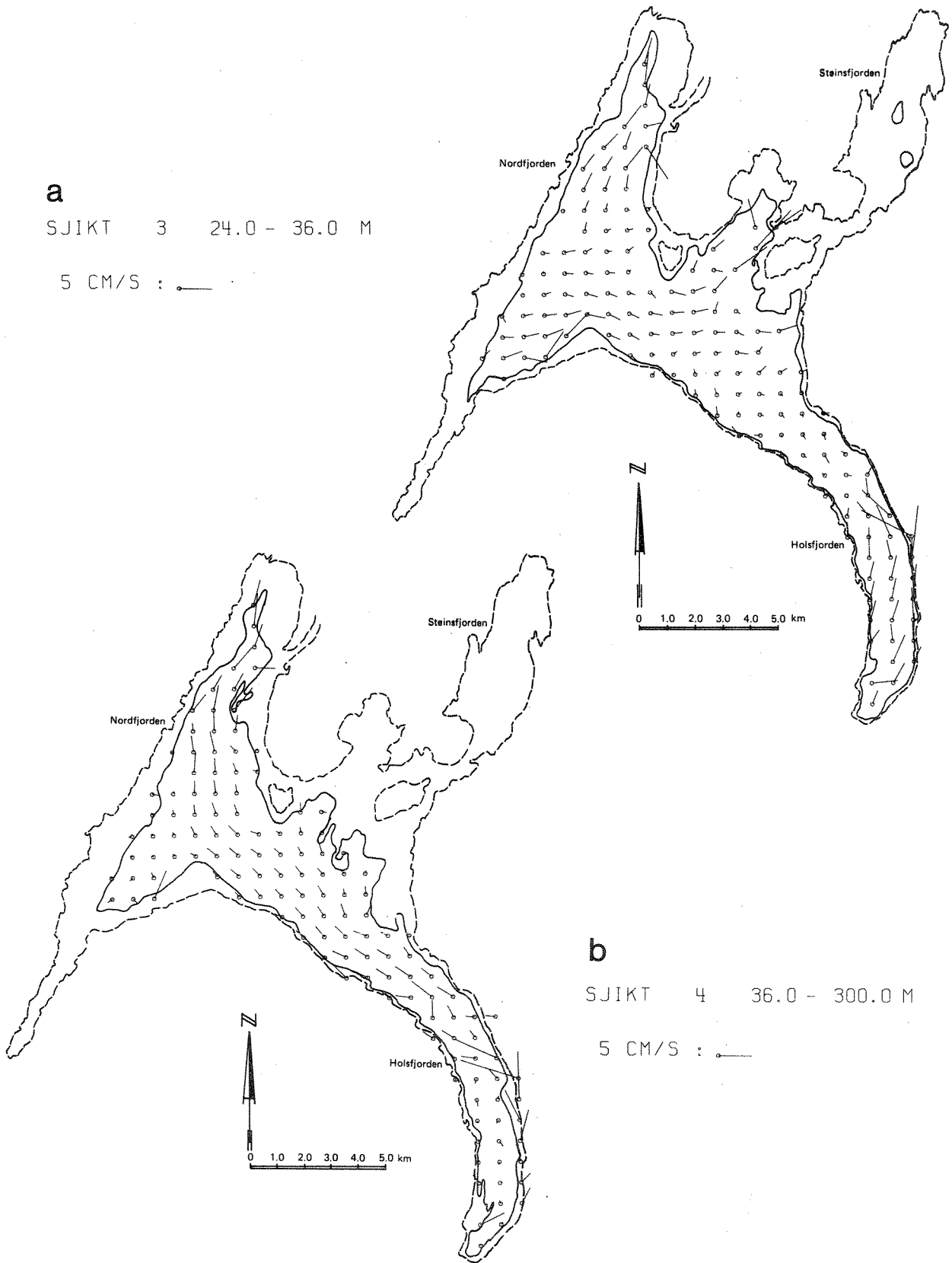


Fig. 4.3-2 Simulert strøm - vind mot sør: 7 m/s

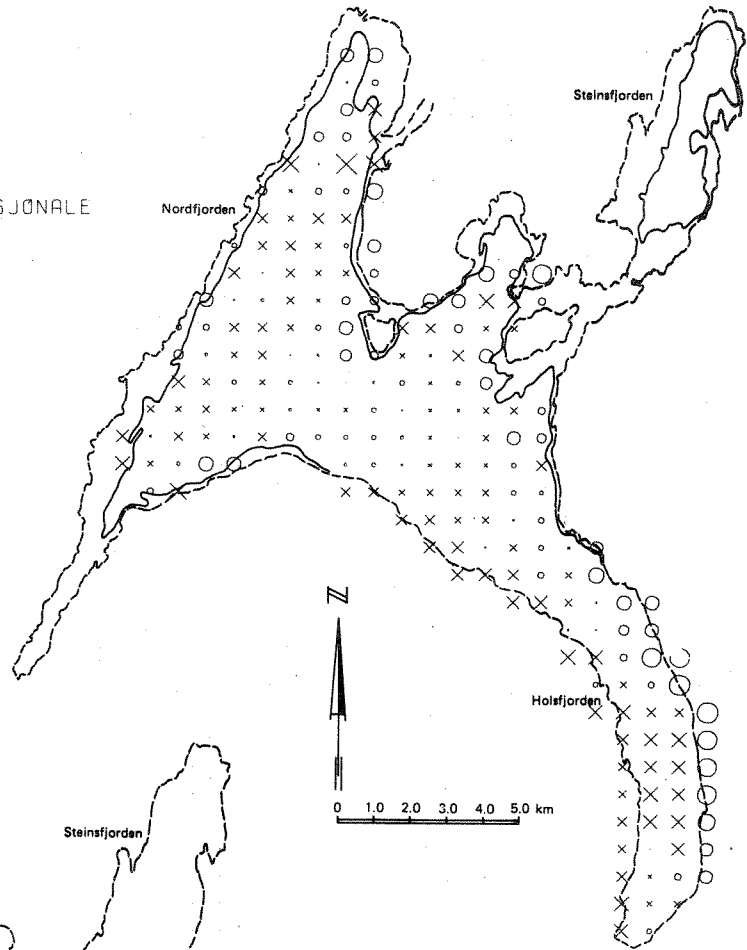
a

NIVJFLATE NR 1 : 12 M

HASTIGHET SYMBOLENE ER FLATEPROPORTSJONALE

○ ØPPOVER RETTET STRØM - 0.2 MM/S

× NEDOVER RETTET STRØM - 0.2 MM/S



b

NIVJFLATE NR 3 : 36 M

HASTIGHET SYMBOLENE ER FLATEPROPORTSJONALE

○ ØPPOVER RETTET STRØM - 0.2 MM/S

× NEDOVER RETTET STRØM - 0.2 MM/S

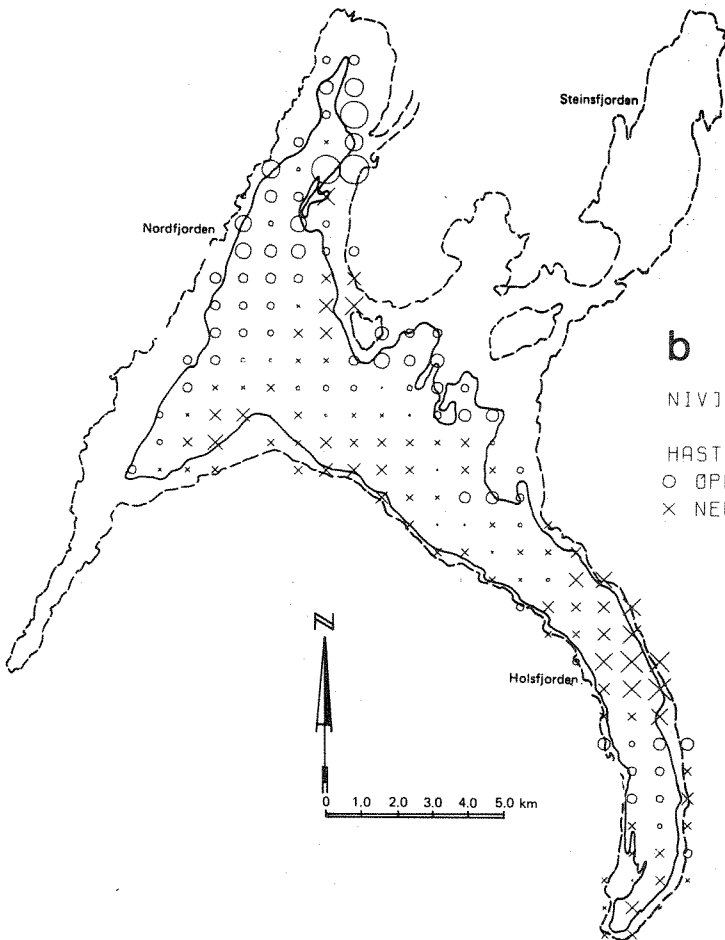


Fig. 4.3-3 Simulerte vertikale strømhastigheter

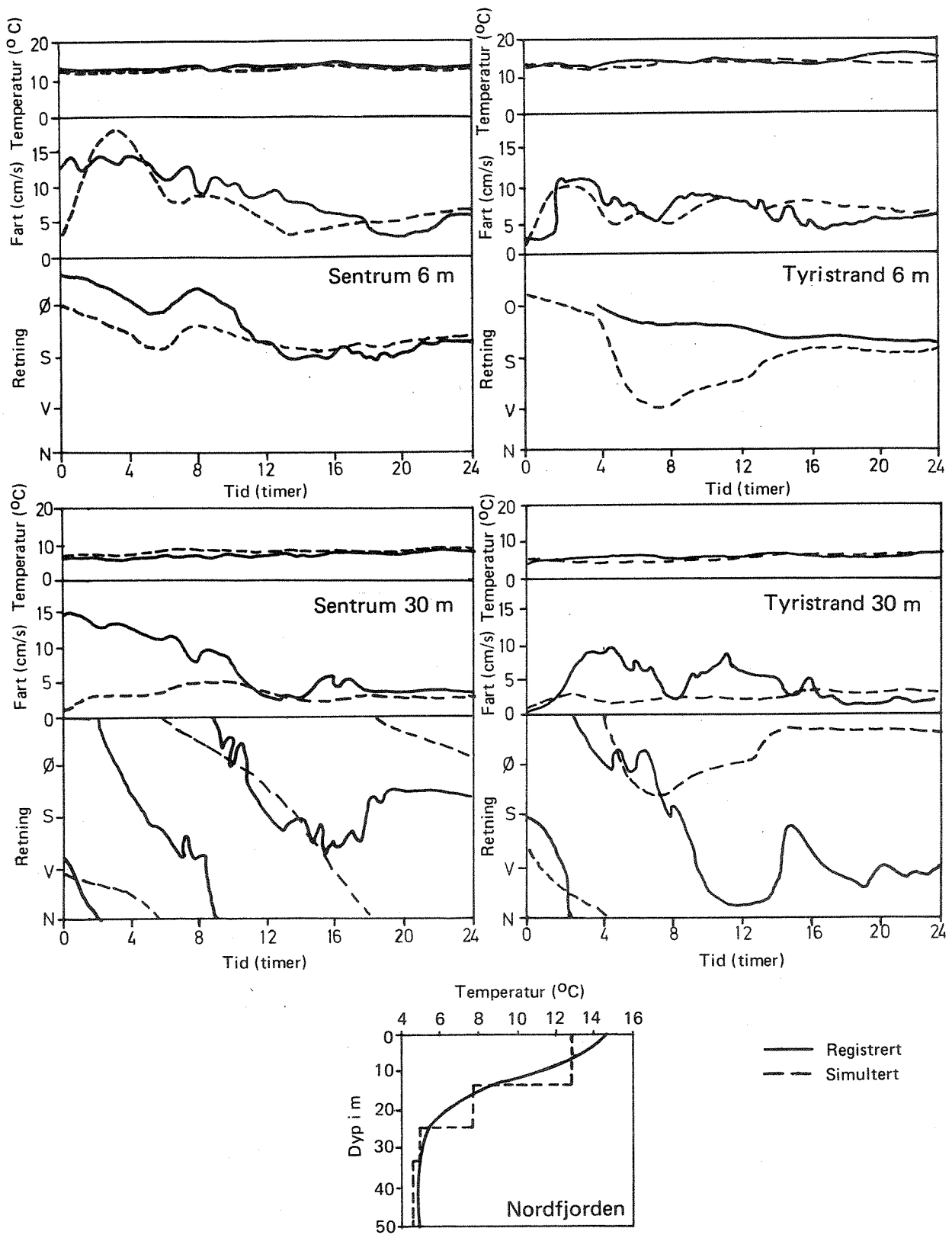


Fig. 4.3-4 Sammenlikning mellom observerte og simulerte verdier

I overflatesjiktet strømmet vannet overveiende mot sør. I Steinsfjorden dannet det seg virvler i bassengene. I sjikt nr. 2 var bevegelsen i stor grad rettet mot vest. I bunnsjiktet dannet det seg en nordgående returstrøm.

Upwellings-områdene (fig. 4.3-3) med tilhørende lav temperatur i overflatesjiktene, fant sted langs nordlige og østlige deler av sjøen. Downwelling og oppvarming av dypsjiktene var knyttet til områdene i sør og vest.

Inngangsdataene til modellen var i rimelig grad i overensstemmelse med feltregistreringene omkring 23. august 1978.

Med unntak av strømretningene på 30 m's dyp, ga de simulerte verdiene et realistisk bilde av registreringsdataene (fig. 4.3-4).

4.4 Diskusjon

For å verifisere modellberegningene, var det ønskelig å finne perioder med konstant vind over et lengre tidsrom. Dessuten burde strømhastighetene ved simuleringsperiodens start helst være så små som mulig. Disse kravene kunne bare delvis tilfredsstilles i registreringsperioden.

De simulerte temperaturene viste god overensstemmelse med registreringsdataene. Dette tyder på at de simulerte vertikale hastighetene hadde riktig retning, samt en realistisk størrelsesorden.

De simulerte strømmer hadde bedre overensstemmelse i overflatesjiktet enn på 30 m's nivå. Forløpet kan ha sammenheng med strømmer og indre bølgebevegelser som var indusert før simuleringens start og eventuelt bruke flere døgn på å "dø ut".

Ved beregningene ble største dybde satt lik 125 m. Dermed ble regnemaskintiden nesten halvert. Tiden pr. simulering på NORD 10 var ca. 6 timer (CPU). Denne besparelsen ble foretrukket på bekostning av noe usikre verdier i de dypeste delene av sjøen.

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.

Ved simuleringene ble vinden antatt å være konstant i tid og jevnt fordelt over sjøen. I modellen er det imidlertid mulig å variere både vindens styrke med tiden såvel som i horisontalplanet.

5. SPREDNING

5.1 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:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \underbrace{-\frac{\partial(uHc)}{H \cdot \partial x}}_1 - \underbrace{\frac{\partial(vHc)}{H \cdot \partial y}}_2 - \underbrace{\frac{\partial(wc)}{\partial z}}_3$$
$$+ \underbrace{\frac{\partial}{H \cdot \partial x} \left[HK_{xy} \frac{\partial c}{\partial x} \right]}_4 + \underbrace{\frac{\partial}{H \cdot \partial y} \left[HK_{xy} \frac{\partial c}{\partial y} \right]}_5 + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z} \left[K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right]}_6 + \underbrace{\lambda C}_7 + \underbrace{S}_8$$

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

λ : 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" (λ) 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.

5.2 Simulert spredning - vind mot sør

Det blir her gitt et eksempel på bruk av modellen.

Strømningsmønsteret ble antatt å være som vist i avsnitt 4.3 Dvs. med vind mot sør.

Stoffet ble tenkt tilført via Storelva i Nordfjorden og i sørenden av Holsfjorden 30 m under overflaten (sjikt 3). Ved begge utslippene ble 100 kg/s tilført under hele simuleringstiden. Stoffet ble antatt å være konservativt (bestandig).

Fig. 5.2- 1, -2 og fig. 5.2-3, -4 viser konsentrasjonsfordelingen i sjøen ved henholdsvis ett og to døgn etter utslippets start. Kartene

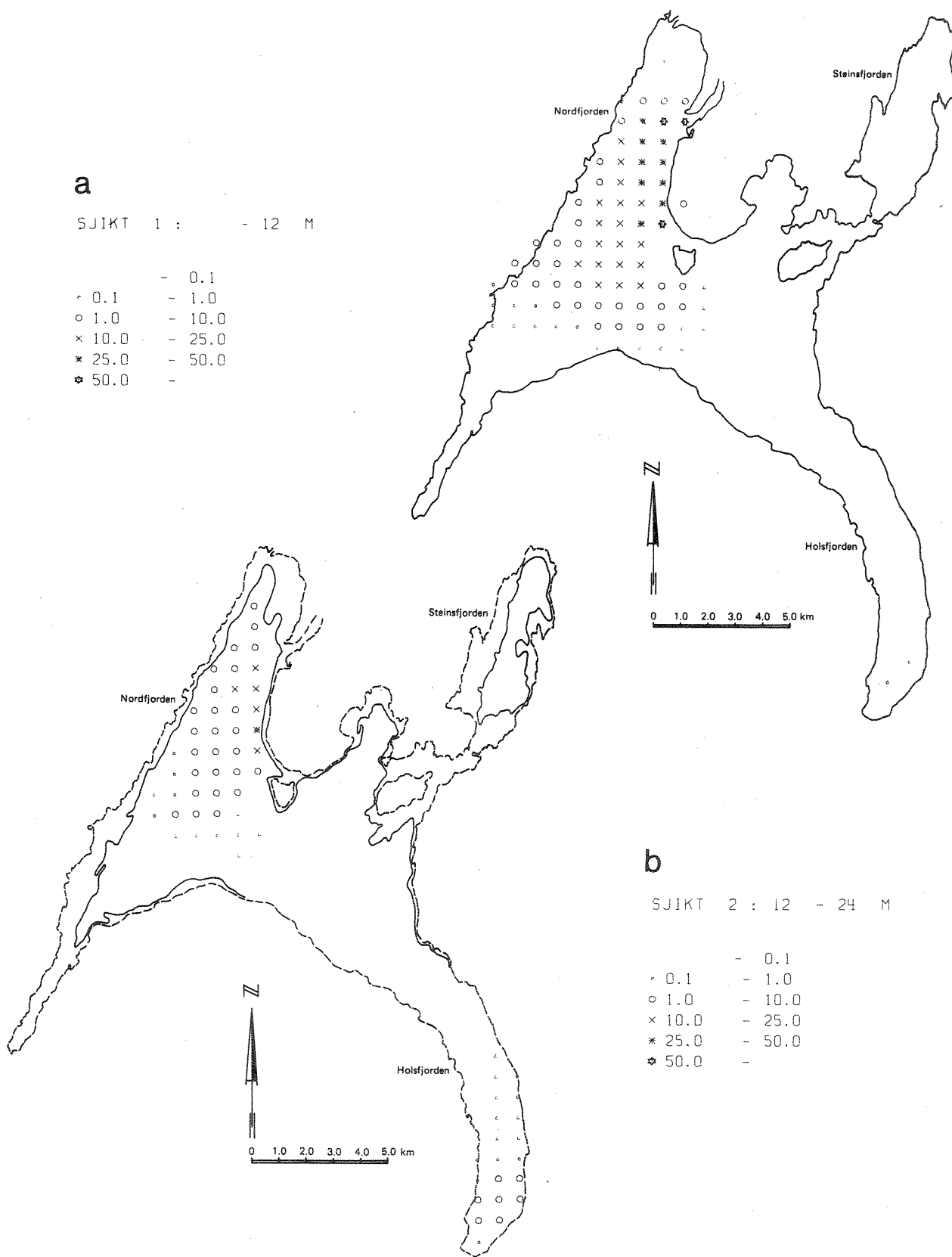


Fig. 5.2-1 Simulert konsentrasjonsfordeling etter ett døgn

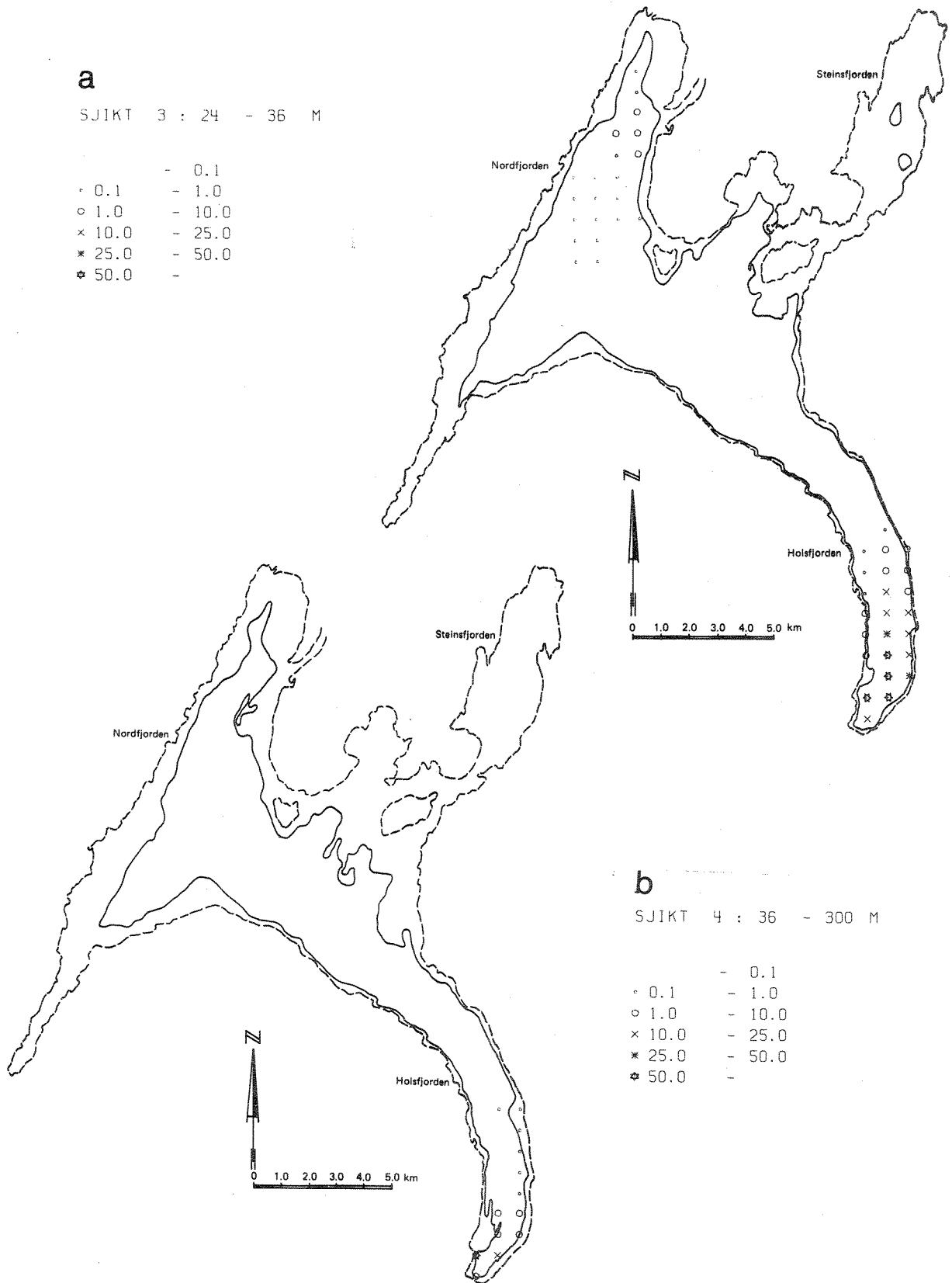


Fig. 5.2-2 Simulert konsentrasjonsfordeling etter ett døgn

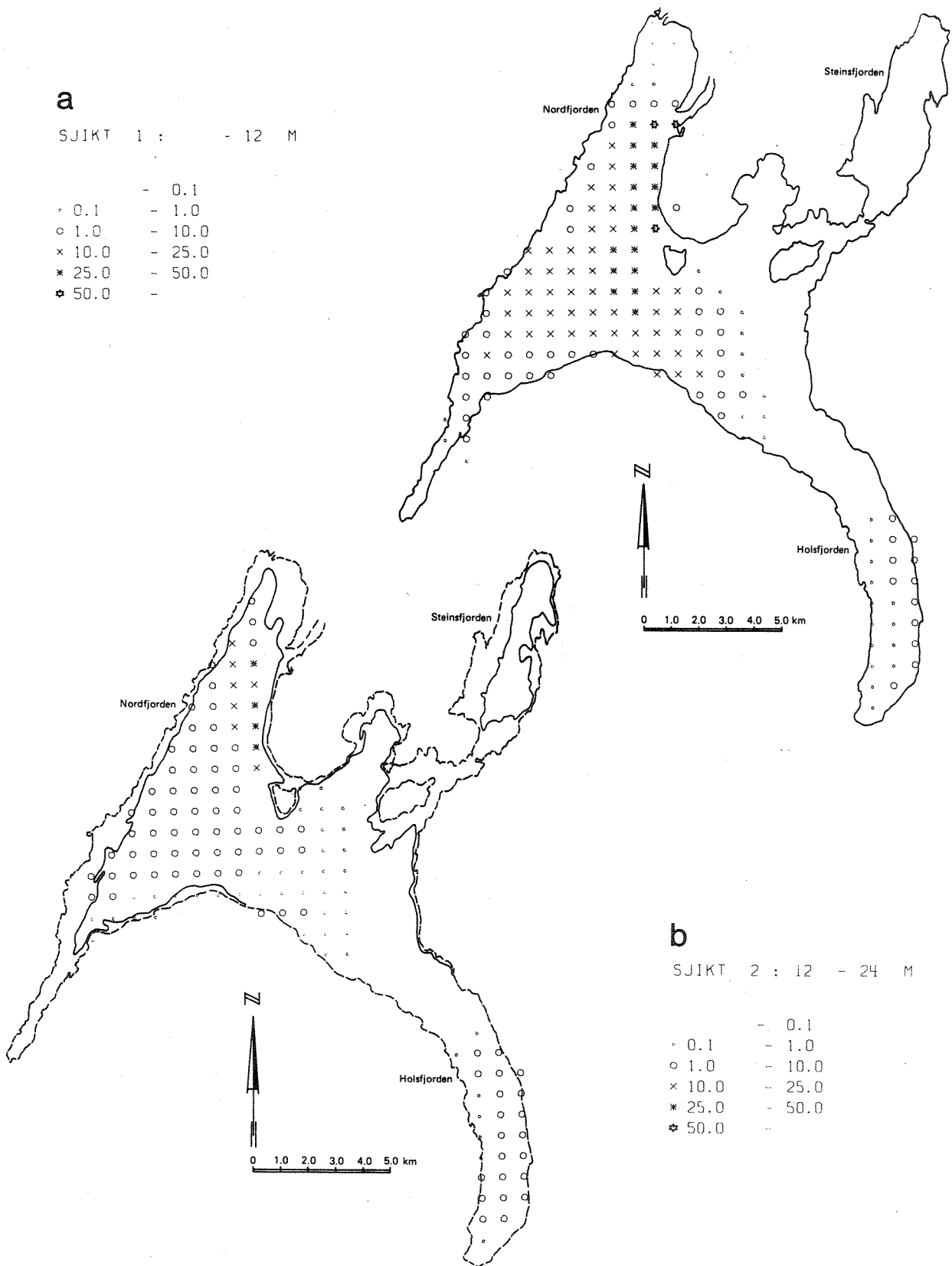


Fig. 5.2-3 Simulert konsentrasjonsfordeling etter to døgn

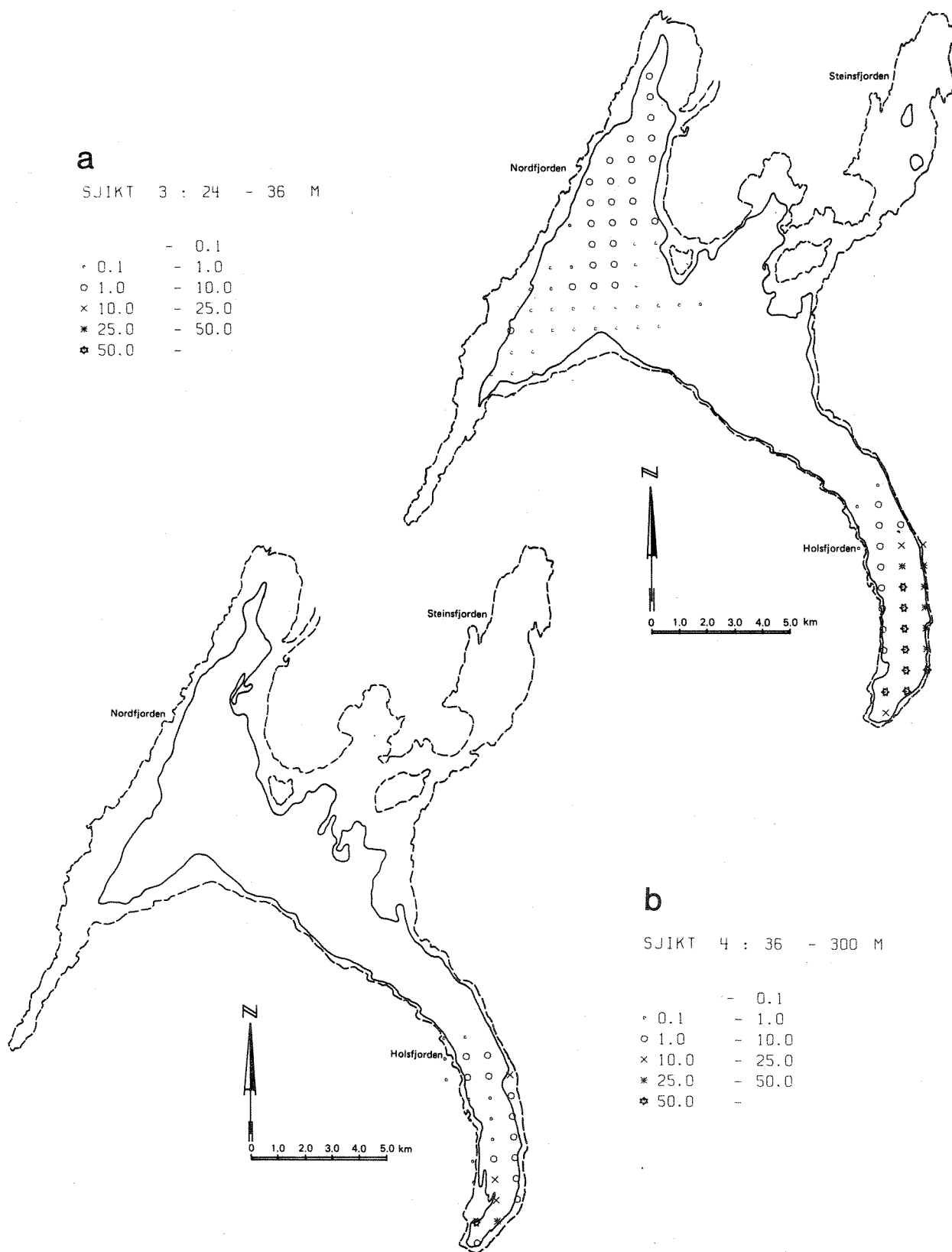


Fig. 5.2-3 Simulert konsentrasjonsfordeling etter to døgn

kan tolkes som hvordan vann fra Storelva ($100 \text{ m}^3/\text{s}$) blandes med vann fra Tyrifjorden. Benevningen mg/l byttes i så fall ut med $1/\text{m}^3$ eller $^{\circ}/\text{oo}$.

Konsentrasjoner over $1^{\circ}/\text{oo}$ (mg/l) kunne spores ca. 13 km fra Storelvas utløp i løpet av simuleringsperioden. Verdier over 100 fantes bare i celler ved elvas utløp. Konsentrasjonene avtok med dybden.

Dypvannstilførslene i Holsfjorden ble i langt mindre grad spredd både i vertikal og horisontal retning enn utslippet i Nordfjorden. Verdier over 100 mg/l og 1 mg/l kunne f.eks. spores til henholdsvis 3 km og 6 km fra utslippsstedet i sjikt nr. 3.

Beregningene var kun ment som et eksempel på bruk av modellen. Flere simuleringer og den videre bruk av resultatene vil komme senere.

Regnemaskintiden er langt mindre enn for strømningsberegningene. Ved kjennskap til representative strømningsmønstre egner spredningsmodellen seg til simuleringer med varighet på noen uker, eventuelt noen måneder. Dvs. at modellen kan gi informasjon om innblanding/utskiftning av vann via elvene, samt vannutskiftning mellom ulike deler av innsjøen. Videre kan spredningsforløpet av ulike typer stoffer studeres. Dette bør sammenholdes med observasjonsdata fra øvrige deler av prosjektet.

6. REFERANSER

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

Simons, T.J., 1975: Verification of numerical models of Lake Ontario: Stratified circulation and temperature changes. J. Phys. Oceanography, 5.

Simons, T.J., Funquist, L., Svensson, J., 1977: Applications of numerical model to lake Vänern. Sveriges meteorologiska hydrologiska institut. No. RH 9.

Tjomsland, T., 1978: Simulering av strømminger i Mjøsa med en tredimensjonal matematisk modell. Norsk institutt for vannforskning, A2-24.

Wittmiss, J., 1978: Applications of a transient mathematical model to Lake Kösen. Div. Water Resources Engineering, Univ. of Luleå, serie A, No. 10.

TJO/ANG
0-79006
9.11.79