



Rapport 396|90

Oppdragsgiver

Statens forurensningstilsyn

Deltakende institusjon

VERITEC

Eutrofi- situasjonen i YTRE OSLOFJORD 1989

DELPROSJEKT 3.3 b

Transportmodell av
overflatelaget i Ytre Oslofjord.

Rapport 2:

Resultater fra simuleringene.
Enanalyse og oppsummering.





Statlig program for forurensningsovervåking

Det statlige programmet omfatter overvåking av forurensningsforholdene i

**luft og nedbør
grunnvann
vassdrag og fjorder
havområder**

Overvåkingen består i langsiktige undersøkelser av de fysiske, kjemiske og biologiske forhold.

Hovedmålsettingen med overvåkingsprogrammet er å dekke myndighetenes behov for informasjon om forurensningsforholdene med sikte på best mulig forvaltning av naturressursene.

Hovedmålet spenner over en rekke delmål der overvåkingen bl.a. skal:

gi informasjon om tilstand og utvikling av forurensningssituasjonen på kort og lang sikt.

registrere virkningen av iverksatte tiltak og danne grunnlag for vurdering av nye forurensningsbegrensende tiltak.

påvise eventuell uheldig utvikling i resipienten på et tidlig tidspunkt.

over tid gi bedre kunnskaper om de enkelte vannforekomsters naturlige forhold.

Sammen med overvåkingen vil det føres kontroll med forurensende utslipp og andre aktiviteter.

Overvåkingsprogrammet finansieres i hovedsak over statsbudsjettet. Statens forurensningstilsyn er ansvarlig for gjennomføring av programmet.

Resultater fra de enkelte overvåkingsprosjekter publiseres i årlige rapporter.

Henvendelser vedrørende programmet kan i tillegg til de aktuelle institutter rettes til Statens forurensningstilsyn, Postboks 8100 Dep, 0032 Oslo 1, tlf. 02 - 65 98 10.

NIVA – RAPPORT

Norsk institutt for vannforskning



NIVA

Hovedkontor

Postboks 33, Blindern
0313 Oslo 3
Telefon (02) 23 52 80
Telefax (02) 39 41 29

Sørlandsavdelingen

Grooseveien 36
4890 Grimstad
Telefon (041) 43 033
Telefax (041) 42 709

Østlandsavdelingen

Rute 866
2312 Ottestad
Telefon (065) 76 752

Vestlandsavdelingen

Breiviken 5
5035 Bergen - Sandviken
Telefon (05) 95 17 00
Telefax (05) 25 78 90

Prosjektnr.: 8801113
Undernummer:
Løpenummer: 2379
Begrenset distribusjon: Åpen

Rapportens tittel: Eutrofisituasjonen i Ytre Oslofjord Delområde 3.3b. Transportmodell av overflate- laget i Ytre Oslofjord. Rapport 2: Resultater fra simuleringer. En analyse og oppsummering. (Overvåkingsrapport nr. 396/90)	Dato: 17.januar 1990
Forfatter (e): Lars Petter Røed Helge Skåtun	Rapportnr.
	Faggruppe: Marin eutrofi
	Geografisk område: Oslofjorden
	Antall sider (inkl. bilag): 78

Oppdragsgiver: Statens forurensningstilsyn (SFT) (Statlig program for forureningsovervåking)	Oppdragsg. ref. (evt. NTNf-nr.):
---	----------------------------------

Ekstrakt: (Dette er en ISBN-side satt inn i NIVA's arkiveksemplarer)

4 emneord, norske:

1. Oslofjord
2. Numerisk modell
3. Havstrømmer
4. Data-simulering

4 emneord, engelske:

1. Oslofjord
2. Numerical model
3. Ocean currents
4. Computer simulation

Prosjektleder:

Kjell Baalsrud

For administrasjonen:

ISBN 82-577 -1670-7

Programleder, overvåking



Rapport/Report

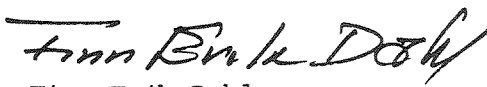
VERITEC

Veritas Offshore Technology and Services A/S

Hovedkontor/Head Office HØVIK (OSLO)

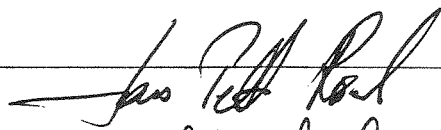
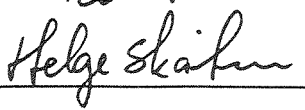
Stedsadresse: Address Veritasvn 1, Hovik
Postadresse: Postal Address P O BOX 300
N-1322 Hovik, Norway
Telefon Telephone (02) 47 72 50 - 47 2 47 72 50
Telegramadr Cable Address Veritas Oslo
Telex 76 192 verit n
Faksimile Facsimile (02) 47 98 71 - 47 2 47 98 71
(02) 47 99 40 / + 47 2 47 99 40

Regionalkontorer Regional Offices BERGEN, STAVANGER

Dato/Date 6. februar 1989	Avd./Dept. 222	Prosjektnr./Project No. 222101
Godkjent av/Approved by  Finn-Erik Dahl Avd.leder, Avdeling for Oseanografi		
Klient, Oppdragsgiver/Client, Sponsor Norsk institutt for vannforskning (NIVA) Kjell Baalsrud		Klient ref./Clients ref. Kjell Baalsrud

Rapporttype/Type of Report Teknisk rapport

Sammendrag/Summary <p>Dette er andre rapport for delprosjekt 3.3. Rapporten beskriver resultatene fra fem eksperimenter og en simulering over 22 dager i juli 1988 med transportmodellen beskrevet i Rapport 1.</p> <p>Beskrivelsen er delt i tre hovedavsnitt: (i) To typiske sommersirkulasjoner, (ii) tre ideelle eksperimenter, som beskriver avvik fra en "normal-sirkulasjon", og (iii) en simulering for perioden 14 juli til 5 august 1988.</p> <p>Man konkluderer med at modellen synes godt egnet til å beskrive strømmene og derved transportene i de øvre vannmasser. Videre er Drammensvassdraget vesentlig for sirkulasjonen i Breidangen. Sirkulasjonen i de ytre deler er følsom overfor vindretning langs svenskekysten. Eksperimentene viser forøvrig eksistensen av to virvelområder, ett i Breidangen og et i området Fulehuk - Færder.</p>
--

VERITEC Rapportnr./Report No. 89-3055	Emnegruppe/Subject Group F3	
Rapporttittel/Title of Report Eutrofisituasjonen i Ytre Oslofjord. Delområde 3.3: Transportmodell av overflatelaget i Ytre Oslofjord. Rapport 2: Resultater fra simuleringer. En analyse og oppsummering.		
Utført av/Work carried out by  Lars Petter Røed Helge Skåtun 		
Verifisert av/Work verified by		
Dato for siste revisjon/ Date of last rev. 17. januar 1990	Rev.No. 2	Antall sider/ Number of pages 78

4 indekseringstermer (på engelsk)/4 Indexing terms

Oslofjord
Numerical model
Ocean currents
Computer simulation

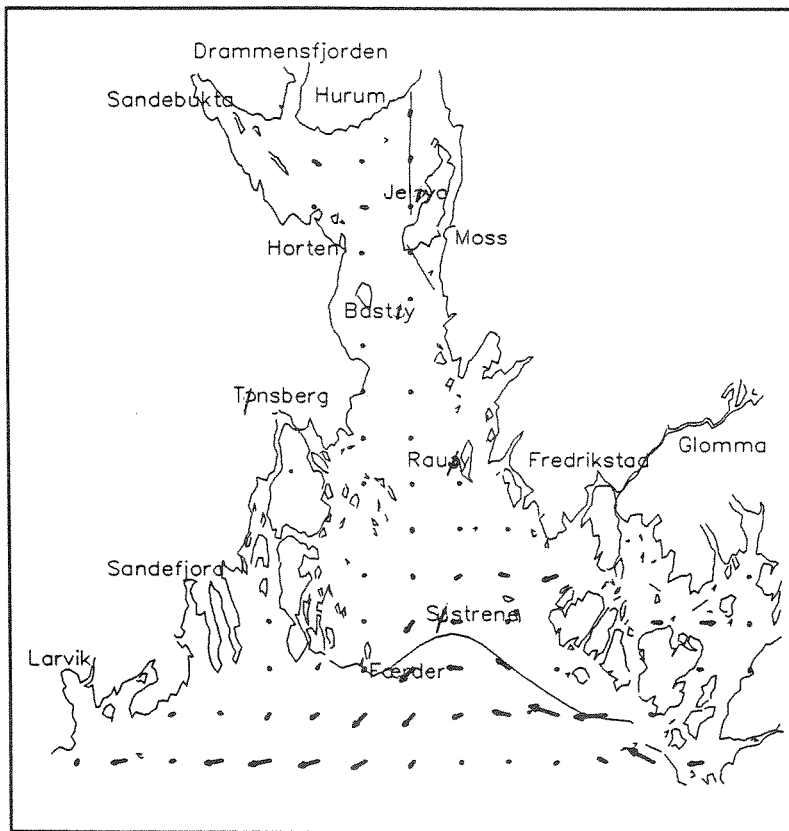
Tilgjengelighet/Distribution statement:

Ingen distribusjon uten tillatelse fra ansvarlig avdeling/
No distribution without permission from the responsible department.

Begrenset distribusjon innen VERITEC/
Limited distribution within VERITEC

Fri distribusjon/Unrestricted

EUTROFISITUASJONEN I YTRE OSLOFJORD
DELPROSJEKT 3.3:



Transportmodell av overflatelaget i Ytre Oslofjord.
Rapport 2: Resultater fra simuleringer. En analyse og oppsummering

av

Lars Petter Røed og Helge Skåtun

Veritas Offshore Technology and Services A/S
Avdeling for Oseanografi
Postboks 300
1322 Høvik

17 Jan 1990

INNHO L D S F O R T E G N E L S E

Forord	1
1 SAMMENDRAG	2
1.1 Formål	2
1.2 Konklusjoner	2
1.3 Gjennomførelse	4
1.4 Resultater	5
1.4.1 STD1	5
1.4.2 RIVER1	6
1.4.3 DRAM1	7
1.4.4 GLOMMA	7
1.4.5 SKAG1	7
1.4.6 SOMMER	8
1.5 Anbefalinger	10
2 INNLEDNING	11
2.1 Oppdragsgiver	11
2.2 Formål	11
2.3 Transportmodellen	11
2.4 Organisering av denne rapporten	12
3 OPPSETT FOR ELVE- OG VINDPÅDRAG	14
3.1 Elveinnstrømning	14
3.2 Vindpådrag	15
4 TO TYPISKE SOMMERSIRKULASJONER I YTRE OSLOFJORD	17
4.1 Eksperiment RIVER1: Kun elvepådrag	17
4.2 Eksperiment STD1: Vind- og elvepådrag	20
5 TRE IDEELLE EKSPERIMENTER	23
5.1 Eksperiment 1: Drammensvassdragets betydning (DRAM1) ...	23
5.2 Eksperiment 2: Glommas betydning (GLOMMA)	24
5.3 Eksperiment 3: Betydningen av den vindrevne Skagerraksirkulasjonen (SKAG1)	25
6 EN SIMULERING FOR SOMMEREN 1988	27
6.1 Oppsett	27
6.1.1 Grenseflatebetingelser	27
6.1.2 Vindpådrag	28
6.1.3 Elvepådrag	29
6.2 Resultater	29
6.2.1 Perioden 14 t.o.m. 18 juli (0 - 96 timer)	30
6.2.2 Perioden 19 t.o.m. 23 juli (96 - 240 timer)	31
6.2.3 Perioden 24 t.o.m. 31 juli (240 - 432 timer)	31
6.2.4 Perioden 1 t.o.m. 4 august (432 - 528 timer)	33
6.2.5 Partikkelbaner	34
6.3 Oppsummering av sommersimuleringen	35
6.3.1 Breidangen-området	35
6.3.2 De sentrale deler av fjorden	36
6.3.3 De ytre deler av fjorden	36
7 SPREDNING AV SPORSTOFF I YTRE OSLOFJORD	38

7.1 Resultater fra STD1, DRAM1 og GLOMMA	38
7.2 Resultater fra SKAG1	39
8 HENVISNINGER	40
8.1 Rapporter innenfor prosjektet (EYO)	40
8.2 Øvrige litteraturhenvisninger	40

FIGURLISTE

Fig. 4.1a: Fordeling av tetthet og strøm RIVER1, 168 timer	43
Fig. 4.1b: Fordeling av tetthet og strøm RIVER1, 192 timer	44
Fig. 4.2: Partikkelbaner RIVER1	45
Fig. 4.3a: Fordeling av tetthet og strøm STD1, 264 timer	46
Fig. 4.3b: Fordeling av tetthet og strøm STD1, 288 timer	47
Fig. 4.4: Kinetisk energi STD1	48
Fig. 4.5: Tidsforløpet av strømmen's nord komponent, STD1	49
Fig. 4.6: Partikkelbaner for STD1	50
Fig. 5.1: Kinetisk energi, DRAM1	51
Fig. 5.2: Fordeling av tetthet og strøm, DRAM1	52
Fig. 5.3: Partikkelbaner, DRAM1	53
Fig. 5.4: Kinetisk energi, GLOMMA	54
Fig. 5.5: Fordeling av tetthet og strøm, GLOMMA	55
Fig. 5.6: Partikkelbaner, GLOMMA	56
Fig. 5.7: Overskuddsmasse, SKAG1	57
Fig. 5.8: Kinetisk energi, SKAG1	58
Fig. 5.9: Fordeling av tetthet og strøm, SKAG1	59
Fig. 5.10: Partikkelbaner, SKAG1	60
Fig. 6.1: Vindhastighet Færder jul/aug 1988	61
Fig. 6.2: Vindfart Færder mot Rauøy jul/aug 1988	61
Fig. 6.3: Spredningsdiagram for vind, Færder mot Rauøy	62
Fig. 6.4: Retningsforskjell vind Færder/Rauøy	62
Fig. 6.5a: Vannføring Glomma og Drammenselva juli 1988	63
Fig. 6.5b: Vannføring Glomma og Drammenselva august 1988	63
Fig. 6.6: Overskuddsmasse, SOMMER	64
Fig. 6.7: Fordeling av tetthet og strøm, SOMMER, 72 timer	65
Fig. 6.8: Fordeling av tetthet og strøm, SOMMER, 96 timer	66
Fig. 6.9: Fordeling av tetthet og strøm, SOMMER, 192 timer	67
Fig. 6.10: Fordeling av tetthet og strøm, SOMMER, 204 timer ...	68
Fig. 6.11: Fordeling av tetthet og strøm, SOMMER, 288 timer ...	69
Fig. 6.12: Fordeling av tetthet og strøm, SOMMER, 312 timer ...	70
Fig. 6.13: Fordeling av tetthet og strøm, SOMMER, 336 timer ...	71
Fig. 6.14: Fordeling av tetthet og strøm, SOMMER, 420 timer ...	72
Fig. 6.15: Fordeling av tetthet og strøm, SOMMER, 492 timer ...	73
Fig. 6.16: Partikkelbaner, SOMMER	74
Fig. 7.1: Fordeling av sporstoff, STD1	75
Fig. 7.2: Fordeling av sporstoff, DRAM1	76
Fig. 7.3: Fordeling av sporstoff, GLOMMA	77
Fig. 7.4: Fordeling av sporstoff, SKAG1	78

TABELLER

Tabell 1: Typisk vannføring for Glomma og Drammenselva 15

Forord

Dette er en delrapport i en større undersøkelse av Eutrofisituasjonen i Ytre Oslofjord.

Prosjektet utføres for Statens forurensningstilsyn av Norsk Institutt for Vannforskning i samarbeid med Biologisk institutt, Universitetet i Oslo og Veritas Offshore Technology and Services A/S (VERITEC).

Resultatene av samtlige delundersøkelser vil til slutt bli sammenholdt og skal danne basis for en sammenfattende hovedrapport. De enkelte delundersøkelser blir behandlet og rapportert på sine premisser og vil bare i liten grad kunne trekke inn resultater fra de andre delundersøkelsene.

Denne rapporten er Rapport 2 av 2 fra delundersøkelse 3.3 og beskriver samtlige numeriske eksperimenter og simuleringer foretatt med transportmodellen og resultatene derav. Tilsammen med Rapport 1 utgjør dette en fullstendig dokumentasjon av gjennomførelse, resultater, og konklusjoner fra delundersøkelse 3.3: Transportmodell. Tilsammen gir de, etter vårt skjønn, et godt grunnlag for en helhetlig forståelse av *hvordan* overflatesirkulasjonen i Ytre Oslofjord varierer, *hva* den forårsakes av, samt en unik innsikt i den *betydning* våre største vassdrag har på transportveiene i Ytre Oslofjord.

Kjell Baalsrud
Prosjektleder

1 SAMMENDRAG

1.1 Formål

Formålet med undersøkelsen av Eutrofisituasjonen i Ytre Oslofjord er å anslå behovet for utslippsreduksjoner av eutrofierende stoffer og organisk stoff til Ytre Oslofjord, og å vurdere de forurensede nærområders effekt på Ytre Oslofjord.

Formålet med denne delundersøkelsen er først og fremst å undersøke muligheten av å bruke en forholdsvis enkel numerisk transportmodell til å beskrive og forstå overflatesirkulasjon i Ytre Oslofjord. Dernext gjennom numeriske eksperimenter å undersøke den forholdsmessige betydningen av de ulike ytre påvirkninger, i hovedsak vind og vannføring i de største vassdragene Glomma og Drammensfjorden, på overflatesirkulasjonen.

1.2 Konklusjoner

I denne delundersøkelsen er det bare i begrenset grad vært foretatt sammenlikninger av modellresultater og data innsamlet gjennom de andre delundersøkelser. De sammenlikninger som har vært foretatt har styrket vår tiltro til at det transportmønsteret som modellen beregner til tider er godt sammenliknbart med det virkelige mønsteret tolket utifra observerte data, det være seg satellittdata, hydrografiske data, eller direkte strømmålinger. De resultatene som er beskrevet i denne rapporten gir derfor etter vår mening en god beskrivelse av hovedmønsteret for transporter i Ytre Oslofjord under skiftende ytre forhold.

I første rekke viser resultatene at transportveiene i overflatelaget er høyst variable, med mange virvler som oppstår og dør under de skiftende ytre forhold. Hovedtendensen er imidlertid at det strømmer inn fjorden under økende sørlige vinder, mens det strømmer ut fjorden under nordlige eller avtagende sørlige vinder.

Videre er det klart at transportmønsteret ved et gitt tidspunkt er avhengig av forhistorien, dvs. at fjorden har en "hukommelse". For eksempel viser modellresultatene at hovedstrømretningen ved flere anledninger er ut fjorden selv om det blåser en tildels kraftige sørlig vind. Dette skyldes at det i dagene før pga. kraftig vind har vært en oppstuvning av vann i de indre deler av fjorden, som når vinden spakner skal ut fjorden. Fjordens

hukommelse synes utifra eksperimentene å være 3-4 dager. Dette betyr at det er nødvendig å vite forhistorien 3-4 dager tilbake i tid for å forklare enkeltstående observerte fenomener.

Ellers viser resultatene at det ut i fra dynamiske betraktninger er naturlig og hensiktsmessig å dele Ytre Oslofjord inn i tre delområder (se figur 1). Disse er:

1. *Indre del*, som dekker området fra Drøbak i nord til snittet Horten - Moss i sør, altså i hovedsak Breidangen.
2. *Midtre eller sentrale del*, som dekker området fra snittet Horten - Moss i nord til snittet Fulehuk - Missingen i sør, og
3. *Ytre eller søndre del*, som dekker området fra snittet Fulehuk - Missingen i nord til modellens sørlige rand mot Skagerrak (Rakkebåene - Nord Koster).

Mens den indre delen preges av Drammensfjordens tilstedeværelse, fungerer den midtre delen nærmest som en transportsone mellom den indre og ytre delen. Den ytre eller søndre delen preges imidlertid sterkt av de vindinduserte strømmene langs den svenske vestkyst og ikke som man kanskje skulle vente av Glomma's tilstedeværelse. Kun under perioder med svært rolige vindforhold påvirkes transportmønsteret i denne delen av Glomma. Dette betyr at vann fra Glomma utenfor Hvalerøyene i stor grad transporteres med de vindinduserte strømmer. Innenfor Hvalerøyene, for eksempel i Singlefjorden, dominerer imidlertid Glomma. Stenges Glomma opphører sirkulasjonene i Singlefjorden.

To større, og hyppig forekommende, virvler dominerer strømbildet ellers, en i indre del og en i ytre del. Den indre, her kalt *Mølenvirvelen*, er en syklonal virvel (dvs. sirkulerer *mot* klokken) og opptrer i Breidangen, som oftest med sentrum i nærheten av Mølen. Størrelsen varierer fra å dekke hele Breidangen området til kun å dekke et lite område vest av Mølen. Sentrum av virvelen flytter seg lite, men kan i enkelte tilfelle være langt over mot Jeløya. Dersom vannføringen i Drammensfjorden er meget mindre enn normalt forsvinner virvelen.

Den andre virvelen befinner seg i det nordre partiet av ytre del. Den har som regel sitt sentrum omtrent midtveis mellom Fulehuk og Store Færder, men "vandrer" under de skiftende forhold. Størrelsen varierer

noe, men virvelen rekker gjerne midtfjords. Dette er en antisyklonal virvel (dvs. sirkulerer *med* klokken). Den dannes som regel under økende sørlige vinder og først etter at den midtre og indre del er "fylt" opp med vann.

1.3 Gjennomførelse

Konklusjonene ovenfor er basert på fem idealiserte eksperimenter samt en lengre simulering av overflatesirkulasjonene sommeren 1988 (juli) med en tyngderedusert modell. Modellen er beskrevet i rapport 1 fra dette delprosjektet (YOE 3.3a). De fem eksperimenten samt simuleringen ble gjennomført som følger:

STD1: Formålet med dette eksperimentet var å få frem et bilde av en typisk overflatesirkulasjon i Ytre Oslofjord om sommeren under påvirkning av typiske vinder og vannføringer i fjordens hovedvassdrag, dvs. Glomma og Drammensvassdraget. For å oppnå dette ble modellen drevet med konstante, lette vinder fra sydvest, dvs. 4-5 m/s av retning 225°, og med typiske verdier for vannføring i en mai måned, hhv. 600 m³/s for Drammenselven og 1200 m³/s for Glomma. Dette "standard" eksperimentet danner grunnlaget for senere sammenlikninger med andre eksperimenter hvor betydningen av avvik i vannføring og/eller vindpåvirkning ble undersøkt.

RIVER1: Formålet her var å få frem et bilde av en typisk overflatesirkulasjon i Ytre Oslofjord *uten* vindpåvirkning. Dette er en situasjon som gjerne opptrer om sommeren med svært lette eller ingen vinder. For å oppnå dette ble vinden helt slått av i den videre kjøring av modellen. Dette resulterer i en overflatesirkulasjon kun drevet av vannføringen i fjordens hovedvassdrag, dvs. Glomma og Drammensvassdraget. For å undersøke betydningen av vindpådraget ble dette resultatene sammenliknet med resultatene fra STD1.

DRAM1: Formålet her var å undersøke betydningen av Drammensvassdraget tilstedeværelse på overflatesirkulasjon i Ytre Oslofjord. Dette ble gjort ved å sette vannføringen i Drammenselven til null, men beholde Glomma's vannføring og vindpåvirkningen. Denne situasjonen kan oppstå dersom vannføringen i Drammenselven er liten, mens vannføringen i Glomma fortsatt er normal. Resultatene ble igjen sammenliknet med de oppnådd under STD1.

GLOMMA: Formålet her var på en liknede måte som i DRAM1 å undersøke betydningen av Glomma's vannføring på overflatesirkulasjon i Ytre Oslofjord. Eksperimentet ble gjennomført som for DRAM1, dvs. ved å sette Glommas vannføring til null, og deretter sammenlikne resultatene med STD1.

SKAGI: Skagerraksirkulasjonenes innflytelse på sirkulasjonen i Ytre Oslofjord, overflatelag blir i modellen pådratt gjennom bruk av en robust grenseflatebetingelse. P.g.a. bruk av denne betingelsen er det mulig å undersøke betydningen av de vindinduserte strømmene i Skagerrak på overflatesirkulasjon i Ytre Oslofjord. Dette var derfor formålet med dette eksperimentet, og ble oppnådd ved å neglisjere vindpåvirkningene i tilpassningssonen mot Skagerrak.

SOMMER: I tillegg til disse fem eksperimentene ble det også gjennomført en realistisk simulering av overflatesirkulasjonsmønsteret i Ytre Oslofjord for perioden 14 juli til 4 august 1988 (dvs. 22 dager). Formålet med dette eksperimentet var todelt; å gi informasjon om fjordens responstid på vind- og vannføringsendringer, og å undersøke om det finnes typiske virvelområder. Slike områder ble vurdert som viktige å kartlegge idet de gir opphav til høyst irregulære strømmer, samt at de gir en lang oppholdstid for partikler fanget inn i virvelområdet. Simuleringen ble gjennomført ved å bruke virkelig målt vind fra Færder Fyr, Rauøy og Tofteholmene, samt virkelig målt vannføring i Glomma og Drammenselven.

1.4 Resultater

De enkelte eksperimentene og simuleringen har vist følgende.

1.4.1 STD1

Under en lengre periode med "godvær" vil sirkulasjonen bestå av to hovedtransportveier. Den første er i form av en "slangeliknende" strøm fra munningen av Drammensfjorden (Rødtangen) i nord til Rakkebåene i sør. Fra munningen av Drammensfjorden går strømmen sør-sørøstover mot Vealøs ved Horten, hvor den krysser fjorden over mot Gullholmen (Jeløya). Strømmen fortsetter så på østsiden av fjorden ned mot Eldøya ved Larkollen, hvor den svinger sørvestover mot Bolærne. Bolærne rundes så pent før strømmen fortsetter mot Færder. Ved Færder blandes denne med den andre hovedstrømmen som har sitt utspring i grensefarvannet mellom Sverige og Norge sør for Hvalerøyene.

Den andre og sistnevnte hovedstrøm skyldes i første rekke en vindindusert strøm opp langs svenskekysten, her kalt "svenskestrømmen", men også tilstedeværelsen av Glomma. Den vindinduserte strømmen oppstår ved at de fremherskende sørvestlige vinder presser overflatevannet inn mot Bohuslänkysten. Dette medfører en trykkraft som på grunn av at jorden roterer driver en strøm nordover langs svenskekysten. Svenskestrømmen blander seg så med strømmen fra Glomma's to utløp, men trenger ikke særlig langt inn i Ytre Oslofjord. Dette skyldes et vindindusert mottrykk i de indre og sentrale deler av Ytre Oslofjord som gjør at svenskestrømmen dreies vestover fra Akerø mot Færder. Her blander den seg med strømmen nordfra, og strømmer så sammen med Drammensfjordvann ut av modellområdet som en relativt kraftig sørvestgående kyststrøm ved Svenner (Rakkebåene).

Ellers preges strømbildet av flere store og små virvler. Disse er både syklonale (mot klokken) og antisyklonale (med klokken). Noen av virvlene er nær fastliggende, mens andre forflyttes med den fremherskende strømretningen. I Breidangen finner vi en større syklonal virvel øst for Drammensfjordens hovedstrøm, dvs. i området mellom Mølen og Jeløya. Denne virvelen må forventes å kunne ha konsekvenser for eutrofieringen idet partikler som fanges opp vil kunne få lange oppholdstider i området. I Breidangen finner vi også en mindre antisyklonal virvel i den vestlige delen som dekker området fra Lauvøya opp mot Langøya.

I de sentrale deler finner vi to fastliggende virvler, henholdsvis øst og vest for hovedstrømmen. Den vestlige og antisyklonale er størst og gir opphav til en returstrøm nordover vest for Bastøy (dvs. i Bastøyrenna). Den østlige og syklonale gir en returstrøm fra Eldøya og nordover mot Moss (Verlebukta).

Vi finner også flere små og store virvler i svenskestrømmen. Dette er typiske levirvler som skapes i le av mindre øyer og utstikkende nes. De holder seg først nær sitt opphavsted mens de er i utvikling, men når de er blitt tilstrekkelig store snurpes de av og forsvinner med hovedstrømmen.

1.4.2 RIVER1

Dette eksperimentet gir et resultat som ikke er så ulikt STD1, til tross for at vinden nå er slått av. Den vesentlige forskjellen finner vi den ytre delen hvor den vindinduserte svenskestrømmen er borte og kun den elveinduserte strømmen er igjen.

At de indre og sentrale deler oppviser tilsvarende transportveier som i STD1 kan forklares med at den vindinduserte oppstuvningen under STD1 fører til at den vindrevne del av strømmen etterhvert opphører i disse områdene. Konsekvensen av dette er at kun den elveinduserte delen gjenstår og dominerer derfor strømbildet også i perioder med vedvarende sørlige vinder. Derav følger at tilstedeværelsen av Drammensfjorden er svært viktig for transportveiene i de indre deler av Ytre Oslofjord.

Videre viser dette eksperimentet at det tar *minimum* 8 dager for en partikkel sluppet ut i Drammensfjordens utløp (Rødtangen) å nå Rakkebåene ved Stavern.

1.4.3 DRAM1

Den viktigste endringen fra det mønsteret som er beskrevet under STD1 er at virvelen i Breidangen svekkes betydelig og at strømmen i de sentrale deler av fjorden dør ut. Endringene i den sørlige delen er ubetydelig. Dette har sammenheng med at vinden fremdeles opprettholder et mottrykk slik at vann fra svenskestrømmen ikke får trenge inn. Dette eksperimentet understreker resultatet fra RIVER1, nemlig at Drammensvassdraget er en vesentlig kilde til strømmer i indre del av Ytre Oslofjord. En annen konsekvens av denne tolkningen er at det i perioder med økende sønnavind er mulig for Drammensfjordvann og trenge inn i Indre Oslofjord forbi Drøbak.

1.4.4 GLOMMA

I motsetning til DRAM1 hvor vannføringen i Drammensvassdraget ble satt til null har ikke en tilsvarende drastisk endring i Glomma's vannføring noen vesentlig innflytelse på sirkulasjonsmønsteret i Ytre Oslofjord. De største endringene finner sted i lokalområdet (Hvaler) ved at strømmene i Løperen og Singlefjorden stopper opp. Dette har sammenheng med at sirkulasjonen i de ytre deler av Ytre Oslofjord domineres av den vindinduserte strømmen, som ved sørlige vinder som her, gir en strøm inn i modellområdet ved Hvaler (se eksperiment SKAG1).

1.4.5 SKAG1

Å se bort ifra den vindinduserte svenskestrømmen, som gjort i dette eksperimentet, gir de mest dramatiske endringer i transportveiene i forhold til STD1. Konsekvensen er at den lokale vindoppstuvningseffekten

ikke er tilstrekkelig til å opprettholde balansen lenger inn i fjorden som derved tømmes. Dette tar 2 til 3 døgn. Etter at fjorden er tømt vil transportveiene i overflaten i de indre og sentrale deler av Ytre Oslofjord likne svært på de vi så for RIVER1. Konsekvensen av at fjorden er "tømt" er at de øverste lagene vil være forholdsvis tyngre enn de ellers ville ha vært. Dette gir grunn til å fremkaste hypotesen om at svenskestrømmen har en enorm betydning ikke bare for de ytre deler, men at virkningen av endringer i denne strømmen vil kunne påvises i hele Ytre Oslofjord.

1.4.6 SOMMER

Det er naturlig å dele Ytre Oslofjord i de tre geografiske områdene beskrevet ovenfor. Perioden som var valgt (14 juli til 4 august, 1988) svarte til en periode med høyere vannføring både i Glomma og Drammensvassdraget enn normalt (nær $1500 \text{ m}^3/\text{s}$ for Glomma og nær $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ for Drammenselven). Perioden inneholdt en godværsperiode fra 17 til 24 juli med to påfølgende kraftige uværsperioder, 24 -27 juli og 29 juli til 1 august, hvor vindstyrken nådde et maksimum i overkant av 20 m/s natt til 31 juli.

På grunn av den forholdsvis høye vannføringen i Drammenselven preges strømbildet i Breidangen av den før omtalte syklonale virvel. Ved sørlige vinder strømmer det inn i området gjennom snittet Horten - Jeløya. Under perioder med økende vind vil denne strømmen holde seg langs Jeløya og trenge inn i Drøbaksundet. Strømskjæret som da oppstår vil bidra til å opprettholde virvelen. Ved avtagende sørlige vinder eller ved nordlige vinder vil strømmen som kommer ut fra Drøbaksundet holde seg langs Hurumlandet til den møter utstrømningen fra Drammensfjorden hvor den blander seg med denne og dreies sørover. Denne strømmen går delvis sørover ut gjennom snittet Horten - Jeløya, men en del av den går også nordover igjen på nordvestsiden av Jeløya, avhengig av vindforholdene. Hovedinntrykket er altså at det ved økende nordavind eller minkende sønnavind vil vann fra Drammenselva sammen med oppstuvet vann i Breidangen og Indre Oslofjord strømme ut gjennom snittet Horten - Jeløya. Ved økende sønnavind vil det stort sett strømme innover gjennom hele snittet Horten - Jeløya, og vann fra Drammensfjorden vil strømme rundt i Breidangen og delvis inn Drøbaksundet.

I de sentrale deler av fjorden er strømmen svært avhengig av vindforholdene. Området fungerer mest som en transportsone mellom Breidangen og den søndre delen av fjorden. Ved økende sønnavind eller

avtagende nordavind vil det strøomme nordover i dette området, og omvendt ved avtagende sønnavind eller økende nordavind vil det strøomme sørover og noen ganger forsterket på grunn av vann som er stuvet opp i Breidangen og Indre Oslofjord.

Dersom vi har perioder med stabil sønnavind (som sommeren 1988) vil vi oppnå tilnærmete stasjonære forhold og strømmen fra Drammensfjorden krysser fjorden omtrent ved snittet Horten-Jeløya, følger så østsiden av fjorden ned mot Eldøya. Her har strømmen en tendens til å svinge vestover mot Bolærne for å runde Fulehuk. På sidene av denne hovedstrømmen dannes det to virvler som er strukket ut i nord-sør-retningen. På vestsiden dannes det en virvel som gir en nordgående returstrøm på vestsiden av Bastøy. På østsiden dannes det en virvel lenger sør som gir en returstrøm på vestsiden av Rauøy opp mot Verlebukta ved Moss.

I de periodene der vindforholdene skifter blir dette mønsteret raskt brutt opp, og det kan i noen tilfelle dannes virvler som strekker seg i hele fjordens bredde. Disse blir imidlertid lett forflyttet ut av området ved kraftig inn- eller utstrømning gjennom dette området som følge av vesentlige endringer i vindforholdene.

I det sørlige området er sirkulasjonen i det alt vesentlige styrt av det som skjer på grenseflaten i sør. Den vindinduserte svenskestrømmen, dominerer sirkulasjonsmønsteret i denne delen, som stort sett strømmer tvers over munningen av Ytre Oslofjord fra Akerø mot Færder. Under ekstreme vindforhold kan svenskestrømmen trenge langt inn i fjorden, men vil sjelden trenge lenger nord enn Bolærne før den vender sørover igjen. Dette er svært avhengig av vindforholdene og forhistorien, dvs hvor mye vann som allerede er stuvet opp i fjorden. I denne kraftige strømmen dannes det levirvler bak Tisler. Disse virvlene vil snurpes av og forflyttes med strømmen først vestover, senere sørover og ut av modellområdet. Også utstrømningen fra Glommas vestre og østre utløp vil følge denne strømmen vestover, og transportene fra Glomma går derved inn i kyststrømmen. I den perioden som er simulert strømmer det sjelden sørover i den sørøstre delen av Ytre Oslofjord.

Til slutt bør nevnes at når svenskestrømmen holder seg syd for Færder domineres bildet mellom Færder og Bolærne av en kraftig antisyklonal virvel. Denne virvelen dannes ofte i dette området og dominerer strømmønsteret mellom Fulehuk og Store Færder.

1.5 Anbefalinger

Området i nordøstre del av Skagerrak viser seg som ventet å være et meget aktivt dynamisk område. Fra et modellsynspunkt er det derfor uheldig å begrense integrasjonsområdet akkurat her. For å være sikret et mer korrekt sirkulasjonsmønster i den søndre delen av området bør en i fremtidige beregninger utvide modellområdet slik at det blir større avstand mellom grenseflaten og de områdene som skal studeres. Ideelt sett kan dette effektivt gjøres ved at en kan kjøre en litt grovere numerisk modell for området som ligger utenfor randen (f. eks. for et område som dekker Skagerrak og deler av Kattegat) og bruke de resultatene som denne modellen gir som inngangsdata.

For vissé områder kan det også se ut som strømningsmønsteret er noe kunstig (f.eks. området sørvest av Vesterø). Disse områdene faller sammen med grunne områder, og områder med mye skjær i sjøen. Slike områder representerer en vesentlig hindring for strømmen. Det bør derfor vurderes i modellsammenheng om ikke slike områder bør representeres ved "kunstige" øyer.

Under dette delprosjektet har det bare vært foretatt sporadiske sammenlikninger "over bordet" med data samlet inn gjennom andre delprosjekter. Disse har imidlertid styrket vår tiltro til at det strømningsmønsteret som modellen beregner er godt sammenliknbart med det virkelige mønsteret tolket utifra observerte data, det være seg satellittdata, hydrografiske data, eller direkte strømmålinger. Det anbefales derfor at det avsettes tid og kostnader til en verifikasjon (sammenlikning) av observerte data og modellresultater, kanskje med særlig vekt på satellittdata, fremover.

Til slutt er det verdt å nevne de preliminare sporstoff forsøkene. Disse synes å ha et særlig potensiale, med tanke på å modellere også spredning av partikulært materiale (f.eks. partikulært nitrogen). En bør derfor gjennomføre forsøk som inkluderer flere av de prosessene som styrer forflytning, spredning, og sedimentering av ulike metaller, organisk materiale og næringssalter.

2 INNLEDNING

2.1 Oppdragsgiver

Statens forurensningstilsyn (SFT), tok høsten 1987 initiativ til en bred og intensiv undersøkelse av eutrofieringsproblemene i Ytre Oslofjord. Norsk institutt for vannforskning (NIVA) ble bedt om å utarbeide et forslag til program. Arbeidet skulle foregå som ledd i Statlig program for forurensningsovervåking. Det endelige forslag, datert 4 mai 1988, ble lagt til grunn for undersøkelsen. Prosjektledelsen har vært hos NIVA. Gjennomføringen er basert på et nært samarbeid med Universitetet i Oslo og Veritas Offshore Technology and Services A/S (VERITEC).

VERITEC har hatt ansvaret for feltmålinger og analyse av hydrografiske data og strømdata. VERITEC har også hatt ansvaret for utvikling av en transportmodell for overflatelaget i Ytre Oslofjord samt analyse av resultatene fra eksperimenter med samme.

2.2 Formål

Formålet med denne delundersøkelsen er å undersøke muligheten av å bruke en forholdsvis enkel numerisk transportmodell til å beskrive og forstå overflatesirkulasjon i Ytre Oslofjord. Dernest gjennom numeriske eksperimenter å undersøke den relative betydningen av de ulike ytre påvirkninger, i hovedsak vind og vannføring i de største vassdragene Glomma og Drammensfjorden.

2.3 Transportmodellen

Den valgte numeriske modellen til beskrivelse av transportveier i overflatelaget av Ytre Oslofjord er beskrevet i detalj i EYO 3.3a. Her følger kun en meget kort oversikt. Modellen kalles en tyngderedusert modell og er basert på en modell utviklet for det Indiske hav av Luther og O'Brien (1985). Effekten av fjordens lagdeling er tatt hensyn til ved innføringen av en redusert tyngdeaksellerasjon og ved å betrakte bevegelsen knyttet til de øvre vannmasser. De matematiske likningene som styrer bevegelsen er imidlertid ikke-lineære, noe som er nødvendig for å kunne simulere virvler.

De resultater modellen gir er vesentlig knyttet til vind- og tetthetsdrevne transportene i de øvre vannmasser og de tilhørende endringer i de øvre vannmassers tetthet, representert ved en parameter kalt "øvre lags tykkelse". Jo tykkere øvre lag, jo lettere vann og vice versa. Modellen tar ikke hensyn til bevegelsen i de nedre lag, men det er viktig å være klar over at transporten (eller fluksen) i nedre lag er like stor og motsatt rettet av transporten i øvre lag. På denne måten blir en estaurine sirkulasjon opprettholdt. Modellen er hva som kalles en ren baroklin modell og har derfor ikke i seg strømmer som skapes på grunn av overflatens helning (såkalte barotrope strømmer). Vinden som er det viktigste pådraget parameteriseres ved hjelp av en vindspenning på overflaten, mens elvenes vannføring tilføres fjorden som bevegelsesmengde.

2.4 Organisering av denne rapporten

Denne rapporten beskriver og diskuterer resultatene fra eksperimenterne STD1, RIVER1, DRAM1, GLOMMA, og SKAG1, samt en simulering av forholdene sommeren 1988 (juli/august) kalt SOMMER.

Nedenfor i kapittel 3 er først gitt en beskrivelse av hvordan vind og elver overfører sin bevegelsesmengde til strømmer i modellen. Deretter (kapittel 4) er de to eksperimenterne STD1 og RIVER1 beskrevet. Resultatene herifra gir informasjon om hva vi har valgt å kalle Ytre Oslofjord's normale sirkulasjon. Med dette mener vi det strømmønsteret en ville få dersom de ytre forhold var nær sine gjennomsnittlige verdier og ikke endret seg over en lengre periode, dvs. en uke eller mer.

Deretter i kapittel 5 er eksperimenterne "DRAM1", "GLOMMA3", "SKAG1" beskrevet. Resultatene fra disse eksperimenterne er ment å gi informasjon om endringen i den "typiske" sirkulasjonen som følge av dramatiske endringer i en (og kun en) av de ytre pådrag. Eksperimentet "DRAM1" beskriver derfor avviket fra det typiske strømmønsteret dersom vannføringen i Drammenselva settes til null. Tilsvarende er eksperimentet "GLOMMA" ment å gi avviket fra en "normal" situasjon dersom Glomma's vannføring settes lik null. Det siste av disse eksperimenterne, "SKAG1" beskriver endringer som følge av endringer i Skagerrak sirkulasjonen.

Kapittel 6 inneholder en beskrivelse av SOMMER eksperimentet, også kalt simulerings-eksperimentet. Dette er et første forsøk på å simulere de "virkelige" transportveier i Ytre Oslofjord under realistiske betingelser. Simuleringen er basert på observerte verdier av vind (fra

Færder og Rauøy) og vannføring i Drammensvassdraget og Glomma. Simuleringen dekker en periode på 22 dager fra 14 juli til 5 august, 1988 og inneholder den perioden hvor august toktet ble gjennomført (se EYO 3.4a, EYO 3.5a-c).

Rapporten avsluttes med kapittel 7 hvor resultatene fra en preliminær studie for å undersøke muligheten av å simulere spredning av sportoff er oppsummert. Dette danner grunnlaget for en eventuell videreføring av denne type beregninger. Her er bare tatt med forberedende arbeid som er gjort utover den opprinnelige spesifikasjon. Det betyr at resultatene peker mot de muligheter som slike analyser kan gi, mens de enkelte resultater i seg selv er virtuelle.

3 OPPSETT FOR ELVE- OG VINDPÅDRAG

Dette kapittelet begrenser seg til å beskrive oppsettet for vind- og elvepådrag for de to typiske sommersirkulasjonene (kap. 4) og de tre ideelle eksperimentene (kap. 5). Oppsettet for sommer simuleringen er beskrevet for seg i kapittel 6.

3.1 Elveinnstrømning

Vassdragenes vannføring, her kalt Q_f , (f for ferskvann) er målt et godt stykke ovenfor elvemunningen. Området fra den posisjon hvor vannføringen er målt og til munningens posisjon svarer grovt til modellens tilpassningssoner (FRS soner). Vannføringen er først omregnet til strømfart. Dette er gjort ved først å anslå en bredde B_f og dybde h_f for deretter å beregne strømfart fra formelen,

$$u = \frac{Q_f}{B_f h_f}. \quad (3.1)$$

For dybde og bredde er brukt h.h.v. $h_f = 2m$ og $B_f = 100m$. Gjennom FRS sonen oppblandes dette vannet med saltere vann fra den underliggende saltkilen til tettheten er tilnærmet lik fjordens tetthet. Bevegelsesmengden blir derfor redusert på grunn av dette samt at bredden av munningen B er bredere. For bredden B har vi brukt breddene av de respektive FRS sonene. For nærmere detaljer henvises til EYO 3.3a.

Som nevnt over er bevegelsen startet fra en tilstand uten strøm. Bevegelse skapes ved å "trekke opp" vannføringen, Q , i elvene gradvis over en periode til den typiske konstante verdien Q_0 gitt ved funksjonen

$$Q(t) = Q_0(1 - e^{-\gamma t}) \quad (3.2)$$

hvor γ er bestemt slik at Q oppnår 2/3 av sin stasjonære verdi i løpet av 10 timer (dvs. $\gamma = (\ln 3/36000.0)s^{-1}$).

Typiske verdier, Q_0 , for vassdragene er hentet delvis fra tidligere undersøkelser (Magnusson og Næs, 1986) og delvis fra Norges Vassdrags og Elektrisitetsvesen (NVE), Hydrologisk avdeling (se Tabell 1 nedenfor).

Vassdrag	Mai	Juni	Juli	August	Typisk verdi
Drammenselven	505	429	246	212	600
Glomma Vestre					240
Glomma Østre					960
Glomma totalt	1202	1353	1120	878	1200

Tabell 1: Gjennomsnittlige månedsverdier (i m^3/s) for perioden 1931-1960 for vannføring i Glomma og for perioden 1981-1980 for Drammenselva. Også gjengitt er "typiske" verdier brukt i modellberegningene. Typisk verdi for Drammenselva er noe i overkant av de observerte månedsmidler, men er allikevel godt innenfor forventede verdier for en "normal" sommer.

For de andre parametrene har vi brukt de standard-verdiene som er gitt i EYO 3.3a.

3.2 Vindpådrag

I modellen må vindpåvirkningen gis i form av en vindspenning og ikke som vindhastighet. I henhold til klassisk teori for overgangen vindhastighet til vindspenning (se f. eks. Large and Pond, 1981) brukes også her uttrykket:

$$\vec{\tau} = \rho_a C_D |\vec{W}| \vec{W}, \quad (3.3)$$

hvor $\vec{\tau}$ er vindspenningen, ρ_a er luftens tetthet, C_D en drakoeffesient, \vec{W} vindhastigheten og $|\vec{W}|$ vindfarten.

Som typisk vind har vi brukt middelvinden på Færder Fyr hentet fra Den norske Los, Bind I. I sommermånedene juni, juli og august er den hyppigste vindretning fra sørvest (210° med en styrke på $|\vec{W}| = 4-5 m/s$. Med en luft-tetthet på $\rho_a = 1.2 kg m^{-3}$ og en drakoeffisient på $C_D = 1 \cdot 10^{-3}$ gir det en vindspenning av størrelse $|\vec{\tau}| = 0.03 Pa$. Retningen til vindspenningen svarer til vindretningen og er gitt ved 210° .

For å sikre en "myk" overgang fra vindstille til fullt vindpådrag er det på samme måte som med elvepådraget valgt en "opptrekkstid" på 12 timer for vinden i alle eksperimenter. Dermed vil vindspenningen i løpet av

de første 12 timene av simulert beregningstid øke fra null til maksimal (konstant) verdi som en Gauss-klokkefunksjon med en tilpassningstid på 6 timer.

For randbetingelse i sør, dvs. mot Skagerrak, er det, i tillegg til den før nevnte utstrømningen som balanserer ferskvannsavrenningen; også gitt en enkel Ekman balanse (se EY0 3.3a, kapittel 5.2.2). Friksjonskoeffisienten på skilleflaten er satt til $R = 4.8 \cdot 10^{-4} m s^{-1}$, slik at Ekman-transporten relativt raskt vil anta en tilnærmet stasjonær tilstand.

4 TO TYPISKE SOMMERSIRKULASJONER I YTRE OSLOFJORD

Vi tar her sikte på å etablere en "normal" sommer situasjon for ytre Oslofjord, dvs. den sirkulasjonen som etableres ved å velge typiske, men dog konstante, verdier for de ytre pådrag, såsom vind og ferskvannsavrenning, for en typisk sommer i Oslofjordområdet.

Dette har vi gjennomført i to steg. Først har vi etablert en "normal" sirkulasjon i fjorden kun ved å bruke "typiske" for ferskvannsavrenningen fra de to største elvene Glomma og Drammensvassdraget. Dette eksperimentet har vi kalt *RIVER1*. Deretter har vi lagt på en typisk sommervind ved å bruke verdier for vind målt på Færder Fyr (moderat sørvestlig vind). Det siste eksperimentet har vi kalt *STD1*. De to sirkulasjonsmønstrene som da fremkommer er som følger:

- En typisk sirkulasjon for en sommer med lite eller ingen vind (*RIVER1*)
- En typisk sirkulasjon for en sommer med lette sørvestlige vinder (*STD1*).

4.1 Eksperiment *RIVER1*: Kun elvepådrag

Her tar vi ganske enkelt og ser bort ifra vindkraftene ved å sette vindspenningene lik null, men beholder en typisk vannføring i Glomma og Drammensvassdraget som gitt i kapittel 3. Den tilførte vannmasse fra elvene er balansert av en tilsvarende utstrømning gjennom den åpne randen mot Skagerrak i sør ved at den totale utgående volumfluks svarer til den innkomne volumfluks fra de to store vassdragene. Videre er denne utstrømningen jevnt fordelt over hele den åpne randen slik at ingen del er spesielt foretrukket. De øvrige render er spesifisert som beskrevet i EYO 3.3a. Spesielt er randbetingelsen ved Drøbak konstruert for å simulere virkningen av et basseng på størrelse med Indre Oslofjord (se EYO 3.3a for detaljer).

Med dette oppsettet er et tidsforløp av sirkulasjonen simulert. Til å begynne med er det ingen strøm og tettheten er den samme over hele beregningsområdet (dvs. lik tykkelse). Strømmen "trekkes" så igang ved hjelp av de gitte ferskvannstilførslene fra Glomma og Drammensvassdraget (Tabell 1).

Tidsutviklingen er fulgt ved å ta ut parametere og felter i henhold til spesifikasjonen (se EYO 3.3a, kapittel 7). Spesielt har vi i sett på øyeblikksbilder av tykkelsesfeltet (eller tetthetsfeltet) for hvert døgn (dvs. med 24 timers mellomrom). Stasjonærhet ble testet ved å sammenlikne avviket mellom to påfølgende øyeblikksbilder (altså med 24 timers mellomrom). Beregningene ble på dette grunnlag stoppet etter åtte døgn (192 timer) simulering. Tykkelsesfeltet var da tilnærmet likt tykkelsesfeltet etter syv døgn simulering, bortsett fra avvik i områder dominert av virvler (se Figurene 4.1a og b).

Tilstedeværelsen av virvler er naturlig på grunn av Oslofjordens topologi, idet bakevjer naturlig vil dannes i le av nes og odder. Videre er det naturlig at slike virvler vil bevege seg noe idet de har en tendens til å bli forflyttet eller "trukket" med av det fremherskende strømfeltet forøvrig. Vi anser derfor at resultatene etter 8 døgn simulering gir et godt bilde av en normal sirkulasjon i Ytre Oslofjord under forhold med lite eller ingen vind.

Fra Fig. 4.1 legger vi merke til at strømmen stort sett peker i en retning som er parallell med linjene for konstant tetthet. Dette indikerer at feltet er i nær geostrofisk balanse, dvs. at tykkelsesfeltene nærmest er å regne for strømlinjer. Samtidig se vi at jo tettere linjene ligger hverandre jo sterkere er strømmen (lengre piler).

I store trekk viser dette mønsteret en slangelignende sørgående hovedstrøm i fjorden fra Drammensfjorden til Rakkeåene sør for Stavern, samt en vestgående hovedstrøm fra Hvalerområdet over mot Tristein (Færder Fyr). Vannet fra Drammensfjorden strømmer først i sørøstlig retning mot Vealøs nord for Horten for så å krysse fjorden over mot Guldholmen samtidig som den dreier sørover. Hovedstrømmen holder seg så på den østre siden av fjorden ned mot Eldøya, dreier så svakt over mot Bolærne og runder disse. Sør for Bolærne og henimot Færder holder denne strømmen seg på fjordens vestsida. Sør for Færder smelter den så sammen med den vestgående strømmen fra Hvalerområdet og danner en sørvestgående "kyststrøm" som renner ut av modellens integrasjonsområde ved Rakkeåene sør for Stavern.

Detaljene i strømmønsteret domineres av tre store virvler. Den nordligste av disse befinner seg i Breidangen området og ligger tilnærmet i ro (se Fig. 4.1). Denne virvelen er syklonal (dvs. sirkulerer mot klokken). Videre er det dannet en mindre og svakere antisyklonal virvel i området

nord og vest for Horten mellom Lauvøya og Langøya. Dette indikerer at en god del av vannet fra Drammensfjorden resirkulerer i Breidangen selvom storparten følger med hovedstrømmen sørover.

Sør for Breidangen, mellom snittene Horten-Moss og Fulehuk-Missingene, finner vi nok en dominerende syklonal virvel nord og vest av Rauøy. Denne virvelen har en tendens til å forflytte seg sørover i hovedstrømmens retning (se Fig. 4.1). Denne forflytningen fører til at hovedstrømmen blir smalere og presses noe nærmere Bolærne samtidig som strømhastigheten forsterkes. I dette området finner vi også noen mindre virvler, en antisyklonal virvel vest av hovedstrømmen sør for Bastøy og noen små syklonale virvler øst av hovedstrømmen i området mellom Jeløya og Eldøya. Dette fører til at strømmen i Bastøyrenden preges av en svak nordgående strøm.

I den sørlige delen av Ytre Oslofjord finner vi en tredje virvel i området vest av Vesterøy og Akerøy. Denne virvelen er antisyklonal og forflytter seg med den vestgående hovedstrømmen samtidig som den dypes (forsterkes) noe. Opprinnelig er den dannet vest av Tisler, hvor strømmen fra Glomma's østre løp ut gjennom Løperen dreier vestover. Det er derfor ventelig at nok en antisyklonal virvel vil dannes her i kjølvannet av den foregående, etterhvert som den sistnevnte trekker seg vestover.

Ellers ser en også at det blir etablert en "kyststrøm" langs vestsiden av fjorden fra Færder og sørvestover. I grenseflatebetingelsene for den sørlige randen er det spesifisert at utstrømningen som skal balansere innstrømningen fra elvene skal være jevnt fordelt langs hele randen. Denne kyststrømmen er derfor ikke diktert, men snarere et resultat av den indre dynamikken.

Partikkelbanene basert på dette eksperimentet er vist i Fig. 4.2 og gjenspeiler både de store og små trekk i det bildet som er dannet ovenfor. Vi legger merke til at ingen av partiklene som er sluppet ut i Hvalerområdet når nord for snittet Fulehuk-Missingen. Vi legger også merke til at partiklene nå og da blir oppfanget i virvlene. Spesielt gjelder dette partiklene sluppet ut i Drammensfjordens munning, og i noe mindre grad partikler sluppet i enden av Løperen.

Det fremgår også at Søstrene er en vesentlig hindring for strømmen ut av Glomma's vestre løp. Dette fører til en tydelig oppsplitting av strømmen og partiklene sluppet ut lengst i sør i Glomma's vestre utløp for en

"skjebne" svært forskjellig fra de resterende partiklene sluppet bare noe lengre nord. Disse blir ført med en strøm som "sniker" seg langs Vesterø innenfor Søstrene og ned mot Akerø.

4.2 Eksperiment STD1: Vind- og elvepådrag

Som nevnt over er vi på jakt etter en typisk fjordsirkulasjon som følge av påvirkning fra typiske verdier for både vind og ferskvannsavrenning. Som begynnelsestilstand for denne beregningen bruker vi derfor det tilnærmet stasjonære strømmønsteret som beskrevet ovenfor i kapittel 4.1. En ny sirkulasjon trekkes så igang ved å legge på et konstant vindfelt og beregningene ble først videreført inntil en ny tilnærmet stasjonær tilstand ble oppnådd (igjen ca. 8 døgn), men ble så deretter fortsatt i nye 8 døgn (tilsammen 16 døgn) for å sjekke stasjonariteten. Under beregningene er hastighet- og tykkelsesfeltene tatt ut hver 12 time. To påhverandre følgene felter er så sammenlignet for å undersøke avvik fra foregående tidspunkt. Etter nye 16 døgn da beregningene ble er somdet fremgår av Figurene 4.3a og b avvikene små, bortsett fra i virvelområder.

Et godt mål for hvor stasjonær den oppnådde tilstanden er får en ved å se på tidsforløpet til den totale kinetiske energi og den totale tilgjengelige potensielle energi (se EYO 3.3a for definisjoner) som gjengitt i Fig. 4.4.

Det fremkomne sirkulasjonsmønsteret, spesielt i de indre og sentrale deler av fjorden (se Fig. 4.3), er overraskende nok ikke ulikt det vi fant uten vind (Fig 4.1). Dette har sammenheng med at pådraget fra den sørvestlig vinden, som normalt fører til nordgående strømmer i fjorden, etter 1 til 2 døgn blir balansert av et mottrykk. Dette fører til at strømmene, ihvertfall for de sentrale og indre deler av ytre Oslofjord, stopper opp, og strømmene som skyldes ferskvannsavrenningen vil igjen dominere bildet. Vanligvis vil ikke vinden, i en godværsommer, stå på fra sørvestlig kant som antatt her, men mere ha karakter av solgangsbris. Som vi senere skal se (kapittel 7), vil solgangsbrisen medføre en "pumpe-effekt" i de sentrale og indre områder av fjorden.

Som følge av dette er hovedtrekkene som for RIVER1, dvs. at bildet domineres av en svak slangeliknende sørgående strøm, med en syklonal virvel beliggende i Breidangen. De største forskjellene finner vi i de ytre deler av fjorden sør for snittet Fulehuk-Missingen. Den sørvestlige vinden gir her opphav til en strøm som kommer opp langs svenskekysten

(i det videre kalt "svenskestrømmen"). Den forplanter seg videre nord-nordvest over i området vest for Hvaler og dreier samtidig vestover for å smelte sammen med den sørgående strømmen fra de indre og sentrale deler. Denne strømmen har karakter av en omvendt flat U. Vi legger også merke til at den sørgående "kyststrøm", som dannes sør for Færder langs norskekysten, forsterkes ganske kraftig på grunn av denne strømmen.

Strømmen opp langs svenskekysten berører bare i liten grad de sentrale deler av fjorden. Faktisk er den begrenset til et område sør for snittet Færder-Akerøy. Dette har sammenheng med mottrykket som bygger seg opp i de indre og sentrale deler av fjorden, som forhindrer strømmen i å trenge inn i fjorden.

Tidsseriene av strøm (se f.eks. Fig. 4.5) viser at det oppstår en del tyngdesvingninger i fjorden under oppstartingen av dette eksperimentet. Disse svingningene blir ganske raskt dempet ut, avhengig av posisjonen i bassenget. Allerede etter 1-2 døgn er mesteparten av svingningene forsvunnet. Videre ser vi fra tidserien av kinetisk energi (Fig. 4.4) at vinden i begynnelsen bidrar til å dempe bevegelsen i modellen noe. Men etter ca. ett døgn stiger den kinetiske energien kraftig, for så å stabilisere seg på det nye stasjonære nivået. Vi legger merke til at dette nivået er vesentlig høyere enn det tilsvarende nivå uten vind. Dette har sammenheng med den U-formete strømmen i den ytterste del av fjorden, som altså bidrar vesentlig til å øke den kinetiske energien.

Tidsseriene viser også at det oppstår en del småsvingninger fra 75-100 timer etter start. Disse svingningene er falske og har sammenheng med at modellen er startet på nytt 72 timer. Ved dette tidspunktet ble det foretatt noen endringer i programmet som beskriver bevegelsen i FRS sonen i sør. Dette gir et lite "sjokk" når modellen startes påny og tyngdesvingninger oppstår umiddelbart. Svingningene er mest merkbare i de sørligste punktene G og H. Svingningene dempes imidlertid relativt hurtig bort og har derfor liten innflytelse på den endelige tilnærmete stasjonære sirkulasjonen selv etter "bare" åtte døgn simulering.

En annen effekt av vindkraftene er at virvelen som oppstod vest av Akerøy er blitt ødelagt. Strømmen fra vestre utløpet av Glomma går nå med "svenskestrømmen" rett vestover, smelter sammen med strømmen fra Drammensfjorden ved Færder og forlater integrasjonsområdet via Kyststrømmen.

Transporten av Glommavann fra Glomma's østre utløp går vesentlige gjennom Løperen, mellom Asmaløy og Kirkøy. Men vi ser at av Fig. 4.3 at Løperen er for saml og at noe av Glommavannet presses ut i Singlefjorden. Dette bekreftes av satelittbilder fra samme område (se rapport fra delundersøkelse 3.7).

Både det storstilte og detaljerte mønsteret som er beskrevet ovenfor er anskueliggjort ved hjelp av opptegning av partikkelbaner (Fig. 4.6). Som i RIVER1 er partiklene sluppet ut ved munningen av Drammensfjorden (4 stk.), ved munningen av Glomma's vestre utløp (7 stk.), og ved Glomma's østre utløp i sørenden av Løperen (5 stk.). Til forskjell fra det foregående eksperimentet ser vi at nå blir alle partiklene fra Drammensfjorden transportert sørover og gjennom snittet Horten-Moss og forbi Bastøy. De følger også omtrent de samme banene, men med forskjellig fart. Bare en av partiklene blir oppfanget i en virvel mellom Bastøy og Horten, mens en annen tar veien over fjorden til nordenden av Rauøy. Vi ser også at de partiklene som er sluppet ut i utløpene av Glomma etterhvert går vestover og inn i kyststrømmen. Partiklene fra Glommas østre løp blir transportert raskt vestover, og etter mindre enn fire døgn er de raskeste partiklene transportert tvers over fjorden fra Løperen til Færder. Etter vel fem døgn er noen av partiklene ute av modellområdet ved Rakkebåene. Partiklene fra Glommas vestre løp viser et annet mønster, og igjen er Søstrene en vesentlig hindring. De deler seg grovt i tre skjebner. De som er sluppet ut lengst nord går nordover med liten fart. De som er sluppet ut midt i munningen går vest-sørvestover og inn i strømmen fra Drammensfjorden, skyter fart og fraktes hurtig med Kyststrømmen ut av området. De lengst sør sniker seg igjen innenfor Søstrene og sørover hvor de imidlertid ganske fort blir oppfanget av "svenskestrømmen" og fraktes nordover og vestover.

5 TRE IDEELLE EKSPERIMENTER

I henhold til prosjektbeskrivelsen, har vi begrenset oss til å se på virkningen av (i) å strupe Drammensvassdraget, (ii) å strupe Glomma's to utløp, og (iii) endre betingelsene på grensen mot Skagerrak (dvs. strupe svenskestrømmen). Undersøkelsen består i studere avvik fra den typiske sirkulasjon som beskrevet ovenfor.

5.1 Eksperiment 1: Drammensvassdragets betydning (DRAM1)

Som begynnelsestilstand for dette eksperimentet har vi valgt den dynamiske balansen fra standard-eksperimentet, STD1, beskrevet over. Deretter er vannføringene i Drammensvassdraget gradvis nedtrappet til null. Dette siste er nødvendig for å redusere treghets-tyngde svingninger som ellers vil oppstå ved plutselig å sette vannføringen lik null. Nedtrappingen skjer lineært og i løpet av seks timer. En tilsvarende nedtrappingen er også foretatt på den sørlige randen mot Skagerrak hvor utstrømningen som balanserer massetilførselen fra elvene er redusert tilsvarende. Vindkrefter og de andre grenseflatebetingelsene har ellers de samme verdiene som i STD1.

Av Fig. 5.1, som viser tidsutviklingen av den totale kinetiske energi, ser vi at mens det tok bortimot åtte døgn å oppnå en tilnærmet stasjonær tilstand for STD1 tar det bare 2-3 døgn å oppnå det samme etter å ha avstengt Drammenselva. Imidlertid ser vi at den kinetiske energien stiger svakt (ca. 5%) i løpet av de siste 2 døgnene, og har fortsatt en stigende tendens etter 96 timer. Dette har trolig sammenheng med dannelsen av virvler. Dette inntrykket styrkes av synlige små fluktuasjoner i tidsseriene for overskuddsmasse, potensiell energi, og delvis også kinetisk energi er etter ca. 50 timer (se Fig. 5.1).

Som forventet er de indre deler av fjorden, og spesielt Breidangen, følsom overfor vannføringen i Drammenselva. Av Fig 5.2 ser vi da også at strømmene etter 96 timer (4 døgn) innenfor Fulehuk er nær null. Imidlertid antyder figuren at det fremdeles er rester av virvelen igjen i Breidangen.

Det er grunn til å anta at denne virvelen i noen grad opprettholdes av vindpådraget. Vinden, som er av sørlig retning, har en tendens til å transporterer vann nordover langs Jeløylandet. Denne strømmen er ikke kompensert ved en tilsvarende vindstrøm inn mellom Vealøs og Guldholmen og tas derfor fra områdene nord for Horten. Videre er Indre Oslofjord

"fullt" slik at denne strømmen ikke trenger inn i Drøbaksundet, men returneres istedenfor vestover mellom Tofte og Mølen. Dette mønsteret blir også bekreftet av opptegningene av partikkelbaner (se Fig. 5.3).

5.2 Eksperiment 2: Glommas betydning (GLOMMA)

Både det vestre og østre løpet blir stengt av parallelt. Vi har ikke gjort forsøk med avstenging av bare det ene løpet. Da den overveiende delen (80 %) av innstrømmingen kommer fra det østre løpet, vil det være dette som gir bidrag til sirkulasjonen. Tilsvarende som for Drammenselva vil vi stenge av innstrømmingen fra Glomma gradvis i løpet av de første seks timene av eksperimentet for å redusere tyngdesvingninger i modellen. Beregningene foregår over en fire døgns periode inkludert nedtrappingsperioden på seks timer.

På samme måte som for DRAM1 viser tidserien av den totale kinetiske energien (Fig. 5.4) at etter 48 timer er sirkulasjonen stasjonær igjen. Både strømhastigheter og tykkelse har minnet i forhold til den opprinnelige tilstanden (Fig. 5.5), noe som reflekteres ved at den kinetiske energien har sunket til omlag en tredjedel av sin verdi under STD1. Elleser ser vi av Fig. 5.5 at svenskestrømmen når lenger inn i Oslofjorden når vannføringen i Glomma er lav (her null). Av detaljer legger vi merke til at det etter 96 timer ikke er noe strøm igjen i Singlefjorden. Det er bare i de trangeste sundene at strømmen overskrider 2 cm/s. En nærmere studie av denne sirkulasjonen (ikke vist her) viser at strømmen går inn gjennom sundene øst for Kirkøy og ut gjennom Løperen, vest for Kirkøy.

Partiklene fra Drammensvassdraget (se Fig. 5.6) følger hovedsaklig de samme banene som i STD1. Vi ser at en av partiklene er i ferd med å gå inn i en virvel og følge returstrømmen nordover vest for Bastøy. Partiklene fra Glommas vestre utløp går lenger sør i dette eksperimentet enn i standardeksperimentet. Hastighetene er imidlertid mye mindre i dette eksperimentet. Vi ser at i løpet av 96 timer har partiklene kommet omtrent like langt som etter bare 24 timer i STD1. Sammenlignet med STD1 (Fig. 4.6) er det bare små forskjeller i banene til partiklene som kommer fra Glommas østre utløp (Løperen). Grunnen til dette er at disse partiklene kommer ut i "svenskestrømmen" svært tidlig i eksperimentet, og før utløpet fra Glomma er helt stengt. Etter at de er kommet ut i denne kraftige strømmen går de raskt vestover, og influeres lite av de endringene som senere måtte skje nær sørenden av Løperen.

5.3 Eksperiment 3: Betydningen av den vindrevne Skagerraksirkulasjonen (SKAG1)

I dette eksperimentet har vi gradvis trappet ned den vindrevne transporten ved grenseflaten mot Skagerrak, fra full effekt til null effekt i løpet av 24 timer (spin-down). Den gradvise nedtrappingen er som før valgt for å unngå dannelsen av tyngde-treghets svingninger. Reduksjonen av transportene og tykkelsesavviket ved grenseflaten er lineært i tiden i denne perioden. Simulerte beregninger av strøm og tykkelse er foretatt for en fire døgns periode inkludert nedtrappingsperioden. Felter fra simuleringen er tatt ut hver 12. time. Vindkreftene og de andre grenseflatebetingelsene er som i STD1.

Tidsseriene av overskuddsmasse (Fig. 5.7) viser at tykkelsen av det øvre lag avtar ganske raskt mot likevektstykkelsen. Vindspenningen i modellområdet kan ikke alene opprettholde oppstuvningen av overflatevann i Oslofjorden. Trykkgradientene som balanserte Skagerrakstrømmen presser nå vannet ut fjorden igjen. Dette bekreftes av tidserien for kinetisk energi (Fig. 5.8) som først holder seg konstant inntil 30 timer før den begynner å avta, dvs. det strømmer kraftig i de første 30 timene i samsvar med at vannet strømmer ut fjorden. Konturplottene for overflatelagets tykkelse viser også at det strømmer kraftig sørover i de to første døgnene av eksperimentet, men etter 96 timer (Fig. 5.9) er sirkulasjonen ikke så ulik den stasjonære sirkulasjonen som ble oppnådd med bare elver som ytre krefter (se Fig. 4.1b). Det er blitt dannet en virvel i Breidangen området og det vann fra Drammensfjorden strømmer sørover. I Hvalerområdet sørget imidlertid de trange utløpene fra Singlefjorden mot Oslofjorden for at det tar lang tid før forskjellen i tykkelse mellom Singlefjorden og området utenfor er utlignet. Mesteparten av innstrømmingen fra Glomma går gjennom Løperen, men det går også en betydelig del ut gjennom Sekken.

Partiklene sluppet ut fra Glommas vestre utløp (se Fig. 5.10) går nå langt sørover på grunn av den kraftige strømmen som blir satt opp når det oppstuede overflatevannet strømmer ut fra Breidangen og den sentrale delen av fjorden. De fleste av partiklene følger kysten nedover mot Tisler. Partiklene fra Glommas østre utløp har ganske forskjellige skjebner. Banene til disse partiklene er svært avhengig av hvor tidlig de kommer ut i "svenskestrømmen". To av partiklene kommer ut i denne strømmen før den dør ut, og de blir ført helt vest til Færder i løpet av de første 72 timene. Her kommer de inn i en virvel som har dannet seg, og blir faktisk ført nord-østover i løpet av de siste 24 timene.

De andre partiklene når ikke ut i den kraftige strømmen før den dør ut, og disse går en mye kortere distanse. På noen av partikkelbanene ser vi spiralmønster som indikerer virvler i området.

6 EN SIMULERING FOR SOMMEREN 1988

I tillegg til de eksperimentene som er beskrevet ovenfor har vi, i tråd med prosjektbeskrivelsen, foretatt en lengre simulering for en periode sommeren 1988. Perioden, som er 22 døgn lang, starter den 15. juli og går frem til 5. august. I denne perioden er det relativt god dekning med hydrografiske målinger for senere sammenlikninger, og det foreligger mot slutten av perioden (2-4. august 1988) intensive målinger av strøm med ADCP fra F/F "Trygve Braarud", samt hydrografi.

6.1 Oppsett

Bortsett fra at vi har brukt virkelige verdier for vind og ferskvannsavrenning fra de to store vassdragene er alle andre verdier av parametere stort sett standard og som gitt i EYO 3.3a.

6.1.1 Grenseflatebetingelser

For å unngå at det skal oppstå numeriske problemer i det sørvestre hjørnet av integrasjonsområdet (dvs. Rakkebåene) i de tilfellene hvor vi har en kraftig strøm ut av modellområdet her, har vi modifisert den ytre løsningen for relaksasjonssonen (FRS sonen). Slik den er beskrevet i EYO 3.3a skaper den spesifiserte Ekman-transporten, ved sørvestlige vinder, en transport som går inn i modellen langs hele den sørlige randen. Denne transporten har sitt maximum langs kysten av Norge og Sverige. Som vi har sett tidligere (STD1) vil vannet etterhvert stuves opp i de indre og sentrale deler av fjorden, og en omvendt U formet strøm settes opp i den ytre delen som går sørover og ut av modellområdet i sørvest ved Rakkebåene. Til en viss grad klarer FRS'en også å håndtere denne type situasjoner, selvom det er uoverensstemmelse mellom den indre og den ytre løsningen, men ved kraftige strømmer over lengre tid vil det lett kunne oppstå instabiliteter. Vi har derfor tillatt at tykkelsen h for den ytre løsningen til en viss grad kan avhenge av den indre løsningen. Dersom forskjellen mellom den ytre og indre løsningen for tykkelsen overstiger en viss terskelverdi vil den ytre løsningen justeres slik at denne forskjellen settes lik terskelverdien. Dersom forskjellen mellom den verdien den umodifiserte ytre løsningen har og den indre tykkelsesløsningen ved et senere tidspunkt skulle vise seg å være mindre enn terskelverdien vil den ytre løsningen igjen være umodifisert. Terskelverdien er satt til 4 meter.

Ingen endringer er ellers foretatt i de opprinnelige grenseflatebetingelsene slik de er beskrevet i EY0 3.3a. F. eks. er fortsatt Indre Oslofjord (dvs. innenfor Drøbak) spesifisert som et virtuelt basseng (se EY0 3.3a, kapittel 5.3.2). For friksjonsparameteren R har vi brukt verdien $R=4.8 \cdot 10^{-4}$, og som før har vi i tillegg til Ekman-transporten spesifisert en utstrømning ved randen i sør som skal balansere innstrømningen fra elvene.

6.1.2 Vindpådrag

Perioden starter med relativt rolige vindforhold, går gjennom en periode med relativt kraftige sør-vestlige vinder i siste del av juli og ender opp med moderate vindforhold de første dagene i august (se Fig. 6.1). Den observerte vinden er 10 minutters middelvind og den første vindobservasjonen er nord-østlig vind (fra 70 grader) med hastighet 12 ms^{-1} . Denne vindretningen dominerer de første 4 døgnene. Ellers ser vi at første halvparten av perioden er preget av vekslende vind av moderat styrke. I den siste halvparten av simuleringsperioden er det sør-vestlige vinder som dominerer, og vinden er mer stabil. Den sterkeste vinden er observert 30. juli kl. 19 (dvs. etter 403 timer) med vindhastighet omkring 20 ms^{-1} og retning 230° .

Disse vindobservasjonene er sammenholdt med vindobservasjonene fra en tilgjengelig værstasjon på Rauøy (Fig. 6.2). Sammenlikning mellom vindfarten fra de to stasjonene for juli og august 1988 viser en klar sammenheng mellom de observerte verdiene på de to stasjonene, noe som blir bekreftet ved å se på spredningsdiagrammet i Fig. 6.3. Den siste viser imidlertid at vindstyrken generelt er litt mindre på Rauøy enn på Færder, og av retningsforskjellen gjengitt i Fig. 6.4 ser vi også at vinden er dreiet mer mot venstre på Rauøy i forhold til vindretningen på Færder. For store vindstyrker er retningsavviket ca 15-20 grader.

Dette er tatt hensyn til ved at vindretningen innover fjorden er gjort avhengig av breddegraden. På randen i sør har vi brukt den vindretningen som er gitt fra vindobservasjonene på Færder. Videre nordover dreier vinden til venstre som en lineær funksjon av breddegraden, slik at retningene ved den nordlige randen (Drøbak) ligger 20 grader til venstre for retningen ved den sørligste randen.

Øst- og nord-komponentene av vinden er først interpolert hver for seg lineært i tiden for å gi en verdi for hvert tidsskritt mellom observasjonene. På denne måten unngår vi høyfrekvente svingninger i responsen som ville ha oppstått dersom de ytre kreftene hadde blitt oppdatert som en trappefunksjon. Derneft er vindspenningen, $\vec{\tau}$, beregnet i henhold til (3.3). Verdien for drakoeffesienten, C_D , er hentet fra Large og Pond (1981):

$$C_D = 10^{-3} \begin{cases} 1.2, & |\vec{W}| < 11 \text{ m/s} \\ 0.49 + 0.065 |\vec{W}|, & |\vec{W}| \geq 11 \text{ m/s} \end{cases} \quad (6.1)$$

6.1.3 Elvepådrag

De to vassdragene som inngår i modellen er som før Drammensvassdraget og Glomma. For vannføring har vi brukt døgnmidler ved hhv. stasjonene Solbergfoss og Døvikfoss. Som beskrevet over samt i EYO 3.3a antar vi at dette ferskvannet blandes med vann fra det nederste laget til det oppnår øvre lags tykkelse og tetthet. Vi har satt elvens bredde ved utløpet i fjorden, b , lik FRS-sonens bredde. Vannføringen Q er lineærinterpolert i tiden mellom døgnmidlene (som vi antar gjelder for kl. 12 hver dag).

Vannføringskurvene for Drammenselva og Glomma (Fig. 6.5a og Fig. 6.5b) viser at vannføringen i både Glomma og Drammenselva øker kraftig i siste del av juli for så å avta mot mere normale verdier. En tilsvarende utvikling finner vi også i august. Vannføringen vist for Glomma er i simuleringen fordelt med 20% på vestre utløp og 80% på det østre.

6.2 Resultater

Simuleringen av sommer-situasjonen begynner der RIVER1 slutter (se kapittel 4.1). I de første 24 timene er vindfeltet og ferskvannstilførslene endret lineært i tiden fra de verdiene de hadde under RIVER1 til de tilsvarende målte verdiene ved første tidspunkt. Dette er gjort for å "trekke" modellen rolig igang uten å eksitere tyngde-treghetssvingninger. Denne perioden gir altså helt kunstige resultater og kalles heretter opptreksdøgnet. Vi har valgt 14. juli kl. 00 (norsk tid) som start-tidspunkt, slik at døgnet 14 juli kl 00 - kl. 24 er opptreksdøgnet. De første data for vind og elve-innstrømning er fra 15. juli, hhv. kl. 01 for vind og kl. 12 for elver.

De tidligere eksperimentene har vist at vinden er den viktigste av de ytre kreftene. Når vi ser på tidsserien av vinden (Fig. 6.1), finner vi det naturlig å dele simuleringsperioden opp i fire deler, som følger:

- Perioden 14 t.o.m. 18 juli (0 - 96 timer).
- Perioden 19 t.o.m. 23 juli (96 - 240 timer).
- Perioden 24 t.o.m. 31 juli (240 - 432 timer).
- Perioden 1 t.o.m. 4 august (432 - 528 timer).

Den første perioden omfatter opptrekkstiden og fram fire døgn. Denne perioden er preget av nordøstlige vinder i opptrekksdøgnet og av sørlige moderate vinder i det siste døgnet. Den andre perioden er karakterisert ved svake, skiftende vinder med preg av solgangsbris. I den tredje perioden er det to lavtrykkspassasjer med dertil hørende kraftige sørøstlige til sørvestlige vinder. I den siste perioden er det igjen rolige vindforhold og stort sett av nordlig retning.

Disse periodene kan vi kjenne igjen ved å se på tidsserien av overskuddsmasse (excess mass, Fig. 6.6). Overskuddsmasse er et mål på fjordens midlere tetthet slik at høye verdier svarer til lette vannmasser (i gjennomsnitt for hele fjorden). I den første perioden synker denne for så å stige igjen, svarende til nordavind først i perioden og derpå påfølgende sønnvind. I den andre perioden er det bare små endringer. Først i den tredje perioden, med de kraftige sørvestlige vindene, øker overskuddsmassen radikalt. Deretter avtar den like brått igjen i den fjerde og siste perioden når vindforholdene blir rolige igjen.

6.2.1 Perioden 14 t.o.m. 18 juli (0 - 96 timer)

De første 72 timer (inklusive opptrekkstiden) av simuleringen er preget av nord-østlige vinder. Som forventet fører dette til en forsterkning av utstrømningstendensen i Oslofjorden. Svenskestrømmen stopper opp og bildet preges av en relativt jevn utstrømning med liten eller ingen tendens til dannelse av en kyststrøm langs norskekysten (se Fig. 6.7). Mot slutten av denne perioden, ved ca. 84 timer snur vinden til rett sør. Dette fører øyeblikkelig til at strømmen snur i hele fjorden og spesielt i de vestlige deler, hvor kyststrømmen normalt går sørvestover

(se Fig. 6.8). Vi legger også merke til at det dannes levirvler bak Færder og Bolærne, men disse har forholdsvis kort levetid. Virvelen nord-øst for Bolærne holder seg i 24 timer.

6.2.2 Perioden 19 t.o.m. 23 juli (96 - 240 timer)

Responsen i denne perioden bærer tydelig preg av solgangsbrisen som er dominerende. Perioden er derfor preget av at mange både små og store virvler får lov til å utvikle seg. Spesielt legger vi merke til en ganske stor antisyklonal (med klokken) virvel mellom Færder og Bolærne, en tilsvarende virvel i området mellom Svenner og Færder samt den syklonale virvelen i Breidangen (Fig. 6.9, 192 timer). Solgangsbrisen har en viss "pumpe-effekt" på strømmene i Breidangen og den sentrale delen av Oslofjorden. I den sentrale delen (mellom Horten og Fulehuk) ser vi at ved sørlige vinder blir strømmen fra Drammenselva bremsset opp av vindkreftene, og det er lite strøm i dette området.

Under disse forhold forsterkes den syklonale virvelen i Breidangen, idet strømmen fra Drammensvassdraget ikke slipper ut gjennom passasjen mellom Horten og Jeløya. Den vil derfor gå nordover igjen på østsiden av Breidangen og inn i virvelen og dermed forsterke denne. Ved nordlige vinder skjer det motsatte, som vist i Fig. 6.10 (204 timer), ser vi en kraftig utstrømming fra Drammensfjorden og Breidangen-området. Virvelen blir presset østover mot Jeløya, og det er også tendenser til dannelse av levirvler bak (sør for) Jeløya i Verlebukta.

6.2.3 Perioden 24 t.o.m. 31 juli (240 - 432 timer)

I denne perioden får vi en vedvarende økning av vinden med styrker opptil 20 ms^{-1} . Dette er et klassisk eksempel på opptrekk til en periode med dårlig vær. I det første døgnet er det økende sørøstlig vind, senere dreierende sørvest med ny vindøkning for deretter og dreie noe mot vest. En ny lavtrykkspassasje gir en kort periode med vindøkning fra sørøst med påfølgende dreining til sørvest, og senere til vest og endog nordvest helt mot slutten av perioden. Perioden preges med andre ord av stabilt dårlig vær med kraftige sørlige vinder og mye nedbør. Dette siste gjenspeiles i vannføringene i både Glomma og Drammenselva som stiger med $600-700 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ i denne perioden (Fig. 6.5a).

På grunn av vindretningen, som til å begynne med er mere østlig, settes det nå opp en kraftig strøm langs østsiden av fjorden fra svenskegrensen og nordover. Denne strømmen trenger til å begynne med nordover og inn hele fjorden, også inn i Indre Oslofjord (dvs. nord for Drøbak) (se Fig. 6.11, 288 timer). Som forventet får vi en kraftig forsterkning av virvelen i Breidangen i denne første delen av perioden som preger sirkulasjonsmønsteret i denne delen flere døgn fremover.

Etterhvert fylles de indre deler av fjorden opp, og det bygges opp et mottrykk som balanserer vindkreftene, noe vi gjenkjenner fra STD1. Strømmen innover i fjorden avtar og bremses gradvis opp. Etter 312 timer (Fig. 6.12) er det lite strøm i den sentrale delen av Ytre Oslofjord. Derimot ser vi at svenskestrømmen er blitt presset vestover av dette mottrykket. Etterhvert som mottrykket bygges opp blir også innflytelsesområdet mindre og begrenses til området sør for Færder-Akerøy. Dermed får den antisyklonale virvelen mellom Færder og Bolærne igjen lov å utvikle seg (Fig. 6.13). I den sørvestlige delen av fjorden går strømmen mer og mer over til kyststrømmen på vestsiden av fjorden etterhvert som de indre delene av fjorden fylles opp og mottrykket blir kraftigere.

I Breidangen går innstrømmingen fra Drammensvassdraget med til å opprettholde virvelen i dette området. Vi ser også tendenser til den "pumpingen" som ble beskrevet for forrige periode på grunn av at vinden fluktuerer litt. I de periodene vinden avtar litt, strømmer det ut fjorden på vestsiden, og de periodene vinden øker, strømmer det nordover på østsiden av fjorden. Dermed bidrar denne pumpemekanismen til å opprettholde den syklonale virvelen i Breidangen.

Vi ser også at det i den kraftige svenskestrømmen dannes levirvler bak Tisler. Disse forplanter seg med hovedstrømmen vestover, og deres baner presses dermed etterhvert lengre sørover etterhvert som den kraftige strømmen blir presset søroverover. Også bak Svenner dannes det virvler, som transporteres ut av modellområdet.

Sirkulasjonen i de sentrale og indre deler av fjorden har en forholdsvis kort reaksjonstid, mellom ett og to døgn ved moderate endringer av vinden. Strømmene forårsaket av vindenendringer i dette området skapes stort sett for å gjenskape balanse mellom vindstresset og trykkgradientene. Strømmene i den sentrale delen av fjorden influerer på strømmen i den sørlige delen

av fjorden, slik at når det strømmer sørover i den sentrale delen så vil den kraftige strømmen i den sørlige delen av fjorden følge en mer sørlig bane.

I det siste døgnet av perioden (1. august, 432 - 456 timer) dreier vinden mer vestlig (fra ca. 225 grader til 270 grader) og avtar kraftig i styrke (fra 22 m/s til 8 m/s). Dette er gunstig for utvikling av virvler idet mye oppsamlet potensiell energi slippes løs som først og fremst går over i kinetisk energi. F.eks. ser vi at levirvlene bak Tisler utvikler seg kraftig i denne siste delen av perioden (Fig. 6.14). Vi ser også begynnelsen til en virvel omtrent midtfjords ved randen i sør, i posisjon ca. 10° 40' øst, 57° 58' nord. Denne virvelen utvikler seg så kraftig i tiden fra 420 til 436 timer, vesentlig ved at virvlene som utvikles i strømmen nordvest for Tisler overfører energien sin til denne virvelen, at det nødvendigvis gjør bruk av en svak friksjon mellom øvre og nedre lag for å dempe utviklingen av denne virvelen. Verdien som er brukt for friksjonsparameteren er $R = 6 \cdot 10^{-5}$ m/s, dvs. 1/8 av den friksjonen som brukes i Ekman-transporten ved randen i sør. Denne verdien er brukt for resten av beregningsperioden. At denne virvelen utvikles så kraftig har også sammenheng med grenseflatebetingelsen i sør. Innover i relaksasjonssonen vil den sonale hastighetskomponenten gå mot null fordi Ekman-transporten gir en sonal hastighetskomponent som er tilnærmet lik null. Dermed vil trolig relaksasjonssonen hindre virvelens naturlige utvikling. Levirvlene forhindres i å advekteres ut av området, og går i stedet inn i den kraftige virvelen midtfjords. Med et større modellområde i sør ville denne virvelen også kunne vokst i utstrekning uten å bli hindret av grenseflaten. Dermed kunne trolig virvelen ha utviklet seg naturlig uten at dette ville få konsekvenser for modellsimuleringen.

6.2.4 Perioden 1 t.o.m. 4 august (432 - 528 timer)

Den siste delen av simuleringsperioden er preget av at den kraftige sørvestlige vinden som har vart de siste åtte døgnene dreier mot vest og stilner av, for å bli erstattet av forbigående moderate nordlige vinder den 2. og 3. august. Det siste døgnet av simuleringsperioden er det vestlige vinder av moderat styrke.

Bortfallet av den kraftige vinden medfører for det første at svenskestrømmen raskt dør ut. Dernest opphører balansen mellom trykkgradienten i de sentrale og indre deler av fjorden, med en kraftig utstrømming fra de indre og sentrale deler av fjorden som følge. Strømmen

ut fjorden følger i store trekk den slangeliknende mønster ut fjorden som beskrevet under RIVER1 og STD1 (Fig. 6.15, 492 timer), som er typisk for denne perioden.

Vi ser at selv om løsningen for Ekman-transporten i de fleste tilfeller gir enten ren innstrømning eller ren utstrømning på begge sider av den sørlige randen, så vil den indre dynamikken i modellen i de fleste tilfelle føre til en innstrømning på østre delen av randen og en utstrømningen på vestre delen av randen.

6.2.5 Partikkelbaner

I likhet med de tidligere eksperimentene har vi beregnet partikkelbaner for denne simuleringen. Ved starten av opptrekkstiden har vi som før startet fire partikler ved utløpet av Drammensfjorden, syv ved vestre utløpet av Glomma og fem ved sørenden av Løperen (Glommas østre løp). Posisjonene til partiklene er beregnet hvert 6. minutt og er vist samlet i Fig. 6.16.

Av de som er sluppet ut i munningen av Drammensfjorden ser vi at bare de to midterste av de fire partiklene forsvinner helt ut av modellområdet. Det er disse som har høyest hastighet i starten. Partikkelbanene viser ellers at det er et markert skille i sirkulasjonstypen ved snittet Fulehuk - Missingen. Partiklene har en tendens til å snu der, og holde seg i de sentrale og nordre delene av fjorden. De to partiklene som går ut forbi denne linjen går ganske hurtig videre i kyststrømmen. I Fig. 6.16 ser vi også den stasjonære virvelen i Breidangen tydelig. Når partikkelen går inn igjen i Breidangen etter vel fire døgn går den rundt i denne virvelen resten av perioden.

Når det gjelder partikler sluppet ut i det vestre utløpet av Glomma viser Fig. 6.16 at selv om partiklene starter i nesten samme posisjon, så er deres skjebne svært ulike. En skal imidlertid være oppmerksom på at beregningsprogrammet er laget slik at de partiklene som går ut over randen aldri vil vende tilbake til området, selv om strømmen på randen snur. Vi ser også at det er lite strøm på sørvestsiden av Søstrene. De partiklene som kommer inn i dette området får lang oppholdstid i dette området.

Partiklene fra det østre utløpet av Glomma går først sørover i opptrekkperioden, men følger deretter hovedsaklig kyststrømmen rundt

mot vestsiden av fjorden og ut ved Svenner - Rakkebåene. Vi ser også at tre av partiklene kommer inn i den antisyklonale virvelen sørvest for Hvaler før de går videre vestover.

6.3 Oppsummering av sommersimuleringen

Når vi skal oppsummere resultatene fra sommersimuleringen 1988, er det naturlig å dele Ytre Oslofjord i de tre geografiske områdene vi tidligere har beskrevet; (i) Breidangen, dvs. hele den nordre (indre) delen fra Drøbak i nord til snittet Vealøs (Horten) - Guldholmen (Jeløya) i sør; (ii) den sentrale delen fra Horten-Moss i nord til snittet Fulehuk-Misingen i sør, og (iii) den søndre delen av fjorden som dekker hele området sør for snittet Fulehuk-Misingen. Vi har valgt å oppsummere resultatene fra disse delene hver for seg.

6.3.1 Breidangen-området

I Breidangen dannes det en stasjonær syklonal virvel (mot klokken). Denne virvelen blir opprettholdt både av utstrømmingen fra Drammenselva og delvis av vinden. Ved vekslende og moderate vindforhold vil vinden bidra til å opprettholde virvelen uansett vindretning.

Ved sønnavinder vil det strømme nordover forbi snittet Vealøs-Guldholmen. Denne strømmen vil holde seg langs land på østsiden av Breidangen og gå inn Drøbaksundet. Det strømskjæret som da oppstår vil bidra til å opprettholde virvelen. Ved nordavinder vil den strømmen som kommer ut fra Drøbaksundet prøve å holde seg langs land på høyre side. Den vil derfor følge Hurumlandet rundt nesten til Mølen før den møter utstrømmingen fra Drammensfjorden og dreier sørover.

Transporten av utstrømmingen fra Drammensvassdraget vil delvis gå ut forbi snittet Vealøs-Guldholmen og delvis gå nordover igjen på nordvestsiden av Jeløya, avhengig av vindforholdene. Ved økende nordavind eller minkende sønnavind vil oppstuet vann i Breidangen og Indre Oslofjord strømme ut gjennom snittet Vealøs-Guldholmen. Ved økende sønnavind vil det strømme inn gjennom snittet Horten-Moss, og vannet fra Drammensfjorden vil strømme rundt Breidangen og delvis inn Drøbaksundet.

6.3.2 De sentrale deler av fjorden

I denne delen av fjorden vil strømmen være svært avhengig av vindforholdene. Området fungerer mest som en transportsone mellom Breidangen og den søndre delen av fjorden. Når nordkomponenten av vinden er økende (dvs. økende sønnavind eller avtagende nordavind) vil det strømme nordover i dette området, og omvendt ved minkende nordkomponent av vinden vil det strømme sørover på grunn av vann som er stuet opp i Breidangen og Indre Oslofjord.

Ved tilnærmet stasjonære vindforhold og etter at det er blitt balanse mellom vind og oppstuing vil hovedstrømmen fra Drammensfjorden krysse fjorden omtrent ved snittet Horten - Jeløya og så følge østsiden av fjorden ned mot Eldøya. Der svinger strømmen vestover mot Bolærne og runder Fulehuk. På sidene av denne hovedstrømmen dannes det to virvler som er strukket ut i nord-sør-retningen. På vestsiden dannes det en virvel som gir en nordgående returstrøm på vestsiden av Bastøy. På østsiden dannes det en virvel lenger sør som gir en returstrøm på vestsiden av Rauøy.

I de periodene der vindforholdene skifter blir dette mønsteret raskt brutt opp, og det kan i noen tilfelle dannes virvler som strekker seg i hele fjordens bredde. Disse blir imidlertid lett advektert ut av området ved kraftig inn- eller utstrømning gjennom dette området som følge av vesentlige endringer i vindforholdene.

6.3.3 De ytre deler av fjorden

I dette området er sirkulasjonen i det alt vesentlige styrt av det som skjer på grenseflaten i sør. Svenskestrømmen, som settes opp av Ekman-balansen på randen i sør, dominerer sirkulasjonsmønsteret i denne delen. Denne strømmen går langs østsiden av fjorden nordover til området mellom Fulehuk og Færder før den vender sørover igjen og går ut av området ved Svenner. Hvor langt nordover denne strømmen strekker seg avhenger av hvor mye av overflatelaget som er stuet opp innover i fjorden. Ved stor oppstuing vil strømmen ha vendepunkt langt sør.

I denne kraftige strømmen dannes det levirvler bak Tisler. Disse virvlene vil så advekteres vestover med strømmen og ut av modellområdet. Denne

adveksjonen vil i noen tilfeller bli hindret av grenseflatebetingelsen, slik at det danner seg kunstige virvler med liten skala langs grenseflaten i sør.

Utstrømningen fra Glommas vestre og østre utløp vil følge denne strømmen strømmen vestover, og transportene fra Glomma går inn i kyststrømmen. Det strømmer i svært liten grad sørover over den østre delen av den søndre randen.

Vi legger også merke til en relativt kraftig virvel mellom Færder og Bolærne som dannes når svenskestrømmen har blitt presset tilstrekkelig langt sør, dvs. sør for snittet Færder-Akerø.

Det er viktig å være klar over at den grenseflatebetingelsen vi har brukt mot Skagerrak i sør er kunstig. Dvs. at den er i hovedsak konstruert for at forstyrrelser skapt i det indre fritt skal få passere ut. Imidlertid har den også den egenskap at vi kan spesifisere, slik som vi har gjort her, noe av den fremherskende dynamikk vi tror eksisterer utenfor modellområde. Her har vi spesielt tatt hensyn til vindgenerert strøm ved hjelp av Ekman dynamikk. Siden strømmene i den søndre delen av fjorden er så avhengige av grenseflatebetingelsen i sør, må resultatene fra dette området vurderes mot denne bakgrunnen.

Området i nordøstre del av Skagerrak viser seg å være et meget aktivt dynamisk område. Det er derfor uheldig å legge grenseflaten i dette området. For å være sikret et mer korrekt sirkulasjonsmønster i den søndre delen av området bør en utvide modellområdet slik at det blir større avstand mellom grenseflaten og de områdene som skal studeres. F.eks. kan dette effektivt gjøres ved at en kan kjøre en litt grovere numerisk modell for området som ligger utenfor randen (f. eks. Skagerrak og Kattegat) og bruke de resultatene som denne modellen som inngangsdata på randen.

7 SPREDNING AV SPORSTOFF I YTRE OSLOFJORD

For å ha muligheten til å undersøke hvordan forurensningsutslipp fra elveutløpene transporteres i Ytre Oslofjord har vi i tillegg til det som er beskrevet ovenfor også gjort en forenklet beregning av utbredelsen av sporstoff (f.eks. næringsstoffer) i modellområdet for de ideelle eksperimentene. Dette må ses på som rene eksperimenter på det nåværende stadium. F.eks. har vi ikke tatt hensyn til noen bakgrunnskonsentrasjon av sportstoff, men latt fjorden være "kjemisk" rensert ved startøyeblikket. Videre har vi bare sett på hvordan transportveiene fra elveutløpene går for de tilnærmete stasjonære slutt-tilstandene for hvert eksperiment. Hvordan tidsendringene behandles numerisk i modellen er beskrevet i EYO 3.3a, kapittel 6. Beregningene er gjort i ettetid og *hastighetsfeltet er holdt konstant og lik det feltet en har beregnet ved slutten av hvert eksperiment.*

Kildene for sporstoffet er satt slik at konsentrasjonen av sporstoffet blir holdt konstant lik 1.0 i gitterpunktene som danner grensene mot FRS-sonene for de tre fjord- og elve-utløpene. Beregningene for sporstoffet er gjort for fire døgn. Det er ikke skilt mellom sporstoffene fra de forskjellige utløpene. Muligheten for blanding av sporstoff fra de tre utløpene er relativt liten for en fire døgns beregning.

7.1 Resultater fra STD1, DRAM1 og GLOMMA

I STD1 (Fig. 7.1) ser vi at sporstoffet fra Drammensfjorden holder seg samlet, men vi ser starten til utløpere i returstrømmene ved Vealøs, Guldholmen og Slagentangen. "Hovedtungen" bekrefter hvordan hovedstrømmen går som en slange sørover mot Bolærne. Splitten i strømmen fra Glomma's vestre utløp som vi har observert ved Søstrene finner vi selvsagt igjen i fordelingen av sporstoff. Fra det vestre utløpet av Glomma deler tungen seg i to ved Søstrene, og vi finner lite sporstoff på sørvest-siden av Søstrene. Utbredelsen av sporstoffet er ikke kommet særlig langt etter 96 timer. Fra Glommas østre utløp går den vesentlige transporten gjennom Løperen. Den delen som går ut på nord-og østsiden av Kirkøy holder seg i den vestre delen av Singlefjorden. Etter 96 timer er spissen av denne grenen så vidt kommet ut gjennom Sekken. Til sammenligning er den delen som går ut Løperen kommet bort til Færder i løpet av den samme tiden.

Resultatene fra DRAM1 (Fig. 7.2) oppviser forholdsvis små forskjeller fra STD1. Fra det vestre utløpet av Glomma splitter sporstoffet seg i to grener som i STD1, men nå går det meste av sporstoffet ut i den nordre (vestre) grenen. Fra det østre utløpet er fordelingen av sporstoff i Singlefjorden den samme som i STD1. Vi ser imidlertid at den tungen som kommer ut Løperen tar en mer nordlig bane over Oslofjorden, og at denne tungen nå går rett på Færder-øyene og splittes. Tungen når heller ikke så langt vest som i STD1.

Dersom vi nå ser på resultatene fra GLOMMA (Fig. 7.3) ser vi at det er minimale forskjeller fra STD1. Bare i den sørligste delen av sporstoff-tungen ser vi at strømmen har en tendens til å gå mer midtfjords når utstrømningen fra Glomma er stengt.

7.2 Resultater fra SKAG1

Som for dynamikken er det når vi ser bort ifra "svenskestrømmen" at de største endringene fra STD1 finner sted (Fig. 7.4). Utbredelsen av sporstoff gjenspeiler tydelig at Ekman-transporten og den nordlige delen av Skagerrak-strømmen er forvunnet, mens det for utløpet fra Drammensfjorden er forholdsvis beskjedne forskjeller. Strømmen har mer tendens til å virvle seg opp, og vi ser flere tunger som stikker ut og antyder virvler, bl.a. ved Bastøy og sør for Jeløya.

Fra Glommas vestre utløp ser vi at splitten i strømmen ved Søstrene ikke er så markert som i standard-eksperimentet. De to grenene av strømmen fortsetter i samme retningen som hovedstrømmen.

Den mest markerte forskjellen i sporstoff-fordeling ser vi fra Glommas østre utløp. Fraværet av Skagerrak-strømmen sees tydelig ved at den grenen som går ut løperen går helt sør til Tisler før den dreier vestover. Vi ser også at sporstoff-tungen går inn i en stor virvel vest for Tisler istedenfor å gå rett over til Færder.

Den grenen som går øst for Kirkøy strekker seg lenger sørover, og går nå sør for Dynekilens munning. Vi ser også at det går mer sporstoff inn mot Skjeberg-kilen enn det gjorde i standard-eksperimentet.

8 HENVISNINGER

8.1 Rapporter innenfor prosjektet (EY0)

Disse er betegnet EY0 i teksten

- 3.3a Skåtun, H., og L.P. Røed, 1989: Transportmodell av overflatelaget i Ytre Oslofjord. Rapport 1: Modellens og dens åpne grensflater. *Rapport nr. 88-3422, Rev. 2, Veritas Offshore Technology and Services A/S, 37 s.*
- 3.4a Dahl, F.E., og B. Hackett, 1988: Data Atlas: Strøm-, vær-, og hydrografiske målinger i faste punkter, mai-november 1988. *Rapport nr. 88-3056, Rev. 1, Veritas Offshore Technology and Services A/S, 121 s.*
- 3.5a Hackett, B., og F.E. Dahl, 1988: Strømmålinger med en akustisk doppler strømmåler (ADCP) på F/F "Trygve Braarud", august 1988, *Rapport nr. 88-3057, Rev. 1, Veritas Offshore Technology and Services A/S, 56 s.*
- 3.5b Hackett, B., 1988: Data Atlas: Hydrografiske målinger fra F/F "Trygve Braarud", juni og august 1988, *Rapport nr. 88-3058, Rev. 1, Veritas Offshore Technology and Services A/S, 101 s.*
- 3.5c Dahl, F.E., 1989: Strømmålinger i Oslofjorden - Et sammendrag. *Rapport nr. 89-3132, Rev. 0, Veritas Offshore Technology and Services A/S, 37 s.*

8.2 Øvrige litteraturhenvisninger

- Large, W.G., og S. Pond, 1981: Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 11, 324-336.
- Luther, M.E., and J.J.O'Brien, 1985: A model of the seasonal circulation in the Arabian Sea forced by observed winds. *Prog. Oceanogr.*, 14, pp. 353-385.

Magnusson, J., og K. Næs, 1986: Basisundersøkelser i Drammensfjorden 1982-84. Delrapport 6: Hydrografi, vannkvalitet og vannutskiftning. *Statlig program for forurensningsovervåkning Rapport nr. 243/86*, Norsk institutt for vannforskning, 77 s.

FIGURER

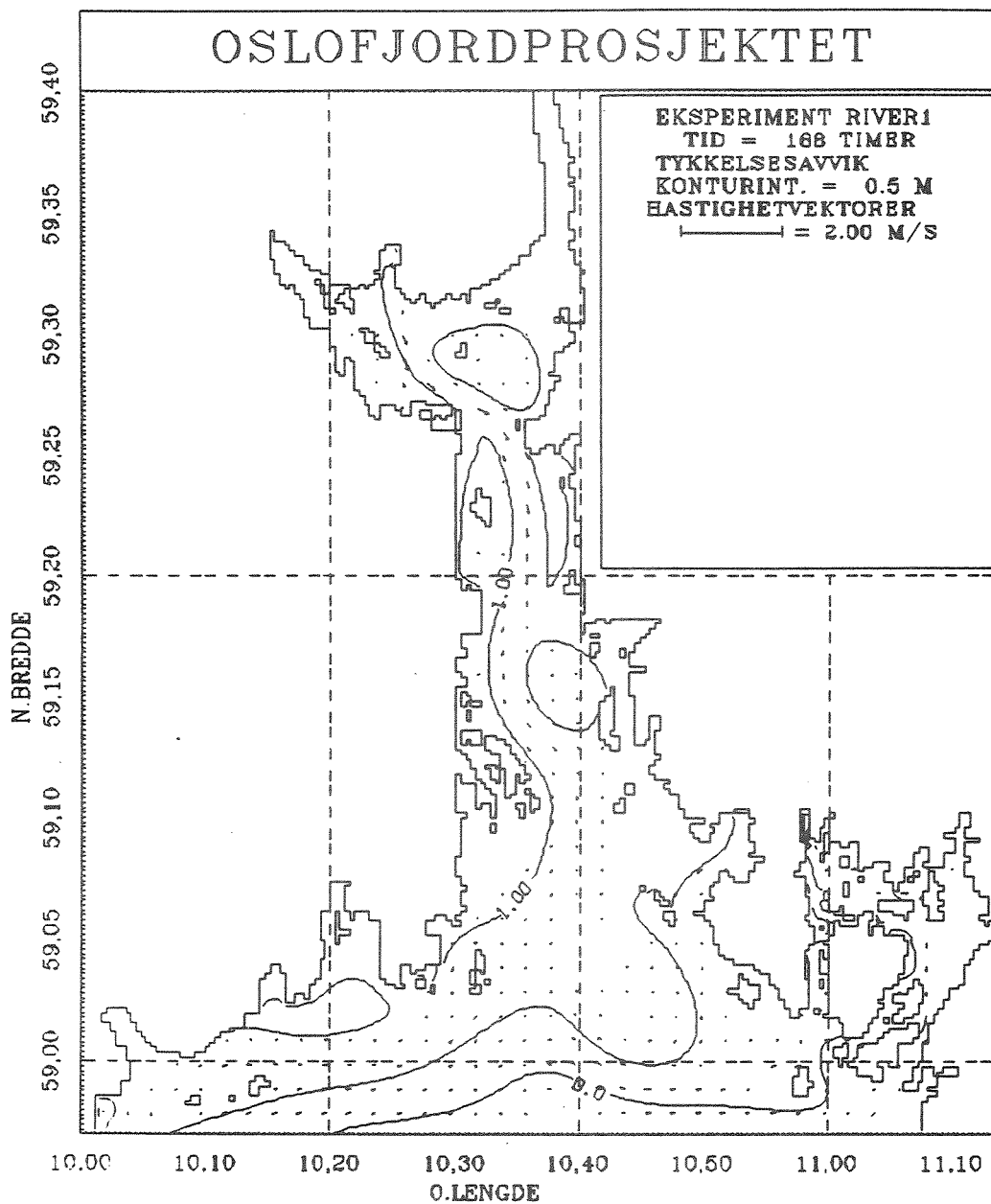


FIG. 4.1a: Fordeling av tetthet (øvre lags tykkelse) og strøm i Ytre Oslofjord etter 168 timers integrering for eksperimentet RIVER1. Heltrukne linjer svarer til isolinjer for øvre lags tykkelse (tetthet) i m gitt som avvik fra normal tykkelse (20 m). Konturintervallet er 0.5 m og negative avvik er markert med stipling. Strømmen er angitt som piler for hvert annet gridpunkt. Pilens retning svarer til strømrretningen og pilens lengde svarer til strømstyrken i hht. skalaen angitt på figuren øverst til høyre.

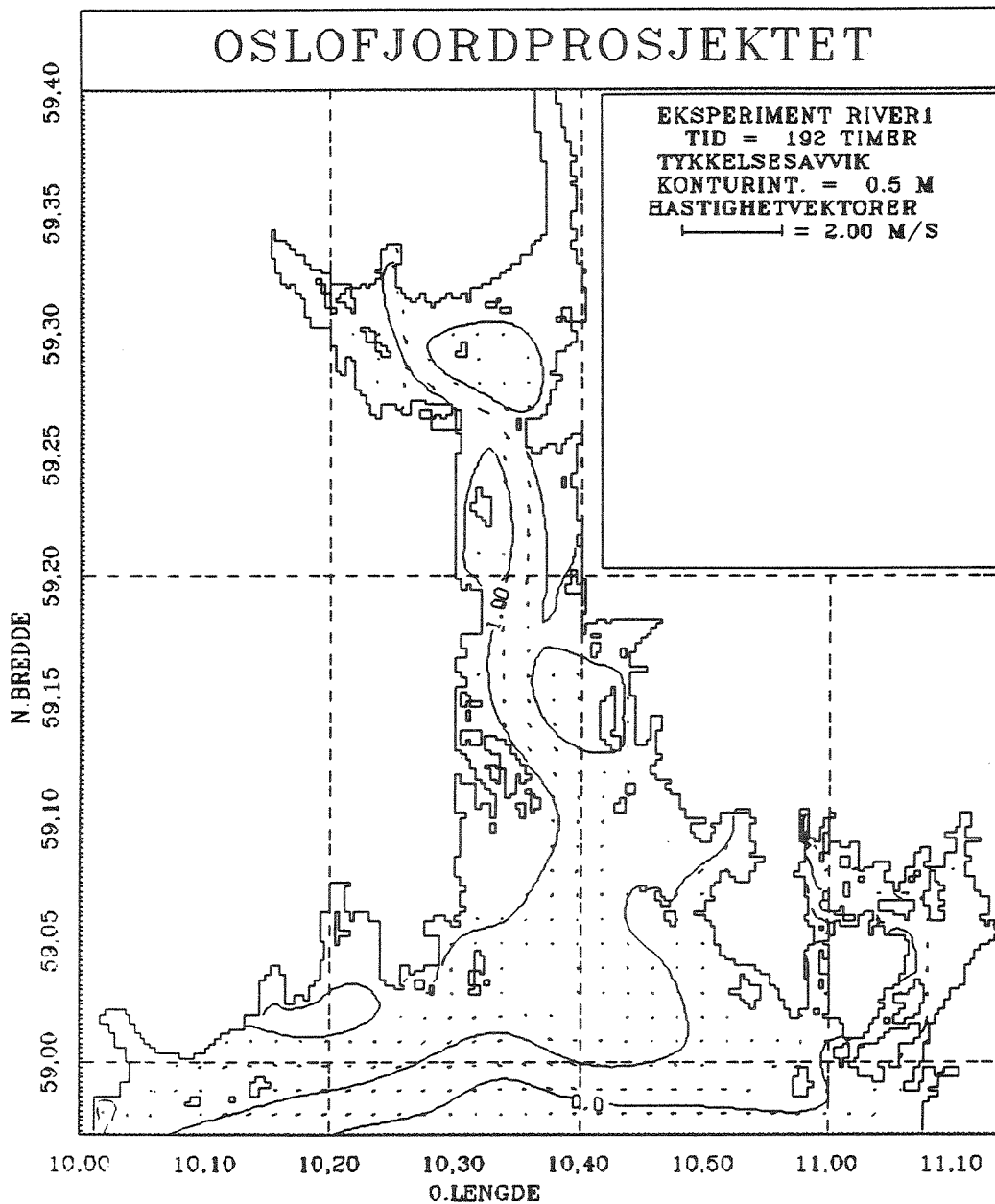


FIG. 4.1b: Som Fig. 4.1a, men etter 192 timers simulering.

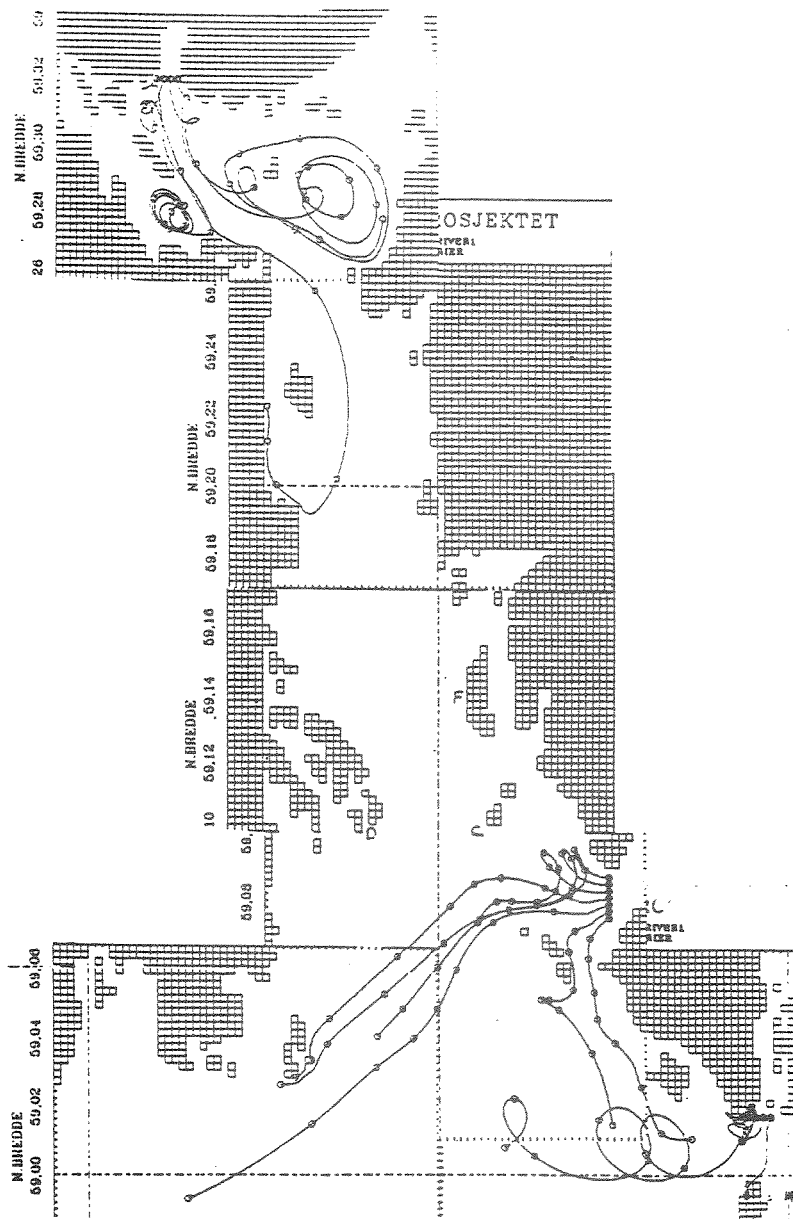


FIG. 4.2: Partikkelbaner RIVER1. Startposisjon er markert med fylt sirkel, mens posisjoner for hver 24 time er markert med åpne sirkler.

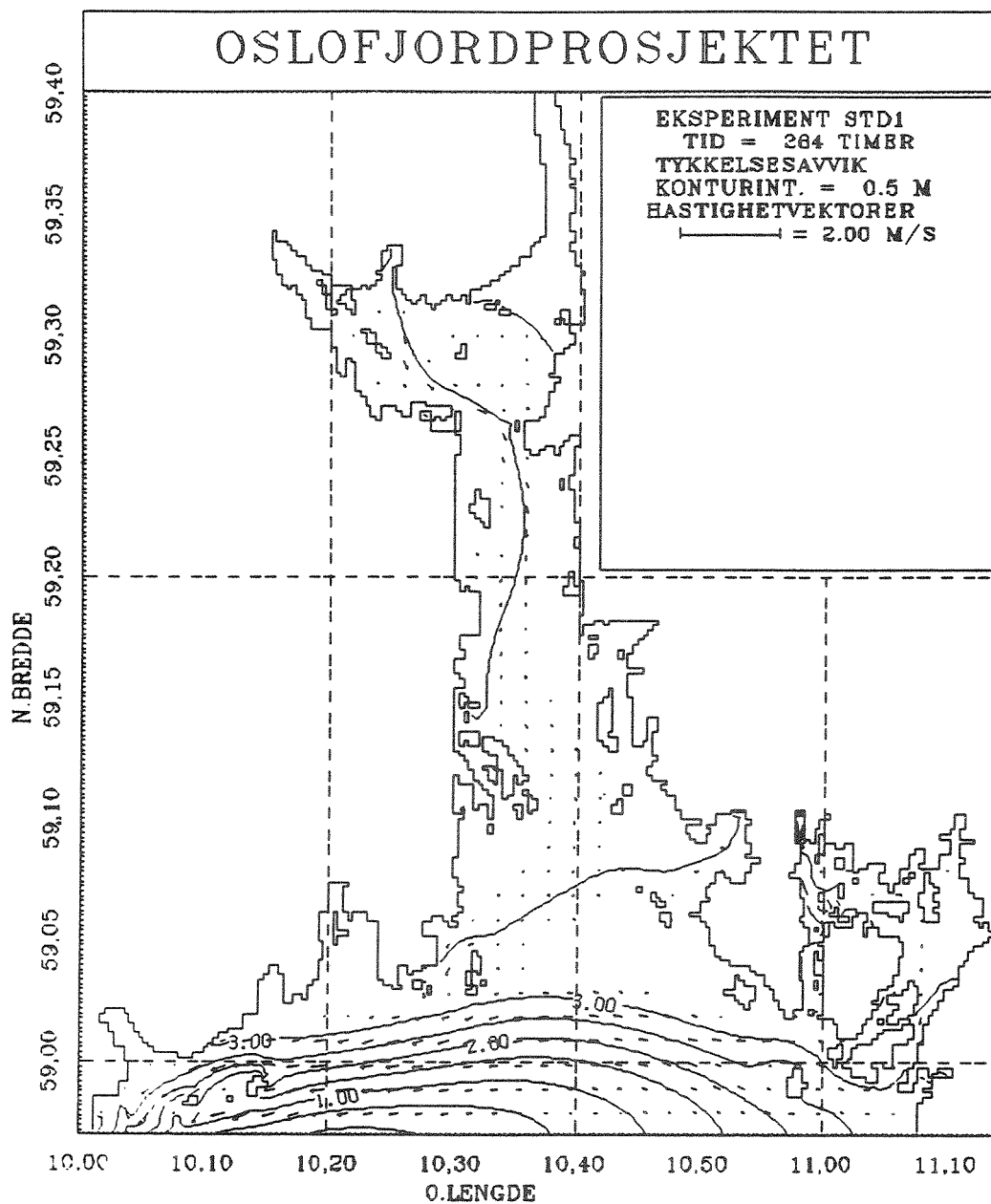


FIG. 4.3a: Fordeling av tetthet og strøm for STD1 etter 264 timers integrering. Øvrig forklaring se telsten til Fig. 4.1a.

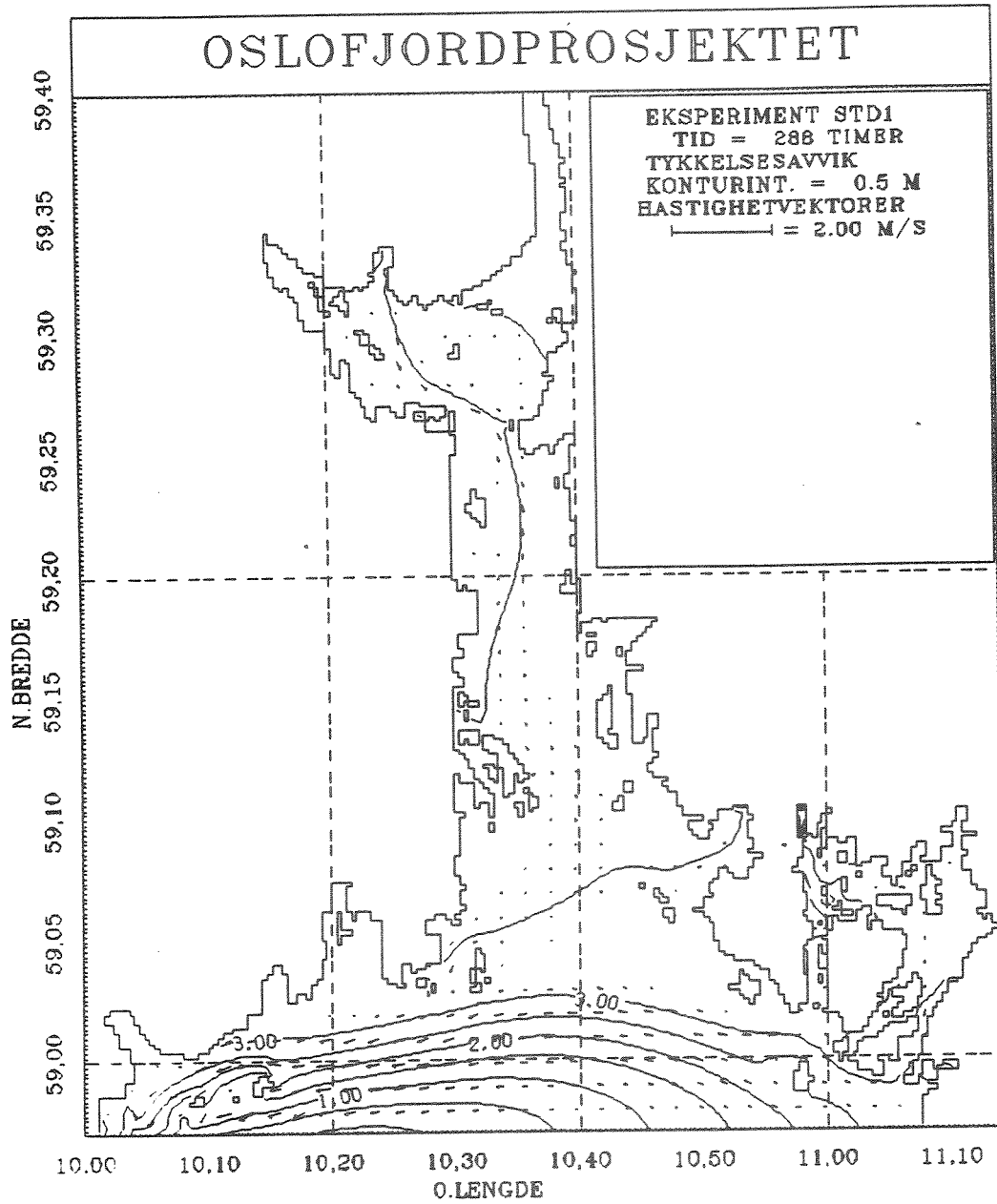


FIG. 4.3b: Som for Fig. 4.3a, men etter 288 timer.

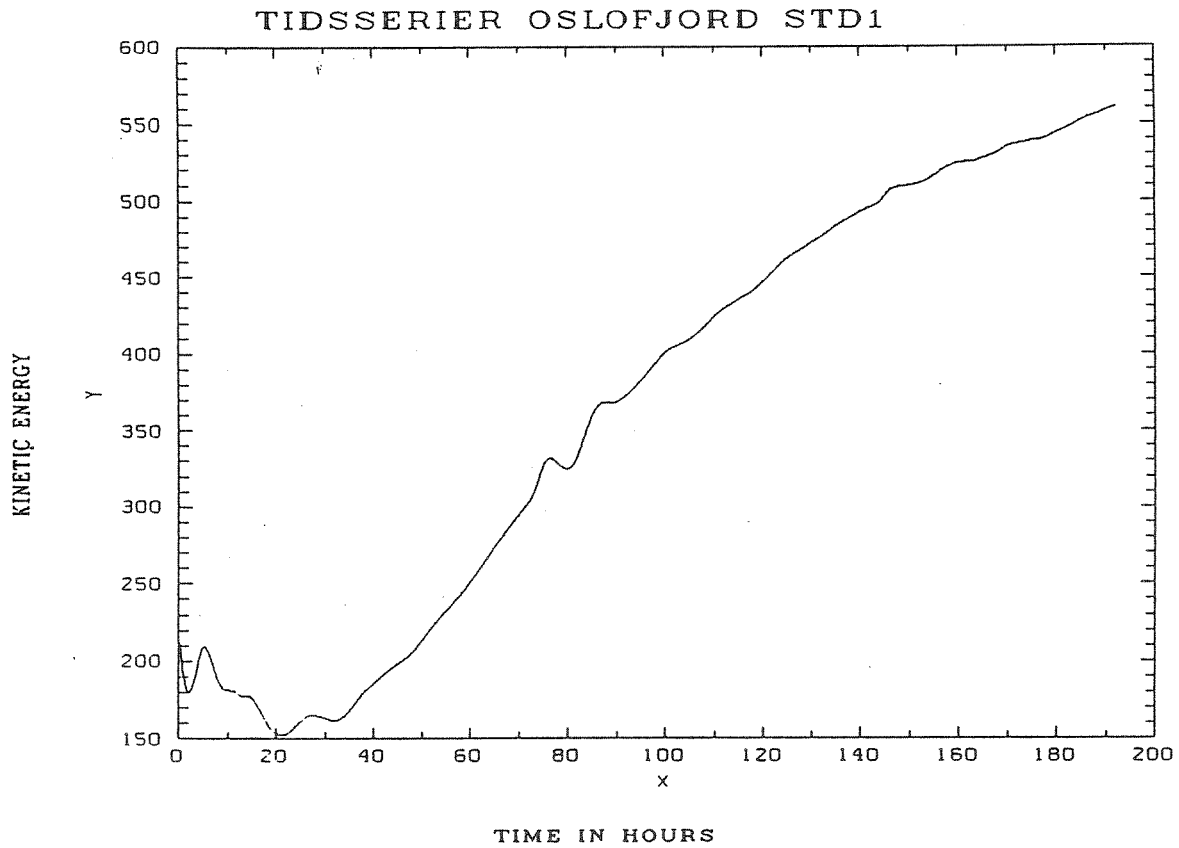


FIG. 4.4: Den heltrukne linjen viser tidsforløpet av kinetisk energi for eksperimentet STD1 for de første åtte døgnene (192 timer).

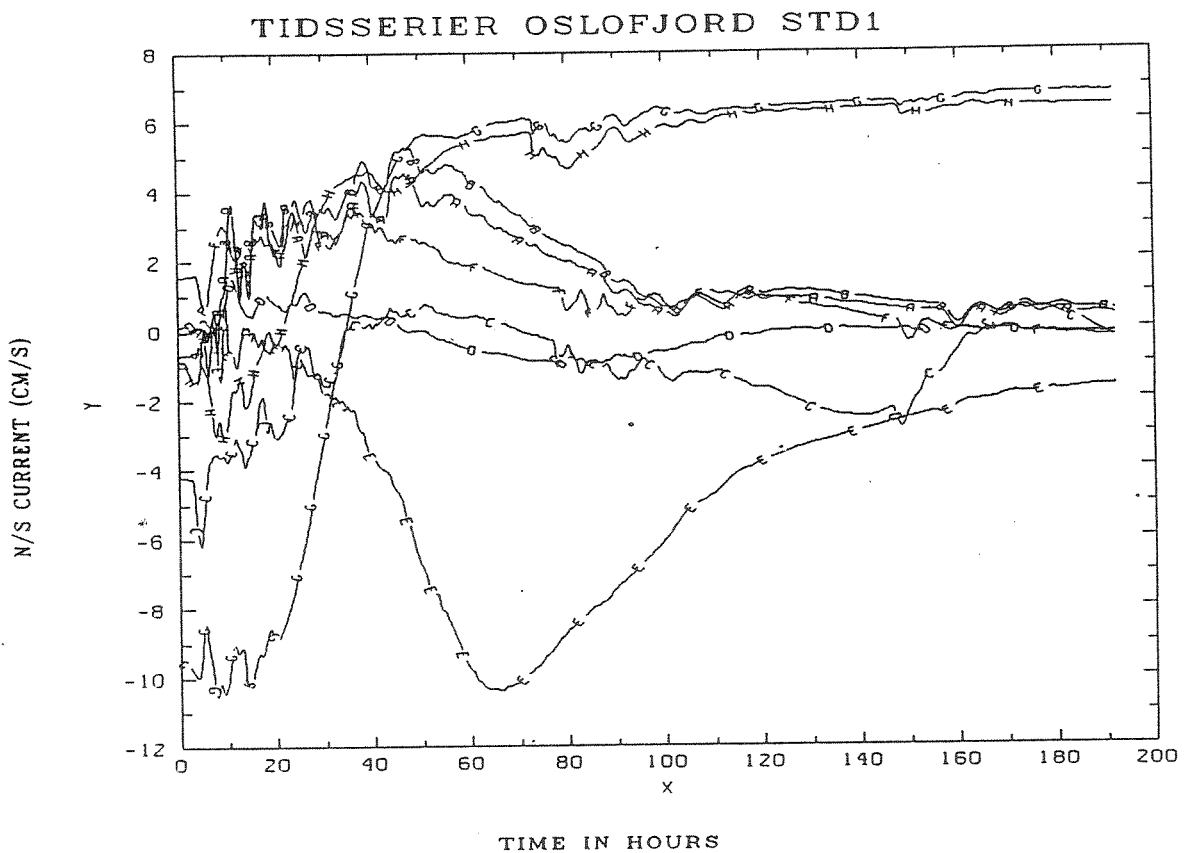


FIG. 4.5: De heltrukne linjene viser tidsforløpet av strømmen's nord komponent for eksperiment STD1 for åtte posisjoner (A - H) i Ytre Oslofjord. Den geografiske posisjon er gitt i hht. tabell i EYO 3.3a. A er lengst i nord og H lengst i sør.

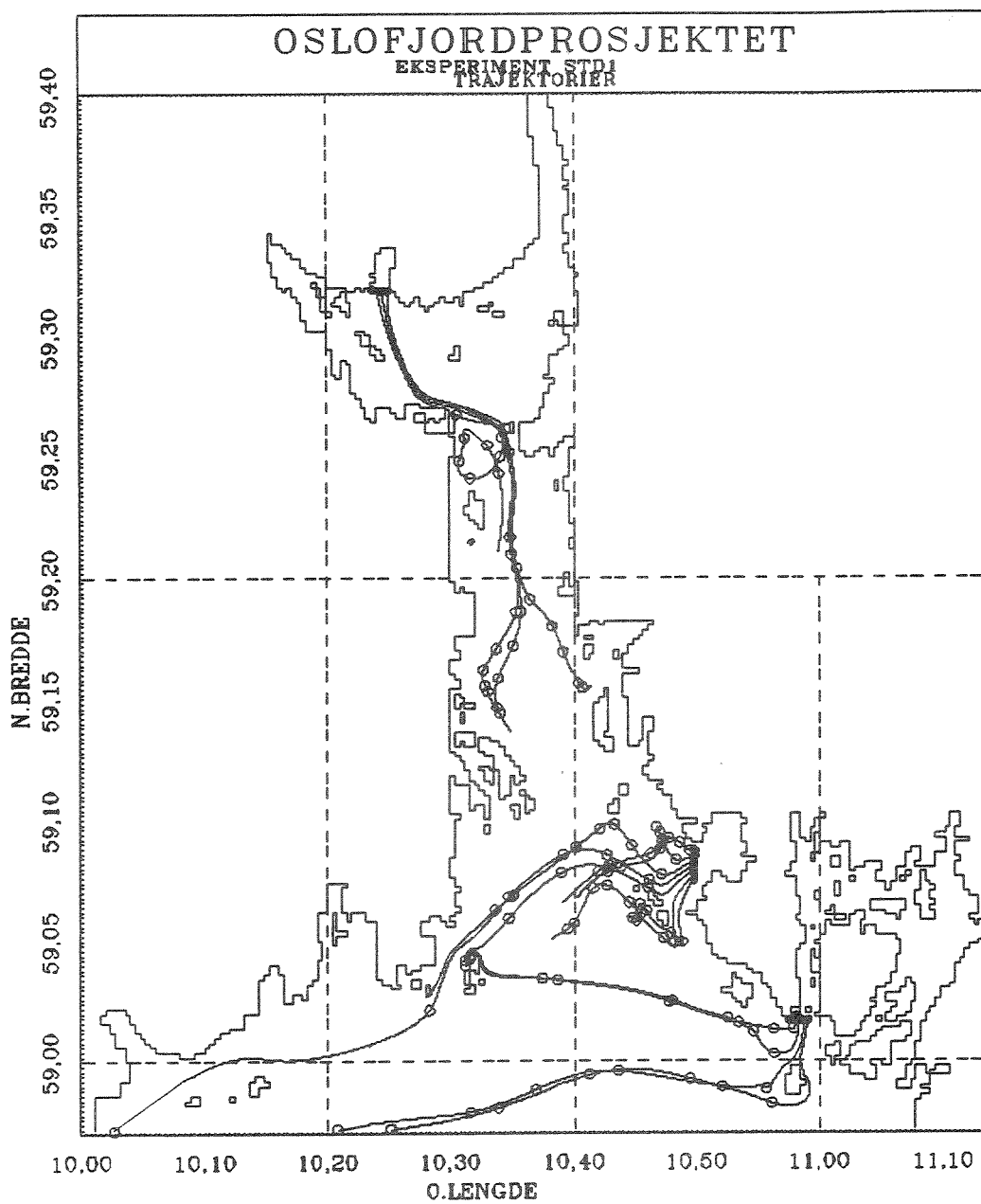


FIG. 4.6: Partikkelbaner for eksperiment STD1. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.2.

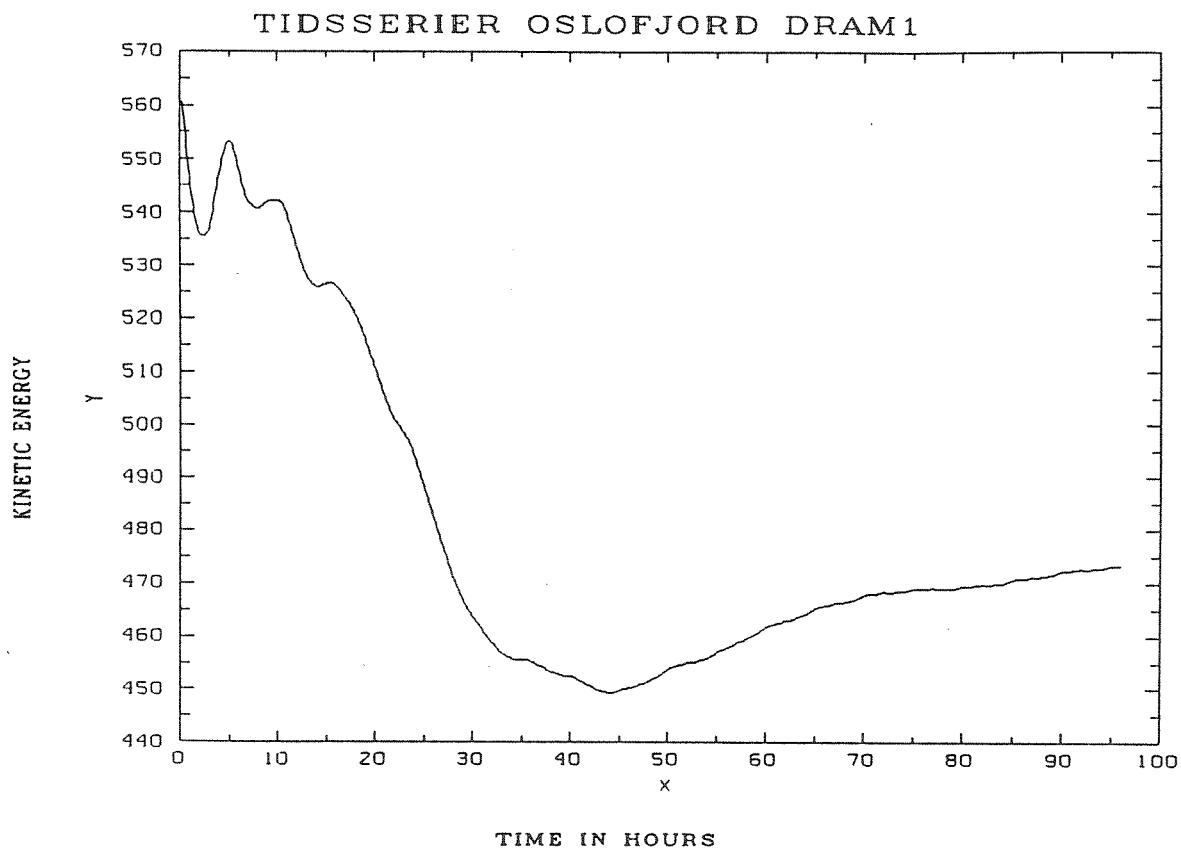


FIG. 5.1: Tidsforløpet av kinetisk energi for eksperiment DRAM1 for de første fire døgn (96 timer).

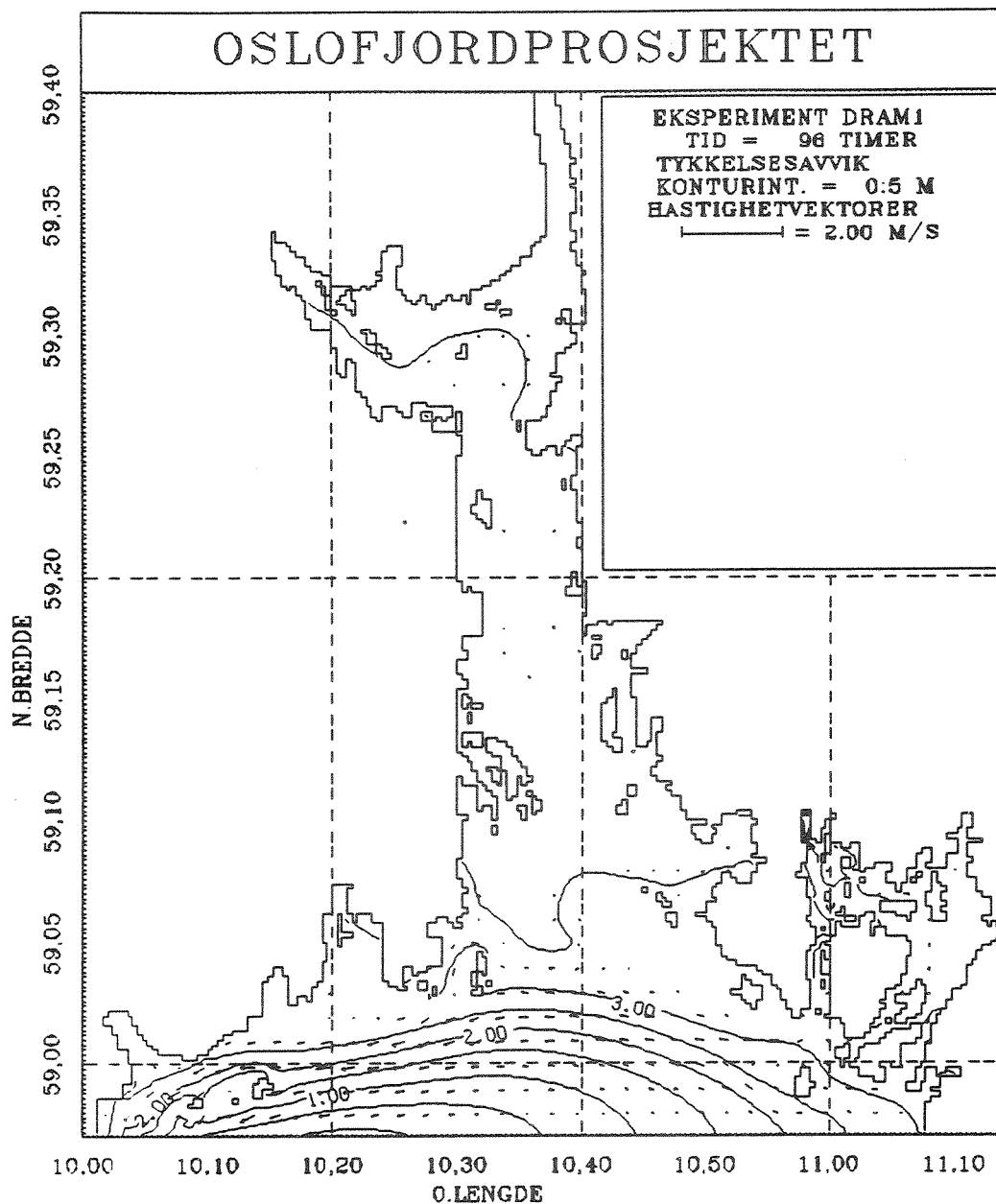


FIG. 5.2: Fordeling av tetthet og strøm for DRAM1 etter 96 timers integrering. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

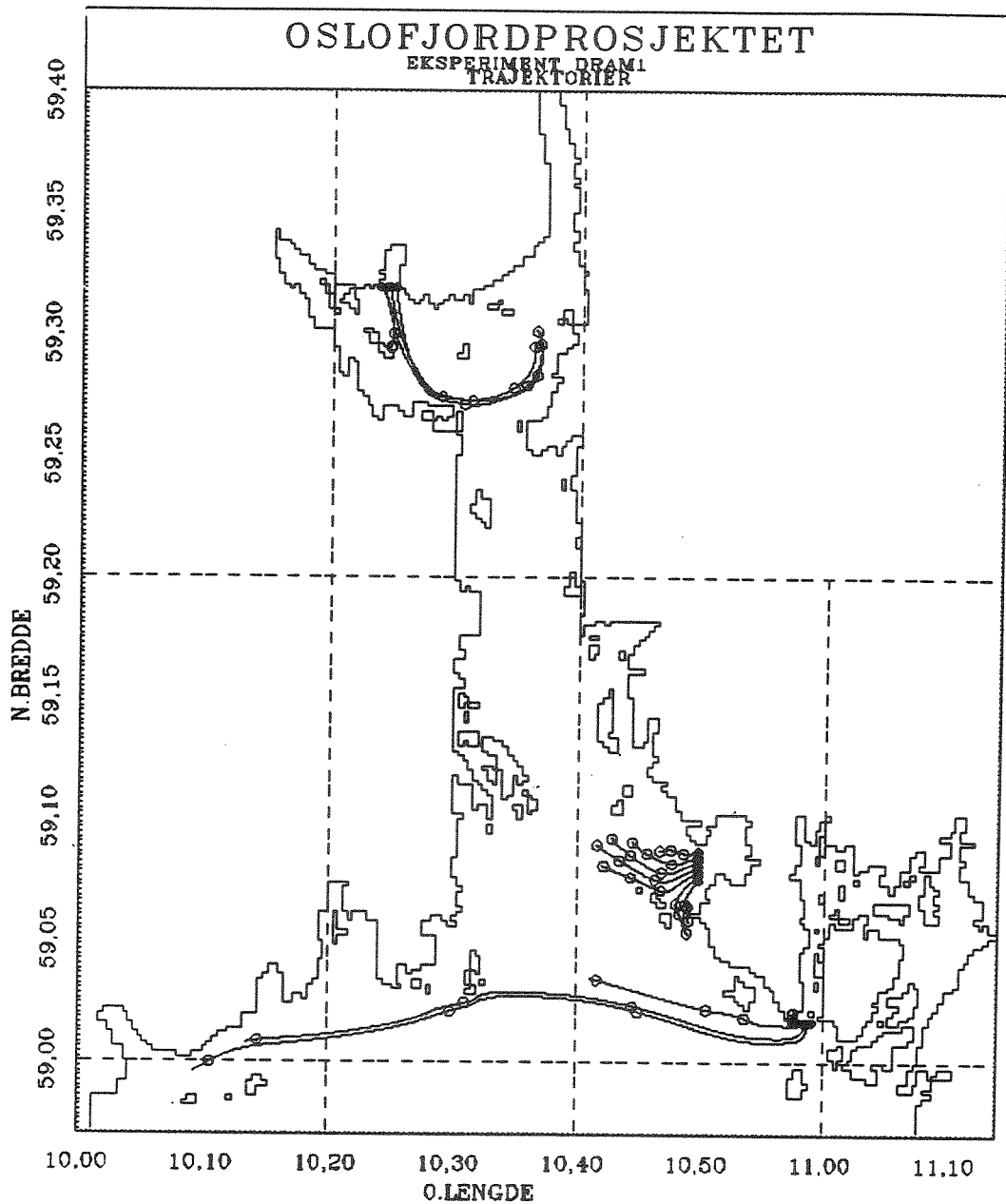


FIG. 5.3: Partikkelbaner for eksperimentet DRAM1. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.2.

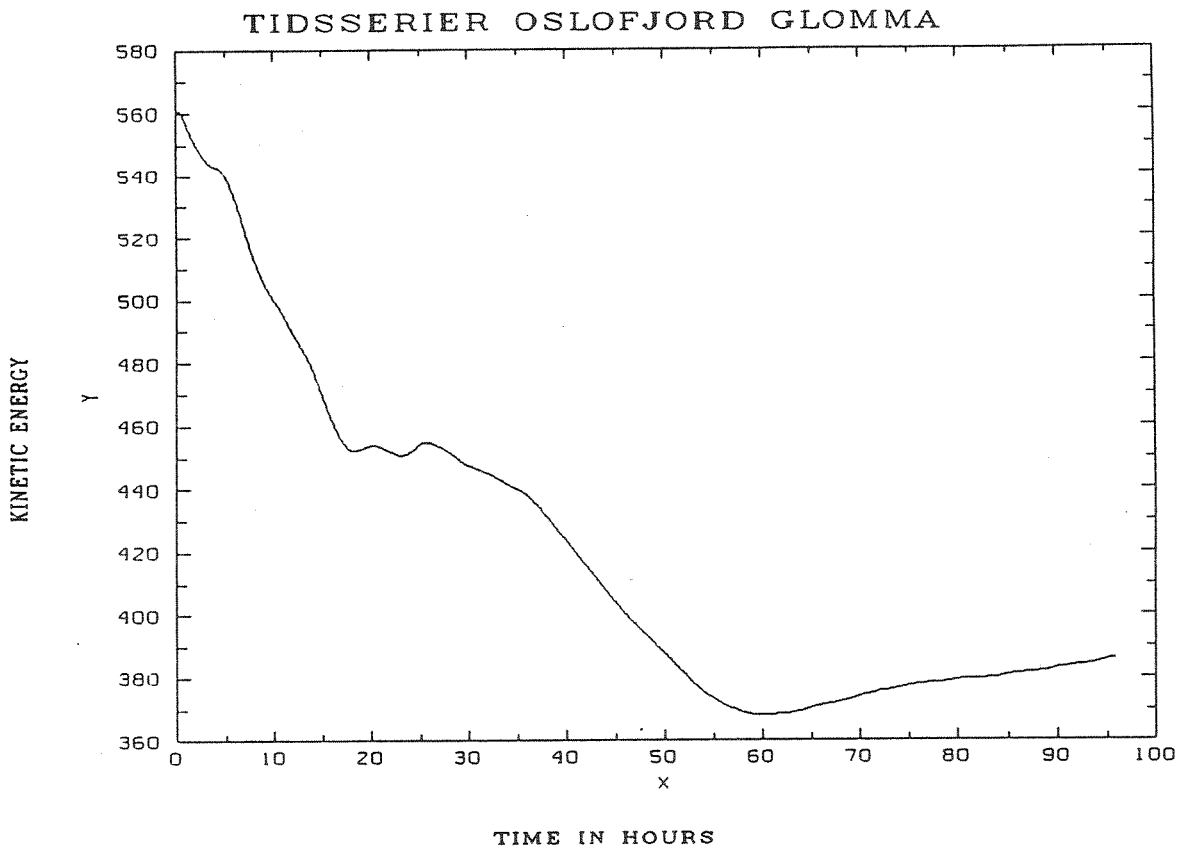


FIG. 5.4: Den heltrukne linjen viser tidsforløpet av kinetisk energi for eksperimentet GLOMMA for de første fire døgnene (96 timer).

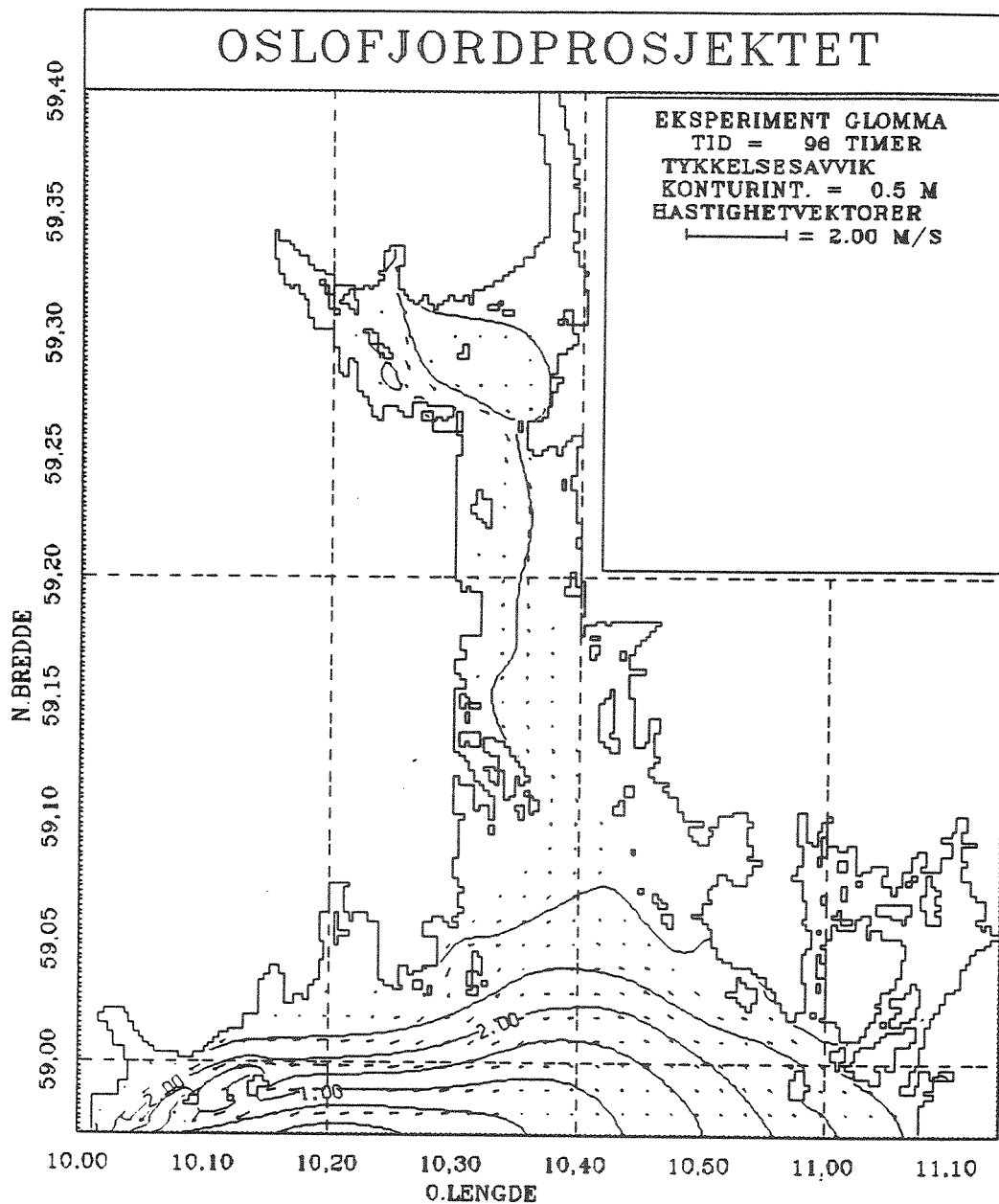


FIG. 5.5: Fordeling av tetthet og strøm for GLOMMA etter 96 timers integrering. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

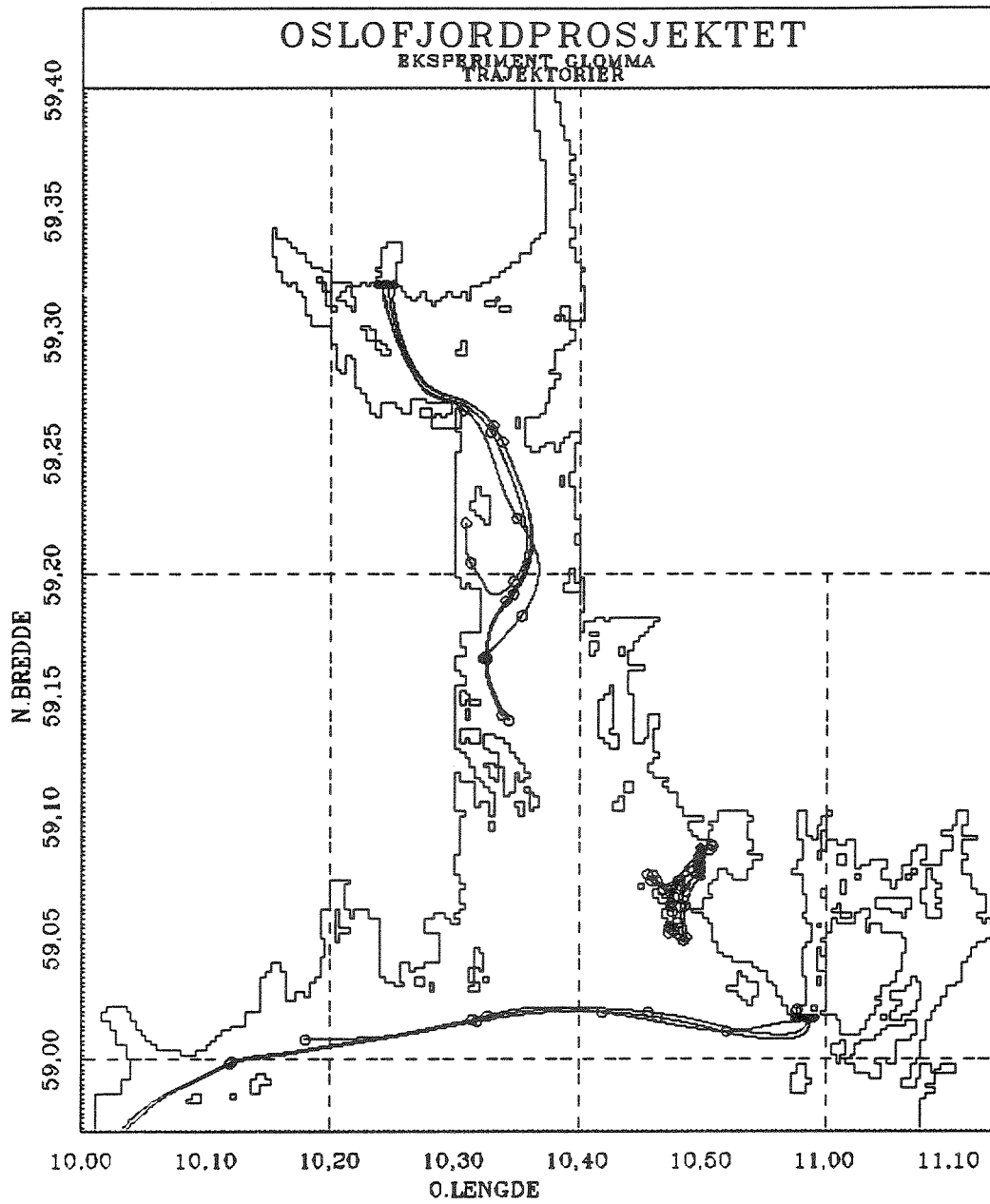


FIG. 5.6: Partikkelbaner for eksperimentet GLOMMA. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.2.

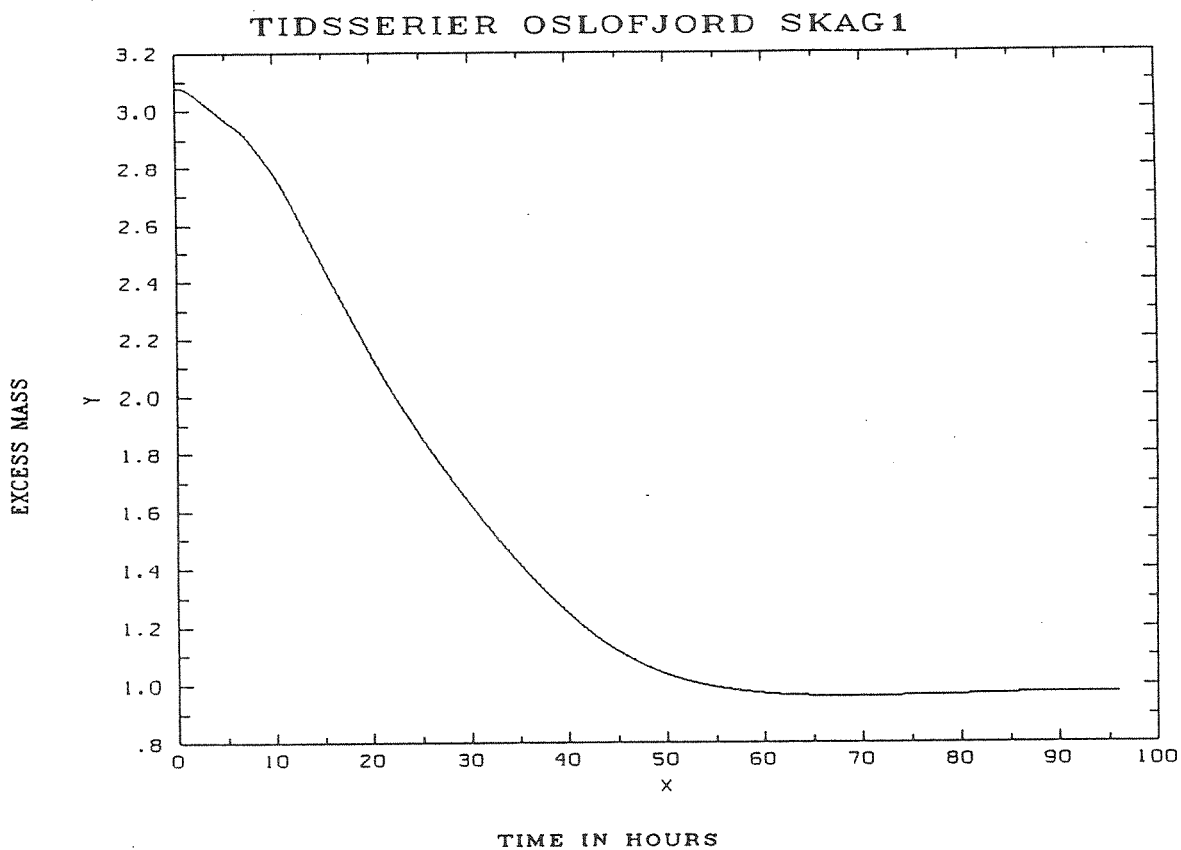


FIG. 5.7: Den heltrukne linjen viser tidsforløpet av overskuddsmasse (excess mass) for eksperiment SKAG1 for de første fire døgnene (96 timer).

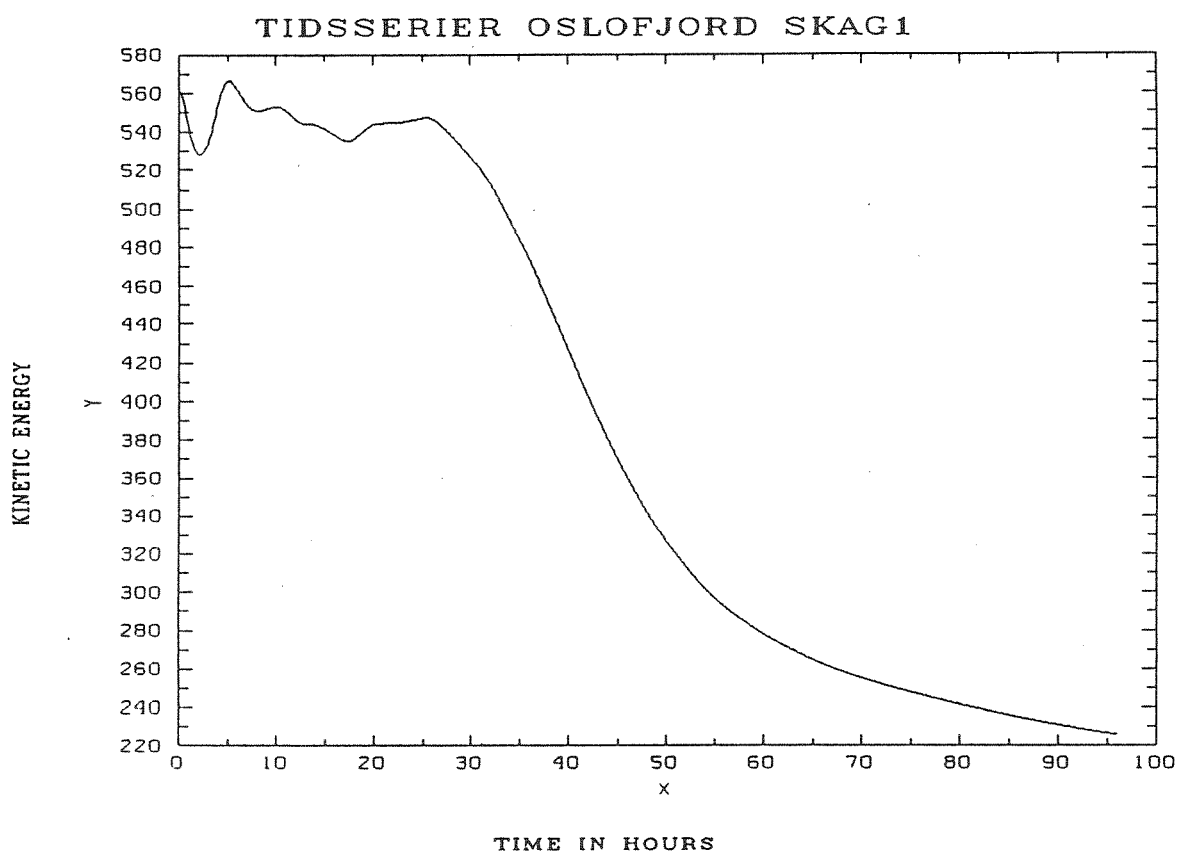


FIG. 5.8: Den heltrukne linjen viser tidsforløpet av kinetisk energi for eksperimentet SKAG1 for de første fire døgnene (96 timer).

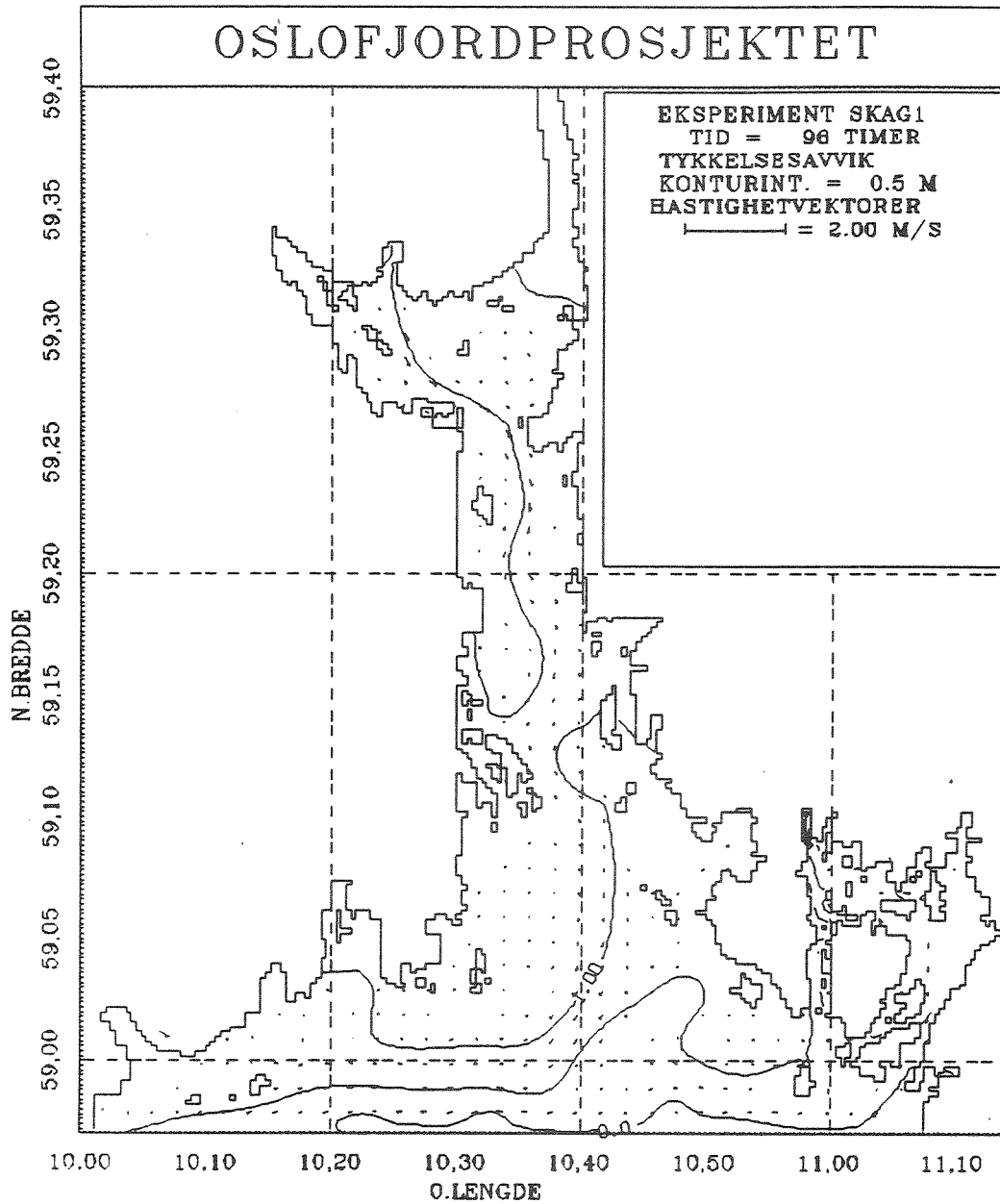


FIG. 5.9: Fordeling av tetthet og strøm for SKAG1 etter 96 timers integrering. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

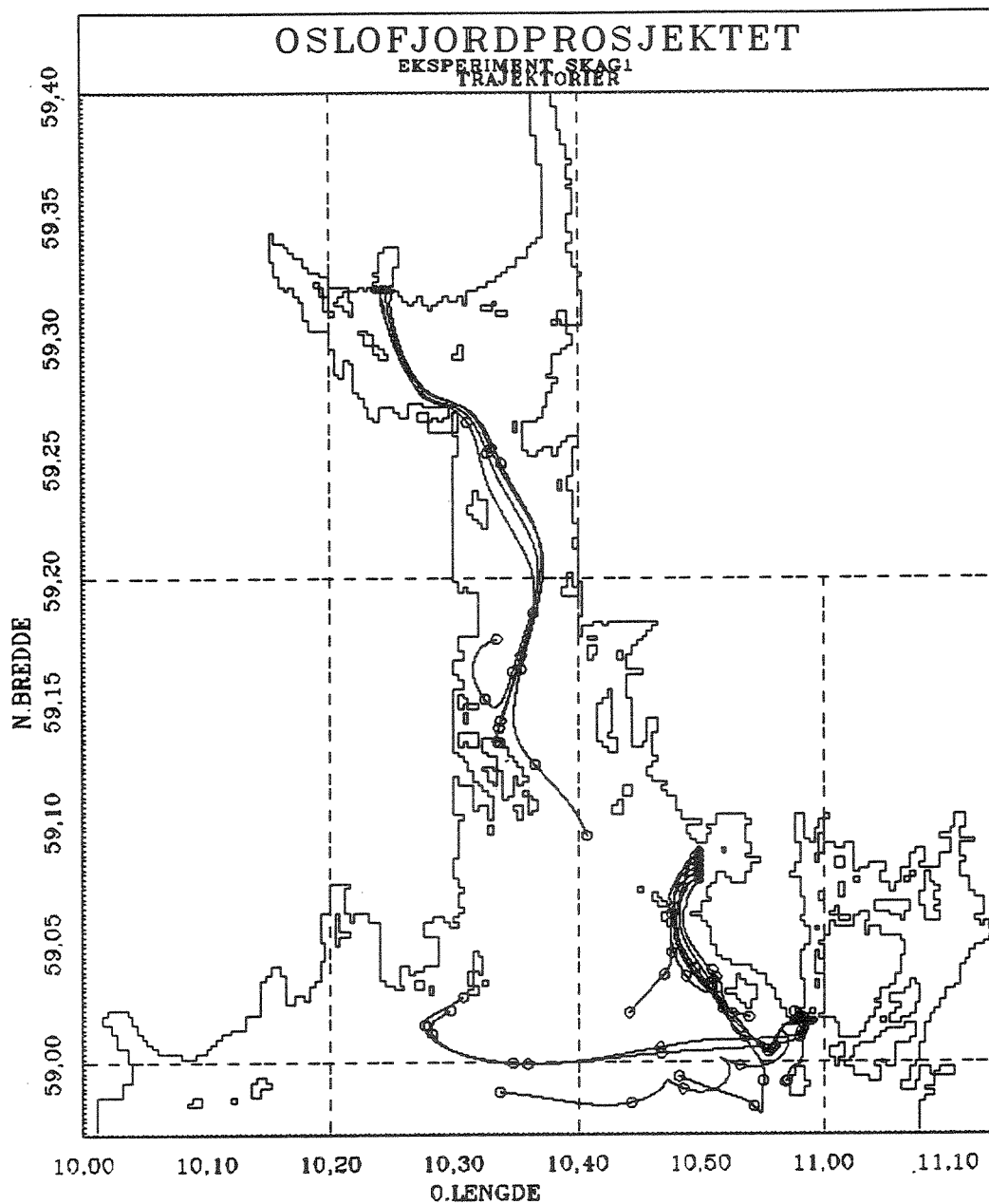


FIG. 5.10: Partikkelbaner for eksperimentet SKAG1. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.2.

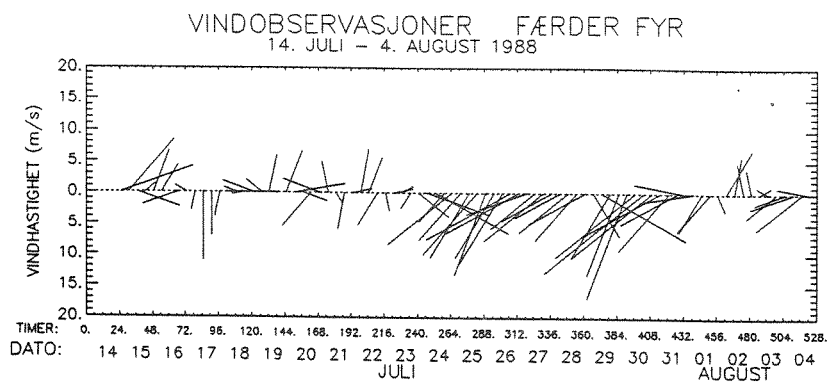


FIG. 6.1: Vektor-tidsserie for vind observert på Færder. Den horisontale akse viser tiden i timer fra 14. juli 1988 kl. 00. Den vertikale akse viser vindhastighet i ms^{-1} . Vindvektorene er satt av slik at dersom en linje peker rett nedover fra den faste horisontale linje så blåser det sønnvind. Observasjonene er 10 minutters middelvind kl. 01, 07, 13 og 19.

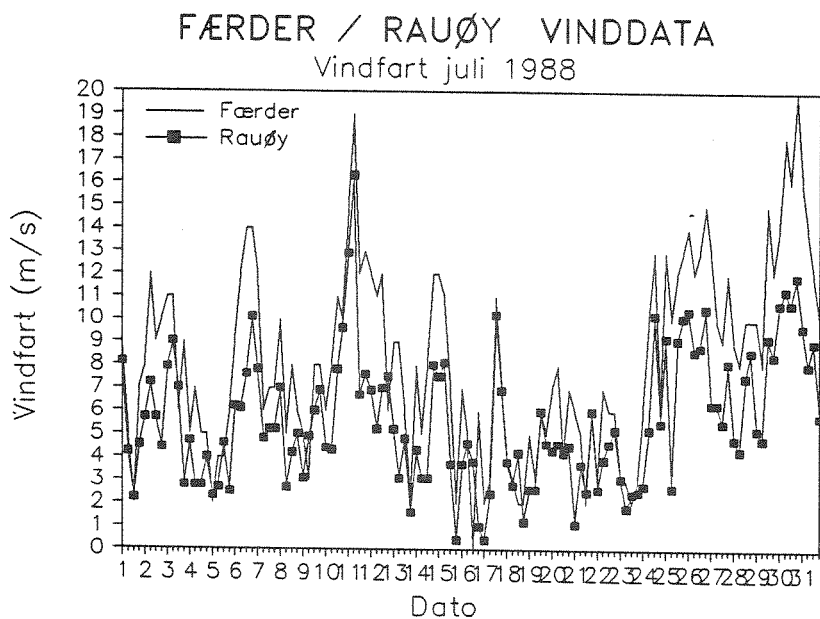


FIG. 6.2: Tidsserier for vindstyrke i juli 1988 for stasjonene Færder og Rauøy. Styrken er gitt i ms^{-1} . På den horisontale akse er datoen satt under observasjonen kl. 01.

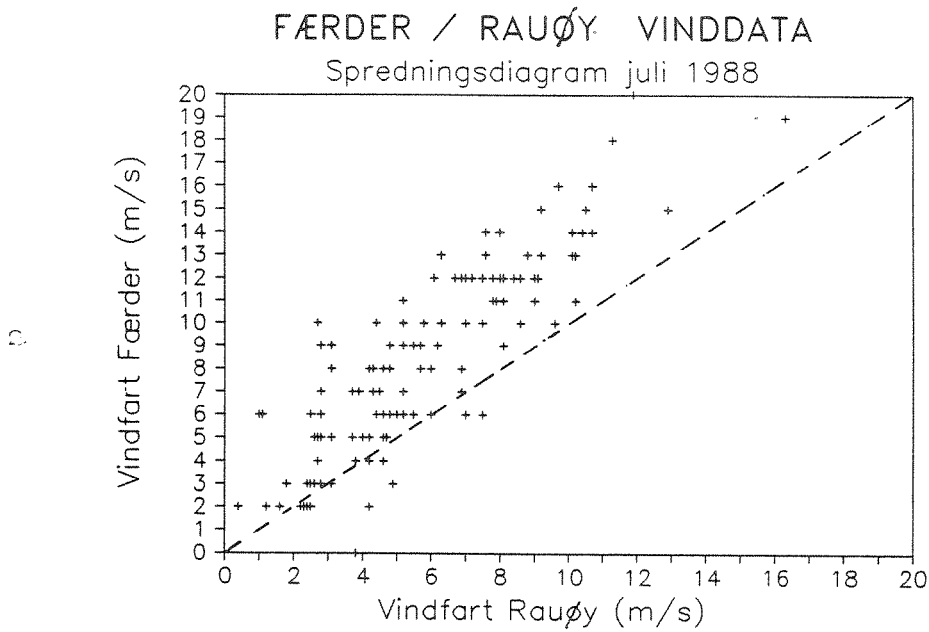


FIG. 6.3: Spredningsdiagram for vindstyrke i juli 1988 mellom stasjonene Rauøy og Færder. Vindstyrken er gitt i ms^{-1} , og vindobservasjonene er 10 minutter middelvind observert kl. 01, 07, 13 og 19.

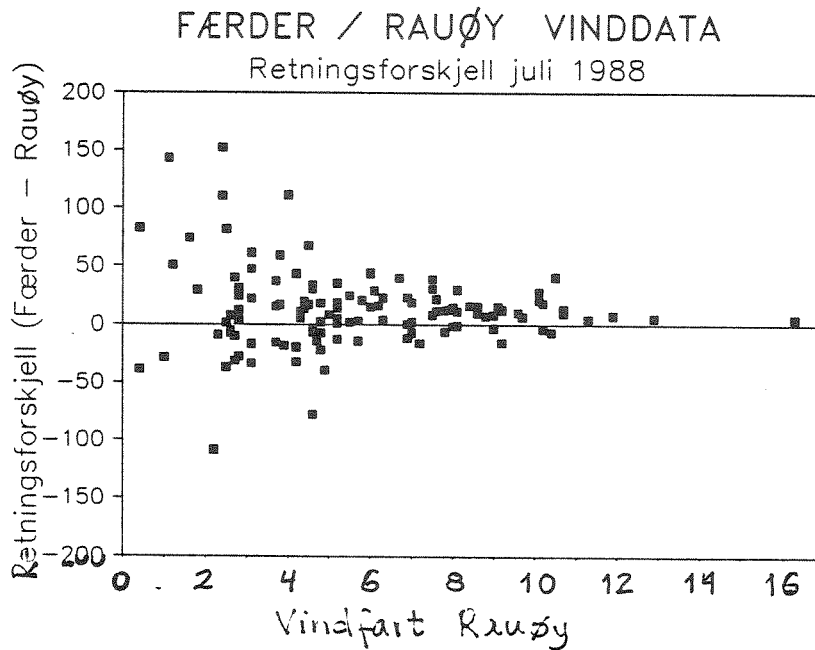


FIG. 6.4: Retningsforskjell for vind mellom stasjonene Færder og Rauøy. Retningsdifferansen, gitt i grader, er plottet mot vindstyrken på Rauøy. Retningsdifferansen er gitt som vindretning (dvs. hvor vinden kommer fra) på Færder minus vindretning på Rauøy. Vindobservasjonene er 10 minutters middelvind kl. 01, 07, 13 og 19.

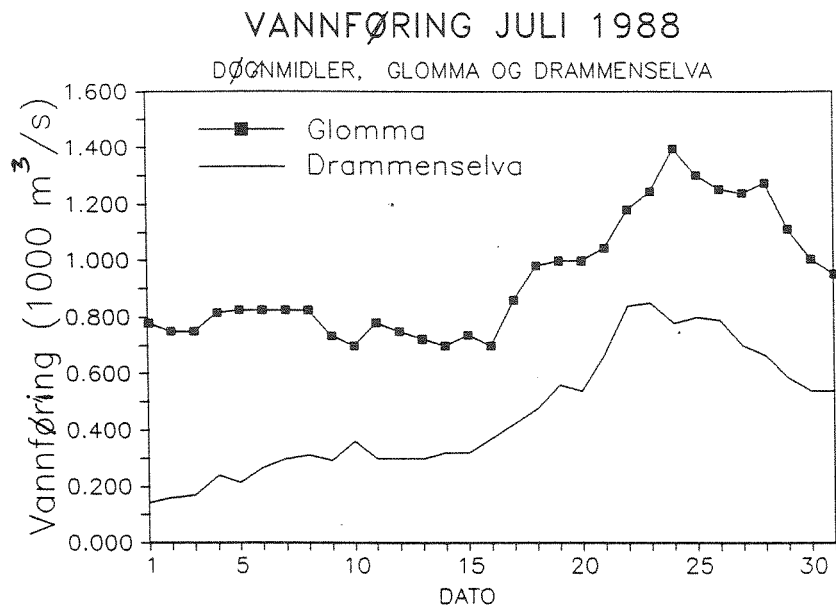


FIG. 6.5a: Vannføring for Glomma ved Solbergfoss og Drammenselva ved Døvikfoss for juli 1988. Skalaen til venstre angir vannføring i 1000 kubikkmeter pr. sekund.

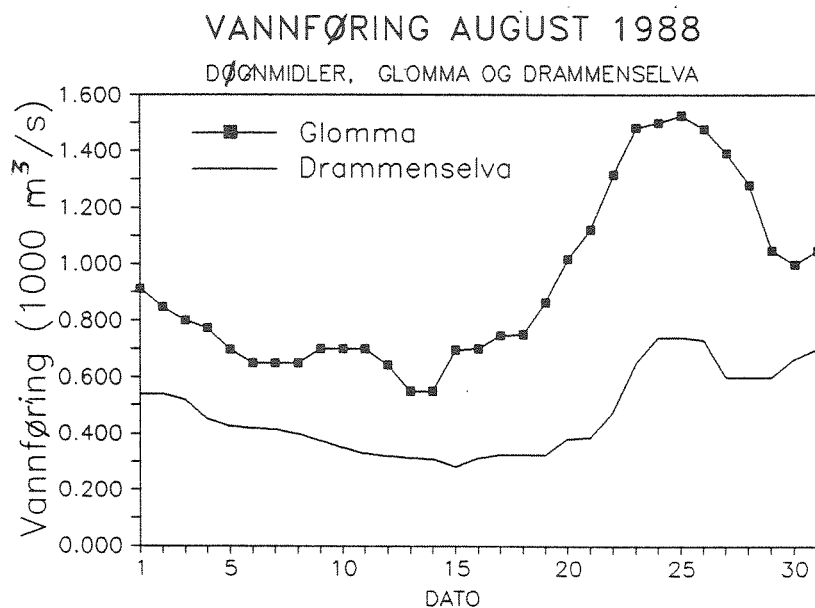


FIG. 6.5b: Som for Fig. 6.5a men for august 1988.

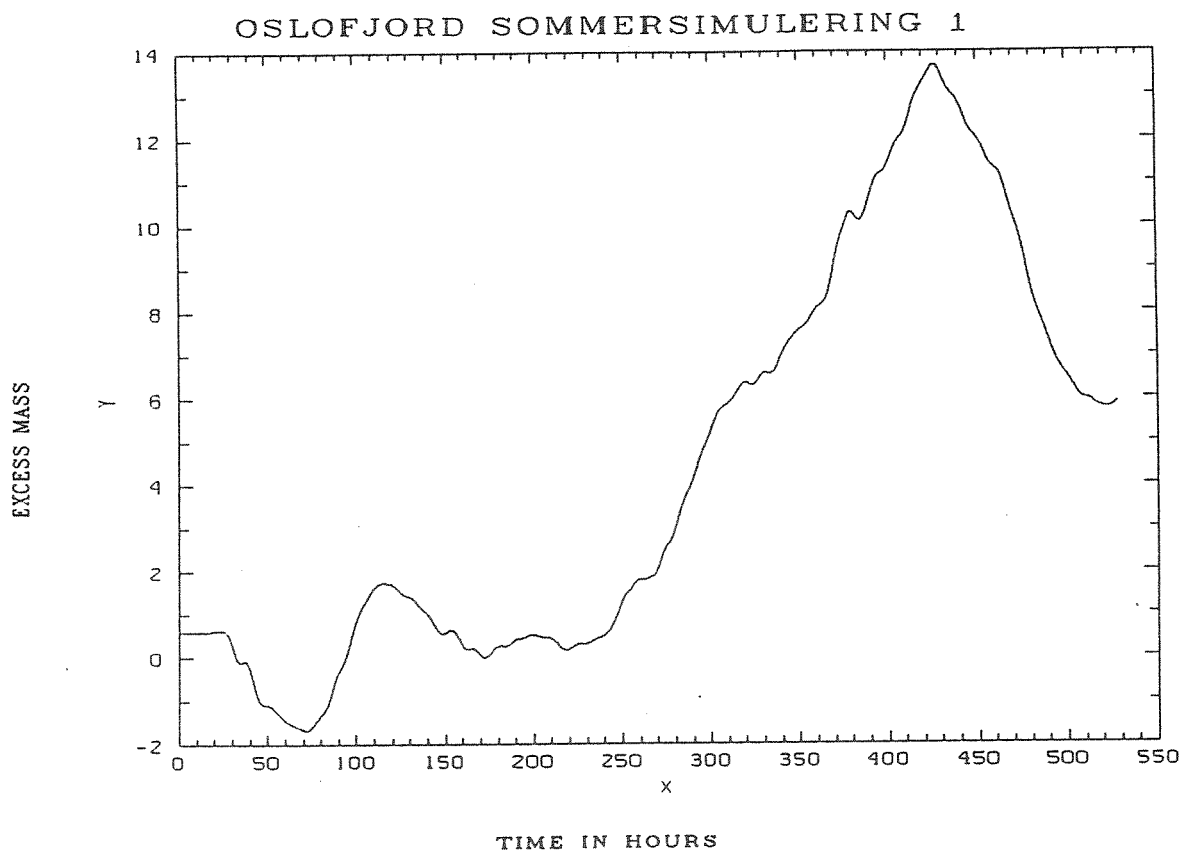


FIG. 6.6: Den heltrukne linjen viser tidsforløpet av overskuddsmasse (excess mass) for eksperimentet SOMMER (ialt 22 døgn eller 528 timer).

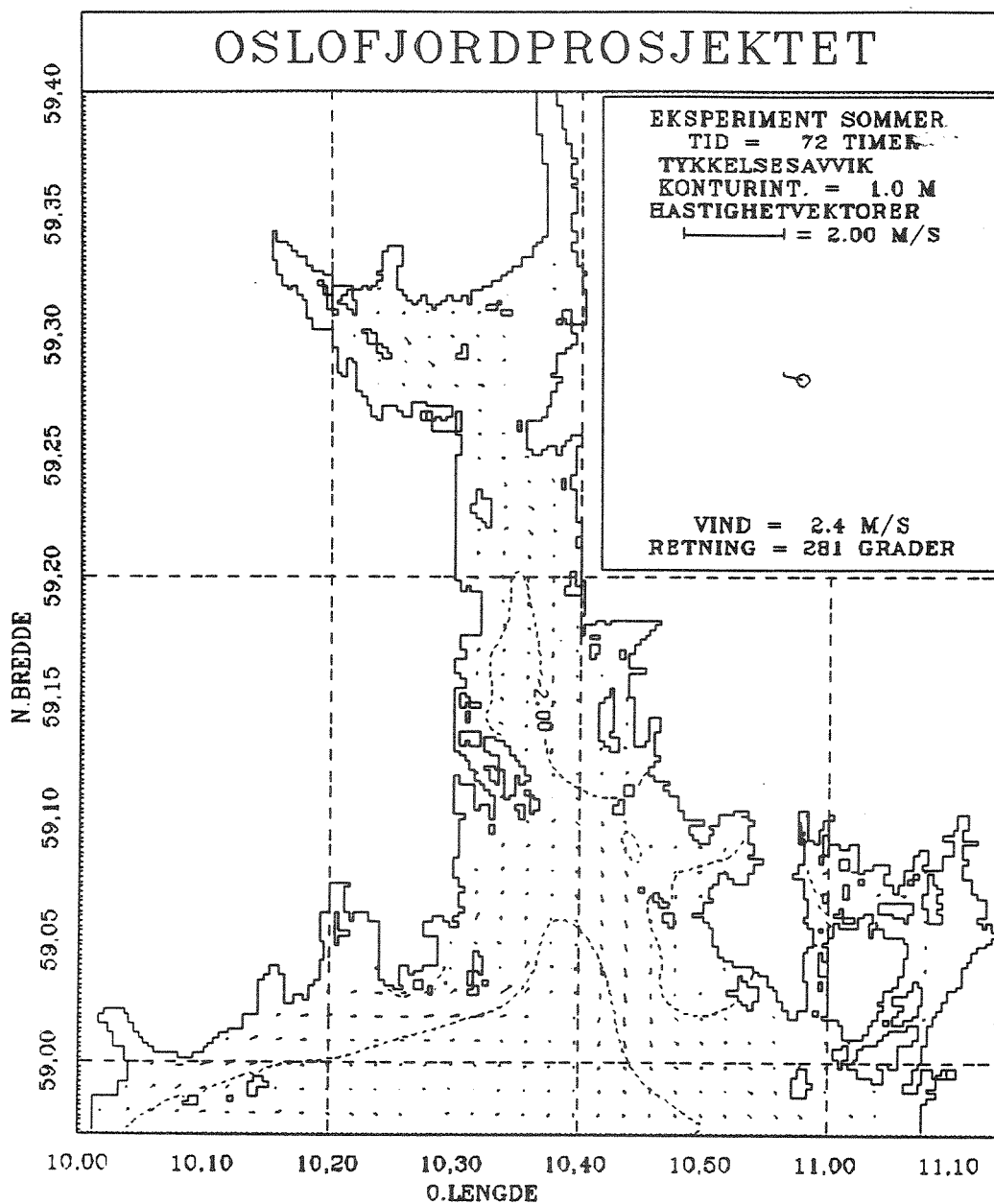


FIG. 6.7: Fordeling av tetthet og strøm for SOMMER etter 72 timers integrering svarende til 17 juli 1988, kl. 00 lokal tid. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

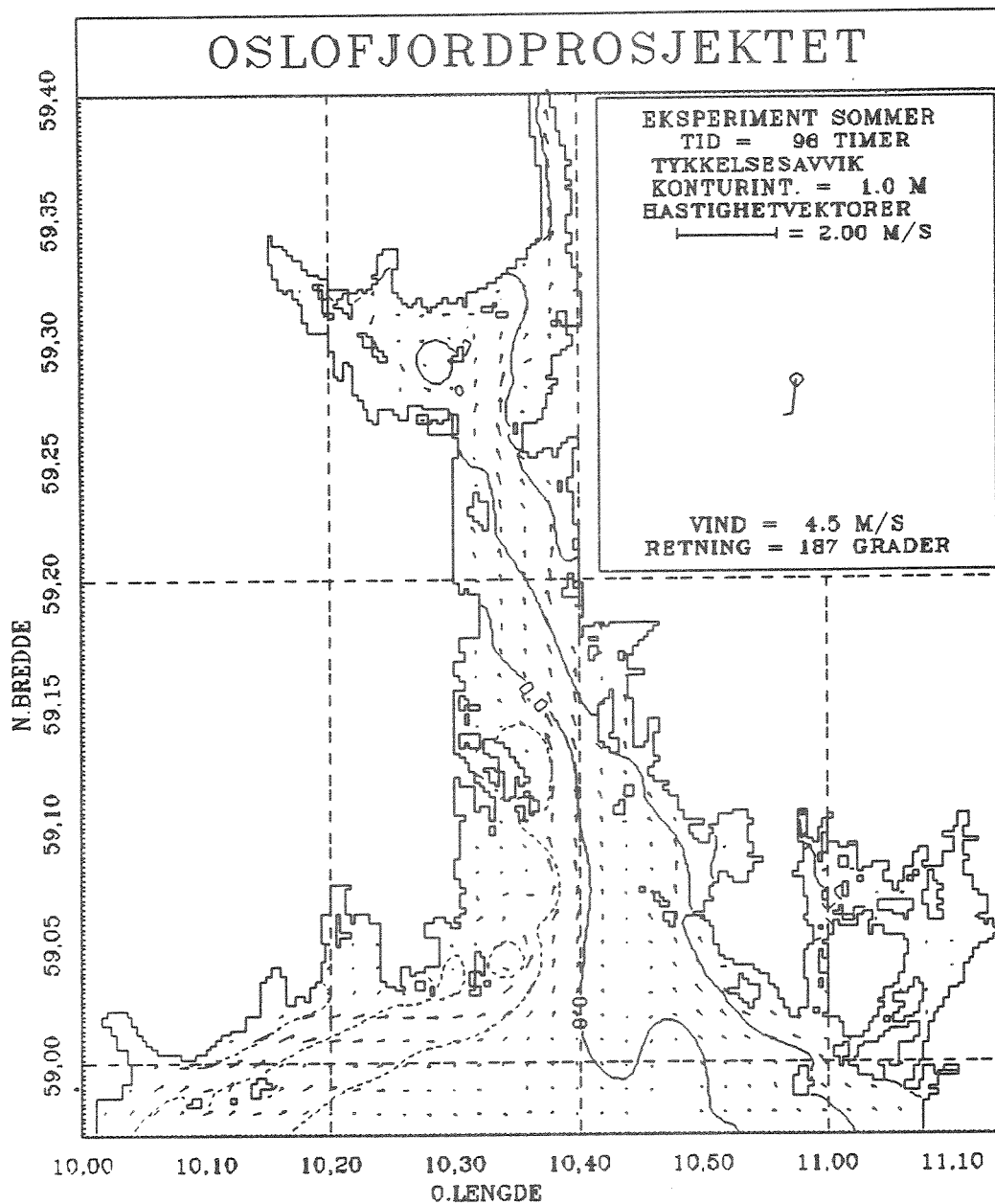


FIG. 6.8: Fordeling av tetthet og strøm for SOMMER etter 96 timers integrering svarende til 18 juli 1988, kl. 00 lokal tid. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

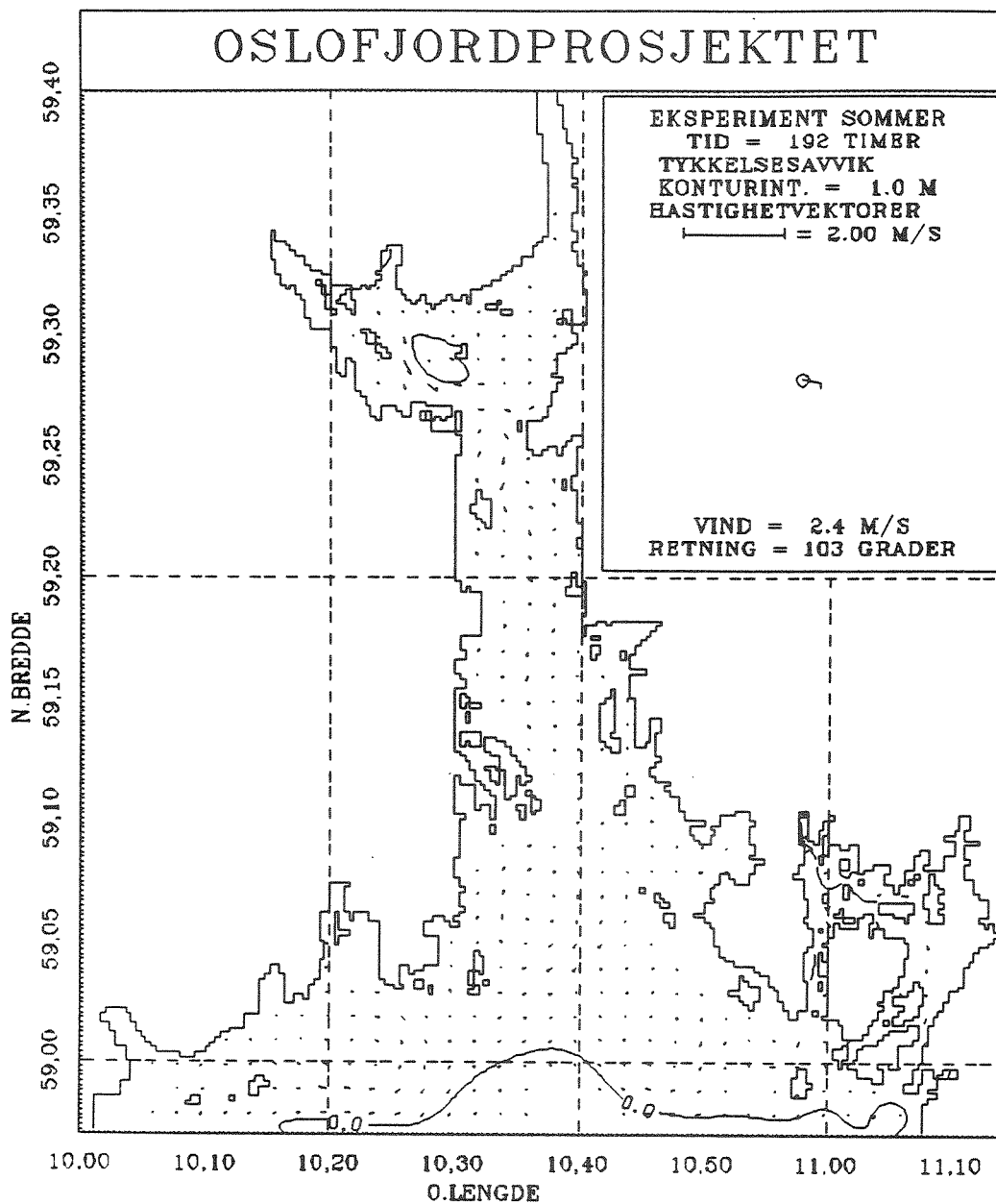


FIG. 6.9: Fordeling av tetthet og strøm for SOMMER etter 192 timers integrering svarende til 22 juli 1988, kl. 00 lokal tid. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

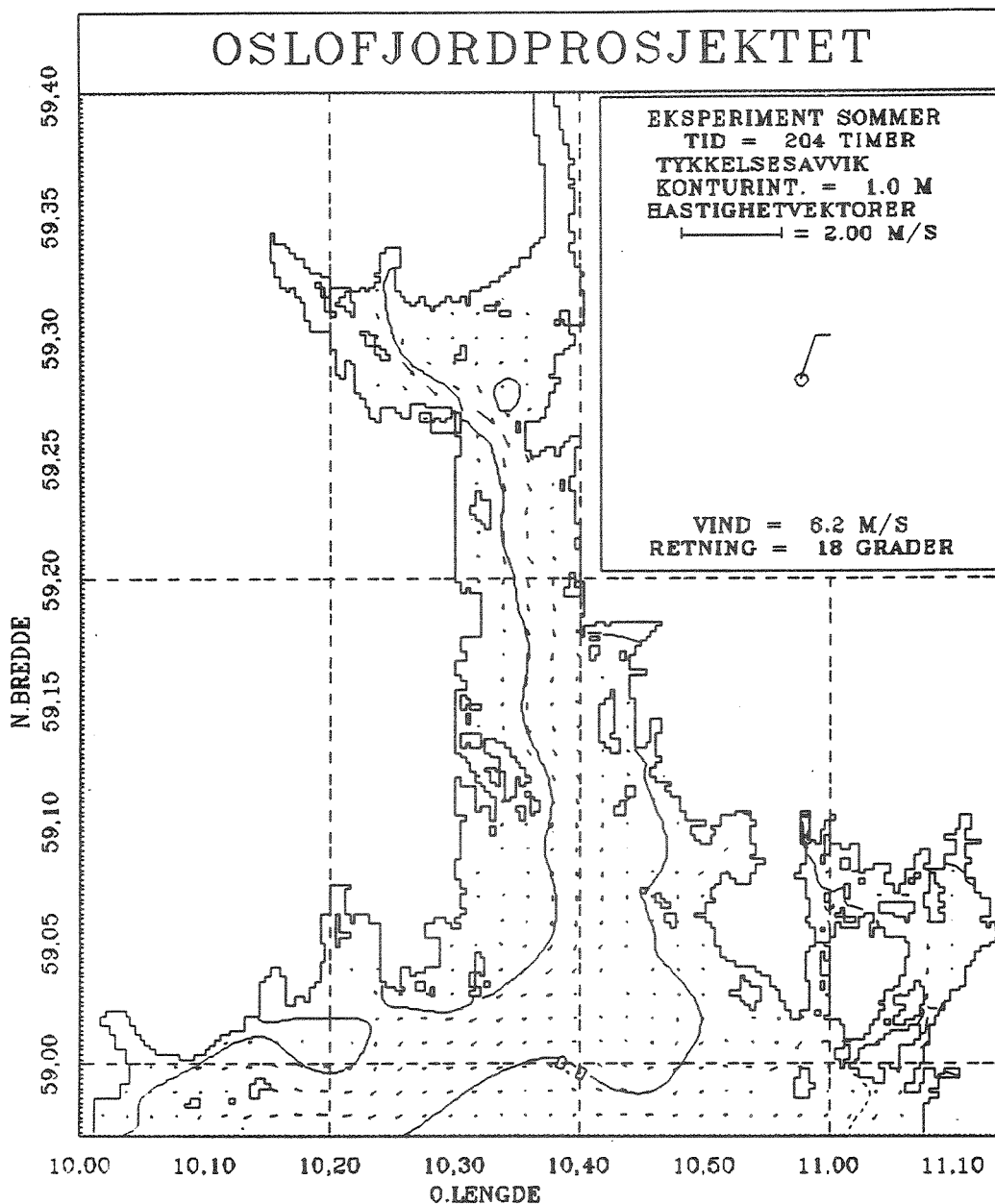


FIG. 6.10: Fordeling av tetthet og strøm for SOMMER etter 204 timers integrering svarende til 21 juli 1988, kl. 12 lokal tid. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

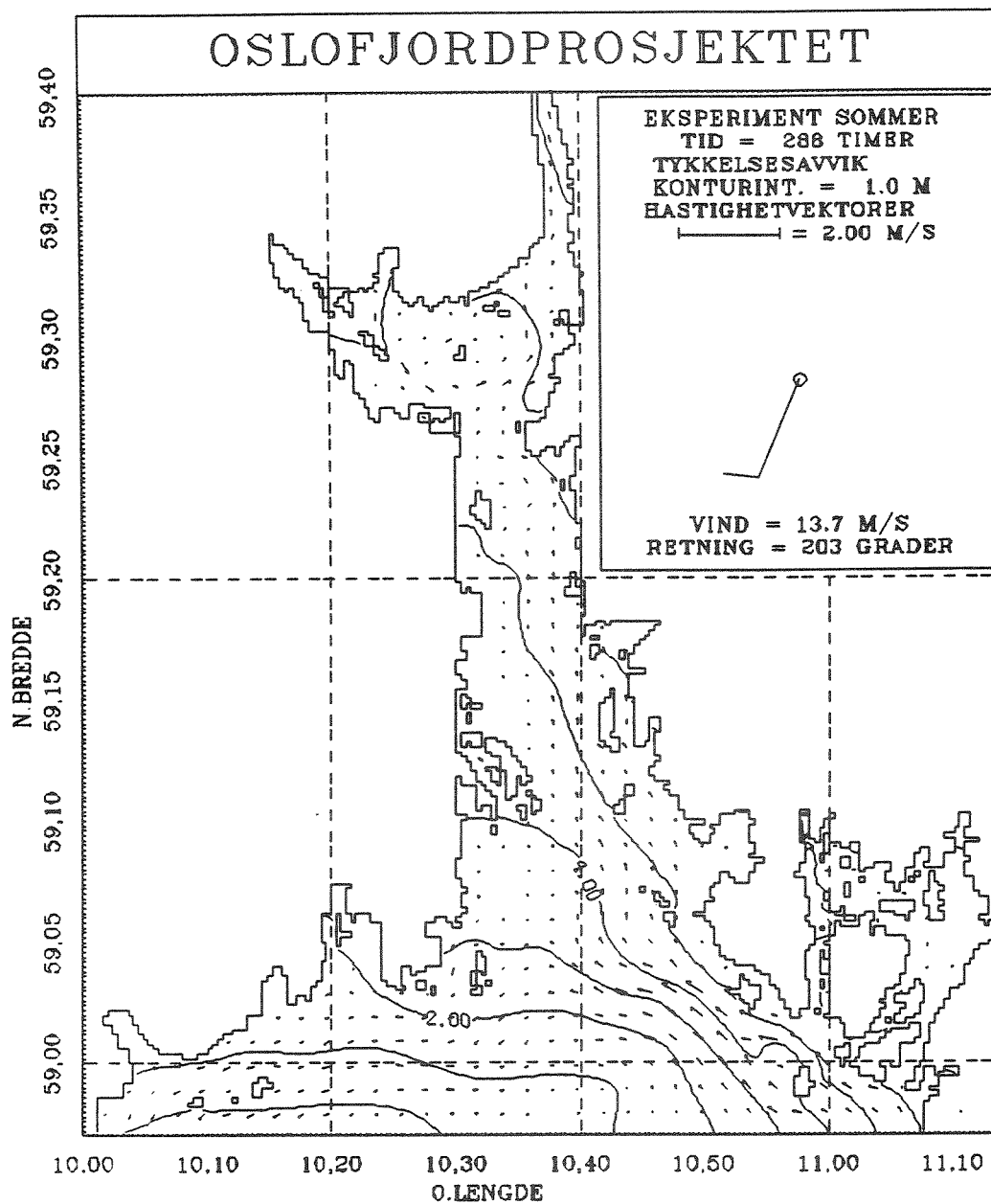


FIG. 6.11: Fordeling av tetthet og strøm for SOMMER etter 288 timers integrering svarende til 26 juli 1988, kl. 00 lokal tid. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

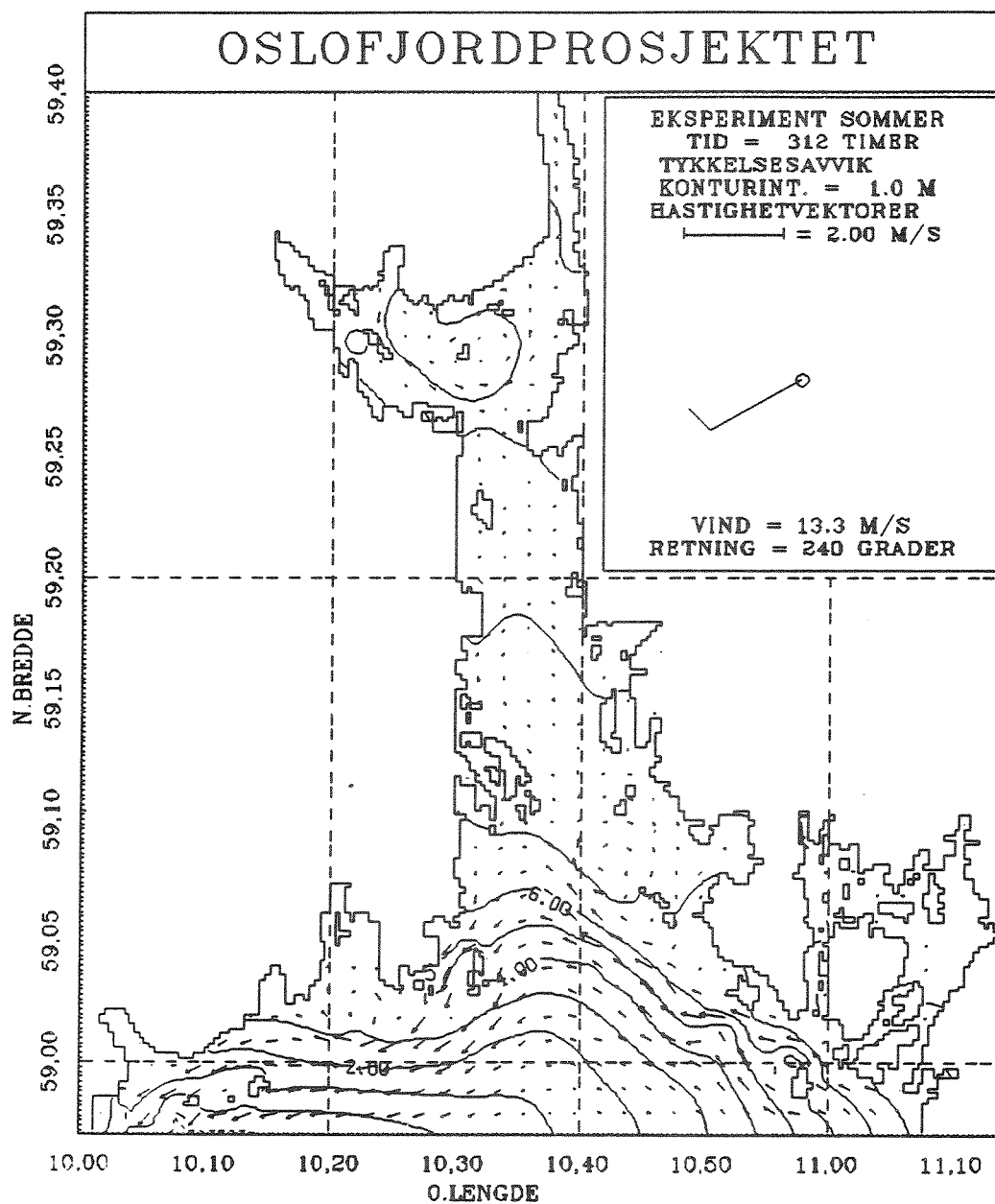


FIG. 6.12: Fordeling av tetthet og strøm for SOMMER etter 312 timers integrering svarende til 27 juli 1988, kl. 00 lokal tid. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

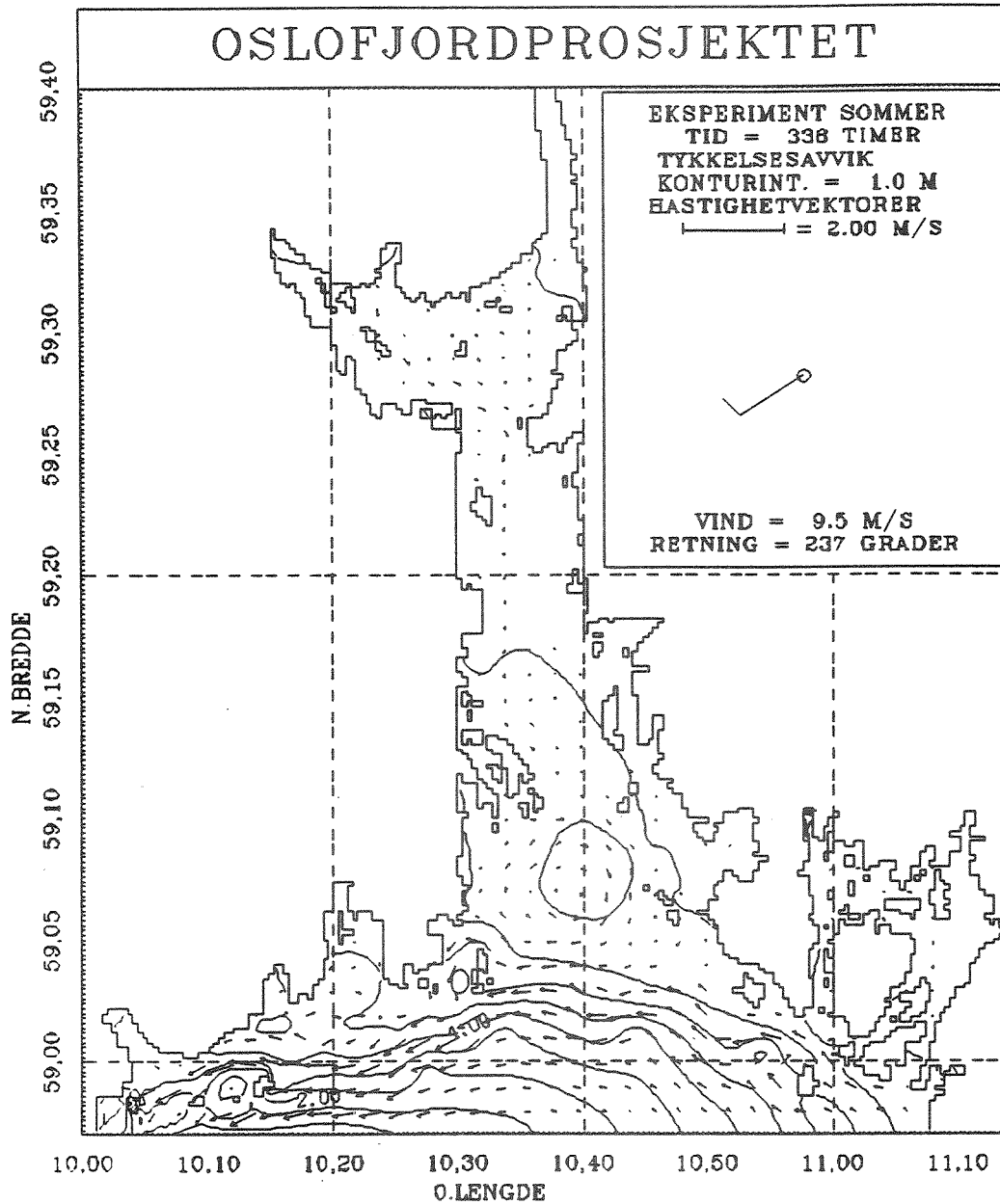


FIG. 6.13: Fordeling av tetthet og strøm for SOMMER etter 336 timers integrering svarende til 28 juli 1988, kl. 00 lokal tid. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

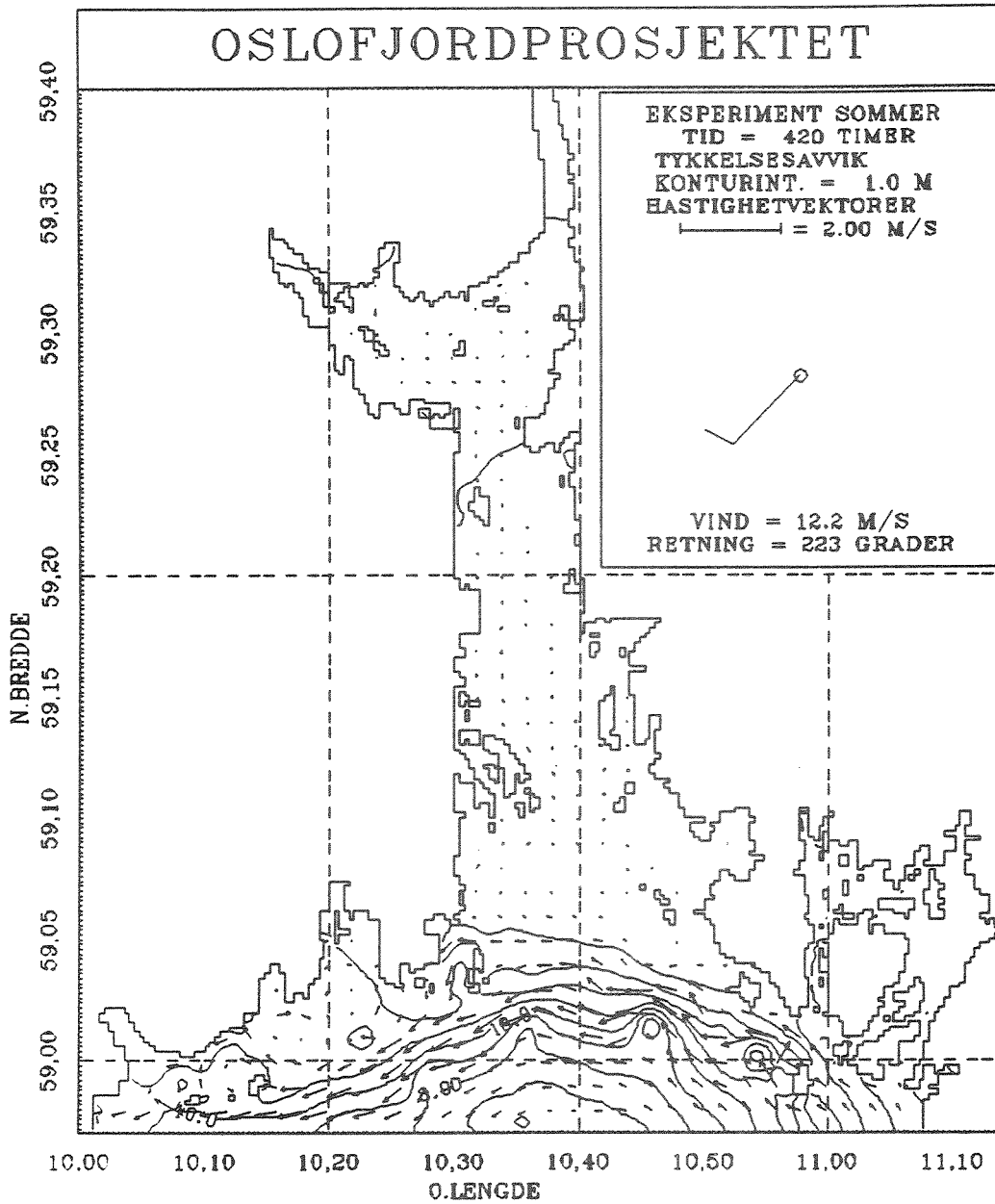


FIG. 6.14: Fordeling av tetthet og strøm for SOMMER etter 420 timers integrering svarende til 30 juli 1988, kl. 12 lokal tid. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

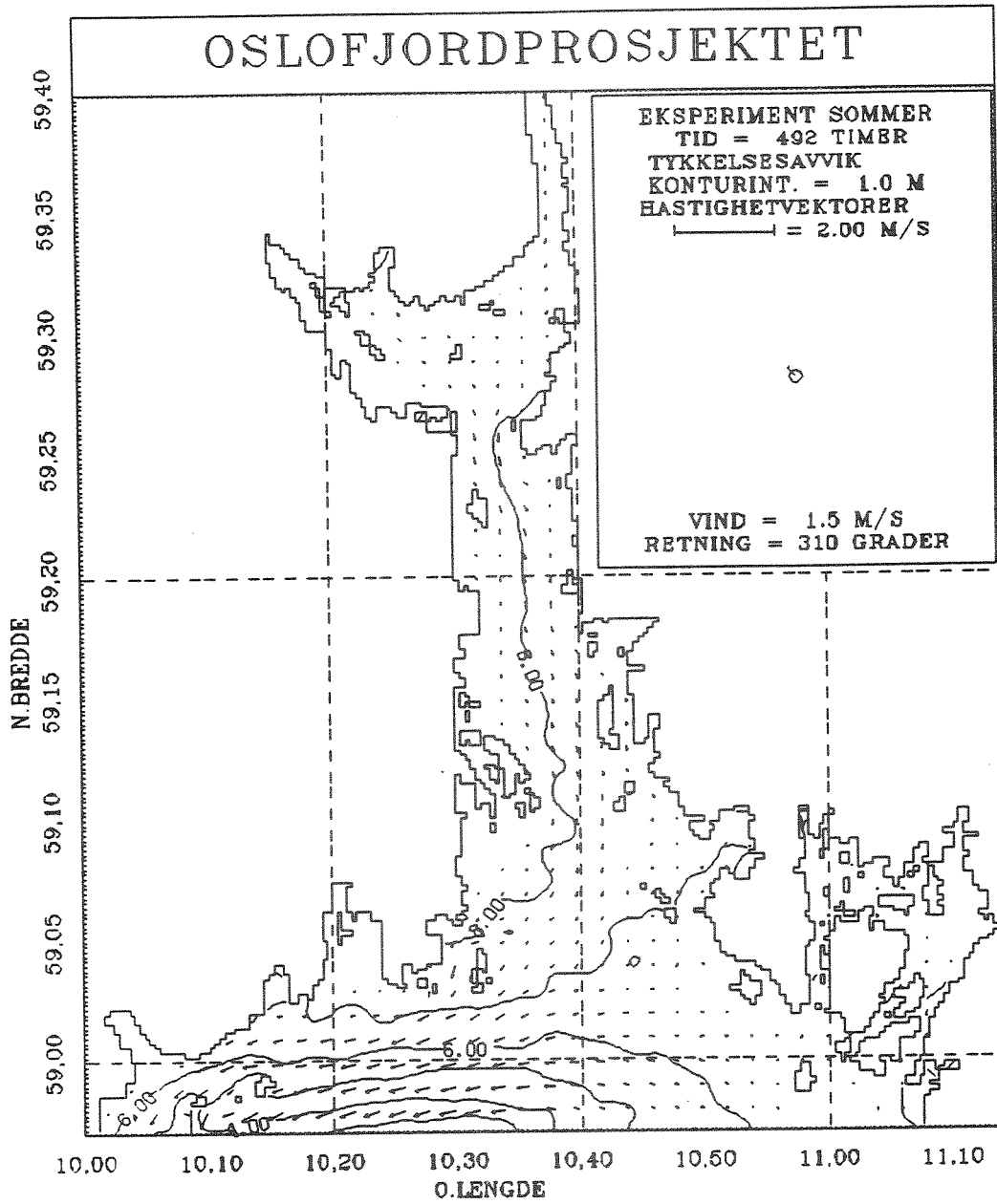


FIG. 6.15: Fordeling av tetthet og strøm for SOMMER etter 492 timers integrering svarende til 2 august 1988, kl. 12 lokal tid. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.1a.

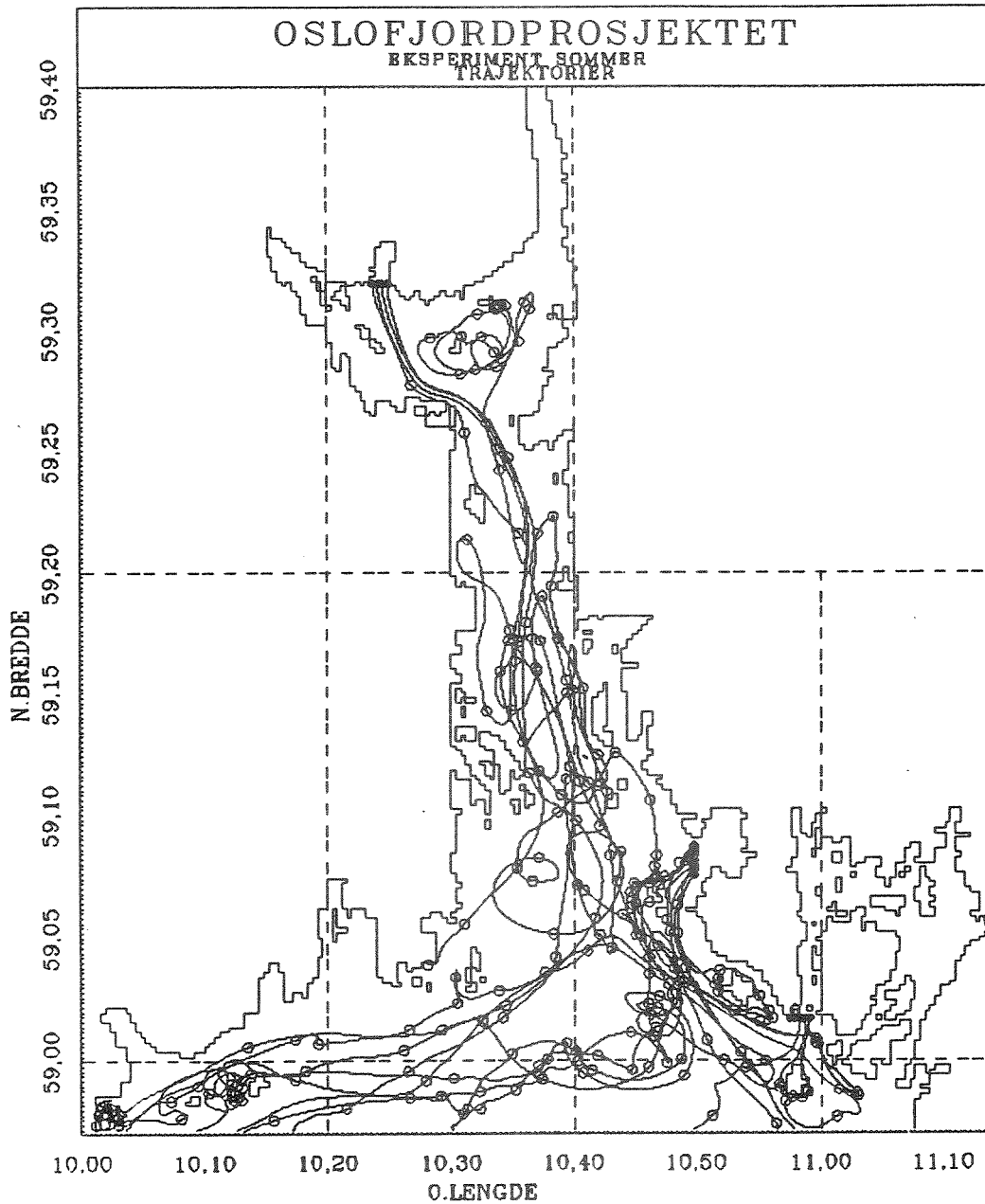


FIG. 6.16: Partikkelbaner for eksperimentet SOMMER. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 4.2.

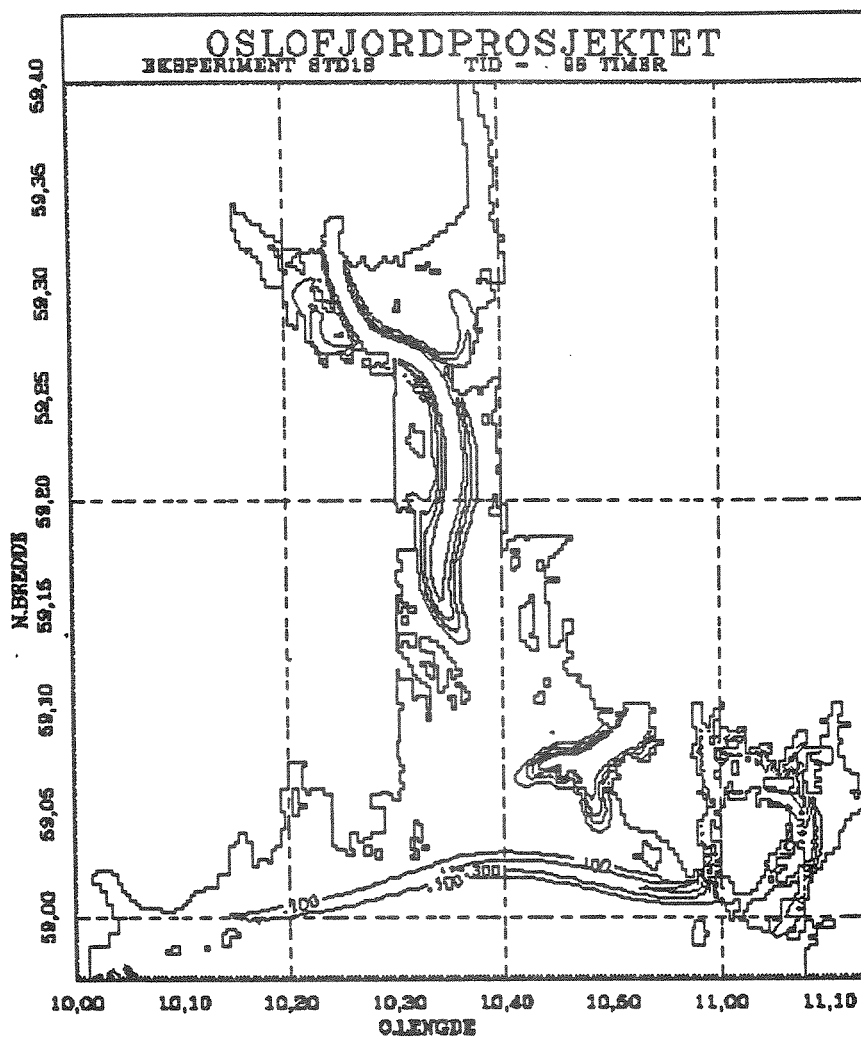


FIG. 7.1: Fordeling av sportstoff etter 96 timer for eksperiment STD1. De heltrukne linjene angir konsentrasjon av et sportstoff i % (1.0=100%). Isolinjer for konsentrasjoner lik 10, 30, 70, og 90% er inntegnet.

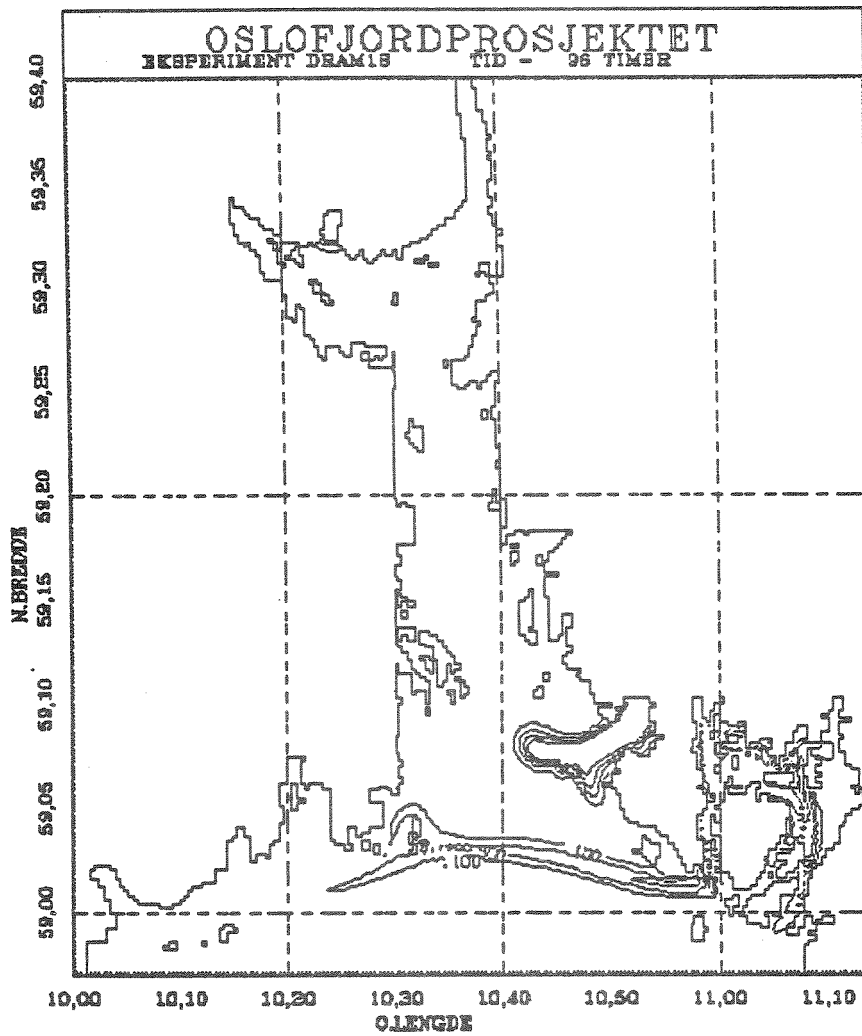


FIG. 7.2: Fordeling av sportstoff etter 96 timer for eksperiment DRAM1. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 7.1.

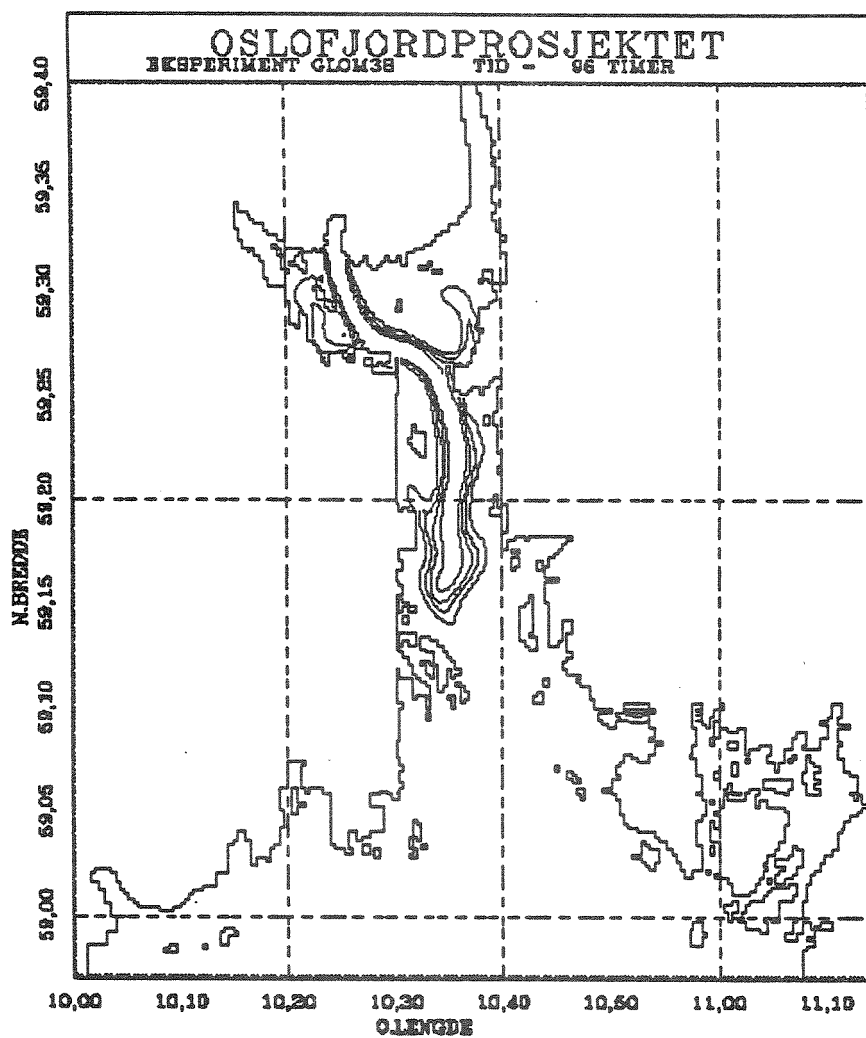


FIG. 7.3: Fordeling av sportstoff etter 96 timer for eksperiment GLOMMA. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 7.1.

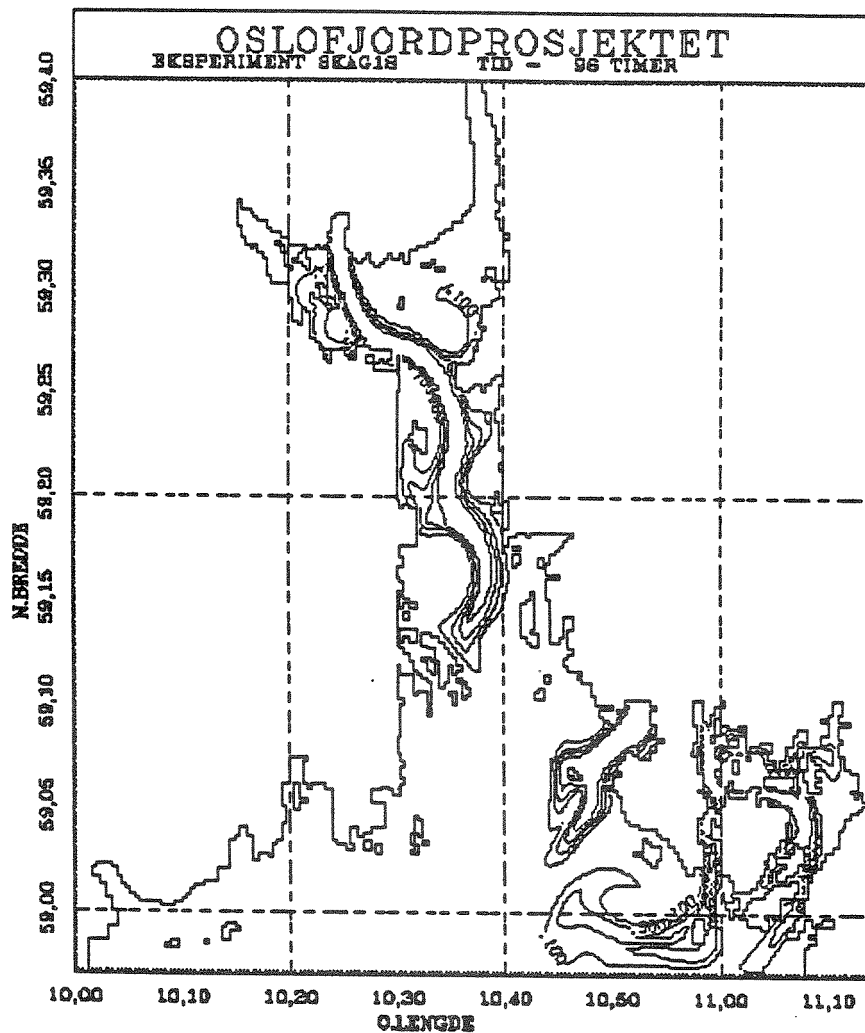


FIG. 7.4: Fordeling av sportstoff etter 96 timer for eksperiment SKAG1. Øvrig forklaring se teksten til Fig. 7.1.