

# Havforskning fra Miljøstyrelsen

Nr. 7 1991

## Skagerrak-frontens dynamik



Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

## Om Hav-90 forskningsprogrammet

Hav-90 forskningsprogrammet skal

- bidrage til at evaluere effekterne af den iværksatte Vandmiljøplan.
- styrke beslutningsgrundlaget for de forholdsregler, der skal tages i fremtiden for at imødegå stigende eutrofiering – og dermed beskytte havmiljøet omkring Danmark.

Denne rapport er én af de ca 45 rapporter, der udsendes som et resultat af Hav-90 forskningsprogrammet. Med Miljøstyrelsen som ansvarlig for programmets gennemførelse, er der sat ca 50 Hav-90 projekter i gang ved 15–20 institutioner.

I forbindelse med Folketingets vedtagelse af Vandmiljøplanen i 1987, blev det aktuelt at få en bedre forståelse af de fysiske og kemiske processer samt de biologiske effekter i de danske havområder. Herudover var der behov for en undersøgelse af, hvilken påvirkning der sker i havområderne ved tilførsel af forurenende stoffer fra atmosfæren og de tilstødende udenlandske farvande. På baggrund heraf fandt vi det hensigtsmæssigt at udvikle modeller til beskrivelse af vand- og stoftransporten samt selve stofomsætningen i de danske farvande.

Med henblik på at skabe en større viden indenfor dette område/de danske havområder besluttede Folketinget – i forbindelse med Vandmiljøplanens vedtagelse – at afsætte 85 mio.kr. til et forskningsprogram, der skulle løbe over en 5-årig periode fra 1988 til udgangen af 1992.

I 1987 nedsatte Miljøministeren derfor et rådgivende ekspertorgan, der skulle bistå Miljøstyrelsen, dels ved planlægning af den fremtidige havmiljøforskning, og dels ved at sikre en såvel faglige som økonomiske afvejning af denne forskning. Forskningen blev delt i 4 hovedområder, og der blev nedsat 4 koordinationsgrupper, som hermed har fået faglig ansvar for hvert sit område:

- Stofomsætningen og -transporten i kystvandene, herunder belastningernes effekt på samme
- Stofomsætningen i de frie vandmasser
- Sedimentets rolle i stofomsætningen
- Meteorologiske processers betydning for eutrofieringsforholdene

Rapporterne udsendes i serien: »Havforskning fra Miljøstyrelsen»

Miljøstyrelsens Vandkvalitetskontor har været sekretariat for Hav-90 forskningsprogrammet, og har sammen med koordinationsgrupperne stået for redaktionen af denne rapportserie.

# **Havforskning fra Miljøstyrelsen**

Nr. 7 1991

## **Skagerrak-frontens dynamik**

**Hydrografien i Skagerrak og Kattegat**

Ole Poulsen  
Danmarks Tekniske Højskole

**Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen**



# Indhold

1.	Forord	side 5
2.	Resume	7
3.	Indledning	9
4.	Hydrografisk oversigt	14
4.1	Hydrografien i Kattegat	14
4.1.1	<i>Vandudskiftningen i Kattegat</i>	14
4.1.2	<i>Strømmen i Læsø Rende</i>	17
4.2	Hydrografien i Skagerrak	20
4.2.1	<i>Nordsøen som randbetingelse</i>	21
4.2.2	<i>Hydrografien i et tværsnit i Skagerrak</i>	27
5.	Skagerrak-frontens dynamik	33
5.1	Frontens dynamik under nordlige og østlige vinde	33
5.2	Frontens dynamik under sydlige og vestlige vinde	36
6.	Feltmålinger	38
6.1	Introduktion	38
6.2	Hydrografiske forhold under vestlige vinde	38
6.3	Hydrografiske forhold under østlige vinde	42
6.4	Diskussion	45
7.	Satellitbilleder og numeriske modeller	47
7.1	Satellitbilleder	47
7.2	Numeriske modeller	50
8.	Sammenfatning	56
9.	Litteraturliste	58



# 1. Forord

## Forskningsprojekt

Den forliggende rapport beskriver resultaterne af et forskningsprojekt vedrørende Skagerrak-fronten, som blev afsluttet februar 1991. Arbejdet, der har været finansieret af Miljøstyrelsen, er udført på Institutet for Strømningsmekanik og Vandbygning, Danmarks Tekniske Højskole.

## Rapportens tilblivelse

Rapportens tilblivelse er sket på baggrund af forfatterens engelsksprogede Ph.D.-afhandling. I et forsøg på at henvende sig til en bredere målgruppe af læsere er denne rapport lavet som en mere beskrivende gennemgang af de dominerende hydrografiske fænomener, og de hertil tilknyttede biologiske forhold i de marine områder, der er bestemmende for Skagerrak-fronten.

Det har desværre ikke været muligt helt at skjule, at rapporten tager udgangspunkt i en engelsksproget afhandling, idet tekster på figurer stadig er på engelsk. Læseren bør ikke lade sig forvirre af denne reminiscens, men blot tage dette som en opfordring til at læse originalværket, der bl.a. udmærker sig ved at indeholde et større antal - unikke - feltmålinger fra Kattegat og Skagerrak.

Dette forord skal desuden bruges til at takke Civilingeniør, Ph.D. Karsten Bolding Kristensen for sin hjælp til opsætning og kørsel af den numeriske model anvendt i kapitel 7.2.





## 2. Resumé

Formål	Elementer af hydrografien i Skagerrak og Kattegat er undersøgt med henblik på at bestemme Skagerrak-frontens dynamik. Skagerrak-fronten er i den eksisterende litteratur defineret som overgangen mellem det brakke overfladevand i Kattegat og det salte overfladevand i Skagerrak. Fronten bliver opfattet som Kattegats nordlige grænse og har en afgørende betydning for forståelsen af vandudvekslingen mellem Skagerrak og Kattegat.
Vindgeneret medrivning i Kattegat	Den vindgenererede medrivning af bundvand op i overfladevandet i Kattegat viser en stor årlig variation.
Strømningen i Læsø Rende	Størrelsen af den oscillerende vandgennemstrømning i Læsø Rende er estimeret til $\pm 100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Transporten af vand gennem Læsø Rende skyldes en kombination af en transport genereret af variationer i vindstuvning og en transport genereret som en konsekvens af den opadrettede medrivning i Kattegat. Forløbet af udstrømningen fra Store Bælt er i Kattegat bestemt af forholdene i Læsø Rende.
Skagerrak	<p>Transporten af vand ind og ud af Skagerrak langs den danske kyst er bestemt af randbetingelser i Nordsøen. Som et resultat heraf er størrelsen og retningen af transporten under stor indflydelse af de meteorologiske forhold i Nordsøområdet.</p> <p>Feltmålinger har vist, at de store strømhastigheder langs skråningen til Norske Renden genererer en blanding af bund- og overfladevand, hvilket skaber forhold, der fremmer biologiske processer.</p>
Skagerrak-fronten	Den eksisterende definition af Skagerrak-fronten er ikke fyldestgørende. Det er ved teoretiske overvejelser sammenholdt med feltmålinger dokumenteret, at Skagerrak-fronten består af en kinematisk front og en densitets front. Den kinematiske front defineres som overgangen mellem vandmasser med relative høje hastigheder og vandmasser med relativt små hastigheder i det nordlige Kattegat. Densitets fronten, der er identisk med den traditionelle frontopfattelse, defineres som overgangen mellem det brakke overfladevand i Kattegat og det salte overfladevand i Skagerrak.
Kinematisk front	
Densitets front	
	Den kinematiske front er under nordlige og østlige vinde et resultat af en geostrof balance mellem Corioliskraften, p.g.a. den høje strømhastighed i det salte Skagerrak vand, og den barocline trykgradient skabt af skillefladehældningen. Positionen af densitets fronten er under disse vindforhold identisk med positionen af den kinematiske front, hvorved Skagerrak-fronten vil kunne registreres som en samlet frontstruktur.

Under sydlige og vestlige vinde er den kinematiske front skabt p.g.a. en balance mellem Corioliskraften og den barotrop trykgradient i det nordlige Kattegat. Positionen af densitets fronten, der reelt er bestemt af kontinuiteten i volumen i Kattegat, vil under disse vindforhold bevæge sig ind i Kattegat, hvorved Skagerrakfronten separerer og som konsekvens danner to selvstændige frontstrukturer.

#### Den Jyske Kyststrøm

Vand fra den Jyske Kyststrøm transporteres ind i Skagerrak langs den danske kyst under sydlige vinde. Vandet fra den Jyske Kyststrøm fortsætter langs den danske kyst i Skagerrak for 3-10 dage senere at have mulighed for at strømme ind i Kattegat.

Det generelle strømmønster i Skagerrak og responsen på ændringer i de meteorologiske forhold kan beskrives barotropt.

### 3. Indledning

Skagerrak-frontens dynamik

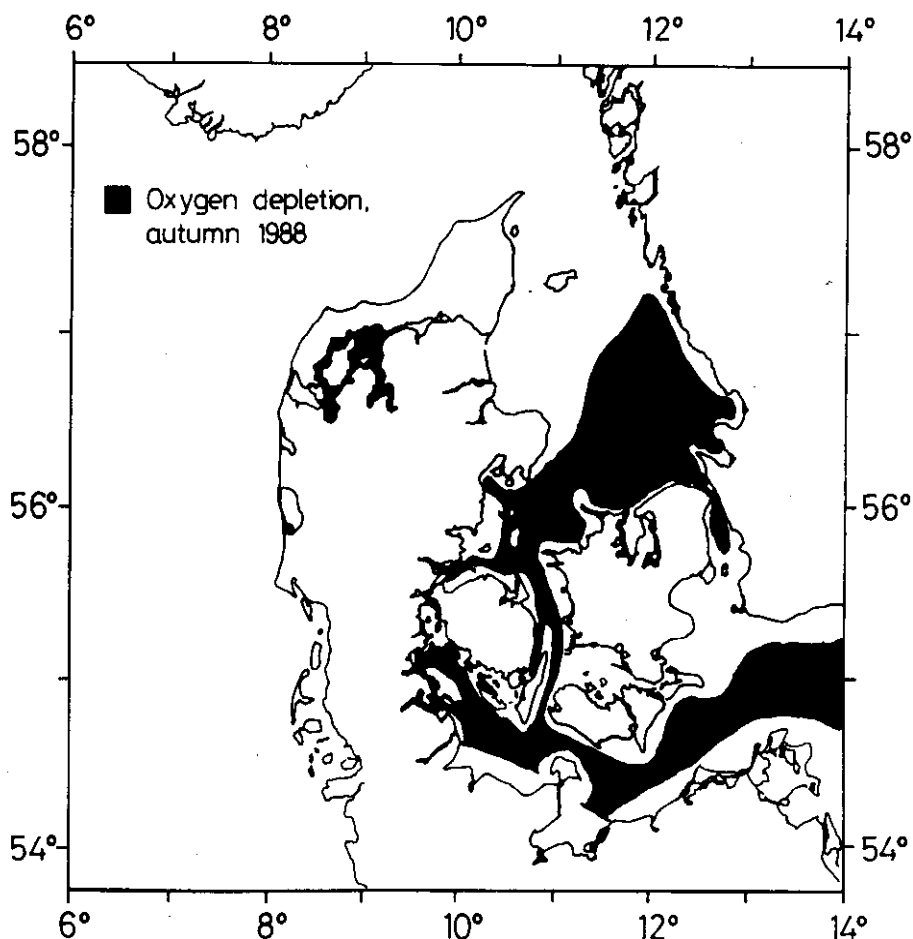
Målet med denne rapport "Skagerrak-frontens dynamik - Hydrografien i Skagerrak og Kattegat" er at beskrive de hydrografiske forhold i overgangsområdet mellem Kattegat og Skagerrak med henblik på at forbinde den Jyske Kyststrøm med Kattegat. Beskrivelsen er primært baseret på analytiske overvejelser sammenholdt med feltmålinger foretaget med undersøgelsesskibet "DANA" i årene 1989 og 1990.

Iltsvind

Interessen for denne beskrivelse skyldes, at der gennem 80'erne i de indre danske farvande ofte er konstateret iltsvind i store områder i Kattegat og Bælthavet. De første tilfælde af udbredt iltsvind blev registreret i efteråret 1981. Iltsvind i de indre danske farvande er herefter registreret næsten årligt. Området i de indre danske farvande berørt af iltsvind er vokset med tiden, således at hele Bælthavet samt de sydlige og centrale dele af Kattegat nu hvert år har stor risiko for at opleve perioder med iltsvind (se fig. 3.1).

**Figur 3.1**

*Kort over de områder i Kattegat og Bælthavet der var ramt af iltsvind i september/oktober 1988 (Kilde: Danmarks Fiskeri- og Havundersøgelser).*



Tilførsel af kvælstofholdige næringssalte

Antallet af mekanismer, der har en indflydelse på den øgede intensitet af iltsvind i de indre danske farvande, er mangfoldige, men den generelt accepterede teori konkluderer, at årsagen er den forøgede tilførsel af kvælstof-baserede næringssalte til Kattegat og Bælthavet (Ærtebjerg, 1986). Denne tilførsel forårsager en øget produktion og sedimentation af organisk materiale i vandsøjlen.

Den biologiske årscyklus

I det sene efterår og om vinteren er den biologiske produktion lille p.g.a. den lille intensitet i solindstrålingen. Stabilitet af vandsøjlen er desuden lille i disse måneder, hvilket resulterer i blanding over større dybder, og dermed en generelt kortere opholdstid i den fotiske zone for en partikel. Indholdet af næringssalte stiger i den samme periode dels grundet det lille forbrug dels pga. remineralisering og tilførsel af næringssalte fra land (pga. vinterafstrømning). Den høje koncentration af næringssalte i den fotiske zone og den stigende intensitet af indkommende sollys resulterer i februar/marts i gunstige betingelser for en pludselig intensiv phytoplankton produktion, også kaldet forårsopblomstringen. Størsteparten af phytoplankton produktionen under forårsopblomstringen vil, når phytoplanktonen dør, synke og sedimentere på bunden, da de ikke kan nå at blive græsset eller regenereret i vandsøjlen. Phytoplankton produktionen er efter forårsopblomstringen og igennem sommeren begrænset af tilførslen af kvælstof-baserede næringssalte, hvilket generelt anses for det begrænsende næringssalt i de marine dele af Kattegat og Bælthavet. Størrelsen af produktionen bliver afhængig af mængden af næringssalte regenereret i vandsøjlen samt af mængden af næringssalte, der bliver tilført overfladevandet fra bundvandet p.g.a. vind-, tidevands- eller friktions genereret blanding. En stor procentdel af sommerproduktionen vil på et eller andet tidspunkt ende som eskremitter, marin sne og anden form for dødt organisk materiale som sedimenterer mod bunden.

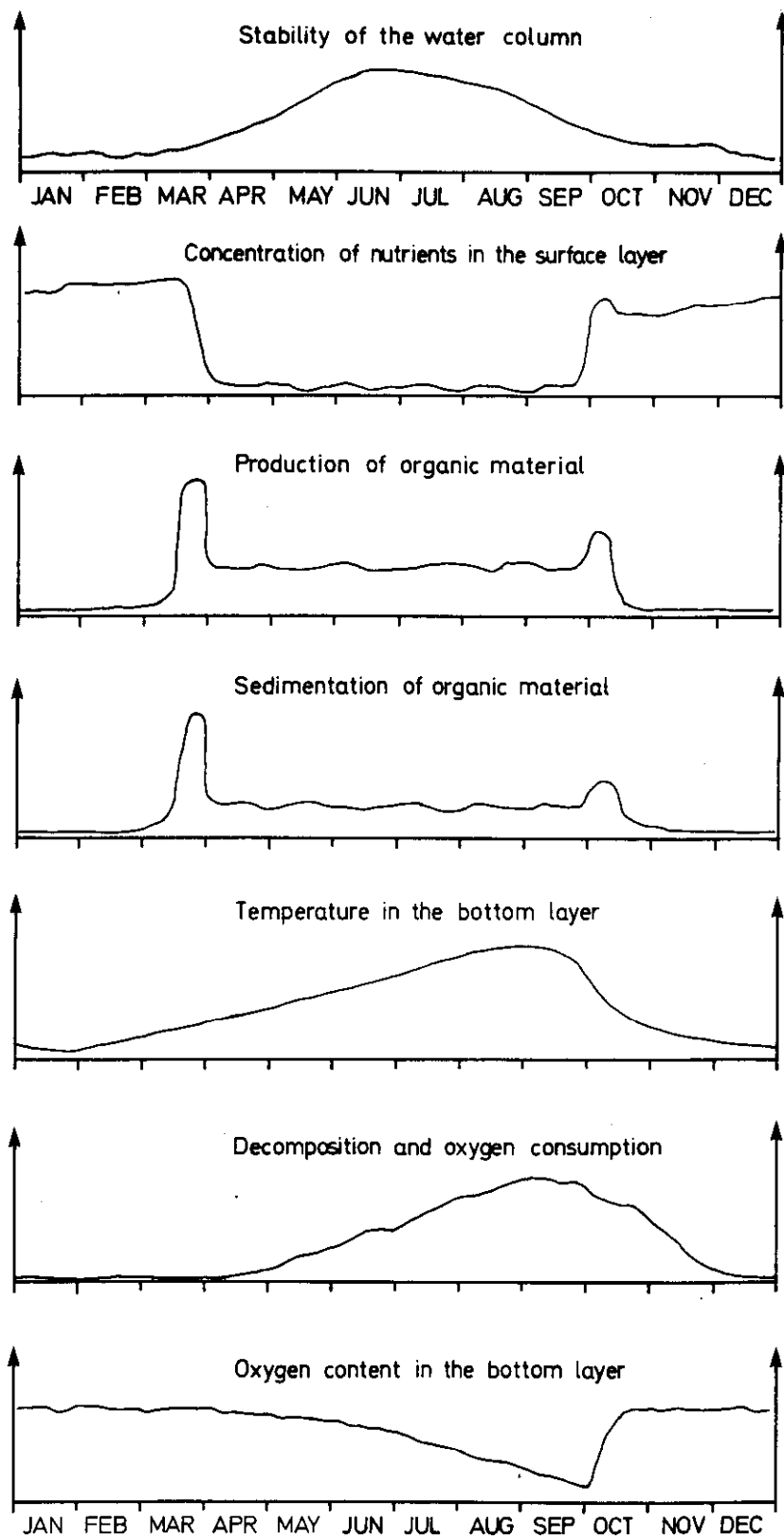
Iltforbruget i bundvandet

Iltforbruget i bundvandet stiger i sensommeren, da nedbrydningshastigheden af det sedimenterede organiske materiale hovedsageligt er afhængig af temperaturen. Kattegat og Bælthavet er i denne periode domineret af en pyknoklin, der minimerer udvekslingen af vand mellem bundvandet og overfladevandet. Som en konsekvens heraf medfører nedbrydningen af det sedimenterede organiske materiale, at koncentrationen af næringssalte vokser i bundvandet samtidig med, at koncentrationen af ilt aftager. Når indholdet af ilt er mindre end 4 mg O<sub>2</sub>/l begynder fisk at migrere til andre lokaliteter. Hvis iltindholdet i bundvandet falder yderligere, udvikler der sig en situation med iltsvind som observeret i Kattegat og Bælthavet.

I løbet af efteråret vil kraftige vinde medføre, at vandsøjlen bliver blandet. Som konsekvens dels heraf dels pga. at nyt bundvand tilføres, stiger iltkoncentrationen i bundvandet, og afslutter en periode med iltsvind. En skitse af den årlige variation i de involverede processer, der genererer iltsvind, er illustreret i fig. 3.2.

Tilførsel af kvælstof

Den totale tilførsel af kvælstof til Kattegat og Bælthavet er blevet



**Figur 3.2**  
 Illustration af den årlige variation i de styrende processer der er årsagen til iltsvind i de indre danske farvande (Kilde: Hansen et al, 1990).

bestemt af Rydberg (1987) og viser en netto sedimentation på ca. 200.000 ton N/år i de indre danske farvande. En af de potentielle kilder til transporten af næringssalte og organisk materiale til de indre danske farvande gennem den nordlige rand til Kattegat er den Jyske Kyststrøm.

#### Nordsøen

Nordsøen modtager årligt omkring 1.000.000 ton N/år, hvoraf ca. 50-60 % kommer fra de tyske floder Elben og Rhinen. Ferskvandsafstrømningen fra floderne danner et område i Tyske Bugt, hvor vand med en relativ lav salinitet og en høj koncentration af næringssalte dominerer. Under visse meteorologiske omstændigheder danner dette lav-saline vand en strøm langs den jyske vestkyst, der eventuelt kan føre vand ind i Kattegat. Rapporten omhandlende den Jyske Kyststrøm fra Miljøstyrelsen (Richardson og Jacobsen, 1990) konkluderer v.h.a. radioaktive tracere, at 50-70 % af det tilførte bundvand til Kattegat har passeret Tyske Bugt. Resultatet i selvsamme rapport kan dog kun indikere hvilke mængder af næringssalte, der potentielt bliver transporteret fra Tyske Bugt til Kattegat. Rapporten er ikke i stand til at bestemme, hvorledes transporten af vand fra Tyske Bugt til Kattegat påvirker de indre danske farvande, da transporten er en tidsvarierende proces samtidig med, at de transporterede næringssalte og det organiske materiale ikke er konservative stoffer.

#### Den Jyske Kyststrøm

#### Numeriske modeller

For at kunne estimere mængden af næringssalte og organisk materiale, der transporteres ind i Kattegat p.g.a. den Jyske Kyststrøm, er det nødvendigt at kunne beskrive de fysiske processer i både tid og rum, ligesom de biologiske processer skal kunne beskrives og modelleres. Dette kan gøres i en numerisk model, som er en beskrivelse af naturen. Enhver model indeholder en eller anden form for unøjagtighed, dels fordi visse delprocesser ikke kan beskrives med tilstrækkelig nøjagtighed, dels fordi det er umuligt at simulere korrekte rand- og startbetingelser. Det er derfor umuligt idag at forsøge at integrere den fuldstændige korrekte fysik og biologi. Det er dog muligt at lave en beskrivelse af transporten fra Tyske Bugt til Kattegat ved at sammensætte delmodeller, der beskriver isolerede fysiske eller biologiske processer. Det følgende vil hovedsageligt beskæftige sig med beskrivelsen af de fysiske processer.

De fysiske processer, der kontrollerer strømmønstret i Skagerrak, er stadig ikke forklaret tilfredsstillende samtidig med, at kompleksiteten i de fysiske processer i området introducerer horisontale og vertikale diskontinuiteter, så strømme og cirkulationsmønstre kan være svære at modellere korrekt i en numerisk model. Eksisterende numeriske modeller kan dog indikere det generelle strøm-mønster i Skagerrak (se f.eks. Pingree og Griffiths, 1980).

Det er nødvendigt at forstå baggrunden for de fysiske processer i Skagerrak for at kunne beskrive transporten af vand fra Tyske Bugt til Kattegat. Dette omfatter en forståelse af variationen i strøm-mønstret i Skagerrak i tid og rum samt en forståelse af dynamik-

ken i Skagerrak-fronten, der kontrollerer delingen af eventuelt vand fra den Jyske Kyststrøm i en del, der følger den generelle cirkulation i Skagerrak, og i en del, der strømmer ind i Kattegat.

For at bestemme effekterne i Kattegat af transporten af vand fra Tyske Bugt er der således tydeligvis brug for en inter-disiplinær biologisk og hydrodynamisk forskning for at bestemme variationen og mængden af næringssalte og organisk materiale, der transporteres gennem den nordlige rand til Kattegat.

## 4. Hydrografisk oversigt

For at være i stand til at beskrive Skagerrak-frontens dynamik, forstå indflydelsen af fronten på vandudvekslingen mellem Skagerrak og Kattegat, samt forklare den biologiske effekt i Kattegat af denne vandudveksling, er det nødvendigt at kende og forstå de mekanismer, der bestemmer strømmingerne i disse marine områder. Det følgende kapitel giver en beskrivelse af hydrografien i udvalgte dele af Kattegat og Skagerrak.

### 4.1 Hydrografien i Kattegat

#### Geometrien af Kattegat

Kattegat er et fladvandet havområde ca. 220 km langt og 100 km bredt, hvilket giver et samlet overfladeareal på ca. 22.000 km<sup>2</sup> (Mikulski, 1986). Det totale volumen i Kattegat er 515 km<sup>3</sup> svarende til en middeldybde på 23 m. Bundtopografien i Kattegat er meget irregulær, hvor den østlige del er præget af store dybder p.g.a. Norske Rendens forlængelse, der rækker ind i Kattegat. Den vestlige del er karakteriseret af store fladvandede områder f.eks. Aalborg Bugt, hvor vanddybden kun er 10-12 m, hvilket er mindre end skillefladedybden i Kattegat. Området nord for Læsø har en middeldybde på ca. 35 m (se fig. 4.1).

#### Lagdeling

Kattegat kan betragtes lagdelt med et overfladelag bestående af brakvand kommende fra Østersøen, og et bundlag bestående af saltvand fra Skagerrak/Nordsøen. Det Baltiske vand, der tilføres overfladelaget i Kattegat, har en middelsalinitet på 12 ‰, hvis det er passeret igennem Øresund, mens en middelsalinitet på 20 ‰ er karakteristisk for vandet fra Store Bælt. Når overfladevandet strømmer ud i Skagerrak er middelsaliniteten steget til ca. 25 ‰. Stigningen i overflade-saliniteten skyldes primært vind-genereret medrivning af bundvand op i overfladevandet over hele Kattegat. Bundvandets salinitet er ca. 33 ‰, hvilket skaber en haloklin mellem overfladevand og bundvand. Figur 4.2 viser variationen i middeldensiteten i Kattegat i juli måned.

#### 4.1.1 Vandudskiftningen i Kattegat

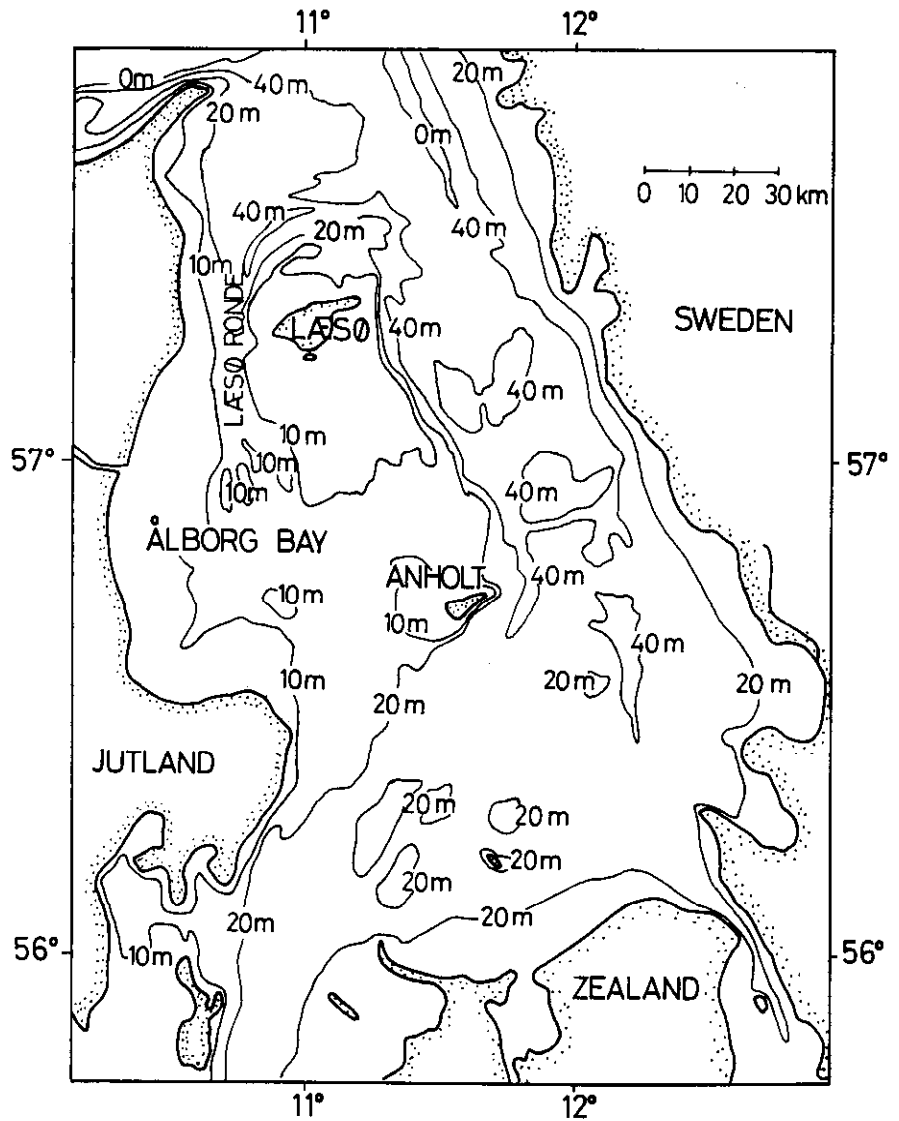
#### Barotrop transport

Vandudskiftningen i Kattegat er under indflydelse af mange fænomener f.eks. vind, tidevand og den lokale bundtopografi. Den mest betydningsfulde faktor er dog den skiftende ind- og udstrømning mellem Østersøen og Nordsøen. Denne udskiftning af vand er kontrolleret af trykgradienten mellem de to havområder. Hvis trykgradienten skyldes en gradient i overfladeelevationen eller en gradient i det atmosfæriske tryk, kaldes den genererede transport



**Figur 4.1**

Kort over Kattegat der viser den store variation i dybdeforholdene.

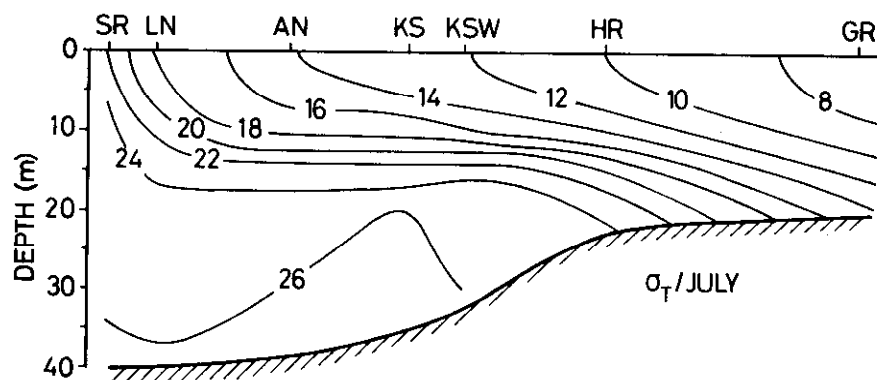


### Baroklin transport

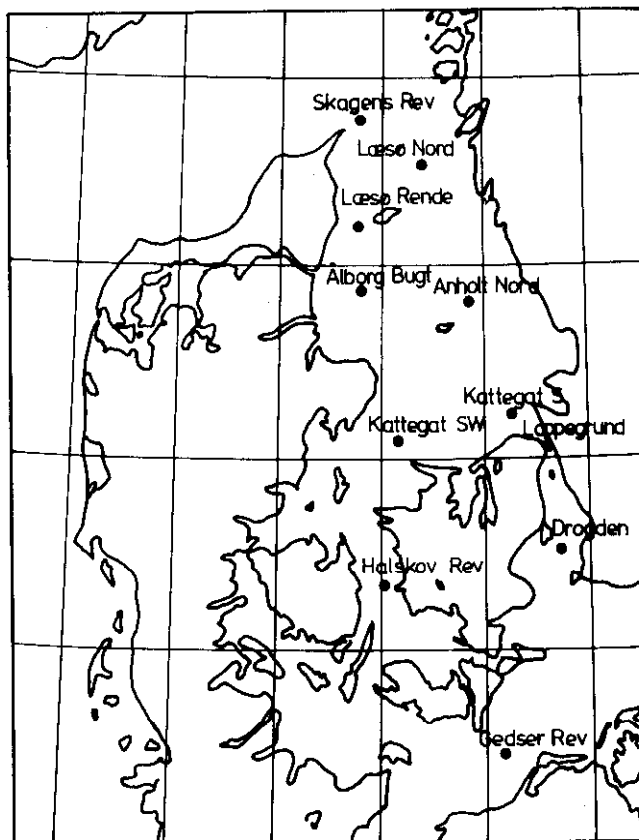
for barotrop. Hvis trykgradienten er dannet p.g.a. ændringer i densiteten, kaldes transporten baroklin. Den totale vandføring gennem Kattegat er en superposition af den barotrope og den barokline transport.

**Figur 4.2**

Densitetsfordelingen i Kattegat i juli måned. Værdierne er en middelværdi af observationer foretaget i årene 1951-1959 på fyrskibene Ska-gens Rev (SR), Læsø Nord (LN), Anholt Nord (AN), Kattegat Syd (KS), Kattegat Sydvest (KSW), Halsskov Rev (HR) og Gedser Rev (GR) (se også figur 4.3).



**Figur 4.3**  
Positionen af fyrskibene i de indre danske farvande.



**Knudsen's theorem**

Knudsen's Theorem, der benytter kontinuitetsligningen for volumen og salt, kan bestemme middel transporterne af overfladevand og bundvand gennem Kattegat.

$$Q_{ud} = Q_F \frac{S_{ind}}{S_{ind} - S_{ud}} \tag{4.1}$$

$$Q_{ind} = Q_{ud} - Q_F$$

hvor  $Q_F$  er ferskvand tilstrømningen til Østersøen,  $Q_{ind}$  og  $Q_{ud}$  er henholdsvis indstrømningen i bundvandet og udstrømningen i overfladevandet.  $S_{ind}$  og  $S_{ud}$  er saltholdigheden af henholdsvis bundvandet og overfladevandet.

**Middelvandføring**

Poulsen (1991) fandt, at middelvandføringen i det sydlige Kattegat er  $Q_{ud} = 38.000 \text{ m}^3/\text{s}$  og  $Q_{ind} = 23.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , mens middelvandføringen i det nordlige Kattegat er  $Q_{ud} = 62.000 \text{ m}^3/\text{s}$  og  $Q_{ind} = 47.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Størrelsen af den beregnede indstrømning af saltvand fra Skagerrak er i overensstemmelse med målinger foretaget i det nordlige Kattegat (Rydberg og Andersson, 1989). Forskellen mellem indstrømningerne i det nordlige og sydlige Kattegat giver et udtryk for størrelsen af medrivningen af bundvand op i overfladevandet i Kattegat.

**Medrivning i Kattegat**

$$Q_E = 24.000 \text{ m}^3/\text{s} \tag{4.2}$$

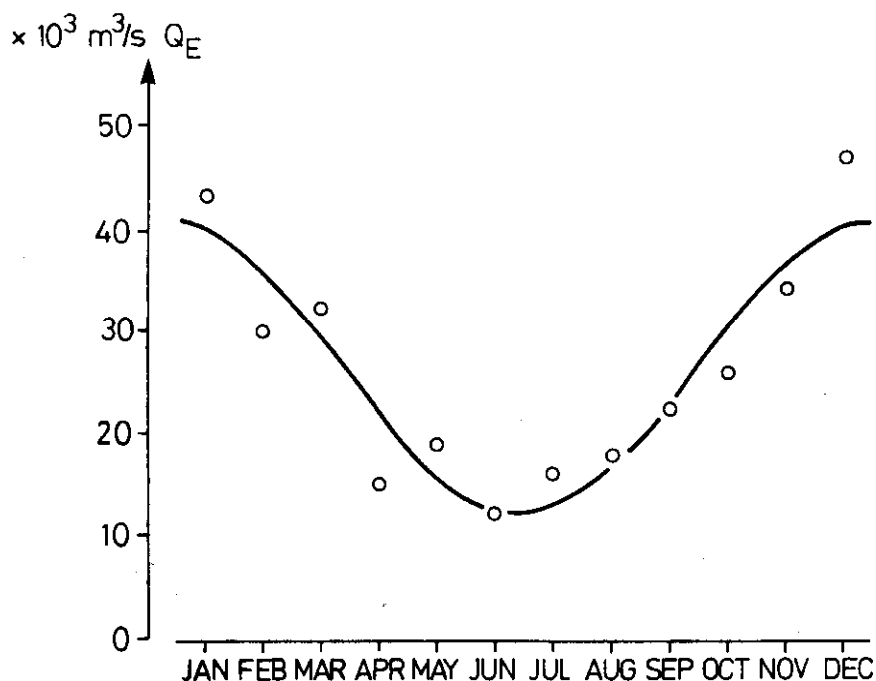
## Daglige vandføringer

De ovenstående værdier for vandføringen er kun et udtryk for middeltransporterne. De daglige fluktuationer i strømningen gennem Kattegat p.g.a. skiftende barotrope og barokline strømninger er meget større end de ovenfor angivne middeltransporter. Rydberg og Andersson (1989) målte således de daglige vandføringer i det nordlige Kattegat op til værdier så store som  $\pm 200.000 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Foruden den daglige variation varierer medrivningen også betydeligt igennem året. Poulsen (1991) fandt på basis af salinitet, temperatur og vinddata medrivningens årsvariation i Kattegat. Figur 4.4 viser, at der i sommerperioden kun er en lille opadrettet transport i Kattegat, mens medrivningen omvendt er stor om vinteren.

**Figur 4.4**

Beregnet årlig variation i den totale medrivning ( $Q_E$ ) af bundvand op i overfladevandet i den del af Kattegat der er syd for Læsø.



### 4.1.2 Strømmen i Læsø Rende

Der findes kun få dataserier, der systematisk kan beskrive hydrografien i det nordlige Kattegat. Rydberg og Andersson (1989) udførte i perioden 1984-1988 en serie hydrografiske målinger for at fastlægge strømningen ud og ind gennem et tværsnit mellem Læsø og Sverige. Det følgende vil beskæftige sig med strømningen på den vestlige side af Læsø, i Læsø Rende (LR), der også har stor betydning for den hydrografiske tolkning af forholdene i det nordlige Kattegat.

## Læsø Rende fyrskib

Hastighedsdata fra LR fyrskib viser at ud- og indstrømningen vest for Læsø er i samme størrelsesorden som vandføringen øst for Læsø. Poulsen (1991) vurderede, at hastighedsobservationerne skal reduceres til 83 % for at repræsentere middelstrømmen i LR. Dette betyder, at de skiftende ud- og indstrømninger i LR giver

vandføringer på  $\pm 100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , hvilket kan sammenlignes med de maksimale vandføringer i øst renden på  $\pm 200.000 \text{ m}^3/\text{s}$  (Rydberg og Andersson, 1989). Forholdet mellem de to vandføringer skal ses i lyset af, at forholdet i gennemstrømningsarealet vest og øst for Læsø er ca. 1/10, hvilket indikerer at lokale faktorer kompenserer for den relativ store friktion i Læsø Rende.

#### Middelstrømmen i Læsø Rende

Middeludstrømningen af overfladevand i LR er  $37.000 \text{ m}^3/\text{s}$ , mens middeludstrømningen øst for Læsø er  $18.000 \text{ m}^3/\text{s}$  (Rydberg og Andersson, 1989). Den store udstrømning i LR kan ikke forklares med den generelle udstrømning af vand fra Østersøen som under påvirkning af Corioliskraften vil prøve at koncentrere sig i den østlige del af Kattegat, hvor friktionen også er mindst (største gennemstrømningsareal). For at forklare de observerede vandføringer i LR er det derfor nødvendigt at tage de lokale forhold i betragtning.

#### Vindafhængighed

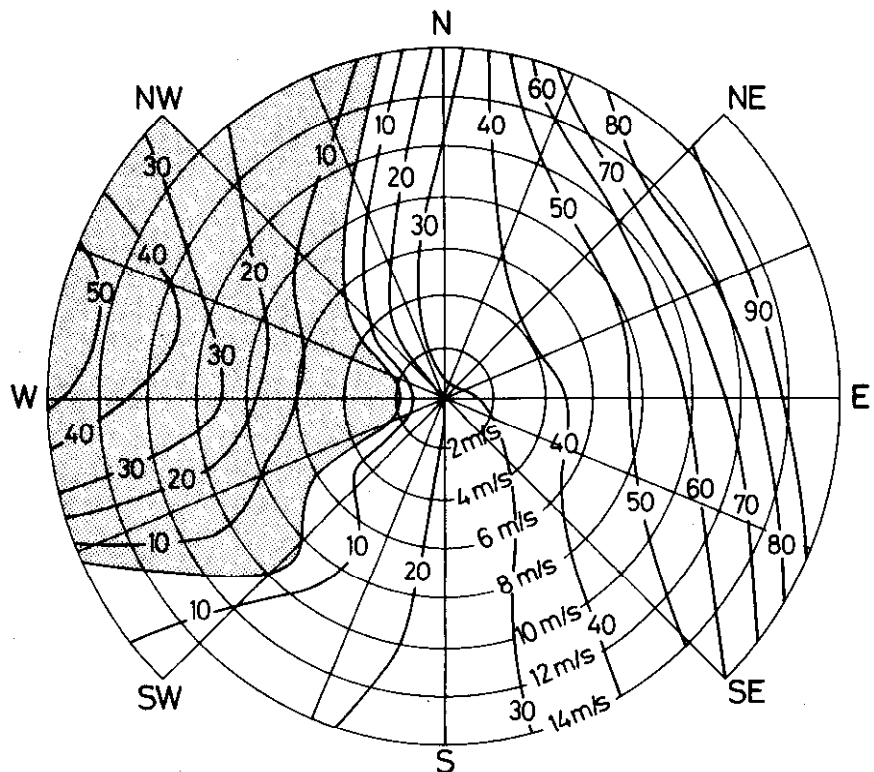
Middelstrømmene observeret på LR fyrskib i perioden 1951 - 1960 er illustreret i fig. 4.5. Strømmen ses primært at være afhængig af øst/vest komponenten af vinden. Sammenhængen mellem den nord/syd-gående strøm i LR og øst/vest-komponenten af vinden skyldes forskellig respons i overfladeopstuvningen/sænkningen nord og syd for LR.

#### Strøm genereret af øst/vestlige vinde

Aalborg Bugt er et vel-blandet estuarie med en vanddybde på 10-12 m. Området nord for Læsø er et lagdelt estuarie med en skillefladedybde på 15 m og en total dybde på 35 m. Poulsen (1991)

**Figur 4.5**

Sammenhæng mellem observeret vind og den nord/syd rettede strøm ved Læsø Rende fyrskib 1951-1960. Strømmen (cm/s) i Læsø Rende (er tegnet som isovelver) er givet som funktion af vindstyrken (kan læses på cirklerne) og vindretningen (fra) (kan læses på figuren). Det lyse område viser en nordgående strøm, mens de mørke område indikerer en sydgående strøm.



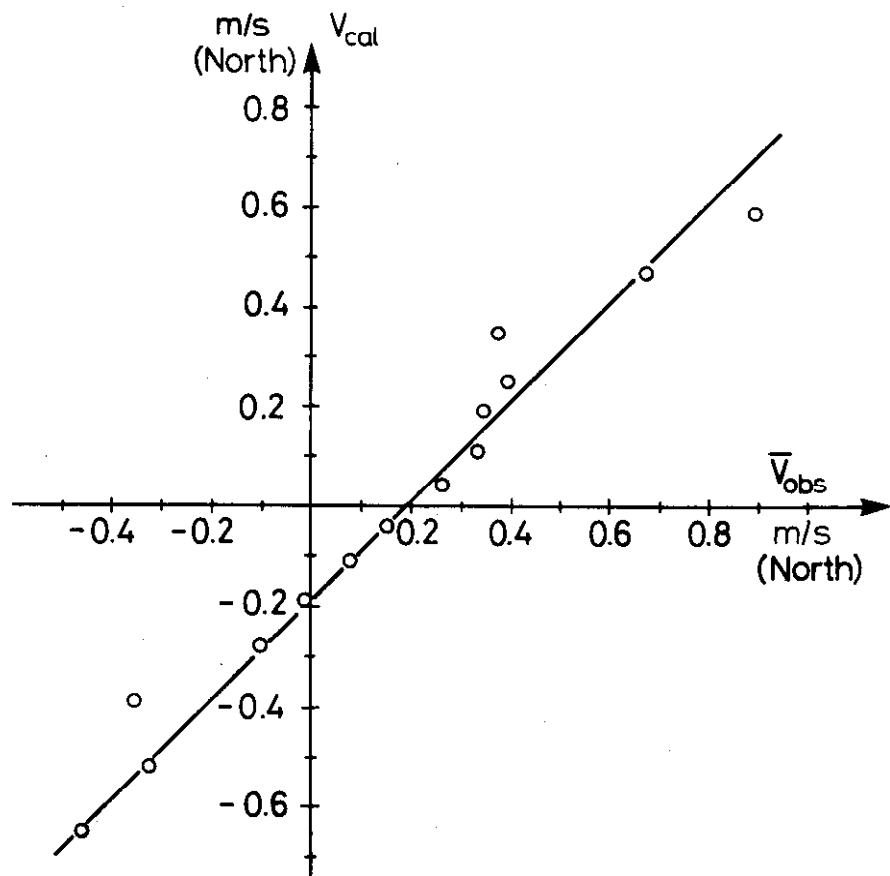
viste, at områdernes forskellige karakteristika under påvirkning af øst/vestlige vinde danner en gradient fra syd til nord i overfladeelevationen. Denne gradient skaber en trykgradient, som er i stand til at skabe en nord- eller sydgående strøm i LR. Strømhastigheden er bestemt af en ligevægt mellem den skabte trykgradient og bundfriktionen i LR. Strømmen kan således udtrykkes som funktion af vindstyrken ( $W$ ) og vindretningen ( $\theta_w$ )

$$\frac{\bar{v}}{W} = 3.8 \cdot 10^{-2} \frac{\sin(\theta_w)}{|\sin(\theta_w)|^{\frac{1}{2}}} \quad (4.3)$$

Figur 4.6 viser sammenhængen mellem middelstrømmen under øst/vestlige vinde i LR beregnet på grundlag af hhv. fyrskibsdata og vinddata (lign. 4.3). Figuren illustrerer, at variationen i strøm-mønsteret kan forklares ved en superposition af en konstant nordgående strøm på 0.20 m/s og den vindinducerede strømning.

**Figur 4.6**

Sammenhæng mellem middelstrømmen i Læsø Rende under øst/vestlige vinde baseret på observerede hastigheder fra Læsø Rende fyrskib og beregnede hastigheder. Figuren viser (x,y)-koordinater for forskellige vindstyrker. X-koordinaten er middelstrømmen i LR bestemt ud fra observationer på LR-fyrskib for forskellige vindstyrker under østlige og vestlige vinde. Y-koordinaten er middelstrømmen i LR for samme vindstyrke og retning beregnet v.h.a lign. 4.3.



Strøm genereret p.g.a. medrivning

På grund af medrivning sker der en øgning af densiteten mod nord i Kattegat. Da bundvandets hastighed i LR (Rossiter, 1968) er ringe, kan det antages, at trykgradienten i dette lag er lille. For at trykgradienten under skillefladen kan være lille, må den generelle stigning i densiteten mod nord i Kattegat kompenseres med en negativ gradient i overfladeelevationen i nordlig retning. Denne

gradient i overfladeelevationen vil samtidigt være i stand til at skabe en konstant nordgående strøm i overfladevandet i LR på ca. 0.2 m/s.

Middelvandføringen i LR er desuden under indflydelse af yderligere to processer, der skaber henholdsvis en sydgående transport og en nordgående transport. Disse vandføringer, der er relativt små og modsvarer hinanden, er nærmere beskrevet i Poulsen (1991).

Påvirkning af Store Bælt udstrømningen

Strømmønsteret i Læsø Rende kan således generelt beskrives ved en superposition af strømme, der skyldes vinden og medrivningen i Kattegat. En typisk vindsituation med østlig vind og en vindstyrke på 8 m/s vil følgelig give en nordlig strøm gennem Læsø Rende på ca. 100.000 m<sup>3</sup>/s. Vandføringen gennem LR må nødvendigvis blive kompenseret af en tilsvarende tilstrømning til Aalborg Bugt. Denne tilstrømning kan ifølge satellitbilleder relateres til Store Bælt, der har en udstrømning af samme størrelsesorden. Man må derfor konkludere at strømmingen gennem LR er i stand til at tvinge Store Bælt-udstrømningen mod nord langs Jyllands østkyst. Forholdene i LR optræder således som en randbetingelse for strømmønsteret i det sydlige Kattegat, der må tilpasse sig forholdene i dette specifikke område.

Returstrømning bag Læsø

De høje strømhastigheder i udstrømningen gennem LR og tildels gennem øst-renden resulterer i, at vand fra området bag Læsø medrives ind i det udstrømmende vand. Denne horisontale medrivning skaber en returstrømning bag Læsø. De store strømhastigheder i LR betyder desuden, at sedimentation af bl.a. organisk materiale ikke findes eller er stærkt begrænset i området berørt af udstrømningen.

## 4.2 Hydrografien i Skagerrak

Geometrien i Skagerrak

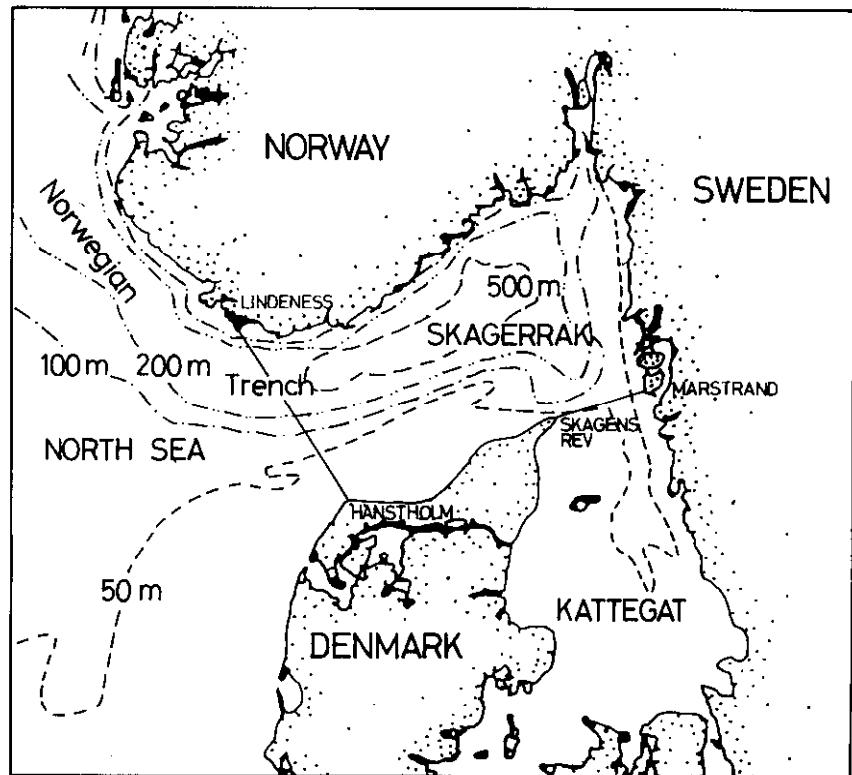
Den geografiske grænse mellem Skagerrak og Nordsøen trækkes mellem Hanstholm (DK) og Lindeness (N), mens den geografiske grænse til Kattegat er tværsnittet mellem Skagens Rev (DK) og Marstrand (S) (se fig. 4.7). Skagerrak er ca. 240 km lang og 135 km bred, og har et overfladeareal på 32.300 km<sup>2</sup> (Svansson, 1975). Det totale volumen i Skagerrak er 6.780 km<sup>3</sup>, hvilket giver en middeldybde på 210 m.

Skagerrak er et marint område med en meget varieret bundtopografi, hvilket betyder at området ikke kan beskrives v.h.a. middeldybden. Området kan groft opdeles i et fladvandet havområde og et dybtvands område.

Den fladvandede del har en middeldybde på ca. 30 m og strækker sig fra den danske kyst ca. 50 km ud i det centrale Skagerrak.

**Figur 4.7**

Kort over Skagerrak. Linierne DK-N og DK-S viser de officielle grænser til Skagerrak.



Denne del af Skagerrak er gennem det meste af året vertikal homogen med saliniteter på 30 - 34 ‰. Et to-lags system kan udvikle sig i kortere perioder, men disse lagdelinger eksisterer kun i kortere perioder p.g.a. den store blanding i dette område.

Den dybe del er afgrænset af Norske Renden, hvor dybden visse steder overstiger 700 m. Denne del af Skagerrak kan som regel antages som et to-lags system med saliniteter på 25 - 32 ‰ i et tyndt overfladelag (10 - 20 m) og ca. 35 ‰ i bundvandet.

Hydrografien i Skagerrak er meget afhængig af de meteorologiske forhold i området. Feltnmålinger har vist, hvor hurtigt overfladeværdier (temperatur, salinitet ect.) kan ændre sig inden for kort tid (se f.eks. Poulsen (1991) og Aure og Sætre (1980)).

#### 4.2.1 Nordsøen som randbetingelse

Beskrivelsen af strømmønsteret i et specifikt marint område kan opdeles dels i en beskrivelse af strømmønsteret påvirket af quasi-stationære forhold, dels i en beskrivelse af strømmønsteret under ikke-stationære forhold.

**Ikke-stationære strømforhold**

Strømmønsteret i et marint område er ikke-stationært, når det er i en proces, hvor det prøver at tilpasse sig til nye randbetingelser. Det ikke-stationære strømmønster er således karakteriseret af at være under indflydelse af både gamle og nye randbetingelser. Ændringen i randbetingelser kan f.eks. skyldes en ændring i de

meteorologiske forhold. Hvis det betragtede marine område har en længdeskala større end Rossby radius, vil perturbationerne i strømmønsteret vil have tilbøjelighed til at dreje mod højre som følge af indflydelsen af Corioliskraften. Denne synlige effekt af Corioliskraften på strømmønsteret skyldes, at der til at begynde med i det ikke-stationære tilfælde ikke eksisterer nogen anden kraft, der kan balancere bidraget fra Corioliskraften. Strømmønsteret vil derfor primært være afhængig af områdets geometri og den påtrykte ændring i kraftbalancen.

Quasi-stationære strømforhold

I takt med at en quasi-stationær tilstand udvikler sig, vil trykgradienter, dannet på grund af variationer i overfladeelevationen, være i stand til at balancere Corioliskraften. Denne kraftbalance danner et helt andet strømmønster, der primært er afhængig af de påtrykte randbetingelser.

Jakobsen (1991) viste v.h.a. en numerisk model den karakteristiske forskel i Bornholmer Bassinet mellem strømmønsteret i en quasi-stationær situation og strømmønsteret dannet p.g.a. en ændring i kraftbalancen. I den stationære situation er strømmønsteret i Bornholmer Bassinet dikteret af kraftbalancen mellem Corioliskraften og gradienter i skilleflade elevationen. Skillefladegradierne er bestemt af den nedstrøms randbetingelse i Stolpe Kanalen. I den ikke-stationære situation kan strømmene, der er dannet p.g.a. ændringen i kraftbalancen, ikke registrere den nedstrøms randbetingelse og danner derfor et strømmønster under stærk indflydelse af Corioliskraften.

Nordsøen som randbetingelse

Strømmønsteret i Skagerrak kan på lignende måde forbindes til randbetingelser i Nordsøen. Nordsøen kan opdeles i et fladvands- og et dybtvandsområde. Det fladvandede område er ca. 30 m dybt og er beliggende i den sydlige og østlige del af Nordsøen og strækker sig ind i Skagerrak langs den Jyske kyst. Dybtvandsområdet (> 60 m) er primært koncentreret i den vestlige og nordlige Nordsø (se fig. 4.8).

Generelle bevægelsesligninger for den centrale Nordsø

Poulsen (1991) viste på baggrund af en størrelsesorden-analyse, at de generelle bevægelsesligninger gældende i den centrale Nordsø kan reduceres til lign. 4.4 og 4.5

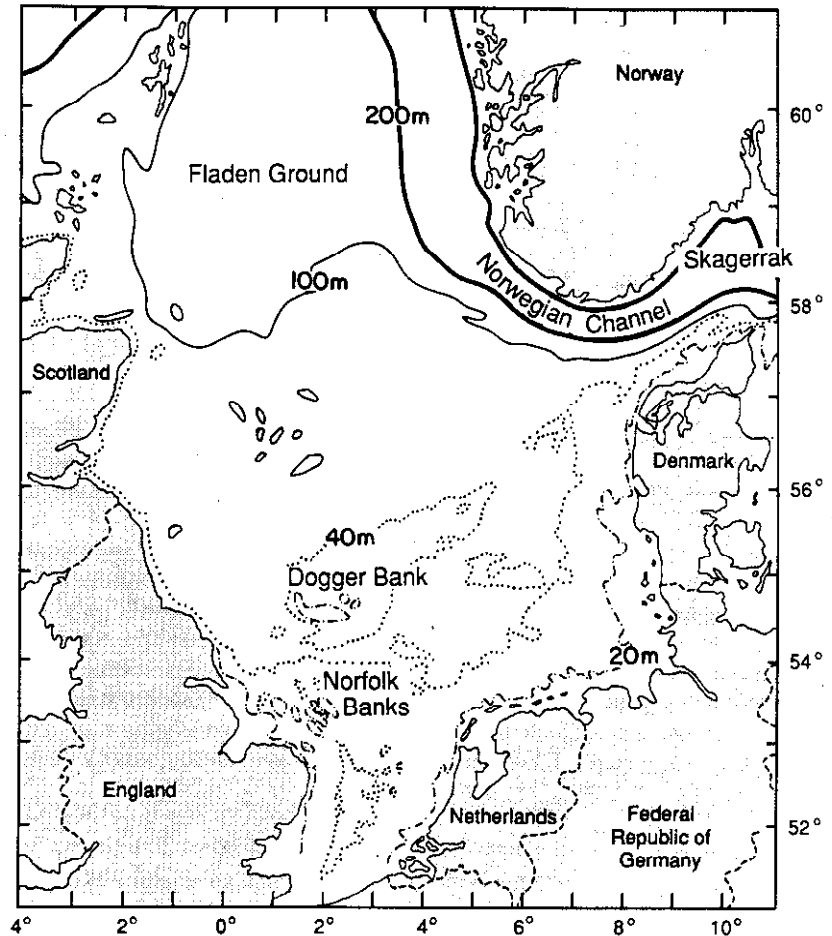
$$-f_c v = \frac{\tau_{wx}}{\rho h} \quad (4.4)$$

$$f_c u = \frac{\tau_{wy}}{\rho h} \quad (4.5)$$

hvor  $u$  = hastighed i x-retning  
 $v$  = hastighed i y-retning  
 $f_c$  = Coriolis parameteren  
 $h$  = vanddybde  
 $\tau_w$  = forskydningsspænding skabt af vinden



**Figur 4.8**  
Kort over Nordsøen (Kilde: Holligan et al, 1989).



**Analytisk model**

Ved at betragte de reducerede bevægelsesligninger er det nu muligt at opstille en analytisk model for Nordsøens indflydelse på vandføringen ind og ud af Skagerrak langs den danske kyst.

**Randbetingelse for Skagerrak under sydlige vinde**

Først betragtes tilstanden i den centrale Nordsø under sydlige vinde. Under denne vindsituation reduceres lign. 4.4 og 4.5 yderligere til

$$v = 0 \tag{4.6}$$

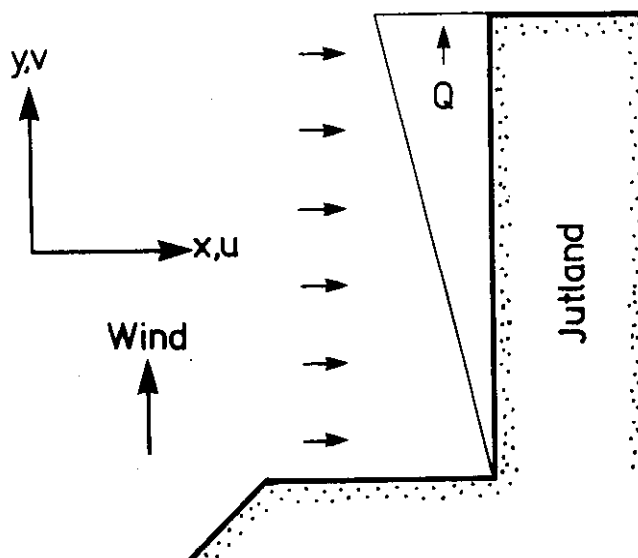
$$f_c u = \frac{\tau_{wy}}{\rho h} \tag{4.7}$$

**Ekman transport**

Ligningerne 4.6 og 4.7 viser, at en sydlig vind skaber en transport af vand fra den centrale Nordsø rettet mod Jyllands kyst. Denne transport, der kaldes Ekman transport, vil, når den rammer den jyske kyst skabe en nordgående strøm. Den nordgående strøm er dikteret af kontinuitetsligningen, da geometrien i den sydlige del af Tyske Bugt resulterer i, at vandføringen her er nul (se fig. 4.9). Vandføringen i den nordgående kyststrøm, som kan antages at være i geostrof balance, øges op langs kysten, idet Ekman transporten mod kysten er ensformigt fordelt i hele Nordsøen. Når den

**Figur 4.9**

Skitse af koordinatsystemet brugt i lign. 4.4 - 4.7. Skitsen viser Ekman transporten i Nordsøen og transporten langs Jyllands kyst under sydlige vinde.



nordgående strøm når Hanstholm, vil strømmen p.g.a. Coriolisefekten strømme ind i Skagerrak langs den jyske nordkyst.

Randbetingelse for Skagerrak under nordlige vinde

Under nordlige vinde vil Ekman transporten i den centrale Nordsø skabe en strøm rettet fra den jyske kyst ud i den centrale Nordsø. På grund af geometrien i Tyske Bugt og p.g.a. at Ekman transporten er ensformigt fordelt i Nordsøen, vil den nødvendige vandføring rettet ud fra Jyllands kyst blive hentet i Skagerrak. Poulsen (1991) udregnede vandføringen ind i Skagerrak genereret af Ekman transport i Nordsøen under syd- og nordlige vinde til

Vandføring i Skagerrak

$$Q = -7.3 \cdot 10^3 W^2 \cdot \cos(\theta_w) \quad [m^3/s] \quad (4.8)$$

hvor  $W$  = vindens hastighed (m/s)  
 $\theta_w$  = vindens retning (fra)

Randbetingelse for Skagerrak under øst/vestlige vinde

Betragtes tilstanden i den centrale Nordsø under øst/vestlige vinde vil de generelle ligninger 4.4 og 4.5 reduceres til

$$-f_c v = \frac{\tau_{wx}}{\rho h} \quad (4.9)$$

$$u = 0 \quad (4.10)$$

Ekman transport

Ligningerne viser, at den centrale Nordsø nu er præget af en Ekman transport i nordlig og sydlig retning. Forholdene i den centrale Nordsø påvirker således ikke forholdene tæt på den jyske kyst. På grund af den relative ringe vanddybde langs Jyllands kyst vil det kystnære område istedet være karakteriseret af en kraftbalance vinkelret på kysten mellem forskydningsspændingen hidrørende fra vinden og trykgradienten skabt p.g.a. en overflade-elevation ved kysten.

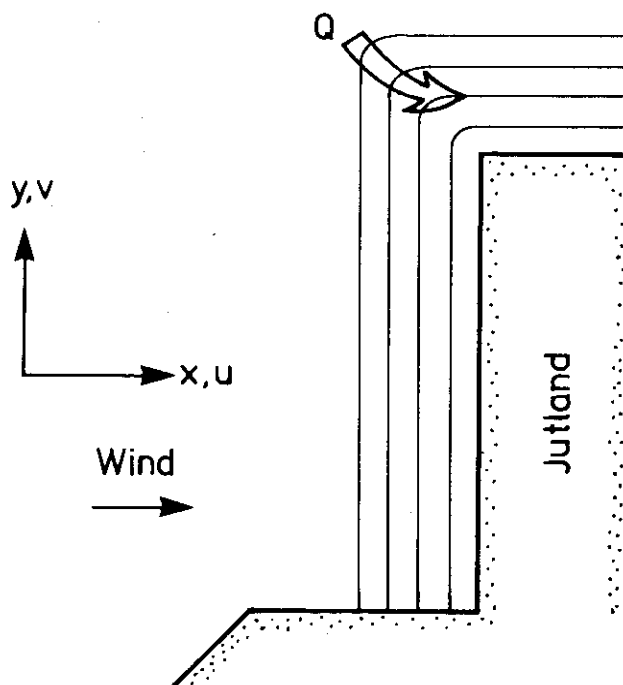
## Geostrof balance

Vand fra den nordlige Nordsø

Bredden af det fladvandede plateau i Nordsøen aftager mod nord. Når plateauet bliver smallere, er forskydningsspændingen, hidrørende fra den øst/vestlige komponent af vinden, ikke i stand til at opretholde samme gradient i overfladeelevationen som i Tyske Bugt. Dette skaber en uligevægt mellem trykgradienten (skabt af gradienten i overfladeelevationen) og forskydningsspændingen (skabt af vinden), der genererer en strøm, der p.g.a. Corioliskraftens indflydelse bliver parallel med kysten. Denne strøm parallelt med kysten kompenserer p.g.a. Corioliseffekten for reduktionen i forskydningsspændingen i kraftbalancen. Nord for Hanstholm, hvor den jyske kyst er drejet ind i Skagerrak, er de øst/vestlige vinde ikke i stand til at balancere opstuvningen af vandspejlet ved kysten, da vinden her vil være parallel med kysten. Overfladeelevationen er således kun i stand til at eksistere i balance med Corioliseffekten hidrørende fra en strøm, der løber parallelt med kysten. Det vand, der danner denne strøm langs den danske kyst i Skagerrak, må under vestlige (østlige) vinde stamme fra (strømme mod) den nordlige Nordsø, da øst/vestlige vinde skaber en næsten homogen overflade sænkning/opstuvning langs den jyske vestkyst, og således ikke er i stand til at inducere strømme ind i Skagerrak (se fig. 4.10)

**Figur 4.10**

Skitse af koordinatsystemet brugt i lign. 4.9 - 4.11. Skitsen viser variationen af overflade elevationen langs Jyllands kyst under østlige og vestlige vinde. Overflade elevationen langs kysten fortsætter ind i Skagerrak hvor trykgradienten er i geostrof balance med Coriolis kraften.



Vandføring ind i Skagerrak

Volumen transporten ind i Skagerrak genereret på grund af den vindgenererede overfladeelevation langs den jyske vestkyst er beregnet af Poulsen (1991).

$$Q = -4.9 \cdot 10^3 W^2 \cdot \sin(\theta_w) \quad [m^3/s] \quad (4.11)$$

Vandføringen i lign. 4.11 angiver transporten af vand ind i Skagerrak langs den danske kyst i en situation, hvor strømmønsteret er dikteret af en nedstrøms randbetingelse i Nordsøen. Gyldigheden

af lign. 4.11 forudsætter ligesom lign. 4.8 stationære forhold i Nordsøen.

#### Tidsskala for Nordsøen

Tidsskalaen i Nordsøen, d.v.s. tiden det tager, før stationære forhold er genskabt efter en pludselig ændring i de styrende kraftlige vægte, er af Poulsen (1991) beregnet til 12 timer. Størrelsen af tidsskalaen er lille set i forhold til den meteorologiske tidsskala, der er i størrelsesordenen 5-7 dage. Den lille tidsskala i Nordsøen indikerer, at strømmingen ind og ud af Skagerrak langs den danske kyst hovedsageligt er et stationært fænomen dikteret af forholdene i Nordsøen. Nordsøen fungerer således som bestemmende randbetingelse for strømmingen i Skagerrak.

#### Konklusion

Det kan konkluderes, at Nordsøen virker som randbetingelse for cirkulationen i Skagerrak. Ligning 4.8 og 4.11 giver et udtryk for den resulterende strømning ind i Skagerrak som følge af henholdsvis nord/sydlige og øst/vestlige vinde, når stationære forhold er tilstede i Nordsøen. De to udtryk kan superponeres til et enkelt udtryk, der angiver vandføringen ind i Skagerrak langs den danske kyst som funktion af en vilkårlig vindstyrke ( $W$ ) og vindretning ( $\theta_w$ )

$$Q = 8.8 \cdot 10^3 W^2 \cos(\theta_w - 214^\circ) \quad [m^3/s] \quad (4.12)$$

hvor  $Q > 0$  angiver en vandføring rettet ind i Skagerrak. V.h.a ligning 4.12 kan det vises, at der er størst indstrømning langs den danske kyst til Skagerrak under vinde fra SSV - SV, mens vinde fra NNØ - NØ genererer den største udstrømning.

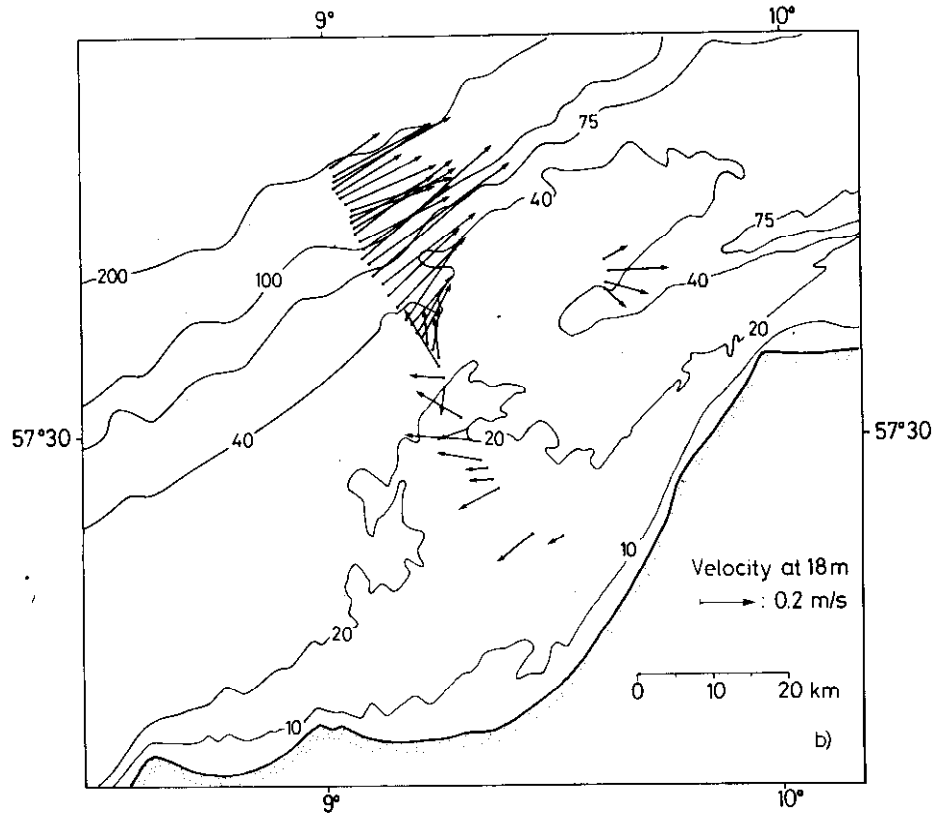
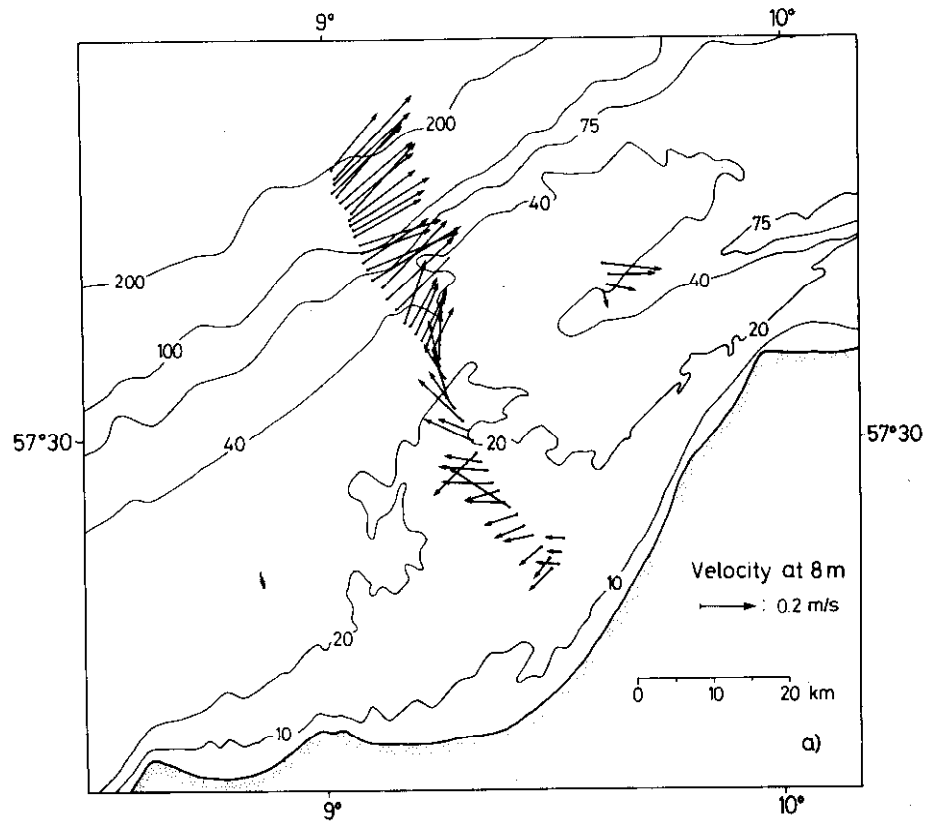
Den simple analytiske model antager, at vandføringen langs den danske kyst i Skagerrak under stationære forhold er styret af den barotrope respons i Nordsøen på meteorologiske hændelser. Nordsøen virker som randbetingelse til Skagerrak og giver en vandføring ind og ud af Skagerrak, som angivet i ligning 4.12. I Skagerrak kan volumentransporten anses for at være i geostrof balance.

Der er dog store forskelle i vandet, der transporteres ind i Skagerrak under henholdsvis sydlige og vestlige vinde. Under sydlige vinde vil det indstrømmende vand til Skagerrak hovedsageligt stamme fra den sydlige Nordsø. Det er under disse vindforhold, at vand fra Tyske Bugt transporteres ind i Skagerrak. Under vestlige vinde vil det indstrømmende vand stamme fra den nordlige Nordsø og være kendetegnet ved en højere salinitet.

De beskrevne mekanismer i Nordsøen er selvfølgelig kun en simpel tilnærmelse af virkeligheden. For at inkludere alle dynamiske processer, der har indflydelse på ind- og udstrømningen af vand til Skagerrak, er det nødvendigt at bruge en numerisk model. De beskrevne processer illustrerer dog størrelsen af vandføringen ind i Skagerrak langs den danske kyst og viser, hvor stor indflydelse Nordsøen har på strømmønsteret i Skagerrak.

## 4.2.2 Hydrografien i et tværsnit i Skagerrak

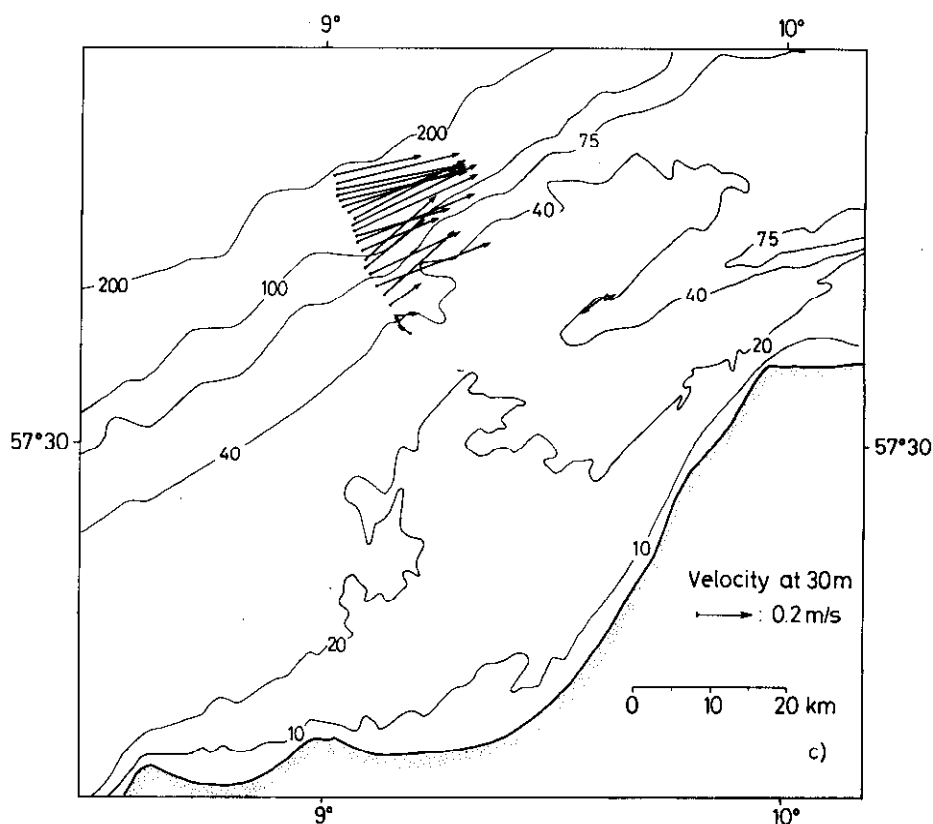
- Meteorologiske forhold**  
2. august 1989
- Den 2. august 1989 målte undersøgelsesskibet "Dana" salinitet, temperatur og hastighedsprofiler på tværs af Skagerrak fra Blokhus (DK) til Lillesand (N). Vinden var i dagene op til den 2. august kommet fra sydvest. Samme dag, som målingerne blev foretaget, skiftede vindretningen fra sydvest til nordøst.
- Strømskifte i Skagerrak**
- Ifølge konklusionerne i kap. 4.2.2 vil strømmønsteret i Skagerrak være i en overgangssituation, hvor indstrømningen langs den danske kyst erstattes af en udstrømning. Strømskiftet vil først ske i området tæt på den danske kyst, idet bundfriktionen har en relativ større indflydelse på strømmønsteret her end i de områder i Skagerrak, der har stor vanddybde. Dette betyder, at den første reaktion på et skift i de meteorologiske forhold vil kunne ses i det kystnære område. Fokuseres der på hastighederne i det valgte tværsnit (se fig. 4.11), ses det, at hastighedsfeltet langs den danske kyst netop er i denne overgangssituation og underbygger således teorien i foregående afsnit.
- Den Norske kyststrøm**
- Figur 4.12 viser salinitets- og temperaturfordelingen i Skagerrak tværsnittet. Tværsnittet viser den Norske Kyststrøm som et område langs den norske kyst hvor vand med en relativ lille salinitet er afgrænset ud mod Skagerrak af en kraftig haloklin. Antages kyststrømmen at være i geostrof balance er hastighederne i kyststrømmen beregnet i Poulsen (1991) til 1.4 m/s, hvilket medfører, at kyststrømmen har et baroklin Froude tal på  $F_b \approx 1$ .
- Blanding**
- To-lags strukturen i det centrale Skagerrak er vel-dokumenteret af temperatur og salinitetsprofilerne i fig. 4.12. Den største gradient i skillefladen er midt i Norske Renden, hvor skillefladen er tættest på overfladen. På grund af den lille dybde er vinden her i stand til at homogenisere overfladelaget. Som en konsekvens af det homogene overfladelag vil næringsrigt bundvand blive blandet op i overfladevandet i det centrale Skagerrak. Den vindgenererede blanding i det centrale Skagerrak er dog ikke den primære form for blanding i Skagerrak.
- Det fladvandede havområde nær den danske kyst er karakteriseret af en svag vertikal densitets gradient. Dette skyldes, at de store vandføringer ind og ud af Skagerrak i dette område skaber turbulens p.g.a. bundfriktionen. Denne turbulens er tilstrækkelig til at skabe velblandede forhold nær den danske kyst strækkende sig ud til skrænten til Norske Renden. Et tegn på denne blanding ses på skrænten til Norske Renden, hvor skillefladens isohaliner og isotermer divergerer, idet de nærmer sig dette turbulente område.
- Temperatur og salinitets målinger i station 43 (se Poulsen, 1991) viser, at vandet på skrænten består af en linear kombination af saliniteten og temperaturen i hhv. det kystnære vand og det saline Skagerrak vand. Denne kombination eksisterer kun, fordi der til



**Figur 4.11**  
 Hastighedsvektorer i dybderne a) 8 m, b) 18 m og c) 30 m i tværsnit-  
 tet Blokhus (DK) - Lillesand (N) den 2. august 1989.

Figur 4.11

Fortsat.



#### Domen i Skagerrak

stadighed sker en blanding på skrænten af de tilførte vandmasser fra Skagerrak og det kystnære område. Temperatur minimaet i overfladen over skrænten understøtter, at en kraftig blandingsproces eksisterer på denne position, idet blandingen af det relative kolde bundvand op i overfladevandet vil skabe dette temperaturminimum. Blandingsprocessen på skrænten til Norske Renden er som følge af isohalinernes og isotermernes divergens således også årsagen til, at skillefladen på tværs af Skagerrak antager en kuppelformet dome.

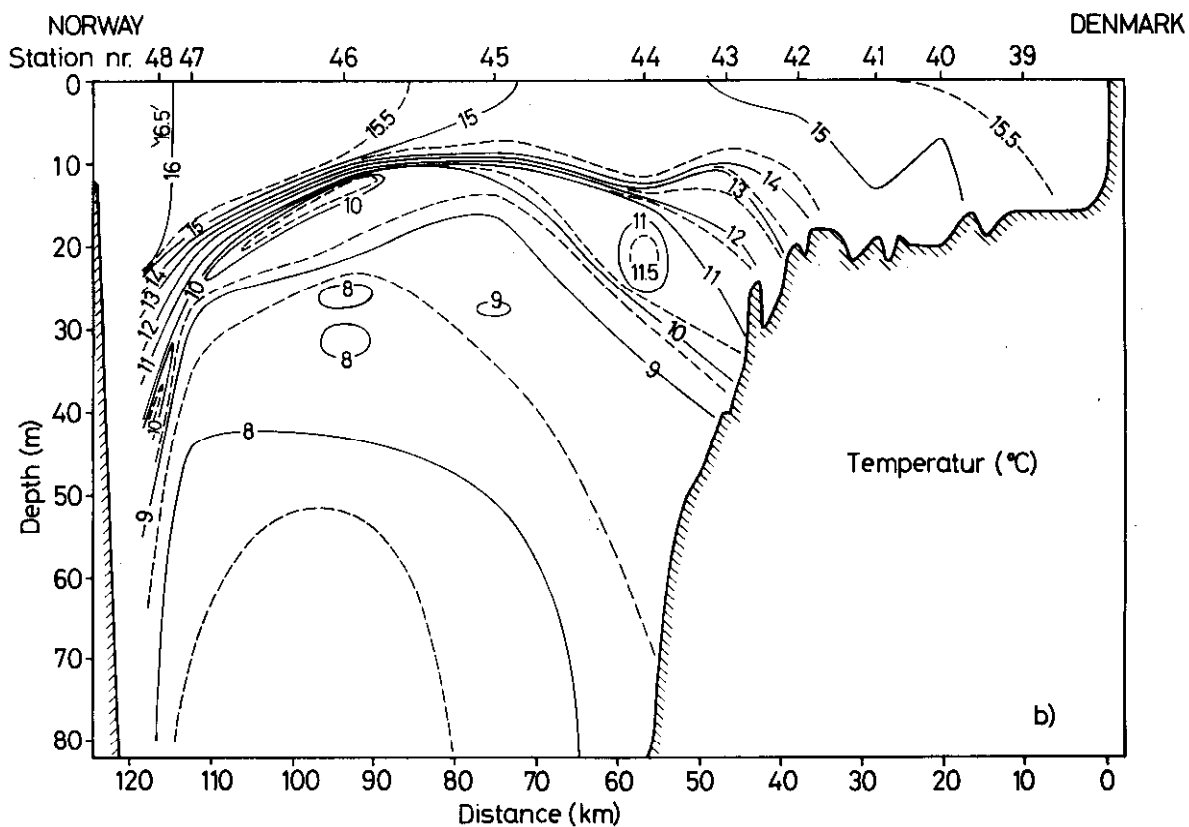
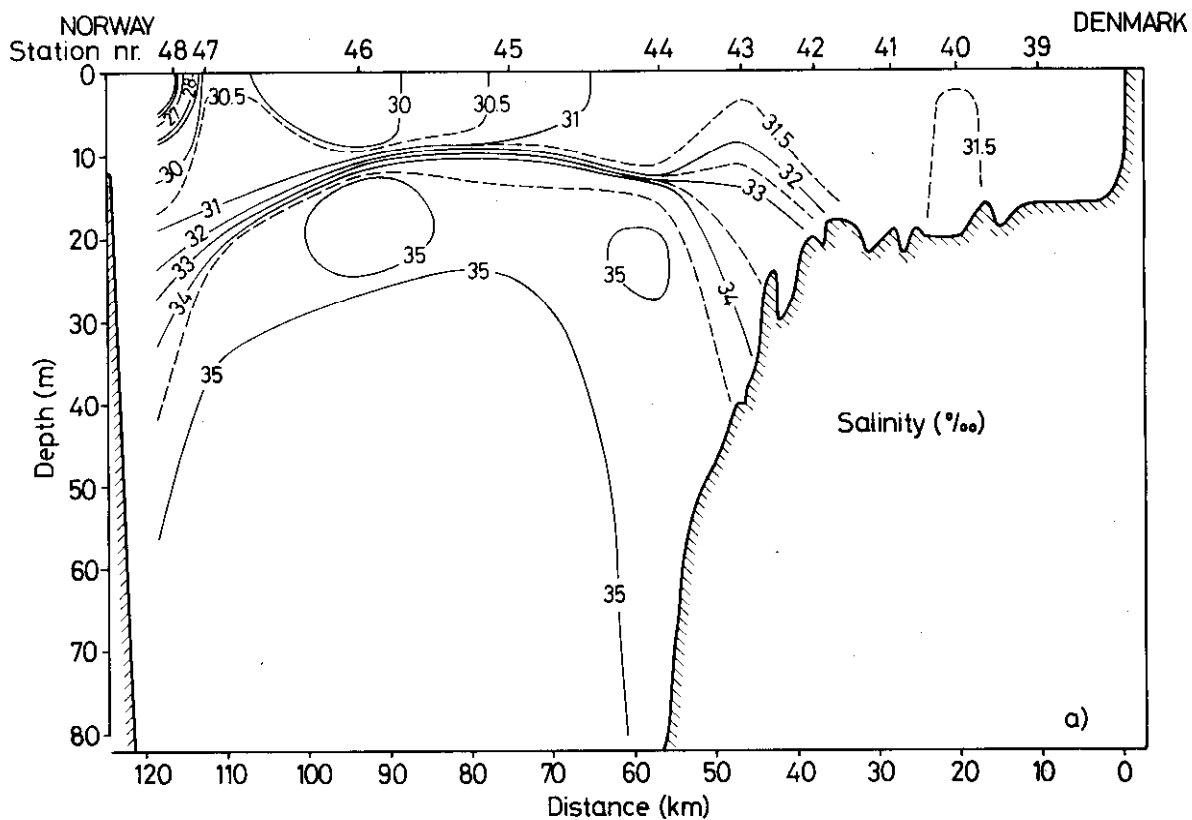
#### Blanding på skrænten 10 gange større end i det centrale Skagerrak

Figur 4.13 viser hastighedsfordelingen i Skagerrak. Hastighedsprofilen vinkelret på skrænten (fig. 4.13b) viser, at der i blandingsområdet er konvergens i strømmen, hvilket ud fra de målte værdier indikerer at høj-salint bundvand fra det centrale Skagerrak blandes ind i overfladevandet med en hastighed på  $0.5 - 1 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ . Poulsen (1991) viste således at blandingen på skrænten medfører en indblanding af bundvand i overfladevandet, der er 10 gange større end i det centrale Skagerrak.

#### Øget biologisk produktion

Det må ud fra den kraftige blanding på skrænten til Norske Renden antages, at den biologiske produktion her sammenlignet med det øvrige Skagerrak er betydeligt forøget grundet den betydelige tilførsel af næringsrigt vand til overfladvandet.

Figur 4.13a viser hastighedsfordelingen rettet ind i Skagerrak. Indstrømningen til Skagerrak er i det målte område ca.  $500.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Hastighedsprofilen afslører eksistensen af en indstrømmende



**Figur 4.12**  
 (a) Salinitets (‰) og (b) temperatur (°C) fordeling i tværsnittet Blokhus (DK) til Lillesand (N) den 2. august 1989.



jet placeret lige under haloklinen i en position på skrænten til Norske Renden. Jetten er ansvarlig for en vandføring på ca. 200.000 m<sup>3</sup>/s, hvilket er næsten halvdelen af af den målte indstrømning til Skagerrak. Hastighederne i jetten er ligeledes 30-40 cm/s højere end det omgivende vand.

#### Jyllandsstrømmen

Poulsen (1991) viste ved at sammenholde de målte saliniteter og temperaturer i et TS-diagram, at vandet i jetten er sammenfaldende med et salinitets maximum, og at vand med en lignende salinitet i Skagerrak har en temperatur, der er 2°C lavere. Poulsen (1991) konkluderede, at vandet i jetten over skrænten til Norske Renden har sin oprindelse i den nordlige Nordsø og er identisk med, hvad der i litteraturen refereres til som Jyllandsstrømmen. Dette stemmer overens med overvejelserne i kap. 4.2.2, der konkluderede, at vestlige vinde genererer en indstrømning af vand fra den nordlige Nordsø.

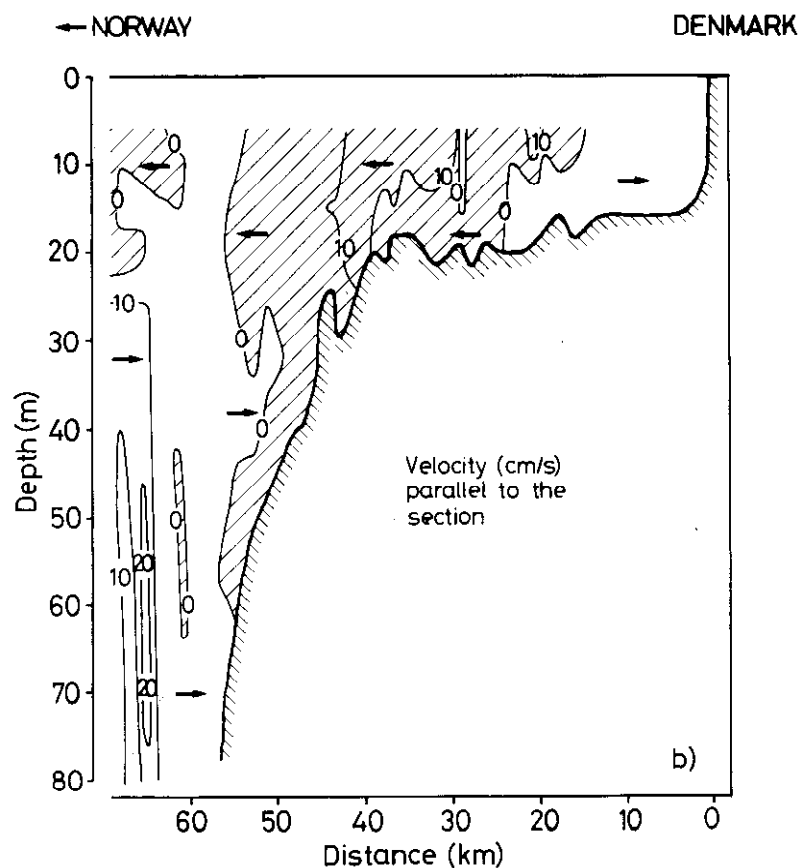
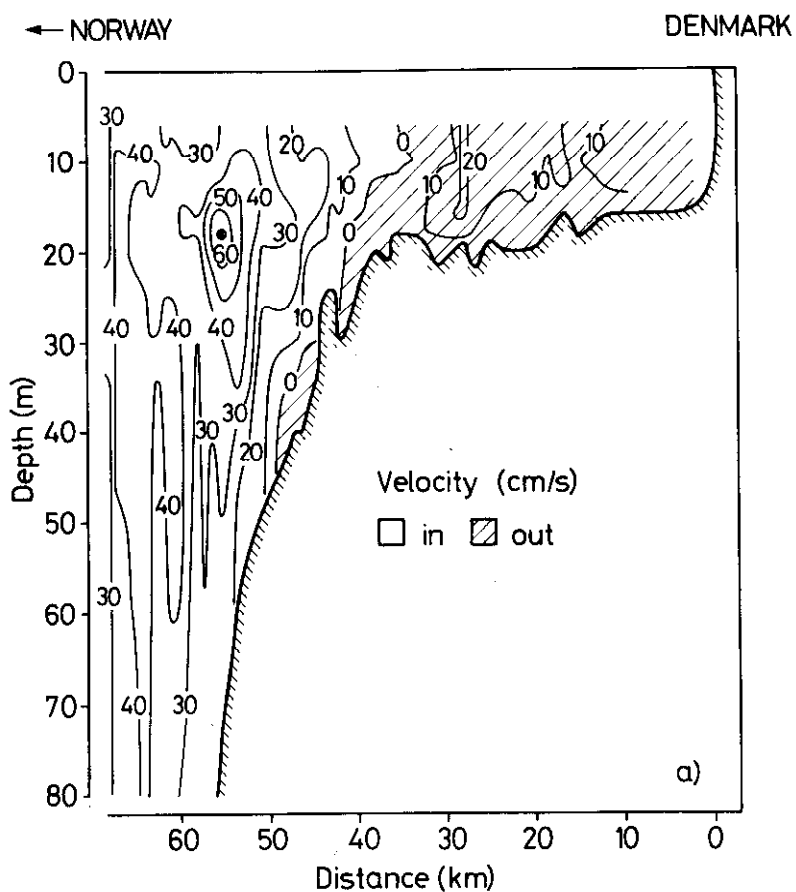
#### Geostrofe forhold i Skagerrak

I forbindelse med en indstrømning (udstrømning) til (fra) Skagerrak langs den danske kyst vil der p.g.a. kontinuitet ske en tilsvarende udstrømning (indstrømning) langs den norske kyst. Dette kan vises ved at beregne den dynamiske højde i målte tværsnit og samtidig antage, at strømmingen i Skagerrak er i geostrof balance (se Poulsen, 1991). At strømmønsteret i Skagerrak under stationære forhold er i geostrof balance blev v.h.a. vorticity-ligningen vist i Poulsen (1991). Som konsekvens heraf vil strømrretningen altid være parallel med bundtopografien, hvilket stemmer pænt overens med fig. 4.11, når skiftet i vindretningen tages i betragtning.

De ovenfor beskrevne fænomener har været relateret til målinger foretaget den 2. August 1989. Undersøges andre feltmålinger fra Skagerrak vil de samme fænomener kunne beskrives (se bl.a. Poulsen, 1991). Dette skyldes, at strømmønsteret og blandingsprocesserne i Skagerrak reproducerer sig selv, da fænomenerne hovedsageligt er afhængige af de herskende meteorologiske forhold.

**Figur 4.13**

Hastighedsfordeling i tværsnittet Blokhus (DK) til Lillesand (N) den 2. august 1989. (a) illustrerer hastighedsfordelingen rettet ind- og ud af Skagerrak, (b) illustrerer strømhastighederne parallelt med tværsnittet.



## 5. Skagerrak-frontens dynamik

### 5.1 Skagerrak-fronten under nordlige og østlige vinde

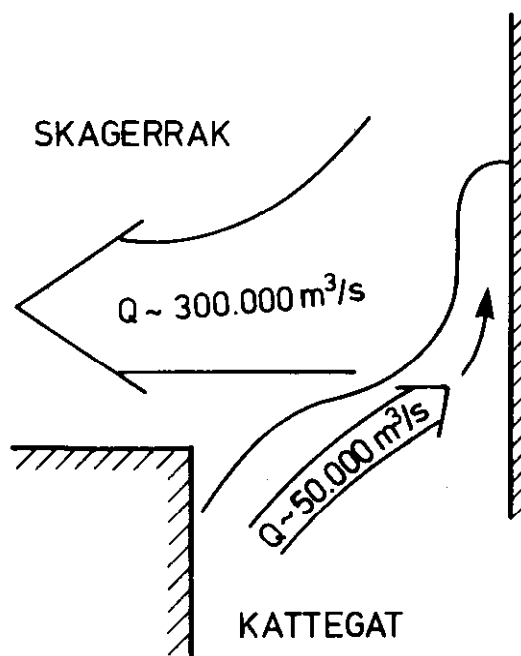
Vandføring i Skagerrak

Vandføring i Kattegat

Skagerrak er kendetegnet ved store ændringer i strømmønstret, da vandføringen i området er styret af randbetingelser i Nordsøen (vist i kapitel 4.2) og dermed bestemt af de svingende meteorologiske forhold. Transporten af vand ind og ud af Skagerrak langs den danske kyst resulterer i, at Skagerrak/Kattegat overgangsområdet er præget af store fluxe. Strømme rettet mod vest, vil dominere på Skagerrak-siden af fronten under nordlige og østlige vinde (se fig. 5.1). En typisk vandføring parallel med fronten i Skagerrak er i størrelsen 300.000 - 400.000 m<sup>3</sup>/s. Udstrømningen fra Østersøen dominerer strømmene på Kattegat-siden af fronten. Ved fronten vil det brakke Kattegat-vand akkumulere ved den svenske kyst p.g.a. Corioliseffekten. Dette danner den Baltiske Strøm, som er en kyststrøm af brakvand. Den typiske udstrømning fra Kattegat er 50.000 - 100.000 m<sup>3</sup>/s. Den store forskel mellem fluxen på hver side af fronten betyder, at det kan antages, at strømmen i Skagerrak dominerer betingelserne for dannelsen af Skagerrak-fronten.

**Figur 5.1**

*Idealiseret strømmønster i front-zonen i Skagerrak/-Kattegat overgangen under nordlige og østlige vinde.*



Feltmålinger

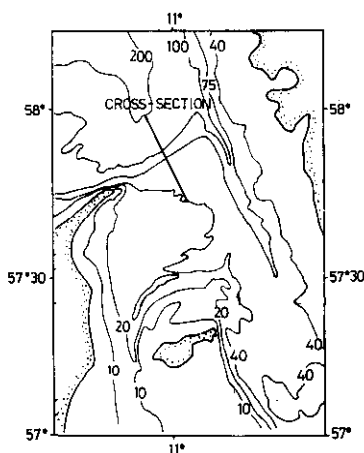
Det danske undersøgelsesskib "Dana" undersøgte i perioden 15.-27. oktober 1990 hydrografien i Skagerrak og i det nordlige Kattegat. Under dette togt blev salinitets- og hastighedsfordelingen

gennem Skagerrak-fronten målt (se fig. 5.2 og 5.3a-c). Østlige vinde dominerede under togtet. Salinitetsfordelingen viser, at Skagerrak-vandet ( $>33\text{‰}$ ) er separeret fra det brakke Kattegat-vand ( $<30\text{‰}$ ) ved en tydelig skilleflade. Hastighedsfordelingen viser den store vandføring i Skagerrak. Strømretningen af Skagerrak-vandet er i overensstemmelse med de teoretiske overvejelser i kapitel 4.2. Den vestlige flux i Skagerrak er ca.  $300.000 \text{ m}^3/\text{s}$  i det målte tværsnit. Den østlige strøm af brakvand, der ses på Kattegat-siden af fronten, er ca.  $40.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . Forskellen i de to vandføringer viser, at det er en god tilnærmelse at antage, at Skagerrak-fronten er bestemt af forholdene i Skagerrak.

Baroklin styret geostrof balance

Kraftbalancen, der fastholder fronten i det målte tværsnit, er balancen i Skagerrak-vandet mellem Corioliskraften og den barokline trykgradient, givet ved

$$f_c v_{Ska} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \delta g \frac{\partial y_l}{\partial x} \quad (5.1)$$



Figur 5.2  
Placering af tværsnittet gennem Skagerrak-fronten præsenteret i fig. 5.3.

hvor  $f_c$  er Coriolis parameteren. Den relative densitetsforskel mellem Skagerrak-vandet og Kattegat-vandet ( $\delta$ ), og gradienten af skillefladen ( $\partial y_l / \partial x$ ) kan i den aktuelle front i fig. 5.3 findes til henholdsvis  $\delta = 8 \cdot 10^{-3}$  og  $\partial y_l / \partial x = 5.7 \cdot 10^{-4}$ .

Indflydelse af strømmingen i Kattegat på skillefladehældningen kan beregnes ved at antage at Kattegat-vandet strømmende langs fronten er i geostrof balance

$$f_c v_{Kat} = g \frac{\partial \eta}{\partial x} \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{f_c v_{Kat}}{g} \approx -6 \cdot 10^{-7}$$

hvor den beregnede overfladegradiant ( $\partial \eta / \partial x$ ) balancerer en skillefladehældning på ca.  $7 \cdot 10^{-5}$ .

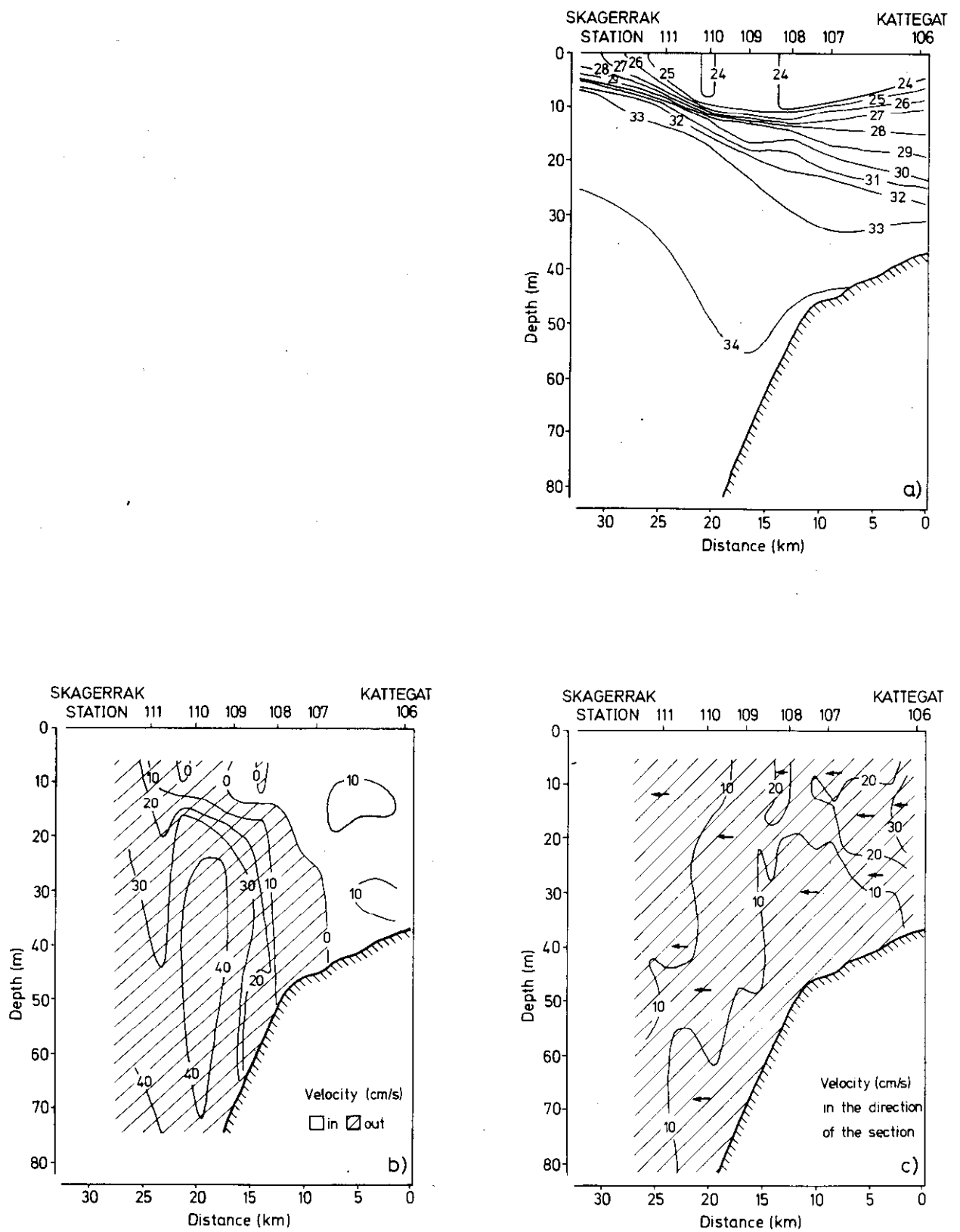
Den nødvendige hastighed i Skagerrak-vandet for at opretholde kraftbalancen skitseret i formel 5.1 kan nu udregnes ved at indsætte værdien af skillefladehældning reduceret med  $7 \cdot 10^{-5}$ .

$$v_{Ska} = 0.32 \text{ m/s} \quad (5.3)$$

Den udregnede hastighed er i god overensstemmelse med feltmålingerne, der viser at middelhastigheden i Skagerrak-vandet er ca.  $0.3 \text{ m/s}$ .

Position af Skagerrak-fronten

Det kan konkluderes, at Skagerrak-fronten under meteorologiske betingelser, der skaber forhold med østlige og nordlige vinde, er en kraftbalance mellem Corioliskraften p.g.a. strømmen i Skagerrak og den barokline trykgradient dannet p.g.a. skillefladehældningen i fronten. Denne frontbetingelse viser, at Skagerrak-fronten kan



**Figur 5.3**  
 (a) Salinitets fordelingen (‰) og (b,c) hastighedsfordelingen (cm/s) i et tværsnit gennem Skagerrak-fronten i det nordlige Kattegat d. 22. oktober 1990. Salinitetsfordelingen er identisk med densitetsfordelingen p.g.a. en ringe temperatur variation.

Kinematisk front og densitets-front

betragtes som superposition af en kinematisk front og en densitets-front (dvs. overgangen mellem Skagerrak- og Kattegat-vandet). Positionen af de to fronter, som under de betragtede vindretninger er knyttet uløseligt til hinanden, er primært bestemt af at strømmen i Skagerrak, som er koncentreret over skrænten til Norske Renden i overgangsområdet mellem Skagerrak og Kattegat.

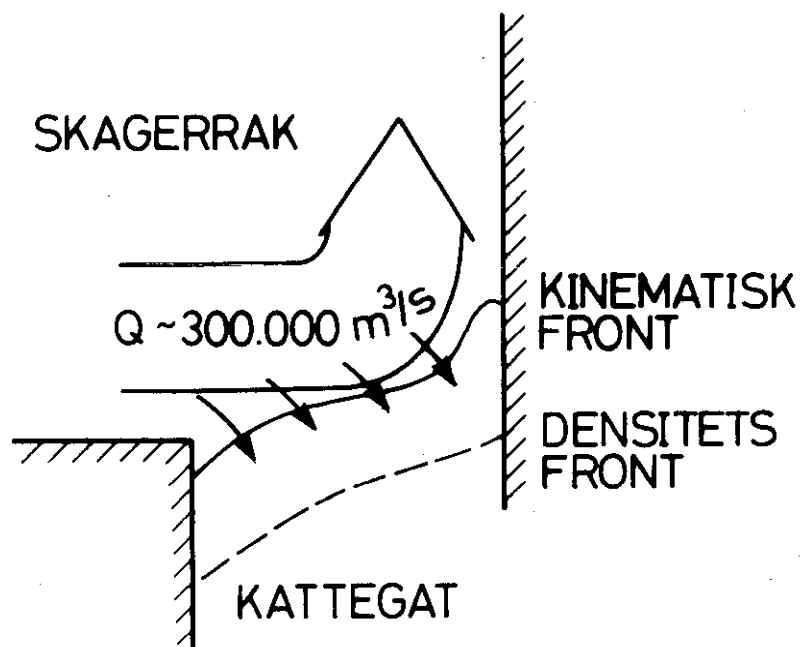
## 5.2 Skagerrak-fronten under sydlige og vestlige vinde

Barotrop styret geostrof balance

Kraftbalancen i Skagerrak-fronten mellem Corioliskraften og den barokline trykgradient under østlige vinde kan ikke opretholdes, når de meteorologiske forhold skifter. Så snart en sydlig og vestlig vind begynder at dominere, skifter strømmen langs den danske kyst i Skagerrak fra udstrømning til indstrømning. Dette skift i strømretning etablerer en østvendt strøm i overgangsområdet mellem Skagerrak og Kattegat i størrelsesordenen  $3\text{-}400.000\text{ m}^3/\text{s}$  (se fig. 5.4). Den eneste kraft, der er i stand til at balancere bidraget fra Corioliskraften, er en barotrop trykgradient på tværs af strømmen i Skagerrak. Denne kraftbalance skaber således igen en kinematisk front i det nordlige Kattegat. Overfladehævningen i Kattegat, der er nødvendig for at danne barotrope trykgradient, er udregnet i Poulsen (1991) til  $7.5 \cdot 10^{-2}\text{ m}$ .

På grund af indstrømningen fra Kattegat til Østersøen vil en mindre del af fluxen i Skagerrak ( $\sim 100.000\text{ m}^3/\text{s}$ ) af kontinuitets grunde blive transporteret ind i Kattegat. Dette vil medføre at

**Figur 5.4**  
Idealiseret strømmønster i front-zonen i Skagerrak/-Kattegat overgangen under sydlige og vestlige vinde.



densitets-fronten (overgangen mellem overfladevandet i Kattegat og Skagerrak) bevæger sig længere ind i Kattegat.

Skagerrak-fronten

Kinematisk front

Densitets-front

Disse betragtninger viser, at Skagerrak-fronten under sydlige og vestlige vinde vil separere og danne både en selvstændig kinematisk front og en selvstændig densitets-front. Den kinematiske front er beliggende relativt stationært i overgangen mellem Skagerrak og Kattegat (Skagens Rev - Marstrand transektet), da fluxen på Skagerrak-siden af fronten er begrænset til skrænten til Norske Renden. Positionen af densitets-fronten kan på baggrund af kontinuitetsbetragtninger bestemmes til at have mulighed for at vandre op til 40 km frem og tilbage i det nordlige Kattegat.

Man kan ud fra ovenstående betragtninger konstatere, at Skagerrak-fronten består af to frontstrukturer, dels en kinematisk front, dels en densitets-front, hvis position og dynamik begge er tæt koblet til variationen i strømmønsteret i Skagerrak og dermed til de dominerende meteorologiske forhold.

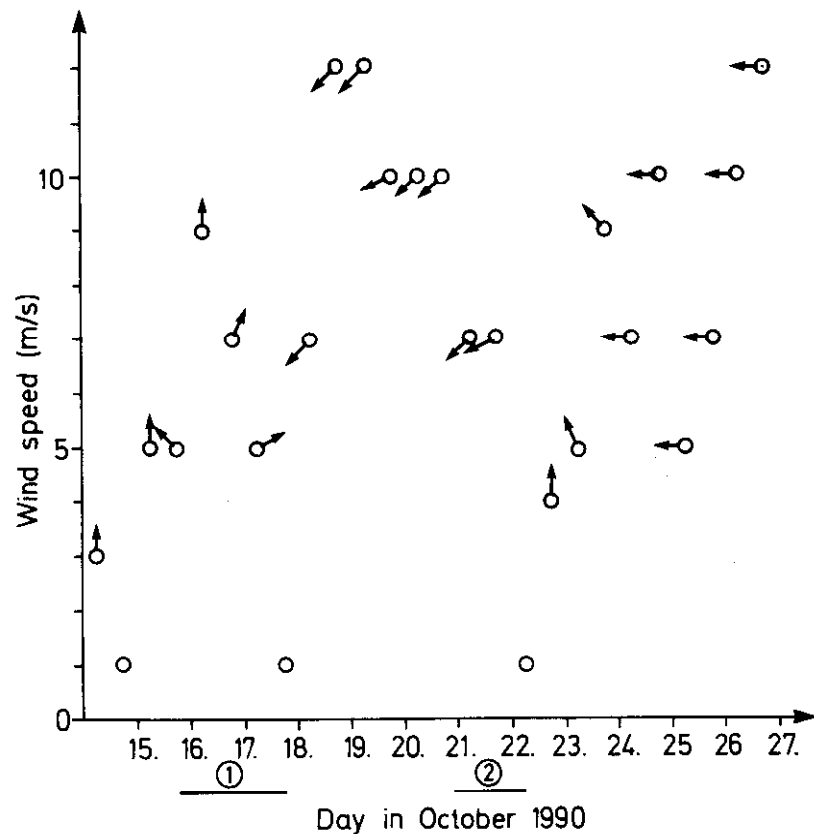
## 6. Feltmålinger

### 6.1 Introduktion

Det danske undersøgelseskib "Dana" udførte i perioden 15.- 27. oktober 1990 salinitets-, temperatur- og hastighedsmålinger i Skagerrak og det nordlige Kattegat. Hastighedsmålingerne blev foretaget med en Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), der bestemte hastighedsfordelingen gennem vandsøjlen på over 3000 positioner i denne periode. Salinitets- og temperaturprofiler blev i samme periode registreret på over 100 positioner. Vinden var i perioden op til toget primært kommet fra syd-sydvest. Den 17. oktober skiftede vinden fra sydvest til nordøst (se figur 6.1).

**Figur 6.1**

Vindhastighed og retning (mod) i perioden 15.- 27. Oktober 1990. Vinden er målt på undersøgelseskibet "Dana". Numrene 1 og 2 på tidsaksen viser de to perioder hvor intensive hydrografiske målinger blev foretaget (15.- 17. Okt. og 20.- 22. Okt.)

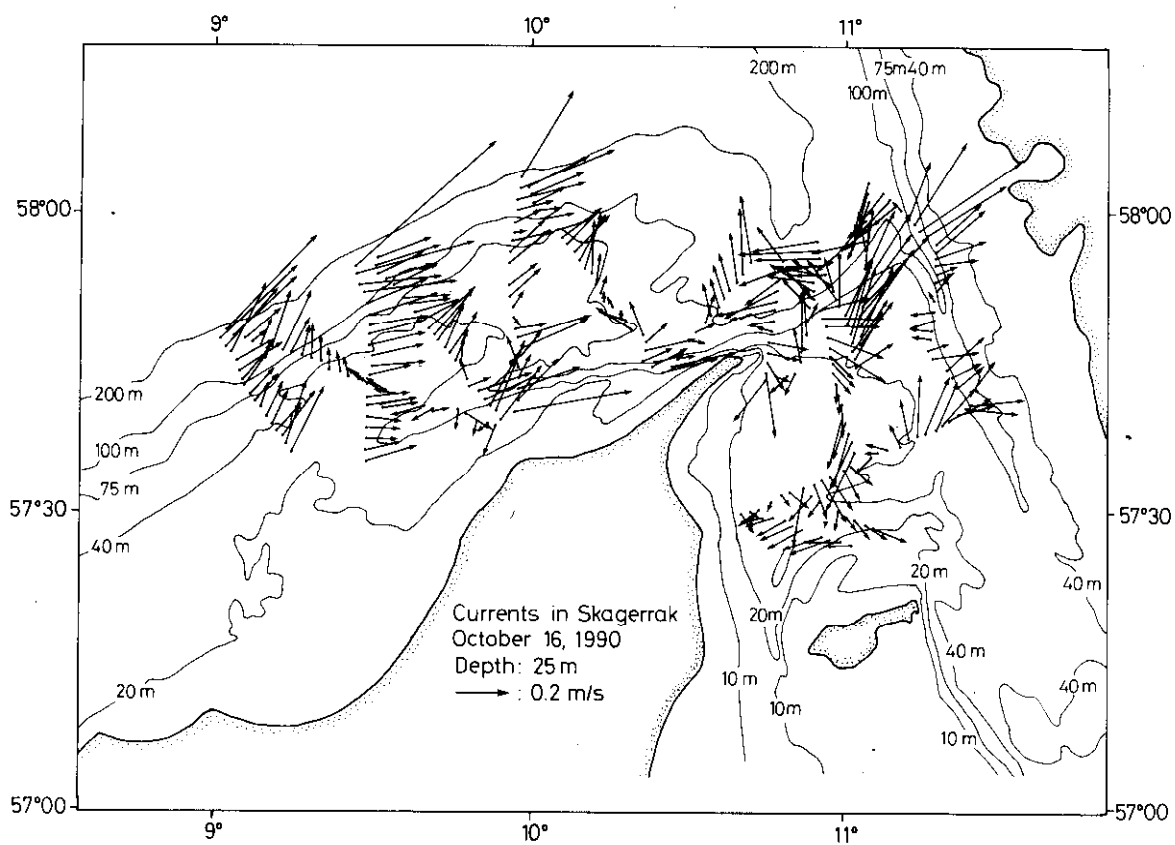
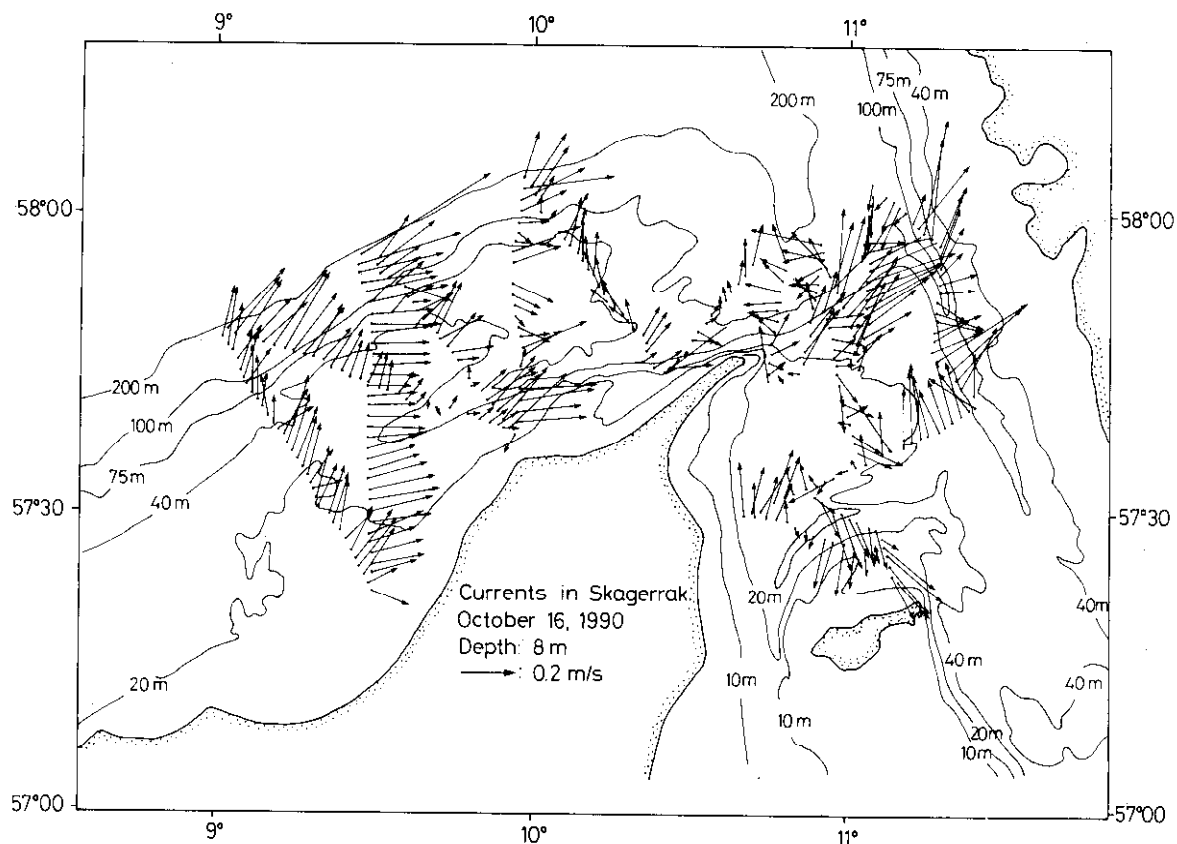


### 6.2 Hydrografiske forhold under vestlige vinde

Feltmålinger d. 15.- 17. Oktober 1991

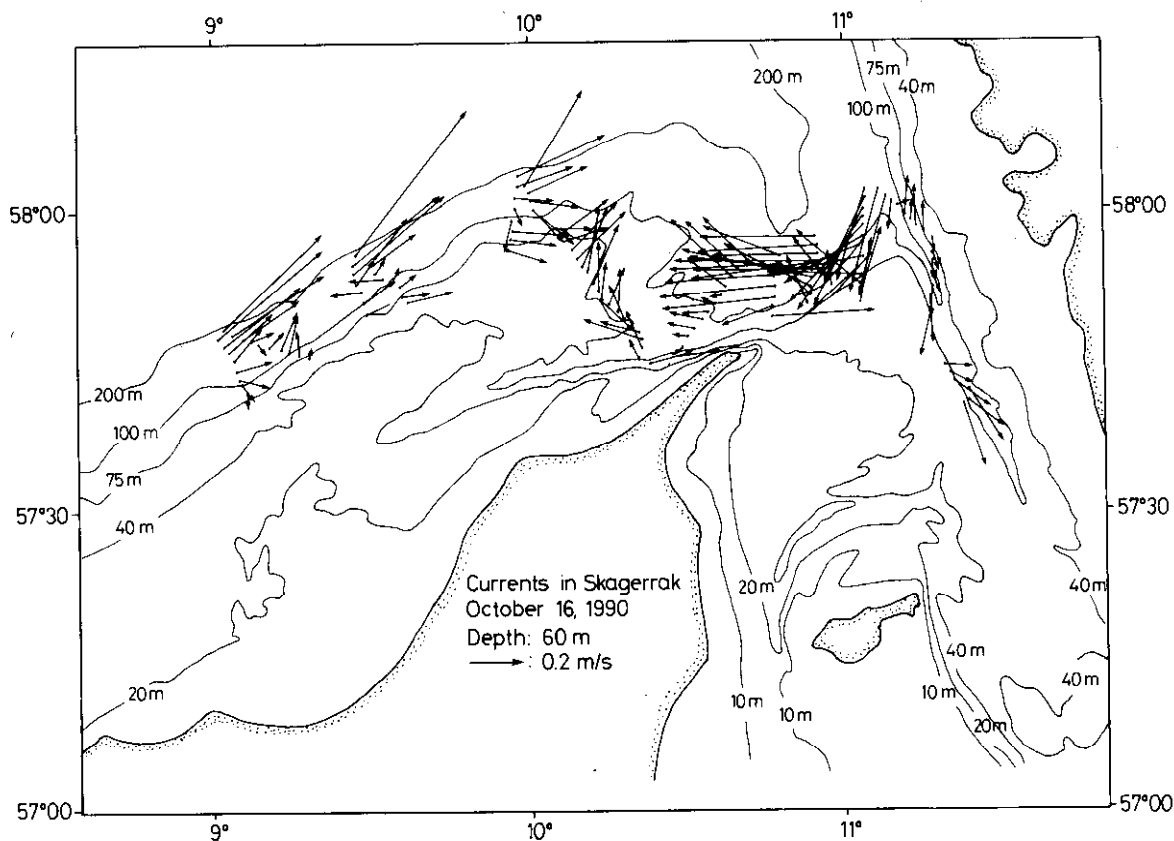
Figur 6.2 og 6.3 viser hastigheds-, salinitets- og temperaturfordelingen i Skagerrak og i det nordlige Kattegat. Alle data blev indsamlet gennem 49 timer i perioden 15.- 17. oktober og viser de hydrografiske forhold, lige da vindens retning skifter fra sydvest til nordøst.





**Figur 6.2**

Hastighedsvektorer i den danske del af Skagerrak og i det nordlige Kattegat d. 15.- 17. oktober 1990. Hastighedsmålingerne er foretaget med en ADCP. Dybderne af de valgte hastighedsvektorer er (a) 8 m, (b) 25 m og (c) 60 m.



**Figur 6.2** Fortsat.

**Geostrof balance**

Hastighedsfordelingen i figur 6.2a-c viser, at vandets hastighed næsten kan anses for konstant over dybden med en tendens til, at hastigheden øges med dybden i området over skrænten til Norske Renden. Dette viser, at strømmønsteret ikke er under særlig indflydelse af den lokale vind. Det kan desuden ses, at strømmen i Skagerrak følger dybdekonturerne, hvilket indikerer, at strømmene er i geostrof balance. Dette underbygges også af variationen i den dynamiske højde, der kan beregnes ud fra salinitets- og temperaturmålinger (se Poulsen, 1991).

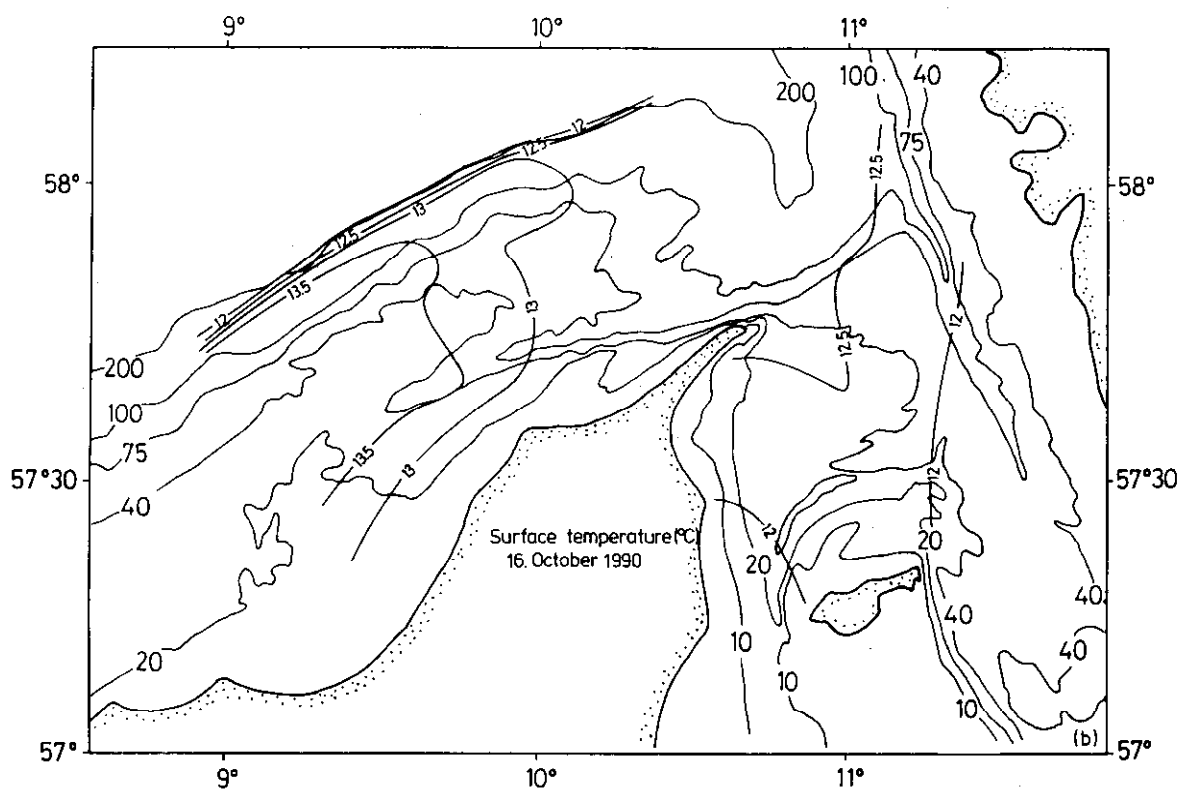
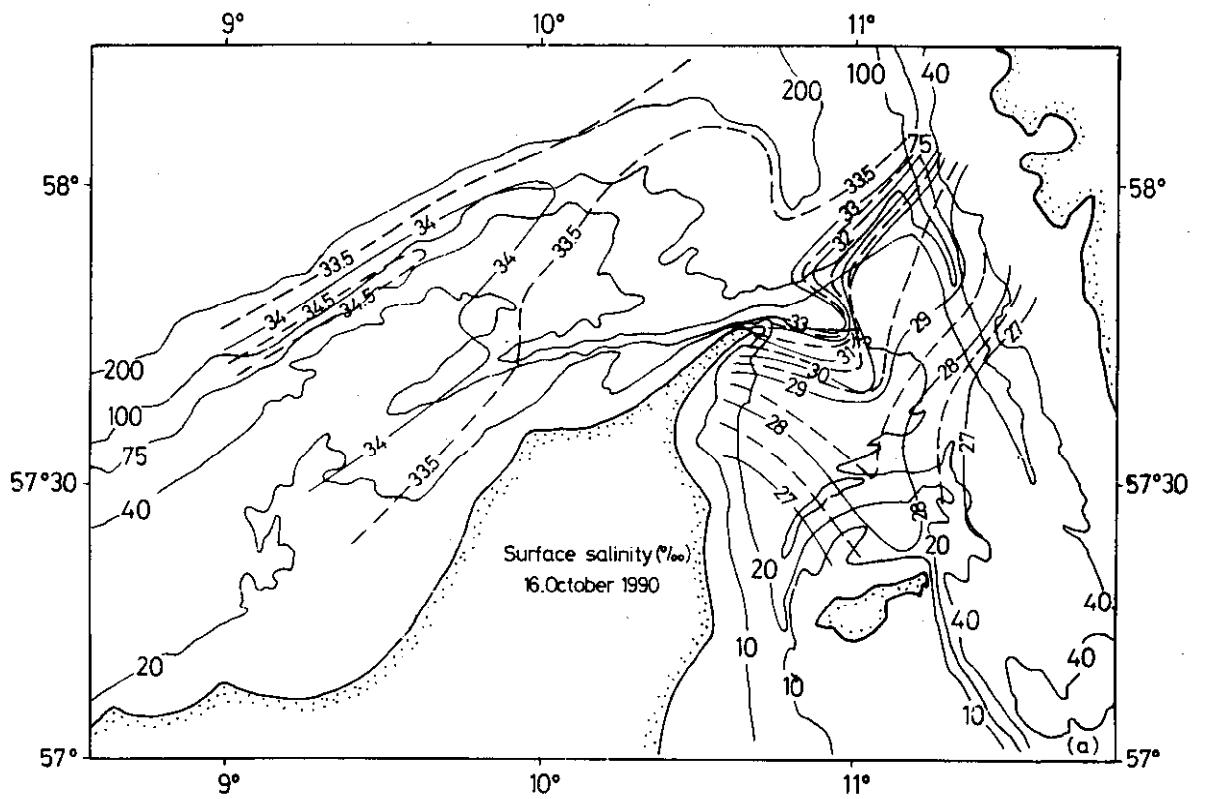
**Blanding**

Blandingen på skrænten til Norske Renden ses tydeligt som maxima både i salinitets- og temperaturfordelingen (fig. 6.3).

Indstrømningen til Skagerrak langs dybdekonturene er beregnet i Poulsen (1991) til ca.  $4 \cdot 10^5$  m<sup>3</sup>/s. En indstrømning af denne størrelse kan ifølge beregningerne i kap. 4.2 dannes af en sydvestlig vind på 7 m/s, hvilket er i overensstemmelse med observationerne af den aktuelle vindstyrke og retning.

**Skagerrak-fronten**

Fronten i overgangsområdet mellem Skagerrak og Kattegat viser sig både som en tydelig ændring i hastighedsfeltet og en stor gradient i overfladesaliniteten. Strømmen på Skagerrak-siden af fronten er rettet mod vest, mens strømmen i Kattegat er rettet mod Sverige. Den anticykloniske hvirvel på Skagerrak-siden af fronten er et resultat af skiftet i vindretningen.



**Figur 6.3**  
 (a) Overflade-salinitet (‰) og (b) overflade-temperatur (°C) i Skagerrak og i det nordlige Kattegat d. 15.- 17. oktober 1990.

Udstrømning fra Kattegat

Udstrømningen af brakvand fra Kattegat gennem både Læsø Rende og øst-renden kan identificeres i både hastigheds- og salinitetsfordelingen. Området nord for Læsø er derimod karakteriseret ved en svag retur-strømning ved bunden og i skillefladen. Området med retur-strømningen er afgrænset af de to udstrømninger øst og vest for Læsø. Retur-strømningen er sandsynligvis en kompensationsstrøm forårsaget af den horizontale medrivning af vand fra området nord for Læsø ind i de to udstrømnings-jets, der omgiver Læsø. Den horizontale medrivning er væsentlig p.g.a. de høje hastigheder i de to udstrømnings-jets. Det udstrømmende brakvand fra Kattegat akkumuleres ved den svenske kyst og danner dermed den Baltiske Kyststrøm.

Den Jyske Kyststrøm

Intrusion ved Skagen's Rev

Transporttid i Skagerrak

Salinitetsfordelingen i fig. 6.3a viser, at vand med en salinitet identisk med saliniteten i den Jyske Kyststrøm transporteres ind i Skagerrak langs den danske kyst. Vandet i den Jyske Kyststrøm kan følges helt op til Skagerrak-fronten, hvor en del trænger ind i Kattegat gennem frontzonen ved Skagens Rev. En sammenligning af feltmålingerne ved Skagens Rev og målinger fra Skagens Rev fyrskib viser, at den observerede hastighed, strømretning og salinitet er typisk for denne lokalitet. Hastighedsfordelingen i fig. 6.2 viser at strømmen langs den danske kyst er ca. 0.2 m/s, hvilket svarer til en transporttid på ca. 8 dage, fra vandet i den Jyske Kyststrøm kommer ind i Skagerrak (ved Hanstholm) til det har mulighed for at trænge ind i Kattegat.

Hastighedsmålingerne viser desuden, at der foregår en indstrømning af vand fra Skagerrak til Kattegat i de dybere dele af Norske Rendens forlængelse i Kattegat.

### 6.3 Hydrografiske forhold under østlige vinde

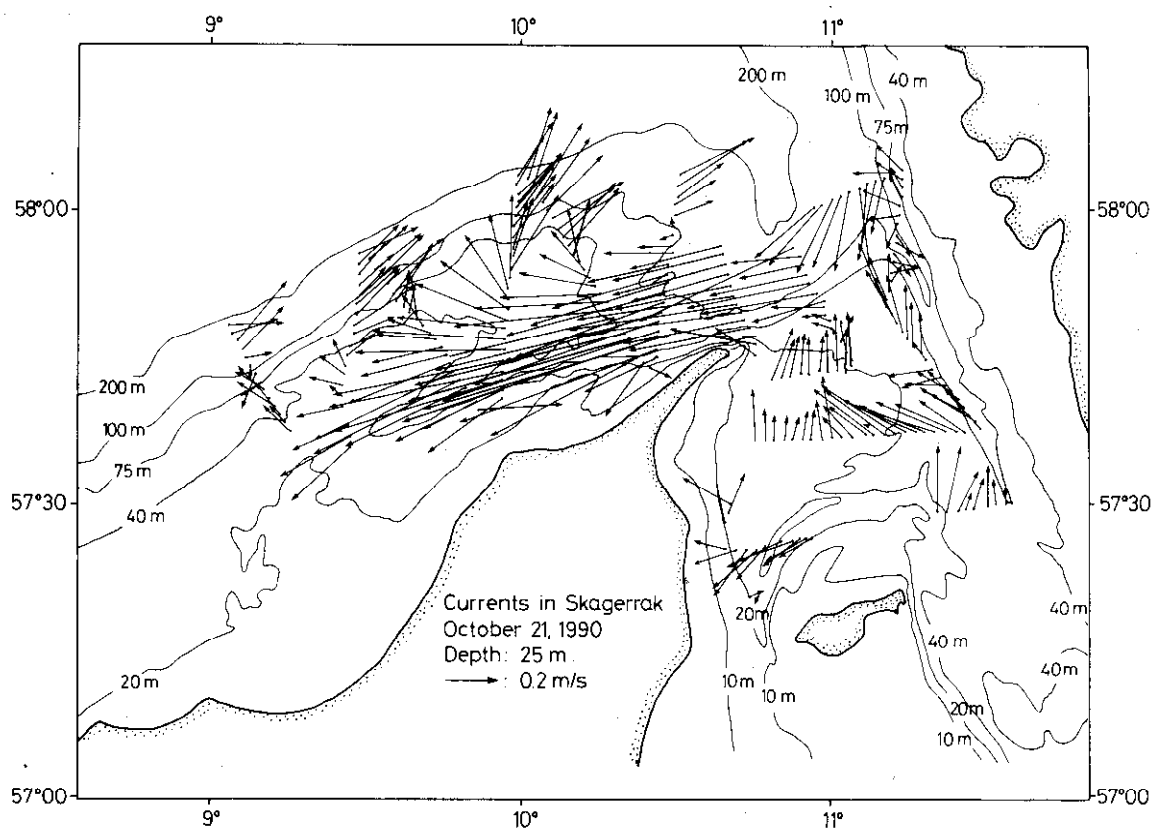
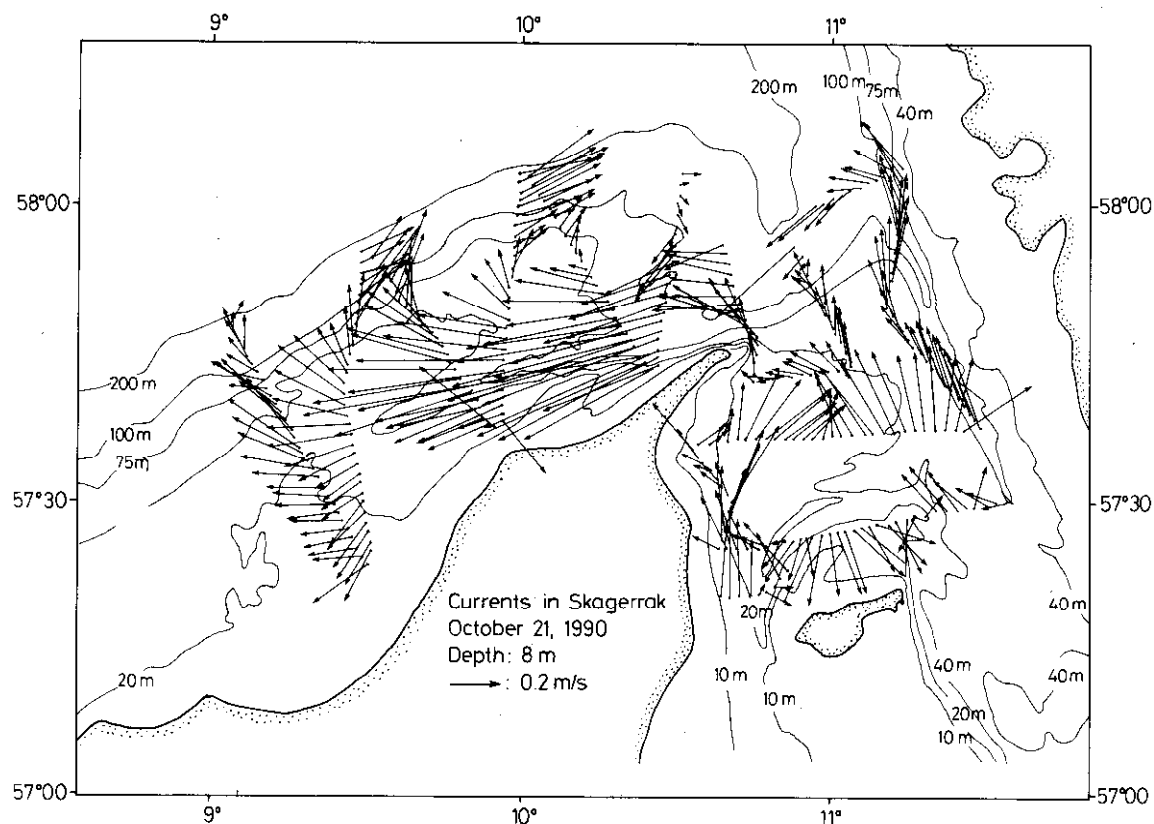
Feltemålinger d. 20.- 22. oktober 1990

4 dage senere, den 20.- 22. oktober, blev indsamlingen af intensive hastigheds- og temperaturdata gentaget i Skagerrak og i det nordlige Kattegat. Alle data blev indsamlet gennem 34 timer under meteorologiske forhold, der resulterede i vinde konstant kommende fra nordøst. Hastighedsfordelingen er vist i fig. 6.4. Overfladetemperaturen er vist i fig. 6.5, mens overfladesaliniteten ikke er repræsenteret p.g.a. et utilstrækkeligt antal salinitetsmålinger. Forskellen i temperaturen mellem målingerne i fig. 6.3b og fig. 6.5 skyldes overfladeafkølingen i oktober (Poulsen, 1991).

Tilpasning til randbetingelser

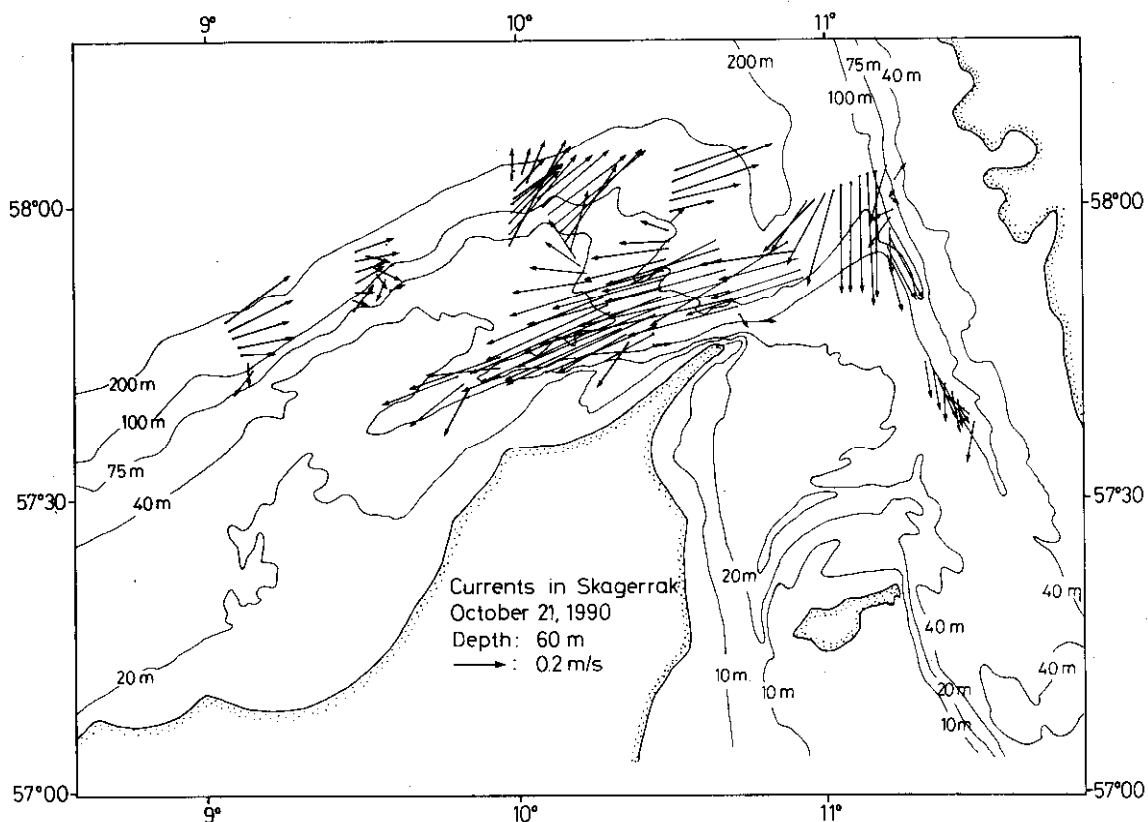
Strømmønsteret i fig. 6.4 viser, at der er sket en tilpasning til de ændrede randbetingelser i Nordsøen og dermed til de nye meteorologiske forhold. Hastighedsfordelingen er næsten homogen over dybden, hvilket indikerer, at de drivende kræfter er barotrope.

Hastighedsfordelingen viser, at en stor del af udstrømningen langs



**Figur 6.4**

Hastighedsvektorer i den danske del af Skagerrak og i det nordlige Kattegat d. 20.- 22. oktober 1990. Hastighedsmålingerne er foretaget med en ADCP. Dybderne af de valgte hastighedsvektorer er (a) 8 m, (b) 25 m og (c) 60 m.



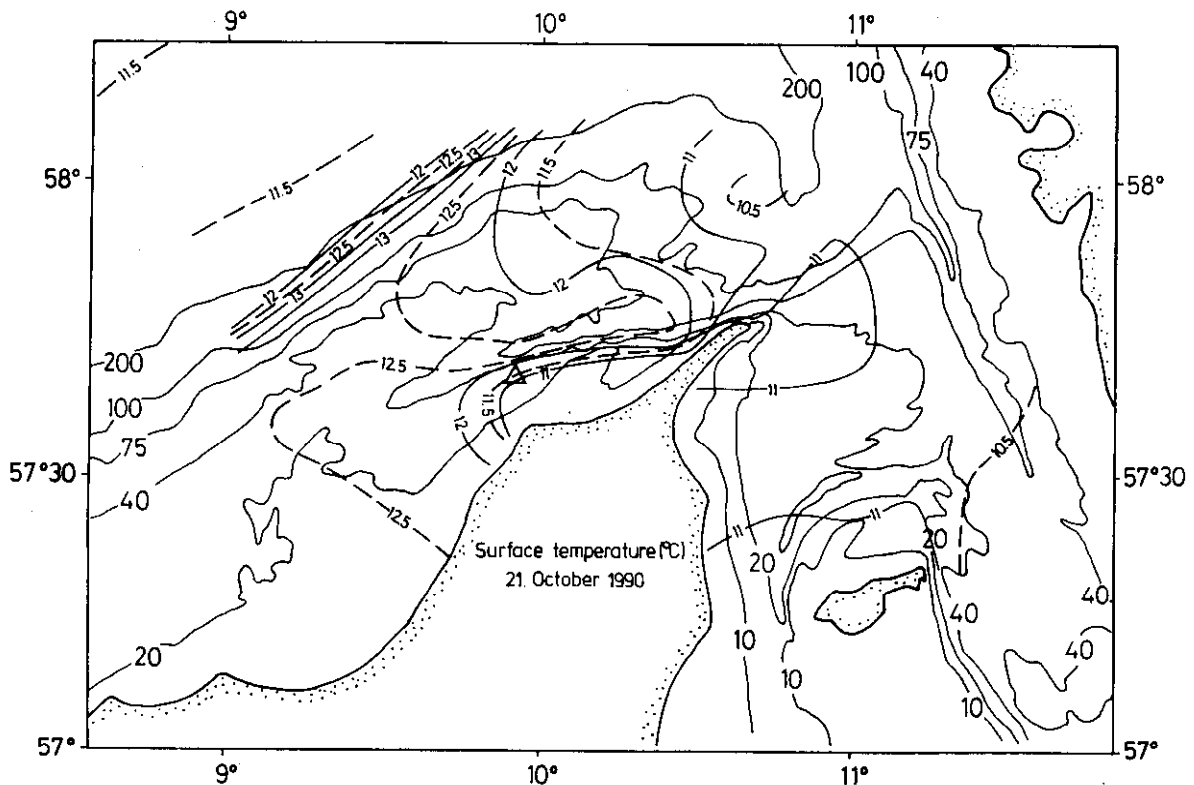
**Figur 6.4** Fortsat

den danske kyst transporteres væk fra kysten ud over skrænten til Norske Renden. Størrelsen af transporten rettet væk fra kysten er ca.  $6 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ , hvilket giver en middelhastighed rettet mod det centrale Skagerrak på  $0.15\text{-}0.20 \text{ m/s}$ . Mekanismen, der skaber denne transport, skyldes en kombination af 1) en trykgradient skabt af densitetsforskelle og 2) vorticity bevarelse som følge af ændringer i bundforholdene. Poulsen (1991), viste at begge årsager kan redegøre for transporten.

Poulsen (1991), viste at salinitetsforskellen i frontområdet er vokset p.g.a. udstrømningen af brakvand fra Kattegat. Positionen af densitets-fronten er desuden flyttet ud mod Skagerrak som en konsekvens af den nye kraftbalance i frontzonen, der har ændret skillefladegradienten mellem Skagerrak-vandet og Kattegat-vandet.

#### Udstrømning fra Kattegat

Udstrømningen af brakvand gennem Læsø Rende og Øst Renden ses at være forbundet med en kompensationsstrømning i området nord for Læsø p.g.a. en horisontal medrivning af vand fra dette område ind i de to udstrømningsjets. Indstrømningen af Skagerrakvand i Norske Rendens forlængelse i Kattegat synes desuden at være et hyppigt forekommende fænomen.



**Figur 6.5**  
*Overflade-temperatur (°C) i Skagerrak og i det nordlige Kattegat d. 20.- 22. oktober 1990.*

#### 6.4 Diskussion

Ved hjælp af intensive feltmålinger er det lykkedes at vise eksempler på den virkelige hastighedsfordeling i dele af Skagerrak og i det nordlige Kattegat sammenholdt med temperatur- og salinitetsdata. Det er naturligvis svært at drage den konklusion, at målingerne fra denne hydrografiske undersøgelse er i stand til at repræsentere den generelle hastigheds- og salinitetsfordeling. Målingerne viser dog, at hastighedsfordelingen underbygger de teoretiske overvejelser i kap. 4. Salinitetsfordelingen er tæt knyttet til hastighedsfordelingen (og visa versa) og er også bundet af randbetingelserne skabt i Nordsøen.

#### **Skagerrak-fronten**

Målingerne viser, at beliggenheden af den kinematiske front ikke flytter sig væsentlig, hvilket stemmer overens med konklusionerne i kap. 5 og viser, at Kattegats nordlige randbetingelse er skabt af cirkulationen i Skagerrak.

Densitets-fronten er dog et ikke-stationært fænomen og er bl.a. karakteriseret af instabiliteter kombineret med intrusioner af Skagerrak-vand ind i Kattegat analogt til indstrømningen ved

Skagens Rev i kap. 6.2. At indstrømningen ved Skagens Rev er et normalt fænomen kan ses i tidsserier af hastighedsmålinger fra Skagens Rev fyrskib. Hastighedsmålingerne fra denne tidsserie viser, at de to hastighedsfordelinger i fig. 6.2 og fig. 6.4 repræsenterer de typiske strømretninger ved Skagens Rev under henholdsvis vestlige og østlige vinde.

#### Blanding

De hydrografiske målinger har vist, at blandingen på skrænten til Norske Renden er årsagen til, at skillefladen i Skagerrak antager en dome-formet facon (Poulsen, 1991). Blandingen har også en stor betydning for de biologiske processer over skrænten til Norske Renden, da der skabes ideelle forhold for biologisk aktivitet (lys og næringssalte), og det må således forventes, at der kan registreres en øget biologisk produktion i dette område.

#### Barotrope processer dominerer

De viste hastigheds- og salinitetsfordelinger indikerer, at mange af de bestemmende dynamiske processer i Skagerrak er barotrope. Dette betyder, at variationen i det generelle strømmønster i Skagerrak kan modelleres v.h.a. en simpel barotrop model. Blandingsprocesser på skrænten til Norske Renden og dynamikken i Skagerrak-fronten er barokline processer, der selvfølgelig ikke kan beskrives barotropt. Selvom barotrope processer styrer strømmønsteret i Skagerrak, er det de barokline processer, der signifikant påvirker de biologiske processer. De barokline processer kan derfor ikke ignoreres i beskrivelsen af de fysiske processer, hvis det endelige mål med beskrivelsen er at forklare de biologiske processer og deres betydning i området.

#### Barokline processer

Yderligere beskrivelse af feltmålinger i Skagerrak og i det nordlige Kattegat findes i Poulsen (1991).



## 7. Satellitbilleder og numeriske modeller

### 7.1 Satellitbilleder

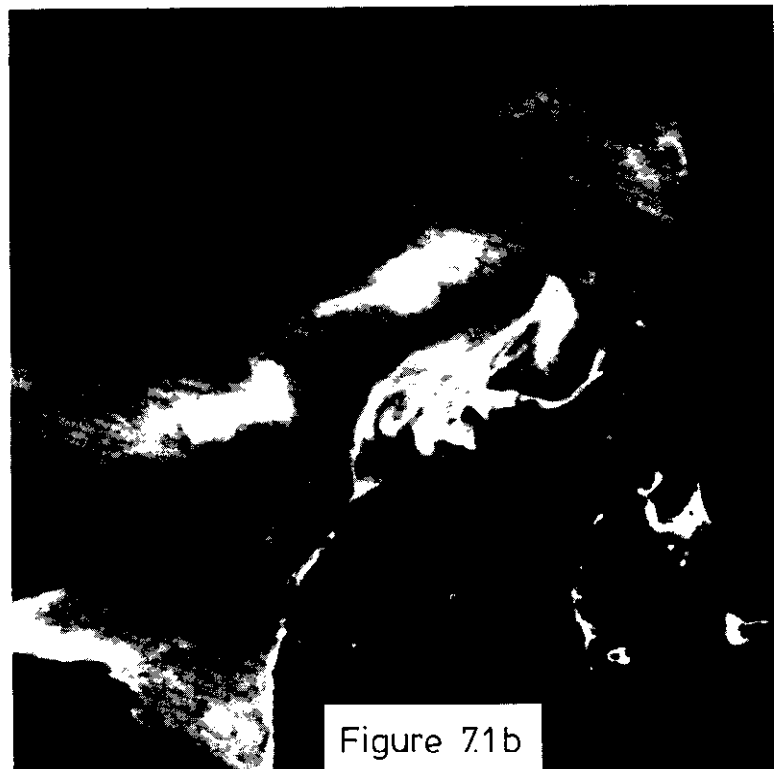
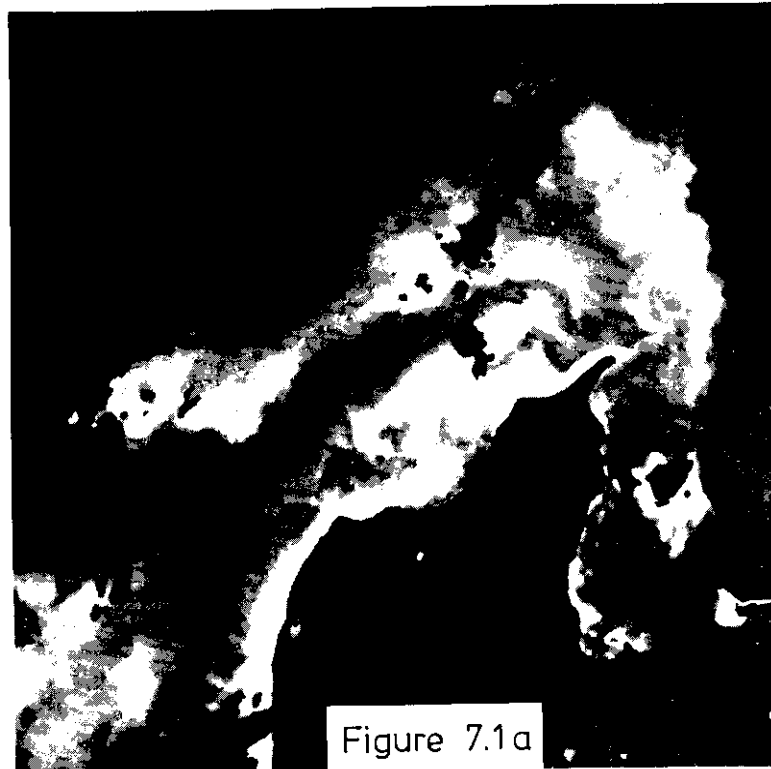
Satellitbilleder er ud fra en økonomisk betragtning en billig måde at indsamle informationer om variationerne af forskellige overfladeparametre (f.eks. temperaturen) i et større havområde. Satellitbilleder er i stand til at vise et synoptisk billede af overfladeforhold, hvilket gør det muligt at foretage en vurdering af strømmønsteret i et større område. De følgende satellitbilleder viser refleksionen fra overfladevandet, hvilket er en indikation af mængden af opslemmet materiale i vandet.

Figur 7.1a-d viser et eksempel på den tidlige variation i strømmønsteret i Skagerrak i perioden 19.- 23. juni 1982. Perioden før 18. juni var domineret af vestlige vinde, hvorefter vinden skiftede retning til øst med vindstyrker på 5-10 m/s. Disse meteorologiske forhold er identisk med de forhold, der eksisterede, mens feltmålingerne i kap. 6 blev indsamlet.

Figur 7.1a er taget på dagen, da vinden skiftede fra vestlig til østlig retning. Indstrømningen til Skagerrak kan ses langs den danske kyst. En svag udstrømning fra Kattegat akkumulerer ved den svenske kyst og bevæger sig nordpå uden dog at danne en tydelig kyststrøm.

Figur 7.1b viser strømmønsteret i Skagerrak 2 dage senere. Vinden kommer nu fra øst, hvilket har medført, at strømmen tæt på den danske kyst i Skagerrak er skiftet til udstrømning. Vindretningen skaber også udstrømning af brakvand fra Kattegat. Denne udstrømning danner den Norske Kyststrøm, der tydeligt kan ses på satellitbilledet. Indstrømning til Skagerrak er koncentreret i det centrale Skagerrak og danner sammen med strømmene langs både den norske og danske kyst henholdsvis en cyklonisk og en anticyklonisk cirkulation. Skiftet mellem indstrømningen og udstrømningen i den danske del af Skagerrak, der kan ses som en tydelig farveændring i satellitbilledet, følger dybdekonturerne. Positionen af Skagerrak-fronten, der også kan ses som en farveændring, har ikke flyttet sig signifikant sammenlignet med fig. 7.1a.

Figur 7.1c-d viser Skagerrak henholdsvis 3 og 4 dage efter ændringen i vinden. Figurerne viser samme tendenser som fig. 7.1b dog med en tydeligere anticyklonisk cirkulation i overgangsområdet mellem Kattegat og Skagerrak. Indstrømningen til Skagerrak er begrænset til området over skrænten til Norske Renden. Positionen af fronten mellem Kattegat og Skagerrak ser ud til at forblive stationær, hvilket underbygger, at fronten er et relativt stationært fænomen.



**Figur 7.1**  
*Satellitbillederne viser refleksionen af lys fra havoverfladen, hvilket er en indikation på mængden af opslemmet materiale. a) er målt 19. juni 1982, b) er målt 21. juni 1982, c) er målt 22. juni 1982 og d) er målt 23. juni 1982 (Kilde: Holligan et al, 1989, fig. 74-77).*

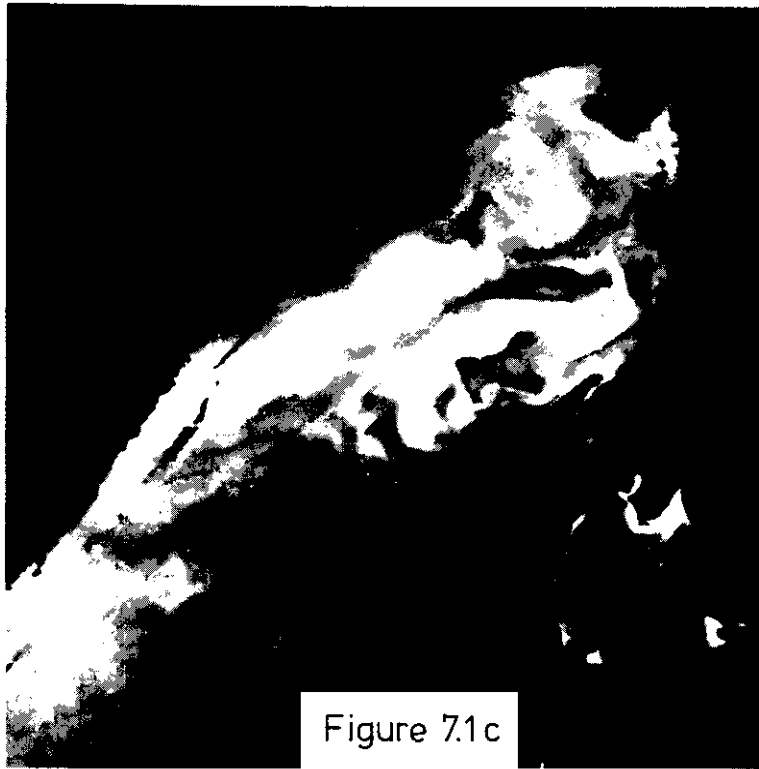


Figure 7.1c

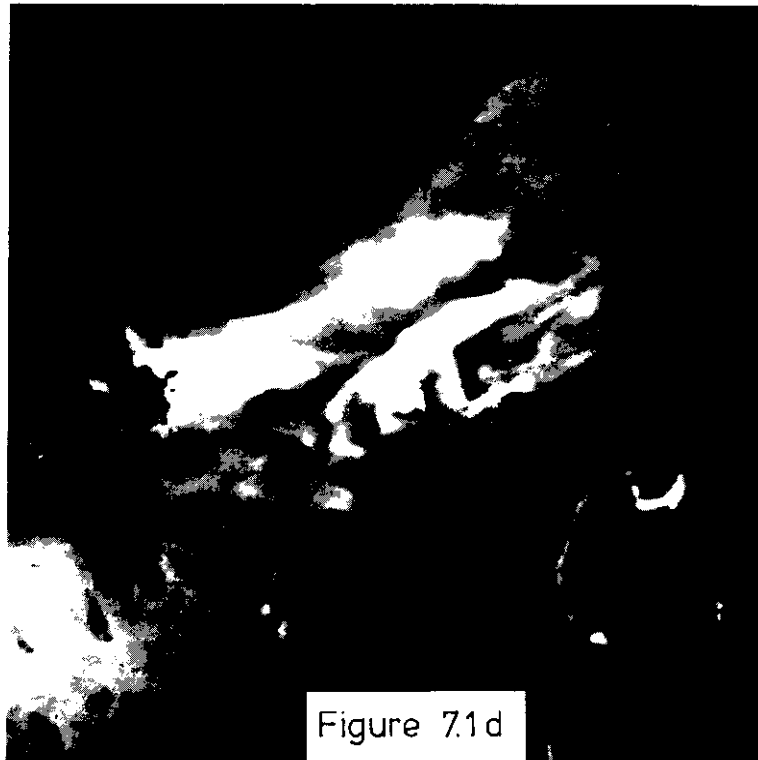


Figure 7.1d

*Figur 7.1 Fortsat.*

Satellitbillederne viser det samme generelle strømmønster som feltmålingerne i kap. 6. Overensstemmelsen mellem feltmålingerne og satellitbillederne viser, at strømmønsteret reproducerer sig selv. Dette skyldes, at de observerede fænomener i Skagerrak hovedsageligt er bestemt af de herskende meteorologiske forhold.

## 7.2 Numeriske modeller

Da barotrope forhold er bestemmende for mange af de fundamentale dynamiske processer i Nordsøen og i Skagerrak blev en barotrop model brugt til at illustrere variationen i strømmønsteret i Skagerrak. Den brugte model er et-lags modellen System-21 udviklet af Dansk Hydraulisk Institut. Modellen dækker arealmæssigt hele Nordsøen og Østersøen. Som randbetingelse benyttes en viden om variationerne i overfladeelevationen i den nordlige og sydlige rand i Nordsøen. Modellen inkluderer desuden variationen i atmosfæretryk og påvirkninger fra vind.

Meteorologiske forhold

Den simulerede tidsserie har som baggrund meteorologiske forhold identiske med forholdene under togtet i oktober 1990 (kap. 5) og perioden i juni 1982, hvor de foregående satellitbilleder er optaget (kap. 7.1). En lang periode med vestlig vind (10 m/s) er efterfulgt af en periode med østlig vind (10 m/s). Tidevandsbidraget til hastighedsfordelingen er ikke filtreret fra i modellens resultater. Da tidevandsbidraget i Skagerrak er lille, kan modellens hastighedsfordeling her betragtes som vindgenereret, mens tidevandsbidraget i Kattegat er større end de vindgenererede strømme. Dette betyder, at tolkningen af modellens resultater i Kattegat skal gøres med stor forsigtighed.

Tidevandets bidrag

Quasi-stationære strømforhold med vestlig vind

Figur 7.2a-b viser hastighedsfordelingen og overfladeelevationen i Skagerrak, efter at en quasistationær situation med vestlig vind har udviklet sig. Der eksisterer en geostrof balance på tværs af strømretningen langs den danske kyst. Vandføringen rettet ind i Skagerrak er givet ved

$$Q = \frac{gh_{ska} \Delta \eta_{ska}}{f_c} = 6.4 \cdot 10^5 \text{ m}^3/\text{s} \quad (7.1)$$

hvor  $h_{ska}$  er vanddybden i det kystnære område, og  $\Delta \eta_{ska}$  er ændringen i overfladeelevationen. Resultatet i lign. 7.1 er i samme størrelsesorden som det analytiske resultat fundet i kap. 4.2. Strømningen langs den danske kyst er i overgangsområdet mellem Kattegat og Skagerrak balanceret af en overfladehældning, hvilket er i overensstemmelse med konklusionerne i kap. 5. Indstrømningen til Skagerrak er modsvaret af en tilsvarende udstrømning langs den norske kyst. Udstrømningen er også i geostrof balance.

## Vindskift

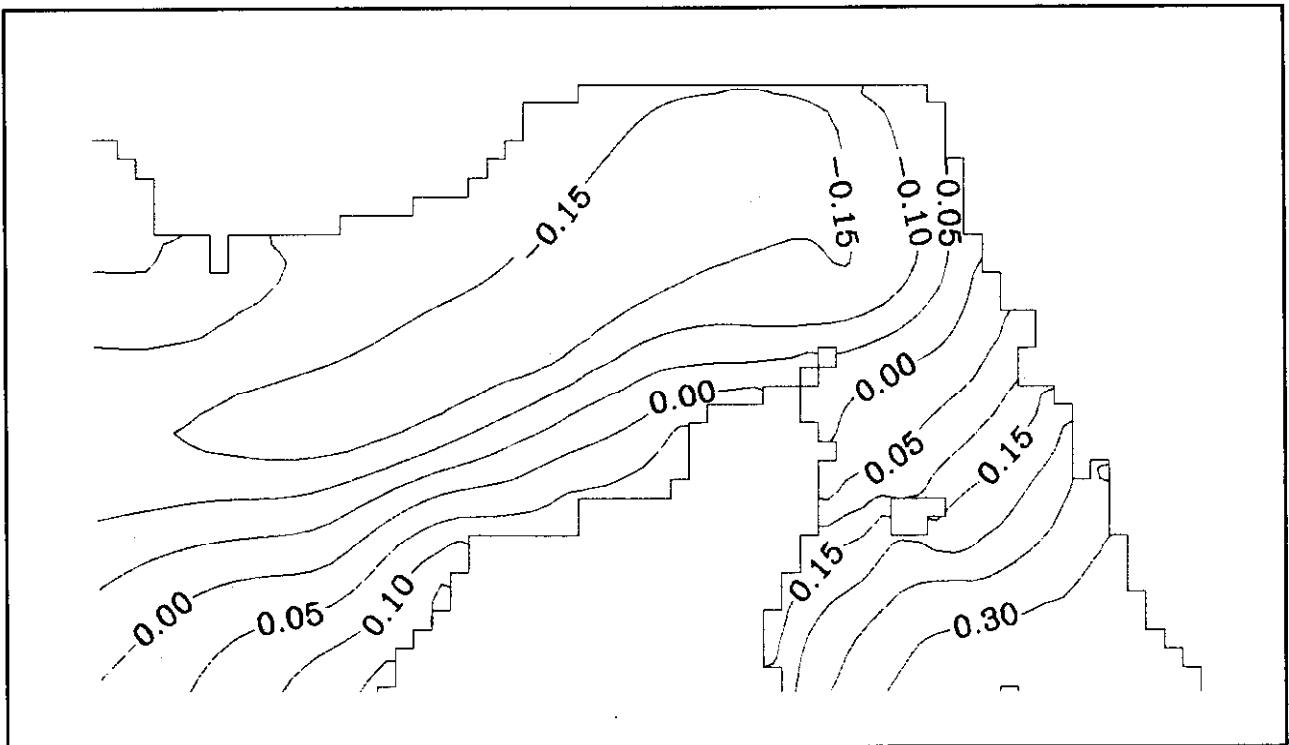
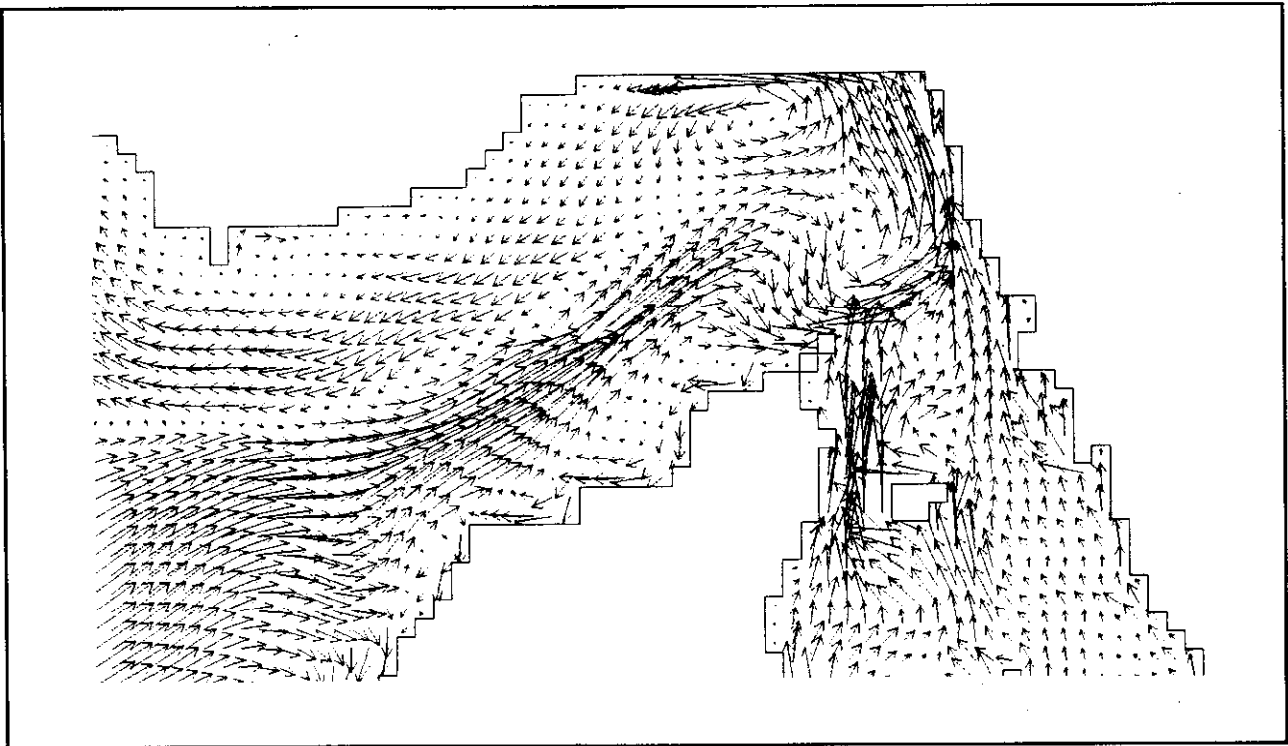
Figur 7.3a-b viser hastighedsfordelingen og overfladeelevationen 8 timer efter, at vinden er skiftet fra en stationær situation med vestlig vind til en stationær situation med østlig vind. Figuren viser, at overfladeelevationen i Skagerrak reagerer i overensstemmelse med den generelle overfladesænkning langs Jyllands vestkyst. Ændringen i strømmønsteret i Skagerrak sker først tæt ved kysten, både fordi ændringen i overfladeelevationen først slår igennem her, men også fordi bundfriktionen har en relativ større effekt i det lavvandede område. Strømmene i Skagerrak er generelt stadig i geostrof balance. Fronten i det nordlige Kattegat kan også stadig ses som en kraftig østvendt strøm i geostrof balance.

Hastighedsfordelingen og overfladeelevationen i Skagerrak og Kattegat 16 timer efter vindskiftet er vist i fig. 7.4a-b og viser sammenbruddet i det gamle strømmønster. Dette illustrerer, hvor hurtigt betydningen af de forrige meteorologiske forhold forsvinder.

## Quasi-stationær strømforhold med østlig vind

Cirka 48 timer efter ændringen i vinden har hastighedsfordelingen og overfladeelevationen nået en quasistationær tilstand (se fig. 7.5a-b). Udstrømningen langs den danske kyst er styret af en trykgradient i strømretningen og af en geostrof balance på tværs af strømmen. Volumen-transporten ud af Skagerrak er i samme størrelse som indstrømningen beregnet i lign. 7.1. Udstrømningen er kompenseret af en tilsvarende indstrømning over skrænten til Norske Renden. Strømmen i overgangsområdet mellem Skagerrak og Kattegat er også ændret til en vestvendt strøm, hvilket underbygger, at den observerede front i kap. 5.1 er et generelt udtryk for forholdene i frontområdet.

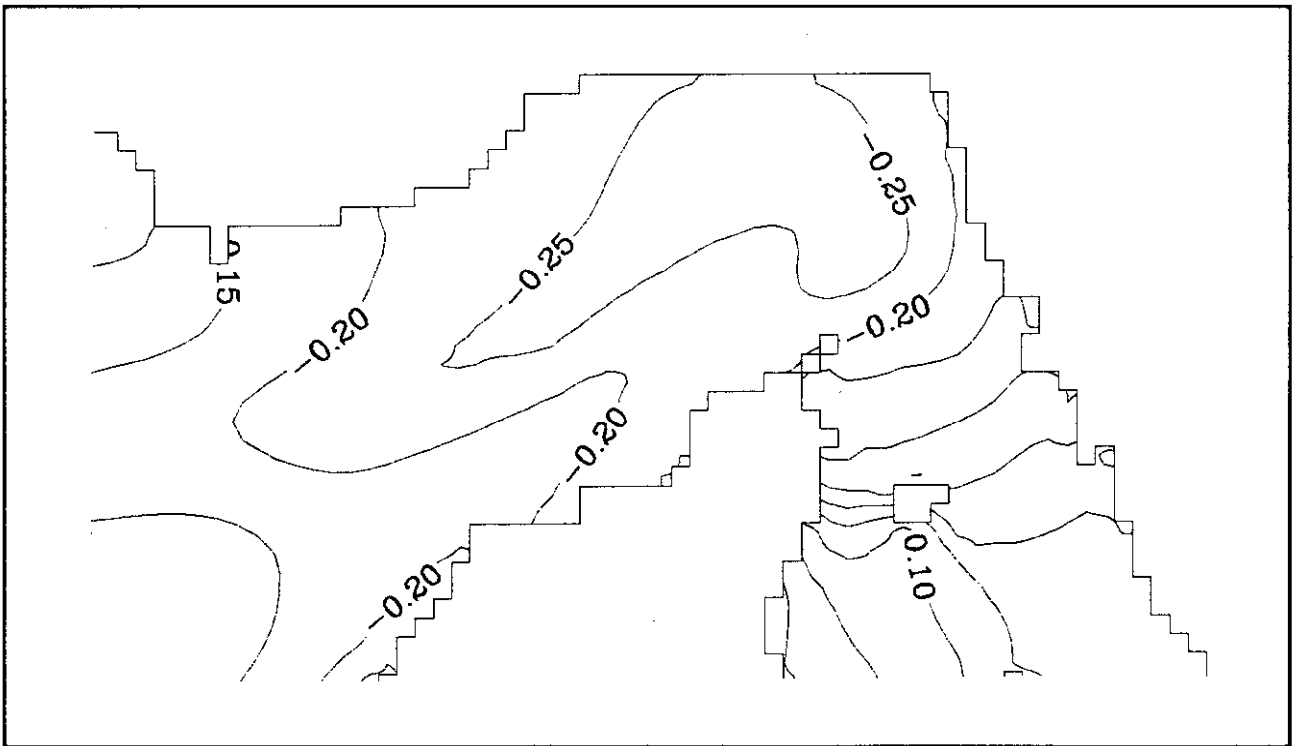
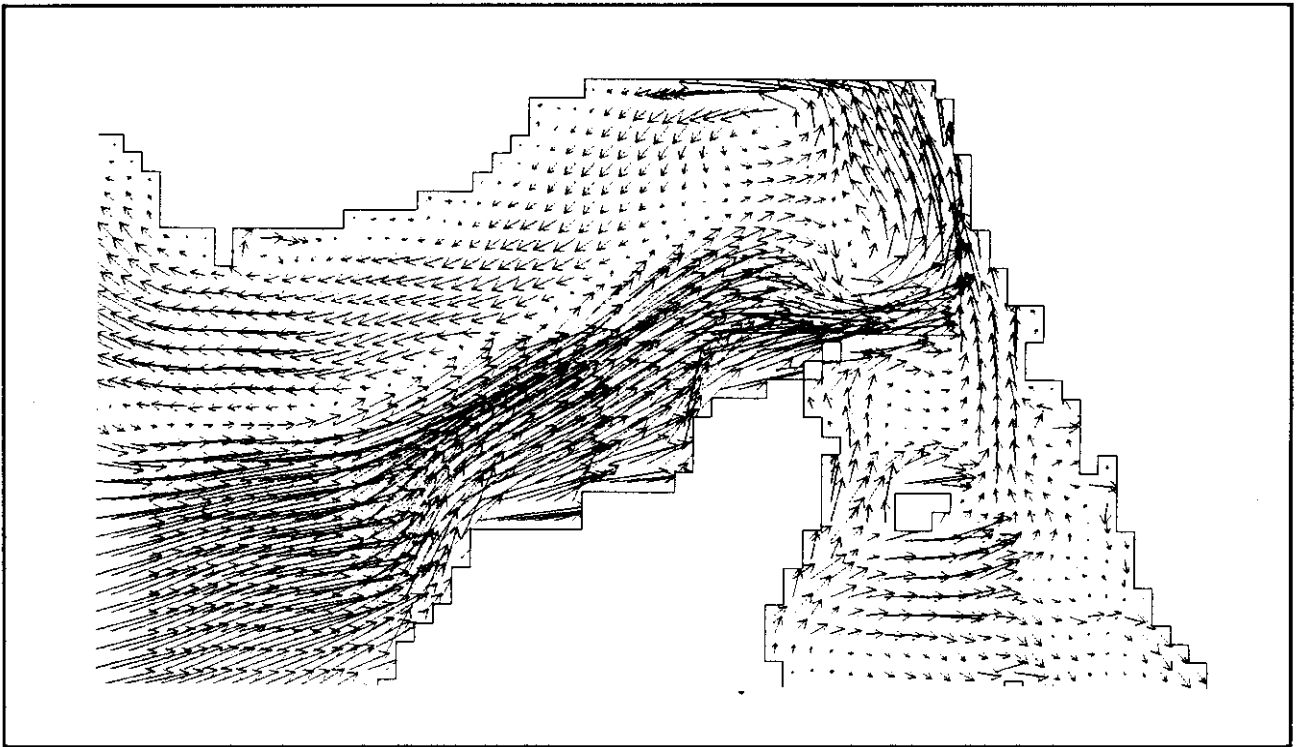
Strømforholdene beregnet v.h.a. den barotrope numeriske model System-21 og strømmønsteret illustreret i feltmålingerne og satellitbillederne viser mange ligheder. Ved at sammenligne model og feltmålinger må det konkluderes, at barotrope forhold er i stand til at beskrive reaktionen i ind- og udstrømning langs den danske kyst i Skagerrak på ændringer i de meteorologiske forhold. Modellen er ikke i stand til at simulere blandingsprocesser på skrænten til Norske Renden. Andre barokline effekter såsom den Norske Kyststrøm og frontdynamik kan selvfølgelig heller ikke modelleres. Brugen af modellen har dog vist sin berettigelse til at illustrere stor-skala transporterne ind og ud af Skagerrak. Modellen kan desuden bruges til at vise tids-skalaerne for større ændringer i hastighedsfordelingen i Skagerrak.



**Figur 7.2**

a) Den quasistationære hastighedsfordeling i Skagerrak og Kattegat efter en periode med vestlig vind (  $\longrightarrow$  : 0.5 m/s,  $W = 10$  m/s, retning (fra): vest). Hastighedsfordelingen er beregnet v.h.a. den numeriske et-lags model System 21.

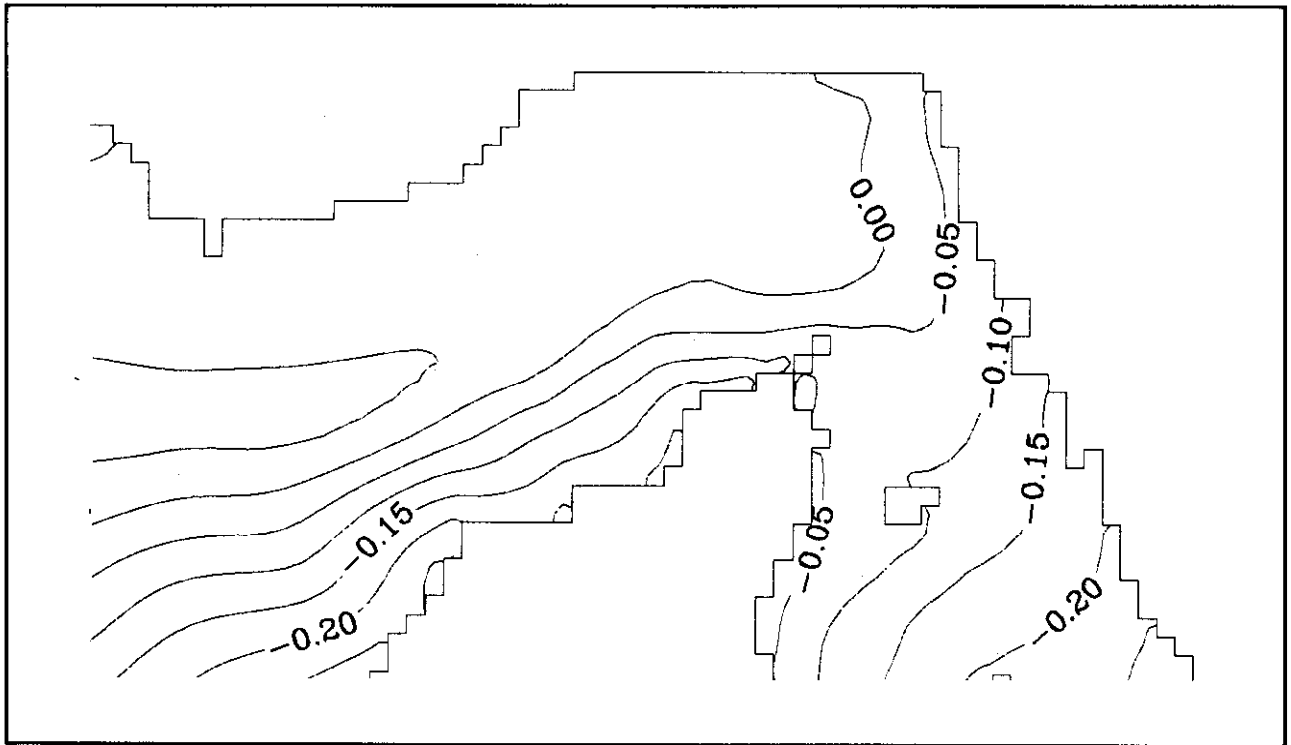
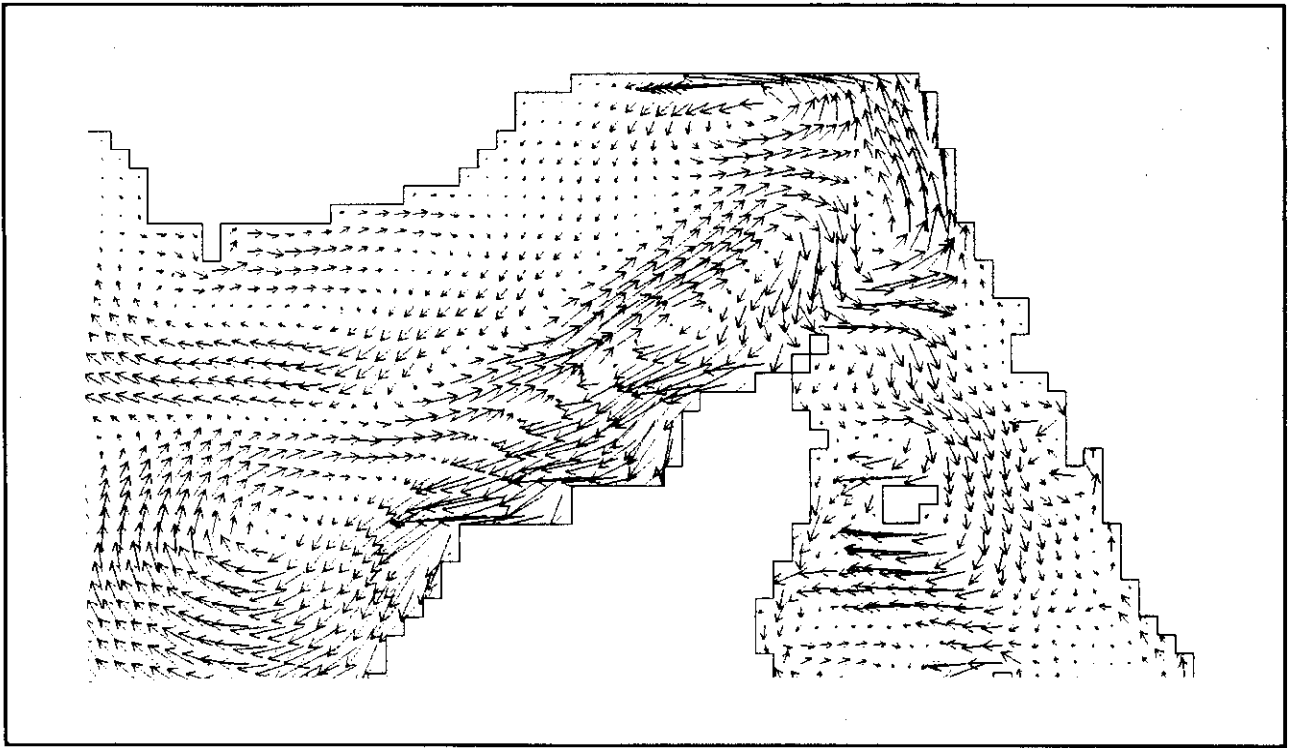
b) Overfladeelevation (m) i Skagerrak og Kattegat.



**Figur 7.3**

a) Hastighedsfordeling i Skagerrak og Kattegat 8 timer efter vinden er skiftet fra vestlig til østlig retning (  $\longrightarrow$  : 0.5 m/s,  $W = 10$  m/s, retning (fra): øst). Hastighedsfordelingen er beregnet v.h.a. den numeriske et-lags model System 21.

b) Overfladeelevation (m) i Skagerrak og Kattegat.

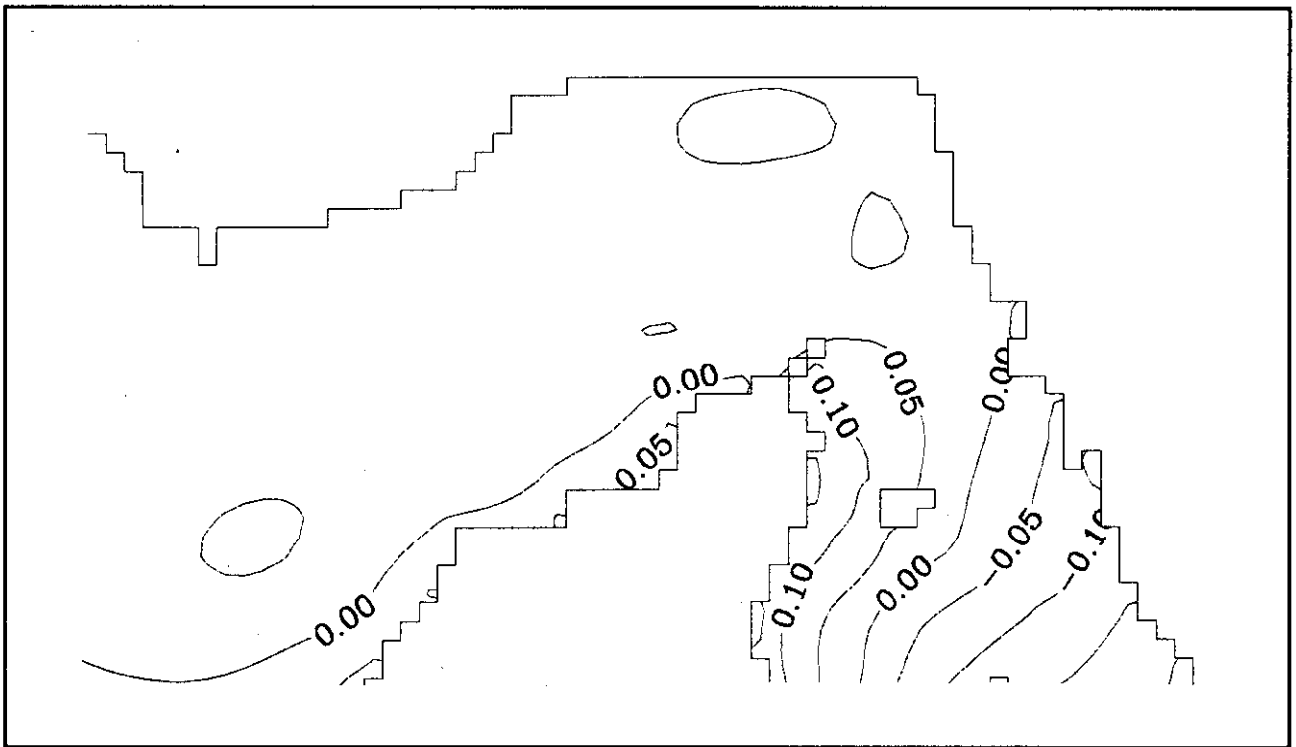
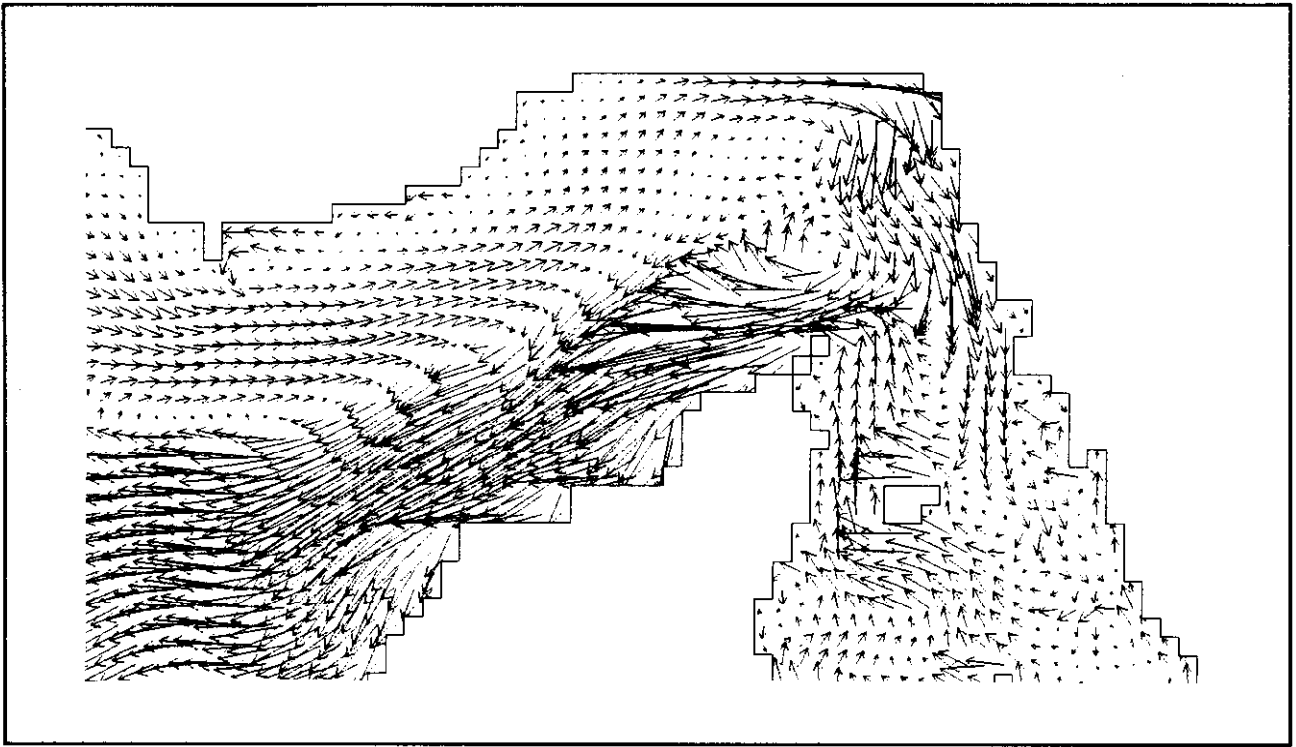


**Figur 7.4**

a) Hastighedsfordeling i Skagerrak og Kattegat 16 timer efter vinden er skiftet fra vestlig til østlig retning (—→ : 0.5 m/s,  $W = 10$  m/s, retning (fra): øst). Hastighedsfordelingen er beregnet v.h.a. den numeriske et-lags model System 21.

b) Overfladeelevation (m) i Skagerrak og Kattegat.





**Figur 7.5**

a) Hastighedsfordeling i Skagerrak og Kattegat 48 timer efter vinden er skiftet fra vestlig til østlig retning (  $\longrightarrow$  : 0.5 m/s,  $W = 10$  m/s, retning (fra): øst). Hastighedsfordelingen er beregnet v.h.a. den numeriske et-lags model System 21.

b) Overfladeelevation (m) i Skagerrak og Kattegat.

## 8. Sammenfatning

### Læsø Rende

Strømmønsteret i overgangsområdet mellem Skagerrak og Kattegat har vist sig at være domineret af store fluxe både syd og nord for frontzonen. Læsø Rende er kendetegnet ved en skiftende strøm, der ofte giver vandføringer i størrelsen  $\pm 100.000 \text{ m}^3/\text{s}$ . De skiftende hastigheder er en konsekvens af 1) den varierende vind, der skaber en opstuvning langs den jyske østkyst og 2) en strøm genereret som en konsekvens af den opadrettede medrivning i Kattegat. Betingelserne, der kontrollerer strømmen i Læsø Rende, tvinger desuden udstrømningen fra Store Bælt til at følge Jyllands kyst op gennem Kattegat.

### Nordsøen som randbet- tingelse

Den fladvandede del af Skagerrak langs den danske kyst er karakteriseret af en cirkulation, der er stærkt afhængig af de meteorologiske forhold. Kapitel 4.2 viste, at indstrømning langs den danske kyst forekommer under sydlige og vestlige vinde, mens nordlige og østlige vinde genererer en udstrømning til Nordsøen. Hvis vestlige vinde dominerer, vil indstrømningen til Skagerrak langs den danske kyst være domineret af vand fra den nordlige Nordsø, mens indstrømningen vil være domineret af vand fra den sydlige Nordsø og Tyske Bugt under sydlige vinde. Det er i forbindelse med diskussionen om indflydelsen af den Jyske Kyststrøm på de marine miljø i Kattegat interessant at bemærke, at vand fra den Jyske Kyststrøm kan findes i Skagerrak efter en periode med sydlige vinde. Størrelsen af ind- og udstrømningen er proportional med vindens hastighed opløftet i anden potens ( $W^2$ ).

### Den Jyske Kyststrøm

På grund af variationen i vinden er det svært at beregne den nøjagtige tid, det tager for den Jyske Kyststrøm at transportere vand fra Tyske Bugt til Skagerrak. Bolding (1991) estimerede middeltransporttiden til ca. 3 måneder, mens specielle perioder med dominerende sydlige vinde kan reducere transporttiden til 1 måned. Transporttiden i Skagerrak under en indstrømningssituation kan ud fra feltmålinger estimeres til 5-10 dage (kap. 6).

### Transporttid

Den relativt lange transporttid fra Tyske Bugt til Skagens Rev betyder, at den store koncentration af næringssalte i Tyske Bugt vandet vil blive forbrugt af phytoplankton, før det når Kattegat, hvis det antages, at der er gunstige forhold for en phytoplanktonproduktion. Som konsekvens heraf må det antages, at den Jyske Kyststrøm primært transporterer organisk materiale ind i Kattegat i forårs- og sommermånederne, mens uorganisk materiale vil dominere i den Jyske Kyststrøm om vinteren.

### Indstrømning til Kattegat

Indstrømningen af vand fra Skagerrak til Kattegat er koncentreret ved Norske Rendens forlængelse (Øst Renden) og ved området i forbindelse med Skagens Rev. Øst Renden er generelt kendetegnet ved en indstrømning af salint vand (Rydberg og Andersson, 1989).

Indstrømningen til Kattegat ved Skagens Rev er afhængig af strømforholdene i Skagerrak og dermed af de meteorologiske forhold. Både tidsserier af hastighedsdata fra Skagens Rev fyrskib og ADCP-målinger (kap. 6) viser, at Skagerrak-vand kun løber ind i Kattegat ved Skagens Rev under sydlige og vestlige vinde. Det er rimeligt at antage, at indstrømningen til Kattegat ved Skagens Rev primært er vand, der har oprindelse i den Jyske Kyststrøm. Perioder, hvor vand fra den Jyske Kyststrøm har mulighed for at være tilstede i Kattegat/Skagerrak overgangsområdet, er også perioder, hvor de meteorologiske forhold skaber en generel indstrømning fra Skagerrak gennem Kattegat til Østersøen. Det må derfor antages, at en væsentlig del af indstrømningen fra Skagerrak til Kattegat i disse perioder har sin oprindelse i Tyske Bugt.

#### Skagerrak-fronten

Skagerrak-fronten består af to frontstrukturer - en kinematisk front og en densitets-front. Den kinematiske front er en konsekvens af strømforholdene i Skagerrak. Fronten, hvis position er relativ stationær, er under østlige og nordlige vinde dannet som konsekvens af en kraftbalance på Skagerrak-siden af fronten mellem Corioliskraften og den barokline trykgradient skabt af skillefladegradienten i front-zonen. Under sydlige og vestlige vinde er den kinematiske front kontrolleret af en kraftbalance mellem Corioliskraften og en barotrop trykgradient skabt af en overfladeelevation i Kattegat. Positionen af densitets-fronten er under østlige og nordlige vinde identisk med positionen af den kinematiske front, mens positionen under sydlige og vestlige vinde ud fra kontinuitetsbetragtninger er i stand til at vandre op til 40 km frem og tilbage i det nordlige Kattegat.

#### Yderligere undersøgelser

Det må understreges, at det på nuværende tidspunkt ikke er muligt præcist at bestemme vandudvekslingen mellem Skagerrak og Kattegat samt størrelsen og variabiliteten af indstrømningen til Kattegat fra den Jyske Kyststrøm. En tilstrækkelig viden til at beskrive disse fænomener kan kun opnås, hvis det eksisterende datamateriale bliver understøttet af en kombination af intensive hydrografiske, biologiske og kemiske feltmålinger fra frontområdet. En yderligere forståelse af Skagerrak-frontens dynamik samt dens variabilitet og indflydelse på vandudvekslingen kan desuden blive fastlagt ved en sådan undersøgelse.

## 9. Litteraturliste

- Aure, J. and Sætre, R., 1980: Wind effects on the Skagerrak outflow, Proceedings from the Norwegian Coastal Current Symposium, Geilo, 9-12 September.
- Backhaus, J.O. and Maier-Reimer, E., 1983: On the circulation patterns in the North Sea. p 63-84. In: North Sea Dynamics, ed. J. Sündermann and W. Lenz, Springer Verlag.
- Bieler, H., Loof, S., Møller, P., Szaron, J. and Thorstensson, B., 1976: Preliminary results of investigations in the Kattegat. 10. Conference of Baltic Oceanographers, Gøteborg.
- Danish Hydraulics, Nr. 9, Februar 1989, Dansk Hydraulisk Institut, Agern Allé 5, 2970 Hørsholm.
- Dietrich, G., 1951: Oberflächenströmungen im Kattegat, im Sund und in der Beltsee. Deut. Hydr. Z., 4, side 129-150.
- Fonselius, S.H., 1987: Kattegat - havet i väster. Sveriges Meteorologiske og Hydrologiske Institut, Oceanografi, nr. 18. SMHI, Oceanographical Laboratory, Gøteborg, Sverige.
- Fonselius, S.H., 1989: Hydrographic variabilities in the Skagerrak surface water. Sveriges Meteorologiske og Hydrologiske Institut, Oceanographical Laboratory, Gøteborg, Sverige.
- Gill, A.E., 1982: Atmosphere-Ocean Dynamics. International Geophysics Series, Vol. 30, Academic Press.
- Goedecke, E., Smed, J. and Tomczak, G., 1967: Monatskarten des Salzgehaltes der Nordsee. Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Erg.-H. Reihe B (4<sup>o</sup>), nr 9.
- Hansen I.E., Ærtebjerg G., Jørgensen L.A. and Pedersen F.B., 1990: Analyse af ilt-sænkningen i Kattegat, Bælthavet og vestlige Østersø. Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 1, Miljøstyrelsen.
- Holligan, P.M., Aarup, T. and Groom, S.B., 1989: The North Sea: Satellite Colour Atlas. Cont. Shelf Res., vol 9, no 8, side 667-765.
- Jacobsen, T.S. and Nielsen, P.B., 1978: Hydrographical observations in Øresund September 1976, Report no. 37, Institut for Fysisk Oceanografi, Københavns Universitet.

- Jacobsen, T.S. and Ottesen Hansen, N.E., 1985: Oxygen depletion in the Kattegat. *Nordic Hydrology* 16.
- Jakobsen, F., 1991: The Bornholm Basin - Estuarine dynamics, Series Paper, vol. 52, Institutet for Strømningsmekanik og Vandbygning, Danmarks Tekniske Højskole.
- Kristensen, K.B., 1991: The Jutland Coastal Current. Series Paper, vol 53, Institutet for Strømningsmekanik og Vandbygning, Danmarks Tekniske Højskole.
- Larsson, A. and Rhode, J., 1979: Hydrographical and chemical observations in the Skagerrak 1975-1977. *Oceanografiska Institutionen, Göteborgs Universitet, Report* 29.
- Ljøen, R., 1980a: On the exchange of deep waters in the Skagerrak basin. *Proceedings from the Norwegian Coastal Current Symposium, Geilo, 9-12 September.* side 340-356.
- Ljøen, R., 1980b: Seasonal variations in inflow of different water masses to the Skagerrak. *Proceedings from the Norwegian Coastal Current Symposium, Geilo, 9-12 September.* side 357-369.
- Mikulski, Z., 1970: Inflow of river water to the Baltic Sea in the period 1951-1960. *Nordic Hydrology*, 4, side 216-227.
- Mikulski, Z., 1986: The Baltic as a system, Ch. 2 in *Water balance of the Baltic Sea*, Ed. Falkenmark M., *Baltic Sea Environment Proceedings No. 16*, side 7-15.
- Miljøstyrelsen 1984: NPO-redegørelsen, Miljøstyrelsen.
- Poulsen O., 1991, The hydrography of Skagerrak and Kattegat - The dynamics of the Skagerrak front, Series Paper, vol. 52, Institutet for Strømningsmekanik og Vandbygning, Danmarks Tekniske Højskole.
- Pedersen, F.B. and Møller, J.S., 1981: The diversion of the river Neva. *Nordic Hydrology*, 12, side 1-20.
- Pedersen, F.B., 1986: *Environmental Hydraulics: Stratified Flows. Lecture notes on Coastal and Estuarine Studies, Vol. 18*, Springer-Verlag, Berlin.
- Pedersen, F.B., 1990: Hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat, *Havforskning fra Miljøstyrelsen, Miljøstyrelsen.*
- Petersen, E.L., Troen, I., Frandsen, S. and Hedegaard, K., 1981: *Windatlas for Denmark. Risø, 4000 Roskilde.*

- Pingree, R.D. and Griffiths, D.K., 1980: Currents driven by a steady uniform wind stress on the shelf sea around the British Isles., *Oceanol. Acta*, 3, 2, side 227-236.
- Rhode, J., 1987: The large scale circulations in the Skagerrak; interpretation of some observations. *Tellus*, 39A, side 245-253.
- Rhode, J., 1989: The large scale mixing and the estuarine circulations in the Skagerrak; Calculations from observations of salinity and velocity fields. *Tellus*, 41A, side 436-446.
- Richardson, K. and Jacobsen, T.S., 1990: Jyllandsstrømmen, Miljøstyrelsen, Havforskningsprogram 90, Rapport nr. C6.
- Rossiter, J.R., 1968: The analysis of tidal streams - Læsø Rende. Institute of Coastal Oceanography and Tides, Internal report, 12, side 1-3.
- Rydberg, L. 1987: Hydrography, nutrient and oxygen balance of the Kattegat and related phenomena. Gøteborg Universitet. (Dissertation).
- Rydberg, L. and Anderson, L., 1989: Measurements of velocities, hydrography and nutrients in the northern Kattegat during 1984-1988: Data report. Oceanografiska Institutionen, Gøteborg Universitet.
- Schrøder, H. 1984: Udviklingen i kvælstofabene fra dansk land brug og konsekvenserne for vandmiljøet. Vandkvalitetsinstituttet, Hørsholm.
- Stigebrandt, A., 1983: A model for the exchange of water and salt between the Baltic and the Skagerrak. *Journ. Phys. Ocean.*, 13, side 411-427.
- Svansson, A., 1975: Physical and chemical oceanography of the Skagerrak and the Kattegat. 1. Open sea conditions, Fishery board of Sweden, Inst. of Marine Res., 1.
- Svansson, A., 1984: Hydrographic features of the Kattegat. *Rapp. P.-v. Reun. Cons. Int. Explor. Mer.*, 185, side 78-90.
- Tomczak, G. and Goedecke, E., 1962: Monatskarten des Temperatur der Nordsee. *Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Erg.-H. Reihe B* (4°), nr 7.
- Thorstensson, B., 1980: Mean values and time development of parameters measured at the GF-section in the northern Kattegat 1975-1977. The Baltic entrance project, Institute of Hydrographic Research, Gothenburg series nr. 7.

Ærtebjerg, G. 1986: Årsager og effekter af eutrofiering i Kattegat og Bælthavet. 22. Nordisk Symposium om Vandforskning, Laugarvatn, Island, Aug. 1986.

REGISTRERINGSBLAD

**Udgiver:** Miljøstyrelsen, Strandgade 29, 1401 København K

**Serietitel, nr.:** Havforskning fra Miljøstyrelsen, 7

**Udgivelsesår:** 1991

**Titel:**

Skagerrak-frontens dynamik

**Undertitel:**

Hydrografien i Skagerrak og Kattegat

**Forfatter(e):**

Poulsen, Ole

**Udførende institution(er):**

Danmarks Tekniske Højskole. Instituttet for Strømningsmekanik og Vandbygning

**Resumé:**

Undersøgelsen viser, at Skagerrak-fronten består af 2 frontstrukturer. Tilførslen af vand fra Nordsøen til Skagerrak, dels fra den forholdsvis rene, nordlige Nordsø, dels fra Tyske bugt, er bestemt som funktion af de meteorologiske forhold. De fysiske forhold, der betinger dannelsen af domene i Skagerrak, er fastlagt med vurdering af biologiske følgevirkninger. De teoretiske overvejelser er underbygget af feltmålinger, der på unik måde illustrerer hydrografien i Skagerrak og det nordlige Kattegat.

**Emneord:**

Skagerrak; Kattegat; Nordsøen; meteorologi; hydrografi; næringsstoffer; modelberegninger

**ISBN:** 87-503-9325-1

**ISSN:**

**Pris (inkl. moms):** 65 kr.

**Format:** A4

**Sideantal:**

**Md./år for redaktionens afslutning:** september 1991

**Oplag:** 600

**Andre oplysninger:**

Rapport fra koordinationsgruppen for stofomsætningen i de frie vandmasser. Bygger på forfatterens Ph.D.-afhandling: "The Hydrography of Skagerrak and Kattegat - The Dynamics of the Skagerrak Front", Series paper, vol. 52 / Instituttet for Strømningsmekanik og Vandbygning, Danmarks Tekniske Højskole, 1991.

**Tryk:** P. J. Schmidt Tryk, Vojens

Trykt på 100% genbrugspapir **cyclus**



## Havforskning fra Miljøstyrelsen

### Rapporter fra Hav-90 forskningsprogrammet:

- Nr. 1: Analyse af ilt-sænkning i Kattegat, Bælthavet og V. Østersø
- Nr. 2: Danmarks vindklima fra 1870 til nutiden
- Nr. 3: Hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat
- Nr. 4: Kystnær omfordeling af sediment og næringssalte
- Nr. 5: Bestemmelse af phytoplanktonets totale stofproduktion
- Nr. 6: Den Jyske Kyststrøm
- Nr. 7: Skagerrak-frontens dynamik

# Skagerrak-frontens dynamik

Undersøgelsen viser, at Skagerrak-fronten består af 2 frontstrukturer. Tilførslen af vand fra Nordsøen til Skagerrak, dels fra den forholdsvis rene, nordlige Nordsø, dels fra Tyske bugt, er bestemt som funktion af de meteorologiske forhold. De fysiske forhold, der betinger dannelsen af domene i Skagerrak, er fastlagt med vurdering af biologiske følger-virkninger. De teoretiske overvejelser er underbygget af feltmålinger, der på unik måde illustrerer hydrografien i Skagerrak og det nordlige Kattegat.



Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

Strandgade 29, 1401 København K, tlf. 31 57 83 10

**Pris kr. 65,- inkl. 22% moms**

ISBN 87-503-9325-1