

Havforskning fra Miljøstyrelsen

nr. 3 1991

Hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat



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. 3 1991

Hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat

Fl. Bo Pedersen
Danmarks Tekniske Højskole

**Miljøministeriet
Miljøstyrelsen**

Om strømmen i Kattegat:

"Erfaring har paa det allerbestemteste godtgjort, at Strømmen i Reglen retter sig efter vinden, dog ei altid efter den som blæser, men ofte efter den som kommer til at blæse, stundom endog efter den som hersker andensteds, om den end ei altid blæser igennem".

Citat: Den Danske Lods
første udgave 1843, side 5.

HYDROGRAFISKE FORHOLD I DET SYDLIGE KATTEGAT

Indholdsfortegnelse

<u>0.</u>	<u>Baggrund</u>	4
<u>1.</u>	<u>Østersøen - De indre Danske Farvande - Nordsøen</u>	7
1.1	Ferskvandstilførslen	7
1.2	Blandingen	9
1.3	De meteorologiske forhold	11
1.4	Tærsklerne ved Drogden og Darss	14
1.5	Saltvandstilførslen	16
<u>2.</u>	<u>Det sydlige Kattegat</u>	23
2.1	Øresunds udstrømning	24
2.2	Store Bælts udstrømning	27
2.3	Sydlige Kattegat - tværsnit	30
	2.3.1 Øresundsjetten	33
	2.3.2 Lækagen fra Øresundsjetten	36
	2.3.3 Intrusioner	36
2.4	Bøjestationen	39
<u>3.</u>	<u>Litteratur</u>	42
	Bilag 1. Togtrapport: 30. maj - 17. juni 1988	45
	Bilag 2. Togtrapport: 24. oktober - 10. nov.1988	59
	Bilag 3. Togtrapport: 28. marts - 14. april 1989	75
	Bilag 4. Togtrapport: 21. august - 11. sept.1989	89
	<u>Registreringsblad</u>	102

0. Baggrund

I forbindelse med bøjeprojektet* opstod der et behov for en mere detaljeret forståelse og beskrivelse af de hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat med henblik på at inddrage hydrografen mest muligt i fortolkningen af de kemiske/biologiske observationer på målestedet.

Dette behov for et bedre kendskab til hydrografen er ikke mindre for det nordlige Kattegat samt for de farvande, som støder op til Kattegat. For disse områder er der startet forskningsaktiviteter, således at det må forventes, at der også for disse centrale områder snart vil foreligge hydrografiske beskrivelser, der er nyttige i bestræbelserne på at beskrive ilt-svindsproblemerne.

Når der er behov for en nyvurdering af vor hydrografiske viden, skyldes det, at man i høj grad behøver at se med biologens øjne på de fysiske hændelser. Dette er sjældent gjort i de eksisterende hydrografiske beskrivelser af de Indre Danske Farvande, hvorfor der i nærværende beskrivelse heller ikke findes mange litteraturhenvisninger til "klassikerne".

Bøjeprojektet

* Projektets formål

- At bestemme den horisontale, tidsmæssige og vertikale variation i fytoplanktonets biomasse, arts- og størrelsessammensætning samt vækstrate.
- At undersøge den horisontale og tidsmæssige variation i vækstrate og produktion af zooplankton.

Rapporten forudsætter et generelt kendskab til de grundlæggende hydrografiske elementer i de Indre Danske Farvande, såsom blanding, lock-exchange, intrusioner, upwelling/downwelling m.m. Alle disse begreber er beskrevet i et kompendium (Bo Pedersen, 1990).



Bøjestationen

Figur 0.1

Overfladetemperaturen fotograferet fra en satellit. De mørke områder er de varmeste. Under en østenvind (20. maj 1985) observeres udstrømning af koldt vand fra Østersøen, samt at Jyllandsstrømmen afbrydes og breder sig ud over Nordsøen.

Den generelle hydrografiske beskrivelse i rapporten bygger på observationer, der er tilgængelige i litteraturen. Derudover er der i rap-

porten benyttet illustrative målinger fra de fire intensive måleperioder på og i nærheden af bøjestationen (se Figur 0.1)

Intensiv periode:	1:	30/5	til	17/6	1988
	2:	24/10	til	10/11	1988
	3:	28/3	til	14/4	1989
	4:	21/8	til	11/9	1989

Togtrapper

Eksemplerne fra de intensive målinger er taget fra de foreløbige rapporter, der blev udarbejdet i tilknytning til hver måleperiode. Disse rapporter (i let revideret udgave) kan fås ved henvendelse til Miljøstyrelsen.

1. Østersøen - De Indre Danske Farvande - Nordsøen

De Indre Danske Farvande (IDF) udgør et fladvandet overgangsområde mellem den lavsaline Østersø og den høj-saline Nordsø. De IDF er derfor i meget høj grad styret af forholdene i randene til Østersøen og Nordsøen (Skagerrak).

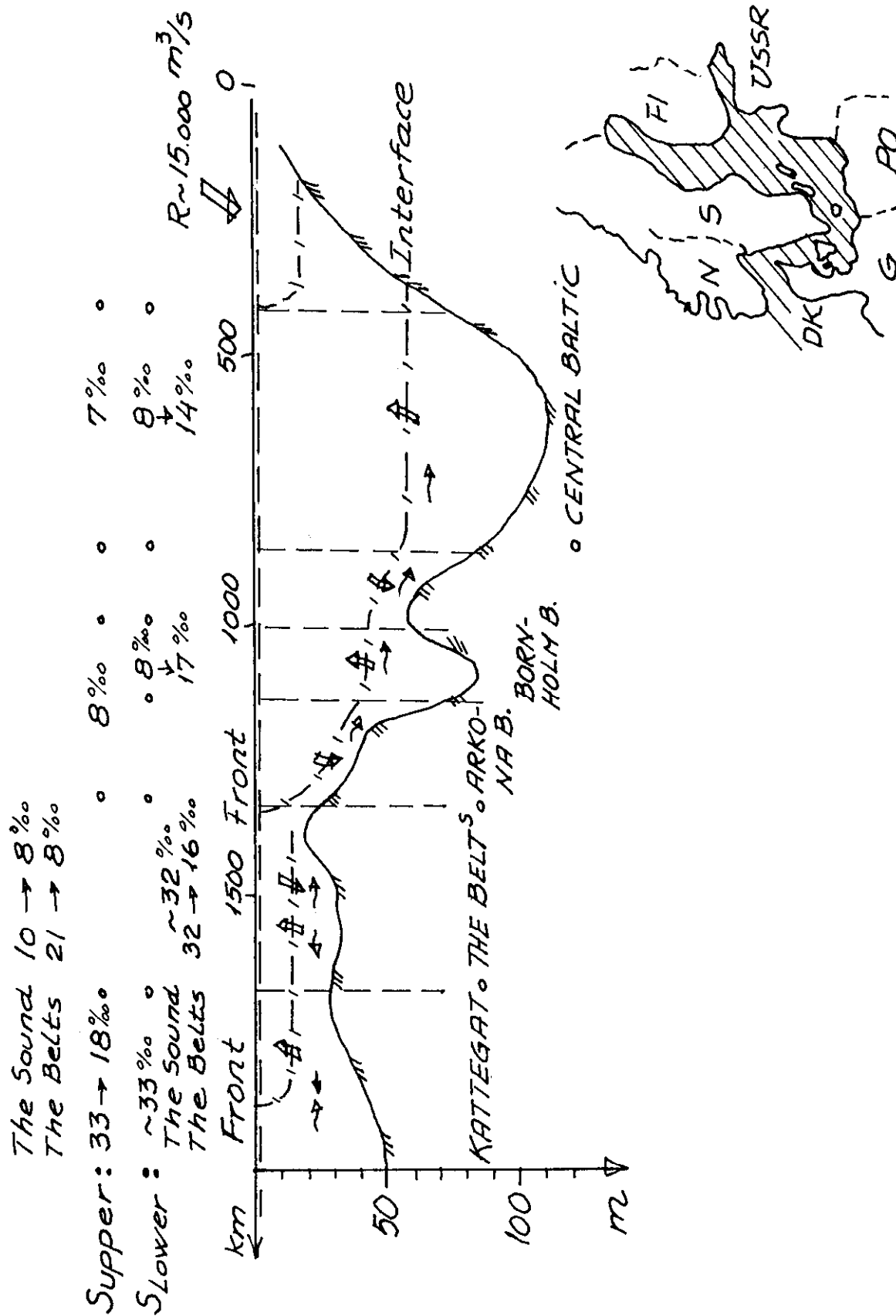
På Figur 1.1 er vist en oversigt og et langs-gående snit i systemet Østersøen - IDF - Nordsøen. De for biologien i det sydlige Kattegat vigtigste hydrografiske forhold er bestemt af 5 faktorer, nemlig

Vigtige hydrografiske forhold

1. En nettoferskvandstilførsel på $R = 15.000 \text{ m}^3/\text{s}$ til Østersøen.
2. En blanding mellem det til Østersøen tilførte ferskvand R (saltholdighed $S = 0$) og det i den nordlige rand tilførte salte bundvand ($S \sim 33\%$).
3. De meteorologiske forhold, som betinger store variationer i ind- og udstrømningen gennem bæltene og Øresund.
4. Tærsklerne ved Drogden ($\sim 8 \text{ m}$; Øresund) og Darss (17 m ; bæltene) som dels udgør en barriere for bundvandets transport ind i Østersøen, dels giver anledning til at ensrette denne transport, når den forekommer.
5. De varierende saltholdigheder i den nordlige rand.

1.1 Ferskvandstilførslen

Set over en længere periode kan der ikke ske nogen opmagasinering af det til Østersøen tilførte ferskvand. Igennem et vilkårligt tværsnit skal der altså i gennemsnit passere $15.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ferskvand, idet forskellen mellem nedbør og fordampning er minimal. Betragter vi f.eks. det nordligste snit, hvor saltholdigheden i det øverste lag er $S_u = 23\text{--}26\%$ (usikkert skøn), finder vi ved brug af Knudsens teorem (Bo Pedersen, 1990), at vandføringen af det udstrømmende vand er



Figur 1.1 Oversigtskort og længdesnit i systemet Østersøen, Indre Danske Farvande, Nordsøen (Skagerrak). (Middel strømminger og saliniteter er vist). Bo Pedersen og Møller [1981]

$$Q_{ud} = R \frac{S_i}{S_i - S_u} = 15.000 \frac{33}{33 - S_u} =$$

$$50 \rightarrow 70 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s}$$

og tilsvarende, at vandføringen ind i det nedre lag er

$$Q_{ind} = Q_{ud} - R = 35 \rightarrow 55 \times 10^3 \text{ m}^3$$

Direkte målinger foretaget af Rydberg og Andersson (1989) i et snit ved Læsø, har givet følgende skøn for bundvandsindstrømningen:

$$Q_{ind} \sim 60 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \text{ i vinterperioden}$$

$$Q_{ind} \sim 30 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{s} \text{ i sommerperioden}$$

Tallene er som sagt ret usikre, men viser dog dels den rigtige størrelsesorden, dels at saltholdigheden i øvre lag (og dermed vandføringen) er større om vinteren end om sommeren. Denne sæsonvariation afspejler sæsonvariationen i meteorologien med kraftigere vinde (og dermed blanding på grund af opadrettet medrivning) i vinterhalvåret.

1.2 Blandingen

Langtidsmidlede saltholdigheder

På længdesnittet (Fig. 1.1) er anført de langtidsmidlede saltholdigheder, man kan observere i det øvre og det nedre lag i systemet. Man bemærker, at der i den centrale Østersø optræder brakvand i overfladelaget, med $S \sim 7-8\%$. Saltbalancen viser, at dette overfladevand må bestå af godt 3 dele ferskvand ($S = 0$) og 1 del saltvand ($S = 33\%$), som altså må være tilført via tærskeloverskyl ved Darss og Drogden. Af det ovenfor beregnede/målte i middel tilførte Nordsøvand på ca $45.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ved den nordlige rand er det altså kun de ca $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ Nordsøvand ($1/3 R$), der passerer tærsklerne sydpå (dog med mindre saltholdighed og større vandføring). Resten - ca $40.000 \text{ m}^3/\text{s}$ - må derfor cirkulere rundt i de IDF.

Ser vi på variationen af saltholdigheden i de IDF, bemærker vi, at specielt Store Bælt udviser meget store langsgående saltgradienter i såvel øvre som i nedre lag, medens den langs-

Kattegat gående saltgradient i Kattegat er langt større i det øvre lag end i det nedre lag. I Kattegat foregår der derfor primært en opadrettet transport gennem haloklinen, forårsaget af vindgenereret medrivning. Den nedadrettede transport, som er styret af strømmingen i det nedre lag, er ret svag omend ikke helt negligibel. I **Store Bælt** er tværsnitsarealet kraftigt indskrænket, således at de deraf affødte store strømhastigheder giver anledning til kraftig turbulensdannelse og dermed en betydelig opadrettet og nedadrettet transport gennem haloklinen. I **Øresund** - som også er meget smal - sker der derimod ikke nogen væsentlig nedadrettet transport, fordi den lavvandede tærskel ved Drogden (ca 8 m) ligger højere end den primære haloklin (ca 15 m) og derfor blokerer for strømmingen i det nedre lag.

Kattegats bidrag til cirkulationen Vi så ovenfor, at ca 40.000 m³/s cirkulerede rundt i de IDF. Kattegats bidrag til denne cirkulation kan vi finde ved at anvende Knudsens teorem på et snit i det sydlige Kattegat, hvor saltholdigheden af det øvre lag kan skønnes til ca $S_u \sim 18\text{‰}$. Vi får derfor

$$Q_u = R \frac{S_i}{S_i - S_u} = 15.000 \frac{33}{33 - 18} = 33.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

og dermed

$$Q_{ind} = Q_u - R = 18.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

Opadrettet transport i Kattegat Differencen mellem indstrømningen af bundvand i den nordlige og i den sydlige rand, altså 45.000 - 18.000 = 27.000 m³/s udgør den opadrettede transport i Kattegat. Vandføringen i Kattegat bliver derfor næsten fordoblet fra syd ($Q_u = 33.000 \text{ m}^3/\text{s}$) til nord ($Q_u = 60.000 \text{ m}^3/\text{s}$) på grund af vindgenereret medrivning.

Cirkulationen og blandingen i bæltene og Øresund er vanskelige at beregne, idet det kræver et skøn over, hvorledes vandet fordeler sig mellem de parallelle løb.

Under en udstrømningssituation bliver vandet fra Arkona Bassinet delt i ca 70% gennem bæltene og ca. 30% gennem Øresund. På grund af den store blanding i Bæltene øges saltholdigheden her fra ca 8‰ til ca 14-20‰, når det strømmer ud i Kattegat. Den lave grænse på 14‰ opnås efter en langvarig udstrømningssituation, medens den høje grænse på 20‰ kan observeres

ved kortvarige udstrømninger. I modsætning her-
til sker der kun en meget svag blanding i Øre-
sund, således at saltholdigheden her typisk er
10%, når vandet løber ud i Kattegat. Under ud-
strømning vil man derfor typisk kunne finde 3
forskellige vandmasser i Kattegats øvre lag,
nemlig

3 vandmasser i Kattegats øvre lag	10%	vand i øst - fra Øresund
	14 - 20%	vand i vest - fra bælte- terne
	18%	vand i den centrale del af Kattegat

hvor dette centrale 18% vand udgør den endelige
blanding af det udstrømmende vand og bundvan-
det, der er medrevet på grund af vinden.

Hvis vi sammenligner det udstrømmende vand med
det modtagende 18% vand, så vil Øresunds bidrag
have en væsentlig større afvigelse i saltind-
hold end bælternes bidrag, således at der ud
fra et stabilitets synspunkt (over for vindge-
nereret blanding) må tillægges Øresund mere
betydning end de 30%, som vandføringen indi-
kerer.

1.3 De meteorologiske forhold

De meteorologiske forhold over Østersøområdet
er kendetegnet ved en forholdsvis regelmæssig
passage af lavtryk og højtryk over Skandinavi-
en, se Fig. 1.2.

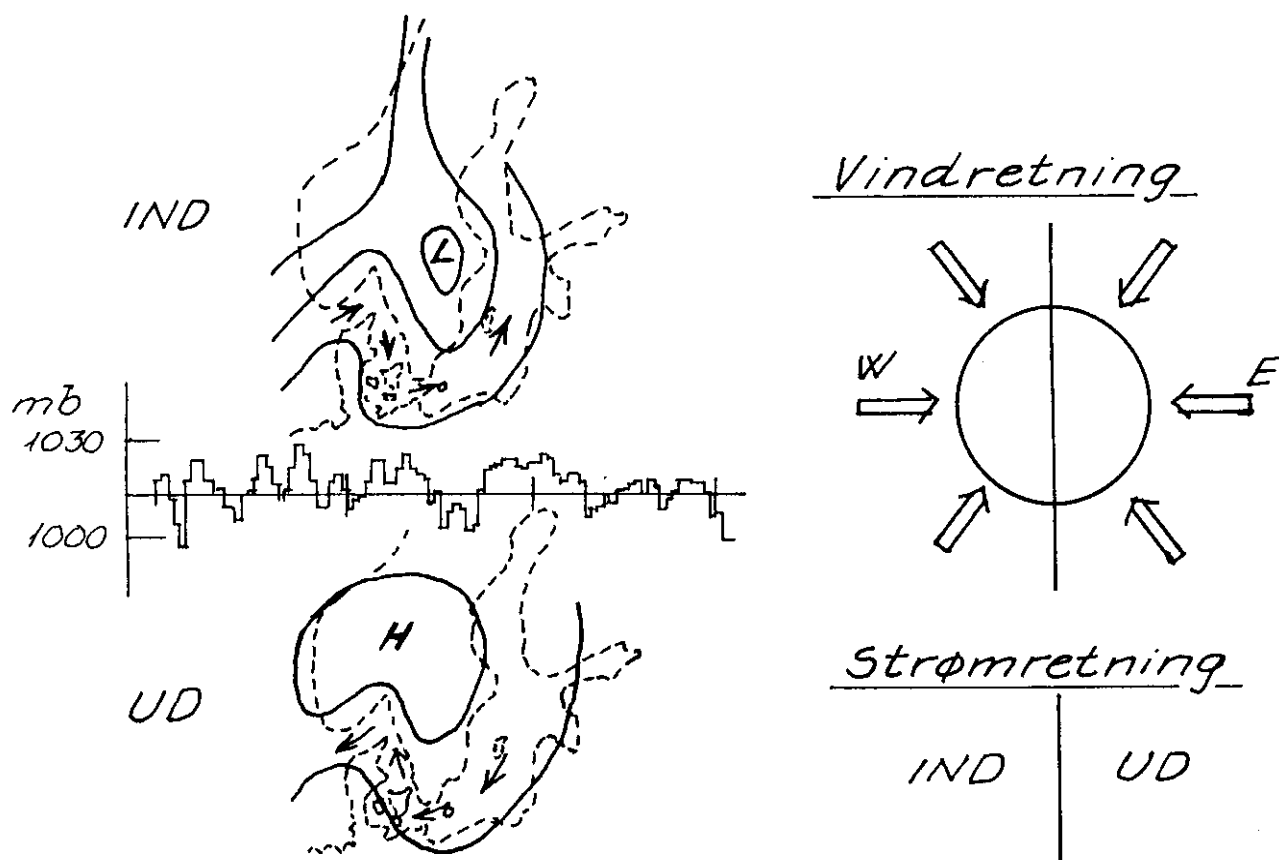
Lavtryk over
Skandinavien

Højtryk over
Skandinavien

Periodisk ud/ind
strømning gennem
Store Bælt

Et lavtryk over Skandinavien betyder vestli-
ge vinde, som dels giver opstuvning i Skager-
rak, dels en vandspejlssænkning i den vestlige
Østersø, altså en vandspejlshældning fra N til
S, hvilket genererer en barotrop strømning ind
i Østersøen. Strømningsmodstanden - og dermed
vandspejlshældningen - vil være størst gennem
de lavvandede snævre passager, hvor de største
hastigheder optræder, altså Bælterne og Øre-
sund. Ved højtryk over Skandinavien får vi til-
svarende østlige vinde, der skaber højvande i
den vestlige Østersø og lavvande i Skagerrak og
dermed en udstrømningssituation, igen med det
største vandspejlsfald gennem Bælthavet og
Øresund. Den periodiske ind/udstrømning gennem
Store Bælt og den dertil hørende vandspejlsfor-
skel mellem Gedser og Hornbæk kan vi f.eks.
illustrere for en 3 måneders periode i 1976,
hvor vi takket være Bæltprojektet (Miljøstyrel-
sen, 1980) har kendskab til vandføringerne (Fi-

gur 1.3). Vi bemærker, at der er en stor korrelation mellem vandføringerne og vandspejlsdifferencerne, hvilket betyder, at Store Bælt i store træk opfører sig som en almindelig kanalstrømning (barotrop strømning). En nøjere beregning ud fra kendskab til de geometriske forhold i denne "kanal" viser da også, at hvis man sammenlægger friktionstabene fra bund- og skilleflade med de enkelttab, der forekommer ved bratte areal-variationer, så får man god overensstemmelse mellem teori og målinger.



Figur 1.2

Lavtryk over Skandinavien giver W-vinde og indstrømning.

Højtryk over Skandinavien giver E-vinde og udstrømning.

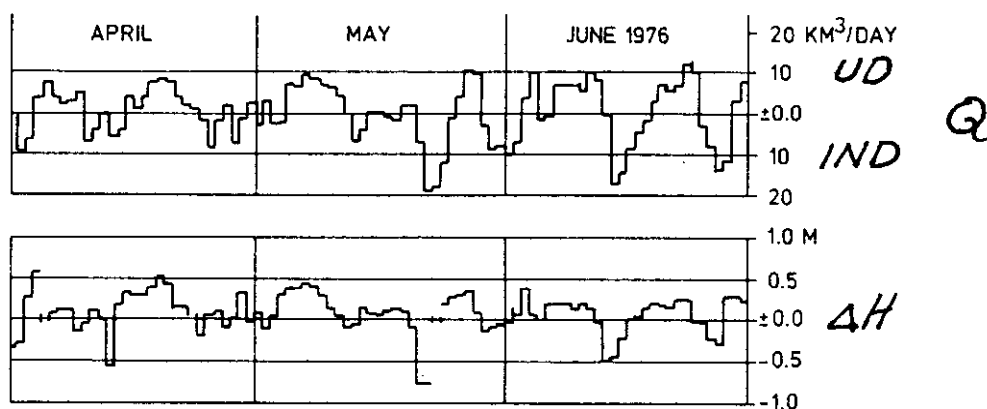
Miljøstyrelsen [1976], DMI [1976]

Nettovandføring

Det næste forhold, der skal bemærkes, er, at nettovandføringen over en længere periode er meget lille i forhold til de dagligt observerede vandføringer. Nettotransporten ud gennem Store Bælt (og Lille Bælt) udgør ca. 70% af ferskvandstilførslen til Østersøen (d.v.s. ca. $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$), medens en typisk ud/indstrømning er af størrelsesordenen $80.000 \text{ m}^3/\text{s}$. Dette forhold har stor betydning for blandingen i Store Bælt, for bundvandsfornyelsen i de dybe bassiner inde i Østersøen, samt for de hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat.

Nettovandføringen betydning

Betydningen for blandingen blev omtalt ovenfor i afsnit 1.2. Betydningen for bundvandsfornyelsen i de dybe bassiner i Østersøen bliver behandlet nedenfor, afsnit 1.4. Betydningen for hydrografien i det sydlige Kattegat bliver behandlet nedenfor i kapitel 2.



$$\Delta H \sim K Q^2$$

$$Q_{\text{netto, SB}} \sim 0.7 \text{ km}^3/\text{dag}$$

$$Q_{\text{ud/ind}} \sim 7.0 \text{ km}^3/\text{dag}$$

Figur 1.3

- a) Målt vandføring gennem Store Bælt
- b) Observeret vandstandsfor-skel mellem Ged-ser og Hornbæk. Data fra Bæltprojektet, Miljøstyrelsen [1980].

1.4 Tærsklerne ved Drogden og Darss

Blokering af strøm	Et længdesnit gennem Østersøen (figur 1.1) viser de typiske karakteristika for en fjord, nemlig et system af bassiner adskilt af tærskler. For det første blokerer tærsklerne for en fri udveksling mellem havets og fjordens dybeliggende vandmasser. For det andet virker tærsklerne som ensretterventiler for det tungere vand, der passerer dem under indstrømningssituationer. Denne ensrettereffekt er særlig markant ved Darss-tærsklen i Store Bælt og Drogdentærsklen i Øresund. Mekanismen kan vi først illustrere for Darss-tærsklen:
Ensretning af strøm	
Darss-tærsklen	
Langsgående salt variationer	De kraftige strømninger og deraf affødte blandinger i Bælthavet resulterer i, at saltholdigheden har store langsgående variationer, i gennemsnit fra ca. 8‰ til ca 14-20‰ i overfladelaget (se afsnit 1.2) og fra 16-17‰ til 33‰ i bundlaget, begge voksende fra Darss til Kattegat. Når vandet strømmer ind i Østersøen, vil saltholdigheden ved Darss være stadig stigende på grund af den langsgående saltgradient, og da det salte vand er tungere end det vand, det møder i Arkonabassinet, vil det søge mod bunden og fortsætte som en tung bundstrøm mod Bornholmbassinet (se Figur 1.4). Observationer ved Bornholm viser tydeligt eksistensen af denne bundstrøm - forøvrigt kraftigt påvirket af Corioliskraften.
Drogden-tærsklen	Ved Drogden-tærsklen er det indstrømmende overfladevand fra Øresund kun ca. 10%. Til gengæld er dette 10% vand-volumen i Øresunds overfladelag så ringe, at det efter 1 á 2 døgns normal indstrømning er tømt, således at det efterfølgende indstrømmende vand er Kattegats overfladevand, der har en saltholdighed på 18‰ og op- Regner vi - som et størrelsesorden skøn - at saltholdigheden af det indstrømmende vand i gennemsnit for såvel Øresund som Bælterne er ca. 18‰, giver saltbalancen for Østersøen, at der over tærsklerne skal strømme en middelvandføring på Q_{ind} bestemt af saltbalancen, dvs:
Middelvandføring ind via tærskler	

$$Q_{ind} \cdot 18[0/00] = Q_{ud} \cdot 8[0/00]$$

og

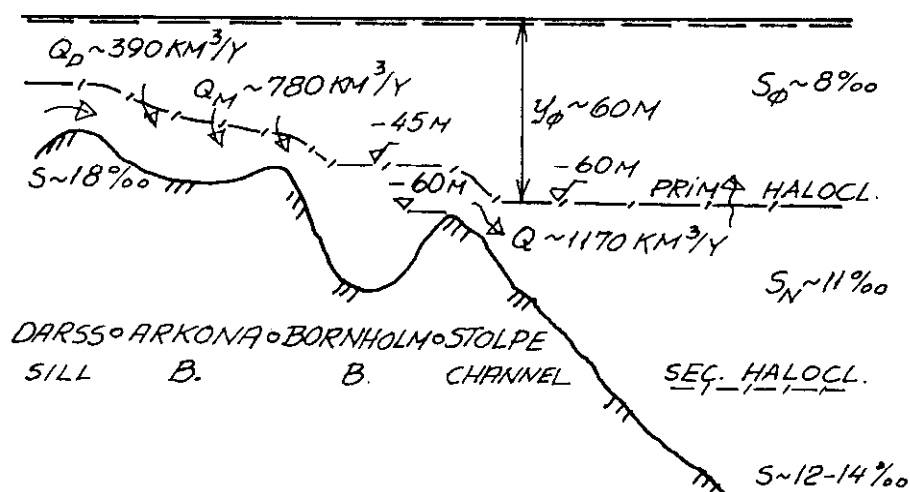
$$Q_{ud} = Q_{ind} + R$$

hvoraf

$$Q_{ud} \sim 27.000 \text{ m}^3/\text{s} \quad Q_{ind} \sim 12.000 \text{ m}^3/\text{s}$$

Typisk indstrømningsvandføring

Da indstrømningssituationen imidlertid kun forekommer i ca halvdelen af tiden (se Figur 1.3) er en typisk indstrømningsvandføring altså nærmere det dobbelte, d.v.s. ca $24.000 \text{ m}^3/\text{s}$ i de perioder, den forekommer. Disse $24.000 \text{ m}^3/\text{s}$ startede i den nordlige rand som ca. $5.000 \text{ m}^3/\text{s}$ jævn indstrømning af højsalint Skagerrakvand (afsnit 1.1).

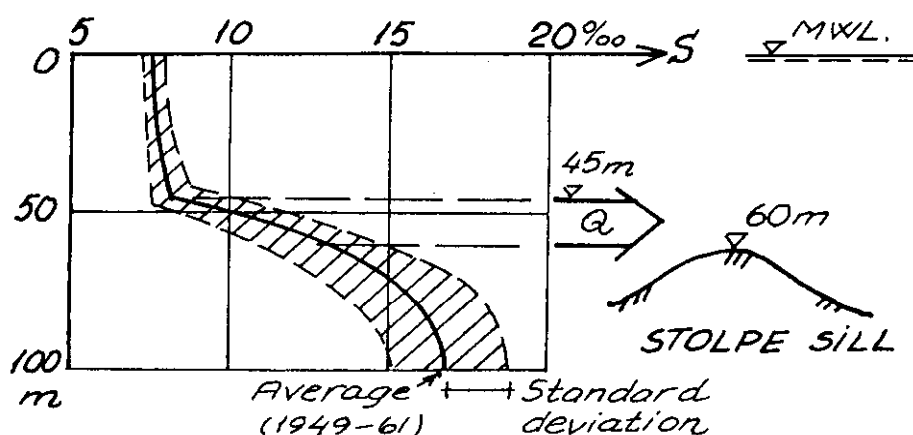


Figur 1.4

"Luftningen" af Østersøens bundvand øges gennem medrivning af det overliggende vand i de tunge bundstrømme i Arkona Bassinet og i Stolpe kanalen. Udløbet fra Bornholms Bassin er bestemt af tærsklen i Stolpe renden (60 m).

Opholdstider i Østersøen

Efter en opholdstid på nogle måneder i Bornholmerbassinet vil det omtalte vand fra tærskeloverskyllene passere den næste tærskel ind til den centrale Østersø, hvor det får lov til at opholde sig i 10-30 år, før det genser Store Bælt. Den faldende saltholdighed undervejs er et resultat af, at de tunge bundstrømme river væske med sig fra det lettere omgivende vand. Dermed øges mængden af det vand, der "lufter" Østersøens dybere beliggende vandmasser. For at lukke vandets kredsløb kræves der en opadrettet transport gennem Østersøens haloklin. Den primære energikilde til denne envejs medrivning er vinden.



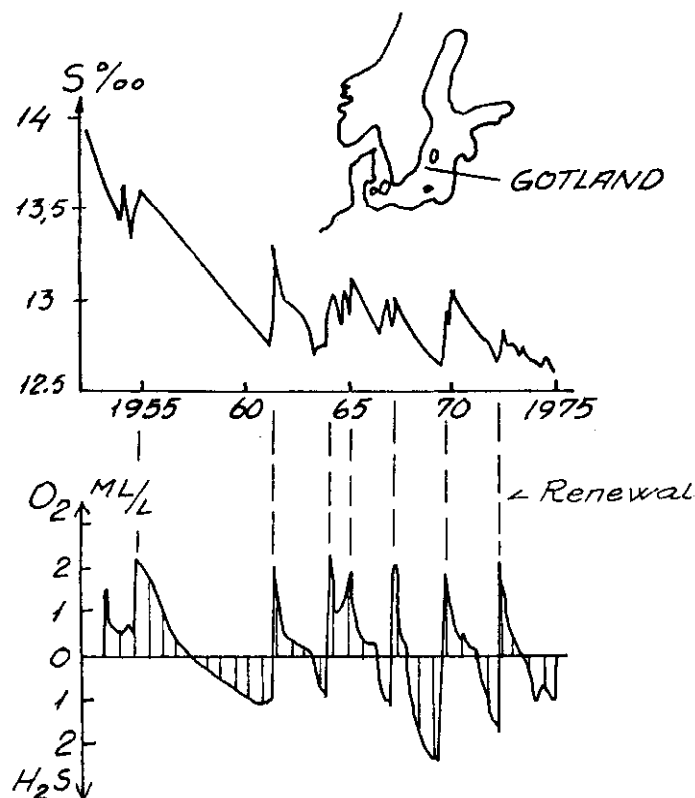
SALINITY distribution in the BORNHOLM BASIN

Figur 1.5

Normalt strømmer vandet i niveauet fra 45 til 60 meters dybde (intrusion). Ved store indstrømninger af saltvand sker indstrømningen dybere (dybere intrusion). Bo Pedersen [1977]

Bornholmer- bassinet

Hvis vi vender tilbage til Bornholmerbassinet (se Figur 1.5), bemærker vi, at der er en markant større saltholdighed helt nede ved bunden i sammenligning med den saltholdighed, vi finder i det gennemstrømmende vand (intrusionen mellem kote -45 m og -60 m). For at forny dette næsten stillestående meget tunge bundvand kræves der en indstrømning af meget salt vand, som kan løfte det gamle vand op i gennemstrømningsområdet.



The GOTLAND DEEP (below 200 m)

Figur 1.6

Bundvandsfornyelser i Østersøen med iltholdigt vand får midlertidigt svovlbrinten til at forsvinde. Fonselius [1975]

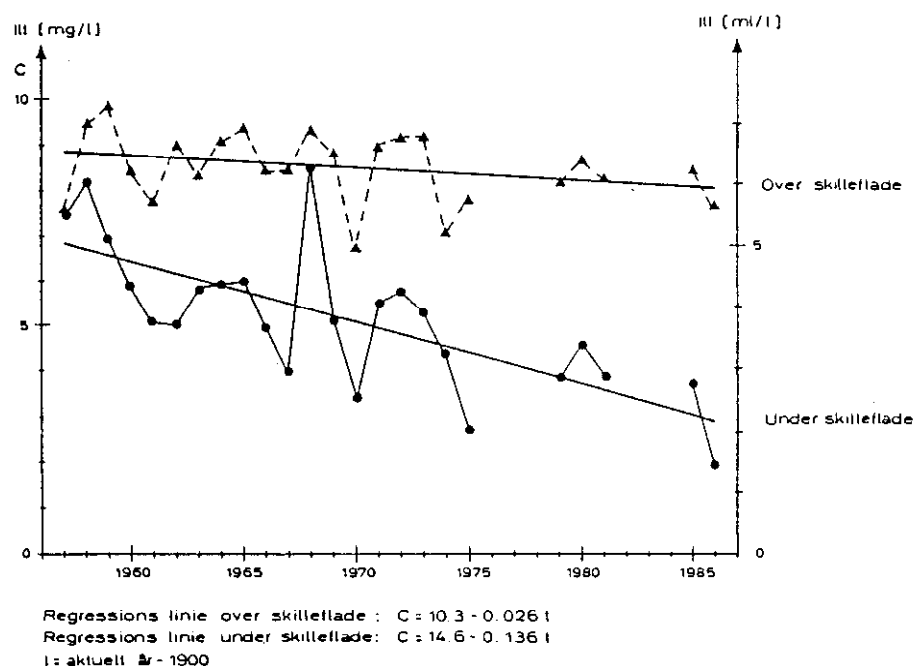
Gotlandsbassinet

Sådanne saltvandsindbrud forekommer med års mellemrum, som illustreret for Gotlandsbassinet (Figur 1.6), hvor vi kan se, at de medfører en brat stigning i saltholdigheden og samtidigt en brat øgning af vandets iltindhold. Man bemærker imidlertid også, at der er tale om en stakket glæde, hvilket har sin forklaring i, at den nye ilt forbruges til bakteriologisk nedbrydning af dødt plankton m.m. Stagnationsperioder med svovlbrinte i bundvandet har eksisteret gennem flere århundreder i Østersøen.

Stakket glæde

Iltsvind rykket nordpå

Det beklagelige er, at de områder, hvor iltsvind forekommer, er rykket længere udad i systemet, således at vi nu også mærker iltsvindet i Kieler bugten (se Figur 1.7), Bælthavet og i 1980'erne selv i Kattegat. Disse iltsvind og medfølgende fiskedød er hovedårsagen til den store offentlige interesse, der er for alle indgreb i naturen, der kan give anledning til forandring af forholdene, inklusive en reduktion af de for planktonproduktionen nødvendige næringssalte til de Indre Danske Farvande.



Figur 1.7

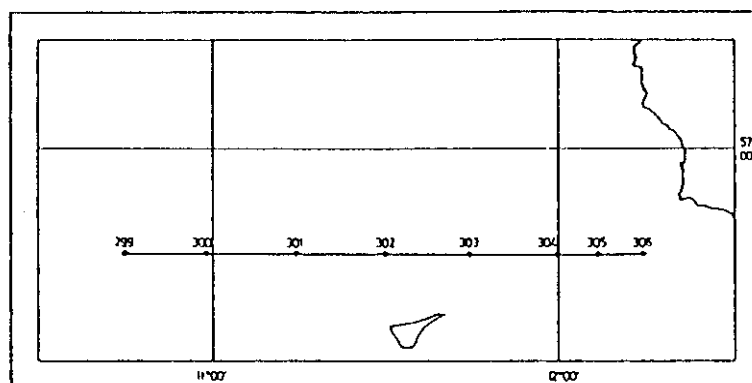
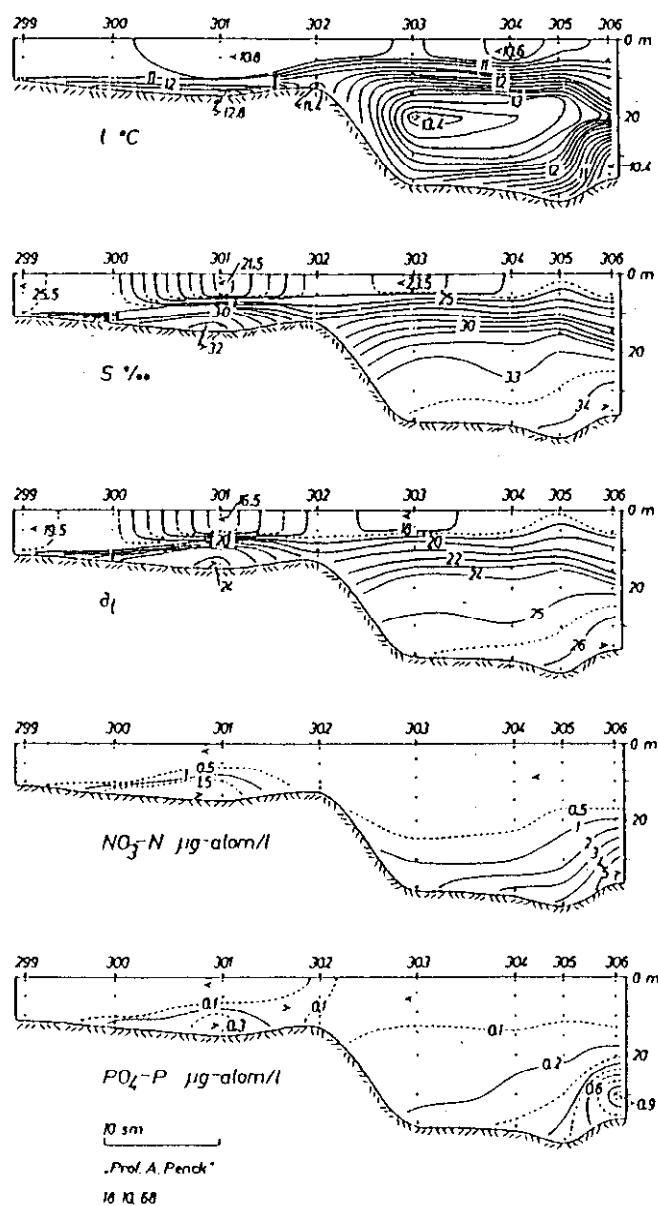
Udviklingen af iltforholdene i Kieler Bugt viser en klar faldende tendens mod kritiske forhold. DHI, ISVA, DMU, [1990]

1.5 Saltvandstilførslen

Nordlige rand

De hydrografiske forhold i den nordlige rand er dårligt belyst. Nogle generelle træk kan vi imidlertid godt uddrage ved at se på forholdene i et tværsnit af Kattegat lagt lidt nord for Anholt. Her har vi f.eks. en måling foretaget med det østtyske forskningsskib "Prof. A. Penck", 18.10.1968, Frank et al. [1972], se Fig. 1.8.

Af fordelingen af saltholdigheden fremgår det, at såvel Øresundudstrømningen som Store Bælt - udstrømningen kan genfindes som to adskilte områder i overfladen med en målelig formindsket saltholdighed. Det generelle billede fra den sydligere del af Kattegat (se nedenfor) genfindes her nord for Anholt, men det siger sig selv, at fronterne er mere udviskede jo længere nordpå vi kommer. En anden ting man bemærker er, at Øresund-udstrømningen på måletidspunktet har forladt den svenske kyst, hvilket, som vi skal se nedenfor, er et tegn på, at der i tiden forud for målingen har været en indstrømning.

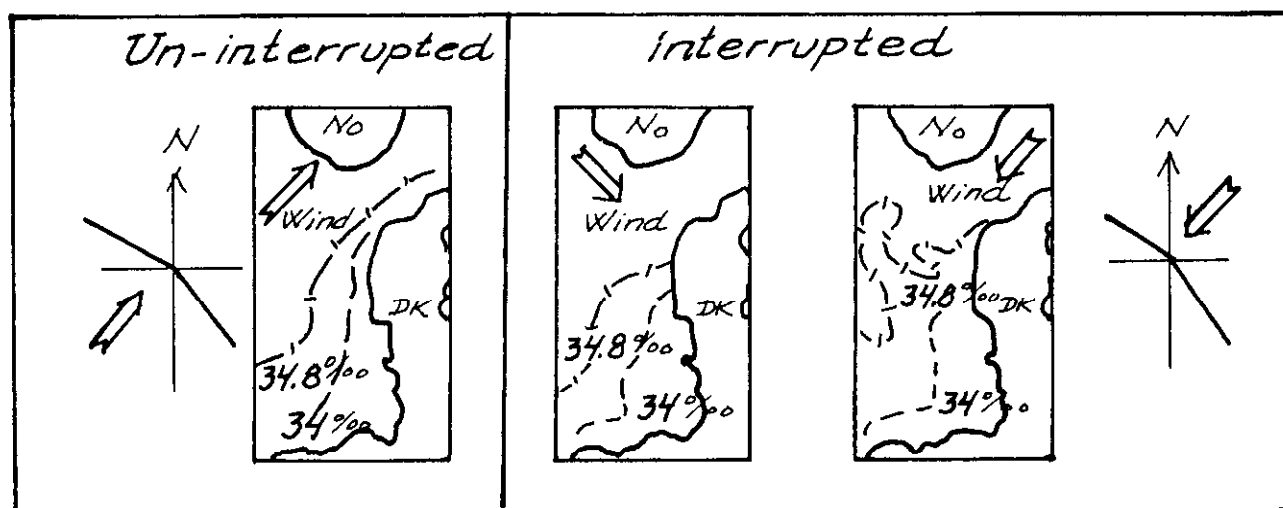


„Prof. A. Penck“ 18.10.1968

Figur 1.8
Hydrografiske forhold i et snit nord for An-
holt. Franck et al. [1972]

Temperatur- intrusion

Af fordelingen af temperaturen kan vi aflæse en information mere om de hydrografiske forhold i snittet, nemlig at vandet i en central del af springlaget har et temperaturmaksimum, hvilket betyder, at det ikke er skabt ved blanding mellem overfladevandet og bundvandet det pågældende sted. Oprindelsen af denne store linse af vand med en tæthed, der ligger mellem det tungeste vand ved bunden og det letteste vand ved overfladen skal søges helt oppe nordpå ved Kattegat - Skagerrak fronten. Heroppe befinder der sig i de øverste vandlag enten Nordsøvand uden andet indblandet vand (~ 35‰) eller Nordsøvand indblandet vand der er lasket fra den Baltiske Strøm (Skagerraks øverste vandlag 25-34‰) eller Nordsøvand blandet med ferskvand fra kontinentet båret herop af Den Jyske Kyststrøm (30-34‰). I den forbindelse skal man erindre sig, at Den Jyske Kyststrøm kun eksisterer ved Skagen, når vinden kommer fra en sektor W N W over W til SE (Figur 1.9) se Bo Pedersen et al [1988]. Da Nordsøvand med indblandet fersk- eller brakvand er lettere end ublandet Nordsøvand, vil dette blandede vand ved intrusion trænge ind i Kattegat på det niveau, som passer til saltholdigheden, d.v.s. omkring den primære haloklin, som det ses af figur 1.8. Denne intrusion af vand fra Den Jyske Kyststrøm må derfor forventes at finde sted, når vinden i længere tid har ligget i sektoren fra W N W over W til SE.



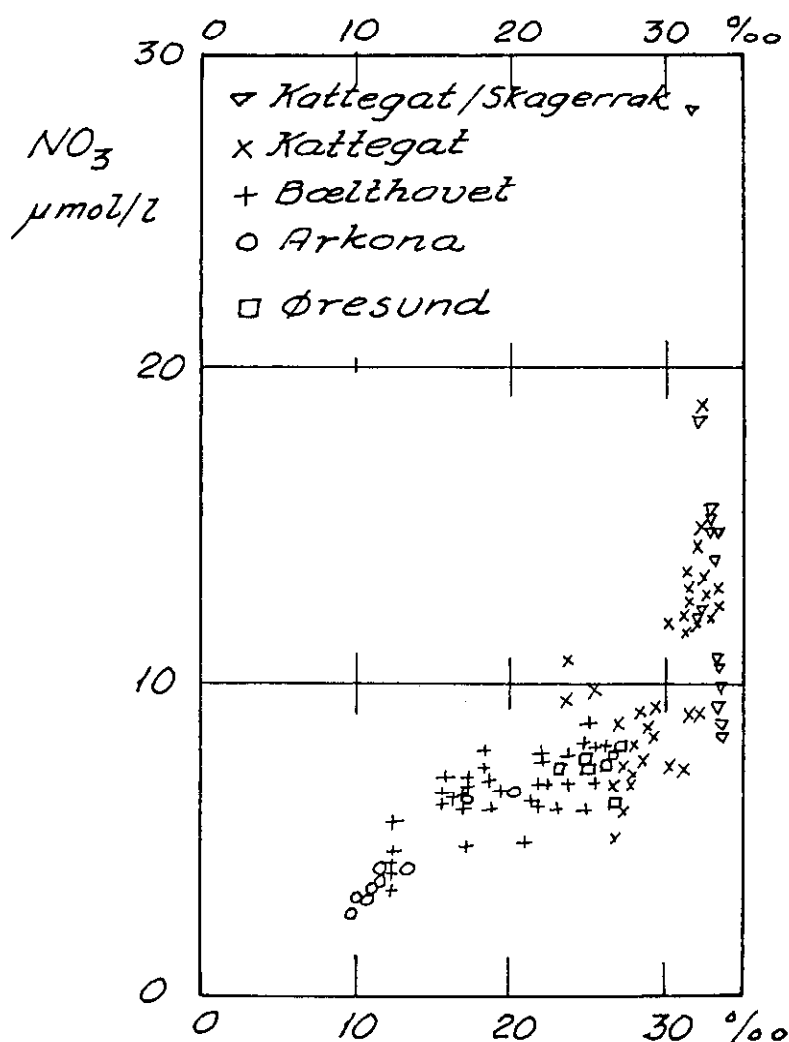
Figur 1.9

Illustration af den Jyske Kyststrøms position ved forskellige vindretninger af længere varighed. Kun i den uafbrudte situation vil Jysk Kyststrøms vand trænge ind i Kattegat.

Næringssalt- intrusion

En tilsvarende stærk kemisk indikation for indtrængning af Jysk Kyststrømsvand i Kattegat kan illustreres ved NO_3 målingerne foretaget på togt 70, febr. 1989 af DMU, se Figur 1.10. Indstrømmende vand fra Østersøen har en NO_3 koncentration på 3 á 4 $\mu\text{mol/l}$ (Arkona), mens der i den nordlige rand observeres NO_3 koncentrationer på op til 28 $\mu\text{mol/l}$.

Man skal bemærke, at det mest salte vand fra Nordsøen (Skagerrak) "kun" har en NO_3 koncentration på ca 10 $\mu\text{mol/l}$. Det højkoncentrerede vand med en saltholdighed lidt lavere end Nordsøvandet kan kun skyldes tilstedeværelsen af Jysk Kyststrømsvand i målingerne.



Figur 1.10

Målinger af NO_3 i de Indre Danske Farvande i februar 1989. (Togt 70, DMU, Gunni Ærtebjerg).

Salt-intrusion

Den Jyske kyststrøm

Da intrusioner optræder overalt, hvor vand med forskellig tæthed mødes, må man forvente en meget dynamisk ud/ind strømning i Kattegat/Skagerrak snittet dikteret af de meget varierende saltforhold i Skagerrak. Da de største saltvariationer foregår i intervallet 30-34‰ er det altså specielt i nærheden af den primære haloklin (og dybere), at den store barokline udveksling finder sted. Disse forhold er som nævnt imidlertid meget dårligt belyst. Endelig skal man erindre sig, at næringssaltindholdet af vandet i Den Jyske Kyststrøm er stærkt påvirket af den biologiske aktivitet i strømmen langs hele Jyllands vestkyst.

2. Det sydlige Kattegat



Fig. 2.1

Satellitbillede med IR-kamera over Kattegat, 25-05-1987. Fra SMHI Oceanografi nr. 18, 1987.

Middelforhold:
groft overordnet
billede

Det fremgik klart af den generelle hydrografiske beskrivelse i afsnit 1, at middelforholdene i det sydlige Kattegat kun tegner et meget groft overordnet billede, idet de varierende ud/ind strømninger i Øresund og Bælthavet er en størrelsesorden større end den udadrettede middelstrømning. Yderligere er forholdene i det sydlige Kattegat kompliceret af, at

de vandmasser, der skabes, er dannet af bidrag fra to i hydrografisk henseende vidt forskellige tilstrømninger, nemlig det stærkt blandede (dvs. salte) Bælthavsvand og det svagt blandede (dvs. brakke) Øresundsvand. Strømningen og blandingen i Kattegat af disse to vandmasser foregår i hovedprincippet efter følgende mønstre:

Udstrømning Øresund

Under udstrømning vil Øresundsvandet holde sig langs den svenske kyst som en smal kystjet, medens Bælthavsvandet primært holder sig i den vestlige del af Kattegat, dog med en kraftig tendens til at søge østover på grund af Corioliskraften og tæthedsforskellen. En udstrømningssituation er illustreret ved satellitbilledet fra den 25. maj 1987, Figur 2.1, hvor den lyse farve indikerer koldt udstrømmende vand, og den mørke farvetone viser det varmere modtagende overfladevand i Kattegat.

Indstrømning Øresund

Når strømmen skifter til indadgående, vender Corioliskraften, således at det lette overfladevand nu søger vestover godt hjulpet af tæthedsforskellen (lock-exchange). Det lette vand spreder sig i denne situation som et tyndt låg ud over Kattegat, og først når vindens blandede effekt har virket nogle døgn, er der sket en opblanding mellem det tidligere udstrømmende lette vand og Kattegats overfladevand, således at de øverste 10-15 meter i Kattegat bliver næsten homogent.

Vi skal i det følgende give en mere detaljeret beskrivelse af disse situationer.

Udstrømning Øresund

2.1 Øresunds udstrømning

Satellitbillede: Kystjet

Det mest slående i billedet, Figur 2.1, er det udstrømmende vand fra Øresund, der på grund af Corioliskraften klæber til den svenske kyst. Endvidere bemærker man af farvetonen, at vandet ikke blander sig ret meget med det omgivende vand, men bibeholder sin identitet langt op i Kattegat.

Medrivning

Man kan dog fornemme en svag gråtoning i strømmens retning af selve kyststrømmen, hvilket indikerer, at der undervejs sker en medrivning af varmere vand, dvs at kyststrømmens saltholdighed stiger i strømretningen, hvilket formindsker dens stabilitet over for blanding med det omgivende vand og dermed dens overlevelsese-

Kyststrøm sejlivet

evne, efterhånden som den kommer nordpå. Imidlertid er kyststrømmen ret sejlivet, hvilket vi så et eksempel på i Figur 1.8, der viste såvel Store Bælts som Øresunds udstrømmende (kolde og brakke) vand i et snit nord for Anholt.

Lækage fra kyststrøm

Man kan også fornemme en gråtoning af det modtagende Kattegatvand langs med kyststrømmen, hvilket indikerer, at der sker en lækage af vand fra den lette kyststrøm til overfladelaget i Kattegat. Strukturen i farvemønstret uden for kyststrømmen viser tydeligt, at der forekommer afsnøring af cykloniske hvirvler (mod uret), som på grund af deres indhold af let Østersøvand vil sprede sig som en tyngdedreven "lock-exchange" i det omgivende Kattegatvand. Med tiden vil spredningen og vindens opblandende effekt udviske disse afsnøringers identitet, og det afsnørede vand vil indgå som en del af det øvre lag i Kattegat. Selv om denne lækage tilsyneladende er beskeden, skal vi nedenfor se (afsnit 2.3 Sydlige Kattegat - tværsnit), at den spiller en markant rolle for hele Kattegats hydrografi, specielt med henblik på de biologiske forhold.

Langsgående salt- variationer ved udstrømning

Vi har ingen feltmålinger for den udstrømnings-situation, der er vist på Figur 2.1. For at illustrere saltfordelingen i Øresunds og Kattegats overfladelag under en langvarig udstrømning, er der på Figur 2.2 vist de observerede overfladesaltholdigheder ved fyrskibene Drogden, Lappegrunden, Kattegat S, Anholt N og Læsø N under en anden udstrømningssituation nemlig i marts/april 1967 (Nautisk - Meteorologisk Årbog, 1967).

Drogden

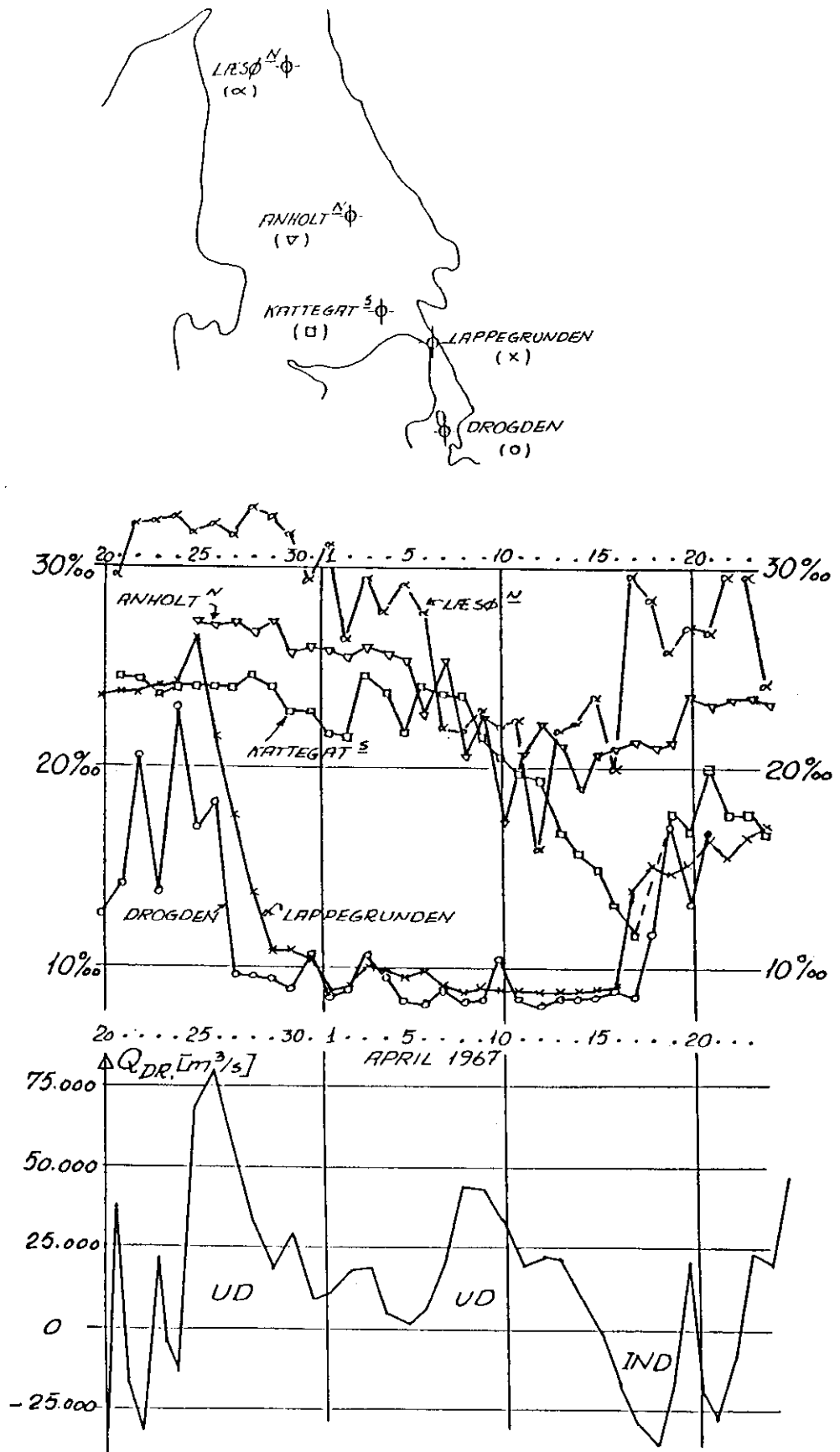
Drogden:

Indtil den 27. marts observeres der meget varierende saltholdigheder mellem 12 og 23‰, i takt med kortvarige udstrømninger (faldende S) og indstrømninger (stigende S). Fra den 27. marts og frem til og med den 17. april ligger saltholdigheden meget konstant på 8-10‰, svarende til, at der på Drogden tærsklen befinder sig udstrømmende Østersøvand. Derefter vender strømmen, og i løbet af et par døgn mærkes det mere salte overfladevand fra Kattegat.

Lappegrunden

Lappegrunden:

Lappegrunden fyrskib er beliggende inde i Øresund. Fronten af det brakke udstrømmende Østersøvand ses at passere Lappegrunden 1 til 2 døgn efter passagen af Drogden. Den meget lille



Figur 2.2
Saltholdighedsvariation i hovedstrømretningen - Øresund.

blanding i Øresund fremgår tydeligt af, at saltholdigheden på Lappegrunden og Drogden ikke afviger markant fra hinanden under udstrømningen. I forbindelse med strømskiftet midt i april måned ses der igen en faseforskydning på 1 a 2 døgn mellem front passagen ved Lappegrunden og Drogden, nu blot med det forsinkede signal ved Drogden.

Kattegat S

Kattegat S:

På trods af den ringe afstand mellem Lappegrunden og Kattegat S er det åbenlyst fra observationerne her, at den udstrømmende Øresundsjet har en bredde, som er mindre end afstanden fra den svenske kyst til Kattegat S fyrskib. Man bemærker dog en svagt faldende saltholdighed med tiden, der, som vi skal se nedenfor, skyldes lækagen af brakvand fra Øresundsjetten. I forbindelse med at udstrømningen aftager falder saltholdigheden mere kraftigt, idet kystjetten mister noget af sin geostrofe balance (Corioliskraften aftager med faldende vandføring) dvs at jetten breder sig på tværs. I forbindelse med strømskiftet vil kyststrømmen miste hele sin geostrofe balance, hvorefter den via lock-exchange vandrer vestpå forbi fyrskibet Kattegat S. Efter at det brakke kystvand har passeret fyrskibet (1 á 2 døgn), stiger saltholdigheden igen brat. Vi skal nedenfor se en sådan kystvandspassage illustreret fra målinger under bøjeprojektet.

Anholt N, Læsø N

Anholt N, Læsø N:

De to nordlige fyrskibe udviser principielt samme saltvariation som Kattegat S, dog med en højere saltholdighed såvel før som under kyststrømmens passage i forbindelse med strømskiftet.

Udstrømning Store Bælt

2.2 Store Bælts udstrømning

I selve Store Bælt

Så længe vandet strømmer i selve Store Bælt (og Lille Bælt) vil Corioliskraften under en udstrømningssituation bevirke, at overfladevandet fordeles på tværs med det letteste vand langs højre kyst i strømretningen, og det tungeste vand langs venstre bred. Derudover vil man kunne registrere, at vandspejlet stiger på tværs af strømmen, således at vandstanden ved højre bred bliver højere end ved venstre bred (ofte i størrelsesordenen 10 cm). Når denne strømning derfor forlader Store Bælt mangler den pludselig en kyst, der kan opretholde denne

I Kattegat

overhøjde af vandspejlet i højre side. Det udstrømmende vand vil derfor have en kraftig trykgradient mod højre, lige når det forlader Sjællands Odde dels på grund af overhøjden (eller Corioliskraften som har skabt den, om man vil) dels på grund af tæthedsforskellen, idet det udstrømmende vand vil have en saltholdighed, der er lavere end det omgivende vand. Alt andet lige vil det udstrømmende vand derfor have en kraftig tendens til at søge østover, hvilket også fremgår af satellitbilledet, Fig. 2.1.

Langsgående saltvariationer ved udstrømning

Vi kan illustrere forholdene i Store Bælt under en udstrømningssituation ved at foretage en optegning af de målte saltholdigheder som funktion af tiden for den lige omtalte situation (marts - april 1967), se Figur 2.3. Idet vi igen starter sydpå observeres følgende saltholdighedsvariationer ved

Gedser Rev

Gedser Rev:

På det store flade område syd for Sjælland befinder der sig, efter en længerevarende indstrømningssituation, en pulje af vand med lidt højere saltholdighed end i Arkona bassinet. Returstrømningen af denne vandmasse giver sig til kende ved et mere gradvist fald i saltholdigheden ved Gedser Rev fyrskib end ved Drogden. Fra omkring den 30. marts holder saltholdigheden sig meget konstant på ca 8 - 9%, indtil strømmen vender igen medio april.

Halskov Rev

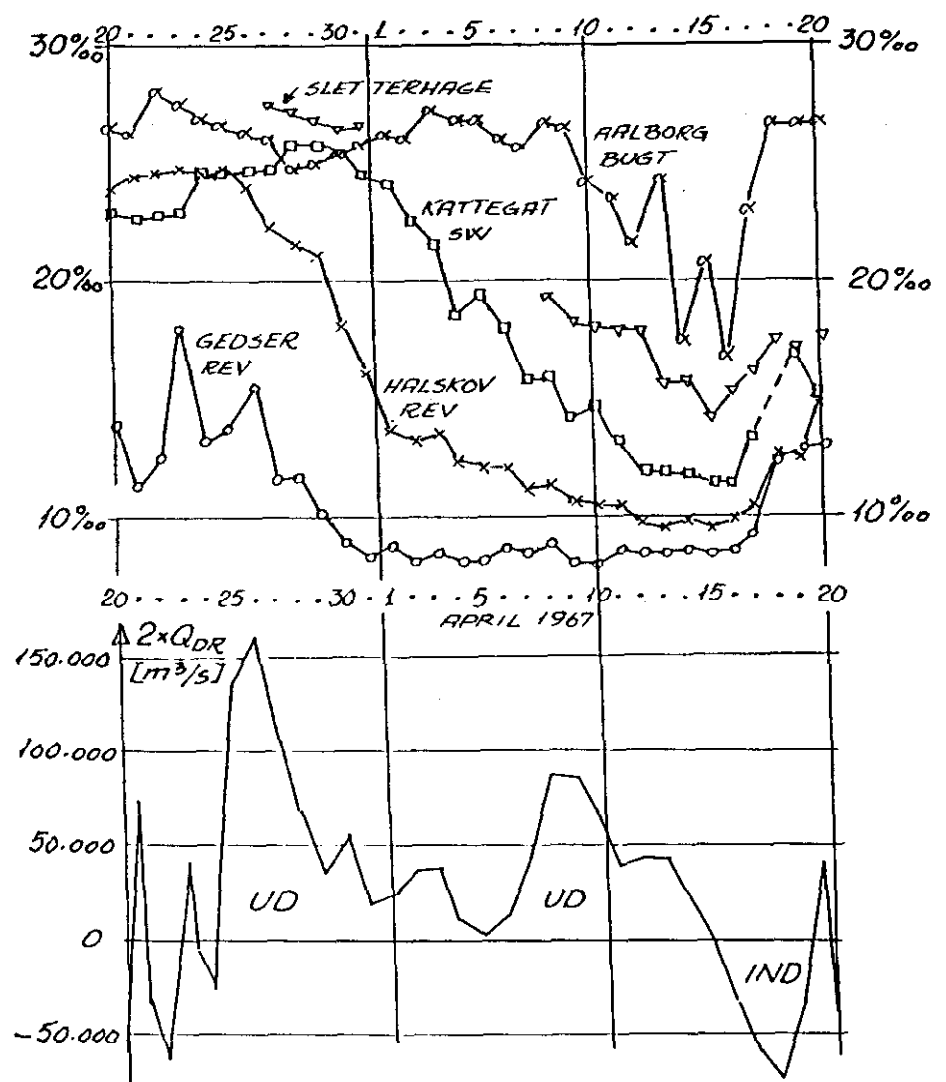
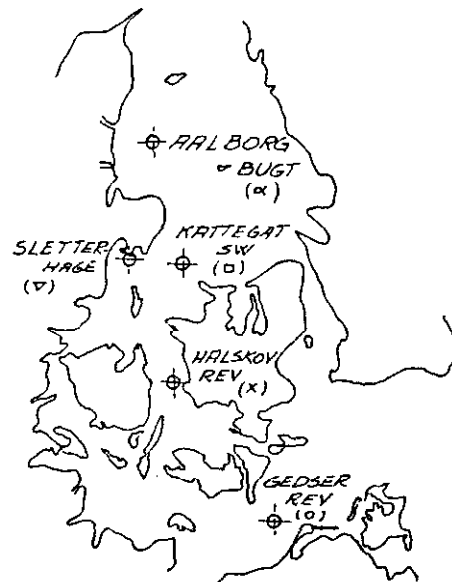
Halskov Rev:

Med en tidsforsinkelse på ca. 5 dage genfindes saltholdigheden fra Gedser Rev ved Halskov Rev. På grund af den store blanding i Store Bælt ligger startsalholdigheden ved Halskov Rev ca. 10% højere end ved Gedser Rev. Denne forskel mindskes under den langvarige udstrømning - ligesom en langvarig indstrømning også ville have mindsket denne forskel. Blanding i Store Bælt medfører, at der selv efter langvarig udstrømning stadig kan observeres 2 - 3% saltforskel mellem Gedser Rev og Halskov Rev.

Kattegat SW

Kattegat SW:

Kattegat SW er beliggende i det udstrømmende Store Bælt/Lille Bælt vand. Det jævne fald i saltholdigheden følger nøje faldet i de sydligere beliggende stationer, blot forsinket ca. 1 uge i forhold til Halskov Rev. Igen observeres det, at den langsgående saltgradient formindskes med tiden. Den reducerede blanding under langvarig udstrømning skyldes to ting.



Figur 2.3
 Saltholdighedsvariation i hovedstrømretningen -
 Store Bælt.

For det første betyder udstrømningen af Østersøvand, at saltforskellen mellem øvre og nedre lag øges. For det andet betyder udstrømningen, at dybden af det øvre lag øges (skillefladen presses ned). Begge forhold er med til at øge stabiliteten over for blanding (den dynamiske højde).

Sletterhage/ Aalborg Bugt

Sletterhage/Aalborg Bugt:

Begge disse stationer er beliggende til venstre for udstrømningen af Bæltvandet. På grund af Corioliskraften vil det mest salte vand befinde sig i venstre side af strømningen (se f.eks. Figur 2.5 nedenfor), hvorfor begge stationer vil have en relativ høj saltholdighed. På grund af lækage, sker der et gradvist fald i saltholdigheden med tiden. I forbindelse med aftagende udstrømning og til sidst strømvending i slutningen af perioden passerer det udstrømmende vand ved lock-exchange forbi de to nordlige stationer. Mekanismen er den samme som kunne observeres ved fyrskibet Kattegat Syd i forbindelse med Øresundsjetten's aftagende Corioliskraft. Effekten ses meget tydeligt ved Aalborg Bugt i forbindelse med at strømmen vender medio april.

2.3 Sydlige Kattegat - tværsnit

Hydrografi ved Bøjestationen

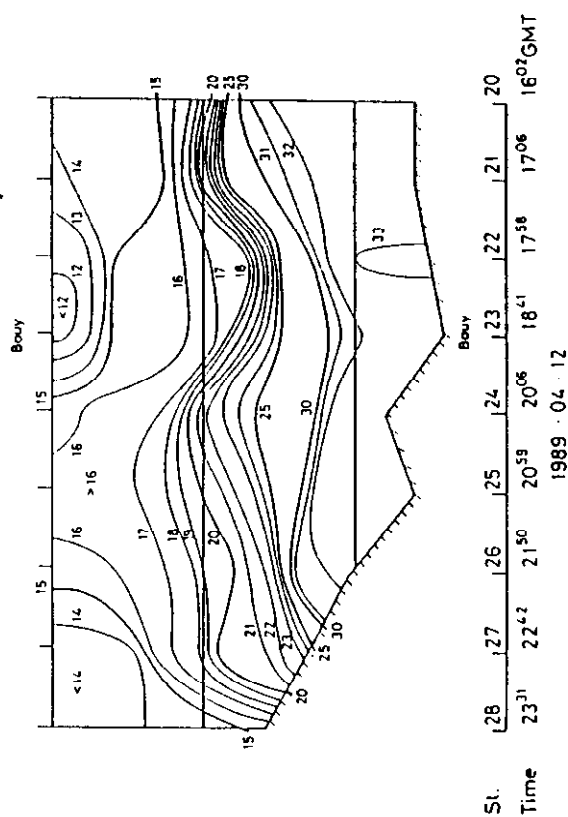
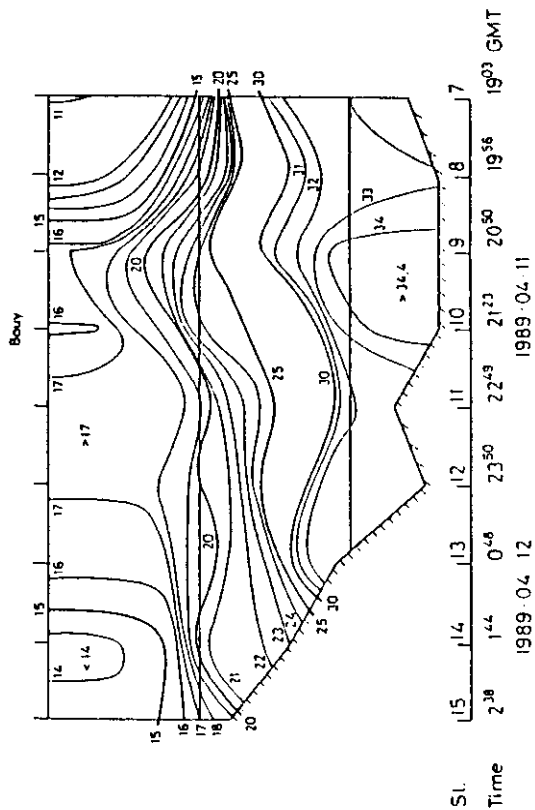
Som udgangspunkt for den nøjere beskrivelse af de hydrografiske forhold omkring bøjestationen, kan vi tage to opmålte transsektorer nord for Sjælland, se Figur 2.4.

Transsekt 11. april 89

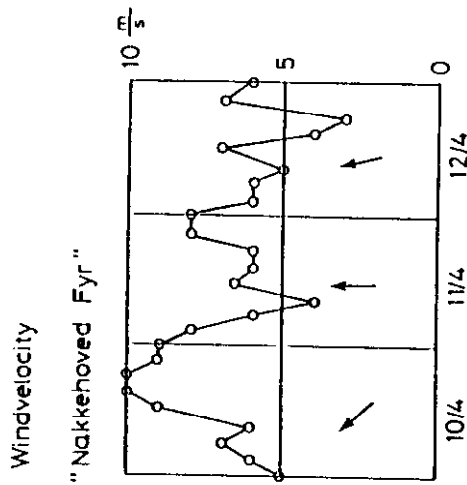
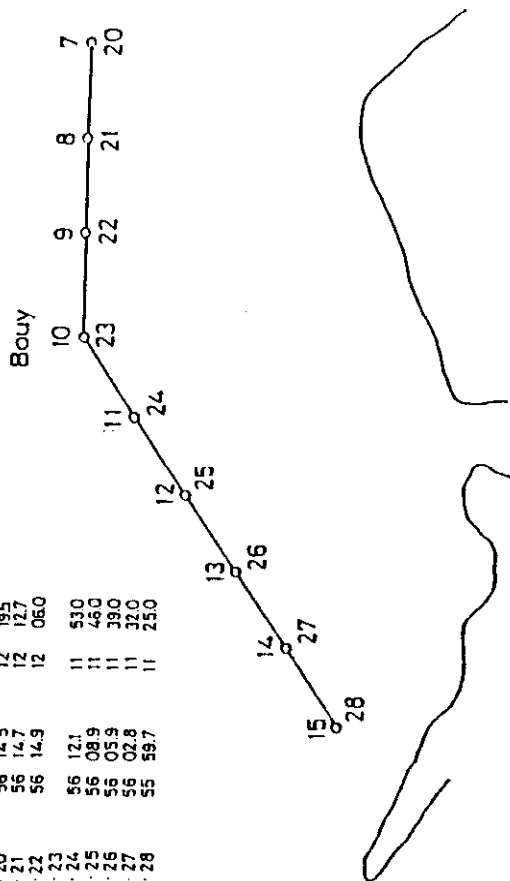
Transsektterne blev taget med ca. 1 døgn mellemrum. Det første transsekt (11. april 1989) viser dels det brakke udstrømmende Øresundsvand, der som en kystjet klæber til den svenske kyst, dels det mere salte Bælthavsvand, der med en mindre markant front er på vej østover. Endvidere kan man omkring bøjestationen observere en afsnøret vandmasse (saltholdighed 16 - 17‰) i overfladelaget. Denne vandmasse skyldes formentlig lækagen fra Øresundsjetten.

Transsekt 12. april 89

Ser vi dernæst på det næste transsekt (12. april 1989) observerer vi, at det udstrømmende Øresundsvand har forladt den svenske kyst, og nu er på vej vestover via en lock-exchange med Kattegats øvre lag (bemærk at skillefladen mellem de to vandmasser ligger i midt dybde af det øvre lag, hvilket er en klar indikation på lock-exchange). Endvidere antyder isohalinerne i midten af transsektet, at der har foregået en intrusion til begge sider af det vindblandede salte vand (ca. 16‰). Kystjetten, dens separation fra kysten, lækagen og intrusionen behandles mere indgående nedenfor.



St.	Latit.	Longit.
7-20	56 14.9	12 19.5
8-21	56 14.7	12 12.7
9-22	56 14.9	12 06.0
10-23	56 12.1	11 53.0
11-24	56 08.9	11 48.0
12-25	56 05.9	11 39.0
13-26	56 02.8	11 32.0
14-27	55 59.7	11 25.0



Figur 2.4
To opmålte transekter gennem bøjestationen i det Sydlige Kattegat

2.3.1 Øresundsjetten

Målinger af Øresundsjet

Starten på den kyststrøm som genereres ved udløbet af Øresundsvand kan bedst illustreres ved at optegne et sæt af de målinger, som Miljøstyrelsen lod foretage i september 1976 bl.a. i snittet Gilleleje - Höganäs, se Figur 2.5, Jacobsen og Nielsen [1978].

Hastighedsprofil

Hastighedsprofilerne er illustreret ved isoverlerne, der viser, dels at strømmen klæber op ad den svenske kyst, dels at såvel den vertikale som den horisontale fordeling af hastigheden er trekantformet. Bemærk i øvrigt de meget store hastigheder (over 1 m/s), som er typiske for koncentrerede kyststrømme, men i øvrigt af en størrelse, som man sjældent finder i de åbne farvande udenfor koncentrerede jetstrømme. Man bemærker også den returstrøm, der finder sted uden for jetten. Denne strøm er skabt af den medrivning, der foregår ind i kyststrømmen syd for målesektionen. Denne medrivning er betragtelig på grund af de meget høje hastigheder fra H-H snittet til målesnittet.

Returstrøm p.g.a medrivning

Bredde af jet

Jettens bredde ses at være ca. 10 km, svarende til den interne Rossby radius (se Bo Pedersen 1990). Det er denne smalle bredde af kyststrømmen, som betinger, at man ikke straks mærker en udstrømningssituation ved fyrskibet Kattegat S eller ved bøjestationen.

Når strømmen aftager/vender

Når strømmen gennem Øresund aftager og til sidst vender mister jetten sin geostrofe balance (Corioliskraften aftager). Tager vi som eksempel, at strømningen pludselig stagnerer (d.v.s. Corioliskraften forsvinder), får vi en klassisk lock-exchange mellem det brakke Øresundsvand og det saltere overfladevand i Kattegat. Med de på principskitsen (Figur 2.5 e) viste saliniteter findes en lock-exchange hastighed på ca. [se Bo Pedersen, 1990]

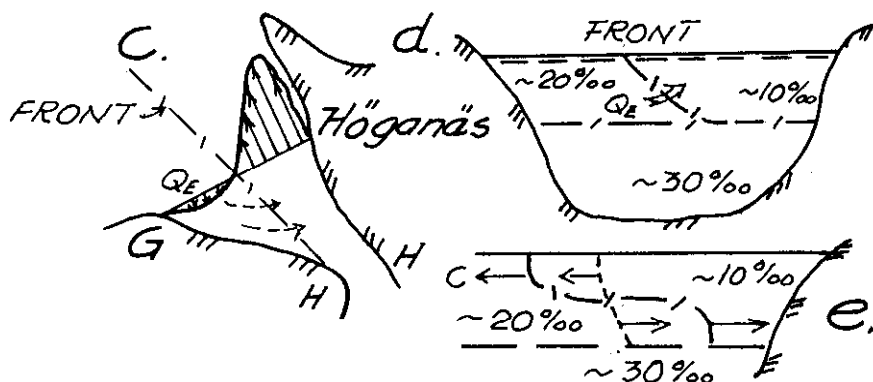
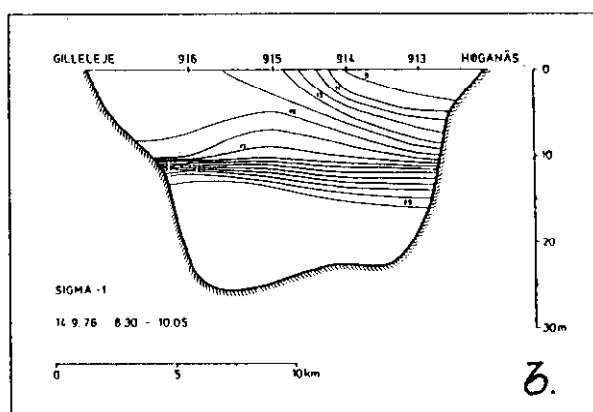
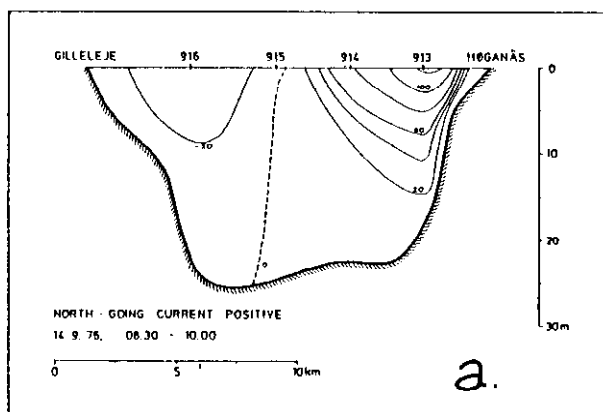
$$C = 0,5\sqrt{\Delta g D} \sim 0,5\sqrt{0,8 \cdot 0,010 \cdot 9,81 \cdot 12}$$

$$\sim 0,5 \text{ m/s}$$

idet $\Delta \approx 0,8(S_{\text{kat}} - S_{\text{øres}}) = 0,8(0,020 - 0,010)$
og $D = \text{øvre lags dybde er sat til } 12 \text{ m.}$

Tid for jettens
separation fra
kysten

Såfremt bredden af jetten sættes til ca. 10 km, tager det altså 5 á 6 timer før fronten af Kattegats overfladevand i det nederste lag når den svenske kyst, dvs. før jetten separerer fra kysten.



Figur 2.5

Øresundsjetten ved snittet Gilleleje/Höganäs.

a. målt hastighedsfordeling

b. målt sigma fordeling

Principskitser: c) Plan

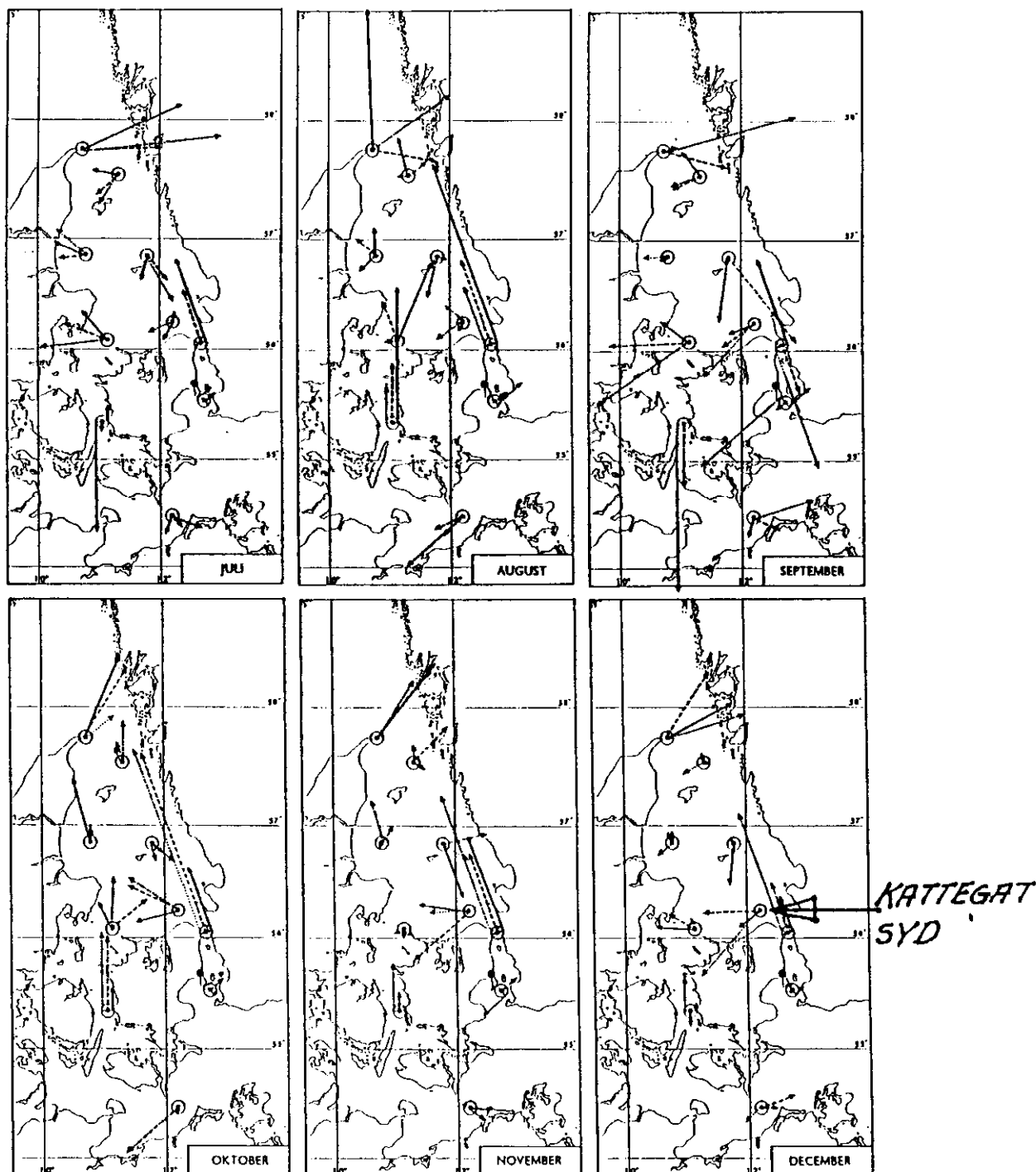
d) Snit

e) Lock-exchange

Vektorielle dekademidler af overfladestrømmen 1966

Strømshastighed i knob svarende til pilens længde: 0.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0

— I. Dekade (1. - 10.) - - - II. Dekade (11. - 20.) — III. Dekade (21. - 28./29./30./31.)



Figur 2.6

Strømmen ved Kattegat S fyrskib har en vedvarende kraftig W-lig retning på grund af lækage og separation af Øresundsjetten.

2.3.2 Lækagen fra Øresundsjetten

Øresundsjetten lækage

Mængden af vand som lækker fra Øresundsjetten er aldrig målt/estimeret. At den forekommer har vi set beviser på i de observerede saltvariationer (se f.eks. Fig. 2.2 og Fig. 2.4). En yderligere indikation for denne lækage har vi i de ved Kattegat S fyrskib observerede daglige overfladehastigheder, se Figur 2.6. Såvel lækager fra som separation fra kysten ved strøm vending af Øresundsjetten skaber vestgående overfladestrøm, der ses at være den dominerende strømretning ved Kattegat S fyrskib.

2.3.3 Intrusioner

"Bæltprojektet" transekt, Fig. 2.7

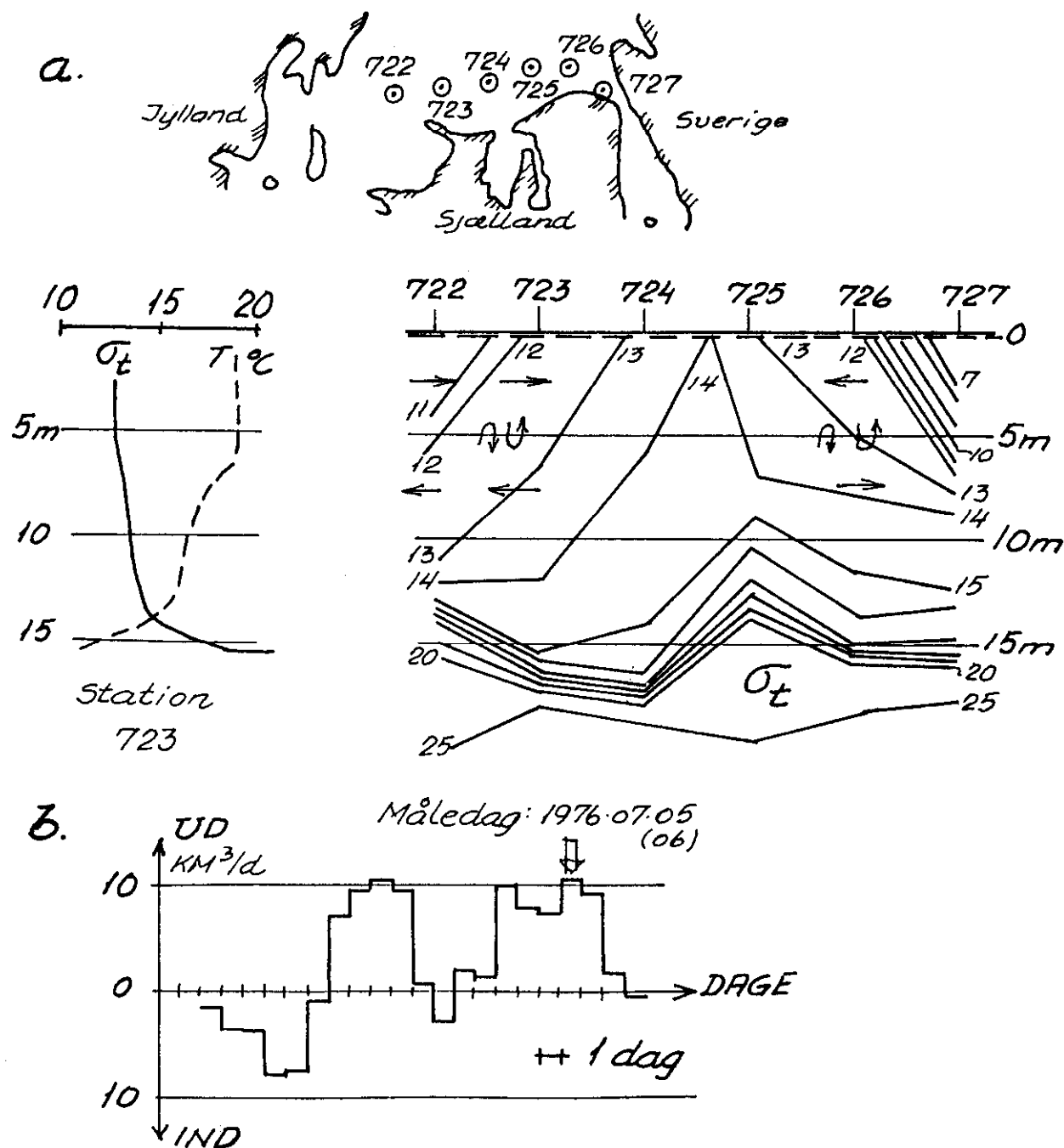
Vi kan nu se på hvilken indflydelse de omtalte lækager fra de udstrømmende vandmasser har på de hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat. Desværre findes der ikke ret meget materiale til at illustrere dette forhold, men fra målekampagnerne i forbindelse med "Bæltprojektet" eksisterer der vertikale tætheds og temperaturprofiler fra bl.a. de på Fig. 2.7 viste målestationer i det sydlige Kattegat. Det eksempel, der her er valgt til at illustrere forholdene, er utypisk i den forstand, at det er uden "støj" fra skiftende strøm- og vindretninger og styrker, men illustrativt, idet det er i overensstemmelse med det, man ville forvente ud fra en meget simpel beskrivelse (se Figur 2.7).

Slutningen af udstrømnings- periode

Af grafen for den totale udstrømning gennem sundet og bælterne fremgår det, at opmålingen er foretaget i slutningen af en periode med udstrømning, hvor der i alt er strømmet ca. 80 kubikkilometer vand ud i Kattegat (en vandføring på ca. 10 kubikkilometer per dag er helt normal). I station 727 ses meget tydeligt det lagdelte udstrømmende vand fra Øresund, som har en sigma på ned til 7, dvs. en saltholdighed på lidt under 9‰. I den tilsvarende station i Store Bælt udstrømningen, nemlig station 722 ses ligeledes en tydelig lagdeling af det udstrømmende vand, blot mindre markant end i station 727 og endvidere med en større sigma (=11), hvilket svarer til en saltholdighed på ca. 14‰. Det lette vand, der lækker fra såvel Øresundsjetten som Store Bælt udstrømningen, bevæger sig i den øverste halvdel af overfladelaget ind mod midten af Kattegat, hvor tætheden er større på grund af den højere saltholdighed (ca. 17‰), medens der i den nederste halvdel af

Øresund Store Bælt

Lækagen: Lock-exchange



Figur 2.7

a) Sydlige Kattegat. Stationsnumre og T-forde-
ling.

b) Beregnet transport gennem Øresund og bælter-
ne.

→ ← : Strømretninger

↻ ↻ : Blandinger

Temperaturprofil
St. 723 afslører
Lock-exchange

Den højeste salt-
holdighed i over-
fladelag = størst
medrivning

Området med størst
medrivning =
Bøjestationen

Dynamikken i det
sydlige Kattegat

Udstrømning =
stabilisering mod
blanding

Vindgenereret
blanding

Lock-exchange =
dobbel-låg mod
blanding

overfladelaget pågår en modsat rettet returstrømning af tungere vand fra midten af Kattegat, dvs. den klassiske lock-exchange strømning. Denne strømning er ikke målt i de pågældende stationer, men kan alligevel nemt ses af de vertikale salt/temperaturprofiler. Dette er som eksempel illustreret for station 723, hvor specielt temperaturprofilet afslører tolagsstrukturen over den primære haloklin. På grund af blanding undervejs, som kan skyldes såvel strømmingen som vindens aktivitet, sker der en gradvis øgning af saltholdigheden for begge lækager, efterhånden som de nærmer sig hinanden. Den højeste saltholdighed i det øvre lag finder vi derfor, hvor de to lækager mødes. I dette snit er der derfor også den mindste saltforskel mellem øvre og nedre lag, og dermed den største sandsynlighed for at få vindgenereret medrivning af næringsrigt vand fra under til over den primære haloklin. En analyse af samtlige de målinger, der blev foretaget under Bæltprojektet, viser, at punktet, hvor vandene mødes, i gennemsnit ligger midt mellem stationerne 725 og 726, dvs. i positionen for målebøjen. Dette betyder altså dels, at der ved målebøjen er den største sandsynlighed for medrivning af næringsrigt vand (i den valgte afstand fra kysten), dels at der er lige stor sandsynlighed for, at det øverste lag af vand stammer fra Øresund og fra Store Bælt. Sidstnævnte kan give anledning til meget hurtige variationer i de fysisk/kemiske parametre, der måtte være væsentligt forskellige for de to vandmasser, når vandet på målestedet skifter fra den ene vandmasse til den anden.

Figur 2.7 viser tydeligt dynamikken i det sydlige Kattegat. Fra såvel Øresundsjetten som Store Bælts udstrømning sker der en tilførsel til den centrale del af Kattegat af let vand i overfladen, som betyder en stabilisering mod blanding af vandsøjlen. Den stigende saltholdighed i overfladelagenes strømretning (ind mod midten) viser, at der undervejs sker en blanding mellem de to vandmasser, der strømmer over hinanden i modsat retning. Denne primært vindgenererede blanding er begrænset til at foregå mellem disse to øverste lag, dvs. at der under den del af det Sydlige Kattegat, hvor denne lock-exchange foregår, ikke sker nogen nævneværdig opadrettet medrivning af næringsrigt bundvand. Lock-exchange vandet skaber derfor et dobbelt-låg mod blanding med bundvandet. Jo større tilførslen af let vand er, jo stærkere er låget. Blandingseffekten

**Dobbelt-låget
brydes midt i
Kattegat**

Intrusion

**Intrusion =
næringssalte i den
fotiske zone**

**Identificering
af intrusion**

**Måling af
intrusion**

skyldes primært vinden, jo stærkere vind jo stærkere blanding. Udstrækningen af lock-exchangen på tværs af Kattegat er derfor styret af styrkeforholdet mellem den stabiliserende tilførsel af let vand og den destabiliserende vinddeffekt. I den observerede situation, Fig. 2.7, ses dobbelt-låget at være brudt midt i Kattegat, hvor vi, som omtalt ovenfor, derfor må forvente at få en medrivning af bundvand op i det øverste lag. Dette medrevne vand vil blande sig med det øvre vand og derfor skabe en vandmasse, der har en lidt større saltholdighed end den omkringliggende øvre vandmasse. Vi får dermed skabt en intrusion (indtrængning) af dette lidt tungere vand - det søger ind under det øvrige lidt lettere overfladevand.

Intrusioner har to egenskaber, som gør dem biologisk interessante, nemlig at de indeholder næringssalte (fra bundvand), og at de befinder sig i den fotiske zone (<20 m).

I Bo Pedersen [1990] er vist, hvorledes man kan identificere intrusioner i et isoplet-diagram af saltholdigheden og temperaturen på en bestemt station, nemlig som vandmasser med en fra omgivelserne forskellig karakteristisk, som er beliggende i et lag over den primære haloklin (altså højere end det salte bundvand) og under det øverste mindre salte vand, der kommer fra Øresund og/eller Bælthavet. En meget tydelig intrusion blev opfanget på det måletranssekt, som blev foretaget den 8. november 1988 af "Gunnar Thorsen"'s besætning, se Figur 2.8. På grundlag af de 6 målte saltprofiler langs et ben i øst-vestlig retning kan man identificere en næsten homogen vandmasse med $S \sim 24-25\%$, som adskiller sig skarpt fra såvel det lettere øvre lag, som det tungere nedre lag. En forlængelse af den sekundære haloklin mod vest viser, at vandet stammer fra en position, der ligger ca. 5 til 10 sømil vest for station 6, hvor man må forvente at finde fronten mellem det øvre lagdelte og det øvre homogene vand.

2.4 Bøjestationen

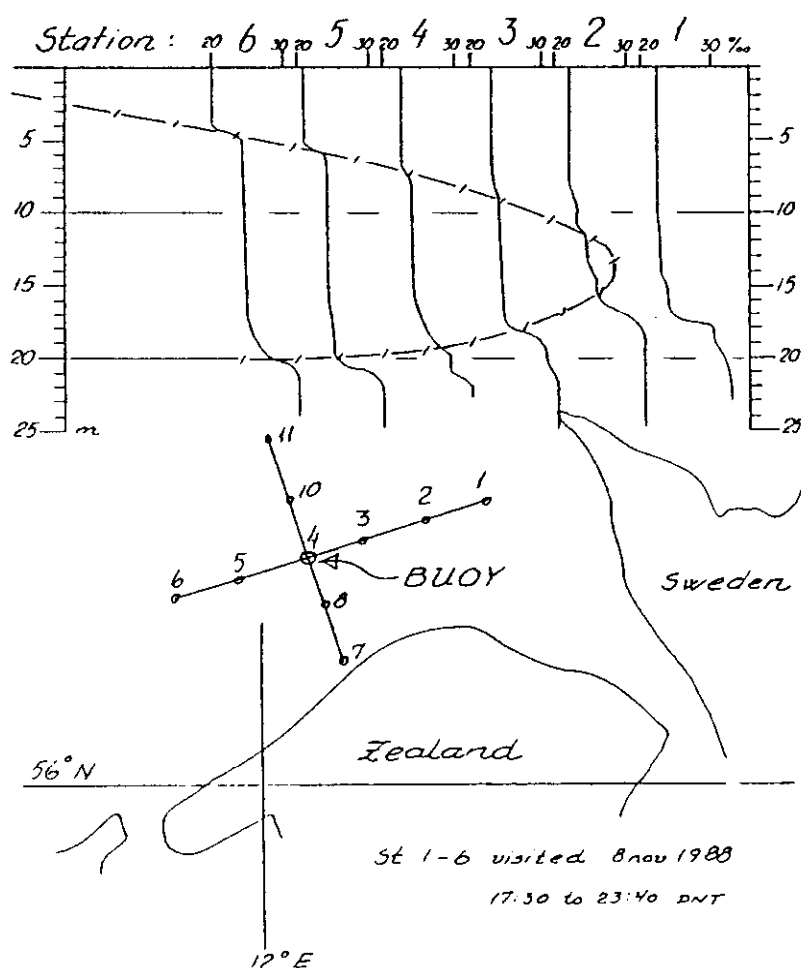
**Intensive målinger
på bøjestationen**

Der har i projektperioden været udført intensive hydrografiske/kemiske målinger af Marinbiologisk Laboratorium, Helsingør ("Ophelia") og af DMU, Afdelingen for Havmiljø og Mikrobiologi ("Gunnar Thorsen"):

Periode 1: 30/5 til 17/6 1988
 Periode 2: 24/10 til 10/11 1988
 Periode 3: 28/3 til 14/4 1989
 Periode 4: 21/8 til 11/9 1989

Detaljerede be-
 skrivelser kan
 rekvireres

For alle disse perioder er der udarbejdet en
 hydrografisk beskrivelse, som for en stor del
 bygger på det generelle kendskab til forholdene,
 som er skitseret i nærværende hovedrapport.
 Disse delrapporter, der kan rekvireres hos Mil-
 jøstyrelsen, giver en mere detaljeret beskri-
 velse af enkeltstående hændelser og "dag til
 dag" udviklinger på bøjestationen.



Figur 2.8

Snit gennem intruderende vandmasser skabt ved
 vindblanding ca 6 sømil vest for station 6.

Kontinuerte registreringer

Udover de intensive målekampagner har en udlagt målebøje i funktionsperioderne indhentet kontinuerte registreringer af saltholdighed, temperatur, lysforhold, strømningshastighed og -retning, vindhastighed og -retning, i hele projektperioden. På grund af diverse uheldige omstændigheder, var der ikke sammenfald mellem bøjens funktionsperioder og de intensive måleperioder, således at målingerne kunne kobles sammen til mere homogene tidsserier, hvor f.eks. dataudfald på grund af dårligt vejr, kunne have været udfyldt med data fra målebøjen. Da der yderligere var svigt af nogle centrale måledata i bøjens funktionsperiode, har bøjedataerne endnu kun været sporadisk behandlet, hvorfor de ikke indgår i rapporten. På længere sigt vil de indhentede data fra bøjen - som i parentes bemærket fortsætter ud over den første projekt periode - give nyttige informationer ved en mere tilbundsgående analyse af de hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat.

3 Litteratur

- Bo Pedersen, Fl. [1977]: "On dense bottom currents in the Baltic Deep Water". Nordic Hydrology, pp. 297-316.
- Bo Pedersen, Fl. and J.S. Møller [1981]: "Diversion of the River Neva - How will it influence the Baltic Sea, the Belts and Cattegat". Nordic Hydrology, 12, 1981, pp. 1-20.
- Bo Pedersen, Fl., K. Richardson and T.S. Jacobsen [1988]: "The Jutland current: Where is it and when?" Proceedings, Vol. 2, 16th Conference of the Baltic Oceanographers, Kiel, Institute of Marine Research, Düsternbrooker Weg 20, D-2300 Kiel 1, West Germany, pp. 806-823.
- Bo Pedersen, Fl. [1990]: "Hydrografiske grundelementer i de Indre Danske Farvande". ISVA, DTH.
- DHI, ISVA, DMU [1990]: "Analyse af iltsænkning i Kattegat, Bælthavet og v. Østersø".
- DMI [1976]: Danmarks Meteorologiske Institut.
- Fonselius, S.H. [1975]: "On the Distribution of Nutrients in Baltic Water". 3rd Soviet-Swedish Symposium on the Baltic Sea Pollution, Stockholm, Sept. 1975.
- Franck, H., D. Nehring and S. Schulz [1972]: "Ozeanologische Untersuchungen der DDR in der Nordöstlichen Nordsee in den Jahren 1965-1969 (nebst Einzeluntersuchungen im Kattegat). Nationalkomitee für Geodäsie und Geophysik bei der Akademie der Wissenschaften der Deutschen Demokratischen Republik. Reihe IV, heft 8, Berlin.
- Jacobsen, T.S. og P. Bo Nielsen [1978]: Hydrographical observations in Øresund, September 1976. A Data Report. Report No 37, May 1978. Københavns Universitet, Inst. for Fysisk Oceanografi.
- Miljøstyrelsen [1976]: Bæltprojektet: Fysiske undersøgelser.

Miljøstyrelsen [1980]: The Belt Project:
Sea water exchange of the Baltic.
Measurements and Methods. T.S. Jacobsen.

Rydberg, L. og Andersson, L. [1989]: "Measurements of velocities, hydrography and nutrients in the northern Kattegat during 1984-88". Data report No 49. Dept. of Oceanography, Gothenburg University, Sweden.

Foreløbigt tryk. December 1988
Revideret. Juni 1990

HAVFORSKNINGSPROGRAM - 90

BØJEPROJEKTET

30. maj - 17. juni 1988

Baggrund

Ud fra den generelle beskrivelse af Kattegats hydrografi (hovedrapporten) er der foretaget en detaljeret analyse af de hydrografiske forhold på bøjepositionen. Som basismateriale er anvendt:

1. Feltnmålinger af saltholdighed
temperatur
iltindhold
lysforhold
nitrat-indhold mm
for perioden 30. maj til 17. juni 1988,
samt lokale vindobservationer fra Nakkehoved Fyr til bestemmelse af medrivningerne.
2. Vindobservationer fra Skagen, der er et godt mål for det overordnede vindfelt, som styrer ud og indstrømningen gennem Øresund og Bælterne, Fig. 1.
3. Hastighedsobservationer fra Drogden, der direkte kan benyttes til at skønne størrelsen af ind- og udstrømningens variation med tiden, Fig. 2.

1. data stammer fra "OPHELIA" og "GUNNAR THORSEN" samt vind fra DMI, medens 2. og 3. data stammer fra DMI, men er hentet fra

"Chrysochromulina propylepis"-rapporten, udarbejdet til EF under study contract No EV4V-016-6-DK (CH), november 1988 under redaktion af Arne Nielsen, Havforureningslaboratoriet.

Derudover er der foretaget en første simpel biologisk, kemisk, hydrodynamisk analyse, med det formål at starte diskussionen om, hvad der egentlig skete i måleperioden og forud.

HYDROGRAFIEN I MÅLEPERIODEN

22.05.88 - 30.05.88:

Gennem Øresund sker der en udstrømning med en maksimalværdi på ca 50.000 kubikmeter per sekund, der falder midt i perioden, se Fig. 2. Saltholdigheden ved Drogden var under denne udstrømning ca 8 til 9 promille, dvs. at saltholdigheden af den udstrømmende vand ved udløbet til Kattegat formodentlig har været ca 10 til 11 promille. Udstrømningen var forårsaget af en ESE-lig vind med en gennemsnitshastighed på ca. 4 m/s.

30.05.88 - 03.06.88:

Vinden slår nu over i SW via S, hvilket bevirker, at vi får en kortvarig indstrømning af stor intensitet, max ca 70.000 kubikmeter per sekund, se Fig. 2. Indstrømningen medfører, at den tidligere formede kyststrøm langs den svenske kyst mister sin geostrofe balance. Der dannes derfor en lock-exchange på tværs af kysten. På Fig. 3 er optegnet, hvorledes saltholdigheden varierer med dybden og tiden på målestationen. Man ser tydeligt, hvorledes den tværgående strømning af lettere vand passerer forbi målestedet. I hele denne periode har vi en sekundær skilleflade i ca 5-6 meters dybde, der virker som et låg på vandsøjlen. Der sker derfor ingen vindgenereret medrivning af næringsrigt bundvand i denne periode.

03.06.88 - 06.06.88:

Vinden går nu tilbage til syd - men det er en svag vind. Dette giver anledning til en fornyet udstrømning, men af beskeden størrelse og varighed, idet den sydlige vind næsten dør ud de sidste dage i perioden. Den meget svage lagdeling efter frontpassagen i forrige periode bliver nedbrudt, således at vandsøjlen bliver homogen ned til den primære haloklin i ca 9 til 10 meters dybde. Med den svage vind og den me-

get korte varighed af perioden er den tilsvarende medrivning særdeles svag. Skønsmæssigt kan det antages, at der er blevet transporteret ca 10 liter per kvadratmeter per døgn gennem springlaget i forbindelse med den vindgenererede blanding.

06.06.88 - 10.06.88:

Vinden går nu over i NE til N (Fig. 1), hvilket stadigvæk giver udstrømning gennem Øresund (max 70.000 kubikmeter per sekund, se Fig. 2). På Fig. 3 ser vi igen effekten af den svage lækage af vand fra kyststrømmen, nemlig en faldende saltholdighed i de øverste 5 til 10 meter. I hele denne periode kan der ikke ske nogen medrivning fra det næringsrige bundvand, idet saltgradienten i det øverste lag lægger et låg på laget.

11.06.88 - 12.06.88:

Den 11. er der en meget kraftig vind igennem en periode på ca 12 timer; hvorefter vinden igen falder fra ca 12 m/s til mere moderate hastigheder, ca 6 m/s. Denne vind eroderer den øvre lagdeling ned, således at der bliver etableret et homogent lag helt ned til den primære haloklin (ikke målt den 11. - men tydelig homogenisering den 12.). Den meget korte, uens vind gør det meget vanskeligt at estimere medrivningens størrelse, idet den vindgenererede strømning i vandet har en nedtrængningstid, der bliver stor i forhold til vindens varighed, og i hele denne nedtrængningstid bruges vindens effekt til acceleration af vandet, og ikke til medrivning. I sådanne meget kortvarige hændelser bliver man nødt til at opstille en detaljeret turbulensmodel, for at få et rimeligt skøn på medrivningen. Alternativt ville en samtidig registrering af f.eks. nitrat og saltholdighed have kunnet give et rimeligt mål for medrivningen. Ser vi på de samhørende værdier af iltindhold og saltholdighed før og efter hændelsen, er der ikke sket nogen målelig ændring, hvilket kunne indikere, at langt størsteparten af vindens effekt er gået til at skabe strømning.

13.06.88 - 15.06.88:

Denne periode er kendetegnet ved en W N W - lig vind med en kortvarig, middel indstrømning (max 40.000 kubikmeter per sekund). Som før giver indstrømning anledning til at den tidligere etablerede kyststrøm passerer forbi målestedet. Der er en meget tydelig lock-exchange den 13. og 14. juni. I denne periode er der ingen medrivning fra det næringsrige bundvand, da det

lette overfladevand skaber en sekundær halo-klin.

16.06.88 - 24.06.88:

Vinden går via S (med en tilhørende kort udstrømning) over i W, og dermed indstrømning. Der er tale om svage strømninger og en middelvind, som giver anledning til en svag medrivning, måske i størrelsesorden 10 til 20 l/s per kvadratmeter.

BIOLOGI / KEMI / HYDROGRAFI

Aktivitet - springlag, Fig. 4.

Det første man bemærker sig er, at den biologiske, kemiske aktivitet i perioden er koncentreret i springlaget, dvs. i det 3 til 4 meter tykke lag, hvor saltholdigheden varierer fra ca 16 til 30 promille. Dette springlag er ekstremt stabilt.

Temperatur - saltholdighed - "konservative", Fig. 6b.

Såvel saltholdighed som temperatur vil optræde som konservative stoffer i et springlag, hvor der ikke sker nogen væsentlig solopvarmning. En optegning af et T-S diagram, se Fig. 6b, viser da også en ren blanding, dvs. en RET linie for saltholdigheder større end 16 promille, altså fra springlagets top og nedefter. Man skal samtidigt være opmærksom på, at det også er ensbetydende med, at der næppe er sket nogen indlejring i springlaget af "fremmed" vand nordfra, idet der i så fald højst sandsynligt ville have været et opadrettet knæk på T-S diagrammet på denne tid af året, svarende til at det indtrængende vand efter al sandsynlighed ville have en overtemperatur.

Ilt - saltholdighed - "ikke konservativ", Fig. 6a.

Laver vi et tilsvarende plot af iltindholdet versus saltholdigheden, ser vi straks, at der er et betragteligt overskud af ilt i forhold til det, der ville have været, såfremt iltindholdet i springlaget udelukkende var bestemt af en ren blanding af iltfattigt bundvand og iltrigt overfladevand (den rette linie). Iltindholdet er et resultat af den biologiske aktivitet i springlaget. Vi bemærker:

1. Aktivitetsniveauet har maksimum midt i springlaget - omkring 26 - 27 % saltholdighed.
2. Når der forekommer en turbulent diffusion i springlaget sker der en ilttransport såvel opad som nedad, idet der er en gradient i begge retninger.
3. Den totale mængde ilt, der er repræsenteret i springlaget ud over den rene blanding - altså nettoproduktionen udgør ca

$$\begin{aligned}\text{TOTAL PROD ILT} &= 2/3 \times 4[m] \times 3[l/m^3] \\ &= 8 \text{ liter}/m^2\end{aligned}$$

idet fordelingen er skønnet parabolisk (faktoren 2/3), springlagets tykkelse er ca 4 meter, og maksimalværdien af overskudsilt-indholdet er sat til ca. 3 ml/l.

Den aktuelle produktion i springlaget er enten lig med de fundne 8 liter per kvadratmeter eller mere, idet der ikke er taget højde for den turbulente diffusion, medrivning, respiration, nedbrydning af døde alger m.m., altsammen processer, der vil reducere iltindholdet.

Den producerede C-masse i springlaget:
Ud fra det kendte iltoverskud kan vi estimere, hvor stor en mængde kulstof, der mindst må være produceret i springlaget inden for den samme tid, som iltoverskuddet er blevet oparbejdet i. Sætter vi 1 ml ilt som resultatet af en produktion på 0.4 mg C, finder vi altså, at der mindst må være produceret

$$C - \text{PROD} = 0.4 \times 8 = 3.2 [g C/m^2]$$

$$\approx \frac{3.200 \text{ mg}}{4m} \frac{m^2}{m^2} \sim 800 \text{ mg/l}$$

Antages den målte produktionsrate på ca. 160 mikrogram C per liter per dag at være typisk, når man frem til, at det ville have taget 5 dage for at producere den ovenfor beregnede mængde kulstof.

Nitrat forbrug i springlaget:
Desværre har vi ikke sammenhørende målinger af nitrat og saltholdighed, således at Fig. 6c, som kunne fortælle os om forbruget af nitrat, desværre er forbundet med helt unødvendig usikkerhed. Der er dog ingen tvivl om, at der er sket et forbrug, idet korrelationskurven viser

et underskud af nitrat i forhold til det indhold, der ville have været, såfremt der havde været en ren blanding.

Skønner vi et C:N forhold på 6 skulle der for at producere de ovenfor beregnede 3.2 g C per kvadratmeter være brugt 0.5 g N per kvadratmeter. Med skønnet parabolisk fordeling (faktoren 2/3), og en lagtykkelse på 4 meter samt en nitrat reduktion på 7×14 mg N per kubikmeter (maksimalamplituden 7 er skønnet ud fra Fig. 6c) fås, at der mindst må være forbrugt:

$$\begin{aligned}\text{Nitrat N forbrug} &= 2/3 \times 4 \times 7 \times 14 \\ &= 261 \text{ mg N per m}^2\end{aligned}$$

hvilket kun er halvdelen af de 500 mg N per kvadratmeter, som iltproduktionen gav. Der kan være flere forklaringer til denne uoverensstemmelse:

1. Der kan have været en opadrettet transport af næringssalte til springlaget i perioden forud for målingerne, selv om de nøjagtige iltmålinger ikke tyder på det (det ville jo have betydet en tilsvarende reduktion af iltindholdet, idet det opad transporterede vand har et meget lavt iltindhold). Altså ikke nogen umiddelbar god forklaring.
2. Der kan have været en horisontal transport i springlaget af vand med et noget højere næringssaltindhold end det, der befinder sig i bundlaget i måleperioden. En sådan horisontal indtrængning er betinget af ganske små tæthedsgradienter, der som regel ikke kan måles. Man har ofte disse indtrængninger i springlaget, - de giver sig til kende på T-S profilet, som nævnt ovenfor. Selv om der i måleperioden ikke er registreret tegn på horisontale indtrængninger, så kan de godt have fundet sted i perioden forud for målingerne. Faktisk viser målinger i det nordlige Kattegat i perioden forud, at der i den nordøstlige del af Kattegat netop lå en sådan lomme af meget næringsrigt vand, se "Chrysochromulina"-rapporten, Havforureningslaboratoriets målinger. Denne forklaring er derfor plausibel.
3. Forholdet mellem C og N er måske ikke 6 men 10 til 20 for de aktuelle algearter. Har man nogen form for dokumentation for tallet 6?

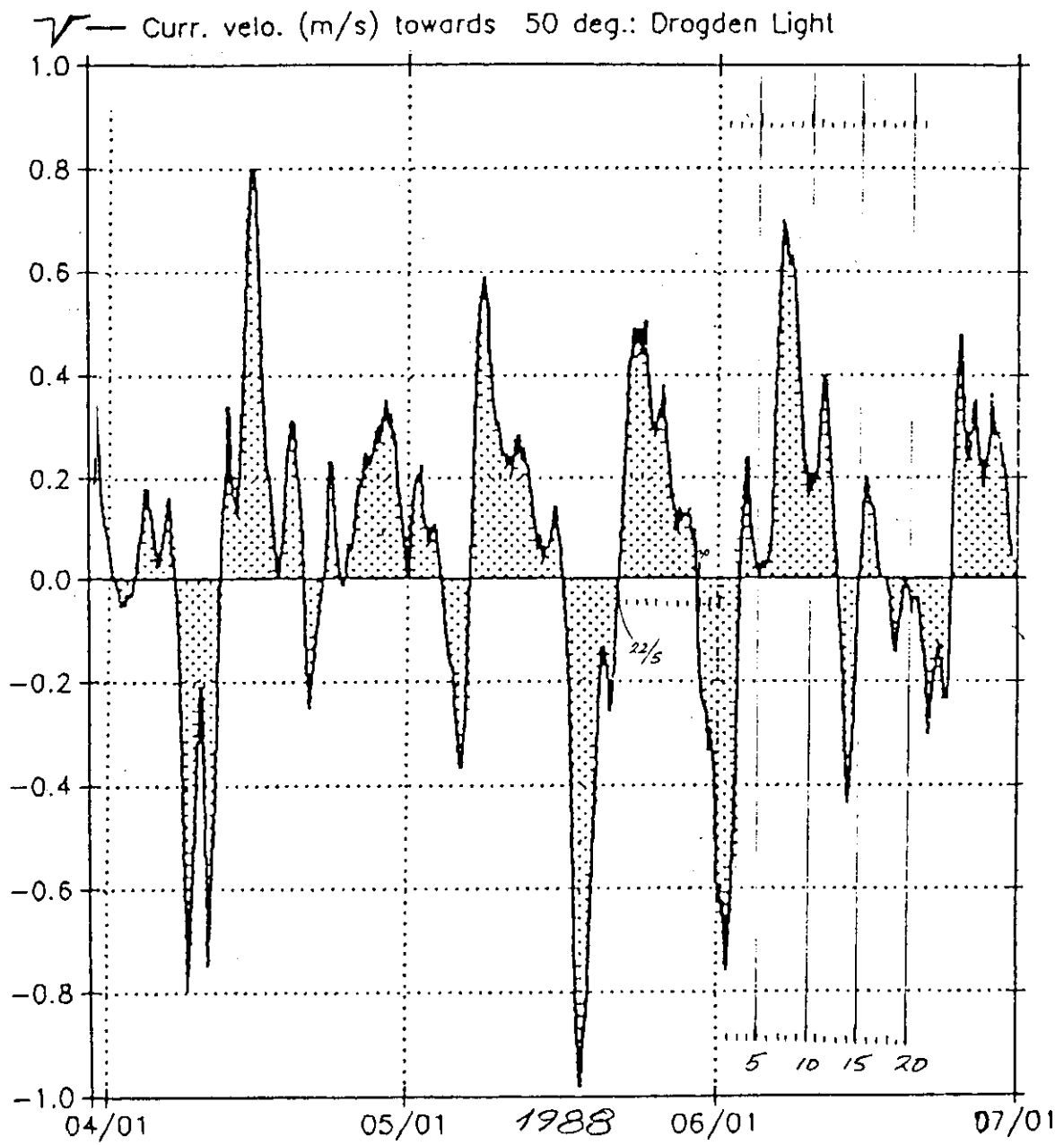
4. Katherine Richardson, DFH, har senere fundet indikationer på, at noget af kvælstoffet kan "genbruges", - så det er også en mulig forklaring.

Konklusionen er altså indtil videre, at enten er forholdet mellem C og N væsentligt større end 6, eller også må indholdet af nitrat have været ca. dobbelt så stort i springlaget som i bundlaget ved starten af den opblomstring, vi ser resultatet af, - eller også sker der et "genbrug" af næringssalte.

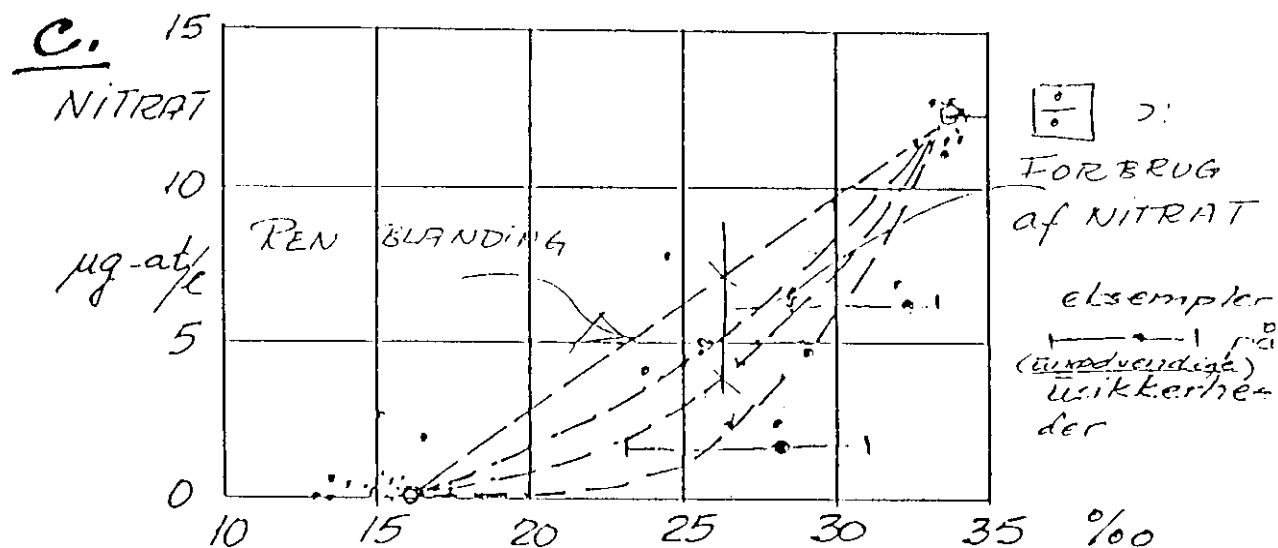
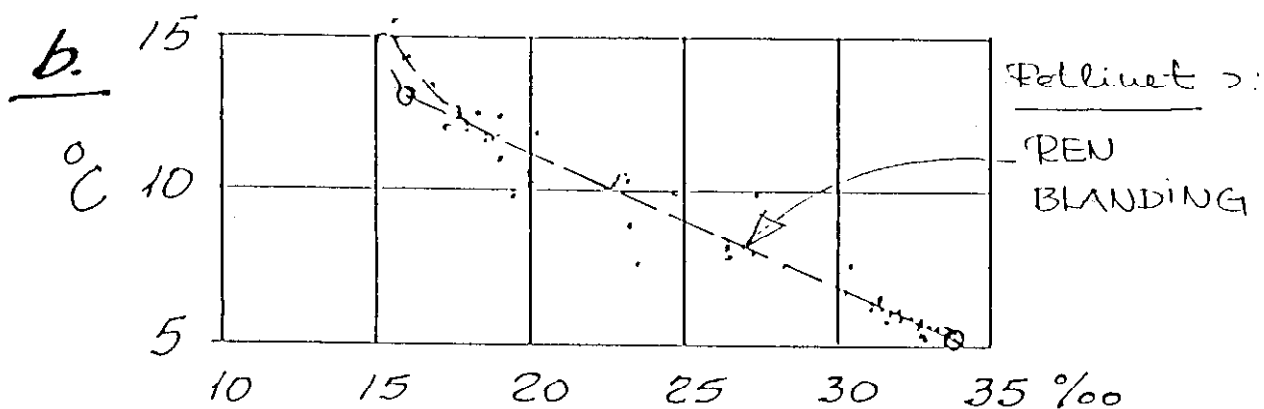
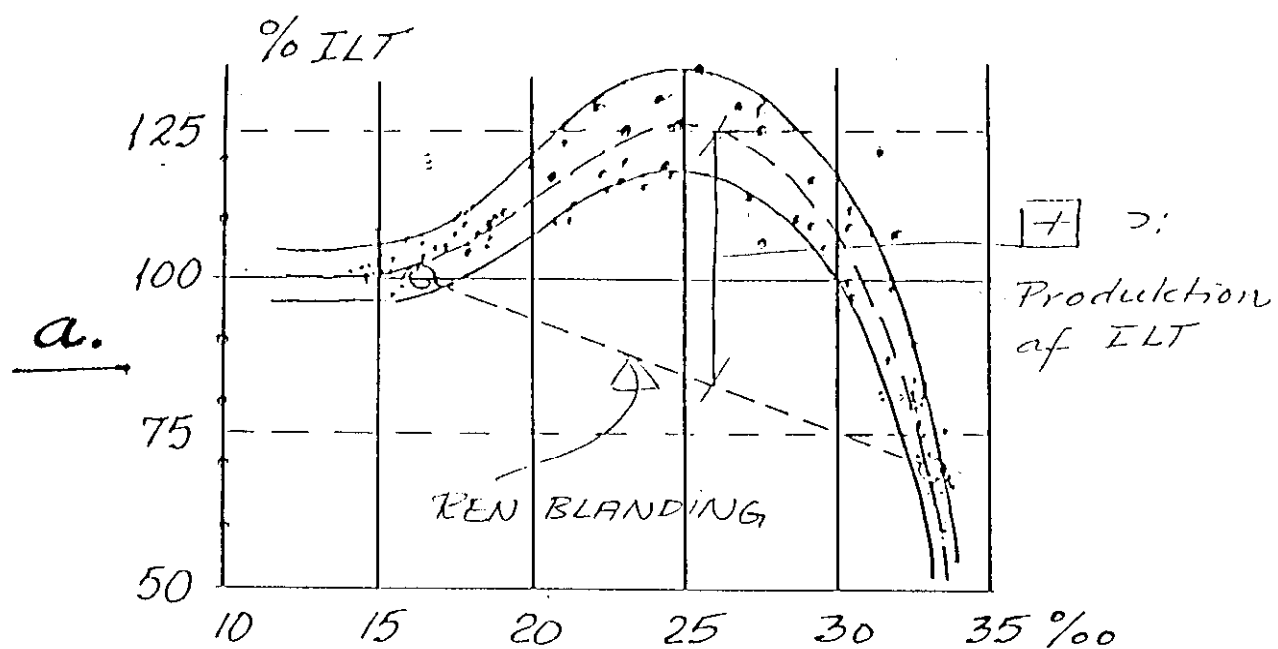
Tidslig variation i aktiviteten:

På Fig. 5 er optegnet de målte maksimalværdier af chlorophyll-a, fluorescence samt den dæmpning, som lyset udsættes for ved passagen gennem springlaget, se Fig. 7. De to første er enkeltobservationer taget i en meget kraftig gradient, og derfor behæftet med stor usikkerhed. Den sidste værdi repræsenterer integralet af hele den lysdæpende aktivitet i springlaget, og er derfor ikke så følsom over for målepositionen. Det er imidlertid bemærkelsesværdigt, at alle tre metoder giver samme generelle billede af den biologiske aktivitet, samt at der inden for meget korte tidsintervaller sker meget store variationer i værdierne. Denne variabilitet skyldes sandsynligvis, at biomassen optræder i skyer ("patches"), som advekteres frem og tilbage forbi målestedet, som foreslået af Thomas Kiørboe, DFH.

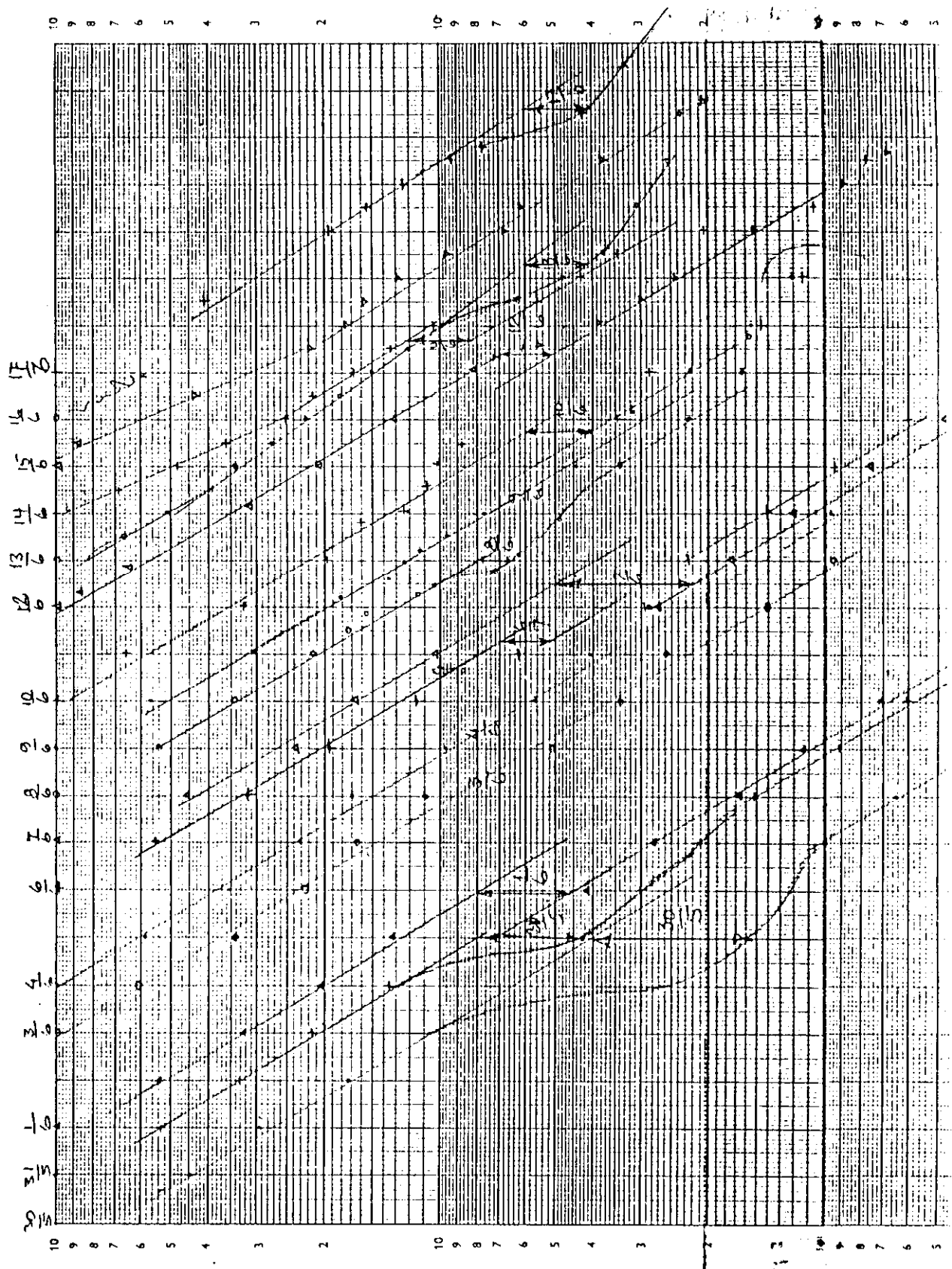
Ser vi på målebøjens registrerede hastigheder, forekommer der en vedvarende strømning i springlaget. Indtil videre vil det dog være uklogt at tillægge disse hastighedsmålinger for stor vægt, idet de ikke ser alt for troværdige ud.



Figur 2
Hastighed - Drogden [$Q \approx 10^5 v \text{ m}^3/\text{s}$]



Figur 6
Korrelationer til SALT
a) O₂ b) Temp. c) Nitrat



Figur 7
 Normaliseret lys som funktion af dybden.
 Normaliseret med lys ved 2 m.

Foreløbigt tryk. Marts 1989
Revideret. Juni 1990

HAVFORSKNINGSPROGRAM - 90

BØJEPROJEKTET

24. oktober - 10. november 1988

Generelt

Måleperioden var en karakteristisk efterårsperiode, med meget kraftige vinde, hovedsageligt fra den vestlige halvcirkel, dvs. at der i perioden primært har været indstrømning, afbrudt af kortvarige, mindre udstrømninger. Dette afspejles i følgende overordnede hændelser:

1. Kystjet-separation

24. oktober 1988.

Når vinden kommer fra ca. den østlige halvcirkel, er der en udstrømning og dermed en kystjet, der klæber op ad den svenske kyst. Hvis vinden pludselig skifter til den vestlige halvcirkel, vil strømretningen skifte til indstrømning, hvorved kyststrømmen mister sin geostrofe balance, d.v.s. den separerer fra kysten og passerer dermed hen forbi bøjestationen. På Fig. 1A ses den første passage at finde sted den 24. oktober affødt af vindskiftet fra den 21.-23. oktober, se Figur 1B, der viser vindens styrke og retning (pilene viser, hvorhen vinden blæser).

28. oktober 1988

Den næste markante passage af lettere udstrømmende vand kommer omkring den 28. oktober i forbindelse med vindskiftet fra den 26.-27. oktober. Denne hændelse er illustreret på forskellig vis:

Figur 1C indeholder den tidslige variation af det samlede saltindhold og temperaturindhold i vandsøjlen fra overfladen til 20 m dybde. Såfremt der kun skete en lokal blanding af vandmassen, ville det ikke ændre det samlede saltindhold, d.v.s. at denne strørrelse er uafhængig af vindens blandingseffekt. For at ændre det samlede saltindhold i vandsøjlen, skal der altså tilføres brakvand eller saltvand ved horisontal advektion. Denne graf indikerer altså tydeligt styrken af advektive transporter på bøjestationen. Det fremgår af Figur 1C, at der i perioden fra den 26.-30. oktober har været en passage af brakvand med kulmination den 28. oktober, hvor summen af saltindhold viser sit minimum i måleperioden. Det samlede temperaturindhold viser blot en generel faldende temperatur i overensstemmelse med årstiden.

På Figur 2A er der vist saltholdigheden og temperaturen som funktion af dybden for de tre dage: 26. -28. -30. oktober. På trods af den vindgenererede erosion, som bringer saltvand op i overfladelaget og dermed skulle øge saltholdigheden, så viser saltprofilen tydeligt, at der sker en sænkning af overfladelagets saltholdighed fra den 26.-28. oktober.

Det går omvendt fra den 28.-30. oktober. Nu er brakvandstilførslen aftagende, hvilket viser sig i, at det samlede saltindhold går tilbage til den værdi, det havde inden brakvandspassagen. Derved sker der en forstærkning af vindens blandingseffekt, idet vinden nu ikke mere skal blande så meget let vand ned i vandsøjlen. Dette forhold afspejles i salt- som temperaturprofilerne fra den 28.-30. oktober, hvoraf det fremgår, at forholdene er blevet mere homogene som følge af den svagere stabilisering.

7.-9./10. november 1988

Den 7. november og igen den 9./10. november ser vi på Figur 1C effekten af brakvandspassager, der giver anledning til en midlertidig sænkning af saltindholdet.

2. Vind-erosion

25.-29. oktober 1988.

Den første markante vinderosion i måleperioden starter den 26. oktober og varer i ca. 3 dage. På grund af brakvandspassagen på bøjestationen kan vinden ikke erodere ret dybt her, hvilket fremgår af Figur 1A, hvor der med stjerner er angivet til hvilken dybde, vinden har evnet at homogenisere det øverste lag. I den omtalte periode ses denne erosionsdybde at være maksimalt ca. 6 meter. Det samme billede viser Figur 2A, men det fremgår dog også af denne figur, at der er sket en generel sænkning af beliggenheden af den kraftigste gradient i såvel salt- som temperaturprofilerne, altså et sikkert tegn på vindgenereret medrivning. Da denne medrivning ikke kan ske lokalt - p.g.a den stadige tilførsel af et let beskyttende låg af brakvand - afspejler profilerne, at der på bøjestationen sker en advektiv tilførsel af vand, som er blevet skabt ved vindopblanding i nærheden. Fra det generelle billede af Kattegat ved vi, at stabiliteten af vandsøjlen mod vinderosion aftager ind mod midten af Kattegat, hvilket sandsynliggør, at vi skal ud midt i Kattegat for at finde oprindelsesstedet for det intruderende vand, der ses i forskellige niveauer i de viste profiler (Figur 2A). Nedenfor i afsnit 3 skal vi vise et meget smukt eksempel på målinger, som tilfældigvis har opfanget en sådan intrusion af vindopblandet vand.

Den konstante, men ubekendte horisontale tilførsel af såvel brakvand i overfladen som intrusionsvand i de dybere liggende lag, gør det totalt umuligt at beregne størrelsen af den vindgenererede medrivning på bøjestationen. Imidlertid er det måske også mere interessant at få et kvalificeret skøn på, hvad sammenhængen er af det intruderende vand, som må bestå af såvel næringsfattigt overfladevand som næringsrigt bundvand. Når vi i denne forbindelse taler om et skøn, skyldes det, at vi ikke har nogen måling af forholdene i det område, hvor det intruderende vand kommer fra, hvorfor vi som et kvalificeret skøn må antage et typisk saltprofil fra bøjestationen, ligesom vi må antage, at der på medrivningspositionen ikke sker nogen advektiv tilførsel af vand. Under disse forudsætninger kan vi udføre en analyse af medrivningsforholdene.

Beregning af medrivning

Fysisk baggrund

Den effekt vinden tilfører vandet, er proportional med vindens hastighed i tredje potens, nemlig kraften (forskydningsspændingen, der er proportional med vindens hastighed i anden potens) gange vejen per tidsenhed (hastigheden). Af denne tilførte effekt bruges ca. 5% til at øge den potentielle energi af vandsøjlen, hvilket sker ved medrivning og efterfølgende opblanding af tungt vand. En tidsserie af vindens hastighed i tredje potens er altså et mål for den løbende energi, der er til disposition for medrivning.

Når der er vindgenereret medrivning, sker der en homogenisering af det øverste lag, d.v.s. at det medrevne vand blandes totalt op i det øvre lag. Saltholdigheden af det øvre lag som funktion af den dybde, hvortil der er eroderet, er derfor en kendt funktion. Ligeledes kan man relativt nemt beregne den tilsvarende ændring i potentiel energi, som denne blandingsproces giver anledning til. Summeret op fra overfladen til en bestemt dybde vil denne vinding i potentiel energi være et mål for vandsøjlen stabilitet over for vindens eroderende kraft.

Matematisk formulering.

Ud fra massebevarelsesbetragtninger må vi have, at saltholdigheden af det øvre homogeniserede lag er lig med middelværdien af saltholdigheden i det oprindelige saltprofil, regnet fra vandspejlet til den aktuelle erosionsdybde. Resultatet af en sådan beregning er skitseret på Figur 3A, hvor der som eksempel er vist, hvordan det vinderoderede profil vil se ud, svarende til en erosionsdybde på 13 meter.

Den illustrerede flytning af salt fra det nederste skraverede områdes tyngdepunkt til det øverste skraverede områdes tyngdepunkt kræver en energitilførsel, idet der er sket en øgning af den potentielle energi ved denne flytning. Denne er defineret som

$$POT_{\Delta} = - \int_0^H \Delta \rho g z \, dz$$

hvor $\Delta \rho$ er massens afvigelse fra massen af ferskvand, d.v.s. at den er beregnet i forhold til et referencesystem med rent ferskvand. Da

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

Hydrografiske forhold i det sydlige Kattegat

Bøjeprojektets formål var at bestemme den tidslige og stedlige variation af plankton set i lyset af de hydrografiske forhold. Undersøgelserne foregik ved og omkring en bøjestation beliggende ca. 10 sømil VNV for Gilleleje. På baggrund af observationer tilgængelige i litteraturen suppleret med 4 intensive 2-ugers målinger fordelt jævnt over 1988 og 1989 gives en nøjere beskrivelse af det sydlige Kattegat, hvor der fokuseres på blanding, tæthedsstrømninger, intrusioner m.m.



Pris kr. 105,- inkl. 22% moms

ISBN nr. 87-503-9204-2

Miljøministeriet **Miljøstyrelsen**

Strandgade 29 · 1401 København K · Tlf 31 57 83 10