



EN OPERATIONELL OLJEDRIFTSMODELL  
FÖR NORRA ÖSTERSJÖN

av Cecilia Ambjörn, Tiina Luide,  
Anders Omstedt och Jonny Svensson



EN OPERATIONELL OLJEDRIFTSMODELL  
FÖR NORRA ÖSTERSJÖN

AN OPERATIONAL OIL DRIFT MODEL  
FOR THE NORTHERN BALTIC

av Cecilia Ambjörn, Tiina Luide,  
Anders Omstedt och Jonny Svensson

Programmeringsarbetet är utfört av Tiina Luide. Projektet leddes under 1980 av Ingemar Holmström. Björn Looström, Kustbevakningen, har varit till stor hjälp vid litteratursökning.

Kontinuerliga diskussioner har förts med en samrådsgrupp, bestående av Lars Thorell (SNV), Staffan Kvarnström (Kustbevakningen), Hans Stridh (Sjöfartsverket) och Ingvar Kaldén (Rikspolisstyrelsen).

Redigering och utskrift: Vera Kuylenstierna

Issuing Agency SMHI Box 923 S-601 19 NORRKÖPING SWEDEN	Report number RHO 29 (1981)	
Author (s) Cecilia Ambjörn, Tiina Luide, Anders Omstedt and Jonny Svensson	Report date June 1981	
Title (and Subtitle)  AN OPERATIONAL OIL DRIFT MODEL FOR THE NORTHERN BALTIC		
Abstract <p>A model for the forecasting of oil drift has been developed at the SMHI. The model describes the pollution on the surface by treating it as a large number of particles. These particles are transported by:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- the surface current driven directly by the wind</li> <li>- the background circulation driven by the inclination of the sea level</li> <li>- the turbulence of the sea.</li> </ul> <p>Usually the wind driven current is calculated by reducing the wind speed by a constant factor, the wind factor. Measurements show, however, that the wind factor varies with the state of the oil and also with the wind speed. An equation is derived where the velocity profile decreases logarithmically from the surface downwards and continuously transforms into an Ekman balance at a greater depth.</p> <p>The background circulation; the currents driven by the inclination of the sea level, will be calculated by a separate vertically integrated model. The model gives the currents in the Baltic.</p> <p>Every oil particle will also be exposed to a turbulent movement, which is calculated by random technics.</p> <p>The velocity of each oil-particle can be written as</p> $\mathbf{V} = \mathbf{V}_\tau + \mathbf{V}_B + \mathbf{V}'$ <p>where <math>\mathbf{V}_\tau</math> is the oil velocity depending on the wind, <math>\mathbf{V}_B</math> is the background circulation and <math>\mathbf{V}'</math> is the turbulent oil movement.</p> <p>It is important that this model be fast and easy to handle. At the same time, the results must be reliable and of good quality. The aim is to constantly have an effective "emergency forecasting program" ready to operate as soon as an accident occurs.</p>		
Key words Oil drift Numerical model Wind drift		
Supplementary notes	Number of pages 47	Language Swedish
ISSN and title  0347-2116 SMHI Reports Meteorology and Climatology		
Report available from:  Liber Grafiska AB/Förlagsorder S-162 89 STOCKHOLM SWEDEN		



## INNEHÅLLSFÖRTECKNING

	Sid.
1. Inledning	1
2. Modelluppbyggnad	4
3. Vindens transport av olja	7
4. Oljans horisontella spridning	16
5. Bakgrundsströmmens transport av olja	18
6. Några testfall	36
7. Sammanfattning och fortsatt utveckling	43
8. Referenser	46





## 1. INLEDNING

De senaste åren har Sveriges kuster drabbats av flera omfattande oljepåslag:

- I oktober 1977 grundstötte tankern Tsesis i infarten till Södertäljeleden och läckte ut c:a 1 000 ton brännolja i skärgården.
- Under hösten 1978 drabbades Bohusläns skärgård norr om Lysekil av ett kraftigt oljepåslag, vars ursprung inte har kunnat fastställas.
- Under vårvintern 1979 träffades Stockholms skärgård av oljan från den utanför Ventspils grundstöta tankern Antonio Gramsci. Detta oljespill, som bestod av råolja, var antagligen det största, som inträffat i Östersjön över huvud taget och som berört svenska farvatten.
- Under vintern 1980/81 har oljeskadad fågel och mindre mängder olja ånyo drabbat Bohuslän.
- Vid Dalarö grundstötte den sovjetiska tankern José Marti vintern 1980/81.

Jordbruksdepartementet har uppdragit åt SMHI att i samråd med Generaltullstyrelsen, Statens Naturvårdsverk, Rikspolisstyrelsen och Sjöfartsverket utveckla prognoser för oljans drift på vattenytan såsom ett hjälpmedel för oljeskyddsarbetet vid en olycka. Efter en genomgång av redan existerande sådana prognosmodeller kan SMHI nu presentera en prognosmetod, som förutom de egna erfarenheterna också utnyttjar arbeten i andra länder. Stor vikt har lagts vid att prognosen snabbt skall finnas tillgänglig på olycksplatsen samt att resultatet skall kunna presenteras på ett enkelt sätt i form av kartor.

Innan man tar ställning till vad man skall göra åt ett oljeutsläpp i havet, är det viktigt att ta reda på vad som händer med oljan, om den lämnas åt sitt öde.

Under inverkan av vind och vågor sprider sig oljan och bildar ett mycket tunt skikt. De ämnen i oljan, som är flyktigast (har lägst kokpunkt) försvinner till stor del till luften, och en liten del av dem löser sig i vattnet. Om den utsläppta oljan är en råolja och alltså innehåller en stor andel lättflyktiga ämnen, kan 20 procent eller mer försvinna på detta sätt.

Under inverkan av solljuset och syret i luften kommer en del av oljan att oxideras till ämnen, som löser sig i vattnet.

Om oljan är trögflytande, kan vind och vågor komma att pressa in mycket vatten i den (upp till 70 - 80 procent), innan den hunnit spridas till ett tunnare lager. Vad som då uppkommer är en tjock kladdig massa, som brukar kallas för "chokladmousse". Nedbrytning av denna form av olja genom solljus, bakterier m.m. går mycket långsamt. Genom att vattenhalten så småningom minskar och även vissa andra förändringar sker på ytan av denna "chokladmousse" bildas hårdare, tjärliknande klumpar. Det är dessa klumpar, som vanligen driver iland, och som många av oss har träffat på längs våra badstränder. Inuti dessa klumpar kan oljan vara ganska oförändrad under lång tid.

Ett tunt oljeskikt på havsytan kommer att brytas sönder i mindre droppar, som sprids i vattnet. Detta är en emulsion, och oljan är vanligen osynlig för ögat. Genom finfördelning i en stor mängd små droppar har oljan nu fått en stor kontaktyta emot vattnet. Detta underlättar arbetet för de fortsatta processerna. De mest betydelsefulla är konsumtion och spridning genom planktonorganismer, vidhäftning till tyngre partiklar samt bakteriell nedbrytning.

När ett oljeutsläpp inträffar, kräver planläggningen och genomförandet av skyddsåtgärder tillgång till prognoser för oljans rörelser på vattenytan under de närmaste timmarna/dygnet.

Oljedriftsprognoser diskuteras i utredningen om miljörisker vid sjötransporter (SOU 1979:43) samt i STUs programutredning angående bekämpning och sanering av oljor och kemikalier. Båda utredningarna konstaterar, att det är väsentligt att kunna förutsäga väder, vind och strömförhållanden kring ett utsläpp. I STUs utredning konstateras, *"att viktig bas-kunskap många gånger saknas"*. *"Som exempel kan nämnas oljans rörelser i vattenmassan"*. I SOU -79:43 heter det: *"Jag anser det väsentligt för oljebekämpningsarbetet, att en god prognosberedskap för att förutsäga spridningen av oljor och kemikalier finns. Enligt Östersjö-konventionen bör dessutom kuststaterna hålla varandra underrättade om vart löskommen olja driver. Vår förmåga att uppfylla detta krav är inte tillräcklig. Jag anser därför att resurser bör tillföras SMHI för att utveckla spridningsmodeller och upprätta en katalog med förberedda spridningsprognoser för vissa vattenområden."*

Flera modeller, som simulerar oljedrift, har utvecklats i olika länder. En genomgång av sådana modeller har gjorts i USA, Stolzenbach (1977) och Norge, Audunson (1978). I Norge har man med anledning av oljeutvinningen i Nordsjön utvecklat oljedriftmodeller. Utifrån dessa kan man beräkna risken för att ett stort utsläpp i Nordsjön skall förorena kusterna, Audunson, (1977). SMHI har sedan länge samarbetat med flera norska forskningsinstitut angående oljedriftprognoser. SMHI har också med en norsk modell beräknat risken för att ett oljeutsläpp från Nordsjön skall nå svenska västkusten, Holmström (1979).

I de norska oljedriftberäkningarna för Nordsjön används vindstatistik eller historiska vädersituationer som ingångsvärden. Denna typ av beräkningar för riskbedömning går inte direkt att använda som prognosinstrument. En prognosmodell måste på ett effektivt sätt vara kopplad till väderprognoserna. SMHI har därför med utgångspunkt från de utländska arbetena utvecklat en oljedriftmodell, som direkt ansluter till väderprognoserna.

## 2. MODELLUPPBYGGNAD

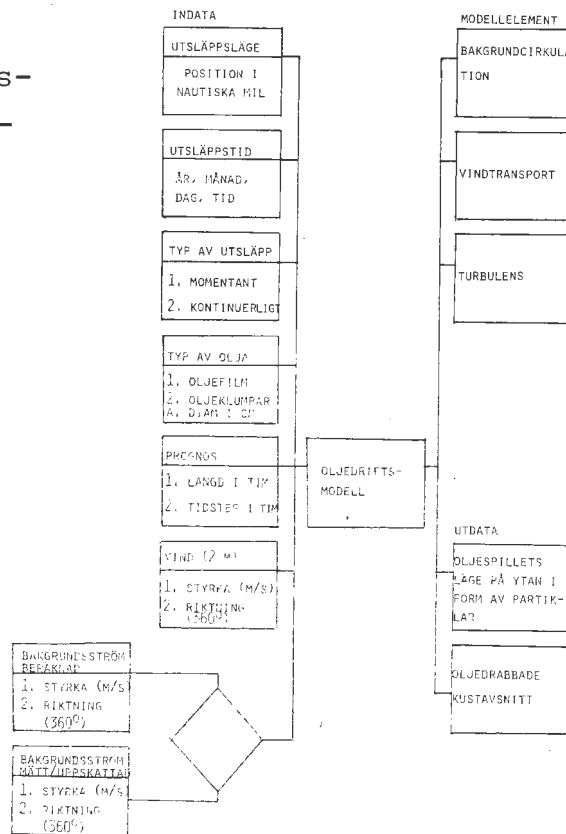
Oljedriftsmodellen är en Lagrangiansk modell. Det betyder, att den beskriver oljans bana genom att vid varje tidpunkt visa var oljan är. Modellen följer olja på havsytan genom att behandla föroreningen som ett stort antal icke lösbara partiklar. Utsläppet kan antingen vara kontinuerligt, som t.ex. från ett läckande fartyg, eller momentant, som t.ex. då en oljeförorening observerats och ingen ny olja tillföres. Uppbyggnaden av modellen visas schematiskt i figur 1.

Oljans hastighet ( $W_o$ ) beräknas såsom summan av vindens transport ( $W_\tau$ ), bakgrundsströmmens transport ( $W_B$ ) och turbulensens transport ( $W'$ )

$$W_o = W_\tau + W_B + W'$$

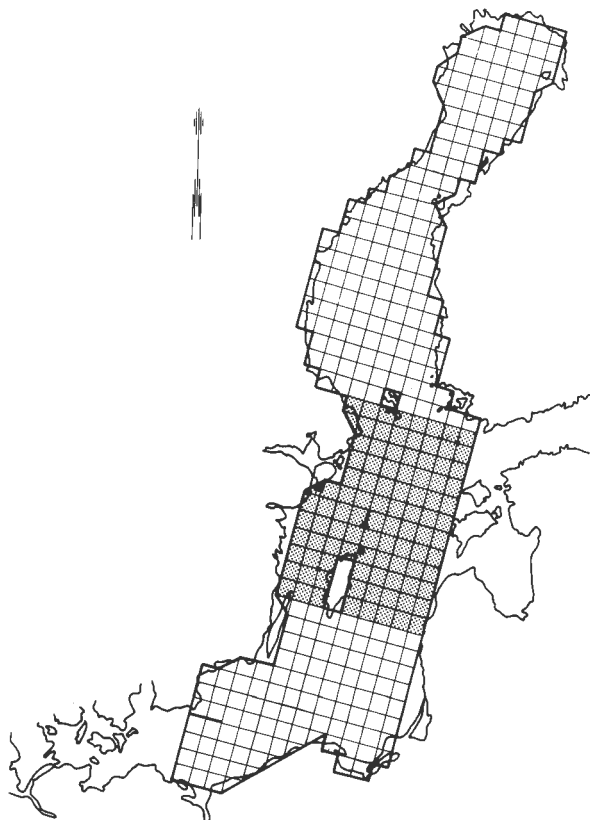
Den vinddrivna oljetransporten beräknas enligt en logaritmisk Ekman-metod, bakgrundsströmmen med en enlayers tidsberoende strömmmodell och turbulensen enligt en slumpstalsteknik. Dessa olika delar diskuteras närmare i följande kapitel.

Figur 1. Oljedriftsmodellens principiella formulering.



The oil drift model's principle formulation.

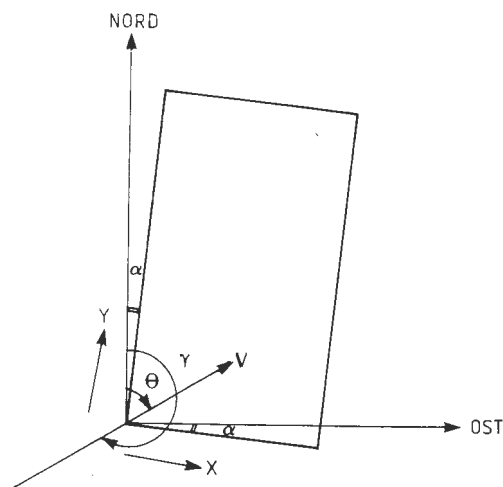
Oljans drift beräknas för närvarande i ett begränsat område i egentliga Östersjön, vilket visas i figur 2. Utvidgning av modellen till Bottniska viken och hela egentliga Östersjön samt Skagerack - Kattegatt är planerad.



Figur 2. Beräkningsnät för oljedriftsmodellen. Beräkningar utföres för närvarande inom det skuggade området.  
Grid net for the oil drift model. Calculations are presently only being done in the screened area.

Då beräkningsnätet av utrymmesskäl är vridet  $\alpha^\circ$  och vind- och strömriktning definieras från nord, där vindens riktning är ifrån det håll det blåser, medan strömmens riktning är åt det håll det strömmar, måste både vind- och strömriktning anpassas till beräkningsnätet, se figur 3. Om  $\theta$  är strömmens riktning i förhållande till nord, så är vinkeln mellan strömmen och beräkningsnätets x-axel  $90 - (\theta - \alpha)$  och om  $\gamma^\circ$  är vindens riktning i förhållande till nord, blir motsvarande vinkel mellan vind och beräkningsnätets x-axel  $90 - (\gamma - 180 - \alpha)$ .

Dessa vinkelvridningar utföres automatiskt i modellen, varför vind och strömriktning kan läsas in enligt traditionella regler.



Figur 3. Definition av vind och strömriktning.

Definition of wind and current direction.

För att möjliggöra en flexibel användning av modellen läses ingångsdata in via datorterminal genom att vakthavande personal besvarar frågor, som automatiskt kommer upp på en skärm efter det att modellen startats upp. I figur 4 visas dessa terminalfrågor.

Du är nu i oljeprognosprogrammet

- P1. VAR HAR UTSLÄPPE SKETT? ANGE X OCH Y-KOORDINAT I NM
- P2. ANGE SKALFAKTOR
- P3. ÄR UTSLÄPPE KONTINUERLIGT?
- P4. ANGE PROGNOSSLÄNGD I TIMMAR
- P5. ANGE TIDSTEG I TIMMAR
- P6. ANGE VINDSTYRKA I M/S OCH VINDRIKTNING I GRADER VID TIDEN = ?
- P7. BESTÅR OLJAN AV OLJEKLUMPAR VID TIDEN = ?
- P8. HUR DJUPT LIGGER OLJEKLUMPARNA, SORT I CM?
- P9. VILL DU VEJA MODELLBERÄKNAD BAKGRUNDSSTRÖM VID TIDEN = ?
- P10. VAR? ANGE X OCH Y-KOORDINAT I NM
- P11. VILL DU ÄNDRA MODELLBERÄKNAD BAKGRUNDSSTRÖM?
- P12. VAR? ANGE X OCH Y-KOORDINAT I NM
- P13. ANGE STRÖMSTYRKA I CM/S OCH STRÖMRIKTNING ÅT DET HÅLL STRÖMMEN GÅR I GRADER
- P14. ÄR DU NÖJD MED BAKGRUNDSSTRÖMMEN?
- P15. ÄR DU NÖJD MED OLJEPROGNOSEN?
- P16. VILL DU HA UTSKRIFT?

Figur 4. Datorterminalfrågor

Data terminal questions

Den tid det tar att utföra beräkningar över oljans drift har minskats ner avsevärt. Det har gjorts genom att vindström och turbulens beräknas i ett modellelement och bakgrundsströmmen i ett annat. Den vinddrivna oljetransporten behöver endast beräknas just där oljan befinner sig, medan bakgrundscirkulationen måste beräknas i hela havet.

### 3. VINDENS TRANSPORT AV OLJA

#### 3.1 Allmänt

Vindens direkta friktion mot den förorenade havsytan påverkar oljans transport betydligt. För att beräkna denna vinddrivna transport har man studerat ytströmmars variation med vind i ett flertal experiment genom att låta olika typer av föremål driva i havets övre skikt. Det vanligaste sättet att presentera resultaten från dessa experiment är att dividera föremålets hastighet med vindhastigheten, mätt på en viss nivå, samt jämföra föremålets drifriktning med vindens riktning. På så sätt erhålls den så kallade vindfaktorn respektive vindvinkeln. Värdena hos dessa uppvisar ofta relativt stora spridningar. Stolzenbach (1977) redogör för rapporterade vindfaktorer mellan (0.8 - 5.8)% och vindvinklar från  $0^{\circ}$  till åtminstone  $45^{\circ}$ .

Flera oljedriftsmodeller utnyttjar trots detta en konstant vindfaktor och vindvinkel vid beräkning av den vinddrivna oljetransporten. I den norska modellen SLIK FORECAST, Audunson et al. (1980), sätts vindfaktorn till 2.7 % och vindvinkeln till  $12^{\circ}$  till höger om vinden, vilken mäts på 10 meters höjd över havsytan.

Att antaga ett konstant förhållande mellan vind och flytande föremål är en stark förenkling. Flera faktorer, såsom hur djupt föremålet ligger, hur starkt det blåser och hur

grunt havet är, påverkar föremålets hastighet. Variationer i dessa faktorer bör därför delvis kunna förklara den relativt stora spridningen i experimentella data, som rapporterats i litteraturen.

I stället för att utgå från ett konstant förhållande mellan vind och oljedrift utvecklas därför nedan en teori för vindens transport av olja, där hänsyn tas till att oljefilm och oljeklumpar tränger olika djupt ner i havet, att vindström i grunda havsområden reduceras och vrids, samt att vindens styrka förändrar det turbulenta utbytet i havets ytskikt.

### 3.2 Teori

För att beräkna hur vinden transporterar olja utgår vi först från en icke förorenad havsyta och härleder ytströmmens variation i vertikal led. Närmast ytan antas, att hastighetsprofilen är logaritmisk och kontinuerligt övergår i ett Ekman-skikt på större djup. Ekvationerna för dessa gränsskikt kan skrivas

$$\frac{\partial}{\partial Z} (v_T \frac{\partial W}{\partial Z} \tau) = 0 \quad Z_0 \leq Z \leq h \quad (1)$$

$$i \cdot f \cdot W_\tau = v_T \frac{\partial^2 W_\tau}{\partial Z^2} \quad h < Z \leq H \quad (2)$$

där  $W_\tau$  är den vinddrivna strömmen,  $v_T$  är den turbulenta utbyteskoefficienten,  $f$  är coriolisparametern,  $Z_0$  är skrovlighetsparametern,  $h$  är logaritmiska gränsskiktetsdjupet,  $H$  är bottendjupet och  $i$  är det komplexa talet  $(0, -1)$ .

Den turbulenta utbyteskoefficienten  $v_T$  antas vara vertikalberoende och öka linjärt från havsytan ner till logaritmiska skiktets undre gräns, där den antar ett konstant värde, d.v.s.

$$v_T = \begin{cases} \kappa U_*^w Z & Z_0 \leq Z \leq h \\ \kappa U_*^w h & h < Z \leq H \end{cases} \quad (3)$$



$\kappa$  är von Karmans konstant och  $U_{\star}^W$  är friktionshastigheten i vatten.

Beräknas den turbulenta utbyteskoefficienten på djupet  $h$  enligt Svensson (1979) såsom

$$v_T = 0.026 U_{\star}^W{}^2 / f \quad (4)$$

kan det logaritmiska skiktdjupet beräknas enligt

$$h = 0.026 U_{\star}^W / (f\kappa) \quad (5)$$

Randvillkoren för vindströmmen är att den antar en ytströmshastighet  $v_T(z_0)$  närmast ytan och att den är försumbar närmast botten. I ett fullt utvecklat turbulent flöde kan enligt Bye (1965) ytströmshastigheten  $v_T(z_0)$  anses vara proportionell mot friktionshastigheten i vatten, där proportionalitetskoefficienten ( $\alpha$ ) antar värden mellan 20 och 25.

För att föra samman lösningarna från logaritmiska ekvationen (1) och Ekmanekvationen (2) antar man att hastigheterna samt hastighetsgradienterna är kontinuerliga på djupet  $h$ . Lösningen för den icke förorenade vindströmmen i ett hav med begränsat djup blir med dessa antaganden

$$v(z) = \alpha U_{\star}^W \left\{ 1 - \frac{\frac{if}{\sqrt{v_T}} \ln z/z_0}{\tanh \frac{if}{\sqrt{v_T}} (H-h) + h \frac{if}{\sqrt{v_T}} \ln h/z_0} \right. \quad (6)$$

där  $v_T$  och  $h$  beräknas från ekvation (4) och (5).

För en oljeförorenad havsyta antas att samma hastighetsprofil gäller och att efterfrågad vindström bestäms av oljeklumparnas vertikala utbredning. Oljefilmens hastighet antas vara proportionell mot friktionshastigheten i vatten och riktad i vindens riktning. Med dessa antaganden och med oljeklumparnas vertikala utbredning ( $D$ ) viktade enligt Bye (1965) kan ekvationen (6) skrivas

$$W_{\tau}(D) = \alpha U_{\star}^w \frac{V^a}{|V^a|} \left\{ 1 - \frac{h \sqrt{\frac{\tau^a}{\rho^w}} \ln((Z_o + 0.2725D)/Z_o)}{\tanh \sqrt{\frac{\tau^a}{\rho^w}} (H-h) + h \sqrt{\frac{\tau^a}{\rho^w}} \ln(h/Z_o)} \right\} \quad (7)$$

där  $W_{\tau}(D)$  är den vinddrivna transporten av olja, som tränger ner till djupet  $D$  i ytskiktet, och  $V^a$  är vindhastigheten. Oljefilmens hastighet utgör enligt ekvation (7) den största hastighet olja kan få. Från ekvation (7) noteras även, att Ekmanskiktets högervridande effekt bara kommer in då  $D$  ej är försumbart och att ytfilmens hastighet är oberoende av botten djupet.

Från definitionen av friktionshastighet och med antagandet om att friktionskrafterna mellan vatten-olja och olja-luft är lika kan friktionshastigheten beräknas enligt

$$U_{\star}^w = \sqrt{\frac{\tau^a}{\rho^w}} \quad \text{där} \quad \tau^a = \rho^a C_d V^a{}^2 \quad (8)$$

$\tau^a$  är vindfriktionskraften per ytenhet,  $\rho^a$  är luftens densitet,  $\rho^w$  vattnets densitet och  $C_d$  friktionskoefficienten mellan olja och luft.

Mätningar över icke förorenade havsytor, Phillips (1977), visar att friktionskoefficienten ej är en konstant utan blir större vid icke turbulenta flöden, vilket är fallet när vinden är svag. Dessutom gäller att för höga vindhastigheter ökar friktionskoefficienten, vilket beror på att vindvågornas storlek ökar och därmed skrovlighetsparametern.

För en oljeförorenad havsyta dämpas vågorna, varför skrovlighetsparameterns ökning med vinden och därmed friktionskoefficientens ökning med vinden reduceras.

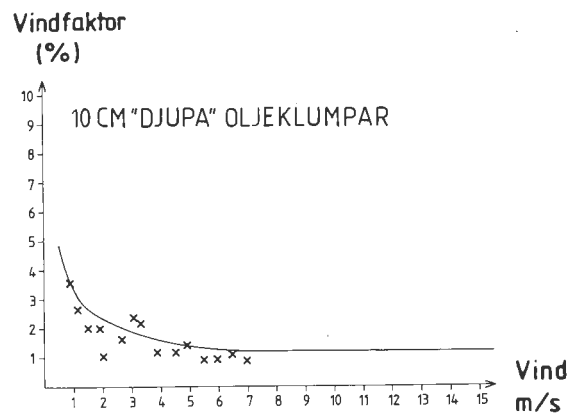
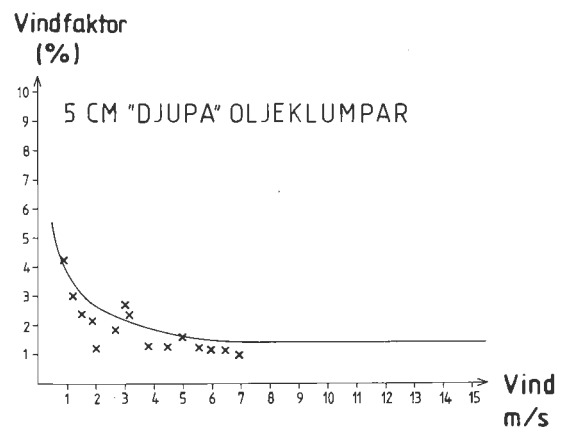
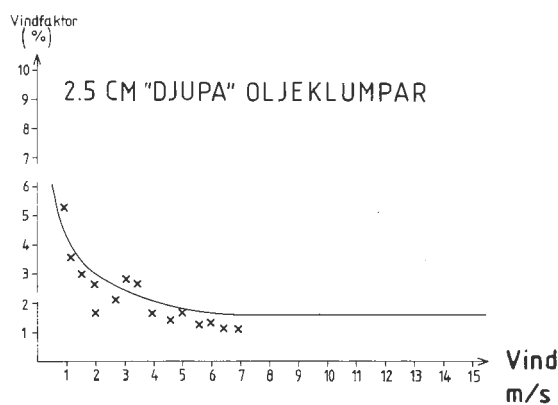
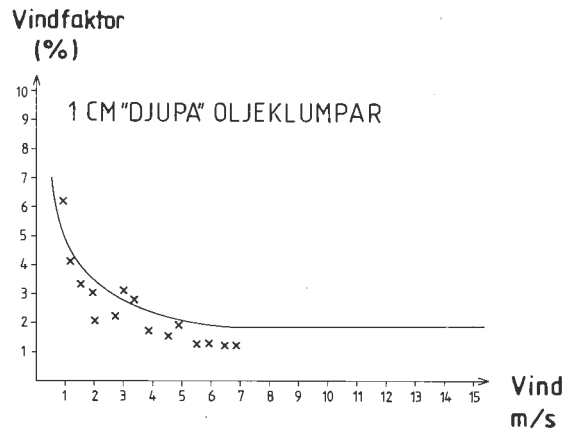
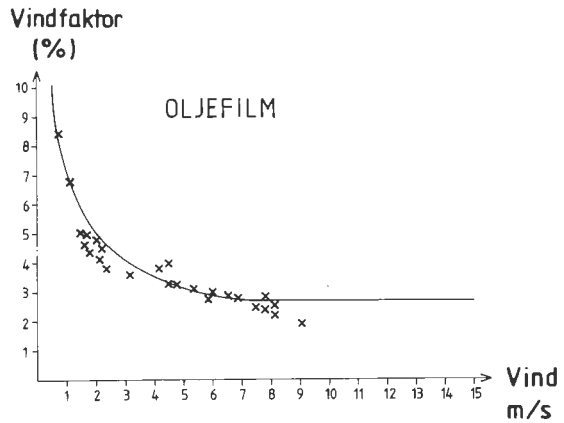
### 3.3 Beräkнад och mätt vindtransport

En mätserie på hur strömmen varierar på olika djup närmast havsytan vid olika vindstyrkor har utförts av SMHI. Genom att följa oljefläckar och små strömkors av varierande vertikalutbredning observerades dels att vindfaktorn systematiskt varierade med avseende på vindstyrka och dels med avseende på det flytande föremålets vertikala utbredning. I samtliga fall observerades ingen vinkelskillnad mellan drivande föremål och vinden. Vinden mättes på 2 meters höjd över havsytan och viken där mätningarna utfördes var c:a 3 meter djup. Normalt jämförs vindfaktorer med vind mätt från den standardmeteorologiska höjden 10 meter. I denna rapport redovisas enbart värden, där vinden avses mätas på 2 meters höjd över havsytan. Ett samband mellan vindfaktorer med vindar mätta från 10 respektive 2 meter ges genom logaritmiska vindlagen enligt

$$\frac{|V_0|}{|V_{10}|} = \frac{|W_0|}{|W_2|} \frac{\ln 2/z_0}{\ln 10/z_0}$$

där  $z_0$  är skrovlighetsparametern för olja-luft. För ett värde på skrovlighetsparametern av  $10^{-4}$  meter skall därför vindfaktorer, som används när vinden är mätt på 2 meter multipliceras med en faktor 0.86 för att vara jämförbara med motsvarande värden, då vinden är mätt på 10 meters höjd.

För oljefilm som enligt ekvation (7) är djupoberoende och går i vindens riktning jämförs beräknade vindfaktorer med uppmätta i figur 5. Det stora vindberoendet i vindfaktorn, som observerats experimentellt, simuleras genom att man låter vindfriktionskoefficienten för låga vindar kraftigt öka, se tabell 1 nedan. Detta kan delvis motiveras av att flödet inte är turbulent men beror också troligen på att i beräkningarna antagits en konstant proportionalitets koefficient ( $\alpha$ ), något som enbart gäller för turbulenta flöden.



Figur 5. Jämförelse mellan uppmätta (x) och beräknade (-) vindfaktorer. Vindmätningar från 2 meters höjd och driftmätningar på 3 meter djupt vatten.

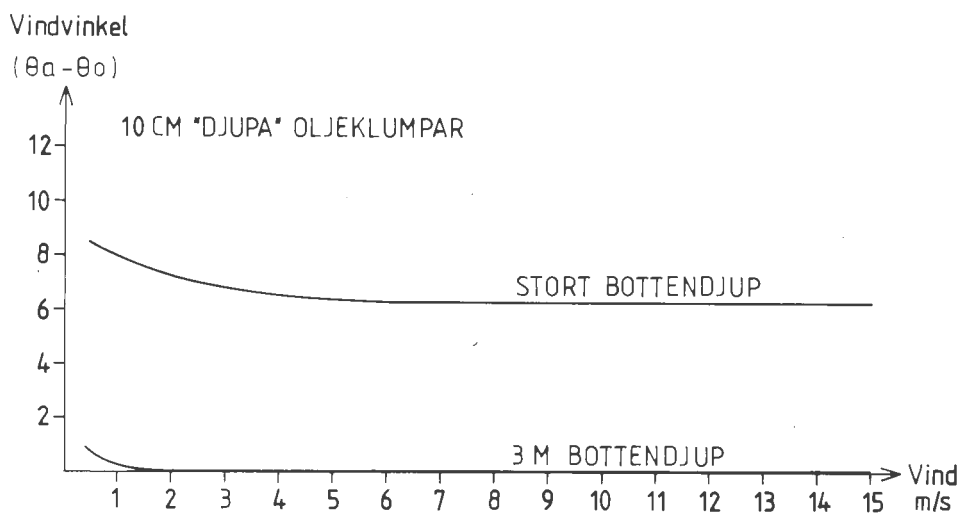
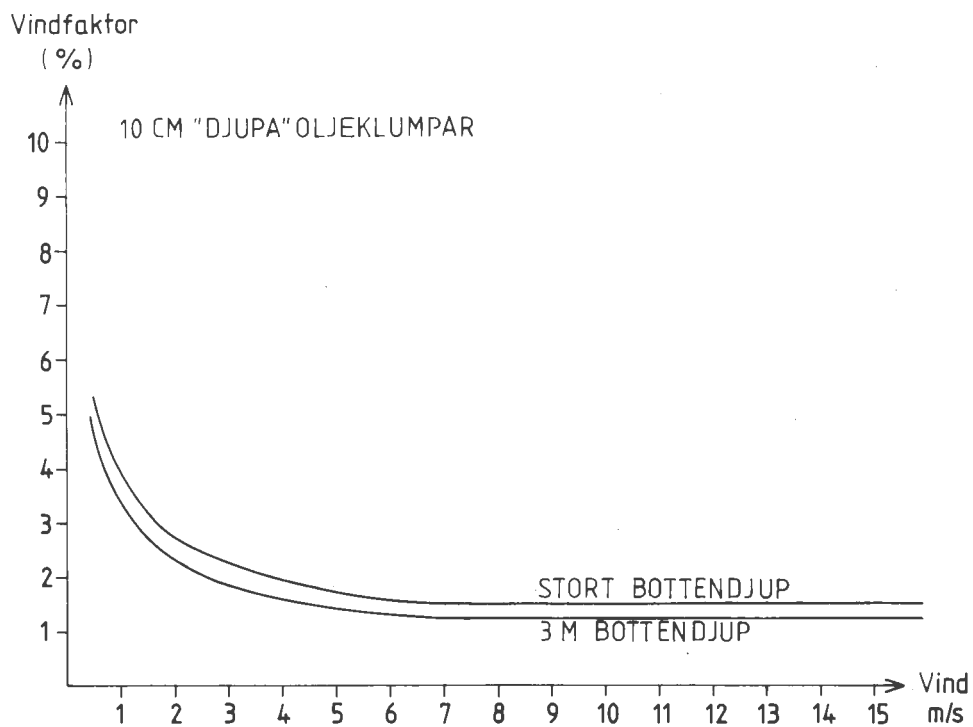
Comparison between measured (x) and calculated (-) wind factors. Wind measurements from 2 meters height and drift measurements in 3-meter deep water.

Den vinddrivna transporten av oljeklumpar, vars vertikala utbredning är 1, 2.5, 5 och 10 cm, beräknas på motsvarande sätt och i figurerna på föregående sida jämförs teoretiskt beräknade värden med experimentella data. Från figurerna observeras en god överensstämmelse, dessutom noteras dels att vindfaktorn ökar för svaga vindar och dels att vindfaktorn reduceras, när oljans vertikala utbredning ökar.

I ett klassiskt arbete av Ekman (1905) härleddes vindströmmens högervridning för ett hav med stort djup till  $45^\circ$ . I samma artikel visade Ekman också, att då vattendjupet minskar, avtar denna vindvinkel och för riktigt grunda vatten transporteras ytströmmen i vindens riktning. En annan viktig faktor för vindvinkeln är vilka antaganden, som görs för den turbulenta utbyteskoefficienten. Ekman (1905) antog, att denna koefficient var konstant. Senare arbeten har prövat utbyteskoefficienter, som varierar vertikalt och Madsen (1977) har uppskattat ytströmmens vindvinkel till c:a  $10^\circ$ , då turbulenta utbyteskoefficienten ökar linjärt närmast havsytan.

I ekvation (7) tas hänsyn till dessa två effekter, d.v.s. dels djupets betydelse för ytströmmen och dels att det är lämpligare med utbyteskoefficienter, som ökar linjärt närmast havsytan.

Då SMHIs mätserie utfördes i en relativt grund vik, observerades ingen högervridning. För att illustrera betydelsen av djupet jämförs beräknade vindvinklar och vindfaktorer för ett 3 meter djupt och ett mycket djupt hav i figur 6. Från figuren ses att djupet reducerar vindfaktorn och minskar vindvinkeln till att vara helt försumbar.

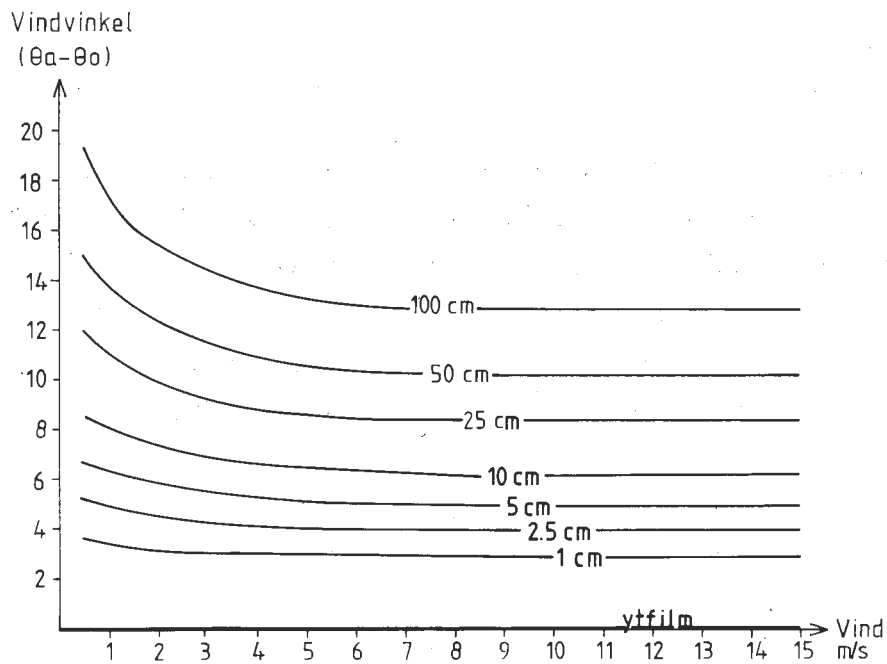
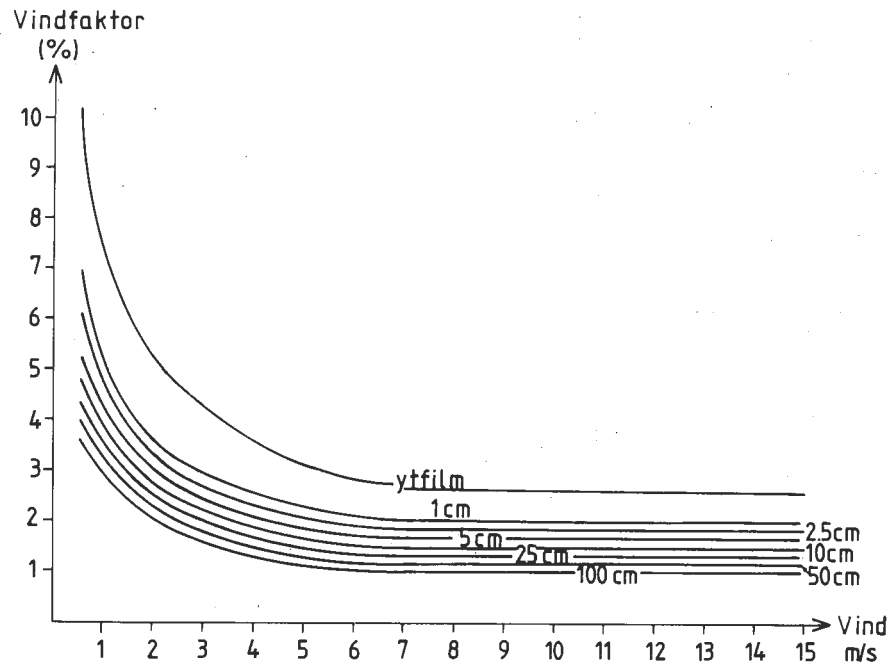


Figur 6. Illustration av djupets inverkan på vindfaktor och vindvinkel.

Illustration of the depth influence on the wind factor and the drift angle.

Den teoretiskt beräknade vinddriften av olja illustreras slutligen i figur 7, där beräkningarna är utförda för ett djupt hav och för olja med olika vertikala utbredningar.

Man noterar åter, att vindfaktorn är större för olja med liten vertikal utbredning, och att vindvinkeln ökar, då vertikala utbredningen hos oljan ökar.



Figur 7. Vindfaktorn och vindvinkeln för olja med olika vertikala utbredningar i ett djupt hav.  
The wind factor and drift angle for oil with different vertical extensions in a deep sea.

Tabell 1

KONSTANT	VÄRDE	ENHET
$\rho^a$ = luftens densitet	1.3	kg m <sup>-3</sup>
$\rho^w$ = vattnets densitet	1005	kg m <sup>-3</sup>
$f$ = Coriolis parameter	$1.3 \cdot 10^{-4}$	s <sup>-1</sup>
$\kappa$ = von Karmans konstant	0.4	-
$Z_0$ = skrovlighetsparam.	$10^{-4}$	m
$\alpha$ = proportionalitets- koefficient	20	-
$C_D$ = friktionskoeffi- cient	$\begin{cases} \frac{10^{-2}}{ v^a } & \text{för }  v^a  \leq 7 \text{ m/s} \\ 1.4 \cdot 10^{-3} & \text{för }  v^a  > 7 \text{ m/s} \end{cases}$	-

### 3.4 Modellekvationer

I oljedriftsmodellen löses den vinddrivna oljetransporten enligt ekvation (7). Det turbulenta utbytet och logaritmiska skiktdjupet beräknas enligt ekvation (4) och (5) och friktionshastigheten i vattnet enligt ekvation (8). Effekten av djupet försummas för närvarande, och havet betraktas som 50 meter djupt. Konstanterna beräknas enligt tabell 1.

### 4. OLJANS HORISONTELLA SPRIDNING

I många geofysiska sammanhang brukar man dela upp hastigheten dels i en medelhastighet och dels i en turbulent hastighet. Oljans rörelsehastighet delas upp på motsvarande sätt, där medelhastigheten beräknas ur den oljetransport, som drivs av vind och bakgrundsström, och där tur-



bulenta hastigheten beräknas med hjälp av slumpstalsteknik. Den turbulenta oljedriftshastigheten ( $W'$ ) skrivs såsom

$$W' = \text{Random} (-P, P)$$

där Random är en rektangelfördelad slumpstalsfunktion, som slumpmässigt beräknar turbulenta hastigheter i intervallet  $-P$  och  $P$ . Enligt Bork (1977) kan den turbulenta skalan  $P$  relateras till den horisontella turbulenta diffusionskoefficienten  $A$  enligt

$$P = \sqrt{\frac{6A}{\Delta t}}$$

där  $\Delta t$  är tidsteget i programmet. Realistiska värden, enligt Bork, på den horisontella turbulenta diffusionskoefficienten är att den bör vara mindre än  $100 \text{ m}^2/\text{s}$ . För ett tidsteg på 600 sekunder betyder det att den turbulenta hastigheten är mindre än  $1 \text{ m/s}$ .

Den horisontella spridningen av olja på havsytan orsakas förutom av den naturliga turbulensen i havet av att oljan i sig själv sprids ut på grund av gravitation och ytspänning. Denna egenspridning sprider oljan till ett relativt tunt skikt och är mest avgörande i begynnelsefasen av utsläppet. Direkta observationer över oljefläckars spridning, Audunson (1980), visar att oljans horisontella spridning väl faller inom förväntade värden för den naturliga turbulensen, varför oljans spridning redan efter några timmar tycks i huvudsak domineras av den naturliga turbulensen i havets ytskikt. Valet av den turbulenta diffusionskoefficientens storlek är dock i verkligheten en gissning, men bör väljas så, att den maximala turbulenta hastigheten ligger i intervallet  $0.1$  till  $1 \text{ m/s}$ .

## 5. BAKGRUNDSSTRÖMMENS TRANSPORT AV OLJA

### 5.1 Allmänt

När man avser att använda modellen för prognoser vid katastrofutsläpp är det främsta målet att det går snabbt för datorn att utföra beräkningarna. Därför måste modellen göras lättillgänglig och oberoende av indata, som inte ständigt finns framme. Förenklingen i modellen måste göras så att beräkningstiden minskas ner. Dessutom måste så bra resultat som möjligt erhållas.

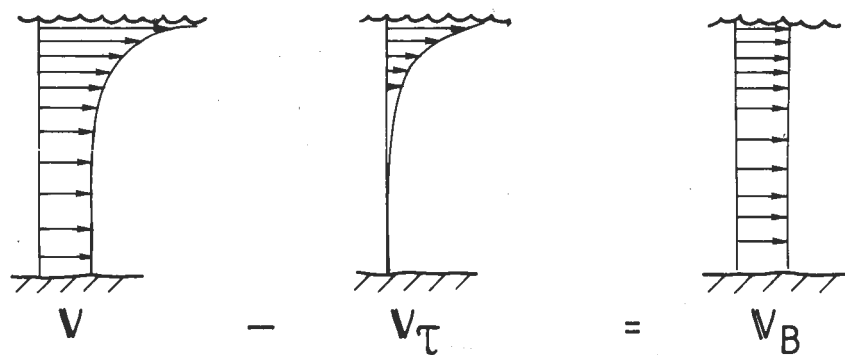
Den numeriska modell, som används i detta arbete, är utvecklad av T J Simons (1973). Den har bl.a. använts för de stora sjöarna i Nordamerika samt för Väneren.

Den storskaliga vattenståndsdrivna bakgrundsströmmen ( $V_B$ ) har, näst den lokala vindpåverkan, störst betydelse för oljans drift. I öppna havsområden kan denna simuleras med hjälp av en numerisk modell, som steg för steg beräknar strömmen på olika platser och för olika tidpunkter. Modellen är uppbyggd utifrån balans mellan de krafter, som verkar i havet och att den totala massan alltid måste vara konstant. Som indata används lufttrycksfältet vid havsytans nivå, ur vilket vinden beräknas.

Bakgrundsströmmen dör aldrig helt ut, även om det är nästan vindstilla. Det beror på att den främst är en följd av vattenytans lutning. Tyngdaccelerationen gör att vattenytan alltid strävar efter att inta ett jämviktsläge, och detta ger upphov till en returström. Genom tidigare vattenstånds-förändringar, skapade av vind och lufttryck, är en havsyta egentligen aldrig horisontell. Bakgrundsströmmens hastighet i Östersjön är av storleksordningen 0.1 m/s.

För att kunna beräkna bakgrundsströmmen i norra Östersjön måste man beräkna den för hela Östersjön, så att alla flöden

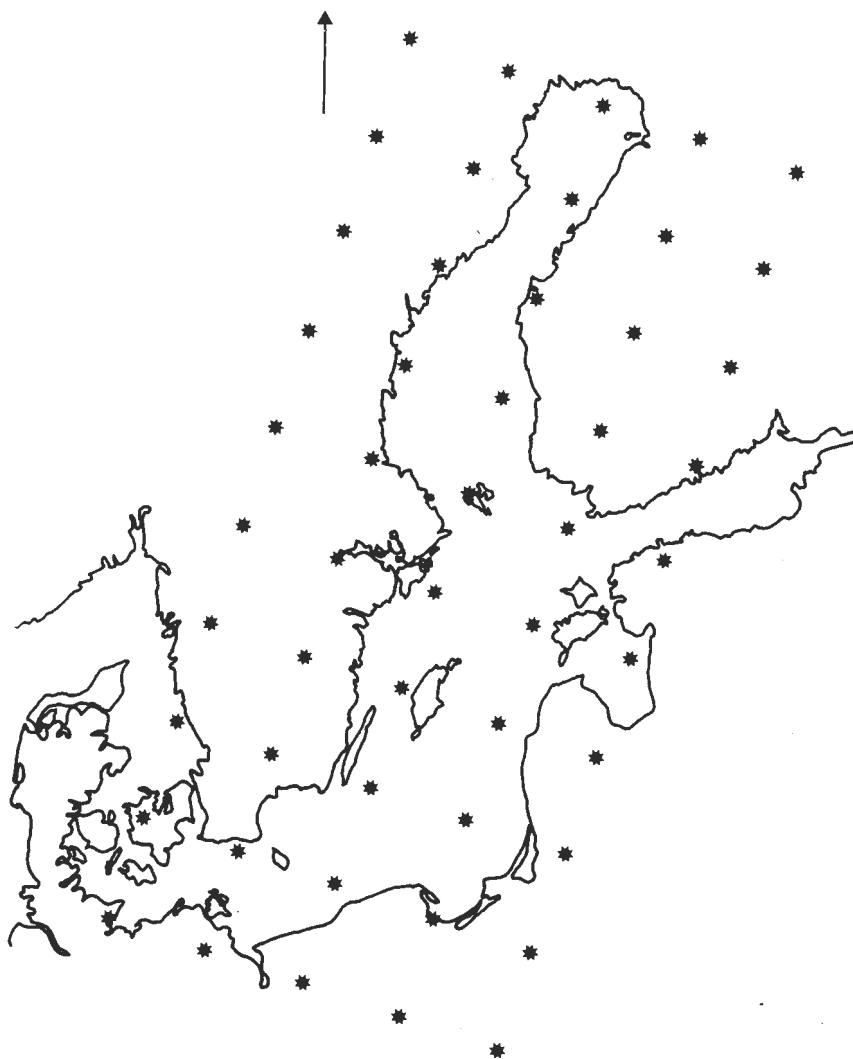
till och från norra Östersjön är kända. När strömmarna i hela Östersjön beräknas, utgör kusterna naturliga gränser, flödet via Öresund och Bälten samt tillskotten från floderna försummas. T J Simons (1976) har visat, att strömhasigheterna i södra Östersjön (t.ex. kring Bornholm) inte påverkas av att flödena via sunden försummas. Vid simulering av bakgrundsströmmen beräknas först den totala strömmen ( $V$ ), där alla externa krafter verkar. Därefter subtraheras den del ( $V_\tau$ ) av totala strömmen, som beror av den direkta vinden. Därvid erhålls den vattenståndsdrivna strömmen, som här benämns bakgrundsströmmen ( $V_B$ ).



Figur 8. Strömprofiler  
Current profiles

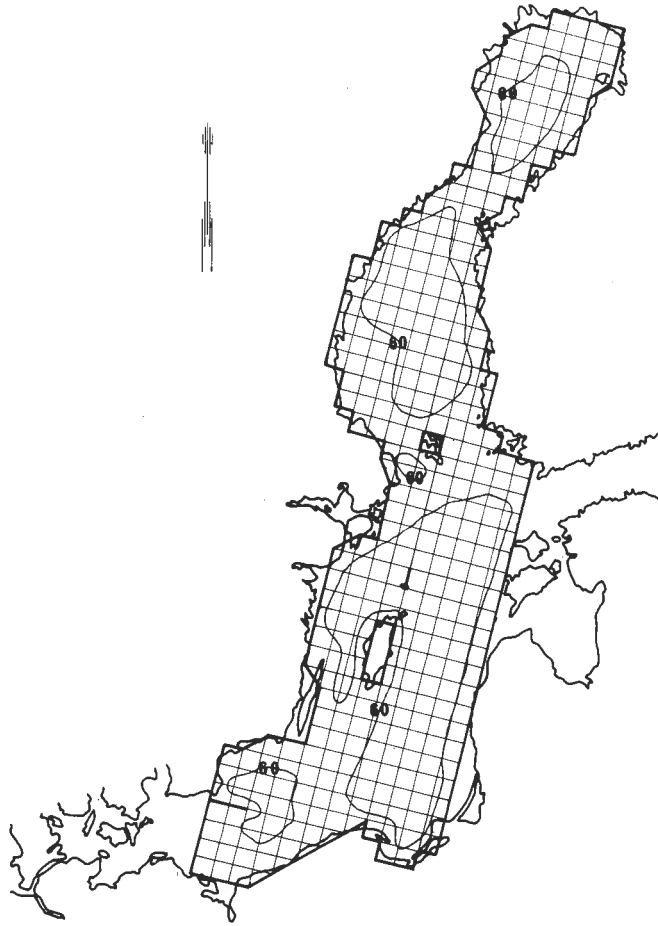
Den rent vinddrivna oljedriften och den horisontella turbulensen beräknas enligt kap. 3 - 4. Oljans totala förflyttning erhålles således genom addition av bakgrundsströmmen, vinddrivna oljedriften och turbulensen.

Strömprognosens längd styrs av lufttryckets prognoslängd. I dag beräknas detta för var 6:e timme och 5 dygn framåt i tiden. Information om lufttrycket erhålles var 15:e mil. Vinden beräknas ur lufttrycksfördelningen.



Figur 9. Punkter, i vilka information om lufttrycket erhålls.  
Points where air pressure information is given.

Alla beräkningar av strömmen görs i bestämda punkter. Ett rutnät anpassat till kustlinjerna är utlagt över Östersjön utom Finska Viken och Rigaviken. Varje rutas sida är 30 km. Sammanlagt erhålls närmare 300 rutor. I var och en av dessa beräknas strömmen var 15:e minut.



Figur 10. Kustkontur och gridnät med djupkonturen 60 m inlagd.  
Grid net and depth contour for 60 meters.

Bottentopografin i hela bassängen bestäms av ett för varje ruta representativt djup.

Strömmarna drivs och modifieras av ett antal olika krafter, där några har stor betydelse och andra kan försummas. De drivande krafterna skapas ur

- vattenytans lutning
- vind
- lufttrycksfördelning
- densitetsskillnader.

Sedan medför

- friktion

mot bl.a. botten, kuster och mellan olika skikt, att strömmen bromsas,

- turbulens

d.v.s. oregelbundna och slumpmässiga virvlar av skiftande storlek, att hastighetsskillnader mellan olika delar av vattenmassan dämpas,

- corioliseffekten

att strömmarna avlänkas mot höger som följd av jordrotationen,

- kust- och bottenkonturer

att strömmarna tvingas anpassa sin riktning efter dessa.

## 5.2 Modellekvationer

Modellen utgår ifrån rörelseekvationerna och kontinuitets-ekvationen. Dessa vertikalintegreras, vilket är liktydigt med att strömmarna beräknas i ett lager. Detta är en förenkling, som kan göras, när vattenmassan betraktas som homogen.

Ekvationerna lyder enligt nedan, där  $x$  och  $y$  är horisontella koordinater,  $z$  är en vertikal koordinat, räknad positiv uppåt och lika med noll vid medelnivå hos vattenytan. Motsvarande hastigheter är  $u$ ,  $v$  och  $w$ . Lufttrycket betecknas  $p$ , densiteten  $\rho$ , tyngdaccelerationen  $g$ , coriolisparametern  $f$ .  $\Delta t$  är tidssteget. Reynolds-approximationen införes i ekvationerna.  $A_H$  är horisontella och  $A_Z$  vertikala utbyteskoefficienten.

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

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

$$(3) \quad \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial A_H}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial A_H}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial A_Z}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial z}$$

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

Då den vertikala strukturen inte beaktas i bakgrundsströmen, införes volymtransportvektorer istället för hastigheter.

$$U = \int_{-H}^{\xi} u dz \text{ för } x\text{-riktn.} \Rightarrow \bar{u} = \frac{U}{H+\xi}$$

$\xi$  betecknar den fria vattenytan och  $-H$  bottendjupet.

Vertikalhastigheten vid ytan,  $\xi$ , är

$$w = \frac{d\xi}{dt} = u \frac{\partial \xi}{\partial x} + v \frac{\partial \xi}{\partial y} + w \frac{\partial \xi}{\partial z} + \frac{\partial \xi}{\partial t}$$

Vertikalhastigheten vid botten,  $-H$ , är

$$w = -\frac{dH}{dt} = -u \frac{\partial H}{\partial x} - v \frac{\partial H}{\partial y}$$

- De olinjära termerna försummas och (4) får därför följande utseende efter vertikalintegrering mellan  $\xi$  och  $-H$ .

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} = -\frac{\partial U}{\partial x} - \frac{\partial V}{\partial y}$$

- Trycktermerna blir oberoende av djupet, eftersom densiteten är konstant.

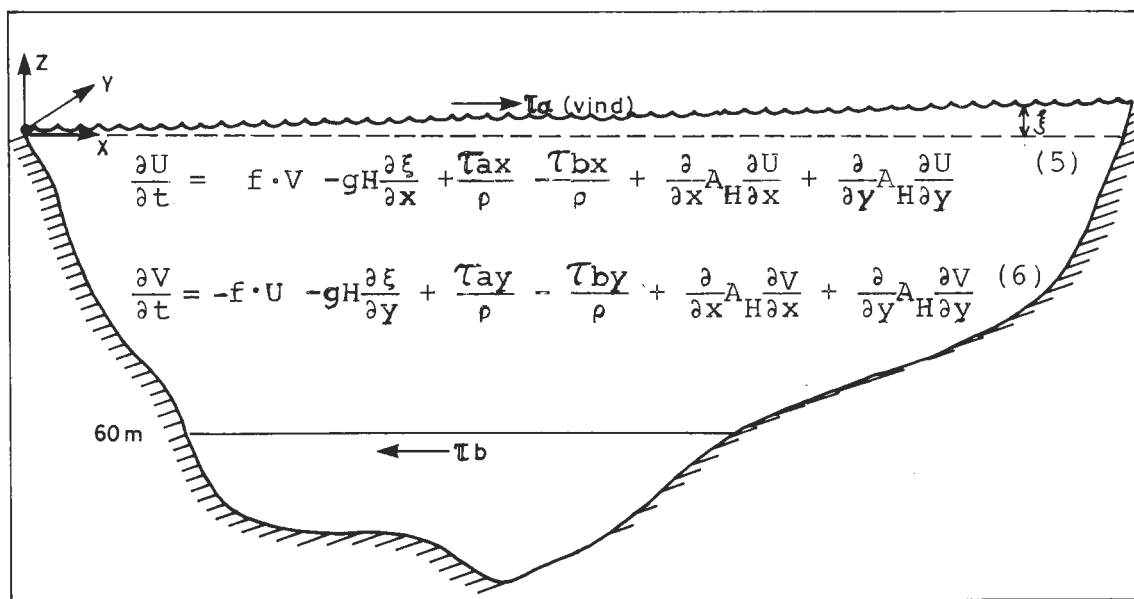
Vertikalintegrering av ekv. (1) ger således

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -g(H+\xi) \frac{\partial}{\partial x} \left( \xi + \frac{p_s}{\rho g} \right) + f \cdot V + \frac{\tau_{ax}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} A_H \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} A_H \frac{\partial U}{\partial y}$$

där  $\tau_{ax}$  och  $\tau_{bx}$  är stresserna vid ytan resp. botten i x-led.

- Lufttrycket vid ytan,  $p_s$ , försummas.

De ekvationssystem, som slutligen används i de numeriska beräkningarna, är följande:



Figur 11. Slutligt ekvationssystem

The final equations

För utförlig beskrivning av teorin hänvisas till Simons (1973).

### Parametrisering

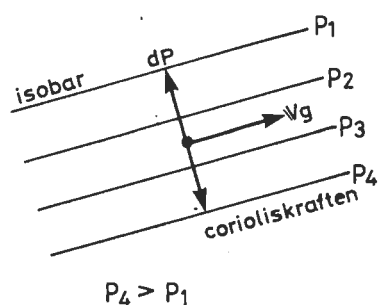
Diffusionen i horisontalplanet anges med en konstant  $A_H$ . Valet av  $A_H$  innebär en parametrisering av de turbulenta rörelserna, vilka är proportionella mot strömmens medelhastighet.

Vid valet av  $A_H$  måste hänsyn tas till grid-storleken,  $l$ , eftersom den har stor betydelse för den horisontella upplösningen av "subgrid diffusivity". Energifördelningen för olika längdskalor hos turbulensen anges av Nihoul (1975). Nihoul redovisar också uppskattningar av energiöverföringen från större till mindre virvlar i turbulensen. Vid den gridstorlek, som används här,  $l = 30$  km, har hastigheten för energiöverföring satts till  $\epsilon \approx 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{sec}^{-3}$ . Eddy diffusionskoefficienten,  $A_H$ , har satts proportionell mot den för turbulensen karakteristiska längden  $l$ ;  $A_H \sim \epsilon^{1/3} l^{4/3}$ . Detta ger en diffusionskoefficient  $A_H$  med storleksordningen  $10^7$ .



Bottenfriktionen sätts proportionell mot strömhastigheten i kvadrat. Det betyder, att  $\tau_b = \rho_w \cdot K \cdot |w| \cdot w$ .  $K$  är dimensionslös och har valts till  $2.5 \cdot 10^{-3}$ .

Vinden beräknas ur lufttryckets fördelning vid havsytan. Lufttrycket erhålls i ett nät med rutstorleken 150 km. Ur detta interpoleras nya värden fram för den gridstorlek, 30 km, som strömmodellen använder. Vid interpoleringen används den statistiska beräkningsmetoden "cubic spline". Denna metod är bättre än linjär interpolering, ty den skapar mjukare och mer verklighetstroga tryckfält. Linjär interpolering kan endast ge konstant vind mellan två lufttryckspunkter och kan också ge den effekten, att vinden vrider  $180^\circ$  i en lufttryckspunkt. Den geostrofiska vinden erhålls sedan ur lufttrycksfördelningen enligt följande.



$$Vg = - \frac{1}{\rho_a \cdot f} \cdot \frac{\partial p}{\partial n}$$

$$- \frac{1}{\rho_a} \cdot \frac{\partial p}{\partial n} = f \cdot Vg$$

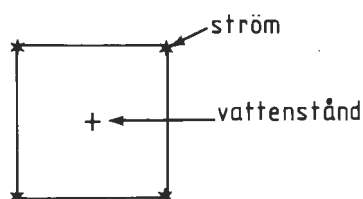
Figur 12. Geostrofisk vind ur lufttrycksfältet

The geostrophic wind from the air pressure field

Ju tätare isobarer, desto starkare vind. Vindstressen för geostrofisk vind beräknas enligt  $\tau_g = C_g \cdot \rho_a \cdot |V_g| \cdot V_g$ . Hänsyn måste tas till friktionens inverkan på den geostrofiska vinden. Friktionen gör, att vinden blir något svagare samt vrids mot vänster med en viss vinkel. Förändringen beror bl.a. på underlagets skrovlighet, luftens temperaturskiktning, latituden och vindens hastighet. Här sätts vinkeln till en konstant  $\beta = 17^\circ$  och den geostrofiska friktionskoefficienten  $C_g$  sätts till  $1.8 \cdot 10^{-3}$ .

Utifrån ovanstående ekvationer, ansatta konstanter och gränsvillkor beräknas vattenstånd och strömmar i varje ruta i gridnätet. Lufttrycksprognosen erhålls från SMHIs numeriska vädermodell och är den enda information, som behövs för att simulera bakgrundsströmmarna i Östersjön.

Strömmen erhålls i varje skärningspunkt och vattenståndet i centrum av varje ruta.



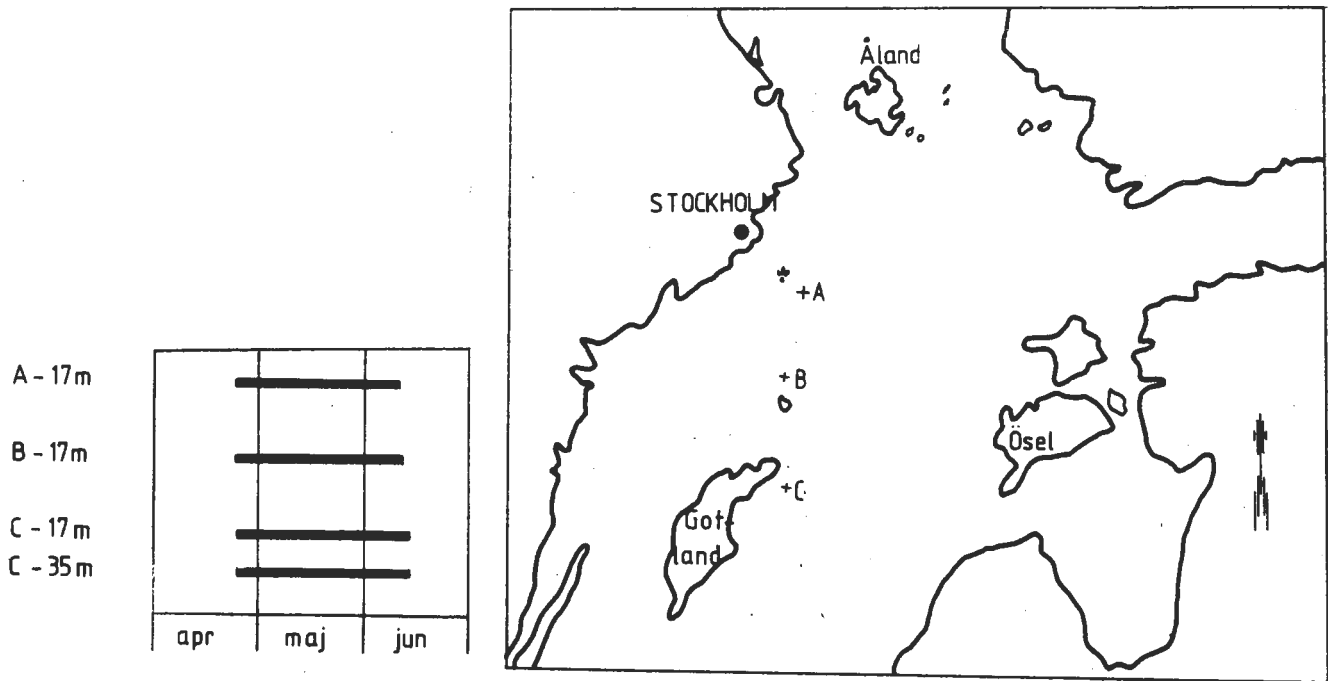
Figur 13 En gridruta

One square in the grid

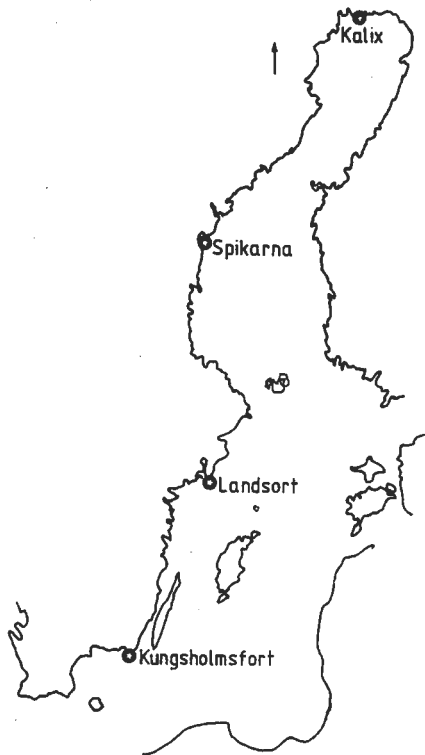
### 5.3 Mätt och beräknad bakgrundsström

#### Fältmätningar

Mätningar av de verkliga strömmarna har utförts på cirka 17 m djup. Dessa resultat används för att verifiera modellen. Strömmen är mätt på 17 m, ty detta djup bedöms vara den nivå, som bäst representerar bakgrundsströmmen. Här är den direkta vindströmmens effekt liten och därunder är strömmen normalt tillräckligt enhetlig för att kunna låta sig representeras av förhållandena på ett visst djup. Mätningarna har utförts var 30:e minut i tre olika punkter; nära Almagrundet, A, nordväst om Gotska Sandön, B, och öster om Fårö, C. I en av punkterna har även strömmen på 35 m djup mätts för att visa kopplingen till strömmen på 17 m.



Figur 14. Mätperiod och mätpunkter, 1980.  
 Measuring period and points with current measurements



Vattenstånd registreras rutinmässigt utmed svenska kusten. De platser, som används i det här arbetet, framgår av intilliggande figur.

Figur 15. Vattenståndsstationer, som används vid verifiering  
 Water level stations used for verification

## Modellkörningar

Modellen har simulerat ström och vattenstånd i Östersjön under perioden 11 - 20 maj 1980. Beräkningarna utgår i startögonblicket från horisontell medelvattenyta och strömstilla och därför behövs 2 - 3 dygns körning av modellen för att den skall anpassa sig till de rådande yttre krafterna.

Beräkningarna är främst beroende av hur tre friktionskoefficienter: horisontell friktion (diffusion), bottenfriktion och vindstressfriktion väljs.

Vid verifiering av modellen jämförs fältmätningar och beräkningsresultat. Friktionskoefficienterna väljs i simuleringarna inom de gränser, som tidigare forskningsresultat angett. Ett antal olika beräkningar har jämförts med fältmätningensresultaten.

I oljedriftprognosen används inte cirkulationsmodellens vattenståndssimuleringar utan endast strömberäkningarna. Det är ändå intressant att jämföra modellresultat och uppmätta vattenstånd.

När nordlig vind råder över Skandinavien, strömmar vatten i ytlagret (0 - 60 m) söderut och då höjs vattenståndet i södra Östersjön. Samtidigt går en kompensationsström norrut i djupare lager (60 m - botten). Att 60 m valts beror på att den största densitetsökningen, avseende salt-halt sker här, och denna nivå är i allmänhet gränsyta för motriktade strömmar.

## Simulering av ström

Oljedriftsprognosens bakgrundsström är den vattenståndsdrivna ström, som går mellan 0 och 60 meter. Denna kan

inte beräknas i en enlagermodell med mindre än att man förhindrar kompensationsströmmen i djuplagret. Ett sätt att komma runt svårigheten är att lägga en artificiell botten på 60 m djup och på så sätt anta, att det saltare vattnet på större djup ej deltar i rörelserna. Friktionen mot botten, d.v.s. verklig botten mellan 0 och 60 m, och en artificiell botten på 60 m djup är baserad på en friktionskoefficient med värdet 0.0025.

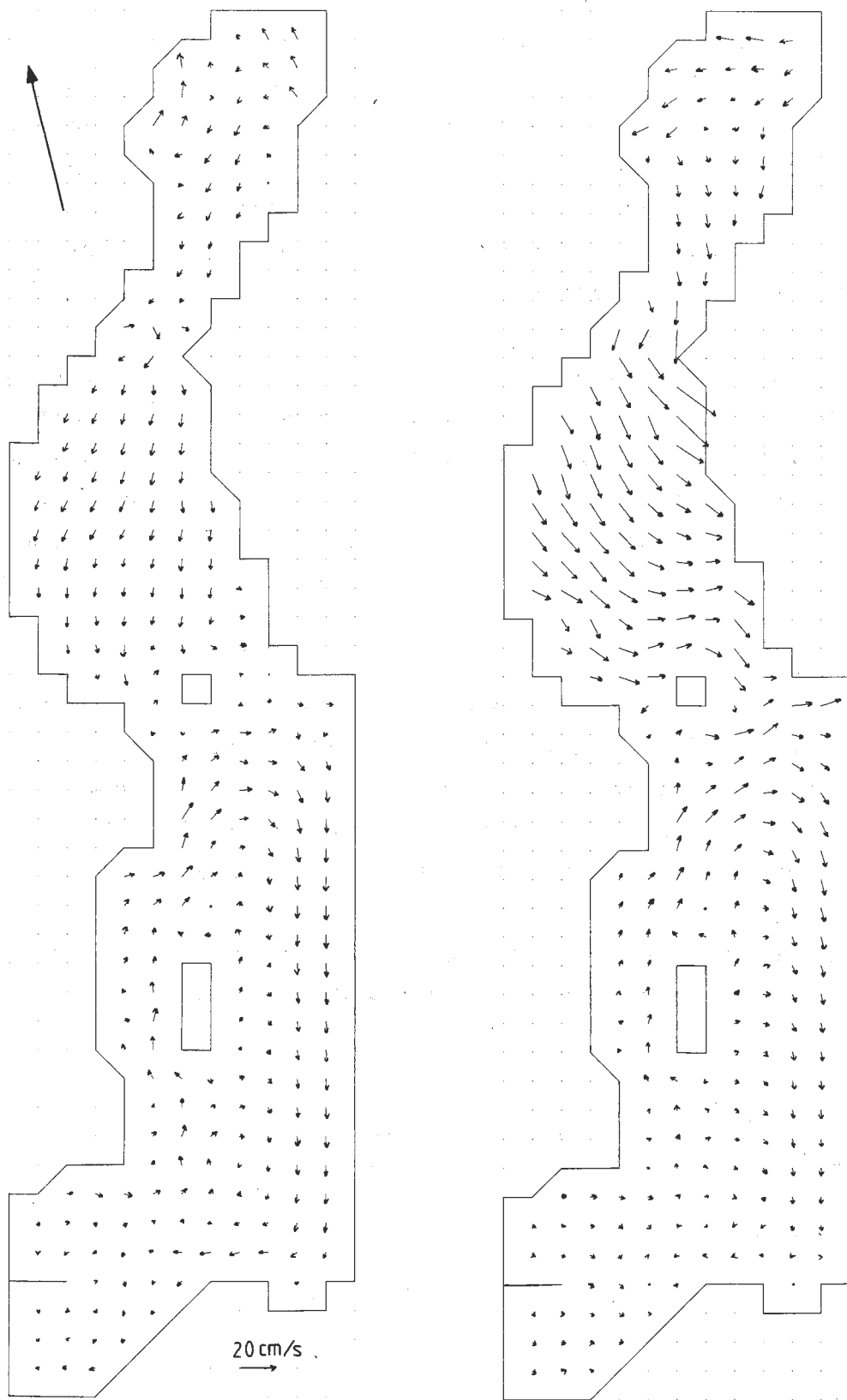
1) Den horisontella diffusionskoefficienten  $A_H$ , har varierats mellan  $10^2$ ,  $10^3$  och  $10^4$ . Simuleringarna visar vid jämförelse med uppmätta strömmar, att  $A_H = 10^3$  ger bästa överensstämmelsen. Strömhastigheterna blir av rätt storleksordning och riktningarna simuleras ganska väl i två av de tre mätpunkterna. I den tredje C, ger beräkningarna en ström, som är motriktad den uppmätta.

2) Vinkeln mellan vinden och isobarerna har som ovan nämnts valts till  $17^\circ$ . Simuleringar med mindre och större vinkel har utförts. Resultaten lät sig inte påverkas nämnvärt av detta utan var i det närmaste identiska med dem där vinkeln  $17^\circ$  använts; detta innebär samma resultat som i 1).

3) Variation av vindstresskoefficienten ger en motsvarande höjning eller sänkning av strömhastigheterna.

Tabell 2

KONSTANT	VÄRDE
$A_H$ = horisontell diffusion	$10^3$
K = "bottenfriktionskoefficient"	$2.5 \cdot 10^{-3}$
k = " " "	$15 \cdot 10^{-3}$
$C_g$ = vindfriktionskoefficient	$1.8 \cdot 10^{-3}$
$\beta$ = vinkel mellan isobar och vind	17



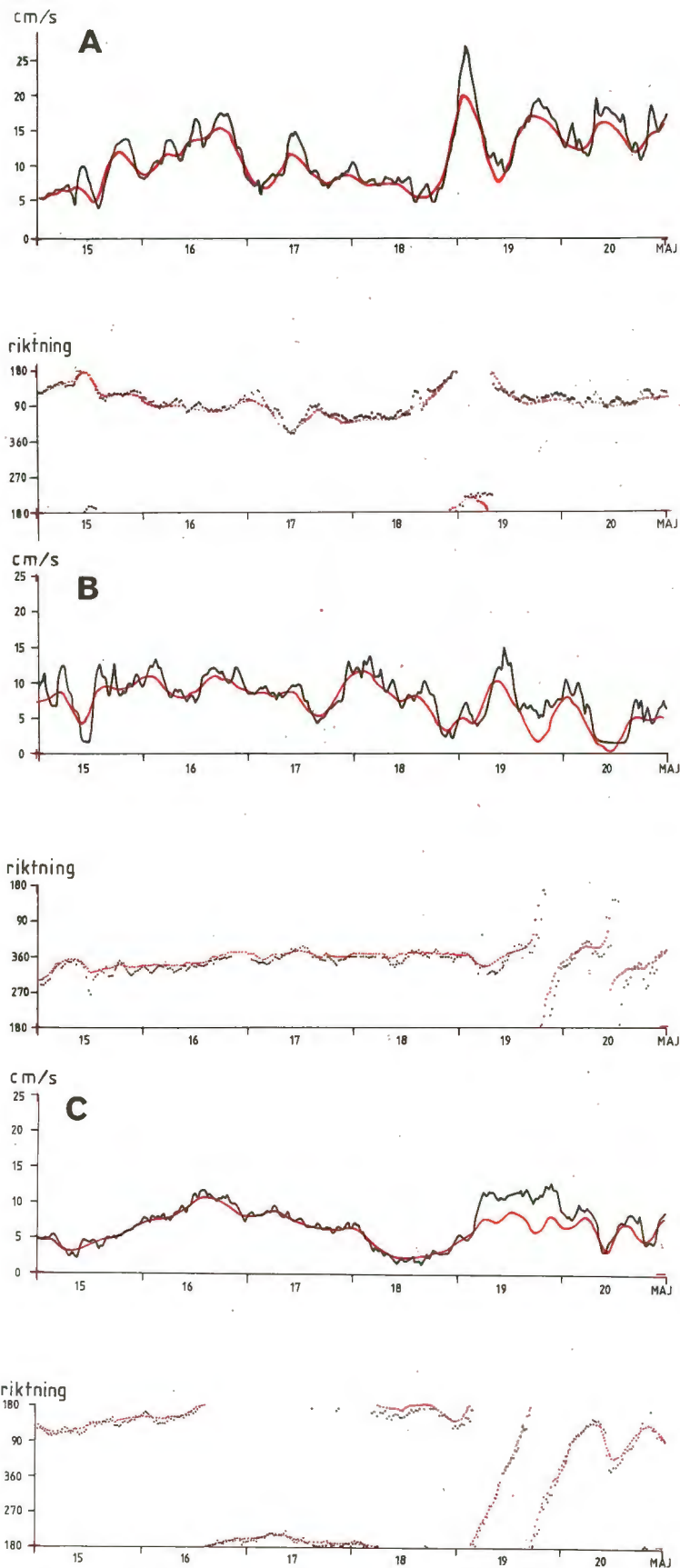
Figur 16. Den simulerade bakgrundsströmmen i Östersjön, 14 och 18 maj 1980 kl 2400.

The simulated background current in the Baltic on the 14th and 18th of May, 1980 at 2400.

Vid valfri tidpunkt och valfri vädersituation kan cirkulationen i Östersjön beräknas. Vidstående figur visar medelströmmen i skiktet 0 - 60 m såsom modellen beräknar den ur verkliga väderförhållanden kl. 2400 den 14 och 18 maj 1980.

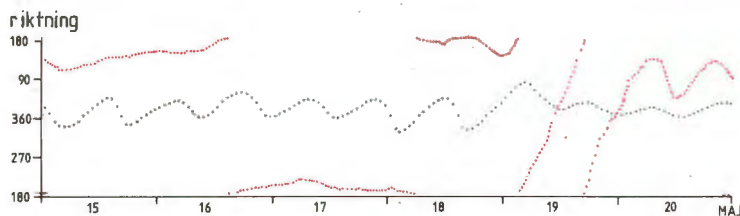
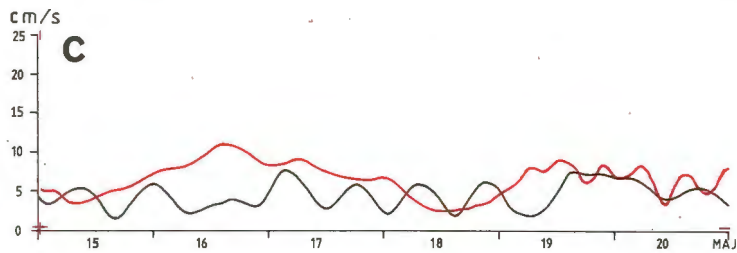
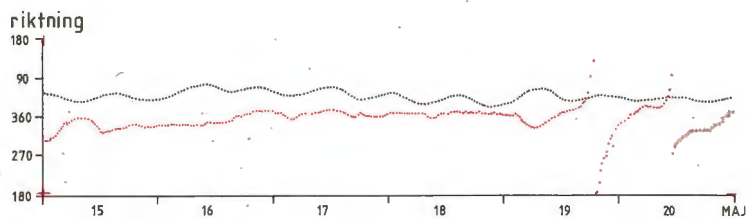
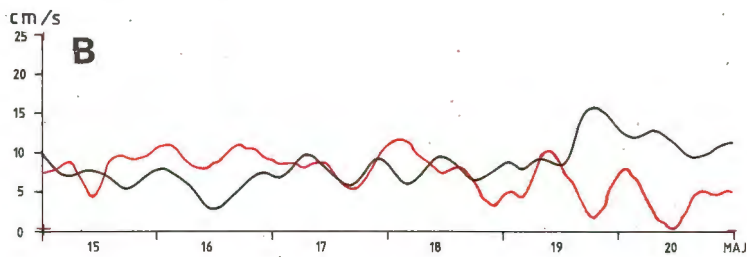
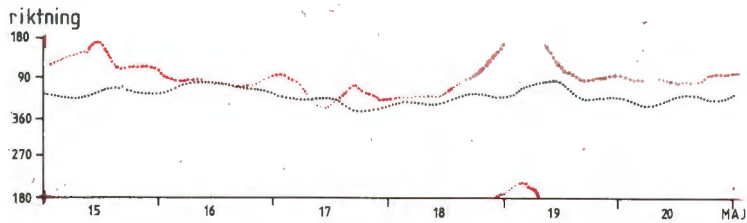
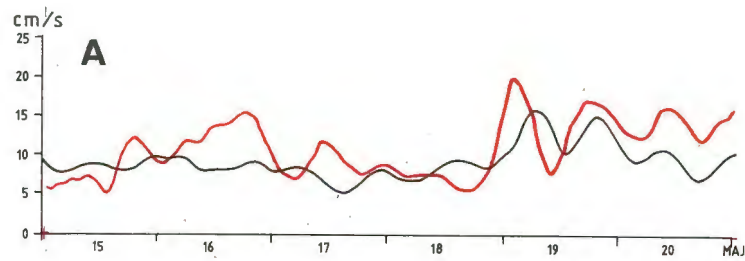
Resultat för varje timme under perioden 15 - 20 maj har tagits ut från de tre gridrutor i modellen, som ligger närmast mätpunkterna A, B och C. Bakgrundsströmmens riktning och hastighet är plottade var för sig. Fältmätningarna från dessa punkter är uppritade på samma sätt. Eftersom modellen får nya vindinformationer var 6:e timme, så innebär detta, att strömvariationer med kortare perioder inte kan skapas ur simuleringarna. För att göra en relevant jämförelse med verkliga strömmar, så har fältmätningarna filtrerats så, att kortare svängningar i viss mån tas bort. Av 4-timmarsperioden återstår 2 procent, av 8-timmarsperioden 40 procent och av 16-timmarsperioden 80 procent. Dessa kortfristiga variationer, som finns i naturen men som inte speglas i modellen, ger inget tillskott till bakgrundsströmmen, som har betydelse för oljedriftsprognosens kvalitet. För att visa filtreringens effekt är ursprungliga mätresultat och filtrerade ritade för de tre olika punkterna i figur 17. De filtrerade mätresultaten är sedan jämförda med bakgrundsströmmen, som ges av modellen, se figur 18 (nästa uppslag).

Det framgår av figurerna, att bakgrundsströmmen i A simuleras väl av modellen. Riktningen är i stort sett ostlig hos båda kurvorna och storleksordningen på hastigheten är den rätta. I punkt B avviker riktningen med upp till  $90^{\circ}$ , modellen visar på en ström mot ostnordost och mätningarna mot nordnordost till nord. Hastigheten är av rätt storleksordning. Mot slutet av perioden förekommer tröghetssvängningar i mätpunkten, som inte erhålls i modellberäkningarna. I vertikal C finns fält-



Figur 17. Uppmätt ofiltrerad och filtrerad ström i A, B och C på 17 m djup 15 - 20 maj 1980. Röd = filtrerad. Measured unfiltered and filtered currents in A, B and C at 17 m depth, 15 - 20 May, 1980. Red = filtered.





Figur 18. Simulerad bakgrundsström 0 - 60 m och uppmätt filtrerad på 17 m djup i A, B och C, 15 - 20 maj, 1980. Röd = uppmätt.  
 Simulated background current 0 - 60 m and filtered measured at 17 m depth in A, B and C, 15 - 20 May, 1980. Red = measured.

mätningar på både 17 och 35 m djup för att kontrollera representativiteten på 17 m för bakgrundsströmmen i skiktet 0 - 60 m. Strömmarna på 17 m och 35 m skiljer sig under denna period inte mycket från varandra. Den simulerade strömmen i gridpunkten närmast vertikal C avviker c:a  $180^{\circ}$  jämfört med mätningarna. Förklaringen till detta kan vara, att strömmen så nära land som i punkten C i hög grad påverkas av kustlinjen. En lokal virvel i kustvatt-net öster om Fårö, som inte kan upplösas av den grova modellbeskrivningen (30 km mellan gridpunkterna), antas vara orsaken till avvikelserna. Slutsatsen, som härav kan dras, är att modellresultatet måste användas med försiktighet nära kusterna. En finare beskrivning av kustlinjerna i modellen vore önskvärd. Arbete med en ny version av modellen med gridavståndet 18,5 km pågår.

#### Simulering av vattenstånd

De vattenståndsvariationer, som beräknas i en enlagermodell med en artificiell botten på 60 m, kan förväntas bli för stora. Vid denna simulering, där realistiska vattenståndsförändringar skall beräknas, utgår modellen från de verkliga vattendjupen.

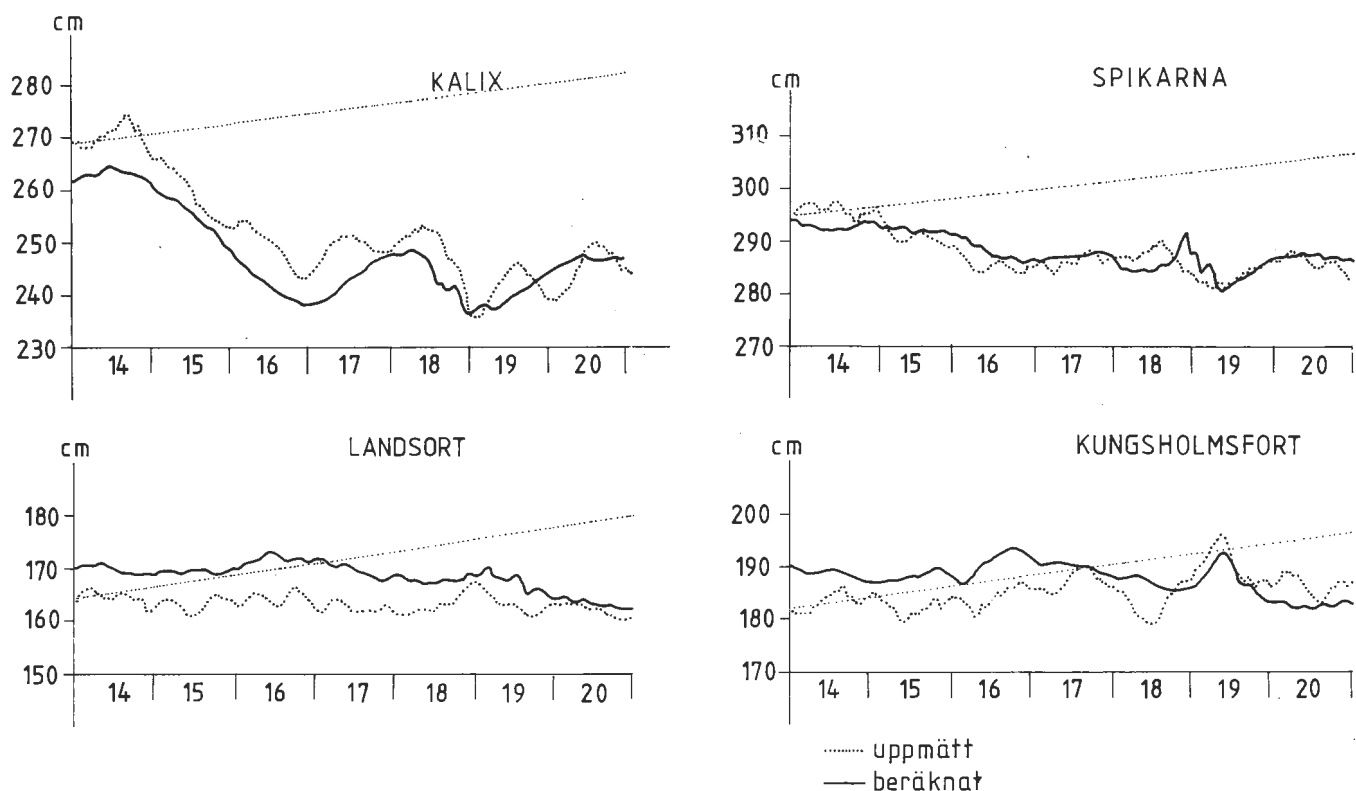
I en vertikal integrerad modell beräknas i varje punkt den totala transporten, d.v.s. yttransporten och djuptransporten tillsammans. Den beräknade strömhastigheten i den totala transporten blir mycket liten, mindre än ytströmmen eller djupströmmen var för sig, och det är denna totalström, som ger upphov till vattenståndshöjningen. Det bör således vara möjligt att i en enlagermodell beräkna vattenståndet genom att utgå från den netto-transport, som strömmen i båda skikten tillsammans ger upphov till.

Dessutom används ett högre värde på bottenfriktionskoefficienten, "k", än vid strömsimuleringarna. Värdet på "k" väljs till 0.0150 utifrån Svanssons och Szarons (1975) resultat av modellkörningar i Östersjön.

### Verifiering - vattenstånd

Modellen försummar flödet genom Öresund och Bälten. Detta flöde har betydelse för volymsinnehållet i Östersjön. Vattenstandsregistreringar visar, att vattenytan sjönk cirka 20 cm från 11 till 20 maj, vilket motsvarar en uttransport av i genomsnitt 2 cm/dygn.

Det vattenstånd, som modellen simulerat, jämförs med uppmätta värden vid stationerna Kalix, Spikarna, Landsort och Kungsholmsfort. Vattenytans lutning simuleras väl, och det är denna lutning, som skapar bakgrundsströmmen.



Figur 19. Vattenstånd 14 - 20 maj 1980. (Den nivåändring, som är frändragen i den simulerade kurvan, är inritad i figuren.)

Water levels 14 - 20 May, 1980. (The water level change, which is excluded in the simulated curve, is included in the figure.)

## 6. NÅGRA TESTFALL

Den operationella oljedriftsmodellen illustreras i detta kapitel för några tänkta katastroftillfällen i norra Östersjön. I samtliga fall är bakgrundsströmmen svagt nordostlig c:a 1 cm/s och den horisontella turbulensens maximala respektive minimala värden  $\pm 1$  m/s.

### Kontinuerligt utsläpp, konstant vind

Först illustreras modellen för konstant vind, se figur 20. Ett fartyg läcker olja nordost om Gotland. Oljeläcket utgörs av oljefilm. Denna drivs av en sydlig vind, 15 m/s, under 4 dygn. Oljan sprider sig som en plym, vars bredd avgörs av den horisontella turbulensen.

### Momentant utsläpp, konstant vind

Under 4 dygn antas vinden åter vara konstant med en styrka på 15 m/s. Oljeutsläppet är denna gång en kraftig oljefläck, som transporteras norröver i Östersjön och sprids horisontellt på grund av turbulens i havets ytskikt, se figur 21.

### Gotska Sandön hotas

Ett kontinuerligt utsläpp sker nordost Gotland och oljefilmen driver in mot Gotska Sandöns stränder i den sydostliga vinden. Efter 24 timmar finfördelas oljefilmen till klumpar, varvid oljans hastighet reduceras. Samtidigt vrider vinden mot syd och väst, varför Gotska Sandön klarar sig från oljeföroreningar denna gång, se figur 22.

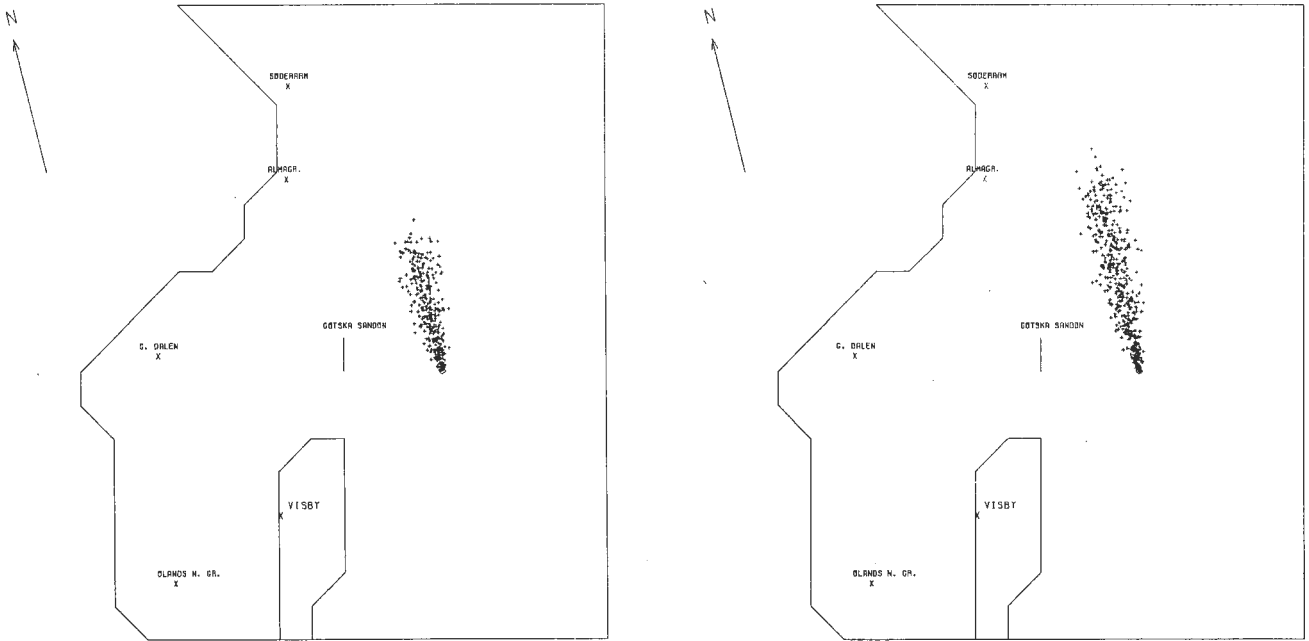
### Östergötlands skärgård hotas

Ett momentant utsläpp observeras mellan Gotland och fastlandet, se figur 23. Vinden blåser kraftigt från sydost, och oljefläcken driver in mot Östergötlands skärgård. Oljefilmen åldras under prognosens gång och klumpar sig, varför oljedriftshastigheten reduceras, samtidigt som vinden vrider mot syd och väst. Oljefläcken driver därför ut till havs, och skärgården klarar sig åtminstone under denna prognos längd.

### Oljepåslag på Stockholms skärgård

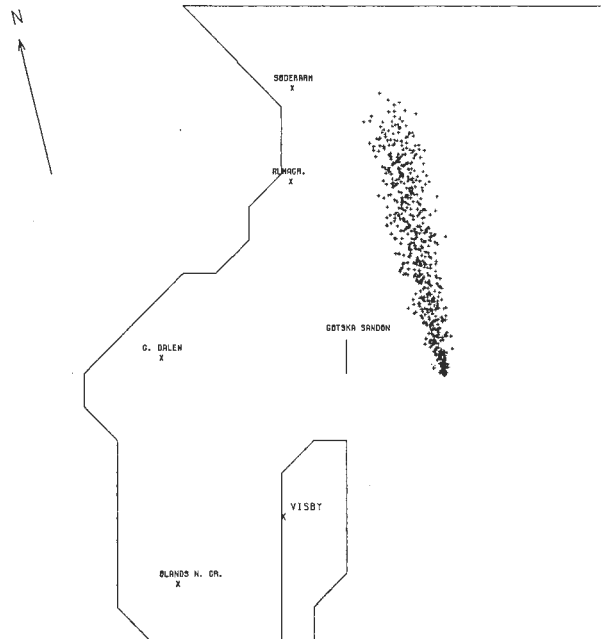
Ett grundstött tankfartyg ligger och läcker olja utanför Landsortsområdet, se figur 24. Vinden är sydostlig och oljefilm driver in mot Stockholms skärgård. Oljepåslaget beräknas drabba södra skärgården efter 30 timmar. Då vinden vrids söderöver, har oljan kommit in mot kusten, och den ligger därför kvar på det oljedrabbade kustavsnittet, när vinden vrider åt väst och för olja ut till havs igen.

0 20 40 n.m.



Efter 48 timmar.  
Oljefilm.  
Vind: 15 m/s från S.

Efter 72 timmar.  
Oljefilm.  
Vind: 15 m/s från S.

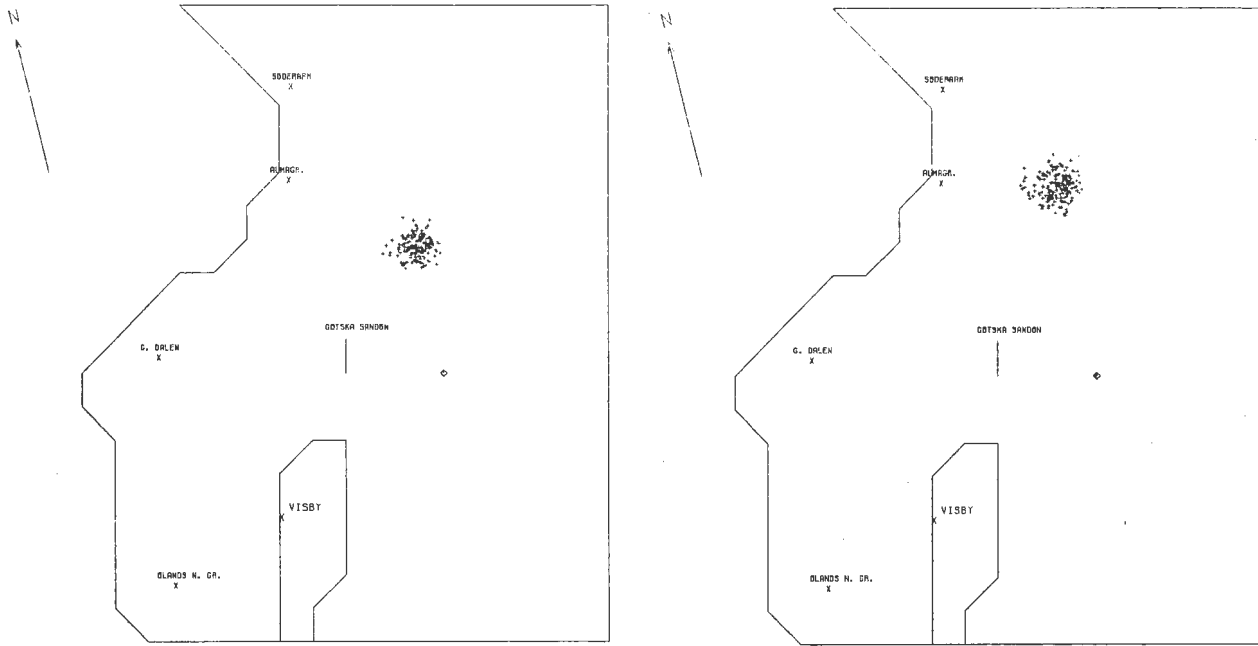


Efter 96 timmar.  
Oljefilm.  
Vind: 15 m/s från S.

Figur 20. Ett kontinuerligt oljeutsläpp under konstant vind i 4 dygn.

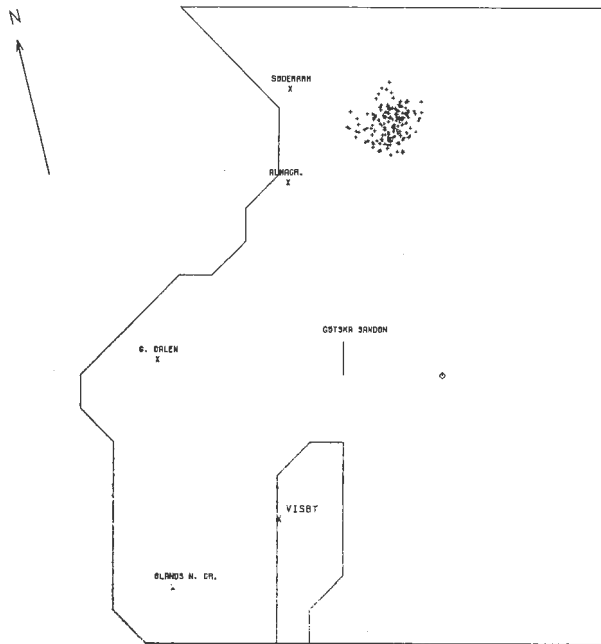
A continuous oil spill with constant wind for 4 days.

0 20 40 n.m.



Efter 48 timmar.  
Oljefilm.  
Vind: 15 m/s från S.

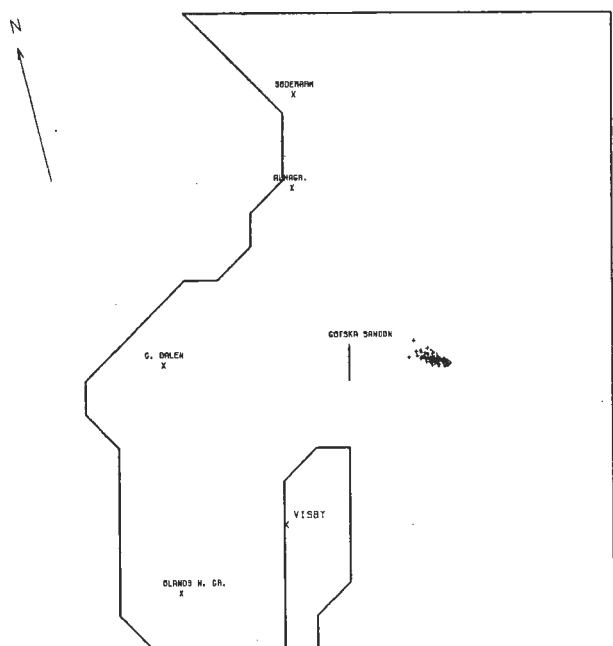
Efter 72 timmar.  
Oljefilm.  
Vind: 15 m/s från S.



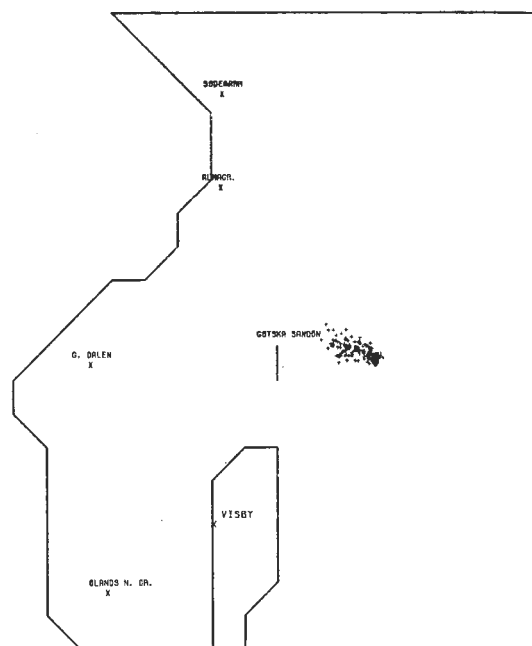
Efter 96 timmar.  
Oljefilm.  
Vind: 15 m/s från S.

Figur 21. Ett momentant oljeutsläpp under konstant vind i 4 dygn.  
A point oil spill during constant wind for 4 days.

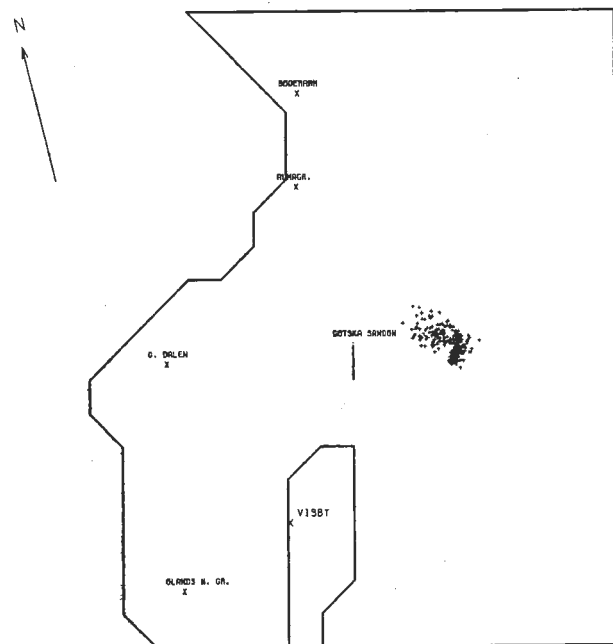
0 20 40 n.m.



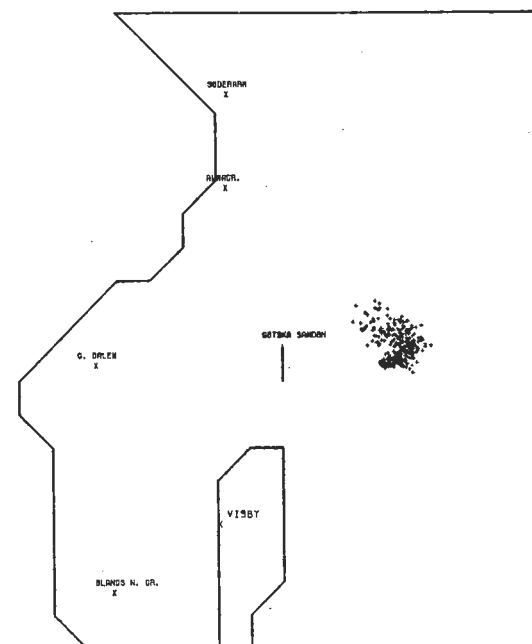
Efter 12 timmar.  
Oljefilm.  
Vind: 15 m/s från SE.



Efter 24 timmar.  
Oljeklumpar, 1 cm stora.  
Vind: 10 m/s från S.



Efter 36 timmar.  
Oljeklumpar, 1 cm stora.  
Vind: 10 m/s från SW.

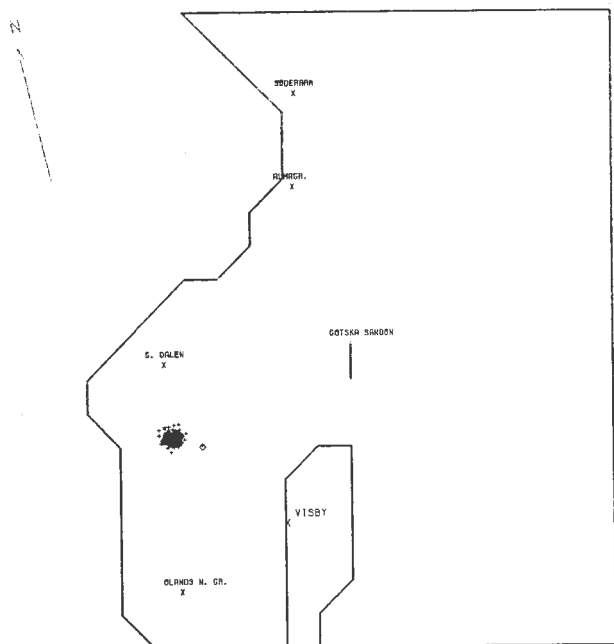


Efter 48 timmar.  
Oljeklumpar, 5 cm stora.  
Vind: 15 m/s från W.

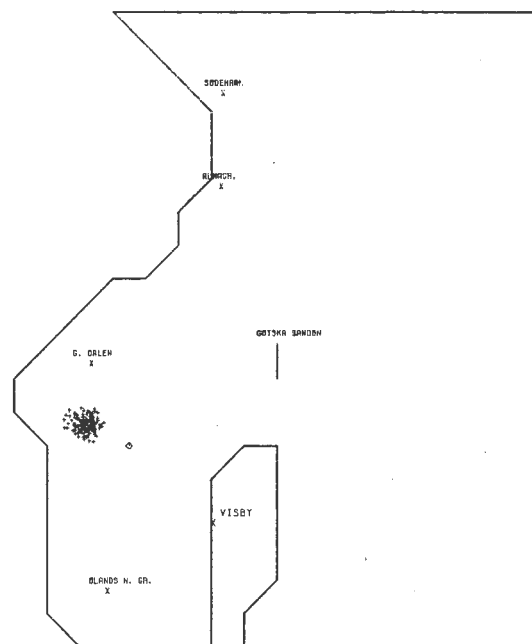
Figur 22. Ett oljeföroreningshot mot Gotska Sandön.  
Kontinuerligt utsläpp.  
An oil spill threat to Gotska Sandön.  
Continuous spill.



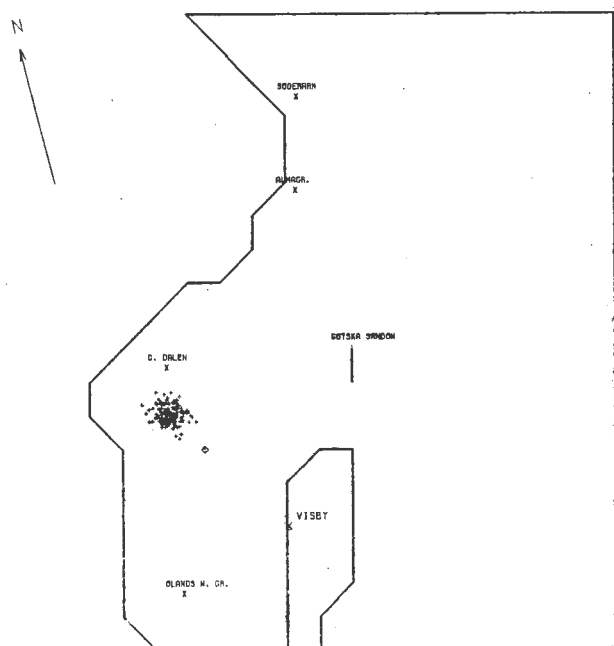
0 20 40 n.m.



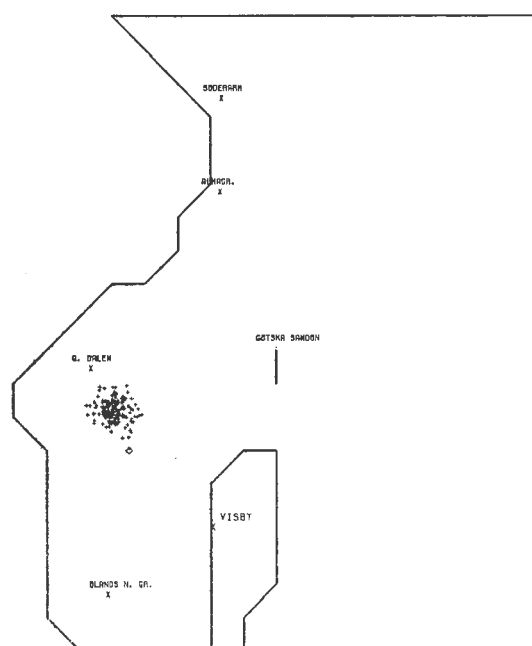
Efter 12 timmar.  
Oljefilm.  
Vind: 15 m/s från SE.



Efter 24 timmar.  
Oljeklumpar, 1 cm stora.  
Vind: 10 m/s från S.



Efter 36 timmar.  
Oljeklumpar, 1 cm stora.  
Vind: 10 m/s från SW.

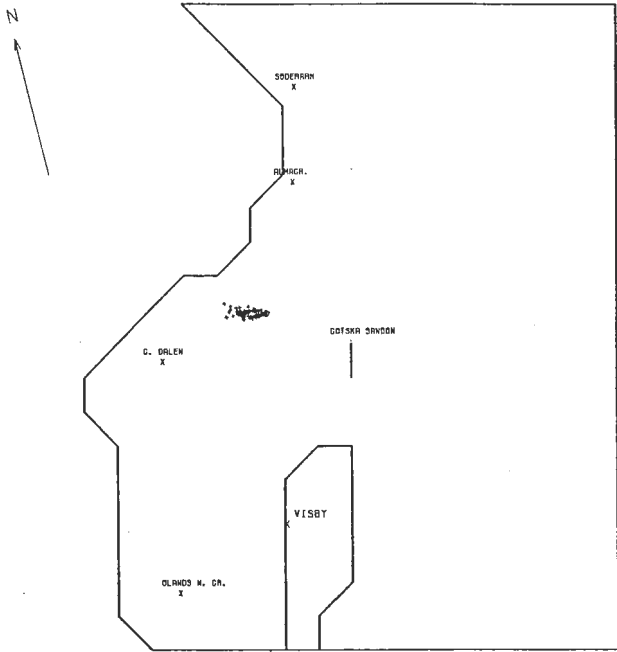


Efter 48 timmar  
Oljeklumpar, 5 cm stora.  
Vind: 15 m/s från W.

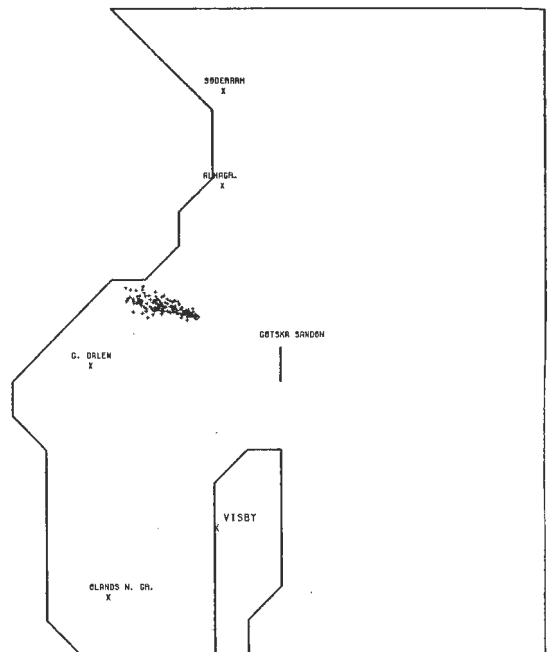
Figur 23. Ett oljeföroreningshot mot Östergötlands skär-  
gård. Momentant utsläpp.

An oil spill threat to the Östergötland  
archipelago. A point oil spill.

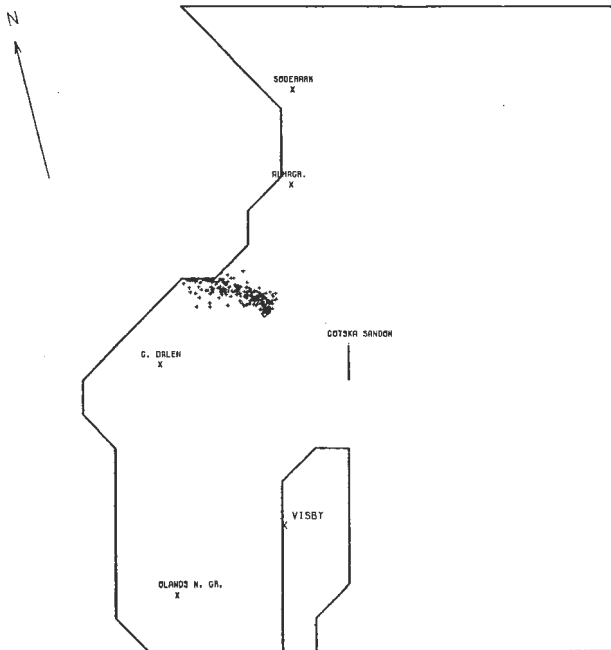
0 20 40 n.m.



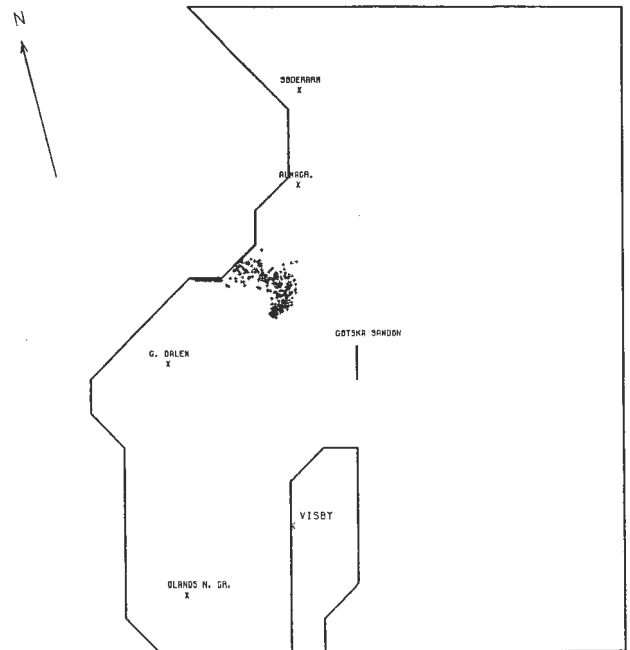
Efter 12 timmar.  
Oljefilm.  
Vind: 17 m/s från SE.



Efter 24 timmar.  
Oljeklumpar, 1 cm stora.  
Vind: 18 m/s från SE.



Efter 36 timmar.  
Oljeklumpar, 1 cm stora.  
Vind: 15 m/s från SSW.



Efter 48 timmar.  
Oljeklumpar, 5 cm stora.  
Vind: 15 m/s från W.

Figur 24. En oljeolycka i Stockholms skärgård. Kontinuerligt utsläpp.

An oil accident in the Stockholm archipelago.  
Continuous spill.

## 7. SAMMANFATTNING OCH FORTSATT UTVECKLING

På uppdrag av Jordbruksdepartementet har SMHI utvecklat en prognosmodell för oljedrift. Denna används operationellt som ett hjälpmedel vid katastrofartade utsläpp. Målet är att minska skadorna genom att bekämpningsinsatserna kan planeras noggrant och sättas in vid rätt tidpunkt och på lämplig plats. Modellen utnyttjar bl.a. de arbeten, som gjorts i Norge, USA och Sverige.

Olja på vattenytan kan bestå av tunn oljefilm eller oljeklumpar av olika storlekar. Förflyttningen av oljan sker i huvudsak via tre processer:

1. Transport genom ström, som orsakas av den lokala vinden.
2. Förflyttning via "bakgrundsström". Strömmen drivs av vattenståndsskillnader över hela Östersjön.
3. Spridning på grund av horisontella slumpmässiga virvlar i vattnet (turbulens).

Den lokala vindströmmen härleds i modellen ur en teoretisk strömprofil i vattnets ytlager. Det använda sambandet innebär, att vindströmmen avtar logaritmiskt med djupet närmast ytan för att längre ner avta som en Ekmanprofil. Oljan rör sig med en hastighet, som är proportionell mot vindens. Proportionalitetskoefficienten varierar med vindhastighet och oljans tjocklek. Strömmen vid ytan går i vindens riktning, medan den på större djup går något till höger om vinden. Den beräknade vindprofilen jämförs i rapporten med uppmätta strömvärden nära ytan.

Bakgrundsströmmen beräknas i en numerisk cirkulationsmodell för Östersjön. Modellen utgår ifrån lufttrycksfältet över Skandinavien. Den ur tryckfältet beräknade vinden sätter upp vattenståndsdifferenser i Östersjön och dessa driver bakgrundsströmmen. Den beräknade strömmen är ett medelvärde mellan 0 och 60 m. Jämförelser mellan beräknad och uppmätt bakgrundsström redovisas i rapporten.

Den horisontella turbulensen simuleras så, att oljefläcken utsätts för en slumpmässig spridning under transporten med vind- och bakgrundsström.

De tre strömelementen summeras i modellen och oljans väg beräknas. Oljefläcken antas bestå av ett stort antal "partiklar". Datorn håller reda på läget på varje partikel och kan vid valfri tidpunkt rita en kartbild över partikelmolnet, d.v.s. oljefläcken. Om olja når stranden, kommer i modellen partiklarna att läggas orörliga på kustlinjen, se figurer i kapitel 6. Driftprognosens längd är beroende på väderprognosens varaktighet. För närvarande ges vindprognoser för upp till 5 dygn, och arbete pågår med längre perioder.

För att möjliggöra en flexibel användning av modellen läser man in ingångsdata (t.ex. vindprognos, oljeklumparnas storlek) via datorterminal genom att vakthavande personal besvarar frågor, som automatiskt kommer upp på en bildskärm efter att modellen startats.

Genom det nu inledda arbetet har det skapats ett snabbt och lätt tillgängligt hjälpmedel för planering av bekämpningsinsatser mot drivande olja.

Det fortsatta arbetet under det närmaste året bör bestå i att driftprognoser ska kunna utföras även i södra Östersjön, Bottenhavet, Bottenviken, Öresund, Kattegatt och Skagerrack/Nordsjön. Beräkning av bakgrundsström för Östersjön och Bottniska Viken görs klar, så att den kan användas i operationell drift. Det krävs, att de senaste dagarnas lufttrycksfält ständigt finns tillgängliga, liksom senaste prognosen. Beräkningarna av bakgrundsströmmen kan också förbättras genom att bl.a. ett tätare gridnät används. Vid driftprognoser för Öresund, Kattegatt och Skagerrack/Nordsjön kommer modellen att använda sig av den vinddrivna transporten samt turbulensen.

En omarbetning av oljedriftsmodellen så att den i efterhand kan beräkna varifrån upptäckt olja kan ha spridits bör också utföras.

På litet längre sikt är det väsentligt att kunna prognosera bakgrundsströmmen för Öresund, Kattegatt och Skagerrack/Nordsjön. Här är ett samarbete med andra länder av största vikt.

Av intresse är även att kunna göra prognoser över transporter inne i vattenmassan. Kemikalier kan, beroende på sin varierande densitet, komma att uppföra sig på många olika sätt. De kan inlagras ganska koncentrerat på ett visst djup och förflytta sig med strömmen, de kan också snabbt spridas ut i vertikal och horisontell led. För att beräkningar ska kunna utföras på kemikaliers spridning och förflyttning måste bl.a. turbulensen i vertikal led simuleras.

## 8. REFERENSER

- Audunson, T m.fl. (1977) Bravoutblåsningen, feltobservasjoner, analyseresultater og beregninger tilknyttet oljen på sjøen.  
IKU rapport nr 90
- Audunson, T (1978) Drift og spredning av olje på vann.  
Institutt for kontinentalsokkelundersøkelser (IKU)
- Audunson, T m.fl. (1980) Slik Forecast - A simulation program for oil spill emergency tracking and long term contingency planning.  
Petromar 80, International Conference and Exhibition on Petroleum and the Marine Environment, Monaco, Proceedings, EUROCEAN, Monaco-Ville (1980)
- Audunson, T (1980) The fate and weathering of surface oil from the Bravo blowout. Marine Environmental Research 3 (1980)
- Bork, I (1977) Model studies of dispersion of pollutants in Lake Vänern. SMHI Rapporter Nr RHO 11 (1977). SMHI, Box 923, 601 19 NORRKÖPING
- Bye, J (1965) Winddriven circulation in unstratified lakes. Limnol. Oceanogr. 10: 451-458 (1965)
- Ekman, V W (1905) On the influence of the earth's rotation on ocean currents. Ark. f. MAT., ASTRON. OCH FYSIK, Vol. 2, No. 11, pp 1-53

- Holmström, I (1979) Beräkning av drift och spridning av olja från anläggningar i Nordsjön. Sveriges Meteorologiska och Hydrologiska Institut, Norrköping
- Madsen, (1977) A realistic model of the wind-induced Ekman boundary layer. Journal of Ph. Oc., Vol. 7, March 1977
- Nihoul, J C J (1975) Modelling of marine systems Elsevier Oceanography Series, 10
- Phillips, O M (1977) The dynamics of the upper ocean. Cambridge Monographs on Mechanics and Applied Mathematics. Second Edition (1977)
- Simons, T J (1973) Development of three-dimensional numerical models of the Great Lakes. Scientific series No. 12. Canada Centre for Inland Waters, Ontario.
- Simons, T J (1976) Topographic and baroclinic circulations in the south-west Baltic. Institut für Meereskunde, Kiel, Rapport nr 25
- Svansson, A och Szaron, J (1975) Sea level computations of the Baltic with a 20-canal model. Tellus, vol. 27, No. 6, 1975
- Svensson, U (1979) The structure of the turbulent Ekman-layer. Tellus, 31, 340-350 (1979)
- Stolzenbach et al. (1977) A review and evaluation of basic techniques for predicting the behaviour of surface oil slicks. Massachusetts Institute of Technology. Report No. MITSG 77-8. Cambridge, Massachusetts 02139, USA (1977)

SMHI Rapporter

HYDROLOGI OCH OCEANOGRAFI

- Nr RHO 1 Weil, J G  
Verification of heated water jet numerical model,  
Stockholm 1974
- Nr RHO 2 Svensson, J  
Calculation of poison concentrations from a hypo-  
thetical accident off the Swedish coast, Stockholm  
1974
- Nr RHO 3 Vasseur, B  
Temperaturförhållanden i svenska kustvatten, Stock-  
holm 1975
- Nr RHO 4 Svensson, J  
Beräkning av effektiv vattentransport genom Sunninge  
sund, Stockholm 1975
- Nr RHO 5 Bergström, S och Jönsson, S  
The application of the HBV runoff model to the File-  
fjell research basin, Norrköping 1976
- Nr RHO 6 Wilmot, W  
A numerical model of the effects of reactor cooling  
water on fjord circulation, Norrköping 1976
- Nr RHO 7 Bergström, S  
Development and application of a conceptual runoff  
model, Norrköping 1976
- Nr RHO 8 Svensson, J  
Seminars at SMHI 1976-03-29--04-01 on numerical models  
of the spreading of cooling water, Norrköping 1976
- Nr RHO 9 Simons, J, Funkquist, L och Svensson, J  
Application of a numerical model to Lake Vänern,  
Norrköping 1977
- Nr RHO 10 Svensson, S  
A statistical study for automatic calibration of a  
conceptual runoff model, Norrköping 1977
- Nr RHO 11 Bork, I  
Model studies of dispersion of pollutants in Lake  
Vänern, Norrköping 1977
- Nr RHO 12 Fremling, S  
Sjöisars beroende av väder och vind, snö och vatten,  
Norrköping 1977
- Nr RHO 13 Fremling, S  
Sjöisars bärighet vid trafik, Norrköping 1977
- Nr RHO 14 Bork, I  
Preliminary model studies of sinking plumes,  
Norrköping 1978



- Nr RHO 15            Svensson, J och Wilmot, W  
A numerical model of the circulation in Öresund.  
Evaluation of the effect of a tunnel between Hel-  
singborg and Helsingör, Norrköping 1978
- Nr RHO 16            Funkqvist, L  
En inledande studie i Vätterns dynamik, Norrköping  
1978
- Nr RHO 17            Vasseur, B  
Modifying a jet model for cooling water outlets,  
Norrköping 1979
- Nr RHO 18            Udin, I och Mattisson, I  
Havsis - och snöinformation ur datorbearbetade satel-  
litdata - en metodstudie, Norrköping 1979
- Nr RHO 19            Ambjörn, C och Gidhagen, L  
Vatten- och materialtransporter mellan Bottniska  
viken och Östersjön, Norrköping 1979
- Nr RHO 20            Gottschalk, L och Jutman, T  
Statistical analysis of snow survey data,  
Norrköping 1979
- Nr RHO 21            Eriksson, B  
Sveriges vattenbalans. Årsmedelvärde (1931-60) av  
nederbörd, avdunstning och avrinning
- Nr RHO 22            Gottschalk, L and Krasovskaia, I  
Synthesis, processing and display of comprehensive  
hydrologic information
- Nr RHO 23            Svensson, J  
Sinking cooling water plumes in a numerical model,  
Norrköping 1980
- Nr RHO 24            Vasseur, B, Funkqvist, L och Paul, J F  
Verification of a numerical model for thermal plumes,  
Norrköping 1980
- Nr RHO 25            Eggertsson, L-E  
HYPOS - ett system för hydrologisk positionsangivelse,  
Norrköping 1980
- Nr RHO 26            Buch, Erik  
Turbulent mixing and particle distribution investiga-  
tions in the Himmerfjärd 1978  
Norrköping 1980
- Nr RHO 27            Eriksson, B  
Den "potentiella" evapotranspirationen i Sverige  
Norrköping 1980
- Nr RHO 28            Broman, B  
On the spatial representativity of our oceanographic  
measurements  
Norrköping 1981
- RHO 29                Ambjörn, C, Luide, T, Omstedt, A och Svensson, J  
An operational oil drift model for the northern Baltic,  
Norrköping 1981







SWEDISH METEOROLOGICAL AND HYDROLOGICAL INSTITUTE

Box 923, S-601 19 Norrköping, Sweden. Phone +46 11 10 80 00. Telex 644 00 smhi s

ISSN 0347-7827