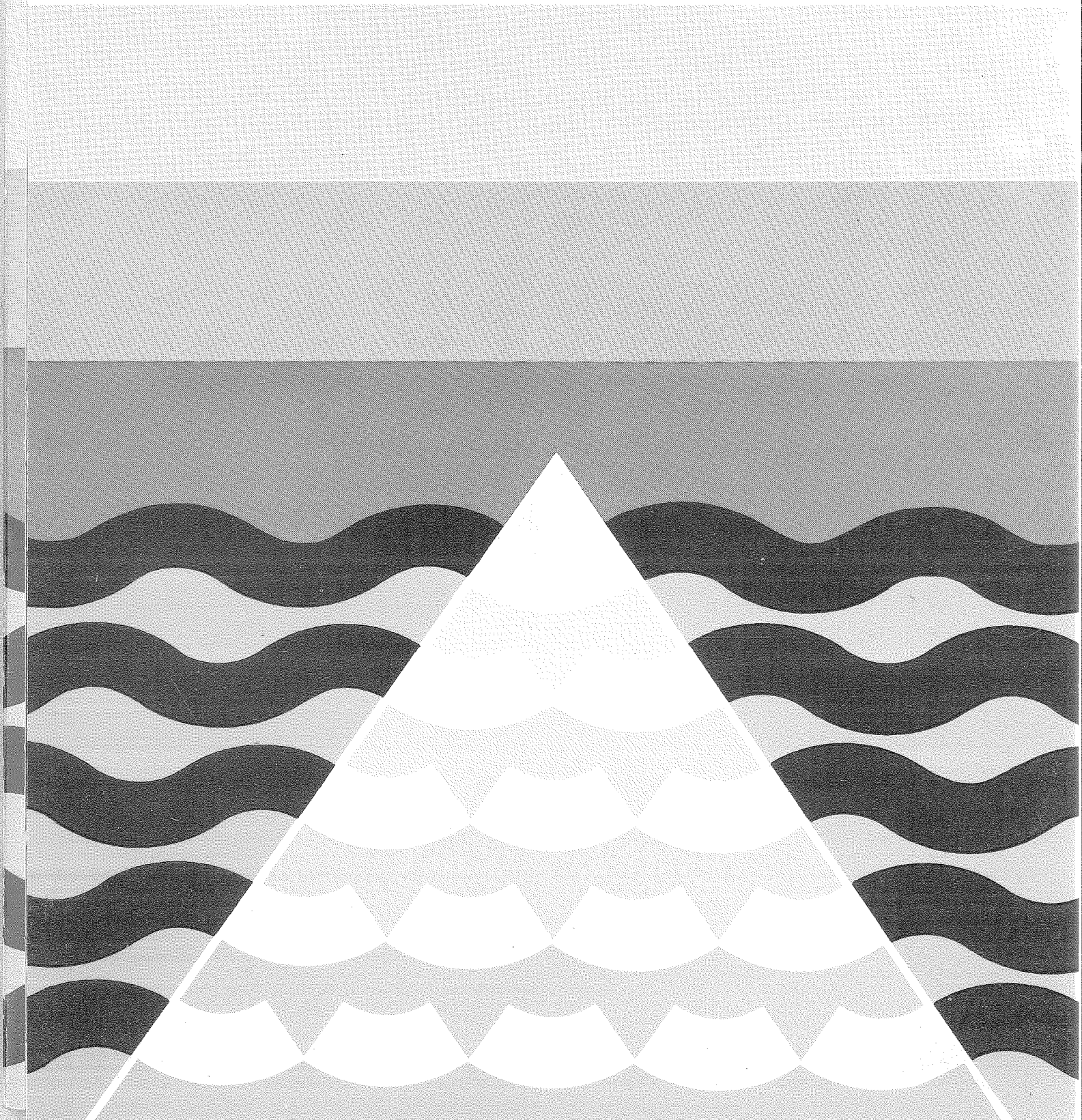


SERIE B
1977 Nr. 4

FISKEN og HAVET

RAPPORTER OG MELDINGER
FRA FISKERIDIREKTORATETS HAVFORSKNINGSINSTITUTT - BERGEN



SERIE B
1977 Nr. 4

Begrenset distribusjon
varierende etter inn-
holdet (Restricted
distribution).

SPREDNING OG TRANSPORT AV
OLJEFORURENSNING PÅ HAVET

EN LITTERATUROVERSIKT

AV

SVEIN SUNDBY og ROALD SÆTRE
Fiskeridirektoratets Havforskningsinstitutt
Boks 1870-72, 5011 Bergen - Nordnes

Redaktør
Erling Bratberg

April 1977

T A K K

Vi ønsker å takke Fiskeridirektoratets Bibliotek for det detektivarbeid de har utført for å finne frem mye av den litteratur som er brukt. Likeledes en hjertelig takk til Jorunn Horne for hennes tålmodighet både med maskinskrivingen og ovenfor forfatterne.

I N N H O L D

1.	INNLEDNING	Side	5
2.	OLJENS FYSISK-KJEMISKE EGENSKAPER	"	8
3.	SELVSPREDNING AV OLJE	"	13
4.	OVERFLATETRANSPORT AV OLJE MED VIND OG BØLGER	"	24
5.	TURBULENT SPREDNING	"	35
6.	LITTERATURLISTE	"	39

1. INNLEDNING

Årlig tilføres verdenshavene store mengder olje. Der rår store usikkerheter når det gjelder mengden, og overslagene varierer mellom 2 og 10 millioner tonn. Den aller største del skyldes oljespill fra tankbåter, og de fleste slike utslipp finner sted i kystnære områder. Tabell 1 gir en oversikt over noen av de største oljeutslipp.

Tabell 1. Noen av de større oljespill (SOLHEIM, H. 1976).

Navn og sted	År	Årsak	Oljetype	Mengde (tonn)
«Tampico Maru» California, USA.	1957	Grunnstøting	Diesel	8 500
«Argea Prima» Puerto Rico	1962	Grunnstøting	Råolje	4 000
«Anne Mildred Brøvig» Helgoland, Tyskland	1966	Kollisjon	Råolje	32 000
«R. C. Stoner» USA.	1967	Grunnstøting	Blanding av flere	20 000
«Torrey Canyon» Scilly Isles, Syd-England	1967	Grunnstøting	Råolje	100 000
West Delto USA	1967	Rørledningsbrudd	Råolje	24 000
«Andron»	1968	Sank	Råolje	15 000
«Keo»	1968	Skrogfeil	Brenselolje nr. 6	30 000
«World Glory»	1968	Skrogfeil	Råolje	45 000
«Ocean Eagle»	1968	Grunnstøting	Råolje	12 000
«Seawarren»	1969	Lagertank	Råolje	30 000
Santa Barbara, California, USA.	1969	Oljebrønn	Råolje	15 000
«Florida» West Faulmoth, USA	1969	Grunnstøting	Brenselolje	
Chevron Mexico-gulfen, USA	1970	Produksjonsplattform	Råolje	5 000
«Arrow» Chedabukta Bay, Canada	1970	Grunnstøting	Dieselolje	
«British Mallard» Troms, Norge	1973	Grunnstøting	Dieselolje	2 200
«Metula» Magellanstredet, Chile	1974	Grunnstøting	Råolje	50 000
«Urquiola» La Coruna, Spania	1976	Grunnstøting	Råolje	100 000

Hvorfor har så ikke disse store oljemengder resultert i en mere synlig og alvorlig forurensning enn det vi idag kan observere? Svaret er at olje på havet er utsatt for en rekke naturlige prosesser som tilslutt får oljen til å forsvinne.

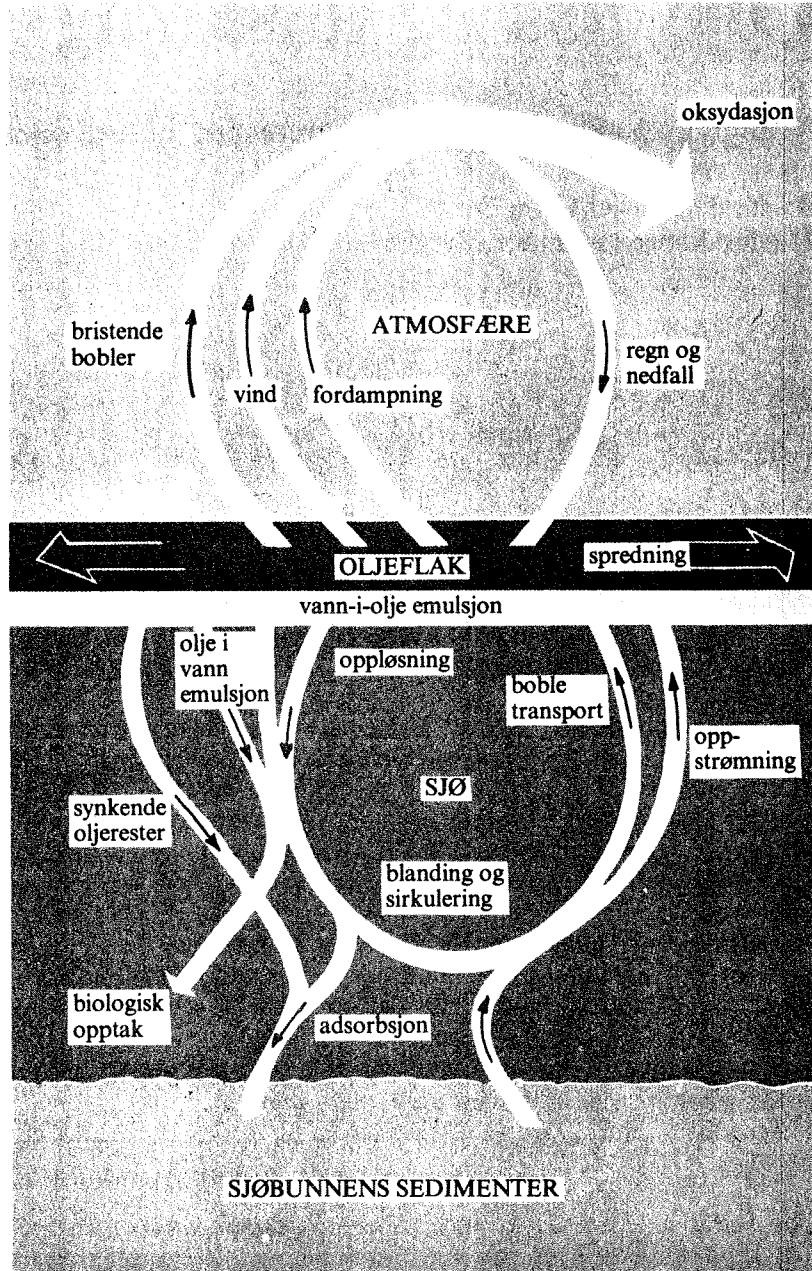


Fig. 1. Naturlige prosesser som virker på olje på havet (Modifisert etter GARRETT, W.D. 1972).

Fig. 1 gir en oversikt over de viktigste av disse. Oljens mere flyktige komponenter vil fordampe, og det dannes aerosoler og emulsjoner. Noe synker ned og sedimenteres på havbunnen og strender. Det finner også sted en aktiv nedbrytning av oljen ved hjelp av sollys, oksygen og mikroorganismer. Alle disse prosessene er avhengig av den fysiske og kjemiske karakteristikk både av oljen og det miljøet som omgir den.

I de senere år er skjedd en veldig økning av den litteratur som tar for seg de forskjellige sider av problemet olje-på-havet. "Torry Canyon"-ulykken i 1967, som gjorde en hel verden oppmerksom på de problemer en kunne stå overfor, er vel den viktigste årsak til dette. NELSON-SMITH (1972) summerer godt opp litteraturen frem til 1971 med hovedvekt på den kjemiske og biologiske side. På norsk gir BERGE (1975), PALMORK (1975) og HÆGH (1975) oversikter over samme emne. FN's rådgivende ekspertgruppe på marin forurensning (GESAMP) har også foretatt en samlet vurdering av oljens virkning på livet i havet (ANON 1976 a, b) som også inneholder en omfattende litteraturliste.

Felles for alle disse oversiktene er at den fysiske siden som behandler transport og spredning av olje på havet, er den som er dårligst dekket. FALLAH og STARK (1976) har publisert en litteraturoversikt over emnet spredning og transport av oljeutslipp på havet. Denne begrenser seg til å liste små sammen- drag av hva forfatterne mener er viktige arbeider. Litteratur- listen deres derimot er meget omfattende. ROSTAD (1976) har også tatt for seg endel viktige fysiske prosesser.

Denne rapporten er et forsøk på å summere opp hva vi vet og kanskje ikke minst hva vi ikke vet om de fysiske prosesser som bestemmer hvorledes olje og oljekomponenter transporteres og spredes i det marine miljøet. Den tar sikte på å være en støtte for dem som driver forskning innen andre områder av problemkomplekset olje-på-havet og å være til hjelp for dem som er opptatt med praktisk bekjempelse av oljeforurensning.

Ved Havforskningsinstituttet arbeider man nå med planer om et større kunstig utslipp av olje i 1978. Dette vil kunne gi svar på hvilke konsentrasjoner av oljehydrokarboner en kan forvente å finne i vannet omkring et større oljeutslipp. For å kunne foreta en realistisk konsekvensanalyse er slike data absolutt nødvendige. Dessuten vil et slikt eksperiment gi muligheter for å belyse de fysiske prosesser som bestemmer spredning og transport av olje og oljekomponenter og likeledes kanskje fortelle noe om biologiske effekter. Det er med bakgrunn i dette at denne rapporten er blitt utarbeidet.

Rapporten inneholder en omfattende liste over den litteratur som er gjennomgått. Fra denne listen er det foretatt et kritisk utvalg av de arbeider som vi mener er mest vesentlige, og disse er da referert til i teksten og merket med stjerne i litteraturlisten.

2. OLJENS FYSISK-KJEMISKE EGENSKAPER

I dette kapittelet er det bare tatt med en del om de fysiske og kjemiske egenskapene som kan tenkes å ha relasjon til blandings- og spredningsmekanismene for olje. De mange muligheter det er for å kombinere karbon- og hydrogenatomer til større og mindre molekyler medfører at råolje består av mange tusen forskjellige komponenter. Størstedelen, fra 80 % og opp til 98 %, er rene hydrokarboner, d.v.s. komponenter som bare inneholder hydrogen og karbon. Resten utgjør stor sett organiske forbindelser med svovel, nitrogen og oksygen.

De kjemiske og fysiske egenskapene til de enkelte komponentene kan være svært forskjellige. Det er store variasjoner i kokepunkt, viskositet, tetthet og affinitet til vandige og organiske løsningsmidler. Disse faktorene har avgjørende betydning for oljens evne til å blande seg i sjøen i form av emulsjoner og løsninger, og for fordampningen fra overflaten. NELSON-SMITH (1972) gir endel fysiske egenskaper for noen av hydrokarbonene i råolje. Det framgår at det er store variasjoner i tettheten. Den letteste komponenten, metan, har en tetthet på $0,424 \text{ g/cm}^3$,

mens antracen har en tetthet på $1,25 \text{ g/cm}^3$. Råolje fra forskjellige kilder inneholder stort sett de samme komponentene, men mengdeforholdene i de forskjellige råoljene kan variere sterkt. Derfor er det også store variasjoner i de fysiske-kjemiske egenskapene. Råolje fra Pennsylvania har en tetthet på $0,811 \text{ g/cm}^3$ ved 16°C , mens mexikansk olje har en tetthet på $0,988 \text{ g/cm}^3$ ved samme temperatur.

Tetthetsforandringen m.h.p. temperaturen er større for olje enn for sjøvann. Oljen kan derfor synke dersom den blir tilstrekkelig avkjølt. DENNIS (1959) nevner et eksempel på at 6500 tonn tung fyringsolje, som lekket ut fra et grunnstøtt skip i kalde farvann, sank for senere å komme opp til overflaten da oljen drev inn i varmere farvann. Videre er det hevdet at ca. 30.000 tonn råolje som lekket ut fra "Anne Mildred Brøvig" i Nordsjøen i 1966 må ha sunket. Oljen ble aldri observert (NELSON-SMITH 1972). Temperaturen i overflatelagene i kystfarvannene utenfor Vestlandet varierer gjennom året med ca. 10°C . På Skagerrakkysten vil de årlige variasjonene normalt være mellom 1°C og 18°C . Det er derfor klart at slike temperaturendringer kan ha stor virkning på oppdriften av de typer olje som har en tetthet nær sjøvannets.

Når råolje flyter ut på sjøen, vil de flyktige komponentene meget raskt fordampe og delvis også løse seg i sjøvannet. Dette fører til at tettheten og viskositeten av den gjenværende oljen øker. Undersøkelser av PARKER, FREEGARDE & HATCHARD (1971) viser at 25 % av komponentene i et oljeflak forsvant i løpet av 2 - 3 dager. Utover denne tiden vil massetapet gå mye langsommere. Ved oljesøl i forbindelse med grunnstøtingen av "Drupa" ved Tananger, hvor ca. 2000 tonn olje lekket ut, var ca. 30 % av oljen forsvunnet etter 6 døgn og ca. 50 % etter 1 mnd. (GRAHL-NIELSEN, NEPPELBERG, PALMORK, WESTRHEIM og WILHELMSSEN 1976).

Det er imidlertid mindre kjent hvordan oljen forsvinner, d.v.s. hvor stor del som oppløses, hvor stor del som fordamper, hvor stor del som emulgeres og hvor stor del som nedbrytes ved kjemiske og biologiske prosesser.

De fleste forfattere antar at nedbrytning ved biologisk aktivitet er liten i forhold til de andre prosessene, ihvertfall mens oljen ennå er i flytende form. Etterhvert som fordampning, løsning og emulsjon avtar, vil den biologiske nedbrytningen få økende betydning. Den biologiske nedbrytningen er imidlertid sterkt temperaturavhengig.

Vanligvis antar man at fordampningen er årsak til den største delen av massetapet de første dagene etter et utslipp.

HARRISON, WINNIK, KWONG, & MACKAY (1975) utførte felteksperimenter for å finne ut hvor stor del som gikk i oppløsning. To komponenter, ispropyl-benzen og n-nonane ble tilført råolje. Disse komponentene ble valgt fordi de har omtrent samme damptrykk, mens ispropyl-benzen er ca. 250 ganger mer løselig.

Massetapet av komponentene ble forenklet uttrykt slik:

$$\frac{d(M X_i)}{dt} = - \frac{K_E X_i \gamma_i P_i}{RT} - K_D S_i X_i \gamma_i \quad (2.1)$$

hvor første leddet på høyre side av ligningen uttrykker massetapet i form av fordampning, og andre leddet uttrykker massetapet i form av oppløsning.

- M = antallet mol pr. flateenhet
- X_i = molfraksjonen
- γ_i = aktivitetskoeffisienten
- P_i = metningsdamptrykket
- S_i = løselighet i vann
- R = den universelle gasskonstanten
- T = absolutt temperatur
- K_D = diffusjonskonstanten
- K_E = fordampningskonstanten

Løsningen av ligning (2.1) gir

$$X_i = X_{i0} e^{(-Kt)} \quad (2.2)$$

hvor

$$K = \frac{K_E \gamma_i P_i}{RT} + \frac{K_D S_i \gamma_i}{M} \quad (2.3)$$

Den vesentligste innvendingen mot denne løsningen er antagelsen om at M er konstant m.h.p. tiden. Selvspredningen gjør at denne antagelse ikke holder. Konklusjonene til HARRISON et al. (1975) blir derfor noe usikre, men rent kvalitativt gir modellen en antydning om størrelsesordenen av fordampning og oppløsning.

De eksperimentelle resultatene bekrefter at fordampningen har størst betydning. Oppløsningen er iallefall mindre enn halvparten av fordampningen, mens modellen over indikerer at oppløsningen kan være så lav som 1 % av fordampningen.

Det må understrekes at eksperimentene over gjelder meget flyktige komponenter. Forholdet mellom fordampning og løselighet blir trolig et annet for tyngre komponenter.

SIVADIER & MIKOLAJ (1973) hevder at råolje mister alle komponentene med lavere karbontall enn 12 i løpet av det første døgnet, mens komponenter med karbontall mellom 12 og 15 trenger hele 20 døgn i tillegg for å forsvinne. Det må antas at en forholdsvis større del av disse komponenter forsvinner via andre veier enn fordampning.

Løseligheten av hydrokarboner i vann er avhengig av temperaturen. Når det gjelder rettkjedete paraffiner, er det funnet at løseligheten avtar én 10-potens når karbonantallet øker med 2 (PARKER, FREEGARDE & HATCHARD 1971). Tilsvarende enkle regler for løselighet gjelder ikke for de øvrige hydrokarboner. Her vil molekylkonfigurasjonen ha stor betydning. For hydrokarboner med et gitt antall karbonatomer, vil forgreinete molekyler ha større løselighet enn rettkjedete molekyler. Dannelse av umettede eller ringformede molekyler vil også øke løseligheten (McAULIFFE 1966). De lettere aromatiske forbindelser er i særlig grad lettløselige (Fig. 2).

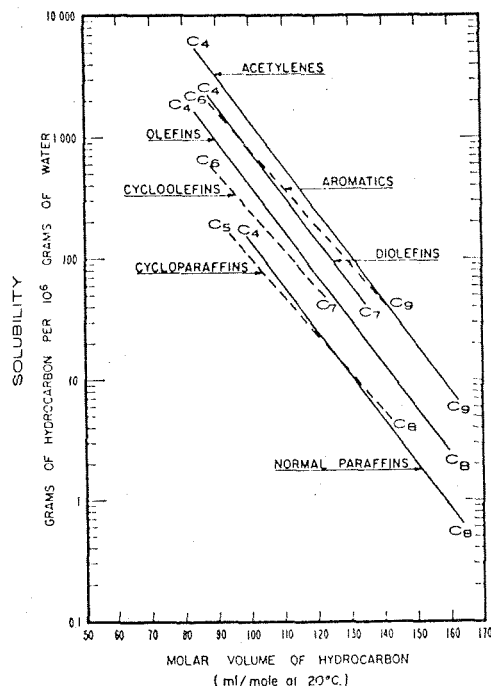


Fig. 2. Løseligheten i vann av forskjellige typer hydrokarboner som funksjon av karbontallet (Etter McAULIFFE 1966).

Molekyler som er substituert med svovel, nitrogen eller oksygen, er vanligvis polare eller har evnen til å danne joner. Lettere molekyler av denne typen er lettløselige, men dersom karbontallet er høyt, vil slike substituerte ikke ha noen vesentlig virkning på løseligheten. BERRIDGE, DEAN, FALLOWS & FISH (1968) hevder at en betydelig del av opprinnelig tungtløselige substanser etterhvert oksyderes og blir ført over til lettløselige former.

Det oppstår lett mekaniske blandinger mellom olje og vann. Selv i meget lett sjø vil emulgering være virksom. Dannelsen av emulsjon vil være særlig stor dersom tetthetsforskjellen mellom olje og vann er liten, eller viskositeten på oljen er lav. Likevel har konsentrasjonen av visse kjemiske stoffer trolig størst betydning for dannelsen av emulsjoner. Det skilles mellom olje-i-vann og vann-i-olje emulsjon. Dannelsen av olje-i-vann emulsjon blir sterkt øket ved tilsetning av dispergeringsmidler.

Råolje kan inneholde 50 % vann uten at det kan oppdages rent visuelt at vann er tilstede i oljen. Når vanninnholdet økes ut over dette, vil oljen forandre seg sterkt m.h.t. utseende og viskositet. Oljen kan inneholde opp til 80 % vann. Den får da en brun-svart og deigaktig konsistens, og blir på engelsk betegnet nok kalt "chocolate mousse". I denne formen blir det hevdet at oljen vanskelig går over i olje-i-vann-emulsjon, og nedbrytning av oljekomponenter skjer meget langsomt. Det er også lettere å samle opp olje med mekaniske hjelpemidler når den har en slik konsistens. En skal imidlertid være klar over at når oljen er kommet på denne formen er allerede en stor mengde av komponentene gått i oppløsning i sjøen.

BERRIDGE, THEW & LORISTON-CLARKE (1968) har undersøkt forskjellige råoljetyper med henblikk på å finne ut hvorfor enkelte svært lett danner vann-i-olje emulsjoner mens andre meget vanskelig danner slike emulsjoner. Det ble sluttet av eksperimentene at høyt innhold av asfaltener virker stabiliserende på vann-i-olje

emulsjonene. NAGY (1973) gjorde forsøk med i hvilken grad en type råolje (Western mix), flybensin og tung fyringsolje danner vann-i-olje emulsjoner ved forskjellig grad av turbulens og temperatur. Resultatene viste at tung fyringsolje dannet lettest emulsjon, mens flybensin ikke dannet merkbare mengder vann-i-olje-emulsjoner.

Dannelse av de omvendte emulsjoner, nemlig olje-i-vann-emulsjoner, fremmes av visse emulgeringskomponenter som naturlig forekommer i råolje. Dette er komponenter som har en hydrofil del, f.eks. syrer (-COO-), alkoholer-OH, aldehyder -CHO, sulfat -OSO₃ - og sulfonat - SO₃H (PILPEL 1968). Dannelsen av slike emulsjoner er imidlertid også sterkt avhengig av vind og bølger.

3. SELVSPREDNING AV OLJE

Olje på sjøen utsettes for spredning av vind, bølger og strøm. Slik form for spredning hvor ytre krefter er de drivende, kommer vi tilbake til i neste kapittel. Her tar vi for oss selvspredning, d.v.s. den spredningen som skyldes tilstander og egenskaper i selve oljen og i vannet umiddelbart omkring.

BLOKKER (1964) var den første som introduserte en modell for spredning av olje på sjøen. Han gjorde den enkle antagelsen at spredningshastigheten av et oljeflak ved et gitt tidspunkt er proporsjonal med tetthetsforskjellen mellom olje og vann og proporsjonal med forskjellen i tykkelse på oljeflaket ved det angitte tidspunkt og tykkelsen etter endt spredning:

$$\frac{dl}{dt} = K_B (\rho_V - \rho_O) \frac{\rho_O}{\rho_V} (h_t - h_\infty) \quad (3.1)$$

hvor

- l = lengden av oljeflaket
- t = tid
- ρ_V = vannets tetthet
- ρ_O = oljens tetthet

- h_t = oljeflakets tykkelse ved tiden t
 h_∞ = oljeflakets tykkelse etter endt spredning
 K_B = konstant som bestemmes eksperimentelt for den enkelte oljetype. Den blir også kalt "Blokker-konstanten"

Av denne ligningen ble spredning i en kanal utledet:

$$l_t^2 - l_o^2 = 4 K_B (\rho_v - \rho_o) \frac{\rho_o}{\rho_v} \frac{V_o}{b} t \quad (3.2)$$

hvor

- V_o = det totale oljevolumet
 b = bredden av flaket
 l_o = lengden på flaket etter et visst tidspunkt
 l_t = lengden på flaket etter tiden t

For sirkulær, aksesymmetrisk spredning fra et punkt får en løsningen:

$$d_t^3 - d_o^3 = \frac{24}{\pi} K_B (\rho_v - \rho_o) \frac{\rho_o}{\rho_v} V_o t \quad (3.3)$$

hvor

- d_o = diameteren på flaket etter et visst tidspunkt
 d_t = diameteren på flaket etter tiden t

Blokkers ligninger gjelder ikke i spredningens første fase. Først etter at flaket har nådd en viss utstrekning l_o h.h.v. d_o , kan ligningene beskrive spredningen. Før flaket har nådd denne utstrekningen, brer oljen seg utover som en bølge. Det viste seg også at etter at spredningen hadde pågått i en tid etter bølgefasen, passet heller ikke ligningene. Blokker forklarte dette fenomenet som effekten av fordampning av oljekomponenter. Dette var imidlertid bare delvis riktig. Etter lengre tids spredning vil grenseflatekreftene mellom olje, vann og luft få en dominerende virkning. BERRIDGE et al. (1968) bestemte Blokker's konstant K_B for en rekke oljetyper og resultatene er vist i Tabell 2.

Tabell 2. Blokker's konstant, K_B , for forskjellige typer råoljer

OLJETYPE	K_B
Libysk (Brega)	1085
Iransk . Tung	750
Kuwait	1480
Irak (Kirkuk)	975
Venezuela	1340

FAY (1969 og 1971) var den første som systematisk undersøkte hvilke krefter som virker under oljespredning. Når en oljemengde slippes ut på overflaten enten i form av et plutselig utslipp eller som en kontinuerlig lekkasje, vil fire krefter virke på oljen, hvorav to bidrar til å spre oljen og 2 motvirker spredning av oljen:

- 1) Trykkraften, P , bidrar til å spre oljen og er et resultat av tyngdekraftens virkning på en hellende oljeplate.
- 2) Grenseflatekreftene, S , som virker mellom vann, olje og luft, bidrar til å spre oljen. Under spesielle forhold kan de også bidra til å minske et oljeflak som allerede har nådd full spredning.
- 3) Tregghetskraften, I , motvirker spredningen.
- 4) De viskøse kreftene, F , i oljen og i vannet umiddelbart under oljelaget motvirker spredningen.

Når et oljespill starter, vil spredningen gjennomgå følgende faser i kronologisk rekkefølge. I hver fase er det til venstre satt opp dominerende drivende krefter og til høyre de dominerende bremsende krefter:

- i) $P \longleftrightarrow I$
- i*) $P \longleftrightarrow I + F$
- ii) $P \longleftrightarrow F$
- ii*) $P + S \longleftrightarrow F$
- iii) $S \longleftrightarrow F$

En kontinuerlig beskrivelse av spredningen gjennom alle faser ved hjelp av de hydrodynamiske ligningene vil være meget vanskelig, for ikke å si umulig. FAY (1969 og 1971) viste at fasene i), ii) og iii) dekket det vesentlige av spredningen ved å gjøre en analyse av de enkelte leddenes størrelsesorden til forskjellige tidspunkt. Fasene merket med stjerne er av forholdsvis kort varighet og har derfor mindre betydning.

HOULT (1972) videreførte Fay's arbeid og viste at løsning av Navier-Stokes ligningene ga det samme resultatet. Hoult sammenliknet de teoretiske resultatene med eksperimentelle resultater, og beregnet de ukjente konstantene i ligningen.

Vi skal her først ta for oss Fay's resonnement for det todimensjonale tilfellet og deretter kommentere de 3 første stadiene i selvspredningen hver for seg.

Anta at oljens tetthet er ρ_o , vannets tetthet er ρ_v , tykkelsen av oljelaget er h . Den delen av oljelaget som ligger over vannets overflate har tykkelsen h' (Fig. 3).

Det antas videre at forskjellen i tetthet mellom olje og vann er forholdsvis liten (anslagsvis $0,1 - 0,05 \text{ g/cm}^3$). Under disse forhold betraktes trykket som hydrostatisk. Trykket i horisontal retning er da av størrelsesorden :

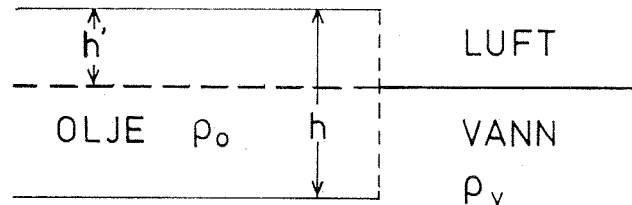


Fig. 3. Skisse til beregning av trykkrefter.

$$\rho g h' = \rho g \Delta h \quad \text{hvor } \Delta = \frac{\rho_v - \rho_o}{\rho_v}$$

Oljeflakets radius er l . Størrelsesordenen av de fire virkende kreftene er da:

- 1) Trykkraften (som genereres av tyngdekraften):

$$P \sim (\rho g \Delta h) hl$$

- 2) Det såkalte spredningstrykket, σ , kan uttrykkes slik:

$$\sigma = \sigma_v - (\sigma_{ov} + \sigma_o)$$

hvor

σ_v = overflatespenningen mellom vann/luft

σ_o = overflatespenningen olje/luft

σ_{ov} = overflatespenningen olje/vann

(Se Fig. 4)

Spredningstrykket har dimensjon kraft pr. lengdeenhet og størrelsesordenen av kraften er derfor

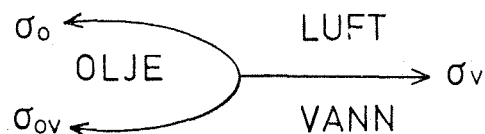


Fig. 4. Skisse for beregning av spredningstrykket.

$$S \sim \sigma \cdot l$$

- 3) Tregetskraften, kraften som virker på en massepartikkel under akselerasjon, blir av størrelsesordenen:

$$I \sim \rho (lt^{-2}) hl^2$$

- 4) Det antas at mesteparten av energien som dissiperes gjennom friksjon går tapt i selve grenseflaten mellom olje og vann og i vannet umiddelbart under denne grensen. Skjærhastigheten gjennom selve oljelaget antas å være neglisjerbart (Fig. 5).

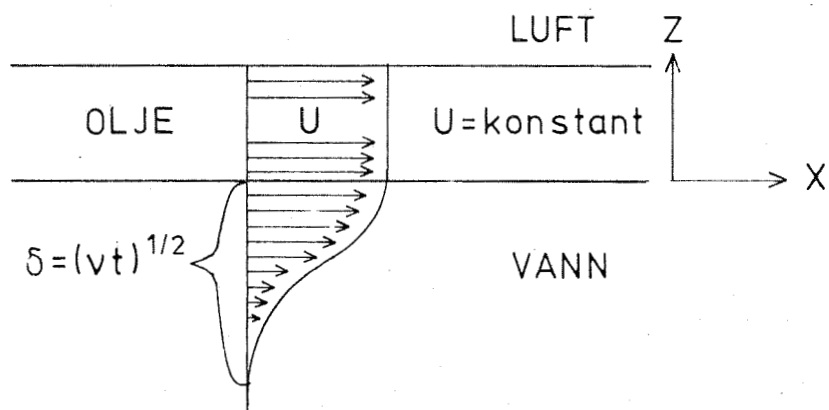


Fig. 5. Skisse for beregning av det viskøse draget.

Det viskøse draget som vannet utøver på oljeflaket over, er da av størrelsesorden:

$$F \sim [\mu(1t^{-1})\delta^{-1}] l^2$$

hvor

$$\mu = \rho\nu \quad \text{og} \quad \delta = (\nu t)^{1/2}$$

hvor

μ og ν er h.h.v. den dynamiske og kinematiske viskositetskoeffisient for vann, og δ er tykkelsen av det hydrodynamiske grenselaget.

Det totale oljevolumet har størrelsesorden $V \sim hl^2$.

Umiddelbart etter oljeutslippet vil som nevnt fase i) være dominerende, d.v.s. trykkrefter, P , og treghetskrefter, I , er i virksomhet.

Sammenlignes P med I får vi:

$$l \sim (g\Delta V)^{1/4} t^{1/2} \quad (3.4)$$

Under denne fasen er tykkelsen, h , stor og $P \gg S$.

Dette medfører: $h \gg \left(\frac{\sigma}{\rho g \Delta}\right)^{1/2}$

I fase ii) sammenlignes P og F og uttrykket for l blir dermed:

$$l \sim v^{-1/2} (g\Delta)^{1/6} v^{1/3} t^{1/4} \quad (3.5)$$

Under disse forhold er $P > S$ som i fase i) og dessuten $F > I$.

Dette medfører at $(vt)^{1/2} > h > \left(\frac{\sigma}{\rho g \Delta}\right)^{1/2}$

Altså må tykkelsen på oljeflaket være mindre enn tykkelsen av det hydrodynamiske grenselaget.

I fase iii) sammenlignes S og F. Dette medfører

$$l \sim \sigma^{1/2} \left(\frac{\rho}{\mu}\right)^{1/4} t^{3/4} \quad (3.6)$$

I denne fasen er altså spredningen uavhengig av volumet av oljeutslippet.

Uttrykkene i ligningene (3.4), (3.5) og (3.6) er et resultat av en analyse av de enkelte leddenes størrelsesorden. For å få et tallmessig mere riktig uttrykk for utbredelsen av oljeflaket i de enkelte faser, må vi i disse ligningene føre inn proporsjonalitetskonstanter, henholdsvis k_1 , k_2 og k_3 . Tabell 3 viser en del observerte verdier av disse konstantene i de tre fasene.

Tabell 3. Spredningskoeffisienter

	<u>Endimensjonal spredning</u>	<u>Todimensjonal spredning</u>
Fase i	1,5	1,14
Fase ii	1,5	1,45
Fase iii	1,33	2,30

I Fig. 6 er vist utbredelsen av et oljeflak med hensyn på tiden gjennom de tre faser.

Den første fasen i Fay's teori er bekreftet eksperimentelt for det éndimensjonale tilfellet av SUCHON (1970) og LIANG (1971). Dessuten er den behandlet i detalj, teoretisk og eksperimentelt av HOULT (1972).

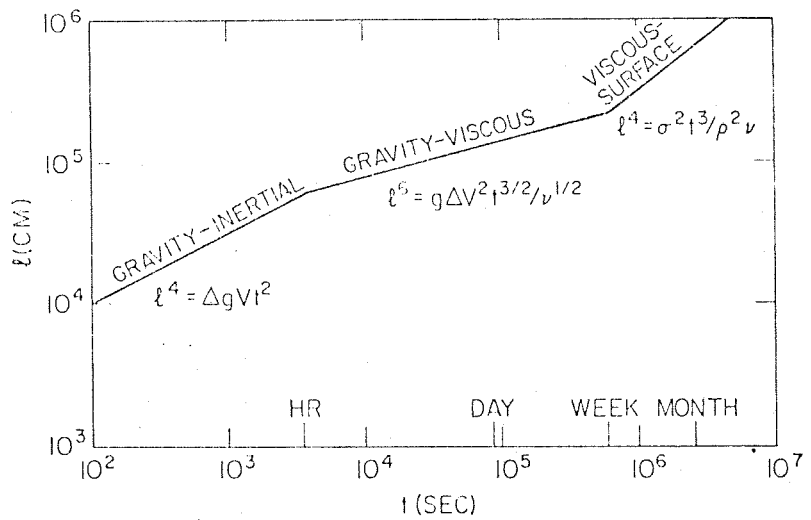


Fig. 6. Spredningen av et oljeflak av størrelsesorden 10 000 tonn (HOULT 1972).

BENJAMIN (1968) har dessuten en fyldig teoretisk behandling av fenomenet generelt uten spesiell henvisning til oljespredning. Som det sees av Fig. 6, er denne første fasen av meget kort varighet etter et plutselig oljeutslipp, for store oljespill av størrelsesorden timer. Oljen brer seg da utover som en bølge som er tykkest ved fronten. Rett bak fronten dannes det en turbulent sone som vist i Fig. 7. I dette tilfellet er væsken som sprer seg tyngre enn vannet.

For olje vil det motsatte være tilfelle slik at figuren egentlig skulle vært snudd opp ned.

Hastigheten på bølgefronten er utledet av von KARMAN (1940)

under den forutsetning av at fronten ikke forandrer form: $c = (2g \Delta H)^{1/2}$

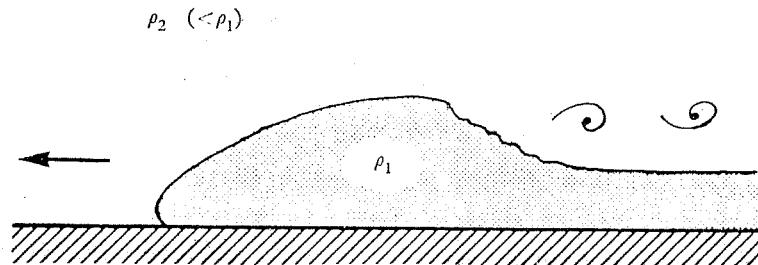


Fig. 7. Form og utbredelse av bølgefronten (BENJAMIN 1968).

hvor H er den konstante tykkelsen av oljeflaket bak bølgefronten.

BENJAMIN (1968) har vist at forutsetningen om at bølgefronten ikke forandrer form neppe holder i virkeligheten.

Målinger av ABBOTT (1961) viste at hastigheten på bølgefronten var $c = (g \Delta H)^{1/2}$

En svakhet ved disse målingene er at de ble utført meget nær utslippet. Den mest korrekte verdien er trolig

$$c = (\lambda g \Delta H)^{1/2} \text{ hvor } 1 < \lambda < 2 \quad (3.7)$$

Den andre fasen er bekreftet eksperimentelt for det endimensjonale tilfellet av SUCHON (1970) og er dessuten behandlet på teoretisk grunnlag av BUCKMASTER (1973). I motsetning til Fay's enkle resultater, hvor en må bestemme konstanten k eksperimentelt, løser Buckmaster ligningen for det endimensjonale tilfellet teoretisk (Buckmaster kaller dette selv todimensjonalt):

$$R(t) = 1.76 (g\Delta)^{1/4} V^{1/2} v^{-1/8} t^{3/8} \quad (3.8)$$

hvor $R(t)$ er den tidsavhengige lengde fra utslippspunkt til oljefronten og hvor $V \sim h l$ i motsetning til hos HOULT (1972) hvor $V \sim h l^2$. Forskjellen mellom Buckmasters teoretiske k-verdi på 1.76 og Suchon og Hoults eksperimentelle på 1.5 er ikke fullt ut forklart, men det blir antydnet at årsaken kan være at det hydrodynamiske grenselaget er turbulent og ikke laminært som antatt i utledningen. Trolig må en også regne med at antagelsen om at det ikke er skjærspenninger på tvers av oljelagets tykkelse, heller ikke er holdbar.

I den tredje fasen er $h < \left(\frac{\sigma}{\rho g \Delta}\right)^{1/2}$

Hoult's teoretiske beregninger av k for denne fasen viser store avvik fra de eksperimentelle resultatene til GARRETT & BARGER (1970) og LEE (1971). Det er ikke funnet noen forklaring på dette avviket. Det gjelder særlig for det todimensjonale tilfellet hvor den eksperimentelle k-verdien er 2,30 mens den teoretiske k-verdien er 0,128.

Grenseflatekreftene forandres imidlertid stadig under hele spredningsprosessen fordi den kjemiske sammensetningen av oljen er i sterk forandring under spredningen.

Helt rene hydrokarboner spres vanligvis ikke spontant på vannflaten. Overflatespenningen olje/luft, σ_o , har da en så stor verdi at det totale spredningstrykket

$$\sigma = \sigma_v - (\sigma_o + \sigma_{ow}) \text{ blir negativt.}$$

Bare de lettere lavmolekylære hydrokarbonene spres lett. Alifatiske hydrokarboner som er mer flyktig enn n-nonane og de fleste aromater har et svakt positivt spredningstrykk, mens ingen av de sykliske hydrokarbonene har positivt spredningstrykk (GARRETT 1969). Når allikevel råolje har et forholdsvis stort spredningstrykk, skyldes dette at råoljen har et høyt innhold av polare komponenter. Disse komponentene senker oljens overflatespenning betraktelig. Råoljer med høyt innhold av polare komponenter har et spredningstrykk på opptil 33 dynes/cm.

Det er gjort flere forsøk på å senke overflatespenningen av vannet rundt olje for på den måten å senke spredningstrykket. Et oljeflak, som er fullt utviklet, kan på den måten trekke seg sammen dersom sjøvannet rundt flaket blir tilført komponenter som reduserer vannets overflatespenning. COCHRAN og SCOTT (1971) har antydnet at vannuløselige alkoholer og syrer med høy molekylvekt, f.eks. stearinsyre og oleinsyre, kan være brukbare til dette. Tilførsel av alkylsulfat reduserer vannets overflatespenning fra 73 dynes/cm til 52 dynes/cm (BLOKKER 1966). O'BRIAN (1970) utførte laboratorieforsøk med moderat og sterkt forurenset vannflate. Som vist på Fig. 8 vil spredningshastigheten i den fasen, hvor grenseflatespredningen er dominerende, reduseres betydelig når vannflaten er sterkt forurenset.

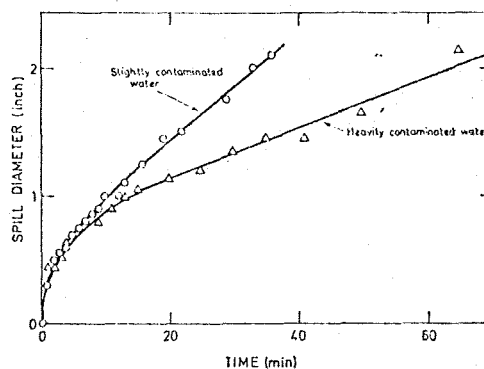


Fig. 8. Utbredelse som funksjon av tid og forurensningsgrad (O'BRIAN 1970).

Hvor stor utstrekning vil så et oljeflak få før selvsprekningen stopper? Allerede i 1933 utledet LANGMUIR en formel for den endelige tykkelsen av et oljeflak basert på likevekt mellom hydrostatisk trykk og grenseflatekrefter og får at

$$\bar{H}^2 \approx \frac{2\sigma\rho_V}{g\rho_O(\rho_V - \rho_O)} \quad (3.9)$$

hvor \bar{H} er middeltykkelsen av oljeflaket.

Et sirkulært oljeflak får således en diameter, d :

$$d \approx \left(\frac{V}{\pi}\right)^{1/2} \left[\frac{8g\rho_O(\rho_V - \rho_O)}{\sigma\rho_V} \right]^{1/4} \quad (3.10)$$

Feltekspesimenter viser at råolje danner 0,001 - 0,004 cm tykke lag. BLOKKER (1966) har antydnet at spredningen i siste fasen blir sterkt redusert av fordampning av lettere komponenter fra oljen. FAY (1971) antar at spredningstrykket blir redusert som følge av oppløsning av oljekomponenter i vannet umiddelbart under oljeflaket. Han kom fram til følgende uttrykk for arealet:

$$A = K_a \left[\frac{\sigma^2 V^6}{\rho^2 v D^3 S^6} \right]^{1/8} \quad (3.11)$$

hvor

D = diffusjonskonstant

S = løselighet i vann

K_a = proporsjonalitetskonstant (størrelsesorden lik 1)

Usikkerhet i bestemmelse av løselighet og spredningstrykk under feltforhold gjør at en må bare anta disse verdiene

Settes $\sigma = 10$ dynes/cm, $D = 10^{-5}$ cm²/sec, $S = 10^{-3}$ g/l,

$K_a = 1$ gir ligningen (3.11)

$$A \text{ (m}^2\text{)} = 10^5 [V \text{ (m}^3\text{)}]^{3/4} \quad (3.12)$$

I Fig. 9 er denne funksjonen tegnet opp sammen med en del observerte verdier etter ALLEN & ESTES (1970).

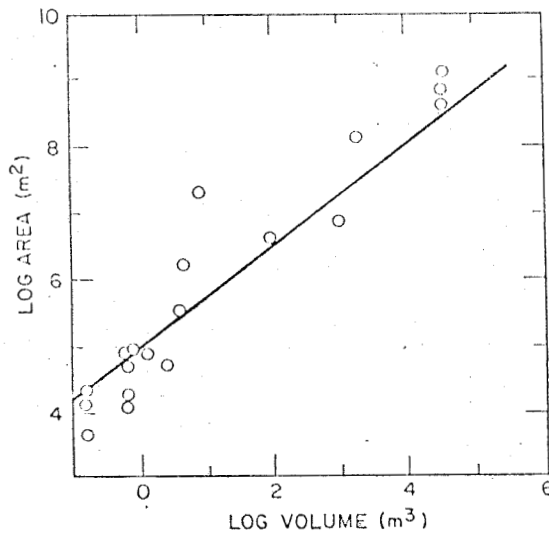


Fig. 9. Maksimum utbredelsesareal som funksjon av volumet (FAY 1971).

4. OVERFLATETRANSPORT AV OLJE MED VIND OG BØLGER

Når vind blåser over en havflate, vil der skje en overføring av bevegelsesmengde og kinetisk energi fra atmosfære til hav (vindstress). Mekanismen bak denne prosessen er ennå ikke helt klarlagt. Den overførte energi vil bli brukt til å sette opp en vindstrøm eller vinddrift i overflaten og til å skape og vedlikeholde bølger.

Ut fra den klassiske Ekmanns teori om en stasjonær vindstrøm i et homogent og uendelig hav følger at vindstrømmen i overflaten, V_0 , er proporsjonal med vinstresset.

$$V_0 = \frac{\tau}{(2 A \rho \omega \sin \phi)}^{1/2} \quad (4.1)$$

hvor

- τ = vindstresset
- ρ = vannets tetthet
- ω = jordens vinkelhastighet
- ϕ = breddegraden
- A = turbulent viskositetskoeffisient

Vindstresset er vanligvis uttrykt som

$$\tau = \rho' C w^2 \quad (4.2)$$

hvor

- ρ' = luftens tetthet
- C = dragkoeffisienten
- w = vindhastighet

Dragkoeffisienten C er bl.a. en funksjon av bølgetilstanden på havflaten og dermed også vinden. Ligning (4.2) kan dermed skrives

$$\tau = \rho' C(w) w^2 \quad (4.3)$$

eller

$$C(w) = \frac{\tau}{\rho' w^2} \quad (4.4)$$

Dragkoeffisienten avtar eller øker med økende vindhastighet avhengig av Richardson's tall Ri

hvor

$$Ri = \frac{g E}{\left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2}$$

- E = Hesselberg - Sverdrup's stabilitetskriterium
- g = tyngdens akselerasjon
- $\frac{\partial v}{\partial z}$ = vertikal hastighetsgradient

En rekke forsøk har vært gjort med forskjellige metoder på å beregne C (w) etter ligning (4.4), men resultatene spriker en god del.

Den manglende fysiske forståelse av energioverføringen fra atmosfære til hav gjør de teoretiske relasjonene vindstress - vindhastighet svært usikker. Observasjoner tyder på at energioverføringen er et komplisert samspill mellom vindhastighet, luftens tetthet og temperatur, havoverflatens tilstand og stabilitetsforholdene nær grenseflaten hav/atmosfære. SPILLANE (1971) gir en god oversikt over nyere teoretisk litteratur på området og diskuterer forskjellige sider av problemet. I denne oversikten vil vi ikke gå nærmere inn på dette, men heller drøfte de mange empiriske relasjoner mellom vindstrøm og vind og å se disse i sammenheng med transport av olje på havet.

Før vi tar fatt på dette skal vi se litt på den transport som skyldes bølger alene. Disse bidrar med en massetransport i forplantningsretningen. Denne såkalte Stokes transport kan uttrykkes som

$$V_s = \pi^2 \left(\frac{H}{L} \right)^2 c \quad (4.6)$$

hvor

c = bølgens forplantningshastighet

H = bølgehøyde

L = bølgelengde

Forholdet $\frac{H}{L}$ kalles for bølgehelling (wave steepness). ALOFS & REISBIG (1972) refererer endel empiriske data hvor det synes å være en sammenheng mellom bølgealder og bølgehelling. Bølgealder er definert som forholdet $\frac{c}{w}$. De bruker så disse data til å beregne Stokes transport etter ligning (4.6) og finner at denne kan komme opp i 2,9 % av vindhastigheten.

Nå vil bølger på havet hverken ha enkle bølgehøyder eller bølgelengder, men kan bedre beskrives ved et bølgespektrum. SCHWARTZBERG (1970) viser hvorledes bruken av et midlere bølgespektrum medfører en Stokes transport på 2,2 % av vindhastigheten ved fullt utviklede bølger. SPILLANE (1971) gjør en

lignende beregning, men han kommer til at Stokes transport maksimalt kan utgjøre 0,83 % av vindhastigheten.

I felteksperimenter kan man vanskelig skille mellom den rene vindstrøm og Stokes transport. Den vindfaktor F man der kommer frem til,

$$F = \frac{V_0}{w_{10}} \cdot 100 \% \quad (4.7)$$

inneholder altså den samlede effekt av vindstrøm og Stokes transport. I laboratoriet har man muligheter for å separere disse to effekter og likeledes se på sammenkoblingen av disse. Vi vil derfor først se på noen laboratorieeksperimenter som belyser dette.

O'BRIEN (1971) målte overflatehastigheten ved bruk av punche-korn. For rent vann fant han en vindfaktor F på mellom 1,5 % og 3,5 % avhengig av Reynolds tall

$$\frac{V_0 \cdot d}{\gamma} \quad (4.8)$$

hvor

V_0 = strøm i overflaten

d = vanddyper

γ = kinematisk viskositetskoeffisient

På åpent hav, altså for store Reynold's tall, antar man at F går assymptotisk mot 3,3 %. Ved forsøk med olje var konklusjonen at tynne oljeflak ble transportert med samme hastighet som overflatevannet og at oljens fysiske egenskaper ikke spiller noen rolle.

Også SCHWARTZBERG (1970) fant at driften er uavhengig av olje-type, oljens fysiske egenskaper, oljevolum, temperatur og saltholdighet, viskositet og vanddybde. Han kom fram til en

midlere driftfaktor på 3,66 %. Tynne stive flytelegemer drev langsommere enn oljen. Dette kan muligens være en effekt av bølger som opptrer i hans tank. Schwartzberg forsøkte også med tynne flytende ringer som stakk 3 cm ned i vannet og holdt oljen inne. Disse kunne redusere driften med opptil 50 %. Dette er en naturlig følge av at den vindinduserte drift avtar med dypet. Lenser vil således kunne redusere drifthastigheten vesentlig.

I begge disse to eksperimentene ble det kun brukt fersk olje slik at endringen i oljens fysiske og kjemiske egenskaper som følge av aldring eller forvitring ikke er inkludert.

ALOFS & REISBIG (1972) tok for seg transporten av oljeflak i en tank med bølger alene. De brukte også plastfolie, 0,15 mm tykk og fant at transporten øker med økende diameter på flakene inntil dette har en diameter som er lik bølgelengden. De målte verdier for den bølgeinduserte overflatetransport var hele tiden høyere enn Stokes transport beregnet ut fra lign.(4.6). For bølgeforhold hvor Stokes transport > 2 cm/s, finner de 35 % - 150 % høyere verdier.

Både eksperimentene til SCHWARTZBERG (1970) og ALOFS & REISBIG (1972) kan muligens tolkes slik at plastkonvolutter på havet vil drive langsommere enn olje, men feltobservasjoner gir snarere indikasjoner på det motsatte. Når det gjelder Stokes transport, har andre eksperimentelle arbeider vist bedre overensstemmelse med teorien enn ALOFS & REISBIG (1972).

REISBIG, ALOFS, SHAF & BANERJEE (1973) undersøkte den koblede effekt av vind og bølger på overflatetransporten i en tank. Det var klart at den vindinduserte og den bølgeinduserte driften ikke bare kan adderes. Fig. 10 viser endel av deres resultater. Herav fremgår det at ved små vindhastigheter (under ca. 1 m/s) vil bølgene bidra til å øke den totale drift. For høyere vindhastigheter vil bølgene bidra

til å redusere den totale drift. Denne reduksjonen blir større med økende vindhastigheter. Vindfaktoren, F , som altså her inkluderer både den vindinduserte og bølgeinduserte drift, lå mellom 2,9 % og 4,7 %. Også SCHWARTZBERG (1970) har rapportert at bølger medfører signifikant reduksjon av overflatetransporten.

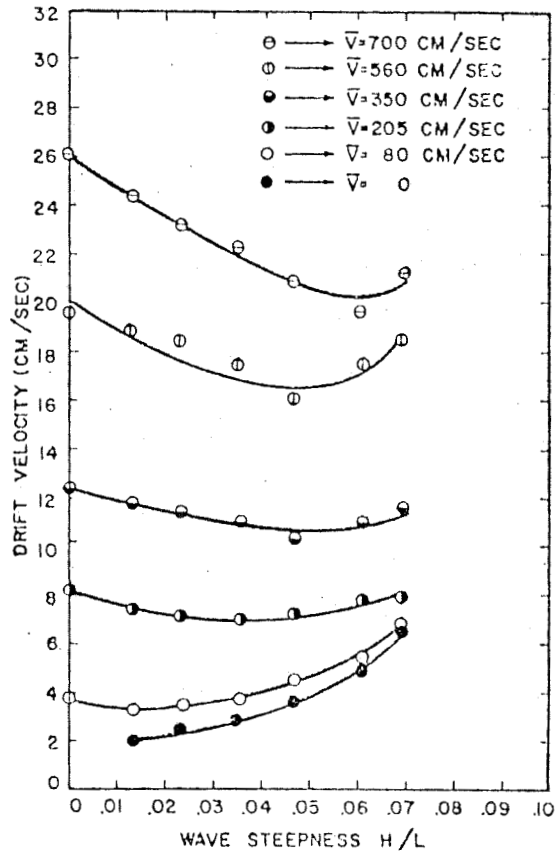


Fig. 10. Bølgehelningens effekt på drifthastigheten ved forskjellige vindhastigheter.

Den reduserende effekt av bølger på den totale drifthastighet henger sannsynligvis sammen med vindens turbulente mønster i bølgedataene. En kan da tenke seg redusert og endatil motsatt vinddrag på lénsiden av bølgene.

Et spørsmål som alltid reiser seg, er i hvilken grad laboratorieeksperimenter kan simulere forholdene på havet. En laboratoriemodell er vanligvis endimensjonal, har en barriere i den ene enden og kun stasjonære forhold observeres, noe som vanskelig fåes på havet. Under slike forhold vil netto massefluks gjennom et tverrsnitt i en kanal være lik null. Dette medfører at en overflatetransport produserer en tilbakestrømning dypere nede i tanken. Vinddata i et laboratorium refererer seg vanligvis til en middelvei over et tverrsnitt mens i felten vil vinden nær sjøoverflaten bli brukt. De fleste av de laboratorieundersøkelsene som foreligger, tar heller ikke hensyn til en eventuell tetthetssjiktning i vannet. Alt dette gjør at resultater fremkommet i laboratoriet må brukes med forsiktighet.

Også felteksperimenter som tar sikte på å komme frem til empiriske relasjoner mellom vindhastighet og vindstrøm har store usikkerheter. Litteraturen frem til 1968 er godt oppsummert av LEE og RAMSTER (1968). De fleste av de tidligere undersøkelsene kommer frem til at relasjonen mellom vindhastighet og vindstrøm har formen

$$V_o = \frac{k_1 w^{1/2}}{\sin \phi^{1/2}} \quad w < 3 \text{ Beaufort} \quad (4.9)$$

$$V_o = \frac{k_2 w}{\sin \phi^{1/2}} \quad w > 3 \text{ Beaufort} \quad (4.10)$$

Dette vil si at man har en avtagende vindfaktor med økende vind opptil omkring 3 Beaufort og at F siden er konstant. Reduksjonen av F med økende vind skyldes sannsynligvis den effekt av bølger man har observert i laboratoriet.

I alle forsøk på å bestemme F ved drivende oljeflak, driftkonvolutter eller lignende drivlegemer, kommer man bort i vanskeligheten med å isolere den direkte effekt av vindstresset fra reststrømmen som skyldes andre årsaker. I nyere undersøkelser er det også med en enkel unntagelse (TEESON, WHITE og SCHENCK 1970)

tendens til å se bort fra det leddet i Ekman's ligning (4.1) som skyldes geografisk bredde.

Også bestemmelse av vindhastigheten volder problemer. Bruker man vinden på nærliggende landstasjoner, kan denne være lite representativ for vind over havet. Som regel vil vind over havet være sterkere enn vind over land. Ofte bruker en geostrofisk vind eller gradientvind W_G og reduserer denne til vind i 10 m høyde W_{10} ved å bruke forholdet $\frac{W_{10}}{W_G} = \frac{2}{3}$. Flere forfattere har observert $\frac{W_{10}}{W_G} > \frac{2}{3}$, og AAGAARD (1969) finner at dette forholdet på værskipstasjon M varierer mellom 0,94 og 1,28 gjennom året med et årsmiddel på 1,05.

Vi skal nå se på endel felteksperimenter som har spesiell relasjon til drift av olje. I Tabell 4 er listet opp en del resultater fra disse samt fra laboratorieeksperimenter.

Tabell 4. En del midlere vindfaktorer

FORFATTER	METODE	\bar{F}	OMRÅDE	BEMERKNING
Hughes (1956)	Driftkonvolutter	3,3 %	Atlantehavet	
Tomczak (1964)	"	4,2 %	Nordsjøen	
Hill and Howard (1971)	"	3,4 - 3,8 %	Irskesjøen	øvre 1 - 2 cm
Tomczak (1964)	Olje	4,3	Nordsjøen	
Brusson (1967)	"	2,5	"	
Smith (1968)	"	3,4	"	
Haug (1970)	"	2,7	"	
Ridgway (1972)	"	3-4 %	New Zealand	
Hill and Howard (1971)	Plast drifters	1,9-2,2 %	Irskesjøen	øvre 2 - 3 cm
Teeson et al. (1971)	Plastflak	2,0-3,0 %	U.S.A.s østkyst	
Hill and Howard (1971)	Fallskjerm	1,0-1,9 %	Irskesjøen	øvre 50 cm
O'Brian (1971)	Laboratorie	2,7-3,3 %		
Schwartzberg (1970)	"	3,7 %		

Et av de mere hyppige refererte arbeider er av TOMCZAK (1964). På grunnlag av utslipp av plastkonvolutter i Nordsjøen beregner han en midlere vindfaktor på 4,2 %. I sine beregninger har han da lagt inn en strøm parallel med kysten i et smalt belte langs

Tyskland, Danmark, Sverige og Norge på mellom 20 cm/s og 40 cm/s men forutsetter ingen reststrøm ellers i Nordsjøen. Han sammenligner så dette med oljeutslippet fra "Gerd Maersk" i Elbens munning hvor han finner en vindfaktor på 4,3 %. I denne siste beregningen har han ikke tatt hensyn til noen strøm overhodet utenom den rene vindstrøm. Det er derfor rimelig å tro at hans vindfaktor er noe for høy.

Også HUGHES (1956) rapporterer endel observasjoner av drift av plastkonvolutter. Hans eksperimenter er utført i Atlanterhavet. Han bruker geostrofisk vind redusert til overflatevind ved forholdet $\frac{W_{10}}{W_G} = \frac{2}{3}$ og korrigerer ikke for eventuell reststrøm. Midlere vindfaktor rapporterer han til 3,3 %.

Flere forfattere, bl.a. TEESON et al. (1970), mener at de plastkonvoluttene som blir brukt simulerer dårlig drift av olje. De stive konvoluttene kan løftes fra bølgetopper og seile med vinden og dermed gi for store hastigheter.

Når det gjelder drift av olje, har SMITH (1968) sett på driften fra "Torrey Canyon". Han kommer til at F ligger mellom 2,6 % og 4,7 % med et middel på 3,4 %. Han bruker vinden på nærmeste landstasjon og ser bort fra reststrømmen. SPILLANE (1971) har gått igjennom beregningene til SMITH og konkluderer med at dersom man forsøker å korrigere for feilkildene, vil $F = 2,7$ % være en mere sannsynlig middelvei. BRUSSON (1967) kommer frem til $F = 2,5$ % for drift av "Torrey Canyon" oljen, og HAUG (1970) får en midlere $F = 2,7$ % ved å bruke data fra samme ulykken. Det er stor spredning i resultatene fra Haug's beregninger hvor F varierer mellom 1,5 % og 4,5 %.

SPILLANE (1971) mener også at grunnen til den tilsynelatende forskjell i vindfaktor for driftkonvolutter og olje ligger i at et stort oljeflak ikke er gjenstand for Stokes transport mens driftkonvoluttene er det. Som tidligere nevnt, kommer han til en maksimal verdi på Stokes transport på 0,83 % av

vindhastigheten. Han betrakter altså vinddrift og Stokes transport som additive, noe som strider mot eksperimentene til både REISBIG et al. (1973) og SCHWARTZBERG (1970).

Dersom oljeflaket er et par cm tykt f.eks. ved dannelsen av emulsjoner, kan dette muligens forklare en lavere driftshastighet for oljeflak enn for driftkonvolutter. HILL og HORWOOD (1971) har i den forbindelse en instruktiv undersøkelse i Irskesjøen hvor de slipper ut tre forskjellige typer drivlegemer som viser driften i øvre 1-2 cm, øvre 2-3 cm og øvre 50 cm av vannsøylen. Ved samtidig å ha ute en rekke strømmålingsbøyer mener de i meget høy grad å kunne ta hensyn til reststrømmen. Resultatene deres viser at F ligger mellom 3,4 % og 3,8 % for de øvre 1-2 cm, mellom 1,9 % og 2,2 % for de øvre 2-3 cm og fra 1 % til 1,9 % for de øvre 50 cm (Tabell 4).

En annen mulig forklaring kan være oljens demping av kapillarbølgene som synes å være viktige for energioverføringen hav/atmosfære. Denne dempingen medfører mindre overføring av bevegelsesmengde og kinetisk energi til havet. En undersøkelse av BARGER og GARRETT (1970), som påviste bl.a. en økning i den midlere vind over et oljeflak, synes å støtte opp om dette. I dette tilfelle måtte en da ha en relativ hastighet mellom olje og det omkringliggende vann ved at oljen drev langsommere enn vannet. HAUG (1970) er inne på lignende tanker hvor han mener at oljeflaket er utsatt for en direkte vindvirkning som virker i vindretningen. Også dette medfører en relativ hastighet mellom olje og det omkringliggende vann. Det er vanskelig å tro på en slik relativ hastighet, og laboratorieeksperimenter tyder på at olje på vann driver med samme hastighet som vannet omkring.

Dersom det er forskjell mellom vindfaktoren for oljeflak og for plastkonvolutter, er den mest sannsynlige årsak til dette at plastkonvoluttene kan seile med vinden.

I feltundersøkelser for å bestemme F tar man vanligvis heller ikke hensyn til eventuell tetthetssjiktning i vannet. Dersom

det er et tydelig sprangssjikt, vil vindsstrømmen som regel være begrenset til det øvre laget og resultere i høyere strømhastigheter enn i et vertikalt homogent hav. Det er derfor sannsynlig at på våre breddegrader kan en vente en sesongmessig variasjon i F .

Fortsatt er relasjonen mellom vindhastighet og vindstrøm utilstrekkelig kjent. Er den linjær som lign. (4.10) eller parabolisk som lign. (4.9)? Vil relasjonen forandre seg ved en eller annen kritisk hastighet? Både teoretiske vurderinger (SPILLANE 1971) og laboratorieeksperimenter (REISBIG et al. 1973) tyder på at vindfaktoren vil avta med økende vindhastighet.

I følge den klassiske teori til Ekman, vil vindstrømmen være 45° til høyre for vindretningen på den nordlige halvkule. I hav med begrenset dybde vil denne vinkelen α være mindre. Flere forfattere har fremmet ideen om at det absolutte toppsjiktet i vannet beveger seg i vindretningen. Både SMITH (1968) og TOMCZAK (1964) gjør denne forutsetning i sine driftundersøkelser. Når det gjelder drift av olje, tyder allikevel andre undersøkelser på at der er en klar corioliseffekt tilstede. Både TEESON et al. (1970), MURRAY (1975), HAUG (1970) og HILL og HORWOOD (1971) viser alle avbøyninger mellom 5° og 40° . På grunn av friksjon vil overflatevind på den nordlige halvkule være rettet til venstre for geostrofisk vind. Ekmanvinkelen α later til å være av samme størrelsesorden som vinkelen mellom overflatevind og geostrofisk vind. Det er derfor rimelig å anta at drivende olje vil bevege seg i retning av den geostrofiske vind dersom en ser bort fra reststrømmer.

Når det gjelder den kombinerte drift som skyldes vind og reststrøm, er det rimelig å tro at disse må summeres vektorielt. SCHWARTZBERG (1970) har på grunnlag av endel meget begrensede eksperimenter i tank konkludert med at vinddrift og strøm ikke er direkte additiv men kan uttrykkes som

$$T = V_o + 0.56 \cdot C$$

hvor

T = den totale drift

V_0 = vinddriften

C = strømdriften

Den ofte refererte relasjon synes å være svakt underbygget, og kan heller ikke ha generell gyldighet da T nødvendigvis må være lik C og ikke $0,56 \cdot C$ når $V_0 = 0$. Det er dessuten vanskelig å skjønne hvilken fysisk mekanisme som skulle ligge bak en slik relasjon. Grunnen til at vi har tatt med dette er at denne relasjonen ofte er brukt i matematiske modeller av oljedrift.

5. TURBULENT SPREDNING

I kap. 3 har vi behandlet selvspredning av olje på havet. Denne er horisontal og knyttet til oljens spesifikke egenskaper. Denne teorien vil beskrive godt oljens utbredelse i den første tiden etter utslippet for laboratorieforhold eller på vann i ro. Havet derimot er aldri i ro men gjenstand for påvirkning av ytre krefter. Dette resulterer så i spredning av olje ved turbulent diffusjon både horisontalt og vertikalt. Turbulens og de prosesser som er knyttet sammen med dette er meget komplisert, og det eksisterer ingen teori som kan ta hensyn til alle faktorer som har betydning.

La oss først se litt på horisontal spredning ved turbulent diffusjon. En av de få som har anvendt slik teori på et oljespill, er MURRAY (1972). Han tar for seg data fra ulykken ved Chevronplattformen i Mississippideltaet i 1970 hvor omkring 1000 fat/døgn rant ut i 20 døgn. En Taylor's éndimensjonal diffusjonsmodell ble brukt til å bestemme diffusjonskonstanten ved å se på hvorledes oljeflakets bredde økte med avstanden fra utslippstedet.

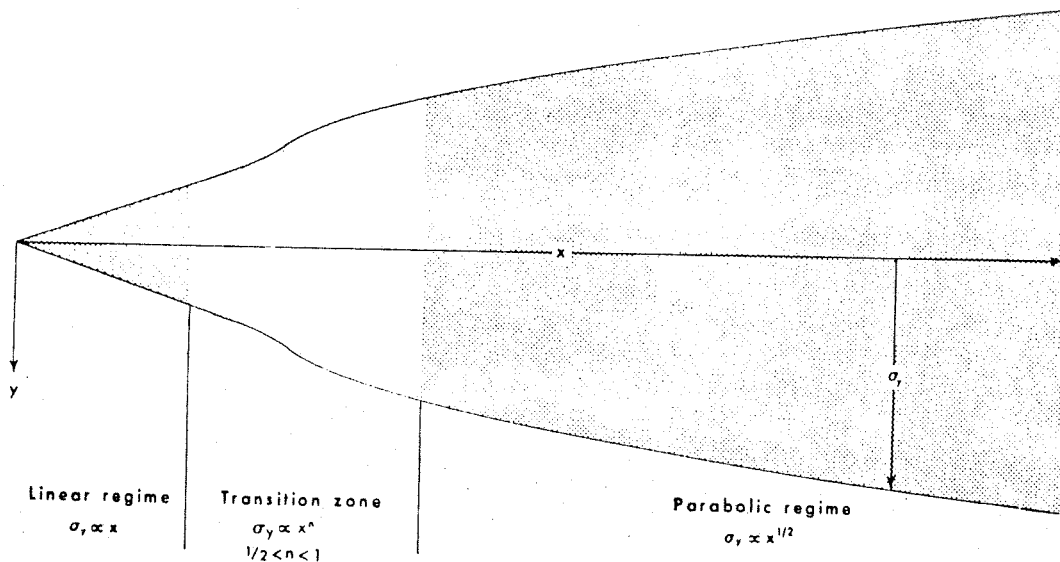


Fig. 11. Det lineære og paraboliske regime ut fra Taylor's teori med en overgangssone imellom (MURRAY 1972).

Fig. 11 viser de tre forskjellige utbredelsesregimer. Ligningene for utbredelsen av partikler på tvers av oljeflaket er

$$\frac{d \sigma_y}{dx} = \frac{(\bar{v}^2)^{1/2}}{U} \quad (5.1)$$

$$\frac{d \sigma_y^2}{dx} = \frac{2(\bar{v}^2)^{1/2} \ell^*}{U} \quad (5.2)$$

σ_y = standardavviket for partikler på tvers av strømrretningen

$(\bar{v}^2)^{1/2}$ = turbulensintensiteten

U = strømhastighet (langs x-aksen)

ℓ^* = karakteristisk lengde for den turbulente bevegelse

Ligning (5.1) gjelder for korte diffusjonstider, d.v.s. like i nærheten av utslippet. Der vil altså bredden på flaket som dannes, være en lineær funksjon av x, d.v.s. av avstanden fra utslippsstedet.

Ligning (5.2) gjelder for lange diffusjonstider og viser at etter en tid vil bredden av oljeflaket være proporsjonal med kvadratet av avstanden til utslippsstedet $x^{1/2}$. Mellom disse to regimer er det en overgangssone.

MURRAY (1972) fant god overensstemmelse for oljeflakets form og utbredelse mellom denne teorien og de få feltobservasjonene han hadde. Han forsøker seg også med en Fick's diffusjonsligning for å få isolinjer for oljekonsentrasjon istedenfor standardavvik for partikler. Også her finner han at denne kan gi god beskrivelse av form og utbredelse av oljen som en funksjon av diffusjonskonstanten, midlere strøm og oljens utstrømmingshastighet.

Slike beregninger som her er utført, gjelder kun i det idealiserte tilfelle hvor oljen strømmer ut i et stasjonært, rettlinjert og uniformt strømfelt, og ingen andre effekter gjør seg gjeldende. I et senere arbeid har MURRAY (1975) fått et langt større datamateriale til rådighet fra denne ulykken. Bildet blir da adskillig mere nyansert idet en ser virkninger på oljeflakets form og utbredelse av vind og vindendringer, romlige variasjoner i strømfeltet og horisontale tetthetsgradienter (fronter). Dette medfører at den praktiske anvendelse av turbulent diffusjonsteori for å beskrive den horisontale utbredelse av et kontinuerlig utslipp er begrenset.

Når det gjelder den vertikale innblanding av olje og oljekomponenter, kan disse føres ned i vannmassene som oppløste stoffer, som olje-i-vann emulsjoner, synkning ved absorpsjon på tyngre partikler, eller ved at oljen ved fordampning og avkjøling blir for tung til å holde seg på overflaten.

Forskningen på dette området har vært beskjedent sammenlignet med den innsats som har vært satt inn på overflatespredning. Årsakene til dette kan være flere. Det har vært lettere å måle den synlige forurensningen på overflaten enn å hente en prøve fra dypet. Prøvetakingsutstyret blir lett forurenset på vei ned, og selve analysemetoden er tidkrevende. Først i den siste tiden har det vært mulig å måle konsentrasjoner av oppløst olje i sjøvann på tilstrekkelig lave nivåer.

Det er stor forskjell på vertikal innblanding av olje fra overflaten, f.eks. i forbindelse med lekk fra skip, og på innblanding av olje fra bunnen fra en oljebrønn. I det første tilfellet vil oppdriften av oljen motvirke innblanding, i det andre tilfellet vil oppdriften bidra til å øke blandingen av olje i vannmassene. Særlig vil denne forskjell virke på de mest løselige og giftigste komponentene. Disse vil raskt fordampe dersom oljespillet skjer fra overflaten mens de i vesentlig høyere grad vil blandes inn i vannkolonnen når oljespillet skjer fra bunnen. Avgjørende for innblandingsgraden av olje fra overflaten i vannkolonnen er de dynamiske forhold i sjøen, særlig vertikal turbulens. Denne er avhengig av bølger, vertikalt strømskjær og den vertikale tetthetssjiktningen. Da tankbåten "Arrow" grunnstøtte i Chedabucto Bay, Nova Scotia 4. februar 1970 under kraftig uvær, registrerte man oljepartikler i emulgert form ned til 45 m dyp i en avstand av 60 km fra havaristedet 4 dager etter ulykken (FORRESTER, 1971). På dette tidspunkt hadde det lekket ut anslagsvis 2-4000 tonn fyringsolje. Til sammenligning kan det nevnes at under oljesølet i forbindelse med grunnstøtingen av "Drupa" i februar 1976 ved Tananger, hvor 2000 tonn iransk råolje lekket ut i forholdsvis rolig vær, kunne det bare registreres emulgerte oljepartikler i umiddelbar nærhet av steder hvor oljen fløt på sjøen (GRAHL-NIELSEN, et al. 1976). Bølge- og vindforholdene har altså en avgjørende betydning på hvor store mengder som innblandes i vannkolonnen. Særlig viktig er de første timene eller første døgnet etter utslipp, d.v.s. i tiden før de lettere komponentene fordamper, og viskositeten ennå er på et minimum.

Vanligvis er det olje-i-vann emulsjoner som har den største betydning for innblanding av olje i sjøen. Store partikler har lettere for å stige til overflaten enn små partikler i emulsjon. Under "Arrow"-utslippet ble det registrert emulgererte partikler i størrelse fra 5μ til 2 mm. Antallet partikler større enn 0,1 mm avtok sterkt med dypet, mens det under denne størrelse var forholdsvis jevn fordeling av partiklene i alle dyp. Partikler mindre enn 0,1 mm ble registrert i så store dyp som 80 m.

Vertikal transport kan muligens også skje på andre måter enn ved vind- og bølgevirkning. MURTY, KHANDEKAR & RAO (1974) har anvendt numeriske metoder i forbindelse med en frontmodell til å se på vertikalhastigheter under et oljeflak i bevegelse. Fig. 12 viser det strømbilledet de kom frem til. Ved en utbredelshastighet av oljefronten på 50 cm/s antyder modellen vertikalhastigheter opptil 0,2 cm/s. Det er vanskelig å se hvordan en kan ha så høye relative hastigheter mellom olje og vann uten i selvspreidningsfasen. I denne fasen vil muligens en frontmodell kunne beskrive hva som skjer under et oljeflak.

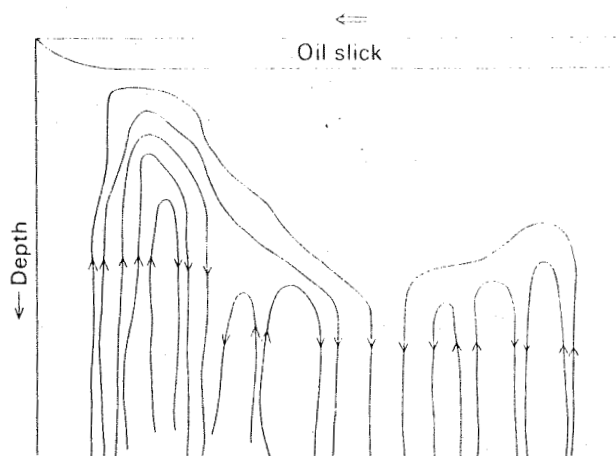


Fig. 12. Strømlinjer i vannet under et oljeflak i bevegelse (MURTY et al.1974).

6. LITTERATURLISTE

Ad. 1. INNLEDNING

ANON (1972). Marine pollution and sea-life. Published by arrangement with FAO and Fishing News (Books) Ltd. General Ed: Mario Ruivo.

ANON (1975). Petroleum on the marine Environment. National Academy of sciences, Wash.D.C.

* ANON (1976 a). On impact of oil on the marine environment. Part I. Report from GESAMP.

* ANON (1976 b). On impact of oil on the marine environment. Part II. Bibliography. Report from GESAMP.

* BERGE, G. (1975). Olje, fisk og forskning. Forskningsnytt nr.

- BLUMER, M. (1969). Oil pollution of the ocean In: Oil in the sea, Ed: D.P. Hoult. Plenum Press, N.Y.
- BLUMER, M. (1972). Oil Contamination and the Living Resources of the Sea. FAO & Fishing News (Books) Ltd. Gen. Ed: Mario Ruivo: 476-481.
- DYRSSEN, D. (1972). The changing chemistry of the ocean. Proc. 20th Nobel Symp. 16-20th August 1971, Gøteborg.
- * FALLAH, M.H. & STARK, R.M. (1976). Literature review: Movement of spilled oil at sea. J.Mar.Technol.Soc., 10(1): 3-18.
- * GARRETT, W.D. (1972). Impact of Natural and Man-Made Surface Films on the Properties of the Air/Sea Interface. In: The changing chemistry of the ocean (ed) Dyrssen, D.J. Proc. 20th Nobel Symp. 16-20th August 1971, Gøteborg.
- MOULDER, D.S. & VARLEY, A. (1971). A bibliography on marine and estuarine oil pollution. The laboratory of the Marine Biological Association of the U.K. Plymouth, Devon, U.K.
- * HÆGH, T. (1975). Biologiske virkninger ved oljeforurensninger Forelesningskompendium. Komité for Miljøvern, Univ. i Trondheim, Tapir Forlag.
- * NELSON-SMITH, A. (1972). Oil Pollution and marine ecology. Elek Science, London: 260 s.
- * PALMORK, K. (1975). Oljens virkninger i det marine miljø. Forelesninger ved seminar "Olje og Miljø, NTH, februar 1975.
- PILPEL, N. (1967). Oil Pollution of the Sea. Science, June 1967: 73-80.
- * ROSTAD, H. (1976). Behaviour of oil spills with emphasis on the North Sea. Publication no 86, IKU, Trondheim.

* SOLHEIM, H. 1976. Oljeutslipp og katastrofer. Norsk Natur
nr. 4.

Ad. 2. OLJENS FYSISK-KJEMISKE EGENSKAPER

ANDREEV, P.F., BOGOMOLOV, A., DOBRYANSKII, A. & KARTSEV, A.
(1969). Transformation of petroleum in nature.
Pergamon Press: 466 s.

ANON. (1975). Petroleum in the marine Environment. National
Academy of sciences. Wash. D.C.

ATLAS, R.M. (1973). Fate and Effect of Oil Pollutants in
Extreme Cold Marine Environments. Report A D -
76989 F, Office of Naval Research.

BERGE, G. (1975). Olje, Fisk og Forskning. Forskingsnytt,
20(4): 11-20.

BERGE, G. & WEDEGE, N.P. (1975). Internasjonalt samarbeide
i overvåkning av marin forurensning. Forskingsnytt,
20(4): 8-11.

* BERRIDGE, S.A., DEAN, R.A., FALLOWS & FISH (1968). The
properties of persistent oils at sea. In: Scientific
aspects of pollution of the sea by oil. Institute
of Petroleum, London: 2-11.

* BERRIDGE, S.A., THEW, M.T. & LORISTON-CLARKE, A.G. (1968).
The formation and stability of emulsions of water
in crude petroleum and similar stocks. In: Scientific
aspects of pollution of the sea by oil. Institute
of Petroleum, London: 35-59.

BLOKKER, P.C. (1964). Spreading and evaporation of petro-
leum on water. Proc. of the 4th Int. Harbour Conf.,
Antwerpen, Vol 5: 911-919.

BLUMER, M. & SASS, J. (1972). Oil pollution: Persistence
and degradation of spilled fuel oil. Science 176:
1120-1122.

- BROWN, L.R., PHILLIPS, W.E. & TENNYSON, J.M. (1970). The effect of salinity on the oxidation of hydrocarbons in estuarine environments. Water Resources Research Institute, Mississippi, State University: 28 s.
- COCHRAN, R.A. & SCOTT, R.R. (1971). The Growth of Oil Slicks and Their Control by Surface Chemical Agents. J. Petroleum Technology, July 1971: 781-787.
- DEAN, R.A. (1968). The chemistry of crude oils in relation to their spillage on the sea. Fld. Stud., 2, (suppl.): 1-6.
- * DENNIS, J.V. (1959). Oil pollution survey of the United States Atlantic coast. Am. Petroleum Institute, Washington.
- FRANKENFELD, J.W. (1973). Factors Governing the Fate of Oil at Sea; Variations in the Amounts and Types of Dissolved or Dispersed Materials During the Wathering Process. Proc. on Conf., Prevention and Control of Oil Spills, March 13-15, 1973: 485-496.
- GARRETT, W.D. (1968). Künstliche Veränderungen der Grenzfläche Ozean/Atmosphäre? Særtrykk fra: Umschau in Wissenschaft und Technik. Frankfurt/M Nr. 18/68: 568-569.
- GARRETT, W.D. (1969). Confinement and control of oil pollution on water with monomolecular surface films. In: Proc. Joint. Conf. on Prevention and Control of Oil Spills: 257-262.
- GARRETT, W.D. (1970). Chemical effects of oil on aqueous surfaces. Paper presented at the Santa Barbara oil symposium, Offshore petroleum production - an environmental inquiry, Santa Barbara, California, 16-18 Dec. 1970.

GRAHL-NIELSEN, O., NEPPELBERG, T., PALMORK, K.H., WESTRHEIM, K. og WILHELMSSEN, S. (1976). Om kontrollerte utslipp av oljehydrokarboner fra produksjonsplattformen på Ekofisk. Fisken og Havet Ser. B Nr. 3, 1976.

* GRAHL-NIELSEN, O., NEPPELBERG, T., PALMORK, K.H., WESTRHEIM, K. og WILHELMSSEN, S. (1976). Oljespillet fra T/T "Drupa". Undersøkelser vedrørende olje, vann og fisk. Fisken og Havet Ser. B Nr. 12, 1976.

* HARRISON, W., WINNIK, M., KWONG, P. & MACKAY, D. (1975). Crude Oil Spills. Disappearance of Aromatic and Aliphatic Components of Sea-Surface Slicks. Env.Sci.Technol., 9(3): 231-234.

HELLMANN, H. & BRUNS, F.J. (1970). Modellversuche zur Bildung von Wasser-in-Rohöl-Emulsionen und ihre Bedeutung für die Ölbekämpfung auf See. Tenside, 7: 11-15.

* MCAULIFFE, C. (1966). Solubility in water of paraffin, cycloparaffin, olefin, acetylene, cyclodefin and aromatic hydrocarbons. J. Phys.Chem. 70: 1267-1273.

MCAULIFFE, C. (1969). Solubility in water of normal C₉ and C₁₀ alkane hydrocarbons. Science 158: 478-479.

NAGY, (1973). Water-in-oil emulsions. In: MacKay, D. & Harrison, W. (ed). Oil and the Canadian Environment.

* NELSON-SMITH, A. (1972). Oil Pollution and marine ecology. Elek Science, London: 260 s.

PALMORK, K. (1975). Forurensninger. Virkninger for naturmiljø. Oljens virkninger i det marinbiologiske miljø II. Forelesning ved seminar om "Olje og Miljø" på NTH, 27. feb. 1975: 49 s.

* PARKER, C.A. FREEGARDE, M. & HATCHARD, G.C. (1971). The effect of some chemical and biological factors on the degradation of crude oil at sea. In: Water pollution by oil, Institute of Petroleum, London: 237-244.

- * PILPEL, N. (1968). The Natural fate of oil on the sea. Endeavour, 27(100): 11-13.
- PILPEL, N.(1967). Oil Pollution of the Sea. Science Journal, June 1967: 73-80.
- * SIVADIER, H.O. & MIKOLAJ, P.G. (1973). Measurement of Evaporation Rates from Oil Slicks on the Open Sea. Proc.Conf. on Prevention and Control of Oil Spills, March 13-15, 1973: 475-485.
- YOUNG, R.N. & SETHI, A.J. (1975). Compositional changes of a fuel oil from an oil spill due to natural exposure. Water, Air and Soil Pollution, 5: 195-205.
- ZOBELL, C.E.(1963). The Occurrence, Effects and Fate of oil polluting the sea. Int. J.Water Poll. 7: 173-198.
- ZOBELL, C.E. (1964). The occurrence, effects and fate of Oil Polluting the Sea. Adv. in Water Poll.Res. Proc. 1.st. International Conference Water Pollution 3:85-118.
- Ad. 3. SELVSPREDNING AV OLJE
- * ABBOTT, M.B. (1961). Houille Blance, 16: 622-635.
- * ALLEN, A.A. & ESTES, J.E. (1970). Detection and measurements of oil films. Santa Barbara Oil Symp. U.of Calif. Santa Barbara.
- BARGER, W.R., GARRETT, W.D., MOLLO-CHRISTENSEN, E.L. & RUGGLES, K.W. (1970). Effects of an artificial sea slick upon the atmosphere and the ocean. J.appl.Meteorol, 9: 396-400.
- BARGER, W.R. & GARRETT, W.D. (1968). Modification of the air-sea interface by artificial sea slicks. Rept. 6762 Naval Res. Lab. Wash.D.C.: 16 s.

- * BENJAMIN, T.B. (1968). Gravity currents and related phenomena. J.Fluid.Mech., 31: 209-248.
- BERRIGDE, S.A., DEAN, R.A., FALLOWS & FISH (1968). The properties of persistent oils at sea. In: Scientific aspects of pollution of the sea by oil. Inst. of Petroleum, London: 2-11.
- * BLOKKER, P.C. (1964). Spreading and evaporation of petroleum on water. Proc. of the 4th Int.Harbour Conf., Antwerpen, 5: 911-919.
- * BLOKKER, P.C. (1966). Die Ausbreitung Von Öl Auf Wasser. (Oil Spreading on Water). Dt.Gewasserk.Mitt., 10: 112-114.
- * BUCKMASTER, J. (1973). Viscous-gravity spreading of an oil-slick. J.Fluid.Mech., 59: 481-491.
- CHEN, E.C. & CHARLES, D.K. (1976). Surface tension spreading of crude oil on ice. Mar.Sci.Communications 2(1):1-11
- * COCHRAN, R.A. & SCOTT, P.R. (1971). The Growth of Oil Slicks and Their Control by Surface Chemical Agents. J.Petroleum Technology, July 1971: 781-787.
- * FAY, J.A. (1969). The spread of oil slicks on a calm sea. In: Oil on the sea. D.P.Hoult (ed). Plenum Press.N.Y:53-63.
- * FAY, J.A. (1971). Physical processes in the spread of oil on a water surface. Proc.Joint Conf. on Prevention and Control of Oil Spills. Am. Petroleum Inst., Wash.D.C: 463-468.
- GARRETT, W.D. (1968). Künstliche Veränderungen der Grenzfläche Ozean/Atmosphäre? Umschau in Wissenschaft und Technik. Frankfurt/M.No.18/68: 568-569.

- * GARRETT, W.D. (1969). Confinement and control of oil pollution on water with monomolecular surface films. Proc. Joint Conf. on Prevention and Control of Oil Spills. Am.Petroleum Inst., Wash. D.C.: 257-262.
- GARRETT, W.D. (1970). Chemical effects of oil on aqueous surfaces. Paper presented at the Santa Barbara oil symposium, Offshore petroleum production - an environmental inquiry, Santa Barbara, California, 16-18 Dec.
- HOULT, D.P. (1969). In: Oil on the sea. D.P.Hoult (ed). Plenum Press. N.Y.: 65-80.
- HOULT, D.P. (1970). Physical effects of oil on aqueous surfaces. Paper presented at the Santa Barbara oil symposium, Offshore petroleum production - an environmental inquiry, Santa Barbara, California, 16-18 Dec.
- HOULT, D.P., FAY, J.A., MILGRAM, J.H. and CROSS, R.H. (1970). The Spreading and Containment of Oil Slicks. AIAA 3D Fluid Plasma Phys. Dynam. Conf.Los Angeles.
- HOULT, D.P. & SUCHON, W. (1970). The Spread of Oil in a Channel. Fluid Mech.Lab.Dept.Mech.Eng.Mass. Inst. Technol.: 25 s.
- HOULT, D.P. & CROSS, R.H. (1971). Collection of Oil Slicks. ASCE, J. Waterways, Harbors, and Coastal Eng. Div. 97 (WW2), May 1971: 313-322.
- * HOULT, D.P. (1972). Oil spreading on the sea. Annu.Rev.Fluid Mechanics. 4: 341-368.
- LANGMUIR, I. (1933). Oil Lenses on Water and the Nature of Monomolecular Expanded Films. J. Chemical Physics, 1: 756-776.

- * LEE, R.A.S.(1971). A study of the surface tension controlled regime of oil spread. MS thesis, Mass. Inst. of Technol.: 57 s.
- * LIANG, L.S. (1971). Spreading of oil on calm water. Inertial phase, MS thesis, Mass. Inst. of Technol.: 55 s.
- * O'BRIEN, J.A. (1970). Oil Spreading on water from a stationary leaking source. The Chemical Engineer, Dec.1970:407-410.
- * SUCHON, W. (1970). An experimental investigation of oil spreading over water. MS thesis, Mass. Inst. of Technol.: 31 s.

SCHWARTZBERG, H.G (1970). The Spreading and Movement of Oil Spills. Engineering bulletin. Extension series, Purdue Univ., Lafayette, 137: 773-782.

- * VonKARMAN, T. (1940). The engineer grapples with non-linear, problems. Bull.Am.Math.Soc.,46: 615-683.

WILKINSON, D.L. (1972). Dynamics of Contained Oil Slicks. ASCE, J. Hyd.Div. 98 (HY 6): 1013-1030.

WILKINSON, D.L. (1973). Limitations to Length of Contained Oil Slicks. ASCE, J.Hyd.Div. 99 (HY5): 701-712.

ZISMAN, W.A. (1941). The spreading of Oils on Water. J. Chemical Physics. 9(9): 789-793.

Ad. 4. OVERFLATETRANSPORT AV OLJE MED VIND OG BØLGER

- * ALOFS, D.J. & REISBIG, R.L. (1972). An Experimental Evaluation of Oil Slick Movement Caused by Waves. J. of Phys. Oceanogr., 2: 439-443.
- * AAGARD, K. (1969). Relation between Geostrophic and Surface Winds at Weather Ship M. J. Geoph. Res., 74(13): 3440-3442.

- BARGER, W.R. & GARRETT, W.D. (1968). Modification of the air-sea interface by artificial sea slicks. Rept. 6762, Naval Res.Lab. Wash.D.C.
- * BARGER, W.R., GARRETT, W.D., MOLLO-CHRISTENSEN, E.L. & RUGGLES, K.W. (1970). Effects of an artificial sea slick upon the atmosphere and the ocean. J.appl.Meteorol, 9: 396-400.
- * BRUSSON, (1967). Le pétrole du "Torrey Canyon" en mer. Penn.Ar.Bed., 6(50).
- FALLAH, M.H. & STARK, R.M. (1976). Random Drift of an Idealized oil Patch. Ocean Engng. 3: 83-97.
- * HAUG, O. (1970). Transport of Pollution in the Sea. GESCAMP/24.
- * HILL, H.W. & HORWOOD, J.W. (1971). A computer simulation of surface drifter returns. Coun.Meet.int.Coun.Explor. Sea, 1971(C:22) [Mimeo.]
- * HUGHES, P. (1956). A determination of the relation between wind and surface drift. Quart.J.Roy.Met.Soc., 82: 494-502.
- * LEE, A.J. & RAMSTER, J.W. (1968). The hydrography of the North Sea. A review of our knowledge of pollution problems. Helgoänder wiss. Meeresunters., 17: 44-63.
- * MURRAY, S.P. (1975). Wind and Current Effects on Large-Scale Oil Slicks. 7th Offshore Technology Conference, Dallas, Texas.
- NEUMANN, H. (1966). "Die Beziehung Zwischen Wind Oberflächenstromung auf Grund von Triftkartenuntersuchungen. (The Relation between Wind and Surface Current Derived from Drift Card Investigations.) Dt.Hydrogr.Z., 19:253-266.
- NEUMANN, H. (1968). The drift of pollutants at the surface of the North Sea. Helgoländer wiss. Meeresunters., 17: 81-93.

- NEUMANN, H. (1969). Bemerkungen zur Trift der Ölschmutz-
stoffe in der Deutschen Bucht. Dt. hydrogr. Z., 22:
57-65.
- * O'BRIEN, J.A. (1971). Wind tunnel experiments on oil slicks
transport. J.of hydraulic Res., 9: 197-215.
- PREMACK, J. (1973). Prediction of oil slick motions in Narra-
gansett Bay. Proc. of Joint Conf. on prevention
and control of Oil Spills. Wash.D.C. 1973.
- * REISBIG, R.L., ALOFS, D.J. SHAH, R.C. & BANERJEE, S.K. (1973).
Measurement of oil spill drift caused by the coupled
parallel effects of wind and waves. Mémoires
Société Royale des Science de Liège, 6. série tome VI:
67-77.
- REISBIG, R.L. & POTTINGER, J.M (1973). The Simulation of
Deep Water Waves for Oil Drift Studies. Proc.
of the Missouri Academy of Science, 1973.
- * RIDGWAY, N.M. (1972) Direction of drift of surface oil with wind and
tide. New Zealand Journal of Marine & Freshwater
Research, 6(1&2): 178-184.
- * SCHWARTZBERG, H.G. (1970). The Spreading and Movement of Oil
Spills. Engineering bulletin. Extension series,
Purdue Univ., Lafayette, 137: 773-782.
- SCHWARTZBERG, H. (1971). The Movement of Oil Spills. American
Pet. Inst., Proc.Joint Conf. on Prevention and
Control of Oil Spills, Wash. D.C., June 15-17, 1971:
489-494.
- SHUKLA, D.K. & STARK, R.M. (1974). Random Movement of Oil
Patches. The Sci. of the Total Environment, 3:
117-125.
- SORENSEN, R.M. (1970). Wind Set-Up of Oil Slicks. Paper Pre-
sented at American Society of Chemical Engineers,
Transportation Engineering Conf., Boston, Mass., July
13-16, 1970.

- SORENSEN, R.M. & SPENCER, E.B. (1971). Two-dimensional wind set-up of oil on water. J.Wat.Ways.Harb.Div.Am.Soc. civ.Eng., 97(WW3): 517-530.
- * SPILLANE, K.T. (1971). Movement of oil on the Sea Surface. Australian MeteorologicalMagazin, 19(4).
- TAYFUN, M.A. & WANG, H. (1973). Monte Carlo Simulation of oil slick movement. J.Wat.Ways.Harb.Coast.Div.Am.Soc. civ.Eng., 99(WW3): 309-324.
- * TEESON, D., WHITE, F.M. & SCHENCK, H. (1970). Studies of the simulation of drifting oil by polyethylene sheets. Ocean Engng., 2: 1-11.
- * TOMCZAK, G. (1964). Investigations with drift cards to determine the influence of wind on surface currents. Studies on Oceanography, Ed.: K. Yoshid, Tokyo Univ. Press.
- WANG, S. (1974). A Numerical Model for Simulation of Oil Spreading and Transport and Its Application for Predicting Oil Slick Movement in Bays. Tetra Tech. Report No. TT-P-345-74-1, Feb. 1974.
- WARNER, J.L., GRAHAM, J.W. & DEAN, R.G. (1972). Prediction of Movement of An Oil Spill on the Surface of the Water. Offshore Technology Conf., Dallas, Texas, 1972, Paper No. OTC 1550.
- WEBB, L.E. (1970). Operational oil spill drift forecasting. Paper presented at 7th U.S.Navy Symposium of Military Oceanography, Annapolis, Maryland: 79-87.

Ad. 5. TURBULENT SPREDNING

ALLEN, A.A., SCHUETER, R.S. & MIKOLAJ, P.G. (1970).

Natural Oil Seepage at Coal Oil Point, Santa Barbara, Calif., Science, 170: 974-977.

BERRIDGE, S.A., DEAN, R.A., FALLOWS & FISH (1968). The properties of persistent oils at sea. In: Scientific aspects of pollution of the sea by oil. Inst. of Petroleum, London: 2-11.

BERRIDGE, S.A., THEW, M.T. & LORISTON-CLARKE, A.G. (1968). The formation and stability of emulsions of water in crude petroleum and similar stocks. In: Scientific aspects of pollution of the sea by oil. Inst. of Petroleum, London: 35-59.

BLUMER, M. & SASS, J. (1972). Oil pollution: Persistence and degradation of spilled fuel oil. Science, 176: 1120-1122.

FALLAH, M.H. & STARK, R.M (1976). A probabilistic Approach for Dispersion of oil at sea. Ocean Eng., 3: 145-156.

* FORRESTER, W.D. (1971). Distribution of suspended oil particles following wreck of tanker "Arrow". J.Mar.Res. 29(2): 151-170.

FRANKENFELD, J.W. (1973). Factors Governing the Fate of Oil at Sea; Variations in the Amounts and Types of Dissolved or Dispersed Materials During the Weathering Process. Proc. on Conf. Prevention and Control of Oil Spills, March 13-15, 1973: 485-496.

- FREEGARDE, M. & HATCHETT, C.G. (1970). The ultimate fate of crude oil at sea. Interim Rep. Admiralty Materials lab. U.K.
- GARRETT, W.D. (1970). Chemical effects of oil on aqueous surfaces. Paper presented at the Santa Barbara oil symposium, Offshore petroleum production - an environmental inquiry, Santa Barbara, California, 16-18 Dec. 1970.
- GORDON, D.C. & MICHALIK, P.A. (1971). Concentration of Bunker C Fuel Oil in the Waters of Chedabucto Bay, April 1971. Journal Fisheries Research, Board of Canada, 28(2).
- GRAHL-NIELSEN, O., NEPPELBERG, T., PALMORK, K.H., WESTRHEIM, K. og WILHELMSSEN, S. (1976). Om kontrollerte utslipp av oljehydrokarboner fra produksjonsplattformen på Ekofisk. Fisken og Havet Ser. B (3), 1976.
- * GRAHL-NIELSEN, O., NEPPELBERG, T., PALMORK, K.H., WESTRHEIM, K. og WILHELMSSEN, S. (1976). Oljespillet fra T/T "Drupa". Undersøkelser vedrørende olje, vann og fisk. Fisken og Havet Ser. B (12), 1976.
- KULLENBERG, G. & TALBOT, J.W. (1974). Physical processes responsible for dispersal of pollutants in the sea. (with special reference to the near-shore zone). Rapp.P.-V.Réun.Cons.int.Explor.Mer, 167. Symposium Århus, 4-7 July 1972.
- MCAULIFFE, C. (1966). Solubility in water of paraffin, cycloparaffin, olefin, acetylene, cyclodefin and aromatic hydrocarbons. J. Phys. Chem., 70: 1267-1273.
- MCAULIFFE, C. (1969). Solubility in water of normal C₉ and C₁₀ alkane hydrocarbons. Science, 158: 478-479.

MEYER, P.A. (1972). Association of fatty acids and hydrocarbons with mineral particles in sea water. Ph.D. thesis. University of Rhode Island, Providence.

MURRAY, S.P., SMITH, W.G. & SONU, C.J. (1970). Oceanographic observations and theoretical analysis of oil slicks during the Chevron spill, March, 1970. Coastal Stud. Inst., La. State Univ., Tech.Rep. 87: 1-59.

* MURRAY, S.P.(1972). Turbulent diffusion of oil on the ocean. Limn. and oceanography, 17(5): 651-660.

* MURRAY, S.P. (1975). Wind and Current Effects on Large-Scale Oil Slicks. 7th Offshore technology conference Dallas, Texas, Paper no. OTC 2329.

* MURTHY, T.S. KHANDEKAR, M.L. & RAO, G.V. (1974). The Movement of Oil Slicks. Rapp.P.-v.Réun.Cons.int.Explor.Mer, 167: 66-74.

RAO, G.V. & MURTHY, T.S. (1973). Some case studies of vertical circulations associated with oceanic fronts. J.Geo.Phys.Res. 78(3): 549-557.

SONU, C.J., MURRAY, S.P. & SMITH, W.G. (1971). Environmental Factors Controlling the Spread of Oil. Naval research reviews, 24: 11-19.

* TAYLOR, G.I. (1921). Diffusion by continuous movement. Proc. London Math. Soc., 20: 196-212.

FISKEN OG HAVET, SERIE B

Oversikt over tidligere artikler finnes i tidligere nr.

- 1977 Nr. 1 Gunnar Nævdal, Marianne Holm og Sten Knutsson:
Erfaring med bruk av ytre merker på oppdrettsfisk.
- 1977 Nr. 2 Didrik S. Danielssen og Svein Arnholt Iversen:
Temperatures innvirkning på utviklingen av naturlig
og kunstig befruktete makrellegg (Scomber scombrus L.).
- 1977 Nr. 3 Svein Arnholt Iversen og Didrik S. Danielssen:
Forhøyete temperaturers innvirkning på egg og larver
av torsk (Gadus morhug L.) og rødspette (Sleuronectes
platessa L.) samt larver av vårgytende sild (Clupea
harengus L.).