GEDRAG, BESTRIJDING EN BIOLOGISCHE EFFECTEN VAN OLIE IN ESTUARIENE GEBIEDEN

II. OLIE IN DE WADDENZEE

Ir. Magda Bergman

RIN-rapport 83/22

Rijksinstituut voor Natuurbeheer
Texel

1983

INHOUD

Voorwoord 4

INLEIDING 5

1 BESCHRIJVING VAN DE WADDENZEE 6
1.1 Inleiding 6
1.2 Hydrologie 6
1.3 Geomorfologie 7
1.4 Ecologie 9
1.4.1 Inleiding 9
1.4.2 Plantaardige organismen 9
1.4.3 Zoöplankton 10
1.4.4 Zoöbenthos 10
1.4.5 Vissen 11
1.4.6 Vogels 11
1.4.7 Zeehonden 12
1.4.8 Kweldervegetaties 12
1.4.9 De centrale rol van de bodem 13

2 GEDRAG VAN (BESTREDEN) OLIE IN DE WADDENZEE 14
2.1 Inleiding 14
2.2 Kans op en vorm van olieverontreiniging 14
2.2.1 Olie vrijgekomen op de Noordzee 14
2.2.1.1 Kans en type olie 14
2.2.1.2 Vorm van de olie bij binnenkomen in de Waddenzee 16
2.2.1.2.1 Overzicht 16
2.2.1.2.2 Drijvend 16
2.2.1.2.3 In het water verdeeld 18
2.2.2 Olie vrijgekomen in de Waddenzee 21
2.3 Verspreiding van olie in de Waddenzee 21
2.3.1 Drijvende olie 21
2.3.2 Olie in het water 24
2.3.2.1 Verspreiding 24
2.3.2.2 Sedimentatie 30
2.3.3 Gesedimenteerde en gestrande olie 32
2.3.3.1 Gesedimenteerde olie 32
2.3.3.2 Gestrande olie 33

2.4 Afbraak van olie in de Waddenzee 38
2.4.1 Drijvende en in het water verdeelde olie 38
2.4.2 Olie op en in het sediment 39

3 BIOLOGISCHE EFFEKTEN VAN (BESTREDEN) OLIE IN DE WADDENZEE 42
3.1 Inleiding 42
3.2 Effekten van onbestreden olie op organismen 42
3.2.1 Drijvende olie 42
3.2.2 Gesedimenteerde en gestrande olie 43
3.2.3 Olie in het water verdeeld 49
3.3 Effekten van bestreden olie op organismen 54
3.3.1 Drijvende olie 54
3.3.1.1 Mechanische bestrijding 54
3.3.1.2 Fysisch-chemische methoden 55
3.3.2 Gestrande olie 61
3.3.2.1 Mechanische bestrijding 61
3.3.2.2 Fysisch-chemische methoden 61
3.4 Effekten van verjagen en schoonmaken van vogels en zeehonden 65
3.4.1 Verjagen 65
3.4.2 Schoonmaken 66

4 AFWEGING OLIEBESTRIJDINGSMETHODEN IN DE WADDENZEE 69
4.1 Inleiding 69
4.2 Beschermingsprioriteit 69
4.3 Toetsing van de bestrijdingsmethoden 69
4.3.1 Drijvende olie 69
4.3.2 Gestrande olie 72
4.4 Afweging en konklusies 75
4.4.1 Vanaf de Noordzee binnendrijvende olie 75
4.4.2 In de Waddenzee vrijkomende olie 79
4.4.3 In de Waddenzee gestrande olie 79

5 AANBEVELINGEN 82
5.1 Preventieve maatregelen 82
5.2 Bestrijding van olie op de Noordzee 82
5.3 Bestrijding van olie in de Waddenzee 83
5.3.1 Drijvende olie 83
5.3.2 Gestrande olie 84
5.4 Onderzoek 85

6 GECITEERDE LITERATUUR 87

Voorwoord

Tot nu toe is de Nederlandse kust een werkelijk grote olieramp bespaard gebleven. Hoewel klein, is de kans daarop echter bepaald niet denkbeeldig. Mocht een dergelijk grote ramp zich voordoen, dan is het materieel dat beschikbaar is voor oliebestrijding op zee ten enen male onvoldoende. Afhankelijk van wind en stroming kunnen dan zeer grote hoeveelheden olie op het strand en in gebieden zoals de Waddenzee en de Oosterschelde terecht komen. Elders in de wereld tijdens olierampen opgedane ervaringen geven echter geen duidelijke aanwijzingen hoe te handelen in zulke gevallen.

De Waddenzee en de wateren van het Deltagebied zijn gekenmerkt door zeer grote ecologische waarden. In geval van een grootschalige olieverontreiniging dient hiermee in hoge mate rekening te worden gehouden wanneer men beslist of en zo ja hoe, deze olie moet worden opgeruimd.

Deze studie tracht de informatie noodzakelijk voor de onderbouwing van een dergelijke beslissing aan te dragen. Allereerst wordt in deel 1 een overzicht gegeven van de gegevens die beschikbaar zijn in de, zeer uitgebreide, internationale literatuur over dit onderwerp. Hieruit wordt in deel 2 afgeleid hoe, al dan niet bestreden, olie zich in de Nederlandse kustwateren vermoedelijk zal gedragen. Tenslotte worden een aantal aanbevelingen gedaan voor het handelen tijdens een grootschalige olieverontreiniging in de Nederlandse kustwateren.

De studie werd uitgevoerd door Ir. Magda Bergman die daartoe tijdelijk was aangesteld bij de afdeling Estuariene Ecologie van het Rijksinstituut voor Natuurbeheer. De literatuurstudie werd per mei 1981 afgesloten, al zijn enkele belangrijke titels van na die datum nog wel in beschouwing genomen.

Met dank wordt gewag gemaakt van de hulp in verschillende vormen van de zijde van het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee.
Dr. R.J. Dortland (Rijkswaterstaat Directie Noordzee), Dr. K. Essink (Rijksinstituut voor de Zuivering van Afvalwater) en Dr. P. de Wolf (Biologisch Onderzoek Eems-Dollard Estuarium) lazen de tekst kritisch door en gaven vele waardevolle suggesties.

De Directie.

INLEIDING

Gebaseerd op de in deel 1 van dit rapport (Bergman 1982) bijeengebrachte gegevens over gedrag, bestrijding en biologische effekten van olie in estuaria wordt in dit tweede deel nagegaan wat verwacht kan worden voor het geval dat een grote hoeveelheid olie in de Waddenzee verschijnt. Het uitgangspunt voor deze beschouwingen wordt gevormd door de karakteristieke eigenschappen van de Waddenzee.

In hoofdstuk 1 worden de hydrologie, geomorfologie en ecologie van de Waddenzee, voor zover van belang voor het gedrag en de effekten van olie en de keuze van de oliebestrijdingsmethode, samengevat.

Hoofstuk 2 geeft een beeld van de vorm waarin (bestreden) olie in het Waddengebied geïntroduceerd kan worden en van de verspreidings- en afbraakprocessen die het lot van de olie in de Waddenzee bepalen.

In hoofdstuk 3 worden de biologische effekten van de verschillende vormen van (bestreden) olie beschreven, terwijl tevens de mogelijkheden van het verjagen en schoonmaken van vogels en zeehonden worden behandeld.

In hoofdstuk 4 worden na de vaststelling van de beschermingsprioriteiten de verschillende oliebestrijdingsmethoden aan deze kriteria getoetst; na afweging worden de konklusies voor de eventuele bestrijding van olie in drijvende en gestrande vorm in de Waddenzee gegeven.

Hoofdstuk 5 bevat aanbevelingen zowel voor de preventie van olieverontreiniging als voor de bestrijding van olie die de Waddenzee dreigt binnen te stromen of reeds in het gebied drijft dan wel is gestrand en tenslotte voor onderzoek van een aantal aspecten van olieverontreiniging.

Hoofdstuk 6 vermeldt tenslotte de geciteerde literatuur.

1 BESCHRIJVING VAN DE WADDENZEE

1.1 Inleiding

Bij de besluitvorming omtrent de eventuele bestrijding van olieverontreiniging in de Waddenzee is inzicht in een aantal essentiële aspecten van dit gebied noodzakelijk. Enerzijds wordt de verspreiding en afbraak van de olie in het Waddengebied door o.a. de hydrologie en geomorfologie bepaald, anderzijds bepalen ecologische aspecten de uiteindelijke biologische effekten van de olie.

1.2 Hydrologie

Gescheiden van de Noordzee door een keten eilanden kan de Waddenzee in principe beschouwd worden als een reeks opeenvolgende kompartimenten met elk een afzonderlijk zeegat. De hoeveelheid water, die via de zeegaten verplaatst wordt, varieert van enkele honderden miljoenen tot ruim 1 miljard m^3 per getijfase. Dit volume water is afkomstig uit de voor de zeegaten op de Noordzee in zuid-west tot westelijke richting gelegen "toestromingsgebieden" met een theoretisch berekend oppervlak van gemiddeld 25 tot 125 km^2 en een breedte van 6,5 tot 11 km (Rijkswaterstaat 1978). Aangezien de verplaatsing van de oppervlakkige waterlaag sterk windafhankelijk is, kan bij toenemende windsnelheden oppervlaktewater van ver buiten de gebieden toestromen.

Buiten de eilanden loopt een betrekkelijk sterke reststroom met een gemiddelde snelheid over langere perioden van 0,04 $m.sec^{-1}$ in noordoostelijke richting tot aan Terschelling, waarna de snelheid geringer wordt. Over kortere perioden, zoals bij aanhoudende NO-winden, kan de reststroom echter van richting veranderen. Als gevolg van deze reststroom wordt het water, dat met eb uit een zeegat stroomt met de volgende vloed slechts gedeeltelijk teruggestuwd (Postma 1982 ; Rijkswaterstaat 1978). Over de wantijen achter de eilanden vindt slechts een gering watertransport plaats, dat echter bij ZW-storm tot enkele tientallen miljoenen m^3 per wantij kan oplopen.

Het getijverschil varieert van ca. 1,5 m bij Den Helder tot 3 m bij Delfzijl. Bij gemiddeld hoogwater bevat het kombergingsgebied van het zeegat van Texel 1.5 maal zoveel water als bij laagwater. Het vertikale getij leidt tot horizontale getijstromingen, waarbij de binnenkomende getijgolf de afstand tot de kust van het vasteland (gem. 15 km) in minder dan 1 uur overbrugt. De getijstromingen kunnen tijdens springtij in de grote zeegaten een snelheid van 4 $mijl.uur^{-1}$ bereiken. In kleinere geulen en prielen op de hogere wadplaten worden in late eb en vroege vloed eveneens dergelijke hoge snelheden bereikt. Het grootste snelheidsverval ontstaat op de rand van

geul naar wad; op de wadplaten en tegen de kusten worden zelden snelheden van meer dan 1 mijl·uur^{-1} bereikt. De tijdstippen van HW en LW vallen over het algemeen voor kleinere geulen en wadplaten samen met de stroomkentering en dan staat het water vrijwel stil. In het algemeen kunnen door verschillen in stroomrichting en -snelheid grote verplaatsingen van aangrenzende watermassa's ten opzichte van elkaar plaatsvinden. Ook door verschillen in dichtheid van de watermassa's kunnen, voornamelijk tijdens de eb, dergelijke langs elkaar schuivende watermassa's optreden.

In het algemeen is de vertikale gelaagdheid in de Waddenzee gering of afwezig. Bij eb breidt zich echter het lichtere wadwater over het zwaardere Noordzeewater uit, terwijl dit Noordzeewater geneigd is bij vloed langs de bodem het zeegat binnen te schuiven.

De horizontale betijbewegingen leiden tot een transport van water in en uit het getijdengebied. Voor een zoutwaterdeeltje dat de westelijke Waddenzee binnenkomt, is de gemiddelde verblijfstijd in het bijbehorende kombergingsgebied ongeveer 3 getijperioden; de gemiddelde leeftijd van een zoutwaterdeeltje in dat gebied is ongeveer 12 getijden. De verversingstijd van het kombergingsgebied van Marsdiep en Vlie is gemiddeld 14 resp. 9 getijperioden (Zimmerman 1976).

Het zoutgehalte van het Waddenzeewater kan variëren van waarden lager dan die van Noordzeewater (in herfst en late winter) tot waarden gelijk of hoger dan de saliniteit van de Noordzee in de perioden waarin weinig zoet water gespuid wordt, of waarin sterke verdamping of uitgebreide ijsvorming plaatsvindt. De gemiddelde temperatuur van het Waddenzeewater varieert van 2°C in februari tot 18°C in juli-augustus, waarbij dit water van mei t/m september warmer is dan Noordzeewater. Op droogvallende platen kan door afkoeling of instraling de watertemperatuur echter waarden bereiken van -20°C tot 40°C (Postma 1982).

Het water van de Waddenzee kan hoge tot zeer hoge concentraties zwevend anorganisch slib (meer dan 250-500 mg.l^{-1}) bevatten, vooral tijdens de maximale vloed- en ebstromen en tijdens perioden met harde wind. Van de totale hoeveelheid gesuspendeerd slib vormt het organisch materiaal 5 tot 15% (Postma 1982).

1.3 Geomorfologie

Gedurende LW valt gemiddeld 40% van het totale Nederlandse waddengebied (totaal 2600 km^2) droog, variërend van 20% in het westelijk tot 75% in het oostelijk deel. De sedimenten in het waddengebied bestaan voor 90% uit zand (>50 µm), 1% van de korrels is groter dan 500 µm, 9% wordt gevormd door silt (50-2 µm) en lutum (<2 µm). In de geulen beneden de LW-lijn varieert de

mediane korrelgrootte van 500-1000 µm (in de zeegaten) tot 250-500 µm (in de kleinere wadgeulen). Op de platen en in de prielen in de zone tussen gemiddeld HW en LW variëren de korrelgroottes van 50-250 µm, waarbij in de zandige wadsedimenten tot 1% organisch materiaal aanwezig is (Anon 1976b). Op beschut gelegen wadden (Balgzand en Fries-Groningse kust) wordt de ruimte tussen de zandkorrels opgevuld door lutum. Eenmaal afgezet kan dit materiaal sterk consolideren en ontstaan de slikwadden, die door aanhoudende sedimentatie steeds ophogen (Postma 1982). Gebieden boven de HW-lijn bij doodtij kunnen meerdere getijperioden achtereen niet overspoeld worden. Gebieden boven de HW-lijn bij springtij worden alleen bij extra hoge waterstanden zoals NW-storm overstroomd. Juist in de zone tussen HW bij doodtij en bij springtij zullen kwelders tot ontwikkeling kunnen komen. Op deze kwelders worden de fijnere sedimentkorrels vastgelegd: fijn zand, silt en lutum. Dit sediment kan 5-10% organisch materiaal bevatten.

De in het water zwevende fijnere deeltjes zullen pas neerslaan bij stroomsnelheden van minder dan 0,002 $m.sec^{-1}$, terwijl deeltjes kleiner dan 8 µm in de Waddenzee niet of nauwelijks neerslaan. De allerfijnste deeltjes bezinken slechts nadat ze door bv. schelpdieren uit de waterkolom zijn gefilterd en als "faecel pellets" aaneengeklit weer worden uitgescheiden. Dit totale sedimentatieproces leidt tot het bezinken van enkele miljoenen tonnen slib per jaar in de Waddenzee (Abrahamse et al. 1976; Postma 1982).

Het sediment in de Waddenzee bestaat in de getijdenzone in de meeste gevallen uit een bovenste aerobe laag met een dikte van enkele mm tot een cm, waaronder anaerobe sedimenten liggen. In sneller stromende geulen met grofzandiger sediment kan de aerobe laag tot ruim een dm dik zijn (pers.med. Vosjan).

Overal waar een aerobe laag van minder dan een cm dikte wordt aangetroffen, zakt slechts een geringe hoeveelheid vloedwater tijdens eb in het sediment van de plaat weg. De getijdenplaten in het Waddengebied bestaan naar schatting voor minder dan 5% uit sedimenten waarin het vloedwater wel tot enkele dm diepte kan wegzakken of percoleren, zoals dit met name aan de randen van de geulen voorkomt. Op de drooggevallen wadplaten zal het interstitiële water tot een diepte van enkele cm uit de plaatselijke verhogingen (golfribbels) wegsijpelen (pers.med. H. Postma).

1.4 Ecologie

1.4.1 Inleiding

De estuariene gebieden langs de Nederlandse kust zijn voedselrijker dan de Noordzee, enerzijds door het netto-transport van al dan niet aan slibdeeltjes gebonden dood organisch materiaal vanuit de Noordzee het estuarium in en anderzijds door de produktie van organisch materiaal door groei van plantaardige organismen in het estuarium (Cadée & Hegeman 1974[a] en 1974[b]; Wolff 1976). Naar schatting is in de Waddenzee van dit organische materiaal (500 tot 700 $g.m^{-2}.jaar^{-1}$ droge stof) slechts ca. 30% afkomstig van lokale producenten, met name de éénceellige planktonische en benthische algen; het overige deel wordt vanuit de Noordzee aangevoerd.

De grote aanvoer van organisch materiaal, dat in de Waddenzee wordt gemineraliseerd, leidt tot een negatieve zuurstofbalans in het gebied, tot uiting komend in gemiddeld een zuurstofonderverzadiging van het water en afwezigheid van zuurstof op vele plaatsen in de bodem. De mineralisatie die in het water maar vooral in de bodem plaatsvindt, geschiedt voor een belangrijk deel door bacteriën, waarbij in de bodem zwavelbacteriën een belangrijke rol spelen. In de zuurstofloze bodem van grote gedeelten van de Waddenzee treedt daarbij sulfide-vorming op (H_2S), waarna ook colloïdale ijzersulfiden (zwart) en bisulfiden ontstaan (grijs).

1.4.2 Plantaardige organismen

In de Waddenzee worden door de primaire producenten zoals micro-algen, zeewieren en hogere planten organische verbindingen gevormd. Door de korte verblijfsduur van het water in de Waddenzee ontwikkelt zich geen specifieke phytoplanktongemeenschap, maar wordt deze gemeenschap hoofdzakelijk gevormd door diatomeeën en flagellaten, meegevoerd met het Noordzeewater en het gespuide zoete water. Deze in het water zwevende algen produceren jaarlijks ongeveer 100 g koolstof per m^2 in de vorm van organische verbindingen. Het microphytobenthos - voornamelijk diatomeeën, blauwwieren en flagellaten - dat zich op de met LW droogvallende platen bevindt, legt eveneens jaarlijks ca 100 g koolstof per m2 vast. Naar schatting wordt door phytoplankton en microphytobenthos gezamelijk jaarlijks ca 120 g koolstof per m^2 in de vorm van organische stof gevormd (Cadée & Hegeman 1974a, 1974b).

Het macrophytobenthos, de grotere wieren, komen vastgehecht op dijken en mosselbanken (blaaswier Fucus vesiculosus en purperblad Porphyra umbilicalis) en op beschutte wadden (zeesla Ulva lactuca en darmwier Enteromorpha sp.) plaatselijk over grote oppervlakten en in grote dichtheden voor. Ook niet aan

het substraat gehechte wieren, die door het water worden meegevoerd, komen voor. De bijdrage van het macrophytobenthos zal voor de primaire produktie relatief van minder belang zijn.

In de spatzone, de strook die alleen met stormvloed onder water komt, groeien op de dijken de lichenen (korstmossen). De grijsblauwe Verrucaria maura en de geel-oranje Xanthoria parietina zijn de meest voorkomende soorten. De bijdrage aan de primaire produktie van deze traaggroeiende organismen is praktisch nihil.

Hogere planten komen in de Waddenzee sinds het definitief verdwijnen van de uitgestrekte wiervelden (Groot zeegras: Zostera marina) nauwelijks meer voor. Klein zeegras (Zostera noltii) groeit verspreid nog in de hogere getijdenzone.

1.4.3 Zoöplankton

Een gedeelte van het levende en dode in de waterkolom zwevende organische materiaal wordt door de zoöplanktonorganismen gebruikt. Deze zoöplanktongemeenschap, bestaande uit kleine kreeftachtigen en andere permanent planktisch levende organismen (holoplankton), larven van bodembewonende organismen (meroplankton) en vislarven (ichthyoplankton) is in de Waddenzee niet opvallend rijk ontwikkeld.

Van een typische zoöplanktongemeenschap is in de Waddenzee nauwelijks sprake, omdat door de korte verversingstijd van het water in dit estuarium (zie 1.2) de tijd ontbreekt om een dergelijke gemeenschap op te bouwen. Uiteraard zijn de tot het mero- en ichthyoplankton behorende organismen voor de opbouw van zoöbenthos- en vispopulaties in de Waddenzee van essentieel belang.

1.4.4 Zoöbenthos

Door het ondiepe karakter van het Waddengebied (de westelijke Waddenzee heeft een gemiddelde diepte van 3,5 m) komt een zeer groot deel van het organische materiaal ten goede aan het in en op de bodemsedimenten levende zoöbenthos (schelpdieren, wormen en kreeftachtigen). Om deze reden zijn ook mossel- en kokkelkultuur in dit gebied mogelijk. De bodemfauna in de Waddenzee kan met ongeveer 25 g droge organische stof per m^2 droogvallend wad tot 10 à 20 maal rijker zijn aan organisch materiaal dan grote delen van de Noordzee. Deze bodemorganismen bevinden zich in de hoogste dichtheden op de droogvallende platen waar veel organisch materiaal sedimenteert en in de kleinere, maximaal 3 tot 5 m diepe geulen (Beukema 1974; Wolff & de Wolf 1977). Een groot deel van de bodemdieren in de hoger liggende delen van de wadplaten (bv. de wadpier Arenicol

marina) consumeert gesedimenteerd materiaal uit de grenslaag water-sediment. Na opname van het organisch materiaal worden zand- en slibdeeltjes weer uitgescheiden. Op de dieper gelegen platengebieden en in de geulen bevinden zich vooral bodemdieren (bv. mossel Mytilus edulis en kokkel Cerastoderma edule), die uit het langsstromende water deeltjes filtreren, waarbij het anorganische sediment en andere niet verteerbare delen als (pseudo) faeces weer in het water worden teruggevoerd. In de grotere stroomgeulen met hogere stroomsnelheden komen lage dichtheden bodemfauna voor, vergelijkbaar met die in de Noordzee. In het algemeen bestaat de naar biomassa en aantal individuen rijk vertegenwoordigde bodemfauna, die ook in de winter aanwezig blijft, uit een relatief gering aantal soorten.

De hoge dichtheden bodemorganismen in de Waddenzee vormen een rijke voedselbron voor grotere kreeftachtigen (bv. garnaal Crangon crangon en strandkrab Carcinas maenas). Jongere stadia van deze dieren groeien vooral op de hogere delen van wadplaten op, waardoor deze gebieden als kinderkamer voor de populaties in grotere delen van de Waddenzee en de kuststrook van de Noordzee fungeren. Ook bij deze kreeftachtigen gaan grote dichtheden samen met een gering aantal soorten. De garnaal, waarop in en net buiten de Waddenzee een belangrijke visserij wordt uitgeoefend, kan als een voorbeeld gelden van een enorm individuen-rijke soort.

1.4.5 Vissen

De rijkdom aan bodemdieren is één van de redenen dat het Waddengebied rijk voedselgebied voor verschillende vissoorten vormt. Voor enkele soorten, waarvan de volwassen exemplaren in de Noordzee voorkomen, vervult de Waddenzee in voorjaar (vanaf januari) en zomer een essentiële rol als kinderkamer en opgroeigebied. Platvislarven, die eerst in het water worden meegevoerd, vestigen zich na enige tijd op de bodem. Jonge schollen en botten zoeken voedsel op de met LW droogvallende wadplaten, jonge tongen fourageren op bodemdieren in de dieper gelegen gebieden, terwijl haringlarven en jonge haringen van zoöplanktonorganismen leven. Andere vissoorten brengen hun hele leven in het Waddengebied door (bv. zeedonderpad en brakwatergrondel) (Zijlstra 1978).

1.4.6 Vogels

Door de hoge dichtheid van zoöbenthosorganismen vormen grote delen van de Waddenzee voor vele watervogelsoorten een belangrijk voedselterrein. Dit geldt zowel voor de droogvallende platen (steltlopers) als voor de wat diepere geulen (duikeenden). Door de rijke visfauna zijn de met water bedekte

gebieden aantrekkelijk voedselgebied voor bv. sterns. De meeste vogelsoorten zoeken in het Waddengebied voedsel buiten de broedtijd, bv. bonte strandloper, wulp, rosse grutto en toppereend (Hulscher 1975). De gehele of een deel van de broedpopulatie van soorten uit N-Europa, IJsland, Groenland en Siberië verblijft gedurende enkele tijd in het Waddengebied. Voor vogelsoorten als brandgans, scholekster, wulp, rosse grutto en kluut komt op bepaalde momenten een zeer hoog percentage van de Oost-Atlantische populaties op doortrek of als overwinteraar in de Waddenzee voor (rapport Waddenzeecommissie 1974; Smit & Wolff 1981). Andere soorten als eidereend, scholekster, bergeend, tureluur, kluut, dwergstern, grote stern en visdiefje zijn ook in de zomermaanden als broedvogel aanwezig.

De grootste aantallen vogels verblijven in de Waddenzee in voorjaar en najaar tijdens de trekperiode; maximale aantallen op één moment kunnen tot 1 miljoen oplopen. In de winter is de Waddenzee de belangrijkste plaats voor estuariene vogels in Europa (Smit & Wolff 1981). Binnen de Waddenzee zijn de vogelconcentraties tamelijk mobiel en kunnen zich afhankelijk van wind, getij en verstoring snel door het gebied verspreiden. Uit schattingen valt af te leiden dat de aantallen vogels in het Waddengebied beperkt worden door de beschikbare hoeveelheid voedsel (Hulscher 1975).

1.4.7 Zeehonden

In de Nederlandse Waddenzee zijn nog ongeveer 500 zeehonden aanwezig, die voornamelijk van vis en garnalen leven. Het Waddengebied vervult door de aanwezigheid van aan diep water grenzende droogvallende zandbanken een onmisbare functie voor het werpen en zogen van de jonge zeehonden (Reynders 1976, 1978). Zeehonden komen het gehele jaar in de Waddenzee voor, waarbij de aantallen in de winter mogelijk wel geringer zijn.

1.4.8 Kweldervegetaties

Zoals in 1.3 beschreven, kunnen op beschut gelegen wadden (op Balgzand, langs de Fries-Groningse kust en aan de Z-O kant van de eilanden) door voortdurende sedimentatie van fijn materiaal de slikwadden ontstaan, waarop in de zone tussen HW bij doodtij en bij springtij kweldervegetaties tot ontwikkeling kunnen komen. De bovenste zone van het wad en tevens de laagste zone van de kwelders (tot net boven gemiddeld HW) wordt bedekt door een beschermende laag groenwieren (Vaucheria), blauwwieren en diatomeeën. In de laagste zone van de kwelder komen zeekraal (Salicornia) en Engels slijkgras (Spartina anglica) vaak in grote dichtheden tot ontwikkeling. In de zone rond gemiddeld HW wordt een groot deel van de vegetatie door kweldergras (Puccinellia

maritima) gevormd, terwijl ook zeeaster (Aster tripolium), lamsoor (Limonium vulgare), gewone zoutmelde (Halimione portalacoides), zeeweegbree (Plantago maritima) en schorrezoutgras (Triglochin maritima) verschijnen. In de hogere kwelderzone, slechts met springvloed overspoeld, vestigen zich rood zwenkgras (Festuca rubra) en Engels gras (Armeria maritima) en soms zeealsem (Artemisia maritima). In de nog hoger gelegen zone, slechts zelden overstroomd, komt vooral Fioringras (Agrostis stolonifera) en Engels gras voor.

1.4.9 De centrale rol van de bodem

Zonder aan het belang van de afzonderlijke aspekten binnen het ecosysteem van de Waddenzee voorbij te gaan, kunnen de biologische aktiviteiten in en op de bodem van dit getijdengebied als een essentiële factor beschouwd worden. Mineralisatie van zowel uit de Noordzee als de Waddenzee afkomstig organisch materiaal door micro-organismen in de bodemsedimenten zal grotendeels ten goede komen aan microphytobenthos, phytoplankton en kweldervegetaties. In de bodemsedimenten staan deze micro-organismen (bacteriën) mogelijk centraal in ontelbaar vele kringloopjes, waarin ook micro- en meiofauna-organismen een belangrijke rol spelen. De macrofauna, die zijn voedseldeeltjes voornamelijk uit de grenslaag sediment-water vergaart, vormt op en in de bovenste centimeters tot decimeters van vooral de droogvallende wadplaten een rijke biomassa. Fouragerend op deze zoöbenthos-organismen kunnen krabben en garnalen, bodemvissen en vogels zich in grote dichtheden in het Waddengebied handhaven. Op hun beurt dienen deze dieren weer als voedsel voor andere soorten, zoals zeehonden.

2 GEDRAG VAN (BESTREDEN) OLIE IN DE WADDENZEE

2.1 Inleiding

De gegevens in deel 1 van dit rapport (hoofdstukken 2 en 7) (Bergman 1982) en de in hoofdstuk 1 van dit deel beschreven karakteristieken van het Waddengebied geven enig inzicht in de verspreiding en afbraak van al dan niet bestreden olie in de Waddenzee. Hieraan voorafgaand zal de kans op een olieverontreiniging in het Waddengebied en de vorm waarin deze te verwachten valt, worden besproken.

2.2 Kans op en vorm van olieverontreiniging

2.2.1 Olie vrijgekomen op de Noordzee

2.2.1.1 Kans en type olie

Olie, die vanuit de Noordzee de Waddenzee binnendringt kan afkomstig zijn van boorplatforms, scheepsongevallen of oliepijpleidingen op de Noordzee.

Over het vervuilingsrisico van bepaalde kustgebieden door olie van boorplatforms zijn op grond van chemisch-fysische eigenschappen van de olie en klimatologisch-geografische parameters schattingen gemaakt. Uit het model "Sliktrak", in 1976 ontwikkeld, komt naar voren dat het seizoen sterke invloed heeft op de hoeveelheid olie, die de kust bereikt. Gemiddeld zal bijvoorbeeld in de zomer veel meer olie het Nederlandse Waddengebied kunnen bereiken en in een kortere tijdsduur dan in de lente. Bij een blow-out in het centrale deel van de Noordzee zal de olie pas na 1 à 2 weken de Waddenzee bereiken (zie deel 1, 1.4.2: Poley 1979). Olie afkomstig uit het 25 km ten westen van Den Helder liggende winningsgebied in vak Q1 zal reeds na circa 30 uur het Waddengebied kunnen bereiken. De bij een blow-out vrijkomende olie kan, afhankelijk van de snelheid waarmee de uitstroming gestopt kan worden, oplopen tot volumes van vele 100.000-den tonnen (zie deel 1: 1.5). Over het algemeen zal een vrij lichte ruwe olie uitstromen, maar in vak Q1 zal zware ruwe olie vrijkomen. Deze olie zal in eerste instantie een drijvende laag vormen. Over de kansen op een blow-out zijn geen exacte gegevens bekend.

Na het lekraken van een oliepijpleiding in de Noordzee zullen veel geringere hoeveelheden ruwe olie, in de orde van maximaal enkele 10.000-den tonnen vrijkomen, welke afhankelijk van de plaats van het lek na een tijdsverloop van dagen tot weken de Waddenzee kunnen bereiken.

Olie afkomstig van schepen op de Noordzee zal in het algemeen vrijkomen na een aanvaring of een stranding. Aanvaring zal in veel gevallen plaatsvinden in de ten noorden van de waddeneilanden lopende TE (Terschelling-Eems)-

vaarroute of in de verder noordelijk liggende DW (Deep-Water)-route. De kleinste afstand van deze routes tot Terschelling is resp. 6 en 32 mijl (zie deel 1, 1.4.2). Uitgaande van een aanvaring in de TE-route zal de olie binnen 12 uur de Waddenzee kunnen bereiken; olie vrijgekomen in de DW-route zal bij windkracht 5 uit noordelijke richtingen de Waddenzee binnen 60 uur bereiken. Stranding is alleen mogelijk in de buitendelta's van de Waddenzee en op de kust van de waddeneilanden; de vrijgekomen olie zal binnen 12 uur de Waddenzee binnendrijven.

Op grond van het jaarlijks gemiddeld aantal schepen boven de 1000 ton, dat op de Noordzee vergaat, de intensiteit van het scheepvaartverkeer en de kustlengte van de Nederlandse Waddenzee wordt geschat dat jaarlijks 0,1 olietanker in het gebied ten noorden en noordwesten van de Waddenzee zal vergaan. In 65% van de gevallen zal het een tanker van 1000-10.000 ton betreffen, in de overige gevallen tankers groter dan 10.000 ton. In 20% van de gevallen komt de olie vrij na een aanvaring, in 80% na een stranding (Rijkswaterstaat 1979).

De kans dat olie, vrijgekomen buiten de Waddeneilanden, echter werkelijk de Waddenzee binnenkomt, is afhankelijk van een aantal faktoren. Alleen olie die in de toestromingsgebieden van de zeegaten (zie 1.2) terechtkomt, zal de Waddenzee bereiken, de overige olie zal gedeeltelijk op de Noordzeestranden van de Waddeneilanden terechtkomen. Voor olievlekken van geringere afmetingen wordt de kans op binnendringen hierdoor tot gemiddeld 45% gereduceerd. Bij windstil weer (0,25% van de tijd) zal een olieveld met een gemiddelde snelheid van $\pm$ 0,07 $m.sec^{-1}$ in noordnoordoostelijke richting van het waddengebied worden weggevoerd. Windrichtingen tussen noord en west zullen een olieveld echter naar de Waddenzee stuwen. Uitgaande van een gemiddelde windkracht van een NW-wind van 4 tot 5 Beaufort en een driftsnelheid van 3.5% van de windsnelheid zal de windfaktor al 4x sterker zijn dan de reststroom (Rijkswaterstaat 1978). Aangezien de windkracht op het Nederlands deel van de Noordzee 65% van het jaar aanlandig is (Rijkswaterstaat 1979), zal een olievlek in de meeste gevallen naar de Waddenzee drijven.

Door de Rijkswaterstaat worden de kansen op een olieverontreiniging van de Waddenzee door aanvaring of stranding van olietankers op de Noordzee geschat. De Waddenzee dreigt eens in de 10 à 30 jaar door een olievlek van 7 000 ton verontreinigd te worden, terwijl eens in de 100 à 140 jaar een olievolume van meer dan 15.000 ton zal binnendrijven (Rijkswaterstaat 1979, 1981).

Van de totale jaarlijks over zee vervoerde olie en olieprodukten bestaat 85% uit ruwe olie (Anonymus 1976a). Ook gezien de samenstelling van de vervoerde olie(produkten) benoorden de Waddeneilanden wordt door Rijkswaterstaat

(1979) verondersteld, dat de kans op vrijkomen van ruwe olie bij een scheepsongeval het grootst is. In de overige gevallen zullen lichte of middel-distillaten vrijkomen, terwijl zware olieprodukten uit de bunkervoorraad kunnen stromen (R.S.U. 1980).

2.2.1.2 Vorm van de olie bij binnenkomen in de Waddenzee

2.2.1.2.1 Overzicht

Om inzicht te krijgen in de vorm waarin de olie afkomstig van de Noordzee uiteindelijk de Waddenzee binnenkomt, is de periode die de olie reeds op de Noordzee heeft doorgebracht een belangrijk gegeven. De lichte olie afkomstig van boorplatforms zal 1 à 2 weken onderhevig geweest zijn aan verspreidings- en afbraakprocessen op de Noordzee, de zware olie afkomstig uit vak Q1 ruim een etmaal. Olie, in de meeste gevallen een ruwe oliesoort, afkomstig van schepen zal minimaal enkele uren (stranding nabij zeegat) of minder dan 12 uur (aanvaring in TE-route) een verwering blootgestaan hebben. Deze verweringsperiode kan oplopen van enkele dagen tot weken alvorens de olie de zeegaten bereikt. Olie vrijgekomen door pijpbreuken zal afhankelijk van de lokatie van de breuk enkele uren tot weken aan verwering hebben blootgestaan. In deze periode van uren tot weken hebben processen als verdamping, oplossing, emulsievorming en en afbraakprocessen de vorm en samenstelling van de olie beïnvloed. De "verweerde" olie kan de Waddenzee als drijvende olielaag of verdeeld in het water binnentrekken.

2.2.1.2.2 Drijvend

Verdamping, oplossing, moussevorming, dispersie en afbraakprocessen kunnen de vorm en de samenstelling van de olie, die de Waddenzee drijvend binnenkomt reeds aanzienlijk veranderd hebben (zie Deel 1: 2.1.1; Morris 1976).

Dikte olielaag

De dikte van de olielaag zal binnen 1 à 2 uur al minder dan 0.8 cm zijn, daarna nog afnemend tot een dikte van enkele mm omringd door oliefilms van enkele µm (Johnsen, McAuliffe & Brown 1978). Moussevorming - zowel bij ruwe oliesoorten (Berridge, Thew & Loriston-Clarke 1968), Noordzeeolie (Gerlach 1978), gasoline (Blackman e.a. 1973) als petroleum (Baker 1976) gekonstateerd - kan bij ruwe zee reeds tijdens het vrijkomen van de olie tot 24 uur na dat tijdstip optreden (Jacobs 1979; Rijkswaterstaat 1979). Door toename van de viskositeit tot het 10- tot 100-voudige (Otto 1973) zal bij moussevorming de spreiding echter tegengewerkt worden, zodat aanzienlijk dikkere olielagen en onder bepaalde omstandigheden lagen tot 25 cm dikte kunnen ontstaan (Jacobs 1979).

Verdamping

Verdamping wordt als het meest belangrijke proces in de periode na het vrijkomen beschouwd (Butler 1976). Aangenomen wordt, dat na 1 tot 5 à 8 uur verdamping alle oliekomponenten met minder dan C6 à C8-ketens zijn verdwenen (Dodd 1974; Johnsen et al. 1978). Binnen 48 uur verdampen de oliekoolwaterstoffen tot C12 en binnen 2 tot 5 dagen de komponenten van C12 tot C14 (Rijkswaterstaat 1979; Guyomarch & Monnat 1978; Brown, Lynch & Admadjian 1978). In een enkel geval is pas na 1 maand 50% van de aromaten tot C12 verdampt (Grahl-Nielsen, Staveland & Wilhelmsen 1978). Oliekoolwaterstoffen boven de C15 verdampen nauwelijks, boven de C25 geheel niet (Guyomarch & Monnat 1978). Deze verdamping vindt plaats onafhankelijk van het type oliekomponent: uit een waterige oplossing verdampen paraffinen, naphthenen en aromaten met eenzelfde snelheid (Lee, Winter & Nicol 1978).

De verdamping wordt door de temperatuur (van 20° tot 30°C) en door zoutgehalten (van 10‰ tot 30‰) weinig beïnvloed (Linden 1979), terwijl ook rond het vriespunt verdamping voortgaat (Brown & Lynch 1977). Door moussevorming wordt verdamping echter volledig verhinderd (Law & Hall 1978; Boesh, Hershner & Milgram 1974; Guyomarch & Monnat 1978).

Het volume van de olie dat verdampt, is afhankelijk van de soort olie. Lichte ruwe oliesoorten die 20 tot 50% lichtere oliekoolwaterstoffen bevatten, verliezen in 24 uur 25% tot 40% van het volume (Dodd 1974; Mommaerts-Billiet 1973). Lichte ruwe olie (Libische, Nigeriaanse) zal sneller en meer verdampen dan zware ruwe olie (Venezuelaanse, Mexicaanse), welke laatste in 24 uur ± 10% verliest en in 5 dagen 50% (zie deel I: tabel 1.4). Bij olieprodukten is verdamping eveneens evenredig met het percentage relatief vluchtige koolwaterstoffen in de olie, dat varieert van 75% voor lichte stookolie tot minder dan 10% voor Bunker C olie en No 6 stookolie (Hansen 1975; Butler, Morris & Sleeter 1976).

Oplossing

Oplossing van oliekoolwaterstoffen vanuit een drijvende laag in de waterkolom is een relatief onbelangrijk proces, dat naar schatting voor 5% van de totale verwering zorgdraagt over een periode van 1 tot 10 dagen (Morris 1976). Paraffinen tot C8 en vooral aromaten tot C10 zullen in oplossing gaan.

Dispersie

Zolang geen moussevorming optreedt kan een aanzienlijk percentage (bij windkracht 3 tot 7 Bf naar schatting 20%) van de drijvende olie binnen enkele dagen op natuurlijke wijze in de waterkolom gedispergeerd raken (Law & Hall 1978; Guyomarch & Monnat 1978; Boesh, Hershner & Milgram 1974; McCarthy, Lindblom & Walter 1978; Rijkswaterstaat 1979).

Afbraak

Vanuit een drijvende olielaag kunnen oliekomponenten door afbraakprocessen over perioden van 10 dagen tot maanden verdwijnen (Morris 1976). Chemische afbraak is een relatief onbekend proces, snelheidsschattingen lopen uiteen van 0,07 tot 1% per dag (Dodd 1971; Hansen 1975) bij olielagen van 0,4 tot 0,02 mm. Bacteriële afbraak gaat naar schatting 10x sneller (Pilpel 1968; Zobell 1963) maar komt vaak pas na weken op gang na de verdamping of oplossing van toxische komponenten (Atlas & Bartha 1972a). Snelheden van microbiële afbraak van drijvende ruwe olie en smeerolie worden geschat op 0,02-2 $g/m^2/dag$ (Zobell 1969) en 0,5 $g/m^2/dag$ op de Noordzee (Poley 1979). In mousse is de afbraak erg traag (van der Linden 1978). Microbiële afbraak is sterk temperatuurafhankelijk (Q10 is 2 à 3), waarbij beneden de 10^oC de afbraak sterk vertraagd is (Otto 1973; Zobell 1969). Gedurende de eerste dagen tot weken zullen afbraakprocessen in het algemeen en zeker van oktober tot mei een te verwaarlozen invloed op de op de Noordzee drijvende olielagen hebben.

Resumerend zal een van de Noordzee binnendrijvende olielaag enkele tientallen uren na het vrijkomen een dikte van enkele µm tot enkele cm (in geval van moussevorming) kunnen hebben. Door verdamping zullen binnen 2 dagen de oliekomponenten tot C12 verdwenen zijn en daarmee circa 40% van het volume bij lichte ruwe olie; bij olieprodukten is het verdampte volume afhankelijk van het percentage vluchtige koolwaterstoffen en zal variëren van enkele procenten tot 50 à 70%. Door oplossing zal het aandeel oliekomponenten tot C8 à C10 in geringe mate afgenomen zijn, terwijl door dispersie (bij afwezigheid van mousse) tot 20% van de laag in de kolom verdeeld kan zijn.

2.2.1.2.3 In het water verdeeld

Olie kan, in het water verdeeld, de Waddenzee binnenkomen in opgeloste vorm, als gedispergeerde oliedruppels of geadsorbeerd aan partikulair materiaal. Tussen deze vormen kan een wisselwerking optreden: gedispergeerde en opgeloste olie kan geadsorbeerd raken, een proces dat bevorderd wordt door hoge concentraties, vaak oleofiel, detritus in het water (Boesh, Hershner & Milgram 1974). In de Waddenzee worden hoge tot zeer hoge concentraties zwevend (an)organisch materiaal aangetroffen (250-500 $mg.l^{-1}$) (Postma 1982), voor 15% van organische oorsprong. Ook door interaktie van gesuspendeerd materiaal met de drijvende olielaag kunnen geadsorbeerde oliedruppels ontstaan (Spooner 1978). Tegelijkertijd kunnen uit gedispergeerde en geadsorbeerde olie weer oliekomponenten in oplossing gaan, waarbij speciaal de aanwezigheid van humuszuren de oplosbaarheid van n-alkanen en isoprenoïden sterk verhoogt,

overigens i.t.t. die van aromaten (Boehm & Quinn 1973). Verdeeld in het water kan de olie zich nog onder het drijvende olieveld bevinden of door de stroming vanonder het veld meegevoerd zijn.

Opgeloste olie

Alleen onvertakte paraffinen tot C8 en naphthenen en aromaten tot C10 zijn goed wateroplosbaar, waarbij de oplosbaarheid in deze reeks toeneemt, zodat aromaten in het water procentueel 10 tot 100 maal sterker vertegenwoordigd kunnen zijn dan in de oorspronkelijke drijvende olie. Ruwe olie leidt tot een hogere concentratie opgeloste oliekomponenten (vooral lichte paraffinen en enkelvoudige aromaten) dan No. 2 stookolie en Bunker C olie, die hogere concentraties, meerringige aromaten bevatten (zie Butler, Berkes & Powles 1974; Deel I: tabel 2.6 & 2.7; Anderson e.a. 1974). De concentraties opgeloste koolwaterstoffen blijven echter zeer gering: 20 uur mengen van een 10% olie-in-water-mengsel leidt tot concentraties opgeloste olie van resp. 23, 6 en 1 ppm. Hogere temperaturen en lagere saliniteit bevorderen de oplossing (Benville & Korn 1977). In de veldsituatie worden binnen enkele uren tot dagen concentraties opgeloste olie in de bovenste waterlagen onder olievelden gemeten van 0.25 tot 5 ppm (Johnson, McAuliffe & Brown 1978; Berdugo, Harris & O'Hara 1977; Gerlach 1978; Taylor & Karinen 1977).

Deze gegevens suggereren dat opgeloste olie zich maximaal in concentraties van ± 10 ppm in de onmiddellijke nabijheid van olielagen zal voordoen. Menging zal tot concentraties van maximaal enkele ppm in de totale waterkolom leiden. Voor concentraties opgeloste olie, die de Waddenzee binnenkomen zal ditzelfde gelden.

Gedispergeerde olie

Een aanzienlijk deel van de drijvende olie zal in het water dispergeren (Mc Carthy, Lindblom & Walker 1978), waarbij de lichtere ruwe oliesoorten beter dispergeren (Anderson et al. 1974). Gedispergeerde olie blijft qualitatief identiek aan de originele olie (Andersen et al. 1974). Gedispergeerde Bunker C olie bestaat uit oliedruppels van 0.5 µm tot 2 mm, met de hoogste frequentie in de 10 µm klasse (Forrester 1971). Ruwe olie en lichte olieprodukten vormen oliedruppels van 0.5 µm tot meer dan 1 µm, waarbij 90% groter dan 1 µm is (Gordon, Keizer & Prouse 1973). De snelheid van het dispersieproces wordt bepaald door de windsnelheid en de aanwezigheid van brekende golven (Naess 1979): bij windkracht 3 tot 7 Bf zal 15 tot 20% van de olielaag gedurende de 2^e en 3^e dag na het vrijkomen in de waterkolom dispergeren (zie Deel 1: fig. 2.3). Gedurende de 4^e en 5^e dag zal dit percentage, afhankelijk van de golfactiviteit variëren van 5 tot 10% (Rijkswaterstaat 1979). In het veld worden

concentraties gedispergeerde olie onder drijvende zware stookolie gemeten van maximaal 1.5 ppm en onder ruwe olie van maximaal 2.5 ppm,terwijl onder een veld lichte Arabische ruwe olie in Saoedi-Arabië 50 ppm is gemeten (Spooner 1970) (zie Deel I: tabel 2.9). Gedispergeerde olie kan meer dan een maand in het water aanwezig blijven (Forrester 1971).

Aangenomen kan worden dat bij afwezigheid van moussevorming door natuurlijke dispersie in een aantal dagen tot 20% van de drijvende olie zich in het water kan verdelen. Per getijperiode zullen dan enkele procenten gedispergeerd raken. Bij een drijvend olievolume van 100.000 ton zullen menging in de vertikaal en uitwisselingsprocessen, een concentratie gedispergeerde olie doen ontstaan in de aan de Waddenzee grenzende delen van de Noordzee van maximaal ca. 10 ppm.

Met 1^e en 2^e generatie dispergenten (zie deel I: 7.1.2.6.2) gedispergeerde olie vormt oliedruppels in dezelfde orde van grootte als mechanisch gedispergeerde olie (Jasper, Kim & Wilson 1978), nl. van 10 tot 100 µm (Butler, Berkes & Powles 1974). Canevari (1975) noemt als maximale grootte enkele millimeters. Bij een grotere mengingsenergie bestaat de trend tot het ontstaan van kleinere druppels. Toediening van het zelfmengende concentraat Corexit 9527 aan Kuwait ruwe olie leidt tot druppels kleiner dan 1 µm (Jasper, Kim & Wilson 1978). Chemisch gedispergeerde olie wordt onder ruwe olievelden gemeten in concentraties van 1 tot 78 ppm na perioden van 1 tot 24 uur na het dispergeren op diepten van 1 tot 3 meter (Cormack & Nichols 1978; Ward & Davies 1978; Brown, Lynch & Ahmadjian 1978; McAuliffe et al. 1975). Onder met Slickgone LTD bestreden zware stookolievelden wordt 0.02 ppm gedispergeerde olie in de bovenste 1 m aangetroffen (Law & Hall 1978).

Uitgaande van de chemische dispersie van een olievolume van 100.000 ton in het vloedvolume van het Marsdiep of het Vlie ($1.10^9 m^3$) zullen bij volledige menging concentraties van maximaal 100 ppm kunnen optreden.

Geadsorbeerde olie

Adsorptie van opgeloste of gedispergeerde olie kan plaatsvinden aan gesuspendeerd materiaal (kleideeltjes, organisch materiaal) en aan plankton. (Cyclo)-alkanen hechten beter dan aromaten aan klei, $CaCO_3$, metaaloxides en organische detritus (Lee et al. 1977). Verzadigde koolwaterstoffen raken vooral geadsorbeerd aan partikels van 0.3-45 µm (Wade & Quinn 1980). Aangenomen wordt dat bij een ruwe zee, wanneer veel gesuspendeerd materiaal in het water aanwezig is, adsorptie sterker zal optreden.

Over adsorptie van chemisch gedispergeerde olie lopen de meningen uiteen (zie deel I: 7.1.2.6.2). Gesuggereerd wordt, dat chemisch gedispergeerde oliedruppels minder geneigd zijn te hechten aan natte vaste oppervlakten als

sediment en zwevende partikels (Gesamp 1977) en flora en fauna (Engdahl 1974). Kuwait ruwe olie hecht niet aan zandkorrels in aanwezigheid van dispergenten. Andere auteurs vermelden echter het beter hechten van chemisch gedispergeerde olie aan natte biologische en minerale oppervlakten dan van mechanisch gevormde druppels (Nelson-Smith 1972).

Gezien de hoge concentratie zwevend materiaal in de Waddenzee (zie 1.1) zal adsorptie van opgeloste en (chemisch) gedispergeerde olie in hoge mate kunnen plaatsvinden. Ook adsorptie van olie direkt uit een drijvende laag aan gesuspendeerd materiaal kan optreden. Aangenomen mag worden dat een aanzienlijk deel van de opgeloste en gedispergeerde olie (die in concentraties van enkele tot 10 ppm de Waddenzee zal binnenkomen), geadsorbeerd aan partikels zal voorkomen. Ditzelfde geldt voor chemisch gedispergeerde olie, die in concentraties tot 100 ppm in het vloedwater kan worden meegevoerd.

2.2.2 Olie vrijgekomen in de Waddenzee

Over de westelijke Waddenzee vindt regelmatig vervoer van olieprodukten plaats. Dit bestaat hoofdzakelijk uit vervoer van jaarlijks 20.000 ton zware stookolie en totaal 30.000 ton benzine, gasolie en huisbrandolie vanaf Kornwerderzand naar Oudeschild op Texel (zie Deel I, 1.4.2: pers.comm. Harting). Daar deze olieprodukten in porties van 1000 à 1500 ton vervoerd worden, zal een ongeluk bij dit transport tot een olieramp van beperkte omvang leiden. Over de kansen op een dergelijk ongeval zijn geen schattingen bekend.

De vrijgekomen olieprodukten zullen in eerste instantie zeker een drijvende olielaag vormen. Ook de bij laad- en losaktiviteiten in havens in het Waddengebied vrijgekomen olie zal een drijvende olielaag vormen (zie Deel I: 2.1). Uit een lek in een oliepijpleiding in de Waddenzee, zoals bij het voorgenomen tracé ten oosten van Schiermonnikoog zal, indien de leiding niet in zijn geheel vernietigd wordt, in 32 uur maximaal 8000 ton ruwe olie stromen (NAM 1981).

2.3 Verspreiding van olie in de Waddenzee

Wanneer olie vanaf de Noordzee de Waddenzee binnenkomt of in de Waddenzee vrijkomt, kan deze zich als drijvende laag of verdeeld in het water over het getijdengebied verspreiden, waarbij sedimentatie en stranding kunnen optreden.

2.3.1 Drijvende olie

Op grond van de rangschikking naar toenemende kwetsbaarheid (1 t/m 10) van kustvormen voor olieverontreiniging (zie Deel I: tabel 2.13; Gundlach et al. 1978; Gundlach & Hayes 1978) wordt het Waddengebied gevangen onder de categoriën 3, 5, 9 en 10:

meer of minder geëxponeerd gelegen vlakke fijnzandige gebieden (3+5), beschut gelegen estuariene getijdenplaten (9) en beschut gelegen estuariene kwelders (10). In het algemeen kan het gebied volgens deze index als een middelmatig tot sterk voor olie kwetsbaar gebied gekarakteriseerd worden (fig. 2.1).

De horizontale verspreiding van drijvende olie in het Waddengebied zal door hydrografie, getijstroming en wind bepaald worden. In het algemeen zal de drijvende olie bij HW langs de HW-lijn stranden en bij vallend water vanaf de HW tot LW-lijn en vooral in de lagere delen van de getijdenzone, op het sediment blijven liggen (Nelson-Smith 1978; van der Meulen et al. 1978; Wolfe 1978). Sterke accumulatie van olie (wind!) en achtereenvolgende getijbewegingen kunnen tot bedekking van de gehele getijdenzone leiden met de dikste lagen langs de HW-lijn (Gundlach et al. 1978). Door de geringe stroomsnelheden op de wantijen zal olie waarschijnlijk juist ook in deze gebieden op het sediment worden afgezet met afgaand tij. Oude maximaal geëmulgeerde mousse (70-80% water en meer dan 2% sediment) zal in veel gevallen beneden de LW-lijn sedimenteren (VanderMeulen et al. 1978).

Rijkswaterstaat (1977) komt, uitgaande van een hypothetische olievlek van 10.000 ton verweerde ruwe olie aan het begin van de vloed bij het begin van de Vliestroom bij windkracht 5 Bf uit het noorden, op grond van drijverexperimenten en stroombaanberekeningen tot de volgende konklusie over de verspreiding van deze 1 mm dikke olielaag. De olie zal na 18 uur de Friese kust bereiken en zal na 24 uur een zeer groot deel van het kombergingsgebied (850 km^2) verontreinigd hebben en zich uitbreiden tot het Eierlandse Gat, waarbij ook het kombergingsgebied van Texel gevaar loopt. Bij krimpende wind zal ook het wantij onder Terschelling door de olie overschreden worden. Door het gebruik van drijvers met een diepgang van 1 meter kan uit het drijverexperiment echter niets gekonkludeerd worden over het al dan niet stranden van de drijvende olie op de droogvallende platen.

Mogelijk kan meer inzicht in de bewegingen van drijvende olievelden in de Waddenzee worden verkregen door de verspreiding van gemerkte ijsvelden te volgen.

Aangenomen mag worden dat indien een olievlek de Waddenzee binnendrijft bij windrichtingen tussen ZW en NO, hetgeen gedurende 70% van het jaar het geval is (Rijkswaterstaat 1979), deze olie binnen 24 uur goeddeels over het kombergingsgebied verspreid zal zijn. Met afgaand water zal deze olie in de getijdenzone langs kusten, wantijen en platengebieden op het sediment blijven liggen. Uitgaande van een olievolume van 100.000 ton drijvende olie zal bij een laagdikte van 1 mm een gebied van 10 bij 10 km onder een aaneengesloten olielaag

Fig. 2.1 Kwetsbaarheid van het Waddenzeegebied voor olieverontreiniging volgens de tiendelige schaal van Gundlach & Hayes (1978) en gebaseerd op een ongepubliceerde habitatkaart van Drs. K.S. Dijkema (RIN, Texel). De gebieden in de categorieën 9 (lichte stippeling) en 10 (donkere stippeling) van Gundlach & Hayes (l.c.) zijn zeer kwetsbaar voor olieverontreiniging. Het overige deel van de Waddenzee is zonder nadere studie niet goed volgens genoemde schaal in te delen.

bedekt raken. Hierbij wordt dan volledig voorbij gegaan aan eventuele redistributie (zie 2.3.3.2.1).

2.3.2 Olie in het water

Olie kan vanaf de Noordzee verdeeld in het water de Waddenzee binnenkomen of vanuit een drijvende olielaag op de Waddenzee in het water verdeeld raken. In het water bevindt de olie zich in opgeloste vorm, als (chemisch) gedispergeerde oliedruppels of geadsorbeerd aan gesuspendeerd materiaal. Zolang de olie in het water verdeeld blijft, zal de verspreiding van olie over het Waddengebied globaal gelijk zijn aan de verspreiding van waterdeeltjes, die door mengingsprocessen wordt bepaald. Vanuit het water kunnen oliedruppeltjes en geadsorbeerde olie echter sedimenteren of door organismen worden opgenomen en in "faecal pellets" worden vastgelegd op het sediment.

2.3.2.1 Verspreiding

De verspreiding van olie verdeeld in het water van de Waddenzee kan gesimuleerd worden m.b.v. een door Zimmerman (1976) ontwikkeld kompartimentenmodel voor de westelijke Waddenzee. In dit model wordt het gebied in een serie kompartimenten verdeeld, waartussen uitwisseling van waterdeeltjes kan plaatsvinden (fig. 2.2). De diffusiesnelheden worden als konstanten beschouwd en uitgegaan wordt van gemiddelde getijkondities.

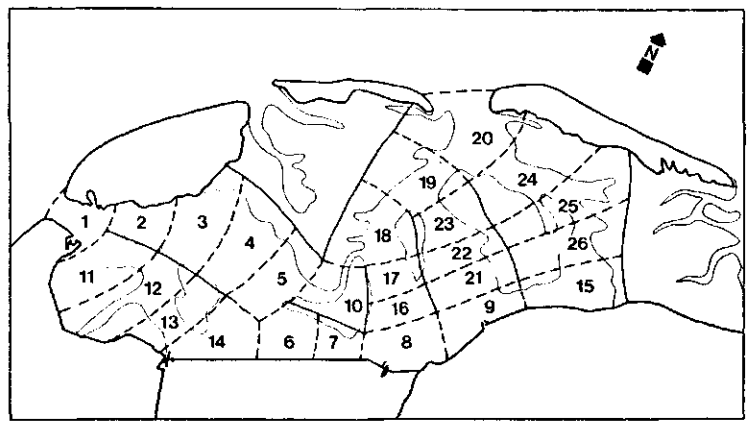

fig. 2.2 Kompartimenten in de westelijke Waddenzee. Wateruitwisseling wordt verondersteld slechts via de gestippelde lijnen plaats te vinden (Zimmerman 1976).

Aannemende dat de gedispergeerde olie zich snel homogeen over het gehele volume van één kompartiment verdeelt (zie 7.2.2.6.2), kan de verspreiding van de chemisch gedispergeerde olie vanuit een bepaald kompartiment over de Waddenzee worden berekend. Als maat voor de verspreiding wordt steeds de maximale concentratie gegeven, die na verloop van een aantal getijperioden in een willekeurig ander kompartiment optreedt. Na het optreden van de maximale concentraties

zullen de concentraties in ieder kompartiment exponentieel afnemen. Als uitgegaan wordt van een gemiddelde verversingstijd voor de westelijke Waddenzee van 13 getijperioden zal deze afname het in fig. 2.3 geschetste verloop hebben. In werkelijkheid zullen de kompartimenten nabij de zeegaten sneller en nabij de kust van Friesland trager verversen. Goede schattingen van de afwijkingen van de gemiddelde verversingstijd zijn op grond van de bestaande gegevens nog niet te geven.

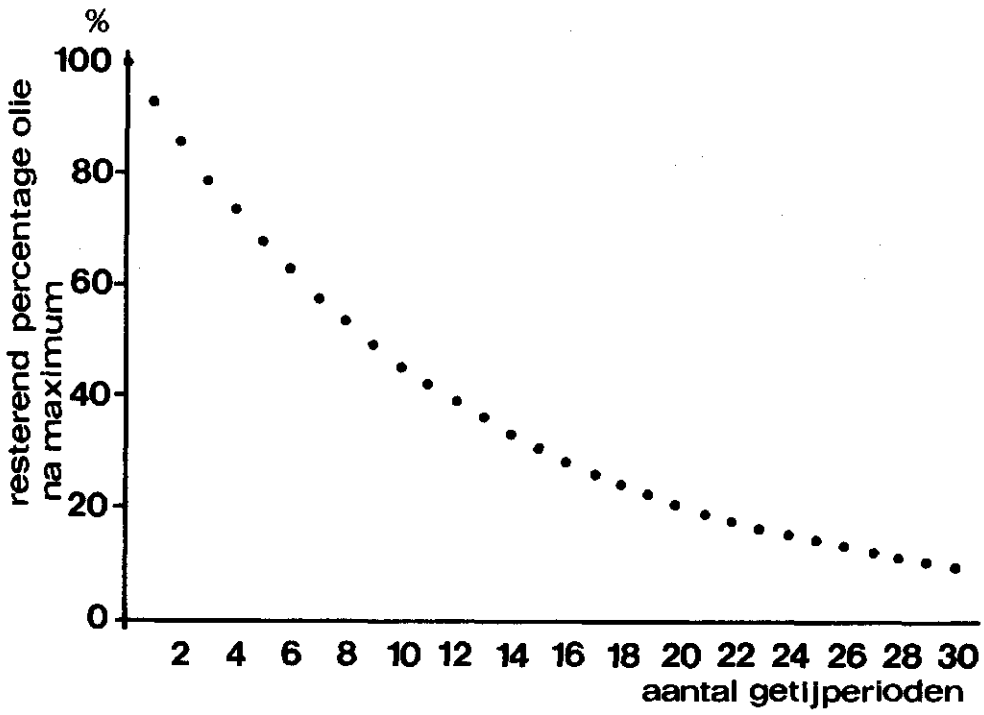

Fig. 2.3 Gemiddeld concentratieverloop in kompartimenten van de westelijke Waddenzee na het optreden van het lokale maximum (in %).

Voor de berekening wordt uitgegaan van een drijvende olievlek van 100.000 ton, dus een geval van zeer ernstige olieverontreiniging van de Waddenzee dat alleen in zeer extreme gevallen overschreden zal worden. Bij een laagdikte van 2,5 mm beslaat een dergelijke volume olie een oppervlak van 4 bij 10 km. Aangezien het toestromingsgebied buiten het zeegat, vanwaaruit het totale vloedvolume het Marsdiep en het Vlie binnenstroomt, berekend is op een oppervlak van $\pm$ 100 km^2 (Rijkswaterstaat 1978) moet het mogelijk geacht worden, dat een dergelijke olievlek in één vloedperiode het kombergingsgebied binnendrijft. Alle

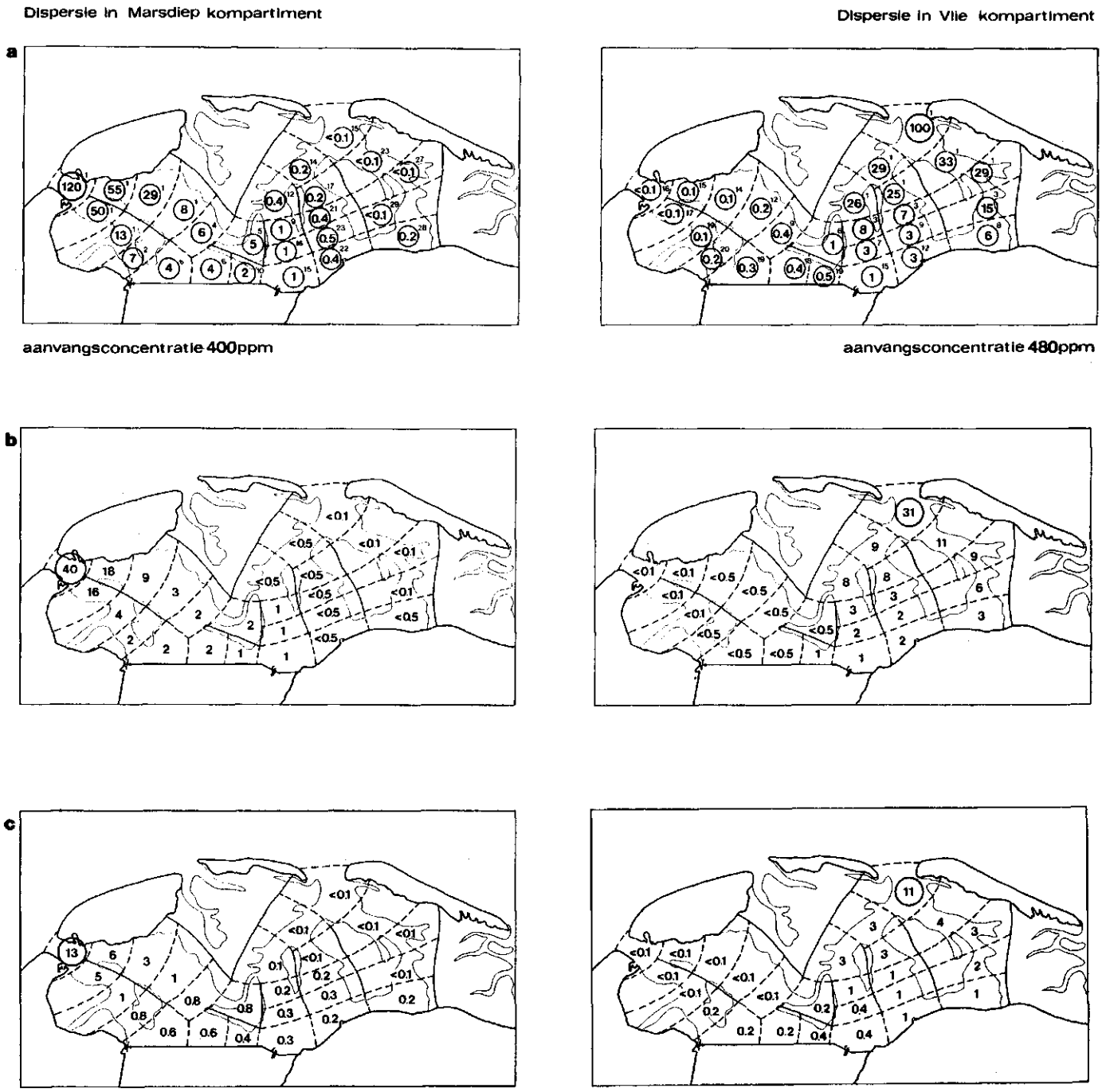

Fig. 2.4 Schatting van de verspreiding van 100.000 ton in het zeegat chemisch gedispergeerde olie over de westelijke Waddenzee; de dispersie gebeurt binnen 1 getijperiode, waarbij de olie zich homogeen over het volume van het kompartiment bij halftij verdeelt.

a. maximaal bereikte lokale concentraties (ppm) na verloop van aantal getijperioden (= index)

b. situatie na 1 week

c. situatie na 2 weken

andere kompartimenten in het Waddengebied zijn eveneens van een voldoende oppervlak om een dergelijke olievlek te kunnen dragen.

De verspreiding van gedispergeerde olie afkomstig van een olievolume van een andere grootte laat zich proportioneel van de gegeven concentraties voor de situatie met 100.000 ton afleiden. Het tijdsverloop waarbinnen deze maximale concentraties optreden, blijft echter onveranderd.

Als voorbeeld zal de verspreiding van de chemisch gedispergeerde olie in de Waddenzee worden berekend voor het theoretische geval van dispersie van een binnendrijvende olievlek van 100.000 ton gedurende 1 getijperiode in het volume bij halftij van het zeegat van Texel (Marsdiep) en van Terschelling (Vlie). In fig. 2.4 worden de maximale concentraties gedispergeerde olie in de overige kompartimenten aangegeven en het tijdsverloop waarbinnen deze optreden. Na het optreden van deze lokale maxima neemt steeds de concentratie olie exponentieel af (zie fig. 2.3). De concentraties gedispergeerde olie zoals die 1 week resp. 2 weken na het moment van dispergeren theoretisch aanwezig zijn, worden eveneens in fig. 2.4 gegeven. Uit deze figuur blijken de concentraties gedispergeerde olie verder naar binnen in de kombergingsgebieden af te nemen. De lokale maxima zijn daar lager en worden pas na een langer tijdsverloop bereikt. De hoogste lokale concentraties worden bereikt in de nabij het zeegat gelegen kompartimenten; deze variëren van maximaal 35 tot 55 ppm na verloop van één getijperiode na de dispersie. Eén week na de dispersie zijn de concentraties afgenomen tot maximaal 10 à 20 ppm in de nabijgelegen gebieden, terwijl in globaal ¾ van de westelijke Waddenzee de waarden beneden de 5 ppm zijn gedaald. Twee weken na de dispersie zijn de concentraties in het totale gebied beneden de 5 ppm gedaald. Hierbij geldt, dat de concentraties in de nabij de zeegaten gelegen gebieden door de kortere verversingstijd in deze kompartimenten zeker sneller zullen afnemen dan is geschetst.

Een tweede voorbeeld gaat uit van de situatie waarin een olievlek van 100.000 ton verder in de Waddenzee is gedreven of ter plaatse is vrijgekomen. Olie in de Waddenzee vrijgekomen zal echter naar verwachting een volume van ca. 1000 of 8000 ton (tankerongeval resp. breuk in pijpleiding) niet of slechts zeer zelden overschrijden, zodat in die gevallen de gegeven concentraties proportioneel moeten worden verminderd. De verspreiding van de gedispergeerde olie over de Waddenzee zal worden berekend na dispersie in de centrale delen (kompartimenten 5 en 12)en in de meer beschutte randgebieden (kompartimenten 8 en 15). Fig. 2.5 en 2.6 geven een beeld van de tijdsperiode waarin de maximale concentraties optreden in de overige kompartimenten. Na het optreden van deze lokale maxima nemen de concentraties af, zoals eveneens in deze figuren getoond wordt.

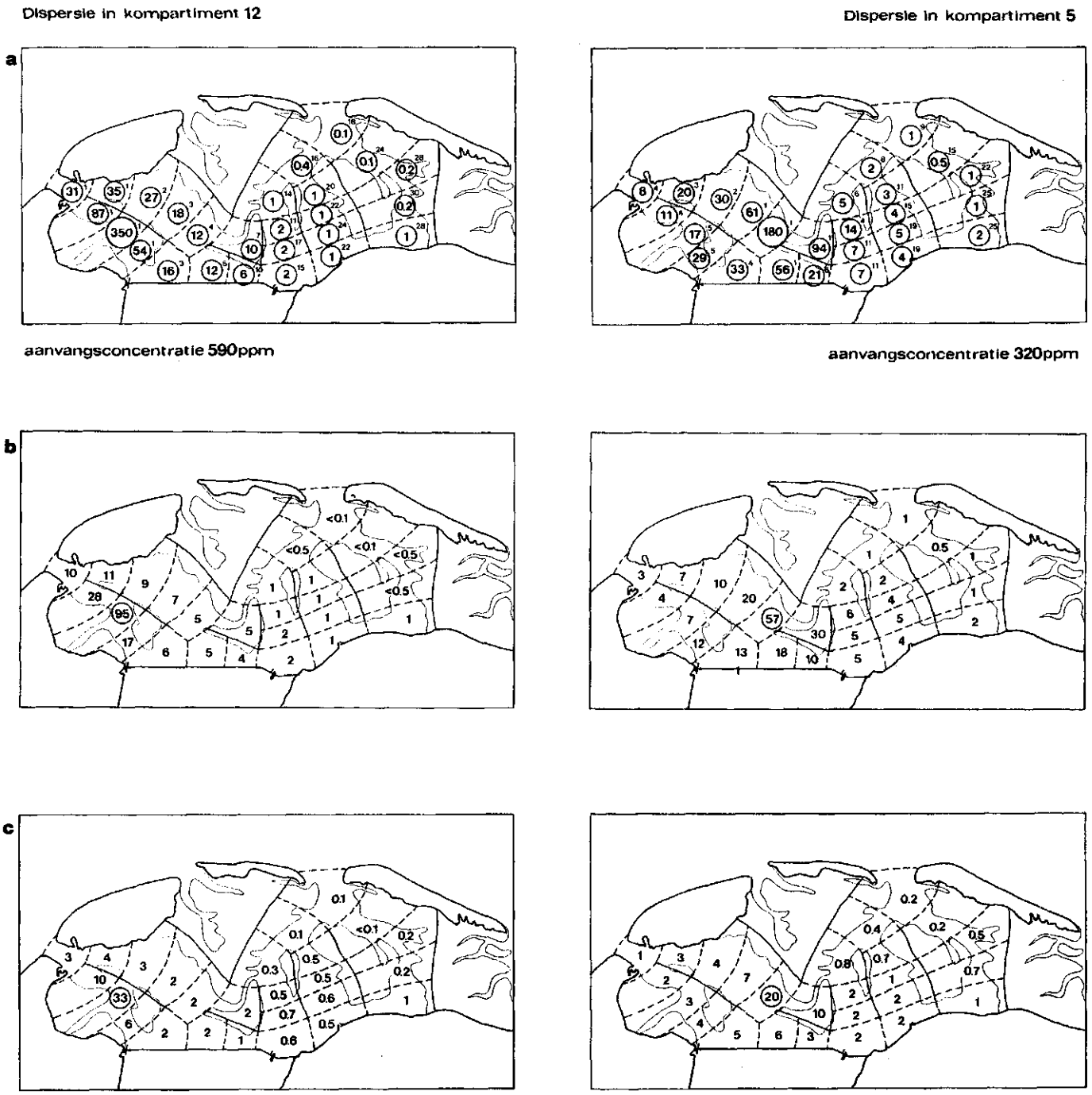

Fig. 2.5 Schatting van de verspreiding van 100.000 ton in het centrale deel van de westelijke Waddenzee chemisch gedispergeerde olie; de dispersie gebeurt binnen 1 getijperiode, waarbij de olie zich homogeen over het volume van het kompartiment bij halftij verdeelt.

a. maximale lokale concentraties (ppm) na verloop van aantal getijperioden (= index).

b. situatie na 1 week.

c. situatie na 2 weken.

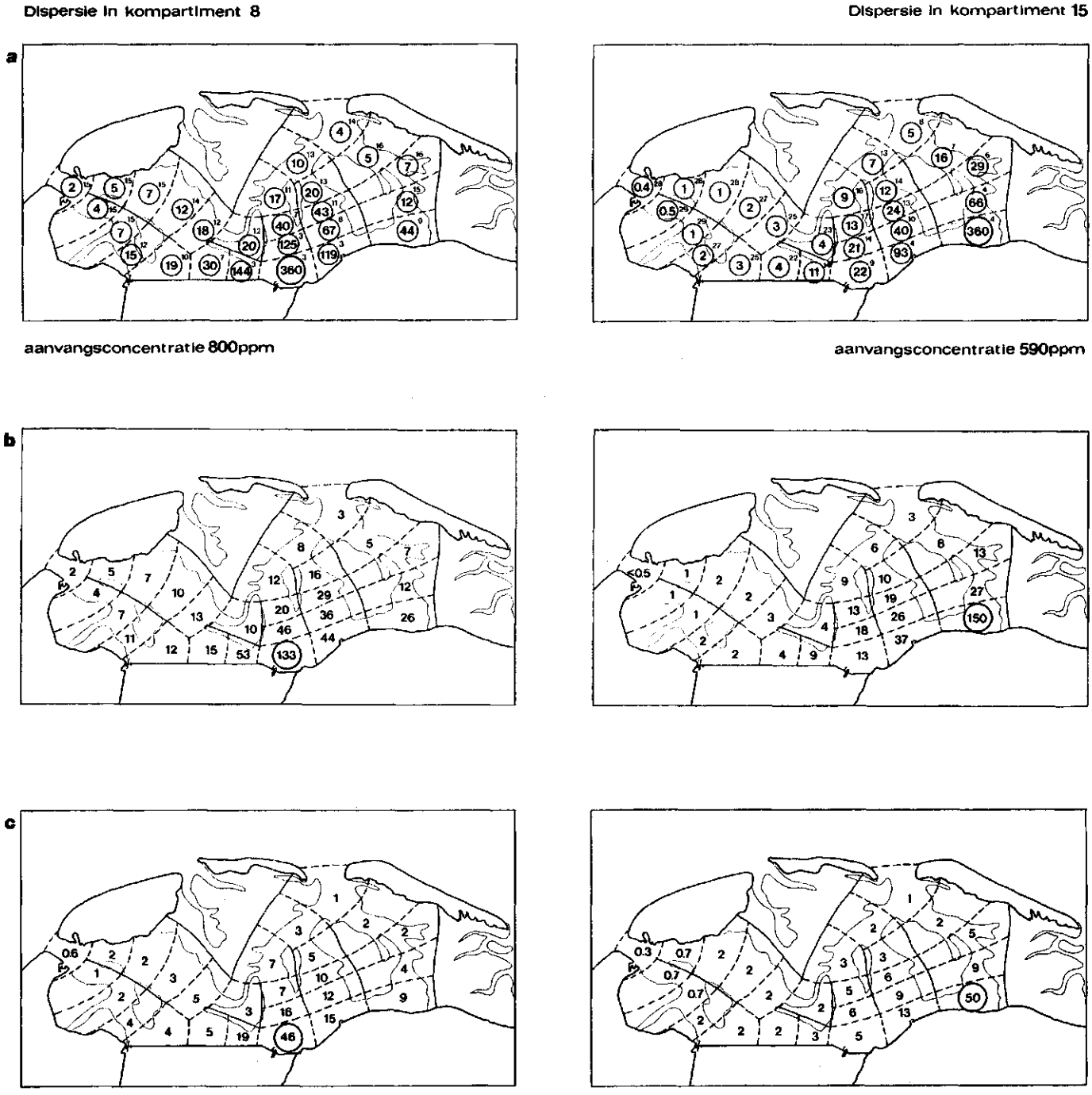

Fig. 2.6 Schatting van de verspreiding van 100.000 ton olie in de randgebieden van de westelijke Waddenzee chemisch gedispergeerde olie; de dispersie gebeurt binnen 1 getijperiode,waarbij de olie zich homogeen over het volume van het kompartiment bij halftij verdeelt.

a. maximale lokale concentraties (ppm) na verloop van aantal getijperioden (= index) (in kompartimenten 8 en 15 is de concentratie na 3 resp. 4 getijperioden weergegeven).

b. situatie na 1 week

c. situatie na 2 weken.

Uit fig. 2.5 en 2.6 blijkt het volgende. Terwijl na dispersie in de centrale delen reeds na één getijperiode de lokale maxima in de orde van 90 ppm ontstaan, bouwen na dispersie in de randgebieden deze maxima zich in 3 à 4 getijperioden op tot maanden tot 150 ppm. Door geringere uitwisseling van water tussen de kompartimenten neemt de concentratie gedispergeerde olie, na dispersie in meer binnenwaarts gelegen gebieden, hogere waarden aan die zich over een langere periode handhaven. Na verloop van een week zijn de concentraties na dispersie in de centrale delen tot beneden de 30 ppm gedaald, na dispersie in de randgebieden tot beneden de 50 ppm. Twee weken na de dispersie zijn deze waarden nog verder gedaald tot 10 resp. 20 ppm. Overigens zal de verversing en daarmee het dalen van de concentraties olie in de aan de randen van het kombergingsgebieden gelegen kompartimenten trager gaan dan de hier op grond van de gemiddelde verversingstijd beschreven situatie.

In de periode na deze 2 weken zullen de concentraties gedispergeerde olie nog slechts langzaam afnemen, gemiddeld over de hele westelijke Waddenzee met 1% per dag. Hierbij geldt evenals voor de gehele periode van afnemende concentraties, dat in de meer aan de rand gelegen gebieden deze afname aanzienlijk trager en nabij de zeegaten de afname sneller zal plaatsvinden dan hier berekend.

2.3.2.2 Sedimentatie

Natuurlijke sedimentatie

Voor sedimentatie vanuit het water zijn deeltjesgrootte en stroomsnelheid van het water de essentiële factoren. Opgeloste olie zal zich als waterdeeltjes gedragen en uiteraard nooit sedimenteren. Bij mechanisch gedispergeerde olie varieert de druppelgrootte van 0.5 µm tot 100 µm, met veelal de hoogste frequentie boven de 1 µm in de 10 µm grootte (Forrester 1971; Gordon, Keizer & Prouse 1973). Chemisch gedispergeerde oliedruppels variëren van 10 tot 100 µm bij 1^e- en 2^e-generatie dispergenten (Jasper, Kim & Wilson 1978; Butler, Berkes & Powles 1974), bij 3^e-generatie dispergenten zijn de gevormde druppels veelal kleiner dan 1 µm (Jasper, Kim & Wilson 1978). Adsorptie van olie aan gesuspendeerd materiaal vindt plaats aan deeltjes vanaf 0.3 µm (Wade & Quinn 1980). Adsorptie zal gezien de concentratie zwevend materiaal (zie 1.2) in de Waddenzee op grote schaal kunnen plaatsvinden.

In het algemeen zullen kleine zwevende deeltjes pas bij zeer geringe stroomsnelheden neerslaan (zie 1.3), terwijl deeltjes kleiner dan 10 µm nauwelijks en kleiner dan 0.5 µm in het Waddengebied totaal niet bezinken (Duinker et al. 1974; Postma, pers.med.). Te verwachten valt dat, gezien de geringe grootte van de oliedruppels, gedispergeerde olie nauwelijks in het Waddengebied zal sedimenteren. Alleen aan zwevend materiaal gehechte olie zal kunnen neerslaan

en daarmee relatief het grootste gedeelte van de sedimenterende olie vormen (Thuer & Stumm 1977). In welke hoeveelheden deze geadsorbeerde olie zal bezinken blijft echter onbekend. Bezinking zal voornamelijk gebeuren in gebieden met de geringste stroomsnelheden, zoals langs de randen van de Waddenzee en op de wantijen. Mede als gevolg van de door Postma (1961) beschreven akkumulatie-processen zullen de sedimenterende deeltjes zich uiteindelijk concentreren in slikkige sedimenten in gebieden met de geringste stroomsnelheden. Concentraties olie in het water boven dergelijke sedimenten kunnen bij opwerveling aanzienlijk hogere waarden bereiken dan de in 2.2.1.2.3 beschreven concentraties.

Sedimentatie via zoöplankton en zoöbenthos

Sedimentatie van opgeloste, gedispergeerde of geadsorbeerde olie kan ook optreden na ingestie door of adhesie aan (zoö)plankton en (zoö)benthos. Begrazing van een drijvend olieveld of in het water verdeelde olie door zoöplankton is een belangrijk mechanisme, waardoor olie vanuit het pelagiaal in de vorm van "faecal pellets" naar de bodemsedimenten wordt getransporteerd (Lee et al. 1977). In de vorm van 0.7 tot 7% olie bevattende faecal pellets kan tot 20% van de gedispergeerde olie gesedimenteerd raken (Conover 1971; Linden, Elmgren & Boehm 1979). Berekend is, dat een dichtheid van 2000 copepoden (Calanus finmarchicus) per m^3 over een gebied van 1 km^2 tot een diepte van 10 m kan leiden tot de sedimentatie van 3 ton olie per dag uitgaande van een concentratie gedispergeerde olie van 1.5 ppm (Parker, Freegarde & Hatchard 1971; Conover 1971). Uitgaande van de voor de westelijke Waddenzee geldende gegevens: diepte gemiddeld 3.7 m, oppervlak 1560 km^2 (Verwey 1952) en een dichtheid van 2000 copepoden per m^3 gemiddeld over het jaar met een jaargemiddelde filtratiesnelheid van 10 ml/copepode/dag (Baretta, pers.med.), laat zich de dagelijks door dit zoöplankton neergeslagen hoeveelheid olie berekenen. Indien alle door het zoöplankton uit een concentratie van 1.5 ppm gefilterde olie in faecal pellets zou bezinken, leidt dit tot een sedimentatie van 170 ton olie per dag in de westelijke Waddenzee. Gezien de seizoensafhankelijkheid van de dichtheid en in mindere mate van de filtratiesnelheid van de copepoden zal de hoeveelheid in faecal pellets gesedimenteerde olie in de winter aanzienlijk lager zijn dan in de zomer (Baretta, pers.med.).

Zoöbenthos-organismen als polychaeten en bivalven kunnen enorme hoeveelheden water doorpompen, waarna de niet-verteerde of niet-geaccepteerde deeltjes als (pseudo)faeces worden uitgescheiden. Verwey (1952) berekende dat rond 1950 door kokkels en mossels in de westelijke Waddenzee dagelijks een hoeveelheid water van circa 0.04 km^3 werd doorgepompt. Dit volume is gebaseerd

op de aantallen kokkels en mossels in die periode, naar schatting totaal 6000 resp. 2000 miljoen exemplaren. De huidige hoeveelheid kokkels en mossels zal in dezelfde orde van grootte liggen (Beukema, pers.med.). Het in dit volume water aanwezige gesuspendeerde materiaal wordt vastgelegd in scheldiervlees, pseudofaeces en faeces. Bij de kokkel, waarvan de (pseudo)faeces produktie die van de mossel in de Waddenzee 4 maal overtreft, wordt ongeveer 40% in faeces vastgelegd, die wegens de moeilijke afbreekbaarheid jarenlang aanwezig kan blijven. Pseudofaeces en faeces van de kokkel worden meestal door het water over de bodem getransporteerd, die van de mossel blijven veelal in de mosselbank achter (Verwey 1952). Uitgaande van een concentratie olie in het water van 1.5 ppm zal door kokkels en mossels tezamen in de westelijke Waddenzee 0.04 ton olie per dag per km^2 uit het water kunnen worden vastgelegd. Voor de gehele westelijke Waddenzee betekent dit maximaal 60 ton olie per dag.

Gekonkludeerd kan worden dat voor de Waddenzee de aktiviteiten van zooplankton en zoöbenthos tot de dagelijkse sedimentatie van gemiddeld 230 ton olie zouden kunnen leiden uitgaande van een concentratie gedispergeerde olie in het water van 1.5 ppm. Uiteraard zullen bij hogere concentraties olie in het water uiteindelijk waarden worden bereikt, waarbij de filteraktiviteit van plankton en benthos steeds geringer wordt en uiteindelijk volledig ophoudt bij het afsterven van de organismen (zie 3.2.3 & 3.3.1.2).

2.3.3 Gesedimenteerde en gestrande olie

2.3.3.1 Gesedimenteerde olie

Olie verdeeld in het water kan beneden de LW-lijn en in de getijdenzone sedimenteren. Olie geadsorbeerd aan partikels en plankton, door verwering zwaarder geworden dan zeewater of vastgelegd in faecal pellets kan op de bodemsedimenten uitzakken. Eenmaal op het sediment bezonken kan de olie onder later sedimenterend materiaal bedolven raken of door graafaktiviteiten van bodembewonende organismen het sediment ingewerkt worden, terwijl ook oude gegraven gangen een potentiële toegangsweg tot het sediment vormen (zie Deel I, 2.1.1.5). Aangezien attraktie tussen sedimentpartikels en oliekoolwaterstoffen meestal sterker is dan de neiging om in oplossing te gaan, is de snelheid van vrijkomen van oliekomponenten in het milieu na sedimentatie meestal gereduceerd (Blumer & Sass 1972b).

In de sedimenten kunnen aanzienlijke concentraties olie worden vastgelegd. In experimenten werd 415 ppm olie (droog sediment) in de bovenste cm van de bodem tegen 0.18 ppm no. 2 stookolie in het bovenstaande water aangetroffen (Wade & Quinn 1980). In de veldsituatie werden bij de "Amoco Cadiz" ramp con-

centraties lichte ruwe olie tot 1 à 2% in fijne en grove sedimenten tot 30 m beneden de LW-lijn gemeten, terwijl ook aaneengesloten olievelden op de bodem werden gesignaleerd (Laubier 1978; Cabioch, Dauvin & Gentil 1978). In de bovenste cm van sedimenten beneden de LW-lijn werden na de "Florida" ramp (no. 2 stookolie) concentraties van 1200 ppm tegen een blanco van 60 ppm gemeten (Blumer & Sass 1972a). Bodemsedimenten treden veel als bezinkplaats op: 5 jaar na de "Arrow" ramp (Bunker C olie) wordt op 1 m boven het sediment 1 ppb, in het grensvlak sediment/water 200 ppb en in het sediment enkele duizenden ppm gemeten (VanderMeulen & Gordon 1976).

Aangenomen kan worden dat ook rond en beneden de LW-lijn in de Waddenzee en bij uitstek in de meer fijnkorrelige gebieden gesedimenteerde olie tot aanzienlijke olieconcentraties kan leiden. Als gevolg van chronische verontreiniging worden nu in het water van het Marsdiep olieconcentraties tot 0.3 ppm gemeten (gemiddeld 0.1 ppm) (de Wit,pers.med.),welke mede aanleiding geven tot het ontstaan van olieconcentraties in de bovenste 10 cm van middelfijne zandige getijdenplaten van 25 à 50 ppm drooggewicht (Rijkswaterstaat 1976, 1977; zie Deel I: 7.3.2.5). Bij beide metingen is sprake van de totale koolwaterstofconcentratie, zowel de fossiele als de recente biogene fractie. Uitgaande van de berekening in 2.3.2.2 zal gemiddeld over een jaar dagelijks 15 ton olie door zoöplankton en zoöbenthos in de westelijke Waddenzee kunnen neerslaan vanuit een olieconcentratie van 0.1 ppm. Verdeeld in de bovenste 10 cm van het sediment zal hierdoor jaarlijks een olieconcentratie van ca.20 ppm kunnen ontstaan.

Eenmaal in een getijdengebied gesedimenteerd kan de olie nog herhaaldelijk geredistribueerd worden, waarbij transport via het bovenstaande of het interstitiele water belangrijke wegen zijn (vanderMeulen & Gordon 1976). Redistributie door getij, stroom en golfwerking leidde bij verschillende olierampen tot jarenlange uitbreiding van gesedimenteerde, geadsorbeerde olie vanuit ondiepe naar diepere sedimenten (Boesh, Hershner & Milgram 1974), waardoor olieconcentraties in sedimenten beneden de LW-lijn, toenamen van 1200 tot 12.000 ppm (Blumer & Sass 1972a). In het mobiele Waddengebied moet redistributie van gesedimenteerde olie zeker niet uitgesloten geacht worden. Op het sediment bezonken olie zal door de aktiviteiten van zoöbenthos in diepere lagen doordringen (zie ook 2.3.3.2.2).

2.3.3.2 Gestrande olie

Redistributie

Olie, boven de LW-lijn gestrand op het sediment, kan of door de volgende vloed worden opgelicht of voor langere tijd immobiel blijven, waarbij in beide gevallen eventueel oliekomponenten in het sediment kunnen doordringen.

Gevallen worden beschreven, waarin de gestrande olie zich min of meer blijvend aan het sediment hecht naast situaties,waarin de gestrande olie zich door het estuarium verplaatst. Gestrande lichte ruwe olie ("Amoco Cadiz") werd gedurende 1 week nog door de vloed opgelicht, maar na 1 maand was de gestrande laag te viskeus geworden (D'Ouzouville, Gundlach & Hayes 1978). Deze olie in mousse-vorm (vaak reversibel) plakt goed aan het sediment en wordt veelal niet weer opgenomen (VanderMeulen et al. 1978), hoewel ook dagenlange mobiliteit wordt vermeld (Spooner 1978). Ruwe en geëmulgeerde ruwe olie tijdens vallend water op een slecht waterdoorlatende zandige plaat uitgegoten, hecht zich door het achterblijvende waterfilmpje niet zichtbaar aan het wad en wordt door de vloed weer opgenomen (Rijkswaterstaat 1976, 1977). Op drogere delen van getijdenplaten tijdens zonnige dagen wordt lichte ruwe olie echter niet weer door de vloed opgelicht (v. Bernem 1976).

Het kan niet uitgesloten worden, dat olie die in grotere hoeveelheden strandt in de getijzone, zich althans ten dele aan de sedimenten in de Waddenzee zal hechten. Deze olie, die niet meer door de vloed wordt opgenomen, zal door verspreidingsprocessen afhankelijk van de hoeveelheid mechanische energie in de vorm van golven, getijden en wind (Owens 1978) en door afbraakprocessen (zie 3.3) uit het gebied verdwijnen. In fijnzandige en slikkige gebieden met een lage energieinhoud, zoals de meer beschutte delen van het Waddengebied, zullen deze verspreidingsprocessen het traagst (in de orde van jaren) verlopen (Rashid 1974).

Indien de eenmaal gestrande olie zich weer over het estuarium verspreidt, wordt een groter gebied met olie besmet. Door herhaalde redistributie van gestrande en gesedimenteerde olie werd gedurende het eerste jaar na het vrijkomen van zware stookolie uitbreiding over een groter gebied beneden de LW-lijn ("Arrow") en voortdurende afzetting van olie in de lagere getijdenzones ("Pennant") gekonstateerd (Blumer & Sass 1972; Pierce, Cundell & Traxler 1975). Water afstromend van op de kust gestrande olie met olieconcentraties van 0.6 tot 140 ppm, kan ook een bron van recontaminatie zijn (Law & Hall 1978).

Toepassing van een aantal bestrijdingsmethoden op gestrande olie, bevordert de redistributie van olie over het gebied. Toediening van "herders" (Deel I: 7.2.2.5) aan strand of steenglooiingen voordat de olie arriveert, voorkomt dat verweerde Kuwait ruwe olie aan het substaat hecht, terwijl deze olie zich aan onbehandeld substraat gedeeltelijk hecht en daardoor bij de volgende vloed niet wordt opgelicht (Rijkswaterstaat 1974). Bij het met apparatuur of met handkracht verwijderen van gestrande olie kan door niet

goed verzamelen, recontaminatie plaatsvinden (zie Deel I, 7.2.1: Foget et al. 1979). Ditzelfde geldt voor het niet goed verzamelen van de met water, stoom of zand losgespoten olie (zie Deel I, 7.2.2: Foget et al. 1979). Toevoegen van met stearaat behandeld kalksteenstof als absorbent aan zware gestrande olie tijdens LW zal deze geadsorbeerde olie door de getijbeweging naar dieper water doen voeren, waar bezinken beneden de LW-lijn kan optreden (zie Deel I, 7.2.2: Nelson-Smith 1972). Door kort voor het opkomende water dispergenten op gestrande olie te sproeien, zal door gebruik van hogedrukspuiten of door het getij de gedispergeerde olie in het water verdeeld raken en zich in het gebied verspreiden (zie Deel I, 7.2.2: Nelson-Smith 1972). Aangezien de gevormde emulsies van olie en dispergenten vrij instabiel zijn, zal de olie zich opnieuw over de kust of de sedimenten kunnen verspreiden (Butler, Berkes & Powles 1974). De concentratie gedispergeerde olie in het water in de nabijheid van de oorspronkelijk gestrande olie zal zeker meer dan 50 ppm kunnen zijn (Martinelli, pers.comm.; zie ook 2.3.2.1).

Sedimentdoordringing

Olie gestrand op zandige of slikkige gebieden zoals in de Waddenzee voorkomen, kan op een aantal verschillende wijzen in het sediment doordringen. In de literatuur worden de mogelijkheden beschreven die zijn waargenomen in de veldsituatie.

Langs geëxponeerde mobiele zandstranden kunnen olielagen als geheel in het zand begraven raken tot diepten van 50 à 80 cm, waarbij het zand tussen de lagen tot 50 ppm olie kan bevatten (Butler & Levy 1978; VanderMeulen et al. 1978; Wolfe 1978). In zandige getijdengebieden kan een laag geëmulgeerde olie ook als druppels mousse in de sedimenten begraven worden (Hyland 1978).

In meer beschutte gebieden, maar ook op geëxponeerde kusten, kan gestrande olie, afhankelijk van de permeabiliteit van het sediment, via de ruimten tussen de korrels de bodem binnendringen, waarbij eerst vertikale migratie tot de grondwaterspiegel plaatsvindt. Sterke capillaire krachten in media met een lage permeabiliteit zoals klei, verhinderen doordringen van olie in deze sedimenten (van Dam 1969; Dietz 1971).

Veldexperimenten wijzen uit, dat percolatie van het droogvallende sediment een essentiële factor is: op percolerende wadplaten werd olie tot de diepte van de weggezakte waterspiegel aangetroffen (Baker, pers.comm.; van Bernem 1976). Op wadplaten (korrelgrootte ca. 170 µm) waar met LW de waterspiegel zich aan het wadoppervlak bevindt, werd ruwe olie niet dieper dan 1 à 2 cm gevonden in concentraties van 65 tot 1000 ppm (Baker 1971a; Levell 1976; Rijkswaterstaat 1976, 1977; van Bernem 1976). Ditzelfde geldt voor zeer dicht ge-

pakte slikwadden (4 tot 16 µm), waar concentraties van 1700 ppm in de bovenste cm werden aangetroffen (Naidu, Feder & Norell 1978). Op niet-percolerende wadplaten gestrande olie met een laagdikte van minimaal 0.5 cm zal in slikkig resp. fijnzandig sediment 4 resp. 6 cm doordringen en leiden tot gemiddelde concentraties van 400 ppm. Gestrande olielagen dunner dan 0,5 cm zullen afhankelijk van de omstandigheden in deze sedimenten doordringen (van Bernem, pers.comm.). Ook bij olierampen is gekonstateerd dat percolerende stranden als een filter werken, waarbij tot op diepten van 1 meter adsorptie van ruwe olie aan korreloppervlakten plaatsvindt (Giere 1979) en waarbij op diepten van 30 cm concentraties van 100.000 ppm worden aangetroffen (Laubier 1978; VanderMeulen et al. 1978). No. 2 stookolie dringt echter ook in totaal met water verzadigde sedimenten; in de bovenste 2.5 à 5 cm van kweldersedimenten zijn concentraties van 1200 tot 21.000 ppm (nat gewicht) tegen blancowaarden van 60 ppm gemeten (Blumer, Souza & Sass 1970; Burns & Teal 1979; Blumer & Sass 1972a). Na vier jaar was de concentratie aromaten nog ruim 3000 ppm (drooggewicht) in de bovenste 7 cm (Teal, Burns & Farrington 1978). Sediment in beschutte baaien kan van 4 tot 125 ppm (nat gewicht) olie bevatten (Law 1978).

In slikkige en fijnzandige gebieden, waar de gestrande of gesedimenteerde olie de waterverzadigde, niet-percolerende sedimenten niet direkt kan binnendringen, kan de olie via de gangen van bodembewonende organismen aanzienlijke diepten bereiken (Chassé 1978; Laubier 1978). De voortdurende omwoeling van het sediment door benthische organismen als polychaeten en amphipoden (bioturbatie) wordt als een essentiële factor beschouwd bij het doordringen van olie tot op diepten van tientallen cm (Blumer, Sanders, Grassle & Hampson 1971; van Bernem 1976; Giere 1979). Opvallend is de diepere doordringing van Bunker C olie in ondiep gelegen slikkige sedimenten beneden de LW-lijn dan in de dieper gelegen sedimenten, mogelijk door de sterkere bioturbatie (Scarrat & Zitko 1972).

Onafhankelijk van de doordringing van vloeibare olie in het sediment kan oplossing van olie in het interstitiële water en verdere verspreiding via diffusie optreden. In de veldsituatie is diffusie van lichte ruwe olie aangetoond in slikkige en fijnzandige gebieden (Giere 1979). Verondersteld wordt, dat No. 2 stookolie in totaal met water verzadigde sedimenten kan doordringen d.m.v. oplossing en diffusie, waarbij concentraties van enkele duizenden ppm kunnen ontstaan (Blumer, Souza & Sass 1970). Burns & Teal (1979) veronderstellen op grond van verschillen in de mate van degradatie van oliekomponenten op verschillende diepten in dergelijke sedimenten, dat olie via diffusie en menging op kleine schaal diepten tot 70 cm in de kweldersedimenten bereikt.

Na verschillende rampen is gesignaleerd dat sterke verontreiniging van interstitieel water van stranden en getijdenplaten in veel gevallen gepaard gaat met uiterlijk schone wadoppervlakken (D'Ouzouville, Gundlach & Hayes 1978).

Verondersteld wordt dat hoge concentraties gesuspendeerd sediment in het vloedwater indringing van olie in het sediment bevorderen door toenemende adsorptie van de olie aan deze partikels en door bedekking en fixatie van nog op de bodemsedimenten liggende olie (van Bernem 1976).

Uitgaande van de boven beschreven veldgegevens moet aangenomen worden, dat gestrande (maar ook gesedimenteerde) olie vooral door bioturbatie in de sedimenten van de Waddenzee door zal dringen. Olieconcentraties in de orde van honderden ppm zullen in de bovenste decimeters kunnen optreden na de stranding van olie.

Verschillende bestrijdingsmethoden van gestrande olie kunnen leiden tot doordringen van olie in het sediment. Bij het mechanisch verwijderen kan de olie door rijden met zware apparatuur of betreding dieper in het sediment doordringen (zie Deel I, 7.2.1: Gundlach & Hayes 1978). Sijpeling van olie uit gegraven gleuven in het omringende sediment leidt tot eenzelfde effekt (Spooner 1978). Herderstoffen dringen in de bovenste 2 tot 5 cm van droogvallend, stagnerend, fijnzandig sediment door, maar verkleinen op een stagnerend wad niet de hoeveelheid olie, die in deze bovenlaag van het sediment doordringt (zie Deel I, 7.2.2: Rijkswaterstaat 1976, 1977).

Dispergenten toegediend aan gestrande olie bevorderen met doordringen van olie in kweldersedimenten en droogvallende platen (zie 7.2.2; Baker 1978; Gerlach 1978; Nelson-Smith 1978; Giere 1979; Butler, Berkes & Powles 1974). Cormack & Nichols (1978) beweren echter het tegendeel. Doch toediening van dispergent BP 1100X aan ruwe olie doet de adhesie van olie aan zandkorrels verminderen afhankelijk van de verhouding olie/dispergent en de korrelgrootte. Dispergent toevoegen leidt dus tot dieper doordringen van olie in zandige (percolerende) sedimenten (Harris & Wells 1979). Olie gemengd met Finasol OSR_2 en OSR_5 dringt in niet-percolerende fijnzandige sedimenten tot $\pm$ 15 cm diepte door, dezelfde olie zonder dispergent slechts tot een diepte van 6 cm (van Bernem pers.med.). Toediening van dispergent BP 1100 WD aan gestrande ruwe olie doet de concentratie olie op 5 tot 10 cm diepte in percolerende, fijnzandige sedimenten vertwintigvoudigen (tot 80 ppm); op stagnerende sedimenten leidt toevoegen van dispergent echter niet tot verhoogde olieconcentraties (Baker, pers. med.).

2.4 Afbraak van olie in de Waddenzee

2.4.1 Drijvende en in het water verdeelde olie

Olie in estuariene gebieden is onderhevig aan een aantal afbraakprocessen, waardoor oliekoolwaterstoffen in een serie intermediaire produkten worden omgezet (zie Deel I: 2.1.2 en 2.2.2).

Chemische processen

Tot de belangrijkste chemische processen betrokken bij de afbraak van oliekomponenten behoren de foto-oxidatie processen. Deze oxidatie processen, die door zonlicht gekatalyseerd worden, hebben een erg lage snelheid, die door Dodd (1971) geschat wordt op een hoeveelheid geoxideerde olie van 1 ton per dag vanuit een drijvende 0.02 mm dikke olielaag met een oppervlak van 8 km^2, dus uit een totaal volume van 100 ton, d.w.z. 1% per dag. Zonder turbulente menging schat Hansen (1975) de snelheid van foto-oxidatie van een 0.4 mm dikke olielaag echter op 0.07% per dag. Over de chemische afbraak van olie in het water zijn geen schattingen bekend.

Microbiële processen

In mariene en estuariene gebieden worden olie-afbrekende bacteriën, fungi en gisten aangetroffen met de hoogste dichtheden in de nabijheid van de kust (Stewart & Marks 1978; Atlas & Bartha 1973; Gunkel 1973). Afhankelijk van het verdwijnen van toxische komponenten uit de olie komt biodegradatie pas na weken tot maanden goed op gang (Atlas & Bartha 1972a). Korte (cyclo)alkanen worden het snelst, langere of vertakte alkanen en polycyclische aromaten veel langzamer afgebroken, terwijl asphalthenen nauwelijks afbreekbaar zijn (Butler, Morris & Sleeter 1976). Door de relatieve oppervlaktevergroting van het grensvlak olie-water zal in het water verdeelde olie in principe sneller afbreekbaar zijn (Zobell 1963). Dit principe vormt de basisgedachte voor het chemisch dispergeren van drijvende of gestrande olielagen, hoewel werkelijke gegevens over deze versnelde biodegradatie schaars zijn (zie Deel I: 7.1.2.6.2).

In het algemeen wordt verondersteld, dat bacteriële afbraak 10 maal sneller verloopt dan de chemische oxidatie (Pilpel 1968; Zobell 1963). Op grond van de gegevens in Deel I kan gekonkludeerd worden dat drijvende olie met een snelheid van 0.02 tot 2 $g.m^{-2}.dag^{-1}$ zal worden afgebroken (Zobell 1969), waarbij de dagelijkse afbraak op de Noordzee op 0.5 $g.m^{-2}$ wordt geschat (Poley 1979). De aerobe afbraak van olie in het water zal liggen in de range van 0.001 tot 1.0 $g.m^{-3}.dag^{-1}$ (Zobell 1963; Aubert e.a. 1969; Butles, Morris & Sleeter 1976). De afbraaksnelheid van polycyclische aromaten met beginconcentraties van maximaal enkele tientallen ppb zal nog geringer zijn (Gerlach 1978).

Bij de afbraak kunnen de concentratie zuurstof, stikstof en fosfaat (in de zomer!) en de temperatuur, indien lager dan 10°C, beperkende factoren worden

Uit bovenstaande gegevens kan afgeleid worden dat olie drijvend of verdeeld in het water in de Waddenzee met een dagelijkse snelheid van maximaal ca. 0.5 g. per m^2 resp. m^3 chemisch en microbieel zal worden afgebroken. Bij een laagdikte van 1 mm zal dan ca. 0.5% per dag worden afgebroken. Gezien de watertemperatuur zal deze snelheid gedurende de maanden november tot juni sterk beperkt zijn.

Hogere organismen

In estuariene gebieden spelen de in grote dichtheden voorkomende hogere organismen een belangrijke rol bij de biodegradatie van olie verdeeld in het water. Zoöplanktonorganismen als copepoden en zoöbenthos als polychaeten, bivalven en crustaceeën kunnen vanuit het water of vanuit het grensvlak water/sediment olie opnemen en gedeeltelijk metaboliseren (zie Deel I: 2.2.2 ; Rossi, Anderson & Ward 1976; Burwood & Speers 1974; Baker 1971b en 1976; Blackman 1972; Lee 1976). De olie kan in onveranderde vorm of als metaboliet worden uitgescheiden of na de dood van het organisme in bepaalde vorm weer in het estuarium beschikbaar komen (Goldberg 1972). Lagere algen, flagellaten en ciliaten benutten vermoedelijk de intermediaire produkten van de microbiële degradatie- en/of nemen de bacteriecellen zelf op, zodat bacteriën een belangrijke tussenschakel voor biodegradatie van olie door hogere organismen vormen (McIntyre, Munro & Steele 1970).

De mate waarin metabolisatie door hogere organismen bijdraagt aan de afbraak van olie in de Waddenzee kan niet nader gekwantificeerd worden.

2.4.2 Olie op en in het sediment

Chemische processen

De chemische oxidatie zal bij gestrande en in de getijdenzone gesedimenteerde olie in aanwezigheid van licht in dezelfde orde van grootte liggen als bij drijvende olie (zie 2.4.1). Door verharding van de bovenlaag van boven de HW-lijn gestrande olie kan deze snelheid sterk verminderen. In zones beneden de LW-lijn met onvoldoende licht zal de snelheid van deze processen te verwaarlozen zijn.

Microbiële processen

De hoogste dichtheden olie-afbrekende microorganismen in en op het sediment worden in de nabijheid van de kust aangetroffen (Gunkel 1973; Zobell & Prokop 1966). Na de introduktie van de olie kan de dichtheid snel toenemen: binnen enkele dagen tot weken kunnen deze waarden enkele duizenden malen de blanco-

waarden overschrijden (Gunkel 1968; Pierce, Cundell & Traxler 1975).

De aerobe afbraak van olie op het sediment wordt berekend op 0.04 tot 0.09 $g.m^{-2}.dag^{-1}$ (Johnson 1970). De microbiële afbraak van in silt gemengde olie varieert van 0.3 tot 2.0 $g.m^{3}.dag^{-1}$ (Hughes & McKenzie 1975). Opvallend is het verschil in afbraaksnelheid in aerobe en anaerobe sedimenten: de aerobe afbraak van 5 ppm C8 tot C10 oliekomponenten vergt ruim 2 maanden, de anaerobe afbraak duurt jarenlang (Delaune, Hambrich & Patrick 1980).

Hogere organismen

Zich op of in het sediment bevindende olie kan door meio- en macrofauna elementen worden opgenomen en onveranderd of (gedeeltelijk) gemetaboliseerd worden uitgescheiden. In estuariene gebieden kan dit een aanzienlijke vorm van oliedegradatie inhouden. In faeces van de polychaet Arenicola marina worden 17 tot 72% minder oliekomponenten aangetroffen dan in het omringende sediment (Gordon, Dale & Keizer 1978). Op grond van dit gegeven wordt geschat dat bij een dichtheid van 10 tot 25 A. marina per m^2 de Bunker C olie ("Arrow") aanwezig in de sedimenten in concentraties van 25 tot 1300 ppm in 2 tot 4 jaar gedegradeerd kan zijn.

Ook omwoeling (bioturbatie) van de sedimenten door bodembewonende organismen kan olie mogelijk weer in meer hoger gelegen aerobe sedimentlagen brengen, waar een hogere bacteriële afbraakcapaciteit aanwezig is (Lee 1976).

In de veldsituatie is gekonstateerd dat afbraak van olie op of in het sediment een langdurig proces is, waarbij zowel de bovenbeschreven chemische en microbiële afbraakprocessen als de afbraak door hogere organismen een rol spelen.

Olie op het sediment

Biodegradatie van op het sediment liggende olie wordt bevorderd door een hoge mate van verspreiding, zoals die voorkomt op kusten met een hoge mechanische energie-inhoud (Rashid 1974). Op geëxponeerde rotskusten en stranden varieert de periode waarin de olie verdwijnt van enkele weken tot enkele jaren (Hyland 1978; Owens 1978; Giere 1979).

In meer beschutte gebieden, waartoe ook het Waddengebied behoort, kan gestrande Bunker C olie ("Arrow") en ruwe olie ("Torrey Canyon") van 3 tot 6 jaar aanwezig blijven (Owens 1978). Mogelijk speelt de bereikbaarheid van de olie door nutriënten hierbij een rol (Blumer, Ehrhart & Jones 1973), terwijl biodegradatie op beschutte plaatsen bovendien alleen in de bovenste lagen (mm) van de olie plaatsvindt (Giere 1979). In kweldergebieden met zeer weinig mechanische energie en een veelal uitgebreide oliebedekking, wordt de olie niet of nauwelijks meer afgevoerd en kan in verhardende vorm meer dan 10 jaar aanwezig blijven (Hyland 1978; Baker pers.med.).

Olie in het sediment

De biodegradatie van in de sedimenten doorgedrongen olie verloopt over het algemeen trager dan van op het sediment gestrande olie. In een beschut getijdengebied gestrande No. 2 stookolie, die tot 80 cm diep in fijnkorrelige anaerobe kweldersedimenten was doorgedrongen, werd sterk selektief afgebroken. Over een periode van 7 jaar verminderde de totale concentratie in de bovenste 7 cm van 2700 tot 1900 ppm (nat gewicht) (Burns & Teal 1979; Krebs & Burns 1977). In andere situaties na olierampen werden na jaren nog concentraties van honderden tot duizenden ppm gemeten in (anaerobe) sedimenten (Teal, Burns & Farringron 1978; Mayo et al. 1978; Mayo, Donavan & Jiang 1974; Jacobs 1979). Ook de biodegradatie van olie in sedimenten beneden de LW-lijn kan een zeer langzaam proces zijn. In slikkige gebieden op 3 meter diepte werden na 2 jaar nog concentraties van 1250 ppm gemeten; in grofzandige en grindgebieden na 1 jaar concentraties tot 80 ppm, na 2 jaar tot 10 ppm (Scarrat & Zitko 1972). Vermoedelijk gaat het steeds om een samenspel van verspreidings- en afbraakprocessen.

De oorzaak van de over het algemeen zeer grote traagheid, waarmee de biodegradatie processen zich in de sedimenten voltrekken is de onvoldoende aanvoer van sulfaat en nitriet vanuit het water naar de anaerobe lagen in het sediment. Deze situatie doet zich veelal voor in gebieden met een lage mechanische energie zoals kwelders en getijdenzones in Waddengebieden, fijnkorrelige anaerobe sedimenten met een hoog organisch stofgehalte, waar de olie naar verwachting tientallen jaren persistent kan blijven (Gunkel & Gassman 1979). Oliekomponenten tot concentraties van enkele honderden ppm voorkomend in aerobe slikkige en fijnzandige sedimenten zullen binnen een jaar resp. enkele maanden afgebroken zijn (van Bernem pers.med.).

3 BIOLOGISCHE EFFEKTEN VAN (BESTREDEN) OLIE IN DE WADDENZEE

3.1 Inleiding

Gegevens uit de hoofdstukken 4 en 8 van Deel I over de effekten van al dan niet bestreden olie op groepen estuariene organismen leveren inzicht in de biologische effekten van olie in de Waddenzee. In 3.2 worden de biologische effekten, waartoe de verschillende vormen van olie (drijvend, in het water verdeeld of op/in het sediment) kunnen leiden, kort samengevat. Per groep organismen worden, voorzover bekend, gegevens vermeld over de toxiciteit van de olie afhankelijk van de concentratie. In 3.3 wordt een beeld gegeven van de biologische consequenties van verschillende typen bestrijding van drijvende en gestrande olie in de Waddenzee. Tenslotte wordt in 3.4 nagegaan in hoeverre het bij voorbaat verjagen van vogels en zeehonden en het schoonmaken van met olie verontreinigde exemplaren de effekten van in de Waddenzee drijvende en gestrande olie kan verminderen.

3.2 Effekten van onbestreden olie op organismen

3.2.1 Drijvende olie

Olie in drijvende vorm zal op het wateroppervlak rustende, duikende en in ondiepe gebieden wadende vogels bedreigen. Voor zeehonden vormt deze olie eveneens een bedreiging.

Type olie

In het algemeen is er weinig verschil in effekt tussen verschillende olietypen. Dunne verse ruwe olie en lichte olieprodukten dringen sneller tot de donslaag van vogels door dan zwaardere olie of mousse, welke echter eerder voor immobiliteit zorgen. Mogelijk zijn de lichte olieprodukten bij ingestie het meest toxisch. Bij zeehonden zullen verweerde ruwe olie en zwaardere olieprodukten eerder tot mechanische schade leiden dan de lichtere oliesoorten, waarvan de vluchtige komponenten echter tot oogirritatie aanleiding geven.

Dikte van de olielaag

Minimale dikten van de olielagen die voor vogels en zeehonden nog bedreigend zijn, zijn niet bekend. In het algemeen zullen lagen drijvende olie van geringere dikte tot minder persistente besmetting van het verenpak resp. de vacht kunnen leiden, die mogelijk in kortere tijd door de dieren zal zijn verwijderd.

3.2.2 Gesedimenteerde en gestrande olie

Na de stranding van drijvende olielagen in de getijdenzone of na sedimentatie van in het water verdeelde olie wordt een aantal groepen organismen direkt bedreigd: micro-organismen, micro- en macrophytobenthos, lichenen, zeegrassen, zoöbenthos, bodemvissen, vogels op broed- en rustgebieden, zeehonden op rustgebieden en kwelders. Indirekt worden door een verminderde dichtheid van voedselorganismen of door met olie besmette voedselorganismen groepen als vogels, vissen, epibenthos en zeehonden bedreigd.

Type olie

In tabel 3.1 worden de direkte effecten van verschillende soorten gestrande olie op de bedreigde groepen samengevat. Het blijkt dat zowel lichte als zware olie(produkten) in verse, verweerde of moussevorm tot een reeks effekten op bovengenoemde groepen organismen kunnen leiden.

Hoeveelheid gestrande/gesedimenteerde olie

Tabel 3.2 toont de effekten van gestrande/gesedimenteerde olie afhankelijk van de dikte van de olielaag. Lagen olie vanaf de duizendsten tot tienden van millimeters blijken na stranding of sedimentatie tot groeiremming en sterfte bij tal van soorten organismen te leiden.

Concentratie olie in het sediment

Tabel 3.3 geeft effekten van olieconcentraties in het sediment weer. Concentraties olie vanaf enkele honderden ppm leiden tot sterfte bij een aantal groepen organismen.

Tabel 3.1 Biologische effekten van gestrande/gesedimenteerde oliesoorten (samengevat uit hoofdstuk 4 van Deel I).
(x = aangetoonde effekten)

groep organismen	type effekt	ruwe olie			olieprodukten		voor effekt bepalend
		vers	mousse	verweerd	licht	zwaar	
micro-organismen	groeiverandering	x			x	x	aromaten
microphyto-benthos	groeiverandering	x			x	x	
	fotosynthese-remming	x			x	x	
macrophyto-benthos	fotosynthese-remming		x				fenolen en meest paraffinische ruwe olie
meiozoö-benthos	sterfte & groei-remming	x			x	x	
macrozoö-benthos	toxisch	x	x		x		hogere gemethyleerde (di-)aromaten
	verstikking			x		x	
vissen	toxisch,	x			x		aromaten/fenolen
	carcinogeen			x		x	
vogels	toxisch,				x		
	effekten op broeden, rusten en fourageren	x	x	x	x	x	
	schade aan eieren	x			x	x	
zeehonden	fysiologische schade			x		x	
	oogirritatie	x			x		
	huidirritatie	x	x	x	x	x	
kwelders	sterfte van bloem/knop/zaad/blad	x		(x)	x	x	paraffinen-alkenen-cycloparaffinen-aromaten toenemend toxisch
	doordringen in bladeren	x	(x)	(x)	x	(x)	

Tabel 3.2 Biologische effekten van hoeveelheid gestrande/gesedimenteerde olie per oppervlak (samengevat uit hoofdstuk 4, Deel I).

groep organismen	soort organisme	effekt	dikte olie	expositie duur	type olie
microphyto-benthos	Nitszchia & Navicula	remming groei en fotosynthese	0,001-0,1 mm	7 uur	ruwe olie
macrophyto-benthos		remming foto-synthese	sterker bij dikste lagen		
	Fucus, Entero-morpha & Laminaria	remming groei en fotosyn-these	0,0001-0,1 mm		ruwe olie
	Porphyra	sterfte	0,0001-0,1 mm		ruwe olie
lichenen		groeien door olie heen	niet te dik		verharde olie
meiozoöbenthos	nematoden & harpacticoïde copepoden	géén effekt op biomassa		enkele uren	ruwe olie
macrozoöbenthos	Arenicola marina	50% reduktie in dichtheid	0,2 mm	24 uur	ruwe olie
	A. marina	100% sterfte	0,2 mm/2 mnd. gedurende 8 maan-den op percolerend sediment		ruwe olie
	A. marina	géén sterfte	0,2 mm/2 maanden gedurende 8 maan-den op stagnerend sediment		ruwe olie
	Nereis sp.	géén sterfte	0,025 mm/dag ge-durende 3 dagen		lichte ruwe olie
	Macoma bathica	géén sterfte	0,025 mm/dag ge-durende 3 dagen		lichte ruwe olie
	Macoma bathica	lichte sterfte	0,01 mm/dag ge-durende 2 dagen		Prudhoe ruwe olie
	Macoma bathica	10% sterfte	0,05 mm/dag ge-durende 5 dagen op slikkig wad		ruwe olie
	Mytilus edulis	direkte sterfte	1,5 mm		no. 2 stook-olie
	Mya arenaria	50% reduktie in filtreer-snelheid	bedekking		no. 6 stook-olie & lichte olie
	Corophium volutator	80% afname in dichtheid	0,025 mm/dag gedu-rende 3 dagen	3 dagen	ruwe olie
vogels		verontreini-ging van veren	uitgebreider bij dikkere lagen		
kwelders		sterfte blad;	bedekking		
	Spartina, Puccinellia & Juncus	afnemende dichtheid	0.5 mm	2 à 4 maal	ruwe olie

vervolg tabel 3.2.

Spartina	verminderde regeneratie	4-8 mm	ruwe olie
	geen regeneratie	meer dan 16 mm	ruwe olie
	langduriger effekten	dikkere lagen	

Tabel 3.3 Biologische effekten van concentraties olie in het sediment (samengevat uit Deel I: hoofdstuk 4).

groep organismen	soort organisme	effekt	conc. olie ppm	expositie duur	type olie
micro-organismen		geen effekt op anaerobe reduktie NO_3^-,Fe, SO_4^{2-},Mn			ruwe olie
meiozoöbenthos	copepoden en nematoden	toename biomassa	100-200 in slikkig zand		
	oligochaeten	toename biomassa	0,01 1/m²		
macrozoöbenthos	Arenicola marina	verminderde voedselopname	10		verweerde no. 2 stook-olie
	A. marina	graafaktiviteit stopt	250		no. 2 stook-olie
	A. marina	50% sterfte	max.800 in bovenste 15 cm	24 uur	ruwe olie
	Mediomastus sp.	90% reduktie in biomassa	15 in bovenste 1 cm en/of 200 in bovenste sliklaagje	5 mnd.	no. 2 stook-olie
	Nereis virens	geen effekt op dichtheid	"	"	"
	Nereis diversicolor	sterfte	1000		olie
	Pitar morrhuana	100% reduktie dichtheid	15 in bovenste 1 cm en/of 200 in sliklaagje	5 maanden	no. 2 stook-olie
	Mya arenaria	sterfte	4000		Bunker C
	Mya arenaria	sterfte	600		no. 2 stook-olie
	Mya arenaria	25% sterfte	250		no. 2 stook-olie
	Mya arenaria	tumoren aan gonaden	150		
	Macoma balthica	10% sterfte	>530 in 1 cm slik	na 60 dagen	ruwe olie
	Macoma Balthica	sterfte	600		no. 2 stook-olie
	Macoma balthica	uitgraafgedrag	<600		No. 2 stook-olie
	Uca pugnax	sterfte	1000		no. 2 stook-olie
	Uca pugnax (juveniel)	sterfte	100		no. 2 stook-olie
vissen	platvis	gewichtsverlies en leverafwijkingen	400		ruwe olie

Vervolg tabel 3.3

kwelder	Spartina & Puccinellia	geen regeneratie	200-1000	no. 2 stookolie
		idem; doch langduriger	sneller en dieper in sediment	dunnere olie

3.2.3 Olie in het water verdeeld

In het water opgeloste, gedispergeerde of geadsorbeerde olie kan schadelijk zijn voor micro-organismen, phytoplankton, micro- en macrophytobenthos, zooplankton, zoöbenthos en vissen. Ook hier geldt de indirekte bedreiging van zooplankton, vissen, vogels, zoöbenthos en zeehonden via de voedselorganismen.

Type olie

In tabel 3.4 worden de effekten van diverse oliesoorten, in het water verdeeld, samengevat. Zowel lichte als zware olie(produkten), vooral in verse toestand, blijken tot effekten op groepen organismen te leiden.

Olieconcentratie

Tabel 3.5 geeft een beeld van de effekten van olieconcentraties in het water op de bedreigde groepen organismen. Olieconcentraties vanaf enkele honderdsten tot enkele tientallen ppm leiden tot sterfte bij bepaalde groepen organismen.

Tabel 3.4 Biologische effekten van in het water verdeelde oliesoorten (samengevat uit Deel I: hoofdstuk 4); x = aangetoonde effekten.

groep organismen	soort organisme	type effekt	ruwe olie			olieprodukten		bepalend voor effekt
			vers	mousse	verweerd	licht	zwaar	
micro-organismen		groei	x			x	x	aromaten
	gisten	groei			x			
phytoplankton		groei & fotosynthese	x			x	x	
microphyto-benthos		groei & fotosynthese	x					gedispergeerde & geadsorbeerde olie(niet de opgeloste vorm)
macrophyto-benthos		groei & fotosynthese	x			x	x	fenolen
holoplankton		groei & reproduktie	x			x	x	
meroplankton		groei & sterfte	x			x	x	aromaten & gealkyleerde naphthalenen (no.2 stookolie 100 maal toxischer dan ruwe olie)
meiozoöbenthos		sterfte & groei	x			x	x	
macrozoöbenthos		afwijkend gedrag	x			x	x	vooral opgelost en gedispergeerd wordt in weefsel opgenomen(geadsorbeerd minder) aromaten: vooral gemethyleerde di- en tri-aromaten fenolen
Vissen			x			x	(x)	aromaten & fenolen

Tabel 3.5 Biologische effekten van concentraties in het water verdeelde olie (samengevat uit Deel I: hoofdstuk 4).

groep organismen	soort organisme	effekt	concentratie olie (ppm)	expositie duur	type olie
phytoplankton		verlaagde delingsnelheid	>0,1	1 à enkele dagen	
		groeistimulatie	<10		
		sterfte	4,5		no.2 stookolie
		fotosynthese: remming of stimulatie	0,03-0,005		
microphyto-benthos	Nitzschia & Navicula	groeiremming	20	48 uur	ruwe olie
	"	100% groeiremming	1000	"	"
	"	remming foto-synthese	>100		ruwe olie voor opgeloste olie minder gevoelig dan phytoplankton
macrophyto-benthos	bruinwier	50% remming fotosynthese	10	4 dagen	dieselolie
	bruinwier & groenwier	50% remming fotosynthese	7	"	ruwe olie
	sperma Fucus	sterfte	0,0002		
	zygote Fucus	groeiremming	2 à 3		no.2 stookolie
	"	sterfte	20		"
	"	geen effekt groei	10		ruwe olie
	kiemplant Fucus	groeiremming	10		
holoplankton	copepoden	50% sterfte	30	4 dagen	ruwe olie
		50% sterfte	10	2 dagen	no.2 stookolie
		50% sterfte	0,3	1 dag	gesubstituëerde naphthalenen
		sterfte	0,005		ruwe olie
		verminderde dichtheid	0,005-0,2		
		remming groei & ontwikkeling	0,08		naphthaleen
		10% lagere voedingssnelheid	0,2	5 maand	no.2 stookolie
		remming voedselopname	1,0		ruwe olie
		sterke remming eiproduktie	0,5	4 uur	stookolie
		sterke remming eiproduktie	0,01	1 maand	stookolie

groep organismen	soort organisme	effekt	concentratie olie (ppm)	expositie duur	type olie
meroplankton	crustaceeën	50% sterfte	1 (opgelost)	4 dagen	ruwe olie
	"	50% sterfte	3 (opgelost)	4 dagen	no.2 stookolie
	bivalven	50% sterfte	0,25-6	2 dagen	ruwe olie & No. 2 stookolie & Bunker C olie
	"	100% sterfte	0,008	1 dag	naphthaleen
	polychaet & mollusk	verminderde dichtheid	0,05-0,2		ruwe olie
	"	remming groei, ontwikkeling & voedselopname	>1		ruwe olie
microzoöbenthos		toename biomassa & diversiteit	0,2	maanden	no.2 stookolie
meiozoöbenthos	oligochaet	100% sterfte	5%	5 dagen bij 26°C	ruwe olie
	"	enige sterfte	5%	2 weken bij 10-13°C	ruwe olie
	nematoden & harp.copepoden	afnemende biomassa	0,2	maanden	no.2 stookolie
	eicocons van polychaet	geen effekt	1000		
macrozoöbenthos	polychaeten	LC50	10->20	96 uur	ruwe olie
	polychaeten	LC50	1->9	96 uur	no.2 stookolie & Bunker C olie
	Mya arenaria	0,5% sterfte	10	1 maand	no.2 stookolie
	"	20% sterfte	50	1 maand	"
	"	17% sterfte	110	1 maand	"
	Cerastoderma edule	100% sterfte	500	enkele uren	verse ruwe olie
	Ostrea edulis	100% sterfte	30.000	<1 week	stookolie
	Mytilus edulis	geen sterfte	1000	24 uur	ruwe olie
	"	sterfte	opgelost en/of gedispergeerd vanuit drijvende laag van 0,6 mm.	48 uur	no.2 stookolie
	crustaceeën (garnalen)	LC50	1-7 gedispergeerd	96 uur	no.2 stookolie & Bunker C olie
	garnalen	LC50	30-37 gedispergeerd	96 uur	ruwe olie
	Eliminius-larven	LC50	100	1 uur	ruwe olie
	Callinectes-larven	LC50	14	96 uur	no.2 stookolie

vervolg tabel 3.5

groep organismen	soort organisme	effekt	concentratie olie (ppm)	expositie duur	type olie
vervolg macrozoöbenthos	Callinectes-larven	LC50	10	7 dagen	no.2 stookolie
	Homarus americanus larven	LC50	1-5	4 dagen	ruwe olie
	zeeëgel	100% sterfte	1000 gedispergeerd	<1 uur	dieselolie
	anneliden/mollusken & crustaceeën	sterfte	<1		aromaten
	"	geringere groei & ontwikkeling	0,15	enkele weken	
	"	geringere groei & ontwikkeling	0,05		naphthaleen
	anneliden & crustaceeën	geringere reproduktie	0,3		
	crustaceeën	negatief effekt op paarvorming	0,01		
	mollusken & crustaceeën	remming voedselopname/ verhoging respiratiesnelheid	0,01-1,0		
	Arenicola marina	uit gang verdreven	>1 gedispergeerd		no.2 stookolie (vers of verweerd)
	A. marina	vermindering faecesproduktie	10 gedispergeerd		"
	A. marina	stoppen voedingsactiviteit	>100 gedispergeerd		"
	Mytilus edulis	(pseudo)faeces produktie ongehinderd	4000		
	mollusken & crustaceeën	vermindering voedselperceptie & foto- en chemotaxis	0,001		
vissen	Sardien (ei/larf)	90% sterfte	0,25		stookolie
	eieren kabeljauw	90% sterfte	0,25		stookolie
	eieren kabeljauw, haring en platvis	sterfte	0,1 à 1,0	enkele dagen	ruwe olie, stookolie en naphthaleen
	haringlarf	sterfte	5	enkele dagen	ruwe olie
	zalmlarf	sterfte	100	enkele dagen	ruwe olie

vervolg tabel 3.5

groep organismen	soort organisme	effekt	concentratie olie (ppm)	expositie duur	type olie
vervolg vissen	div. larven	sterfte	90-170		gasoline/ dieselolie
	"	sterfte	2500		Bunker C olie
	adulte zalm	sterfte	100-200	enkele dagen	ruwe olie
	eieren haring & platvis	gedeformeerde embryos	0,01	enkele dagen	
	"	gedeformeerde embryos	5	"	ruwe olie
	"	gedeformeerde embryos	2	"	no.2 stookolie
	"	gedeformeerde embryos	1	"	naphthaleen
	larven kabel-jouw, haring en platvis	misvormingen	5-10		ruwe olie
	jonge zalm	neg.effekt op respiratie	enkele		mono-aromaten
	zalmlarven	vermijding olie	1,6		
	zalmlarven	beschadiging chemo-recep-toren	>1 2		
		verzweringen van de huid			ruwe olie

3.3 Effekten van bestreden olie op organismen

Uitgaande van het feit dat zich een olieverontreiniging in de Waddenzee kan voordoen, is het van groot belang te weten of de te verwachten biologische effekten van deze olie door toepassen van bestrijdingsmethoden aanzienlijk zullen verminderen (zie Deel I: hoofdstuk 7 en 8). In een aantal gevallen zullen de effekten van een bepaalde vorm van olie op enkele groepen organismen verminderen, maar vormt de bestreden olie een nieuwe bedreiging voor andere groepen organismen. In andere gevallen zal bestrijding van olie de direkte effekten voor de bedreigde groepen niet of nauwelijks verminderen, maar zal een kortere herstelperiode het gevolg zijn. Slechts drijvende en gestrande olie komen in aanmerking voor bestrijding; in het water verdeelde en beneden de LW-lijn gesedimenteerde olie zijn onbehandelbaar.

3.3.1 Drijvende olie

3.3.1.1 Mechanische bestrijding

Door gebruik van (absorberende) schermen, olieverwijderingsapparatuur (skimmers) en met veegarmen en absorberende rollen uitgeruste schepen, kan olie in principe van het wateroppervlak worden verwijderd (zie Deel I: 7.1.1). Bij stroomsnelheden vanaf 0,5 mijl per uur worden de huidige olieschermen minder effektief, bij snelheden vanaf 1,5 mijl per uur verdwijnt alle drijvende olie onder de schermen langs in het water. Bij stroomsnelheden vanaf 0,5 mijl per uur zullen daarom bij gebruik van schermen zeer grote hoeveelheden olie door turbulentie in het water gedispergeerd raken (zie Deel I: 7.1.1.1). Aldus gevormde concentraties olie in de kolom zijn niet kwantitatief beschreven.

Volledige mechanische verwijdering van drijvende olie zal tot volledige opheffing van de verwachte effekten op door drijvende olie bedreigde diergroepen (vogels en zeehonden) leiden. Daarnaast zullen ook de verwachte effekten op door gestrande en gesedimenteerde olie bedreigde groepen organismen niet optreden. Dit geldt voor micro-organismen, micro- en macrophytobenthos, lichenen, zeegrassen, zoöbenthos, bodemvissen, broed- en rustgebieden van vogels, rustgebieden van zeehonden en kwelders. Rekening houdend met enige toename van gedispergeerde olie in het water tijdens de bestrijding zal over het geheel genomen de hoeveelheid in het water verdeelde olie toch sterk afnemen en daarmee de verwachte effekten op de hierdoor bedreigde groepen: micro-organismen, phytoplankton, micro- en macrophytobenthos, zoöplankton, zoöbenthos en vissen.

3.3.1.2 Fysisch-chemische methoden

Door gebruik van absorberende en gelvormende materialen, herders en dispergeermiddelen en door bezinking of verbranding kan drijvende olie in zekere mate van het wateroppervlak verdwijnen.

Absorberende materialen (zie Deel I: 7.1.2.1)

Door toepassing van olieabsorberende materialen kan, mits een goede methode van verzamelen van de geadsorbeerde olie wordt gekozen, een drijvende olielaag totaal verwijderd worden. Zoals in 3.3.1.1 beschreven, verdwijnen hiermee de verwachte biologische effekten van drijvende, gestrande en gesedimenteerde olie en in het water verdeelde olie.

Gelvormers en herders (zie Deel I: 7.1.2.4 & 7.1.2.5)

Door toepassing van gelvormers en herders kan de gestolde en bijeengedreven olie gemakkelijker mechanisch worden verzameld. Evenals bij gebruik van absorberende materialen zullen hiermee de verwachte biologische effekten van drijvende, gestrande en gesedimenteerde en in het water verdeelde olie verminderen.

Bezinken (zie Deel I: 7.1.2.2)

Bezinken van drijvende olie met oleofiele materialen doet de olie van het oppervlak verdwijnen en op het sediment bezinken. Verwachte effekten van drijvende olie op vogels en zeehonden, evenals de bedreiging van bijv. kwelders door gestrande olie zullen niet optreden. In hoeverre vanuit de gesedimenteerde olie weer oliekomponenten in het water dispergeren of oplossen is onbekend, maar dit zal zeker gebeuren. Verwachte effekten van in het water verdeelde olie zullen dus slechts gedeeltelijk verminderen of zelfs sterker worden. De beneden de LW-lijn gesedimenteerde olie, die bij stroomsnelheden boven de 0.3 à 0.5 mijl per uur zeer mobiel blijft en een persistent karakter heeft, zal een sterke rechtstreekse bedreiging vormen voor de voor gesedimenteerde olie kwetsbare groepen organismen: micro-organismen, micro- en macrophytobenthos, zeegrassen, zoöbenthos en bodemvissen. In welke mate de gesedimenteerde olie na verloop van tijd als samenhangende volumina in de getijdenzone zal stranden is onbekend, hoewel aanzienlijke redistributie van gesedimenteerde olie wordt vermeld.

Verbranden (zie Deel I: 7.1.2.3)

Voor verbranding zijn slechts dikke lagen drijvende verse ruwe olie of lichte olieprodukten geschikt. Na de verbranding van de lichtste komponenten zal naast de luchtvervuiling een drijvend residu overblijven. Verwachte effekten van drijvende olie worden dus slechts ten dele opgeheven: dit verweerde residu zal vogels en zeehonden, hoewel in geringere mate, blijven bedreigen. Verwachte

effekten van gestrande en gesedimenteerde olie zullen eveneens door het verweerde karakter van het residu verminderen, hoewel dergelijke olie zeker persistent zal blijken. Effekten van verbranding op de concentratie in het water verdeelde olie zijn onbekend en vermoedelijk onbelangrijk.

Dispergeermiddelen (zie Deel I: 7.1.2.6)
Dispergeermiddelen toegevoegd aan drijvende olie leiden ertoe dat olie in het water gedispergeerd raakt. Afhankelijk van type dispergent en mengingsenergie bevat de dispersie druppels van 1 tot 100 µm, waarbij de meeste oliedruppels een grootte in de orde van 10 µm hebben. De concentratie gedispergeerde olie in het water is afhankelijk van de hoeveelheid drijvende olie per oppervlakte-eenheid, de snelheid van dispersie en de verversingstijd van het waterbekken. Ditzelfde geldt voor de concentratie van de dispergent. Zoals in 2.3.2.1 beschreven zal het theoretische geval van chemische dispersie van 100 000 ton olie in het volume bij halftij van een aantal kompartimenten van de Westelijke Waddenzee leiden tot concentraties gedispergeerde olie in de eerstvolgende dagen variërend van maximaal 35 tot 145 ppm (uitgezonderd het kompartiment van dispersie). In de eerste resp. tweede week na de dispersie zullen de concentraties tot 10 à 50 resp. 5 à 20 ppm afnemen; waarbij de laagste maximale concentraties steeds bij dispersie in of nabij de zeegaten worden bereikt. De chemische dispersie van kleinere volumina drijvende olie leidt tot proportioneel geringere concentraties gedispergeerde olie in het water. Bij toenemende viskositeit van de olie en lagere watertemperaturen wordt de hoeveelheid toegediende dispergent per volume olie vergroot; globaal kan worden uitgegaan van 1 deel dispergent op 10 delen olie (Deel I: 7.2.2.6.2 & 7.2.2.6.3), zodat bij dispersie van 100.000 ton olie 10.000 ton dispergent zou moeten worden gebruikt. Eenmaal in het water gedispergeerd zou adsorptie van gesuspendeerd materiaal kunnen voorkomen, hoewel de literatuur op dit punt tegenstrijdig is.

Door het van het wateroppervlak verdwijnen van drijvende olie, zullen de verwachte effekten op vogels en zeehonden verdwijnen. De verwachte biologische effekten van gestrande olie zullen ook niet optreden. De in het water chemisch gedispergeerde olie, die eveneens tot toenemende concentraties opgeloste en geadsorbeerde olie zal leiden, zal echter verschillende groepen organismen bedreigen: micro-organismen, phytoplankton, micro- en macrophytobenthos, zeegrassen, zoöplankton, zoöbenthos en vissen (tabel 3.6). Oppervlakte-aktieve componenten in concentraties vanaf 0.5 ppm beïnvloeden de overleving van benthische organismen. Dispergenten van de 1^{e} generatie veroorzaken bij concentraties vanaf enkele ppm sterfte; bij 2^{e} en 3^{e} generatie dispergenten treedt sterfte op bij concentraties vanaf enkele tientallen tot zelfs duizenden ppm. Chemische gedispergeerde olie (2^{e} generatie) leidt bij concentraties vanaf minder dan 25 ppm tot meer dan 1000 ppm tot sterfte.

Tabel 3.6 Biologische effekten van concentraties dispergent en chemische gedispergeerde olie (samengevat uit Deel I: hoofdstuk 8) (opp.akt. = oppervlakte-aktieve stof).

groep organismen	soort organisme	dispergent				olie		expositie duur	effekt
		opp. akt.	gene-ratie	naam	conc. (ppm)	type	conc. (ppm)		
micro-organismen			2e	Corexit 8666					groeivertraging
			2e	Corexit 8666		ruwe olie			toxischer als mechanisch gedispergeerd; groeibevordering
phyto-plankton			1e		1 à enkele				sterfte
	nanofla-gellaat		2e		20				weinig effekt op groei
			2e	Corexit	10				stimulatie foto-synthese
	flagellaat		1e		25-50				herstel cysten
	"		2e	Finasol	500				herstel cysten
microphyto-benthos									als bij phyto-plankton
macrophyto-benthos			1e		10				overleving
	Fucus		2e			x	totaal 100-550		sterfte
	roodwier		3e	BP1100WD		x			aantasting thallus sterker dan door mechanisch gedis-pergeerde olie
holoplankton	Acartia		2e	Finasol	1000			10 uur	50% sterfte
			2e	BP1100X	2	x	10	20 uur	50% reduktie fil-treersnelheid
meroplankton			1e		0.5-enkele				sterfte
			2e	Corexit 7664	40-300				sterfte
meiozoö-benthos	oligochaet		1e		0,1	x			toxischer dan olie alleen
			2e	Corexit/ Finasol		x			overleving
	eicocons oligochaet		2e	Corexit/ Finasol		x			overleving
macro-zoöbenthos	anneliden	x			0,5			48 uur	sterfte
	mollusken	x			1,0-10			48 uur	sterfte
	Capitella capitata (jonge)	x			0,01				ontwikkeling & overleving

groep organismen	soort organisme	dispergent				olie		expositie duur	effekt
		opp. akt.	gene-ratie	naam	conc. (ppm)	type	conc. (ppm)		
Macro-zoöbenthos (vervolg)	Mollusken larven	x			0,01				ontwikkeling
	Mollusken		1e		2-640			48 uur	LC_{50}
	Crustaceeën		1e		3-435			48 uur	LC_{50}
	Mollusken (ei/larven)		1e		0,01				ontwikkeling
	Mollusken		2e		40-2000			96 uur	LC_{50}
	Crustaceeën		2e		40-10.000			96 uur	LC_{50}
	Mollusken (ei/larven)		2e		40				ontwikkeling
	Zeeëgel (larf)		3e		10				sterfte
			3e		1				vertraagde metamorfose
	zeepok (larf)		3e		100				sterfte
			3e		10				vertraagde ontwikkeling
	Cerastoderma, Chlamys		2e	Corexit		div.	totaal <25-140	96 uur	LC_{50}
	Garnalen, Krabben		2e	Corexit		div.	totaal 70-500	96 uur	LC_{50}
	Mytilus edulis		2e	Corexit		div.	>1000	96 uur	LC_{50}
	"		2e	Corexit 7664		ruwe olie	<50	96 uur	spinnen byssusdraden stagneert
	"		2e	Corexit 7664		ruwe olie	>1000	96 uur	vertraagd vermogen tot sluiten
	Pandalus danae		3e	Corexit 9527		ruwe olie	2-8	96 uur	half zo toxisch als mechanisch gedispergeerde olie
	"		3e	Corexit 9527		ruwe olie	0,1		remming voedselopname
vissen	eieren van haring en platvis		1e		2			100 uur	ontwikkeling geremd
					10			100 uur	uitkomstsucces kleiner
					5				skeletafwijkingen & huidbeschadiging
	1 dag oud ei van kabeljauw		2e & 3e		1				abnormale ontwikkeling

vervolg tabel 3.6

groep organismen	soort organisme	dispergent				olie		expositie duur	effekt
		opp. akt.	gene-ratie	naam	conc. (ppm)	type	conc. (ppm)		
Vissen (vervolg)	oudere eieren van kabeljauw en schol		2^e		100-1000				abnormale ontwikkeling
			3^e		10				abnormale ontwikkeling
	larven van haring en platvis		1^e		2 à 7			96 uur	sterfte
	schollarven		1^e		2				verandering voedselzoekgedrag
	platvis-larven		2^e		100-300				sterfte
	adulten: kabeljauw en platvis		1^e		10-30			1-4 dagen	sterfte
			2^e	Corexit 7664	130			4 dagen	sterfte
	"		2^e	Corexit 8666	900			4 dagen	sterfte
	adulte kabeljauw		2^e	Corexit 7664		ruwe olie	totaal 120	96 uur	sterfte
	"		2^e	Corexit 8666		die-sel-olie	tot 60	96 uur	sterfte
	haring-eieren		$1^e/2^e$			ruwe olie	totaal 0.25-25		uitkomst & ontwikkeling geremd
	"		$1^e/2^e$			ruwe olie	totaal 0.25-25	24-48 uur	kleinere lengte
Kwelders				x	10%				toxisch

Daarnaast zal beneden de LW-lijn sedimenterende gedispergeerde olie een bedreiging voor de volgende groepen vormen: micro-organismen, micro- en macrophytobenthos, zeegrassen en bodemvissen.

In tabel 3.7 wordt samengevat in hoeverre het mechanisch en fysisch-chemisch bestrijden van drijvende olie tot het ontstaan van andere verschijningsvormen van olie leidt en welke van deze vormen een bedreiging voor bepaalde groepen organismen kunnen vormen. Uiteraard zal niet-bestreden drijvende olie t.z.t. over gaan in gesedimenteerde in het water verdeelde en gestrande olie.

Tabel 3.7 Toename (+) of afname (-) van olie in verschillende vormen door het toepassen van verschillende bestrijdingsmethoden op drijvende olie (bovenste tabel).
Overzicht van de door verschillende vormen van olie bedreigde groepen organismen (onderste tabel)

	Toename (+) of afname (-) van olie in de vorm van			
	drijvend	gesedimenteerd	gestrand	in het water
mechanisch bestrijden	-	-	-	-
absorberen	-	-	-	-
gelvormers & herders	-	-	-	-
bezinken	-	+	-	+
verbranden	-	-	-	-
dispergeren	-	+	-	+

	Bedreiging door olie in de vorm van			
	drijvend	gesedimenteerd	gestrand	in het water
micro-organismen		x	x	x
phytoplankton				x
microphytobenthos		x	x	x
macrophytobenthos		x	x	x
lichenen			x	
zeegrassen		x	x	
zooplankton				x
zoöbenthos		x	x	x
vissen		x	x? (bodemvis)	x
vogels	x		x (broed-, rustgebied)	
zeehonden	x		x (rustgebied)	
kwelders			x	

3.3.2 Gestrande olie

3.3.2.1 Mechanische bestrijding

Als preventieve maatregel kan in de lagere getijdenzone op zandige kusten een wal worden opgeworpen, die de olie gedurende 1 à 2 getijden belet in de hogere kustzone te stranden (zie Deel I: 7.3.1). Biologische effekten van gestrande olie worden hierdoor (tijdelijk) verminderd.

Eenmaal gestrande olie kan op een aantal manieren mechanisch worden verwijderd (zie Deel I: 7.2.1). Met de verwijdering van de olie met handkracht dan wel met apparatuur die olie schraapt en oppompt, zullen de direkte effekten van gestrande olie voor een aantal groepen niet geringer worden, aangezien deze organismen door de behandeling (gedeeltelijk) worden verontreinigd of meegevoerd. Dit is het geval voor micro-organismen, microphytobenthos, macrophytobenthos, lichenen, zeegrassen, zoöbenthos, (larven van) bodemvissen en kwelderplanten. Door de verwijdering van de olie zal (behalve bij kwelders) echter sneller herstel mogelijk zijn. Mechanische verwijdering van olie van broed- en rustgebieden van vogels en van rustgebieden van zeehonden leidt eveneens tot verminderde effekten van gestrande olie.

Verwijdering van olie van beschutte estuariene getijdenplanten en kwelders, waar zware, vrij persistente oliebedekking kan optreden, zal kunnen leiden tot in het sediment woelen van de olie door betreding en gebruik van zware apparatuur of door lekkage vanuit gegraven geulen en putten, waarin de olie verzameld wordt. De biologische effekten van gestrande olie zullen door indringen van de olie in het sediment versterkt worden en daarnaast langduriger worden.

3.3.2.2 Fysisch-chemische methoden

Door het gebruik van lage- en hoge-druk-spuiten, stoomspuiten en zandstraalapparatuur, het toevoegen van absorberende materialen en herders, het verbranden en het gebruik van dispergeermiddelen kan gestrande olie verwijderd worden.

Spuiten met water, stoom en zand (Deel I: 7.2.2.1)

Gebruik van lage-drukspuit voor het verwijderen van lichte, niet plakkende olie van slikkige substraten en vegetatie, en van hoge-drukspuiten, stoom- en zandspuiten voor het schoonmaken van harde substraten zal - uitgezonderd mogelijk het gebruik van lage-drukspuiten - niet leiden tot sterk verminderde direkte biologische effekten. Tegelijk met de verwijdering van de olie worden immers de organismen vernietigd en/of meegevoerd. Ook hier bestaat het gevaar van in het sediment drijven van de olie door betreding. Biologisch herstel van deze groepen zal echter - mits de losgespoten olie goed verzameld wordt - van kortere duur kunnen zijn.

Absorberende materialen (zie Deel I: 7.2.2.2)
Toepassing van olie-absorberende materialen maakt het mogelijk lichte, niet-plakkende olie van zachte en harde substraten te verwijderen. Daarbij het verwijderen van olie plus absorbentia de bodemorganismen voor een deel eveneens worden vernietigd, leidt deze methode slechts tot duidelijke vermindering van de direkte effekten van gestrande olie op rust- en broedgebieden van vogels en rustgebieden van zeehonden. Voor de overige bedreigde groepen, behalve op kwelders, zal de herstelperiode van de organismen - mits de geadsorbeerde olie goed verzameld wordt - in het algemeen wel van geringere duur kunnen worden.

Wordt de aan absorberend materiaal gehechte olie uiteindelijk in zee gespoten dan zullen, afhankelijk van het type absorbent, de biologische effekten van drijvende of gesedimenteerde olie toenemen. Bij drijvende absorberende materialen kan goed verzamelen een verdere verspreiding van olie voorkomen.

Herders (zie Deel I: 7.2.2.5)
Toepassing van herders voorkomt hechting van olie aan steenglooiingen en indringen van olie in zandstranden. Bij toepassing op niet-percolerende fijnkorrelige sedimenten lijkt toepassing van herderstoffen te leiden tot verhoogde concentraties oliekomponenten in de bovenste centimeters. Door toepassing van herderstoffen zullen de biologische effekten van gestrande olie op harde substraten en percolerende zandige kusten kunnen verminderen. Effekten van drijvende, gesedimenteerde en in het water verdeelde olie worden niet verminderd.

Verbranden (zie Deel I: 7.2.2.4)
Gestrande olie, die dik en bovendien vers genoeg is, kan tot (meestal incomplete) verbranding gebracht worden, waarna een residu en luchtverontreiniging zal resteren. Of brandende olie tot doordringing van olie in het sediment bijdraagt is onbekend. De direkte effekten van gestrande olie zullen dus niet of nauwelijks verminderen, terwijl het residu tot een langdurige herstelperiode zal leiden.

Redistributie van dit residu zal vermoedelijk slechts in zeer geringe mate plaatsvinden.

Dispergeermiddelen (zie Deel I: 7.2.2.6)
Gebruik van dispergeermiddelen op gestrande olie zal door toevoeging van energie met behulp van hoge-drukspuiten of door de energie van de golfzone tot dispergeren van de gestrande olie in het water leiden. De toe te voegen concentraties dispergenten bedragen vaak 25% van het volume olie. Mengsels

van olie en dispergent en gedispergeerde oliedruppels hechten waarschijnlijk slechter aan sedimentkorrels en zouden daarom dieper kunnen doordringen in percolerende zandstranden en waarschijnlijk ook in niet-percolerende sedimenten van wadplaten en kwelders. De literatuur is op dit punt echter tegenstrijdig. Mogelijk zal dispergeren van gestrande olie tot dieper in het sediment dringen van de olie leiden en dus tot langdurige effekten van gestrande olie. Door het dispergeren van de gestrande olie zullen de direkte biologische effekten waarschijnlijk nauwelijks verminderen (zie tabellen 3.2 en 3.3). Wanneer de olie gedispergeerd wordt kort voor het opkomen van het water zal het mengsel olie/dispergent slechts gedurende korte tijd op de benthische organismen inwerken. Effekten van deze concentraties worden in tabel 3.8 vermeld, terwijl voor de orde van grootte ook de gegevens uit tabel 3.6 zinvol zijn. Uit tabel 3.8 blijkt dat het toevoegen van 0,2 l ruwe olie per m^2, die gedispergeerd wordt met de 2^e-generatie dispergent BP 1100 X, tot sterfte kan leiden.

De in het water chemisch gedispergeerde olie zal een bedreiging vormen voor verschillende groepen organismen (zie tabel 3.6). Van de in het water gedispergeerde olie kan een aanzienlijk deel sedimenteren, terwijl door het soms instabiele karakter van de gevormde dispersies eventueel ook weer drijvende olielagen kunnen ontstaan.

In tabel 3.9 wordt samengevat in hoeverre het mechanisch en fysisch-chemisch bestrijden van gestrande olie tot het ontstaan van andere verschijningsvormen van olie leidt. Als gevolg van mechanische methoden en verwijdering m.b.v. lage- en hoge-drukspuiten, zandstralen, stoomtoepassing en absorbentia zullen de direkte effekten van gestrande olie niet verminderen, ondanks vermindering van het totale volume gestrande olie. Bij deze methoden worden de door gestrande olie bedreigde organismen immers (gedeeltelijk) meegevoerd of vernietigd. Alleen wat betreft broed- en rustgebieden van vogels en rustgebieden van zeehonden zullen de direkte effekten van de gestrande olie verminderen. Wel zal over het algemeen, uitgezonderd bij kwelders, een sneller herstel na de oliebestrijding mogelijk zijn.

Tabel 3.8 Biologische effekten van gedispergeerde gestrande olie (samengevat uit Deel I: hoofdstuk 8).

groep organismen	soort organisme	dispergent			olie		expositie duur	effekt
		generatie	naam	conc.	type	conc.		
lichenen			x					verminderde koolstoffixatie en verlies van pigmenten
meio-zoöbenthos	oligochaet	1e		0,1%	ruwe olie			toxischer dan oliefilm alleen
macro-zoöbenthos		2e	BP1100X en BP1100WD	spaarzaam gebruik en goed wegspoelen				geen zware sterfte op rotskust
	zeepok	2e	BP1100WD (1:20)	1,3l/m²	ruwe olie	1,4l/m²	7 maal bij LW	géén effekt (idem ruwe olie alleen)
	Patella en Littorina	2e	BP1100WD (1:20)	1,3l/m²	ruwe olie	1,4l/m²	7 maal bij LW	tijdelijke reduktie aantallen (idem ruwe olie alleen)
	Arenicola marina	2e	BP1100WD	0,13 l/m²				geen effekt zowel op percolerend als niet-percolerend sediment (idem olie alleen)
	Arenicola marina	2e	BP1100X		ruwe olie	0,2 l/m²	1 maal	25% reduktie van dichtheid
	Arenicola marina	2e	BP1100X		ruwe olie	0,2 l/m²	4 maal om de 2 mnd.	totale sterfte
vogels	eieren		x	1 druppel				sterfte
			x		x			toxischer dan olie alleen
kwelders			x					sterfte blad
	Spartina en Salicornia		x		x			geen verminderde sterfte en geen sneller herstel t.o.v. olie alléén

Tabel 3.9 Toename (+) en afname (-) van olie in verschillende vormen na verschillende bestrijdingsmethoden van gestrande olie.

	toename (+) of afname (-) van olie in vorm van				
	drijvend	gesedimenteerd	gestrand		in water verdeeld
			op sediment	in sediment	
mechanisch bestrijden	-	-	-	+	-
lage- en hoge druk-spuiten, stoomspuiten, zandstralen	-	-	-	+	-
absorberen	-	-	-	+	-
geabsorbeerd in zee spoelen	-	+ bij bezinken	-	-	-
herders	+	+	-	+ bij niet percolerend sediment	+
verbranden	-	-	residu	?	-
dispergeren	-	+	-	+	+

3.4 Effekten van verjagen en schoonmaken van vogels en zeehonden

3.4.1 Verjagen

Indien het mogelijk zou zijn de vogels en zeehonden voor het arriveren van de drijvende olie tijdelijk te verjagen, zouden de effekten van drijvende en op rustgebieden gestrande olie sterk verminderen.

Koski & Richardson (1976) geven een overzicht van methoden, die kunnen leiden tot het verdrijven van vogels uit door olie bedreigde gebieden. Gekonkludeerd wordt, dat zeer weinig systematische en kwantitatieve informatie beschikbaar is over de effektiviteit van deze methoden in kustwateren. Toepassing van aan de olie toegevoegde gekleurde stoffen, vooral in de fluorescerende geelgroen tinten, van flitslichten, vooral in het rode spectrum, en van glimmende reflectors, zou vogels kunnen verjagen. Akoustische verschrikkingsmethoden, waarbij het geluid van een predator of de alarmroep wordt uitgezonden, behoren eveneens tot de mogelijkheden. Kombinaties van geluid en licht zijn mogelijk nog de beste verschrikkingsmethoden: uit experimenten van Grumnet (1973 in Croxall 1975) blijkt dat meer dan 50% van de futen, aalscholvers en zeeëenden door audio-visuele middelen het bedreigde gebied verlaat.

Onderzoek zal moeten uitwijzen of sommige vogelsoorten niet eerder geneigd zijn onder te duiken dan weg te vliegen en hoe effectief de methoden zijn. Verjaging van eenden tijdens de rui zal zeker op grote problemen stuiten, omdat de dieren dan niet kunnen vliegen. In het algemeen zullen naar verwachting de verschrikkingsmethoden echter in een uitgestrekt gebied als de Waddenzee nauwelijks effectief zijn.

Het bij voorbaat wegvangen van vogels uit de door olie bedreigde gebieden zal op onoverkomelijke technische moeilijkheden stuiten voor wat betreft het vangen en het opvangen van de vogels.

Methoden om zeehonden uit de door olie bedreigde gebieden te weren zijn niet beschreven, maar zullen in principe op dezelfde grondslagen berusten als de verschrikkingsmethoden voor vogels. Onderzoek zal ook hier moeten uitwijzen of de methoden effectief kunnen zijn in een gebied als de Waddenzee.

Het bij voorbaat wegvangen van zeehonden uit door olie bedreigde gebieden zal zeker met zeer grote praktische problemen en stress van de zeehonden gepaard gaan (pers.med. Reijnders).

3.4.2 Schoonmaken

In het verleden is getracht de bij olierampen op de kust aangespoelde, met olie besmeurde vogels te verzamelen, schoon te maken en weer terug te zetten. Door Williams et al. (1978) is een handleiding uitgegeven, waarin het vangen, verzorgen, schoonmaken, afspoelen en huisvesten van de vogels wordt beschreven echter zonder vermelding van kwantitatieve gegevens over de effectiviteit van het gehele proces.

Het totale rehabilitatieproces is echter een complex geheel, waaraan aanzienlijke praktische problemen kleven. Eenmaal gevangen moeten de vogels gehuisvest, gevoed en warm gehouden worden, waarbij voorkomen moet worden dat olie van het verenpak wordt opgegeten. Bij grotere aantallen vogels bijéén kunnen problemen als agressiviteit en stress optreden.

Het eigenlijke schoonmaken van de vogels kan met chemische en/of absorberende middelen plaatsvinden. Een grote verscheidenheid aan oplosmiddelen is beproefd om de olie van de veren te verwijderen. Als oplosmiddelen die goed voldoen, worden genoemd: Polycomplex-A in oplossing van enkele procenten, Anway Loc, Tremalon B en huishoudmiddeltjes als Fairy Liquid (Nelson-Smith 1972). Oplossing van 1% TEEPOL in warm water voldoet eveneens goed (Swennen 1977). Lanimol en Biotex zijn middelen die de huid irriteren. De meeste oplosmiddelen verwijderen echter met de olie de natuurlijke waterafstotende eigenschappen van het verenkleed. Gebruik van koolwaterstofoplossingen als Arklone P tast dit waterafstotend vermogen niet aan, maar geeft toxische bijwerkingen (Clark & Gregory 1971). Een middel als Laridan J27, dat olieoplossende eigen-

schappen kombineert met een kosmetische was, geeft het verenkleed na reiniging weer een waterafstotend karakter, waarna eenden binnen 8 à 10 dagen kunnen zwemmen (Odham 1971 in Butler, Berkes & Powles 1974). Absorberende materialen, zoals zaagsel, kalk, meel en vollersaarde voldoen goed om de olie uit de veren te verwijderen (De Jager & Belterman 1970).

Bijkomende problemen van het schoonmaakproces zijn huisvesting, verzorging, voeding en optredende ziekten in de periode van meestal enkele weken tot het verenkleed zich (soms pas na de ruiperiode) voldoende hersteld heeft. In deze periode doen zich vaak grote technische en aviculturele problemen voor (Jager & Belterman 1970). Bij het weer terugbrengen in de natuurlijke omgeving blijken sommige vogelsoorten, zoals eenden en duikers, een gestoord sociaal en voedselzoekgedrag te vertonen. Gezien de vele problemen die zich tijdens het hele rehabiliteitsproces kunnen voordoen, worden de kansen op een succesvolle afloop voor vogels met een minder goede beginkonditie snel kleiner: een redelijke kans op herstel hebben slechts die vogels die rectaal gemeten een temperatuur van minimaal 38.4°C hebben (Nelson-Smith 1972).

Oordelen over het zinvol zijn van schoonmaken van olievogels is sterk afhankelijk van het uitgangspunt. Vanuit algemeen ethisch standpunt is iedere van de oliedood geredde vogel zinvol. Vanuit het oogpunt van natuurbeheer is het schoonmaken van bepaalde soorten meeuwen in verband met hun nog steeds groeiende populatie en van zeeëenden in verband met de hoge reproduktie- en herstelcapaciteit een nauwelijks noodzakelijke aktiviteit. Snel herstel van de populatie eidereenden werd na de "Palva" ramp gekonstateerd: in 1 jaar tijd is 30% van de sterfte in de broedpopulatie weer hersteld (Leppakoski 1973). Standring (1979) konkludeert, dat terwijl in het algemeen slechts een gering percentage van de door olie getroffen vogels wordt schoongemaakt (zie Deel I: 4.7.3), 10% van de losgelaten behandelde vogels binnen 1 maand dood wordt gevonden. Door andere auteurs worden overlevingspercentages van schoongemaakte en teruggezette vogels genoemd variërend van 1% (Nelson-Smith 1972; Clark 1978) tot 50% (Randall, Randall & Bevan 1980). Behandeling van olievogels zou daarom een vrij nutteloze aktiviteit zijn. Ook Swennen & Spaans (1970) en Swennen (1977) konkluderen uit de resultaten van schoonmaakakties van met olie besmeurde vogels uit het Waddengebied, dat deze reddingsakties nauwelijks effekt op het herstel van de vogelpopulaties hebben. Een uitzondering hierop zou kunnen worden gemaakt voor kleine, geïsoleerde broedkolonies van vogelsoorten met een lage reproduktiesnelheid (Clark 1973).

De effekten van drijvende en op rustgebieden gestrande olie zouden sterk gereduceerd kunnen worden, indien schoonmaken en terugzetten van met olie besmeurde zeehonden goed uitvoerbaar zou zijn.

In laboratoriumexperimenten leidde het schoonmaken van met ruwe olie (0,02 $ml.cm^{-2}$) besmeurde vachten van zeehonden (Callorhinus) niet tot een reduktie van de door de olieverontreiniging verhoogde warmtegeleiding van de pels. De warmte-isolerende werking van de vacht, belangrijk voor zeer jonge zeehonden die nog niet in bezit van een spekklaag zijn, wordt met schoonmaken van de vacht dus niet hersteld (Kooyman, Davis & Castellini 1977). Verwijderen van de olie van de vacht is mogelijk met o.a. Swarfega en de dispergent BP 1100 X, welke echter slechts bij verse olie en niet bij verweerde olie werkzaam is. Verwijderen van olie van de vacht van gevangen jonge grijze zeehonden blijkt zinloos, zolang bronnen van herhaalde oliebesmeuring (beoliede moeders en zandplaten) niet verdwenen zijn. Daarnaast dient overwogen te worden of vangen en schoonmaken van de besmeurde zeehonden niet tot grotere (verstorings-) effekten leidt dan de olie zelf (Davis & Anderson 1976).

4 AFWEGING OLIEBESTRIJDINGSMETHODEN IN DE WADDENZEE

4.1 Inleiding

Gebaseerd op het in de voorgaande hoofdstukken beschreven gedrag van olie alsmede de biologische effekten van (eventueel bestreden) olie in de Waddenzee, zal in dit hoofdstuk worden afgewogen wat de meest geschikte wijze van handelen zou kunnen zijn in geval van een dreigende olieverontreiniging van het Waddengebied.

De beste wijze van handelen wordt hierbij gedefinieerd als het nemen van die maatregelen welke de gevolgen van een olieverontreiniging voor de ecologie van de Waddenzee zo gering mogelijk houden.

4.2 Beschermingsprioriteit

Uitgaande van de sleutelpositie (zie 1.4), die de benthische organismen in het totale ecosysteem van het Waddengebied innemen, lijkt het in eerste instantie van belang om de effekten van olie op deze groep organismen zo gering mogelijk te houden. Verminderde biomassa van deze soorten organismen - speciaal van zoöbenthossoorten - zal zich zonder twijfel in verminderde dichtheden van epibenthos, vissen, vogels en zeehonden weerspiegelen.

Gezien de biologische karakteristieken van de Waddenzee zal nádat de olie uit het gebied is verdwenen een relatief snel herstel in de orde van enkele maanden tot hoogstens enkele jaren van kwelders en populaties van epibenthos (garnalen), zoöbenthos, vissen en de meeste vogels te verwachten zijn. Wegens dit snelle herstel zijn eventuele sterkere korte-termijn effekten op zoöbenthos te verkiezen boven het optreden van lange-termijn effekten zoals naar verwachting zal gebeuren, wanneer de olie zich in het Waddengebied voor langere termijn handhaaft.

4.3 Toetsing van de bestrijdingsmethoden

Uitgaande van de in 4.2 gestelde kriteria, n.l. het zoveel mogelijk beschermen van het zoöbenthos, speciaal tegen lange-termijn effekten van oliebelasting, kunnen de bestrijdingsmethoden van olie in drijvende of gestrande vorm op hun waarde getoetst worden.

4.3.1 Drijvende olie

Niet-bestrijden

Zolang de olie zich drijvend in de Waddenzee bevindt, zullen effekten op zoöbenthos uitblijven. Door mechanische dispersie en oplossing zal een zekere hoeveelheid olie in het water verdeeld raken, zolang er geen moussevorming

optreedt. Schattingen geven aan dat binnen enkele dagen tot maximaal 25% van de verse drijvende olie zich in het water kan verdelen, waarvan minimaal 80% in de vorm van gedispergeerde olie (zie 2.2.1.2.1). Bij enigszins ruwe zee is echter moussevorming te verwachten, zodat de hoeveelheid olie in het water in het algemeen aanzienlijk geringer zal zijn. De in het water verdeelde olie, die zich voor een deel aan het in ruime hoeveelheden aanwezige gesuspendeerde materiaal (zie 1.2) zal hechten, zal tot effekten op het zoöbenthos kunnen leiden. Blootstelling van zoöbenthos aan deze olie is echter van relatief korte duur gezien de gemiddeld snelle verversingstijd van het Waddenzeewater (zie 1.2. & 2.3.2.1).

Vanuit het water kan een deel van deze opgeloste, gedispergeerde en geadsorbeerde olie - ook in de vorm van (pseudo)faeces van zoöplankton en zoöbenthos - op het sediment neerslaan. Het bezinken van, vooral geadsorbeerde olie door natuurlijke sedimentatie (zie 2.3.2.2) valt niet te kwantificeren voor de Waddenzee. Sedimentatie door zoöplankton en zoöbenthos van in het water verdeelde olie (b.v. 1.5 ppm) zal gemiddeld over het jaar tot neerslaan van dagelijks 230 ton olie in de westelijke Waddenzee kunnen leiden (zie 2.3.2.2), hetgeen een dagelijkse toevoeging van ca. 0.8 ppm aan de bovenste 10 cm van het sediment betekent. Door het persistente karakter van eventueel als (pseudo)faeces gesedimenteerde olie kunnen lange-termijn effekten ontstaan op het zoöbenthos.

In de Waddenzee drijvende olie zal uiteindelijk goeddeels op de platen in de getijdenzone, vooral juist op de wantijen en de ondiepere kustvlakten stranden (zie 2.3.1). Effekten van in de getijdenzone gestrande olie op zoöbenthos zullen, zeker wanneer de olie in het (anaerobe) sediment doordringt (zie 2.3.3.2.2) een zeer langdurig karakter dragen (zie 2.4.2). Zoals uit tabel 3.2 blijkt, treedt sterfte bij zoöbenthos op na stranding gedurende enkele dagen van olie met laagdikten vanaf enkele honderdsten tot tienden van milimeters. Concentraties olie in het sediment vanaf enkele honderden ppm leiden tot sterfte van zoöbenthos (zie tabel 3.3).

Bij het onbestreden laten van een drijvende laag olie in de Waddenzee zijn de meest langdurige effekten op zoöbenthos te verwachten van het stranden van olie en het doordringen van olie in de (anaerobe) sedimenten van de getijdenzone.

Mechanisch bestrijden, absorberen, gelvormers en herders

Het met schermen en skimmers mechanisch bestrijden van drijvende olie, eventueel met behulp van absorberende materialen, gelvormers en herders, is een effektieve methode om de effekten van gestrande olie op zoöbenthos te verminderen. De neveneffekten van deze methode zijn zodanig, dat biologische effekten van opnieuw drijvende, gesedimenteerde en in de kolom verdeelde olie op zoöbenthos eveneens sterk verminderen.

Bezinken

Bezinken van drijvende olie zal leiden tot verminderde effekten van gestrande olie op zoöbenthos, vooral als bezinken op grote afstand van de getijdenzone plaatsvindt. Gezien het mobiele karakter van de bezonken olie is redistributie, ook over de getijdenzone, na verloop van tijd echter zeker niet uit te sluiten, waarbij langdurige effekten op zoöbenthos kunnen optreden. Als neveneffekt treedt een zeer sterke toename van de biologische effekten van gesedimenteerde olie op, welke een zeer langdurig karakter kunnen hebben. Dit geldt eveneens voor de effekten van in de kolom verdeelde olie. Effekten van drijvende olie zullen echter wel sterk verminderen.

Verbranden

Verbranden van drijvende olie zal leiden tot slechts gedeeltelijk verminderde effekten van gestrande olie, aangezien het residu toch kan stranden. Als neveneffekten zullen ook biologische effekten van drijvende, gesedimenteerde en in het water verdeelde olie gedeeltelijk verminderen.

Dispergeermiddelen

Het dispergeren van de drijvende olie leidt tot zeer sterk verminderde biologische effekten van gestrande olie. Als neveneffekt zullen de biologische effekten van drijvende olie eveneens sterk verminderen. De biologische effekten van olie verdeeld in het water zullen zeer sterk toenemen. Deze effekten zijn echter, gezien de gemiddeld korte verversingsduur van het Waddenzeewater, in het algemeen van relatief korte duur (zie 1.2 & 2.3.2.1).

Door het bezinken van een aanzienlijk deel van de in het water gedispergeerde olie in het Waddengebied - ook als (pseudo)faeces-, kunnen de biologische effekten van gesedimenteerde olie toenemen. Deze vorm van olieverontreiniging kan een zeer persistent karakter dragen, wanneer de olie b.v. door bioturbulentie in de sedimenten doordringt. Het bezinken door natuurlijke sedimentatie (zie 2.3.2.2) van vooral geadsorbeerde olie valt voor de Waddenzee niet te kwantificeren. Sedimentatie door zoöplankton en zoöbenthos zal tot de dagelijkse sedimentatie van honderden tonnen gedispergeerde olie kunnen leiden (zie 2.3.2.2), zolang de kritieke concentraties gedispergeerde olie niet worden overschreden. De kritieke concentratie gedispergeerde olie ($2^e/3^e$ generatie dispergenten)voor het doorpompen van water ligt voor zoöplankton (calanoide copepoden) bij waarden gedurende 1 dag vanaf 10 ppm, terwijl voor zoöbenthos (kokkels) na 4 dagen bij 25 tot 140 ppm de helft van de dieren gestorven is (tabel 3.6). Mossels blijven echter bij concentraties gedispergeerde olie tot 4000 ppm, pseudofaeces produceren (zie Deel I: 4.5.4.2.3), hoewel problemen met het sluiten van de schelphelften bij concentraties boven de 1000 ppm optreden (zie Deel I: 8.5.2.4.2.1.1).

Samenvattend blijkt zoöbenthos vooral bedreigd te worden door de effekten van gestrande olie, die bij doordringen in de anaerobe sedimenten van de getijdenzone een zeer langdurig karakter zullen dragen (orde van jaren). Olie in de aerobe sedimentlaag zal mogelijk binnen enkele maanden tot een jaar afgebroken zijn (zie 2.4.2). Het mechanisch verwijderen van drijvende olie eventueel m.b.v. absorbentia, gelvormers en herders moet als een uitsluitend positieve methode beschouwd worden om de stranding van olie te voorkomen, waarbij ook andere vormen van olie zeer sterk afnemen. Chemisch dispergeren van drijvende olie leidt eveneens tot een effektieve preventie van gestrande olie, doch toenemende concentraties olie in het water (zij het van relatief korte duur) en langdurige effekten van toenemende hoeveelheden gesedimenteerde olie zijn de neveneffekten. Bezinken is eveneens een effektieve methode om de effekten van gestrande olie te verminderen, maar de sterk toenemende, zeer langdurige effekten van gesedimenteerde en van in de kolom verdeelde olie zijn zeer ongunstige neveneffekten. Verbranden van drijvende olie doet zowel de effekten van gestrande olie als van andere vormen van olie gedeeltelijk verminderen.

4.3.2 Gestrande olie

Niet bestrijden

In de getijdenzone gestrande olie heeft effekten op zoöbenthos organismen (zie tabel 3.2). Laagdikten vanaf honderdsten van mm kunnen tot sterfte van zoöbenthos leiden. Afhankelijk van de mate van percolatie en mobiliteit van het sediment en van de bioturbatie zal gestrande olie in zandige/slikkige sedimenten kunnen dringen. Kwantificering van de hoeveelheid olie die in het sediment zal doordringen is zonder nader onderzoek niet mogelijk, maar concentraties zullen in de orde van grootte van enkele honderden ppm kunnen liggen (zie 2.3.3.2.2). Effekten op zoöbenthos (tabel 3.3) treden op bij concentraties vanaf enkele honderden ppm. In het sediment doorgedrongen olie zal, gezien het zeer persistente karakter (zie 2.4.2), tot langdurige effekten op zoöbenthos leiden.

Eenmaal gestrande olie zal afhankelijk van het type olie, de verweringssnelheid, de opname van sediment in de olie en de windkondities slechts gedurende een beperkte periode weer door het opkomende water kunnen worden meegevoerd. In de literatuur zijn aanwijzingen, dat die periode in de orde van enkele dagen tot 1 à 2 weken ligt. De meegevoerde olie wordt opnieuw in het estuarium gedistribueerd en leidt in de vorm van in het water verdeelde, gesedimenteerde en/of gestrande olie tot herhaalde en meer uitgebreide effekten op het zoöbenthos.

Mechanische bestrijding

Het mechanisch verwijderen van de gestrande olie, zowel op harde als zandig/slikkige substraten, zal de direkte effekten op zoöbenthos niet verminderen omdat met de olie en eventueel de bovenste laag sediment een belangrijk deel van het zoöbenthos wordt verwijderd. Bovendien leidt mechanische bestrijding van op zandig/slikkige substraten gestrande olie, zowel door het graven van putten en geulen, als door betreding en gebruik van zware apparatuur, in veel gevallen tot verder in het sediment doordringen van de olie en daarmee tot het optreden van langduriger effekten. Of in het algemeen door het verwijderen van de gestrande olie, de langdurige effekten op zoöbenthos bekort zullen worden, is dus sterk afhankelijk van de mate van sedimentdoordringing als gevolg van de bestrijding. Als positief neveneffekt van deze wijze van bestrijden, geldt dat opnieuw drijvende, in het water verdeelde of gesedimenteerde olie niet meer optreedt.

Water-, stoom- en zandspuiten en absorberende materialen

Het gebruik van hoge druk-, stoom- en zandspuiten zal de direkte effekten van gestrande olie op zoöbenthos niet verminderen, maar eerder versterken door totale vernietiging van de organismen. Toepassing van lage-drukspuiten leidt in het algemeen niet tot vernietiging van zoöbenthos. Door toepassing van absorberende materialen op gestrande olie zal bij het verzamelen van de geabsorbeerde olie mogelijk ook een gedeelte van het zoöbenthos worden meegevoerd. Door toepassing van deze bestrijdingsmethoden zullen dus de direkte effekten op zoöbenthos (behalve mogelijk bij gebruik van lage-druk-waterspuiten) niet sterk verminderen. Bovendien leiden deze bestrijdingsmethoden, vooral bij op zandige-slikkige substraten gestrande olie, door betreding en gebruik van apparatuur tot verder in het sediment doordringen van de olie, en daarmee tot het optreden van langduriger effekten. Bij verwijderen van olie van hardere substraten en bij verwijderen van olie van zachte zandige/slikkige substraten met methoden die indringen van de olie in het sediment beperken , zullen in het algemeen mits de olie effektief verzameld wordt, langdurige effekten op zoöbenthos bekort worden. Mits de olie goed verzameld wordt na het losspuiten of het absorberen, zullen ook de effekten van opnieuw drijvende, in het water verdeelde of gesedimenteerde olie sterk verminderen. Opgemerkt moet worden, dat het absorberen van olie aan niet-drijvende materialen na niet zorgvuldig verzamelen kan leiden tot versterkte effekten van gesedimenteerde olie.

Herders

Het gebruik van herders, preventief op harde en percolerende substraten, kan leiden tot verminderde effekten op zoöbenthos van gestrande olie. Er zijn aanwijzingen, dat op niet-percolerende sedimenten gestrande olie door gebruik

van herders enkele cm diep in het sediment doordringt, zodat langduriger effekten te verwachten zijn. Als neveneffekten van het gebruik van herders geldt, dat de olie zich wederom in drijvende vorm in het estuarium zal verspreiden, waardoor effekten van drijvende olie, verdeling in het water, sedimentatie en stranding opnieuw kunnen optreden.

Verbranden

Verbranden van gestrande olie zal door de gevormde hitte en het residu niet tot vermindering van direkte effekten op zoöbenthos leiden, terwijl ook sneller herstel van deze groep organismen niet te verwachten is. Als neveneffekten behoort redistributie van de niet-verbrande gestrande olie tot de mogelijkheden.

Dispergeermiddelen

In het algemeen zal het dispergeren van de gestrande olie niet tot sterk verminderde direkte effekten op zoöbenthos leiden. Daarnaast zal dispergentbehandeling zeker op percolerende, maar ook op niet-percolerende sedimenten de olie dieper in de sedimenten doen doordringen (zie 2.3.3.2.2), waarna gezien het persistente gedrag langduriger effekten op zoöbenthos te verwachten zijn. Als neveneffekt zal gebruik van dispergenten tot sterk toenemende effekten van in het water verdeelde olie leiden, waarbij bij dispergeren van in de ondiepere gebieden aan de randen van de kombergingsgebieden gestrande olie, als gevolg van de geringere verdunning en verversingssnelheid van het water, aanzienlijke concentraties gedispergeerde olie over langere perioden in het water kunnen ontstaan. Ook hier geldt dat een deel van de in het water verdeelde olie, ook door de aktiviteiten van zoöplankton en zoöbenthos in het Waddengebied zal kunnen sedimenteren (zie 2.3.2.2). Deze gesedimenteerde olie zal een mobiel, maar persistent karakter hebben, zodat langdurige effekten op zoöbenthos zijn te verwachten. Tenslotte zal de vorming van weer drijvende olie niet of nauwelijks voorkomen, hoewel de in het water gevormde dispersies veelal een instabiel karakter dragen.

Samenvattend zal op het sediment gestrande olie tot direkte effekten op zoöbenthos kunnen leiden, welke een langduriger karakter krijgen indien de olie in de (anaerobe) sedimenten doordringt. Door de mobiliteit van het sediment en de grote bioturbatie in de getijdenzone zal gestrande olie tot 5 à 10 cm diepte in concentraties van minimaal enkele honderden ppm in de wadsedimenten door kunnen dringen.

Mechanische bestrijding van gestrande olie zal evenals de toepassing van lage-druk- en hoge-druk-, stoom- en zandspuiten en absorbentia de hoeveelheid olie op het sediment sterk verminderen, waarbij de olieconcentratie in het sediment echter kan toenemen. De direkte effekten uitgezonderd die van lage-

drukbehandeling, op zoöbenthos zullen niet, de langdurige effekten mogelijk slechts in geringe mate verminderen. Als positief neveneffekt zal echter niet opnieuw vorming van drijvende, gesedimenteerde, in het water verdeelde en/of gestrande olie plaatsvinden.

Gebruik van herders op harde en percolerende substraten zal de hoeveelheid strandende olie en de direkte en langdurige effekten voor het zoöbenthos tijdelijk sterk verminderen. Op niet-percolerende substraten zal het effekt van herders op gestrande olie en dus op de direkte effekten voor het zoöbenthos mogelijk geringer zijn, terwijl de langdurige effekten op zoöbenthos mogelijk niet veranderen. Als negatief neveneffekt van deze methode wordt de gestrande olie weer in de vorm van drijvende, gesedimenteerde, in het water verdeelde en/of eventueel gestrande olie in het estuarium gebracht.

Verbranden van gestrande olie leidt noch tot essentiële vermindering van de gestrande olie, noch tot vermindering van direkte en langdurige effekten op zoöbenthos. Ook de neveneffekten zijn niet positief: de hoeveelheid drijvende, gesedimenteerde, in het water verdeelde en/of eventueel opnieuw gestrande olie zal niet sterk verminderen.

Het toepassen van dispergeermiddelen op gestrande olie zal de hoeveelheid gestrande olie op het sediment sterk verminderen, maar de concentratie in het sediment mogelijk sterk doen toenemen. De direkte effekten op zoöbenthos, zullen niet of nauwelijks, de langdurige effekten bij doordringen van de gedispergeerde olie in het sediment zeker niet verminderen en zelfs toenemen. Als neveneffekt vindt vorming van chemisch gedispergeerde olie in het water plaats, die in ondiepe gebieden concentraties van tientallen ppm kan bereiken.
Door de geringe verversingssnelheid van het water zullen deze concentraties slechts langzaam verminderen. Daarnaast zal sedimentatie van gedispergeerde olie vermoedelijk toenemen, een vorm van olie met een mobiel en persistent karakter, waardoor langdurige effekten op zoöbenthos te verwachten zijn.

4.4 Afweging en konklusies

4.4.1 Vanaf de Noordzee binnendrijvende olie

Indien olie op de Noordzee vrijkomt, zal deze in eerste instantie een drijvende laag vormen. Wanneer de olielaag niet bestreden wordt en ook na binnendrijven in de Waddenzee onbehandeld blijft, zal een groot deel van deze olie in stranding in de getijdenzone tot direkte en na doordringing in vooral anaerobe sedimenten tot zeer langdurige effekten op zoöbenthos kunnen leiden. Aangenomen dat een olievolume van 100.000 ton de Waddenzee binnendrijft, zal deze olie na (herhaalde) stranding in een dikte van bv. 0.1 mm tot sterfte van zoöbenthos kunnen leiden over een oppervlak van 1000 km². Het is zonder nader onderzoek niet uit te sluiten, dat gestrande olie in de sedimenten van de ge-

tijdenzone door zal dringen. Indien de olie in de sedimenten doordringt zal een olievolume van 100.000 ton, dat na stranding gemengd raakt in de bovenste sedimentlaag van 10 cm dikte tot een concentratie van bv. 500 ppm, tot sterfte va zoöbenthos over een wadoppervlak van circa 1250 km² kunnen leiden. Dus zowel in gestrande vorm als in de sedimenten doorgedrongen, zal een olievolume van 100 000 ton tot sterfte onder zoöbenthos in de gehele getijdenzone van de westelijke Waddenzee (600 km²) kunnen leiden. Indien de olie dieper dan enkele mm of 1 cm in het sediment van de slikkige en zandige getijdenplaten dringt, zullen de daar heersende anaerobe omstandigheden tot een zeer trage, jaren durende afbraak aanleiding geven. Langdurige effekten op zoöbenthos zijn dan te verwachten.

Bestrijding van eenmaal in de getijdenzone gestrande olie zal niet tot essentiële vermindering van de direkte en langdurige effekten leiden. Gekonkludeerd moet worden, dat drijvende olie zodanig zal moeten worden bestreden, dat stranding van olie op platengebieden met produktieve benthische fauna tot een minimum beperkt zal blijven.

Om de hoeveelheid in de getijdenzone van de Waddenzee gestrande olie te miniseren, moet in eerste instantie getracht worden de op de Noordzee vrijgekomen olie, mechanisch te bestrijden. M.b.v. olieschermen, veegarmen, skimmers en eventueel herders, gelvormers en absorbentia moet de olie zoveel mogelijk definitief verzameld worden. Dreigt olie de zeegaten binnen te drijven, dan verdient het overweging de drijvende olie langs olieschermen onder een zeer kleine hoek naar de biologisch weinig kwetsbare zandstranden van de koppen van de eilanden te dirigeren. Gebieden vanwaar de gestrande olie gemakkelijk afgevoerd kan worden, verdienen de voorkeur. Verloopt de mechanische verwijdering succesvol en zal deze naar verwachting ook onder de specifieke omstandigheden van de Waddenzee effectief verlopen dan dient de mechanische verwijdering van drijvende olie zover mogelijk in het Waddengebied doorgezet te worden.

Gezien de hydrografische omstandigheden lijken skimmers met absorberende banden meer geschikt dan typen die de olie "afromen" en veelal rustiger water nodig hebben. Olie die na stranden in de getijdenzone weer gaat drijven, zal ook dan bij voorkeur mechanisch bestreden moeten worden.

Gebruik van herders of gelvormers, om verse, dunne olie bijeen te houden kan mechanische verwijdering in de Waddenzee sterk vergemakkelijken. Gebruik van absorberende materialen, mits dit materiaal uiteindelijk goed wordt verzameld, kan ook voldoen.

In geval een drijvende olielaag met een lokaal karakter een bedreiging vormt voor gebieden zonder direkt belang met betrekking tot zoöbenthos, zoals dijkglooiingen, buitendijkse vogelbroed- en vogelrustgebieden, zeehondenrustgebieden en kwelders zal mechanisch verwijderen van deze drijvende olie eveneens de meest verantwoorde methode zijn.

Slechts in gevallen waarin mechanische verwijdering van op de Noordzee drijvende olie absoluut uitgesloten is, moet indien de olie binnen enkele weken een bedreiging zou kunnen vormen voor produktieve kustgebieden, chemisch dispergeren met 2e of 3e-generatie dispergenten overwogen worden. In verband met enerzijds verdamping en anderzijds moussevorming van de drijvende olie zal dispergeren 4 à 6 uur na het vrijkomen van de olie in het algemeen een juiste keuze zijn, indien de drijvende olie in die periode nog niet de toestromingsgebieden van de zeegaten zal bereiken (4 tot 10 km uit de kust). Zullen deze gebieden wel binnen 4 à 6 uur bereikt worden, dan moet echter zonder uitstel gedispergeerd worden. De concentratie gedispergeerde olie, die de Waddenzee zal bereiken, zal door verdunning gering zijn. Indien olie in moussevorm met de beschikbare dispergenten moeilijk te dispergeren zal zijn, dient steeds zo snel mogelijk gedispergeerd te worden. Ook drijvende olie die de toestromingsgebieden van de zeegaten reeds heeft bereikt, zal met snelwerkende middelen gedispergeerd moeten worden, waardoor bij een gedispergeerd olievolume van bijvoorbeeld 100.000 ton concentraties van 100 ppm in het vloedvolume kunnen ontstaan. Dit zal na 1 getijperiode tot lokale maximale olieconcentraties in het water van de Waddenzee nabij de zeegaten van hooguit circa 50 ppm leiden.

Ook indien drijvende olie zich reeds in het zeegat bevindt en niet mechanisch kan worden verwijderd, moet deze olie gedispergeerd worden. De basis van deze gedachte is de aanwezigheid van olie over langere tijd in het gebied te beperken, ongeacht de eventueel sterkere direkte gevolgen voor het zoöbenthos. Gedispergeerde olie is niet meer onderhevig aan stuwing door de wind en zal door verversing van het water relatief snel naar de Noordzee verdwijnen. Een kortere herstelperiode van het zoöbenthos zal het gevolg zijn, waarmee aan de gestelde kriteria wordt voldaan. Het dispergeren zal onmiddellijk en zorgvuldig moeten gebeuren, zodat onbehandelbare moussevorming en de situatie dat drijvende olie gemengd met dispergent alsnog strandt en diep in het sediment door kan dringen, voorkomen wordt. Indien drijvende olie tijdens de ebperiode in het zeegat aanwezig is, zal dispergeren zeker raadzaam zijn. Mogelijk kan gebruik van schermen of herders, om de olie tot aan of tijdens het dispergeren bijeen te houden en de entree in de Waddenzee te vertragen, nuttig zijn.

Uiteraard zullen de concentraties olie en dispergent door het chemisch dispergeren in het water toenemen. De effekten van de dispergent op zoöbenthos zijn relatief onbelangrijk, omdat de toxiciteit van 2e generatie dispergenten varieert van ongeveer gelijk aan tot een factor 20 geringer dan die van de gedispergeerde olie zelf, terwijl de concentratie dispergent in het algemeen slechts 10% is van de olieconcentratie. Bij het dispergeren in één getijperiode van bv. 100.000 ton olie in de zeegaten (een rekenvoorbeeld) blijken concentraties

gedispergeerde olie van maximaal enkele tientallen ppm nabij het zeegat te ontstaan, die echter zeker tot effekten op zoöbenthos zullen leiden. Door de grote verversingssnelheid van het water dalen de concentraties in de loop van 1 resp. 2 weken tot minder dan 10 à 20 resp. minder dan 6 ppm, waarna effekten op zoöbenthos nog maar sporadisch zullen optreden. Het dispergeren van eenzelfde hypothetische olievlek in de centrale delen, resp. de randgebieden van de Waddenzee leidt tot concentraties gedispergeerde olie, die niet alleen 2 resp. 3 maal hoger zijn, maar door de geringere verversingssnelheid zich ook aanzienlijk langer handhaven in grotere gedeelten van het Waddengebied. Bovendien zal gedispergeerde olie in deze meer produktieve zones tot sterkere effekten op zoöbenthos leiden dan in de nabijheid van de zeegaten.

Duidelijk is dat het dispergeren van drijvende olie bij voorkeur in of nabij het zeegat dient te gebeuren, zodat de geringste en meest kortdurende effekten op zoöbenthos zijn te verwachten. Ook in de centrale gedeelten en de randgebieden verdient chemisch dispergeren van olie echter de voorkeur boven onbehandeld laten stranden.

Uiteraard zal een zekere hoeveelheid gedispergeerde olie uiteindelijk niet naar de Noordzee verdwijnen maar uit het water op het substraat neerslaan. In het algemeen zullen kleinere gedispergeerde oliedruppels (bv. met 3^e-generatie dispergenten) tot geringere hoeveelheden neergeslagen olie leiden. Dispergeren meer aan de randen van de kombergingsgebieden leidt gezien de toenemende concentraties fijn zwevend materiaal mogelijk tot toenemende adsorptie van olie en daarmee tot meer neergeslagen olie. Ook in dit opzicht is dispergeren in of nabij de zeegaten te verkiezen.

Behalve door natuurlijke sedimentatie zal een hoeveelheid olie aan (pseudo) faeces gebonden in het Waddengebied kunnen neerslaan. Concentraties vanaf 10 ppm gedispergeerde olie zullen reeds de filteraktiviteit van zoöplankton (calanoïde copepoden) goeddeels uitschakelen en daarmee 75% van totale (pseudo)faeces produktie van zoöplankton en zoöbenthos in de westelijke Waddenzee verhinderen. Concentraties in deze orde zullen waarschijnlijk ook de filteraktiviteit van kokkels reeds verminderen, welke ongeveer 20% aan de totale (pseudo)faeces produktie toevoegt. Op mossels die echter slechts 5% aan de totale (pseudo)faeces produktie bijdragen, zullen olieconcentraties tot honder(der ppm waarschijnlijk nauwelijks effekt hebben. Concentraties gedispergeerde olie beneden de 10 ppm zullen door de gezamenlijke filteraktiviteit van zoöplankton en zoöbenthos in lente- en zomermaanden dagelijks tot een sedimentatie in de orde van maximaal 1500 ton olie in de westelijke Waddenzee kunnen leiden, dwz. dagelijks een hoeveelheid van ca. 5 ppm olie aan de bovenste 10 cm van het sediment toevoegen.

Dit betekent een ruwweg honderd maal hogere sedimentatie dan gemiddeld onder normale omstandigheden plaatsvindt. Deze maximale hoeveelheid als (pseudo)faeces neergeslagen olie zal zelden of nooit over langere perioden worden bereikt: na grote olierampen zullen de dichtheden zoöplankton en zoöbenthos (kokkels) als gevolg van de aanvankelijk hoge concentraties gedispergeerde olie tijdelijk sterk zijn verminderd; bij kleinere hoeveelheden gedispergeerde olie zullen de concentraties in de beginfase nog snel afnemen en daarom slechts tot kortdurende sedimentatie leiden.

Indien zich drijvende olielagen met een lokaal karakter voordoen, die gebieden met weinig zoöbenthosaktiviteit bedreigen, zal gezien de optredende biologische effekten bij stranding van de olie het dispergeren van de drijvende olie toch de voorkeur verdienen boven het laten stranden op kwelders, vogelbroed- en vogelrustgebieden en zeehondengebieden. Uiteraard geldt dit slechts als mechanische verwijdering van drijvende olie uitgesloten is. In geval de olie dreigt te stranden op dijkglooiingen etc. waar mechanische verwijdering van gestrande olie mogelijk is, zal dispergeren niet noodzakelijk zijn.

Indien mechanische verwijdering en dispergeren van de drijvende olie in de praktijk onmogelijk zijn, blijft bezinken van drijvende olie in de Waddenzee toch zeer ongewenst. Deze bestrijding zal leiden tot sedimenteren van de olie als een mobiele en persistente laag, die zich herhaaldelijk redistribuerend, mogelijk jarenlang in het gebied kan handhaven. Langdurige effekten op o.a. zoöbenthos zijn dan niet uit te sluiten.

Ook verbranden van drijvende olie, indien dit technisch al mogelijk is, moet als een minder gewenste methode worden beschouwd, gezien het ontstaan van een residu (drijvend, gesedimenteerd en gestrand) en luchtvervuiling.

4.4.2 In de Waddenzee vrijkomende olie

Olie, die in de Waddenzee vrijkomt zal een volume van 10 000 ton niet te boven gaan. Aangezien in principe voor de eventuele bestrijding van deze drijvende olie dezelfde overwegingen gelden als voor olie afkomstig van de Noordzee, wordt voor de afweging naar 4.4.1 verwezen.

4.4.3 In de Waddenzee gestrande olie

De bestrijding van eenmaal gestrande olie zal de direkte effekten nauwelijks en de langdurige effekten op zoöbenthos eventueel slechts in geringe mate kunnen verminderen. Slechts op harde substraten toegepast zullen de langdurige effekten verminderen. Het belangrijkste effekt van bestrijding van gestrande olie moet het voorkomen of beperken van redistributie van de olie over het estuarium zijn.

De mechanische bestrijding van gestrande olie, zowel met handkracht als met behulp van apparatuur, lijkt ook gezien het sterke beperken van de redistributie, de meeste effektieve methode. De keuze zal in deze gevallen moeten vallen op methodieken, waarbij voorkomen wordt dat, als gevolg van de bestrijding, de olie in heviger mate in de sedimenten doordringt. Ook gebruik van lage- en hogedruk-, stoom- en zandspuiten en absorberende middelen voldoet goed, mits de losgeraakte of geadsorbeerde olie zorgvuldig wordt verzameld.

Als de olie die gestrand is, bij het volgende HW weer gaat drijven, zal bij voorkeur deze weer drijvende olie mechanisch moeten worden bestreden, omdat de bestrijding dan meestal effektiever en sneller is. Alleen in gevallen, waarbij mechanische bestrijding van gestrande olie door goede berijdbaarheid van het substraat goed uitvoerbaar is, kan gedurende de periode van stranding gewerkt worden. Bij olie die herhaaldelijk strandt en vervolgens weer gaat drijven, zal een snelle bestrijding de voorkeur hebben, omdat in de loop van de tijd steeds meer detritus, organisch materiaal en sediment in de olie wordt ingevangen, zodat het te verwijderen volume sterk toeneemt.

Gebruik van herders vóór de stranding van olie op harde en percolerende substraten zal de direkte en langdurige effekten op zoöbenthos sterk beperken. De olie zal echter volledig geredistribueerd raken in het getijdengebied. Toepassing van deze methode lijkt, gekombineerd met mechanische bestrijding van de weer drijvende olie, niet ongewenst. Over gebruik van herders op niet-percolerende substraten ontbreken essentiële gegevens, mogelijk worden langetermijn effekten versterkt.

Indien mechanische verwijdering van min of meer definitief gestrande olie niet uitvoerbaar is, biedt chemisch dispergeren ook geen uitkomst. Direkte effekten op zoöbenthos zullen door dispergeren niet verminderen. Gezien de aanwijzingen dat chemisch gedispergeerde olie dieper in de sedimenten doordringt, zullen de langdurige effekten eerder toe- dan afnemen.

Door verbranden van gestrande olie zullen de direkte effekten en de langdurige effekten op zoöbenthos niet verminderen, terwijl mogelijk weer redistributie van de olie optreedt. Deze methode verdient ook in verband met de optredende luchtverontreiniging, niet de voorkeur bij de bestrijding van gestrande olie.

Na stranding van olie op gebieden, die niet een aanzienlijke zoöbenthos dichtheid dragen, zal mechanische verwijdering van de olie van dijkglooiingen, vogelbroed- en vogelrustgebieden en zeehondenrustgebieden de beste methode zijn. Indien mechanische verwijdering onuitvoerbaar is, zal gebruik van dispergeermiddelen op vogelbroedterreinen sterk af te raden zijn in verband met de kwetsbaarheid van (toekomstige) eieren voor dispergenten en gedispergeerde

olie, die mogelijk in de sedimenten doordringen. Dit geldt in mindere mate ook voor vogel- en zeehondenrustgebieden. Eventueel zal chemisch dispergeren van op dijkglooiingen gestrande olie, die absoluut niet mechanisch bereikbaar is, aanvaardbaar zijn, indien de olie in een watermassa met voldoende groot volume en korte verversingsduur gedispergeerd raakt. In dit geval zal echter het onbehandeld laten van de olie, als die definitief gestrand is en geen redistributie meer plaats zal vinden, voorkeur verdienen.

Bij in een kwelder gestrande olie zullen door geen enkele bestrijdingsmethode de direkte en langdurige effekten verminderen, tenzij het om zeer grote hoeveelheden olie gaat. Indien de olie in een laagdikte van meer dan enkele cm op en tussen de kweldervegetatie is gestrand, is mechanische verwijdering van deze olie noodzakelijk om jarenlange effekten te voorkomen. Ditzelfde geldt voor dikkere olie die boven de HW-lijn gestrand is en die uiteindelijk in verharde vorm onder het sediment kan raken, waardoor de groei van kwelderplanten jarenlang belemmerd kan worden.

5 AANBEVELINGEN

5.1 Preventieve maatregelen

Het verhinderen van het vrijkomen van olie in de mariene en estuariene gebieden is de enige methode om ecologische schade in kustwateren te voorkomen.

Het verleggen van de vaarroute van geladen olietankers van de T-E-route naar de verder naar het noorden gelegen D-W-route, zal de kans op olievervuiling van de Waddenzee zeer sterk verminderen.

Goede zeeverkeersgeleiding (kustwacht), permanente radarbewaking van het verkeersscheidingsstelsel en beloodsing in nabijheid van havens in het Waddengebied zullen de kans op een olieramp verminderen.

Beveiliging van olietankers door het verplicht stellen van een dubbele bodem (zoals bij chemicaliëntankers) zal de kans op vrijkomen van olie na stranding of aanvaring geringer maken.

Internationale regels voor uitrusting van de olietankers, waarbij de manouvreerbaarheid in noodgevallen verbeterd wordt door eisen met betrekking tot meervoudige bedienings- en navigatiesystemen en vaardigheden van de bemanning zal het risico op stranding en aanvaring verkleinen.

Strengere represailles ingeval een olieverontreiniging door schuld ontstaat, zullen nonchalant handelen in dergelijke situaties afremmen.

Scheiding van gas en olie buitengaats zal vervoer van olie per pijpleiding door het Waddengebied onnodig maken.

Beperking van de vaart met olietankers in de Waddenzee in geval van harde wind en mist zal de kans op vrijkomen van olie in dit gebied verkleinen.

5.2 Bestrijding van olie op de Noordzee

Het vrijkomen van olie uit een beschadigde tanker dient zo mogelijk te worden beperkt door overpompen van de olie in een lege tanker of door toevoegen van gelvormende stoffen aan de in te tanks bevindende olie.

Vrijgekomen olie moet, ook als deze geen bedreiging voor de Waddenzee vormt, bij voorkeur mechanisch verwijderd worden met behulp van schermen, skimmers of met veegarmen uitgeruste schepen.

Mechanische bestrijding moet zo snel mogelijk na het uitstromen van de olie beginnen eventueel met behulp van herders, gelvormers of adsorberende materialen.

Indien olie die de Waddenzee bedreigt, niet mechanisch kan worden verwijderd, wordt chemisch dispergeren, bij voorkeur met niet-persistente 2e en 3e generatie dispergenten, noodzakelijk.

Indien voldoende tijd beschikbaar is, vóórdat de olie de toestromingsgebieden van de Waddenzee (4 à 10 km uit de kust) bereikt, zal met dispergeren gewacht kunnen worden tot 4 à 6 uur na het vrijkomen van de olie in verband

met verdamping en moussevorming.

Gebruik van schermen en herders kan in de periode voor en tijdens het dispergeren de olie bijeen houden.

Dispergeren in dieper en meer snelstromend water zal tot de geringste concentraties gedispergeerde olie in de waterkolom leiden.

Dispergeren boven ondiepe gebieden die voor zoöbenthos, vissen en produktie van visseneieren van belang zijn, dient vermeden te worden.

Olie in de toestromingsgebieden van de Waddenzee (4 à 10 km benoordwesten de Waddenkust) die mechanisch niet te verwijderen is, zal gedispergeerd moeten worden met snelwerkende 2e en 3e generatie dispergenten.

5.3 Bestrijding van olie in de Waddenzee

5.3.1 Drijvende olie

Olie komend vanaf de Noordzee zal bij rustig weer door gebruik van doeltreffende schermen die de olie buiten de zeegaten houden, mogelijk grotendeels buiten de Waddenzee kunnen worden gehouden.

Gebruik van schermen, waarlangs de olie naar minder kwetsbare gebieden als de Hors op Texel, de Vliehors op Vlieland en de Noordvaarder op Terschelling geleid kan worden, waar de olie na stranding kan worden afgevoerd, verdient nadere aandacht.

Olie vrijkomend in een haven aan de Waddenzee zal door gebruik van schermen en skimmers buiten het waddengebied kunnen worden gehouden.

Gezien de slechtere bereikbaarheid voor bestrijding van vrijkomende olie dienen oliepijpleidingen zo min mogelijk door ondiepe platengebieden te lopen.

In de Waddenzee drijvende olie zal bij voorkeur met mechanische middelen bestreden moeten worden.

Gebruik van olieschermen om de olie in de Waddenzee te geleiden naar minder kwetsbare gebieden, waar de olie na stranding goed kan worden afgevoerd, verdient nadere aandacht.

In de diepere geulen kan de olie door schepen met veegarmen verzameld worden, waarbij de olieconcentraties in het teruggepompte water zo laag mogelijk moeten blijven.

Door olieschermen, die de olie bijeenhouden en skimmers die de olie verzamelen, kan ook in de ondiepere gebieden de olie worden verwijderd.

Het vooraf bepalen van gebieden met geringere stroomsnelheden in verband met de effektiviteit van de huidige schermen en skimmers zal de kans op effektieve olieverwijdering vergroten.

Gebruik van herders, gelvormers en absorberende materialen kan de mechanische bestrijding vergemakkelijken.

Indien mechanische verwijdering van in de Waddenzee drijvende olie onuitvoerbaar is of zal zijn, moet dispergeren met niet-persistente 2^e en 3^e generatie dispergenten plaatsvinden.

Dispergeren moet dan bij voorkeur in de zeegaten plaatsvinden direkt bij het binnendringen in de Waddenzee, zodat de concentratie gedispergeerde olie in het water zo gering mogelijk is en van zo kort mogelijke duur.

In de Waddenzee vrijgekomen olie moet indien mechanisch verwijderen onmogelijk is, onmiddelijk en bij voorkeur in de diepere geulen gedispergeerd worden.

Olie die zich in de centrale gebieden of de randgebieden van het Waddengebied bevindt, dient eveneens gedispergeerd te worden in het geval dat mechanisch verwijderen niet mogelijk is.

Dispergeren van een lokale olievlek, die mechanisch niet te bestrijden is, zal noodzakelijk zijn indien de drijvende olie op kwelders, vogelbroed- en vogelrustgebieden en zeehondengebieden dreigt te stranden.

Inzet van sproeivliegtuigen in voor vaartuigen moeilijk bevaarbare gebieden kan de bestrijdingsaktie sneller en effektiever maken.

Dispergeren van een lokale olievlek die een dijkglooiing niet van belang voor zoöbenthos bedreigt, zal niet nodig zijn als de gestrande olie goed te verwijderen is.

Bezinken van olie in de Waddenzee is ongewenst, ook indien mechanisch verwijderen en chemisch dispergeren onuitvoerbaar zijn.

Verbranden van de olie is in dergelijke situaties ook ongewenst.

Door het spuien van zoet water bij Den Oever en Kornwerderzand kan zowel drijvende olie teruggedrongen worden als de concentratie in het water verdeelde olie door snellere verversing verminderd worden.

5.3.2 Gestrande olie

Gestrande olie, die met het opkomende water weer gaat drijven, zal in veel gevallen effektiever in drijvende vorm bestreden kunnen worden met behulp van voor ondiep water geschikte schermen en skimmers.

Gestrande olie, die op het sediment blijft liggen, moet bij voorkeur mechanisch verwijderd worden.

Mechanische bestrijding van gestrande olie dient zo snel mogelijk te gebeuren in verband met mogelijke redistributie en in verband met het steeds toenemend volume van de te verwijderen olie door het invangen van o.a. wier en sediment.

Mechanische verwijdering van olie waarbij de olie zo min mogelijk in de sedimenten kan dringen, verdient de voorkeur.

Ontwikkeling van apparatuur, die met hoog water de bovenste laag van slikkige platen en de daarop gestrande olie met behulp van een lopende band verwijdert (principe "pierenspitmachine") verdient overweging.

Lagedruk-, hogedruk-, stoom- en zandbehandeling zijn, mits de olie daarna goed verzameld wordt, methoden die de verwijdering op aanvaardbare wijze vergemakkelijken.

Herders toegepast op harde- en percolerende substraten, kunnen de hechting van olie plaatselijk en tijdelijk voorkomen.

Indien mechanische verwijdering van op platen gestrande olie uitgesloten is, blijft chemisch dispergeren ongewenst.

Verbranden van gestrande olie is eveneens minder gewenst.

Gestrande olie op dijkglooiingen, vogelbroed-, vogelrust- en zeehondenrustgebieden moet bij voorkeur mechanisch verwijderd worden.

Indien mechanische verwijdering onmogelijk is, zijn dispergenten op vogelbroedterreinen en in mindere mate op vogel- een zeehondenrustplaatsen niet toepasbaar.

Als mechanische verwijdering uitgesloten is, kan op dijkglooiingen gestrande en nog redistribuerende olie met dispergenten worden bestreden, mits diep en snelstromend water in de nabijheid is.

Op kwelders kunnen dunne lagen gestrande olie het beste niet bestreden worden; om geval van dikke olielagen (enkele cm) heeft mechanische bestrijding de voorkeur.

Het bij voorbaat verjagen uit door olie bedreigde gebieden van vogels en zeehonden moet als ondoelmatig worden afgewezen.

Het schoonmaken van met olie besmeurde vogels en zeehonden is in de meeste gevallen uit een oogpunt van behoud van de populatie weinig effektief.

5.4 Onderzoek

Inzicht dient te worden verkregen in verspreiding en stranding van in de Waddenzee drijvende olie; waarnemingen aan het gedrag van drijvende ijsvelden geeft mogelijk meer inzicht in deze processen.

Processen die de doordringing van gestrande olie in ongestoorde wadsedimenten bepalen, ook i.v.m. het gebruik van herders, chemische dispergenten en mechanische bestrijding, dienen nader te worden geanalyseerd.

Ook de mobiliteit en biodegradatie van onbestreden en chemisch gedispergeerde olie in de sedimenten dient te worden nagegaan.

Bepaling van de mate waarin chemisch gedispergeerde olie in het water absorbeert aan zwevend materiaal, is wenselijk.

Metingen van de opname van in het water verdeelde olie door zoöplankton en zoöbenthos zijn wenselijk i.v.m. de (pseudo)faeces produktie, een belangrijke factor bij het transport van olie vanuit het pelagiaal naar de bodemsedimenten.

Metingen van de oliebelasting van organismen in het grensvlak sediment-water en in het water met behulp van bio-indicatoren (bivalven), zijn gewenst.

Vaststelling of zoöbenthos in staat is chemisch gedispergeerde olie in het water ter grootte van 1 µm uit te filteren, is gewenst.

Bepaling van de effekten (direkt en langdurig) van gedispergeerde drijvende olie en van onbestreden gestrande, mechanisch of met dispergenten bestreden gestrande olie op zoöbenthos, is zeer wenselijk.

Indien zich in werkelijkheid in het Waddengebied een olieramp voordoet, staan dezelfde onderzoeksvragen centraal.

Uitvoering van doeltreffend onderzoek maakt planning vooraf t.a.v. personeel, materieel en onderzoeksprojekten uiterst noodzakelijk.

Het gedrag van de olie in het Waddengebied zal door middel van luchtfoto's goed vast te leggen zijn.

Ingeval van een olieramp dient vóór het binnendringen van de olie in het Waddengebied sedimentbemonstering in de getijdenzone en beneden de LW-lijn en bemonstering van het zoöbenthos plaats te vinden. Fotograferen van benthos op harde substraten en van kweldervegetaties is in dit verband een zinvolle methode.

Het volgen van zowel de verspreiding en afbraak van de olie als de biologische effekten zal minimaal gedurende 1 jaar, indien nodig gedurende meerdere jaren, met regelmatige tussenperioden moeten gebeuren.

T.a.v. de oliebestrijdingsmethoden dient het onderzoek zich te richten op snelwerkende dispergenten die ook bij olie in moussevorm effektief zijn, en op scherm en skimmers die bij stroomsnelheden tot 3 mijl per uur en golfhoogten tot 1 m funktioneren en ook in ondiep water bruikbaar zijn.

6 GECITEERDE LITERATUUR

Anonymus. 1976. The battle against oil pollution at sea. Suppl. juli 1973. Issue of Trade & Industry 4, p. 1.

Abrahamse, J., W. Joenje & N. Leeuwen-Seelt.1976. Waddenzee. Landel.Ver.Behoud Waddenzee & Ver. Behoud Natuurmonumenten van Nederland, Harlingen, 368 pp.

Anderson, J.W., J.M. Neff, A. Cox, H.E. Tatum & G.M. Hightower.1974. The effects of oil on estuarine animals: toxicity, uptake and depuration, respiration, p. 285-310. In: F.J. Vernberg and W.B. Vernberg (ed.). Population and physiology of marine organisms. Academic Press, Inc., New York, N.Y.

Anderson, J.W., R.G. Riley & R.M. Bean. 1978. Recruitment of benthic animals as a function of petroleum hydrocarbon concentrations in the sediment. J. Fish.Res.Board Can. 35, 776-790.

Anderson, J.W., S.L. Kiesser, R.M. Bean, R.G. Riley & B.L. Thomas. 1979. Acute and chronic effects of oil and oil-dispersant mixtures on Pandalus danae. Unpublished paper 14th. Eur.Mar.Biol.Symp., Helgoland.

Atlas, R.M. & R. Bartha. 1972a. Biodegradation of petroleum in seawater at low temperatures. Can.J.Microbiol. 18, 1851-1855.

Atlas, R.M. & R. Bartha. 1973. Abundance, distribution and oil biodegradation potential of microorganisms in Raritan Bay. Environ.Pollut. 4, 291-300.

Aubert, M., J. Aubert, S. Daniel & J. Gambarotta. 1969. Etude des effects des pollutions chemiques sur le plancton: degradabilité du fuel par les microorganismes telluriques er marins. Rèv.intem.Oceanogr.mèd. 13/14, 107-123.

Baker, J.M. 1971a. Oil and salt-maps in soil. In: E.B. Cowell, 1971. Ecological effects of oil pollution on littoral communities, 62-72.

Baker, J.M. 1971b. Refinery effluent. In: E.B. Cowell, 1971. Ecological effects of oil pollution on littoral communities, 78-87.

Baker, J.M. 1976. Marine ecology and oil pollution. John Wiley, NY, 556 pp. Proc. "Mar.ecology and oil pollution" Aviemore, Scotland, 1975.

Baker, J.M. 1978. Marine ecology and oil pollution. J.Water Poll.Contr. Fed. 50, 442-449.

Benville Jr., P.E. Korn. 1977. The acute toxicity of six monocyclic. aromatic crude oil components to striped bass (morone saxatilis) and Bay Shrimp (Crago Franciscorum) California Fish and Game, 63(4), 3 pp.

Berdugo, V., R.R. Harris & S.C.M. O'Hara. 1977. The effect of petroleum hydrocarbons on reproduction of an estuarien planktonic copepod in lab. cultures. Mar.Poll.Bull. 8, 138--143.

Bergman, M. 1982. Gedrag, bestrijding en biologische effekten van olie in estuariene gebieden. I. Literatuuroverzicht. RIN-rapport 82/18,420 pp.

Bernem, K.H. van. 1976. Beobachtungen zur einwirkung von Rohölen auf ausgewählte watten-organismen im meso halinen bereiden des Elbe-Eaestuars. Diplomarbeit Univ.Hamburg Fachbereich Biologie, Hamburg, mei 1976, 143 pp.

Berridge, S.A., N.T. Thew & A.G. Loriston-Clarke. 1968. Formation and stability of emulsions of water in crude petroleum and similar stocks. J. Instit.Petrol. 54, 333-357.

Beukema, J.J. 1974. Seasonal changes in the biomass of the macrobenthos of a tidal flat area in the Dutch Wadden Sea. Neth.J. Sea Res. 8, 94-107.

Blackmann, R.A.A. 1972. Effects of sunken crude oil on the feeding and survival of the brown shrimp. C.crangon. ICES Report 72/K!13, 1972.

Blackmann, R.A.A., J.M. Baker, J. Jelly & S. Reynard. 1973. The Dona Marika oil spill. Mar.Poll.Bull. 4, 181-182.

Blumer, M., G. Souza & J. Sass. 1970. Hydrocarbon pollution of edible shelfish by an oil spill. Mar.Biol. 5, 195-202.

Blumer, M., H.L. Sanders, J.F. Grassle & G.R. Hampson. 1971. A small oil spill. Environment 13(2), 2-12.

Blumer, M. & J. Sass. 1972a. Oil pollution: Persistence and degradation of spilled fuel oil. Science 176, 1120-1122.

Blumer, M. & J. Sass. 1972b. Indigenous and petroleum derived hydrocarbons in a polluted sediment. Mar.Pollut.Bull. 3, 92-94.

Blumer, M., M. Erhardt & J.H. Jones. 1973. The environmental fate of stranded crude oil. Deep Sea Res. 20, 239-260.

Boehm, P.D. & J.G. Quinn. 1973. Solubilization of hydrocarbons by the dissolved organic matter in sea-water. Geochim Cosmochim. Acta 37, 2459-2477.

Boesch, D.F., C.H. Hershner & J.H. Milgram. 1974. Oil spills and the marine environment. Ballinger Publishing Company. Cambridge, Mass., 114 pp.

Bourne, W.R.P. 1980. In South Africa Oiled Birds can be rehabilitated. Mar. Poll.Bull. 11, 26.

Brown, C.W. & P.F. Lynch. 1977. "Tanker Tragedies": Identifying the source and determining the fate of petroleum in the marine environment". In: 10^{e} Int. Conf. on Environmental Toxicity Rochester, N.Y., 23-25 mei 1977.

Brown, C.W., P.F. Lynch & M. Ahmadjian. 1978. "Chemical Analysis of Dispersed Oil in the Water Column", Chemical Disperdants for the Control of Oil Spills. ASTM STP 659, L.T. McCarthy, Jr., G.P. Lindblom and H.F. Walter, Eds., 182-202.

Burns, K.A. & J.N. Teal. 1979. The West-Falmouth oil spill: hydrocarbons in the salt marsh ecosystem. Est. & Coastal Marine Science 8, 349-361.

Burwood, R. & G.C. Speers. 1974. Photo-oxidation as a factor in the environment dispersal of crude oil. Est. and Coastal Mar.Sci. 2, 117-135.

Butler, J.N. 1976. "Transfer of petroleum residues from Sea to Air: Evaporative weathering. In: Marine Pollutant Transfer. ed.: Windom & Duce Lexington Book, 201-213.

Butler, M.J.A., F. Berkes & H. Powles. 1974. Biological aspects of oil pollution in the marine environment. A review. Marine Sciences Centre (MSC) Manuscript Report no. 22A.

Butler, J.N., B.F. Morris, T.D. Sleeter. 1976. The fate of petroleum in the open ocean. Uit: Procs.Symp. on sources, effects & sinks of hydrocarbons in the aquatic environment, Washington, 10 pp.

Butler, J.N. & E.M. Levy. 1978. Jongterm Fata of Petroleum Hydrocarbons After Spills. Compositional Changes and Microbial Degradation. J. Fish.Res.B. Can. 35, 604-605.

Cabioch, L., J. Dauvin & F. Gentil. 1978. Preliminary observation on pollution of the sea bed and disturbance of sublittoral communities on northern Brittany by oil from the Amoco Cadiz. Mar.Poll.Bull. 9, 303-307.

Cadée, G.C. & J. Hegeman. 1974a. Primary production of phytoplankton in the Dutch Wadden Sea. Neth.J.Sea.Res. 8, 240-259.

Cadée, G.C. & J. Hegeman. 1974b. Primary production on the benthic microflora living on tidal flats in the Dutch Wadden Sea. Neth.J.Sea.Res. 8, 260-291.

Canevari, G.P. 1975. In: proc. Joint Conf. on the Prev. and Control of Oil Pollution. San Fransisco, 337-342.

Chasse, C. 1978. The ecological impact on and near shores by the Amoco Cadiz oil spill. Mar.Poll.Bull. 9, 298-301.

Clark, R.B. & K.G. Gregory. 1971. Feather-wetting in cleaned birds. Mar.Poll. Bull. 2, 78-79.

Clark, R.B. 1973. Impact of chronic and acute oil pollution on seabirds. In: Workshop on Inputs, Fates and Effects of petroleum in the marine Envir. Airlie, Va, May 21-25, 1973, 619-634.

Clark, R.B. 1978. Oiled seabird rescue and conservation. J.Fish.Res.Board Can. 35, 675-678.

Conover, R.J. 1971. Some relations between zooplankton and Bunker C oil in Chedabucto Bay following the wreck of the tanker Arrow. J.Fish.Res.Board Can. 28, 1327-1330.

Cormack, D. & J.A. Nichols. 1977. The concentrations of oil in sea water resulting from natural and chemically induced dispersion of oil slicks. In: Proc. of the 1977 Oil Spill Conf. (Prevention, Behaviour, Control, Clean up) New. Orleans, Louisiana. A.P.I. Publ. no. 4284, pp. 381-385. A.P.I. Washington D.C.

Cormack, D. & J.A. Nichols. 1978. A system for the application of dispersants to the problems of oil spill clearance. In: Chemical dispersant for the control of oil spills. ASTM STP 659 (L.I. McCarthy, G.P. Lindblom & H.F. Walter eds.), 236-252.

Croxall, J.P. 1975. The effect of oil on nature conservation, especially birds. In: Cole (ed.) Petroleum & the Con.Shelf of N. -W. Europe, 1975. vol. 2(11), 10 pp.

Dam, J. van. 1967. The migration of hydrocarbons in a water-bearing stratum. In: Joint problems of the oil and water industries. Inst. of Petroleum London, 55-88.

Davis, J.E. & S.S. Anderson. 1976. Effects of oil pollution on breeding grey seals. Mar.Poll.Bull. 7, 115-118.

Delaune, R.D., G.A. Hambrick & W.H. Patrick. 1980. Degradation of hydrocarbons in oxidised and reduced sediments. Mar.Poll.Bull. 11, 103-106.

Dietz, D.N. 1971. Pollution of permeable strata by oil components. In: Water pollution by oil. Ed.: Hepple, 127-139. Elsevier, 393 pp.

Dodd, E.N. 1971. Report of Working Party on the effects of natural factors on the movement, dispersal and destruction of oil at sea. Ministry of Defence (Navy Department).

Dodd, E.N. 1974. Oils & Dispersants: Chemical Considerations. In: Beynon & Cowell Ecological Aspects of Toxicity Testing of Oils and dispersants.

D'Ozouville, L., E.R. Gundlach & M.O. Hayes. 1978. Effect of coastal processes on the distribution and persistence of oil spilled by the Amoco Cadiz. Publ. deCNexo série "Actes de Colloques" 6, 69-96.

Duinker, J.C., G.T. van Eck & R. Nolting. 1974. On the behaviour of Cu, Zn, Fe, Mn and evidence for mobilization processes in the Dutch Wadden Sea. Neth. J.Sea.Res. vol. 8, 214-239.

Engdahl, R. 1974. Discussion. In: Ecological aspect of toxicity testing of oils and dispersants. Ed. Beyon & Cowell, 87-95.

Farrington, J.W. 1977. The biogeochemistry of oil in the ocean. Oceanus 20(4), 4-16.

Foget, C.R., E. Schrier, M. Cramer & R. Castle. 1979. Manual of practice for protection and clean-up of shorelines. Volume I. Decision Guide. Volume II, Implementation Guide EPA-600/7-79-187a. U.S. Department of commerce Woodward-Clyde Consultants, San Francisco, CA.

Forrester, W.D. 1971. Distribution of suspended oil particles following the grounding of the tanker Arrow. J.Mar.Res. 29, 151-170.

Gerlach, S.A. (ed.). 1978. Meereskundliche untersuchung von Olunfällen.Arbeitsgruppe zur Meereskundlichte untersuchung von ölunfällen. Inst.für Meeresforschung Bremerhaven, mrt. 1978.

GESAMP. 1977. Report and studies no. 6. Impact of oil on the marine environment. FAO of the United Nations, 238 pp.

Gibbs, C.F., K.B. Pugh & A.R. Andrews. 1975. Quantitative studies on marine biodegradation of oil II. Effect of temperature. Proc.R.Soc.B. 188, 83-94.

Giere, O. 1979. The impact of oil pollution on intertidal meiofauna. Field studies after the La Coruna-spill. mei 1976. Cah. Biol.Mar. 20, 231-251.

Goldberg, E.D. 1972. Baseline Studies of Pollutants in the marine environment and research recommendations: The IDOE Baseline Conference, May 24-26, 1972, New York, 54 pp.

Gordon, D.C. Jr., P.D. Keiser & N.J. Prouse. 1973. Laboratory studies of the accomodation of some crude and residual fuel oils in sea water. J.Fish.Res. Board Can. 30, 1611-1618.

Gordon, D.C. Jr., J. Dale & P.D. Keiser. 1978. importance of sediment working by the deposit-feeding polychaete Arenicola marine on the weathering rate of sediment-bound oil. J.Fish.Res.Board Can. 35, 591-603.

Grahl-Nielsen, O.G., J.T. Staveland & S. Wilhelmsen. 1978. Aromatic hydrocarbons in benthic organisms from coastal areas polluted by irianian crude oil. J.Fish.Res.Board Canada 35 (1978), 5, 615-623.

Gundlach, E.R. & M.O. Hayes. 1978. Vulnerability of coastal environments to oil spill impacts. Marine Techn.Soc.J. 12, 18-27.

Gundlach, E.R., M.O. Hayes, C.H. Ruby, S.G. Ward, A.E. Blount, I.A. Fischer & R.J. Stein. 1978. Some Guidelines for Oil-Spill COntrol in Coastal Environments, Based on Field Studies of Four Oil Spills, Chemical Dispersants for the Control of Oil Spills. ASTM STP 659. L.T. McCarthy, Jr. G.P. Lindblom & H.F. Walter, Eds., American Society for Testing and Materials, 98-118.

Gunkel, W. & G. Gassmann. 1980. Oil, oil dispersants and related substances in the marine environment. Helg. Meeresunters. 33, 164-181.

Guyomarch, J. & J. Mounat. 1978. Caractéristiques et comportement du pétrole déversé à la mer. In: Penn ar Bed 11(93), 299-311.

Hagström, A. 1977. The fate of oil in a model ecosystem. Ambio 6, 229-231.

Hansen, H.P. 1975. Photochemical degradation of petroleum hydrocarbons surface films on seawater. Mar.Chem. 3, 183-195.

Harris, G.W. & P.G. Wells. 1979. A laboratory study on the adhesion of crude oil to beach sand in the presence of a dispergent. Spill.Techn.Newsletter, sept.-okt. 1979, 293-298.

Holme, N.A. 1978. Notes on the condition in september 1978 of some intridial sands polluted by Amoco Cadiz oil. Mar.Poll.Bull. 9, 302.

Hughes, D.E. & P. McKenzie. 1975. The microbial degradation of oil on the sea. Proc.R.Soc.B. 189, 375-390.

Hughes, J. 1979. Cleaning oiled birds. Mar.Poll.Bull. 10, 311.

Hulscher, J.B. 1975. Het wad, een overvloedig of schaars gedekte tafel voor vogels? In C. Swennen, P.A.W.J. de Wilde & J. Haeck (ed.). Symposium Waddenonderzoek, Arnhem.

Hyland, J.L. 1978. Onshore survey of macrobenthos along the brittany coast following the Amoco Cadiz oil spill. Ui: Conan & d'Ozouville: Publ. du C.N.E.X.O., Série "Actes de Colloques" (1978) 6, 175-192.

Jacobs, R.P.W.M. 1979. De stranding van de "Amoco Cadiz" en de gevolgen voor het leven in zee. In: Olieverontreiniging op zee. Lab.Aq.Oecologie, Nijmegen.

Jager, S. de & Th. Belterman. 1970. Treatment of oiled Eidenduck in Holland. Mar.Poll.Bull. 1, 156-157.

Jasper, W.L., T.J. Kim & M.P. Wilson. 1978. Drop Size Distribution in a treated oil-water system. In: Chemical Dispersants for the control of oil spills. Ed.: McCarthy, Lindblom & Walter 203-216.

Johnson, J.C., C.D. McAuliffe & R.A. Brown. 1978. "Physical and Chemical Behavior of Small Crude Oil Slicks on the Ocean", Chemical Disperdants for the Control of Oil Spills, ASTM STP 659, L.T. McCarthy, Jr., G.P. Lindblom & H.F. Walter, Eds., American Society for Testing and Materials, 141-158.

Johnston, R. 1970. The decomposition of crude oil residues in sand columus. J.Mar.biol.Ass.U.K., 50, 925-937.

Keizer, P.D., T.P. Ahern, J. Dale & J.H. VanderMeulen. 1978. Residues of Bunker C oil in Chedabucto Bay. Nova Scotia. 6 years after the Arrow spill. J.Fish. Res.Board Can. 35, 528-535.

Kooyman, G.L., R.W. Davis & M.A. Castellini. 1977. Thermal conductance of immerse prinniped and sea other pelts before and afteroiling with Prudhoe bay crude. In: D.A. Wolfe (ed.). Fate and effects of petroleum hydrocarbons in marine organisms and ecosystems, 151-157.

Koski, W.R. & W.J. Richardson. 1976. Review of waterbird deternent and dispersal systems for oil spills. Pet.Ass. for Conserv. of Can.Envir. Ottawa, dec. 1976, 90 pp.

Krebs, C. & K.A. Burns. 1977. Long term effects of an oil spill on populations of the salt marsh crab Uca pugnax. Science 197, 484-487.

Laubier, L. 1985. The Amoco Cadiz oil spill - lines - of study and early observations. Mar.Poll.Bull. 9, 285-287.

Law, R.J. 1978. Petroleum hydrocarbon analyses conducted following the wreck of the supertanker Amoco Cadiz. Mar.Poll.Bull. 9, 293-296.

Law, R.J. & A.L. Hall. 1978. Preliminary results of recent oil spill investigations. The wreck of the "Eleni V". Ices 1978/E: 21 pp.

Lee, R.F. 1976. Metabolism of petroleum hydrocarbons in marine sediments. In: Procs.Symp. on sources effects & sinks of hydrocarbons in the aquatic environment, Washington.

Lee, R.F., R. Sauerheber & A.A. Benson. 1972. Petroleum hydrocarbons: uptake and discharge by the marine mussel Mytilis edulis. Science 177, 344-346.

Lee, R.F., E. Furlong & S. Singer. 1977. Metabolism of hydrocarbons in marine invertebrates. In: Giam: Pollutant effects on marine organisms, Chapter 7, 8 pp.

Lee, R.F., M. Takahashi, J.R. Beers, W.H. Thomas, D.L.R. Seibert, P. Koeller & D.R. Green. 1977. Controlled ecosystems: their use in the study of the effects of petroleum hydrocarbons on plankton. In: Pollution and Physiologie of Marine Organisms. (ed. I. Vernberg & A. Calabrese), New York: Academic Press.

Lee, W.Y., K. Winters & J.A. Nicol. 1978. The biological effects on the water-soluble fractions of a no. 2 fuel oil on the planctonic shrimp Lucifer faoni. Environm.Poll. 15, 167-184.

Leppakoski, E. 1973. Effects of an oil spill in the northern Baltic. Mar.Poll. Bull. 4, 93-94.

Levell, D. 1976. The effect of Kuwait crude oil and BP 1100 on the lugworm A. marina. In: Baker, J.M. (ed.). Marine ecology and oil pollution John Wiley, New York, 131-185.

Linden, A.C. van der. 1978. Degradation of oil in the marine environment. In: Watkinson (ed.): Developments in biodegradation of hydrocarbons, part 1, 19 pp.

Linden, O., R. Elmgren & P. Boehm. 1979. The Tsesis Oil Spill: its Impact on the Coastal Ecosystem of the Baltic Sea. Ambio 8, 244-253.

Mayo, D.W., D.J. Donavan & L. Jiang. 1974. Longterm weathering characteristics of Iranian crude oil: the weck of the Northern Gulf. Proc.Mar.Poll.Mon. (Petroleum) Symp. Gaithersburg, Md, mei 13-17, 1974. IOC-UNESCO, WMO. NBS no. 409, 201-208.

Mayo, D.W., D.S. Page, J. Cooley, E. Sorenson, F. Bradley, E.S. Gilfillan & S.A. Hanson. 1978. Weathering characteristics of petroleum hydrocarbons desposited in fine clay marine sediments. Searsport, Maine, J.Fish.Res. Board Can. 35, 552-562.

McAuliffe, C.D., A.E. Smalley, R.D. Groover, W.M. Welsh, W.S. Pickle & G.E. Jones. 1975. Chevron Marin Pass Block 41 Oil Spill: Chemical & Biological Investigations pp. 555-566. In! Proc. of 1975. Oil Spill Conf. A.P.I. Washington.

McCarthy, L.T., G.P. Lindblom & H.F. Walter. 1978. Chemical dispersants for the control of oil spills. Symp.Am.Soc. Testing of Materials. Publ. 65, 307 pp.

McIntyre, A.D., A.L.S. Monro & J.H. Stelle. 1970. Energy flow in a sand ecosystem. Marine Food Chains Univ. of Cal.Press., Berkely, California, 19-31.

Menagie, H.M. 1979. Het bestrijden van olieverontreiniging op de Noordzee (I) + (II). Otar 64, 6/7, 17 pp.

Mommaerts-Billiet, Frieda. 1973. Growth and toxicity tests on the marine nanoplanktonic alga Platymonas tetrahele G.S. West in the presence of crude oil and emulsifiers. Environm.Poll. vol. 4, 261-282.

Morris, B.F. 1976. The environmental fates of petroleum in marine waters. 2e IOC/WMO workshop on Marine Pollution Monaco, 14-18 June, 1976. Unesco document IOC-WMO/MPMSW-II/L2.

Mulkins-Philips, G.J. & J.E. Stewart. 1974. Effect of environmental parameters on bacterial degradation of Bunker C oils and hydrocarbons. Appl. Microbiol. 28, 915-922.

Naess, A. 1979. The mixing of oil spills into the sea by breaking waves. Norw. Shipp. N. 2, 35-43.

Naidu, A.S., H.M. Feder & S.A. Norrell. The effect by Prudhoe Bay crude oil on a tidal-flat ecosystem in Port Valdez, Alaska. Uit! Procs. 10th Ann. Offsh.Technol.Conf., Houston, 1 (1978) OTC 3055, 8 pp.

N.A.M. 1981. Gevolgen van een leidinglek voor het Waddengebied. N.A.M. rapport, nov. 1981.

Nelson-Smith, A. 1970. Effects of oil on marine plants and animals. Uit: Congress Water Pollution by Oil, Aviemore, paper 23, 8 pp.

Nelson-Smith, A. 1972. Oil Pollution and Marine Ecology. Publ.: Paul Elek (Scientific Books) LTD. London. 241 pp.

Nelson-Smith, A. 1977. Biological consequences of oil spills. Uit: Lenihan & Fletcher: The marine environment, chapter 2, 12 pp.

Nelson-Smith, A. 1978. Effects of Dispersants Use on Shore Life, Chemical Dispersants for the Control of Oil Spills. ASTM STP 659, L.T. McCarthy, Jr., G.P. Lindblom & H.F. Walter, Eds., American Society for Testing and Materials, 253-265.

Notini, M. 1978. Long-term effects of an oil spill on Fucus macrofauna in a small Baltic bay. J.Fish.Res.Board Cam. 35, 745-753.

Odu, C.T.I. 1978. The effect of nutrient application and aeration on oil degradation in soil. Environm.Poll. vol. 15, 235-240.

Otto, L. 1973. Environmental factors in operations combating oil spills. Report no. 9.

Owens, E.H. 1978. Mechanical dispersal of oil stranded in the littoral zone. J.Fish.Res.Board Can. 35, 563-572.

Parker, C.A., M. Freegarde, C.G. Hatchard. 1970. The effect of some chemical and biological factors on the degradation of crude oil at sea. In: P. Hepple (ed.). Congress Water Pollution by Oil, Aviemore, paper 17, 237-244.

Pierce, R.H., A.M. Cundell & R.W. Traxler. 1975. Persistence and biodegradation of spilled residual fuel oil on an estuariene beach. Appl.Microbiol. 29, 646-652.

Pilpel, N. 1968. The natural fate of oil on the sea. Endeavour 27, 11-13.

Poley, J.Ph. 1979. Oliesamenstelling en kustvervuilingsrisiko's. In: Olieverontreiniging op zee. Lab. voor Aq. Oecologie, Nijmegen, 65-81.

Postma, H. 1961. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. Neth.J.Sea.Res. 1, 148-190.

Postma, H. 1982. Hydrography of the Wadden Sea: movements and properties of water and particulate matter. Balkema, Rotterdam, 75 pp.

Prokop, J.F. 1950. A study of the microbial decomposition of crude oil. Texas A & M Research Foundation.

Randall, R.M., B.M. Randall & J. Bevan. 1980. Oil pollution and penguins is cleaning justified. Mar.Poll.Bull. 11, 234-238.

Rapport van de Waddenzeecommissie. Staatsuitgeverij, Den Haag, 324 pp.

Rashid, M.A. 1974. Degradation of Bunker C oil under different coastal environments of Chedabucto Bay, Nova Scotia, Estuarine Coastal Mar.Sci. 2, 137-144.

Reijnders, P.J.H. 1976. The harbour seal (Phoca vitulina) population in the Dutch Wadden Sea. Neth.J.Sea.Res. 10, 223-235.

Reijnders, P.J.H. 1978. Recruitment in the harbour seal (Phoca vitulina) population in the Dutch Wadden Sea. Neth.J.Sea.Res. 12, 164-179.

Rossi, S.S., J.W. Anderson & G.S. Ward. 1976. Toxicity of water-soluble fractions of four test oils for the polychaetous annelids, Neanthes arenaceodentata and Capitella capitata. Environ.Pollut. 10, 9-18.

R.S.U. 1980. Umweltprobleme der Nordsee. Der Rat von Sachverständiger für Umweltfragen - Sondergut achten juni 1980. Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart a. Main, 503 pp.

Rijkswaterstaat. 1974. Shell Herder Trials. Rapport, 24 pp.

Rijkswaterstaat. 1976. Olievervuilingsonderzoek Balgzand. Meetverslag A 76.21/ memo 077.5, 10 pp.

Rijkswaterstaat. 1977. Olievervuilingsonderzoek Balgzand. Meetverslag A 76.21/ memo 77.5, 10 pp.

Rijkswaterstaat. 1978. Waterbeweging in aanlopen en buitendelta's van de zeegaten van de Waddenzee. Rapport H78 058.

Rijkswaterstaat. 1979. Bestrijding olieverontreiniging Waddenzee. Rapport Dir.Gron. Fr. en N-Holland, deel 1, 16 pp.

Rijkswaterstaat. 1979. Oliebestrijding op de Noordzee. Rapport NZ-R-78.008, 53 pp.

Scarratt, D.J. & V. Zitko. 1972. Bunker C oil in sediments and benthic animal from shallow depths in Chedabucto Bay, N.S. J.Fish.Res.Board Can. 29, 1347-1350.

Shelton, T.B. & J.V. Hunter. 1975. Anaerobic decomposition of oil in bottom sediments. Water Poll. C.F. 47, 2256-2270.

Smit, C.J. & W.J. Wolff. 1980. Birds of the Wadden Sea. Balkema, Rotterdam. 308 pp.

Southward, A.J. & E.C. Southward. 1978. Recolonization of rocky shores in Cornwall after use of toxic dispersants to clean up the Torrey Canyon spill. J.Fish.Res.Board Can.35, 682-706.

Spooner, M.F. 1970. Oil spill in Taruk Bay Saudi Arabia. Mar.Poll.Bull. 1, 166-167.

Spooner, M.F. (ed.). 1978. Amoco Cadiz oil spill. Editorial Introduction. Mar.Poll.Bull. 9, 281-311.

Standring, K. 1979. Marine oil pollution and seabirds. Proc.symp. Werkgroep Noordzee, okt. 1979. Den Haag.

Stewart, J.E. & L.J. Marks. 1978. Distribution and abundance of hydrocarbon-utilizing bacteria in sediments of Chedabucto Bay, Nova Scotia, in 1976. J.Fish.Res.Board Can. 35, 581-584.

Swennen, C. & A.L. SPaans. 1970. De sterfte van zeevogels door olie in februari 1969 in het Waddengebied. Het Vogeljaar 18, 233-245.

Swennen, C. 1977. Laboratory research on seabirds. Report on a practical investigation into the possibility of keeping seabirds for research purposes. NIOZ, Texel, 44 pp.

Taylor, T.L. & J.F. Karinen. 1977. Response of Macoma balthica, exposed to Prudhoe bay crude oil as unmixed oil, water soluble fraction and oil-contaminated sediment in the laboratory. In: D.A. Wolfe. Fate and effects of petroleum hydrocarbons in marine organisms and ecosystems, 229-238.

Teal, J.M.K., Burns & J. Farrington. 1978. Analyses of aromatic hydrocarbons in interdial sediments resulting from two spills of No. 2 fuel oil in Buzzards Bay, Massachusetts. J.Fish.Res. Board Can. 35, 510-520.

Thuer, M. & W. Stumm. 1977. Sedimentation of dispersed oil in surface waters. Prog.Wat.Tech.Vol. 9, 183-194.

Traxler, R.W. & L.S. Bhattacharya. 1978. Effect of a chemical dispersant on microbial utilization of Petroleum hydrocarbons. In: McCarthy, Lindblom & Walter (eds.), chemical dispersants for the control of oil spills, 181-187.

VanderMeulen, J.H. & D.C. Gordon, jr. 1976. Recentry of 5 years old stranded Bunker C fuel oil from a low energy beach into the water, sediments and Biota of Chedabucto Bay, Nova Scotia. J.Fish.Res.Board Can. 33, 2002-2010.

VanderMeulen, J.H., D.E. Buckley, E.M. Levy, F.N. Long, P. McLaren & P. Wells. 1977. Sediment penetration of Amoco Cadiz oil, Potential for future release, and toxicity. Mar.Poll.Bull. 9, 292-293.

Verwey, J. 1952. On the ecology and distribution of cockle and mussel in the Dutch Wadden Sea their role in sedimentation and the source of their food supply. Arch.Neerl.Zool. 10, 172-239.

Wade, T.L. & J.G. Quinn. 1980. Incorporation, distribution and fata of saturated petroleum hydrocarbons in sediments from controlled marine ecosystems. Mar.Environm.Res. 3, 15-33.

Ward, A.P. & J.M. Davies. 1978. A comparison of the rates of transport of oil, from surface slicks and from oil dispersed into the water column to the bottom sediments. ICES CM 1978/E, 35, 18 pp.

Williams, A.S., S.H. Brundage & E. Anderson e.a. International bird rescue center.

Wolfe, D.A. 1978. The Amoco Cadiz oil spill. A summary of observations made by U.A. Scientists. March - 10 May, 1978. Mar.Poll.Bull. 9, 288-292.

Wolff, W.J. 1976. A benthic food budget for the Grevelingen estuary. The Netherlands. In: B.C. Coull (ed.) - Ecology of Marine Benthos - Belle W. Baruch Library in Marine Science, Columbia, 267-280.

Wolff, W.J. & L. de Wolf. 1977. Biomass and production of zoobenthos in the Grevelingen estuary, The Netherlands. Coastal Estuarine Mar.Sci. 5, 1-24.

Zimmerman, J.T.F. 1976. Mixing and flushing of tidal embayments in the western Dutch Wadden Sea. Neth.J.Sea.Res. 10, 149-191, 397-439.

Zobell, C.E. 1963. The occurrence,effects and fate of oil polluting the sea. Int.J.Air.Wat.Poll. 7, 173-198.

Zobell, C.E. 1969. Microbial modefication of crude oil in the sea. In: Proc. Joint on Prevention and Control of Oil spills. API-FWPCA New York 69, API-publication, New York, 317-326.

Zobell, C.E. & J.F. Prokop. 1966. Microbial oxidation of mineral oils in Barataria Bay bottom deposits. Z.all.Microbiol. 6, 143-162.

Zijlstra, J.J. 1978. The function of the Wadden Sea for the members of its fish-fauna. In: N. Dankers, W.J. Wolff & J.J. Zijlstra (eds.). Fish and fisheries of the Wadden Sea, 20-25.