

# Lage zuurstofgehaltenes in het water op het Balgzand

## Inleiding

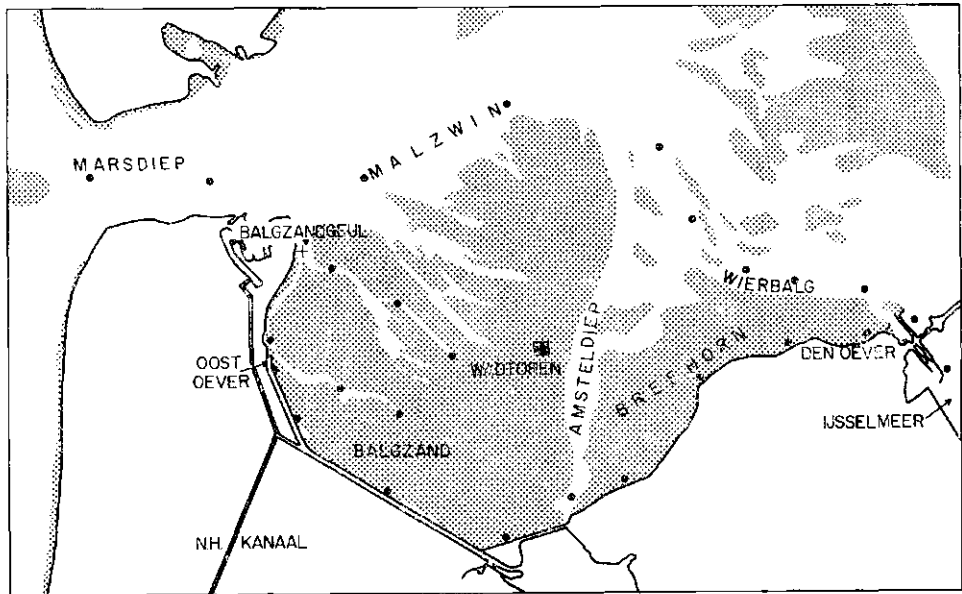
Op 26 augustus jl. werd, tijdens de oceanografische cursus van het Nederlands Instituut voor Onderzoek der Zee, als veldwerkproject het Balgzand (afb. 1) gedetailleerd bemonsterd. Een opvallend resultaat waren de zeer lage zuurstofgehaltenes in het water, gemiddeld over een getijperiode 66 % van de verzadigingswaarde, minimum 38 %. Hoewel het hier incidentele waarnemingen betreft, lijkt het toch zinvol dit feit te signaleren en iets dieper in te gaan op de zuurstofdynamiek (het gaat bij een



S. B. TIJSSEN  
Nederlands Instituut voor  
Onderzoek der Zee, Texel



A. J. VAN BENNEKOM  
Nederlands Instituut voor  
Onderzoek der Zee, Texel



Afb. 1 - Overzichtskaart van het Balgzand en omgeving. De zwarte stippen geven de posities aan waar watermonsters genomen werden, + is de plaats van het ankerstation. Bij Oostoever, uit het Noord Hollands Kanaal en bij Den Oever wordt zoet water gespuid. Het gearceerde gebied valt droog bij LLWS.

(het gevolg van deze accumulatie!) die zelf ook weer bijdraagt tot dit accumulatieproces: mosselen filteren het water; andere schelpdieren en wormen grazen de bodem af. Door deze accumulatie heeft eutrofiëring, veroorzaakt door de steeds stijgende concentraties aan voedingsstoffen in de Rijn (afb. 2) en andere afvalstromen, gevolgen juist voor de Waddenzee (Postma, 1975), ook als het maximum in de primaire productie op de Noordzee op enige afstand uit de kust gevonden wordt (Gieskes en Kraay, 1975).

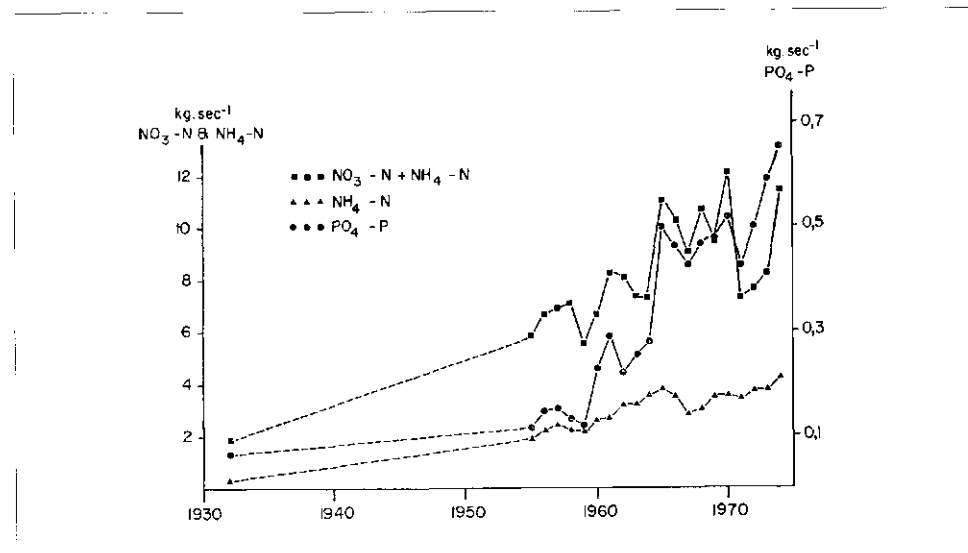
## De metingen op 26 augustus

### Bemonstering en methoden

Het Balgzand met de monsterpunten is weergegeven in fig. 1 Volgens gegevens van de Studiedienst Hoorn van Rijkswaterstaat is het 'natte' oppervlak 72,8 km<sup>2</sup> bij hoog water en 22,5 km<sup>2</sup> bij gemiddeld laag water.

De waterberging op deze tijdstippen is 94.10<sup>6</sup> en 18.10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>. Uit de waterstandskromme van 26 augustus van de peilschrijver te Oostoever (verstrekkt door Rijks

Afb. 2 - De — jaarlijks gemiddelde — belasting van de Rijn te Lobith met opgeloste, anorganische voedingszouten in het tijdvak 1932-1974. Metingen RIZA. Naar gegevens uit de 'Zahlentafeln der phys.-chem. Untersuchungen des Rheins sowie der Mosel'. Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung, Koblenz.



elementaire levensbehoefte als zuurstof zowel om gemiddelden als om extremen). In de kinderkamerfunctie van de Waddenzee speelt het Balgzand een belangrijke rol. De dichtheid van schol is hier veel groter dan op andere platen in de westelijke Waddenzee (persoonlijke mededeling Posthuma, RIVO).

In de westelijke Waddenzee zijn in 1963 op uitgebreide schaal zuurstofconcentraties gemeten (de Groot & Postma, 1968).

De verzadigingspercentages lagen in het algemeen onder de 100 % (minimum 66 %); op het Balgzand (één waarnemingsserie, 2-10-1963) werd een range van 85 - 97 % gevonden. Onderverzadiging wordt veroorzaakt doordat in de Waddenzee meer organisch materiaal wordt 'verwerkt' dan ter plaatse door algen wordt geproduceerd. Het mechanisme achter deze accumulatie van organisch stof is tweeledig: op de bodem liggende deeltjes zullen pas bij een grotere stroomsnelheid worden opgewoeld dan waarbij ze zijn bezonken toen hun valsnelheid de door het getij periodiek veranderende turbulente verticale menging overwon. Stroomsnelheden worden naar de oevers toe steeds kleiner, dus daar zal zich fijn materiaal ophopen, aangevoerd uit het IJsselmeer en uit de Noordzee, waar de zuurstofconcentraties in de zomer boven de 100 % liggen (Tijssen, 1968, 1969, 1970), d.w.z. meer productie dan mineralisatie.

Ten tweede is er een rijke bodemfauna

waterstaat te Den Helder) volgt een gemiddelde waterstand van NAP -19 cm, gemeten over de getijperiode tussen twee hoog waters (10.45 tot 22.00 uur). Dit betekent een gemiddelde waterdiepte over die periode van 86 cm.

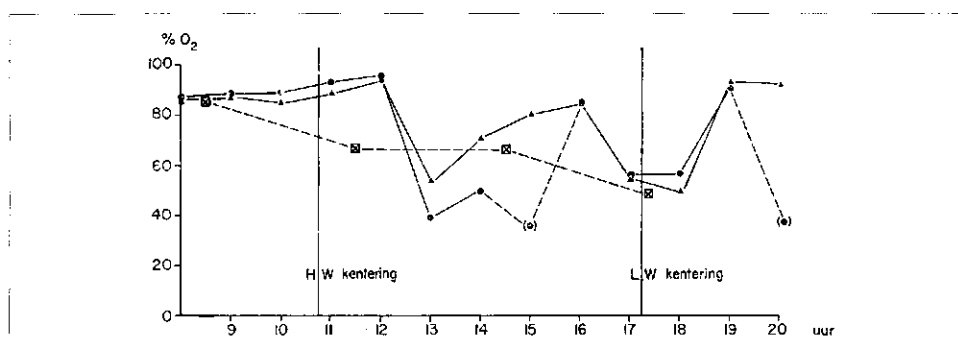
Op het ankerstation werden van 8.00 tot 20.00 uur uurlijks watermonsters van oppervlak en bodem genomen. Omstreeks 8.30, 11.30 (hoog waterkentering), 14.30 en 17.30 (laag waterkentering) bemonsterde een rubberboot het Balgzand. In de watermonsters bepaalden we de temperatuur tot op 0,1 °C, het zoutgehalte tot op 0,01 ‰ S en het zuurstofgehalte met de Winklermethode (nauwkeurigheid ca. 0,5 ‰). Tevens werden NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P en H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> op een Technicon autoanalyser bepaald in over membraamfilters met 0,45 µ poriën gefiltreerd water. Op het ankerstation werd de primaire productie in de waterkolom bepaald, bij de wadtoeren zowel de primaire productie in de waterkolom als die van op en in de bodem levende algen, alles met de C14 methode. Op het ankerstation is het zo diep en zo troebel dat de bodem geen rol speelt.

**Resultaten**

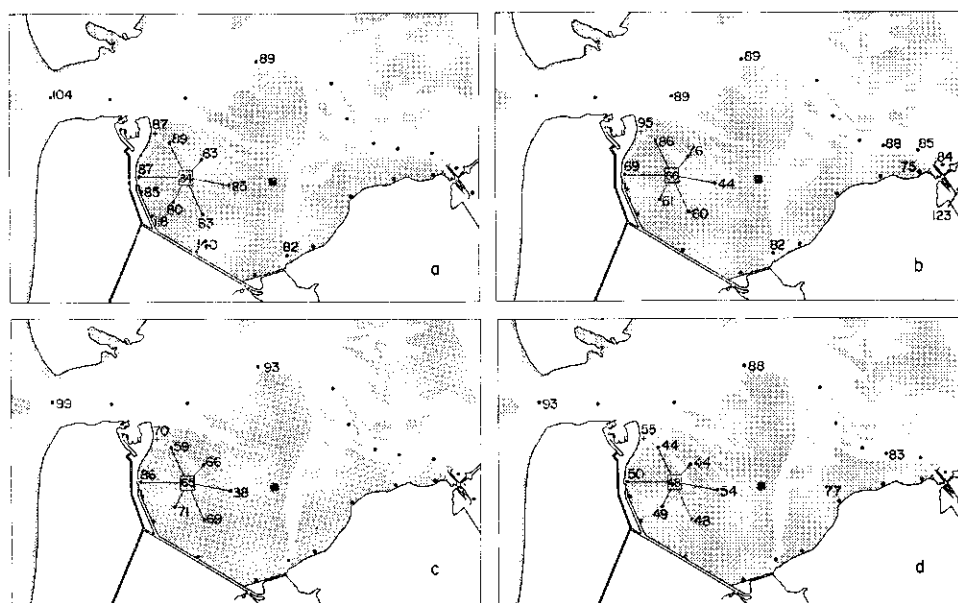
26 augustus was een zonnige dag (lichtinstraling 2094 J/cm<sup>2</sup>, ongeveer maximaal voor de tijd van het jaar) met weinig wind (gemiddeld 2 m/sec. uit Noord tot Noordoost). (Gegevens KNMI, post Den Helder — de Kooy). Enkele gegevens over de watersamenstelling staan in de tabel, het dunne laagje water op het Balgzand warmt 3 °C op; het zoete water dat met laag water verantwoordelijk is voor de daling van de zoutgehaltes komt uit het IJsselmeer: op 22 augustus was voor het laatst gespuid. De zuurstofverzadigingspercentages zijn weergegeven in afb. 3 en 4. Op het Balgzand zijn, zoals verwacht, de percentages het laagst tijdens laag water. Met hoog water heeft zich water uit het Marsdiep met veel hoger zuurstofgehalte over het Balgzand uitgebreid. Toch worden tijdens hoog water al plekken met laag zuurstofgehalte gevonden. De 'getijgang' vertoont twee uitgesproken minima, één omstreeks laag water, wanneer het 'Balgzandwater' tot dicht bij de hoofdgeulen is afgestroomd en één omstreeks twee uur na hoog water. Dit verschijnsel is ook bij eerdere metingen in de Balgzandgeul geconstateerd (16 en 23 september 1969, toen was de getijgang in zuurstofgehaltes veel kleiner, 80 - 104 %). Kennelijk is op het Balgzand sprake van lokale stroomwervels van beperkte omvang, zoals ook door Zimmerman (1974) nabij een wad zijn gevonden. We beschikken over veel te weinig stroommetingen om het stroompatroon op

	Marsdiepwater	Balgzandwater
watertemperatuur °C	18,9 - 19,7	20,8 - 22
zoutgehalte ‰ S	29,8 - 30,5	26,1 - 27,5
alle gehalten in 10 <sup>-6</sup> M		
PO <sub>4</sub> -P	2,6 ( 2,2 - 3,7 )	6,0 ( 4 - 8 )
NH <sub>4</sub> -N	17 ( 13 - 23 )	41 ( 38 - 46 )
NO <sub>2</sub> -N	1,9 ( 1,8 - 2,0 )	5,4 ( 3 - 8 )
NO <sub>3</sub> -N	4,5 ( 4,1 - 6,4 )	11,5 ( 5,5 - 17,5 )
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub>	1,2 ( 0,1 - 3,0 )	60 ( 22 - 95 )
O <sub>2</sub> (µ gat l <sup>-1</sup> )	434 (410 - 463 )	227 (210 - 254 )

Gemiddelden en variaties in de watermassa's die de processen op het Balgzand bepalen. 'Marsdiepwater': Oppervlakte en bodem waarnemingen op het ankerstation bij vloed, 8.00 - 12.00 en 18.00 en 19.00 uur [14]. 'Balgzandwater': Rubberboot waarnemingen van 17.30 uur, laag waterkentering [6].



Afb. 3 - Zuurstofgehaltes op het Balgzand op 26 augustus 1975. ● en ▲, uurlijks gemeten gehalten in de Balgzandgeul op het ankerstation in het oppervlaktewater en op 10 m diepte. (●) minder waarschijnlijke waarnemingen. × gemiddelde gehalten op het Balgzand gemeten (zie ook afb. 4).



Afb. 4 - Zuurstofgehalteverdeling op het Balgzand en in de naaste omgeving. a. tijdens vloed (08.02 - 09.00 h); b. rond HW kentering (11.00 - 11.46 h); c. tijdens eb (14.05 - 14.50 h); d. rond LW kentering (17.00 - 17.40 h); □ gemiddeld zuurstofgehalte.

het Balgzand gedetailleerd te beschrijven. Wel valt uit de op het ankerstation gemeten stroomsnelheden af te leiden dat het 11.30 uur gemeten minimum van 44 % omstreeks 13.00 uur langs het ankerstation zou kunnen passeren. Ook de op de wadtoeren gevonden stroomrichting is daarmee in overeenstemming. Een diepgaande interpretatie van de

voedingsstoffencijfers valt buiten het kader van dit artikel, daarvoor zijn cijfers over een heel jaar vereist. Vergelijking van de cijfers uit de tabel met een jaarstudie over een groter gebied (Postma en Van Bennekom, 1974) leert wel dat de voedingsstoffenwaarden op het Balgzand veel hoger zijn dan in andere

delen van de Waddenzee. Een uitzondering vormt de Dollard waar  $\text{NH}_4\text{-N}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}$  en  $\text{O}_2$  in de zomerperiode vóór de aardappel-campagne, dezelfde grootte-orde hebben als op het Balgzand.

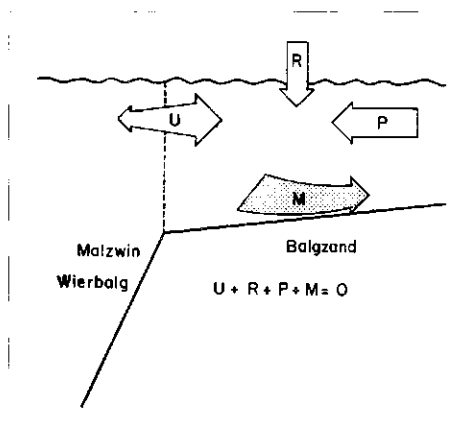
Uit vergelijking van Balgzandwater en Marsdiepwater blijkt dat op het Balgzand  $\text{PO}_4\text{-P}$ ,  $\text{NH}_4\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NO}_3\text{-N}$  en  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  vrijkomen in de atomaire verhouding 1:10:17,5. Ten opzichte van de diepere gedeelten van de Noordzee — waar een verhouding van 1:14:7 geldt — wordt op het Balgzand relatief veel meer  $\text{SiO}_2$  gemineraliseerd. Dit is interessant als we bedenken dat in het Noordzee-kustwater juist  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  de beperkende factor voor diatomeëngroei is (Van Bennekom, Gieskes en Tijssen, 1975). Zie ook de zeer lage concentraties  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  in het Marsdiepwater.

#### Het zuurstofbudget

Het zuurstofgehalte van buitenwater, uitgedrukt als percentage van de verzadigingswaarde, is, als afgezien wordt van snelle temperatuurveranderingen, een indicator voor de onderlinge verhouding tussen *primaire produktie* door algen, waarbij  $\text{CO}_2$  wordt vastgelegd in organische stof en  $\text{O}_2$  vrijkomt en *mineralisatie*, waarbij organische stof wordt geoxydeerd met behulp van zuurstof. Bij gehalten boven 100 % wordt meer geproduceerd dan verbruikt, onder de 100 % omgekeerd. Bij onderverzadigd water treedt *reaeratie* vanuit de atmosfeer op. De grootte van dit zuurstoftransport hangt af van de mate van onderverzadiging en van de toestand van het wateroppervlak (wind!); het effect op de zuurstofconcentratie hangt af van de waterdiepte. In een gebied als de Waddenzee met aanzienlijke verschillen in waterdiepte, stroomsnelheden, dichtheid van dieren en producerende algen, kunnen lokaal zeer verschillende zuurstofgehalten ontstaan.

Dit leidt tot een vierde proces dat de zuurstofconcentratie in een bepaald zeegebied beïnvloedt, nl. *menging van watermassa's* van verschillende herkomst. De energie voor dit mengproces wordt geleverd door de getijstroom, die het water niet alleen heen en weer beweegt maar ook, door de ingewikkelde topografie met geulen en platen, zorgt voor turbulente uitwisseling van bijv. geulwater met water dat boven de platen heeft gestaan. Informatie is nodig over de verblijftijd van het water in een bepaald gebied. Deze verblijftijden zijn niet overal gelijk; het water in baaien als het Balgzand en op wantijen (grens tussen twee kombergingsgebieden) heeft een grotere verblijftijd dan in een meer open gelegen gebied van vergelijkbare grootte (Zimmerman, 1974).

De verschillende termen (zie afb. 5) kunnen



Afb. 5 - De zuurstofkringloop op het Balgzand schematisch voorgesteld. U, R en P zijn de positieve zuurstofaanvoeren door waterverversing, reaeratie en primaire produktie; M is de negatieve zuurstofaanvoer door mineralisatie van organische stof.

uiteraard slechts zeer globaal benaderd worden.

**Reaeratie:** De flux  $F$  door het oppervlak is evenredig met de onderverzadiging, in formule

$$F = k (C_{\text{sat}} - C)$$

Onder omstandigheden met weinig wind kan voor  $k$   $0,5 \text{ dm h}^{-1}$  genomen worden (De Groot & Postma, 1968). Met de gemiddelde onderverzadiging van de rubberbootwaarnemingen (66 %) en de gemiddelde waterdiepte van 8,6 dm vinden we gedurende een getijperiode van 12,5 uur een toename van de zuurstofconcentratie met  $120 \mu\text{gat l}^{-1}$ .

**Primaire produktie:** Over een periode van 14 uur (daglengte) werd  $800 \text{ mg C m}^{-2}$  vastgelegd. Gezien de voedingsstoffenverhoudingen is het logisch te veronderstellen dat  $\text{NH}_4\text{-N}$  de stikstofbron vormt, in dat geval is de verhouding tussen vrijgekomen zuurstof en vastgelegde koolstof 1,2 terwijl de zo berekende hoeveelheid beschouwd moet worden als de *netto* produktie (Ryther, 1956). Gemiddeld over de waterkolom levert dit  $170 \mu\text{gat O}_2 \text{ l}^{-1}$  getij $^{-1}$ .

**Waterverversing:** Het verschil in de gemiddelde gehalten van vloedwater dat het Balgzand opstroomt en van het water dat bij laag water op het Balgzand achterblijft is  $207 \mu\text{gat l}^{-1}$ . Dit getal is pas te vergelijken met de andere termen uit de zuurstofbalans als gedeeld wordt door de verblijftijd van het water op het Balgzand, die moeilijk te schatten is, waarschijnlijk 2 à 4 getijperiodes. De totale zuurstoftoevoer wordt dan  $340$  à  $390 \mu\text{gat}^{-1}$  getij $^{-1}$ , terwijl gemiddeld over de dag zo'n  $360 \mu\text{gat l}^{-1}$  aanwezig is.

De mechanismes die het zuurstofevenwicht

op het Balgzand zeer dynamisch maken zijn belangrijker dan de exacte getallen: per getijperiode wordt alle zuurstof in het water op één of andere manier ververst en de drie processen die hiervoor zorgen, reaeratie, primaire produktie en wateruitwisseling leveren positieve bijdragen van dezelfde orde van grootte. Deze worden gecompenseerd door mineralisatie; een stationaire toestand op het Balgzand waarin  $350 \mu\text{gat l}^{-1}$  aan  $\text{O}_2$  wordt verbruikt, betekent een mineralisatie van ongeveer  $1,5 \text{ g C m}^{-2}$  per getijperiode.

In de praktijk is de toestand niet stationair bij meer wind, vooral bij brekende golven is de reaeratie veel groter. Aan de andere kant vormt een primaire produktie van  $800 \text{ mg C m}^{-2}$  wel een maximum voor de tijd van het jaar (Cadée & Hegeman, 1974). 's Nachts is er bovendien geen produktie.

Bij hogere temperaturen neemt de respiratie van dieren toe, terwijl vooral boven de  $20^\circ \text{C}$  het zuurstofverbruik van de bodem snel toeneemt (Gallagher & Daiber, 1974).

De belangrijkste variabele door de seizoenen maar ook van jaar tot jaar is waarschijnlijk de hoeveelheid organisch materiaal die uit de wijde omgeving op het Balgzand wordt geaccumuleerd. De toenemende eutrofiëring van het IJsselmeer bijv. gecombineerd met het zonnige weer van augustus leidde tot een zeer massale blauwalgengroei, zozeer dat berichten over langs de Waddenzee kust aanspoelende algenmassa's de dagbladen bereikten. Ook in het kustwater van de Noordzee kan massale algengroei voorkomen (Van Bennekom, Gieskes en Tijssen, 1975). De eutrofiëring gaat hier nog steeds door; van 1970 tot 1975 zijn de concentraties aan opgelost fosfaat in het kustwater weer bijna verdubbeld.

Op grond van fosfaatbudgetten concludeert Postma (1975) dat in de westelijke Waddenzee  $360 \text{ g C m}^{-2} \text{ jaar}^{-1}$  beschikbaar komt. Als we aannemen dat de zomer tweemaal zoveel bijdraagt als de winter is dit voor de zomer  $1,3 \text{ g C m}^{-2} \text{ dag}^{-1}$ , terwijl uit onze metingen  $3 \text{ g}$  werd afgeleid. De situatie zoals wij die aantreffen is wellicht helemaal niet zo uitzonderlijk!

#### Discussie

Een van de konsekwenties van massale algengroei in de Waddenzee en aangrenzende wateren kan zijn het optreden van zuurstofloze toestanden. Lokaal en incidenteel komt dit meer voor. Broekhuysen (1935) mat in augustus 1932 in dichte zeegrasvelden op het Balgzand volledige zuurstofloosheid van 1 tot 5 uur 's nachts. Muus (1967) concludeert op grond van werk in de Deense Belten dat de nachtelijke ademhaling van zeegras niet voldoende is om alle zuurstof uit het water te gebruiken en

stelt dat de accumulatie van organische stof en bacteriën belangrijker is. Ook in ondiep water zonder zeegras kwamen lage zuurstofgehaltes voor (minimum 35  $\mu\text{g l}^{-1}$ ). Vele diersoorten die in de Waddenzee leven kunnen lage zuurstofgehaltes wel enige tijd verdragen. Met tussenpozen van enkele jaren komen toch 'rampen' voor die lokaal alle dieren doden, hervestiging treedt echter vrij snel op. In de Nederlandse Waddenzee is in mei 1964 al eens iets dergelijks gebeurd, beschreven door Mastenbroek (1964). Het betrof in deze gevallen steeds zeer ondiepe, min of meer geïsoleerde plasjes water die na de eb op het wad bleven staan. De kinderkamerfunctie van de Waddenzee hangt ongetwijfeld samen met accumulatie van voedsel (Zijlstra, 1972). Het is niet te overzien in hoeverre een periodiek te veel aan voedsel, leidend tot rotting deze functie zal aantasten. Het is nog moeilijker te overzien in hoeverre de gehele ecologische samenhangen in het Waddengebied zullen veranderen onder invloed van de onderling samenhangende sterke schommelingen in gehalten aan zuurstof, voedingsstoffen, afbraakprodukten (bijv. nitriet) en gifstoffen. Tegen deze achtergrond stelt Verwey (1971) dat meer dan 90 % zuurstofverzadiging noodzakelijk is voor een natuurlijk estuarium. Uit het voorgaande blijkt dat lokaal waarschijnlijk altijd wel lagere gehalten zijn opgetreden. Ongestoorde wateruitwisseling met de hoofdgeulen waarin ook tijdens onze metingen de zuurstofgehaltes boven de 85 % bleven beperkt de konsekventies.

De studie van het systeem Rijn-Noordzee-Waddenzee is een gecompliceerde zaak, die nog niet is afgerond. Het zuurstofgehalte is een belangrijke indicator-grootheid die inzicht geeft in de dynamiek van de processen op een vrij korte tijdschaal en verdient daarom aandacht.

### Samenvatting

Op 26 augustus jl. werden tijdens laagwater over het gehele Balgzand in het water zuurstofverzadigings percentages van 40 - 50 % gemeten, gepaard gaande met zeer hoge concentraties aan voedingsstoffen. Uit berekeningen over het zuurstofbudget wordt afgeleid dat de mineralisatie van organische stof op het Balgzand alle zuurstof in het water zou gebruiken, ware het niet dat algenproductie, reëratie vanuit de atmosfeer en wateruitwisseling met het Marsdiep (ieder in ongeveer gelijke mate) dit verbruik compenseren.

Aan de hand van recente cijfers en publicaties wordt de samenhang geschetst tussen toenemende concentraties van voedingsstoffen in de Rijn, planktonproductie in de Noordzee en aanvoer van organische

resten van deze planktonproductie in de Waddenzee. De meeste conclusies zijn gebaseerd op fosfaatwaarnemingen; de algenproductie en de zuurstofgehaltes in Waddenzee en Noordzee in het verleden zijn te onvolledig bekend om langs directe weg met zekerheid te kunnen afleiden hoeveel de zuurstofbalans van de Nederlandse kustwateren is veranderd en nog zal veranderen.

De konsekventies van de eutrofiëring van Noordzee en Waddenzee door de Rijn zijn moeilijk te overzien, zuurstofmetingen juist in gebieden als het Balgzand kunnen een signaal-functie vervullen.

Veel dank zijn wij verschuldigd aan NIOZ-medewerkers, in het bijzonder G. C. Cadée, R. Dapper, G. W. Kraay, J. H. Oversluizen, J. W. Rommets, R. de Vries en H. Witte, en tevens aan de cursus-deelnemers.

### Literatuur

- Bennekou, A. J. van, Gieskes, W. W. C. en Tijssen, S. B., 1975. *Eutrophication of Dutch coastal waters*. Proc. Roy. Soc. (London), B189, 359-374.
- Broekhuysen, G. J., 1935. *The extremes in percentages of dissolved oxygen to which the fauna of a Zostera field in the tide zone at Nieuwediep can be exposed*. Archs. Néerl. Zoöl. 1, 339-346.
- Cadée, G. C. and Hegeman, J., 1974. *Primary production of the benthic microflora living on tidal flats in the Dutch Wadden Sea*. Neth. J. Sea Res. 8, 260-291.
- Gallagher, J. L. and Daiber, F. C., 1974. *Oxygen consumption at the soilwater interface in a Delaware salt marsh*. Chesapeake Science 15, 248-250.
- Gieskes, W. W. C. and Kraay, 1975. *The phytoplankton spring bloom in Dutch coastal waters of the North Sea*. Neth. J. Sea Res. 9, 166-196.
- Groot, S. J. and Postma, H., 1968. *The oxygen content of the Wadden Sea*. Neth. J. Sea Res. 4, 1-10.
- Mastenbroek, P., 1964. *Mortaliteit onder Wadvertebraten na Pinksteren 1964*. Het Zeepaard 24, 71-72.
- Muus, B. J., 1967. *The fauna of Danish estuaries and lagoons*. Meddelelser fra Danmarks fiskeri- og havundersogeler, ny serie 5 nr. 1.
- Postma, H., 1975. *The nutrient content of North Sea Water — changes in recent years*. Symposium on the changes in the North Sea fish stocks and their causes, Aarhus 1975.
- Postma, H. and Bennekou, A. J. van, 1974. *Budget aspects of biologically important chemical compounds in the Dutch Wadden Sea*. Neth. J. Sea Res. 8 (2-3): 312-318.
- Ryther, J. H., 1956. *The measurement of primary production*. Limnology & Oceanography 1, 72-83.
- Tijssen, S. B., 1968, 1969, 1970. *Hydrographical and chemical observations in the Southern Bight*. Annals Biol. 24, 52-56 (1968), 25, 51-59 (1969), 26, 73-81 (1970).
- Verwey, J., 1971. *Die Folgen für das Milieu der Abfuhr organischer Abfallstoffe ins Mündungsgebiet der Ems*. Contact-commissie voor natuur- en landschapsbescherming.
- Zijlstra, J. J., 1972. *On the importance of the Wadden Sea as a nursery area in relation to the conservation of southern North Sea fishery resources*. Symp. Zoöl. Soc. London, 233-258.

