

Rechten voorbehouden

Van interne verslagen zijn nadruk of aanhalingen
slechts toegestaan met uitdrukkelijke toestemming
van het NIOZ.

Enige aspecten van de fosforcyclus in de Nederlandse Waddenzee

door

V.N. de Jonge

intern verslag

over

werkzaamheden verricht als doctorale studie

in het tijdvak juli 1970-juli 1971

aan

NIOZ te Texel

onder leiding van

Prof. Dr. H. Postma

NEDERLANDS INSTITUUT VOOR ONDERZOEK DER ZEE

PUBLIKATIES EN VERSLAGEN

nummer 1972-9

Enige aspecten van de fosforcyclus in de Nederlandse Waddenzee^{x)}

door

V.N. de Jonge

Inhoud:

I. Samenvatting	2
II. Inleiding	3
III. Methoden	5
IV. Enkele karakteristieken van het onderzochte gebied	5
V. Resultaten	6
VI. Discussie	8
VII. Conclusie	16
VIII. Literatuur	18

I. Samenvatting.

Gedurende de periode juli 1970 tot juli 1971 werden in de Waddenzee van Den Helder tot in de Eems op 64 stations de fosforconcentraties gemeten. De waarnemingen hadden betrekking op zowel fosfaat ($\text{PO}_4\text{-P}$) als opgeloste organische ($\text{P}_{\text{org.}}$) en zwevende fosfor (P_{zw}).

^{x)} Deze studie werd mede mogelijk gemaakt door de toekenning van een bijzondere toelage ex. art. 80, lid 2, W.w.o. van het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen.

Het fosfaatgehalte is in het algemeen aanzienlijk hoger dan in de Noordzee. De hoogste concentraties worden in de zomer in het binnenste deel op de wantijen aangetroffen (tot 4 $\mu\text{gr.at P/l}$). Dit hangt samen met het feit dat dan veel organische stof afkomstig uit de Noordzee op die plaatsen wordt geaccumuleerd en vervolgens gemineraliseerd. Deze mineralisatie is ook te meten aan een lager fosforgehalte in het zwevende materiaal. In de winter zijn de verschillen tussen Waddenzee en Noordzee daarentegen gering.

Vergeleken met 1950 is het fosfaatgehalte in de westelijke Waddenzee verdrievoudigd (van 0,5 tot 1,4 $\mu\text{gr.at P/l}$) corresponderend met een verdrievoudiging van de concentratie in het Rijnwater gedurende dezelfde periode. Over de gehele Waddenzee is in dezelfde tijd het gehalte aan P_{zw} , dus aan organische stof, verdubbeld. Zeer lage fosfaatwaarden komen in het voorjaar en de zomer alleen voor in het zeegat van het Vlie, zodat waarschijnlijk alleen in dat gebied fosfor beperkend is voor de planktongroei.

In het noordelijke IJsselmeer is het fosfaatgehalte sinds 1950 gestegen van gemiddeld 0,3 tot 0,7 $\mu\text{gr.at P/l}$. Ook deze stijging is het gevolg van de toegenomen belasting van het Rijn-(IJssel) water, maar nog steeds wordt het overgrote deel van het fosfor in het zuidelijke IJsselmeer door sedimentatie van P_{zw} vastgehouden.

Summary

During the period July 1970 - July 1971 phosphorus concentrations (phosphate, dissolved organic phosphorus and phosphorus in suspended matter) are measured on 64 stations in the Dutch Wadden Sea between Den Helder and the Eems.

Phosphate concentrations were in general much higher than in the North Sea. Highest concentrations occur in summer in the inner parts as a result

of accumulation and mineralization of organic material. In winter differences are small. Phosphate concentrations increased 3x since 1950 parallel to a similar increase in the river Rhine. Over the same period the suspended matter, measured by its P. content, doubled. Very low phosphate values are only found in spring and summer between the islands of Vlieland and Terschelling where phosphorus probably becomes limiting for plankton growth.

II. Inleiding

De Waddenzee zal na afsluiting van het Zuid-Nederlandse deltacomplex, te voltooien in 1978, het laatste Belangrijke estuarium zijn in ons land. Bovendien vertegenwoordigt het een landschap, waardoor ons land eeuwenlang werd gekenmerkt. Door het estuariene karakter is het gebied van nature reeds extra belast met organische stoffen. Door een accumulatiemechanisme (Postma, 1954, 1961; van Straaten & Kuenen, 1957) en in mindere mate via de schelpdieren (Verwey, 1952) fungeert het als "slibvang" van organisch en ander materiaal, dat in hoofdzaak afkomstig is van de Noordzee.

Postma (1954) heeft aan de hand van een rekenmodel gebaseerd op de situatie in de westelijke Waddenzee aangetoond dat er sprake is van een intensieve wateruitwisseling tussen dit gebied en de Noordzee (ongeveer 10% per getijperiode). Dit resulteert in een continue gedeeltelijke verversing van dit bekken en een aanvulling van het slibgehalte waarna dit materiaal hier aan het accumulatiemechanisme onderworpen kan worden.

Postma (1957) kwam op grond van een studie naar de slibhoeveelheid en samenstelling van de Rijn en die van het kustwater tot de conclusie dat het Waddenzeeslib voor het belangrijkste deel afkomstig moest zijn van de Rijn en in veel mindere mate van de Maas, Schelde en Nauw van Calais. Traceronderzoekingen van de Groot (1964, 1970, 1971) aan jonge sediment afzettingen langs rivieren en de kust, met behulp van Mn, hebben deze

mening voor een belangrijk deel bevestigd. Aangetoond kon worden dat er tot diep in de westelijke Dollard sprake was van Rijn/Maas afzettingen, aan de oostzijde bestonden deze voornamelijk uit Eemsafzettingen. Wat betreft het Scheldeslib kon de Groot aantonen dat dit niet verder reikte dan halverwege de Wester-Schelde. Waar Postma dus spreekt over Scheldeslib betreft dit zeer waarschijnlijk materiaal afkomstig van de oude kleibanken die in de buitendelta van de Wester-Schelde liggen en/of afzettingen die afkomstig zijn van de Noord-Franse rivieren de Seine, Somme, Canche en Authie (Terwindt, 1967).

Van de mond van de Nieuwe Waterweg worden zowel het Rijnwater als het slib langs een betrekkelijk smalle zone van ongeveer 2 km naar het noorden gevoerd. Dit geschiedt onder invloed van een klein vloed-getij surplus (Postma, 1957; Terwindt, 1967). Binnen de invloedssfeer van de Waddenzee gekomen kunnen beide componenten naar binnen worden gevoerd terwijl daarna het slib eventueel kan sedimenteren onder invloed van het door Postma (1954, 1961) beschreven accumulatiemechanisme.

De invloed van de Noordzee op de Waddenzee vindt derhalve plaats op twee manieren:

1. Een invloed via het water met de daarin opgeloste stoffen.
2. Een invloed via het door het water meegevoerde slib en de daaraan gebonden stoffen.

Beide aspecten zullen voor wat betreft fosfor in de hiernavolgende studie worden behandeld.

Het zijn de hierboven beschreven overwegingen geweest, gezien tegen het licht van de nog steeds onrustbarende stijging van de stoffenbelasting van de Rijn en Maas en derhalve van ons kustwater die leidden tot deze studie. Hierin wordt nagegaan hoe het verloop en de oorzaak is van de concentraties van de verschillende fosfor-componenten in de Waddenzee. Tevens wordt nagegaan in hoeverre deze concentraties door aanvoer hetzij van het

land hetzij vanuit zee hoger zijn geworden na 1950.

III. Methoden

Gedurende een periode van 13 maanden werden 11 maal oppervlaktewatermonsters verzameld met het m.s. "Eider" van het N.I.O.Z. over vrijwel het gehele Waddengebied, het noordelijk IJsselmeer en het Eems-Dollard estuarium tot aan de mond van de Dollard. Later werden ook een deel van de rivier de Eems alsmede de Dollard zelf bemonsterd (Fig. 1).

Wat betreft fosfor werden per monsterpunt een 3-tal analyses uitgevoerd volgens Murphy en Riley (1962). De metingen werden gedaan met behulp van een Zeiss spectrofotometer PMQ II. De totale fout in de bepaling was $\pm 5\%$. Uit de op deze wijze verkregen gegevens konden de volgende fracties worden berekend:

$\text{PO}_4\text{-P}$	(anorganisch opgelost P)	$\text{PO}_4\text{-P}$
$\text{P}_{\text{org. opgelost}}$	(organisch opgelost P)	$\text{P}_{\text{org.}}$
$\text{P}_{\text{zwevend}}$	(aan gesuspendeerd materiaal gebonden P)	$\text{P}_{\text{zw.}}$

Hiernaast werden nog bepaald het zoutgehalte met een autolab salinometer model 601 - M III (Tijssen, 1970b), gesuspendeerd materiaal per liter wat werd verkregen door te filtreren over glasvezelfilters Whatman (GF/C porienwijdte $0,25 \mu$ en $\text{C}_{\text{organisch}}$ per mg. gesuspendeerd materiaal door elementair analyse via een Coleman Carbon Analyzer. Verwijdering van het anorganisch carbonaat uit het slib geschiedde door een behandeling met 5 ml 10 N HCl gedurende 5 minuten.

IV. Enkele karakteristieken van het onderzochte gebied

Om de studie te begrijpen is een korte algemene fysische beschrijving van het onderzochte gebied noodzakelijk. De Waddenzee wordt aan de landzijde begrensd door dijken en aan de zeezijde door een reeks eilanden welke lopen

van Noord-Holland tot Denemarken. Hierbinnen ligt de relatief smalle en langgerekte Waddenzee waarvan het Nederlandse deel wordt begrensd door het Eems-Dollard estuarium. Voor onze kust bestaat de Waddenzee uit getijdebekken die van elkaar gescheiden worden door wantijen (droogtes). Een enkel getijdebekken bestaat in het algemeen uit een zeegat met een diepe hoofdgeul welke zich meer naar het wantij en de kust differentieert in een groot aantal steeds ondieper wordende geulen. Dit systeem kon ontstaan dank zij de schurende werking van de getijstromen. Deze is het grootst in het zeegat en het kleinst in de buurt van de wantijen en de kust door de afnemende stroomsnelheid van het water. Hiermee in verband staat ook de sterke afname van de grootte van het sediment naar de wantijen en de kust toe evenals de accumulatie op deze plaatsen van het door het water meegevoerde slib (Postma, 1954, 1961).

Bij eb valt 30 - 50% van het gebied droog terwijl het ebvolume ongeveer de helft van het vloedvolume is. De Waddenzee ontvangt via de zeegaten Noordzeewater met een hoog zoutgehalte terwijl het van de landzijde (voornamelijk via spui) zoet water toegevoerd krijgt. Hierdoor ontstaat het brakke milieu. De zoutgehalten in de Waddenzee zijn de laagste in de winter en in het voorjaar als de zoetwateraanvoer het grootst is. De watertemperaturen schommelen tussen 0° en 20° C; door haar geringe diepte is de Waddenzee in de winter maanden in het algemeen kouder en in de zomer maanden warmer dan de Noordzee.

V. Resultaten

De Fig. 4 t/m 14 geven wat betreft PO_4 -P en $P_{org.}$ een representatief beeld van het Waddengebied, het Eems-Dollard estuarium en het meest noordelijke deel van het IJsselmeer. Het laagste PO_4 -P jaargemiddelde van het gehele Waddengebied is gemeten in het Vlie (Fig. 5 en 18, VL/SG) terwijl de zoutgehalten hier in het algemeen het hoogste zijn. De Noordzee situatie wordt hier het meest benaderd; daarom wordt dit monsterpunt gebruikt als referentie-

punt voor de concentraties in het aangrenzende Noordzeegebied.

Het Marsdiep (Fig. 4, wrakboei) en de Texelstroom vertonen veel hogere waarden, vooral in de zomer en het najaar. Een positieve beïnvloeding van dit deel van de Waddenzee vanuit het IJsselmeer in deze tijd van het jaar is uitgesloten daar de concentraties PO_4 -P en $P_{org.}$ daar geen aanleiding toe geven evenmin als de zoutgehaltes. Uit deze zelfde zoutgehaltemetingen blijkt tevens dat een IJsselmeer invloed door spuiing van zoet water zich hoogstens tot aan de Texelstroom uitstrekt.

Opvallend voor de oostelijke Waddenzee zijn de sterke PO_4 -P verhogingen t.o.v. het Vlie in het late voorjaar, de zomer en een deel van het najaar gevolgd door een minimum in november. Dit effect doet zich het sterkste voor op en nabij de wantijen (Fig. 6, 8 en 16); voor zover er metingen beschikbaar zijn lijkt dit ook te gelden voor de Dollard (Fig. 13 en 16). Het beeld in het Eems-Dollard estuarium wordt echter tamelijk gecompliceerd door het feit dat we hier te maken hebben met een rivierafvoer (Eems) met hoge PO_4 -P waarden en watertransport naar zee door spui vanuit Delfzijl en de Dollard eveneens met veel PO_4 -P. Bovendien spelen estuariene concentratie- en mineralisatieprocessen in dit gebied een zeer belangrijke rol (Postma, 1960; Postma & Kalle, 1955). De $P_{org.}$ concentraties vertonen voor het gehele gebied met uitzondering van het IJsselmeer en het Eems-Dollard estuarium een zeer gelijkmatig verloop (Fig. 19). In de Fig. 20 t/m 24a staan de resultaten weergegeven van de P_{zw} analyses. Per vaartocht zijn alle P_{zw}/l uitgezet tegen de zwevende stof/l waarna in de aldus ontstane samengestelde puntenwolk een scheiding werd aangebracht tussen de Waddenzee, het Eems-Dollard estuarium en de Eems. Het IJsselmeer werd steeds afzonderlijk beschouwd. De grens tussen de Waddenzee en het Eems-Dollard estuarium kwam op grond hiervan te liggen in de buurt van de mond van de Dollard, terwijl dit voor de rivier de Eems meestal in de buurt van Leer (km 12,5) was.

Om echter een goed inzicht te krijgen in de fosfor-concentraties van de Eems is daar gedurende een te korte periode gemonsterd; dit geldt ook voor de Dollard.

Voor de aldus onderscheiden puntenwolken werden voor de Waddenzee (bij de andere wolkjes was n = aantal waarnemingen te klein) de correlatiecoëfficiënten, de regressielijnen $y = a + bx$ en de regressielijnen door $(0,0)$ d.w.z. $y = a_0 x$ berekend en getoetst of de lijn $y = a + bx$ afwijkt van de lijn $y = bx$ (Student). De lijnen door $(0,0)$ dus $y = a_0 x$ werden nu vergeleken met $y = bx$ door het quotient

$$\frac{s_{y/x}^2}{s_y^2} \quad \text{welke kleiner moet zijn dan 1.}$$

Voor het gebied tussen de splitsing Eems - Dollard, de Dollard zelf en de zoete rivier de Eems ging dit procédé niet op vanwege een te grote afwijking binnen de punten onderling.

De uiteindelijke resultaten zijn, voor de berekende regressielijnen door $(0,0)$ dus $y = a_0 x$ weergegeven in fig. 20, 21 en 22 terwijl fig. 24a een samenvatting voorstelt van deze drie. In deze laatste figuur is dan duidelijk een seizoensinvloed waarneembaar. **Precies dezelfde berekeningen** als voor het P_{zw} werden uitgevoerd voor zwevende koolstof verminderd met carbonaat ($C_{org. zw.}$). De resultaten van deze berekeningen worden op dezelfde wijze als bij fig. 24a weergegeven in fig. 23.

VI. Discussie

In fig. 24c is weergegeven hoe de fosforcyclus in grote trekken verloopt. Fosfaat wordt, vooral in het voorjaar, opgenomen door phytoplankton. Dit wordt ten dele door andere organismen opgegeten en zo omgezet in dierlijk

weefsel, waarbij een deel weer als organisch en anorganisch fosfaat wordt uitgescheiden. Bij afsterven van organismen ontstaat zowel opgelost als niet opgelost dood materiaal, waaruit fosfaat door bacteriele ontleding vrijkomt. Het is echter niet uitgesloten dat sommige organische stoffen direct weer door phytoplankton worden gebruikt, terwijl omgekeerd ook levend plankton opgeloste organische stoffen kan uitscheiden.

Tegen deze achtergrond zal de fosforcyclus van het Waddengebied worden besproken. Eerst zal een verklaring worden gegeven voor het verloop van de curves van VL/SG (fig. 5).

In het vroege voorjaar (maart/april 1971) ontstaat een sterke PO_4 -P daling tengevolge van opname door het zich ontwikkelende phytoplankton. Hierna komt een gedeelte van het fosfor weer vrij. Dit komt in fig. 5 ook tot uitdrukking in een verhoging van het P_{org} . (april/juni 1971). Een tweede PO_4 -P minimum ontstaat in augustus/september (1970) door een nieuwe planktonbloei. De tijdelijke verhoging van het P_{org} in het najaar, die onmiddellijk wordt gevolgd door een sterke PO_4 -P toename wordt veroorzaakt door het massaal afsterven van plankton door de ongunstiger wordende levensvoorwaarden. In de winter zijn er relatief weinig levende organismen aanwezig waardoor er veel vrij PO_4 -P is en relatief weinig P_{org} .

Het PO_4 -P minimum in april en mei (1971) valt samen met het door Postma en Rommets (1970) gevonden eerste primaire productiemaximum. Dit ontstaat door de normale voorjaarsontwikkeling van het phytoplankton, welke voornamelijk gestimuleerd wordt door de toename van het aantal uren licht per dag. Uit het diepe PO_4 -P minimum blijkt verder dat een fosforgebrek in juni in het Vliee waardoor na de bloeiperiode het phytoplankton in haar ontwikkeling geremd wordt, niet onwaarschijnlijk is. Het in dichtheid nog steeds toenemende zooplankton zal dan op haar beurt via "grazing" de populatiedichtheid van het phytoplankton zeer sterk terug kunnen laten lopen.

Het gevolg daarvan is weer voedselgebrek voor het zooplankton waardoor dit eveneens voor een deel zal afsterven. Door mineralisatie van het op deze wijze vrijkomende $P_{org.}$ en $P_{zw.}$ wordt dan weer de basis gelegd voor een soortgelijke cyclus (vergelijk juli 1970) waardoor het PO_4 -P minimum in augustus kan ontstaan. Het valt ongeveer samen met het door Postma en Rommets (1970) beschreven tweede productiemaximum.

Een opvallend omgekeerd verband bestaat er tussen de fig. 5 en 24a, hoewel de laatste verkregen werd uit de verzameling van bijna alle Wadden-zeemetingen voor $P_{zw.}$ in een bepaalde periode. Dit verband moet zijn ontstaan door het gedrag van de planktonpopulaties die bij hun groei fosfor opnemen terwijl het omgekeerde gebeurt bij afsterven van een deel van de populaties.

Bezien we vervolgens de andere stations, dan ontstaan de opmerkelijke verschillen in PO_4 -P concentratie tussen Marsdiep/Texel-stroom en het Vlie (vergelijk fig. 4 en 5) door de invloed, via de zeegaten, van watermassa's uit de Noordzee. Blijkens waarnemingen van Manuels en Rommets (1971) is er via het Marsdiep sprake van een relatief grote invloed van Noordzeekustwater op de westelijke Waddenzee. Dit water heeft een zoutgehalte dat in het algemeen wat lager is dan dat van het Noordzeewater voor het Vlie (jaargemiddelde van 29,5 ‰ tegen 31,4 ‰). Dit zoutgehalteverschil wat ook aanwezig is in de waarnemingen van Tijssen (1968, 1969, 1970a) wordt in belangrijke mate veroorzaakt door de afvoeren van de rivieren de Rijn en de Maas. Deze zijn bovendien zwaar belast met PO_4 -P (Int. Rijncommissie, 1955 - 1971 (fig. 32); Brouwer, 1971) wat de met de zoutgehaltedaling gepaard gaande PO_4 -P toename zou kunnen verklaren.

Zoals reeds beschreven is. is een positieve invloed vanuit het IJsselmeer door spui op de PO_4 -P concentratie in de westelijke Waddenzee niet mogelijk de fosfor-concentraties in het IJsselmeer zijn daarvoor te laag (fig. 14). Bovendien stemmen de PO_4 -P concentraties in de verschillende

jaargetijden voor het Marsdiep redelijk overeen met welke Tijssen voor het kustwater waarnam. De beïnvloeding door de Rijn vindt daarom voor het belangrijkste deel plaats via het Marsdiep en van daaruit (over de wantijen) en/of indirect (via de Noordzee) op de oostelijke Waddenzee. Dit kan zowel voor de in het water opgeloste stoffen als het door het water meegevoerde slib gelden. Simultane slibmetingen op zowel de Waddenzee als de Noordzee en metingen van wateruitwisseling tussen beide zouden hier mogelijk uitsluitsel over kunnen geven.

Bij WG/BG (fig. 7) wordt het tweede minimum in augustus 1970 verstoord door de invloed van een ander proces dat in de Waddenzee een uitermate belangrijke rol blijkt te vervullen.

Postma (1954, 1957, 1961) en Van Straaten & Kuenen (1957) hebben gewezen op het belang van de Waddenzee in verband met haar functie als "slibvang" wat werd bevestigd door De Groot (1964, 1970, 1971). Bovendien is al door Verwey (1952) en Postma (1954) gewezen op een mogelijke functie van de Waddenzee in verband met de mineralisatie van grote hoeveelheden daar gesedimenteerde organische stoffen die afkomstig zijn uit het kustwater. Aanwijzingen voor deze mineralisatie werden gevonden door De Groot & Postma (1968) die op het wantij bij Holwerd een duidelijke O_2 -onderverzadiging vaststelden die het gevolg zou kunnen zijn van eerder genoemde afbraak van organische stoffen. Deze was kennelijk groter dan de O_2 -productie van het phytoplankton.

De opmerkelijk hoge PO_4 -P waarden in het late voorjaar, de zomer en het najaar wijzen eveneens op sterke mineralisatie. Opvallend is verder dat ze gepaard gaan met fluorescentieverhogingen (Rommets, 1972). De sterkte van de fluorescentie is namelijk een maat voor de hoeveelheid opgeloste organische stoffen van plantaardige oorsprong. Het verloop van de curves is het gevolg van twee verschijnselen die op de wantijen naast elkaar optreden namelijk een normale seizoensactiviteit van het plankton en een zeer sterke mineralisatie. De wantijwaarden moeten derhalve worden verminderd met die welke

gevonden zouden zijn zonder mineralisatie; dit is gedaan door te verminderen met de concentraties van de dichtsbijzijnde zeegaten (fig. 5 t/m 9, 25 t/m 28). Hierbij is niet voor het zoutgehalte gecorrigeerd omdat in de ondiepe Waddenzee, vooral in de buurt van de platen, snel zoutgehalteverschillen kunnen optreden door verdamping en neerslag. Een andere complicatie wordt geleverd door de relatief grote zelfstandigheid van de verschillende getijdebekken onderling. Hierdoor zou voor elk bekken afzonderlijk voor het zoutgehalte gecorrigeerd moeten worden. In het hier beschreven geval zou dat door het geringe aantal metingen per getijdebekken onmogelijk zijn. Op deze wijze wordt een seizoenscurve verkregen die bij benadering de mineralisatie op het wantij aangeeft. De waarden zijn mogelijk aan de lage kant door de relatief grote Noordzee-invloed in deze oostelijke bekkens met hun geringe ebvolume in tegenstelling tot die van de westelijke Waddenzee. In één geval (juli 1971) kon dit effect verder gekwantificeerd worden niet uitgaande van PO_4-P maar van P_{zw} . Van de 6 metingen in fig. 23 die niet bij de puntenwolk hoorden lagen er 5 op of in de buurt van wantijen. Hiervoor is op dezelfde manier als werd beschreven voor P_{zw} de regressielijn door (0,0) bepaald waardoor we nu bij benadering kunnen bepalen hoeveel % van het P_{zw} op deze plaatsen werd gemineraliseerd. Blijkens fig. 23 is ruim 70% van het P_{zw} verdwenen door mineralisatie en dit is mogelijk nog aan de lage kant. Absoluut genomen is er op dat moment op de betreffende plaatsen nog 1,4 $\mu\text{gr.}$ at $P/100$ mg zw. stof minus carbonaat aanwezig. Dit zou kunnen betekenen dat van de 3 $\mu\text{gr.}$ at $p/100$ mg zw. stof minus carbonaat, over in de winter (fig. 24a), er tenminste nog 1,6 worden gevormd door organische stof. Hierover staan ons op dit moment echter geen verdere gegevens ter beschikking. Waarom de mineralisatie alleen in juli 1971 verder gekwantificeerd kon worden is nog niet duidelijk, mogelijk speelt hier het tijdstip van monsternamen een belangrijke rol. Opvallend is overigens dat deze mineralisatie plaats

vindt in gebieden met zeer hoge concentraties schelpdieren en detrituseters (Verwey, 1952, 1968). We hebben hier dus te maken met een samengaan van een activiteit van schelpdieren en detrituseters enerzijds en bacterien anderzijds. De eerste groep vangt een gedeelte van het door het accumulatiemechanisme opgehoopte dood en levend organisch materiaal weg. De eindproducten bestaan hierbij uit $P_{zw.}$, $P_{org.}$ en PO_4-P (Verwey, 1952, 1968; Postma, 1954). Dit proces verklaart een deel van de P_{zw} -verlaging en PO_4-P stijging. Bacterien zullen onder de heersende gunstige thermische omstandigheden op de wantijen/platen in de zomermaanden eveneens het opgehoopte dode organische materiaal alsmede de niet afgebroken uitscheidingsproducten van de bodemdieren aangrijpen en verder afbreken tot PO_4-P . Dit veroorzaakt uiteindelijk de zeer sterke PO_4-P toename die is gemeten op en in de buurt van wantijen/platen (vergelijk ook de fosforcyclus, bldz. 10). Om dit "wantij-effect" verder te kwantificeren zullen echter nog verdere metingen nodig zijn over de uitwisselingssnelheid van het water tussen de platen, het bekken en de Noordzee, de concentratie van voedingsstoffen, de primaire productie (actueel en potentieel) alsmede de fosfor productie ter plaatse op het wad.

Hetzelfde verschijnsel treedt op in het Eems-Dollard estuarium (fig. 10, 11, 12). Hier vindt accumulatie van slib plaats en van plankton dat door het grote verschil in saliniteit in het algemeen afsterft (Postma, 1960, 1969; Postma & Kalle, 1955). Er ontstaat een zogenaamde troebelingszone. Binnen deze troebelingszone, welke voor fosfor in de buurt van LC en LK ligt, vindt bovendien mineralisatie plaats van P_{zw} en $P_{org.}$ tot PO_4-P (fig. 16 en 18). Mogelijk is er ook nog sprake van mineralisatie in de Dollard maar van dit gebied is geen complete jaarcyclus beschikbaar terwijl bovendien de reeds eerder genoemde complicaties optreden door mogelijke spui vanuit het Eemskanaal waar zeer hoge PO_4-P concentraties zijn gemeten (fig. 15). Nog sterker geldt dit voor de Westerwolde A. Hierdoor kan zonder meer niet meer worden vastgesteld welk deel van PO_4-P door spui werd geleverd, wat

werd opgenomen bij een eventuele productie en welk deel weer vrij kwam via afbraak. Of de productie/mineralisatie in de Dollard zelf een belangrijke rol speelt lijkt twijfelachtig omdat al in de mond van de Dollard in het algemeen zeer weinig levende zwevende stof is gemeten (Manuels, 1972). Mogelijk is de belasting van dit gebied met afvalstoffen, met als gevolg O_2 -gebrek door afbraak van organische stoffen al aan de hoge kant. Een en ander lijkt te worden bevestigd door de zeer hoge PO_4 -P concentraties in het Eems estuarium ver buiten de troebelingszone.

Treffend in fig. 24a is de overeenkomst tussen de seizoensvariatiën van P_{zw} voor de Waddenzee en het IJsselmeer. De totale hoeveelheid PO_4 -P in het noordelijk IJsselmeer van 2 $\mu\text{gr. at P/l}$ (fig. 14) wordt opgenomen door het plankton, waarbij het minimum, in tegenstelling tot de meeste plaatsen in de Waddenzee, daalt tot 0 $\mu\text{gr. at P/l}$. Bij het afsterven van het plankton komt deze fosfor vrij in de vorm van dood opgelost en niet opgelost materiaal (zie $P_{org.}$ toename) waarna dit wordt omgezet in PO_4 -P. Opmerkelijk hierbij is dat het $P_{org.}$ dezelfde waarden bereikt als later het PO_4 -P. Ditzelfde gebeurde in 1950 ook nog in de Waddenzee (Postma 1954).

Bij vergelijking van de gemiddelde PO_4 -P waarden uit 1970/71 met die van 1950/51 (Postma, 1954) voor het traject Marsdiep, Malzwin en Wierbalg (fig. 29) valt op dat deze is gestegen van 0,5 tot 1,4 $\mu\text{gr. at P/l}$, dit is een verdrievoudiging. Wanneer we dit vergelijken met de vrachttolname van de Rijn voor wat betreft PO_4 -P van 1956 - 1971 (fig. 32) dan blijkt dit eveneens een verdrievoudiging te zijn, namelijk van 0,45 tot 1,5 kg/sec. (Int. Rijncommissie 1955 - 1971; Brouwer, 1971). Van voor 1956 zijn geen goede cijfers beschikbaar, maar de waarden van 1956 - 1958 geven aan, dat deze vracht waarschijnlijk niet erg veel verschillend zal zijn geweest van die van voor 1956. In plaats van 1,3 kg/sec. vracht in 1971 werd 1,5 aangehouden omdat in 1971 de Rijnafvoeren zeer laag waren met als gevolg minder lozingen, waardoor de lagere vrachtwaaarde ontstaan kan zijn.

De toenemende fosfor-vracht van het Rijnwater veroorzaakt een verhoogd fosfor-aanbod aan het kustwater. In welke vorm het fosfor in de rivier aanwezig is, is minder belangrijk, omdat dit voor een groot deel via mineralisatie het plankton ter beschikking komt. Daar fosfor voor de planktonontwikkeling altijd een beperkende factor is geweest, betekent dit een toename van de planktonhoeveelheden in de Noordzee. Dit betekent een toename van de hoeveelheid organische zwevende stof, dus ook van P_{zw} . Volgens Manuels (1972) is thans 15% van het zwevende materiaal van organische oorsprong. Een belangrijk deel van de organische stof wordt in de Waddenzee geaccumuleerd. De bemesting van de Waddenzee geschiedt derhalve voor een belangrijk deel indirect. In het kustwater voltrekken zich een aantal ombouwprocessen waarna het "rivier-fosfor" in de zomer voor een belangrijk deel als P_{zw} de Waddenzee binnenkomt en in de winter als PO_4-P .

Een vergelijking van P_{org} 1970/71 met die van Postma in 1950/51 is niet zo goed mogelijk, omdat nu beschikt kan worden over glasvezelfilters, terwijl Postma in 1954 slechts kon beschikken over S en S papierfilters met een niet vergelijkbare poriënwijde. Dit komt ook tot uitdrukking in te hoge P_{org} concentraties in 1950/51 vergeleken met die van 1970/71.

Het noordelijk IJsselmeer vertoont, alhoewel ze 50% (de Kloet, 1971) van haar water via de IJssel van de Rijn ontvangt, een gemiddelde stijging van het PO_4-P van 0,3 tot 0,7 $\mu g/l$ (fig. 30). Dit verschil met de Waddenzee is gelegen in het feit, dat in het IJsselmeer geen sprake is van sterke stromingen zoals in de Waddenzee. Hierdoor wordt, in tegenstelling tot de Waddenzee, in de zomer fosfor geaccumuleerd (fig. 16 en 17) en in de winter, gezien de uniforme verdeling van het PO_4-P transport naar de Noordzee en de oceaan, het fosfor door sedimentatie van Rijnslib in het zuidelijke deel van het IJsselmeer opgeslagen. Een tweede vorm van sedimentatie treedt op bij het afsterven van het plankton. Dit betekent dat een groot deel van het P_{zw} niet zal worden gemineraliseerd, terwijl bovendien een af-

name in de fosfor-concentratie van zuid naar noord verwacht kan worden, wat wordt bevestigd door onderzoeken van Postma (1966), Golterman en de Kloet (1969). In deze situatie (Postma, 1969) zal pas verandering komen als de golfslag vat krijgt op de bodem en een groot deel van het slib in suspensie wordt gehouden. Dit houdt in, dat dan pas een evenredige hoeveelheid organisch materiaal die het IJsselmeer binnenkomt via de IJssel deze weer kan verlaten via de sluizen in het noorden. Het direkte gevaar voor de Waddenzee wordt dus op dit moment nog steeds indirect veroorzaakt door de Rijn via de Noordzee en niet rechtstreeks via de IJssel.

Harvey (1955) beschreef, dat er voor marien plankton een C/P verhouding bestond van 106 : 1. Bij vergelijking van de fig. 24a en 24b blijkt echter, dat het verloop van de verschillende bij elkaar horende curves een geheel afwijkend gedrag vertonen ten opzichte van elkaar, wat inhoudt, dat er van een tamelijk constante C/P verhouding geen sprake kan zijn. Een en ander wordt nog duidelijker aan de hand van tabel I. De variaties in deze ratio, ook voor de verschillende getijdebekkens onderling, zijn van dien aard, dat andere factoren welke op de fosfor-verdeling nauwelijks of geen invloed hebben, mogelijk wel aanwezig zijn voor C (Manuels, 1972).

VII Conclusies

De concentraties van $PO_4^{3-}P$ zijn sinds 1950 in het meest westelijke deel van de Waddenzee verdrievoudigd van gemiddeld 0,5 tot 1,4 $\mu\text{gr. at P/l}$, terwijl het P_{zw} in dezelfde periode is verdubbeld. Het is echter niet mogelijk om op grond hiervan een uitspraak te doen over de gehele Waddenzee. Op de wantijen kunnen in de zomer de concentraties aan $PO_4^{3-}P$ op volkomen natuurlijke wijze oplopen tot ruim 4 $\mu\text{gr. at P/l}$. Dit verschil speelt vooral in de oostelijke Waddenzee een belangrijke rol en het is daarom de vraag of fosfor in dit soort gebieden met een sterk estuariën karakter ooit beperkend is geweest. Naast een accumulatie van organisch materiaal en afbraak daarvan vindt

er in de wintermaanden een sterke uitwisseling van dit water met een uniforme $\text{PO}_4\text{-P}$ verdeling over de gehele Waddenzee plaats met de Noordzee (fig. 16 en 17).

Op grond van voorgaande studie dient gesteld te worden dat fosfor in het algemeen niet (meer) als beperkend optreedt in de Waddenzee.

VIII Literatuur

- Brouwer, W.A.H., 1971. Verontreiniging van de IJssel en aanbeveling tot sanering. - H_2O 4: 427 - 430.
- Golterman, H.L. & W. de Kloet, 1969. De eutrofiëring van het IJsselmeer. - Meded. Hydrobiol. Veren. 3: 7 - 8.
- De Groot, A.J., 1964. Origin and transport of mud in coastal waters from the Western Scheldt to the Danish frontier. - Dev. in Sedimentol. 1: 93 - 100.
- , 1970. Geochemisch onderzoek in deltagebieden. - Natuurk. Tijdschrift, nieuwe serie 48: 61 - 75.
- , 1971. Zware metalen in rivierdelta's. Stencil Instituut Bodemvruchtbaarheid, 7 pag.
- De Groot S.J. & H. Postma, 1968. The oxygen content of the Wadden Sea. - Neht. I. Sea Res. 4: 1 - 10.
- Harvey, H.W., 1955. The chemistry and fertility of sea waters. Cambridge 1 - 224.
- De Jonge, H. 1960. Inleiding tot de medische statistiek. 2 delen. Leiden.
- De Kloet, W.A., 1971. Het eutrofiëringsproces van het IJsselmeergebied. - Meded. Hydrobiol. Veren. 5: 23 - 38.
- Manuels, M.W., 1972. Interne publicatie NIOZ 1972 -
- Manuels, M.W. & J.W. Rommets, 1971. Interne publicatie NIOZ, 1971 - 12.
- Murphy, J. & J.P. Riley, 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. - Analytica Chim. Acta, 27: 31 - 36.
- Postma, H. 1954. Hydrography of the Dutch Wadden Sea. - Archs néerl. Zool. 10: 405 - 511.
- , 1957. Balans van het slibtransport in de Nederlandse rivieren en langs de kust; chemische samenstelling van het slib. - Interne publicatie

- NIOZ, 1957 -1, 18 pag.
- , 1960. Einige Bemerkungen über den Sinkstofftransport im Ems-Dollart Gebiet. - Verh. K. Ned. Geol.-Mijnb. Genoot. 103 - 110.
- , 1961. Transport and accumulation of suspended matter in the Dutch Wadden Sea. - Neth. I. Sea Res. 1: 148 - 190.
- , 1966. Observations on the hydrochemistry of inland waters in the Netherlands. - Proc. K. Ned. Akad. Wet. 30 - 38.
- , 1969. Hydrologische problemen in estuariumgebieden. - pag. 197 - 210 Genoot. "Diligentia", Den Haag.
- Postma, H. & K. Kalle, 1955. Die entstehung von Trübungszonen im Unterlauf der Flüsse, speziell im Hinblick auf die Verhältnisse in der Unterelbe. - Dt. hydrogr. Z. 8: 137 - 144.
- Postma, H. & J.W. Rommets, 1970. Primary production in the Wadden Sea. - Neth. I. Sea Res. 4: 470 - 493.
- Rommets, J.W., 1972. Fluorescentie als natuurlijke tracer in de Waddenzee. - Interne publicatie NIOZ, 1972 - , pag.
- Van Straaten, L.M.J.U. & Ph.H. Kuenen, 1957. Accumulation of fine grained sediments in the Dutch Wadden Sea. - Geologie-Mijnb., 19: 329 - 354.
- Terwindt, J.H.J., 1967. Mud transport in the Dutch delta area and along the adjacent coastline. - Neth. I. Sea Res. 3: 505 - 531.
- Tijssen, S.B., 1968. Hydrographic and chemical observations in the Southern Bight, August and November 1967. - Annls Biol. 29: 52 - 56.
- , 1969. Hydrographical and chemical observations in the Southern Bight, February, May, August and November, 1968. - Annls Biol. 25: 51 - 59.
- , 1970a. Hydrographic and chemical observations in the Southern Bight, February, May, July and October, 1969. - Annls Biol. 26: 73 - 81.
- , 1970b. Instructie voor de bepaling van het zoutgehalte van zeewater met een inductief gekoppelde salinometer. - Interne publicatie NIOZ, 1970-6, 13 pag.

Verwey, J., 1952. On the ecology of distribution of cockle and mussel in the Dutch Wadden Sea, their role in sedimentation and the source of their food supply. - Archs néerl. Zool. 10: 171 - 239.

-, 1968. De rijke Waddenzee. - Natuur en Landsch. 19: 129 - 152-

Internationale Kommission zum Schutze des Rheins gegen Verunreinigung, 1955 - 1971. Tafeln der physikalisch - chemischen Untersuchungen des Rheins, sowie der Mosel/Koblenz.

Tabel I

Berekende C/P verhouding voor de Waddenzee
tijdens de verschillende tochten
uitgaande van de regressielijnen door (0,0)

tochtnummer	C/P verhouding
4	101
IV	66
IIV	85
5	90
6	---
7	119
8	---
9	74
10	83
11	80
12	86
13	79

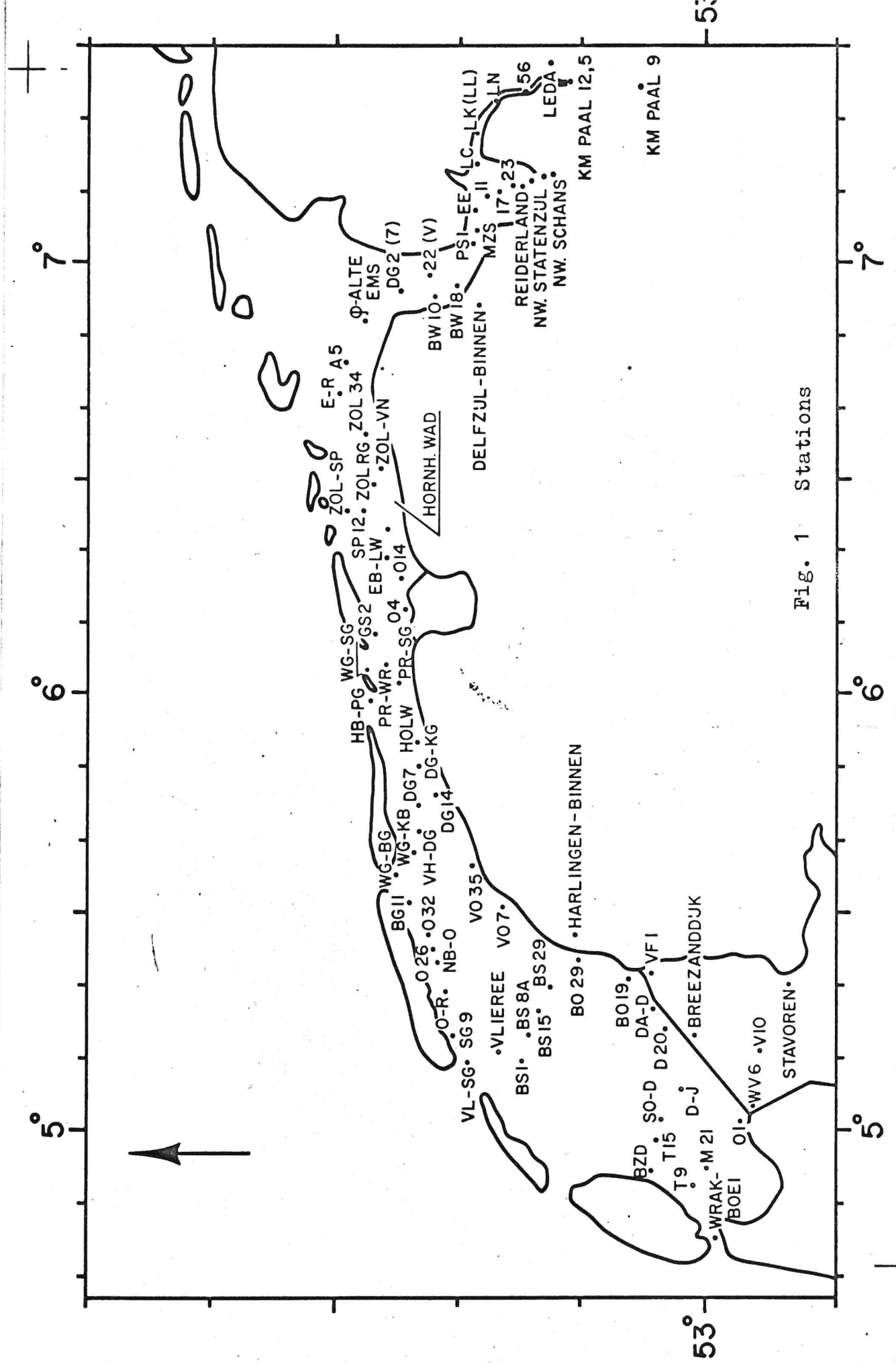
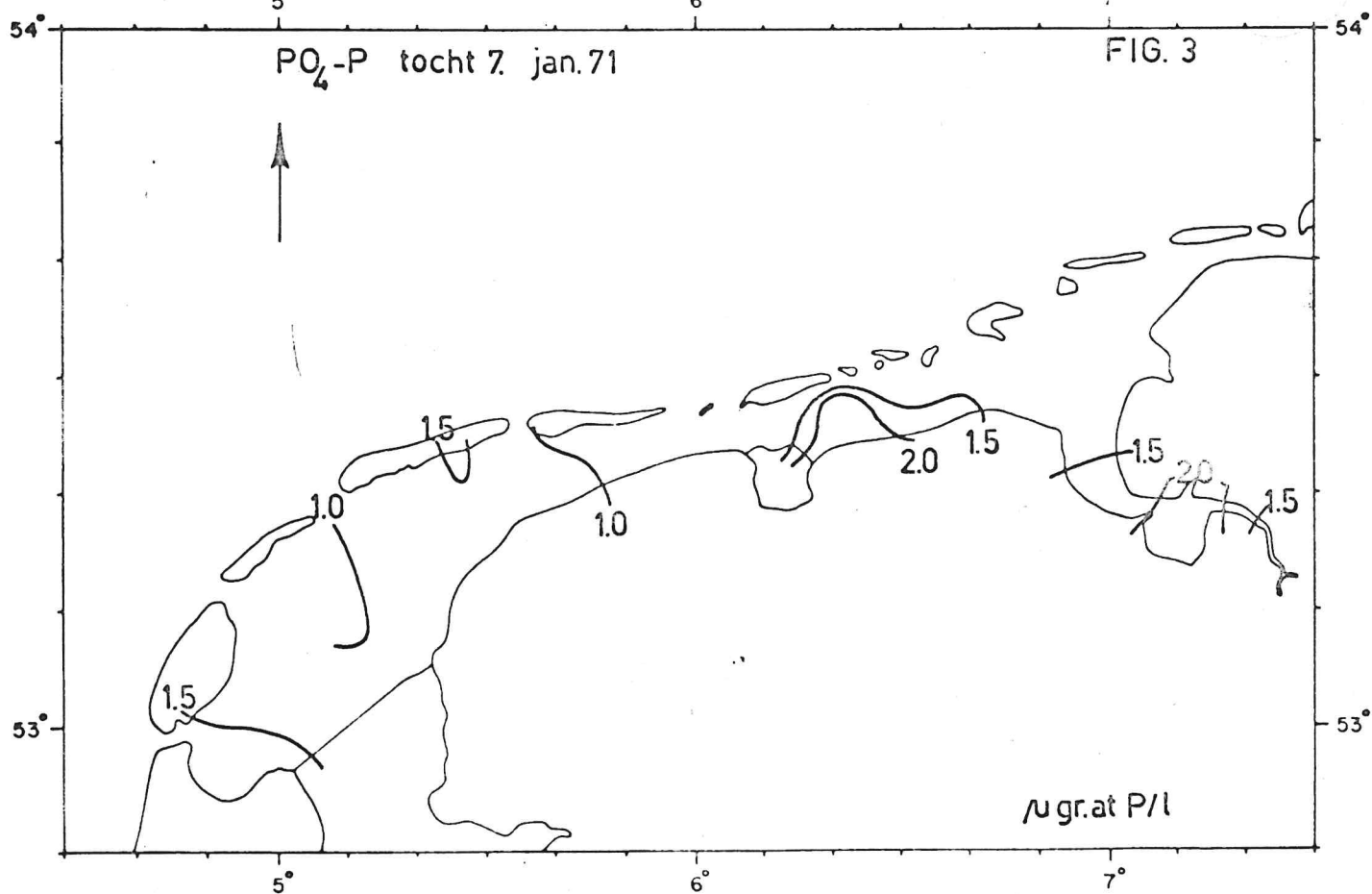
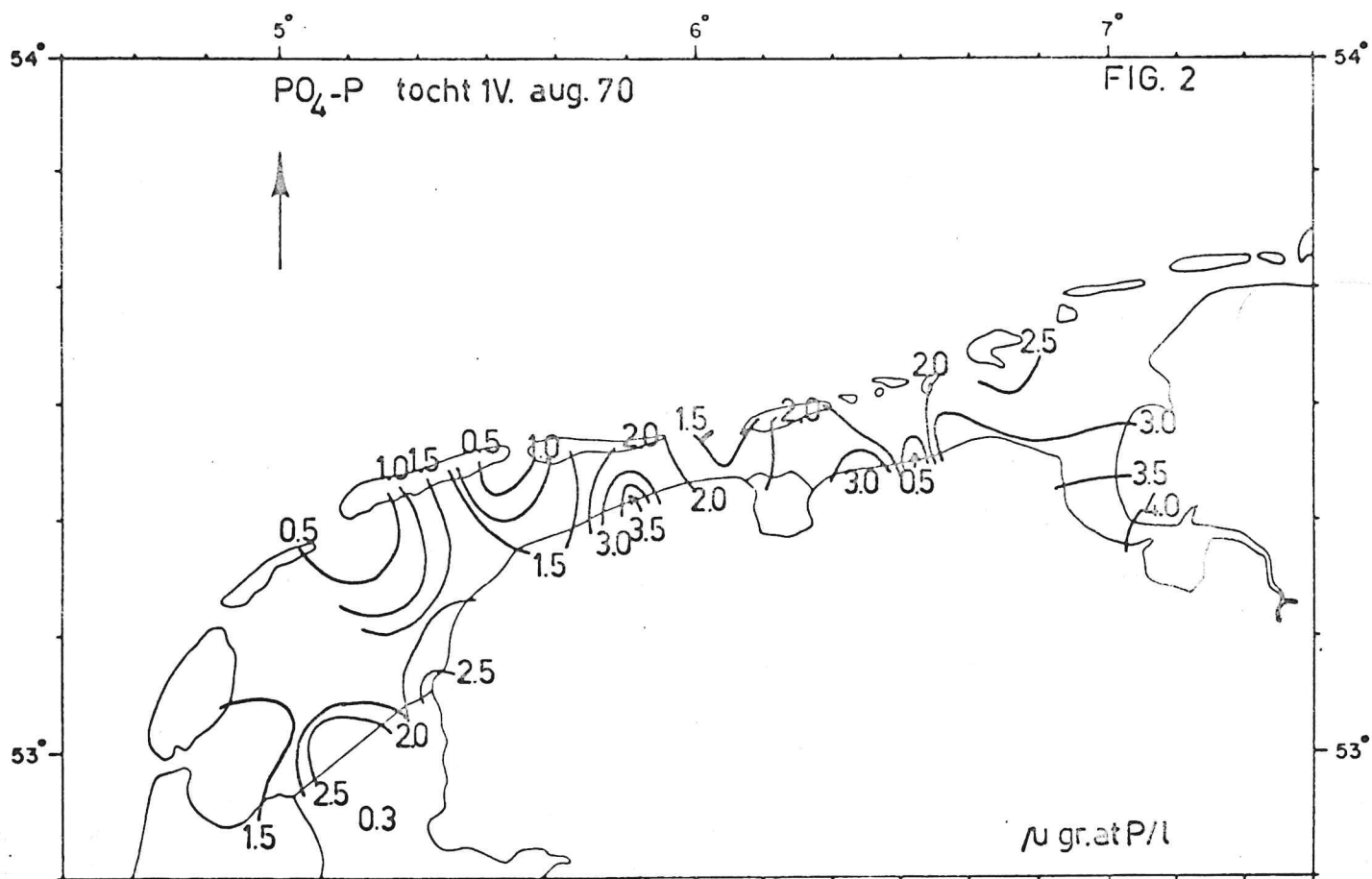
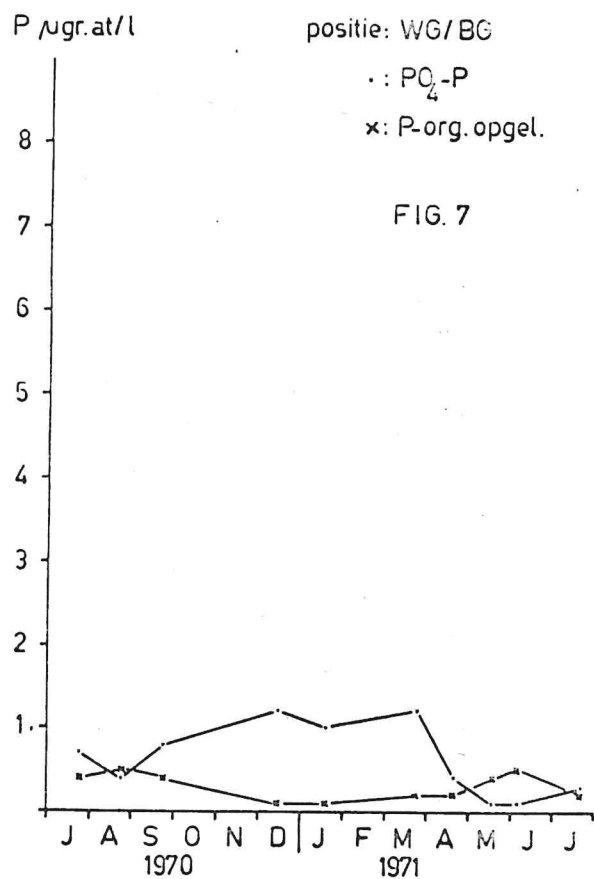
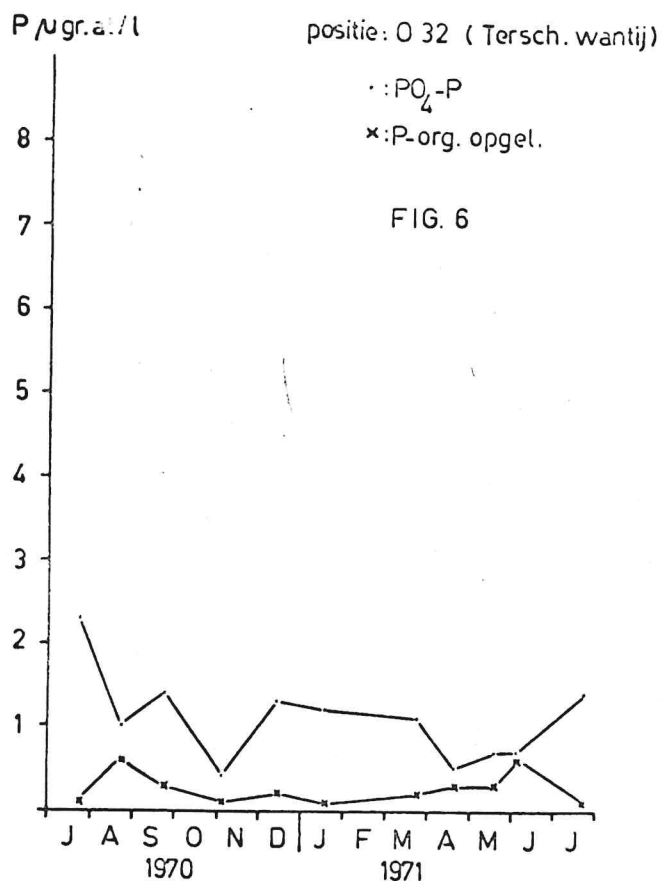
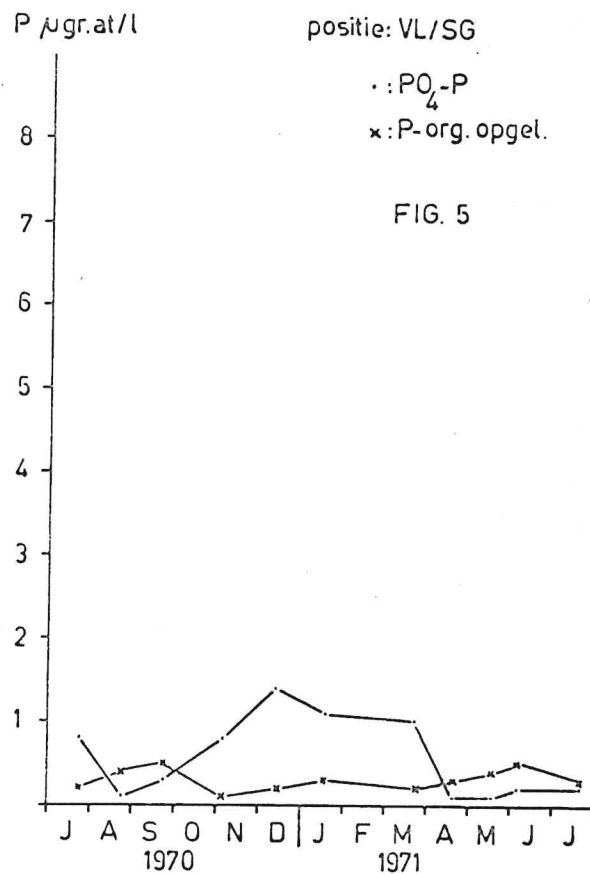
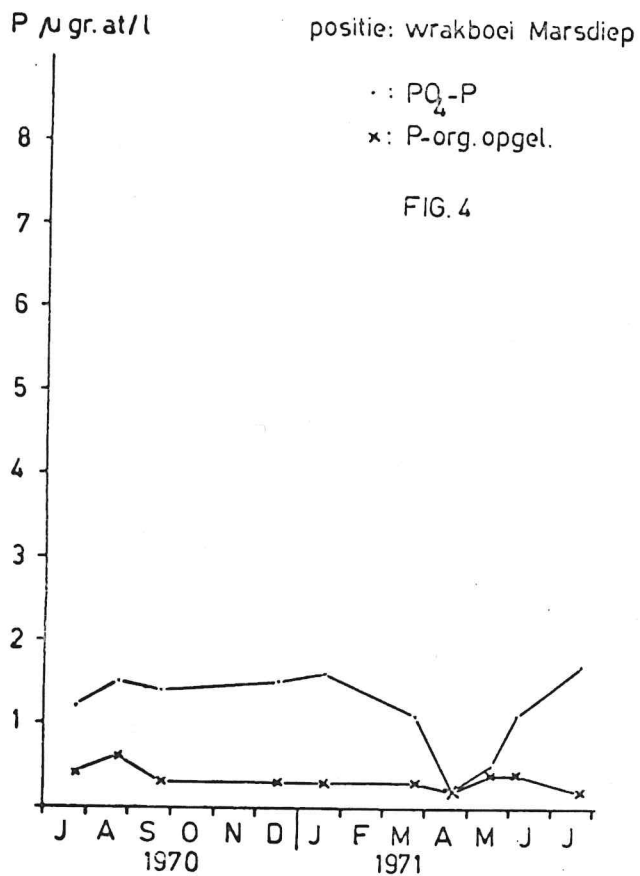
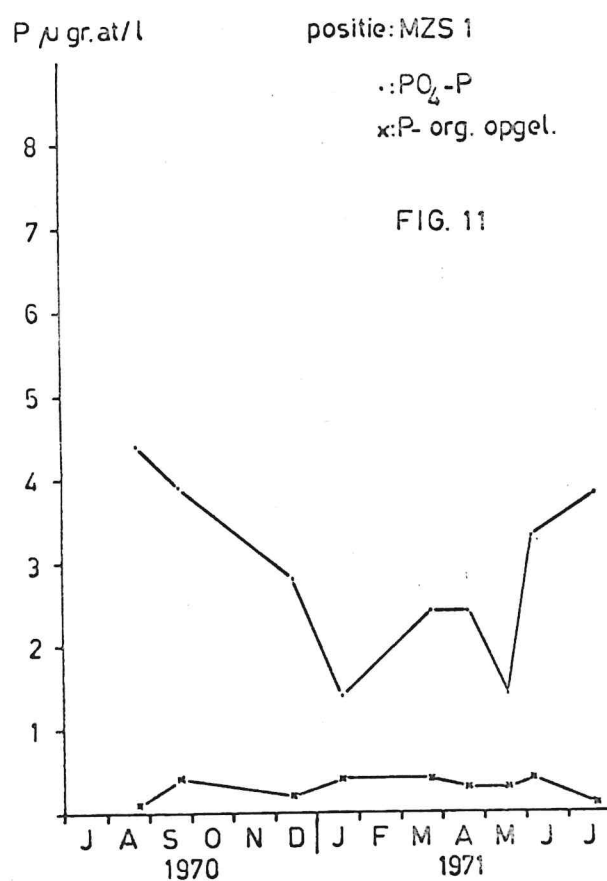
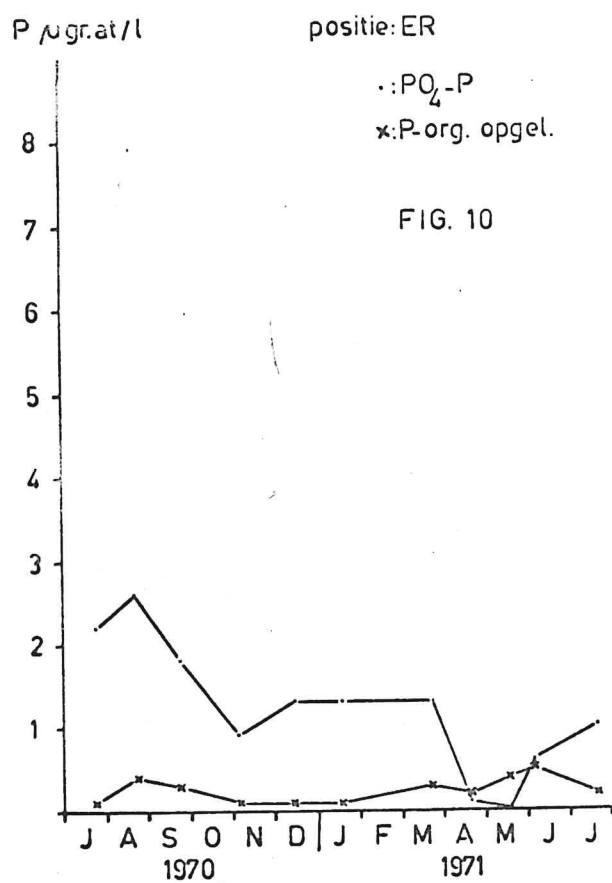
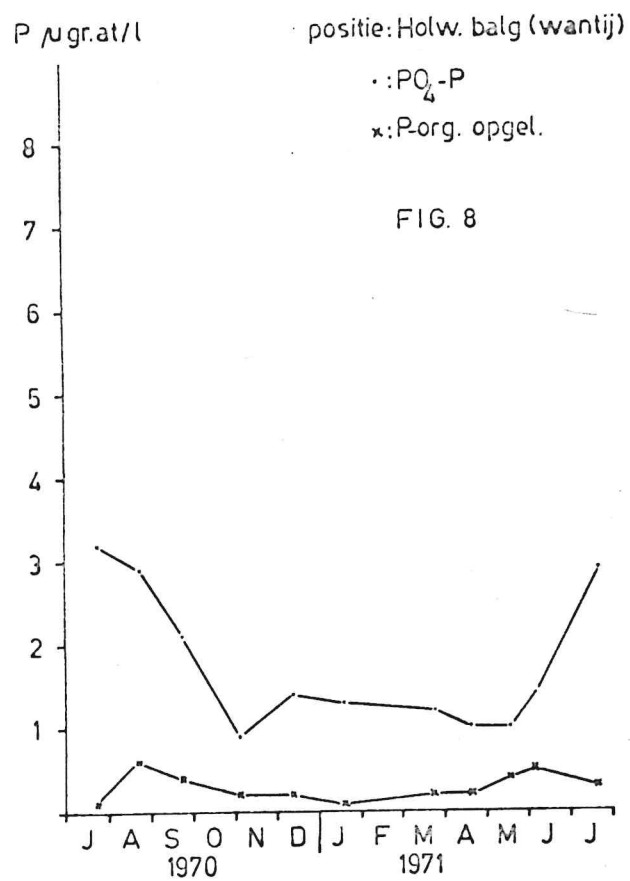
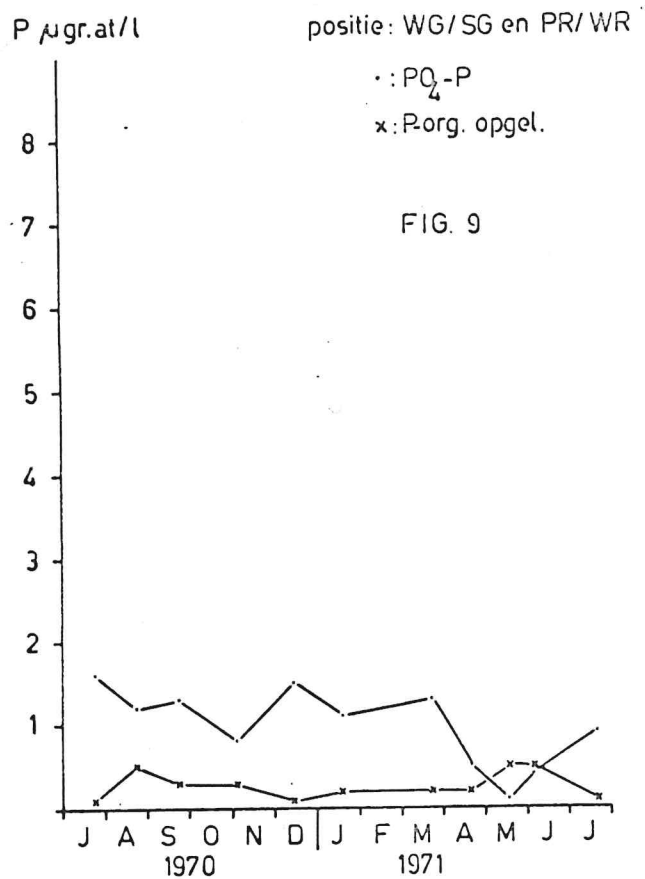


Fig. 1 Stations







P μ gr.at/l

positie: km 12.5 (Kirchborgum)

P μ gr.at/l

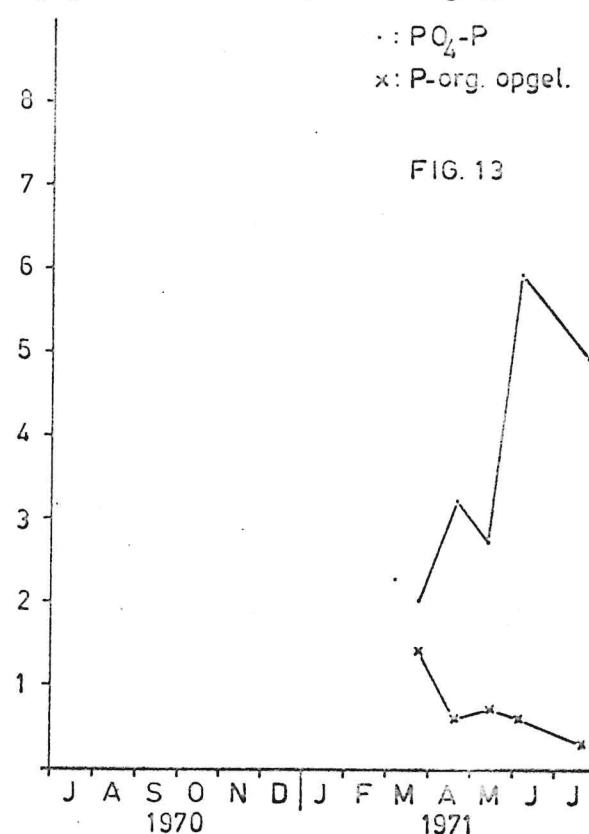
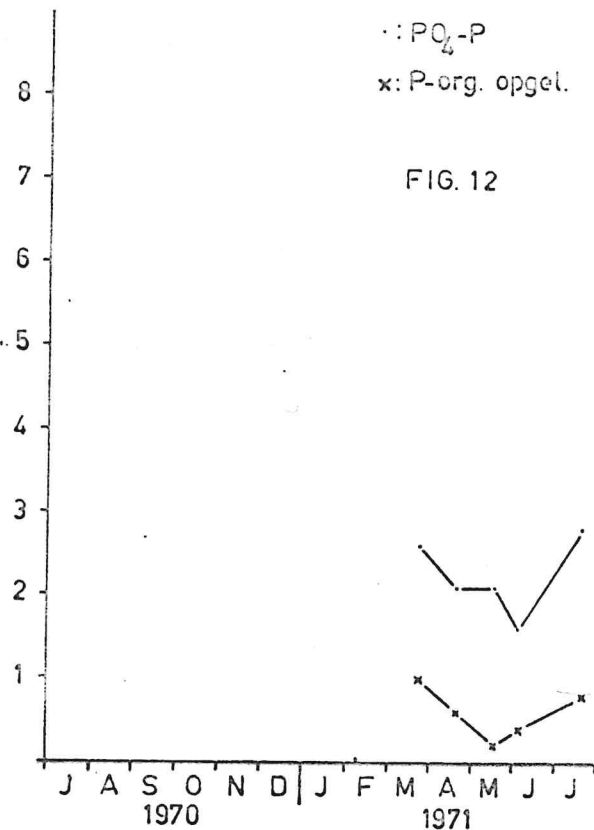
positie: Gr.g. 23

·: PO_4 -P
x: P-org. opgel.

·: PO_4 -P
x: P-org. opgel.

FIG. 12

FIG. 13



P μ gr.at/l

positie: WV6

P μ gr.at/l

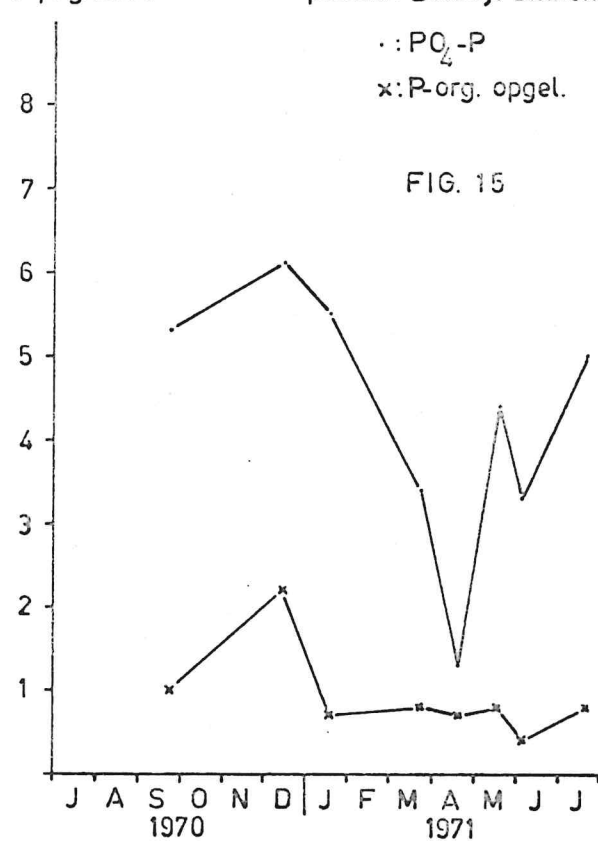
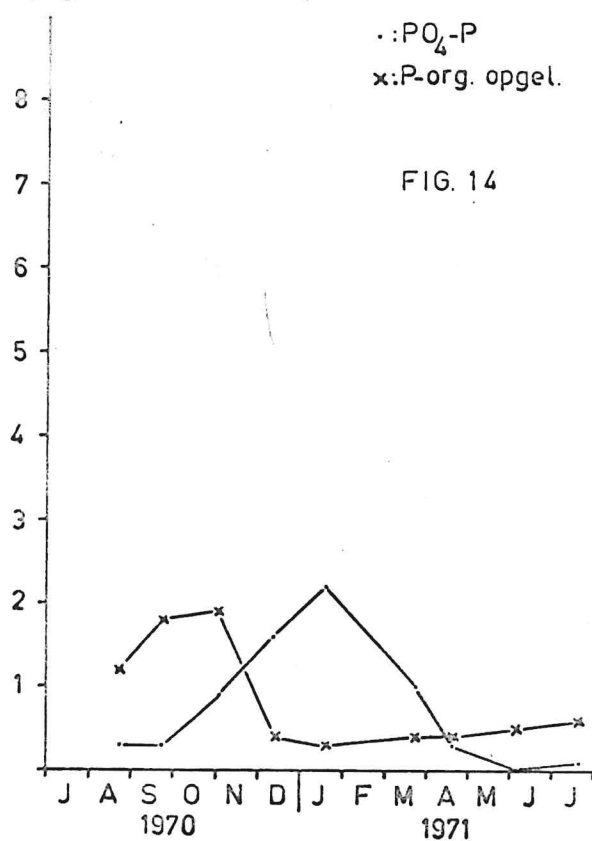
positie: Delfzijl binnen

·: PO_4 -P
x: P-org. opgel.

·: PO_4 -P
x: P-org. opgel.

FIG. 14

FIG. 15



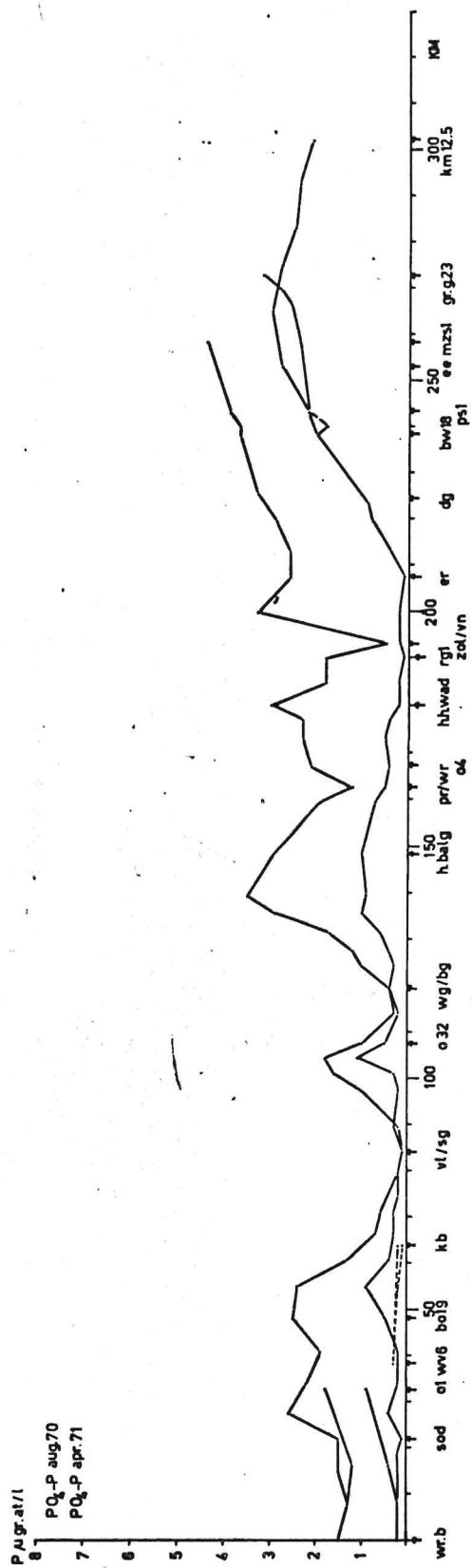


Fig. 16.

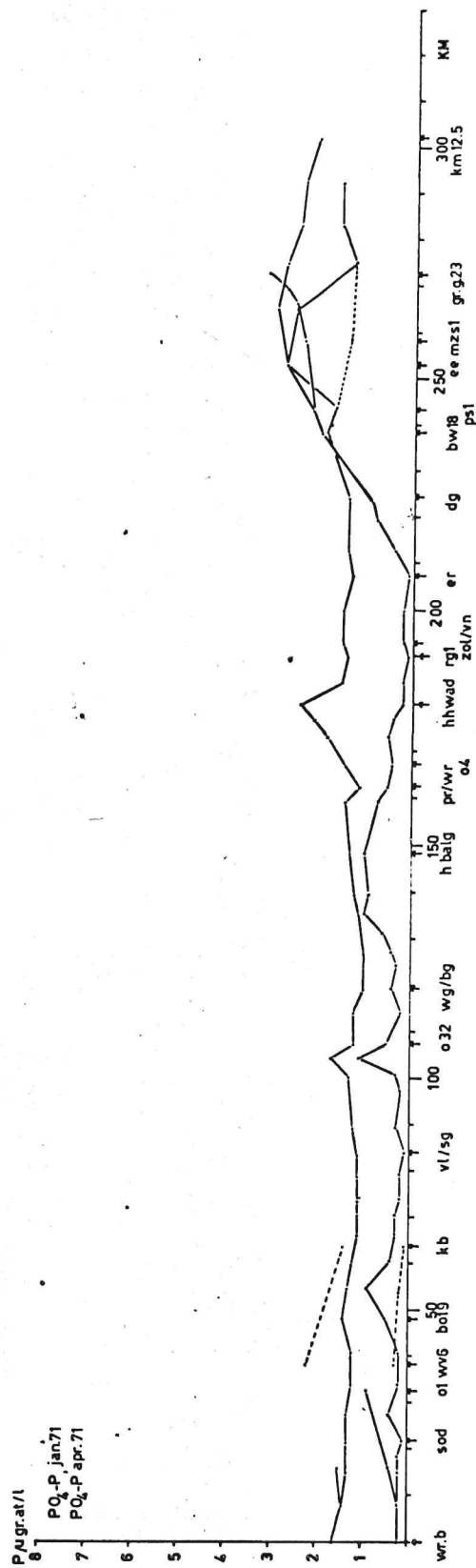


Fig. 17.

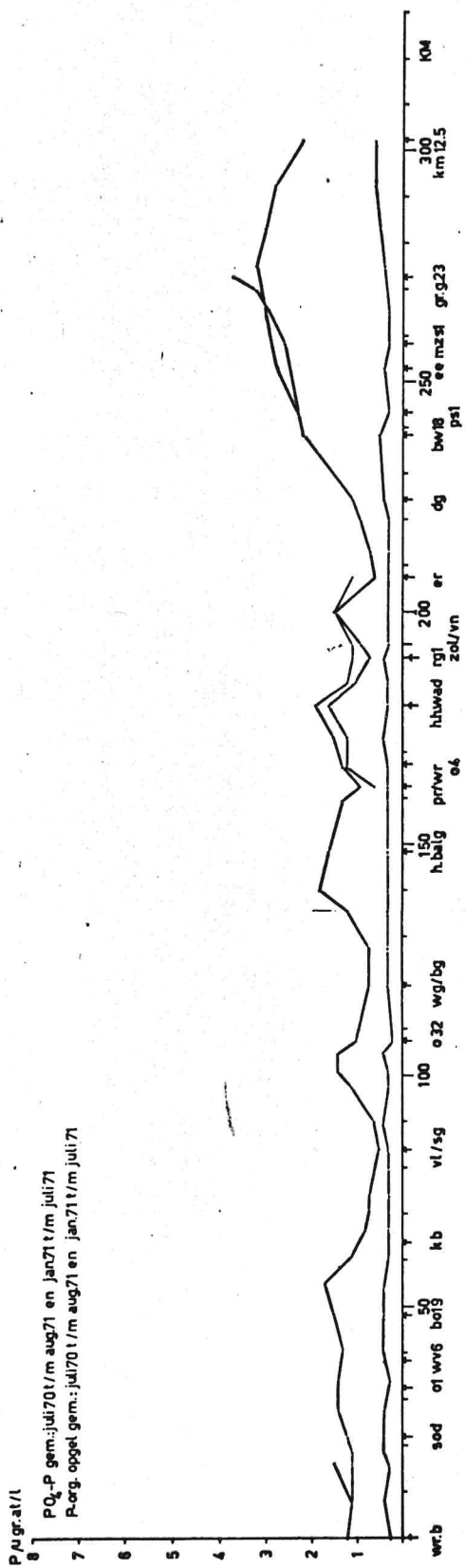


Fig. 18.

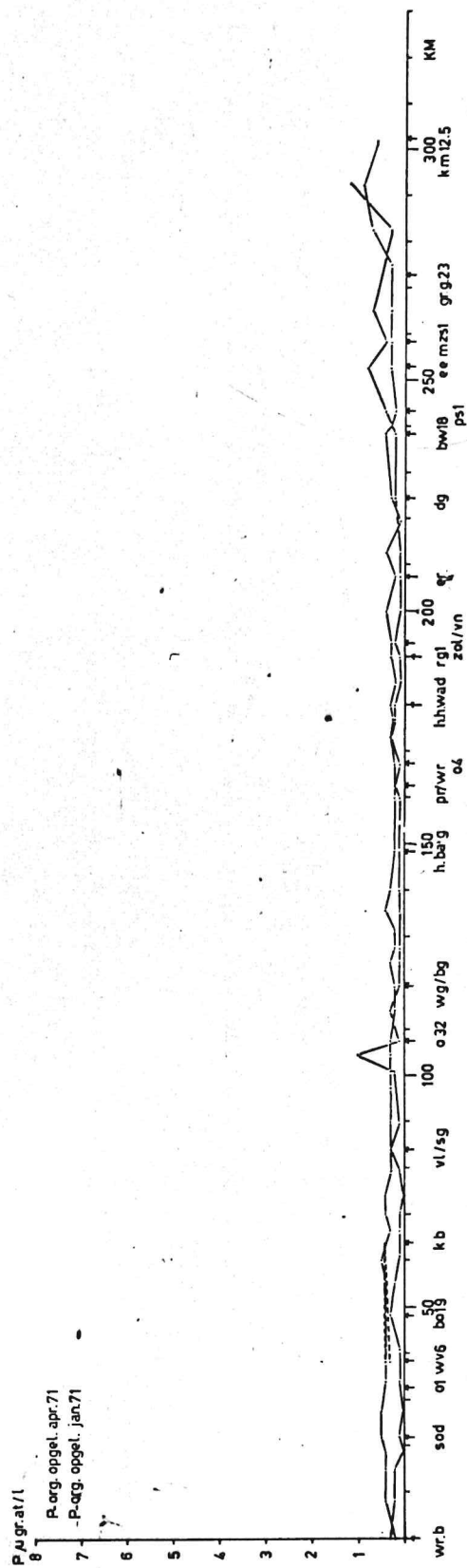


Fig. 19.

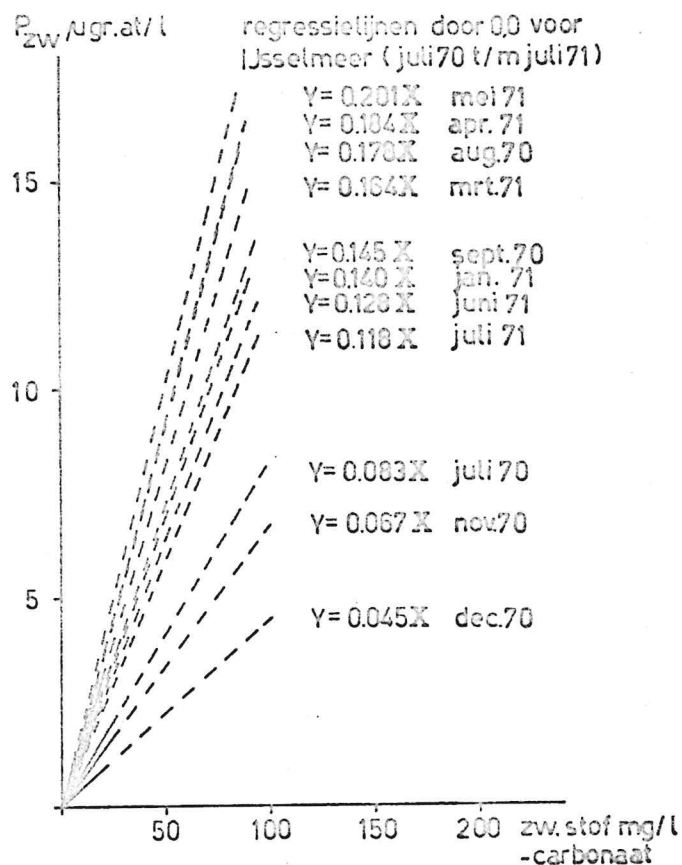
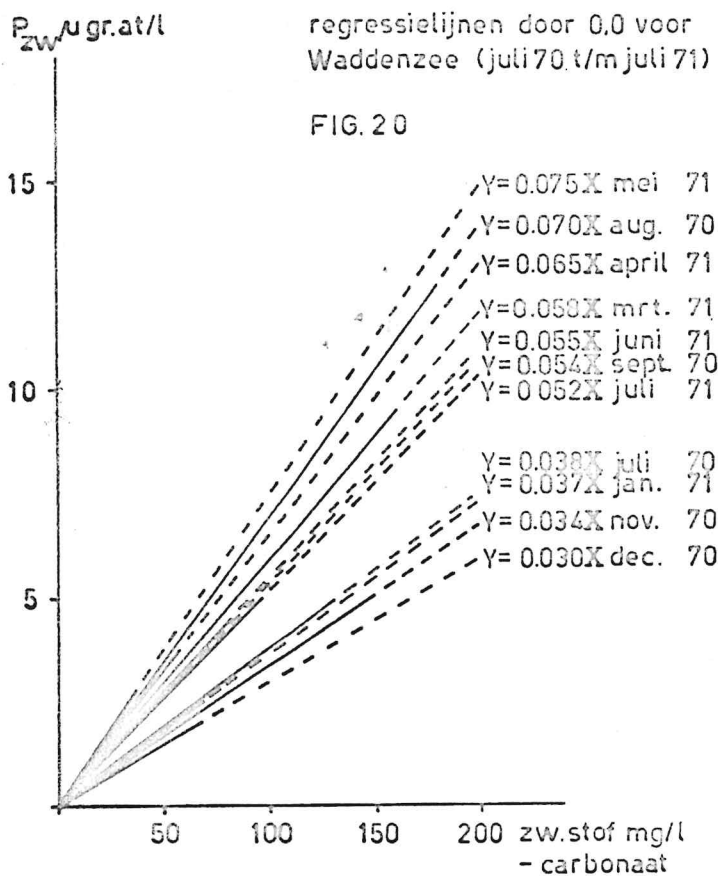


FIG. 21

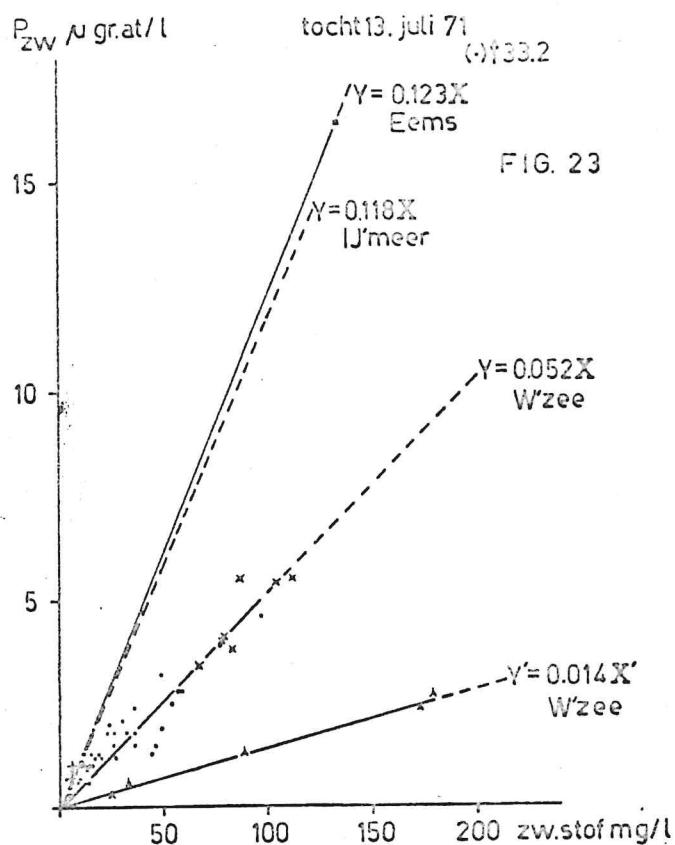
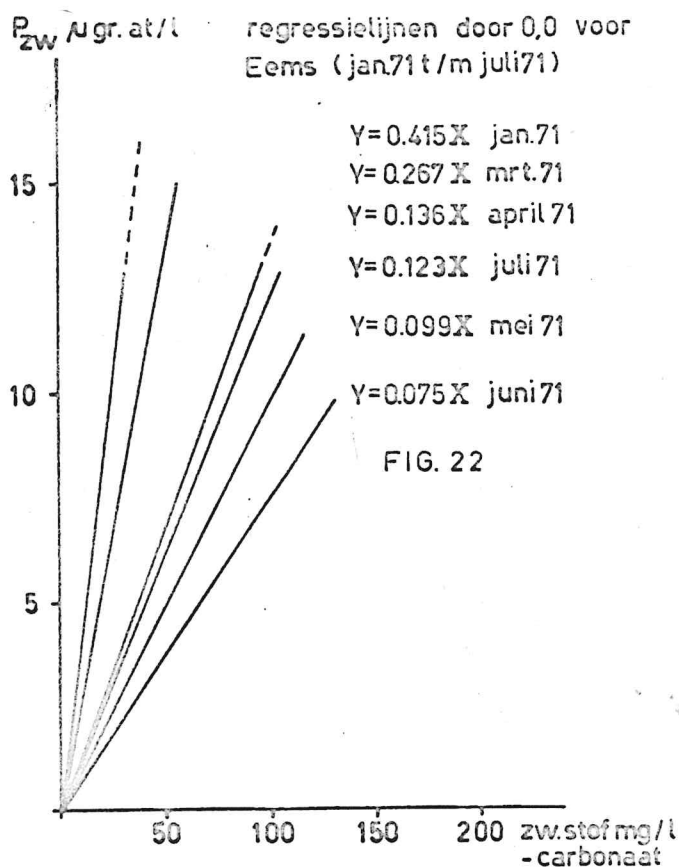


Fig. 23.

• Waddenzee, + IJsselmeer en Δ Eems (rivier) punten, gebruik voor de berekening van de regressielijnen; Δ Waddenzee en Eems-Dollard punten, niet gebruikt bij de berekening van de regressielijnen.

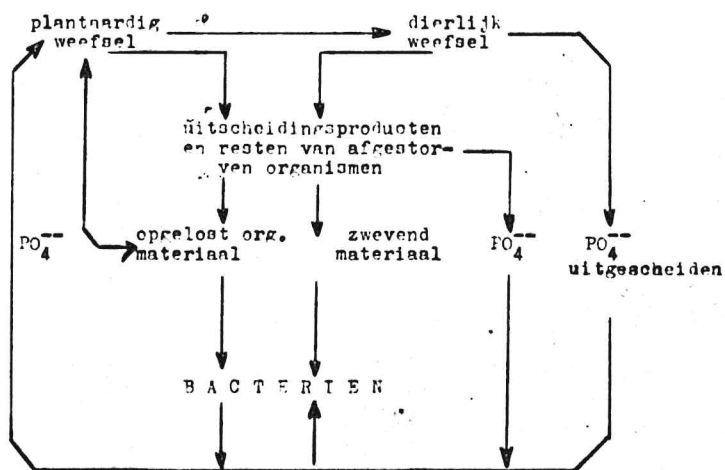
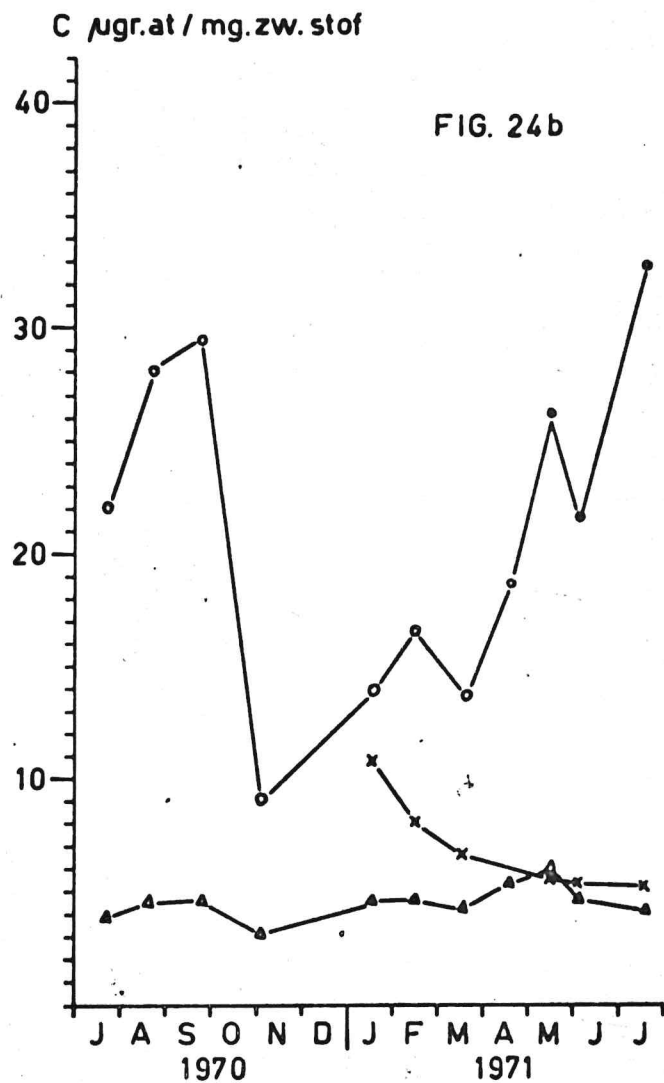
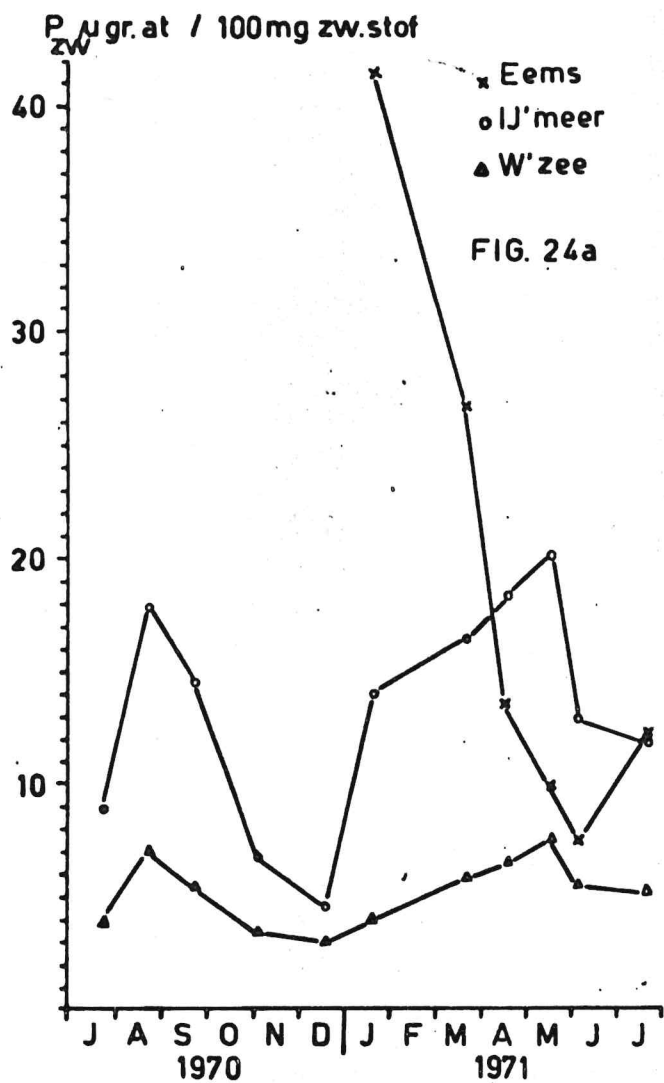


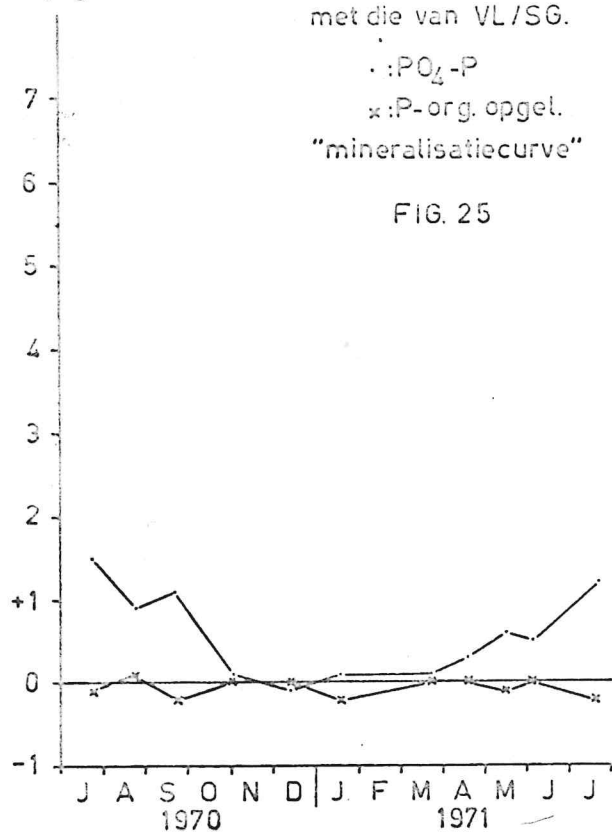
Fig. 24 C. Naar Harvey 1955.

P μ grat/l

conc. O32 verminderd
met die van VL/SG.

·: PO_4 -P
x: P-org. opgel.
"mineralisatiecurve"

FIG. 25

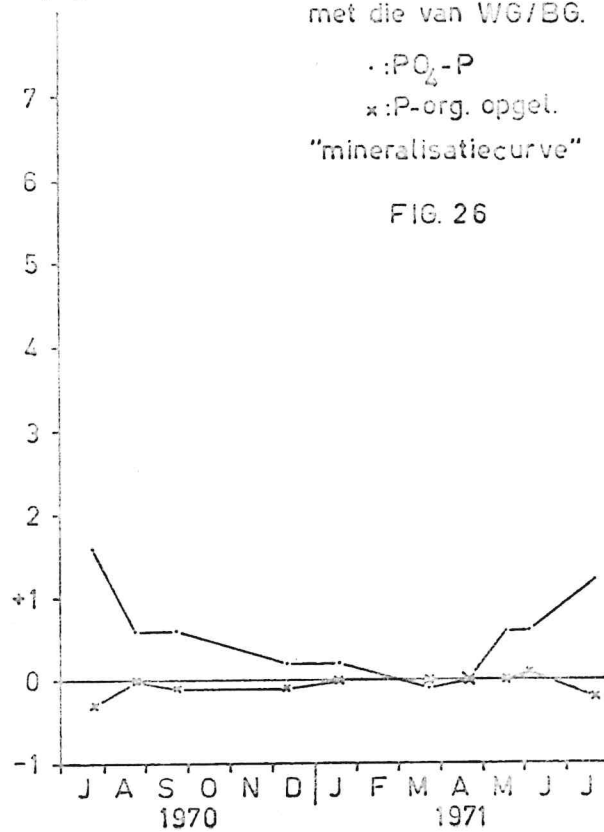


P μ grat/l

conc. O32 verminderd
met die van WG/BG.

·: PO_4 -P
x: P-org. opgel.
"mineralisatiecurve"

FIG. 26

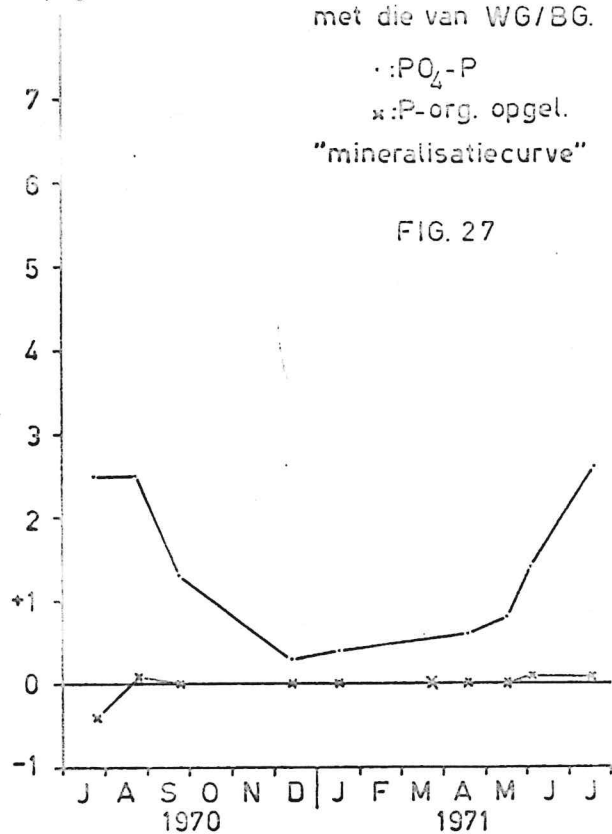


P μ grat/l

conc. H.balg verminderd
met die van WG/BG.

·: PO_4 -P
x: P-org. opgel.
"mineralisatiecurve"

FIG. 27

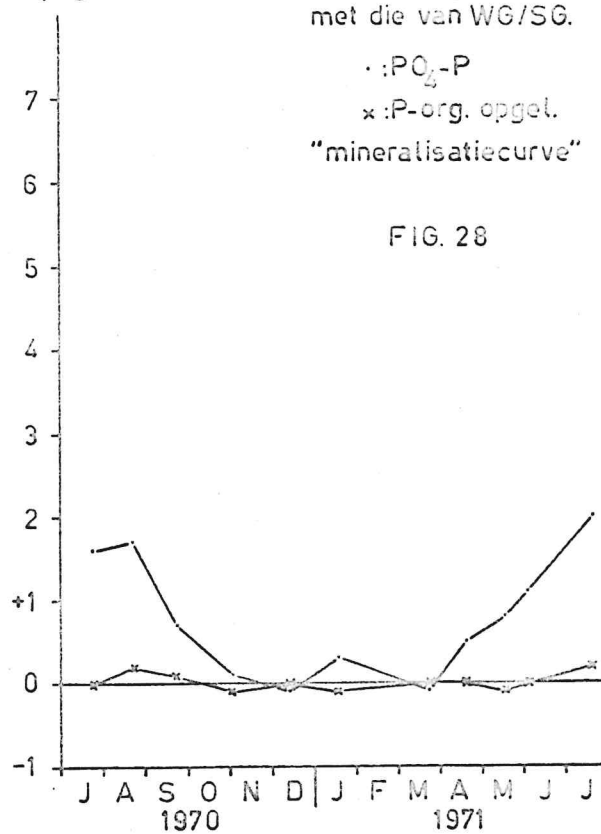


P μ grat/l

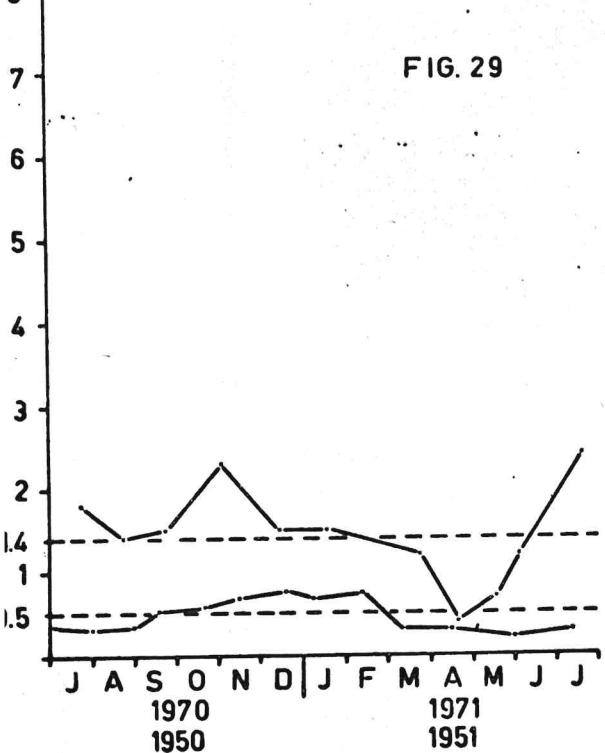
conc. H.balg verminderd
met die van WG/SG.

·: PO_4 -P
x: P-org. opgel.
"mineralisatiecurve"

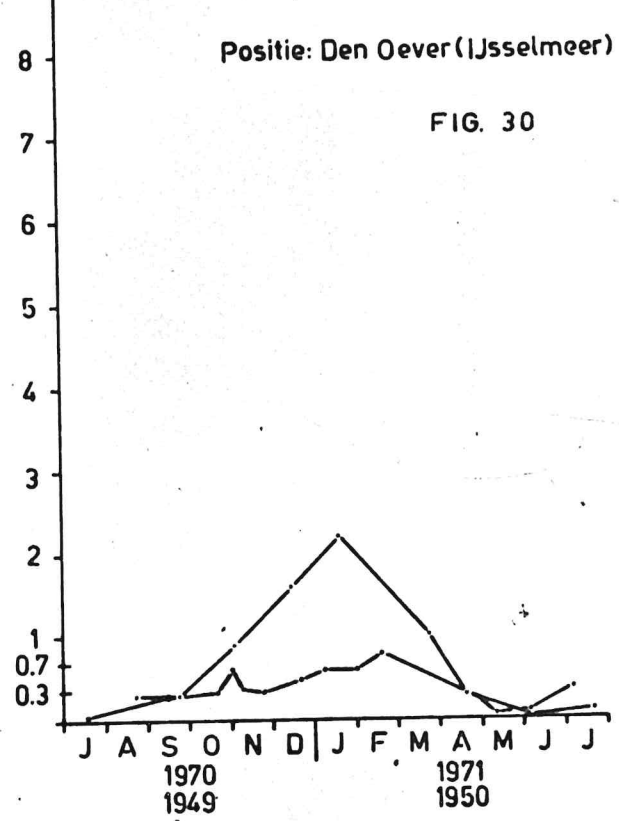
FIG. 28



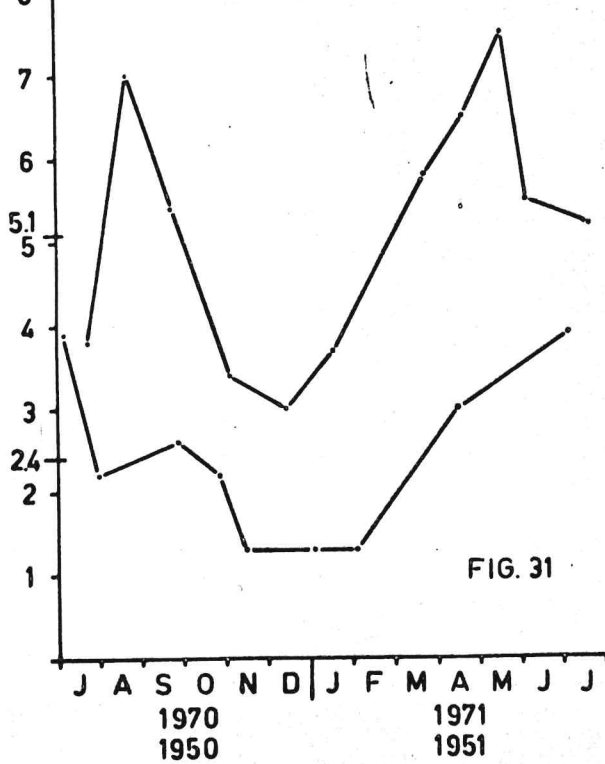
$P \mu\text{gr.at/l}$ Seizoensvariatie $\text{PO}_4\text{-P}$ 1970/71
 vergeleken met 1950/51 (Postma1954)
 P-gem. over traject: Marsdiep, Mal -
 zwin en Wierbalg.



$P \mu\text{gr.at/l}$ Seizoensvariatie $\text{PO}_4\text{-P}$ 1970/71
 vergeleken met 1949/50 (Postma1954)



$P_{\text{zw}} \mu\text{gr.at} / 100\text{mg. zw. stof}$ Seizoensvariatie P_{zw}
 -carbonaat 1970/71 vergeleken
 met 1950/51 (Postma
 1954)



Kg/sec. FIG. 32

