

Nalevering van fosfaat door sedimenten

IV: Transport over het grensvlak sediment-water

Inleiding

Dit artikel is het vierde in een serie die in 1979 is gestart (Lijklema en Hieltjes, 1979: I en II en Hieltjes en Lijklema, 1979: III) betreffende een onderzoek naar de mogelijke nalevering van fosfaat door bodemsedimenten van stagnante wateren, met name van het Brielse Meer.

Op grond van P-totaal balansen is voor vele meren, waaronder het Brielse Meer (Rijkswaterstaat, 1972, 1974), aangetoond dat er een netto accumulatie van fosfaat plaatsvindt. Deze netto sedimentatie is de



DR. IR. A. H. M. HIELTJES
Vakgroep Procesbeheersing
en Milieubeheer, T.H. Twente



DR. L. LIJKLEMA
Vakgroep Procesbeheersing
en Milieubeheer, T.H. Twente

resultante van twee tegengestelde stromen: bruto sedimentatie en nalevering. De verschillende biologische, fysische en chemische processen die zijn betrokken bij het transport van fosfaat tussen water en sediment, maken dat deze fluxen moeilijk of niet voorspelbaar zijn.

In dit onderzoek lag het accent op de flux van fosfaat vanuit het sediment naar het bovenstaande water. Voor de waterbeheerder is het namelijk van groot belang te weten wat het effect van deze interne belasting op de productiviteit van het water zal zijn als de externe belasting door saneringsmaatregelen wordt vermindert. Ook zonder fosfaatreductie wordt met name's zomers soms een niet te verwaarlozen netto P-afgifte gevonden. Zo rapporteerde Uunk (1979) over een aanzienlijke fosfaataflevering in het Wolderwijd/Nuldernaauw en Bassie (1978) in het spaarbekken de Braakman in Zeeuws Vlaanderen.

Het transport van fosfaat vanuit het sediment naar het bovenstaande water kan onderscheiden worden in:

- transport van particulier fosfaat door resuspensie, veroorzaakt door stroming, golven en/of bioturbatie;
- transport van opgelost fosfaat door diffusie, als gevolg van een concentratiegradiënt over het grensvlak sediment-water en door advectie als gevolg van kwel, compactering en/of bioturbatie.

Afhankelijk van de samenstelling van het geresuspendeerde materiaal en de in het

bovenstaande water heersende condities van pH, zuurstof- en fosfaatconcentratie zal desorptie of adsorptie van fosfaat aan dit materiaal optreden (Hieltjes en Lijklema, 1979). Hier zullen de resultaten weergegeven worden van een onderzoek naar het mogelijke optreden van resuspensie in het Brielse Meer t.g.v. een krachtige wind. Vooral in ondiepe meren kan dit een belangrijke term zijn in de fosfaatbalans. Zo is bijvoorbeeld voor het IJsselmeer een positieve correlatie gevonden tussen windsnelheid en totaal fosfaatgehalte (ZZW, 1976), hetgeen wijst op het optreden van resuspensie van bodemmateriaal.

Wat betreft het transport van opgelost fosfaat is in een vorig artikel (Hieltjes en Lijklema, 1979) aangegeven dat er een fosfaatconcentratiegradiënt over het grensvlak sediment-water bestaat, zodat er in principe transport van opgelost fosfaat door diffusie kan optreden. Tevens is in dat artikel ingegaan op factoren die van invloed zijn op het ontstaan en de grootte van deze concentratiegradiënt (relatieve concentraties van fosfaat en ijzer, de redox- en pH-condities).

Hier zal aandacht besteed worden aan de bepaling van fosfaatafgiftesnelheden onder verschillende condities van pH, zuurstofconcentratie en temperatuur. Deze (laboratorium-)experimenten zijn zodanig opgezet dat er noch resuspensie noch advectie optreedt, zodat fosfaat slechts via diffusie in het bovenstaande water terecht kan komen. Het totaal aan processen dat hierbij een rol speelt is reeds beschreven (Hieltjes en Lijklema, 1979; Hieltjes, 1980) en nog eens schematisch weergegeven in afbeelding 1: de fosfaatconcentratiegradiënt zoals die bestaat tussen het interstitiële water en het bovenstaande water wordt in stand gehouden door enerzijds in het meerwater de opname van opgelost fosfaat door algen en adsorptie aan ijzerverbindingen en

calciumcarbonaat en anderzijds door in het sediment optredende afgifte van fosfaat door desorptie van mineralen en ontleding van organisch materiaal.

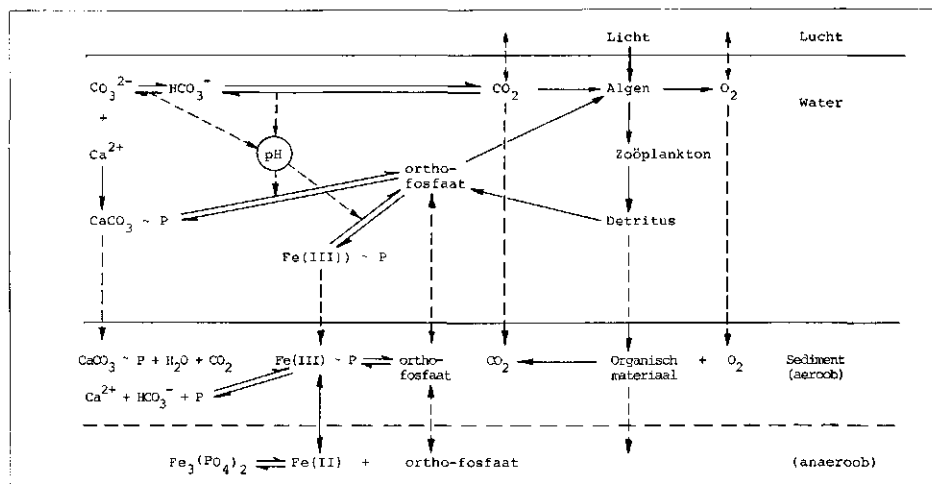
Kennis van deze mechanismen is nodig voor een voorspelling van de fosfaathouding van een meer bij gewijzigde belasting. In een volgend artikel zal voor het Brielse Meer een eerste benadering daarvan beschreven worden.

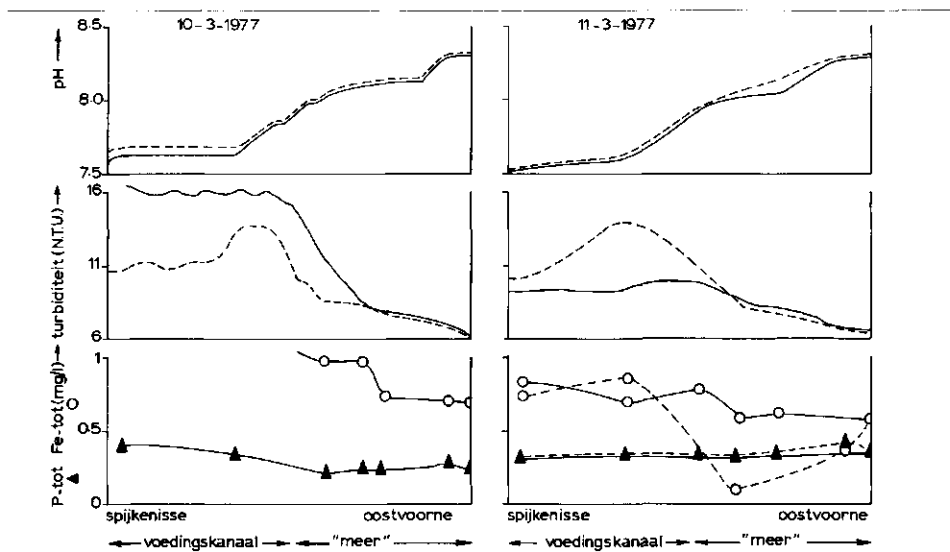
Resuspensie

Uit theorie en praktijk is bekend dat het of niet optreden van resuspensie afhankelijk is van een groot aantal factoren. De belangrijkste hiervan zijn (RIWA/RID, 198 Terwindt, 1976) de stroomsnelheid en de snelheidsgradiënten in het water, de korrelgrootte (-verdeling) en de cohesie van het bodemmateriaal, de ruwheid van de bodem de vorm en diepte van de waterloop en bij golven t.g.v. wind ook nog de frequentie, snelheid, richting en duur van de wind en de strijklengte (= lengte van het open wateroppervlak — gemeten in de windrichting — dat beschikbaar is voor golfontwikkeling). Daar het Brielse Meer een vrijwel stagnant water is, zal slechts resuspensie als gevolg van wind optreden. Om dit te onderzoeken zijn op een viertal dag in 1977 met een speciaal uitgerust schip van Rijkswaterstaat sleepmetingen uitgevoerd. Al varende zijn op 1 of 3 m diepte de pH en turbiditeit continu gemeten (Hieltjes, 1980). Daarnaast zijn op verschillende punten in het meer watermonsters genomen voor bepaling van de totaal P en Fe gehalten.

De resultaten van de eerste meting op 10 maart (afb. 2) zijn sterk beïnvloed door het kort tevoren inlaten van water bij Spijkenisse uit de Oude Maas. Er was een duidelijk verloop van de turbiditeit, pH en P-totaal en Fe-totaal concentraties in de

Afb. 1 - Fosfaatcyclus in een ecosysteem; naar voorbeeld van Lijklema en Hieltjes (1978).





afb. 2 - Resultaten van metingen ten behoeve van resuspensie onderzoek van oost naar west in het Brielse Meer. Getrokken lijn: vaarrichting van Spijkenisse naar Oostvoorne (1 m diepte). Gestippelde lijn: vaarrichting van Oostvoorne naar Spijkenisse (3 m diepte). Vlak voor eerste meting (10-3) is het water ingelaten bij Spijkenisse, daarna niet meer. Windkracht 2-4 Beaufort, Z-ZW.

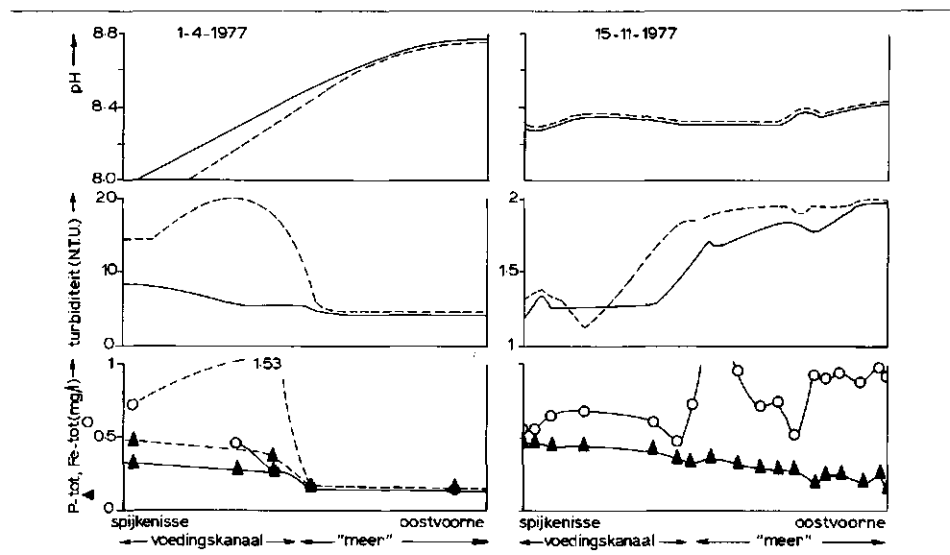
engerichting van het meer waarneembaar.

Het troebele ingelaten water zorgt voor een hoge turbiditeit in het voedingskanaal, terwijl in het brede gedeelte van het meer, waar het water tot 'rust' komt, de turbiditeit veel lager is. De turbiditeit in het voedingskanaal bleek een paar uur na de eerste meting behoorlijk te zijn gedaald g.v. coagulatie en/of sedimentatie van zwevende deeltjes. Ook de pH is niet constant in de lengterichting van het meer: het voedingskanaal bevat het wat zuurdere Maas water, terwijl het meer een hogere pH heeft t.g.v. biochemische processen. Een dag later (11-3) zijn de verschillen in turbiditeit, totaal P en totaal Fe

tussen voedingskanaal en meer verder afgenomen. Het watersysteem lijkt zich na het inlaten van water op 10 maart te 'stabiliseren'.

Bij de sleepmeting op 1 april zijn grote verschillen waargenomen in turbiditeit, pH, totaal P en totaal Fe in het voedingskanaal tussen de eerste en tweede meting op die dag (afb. 3). De geconstateerde veranderingen kunnen echter niet verklaard worden door het optreden van resuspensie ten gevolge van de vrij krachtige wind omdat deze gedurende de gehele tocht een vrijwel constante sterkte en richting had. Veeleer moeten deze wijzigingen in pH, turbiditeit en Fe- en P-concentraties worden toege-

afb. 3 - Resultaten van metingen ten behoeve van resuspensie onderzoek van oost naar west in het Brielse meer. Getrokken lijn: vaarrichting van Spijkenisse naar Oostvoorne (1 m diepte). Gestippelde lijn: vaarrichting van Oostvoorne naar Spijkenisse (3 m diepte). Op 1-4 is tussentijds water ingelaten. Windkracht 6-7 Beaufort, Z-ZW. Op 15-11 geen water ingelaten. Windkracht 9 Beaufort, W-NW.



schreven aan het tussentijds inlaten van water.

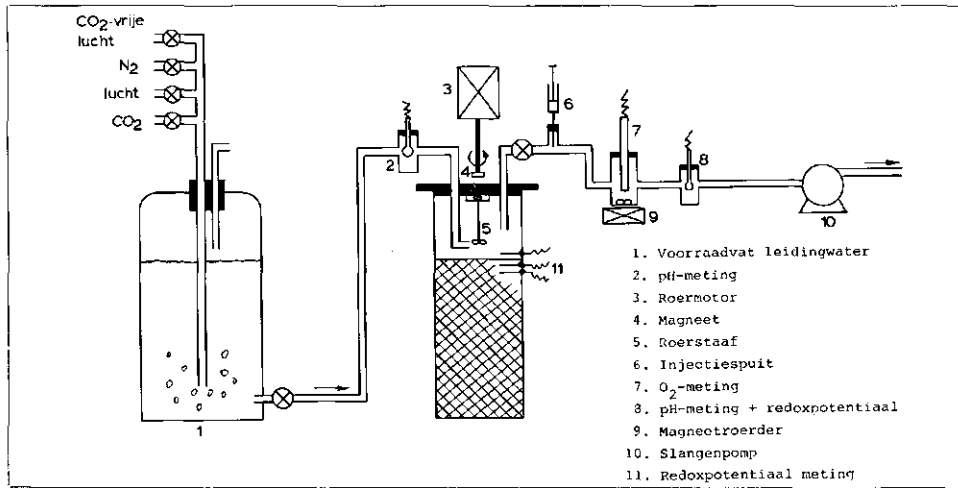
In afb. 3 zijn tevens de meetresultaten van 15 november weergegeven, een dag waarop een flinke storm stond, nadat het al zo'n week lang vrij hard had gewaaid. In die periode is geen water ingelaten. De turbiditeitswaarden lagen een factor 2-10 lager dan tijdens de vorige metingen. Tevens bleek in tegenstelling met de andere meetdagen de turbiditeit in het meer hoger dan in het voedingskanaal; het absolute verschil was echter gering. De pH had door de goede menging t.g.v. de storm in de lengterichting van het meer vrijwel overal dezelfde waarde. Ook de P(tot)- en Fe(tot)-concentraties waren niet of nauwelijks hoger dan anders.

Concluderend kan dan ook gesteld worden dat op grond van deze metingen er geen aanwijzingen zijn voor het optreden van resuspensie van bodemmateriaal in het Brielse Meer als gevolg van een sterke wind.

Transport van opgelost fosfaat

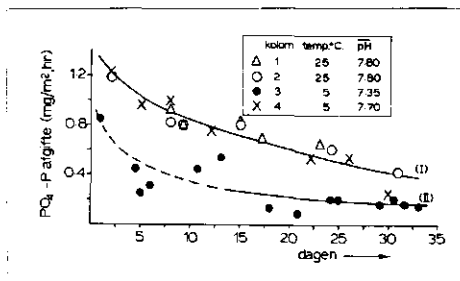
Zowel in aerobe als anaerobe sedimenten is i.h.a. de fosfaatconcentratie in het poriënwater hoger dan in het bovenstaande oppervlaktewater. Indien alleen door diffusie transport kan optreden is de grootte van deze concentratiegradiënt bepalend voor de flux door het grensvlak. Met de in afb. 4 geschetste opstelling zijn continue experimenten uitgevoerd onder verschillende condities van temperatuur, pH en zuurstofconcentratie ter bepaling van fosfaatafgiftesnelheden (Hieltjes, 1980).

Het hart van de opstelling bestaat uit een perspexcilinder (diameter 12 cm, hoogte ca. 60 cm) met 'ongestoord' Brielse Meer sediment en daarboven een laag water. Uit een voorraadvat wordt leidingwater met een verwaarloosbaar kleine fosfaatconcentratie d.m.v. een pomp over het sediment gevoerd. Dit water kan desgewenst op een bepaalde pH worden gebracht. Een en ander geschiedt door regeling van het CO₂-bicarbonaat evenwicht in het voorraadvat. De zuurstofconcentratie in het boven het sediment staande water kan op twee manieren ingesteld worden. De meest gebruikte is die waarbij het met zuurstof verzadigde voorraadvatwater met een bepaald debiet over het sediment wordt geleid. Bij een lange verblijftijd (laag debiet) van het water stelt zich een lage zuurstofconcentratie in en deze kan zelfs nul worden ('anaerob'). Bij een korte verblijftijd worden hoge zuurstofconcentraties bereikt ('aerob'). De zgn. 'N₂-anaerobe' condities zijn gerealiseerd door het door te leiden water met stikstof zuurstof vrij te maken. De temperatuur van het voorraad-



Afb. 4 - Laboratoriumopstelling t.b.v. fosfaatafgifte experimenten.

vat en de sedimentkolom kan ook worden geregeld. Van tijd tot tijd worden watermonsters genomen ter bepaling van de fosfaatconcentratie. Allereerst is de invloed van de temperatuur op de fosfaatafgiftesnelheid onderzocht. Onder aerobe condities — zuurstofconcentratie in bovenstaand water > 0 — is het effect van de temperatuur niet eenduidig (afb. 5). De kolommen 1 en 2 (beide 25 °C) en 4 (5 °C) vertonen een vrijwel gelijk verloop in de tijd (curve I), terwijl alleen voor kolom 3 (5 °C) lagere afgiften (curve II) zijn gemeten. Bij 'anaerobe' condities — zuurstofconcentratie beneden de detectiegrens — is de invloed van de temperatuur wel duidelijk: hogere afgiften bij hogere temperaturen (afb. 6). Een verklaring voor de geconstateerde verschijnselen zou het volgende kunnen zijn. Door de bij hogere temperaturen verhoogde bacteriële activiteit zal het zuurstofverbruik van het sediment toenemen (afb. 7). In het aerobe geval is de aanvoer van zuurstof echter voldoende groot om de aerobe bovenlaag van het sediment in stand te houden. De fosfaatconcentratie in het poriënwater van die laag wordt zoals bekend (Hieltjes en Lijklema, 1979) gecontroleerd door fysische en chemische processen (adsorptie-desorptie, oplossen en neerslaan), waarop de invloed van de temperatuur (in het beschouwde gebied) gering is. Dit houdt in dat de grootte van de drijvende kracht, de concentratiegradiënt over het grensvlak sediment-water, zich nauwelijks wijzigt bij temperatuurveranderingen. De flux van fosfaat naar het bovenstaande water zal dus ook niet veranderen. De gekozen experimentele uitvoering, waarbij de zuurstofconcentratie in het bovenstaande water wordt geregeld door aanpassing van de verblijftijd van het water boven de sedimentkolom, maakt dat in het 'anaerobe' geval de zuurstofconcentratie niet meer meetbaar is terwijl er toch steeds

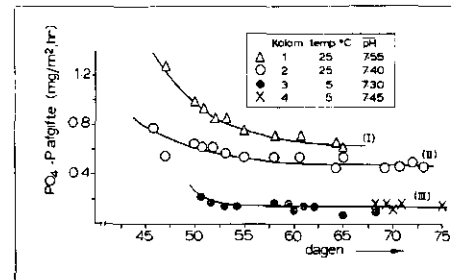


Afb. 5 - Fosfaatafgiftesnelheid onder aerobe condities (debiet 30-60 ml/hr) bij verschillende temperaturen. Kolommen zijn afkomstig van monsterpunt 3 in het Brielse Meer (Lijklema en Hieltjes, 1979).

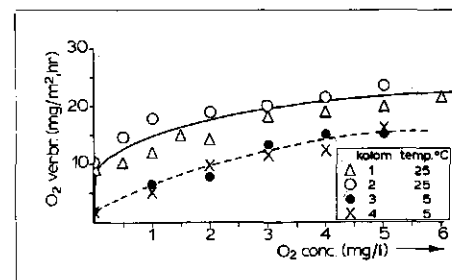
zuurstof wordt aangevoerd (met een klein debiet). Bij hoge temperaturen wordt deze zuurstof geheel verbruikt en zal de aerobe laag volledig worden afgebroken, terwijl bij lage temperaturen met een geringe bacteriële activiteit de aangevoerde zuurstof nog zal kunnen zorgdragen voor de blijvende aanwezigheid van geoxideerde verbindingen in de grenslaag van het sediment; b.v. ijzer(III)-hydroxiden. De evenwichtsfosfaatconcentratie voor een dergelijk systeem is lager dan voor een volledig gereduceerd sediment. De gevolgen zijn duidelijk: bij lage temperatuur wijzigt de concentratiegradiënt zich niet of nauwelijks t.o.v. het aerobe geval, en bij

TABEL I - Gemeten gemiddelde fosfaatafgiftesnelheden bij verschillende pH-waarden en redoxcondities. Kolommen zijn afkomstig van monsterpunt 3 in het Brielse Meer (Lijklema en Hieltjes, 1979). σ = standaarddeviatie.

Kolomnummer	pH	mg P/m ² , hr					
		'aerob'		'anaerob'		'N ₂ -anaerob'	
		PO ₄ -P	σ	PO ₄ -P	σ	PO ₄ -P	σ
6	7	1,21	0,97	0,18	0,09		
5	8,1	1,01	0,37	0,44	0,21		
7	8,7	1,82	1,50	0,98			
8	6,9	3,21	1,70	1,65	0,18	2,07	0,55
11	8	2,03	0,51	1,41	0,34	1,91	0,39
10	7	2,55	1,05				
9	8,3	2,75	1,33				



Afb. 6 - Fosfaatafgiftesnelheid onder 'anaerobe' condities (debiet 2-16 ml/hr) bij verschillende temperaturen. 'Anaerobe' condities vanaf de 40e dag.



Afb. 7 - Zuurstofverbruik als functie van de zuurstofconcentratie.

hoge temperatuur zal het gereduceerde poriënwater met een hogere fosfaatconcentratie direct in contact met het bovenstaande water komen hetgeen leidt tot de geconstateerde hogere fluxen. Deze effecten zullen ook in het veld optreden. Het onderzoek naar de invloed van de pH

TABEL II - Fosfaatafgiftesnelheden in batch experimenten. Kolommen zijn afkomstig van monsterpunten 4 (12 a en 12 an), 5c (13 a en 13 an) en 3 (14 a en 14 an) in het Brielse Meer (Lijklema en Hieltjes, 1979). a = aerob an = anaerob

Kolomnummer	P-afgifte mg P/m ² , hr
12 a	0,47
12 an	0,85
13 a	0,46
13 an	0,86
14 a	0,29
14 an	0,78

• Vervolg op pagina 6.