

Nalevering van fosfaat door sedimenten (III): interactie van fosfaat in sediment en (poriën)water

Inleiding

In een vorig artikel (Lijklema, Hieltjes, 1979) is uiteengezet dat meer dan 50% van de in de onderwaterbodem van het Brielse Meer vastgelegde fosfaten in beginsel gemobiliseerd kunnen worden. Dat nalevering ook werkelijk plaats zal vinden blijkt reeds uit de verhoogde fosfaatconcentraties in het poriënwater vergeleken met het oppervlaktewater, waardoor via moleculaire diffusie, uitdrijven van poriënwater door consolidatie en eventueel kwel, bioturbatie en wellicht erosie door stroming



IR. A. H. M. HIELTJES
TH Twente
Vakgroep Procesbeheersing
en Milieubeheer



DR. L. LIJKLEMA
TH Twente
Vakgroep Procesbeheersing
en Milieubeheer

of golfslag fosfaat kan worden afgegeven aan het bovenstaande water. Bij al deze processen zal de drijvende kracht, dat is de concentratiegradiënt nabij het sediment-water grensvlak, mede bepalend zijn voor de grootte van de nalevering naast de intensiteit van bovengenoemde processen. In dit artikel wordt ingegaan op de factoren die van invloed zijn op het ontstaan en de grootte van deze concentratiegradiënt.

Zoals aangetoond is (Lijklema, Hieltjes, 1979) is de belangrijkste fosfaatfractie geassocieerd met ijzer, terwijl een kleinere fractie aan calcium is gebonden. Bekend is voorts dat de oplosbaarheid van ijzer en de binding van fosfaat in ijzerhoudende sedimenten functies zijn van redoxpotentiaal en pH (Stumm en Lee, 1960; Nriagu en Dell, 1974). Onder reducerende omstandigheden, zoals die in het grootste deel van de sedimenten bestaan, is de oplosbaarheid van beide elementen verhoogd. Onder aerobe omstandigheden, die zich slechts in de top laag van het sediment kunnen voordoen, is ijzer vrijwel onoplosbaar terwijl de fosfaatoplosbaarheid van ijzer(III)-hydroxofosfaatcomplexen wordt bepaald door de fosfaat : ijzer verhouding, de verouderingsgraad van het complex en de pH (Lijklema, 1977; 1979). Dat ook in het Brielse Meer deze factoren een doorslaggevende rol spelen blijkt bijvoorbeeld uit waarnemingen zoals gepresenteerd in afb. 1, waar de concentraties van enkele ionen in water en

poriënwater zijn weergegeven voor een sterk gereduceerd sediment met relatief veel organische stof en fosfaat. Bij het stijgen van de redoxpotentiaal dalen de ijzer en fosfaatconcentraties.

Ook de oplosbaarheid van calciumfosfaten is van de pH afhankelijk (Stumm en Morgan, 1970). Een lagere pH betekent een hogere oplosbaarheid. In oppervlaktewater kan de pH sterk stijgen en daarmee de vorming van slecht oplosbare Ca-fosfaten bevorderen; in sedimenten is echter de pH meestal niet hoger dan 7 à 7,5 door de productie van CO₂ uit afbraak van organisch materiaal, zodat dergelijke fosfaten daar (gedeeltelijk) weer zouden kunnen oplossen.

Het bovenstaande maakt duidelijk dat voor de studie van de nalevering van fosfaat door sediment onderzoek naar de evenwichtinstelling tussen sediment en water als functie van pH en redoxcondities nodig is. Dit artikel is hieraan gewijd, waarbij eerst aandacht wordt besteed aan de mogelijkheid dat Ca-fosfaten in het sediment terecht komen.

Van een uitgebreide beschrijving van de gebruikte experimentele en analytische methoden is omwille van de lengte van het artikel afgezien. De lezer wordt daarvoor verwezen naar een verslag van Hieltjes (1977).

Co-precipitatie van fosfaat met CaCO₃

Het hoge gehalte aan CaCO₃ in de sedimenten van het Brielse Meer (10-20 gew. %, Lijklema en Hieltjes, 1979) kan naast een kleine bijdrage van externe bronnen, worden toegeschreven aan zgn. biogene ontkalking: door de hoge pH veroorzaakt door intensieve fotosynthese wordt de oplosbaarheid

TABEL II - Precipitatie van calcium en fosfaat uit Brielse Meer water door strippen met CO₂-vrije lucht.

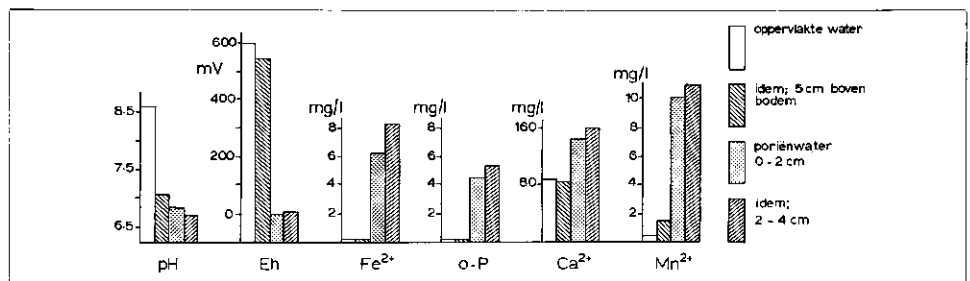
Beginconcentraties (mg/l)		Eindconcentraties (mg/l)		Eind pH
ortho-P	Ca	ortho-P	Ca	
0,30	107,3	0,03	65,5	9,65
0,29	117,0	0,15	66,0	9,50
0,24	107,4	< 0,01	56,0	9,55

van CaCO₃ overschreden. Om na te gaan in hoeverre daarbij ook fosfaat kan precipiteren werd water uit het Brielse Meer, gedeeltelijk met extra fosfaat gedurende een aantal dagen geschud bij verschillende pH's en daarna gefiltreerd. De resultaten staan in tabel I.

Bij pH = 10 blijkt een aanzienlijke precipitatie van Ca op te treden, waarbij voor lage concentraties het fosfaat vrijwel kwantitatief verdwijnt. Bij hogere fosfaatconcentraties wordt ook bij pH = 9 reeds veel fosfaat verwijderd. Omdat toevoegen van loog een onnatuurlijke wijze van pH-verhoging is, is het experiment ook uitgevoerd door CO₂ te strippen met CO₂-vrije lucht om de fotosynthese na te bootsen. Enkele resultaten daarvan zijn in tabel II weergegeven.

Kennelijk vindt naast precipitatie van Ca waarschijnlijk als CaCO₃-coprecipitatie van fosfaat plaats. Bij pH = 10 wordt ongeveer 35 mg P per gram CaCO₃ verwijderd, voor de in tabel II beschreven condities is dit 2 à 3 mg P per gram CaCO₃. Het oplosbaarheidsproduct van het minst oplosbare Ca-zout, hydroxyapatiet (Ca₅(PO₄)₃OH), is ruimschoots overschreden. Uit de literatuur (Stumm en Leckie, 1970; Jacobsen, 1977) is bekend dat CaCO₃ met daaraan geadsorbeerd fosfaat weliswaar in kristallijn apatiet kan worden omgezet maar dit

Afb. 1 - Samenstelling (poriën-)water op monsterplaats Sc. (Lijklema, Hieltjes, 1979) in het Brielse Meer, 16-8-1978.



TABEL I - Precipitatie van calcium en fosfaat uit Brielse Meer water door pH verhoging met NaOH.

Beginconcentraties (mg/l)		Eindconcentraties (mg/l)							
ortho-P	Ca	pH = 7		pH = 8		pH = 9		pH = 10	
		o-P	Ca	o-P	Ca	o-P	Ca	o-P	Ca
0,22	100,3			0,21	96,8	0,22	96,8	< 0,01	25,8
1,15	110,0	0,99	111,1	0,98	109,3	0,91	104,8	0,33	42,9
2,59	100,3			2,50	97,7	1,16	92,4	0,30	46,5
4,88	100,3			4,60	96,4	1,20	84,5	0,30	43,3

proces is zeer traag, vooral bij lagere pH's en lage temperatuur. Het is dus zeer de vraag of dit zout wel gevormd wordt nadat het CaCO_3 in de sedimenten terecht is gekomen. Dat een deel van het carbonaat en derhalve het meegevoerde fosfaat weer oplost door de gevormde CO_2 in de sedimenten, blijkt uit de verhoogde Ca-concentratie (afb. 1).

Naast coprecipitatie van fosfaat is ook adsorptie aan reeds eerder gevormd CaCO_3 mogelijk. Door Lotse (1973) wordt een maximale adsorptie van 25 μg P per gram CaCO_3 gevonden, en Jacobsen (1977) vindt 2,5 mg per gram. Dit laatste echter bij een hoge fosfaatevenwichtsconcentratie nl. 10 mg P/l. Deze resultaten zullen ook afhangen van het gebruikte produkt.

In eigen experimenten werd, afhankelijk van de pH, 20-100 μg P per gram CaCO_3 gevonden, dus erg weinig vergeleken met de coprecipitatie.

De conclusie uit het bovenstaande is gezien de hoge pH-waarden die 's zomers in het Brielse Meer voorkomen dat coprecipitatie mede een rol speelt in de fosfaatverwijdering, maar dat de uiteindelijke vastlegging van fosfaat door calcium in de sedimenten van geringere betekenis is.

Evenwichtinstelling onder aerobe omstandigheden

Onder stationaire condities en aannemende dat de zuurstofconsumptie in sedimenten nulde orde in zuurstof is, kan worden afgeleid dat de indringdiepte van zuurstof

$$z = \sqrt{\frac{2D}{R}} \cdot \sqrt{c_0} \quad (1)$$

is. Hierin is D de effectieve diffusiecoëfficiënt van O_2 in het sediment, R de zuurstofconsumptiesnelheid per volume-eenheid en c_0 de concentratie aan het grensvlak water-sediment. Afhankelijk van de porositeit, temperatuur etc. zal D ongeveer 10^{-10} m^2/sec zijn, c_0 is bij zuurstofverzadiging ongeveer 10 gram/ m^3 terwijl R zeer sterk zal variëren, vooral door temperatuurverschillen en gehalten aan organische, afbreekbare verbindingen van zeer lage waarden, bijv. 10^{-7} gr/ $\text{m}^3 \cdot \text{sec}$ tot relatief zeer hoge waarden. Bij afwezigheid van andere mechanismen die zuurstof in het sediment kunnen brengen zal de aerobe grenslaag kunnen variëren van de orde van 10 cm (winter) tot vrijwel verwaarloosbare dikten in de zomer in actieve sedimenten. Hoewel de aerobe laag in de regel relatief dun is, bepaalt deze laag toch in grote delen van het jaar de mate van nalevering. Om de fosfaatconcentraties te schatten die in aeroob interstitieel water als functie van de pH verwacht kunnen worden is het nuttig om fosfaatadsorptie-isothermen te

TABEL III - Adsorptiecapaciteit van verschillende sedimenten uit het Brielse Meer bij pH = 7 en 8 en verschillende fosfaat toevoegingen. Suspensieconcentratie: 1 gr/50 ml.

Monsterplaats v.h. sediment	% P geadsorbeerd van toegevoegde P					
	pH = 7			pH = 8		
μg P toegevoegd per gram sediment	250	500	750	250	500	750
1	66	61	54	66	62	55
3	78	74	67	75	74	69
4	60	47	39	64	55	52
4	87	83	77	80	85	79
5b	32	20	17	44	35	27
5c	70	64	60	66	62	55
6	27	16	11	42	40	39

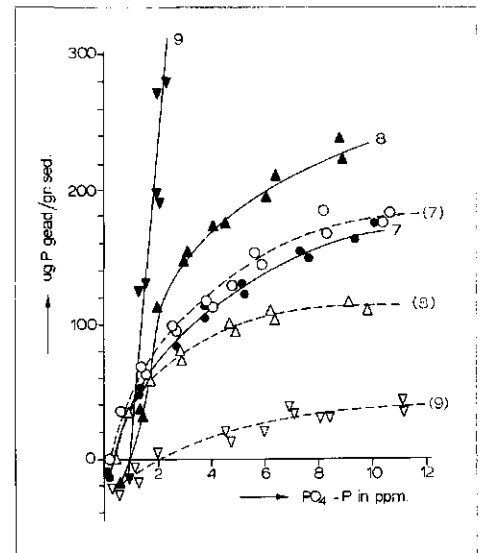
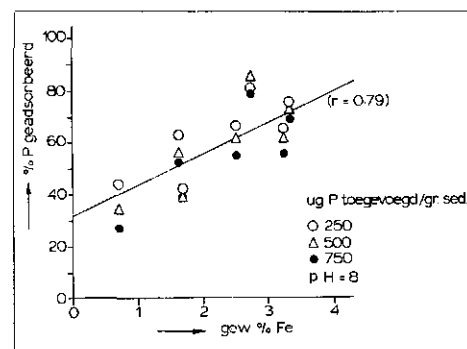
meten. Dit is gebeurd bij verschillende pH-waarden, waarbij in het bijzonder aandacht aan de rol van CaCO_3 is geschonken door deze isothermen ook op te meten voor sedimenten waaruit door extractie met NH_4Cl het carbonaat is verwijderd. Tevens is nagegaan hoeveel van het extra geadsorbeerde fosfaat door schudden met water uit het Brielse Meer weer kon worden ge-desorbeerd.

Tabel III toont dat de hoeveelheden extra fosfaat die geadsorbeerd kunnen worden voor de sedimenten van verschillende monsterplaatsen nogal uiteenlopen. De monsterplaatsen zijn aangegeven in een vorig artikel (Lijklema, Hieltjes, 1979).

Indien men de percentages uit tabel III vergelijkt met de ijzergehaltes van deze sedimenten dan blijkt een duidelijke correlatie (afb. 2): met toenemend ijzergehalte adsorberen de sedimenten meer fosfaat. Dit is in overeenstemming met de eerder gevonden hoge bijdrage van ijzer-geassocieerd fosfaat bij fractioneringsproeven (Lijklema, Hieltjes, 1979). Omdat ijzer(III) echter bij hogere pH volgens verwachting minder goed fosfaat adsorbeert, moet de duidelijk hogere adsorptiecapaciteit bij pH = 8 t.o.v. pH = 7 van sommige sedimenten wellicht worden toegeschreven aan CaCO_3 .

Vergelijking van de isothermen voor een

Afb. 2 - Fosfaatadsorptie als functie van het ijzergehalte in het sediment. Zie ook tabel III.



Afb. 3 - Fosfaatadsorptie aan Brielse Meer sediment (monsterplaats 4) bij verschillende pH-waarden.

--- na extractie met NH_4Cl .

representatief sediment monster (afb. 3) leert inderdaad dat na verwijdering van het CaCO_3 de voor ijzerhydroxiden normale pH volgorde wordt verkregen, waarbij de adsorptiecapaciteit afneemt met de pH. In aanwezigheid van CaCO_3 wordt bij hoge pH blijkbaar zeer veel fosfaat aan het carbonaat gebonden. Daar echter in het sediment de pH zelden hoger dan $\pm 7,5$ wordt, is niet te verwachten dat carbonaten een belangrijke rol spelen.

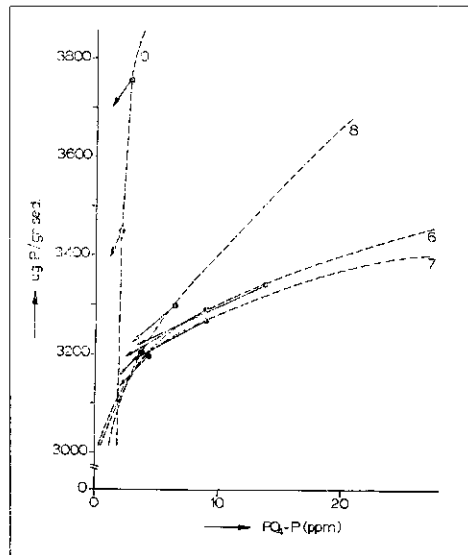
Teneinde na te gaan in welke mate het oorspronkelijk aanwezige resp. extra geadsorbeerd fosfaat weer desorberen kan, zijn bij verschillende pH's sedimentmonsters geschud met meerwater, waarbij zowel het oorspronkelijke sediment is gebruikt als ook sediment waaraan kort te voren fosfaat was geadsorbeerd. Adsorptie en desorptie vonden steeds bij dezelfde pH plaats. De resultaten in tabel IV tonen aan dat het vers geadsorbeerde fosfaat naar verhouding veel beter desorbeert, vooral bij lage pH.

Door de resultaten te presenteren in de vorm van een adsorptie-isotherm ziet men dat in feite adsorptie en desorptie in hoge mate reversibel verlopen: afb. 4. Bij hoge pH is de desorptie gering en de adsorptie-isotherm loopt zeer stijf; dit gedrag is toe te schrijven aan CaCO_3 . Bij lage pH wordt extra fosfaat minder goed geadsorbeerd; de isotherm loopt tamelijk vlak. Dit is toe te schrijven aan de veroudering die de ijzer (hydr)oxiden hebben ondergaan, waarbij de adsorptiecapaciteit afneemt (Lijklema, 1979). Bij lage fosfaatconcentraties lopen de isothermen zeer stijf; dit betekent dat geoxideerde sedimenten zeer langdurig lage fosfaatconcentraties in stand kunnen houden.

Extra fosfaat zal onder de heersende

TABEL IV - Desorptie van fosfaat in µg/g sediment voor en na extra adsorptie. Monsterplaats sediment; 4. Suspensie concentratie: 1 g per 50 ml.

pH	Desorptie van oorspronkelijke sediment	Extra geadsorbeerd	desorptie na extra adsorptie	% van geadsorbeerde P die weer desorbeert
6	8,5	275	87	32
	7,9	335	118	35
7	4,9	193	64	33
	5,2	251	77	31
8	11,2	205	45	22
	13,0	293	68	23
9	20,4	449	40	9
	22,1	755	45	6



Afb. 4 - Adsorptie/desorptie-isothermen bij 4 pH-waarden. Adsorptie (— — —). Desorptie (---). Monsterplaats 4 (Lijklema, Hieltes, 1979).

omstandigheden van pH (± 7) en redox-potentiaal van aerobe sedimenten slechts gedeeltelijk geadsorbeerd kunnen worden onder gelijktijdige verhoging van de concentratie in het poriënwater. Na reductie en opnieuw oxidatie kan de adsorptie-capaciteit echter sterk gewijzigd zijn.

Evenwichtsinstelling onder anaerobe omstandigheden

Ook voor zuurstofloze sedimenten is de evenwichtsinstelling water-sediment bestudeerd op soortgelijke wijze als voor aerobe sedimenten. Een belangrijk verschil is dat de verhouding sediment : water nu veel groter is gekozen omdat de reducerende omstandigheden anders moeilijk bereikt en in stand gehouden konden worden door de in het sediment aanwezige bacteriën en hun substraat. Ook werd behalve extra fosfaat ijzer in verschillende hoeveelheden toegevoegd in de vorm van ijzer(III)-hydroxyfosfaat omdat vermoed werd dat ook in anaerobe sedimenten deze twee elementen en hun onderlinge verhouding de samenstelling van het poriënwater voor fosfaat zouden controleren. De pH werd niet bijge-

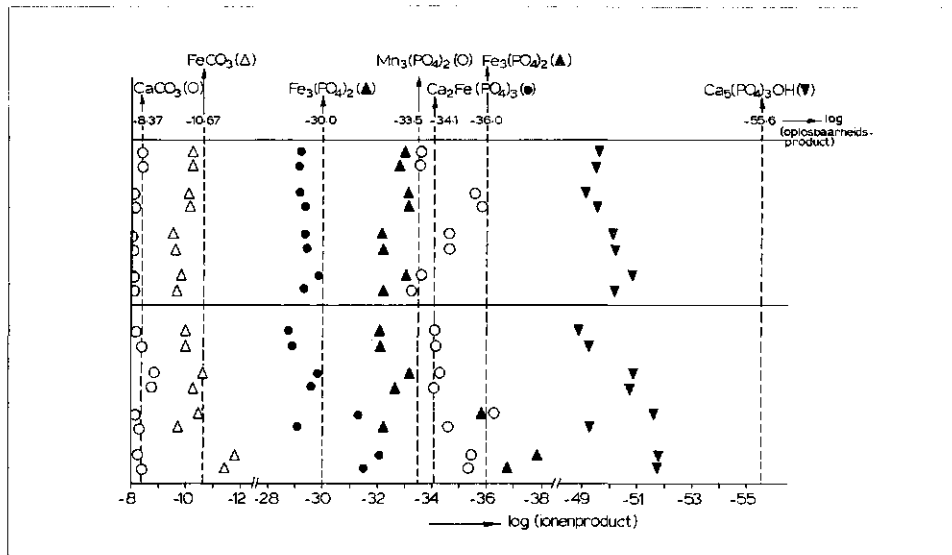
steld maar gemeten zoals hij zich instelde. De aandacht bij de analyses was vooral gericht op de samenstelling van het poriënwater omdat relatief kleine veranderingen in de minerale samenstelling grote veranderingen in de concentraties van de ionen in het interstitiële water kunnen veroorzaken. Deze analyse vereist nogal wat voorzorgen omdat in ieder geval de scheiding van water en sediment onder volstrekte uitsluiting van zuurstof moet plaatsvinden. De filtratie werd uitgevoerd in een handschoenkast onder stikstof. E_h, pH en anorganisch koolstof werden voor filtratie gemeten; daarna in het water Ca, Mg, Fe(II), Mn²⁺ en o-fosfaat en soms nog andere ionen. In het sediment werd via extractie met 0,5 N HCl ook het gehalte aan deze elementen, voor ijzer zowel 2- als 3-waardig, vastgesteld.

De resultaten van een aantal experimenten waarbij de monsters een 10-tal weken in het donker bij kamertemperatuur op evenwicht konden komen, zijn weergegeven in tabel V. Uit de gegevens blijkt, behalve wanneer zeer veel Fe(III) is toegevoegd, dat het aan-

wezige ijzer vrijwel volledig is gereduceerd. Stabiliteitsberekeningen door Nriagu en Dell (1974), gebaseerd op thermodynamische gegevens, wijzen op het ontstaan van gemengde ijzer(II)- en ijzer(III)-hydroxyfosfaten, die bij verdergaande reductie geheel overgaan in ferro-fosfaten. In sommige sedimenten is de Ca- en Mg-concentratie van het interstitiële water duidelijk verlaagd t.o.v. die in het oorspronkelijke meerwater (Ca: 107,4; Mg: 21,1 mg/l). Dit kan in ieder geval voor de met * gemerkte suspensies worden toegeschreven aan de hoge P-afgifte veroorzaakt door de hoge P : Fe verhouding waardoor gemengde Ca-Mg-fosfaten kunnen neerslaan. Daarnaast worden de Ca- en Mg-concentraties ook sterk beïnvloed door de oplosbaarheid van de carbonaten, die door de grote CO₂-productie aan wijziging onderhevig is. Een goede beoordeling van de vraag welke mineralen de oplosbaarheid van de verschillende ionen (mede) bepalen kan worden verkregen door de aanwezigheid van deze mineralen middels röntgen-diffractie direct vast te stellen. Dit is echter slechts voor CaCO₃ en dolomiet (CaMg(CO₃)₂) mogelijk. Indirect kan echter door vergelijking van de oplosbaarheidsproducten zoals bekend uit de literatuur met de gemeten ion-activiteitsproducten geschat worden welke mineralen mogelijkerwijs in de vaste fase aanwezig zijn en de oplosbaarheid controleren. Hiertoe is een rekenprogramma ontwikkeld dat rekening houdt met correcties volgens Debye-Hückel voor de activiteitscoëfficiënten en thermodynamische gegevens van Berner (1971) en Sillén en Martel (1971) gebruikt. Afb. 5

TABEL V - Evenwichtsinstelling van sediment van monsterplaatsen 3 (bovenste helft) en 5b (Lijklema, Hieltes, 1979) met verschillende ijzer: fosfaat-verhoudingen onder zuurstofloze omstandigheden na ± 10 weken. Suspensieconcentratie: 1 gr sediment per 15 ml meerwater. Gehalten organ. stof 5,1 resp. 3,5 gew. %; CaCO₃: 21,3 resp. 16,2 gew. % van het droge sediment.

Samenstelling sediment (mg/gr)						Samenstelling poriënwater (mg/l)					
P	Begin-toestand Fe (tot)	Fe (II)	Eind Fe (II)	E _h (mV)	pH	o-P	Fe (II)	Ca	Mg	Mn	anorg.
2,26	12,64	7,09	12,43	- 80	6,9	10,97	2,71	130,6	23,0	1,4	85
2,26	12,64	7,09	12,05	- 80	6,9	11,97	2,92	129,3	22,3	1,4	84
6,53	25,37	7,09	24,01	- 80	7,2	7,67	1,57	98,9	13,7	0,2	96
6,64	25,67	7,09	23,77	- 80	7,1	7,59	1,93	101,5	14,8	0,2	96
3,32	25,51	7,09	23,72	- 60	7,2	2,53	6,63	129,7	23,1	1,0	90
3,36	25,95	7,09	24,74	- 70	7,1	3,31	6,69	126,3	23,3	1,0	90
3,48	39,24	7,09	23,32	- 40	7,0	4,25	3,68	105,8	22,6	2,2	116
3,50	39,46	7,09	26,85	- 50	7,0	6,15	5,55	113,2	23,9	2,4	120
3,01	18,18	11,65	17,45	- 80	7,1	7,50	4,73	148,9	25,8	0,9	58
3,01	18,18	11,65	17,89	- 80	7,0	7,67	5,49	151,5	26,5	1,0	54
*8,76	35,28	11,65	24,90	- 60	6,9	10,51	2,11	63,2	17,3	0,8	47
*8,26	33,81	11,65	24,41	- 60	6,9	9,94	3,53	75,8	19,9	1,0	60
4,52	36,50	11,65	30,62	- 50	7,2	0,61	5,04	137,1	25,9	0,7	50
4,48	35,96	11,65	31,11	- 60	7,3	2,75	5,13	139,3	25,9	0,8	52
4,62	53,12	11,65	27,90	-110	7,2	0,97	0,14	93,2	19,3	0,9	69
4,60	52,71	11,65	25,00	-100	7,1	1,42	0,33	100,2	19,9	1,0	74



Afb. 5 - Ion-activiteitsproducten vergeleken met bekende oplosbaarheidsproducten van een aantal mineralen. De punten komen overeen met die in tabel V.

geeft daarvan een aantal resultaten, waarbij de berekende waarden voor de verschillende monsters verticaal in dezelfde volgorde zijn uitgezet als de overeenkomstige monsters in tabel V.

De resultaten tonen dat alle suspensies oververzadigd zijn met apatiet, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{OH}$, het minst oplosbare calcium-fosfaat. Bekend is echter ook dat kinetische barrières de precipitatie van dit zout, vooral bij lagere pH's voorkomen (Stumm en Leckie, 1970; Martens en Harris, 1970). Veeleer wordt anapatiet, $\text{Ca}_2\text{Fe}(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, onder deze omstandigheden als het meest waarschijnlijke calciumhoudende fosfaat gezien (Nriagu en Dell, 1974). Ook in Brielse Meer sediment kan dit mineraal in beginsel voorkomen. De ionactiviteitsproducten die voor vivianiet, $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ worden gevonden liggen tussen de uiterste waarden die in de literatuur worden gevonden; hetzelfde geldt voor reddingiet, $\text{Mn}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$. Verschillende onderzoekers (Emerson, 1976; Bray, 1973; Tessenow, 1974) komen voor hun ijzerrijke sedimenten ook tot de conclusie dat vivianiet de fosfaatconcentratie (mede) bepaalt. Enkelen (Bray, 1973; Nriagu en Dell, 1974) zijn er zelfs in geslaagd de aanwezigheid van dit mineraal direct aan te tonen middels röntgendiffractie. In sediment van het Brielse Meer is dit echter nog niet gelukt. Uit de gegevens is verder duidelijk dat CaCO_3 verzadigd is en in de meeste gevallen wordt ook het oplosbaarheidsproduct van ferrocarbonaat bereikt of overschreden. Dit betekent dat verschillende zouten in hun onderlinge wisselwerking gezamenlijk de evenwichtsligging beïnvloeden, zodat tamelijk ingewikkelde berekeningen nodig zijn om vast te stellen hoe de verdeling van de ionen over de verschillende fasen is en

— bij kleine wijzigingen in de totale samenstelling — zal worden.

Mogelijke nalevering van fosfaat

In sedimenten als de onderzochte waarin ijzer een belangrijke rol speelt in de binding van fosfaat zal de interactie tussen sediment en water gecontroleerd worden door redoxcondities en pH. Onder aerobe omstandigheden blijft ijzer vrijwel onoplosbaar en kan fosfaat desorberen van ijzer(III)-hydroxi-fosfaat-complexen bij een stijgende pH als gevolg van competitie met hydroxyl-ionen.

Een toename in de fotosynthetische activiteit in het water kan dus nalevering van fosfaat uit de aerobe grenslaag van het sediment veroorzaken. Een stijging van de pH tot negen of hoger kan echter precipitatie van CaCO_3 met co-precipitatie van fosfaat tot gevolg hebben, waardoor de netto-nalevering weleens zeer miniem kan zijn.

In de loop van de zomer zal niet alleen de pH een sterke verandering ondergaan maar ook de zuurstofconcentratie.

In de euphotische zone zal deze laatste door de verhoogde fotosynthetische activiteit sterk toenemen en variëren met de dag-nacht cyclus. Aan de bodem zal de zuurstofconcentratie door een aantal oorzaken afnemen: een verminderde oplosbaarheid al gevolg van de temperatuurstijging; bij het optreden van stratificatie in de waterkolom verminderd transport van zuurstof naar de bodem toe en bovenal in de sediment grenslaag een sterk toegenomen bacteriële activiteit door de versterkte aanvoer van afbreekbaar organisch materiaal en de verhoogde temperatuur. Dit zal ertoe leiden dat de aerobe zone in het sediment wordt afgebroken.

Tengevolge van de hogere concentratie aan ijzer(III) en fosfaat in het anaerobe sediment zullen deze ionen naar de aerobe laag diffunderen. Zolang er nog een aerobe laag is zal het daarin diffunderende ijzer(II) direct geoxideerd worden, waarbij het precipiterende ijzer(III)-hydroxide behoorlijke hoeveelheden fosfaat bindt. Wanneer de anaerobe zone het grensvlak sediment-water bereikt zal er fosfaat en ijzer(II) in het bovenstaande water diffunderen. De verwijdering van fosfaat door in het zuurstofhoudende water precipiterend ijzer(III)-hydroxide zal vrij slecht zijn gezien de heersende (hoge) pH. Evenwel kan co-precipitatie van fosfaat met CaCO_3 weer leiden tot terugvoer naar het sediment. Geconcludeerd kan worden dat de relatieve concentraties van fosfaat en ijzer en de redox en pH-condities in het systeem van overwegend belang zijn voor de uitwisseling van fosfaat tussen sediment en water. In bovenstaande beschouwing zijn de gevolgen van processen als bioturbatie, kwel en wegzijging op het fosfaattransport niet meegenomen. Deze zullen in ieder meer hun egen specifieke inbreng hebben.

Dankbetuiging

De auteurs zijn dank verschuldigd aan verschillende medewerkers van de Delta-dienst; in het bijzonder drs. J. P. Al, A. M. B. Holland en F. W. Geijp. Een groot deel van de experimenten en analyses zijn uitgevoerd door T. Stoffer.

Literatuur

- Berner, R. A., 1971, 'Principles of chemical sedimentology', McGraw-Hill.
- Bray, J. T., 1973, 'The behaviour of phosphate in the interstitial waters of Chesapeake Bay sediments'. Dissertation John Hopkins University, Baltimore, Maryland.
- Emerson, S., 1976, 'Early diagenesis in anaerobic lake sediments'. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 40, 925-934.
- Hieltjes, A. H. M., 1977, 'Mobilisatie van sedimentfosfaat', TH Twente, Enschede.
- Jacobson, O. S., 1978, 'Sorption, adsorption and chemisorption of phosphate by Danish lake sediments'. Vatten No. 3.
- Lotse, E. G., 1973, 'Phosphate retention by lake sediments'. NTIS, Springfield, PB-223880.
- Lijklema, L., 1977, 'The role of iron in the exchange of phosphate between water and sediments'. In: *Interactions between sediments and fresh water* (ed. H. L. Golterman) Junk-Pudoc, Den Haag.
- Lijklema, L., 1979, 'Binding van o-fosfaat door ijzer(III)- en aluminiumhydroxiden; theorie en praktische betekenis'. *H₂O* (12), nr. 23, 511-513 en 524.
- Lijklema, L. en Hieltjes, A. H. M., 1979, 'Nalevering van fosfaat door sedimenten (I) en (II)'. *H₂O* (12), nr. 18, 390-396.
- Martens, C. S. en Harris, R. C., 1970, 'Inhibition of apatite precipitation in the marine environment by magnesium ions'. *Geochimica et Cosmochimica*

wellicht mogelijkheden. Voor het bijwonen van deze voorstellingen komen duizenden mensen op de been. Met houten of van gehard leer gemaakte poppen (wayang golek of wayang kulit) en ook wel door gemaskerde personen (wayang wong) worden oude mythologische verhalen gespeeld, begeleid door gamelan-muziek. De leider van het spel, de dalang, draagt deze verhalen voor. Daartussen worden echter allerlei aktualiteiten gevlochten, waar vooral de clowns, die in het spel niet ontbreken, zich toe lenen. Ook worden wel poppen vervaardigd, die bepaalde historische personen voorstellen. Zo zag ik in het wayang-museum te Jakarta niet alleen J. P. Coen, maar ook Soekarno, Schermerhorn en Van Mook. Als dit zo is, dan kan de dalang ook wel iets over het water vertellen...

Het is duidelijk, dat deze voorlichtings-activiteiten zich op desa-niveau moeten afspelen. De dorpschouwen (lurahs) die ik ontmoette, leken werkelijk geïnteresseerd, niet in het minst omdat de aanwezigheid van goed drinkwater het aanzien van hun dorpen zou vermeerderen. De gelegenheid tot voorlichting zal dus zeker wel gegeven worden, maar zoals ook bij ons de historie leert, kan de weg tot wijziging van gewoonten in het dagelijks leven nog lang zijn. Een ander probleem is de zorg voor het onderhoud van de installaties. Enige organisatie, die in staat is om onmiddellijk deze taak op zich te nemen, is, zoals ik al vermeldde, niet aanwezig. In de eerste plaats zullen groepen mensen dienen te worden geïnstrueerd om de installaties te verzorgen en eenvoudige gebreken te herstellen. Ze zullen daartoe op zijn minst enige tijd onderricht moeten ontvangen. Vervolgens zullen deze mensen zoveel mogelijk moeten gaan functioneren in bestaande organisaties op plaatselijk en regionaal niveau, die reeds andere verzorgende taken hebben. Het zal ongetwijfeld nog heel wat overleg kosten om de plaatselijk meest passende oplossing te vinden. Het OTA-33 team is daar inmiddels al mee begonnen.

Tenslotte is er nog het probleem van het geld. Het beste zou allicht zijn, dat de gebruikers de kosten van exploitatie en onderhoud betalen. Laatst las ik evenwel in een Indonesisch schoolboekje, dat het gebruik van water als gratis wordt verondersteld. Tot dusver klopt dat in het algemeen ook met de feiten, maar in een gemeenschap waarin geld toch al zo schaars is versterkt dit mijn indruk dat het niet eenvoudig zal zijn om het huishoudbudget, al is het nog zo weinig, te beïnvloeden door de mensen voor het water te laten betalen. Bij ons staat de kantonrechter gereed om wanbetalers tot de orde te roepen, maar dat

ligt daar iets anders. Alleen een sterk gezag lijkt in staat om het geld te innen; van een situatie waarin wanbetaling zou worden bestempeld als a-sociaal gedrag is men nog ver verwijderd. Niettemin moet de oplossing van het vraagstuk als urgent worden beschouwd, omdat de geldmiddelen van de Indonesische regering schaars zijn en voortzetting van subsidiëring voor langere tijd in een situatie waarin nog zoveel behoeften moeten worden gedekt niet in de lijn van de verwachtingen ligt.

Graag wil ik dit reisverslag besluiten met een ere-salut aan alle ontwikkelingswerkers in Indonesië en in het bijzonder aan het 'OTA-33' team, dat mij zo gastvrij heeft ontvangen. Hun inspanningen verdienen bekendheid, zodat ook de lezers van dit tijdschrift in de gelegenheid zijn om, verrijkt met deze informatie, hun een warm hart toe te dragen.



Open dagen Civiele Techniek TH Delft, 11 en 12 januari 1980

In het kader van de jaarlijkse diësviering van de TH-Delft organiseert de Afdeling der Civiele Techniek op 11 en 12 januari 1980 open dagen. Zo wordt op deze afdeling een tentoonstelling ingericht onder het motto: 'De civiele techniek in de praktijk, de praktijk in Civiele Techniek'.

Allereerst wordt de bezoekers een overzicht over het gehele vakgebied gepresenteerd. Daarna volgt een nadere uitwerking aan de hand van een twaaltal thema's: Milieu, Ontwikkelingsland, Land, Verkeer, Stad, Bouwen, Bodem, Zee, Kust, Delta, Rivier en Water.

Bij de thema's Milieu en Water komen o.a. drinkwaterwinning en -bereiding, afvalwaterinzameling en -behandeling en kwaliteitsbeheer van oppervlaktewater aan de orde. Ook kan een bezoek gebracht worden aan de diverse laboratoria van de afdeling, waar o.a. onderzoekstellingen op het gebied van drinkwater, afvalwater en milieutechniek te zien zullen zijn.

Open Dagen, Civiele Techniek, Stevinweg 1, Delft. Openingstijden: beide dagen van 10.00 - 16.00 uur.

● Vervolg van pagina 598

Winning van brak en zout grondwater t.b.v. de bereiding van drinkwater met hyperfiltratie

kader van een samenwerkingsverband tussen het Provinciaal Waterleidingbedrijf van Noord-Holland, het Keuringsinstituut voor Waterleidingartikelen KIWA NV en de afdeling Civiele Techniek van de Technische Hogeschool Delft.

De studie welke ten grondslag ligt aan dit artikel is uitgevoerd als afstudeeropdracht onder supervisie van prof. dr. ir. J. C. van Dam van de vakgroep Waterbeheersing. Ir. H. M. Haitjema heeft door zijn begeleiding bij de opzet van het rekenmodel voor een essentiële ondersteuning van het geheel zorggedragen.

Literatuur

1. Schippers, J. C., 1978. *De bereiding van drinken industriewater met hyperfiltratie uit grond- en oppervlaktewater*. Procestechneek PT. 3, 503-512.
2. de Josselin de Jong, G., 1969. *Generating functions in the theory of flow through porous media*. Flow through porous media, R. I. M. de Wiest, (ed.). Academic Press, New York, 377-400.
3. Haitjema, H. M., 1978. *Introduction of inhomogeneous fluid and aquifer properties in non-steady three dimensional groundwater flow, by application of vortex distributions*. TH-rapport.
4. Dam, J. C. van, 1962. Rapport inzake het geoelektrisch onderzoek op Texel. Rijkswaterstaat, dienst voor waterhuishouding.
5. Scholze, A. S. *Studie naar de winningsmogelijkheden van brak grondwater op Texel*. KIWA-mededeling (in bewerking).



● Vervolg van pagina 602

Nalevering van fosfaat door sedimenten (III) interactie van fosfaat in sediment en (poriën)water

Acta 34, 621 e.v.
Nriagu, J. O., 1972, 'Stability of vivianite and ion-pair formation in the system $Fe_3(PO_4)_2-H_3PO_4-H_2O$ '. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 36, 454-470.

Nriagu, J. O. en Dell, C. J., 1974, 'Diagenetic formation of iron phosphates in recent lake sediments'. *Amer. Mineral.* 59, 933-946.

Sillén, L. G. en Martell, A. E., 1971, 'Stability constants of metal-ion complexes'. Chemical Society, London.

Stumm, W. en Leckie, J. O., 1971, 'Phosphate exchange with sediments: its role in the productivity of surface waters'. In: *Advances in Water Pollution Research* (ed. S. H. Jenkins). Pergamon Press, Oxford. Vol. 2, III-27/1-16.

Stumm, W. en Lee, G. F., 1960, 'The chemistry of aqueous iron'. *Schweizerische Zeitschrift für Hydrologie* 22, 295-319.

Stumm, W. en Morgan, J. J., 1970, 'Aquatic Chemistry', Wiley-Interscience.

Singer, P. C., 1972, 'Anaerobic control of phosphate by ferrous iron'. *Journ. Water Poll. Contr. Fed.* Vol. 44, No. 4, 663-669.

Tessenow, U., 1974, 'Lösungs-, Diffusions- und Sorptionsprozesse in der Oberschicht von Seesedimenten (IV)'. *Arch. Hydrobiol. Suppl.* 47, 1-79.

