Fosfaatnaleveringscapaciteit van sedimenten en naleveringstijd



LOUIS VAN LIERE*
Laboratorium voor Microbiologie
Universiteit van Amsterdam
Nieuwe Achtergracht 127
1018 WS Amsterdam



JOSJE PETERS
Laboratorium voor Microbiologie
Universiteit van Amsterdam



LUUC R. MUR
Laboratorium voor Microbiologie
Universiteit van Amsterdam

Inleiding

Fosfaatnalevering is het onder bepaalde omstandigheden vrijkomen uit het sediment van fosfaten, die daarin onder andere omstandigheden zijn vastgelegd.
In de laatste decennia is door de hoge en voortdurende externe fosfaatbelasting een verhoogde hoeveelheid fosfaat in het sediment vastgelegd. Jaarlijks vindt er een netto accumulatie plaats; met de mogelijkheid dat deze hoeveelheid na sanering van de externe fosfaatbelasting nageleverd wordt moet terdege rekening worden gehouden.

Wanneer men de fosfaatbalans, bepaald over korte periodes (week, maand), bekijkt dan vindt deze nalevering nu reeds plaats in de lente en de zomer. Netto accumulatie wordt gevonden in de herfst en de winter [Uunk, 1979; Bannink et al., 1980]. Als de externe fosfaatbelasting drastisch vermindert, zal de nalevering (interne belasting) een relatief belangrijker rol gaan spelen en in sommige gevallen bestaat de mogelijkheid dat zij zelfs bepalend wordt voor het succes van defosfatering als middel om eutrofiëring tegen te gaan.
Daar reductie van de externe fosfaatbelasting de meest doelmatige methode is om eutrofiëring te bestrijden, is het van het grootste belang informatie te verkrijgen over de *snelheid* waarmee het fosfaat uit het sediment vrij kan komen, alsmede over de tijd gedurende welke dit proces een zodanige snelheid heeft dat algengroei er niet door wordt geremd. Aan deze capaciteit van het sediment is in Nederland betrekkelijk weinig aandacht besteed. Enige voorbeelden van onderzoekers, die zich met deze materie hebben beziggehouden zijn [Hieltjes en Lijklema, 1980; Kelderman en Van de Repe, 1982; Van Liere et al., 1982; Van Liere & Mur, 1982; Golterman, 1977; Bannink et al., 1980; Kouwe en Golterman, 1976]. De eerstgenoemden werkten vooral in Laboratoriumsystemen, de laatsten in butylrubber ringen geplaatst in het te onderzoeken meer. Nalevering en accumulatie worden gestuurd door een scala aan factoren. Hierop zal in dit artikel niet worden ingegaan, maar volstaan wordt met het verwijzen naar een artikelenserie in H_2O door Hieltjes en Lijklema [1979 en 1980], waarin uitgebreid op deze materie wordt ingegaan.
In 1979 gaven het toenmalige Ministerie voor Volksgezondheid en Milieuhygiëne en de Provinciale Waterstaat van Noord-Holland het Laboratorium voor Microbiologie van de Universiteit van Amsterdam opdracht de fosfaatnaleveringscapaciteit van sedimenten te onderzoeken. 'Doel van het onderzoek is inzicht te krijgen in de mate waarin het fosfaat uit de bodem als eutrofiëringsbron gaat dienen, wanneer de fosfaatbelasting van het water afneemt. Tevens zal het onderzoek er aandacht aan besteden of er maatregelen mogelijk zijn om de fosfaatmobilisatie te beperken'. Een aantal facetten van dit onderzoek zal in dit artikel worden belicht.

Materialen en methoden

Monstername gebeurde uitsluitend in meren en sloten van Noord-Holland. De 'ongestoorde' sedimentcores werden gestoken met een polyacrylaat buis, die op een staaf was bevestigd (afb. 1). Deze sedimentsteker functioneert het beste bij wat steviger sediment. Voor het bemonsteren van baggerlagen of bij grotere waterdiepte werd gebruik gemaakt van een Jenkin-modder verzamelaar (afb. 2). De buizen met daarin het sedimentmonster werden gekoeld bij 0 °C en daarna ingevroren bij −20 °C. Deze procedure verstoorde het minste de sediment horizon.

Afb. 1 - Monstername met polyacrylaat buis.

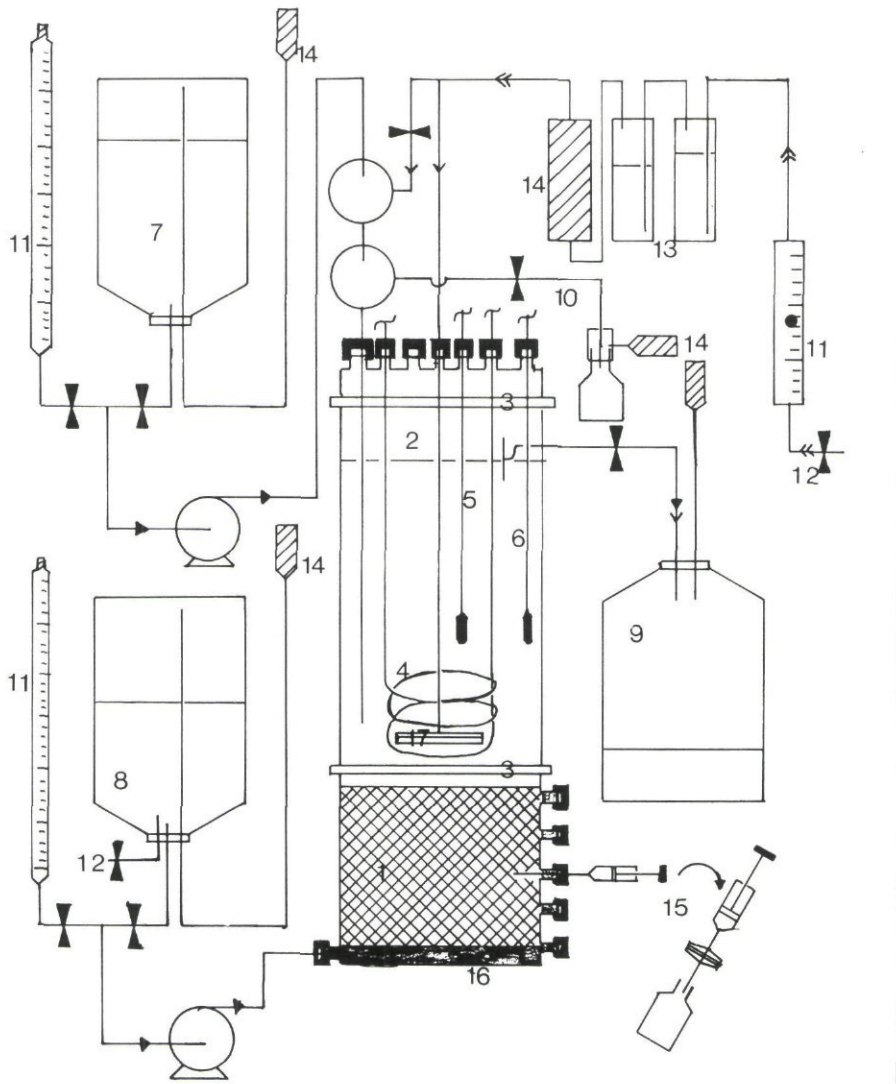




Afb. 2 - De Jenkin-modder-verzamelaar. Door middel van het spannen van een veer worden de kleppen van de polyacrylaat buis geopend. Doordat het apparaat aan een touw hangt blijft de veer gespannen. Wanneer de 'Jenkin' op de bodem staat en er gedeeltelijk in wegzakt ontspant de veer, waardoor ook de kleppen worden gesloten. Op de foto is de monstername net mislukt, doordat de kleppen te vroeg sloten en er alleen water in de verzamelaar terechtkwam.

De continu doorstroomde reactor is schematisch weergegeven in afb. 3 en bestaat uit een sedimentencompartiment dat dezelfde inwendige (6,9 cm) diameter heeft als de monsterbuis, zodat de ingevroren core daar ingebracht kan worden (lengte ± 15 cm). Met behulp van vlakke flenzen wordt het watercompartiment aangebracht, dat daarna gevuld wordt met medium. Dit medium komt wat betreft de concentraties van de belangrijkste ionen overéén met het te bestuderen water, behalve fosfaat, dit werd niet toegevoegd. Met dit medium werd het watercompartiment continu ververst en wel zodanig dat de verdunningssnelheid 0.02 uur^{-1} was. Dat komt overeen met een gemiddelde verblijftijd van 2 dagen. Hoewel in slotensystemen in sommige jaargetijden dergelijke verblijftijden kunnen optreden zal dat in het algemeen niet het geval zijn. De relatief korte verblijftijd is echter gekozen om een snelle afvoer van het door het sediment nageleverde fosfaat te waarborgen. Het is dan tevens een simulatie van de fosfaatopname door het fytoplankton. De gekozen verdunningssnelheid is dan ook lager dan de maximale groeisnelheid van het fytoplankton. Natuurlijk is een vaste waarde ook gekozen om de gevonden resultaten bij verschillende sedimenttypes zo goed mogelijk te kunnen vergelijken. Om dezelfde reden werden temperatuur (20 °C) en pH (8.0) constant gehouden. Dit laatste gebeurde electronisch door wanneer nodig

* Huidig adres: Limnologisch Instituut, Rijksstraatweg 6 - 3631 AC Nieuwersluis.



Afb. 3 - Flowsheet van de reactor.

verdund zoutzuur in het watercompartiment te pompen. Aangezien bij de onderzochte sedimenten en de redelijk bicarbonaat gebufferde media de waarde 8.0 dicht bij de evenwichtswaarde lag, verhoogde het gebruik van de pH-controle de chloride-concentratie niet noemenswaard. De waterkolom werd gemengd met een luchtverdeler, zodanig geconstrueerd dat de luchtbellen uitsluitend opwaarts bewogen zodat geen verstoring van de sedimenthorizon optrad en tevens uitputting van zuurstof in de waterfase werd voorkomen.

De hierboven beschreven condities zijn gekozen op grond van het feit dat ze een realistische weerspiegeling geven van de situatie zoals deze *'s zomers na verregaande reductie van de fosfaatbelasting* zal optreden. Wanneer wegzijging of kwel werden gesimuleerd, werd op de bodem van het sedimentencompartiment een laagje schuimrubber geplaatst, waarin de uitlaat/inlaat van het pompsysteem werd aangebracht, dit om verstopping van de pomp te voorkomen en het water gelijkmatig over de kolom te verdelen. Het kwelmedium werd anaeroob gemaakt door een continue stikstofstroom door het voorraadvat te leiden. Tevens werd de pH van het kwelwater op 7.5 gebracht. Dit is een natuurgetrouwe nabootsing van het opstromende grondwater in onze gevallen. In plaats van siliconenslang zoals gebruikelijk werd het zuurstofloze kwelmedium door butylrubber slangen gepompt (daar zuurstof door de wand van de siliconenslang diffundeert).

Monstername van het bovenstaande water gebeurde door gebruik te maken van de geringe overdruk binnen het systeem. Meting van de diverse doorstroomsnelheden werd gedaan door het openen en sluiten van de juiste kranen (zie het schema in afb. 3).

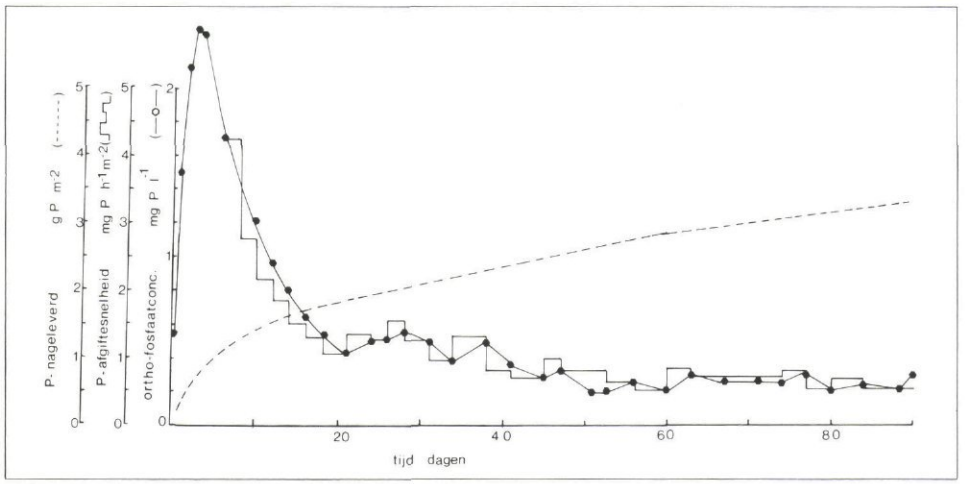
Het bemonsteren van het interstitiële water werd gedaan met behulp van een injectienaald, die door het septum geprikt werd welke in een zijbuis van het sedimentencompartiment gemonteerd was. Achter dit septum was een klein cilindervormig stukje schuimrubber aangebracht om dichtslibben van de injectienaald te voorkomen. In het algemeen was (vanwege de hoge fosfaatconcentratie van het interstitiële water) slechts een kleine hoeveelheid monster nodig, zodat geen verstoring door extra infiltratie optrad tijdens de monstername. Deze monsters werden onmiddellijk na monstername gefiltreerd over 0,45 μm cellulose-acetaat filters en indien mogelijk direct gemeten. Wanneer dit niet mogelijk was, werd zuur toegevoegd om neerslag van ijzer-fosfaat-complexen te voorkomen.

Meting van de fosfaatconcentratie gebeurde volgens Murphy & Riley [1962]. Met deze methode wordt het zogenaamde SRP (Soluble Reactive Phosphorus) gemeten, deels anorganisch, deels labiel organisch fosfaat, voor het gemak in dit artikel met fosfaat of orthofosfaat aangeduid.

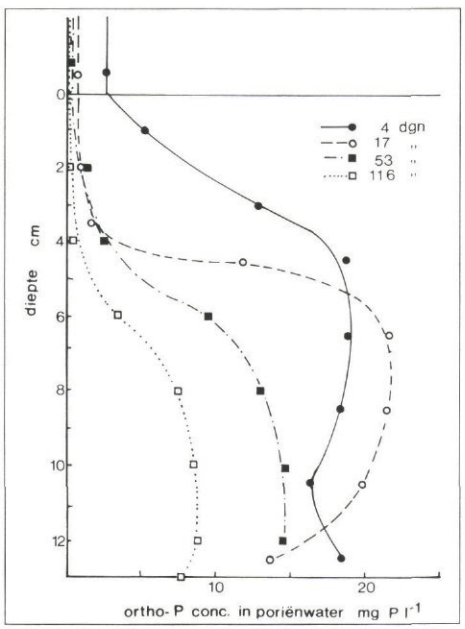
Tenslotte werd het effect van baggeren bestudeerd door een ingevroren core met een diepvriesmes door te zagen en het onderste én bovenste deel in reactoren te brengen. Over de invloed van algengroei op de fosfaatnalevering werd reeds eerder gepubliceerd [Van Liere et al., 1982], evenals over invloeden van grondwaterbewegingen [Van Liere & Mur, 1982].

Fosfaatnaleveringscapaciteit en naleveringstijd

Afb. 4 geeft een weergave van de resultaten van één van de vele doorstroomexperimenten. Aan het begin van het experiment loopt de fosfaatconcentratie snel op o.a. vanwege het grote verschil in concentratie tussen het opgeloste fosfaat in het interstitiële water en de opgeloste fosfaatconcentratie in het bovenstaande water. Dit is onder meer afgebeeld in afb. 5. Daarna vermindert de fosfaatconcentratie in het bovenstaande water doordat de naleveringssnelheid lager wordt en er fosfaat uit het systeem wordt afgevoerd. Vervolgens ontstaat er een schijnbaar evenwicht, echter, nauwkeurige analyse leert dat de fosfaatconcentratie voortdurend daalt, aangezien de voorraad fosfaat in het sediment niet



Afb. 4 - Doorstroom-experiment met bagger uit de Wijde Wormer, condities: T 20 °C, pH 8.0, D = 0.02 uur^{-1}, transport over grensvlak water/sediment door diffusie.



Afb. 5 - Gradiënt van opgelost fosfaat in het interstitiële water als functie van diepte en tijd. Afgebeeld zijn de gradiënten behorende bij het experiment in afb. 4.

onuitputtelijk is, zie ook het verloop van de gradiënt in afb. 5.
Uit twee opéénvolgende fosfaatconcentratie-bepalingen kan, door het opstellen van een stoffenbalans, berekend worden hoeveel fosfaat er per tijdseenheid en per oppervlakte-eenheid het grensvlak sediment/water passeert ('blokgrafiek' in afb. 4). Optelling van de snelheden levert de onderbroken lijn in afb. 4 op. Deze geeft het verloop van de totale hoeveelheid nageleverd fosfaat weer. Uit de literatuur is bekend (zie inleiding) dat het in oplossing gaan van fosfaat uit sedimenten vrijwel uitsluitend plaatsvindt in de periode april - oktober. In de andere periode wordt daarentegen opslag van fosfaat in het sediment waargenomen. Hoewel er gemiddeld over het gehele jaar een netto opslag in het sediment waarneembaar is, is het desondanks de 'zomernalevering', die het succes van sanering op fosfaatgebied kan bepalen.
De gebruikelijke eenheid voor de externe fosfaatbelasting is g P m^{-2} jaar^{-1}. De slechts in lente en zomer voorkomende nalevering zou in een andere eenheid worden uitgedrukt, hoewel het wèl een 'jaarlijkse' belasting betreft. In het continu doorstroomde systeem is de nalevering gesommeerd over c.q. geëxtrapoleerd naar 180 dagen, welke periode is gekozen als lengte van lente en zomer tezamen. Deze periode van 180 dagen wordt aangegeven met 'jaar'. Zo geldt de eenheid g P m^{-2} 'jaar'$^{-1}$ voor interne belasting. Bij externe belasting, welke over het gehele jaar wordt gemiddeld, zullen geen aanhalingstekens geplaatst worden. De in g P m^{-2} 'jaar'$^{-1}$ uitgedrukte grootheid is de *naleveringscapaciteit* van het betrokken sediment. Deze geeft aan hoeveel er in de zomerperiode nageleverd *kan* worden. Sommige experimenten duurden veel langer dan 180 dagen, andere veel korter. Om dit aan te geven is de *naleveringstijd* (dagen) ingevoerd, dat is de tijd gedurende welke het sediment fosfaat naleverde met een snelheid boven een bepaalde lage waarde, waarvoor 0,1 mg P m^{-2} uur^{-1} is gekozen.
Het slagen van een sanering zal zeker ook afhangen van de gebeurtenissen in de winterperiode (bezinking, mineralisatie, adsorptie). Aan het effect hiervan is in het kader van dit onderzoek geen aandacht besteed.
Gezien de langdurige nalevering van sedimenten uit Noord-Holland waren een groot aantal reactoren nodig, de helft ervan ziet u afgebeeld in afb. 6.

Fosfaatnaleveringscapaciteit van verschillende sedimenttypes

De naleveringscapaciteit van een aantal sedimenttypes in Noord-Holland is in het continu doorgestroomde systeem onderzocht. Tabel I geeft een samenvatting van de resultaten daarvan. In afb. 7 zijn de monsterpunten aangegeven in verschillende gebieden. Er bestaat in het onderzoeks-

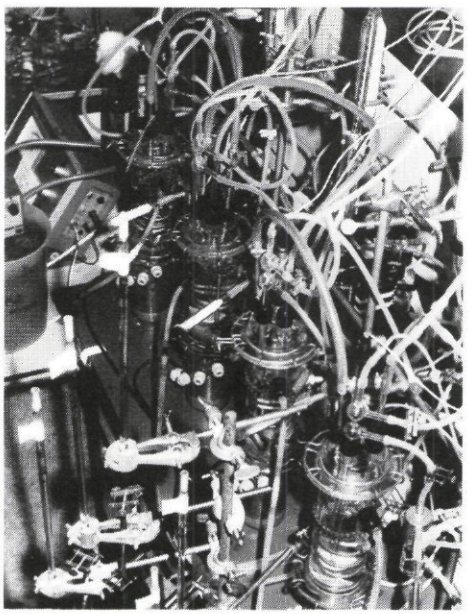
TABEL I – *Overzicht van CPRR experimenten met sedimenten uit Noord-Holland. De periode van nalevering waarover de fosfaatnaleveringscapaciteit is berekend bedraagt 180 dagen. (T = 20 °C, pH 8.0, D = 0.02 uur^{-1}, transport door diffusie (tenzij anders vermeld)).*

Exp. n° Water	Afwijking van 'normale gang van zaken'	Sediment type	Fosfaat-naleverings-capaciteit (g P m^{-2} 'jaar'$^{-1}$)	Naleverings-tijd (dagen)
1. Uitgeestermeer 2		bagger	9.3	>> 180[2]
2. Uitgeestermeer 2	pH 9	bagger	9.1	>> 180
3. Uitgeestermeer 2	pH 10	bagger	9.3	>> 180
5. Uitgeestermeer 4		bagger	10.8	> 180
6. Uitgeestermeer 1		bagger	22.7	>> 180
7. Uitgeestermeer 1	wegzijgingssimulatie	bagger	9.1	> 180[2]
8. Uitgeestermeer 1	kwelsimulatie	bagger	24.3	> 180[2]
9. Holysloter Die		rietveen/zeggeveen	1.0	45[3]
10. Achter de Kerk		mosveen (open verb. met Hilversums Kanaal	1.3	60[3]
17. Ankeveense Plassen		mosveen	0.4	20[3]
12. IJsselmeer (bij Wervershoof)		zand (+wat klei)	0.4	35[3]
13. Polder Wijde Wormer 2 (sloot)[1]		bagger	4.6	± 180[3]
14. Polder Wijde Wormer 3 (sloot)		bagger	3.8	± 180
15. Polder Wijde Wormer 5 (sloot)		veen	1.1	50
16. Polder Wijde Wormer 14 (plas)		zand	0.7	50
18. Polder Beetskoog 3 (sloot)		veen	2.1	80
19. Polder Beetskoog 1 (sloot)		veen	0.6	50
20. Polder Beetskoog 6 (sloot)		bagger/veen	7.9	150

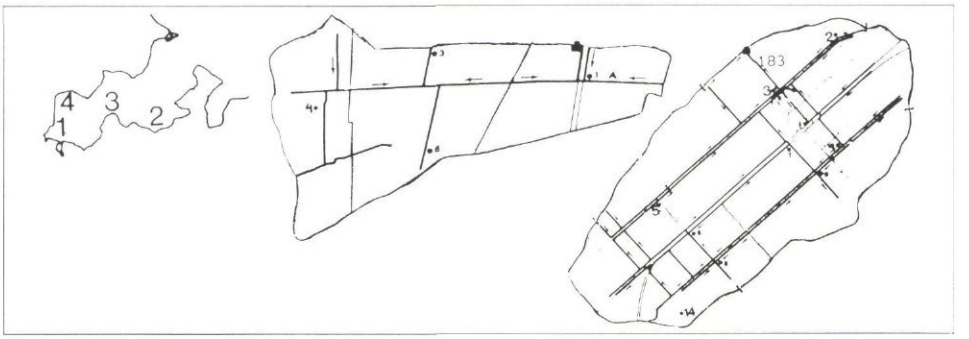
[1] Alle gebieden liggen in een wegzijgingssituatie, behalve de Wijde Wormer, over kwelsituatie hier wordt apart gerapporteerd

[2] Van Liere & Mur [1982].

[3] Van Liere et al. [1982].



Afb. 6 - Enige continu doorstroomde reactoren om de fosfaatnaleveringscapaciteit te bepalen.



Afb. 7 - Ligging van de monsterpunten in resp. het Uitgeestermeer, de Beetskoog en de Wijde Wormer (v.l.n.r.).

gebied een zeer grote verscheidenheid in naleveringscapaciteit, als ook in naleveringstijd.
Het Uitgeestermeer, het centrale meetpunt in het onderzoek, was vroeger één der zwaarst belaste meren in Noord-Holland. Afgezien van de invloed van de recreatie was de externe belasting 11-13 g Pm^{-2} $jaar^{-1}$. Na omleidingen van effluenten is dat gereduceerd tot 5-7 g P m^{-2} $jaar^{-1}$. Deze externe belasting is hoofdzakelijk te wijten aan het uitslaan van polderwater, welke zeer omvangrijk is. Deze langdurige 'historische belasting' wordt weerspiegeld in de hoge fosfaatconcentratie in de bovenste baggerlaag [Van Liere & Mur, 1982]. De naleveringscapaciteit van het sediment van het Uitgeestermeer behoort tot de hoogste waarden die ooit zijn gemeten [Van Liere, 1982]. In alle gevallen is de naleveringstijd groter tot zeer veel groter dan 180 dagen. Op een diepte van 10 cm werd een concentratie van 100 mg P l^{-1} in het interstitiële water gevonden.
Om te voldoen aan de normen gesteld in het IMP [1981] zou de externe fosfaatbelasting in het Uitgeestermeer (verblijftijd enige maanden) ongeveer 2 g P m^{-2} jaar mogen zijn. Zelfs al zou deze norm worden gehaald, dan is terugdringen van de eutrofiëring hier door de hoge interne belasting een langdurige zaak. De term 'onderwatervuilnisbelt' is hier dan ook niet ver bezijden de waarheid. Opvallend, en dit in gunstige zin, zijn de daarop volgende experimenten met veen. Hier was de nalevering laag en werd het sedimentfosfaat in korte tijd afgestaan. Veenpakketten schijnen de mogelijkheid te bezitten om fosfaat in vrij grote hoeveelheden op te nemen en vast te leggen in irreversibel gebonden humuszuurcomplexen. Het meest voedselarme veen (veenmosveen uit de Ankeveense Plassen) wisselde 0.4 mg P m^{-2} uit binnen 20 dagen. Ook het sediment uit de Kortenhoefse Plassen (Achter de Kerk, exp. 10) bestond uit veenmosveen. Echter het deel Achter de Kerk heeft een open verbinding met het Hilversums Kanaal, hetgeen de oorzaak is van een enigszins verhoogde nalevering. Het voedselrijker rietveen/zeggeveen van de Holysloter Die (exp. 9) echter leverde ten opzichte van andere sedimenttypes eveneens weinig na. Gezien de naleveringsresultaten met veenmonsters (ook in de andere veenmonsters, exp. 15, 18 en 19) hebben veengebieden een hoge prioriteit tot sanering van de externe fosfaatbelasting. Vermindering daarvan zal de eutrofiëring snel terugdringen.
Zand heeft slechts een geringe capaciteit om fosfaat vast te leggen, het staat dan ook weinig fosfaat af in de doorstroomexperimenten (exp. 12 & 16). Een groot gebied waar louter zand voorkomt, is in Noord-Holland niet aanwezig.
De resultaten met bagger (gyttja, slib) vertonen de grootste variatie, al is de naleveringscapaciteit in alle gevallen hoog te noemen. Vaak is deze bagger te vinden in de zwaarder belaste delen van Noord-Holland. In de beide polders is eveneens sprake van een grotere variatie, hetgeen ook vaak terug is te voeren op de belasting (bijv. ten gevolge van de ligging t.o.v. de bebouwing) en het sedimenttype.

Baggeren in wegzijgingsgebieden

De grondwaterbeweging is een factor van betekenis in het naleveringsproces [Van Liere & Mur, 1982; zie ook Tabel I: exp. 6, 7 en 8]. Bij wegzijgingssimulaties wordt beduidend minder nageleverd dan bij kwelsimulatie of transport door diffusie. Het onderzoek naar het effect van baggeren is dan ook vooral uitgevoerd in wegzijgingsgebieden. Op kwel wordt later teruggekomen. Tabel II geeft de resultaten van een aantal doorstroomexperimenten waarbij baggeren werd gesimuleerd. Ondanks het feit dat grondwater wegzijgde is dit niet nagebootst in de experimenten, vooral om praktische redenen, maar ook omdat de wegzijgsnelheid van het water niet die grootte had om dit coûte que coûte na te bootsen [Van Liere & Mur, 1982]. Transport van fosfaat over het grensvlak sediment/water vond plaats door diffusie.
De baggerexperimenten gaven zonder enige uitzondering, ongeacht het sedimenttype, een grote verlaging van de naleveringscapaciteit en in de meeste gevallen een aanzienlijke verkorting van de naleveringstijd te zien. Dit uiterst positieve resultaat wijst erop dat baggeren, *als aanvulling op reductie van de externe fosfaatbelasting*, een zeer bruikbare maatregel kan zijn.

TABEL II – *Overzicht van baggersimulaties en baggeren in wegzijgingsgebieden.*

Exp.	Water		Bodemtype	Fosfaatnaleveringscapaciteit (g P m^{-2}'$jaar'^{-1}$)	Naleveringstijd (dagen)
17.	Ankeveense Plassen	voor baggeren	mosveen	0.4	20
21.		na baggeren** (20 cm)	mosveen	0.04	5
10.	Achter de Kerk	voor baggeren	mosveen	1.3	60
22.		na baggeren (23 cm)	mosveen op zand	0.05	5
9.	Holysloter Die	voor baggeren	rietveen/zeggeveen	1.0	45
23.		na baggeren (20 cm)	rietveen/zeggeveen	0.2	30
18.	Polder Beetskoog, punt 3	voor baggeren	veen	2.1	80
26.		na baggeren (10 cm)	jonge zeeklei	0.35	60
6.	Uitgeestermeer, punt 4 ('80)	voor baggeren	bagger	10.8	> 180
11.	('81)	na baggeren*	zand + veen	1.0	60
24.	Uitgeestermeer, punt 4	voor baggeren	zand/bagger/klei	3½	> 100
25.	(1982)	na baggeren (13 cm)	zand/klei	0.15	20

* Dit baggeren was geen door ons uitgevoerde simulatie, maar baggeren in het meer zelf (m.b.v. een baggermolen) teneinde diepte t.b.v. een nieuwe jachthaven te creëren.
** Tussen haakjes de lengte van de weggezaagde bovenlaag.

Naar het effect van baggeren alléén (dus zonder reductie van de externe fosfaatbelasting) konden we toevalligerwijze eveneens onderzoek verrichten. Aan de noordzijde van het Uitgeestermeer was een monsterpunt gekozen (punt 4, zie afb. 7). Vrij kort nadat de metingen aan het daar genomen monster waren verricht (exp. 6, Tabel II), werd er gebaggerd door een baggermolen (diepte van baggeren niet bekend). Het direct na het baggeren genomen monster (exp. 11) vertoonde ten opzichte van de naleveringscapaciteit van het vóór het baggeren gemeten monster een vermindering met een factor tien. Anderhalf jaar later werd op hetzelfde punt weer een monster gestoken. De naleveringscapaciteit was in die korte tijd wederom fors gestegen (vergelijk exp. 11 met 24). De oorzaak hiervan was allereerst dat er slechts in een klein deel van het meer gebaggerd werd, terwijl de zeer lichte toplaag van bagger vrij mobiel is en door waterbewegingen weer over de plas wordt verspreid, en vooral in diepere delen bezinkt. Ten tweede was er een onverminderde hoge externe belasting van het Uitgeestermeer.
De wijze van baggeren zal zeker van invloed zijn op het effect ervan. Zo laat baggeren met een molen de bovenlaag, die immers snel geresuspendeerd wordt, ongemoeid. Wegzuigen van de toplaag verdient daarom de voorkeur.

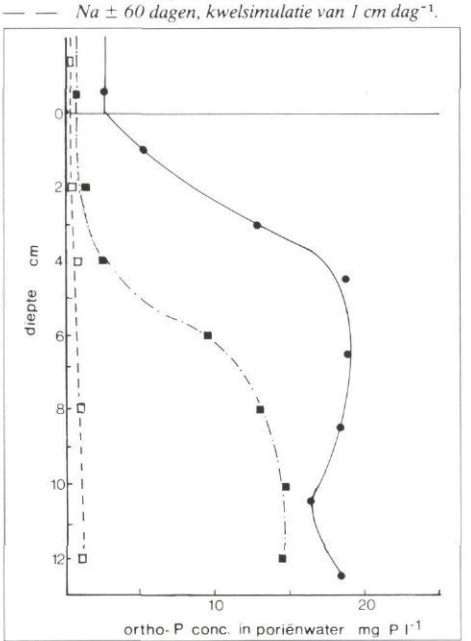
Het effect van kwel op de fosfaatnalevering en het baggeren in een kwelgebied

De kwelpost in een stoffenbalans is niet simpel te kwantificeren. Vaak wordt er een rekenpost of een sluitpost van gemaakt. Geen van beide geeft juiste informatie over de toevoer van fosfaat naar het oppervlaktewater, daar interacties met het sediment, en dit vooral nabij het sediment/water grensvlak, niet voldoende op waarde worden geschat. Ook dit onderzoek kon, gezien het geringe aantal kwelsimulaties, niet veel meer zijn dan een analyse van het mechanisme.
Ten behoeve van de experimenten ter bestudering van kwel en het effect van baggeren in kwelgebieden werd gekozen voor een monsterplek in de Wijde Wormer (pnt. 183, afb. 7). De kwelsnelheid was hier vrij hoog (10 mm dag^{-1}). In diepere lagen werd in het grondwater zowel fosfaat als ijzer aangetoond. Dit laatste element speelt een belangrijke rol in het fosfaatnaleveringsproces [Lijklema, 1979; Van Liere en Mur, 1982]. Aan drie monsters met een toplaag van bagger werden experimenten uitgevoerd. Voorts werd de baggerlaag verwijderd en werd de overgebleven kleilaag op analoge wijze doorgemeten. De resultaten van de experimenten zijn vermeld in Tabel III.
De eerste opvallende conclusie hieruit is dat de in de vorige paragraaf gevonden spectaculaire vermindering van de naleveringscapaciteit na baggeren, zich hier niet voordeed wanneer tevens kwel werd gesimuleerd. Verder is toevoeging van ijzer en/of fosfaat onder deze condities, gezien de gevonden naleveringscapaciteit, niet van belang. Dit suggereert dat de nalevering vanuit de vaste fase van het sediment verreweg het belangrijkst is en de toevoer door kwel slechts een bescheiden bijdrage levert. Wanneer het sediment geen invloed zou hebben (dus ook niet zou naleveren) en het kwelwater met een fosfaatconcentratie van 0.5 mg P l^{-1} het sediment/water grensvlak met een snelheid van 10 mm dag^{-1} omgehinderd zou passeren, zou de belasting 0.9 g P m^{-2} 'jaar'$^{-1}$ bedragen. Dergelijke waarden worden in balansstudies vaak gehanteerd. Tabel III toont de hachelijkheid hiervan aan. Hoewel kwel dus slechts in mindere mate bijdraagt aan de interne belasting (dit in vergelijking met nalevering door het sediment) dient het als transportmechanisme voor het door de vaste fase afgestane fosfaat in diepere lagen. Afb. 8 toont een voorbeeld van de fosfaatgradiënt met en zonder kwelsimulatie. Wanneer diffusie de drijvende kracht is achter de nalevering, vindt de nalevering vooral plaats vanuit de bovenste laag. Bij kwel zorgt de mechanische kracht van het bewegende water ervoor dat de nalevering over een grotere diepte *kan* optreden. Dit werd bevestigd door metingen aan het fosfaatgehalte van de vaste fase op verschillende diepten (resultaten niet in dit artikel).
Een hypothetisch mechanisme van nalevering, onder invloed van fosfaathoudende kwel wordt door de auteurs als volgt voorgesteld. In de zomer levert sediment fosfaat na, waardoor het fosfaat verliest. In de winterperiode wordt weer fosfaat geaccumuleerd, ten dele vanuit het oppervlaktewater, maar ook vanuit de fosfaathoudende kwel. Sanering kan slechts het eerste proces beïnvloeden, maar het 'opladen met fosfaat' door kwel in de winter (met de daarbij behorende nalevering in de zomer) wordt niet beïnvloed. Naar de omvang van deze 'natuurlijke' fosfaatbelasting kan men slechts gissen. Ze is echter niet verwaarloosbaar, gezien de uitgevoerde baggersimulaties. Structuur van het sediment, samenstelling van het kwelwater en kwelsnelheid spelen hierbij een belangrijke rol. Nader onderzoek is noodzakelijk om deze processen te kunnen kwantificeren.

TABEL III – *Overzicht van kwelexperimenten en baggersimulaties met sedimenten uit de Wijde Wormer. Condities: Doorstroommedium: pH 8.0; zuurstofrijk; T: 20 °C. Kwelmedium: pH 7.5; zuurstofloos; T: 20 °C. Kwelsnelheid 10 mm dag^{-1}; de verblijftijd voor de media gezamenlijk was 2 dagen (D = 0.02 uur^{-1}).*

Exp.	Sediment	Kwelkenmerk	Naleverings-capaciteit (g P m^{-2} 'jaar'$^{-1}$)
30	toplaag van	'normaal'	5.1
31	bagger	+ 0.5 mg P l^{-1}	4.3
32		+ 0.5 mg P l^{-1} + 0.5 mgFe l^{-1}	5.5
29	kleilaag (na	'normaal'	2.7
28	verwijderen	+ 0.5 mg P l^{-1}	2.8
27	baggerlaag)	+ 0.5 mg P l^{-1} + 0.5 mgFe l^{-1}	2.3

Afb. 8 - Fosfaatconcentratie in het interstitiële water (Wijde Wormer, pnt. 183).
——— *Beginsituatie.*
— · — *Na ± 60 dagen, transport door diffusie.*
— — *Na ± 60 dagen, kwelsimulatie van 1 cm dag^{-1}.*



Conclusies

Uitgangspunt voor de bestrijding van eutrofiëring dient te zijn: reductie van de fosfaattoevoer naar het oppervlaktewater. Het eerste aangrijpingspunt is vermindering van de externe fosfaatbelasting. De omvang van de externe toevoer dient bekend te zijn evenals de samenstelling ervan (huishoudens, industrie, effluenten, landbouw, veeteelt, etc. etc.). Vermindering van de externe toevoer hoeft niet direct tot vermindering van de hoeveelheid algen te leiden, vanwege de nalevering door het sediment. Vermindering van de interne belasting kan o.a. worden bereikt door op de externe fosfaatreductie aanvullende maatregelen zoals bijvoorbeeld baggeren.
Sanering via vermindering van de fosfaatbelasting zal in veengebieden en in gebieden waar het grondwater wegzijgt snel tot vermindering van de algengroei leiden. Daar waar fosfaathoudende kwel optreedt zal dit proces worden vertraagd, terwijl de veranderingen waarschijnlijk minder spectaculair zullen zijn. In het laatste geval is meer onderzoek nodig om de door kwel ontstane fosfaatbelasting te kwantificeren. Het advies aan de waterbeheerder om meer onderzoek klinkt menig beheerder