

Fosfaatverwijdering uit afvalwater

Volgens de huidige opvatting zou de eutrofiëring van de oppervlaktewateren in belangrijke mate voorkomen kunnen worden door het beperken van de fosfaatlozingen op deze wateren. Dit kan worden gerealiseerd door het terughouden van fosfaten uit de wateren die naar het oppervlaktewater worden afgevoerd. Terughouding bij de bron verdient in het algemeen de voorkeur boven verwijdering uit de totale (afval) waterstroom.

Als fosfaatbronnen kunnen genoemd worden huishoudelijk afvalwater, industrieel afval-



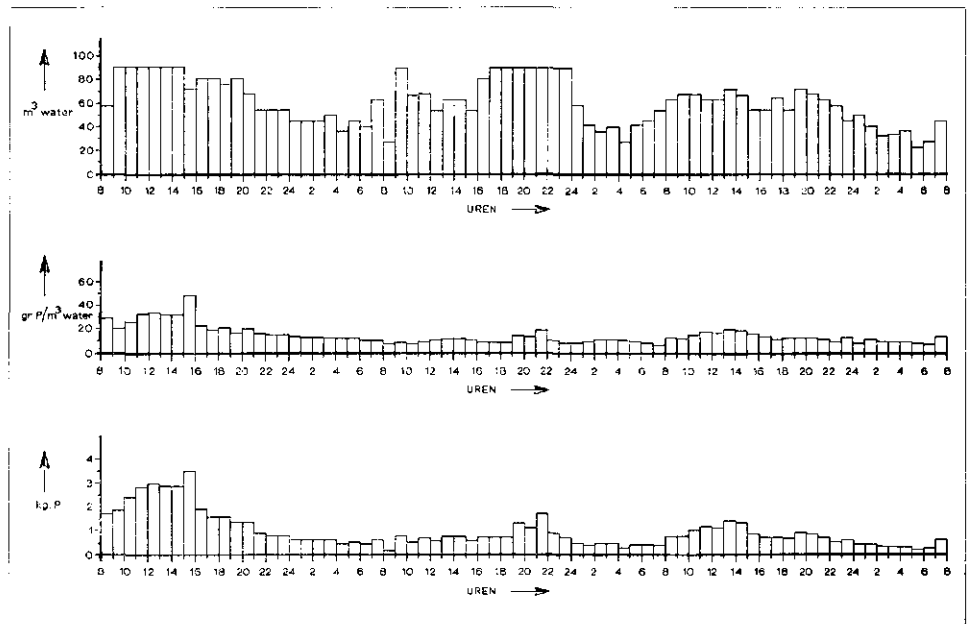
IR. R. KAPER
Rijksinstituut voor zuivering
van afvalwater.

water, uitspoeling uit gronden, het regenwater, het ons land binnenstromende Rijn- en Maaswater en de hoeveelheid fosfaat die in het bodemslib is opgeslagen. Het huishoudelijke afvalwater bevat 6-15 gram totaalfosfaat per inwoner per etmaal, dit is 2-5 gram P. Van deze hoeveelheid is ongeveer 1,5 gram P van de excrementen afkomstig — 0,79 g van urine en 0,71 g van de vaste excrementen —, voornamelijk in de vorm van orthofosfaten. Het resterende aantal grammen is toe te schrijven aan keukengebruik en aan de synthetische wasmiddelen.

Aan de wasmiddelen worden poly- en tripolyfosfaten toegevoegd om de nadelige invloed van de carbonaathardheid op het wasproces tegen te gaan en om de suspensie van vuildeeltjes te bevorderen. In hoeverre de fosfaatlozing zonder schadelijke gevolgen o.a. voor de volksgezondheid gereduceerd kan worden door vervanging van fosfaten door andere componenten in de wasmiddelen en door centrale ontharding van het drinkwater is een vraag die dezerzijds op dit moment niet kan worden beantwoord. Wanneer de fosfaatvracht van het afvalwater door de aangegeven werkwijzen daadwerkelijk zonder nadelige gevolgen teruggebracht kan worden, moet dit niet worden nagelaten.

TABEL I - Vormen en concentraties van fosfaat in huishoudelijk afvalwater (Amerikaanse omstandigheden).

Vorm van het fosfaat	Concentratie	
	mg P/l	Molariteit (g mol/l)
Totaal-fosfaat	10	$3,2 \times 10^{-4}$
Ortho-fosfaat	5	$1,6 \times 10^{-4}$
Tripoly-fosfaat	3	$3,2 \times 10^{-5}$
Pyro-fosfaat	1	$1,6 \times 10^{-5}$
Organisch-fosfaat	≤ 1	≤ $3,2 \times 10^{-5}$



Afb. 1 - Verloop fosfaatbelasting op een zuiveringsinstallatie voor huishoudelijk afvalwater.

In tabel I staan bij benadering de vormen, waarin het fosfaat onder Amerikaanse omstandigheden in huishoudelijk afvalwater voorkomt, vermeld. Afb. 1 geeft een overzicht van het verloop van de fosfaatbelasting over een aantal dagen op een rioolwaterzuiveringsinstallatie waar voornamelijk huishoudelijk afvalwater wordt aangevoerd. Per inwoner is gedurende deze periode 6 tot 15 gram PO_4^{3-} , dit is 2 à 5 g P per etmaal op de installatie aangevoerd. Industrieel afvalwater kan eveneens aanzienlijke hoeveelheden fosfaat bevatten, met name de industrieën, die agrarische producten verwerken, kunstmestfabrieken, slachthuizen en de bio-industrie. De chemische industrie loost in het algemeen afvalwater, dat arm aan fosfaten is.

De uitspoeling uit gronden is afhankelijk van de aard van de grond, de hoeveelheid neerslag en het gebruik dat van de grond gemaakt wordt.

De hoeveelheid fosfaat die met het regenwater wordt aangevoerd is van te verwaarlozen betekenis.

Het Rijn- en Maaswater, dat als voedingsbron voor vele binnenlandse wateren van grote betekenis is, is rijk aan fosfaten. Met het Rijnwater is in 1973 naar raming 55.000 ton totaal fosfaat ons land binnen gestroomd.

Dr. Golterman heeft aangetoond dat het bodemslib een grote hoeveelheid fosfaat kan afgeven. De hoeveelheid fosfaat aanwezig in het bodemslib kan door baggeren worden gereduceerd.

Voor de fosfaatverwijdering zijn van de genoemde bronnen slechts het huishoudelijk en het industrieel afvalwater technisch

grijpbaar. De meest geëigende plaats voor de defosfatering is een centrale afvalwaterstroom, in het algemeen de zuiveringsinstallatie. Wanneer de toevoer van afvalwater naar de zuiveringsinrichting via een gemengd rioolstelsel plaatsvindt moet men accepteren dat bij regen aanzienlijke hoeveelheden fosfaat bevattend water aan de defosfatering ontsnappen.

Op een zuiveringsinstallatie, waar geen speciale voorzieningen voor de fosfaatverwijdering zijn getroffen vindt, voornamelijk tengevolge van het oxydatief-biologisch proces een bepaalde reductie in het fosfaatgehalte plaats. Daar het grootste deel van de fosfaten in huishoudelijk afvalwater in opgeloste vorm aanwezig is kan van het bezinkproces slechts een geringe fosfaatreductie worden verwacht. In het biologische proces wordt fosfor gebruikt voor de assimilatie in nieuwe celmaterie. Een bepaalde hoeveelheid fosfor is van essentieel belang voor de groei van de levende organismen. Jenkins en Menar berichten, dat het actief slib van een zuiveringsinstallatie 2 - 3 % fosfor, betrokken op de organische stof, bevat. Uit dit percentage kan slechts een gemiddelde fosfaatreductie van 20 - 30 % volgen. Deze geringe verwijdering bij het biologisch proces kan voor het huishoudelijk afvalwater verklaard worden aan de hand van de onderlinge verhouding waarin de elementen koolstof, stikstof en fosfor (C : N : P) in het afvalwater en in de celmaterie voorkomen. De C : N : P verhouding is volgens Stumm en Morgan 70 : 17 : 1 voor huishoudelijk afvalwater, en 106 : 16 : 1 voor het bacterie-slib. Uit deze getallen valt af te leiden dat als gevolg van een deficit van

aan organische stof gebonden koolstof niet zoveel organismen geproduceerd worden dat alle beschikbare fosfor wordt opgenomen. Sawyer vermeldt, dat de BOD : P verhouding in afvalwater voor een volledige fosfaatverwijdering een verhouding 100 : 1 moet overschrijden. Niettemin worden in de literatuur toch zuiveringsinrichtingen met fosfaatreducties van 80 % en hoger genoemd zonder dat hierbij sprake is van fosfaatverwijdering door toevoeging van een chemisch agens. (Rilling Road, San Antonio, Texas en Back River te Baltimore). Voor het mechanisme van deze hoge percentages fosfaatverwijdering bestaan twee hypothesen:

1. 'luxury uptake' en verhoogde fosfaatprecipitatie;
2. precipitatie als gevolg van metalen in het afvalwater.

De theorie van de 'luxury uptake' werd geïntroduceerd door Levin en Shapiro. Daartoe geïnspireerd door pilot-plant studies suggereerden zij dat het actief slib onder bepaalde bedrijfsomstandigheden aanzienlijk meer fosfor assimileert dan voor de normale celgroei vereist is. Op de theoretische beschouwingen die aan genoemde hypothese ten grondslag liggen wordt hier niet nader ingegaan. Een en ander bevindt zich nog in een zodanig experimenteel stadium dat er voor wat betreft de praktijk hier gevoelig aan kan worden voorbijgegaan.

Een verregaande fosfaatverwijdering uit afvalwater (>90 %) is volgens de huidige inzichten het meest doelmatig te verkrijgen door de toevoeging van chemicaliën. De hiertoe meest gebruikelijke middelen zijn ijzertzouten, aluminiumzouten en kalk. Het is hierbij niet altijd geheel duidelijk of de fosfaat-eliminatie is toe te schrijven aan precipitatie, flocculatie, adsorptie of een combinatie hiervan. Volgens Wuhmann is de chemische precipitatie van fosfaat met behulp van ijzertzouten een gevolg van de vorming van FePO_4 . Dit FePO_4 wordt opgenomen binnen een zich tevens vormende hydroxydevlok, die op efficiënte wijze de organische fosforverbindingen en de andere samengestelde anorganische fosfaten adsorbeert. Hij acht het noodzakelijk voor een goede fosfaatverwijdering boven de stoichiometrisch vereiste hoeveelheid van 1,88 mg Fe per mg P voor de vorming van het hydroxide ten minste 10 mg/l Fe extra te doseren. Convey legt verband tussen de zuurgraad en het mechanisme van fosfaatverwijdering door aluminium. Bij een $\text{pH} < 6$ is volgens zijn inzicht het reductieproces chemisch precipitatie, bij een $\text{pH} > 6$ meer een adsorptie van aluminiumfosfaat aan de aluminium hydroxydevlok.

Sawyer wijst erop, dat er een verschil bestaat in fosfaatverwijdering tussen ruw afvalwater en biologisch gezuiverd afvalwater. In ruw afvalwater zou de hoeveelheid orthofosfaat slechts 40 - 60 % van het totaal fosfaat zijn; in effluent daarentegen maakt het gewoonlijk meer dan 90 % van het totaal fosfaat uit, een en ander afhankelijk van het soort afvalwater. Samengestelde fosfaten blijken door hun neiging tot het vormen van oplosbare complexen met de kationen moeilijk te verwijderen. Voor de precipitatie van pyrofosfaat is volgens Stumm een vrij hoge $\text{Al} : \text{PO}_4$ verhouding nodig. Hij wijst erop, dat tripolyfosfaat noch door Fe^{3+} noch door Al^{3+} op efficiënte wijze kan worden gereduceerd. Kalk vormt bij een $\text{pH} > 10,5$ met orthofosfaat hydroxylapatiet $\text{Ca}_5(\text{OH})(\text{PO}_4)_3$. De vereiste hoeveelheid kalk voor een efficiënte fosfaatverwijdering ($\text{pH} = 10,5 - 11$) is een functie van de

alkaliteit en van de calciumhardheid van het water en is nagenoeg onafhankelijk van de fosfaatconcentratie. In de literatuur worden bij een $\text{pH} > 11$ restgehalten van 0,1 - 0,3 mg/l fosfaat vermeld. De benodigde hoeveelheden kalk kunnen met behulp van afb. 2, die het verband tussen de dosis kalk en de alkaliteit van het water aangeeft benaderd worden *).

De relatie kalk-alkaliteit komt bij een $\text{pH} = 11$ goed overeen met de grafiek, die door Buzzell en Sawyer werd opgesteld (afb. 3). Volgens deze grafiek moet de benodigde hoeveelheid kalk voor het verkrijgen van een $\text{pH} = 11$ ongeveer 2 à 2,5 x de alkaliteit van het water bedragen. Wuhmann geeft aan, dat de hoeveelheid voor fosfaatverwijdering benodigde kalk bij een $\text{pH} = 11,5$ à 11 gelijk is aan 1,5 x de carbonaathardheid. Daar het reactieproduct in een zeer fijne kristalvorm ontstaat stelt Wuhmann voor een dosis van 1 - 2 mg/l Fe^{3+} als vlokkingsmiddel toe te voegen.

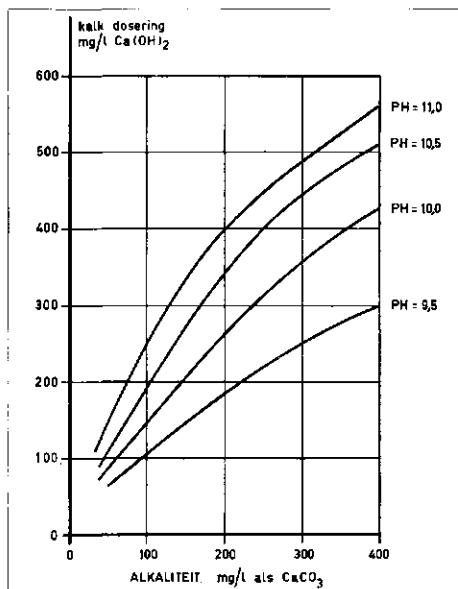
Behalve de in het algemeen grotere slibhoeveelheden verkrijgt men bij de precipitatie met kalk een effluent met een hogere pH waarde, zodat eventueel nog neutralisatie nodig is. Doordat het water meer of minder onthard is zijn hiervoor slechts geringe hoeveelheden zuur nodig.

In afb. 4 zijn schematisch enige werkwijzen van fosfaatverwijdering op rioolwaterzuiveringsinstallaties aangegeven. De schema's hebben betrekking op mechanisch-biologische inrichtingen.

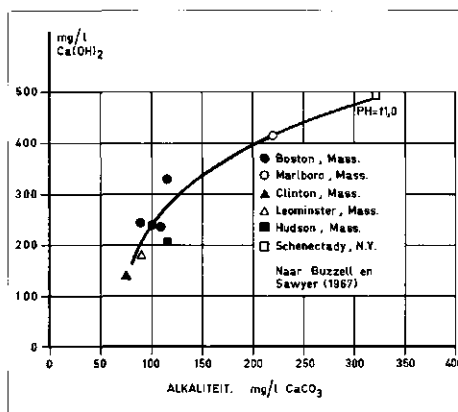
Het eerste schema geeft een proces te zien, waar in de voorzuiveringstrap behalve fosfaat ook andere parameters, zoals organische- en zwevende stof met behulp van chemicaliën gereduceerd worden. Bij het pre-precipitatieproces dient er voor gezorgd te worden dat in het voorbezonden afvalwater voldoende fosfaat in relatie tot de resterende organische stof als nutriënt voor het biologisch proces is overgebleven. Bij pre-precipitatie installaties kan overwogen worden van de verhoogde BOD verwijdering in het mechanisch zuiveringsproces te profiteren door de belichtingsunit kleiner te dimensioneren. Volgens Dorr-Oliver wordt bij het door deze firma ontwikkelde Phosphate Extraction Process (PEP), dat in afb. 5 schematisch is weergegeven behalve het grootste gedeelte van het fosfaat, 85 % van de zwevende stof en 65 - 75 % van de BOD geëlimineerd. De resterende fosfaatreductie vindt in de biologische installatie plaats. De bij het proces vrijkomende CO_2 en de beluchtingsapparatuur worden benut om de pH van het voorbezonden afval-

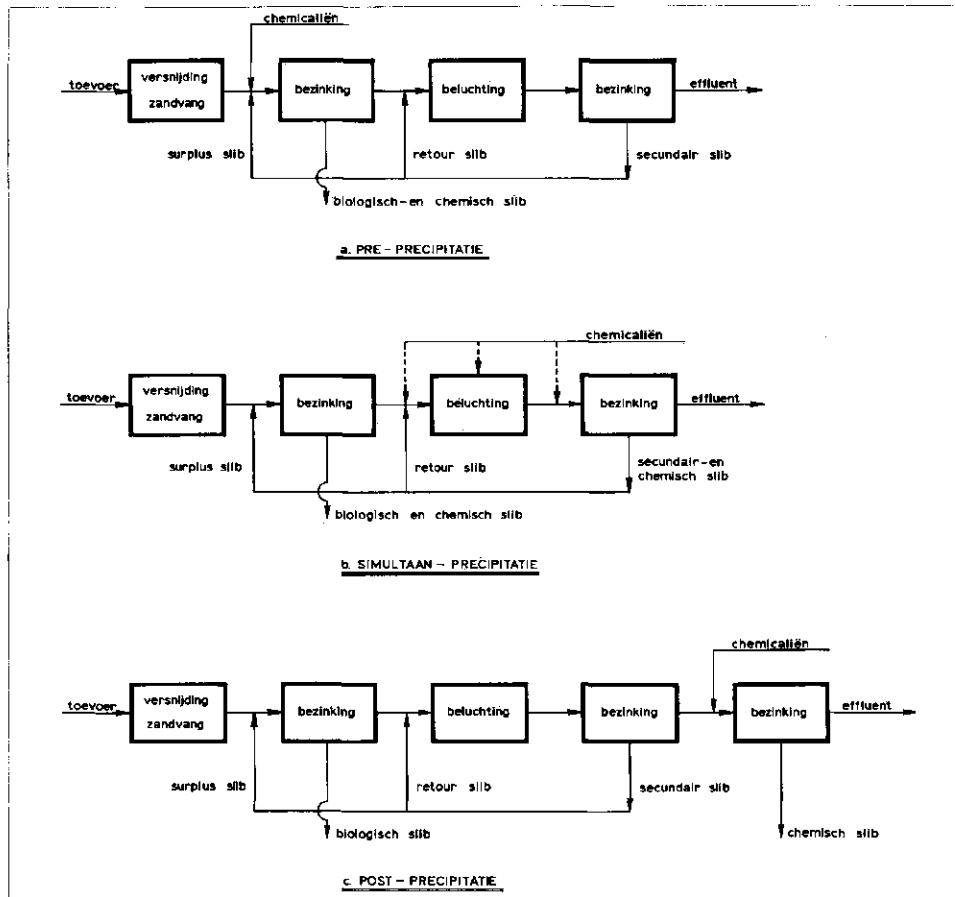
*) Deze afb. werd door Dorr-Oliver voor publicatie vrijgegeven.

Afb. 2 - Verband kalkdosering-alkaliteit (Dorr-Oliver).



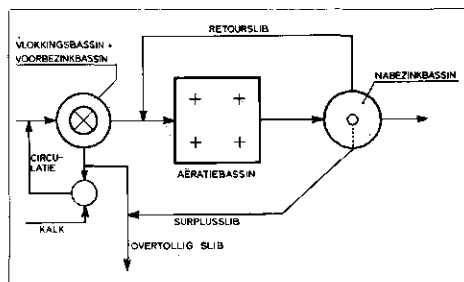
Afb. 3 - Verband kalkdosering-alkaliteit (Buzzell en Sawyer).





Afb. 4 - Werkwijzen van fosfaatverwijdering op mechanisch-biologische rioolwaterzuiveringsinstallaties.

Afb. 5 - Schema Phosphate Extraction Process (Dorr-Oliver).



water (< 9,5) te verlagen. De toepassing van een pre-precipitatie-installatie, maar dan met weglating van het biologische proces verdient overweging wanneer men om welke reden dan ook met een BOD-reductie van 50 - 60 % genoegen neemt maar daarentegen een drastische reductie van de fosfaten verlangt. Dit systeem wordt o.a. in Noord-Zweden gebruikt, waar als gevolg van de lage temperaturen in de winter geen hoge BOD-reducties met behulp van biologische zuivering verkregen kunnen worden. Het is nog geen uitgemaakte zaak of de voorbezinktank bij toepassing van het pre-precipitatieproces groter gedimensioneerd moet worden. Bij het simultane proces heeft de fosfaatverwijdering een directere

invloed op het biologische proces. Sommige onderzoekers vrezen een nadelig effect op het optimaal functioneren van de biologische installatie. Hoewel bij een onderzoek op de installatie te Elburg geen schadelijke werking van de vlokmiddel-dosering geconstateerd is, impliceert dit niet dat het proces zonder meer in alle gevallen probleemloos kan worden toegepast. Op dit punt heeft de praktijk van de defosfatering ons nog wat te leren. Vanwege de hoge en voor het biologische proces ongunstige pH moet voor de gemengde methode de precipitatie met kalk worden ontraden. Het pre-precipitatie- en het simultane proces zijn in het bijzonder geschikt wanneer binnen een kort tijdsbestek faciliteiten voor de fosfaatverwijdering op een bestaande biologische installatie gerealiseerd moeten worden.

Welk van beide systemen in een bepaalde situatie de voorkeur verdient wordt bepaald door het type afvalwater, dat in de installatie wordt behandeld en door de lokale omstandigheden. Alleen bij het laatste schema is het principe van functiesplitsing doorgevoerd. Het biologische gedeelte van de installatie wordt door een separate unit voor de fosfaatverwijdering gevolgd. Volgens Wuhmann en Pöpel levert dit

principe de hoogste fosfaatreductie op. De postprecipitatiemethode biedt de mogelijkheid om het chemische slib afzonderlijk te behandelen.

Uit de praktijk is evenwel bekend dat het ontwateren van het veelal volumineus en moeilijk bezinkbaar hydroxydeslib niet eenvoudig is. Het systeem vergt naast de investering voor chemicalieopslag en dosering hoge kosten voor de bouw van een extra nabezinktank. De normen voor het ontwerpen van deze tank zullen hoogstwaarschijnlijk stringenter moeten zijn dan van de bezinktank voor het secundaire slib (oppervlaktebelasting 0,5 - 0,8 m³/m² uur bij een verblijftijd 3 - 4 uur?). Bovendien wordt in de praktijk ten behoeve van een goede vlokvorming meestal een apart bassin vóór de bezinktank bijgebouwd. Alhoewel bij de twee eerste schema's van afb. 4 een gedeeltelijk gescheiden slibafvoer wel denkbaar is n.l. bij schema a primair- + chemisch slib en surplus slib, bij schema b primairslib en surplus + chemisch slib ligt het voor de hand, dat het biologisch en chemisch slib tezamen verwerkt wordt. Sommige onderzoekers vrezen, dat anaerobe vergisting voor dit slib als behandelingswijze ongeschikt is wanneer FeCl₃ gebruikt wordt. In het anaerobe proces zou het driewaardig ijzer tot tweewaardig ijzer kunnen worden gereduceerd waarbij een oplosbaar fosfaat wordt gevormd dat dan met het slijkwater weer in de biologische installatie wordt teruggevoerd. Thomas daarentegen stelt dat eenmaal in een neerslag gebonden fosfaat bij de anaerobe gisting niet meer in oplossing gaat. Nog aan organische stof gebonden fosfaat komt tengevolge van het gistingsproces gedeeltelijk in oplossing; daar staat tegenover dat het fosfaat gehalte van het slijkwater door het inpompen van ijzerfosfaatslib wordt gereduceerd. Onderzoek op het laboratorium van het RIZA en duurproeven op ware schaal op de rioolwaterzuiveringsinstallatie te Elburg hebben de vrees dat bij het gistingsproces een oplosbaar fosfaat wordt teruggevoerd niet bewaarheid. Vóór de dosering van ijzerchloride varieerde het gehalte aan totaal fosfaat in het slijkwater te Elburg van 150 - 750 mg/l PO₄³⁻; gedurende de dosering daalde het gehalte tot waarden beneden 100 mg/l PO₄³⁻. Bij slibverwerkingsmethoden als pasteurisatie, sterilisatie en thermische behandeling verwacht Thomas op grond van verricht onderzoek in deze zin geen problemen van enige betekenis. Ook bij het gebruik van aluminium als precipitatiemiddel wordt nergens het vrijkomen van fosfaat gerapporteerd. Bij het simultaan proces loopt het chemisch slib in de kringloop van het actieve slib mee.

Het fosfaatbindend vermogen van dit biologisch-chemisch slib leidt volgens Thomas tot een beperking van de benodigde hoeveelheid vlokmiddel. Pöpel wijst op het gevaar, dat de chemische vlokken door de sterke turbulentie in de aeratieruimte vernietigd kunnen worden, hetgeen de bezinkbaarheid van het slib niet ten goede komt. Bovenstaande argumenten behoeven ons er echter niet altijd van te weerhouden het gemengde systeem toe te passen. Zoals reeds hiervoor werd aangegeven wordt het proces met succes op de installatie te Elburg bedreven. Wuhrmann vond bij toepassing van dit proces bij een dosering van 30 mg/l Fe een verdubbeling van de hoeveelheid droge stof en het volume aan surplus slib ten opzichte van eenzelfde installatie zonder fosfaatverwijdering. Thomas geeft op grond van zijn onderzoeken aan dat de slibhoeveelheden door de chemicaliëndosering geenszins in ernstige mate wordt vergroot. Het vlokkingmiddel bevordert blijkbaar een verdichting van het slib. Het post-precipitatieproces leidt zoals eerder werd opgemerkt tot een volumineus en moeilijk bezinkbaar hydroxyde slib. Voor het ontwerpen van dit type installaties worden door de Zweedse Nationale Organisatie ter bescherming van het milieu de volgende slibproductiewaarden gebruikt.

soort slib	droge stof g/inw. etm.	droge stof gehalte [%]	slibvolume na indikken i/inw. etm.
primair-	60	6	1,0
secundair	35	2	1,8
chemisch- (A1)	25	1,5	1,7

Nog weinig onderzoek is verricht aan de fosfaatverwijdering bij installaties met oxydatiebedden. Het post-precipitatieproces kan zonder meer worden toegepast. Thomas verwacht weinig moeilijkheden wanneer het gemengde proces gebruikt wordt. Wel wordt geadviseerd het precipitatie-middel in verband met verstoppingsgevaar voor het filterbed in de afloop van het filter te doseren. Zowel bij het pre- als het simultane proces dient, mede met het oog op de circulatie van water- en slibstromen veel aandacht aan een goede werking van de bezinktanks te worden geschonken. Daarnaast blijft het gevaar van de beïnvloeding van de biologische huid op het filtermateriaal door metaalionen aanwezig. In het tijdschrift *H₂O* (7) 1974, nr. 9 zijn de resultaten van een onderzoek op een oxydatiebedinstallatie in Amerika, waar chemische precipitatie werd toegepast, beschreven.

In het voorafgaande is er al meer malen op gewezen dat de toepassing van een precipitatie-middel voor de fosfaatver-

wijdering een aantal neveneffecten tot gevolg heeft. Reeds aan de orde zijn geweest de invloed op de slibhoeveelheden en de verwerking van het slib, additionele aspecten die beslist niet onderschat mogen worden. Eveneens is ter sprake geweest de beïnvloeding van het bezinkproces en van het biologisch gebeuren op de zuiveringsinrichting. In het algemeen kan op een verbetering van de organische- en zwevende stofreductie worden gerekend, hoewel ook wel geconstateerd is dat de troebelheid van het effluent als gevolg van de dosering van vlokmiddel toenam. Ten aanzien van de verwijdering van zware metalen heeft het pre-precipitatieproces voordelen. De verwijdering zal gestimuleerd worden tenzij de metalen als stabiele oplosbare complexen aanwezig zijn. Oliedispersies en emulsies zullen eveneens worden afgescheiden. Deze bijkomstigheid verschaft een zekere mate van bescherming voor het daaropvolgende biologisch proces. De invloed van toxisch afvalwater bij het simultane proces is minder eenvoudig te voorspellen. Het post-precipitatieproces biedt het biologisch gedeelte van de zuiveringsinstallatie in dit opzicht geen enkele protectie.

Het gebruik van bv. ijzerchloride als precipitatie-middel zal een verhoging van het ijzer- en chloridegehalte in het effluent tengevolge hebben. De concentratie van Fe³⁺ varieerde in de afloop van de installatie te Elburg gedurende de proefperiode waarin FeCl₃ in de aeratieruimte werd gedoseerd van 0,09 - 4,44 mg/l; daarvoor werden gehalten van 0,05 - 0,68 mg/l gemeten.

Ook het chloridegehalte vertoonde een opmerkelijke stijging. Zoals te verwachten is, was de toeneming van Fe³⁺ en Cl⁻ in het effluent het grootst bij de hoogste doseringen van ijzerchloride.

Door het Rijksinstituut voor Zuivering van Afvalwater zijn en worden dank zij de medewerking van het Zuiveringsschap Veluwe een aantal experimenten met betrekking tot de fosfaatverwijdering op de rioolwaterzuiveringsinstallaties te Elburg en te Harderwijk uitgevoerd.

In dit verband zijn te noemen:

1. Simultaan-precipitatie met behulp van 41 gew.% ijzerchloride te Elburg; gepubliceerd in het tijdschrift '*H₂O*' van 27 april 1973, nummer 9.
2. Post-precipitatie, eveneens met 41 gew.% FeCl₃ in een pilot plant te Harderwijk; gepubliceerd in '*H₂O*' van 22 november 1973, nr. 24.
3. Vergelijking van het effect van de precipitatie-middelen ijzerchloride, A.V.R., een Zweeds product, waarvan de actieve component aluminiumsulfaat

is en afvalbeitszuur van de Hoogovens op basis van tweewaardig ijzer.

4. Pre-precipitatie met A.V.R. op de zuiveringsinstallatie te Harderwijk.
5. Mutatie van de hoeveelheid droge stof en het volume surplus slib bij toepassing van het gemengde proces te Elburg, met als precipitatie-middel FeCl₃.

De resultaten van de onderzoeken onder 3 en 4 vermeld zullen binnenkort openbaar gemaakt worden.

Niet onvermeld mag blijven dat naast het RIZA ook andere instanties onderzoek op het gebied van de defosfatering verrichten. Met name door het Hoogheemraadschap van Rijnland zijn interessante proefnemingen gedaan.

Tenslotte zal aandacht worden geschonken aan het ontwerpen van een inrichting voor de fosfaatverwijdering uit afvalwater en aan de kosten die daarmee gemoeid zijn. Voor de behandeling van dit onderwerp — het zal duidelijk zijn dat onmogelijk alle denkbare gevallen aan de orde kunnen komen — zal een willekeurig voorbeeld dienen. De volgende veronderstellingen worden gedaan:

1. uit een fosfaatbalans is gebleken dat door fosfaatverwijdering uit het afvalwater een efficiënte bestrijding van het eutrofiëringsprobleem van het desbetreffende oppervlaktewater wordt verkregen;
2. het betreft een bestaande installatie voor 100.000 inwoners; in de installatie wordt alleen huishoudelijk afvalwater (100 l/inw. dag) en regenwater behandeld; de aeratieruimte is gedimensioneerd op 20 i.e. per m³;
3. de totale hoeveelheid fosfaat, die per inwoner per dag wordt aangevoerd bedraagt, na bezinken en decaneren 3,0 gram P*);
4. de voorzieningen voor fosfaatverwijdering dienen binnen korte tijd met relatief geringe investeringskosten te worden gerealiseerd;
5. vooronderzoek en een globale kostenvergelijking hebben uitgewezen, dat in dit geval de toepassing van het simultane proces de voorkeur heeft boven een pre-precipitatie;
6. in de oxydatief-biologische installatie vindt een fosfaatreductie van 40 % plaats;
7. er behoeft geen rekening te worden gehouden met uitbreiding van de installatie.

*) Deze waarde kan, gezien het eerder gegeven bemonsteringsresultaat (afb. 1) zeker niet als te hoog beschouwd worden.

Met bovenstaande randvoorwaarden als uitgangspunt is te becijferen dat dagelijks

$$\frac{100.000 \times 3,0}{1000} \times \frac{(100 - 40)}{100} = 180 \text{ kg P}$$

door precipitatie verwijderd dient te worden. De overige 120 kg wordt in het biologisch proces verbruikt. De jaarlijks benodigde hoeveelheid precipitatie middel kan worden vastgesteld aan de hand van de te verwijderen fosfaatvracht. Deze bedraagt $365 \times 180 = 65.700 \text{ kg P}$, d.i. ongeveer $200.000 \text{ kg PO}_4^{3+}$.

In tabel II staan een aantal chemicaliën die als vlokmiddel dienst kunnen doen en die in de handel verkrijgbaar zijn met bijbehorende kosten vermeld. De kosten hebben betrekking op levering franco midden-Nederland, excl. BTW. De aangegeven bedragen geven slechts een momentopname en kunnen van leverancier tot leverancier verschillend zijn. Voor elk ontwerp moet daarom bij verschillende toeleveringsbedrijven kostenopgaaf gevraagd worden. Hoe de ontwikkeling van de prijzen met de tijd zal zijn is moeilijk aan te geven. Door de chemicaliën-voorraad tanks en de doseerinstallatie niet te begrensd te ontwerpen kan de mogelijkheid worden ingebouwd in verband met prijsontwikkelingen op een later tijdstip een ander vlokmiddel toe te passen, dan waarvoor de installatie is opgezet. Wanneer deze handelwijze achteraf toch niet mogelijk blijkt kan men overwegen de gehele installatie voor de fosfaatverwijdering te vervangen zeker als de kosten, die uit de chemicaliëndosering voortvloeien in verhouding tot de geïnvesteerde bedragen erg hoog zijn. Voor het onderhavige ontwerp zal ijzerchloride in een 41 gew.% oplossing als precipitatie middel

worden gebruikt. Met dit middel werden bij het simultane proces te Elburg gunstige resultaten verkregen.

Het produkt wordt aangevoerd in 20-ton-tankwagens. Bij de opzet van de installatie zal zoveel flexibiliteit worden ingebouwd, dat ook afvalbeitszuur als vlokmiddel toegepast kan worden.

Hoewel het gebruik van dit produkt op de installatie te Elburg om praktische redenen, waarschijnlijk tengevolge van te geringe beluchtingstijd in eerste instantie niet mogelijk is gebleken, kan het beitszuur in ons geval, waar de beluchtingstijd in de aëratieruimte aanzienlijk langer is (5 uur bij d.w.a.) een gunstiger effect hebben.

Het prijsverschil tussen het ijzerchloride en het afvalbeitszuur is voldoende motivering voor de beslissing extra flexibiliteit in de defosfateringsinstallatie in te bouwen.

AVR leverde bij het simultane proces te Elburg minder gunstige resultaten op, terwijl kalk vanwege de hoge pH ongeschikt is.

Uit afb. 9 van het tweede rapport van het RIZA over het onderzoek inzake de fosfaatverwijdering uit afvalwater te Elburg en Harderwijk (H₂O), 27 april 1973, nummer 9) lezen we af, dat voor een fosfaatverwijdering van 95 % ten opzichte van het gehalte van het biologisch behandelde afvalwater een Fe (in grammen): P (in grammen) verhouding van circa 12 vereist is.

De vereiste Fe : P verhouding = 12, die onder Elburger omstandigheden werd gevonden is vanzelfsprekend een discutabele waarde. De PO_4^{3-} concentratie van het afvalwater lag te Elburg op een belangrijk lager niveau dan in dit voorbeeld (25 mg/l tegenover 92 mg/l PO_4^{3-}). Wat de invloed van dit verschil in concentratie op de

Fe : P verhouding is valt moeilijk te voorspellen. Het impliceert wel dat de te gebruiken Fe : P verhouding onder praktijkomstandigheden gecontroleerd en zo nodig aangepast zal moeten worden. Het is niet uitgesloten, dat voor de genoemde concentraties een belangrijk gunstiger verhouding wordt verkregen dan voor het 'dunne' afvalwater te Elburg. De jaarlijks benodigde hoeveelheid ijzerchloride in 41 gew.% oplossing bedraagt bij een Fe : P verhouding = 12 : 65.700 x

$$12 \times \frac{162,21 \text{ (mol. gew. FeCl}_3\text{)}}{55,85 \text{ (at. gew. Fe)}} \times \frac{100}{41 \text{ (gew.\%)}} \times \frac{1}{1000} = 5585 \text{ ton.}$$

De kosten voor het precipitatie middel FeCl_3 41 gew.% bedragen per jaar: $5.585 \times f 23,90 = f 1.334.800,-$ excl. BTW, of met inbegrip van 16 % BTW $f 1.548.400,-$ dat is circa $f 15,50$ per inwoner!

Onder de hiervoor geschetste omstandigheden zal het effluent van de zuiveringsinstallatie bij droogweerafvoer een concentratie van:

$$\frac{3 \text{ (gP/inw. d.)}}{100 \text{ (l/inw. d.)}} \times \frac{(100 - 40)}{100} \times \frac{(100 - 95)}{100} \times \frac{95 \text{ (mol. gew. PO}_4\text{)}}{31 \text{ (at. gew. P)}} \times 1000 = 2,7 \text{ mg PO}_4\text{/l}$$

bevatten. Wanneer regenwater via de installatie wordt afgevoerd zal deze waarde evenredig met de afgevoerde hoeveelheid regenwater afnemen. Eén en ander betekent

$$\text{dat jaarlijks toch nog } \frac{(100 - 95)}{100} \times$$

$65.700 = 3.285 \text{ kg P} =$ ongeveer 10.00 kg PO_4^{3-} naar het oppervlaktewater zal worden afgevoerd. Ten opzichte van het op de zuiveringsinstallatie aankomende afvalwater, dat bij droogweerafvoer na bezinken en decanteren een fosfaatgehalte van

$$\frac{3}{100} \times \frac{95}{31} \times 100 = 92 \text{ mg/l}$$

heeft wordt een overall reductie van ongeveer 97 % verkregen. Een deskundige op het gebied van de eutrofiëring zal moeten beoordelen of deze reductie acceptabel is, in de wetenschap, dat in dit hoge gebied van fosfaatverwijdering elk procent extra reductie aanzienlijke consequenties ten aanzien van de kosten heeft.

De volgende tabel (III) geeft een overzicht van de jaarlijkse kosten tengevolge van uitsluitend de chemicaliën, wanneer met hogere fosfaatconcentraties in het effluent van de zuiveringsinstallatie volstaan kan

TABEL II - Precipitatie middelen en kosten.

Precipitatie middel	Formule	Fase	kg produkt kg Fe of kg Al	Guidens per 100 kg, incl. vrachtprijs, excl. B.T.W. per maart 1974
Ferrichloride	$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Vast	4,840	75,-
Ferrichloride (in oplossing)	FeCl_3	Vloeibaar 41gew%	7,084	23,90
Ferrisulfaat	is praktisch niet leverbaar			
Ferri-Floc	*	Vast	—	20,80
Ferrosulfaat	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Vast	4,978	12,50
Afvalbeits Hoogovens	FeCl_2	Vloeibaar 25gew%	9,079	1,75
Aluminiumsulfaat	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$	Vast	12,350	25,50
A(vfall) V(atten) R(ening)	**	Vast	—	18,70
Kalk	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	Vast	—	12,50

* Bevat volgens de leverancier 5,4 % Fe^{3+} en 4,2 % Al^{3+}

** Bevat volgens de leverancier: 7-8 % Al^{3+} en 32-1,4 % Fe^{3+}

TABEL III - Jaarlijkse kosten tengevolge van FeCl_3 , 41 gew.%-dosering in relatie tot de mate van fosfaatreductie.

Fosfaatconcentratie effluent bij d.w.a. mg/l PO_4^{3-}	Fosfaat effluent (afgerond) kg/jaar PO_4^{3-}	Percentage reductie t.o.v.		Fe:P (biologisch behandeld afvalwater) g/g	FeCl_3 41 gew.% ton/jaar	Kosten incl. 16% BW. en vrachtprijs gulden/jaar
		onbehandeld afvalwater %	biologisch behandeld afvalwater %			
2,7	10.000	97	95	12	5985	1.548.400
5,5	20.000	94	90	95	4421	1.225.700
6,3	30.000	91	85	75	3491	967.800
11,0	40.000	88	80	6	2793	774.300
13,8	50.000	85	75	5	2327	645.100
16,5	60.000	82	70	4	1862	516.200
19,3	70.000	79	65	35	1629	451.800
22,1	80.000	76	60	3	1396	386.000
24,8	90.000	73	55	25	1164	322.700
27,5	100.000	70	50	2	931	258.100

worden. Bij gebrek aan betrouwbaarder getallen is ook voor het opstellen van deze tabel van de eerdergenoemde afb. uit het tijdschrift 'H₂O' van 27 april 1973 gebruik gemaakt.

Wanneer in de praktijk zou blijken dat het gebruik van afvalbeitszuur gunstige resultaten oplevert zijn hoeveelheden nodig, die 1,2 — 1,7 x de opgegeven aantallen tonnen ijzerchloride bedragen, of 1,5 — 2,0 x het vereiste aantal m³ FeCl_3 , 41 gew.%.

De kosten zijn $\frac{1}{10}$ deel van die voor het

ijzerchloride.

Uiterekend was een benodigde hoeveelheid van 5.585.000 kg FeCl_3 , 41 gew.% per jaar. Dit betekent, dat dagelijks 15.300 kg ijzerchloride nodig is, of bij een gelijkmatige verdeling over het etmaal $15.300 : 24 = 638$ kg ijzerchloride per uur. De beide laatstgenoemde waarden komen overeen met 10.640 liter ijzerchloride per etmaal, respectievelijk 443 liter per uur. Op het terrein van de rioolwaterzuiveringsinstallatie zullen twee kunststofftanks van elk 37,5 m³ geplaatst worden; aangenomen is, dat de beluchtingsunit (500 m³) in twee straten wordt uitgevoerd.

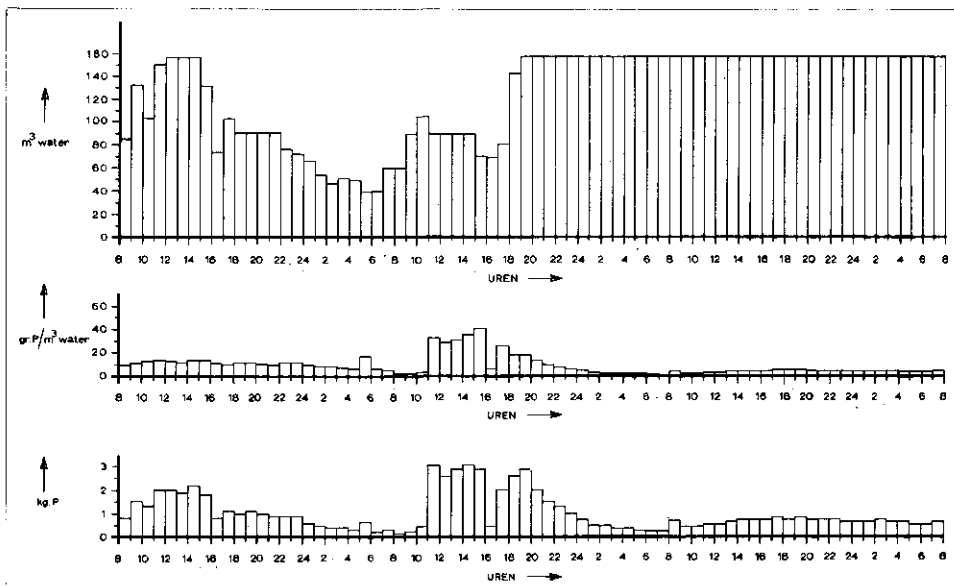
De totale tankinhoud van 75 m³ (= 108 ton) is voldoende voor 7 dagen doseren.

Voorgesteld wordt per tank doseerapparatuur te installeren tot een capaciteit, die tweemaal de theoretische berekende dosis ijzerchloride per uur bedraagt. Dit impliceert, dat maximaal $2 \times 443 = \approx 900$ liter ijzerchloride per uur aan de beide beluchtingsstraten kan worden toegevoegd. Per chemicaliëntank wordt een doseerpomp met een maximale capaciteit van 450 liter per uur opgesteld. Het wordt niet nodig geacht deze apparatuur in tweevoud uit te voeren; volstaan kan worden met het in reserve houden van de belangrijkste onderdelen van de pomp.

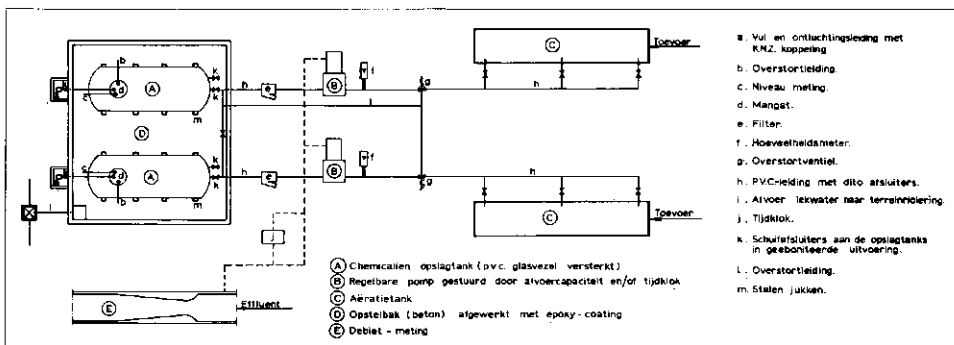
De dosering van het precipitatie middel moet in theorie op elk ogenblik door de

afgevoerde waterhoeveelheid en de fosfaatconcentratie geregeld worden. Afb. 6 geeft arbitrair een indruk van de schommeling van de waterhoeveelheid en de variatie in de fosfaatconcentratie gedurende de uren van een aantal dagen. De afbeelding, die alleen ter illustratie wordt getoond, is samengesteld uit bemonsteringsresultaten van het eerdergenoemde onderzoek op een

Afb. 6 - Variatie waterhoeveelheid en fosfaatgehalte op een zuiveringsinstallatie voor huishoudelijk afvalwater.



Afb. 7 - Inrichting voor fosfaatverwijdering op een rioolwaterzuiveringsinstallatie.



rioolwaterzuiveringsinstallatie waar voornamelijk huishoudelijk afvalwater wordt behandeld. Het aantal inwoners, dat op deze installatie is aangesloten, bedraagt ca. 7000 zodat een directe vergelijking met het onderhavige voorbeeld mank gaat. Tengevolge van het grote inwoneraantal (100.000) kan een geringere fluctuatie verwacht worden. De figuren uit afb. 6 illustreren wel de noodzaak om in het algemeen de dosering te koppelen aan de waterhoeveelheid en aan het fosfaatgehalte. Bij gebrek aan een in de praktijk betrouwbaar gebleken sensor voor de registratie van het gehalte fosfaat in het afvalwater kan deze situatie momenteel niet gerealiseerd worden. Wel kan de capaciteit van de doseerpompen door de waterhoeveelheid geregeld worden, maar deze éézijdige regeling zal in vele gevallen niet kunnen voldoen. Met de wetenschap, dat een ideale dosering slechts kan worden nagestreefd worden de volgende aanbevelingen gedaan: installeer een regelbare doseerpomp, die gekoppeld kan worden aan de afgevoerde waterhoeveelheden, en daarnaast aan een

tijdperk. Men heeft dan na het in bedrijf stellen van de rioolwaterzuiveringsinstallatie de mogelijkheid aan de hand van de resultaten van een dan te verrichten be- monstering de dosering van het precipitatie- middel zo goed mogelijk aan de fosfaatvracht aan te passen.

In dat geval dient er wel rekening mee te worden gehouden, dat de afgevoerde hoe- veelheden neerslag op zich weinig tot een verhoging van de fosfaatvracht bijdragen — het fosfaatgehalte neemt evenredig met de watertoevoer af —, doch dat het toch niet uitgesloten is, dat tengevolge van de door- spoeling van de riolen een toeneming van de fosfaatvracht wordt vastgesteld. In afb. 7 is het hierboven behandelde voorbeeld nader uitgewerkt. Het is raad- zaam de doseerpompen op de hoogte van de centrale as van de voorraadtanks te plaatsen; hiermee beperkt men afwijkingen in de dosis verpompt vlokmiddel als gevolg van veranderingen in het vloeistofniveau in de voorraadtanks. De kosten voor de ontworpen installatie worden op f 103.000,— geraamd, dat is ca. f 1,— per inwoner, excl. kosten voor de fundering, elektrische aansluitkosten en honoraria. Hoewel van niet te onderschatten betekenis wordt hier aan het slibvraagstuk voorbijgegaan. Bij het ontwerpen van rioolwaterzuiverings- installaties zal men er ongetwijfeld over dienen na te denken, welke consequenties de defosfatering voor de slibbehandeling, en voor de uiteindelijke bestemming van het behandelde slib heeft. Het niet tijdig onderkennen van een ogenschijnlijk minder belangrijk detail, zoals b.v. vergroting van de capaciteit van slibpompen kan na de ingebruikneming van de zuiveringsinstallatie veel problemen opleveren.

Hopelijk is in het voorgaande duidelijk geworden, dat de verwijdering van fosfaat uit het afvalwater niet zozeer een technisch probleem meer is. Wel is de vraag ge- bleven, of de defosfatering, die hoge kosten vergt, werkelijk in alle gevallen waar de bouw van een installatie voor de fosfaat- verwijdering wordt overwogen het effect zal sorteren dat men ervan verwacht. In dit verband zij er nogmaals op gewezen dat indien beperking van fosfaatlozing bij de bron een reële mogelijkheid is — te denken is aan centrale waterontharding en fosfaat vervangende produkten in wasmiddelen — men dit in de beschouwingen omtrent het eutrofiëeringsvraagstuk moet opnemen.

Voor de geïnteresseerde lezer is in het navolgende tot besluit een lijst van publicaties over het eutrofiëeringsvraagstuk en de techniek van de fosfaatverwijdering uit afvalwater opgenomen.

Literatuur

- Vollenweider, R. A. *Scientific fundamentals of the eutrophication of lakes and flowing waters with particular reference to nitrogen and phosphorus as factors in eutrophication*. Organization for Economic Cooperation and Development, Directorate for Scientific Affairs, Paris, DAS/CSI/68,27, 1968.
- Ambühl, H. *Der Einfluss chemischer Düngung auf Stehende Oberflächengewässer*. 'Das Gas- und Wasserfach', (107) 1966, Heft 14.
- Leentvaar, Drs. P. *Het probleem van de eutrofiëring*. H₂O (3) 1970, nr. 5.
- Golterman, Dr. H. L. *Mogelijke gevolgen van de fosfaat eutrofiëring van het oppervlaktewater*. H₂O (3) 1970, nr. 10.
- Golterman, Dr. H. L. *Eutrofië van het oppervlakte- water*. De Ingenieur (82) 1970, nr. 46.
- Lijklema, Dr. L. *Wasmiddelen en eutrofiëring*. H₂O (5) 1972, nr. 7.
- Adam, W. E. *Die Bedeutung der Polyphosphate in Waschmitteln*. 'Dat Gas- und Wasserfach' (115) 1974, Heft 1.
- Van der Mark, Drs. H. en Peelen, Drs. R. *Oriënterend onderzoek naar het voorkomen van eutrofiëring van het toekomstige Zeeuwse Meer*. H₂O (5) 1972, nr. 19.
- Golterman, Dr. H. L. *De invloed van fosfaat op het aquatisch milieu*. H₂O (6) 1973, nr. 17.
- Bayley, R. W. *Nitrogen and phosphorus removal: methods and cost*. Water Treatment and Examination, 1970, vol. 19.
- Shindala, A. *Nitrogen and phosphorus removal from wastewaters*. *Water and Sewage Works*, Part I, June 1972; Part II, July 1972.
- Köhler, Chem.-ing. R. *Beitrag zur Phosphat- elimination durch das Belebtschlammverfahren*. *Wasser, Luft und Betrieb* (13), Mai 1969, Heft 5.
- Jones, P. H. *Treatment in municipal plants*. *Innovations for removal of phosphorus*. For presentation at the Regional Conference International Association on Water Pollution Research, London, England, April 1972.
- Levin, G. V.; Topol, G. J.; Tarnay, A. G. and Samworth, R. B. *Pilot-plant tests of a phosphate removal process*. *Journal WPCF*, October 1972, vol. 44, no. 10.
- Buzzell, J. C. and Sawyer, C. N. *Removal of algal nutrients from raw waste water with lime*. *Journal WPCF*, 1967, vol. 39, no. 10.
- Schippers, Ir. J. C. *De toepassing van ferrosulfaat als coagulatiemiddel zonder oxidatie met chloor*. H₂O (4) 1971, nr. 14.
- Jenkins, D.; Ferguson, J. F. and Menar, A. B. *Chemical processes for phosphate removal*. *Water Research Pergamon Press* 1971, vol. 5, pp. 369-389.
- Leckie, J. O. and Stumm, W. *Phosphate Precipitation*. Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- Pöpel, J. *Die phosphatenentfernung als dritte Stufe der Abwasserreinigung*. H₂O (3) 1970, nr. 17.
- Program on evaluation of eutrophication control*. Report of the expert group on treatment processes. Organisation for economic cooperation and development, Environment Directorate, Paris 1972. NR/ENV/72.24 (Restricted).
- Albertson, E. en Sherwood, R. J. *Removing phosphates from waste water*. *Industrial Water Engineering*, nov. 1967.
- Albertson, E. en Sherwood, R. J. *Phosphate Extraction Proces*. *Journal WPCF*, August 1969, vol. 41, no. 8.
- Thomas, E. A. *Die Phosphat-Hypertrophie der Gewässer*. *Chemisch Weekblad* (63) 1967, no. 26.
- Thomas, E. A. *Die Elimination der Phosphor- verbindungen aus dem Abwasser*. *Europäische Abwassersymposium* 1969, München.
- Thomas, E. A. en Rai, H. *Betriebserfahrungen mit Phosphatelimination bei 10 kommunalen Klär-*

- anlagen im Kanton Zürich*, 1969. *Gas- Wasser- Abwasser* (50) 1970, nr. 7.
- Leumann, P. *Die Phosphatfällung im kommunalen Abwasser nach dem Simultanverfahren, Ihre Anwendung in der Schweiz*. *GWF-Wasser/ Abwasser* (114), 1973, Heft 6.
- Wuhrmann, R. *Stickstoff- und Phosphor-Elimination*. *Ergebnisse von Versuchen in technischem Masstab*. Eidg. Techn. Hochschule Zürich, Fortbildungskurs der EAWAG 1964.
- Wuhrmann, R. *Probleme der dritten Reinigungs- stufe von Abwässern*. *Föderation Europäischer Gewässerschutz*. *Informationsblatt* nr. 14, Mai 1967.
- Huber, L. *Praktische Erfahrungen bei Anlagen zur Phosphatelimination*. *Wasser- und Abwasser- Forschung*, nr. 3, 1968.
- Henrikson, S. *Chemical purification of waste water and sludge treatment in connection with a waste incineration plant*. *Europäische Abwasser- symposium* 1969, München.
- Ulmgren, Dr. L. *Swedish experiences in sewage treatment*. 'Waste water treatment in cold climates', Canada, 22/24-8-1973.
- Ulmgren, Dr. L. *Residual phosphorus content in sewage water after chemical treatment*. *The Water Protection Division of The Swedish National Environment Protection Board*, Solna, 7-5-1973.
- Bart, E. F.; Jackson, B. N.; Lewis, R. R.; Brenner, R. C. *Phosphorus removal from waste water by direct dosing of aluminate to a trickling filter*. *Journal WPCF* (41), 1969, 11.
- Derrington, R. E.; Stevens, D. H.; Laughlin, J. E. *Enhancing trickling filter plant performance by chemical precipitation*. Prepared for office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, Washington DC. EPA-670/2-73-060 July, 1973.
- Schuster, Dipl.-Biol. G. en Heine, Dr. Ing. A. *Das Verfahren der chemischen Fällung zur Elimination der Phosphorverbindungen aus häuslichem Abwasser*. *Mitteilungen des Institutes für Wasserwirtschaft*, Berlin DDR, 1973, Heft 38.
- Dirkzwager, Ir. A. H. en Karper, Ir. R. *Fosfaat- verwijdering uit afvalwater*. H₂O (4) 1971, nr. 4.
- Karper, Ir. R. en Dirkzwager, Ir. A. H. *Onderzoek inzake fosfaatverwijdering uit afvalwater te Elburg en Harderwijk*. *Rapporten van het Rijksinstituut voor Zuivering van Afvalwater*. Rapport no. 1, H₂O (6) 1973, nr. 5; Rapport no. 2, H₂O (6) 1973, nr. 9; Rapport no. 3, H₂O (6) 1973, nr. 24.