

De toepassing van kunststofvulmaterialen in hoogbelaste oxydatiebedden

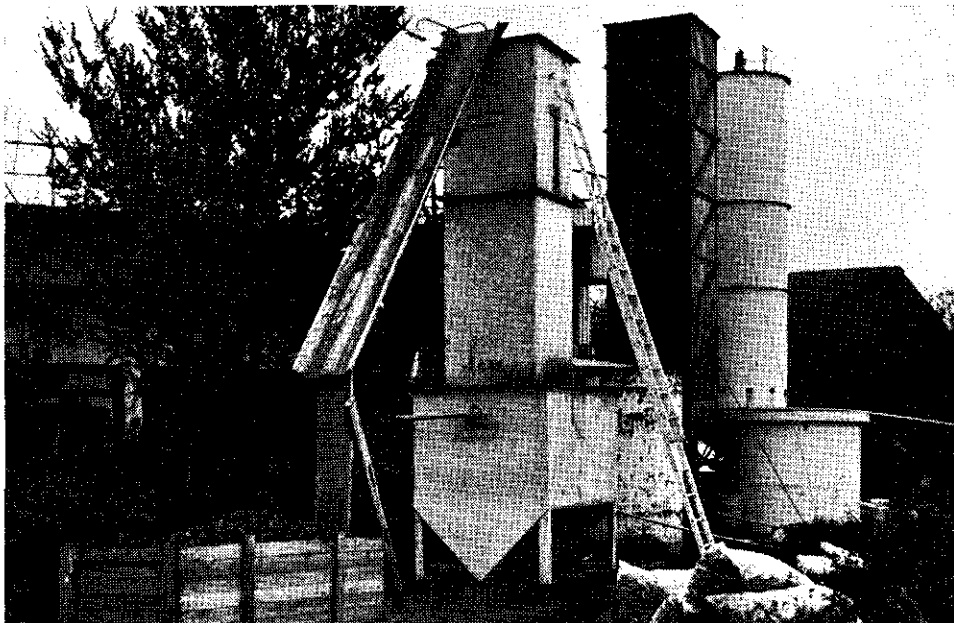
1. Inleiding

In het ontwerp van de rioolwaterzuiveringsinrichting Terwolde, gemeente Voorst, is gekozen voor een tweetraps biologisch zuiveringstelsel.

Als eerste trap is een oxydatiebed gepland; als tweede trap een aktiefslibinstallatie.

Als vulmateriaal voor het — hoogbelaste — oxydatiebed kan naast de bijna traditionele lavasteen, ook kunststofmateriaal worden overwogen.

Door het grote specifieke oppervlak van deze materialen en het grote volume aan



De drie proefinstallaties.



IR. J. H. J. M. VAN DER GRAAF

Witteveen + Bos, raadgevend ingenieursbureau, Deventer



IR. P. P. C. M. LAURIJSENS

Witteveen + Bos, raadgevend ingenieursbureau, Deventer



IR. K. VISSCHER

Zuiveringsschap Veluwe, Apeldoorn

holle ruimte kunnen aanzienlijk hogere biologische belastingen worden toegepast dan bij oxydatiebedden die gevuld zijn met lavastenen. De relatief hoge prijs per volume-eenheid kan worden gecompenseerd door het kleiner benodigde volume en de eenvoudige omhullingsconstructie.

Sinds ca. 20 jaar zijn vooral in de Verenigde

Staten en Engeland kunststofmaterialen voor oxydatiebedden ontwikkeld en met succes toegepast, vooral voor deelzuivering van gekoncentreerd industrieel en huishoudelijk afvalwater.

Fundamentele onderzoeken naar de prestaties van oxydatiebedden met kunststofvulling en ter vergelijking van verschillende vulmaterialen zijn uitgevoerd in Engeland [1] en West-Duitsland [2].

Informatie over bedrijfsresultaten komt veelal van buitenlandse installaties welke bovendien vaak zeer specifiek industrieel afvalwater behandelen.

In Nederland is de toepassing in de praktijk vooralsnog van beperkte omvang (o.a. bij ICI Rozenburg).

Gezien de geringe Nederlandse praktijkervaring met deze kunststofmaterialen is het, zeker in het geval van de toepassing

voor een specifiek afvalwater, nuttig om, naast een bestudering van de relevante literatuur, door praktijkproeven aanvullende gegevens te verkrijgen aangaande de toepassingsmogelijkheden.

In dit geval is gedurende zes maanden een praktijkproef uitgevoerd met een drietal proefinstallaties, elk gevuld met een ander type kunststofmateriaal.

De doelstelling en de opzet van de proef was niet zozeer het doen van een fundamenteel vergelijkend onderzoek tussen de verschillende materialen als wel het verkrijgen van een beter inzicht in het zuiveringsrendement bij zeer hoge belastingen en onder de specifieke bedrijfscondities. De conclusies gelden dan ook slechts voor het onderzochte afvalwater, dat duidelijk afwijkt van normaal huishoudelijk afvalwater.

In dit artikel wordt een algemene beschouwing gegeven over kunststofvulmateriaal met verwijzingen naar de relevante literatuur. Vervolgens wordt een beschrijving gegeven van de praktijkproef daarna volgen de belangrijkste resultaten en conclusies.

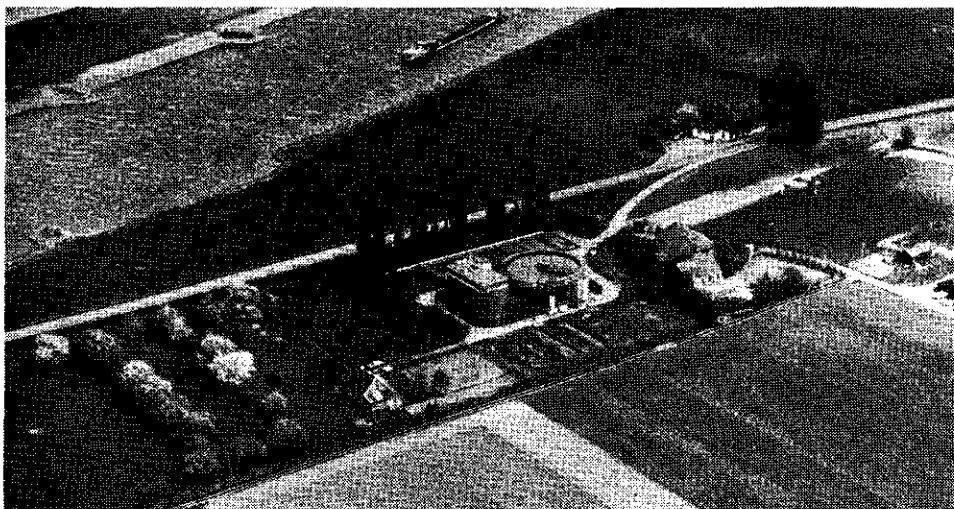
2. Algemene beschouwing

2.1. Oxydatiebedden

Bij een konventioneel oxydatiebed wordt het te behandelen afvalwater versproeid over een filterbed dat bestaat uit een vulmateriaal op een geperforeerde vloer. Als vulmateriaal dienen meestal steenbrokken of lavaslakken.

Op het vulmateriaal zet zich een biologische huid af, waarin zich o.a. aërobe bacteriën en protozoën bevinden. Deze organismen zorgen voor de opname en de afbraak van

RWZI Terwolde.



de organische bestanddelen in het afvalwater.

Afhankelijk van de hoeveelheid organisch materiaal dat per volume-eenheid op het bed wordt toegelaten, wordt gesproken van biologisch laag- of hoogbelaste bedden. De biologische belasting B wordt uitgedrukt als $\text{kg BZV/m}^3 \cdot \text{d}$. Als maat voor de hydraulische belasting wordt in Nederland veelal de oppervlaktebelasting Q_0 gehanteerd; dit is het debiet per m^2 geprojecteerd oppervlak ($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$). Een te lage hydraulische belasting kan verstoppingen veroorzaken; bij een te hoge hydraulische belasting kan de biologische huid van het vulmateriaal af worden gespoeld. Ook wordt wel in plaats van hydraulische belasting de term spoelwerking gehanteerd.

De hydraulische belasting kan worden verhoogd door recirkulatie van effluent.

In tabel I zijn de voornaamste kenmerken vermeld voor konventionele oxydatiebedden [3].

De brokken — in Nederland wordt veelal lavasteen gebruikt — hebben afmetingen van 4 - 8 cm. Het specifiek oppervlak S bedraagt bij deze afmetingen ca. 80 m^2 per m^3 .

Deze grootte is belangrijk omdat het een maat is voor het beschikbare reactieoppervlak van de biologische huid.

Worden kleinere brokken toegepast, bijv. met afmetingen van 2,5 tot 4 cm, dan loopt het specifieke oppervlak S op tot ca. $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$; dit heeft een gunstig effect op het zuiveringsrendement. Het volume aan holle ruimte is bij deze afmetingen echter zo klein, dat het oxydatiebed snel kan verstopten met losgelaten huiddeeltjes, ook wel humusslib genoemd. Dit verstoppingsgevaar is er oorzaak van dat in de praktijk voor normaal huishoudelijk afvalwater brokken van 4 tot 8 cm worden toegepast.

Bij de toepassing van de nieuwe kunststofvulmaterialen is het bovengenoemde effect niet aanwezig. De kunststofvulmaterialen bezitten namelijk naast het grote specifieke oppervlak ook een groot volume aan holle ruimte, zodat minder gevaar voor verstoppingen bestaat.

Door het grotere specifieke oppervlak van kunststofvulmaterialen dan dat van de traditionele lavastenen worden hogere biologische belastingen mogelijk ($1 - 6 \text{ kg BZV/m}^3 \cdot \text{d}$).

2.2. Kunststofvulmaterialen

Chipperfield [4] geeft een aantal eisen

waaraan een ideaal kunststofvulmateriaal moet voldoen:

1. het materiaal moet biologisch inert en chemisch stabiel zijn;
2. de voeding moet gelijkmatig over het oppervlak kunnen worden verdeeld;
3. het materiaal moet voldoende sterk zijn om het eigen gewicht en het gewicht van de bovenliggende lagen te dragen, tezamen met het gewicht van de biomassa;
4. de vloeistof moet in een zo dun mogelijke film over de biomassa, die zich op het oppervlak ontwikkelt, kunnen vloeien om een goede zuurstofoverdracht mogelijk te maken;
5. er moet steeds voldoende holle ruimte aanwezig zijn om een goede luchttoevoer naar de vloeistoffilm mogelijk te maken;
6. de behandelde vloeistof met losgelaten biologische huiddeeltjes moet ongehinderd naar beneden kunnen worden afgevoerd;
7. de toepassing moet in economisch opzicht concurrerend zijn met een oxydatiebed dat gevuld is met een traditioneel materiaal.

Ten aanzien van enkele punten kunnen nog de volgende opmerkingen worden gemaakt:

ad 1. Polypropyleen en polyvinylchloride lijken vooralsnog het meest in aanmerking te komen. Polystyreen is, ondanks de geringe kosten en het lage gewicht, minder geschikt vanwege de geringe sterkte en de beperkte chemische weerstand.

ad 2. Het eigen gewicht van de kunststofvulmaterialen bedraagt 25 à 50 kg/m^3 tegen 1.500 kg/m^3 voor de lavaslakken. Het eigen gewicht tijdens bedrijf, dus inclusief biologische massa en vloeistoffilm bedraagt 250 à 400 kg/m^3 voor de kunststofvulmaterialen en ca. 2.000 kg/m^3 voor de lavaslakken. Het geringe eigen gewicht van de kunststofvulmaterialen maakt een eenvoudige ondersteuningsconstructie mogelijk.

ad 5. Het grote voordeel van de kunststofvulmaterialen ten opzichte van de traditionele steenbrokken of lavaslakken is dat een groot specifiek oppervlak (tot $230 \text{ m}^2/\text{m}^3$) gepaard gaat met een zeer groot volume aan holle ruimte ($90 - 98 \%$).

ad 6. Veel kunststofvulmaterialen hebben een plaat- of buisstructuur in verticale

richting; hierdoor worden de losgelaten huiddeeltjes slechts in zeer geringe mate tegengehouden.

ad 7. De prijs van kunststofvulmaterialen per m^3 is aanzienlijk hoger (ca. $f 200,-/\text{m}^3$) dan van traditionele materialen (bijv. lavasteen ca. $f 70,-/\text{m}^3$). De hogere prijs per volume-eenheid moet worden afgeschat tegen de besparingen door het kleinere bouwvolume en de lichtere wand- en ondersteuningsconstructies.

Ten aanzien van de verschijningsvorm kunnen de kunststofvulmaterialen als volgt worden ingedeeld:

A. Losgestorte ringen van pvc of polypropyleen o.a. Biopac (afb. 1).

B. Pakketten van samengestelde of gegolfde platen o.a. Flocor, Surfpac, Plasdek (afb. 2).

C. Vullingen bestaande uit verticale buizen of doorgaande verticale reactievlakken, o.a. Cloisonyle, Bioprofiel, Honingraatstructuur (afb. 3 en 4).

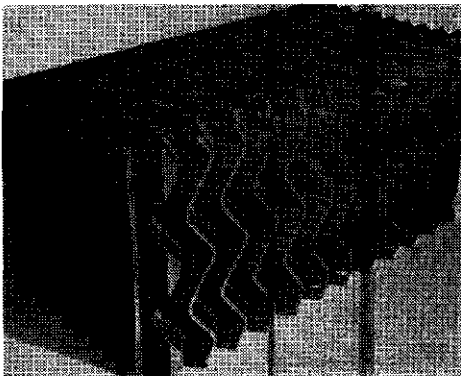
D. Tussenvormen zoals pakketten met verticale reactievlakken, o.a. Hydropak (afb. 5).

In tabel II zijn de voornaamste kenmerken van enkele kunststofvulmaterialen samengevat.

Afb. 1 - Losgestorte ringen, Biopac.



Afb. 2 - Pakket Flocor E.

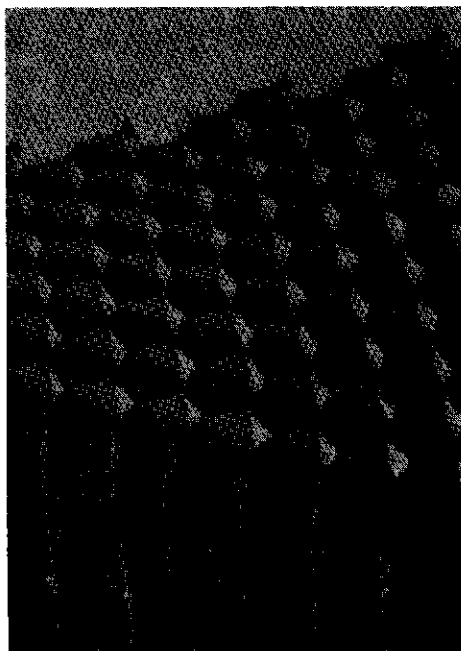


TABEL I - Gegevens van oxydatiebedden onder verschillende belasting.

	Belasting	Laag	Matig	Normaal	Hoog
B	$\text{kg BZV/m}^3 \cdot \text{d}$	$< 0,20$	$0,20 - 0,45$	$0,45 - 0,75$	$0,75 - 1,10$
Q_0	$\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$	$< 0,20$	$0,40 - 0,80$	$0,60 - 1,20$	$0,70 - 1,50$
η	$\%$	> 85	> 80	> 75	> 70



Afb. 3 - Cloisonyle (doorgaande verticale reaktievlakken).



Afb. 4 - Doorgaande reaktievlakken met honingraatstructuur.

TABEL II - Kenmerken van enkele kunststofvulmaterialen.

Handelsnaam	Materiaal	Specifiek oppervlak m ² /m ³	Holle ruimte	Eigen gewicht kg/m ³	Omschrijving vorm
Biopac 50	polypropyleen	130	91 %	55	holle ringen met kruisstructuur Ø 50 mm en Ø 90 mm
90		90	93 %	42	
Flocor E	pvc	85	98 %	ca. 39	pakketten 120 x 60 x 60 cm
Hydropak	pvc	200	> 90 %	30—50	opgerolde platen Ø 150 cm, hoog 135 cm
Plasdek	pvc	100—140	95 %	25	pakketten 120 x 60 x 60 cm
Cloisonyle	pvc	225	94 %		
Bioprofiel	pvc	135	95 %	10—25	geprofileerde platen lang 10 m, breed 50 cm
Surfpac	polystyreen	82—187	94 %		pakketten 120 x 60 x 60 cm

In het Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik [5] wordt ten aanzien van het voorkomen van verstoppingen achtereenvolgens de voorkeur gegeven aan:

1. doorgaande verticale reaktievlakken;
2. pakketten met een klein specifiek oppervlak;
3. pakketten met een groot specifiek oppervlak (> 120 m²/m³) en kleinere doorgangsoeningen;
4. losgestorte holle ringen van kunststof;
5. minerale brokken.

2.3. Zuiveringsrendement

Het zuiveringsrendement van een aktief-slibinstallatie is afhankelijk van de slibbelasting, dat wil zeggen van de verhouding tussen dagelijks aangevoerde voedingsstoffen en de slibmassa.

Bij oxydatiebedden, waar de slibmassa zich als een biologische huid heeft afgezet op het vulmateriaal, is het totaal aan oppervlak van die huid bepalend voor de werk-



Afb. 5 - Bovenaanzicht pakketten Hydropak.

zaamheid van die hoeveelheid biomassa. De dikte van de huid is in mindere mate bepalend voor de zuiverende werking. In formule uitgedrukt laat het zuiveringsproces zich volgens Bruce [1] als volgt beschrijven:

$$b_e = b_0 e^{-k \cdot S/A} \tag{1}$$

waarin:
 b_e = BZV-koncentratie van het effluent in mg/l;

b₀ = BZV-koncentratie van de voeding in mg/l;
 k = groeikonstante, afhankelijk van de temperatuur;
 S = specifiek oppervlak van het vulmateriaal in m²/m³;
 A = ruimtelijke belasting in m³/m³ . d.

Het zuiveringsrendement uitgedrukt in percentages is nu:

$$\eta = \frac{b_0 - b_e}{b_0} \times 100 \tag{2}$$

Direkt is uit de formule (1) af te lezen dat het zuiveringsrendement evenredig is met het specifieke oppervlak, maar niet lineair. Ook volgt uit de formule dat bij een groter specifiek oppervlak S de ruimtelijke belasting A kan worden vergroot zonder dat het zuiveringsrendement η afneemt. Bij een vulmateriaal van brokken kan het specifieke oppervlak worden vergroot door toepassing van kleinere afmetingen; hierdoor zou dus ook een hogere ruimtelijke belasting kunnen worden toegepast, ware het niet dat bij kleinere brokken snel verstoppingen optreden.

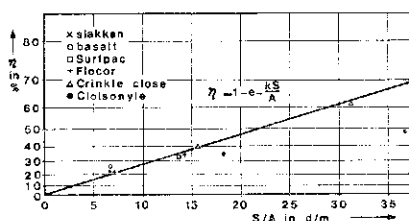
Bij de kunststofmaterialen daarentegen kunnen vanwege het grote specifieke oppervlak en het grote volume aan holle ruimte hoge belastingen worden toegepast zonder dat verstoppingen optreden.

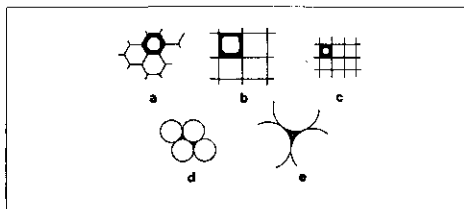
Hierin ligt het grote voordeel van kunststofvulmaterialen ten opzichte van traditionele vulmaterialen.

Een vergelijkend onderzoek te Stevenage [1] bevestigt in grote lijnen bovenstaande; zes vulmaterialen, 2 minerale brokken- en 4 kunststofvulmaterialen werden beproefd bij verschillende biologische en hydraulische belastingen. Afb. 6 geeft een beeld van de resultaten.

Uit de resultaten blijkt ook dat tenminste één filtermateriaal, Cloisonyle, niet aan de algemene formule voldeed. Een oorzaak zou kunnen zijn dat dit materiaal alleen verticale reaktievlakken bezit. Bij de andere materialen lijkt de geometrische vorm weinig invloed te hebben en speelt alleen de grootheid S/A een belangrijke rol.

Afb. 6 - Verband tussen het BZV-zuiveringsrendement η en de grootheid S/A; S is het specifieke oppervlak en A de ruimtelijke belasting; oorsprong: proefnemingen te Stevenage [1].





Afb. 7 - Werkzaam oppervlak bij verschillende geometrische vormen van reaktievlakken [6].

Een andere verklaring voor de afwijking van Cloisonyle zou kunnen zijn, dat na een inwerkperiode niet meer het volledige specifieke oppervlak ter beschikking staat van het langstromende afvalwater; anders gezegd na een inwerkperiode is het werkbare specifieke oppervlak kleiner dan het theoretische, berekende oppervlak.

Born [5] heeft dit uitgewerkt voor een aantal mogelijke geometrische vormen.

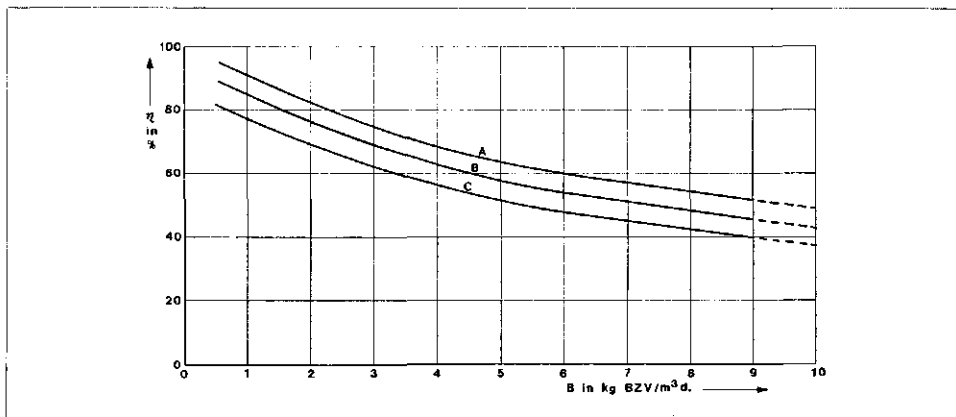
Hij stelt, dat scherpe hoeken tussen de reaktievlakken moeten worden vermeden; een honingraatstructuur zou ideaal zijn. In afb. 7 is weergegeven hoe bij verschillende geometrische vormen het reaktieoppervlak na verloop van tijd minder kan worden.

Wordt bovenstaande theorie toegepast op de gevonden waarden voor Cloisonyle (in afb. 6) dan is bij het gemeten zuiveringsresultaat slechts 60 tot 80 % van het theoretische specifieke oppervlak werkzaam. Dit zou ongeveer overeenkomen met de situatie in afb. 7d.

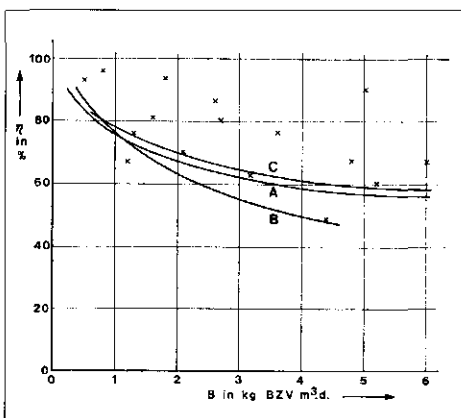
Voor een praktische toepassing van formule (1) en (2) zou dus een correctie op het specifieke oppervlak moeten worden ingevoerd. In de praktijk zal zeer moeilijk te bepalen zijn wat deze correctiefactor voor ieder vulmateriaal moet zijn. Temeer daar deze factor ook afhangt van de huiddikte en dus ook van diverse bedrijfsomstandigheden.

Voor de praktijk lijkt het meer bruikbaar om het zuiveringsrendement te relateren aan de biologische belasting B, in plaats van aan de grootte S/A. De biologische belasting geeft weer de hoeveelheid dagelijks aangevoerde voedingsstoffen per volume-eenheid van het oxydatiebed. Doordat in deze grootte geen rekening is gehouden met verschillen in het specifieke oppervlak kunnen bij dezelfde biologische belasting nog verschillende zuiveringsresultaten worden bereikt. Deze benadering lijkt echter bruikbaar voor een globale beschouwing van de werking van kunststofvulmaterialen (zie afb. 8).

De resultaten zijn verkregen uit een vergelijkend onderzoek bij het Ruhrverband [2]. De zuiveringsresultaten bij een bepaalde biologische belasting zijn hier aanzienlijk beter dan bij het onderzoek te Stevenage. Een verklaring hiervoor moet wellicht



Afb. 8 - Verband tussen het BZV-zuiveringsrendement η en de BZV-belasting B bij kunststofvulmaterialen; oorsprong: proeven van het Ruhrverband [2]. Verklaring: B geeft het gemiddelde verband aan, de spreiding in de waarnemingen wordt aangegeven door A en C.



Afb. 9 - Praktijkervaringen met Flocor [7]. Verklaring: A, B en C = diverse soorten afvalwater; kruisjes = resultaten met industrieel afvalwater.

worden gezocht in verschillen in bedrijfsomstandigheden (o.a. temperatuur) en de aard van het afvalwater.

In het algemeen kan bij een biologische belasting van 3 à 4 kg BZV/m³. d een zuiveringsrendement van 60 à 70 % worden verwacht. Een en ander is sterk afhankelijk van de aard en herkomst van het afvalwater, de temperatuur van het oxydatiebed en het specifieke oppervlak van het vulmateriaal.

Hoezeer de praktijkresultaten van oxydatiebedden met een kunststofvulmateriaal uiteen kunnen liggen illustreren de ervaringen met Flocor [7] zoals deze afgebeeld zijn in afb. 9.

Bovenstaande ervaringen geven tevens de beperkingen voor de toepassing van zeer hoogbelaste oxydatiebedden.

2.4. Hydraulische belasting

De hydraulische belasting van een oxydatiebed wordt vaak uitgedrukt als de oppervlaktebelasting Q_0 , dit is het debiet per m² geprojecteerd oppervlak; bij hoogbelaste

bedden varieert deze grootte tussen 0,7 en 1,5 m³/m². h.

De ondergrens wordt bepaald door de niet meer gelijkmatige verdeling van de vloeistoffilm over de biologische huid en het optreden van verstoppingen. De bovengrens wordt bepaald door een te hoge vloeistofsnelheid over de biologische huid, waardoor de biologische huid geheel of gedeeltelijk van het vulmateriaal wordt weggespoeld, hetgeen resulteert in een lager zuiveringsrendement.

Recirkulatie van het effluent wordt bij hoogbelaste installaties ondermeer toegepast om ook bij lage aanvoeren een optimale hydraulische belasting en spoelwerking te garanderen.

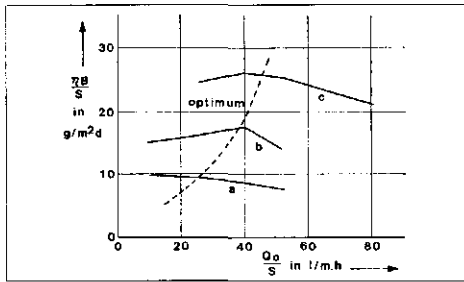
Hoewel het zuiveringsrendement per doorgang hierdoor lager kan zijn, wordt het totale zuiveringsrendement niet minder.

Bij kunststofvulmaterialen wordt door het toelaten van een zeer hoge biologische belasting (3 à 4 kg BZV/m³. d) veelal automatisch voldaan aan de minimum-eis voor een goede spoelwerking. Deze spoelwerking is sterk afhankelijk van de concentratie van het afvalwater en de hoogte van het oxydatiebed.

Praktijkervaringen met Flocor [7] geven een minimale spoelwerking van 1,5 m³/m². h. Hogere spoelsnelheden verhogen in het algemeen de efficiency niet. Recirkulatie is niet direct noodzakelijk, behoudens in enkele specifieke gevallen.

Deze ervaringen worden door onderzoeken bij het Ruhrverband [2] bevestigd. Bij een gelijkblijvende biologische belasting heeft variatie van de hydraulische belasting nauwelijks of geen invloed op het zuiveringsresultaat. Er werd slechts een zeer kleine verbetering waargenomen bij bepaalde spoelsnelheden (zie afb. 10). Recirkulatie is ook hier niet direct noodzakelijk.

Wordt bij traditionele vulmaterialen de hydraulische belasting uitgedrukt in



Afb. 10 - Invloed van de hydraulische belasting op het zuiveringsrendement; op de verticale as staat uitgezet de BZV-abraak per m² (= η · B/S); op de horizontale as de grootheid Q₀/S; a, b, c zijn afgeleid door bij verschillende bedrijfs-kondities alleen de hydraulische belasting (Q₀/S) te variëren [2].

m³/m² · h, voor een juiste waardering van de spoelwerking bij kunststofvulmaterialen zou theoretisch een korrektie moeten worden aangebracht om met de grote verschillen in specifiek oppervlak rekening te houden. Het beschikbare reactieoppervlak per doorsnede van het bed is hiervoor bepalend.

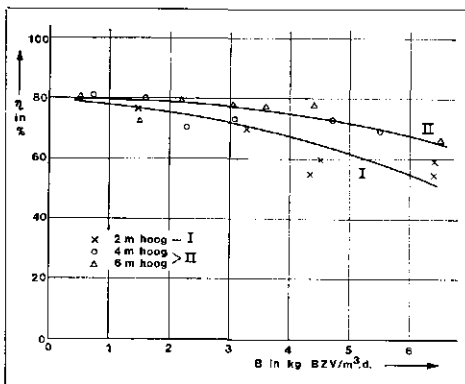
Bij vergelijking van verschillende vulmaterialen dient de spoelwerking nu te worden uitgedrukt als Q₀/S met de dimensie van m³/m² · h.

Gezien het feit dat bij een grote variatie van de spoelsnelheid het zuiveringsrendement weinig verandert, blijkt deze korrektie op de hydraulische belasting nauwelijks noodzakelijk te zijn, en behoeft hij alleen bij fundamentele vergelijkende studies te worden ingevoerd.

De hoogte van het bed heeft een direkte invloed op de hydraulische belasting Q₀. Het geringe eigen gewicht plus de hogere toelaatbare hydraulische belasting maken de toepassing van hogere bedden mogelijk. Hierdoor is minder grondoppervlak nodig. De hogere pompkosten kunnen wegvallen tegen het ontbreken van de noodzaak tot recirkulatie.

Bij onderzoeken in Frankrijk [8] is zeer expliciet de invloed van de hoogte van het

Afb. 11 - Invloed van de hoogte van het oxydatiebed (Cloisonyle) op het zuiveringsrendement; lijn I voor hoogte 2 m; lijn II voor hoogte 4 en 6 m [8].



oxydatiebed onderzocht; zowel bij een konstante biologische als hydraulische belasting. Het zuiveringsrendement bleek nauwelijks of niet te stijgen bij bedhoogten boven de drie meter (zie afb. 11). Bedhoogten van 6 tot 10 m zijn evenwel met sukses toegepast bij bepaalde industriële zuiveringsinstallaties [9].

2.5. Slibproductie

Wat betreft de slibproductie in oxydatiebedden met kunststofvulling lopen de gegevens uit de diverse onderzoeken sterk uiteen. Dit wordt voor een groot gedeelte veroorzaakt door de verschillen in de samenstelling van het afvalwater, vooral in het geval van industriële herkomst. Ook kan van invloed zijn of de verontreinigingen in opgeloste vorm dan wel in zwevende of colloïdale vorm aanwezig zijn.

De slibproductie g' wordt meestal uitgedrukt als specifieke slibproductie, namelijk in kg ds/kg BZV-verwijderd.

Bij laag en matig belaste oxydatiebedden is bij de zuivering van normaal huishoudelijk afvalwater de specifieke slibproductie 0,3 - 0,5 kg ds/kg BZV-verwijderd [1, 5].

In de slibproductie kunnen gedurende het jaar nog grote verschillen optreden.

Bruce [1] vond bij een laagbelast oxydatiebed een gemiddelde waarde van 0,22 kg ds/kg BZV-verwijderd met als hoogste waarde 0,5 in het voorjaar en de laagste 0,08 in de zomer.

Bij hoogbelaste oxydatiebedden worden over het algemeen hogere waarden opgegeven, te weten 0,7 kg ds/kg BZV-verwijderd in Duitsland [5] en 0,63 - 1,00 kg ds/kg BZV-verwijderd bij de proefnemingen in Stevenage [1]. Bij de laatste proefnemingen kwamen de hoogste waarden voor bij de hoogste slibbelasting; het organische gedeelte van het geproduceerde slib is hoog (ca. 80 %).

Op grond van de dagelijkse slibproductie en de slibinhoud in de oxydatiebedden kan een 'slibleeftijd' worden berekend die voor hoogbelaste oxydatiebedden ca. 1 à 3 dagen bedraagt.

2.6. Temperatuur

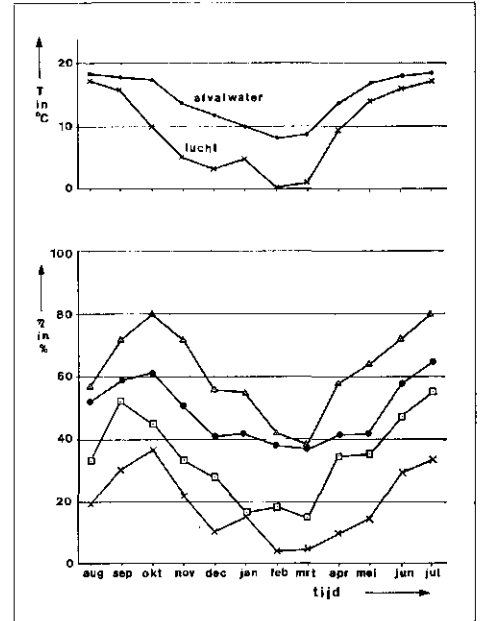
De werking van oxydatiebedden is sterk afhankelijk van de temperatuur van het oxydatiebed. Over het algemeen is de temperatuurinvloed groter dan bij het aktiefslibproces.

Ter beschrijving van de invloed van de temperatuur [12] wordt gebruik gemaakt van de volgende relatie voor de reactiesnelheidskonstante k uit formule (1):

$$k_T = k_{20} \cdot \alpha^{(T-20)} \quad (3)$$

waarin:

k_T = de reactiesnelheidskonstante bij temperatuur T;



Afb. 12 - Invloed van de temperatuur op het BZV-zuiveringsrendement van oxydatiebedden met kunststofvulmaterialen; oorsprong: proefnemingen te Stevenage [1].

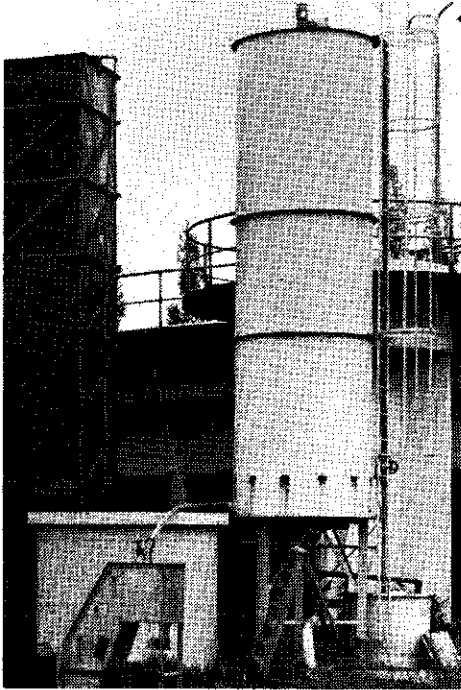
k₂₀ = de reactiesnelheidskonstante bij 20 °C;

α = de temperatuurcoëfficiënt.

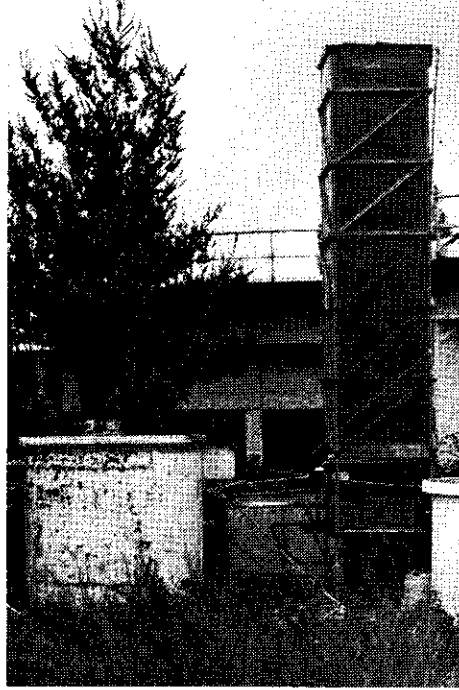
In het algemeen wordt als waarde van α voor oxydatiebedden 1.035 aangenomen, volgens onderzoek van Howland [12]. Hieruit volgt voor een hoogbelast oxydatiebed met zuiveringsrendement van 70 % bij 20 °C dat het zuiveringsrendement bij 10 °C terugloopt tot 58 %. Duitse ervaringen [5] bevestigen deze aannamen. Duidelijk afwijkend zijn de bevindingen bij de proefnemingen in Stevenage [1], zie afb. 12. Bij deze metingen komen resultaten voor van 80 % BZV-abraak in de zomer tot 40 % in de winter. Als waarde voor de temperatuurcoëfficiënt α is een gemiddelde van 1,21 berekend, hetgeen duidelijk hoger is dan de bovenvermelde waarde.

Bij oxydatiebedden wordt de temperatuur van de inhoud voor het belangrijkste deel bepaald door de temperatuur van het aankomende afvalwater [12]. Slechts bij laagbelaste oxydatiebedden en bij extreem lage omgevingstemperaturen kan de temperatuur meer dan enige graden Celcius veranderen. Bij hoogbelaste oxydatiebedden is de temperatuurverandering over het algemeen minder dan 1 °C.

Bij kunststofvulmaterialen is in vergelijking met lavabrokken een iets grotere gevoeligheid te verwachten vanwege het grote uitwisselingsoppervlak en het hoge percentage holle ruimte; praktijkproeven indiceren echter bij kunststofvulmaterialen niet meer dan 1 °C verandering (meestal daling) van temperatuur [1].



De Hydropak-proefinstallaties met o.a. oxydatiebed (rechts) en bezinkingstank (linksonder).



De Flocor-proefinstallatie met o.a. oxydatiebed (rechts) en bezinkingstank (links).



De Biopac-proefinstallatie met o.a. oxydatiebed (bovengedeelte) en bezinkingstank (ondergedeelte).

Soms worden de ventilatie-openingen onder in de wand van het oxydatiebed geheel of gedeeltelijk gesloten om de afkoeling door te grote ventilatie te voorkomen.

3. Praktijkproef

Als de mogelijke toepassing van een oxydatiebed met kunststofvulmateriaal voor een bepaald geval wordt overwogen, is het uiterst zinvol de algemene kennis aan te vullen met gegevens en resultaten verkregen door middel van een praktijkproef. Bij het ontwerp van de rioolwaterzuiveringsinrichting te Terwolde is gebleken dat de toepassing van een oxydatiebed met kunststofvulling als eerste trap van een tweetraps biologisch zuiveringssysteem, waarbij als tweede trap een actief-slibinstallatie is gepland, zowel economisch als procestechnisch een verantwoorde oplossing lijkt.

Ter ondersteuning van deze keuze is een praktijkproef uitgevoerd in de periode half april - half oktober 1976. Daartoe werden op de huidige — mechanische — rioolwaterzuiveringsinrichting Terwolde drie proefinstallaties opgesteld, gevuld met verschillende vulmaterialen.

Het doel van de praktijkproef was vooral uit te zoeken of een hoogbelast oxydatiebed met kunststofvulling geschikt is voor een gedeeltelijke zuivering van het aankomende afvalwater; kenmerkend voor dit afvalwater is het grote aandeel van het afvalwater, afkomstig van vleesverwerkende industrieën, waarvan de productie en dus ook de lozing

van afvalwater vooral overdag gedurende 8 tot 10 uur plaatsvinden.

Verwacht werd, dat door middel van een hoogbelast oxydatiebed met kunststofvulling een groot gedeelte van de organische verontreinigingen van dit gekoncentreerde afvalwater op een energetisch aantrekkelijke wijze kan worden verwijderd.

Bij de proefnemingen zijn verschillende aspecten met name onderzocht:

- de werking van de installaties op ontwerpkondities, vooral met betrekking tot het rendement en de slibproductie;
- het effect van een gereduceerde biologische belasting;
- de invloed van een diskontinue biologische belasting.

4. Omschrijving proefopstelling

4.1. Algemeen

Het onderzoek is uitgevoerd met behulp van een drietal proefinstallaties, t.w.:

1. Hydropak, fabrikant Hoechst;
2. Flocor, fabrikant ICI;
3. Biopac, fabrikant Norton.

Als influent is het voorbezonden afvalwater van de huidige rioolwaterzuiveringsinrichting Terwolde gebruikt. Door middel van een pomp wordt het afvalwater uit de voorbezinktank in een centrale toevoerleiding naar de drie proefinstallaties gepompt, waar het via een drietal regelbare afsluiters over de drie installaties wordt verdeeld.

Iedere installatie bestaat uit een oxydatie-

bed, een nabezinkingstank en een opvoeren recirkulatiesysteem.

De effluenten van de installaties worden verzameld in een buffertank en vandaaruit naar de effluentgoot van de grote installatie gepompt.

In het kort zal iedere proefinstallatie worden beschreven.

4.2. Hydropak-installatie

De vulling van het oxydatiebed (inhoud 7,2 m³, hoogte 4,05 m) bestaat uit 3 rollen Hydropak (zie afb. 5). Bij een dergelijke rol wordt uitgegaan van twee stroken plastic, polyvinylchloride, waarvan de ene strook zig-zagsgewijs op de andere strook geklonken is. De aldus verkregen plaat wordt dan opgerold tot rollen van 1,35 m hoog en variabele diameter (in dit geval 1,5 m). Het specifieke oppervlak bedraagt ca. 200 m²/m³. De diameter van de poriën is ca. 20 mm. De verdeling van het afvalwater over het oxydatiebed vindt plaats door een draaisproeier, die aangedreven wordt door een elektromotor.

4.3. Flocor-installatie

De vulling van het oxydatiebed (inhoud 7,0 m³, hoogte 4,80 m) bestaat uit 16 pakketten Flocor E. Ieder pakket (materiaal polyvinylchloride) is 1200 mm lang, 600 mm breed en 600 mm hoog (zie afb. 2). Een pakket weegt ca. 17 kg. Het specifieke oppervlak van de vulling bedraagt ca. 85 m²/m³. De verdeling van het afvalwater over het oxydatiebed, door middel van een sproei-inrichting is bij de

aanvang van de proeven gewijzigd in een verdeling door middel van een schoteltje, waarop het water al spattend verdeeld wordt.

4.4. Biopac-installatie

De vulling van het oxydatiebed (inhoud 3,0 m³, hoogte 3,0 m) bestaat uit losgestorte elementen. De elementen zijn ringvormig met een diameter van 50 mm en een hoogte van 50 mm (zie afb. 1). De elementen zijn van polypropyleen. Het specifieke oppervlak van de vulling bedraagt 126 m²/m³. De verdeling van het afvalwater over het oxydatiebed vindt plaats door middel van een metalen spatplaatje.

5. Uitvoering

De volledige proefduur kan afhankelijk van de instelling van de bedrijfscondities — de BZV-belasting in kg BZV/m³ . d en de hydraulische belasting Q₀ in m³/m² . h — worden onderverdeeld in 4 perioden, waarbij de inwerkduur (ca. 10 - 20 dagen) buiten beschouwing wordt gelaten:

1. B = 2,2 kg BZV/m³ . d en Q₀ = 2 m³/m² . h (20 mei - 15 juni).

Deze bedrijfsomstandigheden komen redelijk overeen met de ontwerpbelasting van de toekomstige installatie (de BZV-belasting wijkt enigszins af van de gewenste waarde, 3 kg BZV/m³ . d, hetgeen veroorzaakt wordt door fluktuaties in de samenstelling van het influent).

Uit de afname van het zuiveringsrendement en uit de lage slibproductie kon spoedig worden afgeleid dat de oxydatiebedden verstopt raakten.

Door instelling van een volledige recirkulatie met een hydraulische belasting van 4 m³/m² . h bleek het mogelijk de Hydropak-installatie en de Flocor-installatie schoon te spoelen.

Omdat de Biopac-installatie zelfs met een hydraulische belasting van 8 m³/m² . h niet schoon was te spoelen, werd deze installatie buiten bedrijf gesteld.

2. B = 3 kg BZV/m³ . d en Q₀ = 4 m³/m² . h (19 juli - 14 augustus).

De hydraulische belasting is verhoogd ter voorkoming van verstoppingsproblemen.

3. B = 1 kg BZV/m³ . d (diskontinu) en Q₀ = 1,5 m³/m² . h (16 augustus - 15 september).

Deze periode is bedoeld om de werking van de installaties te testen bij lagere belasting en tevens bij diskontinue voeding. De BZV-belasting werd gerealiseerd door een diskontinue voeding zonder recirkulatie gedurende 6 uur. Gedurende de resterende 18 uur werd slechts gerecirkuleerd. Deze bedrijfsvoering is gekozen, omdat aldus

afstellingsmoeilijkheden in de verdeling werden vermeden. Door de diskontinue voeding wordt in feite de praktijksituatie meer benaderd dan bij voeding, gelijkmatig over 24 uur.

Bemonsterd werd er alleen over de periode dat voeding werd toegediend.

4. B = 3 kg BZV/m³ . d (diskontinu) en Q₀ = 3,2 m³/m² . h (27 september - 22 oktober).

Deze periode is bedoeld om een bedrijfsvoering te testen die de te verwachten praktijksituatie benadert; namelijk een BZV-belasting van 3 kg BZV/m³ . d, waarbij de aanvoer alleen tijdens de daguren plaatsvindt en gedurende de rest van de dag alleen recirkulatie wordt toegepast.

Gedurende deze periode is de Biopac-installatie, nu gevuld met elementen van 90 mm diameter en 90 mm hoogte — het specifieke oppervlak is dan 90 m²/m³ —, weer in gebruik genomen.

6. Resultaten

In de kwaliteit van het influent blijken aanzienlijke variaties voor te komen.

Als gevolg hiervan kan de uiteindelijke biologische belasting van de oxydatiebedden enigszins afwijken van de nagestreefde waarde.

Als gemiddelde waarden worden gevonden: 450 mg BZV/l, 1.030 mg CZV/l en 80 mg Kjeldahl-N/l; de temperatuur was vrijwel konstant (20 °C).

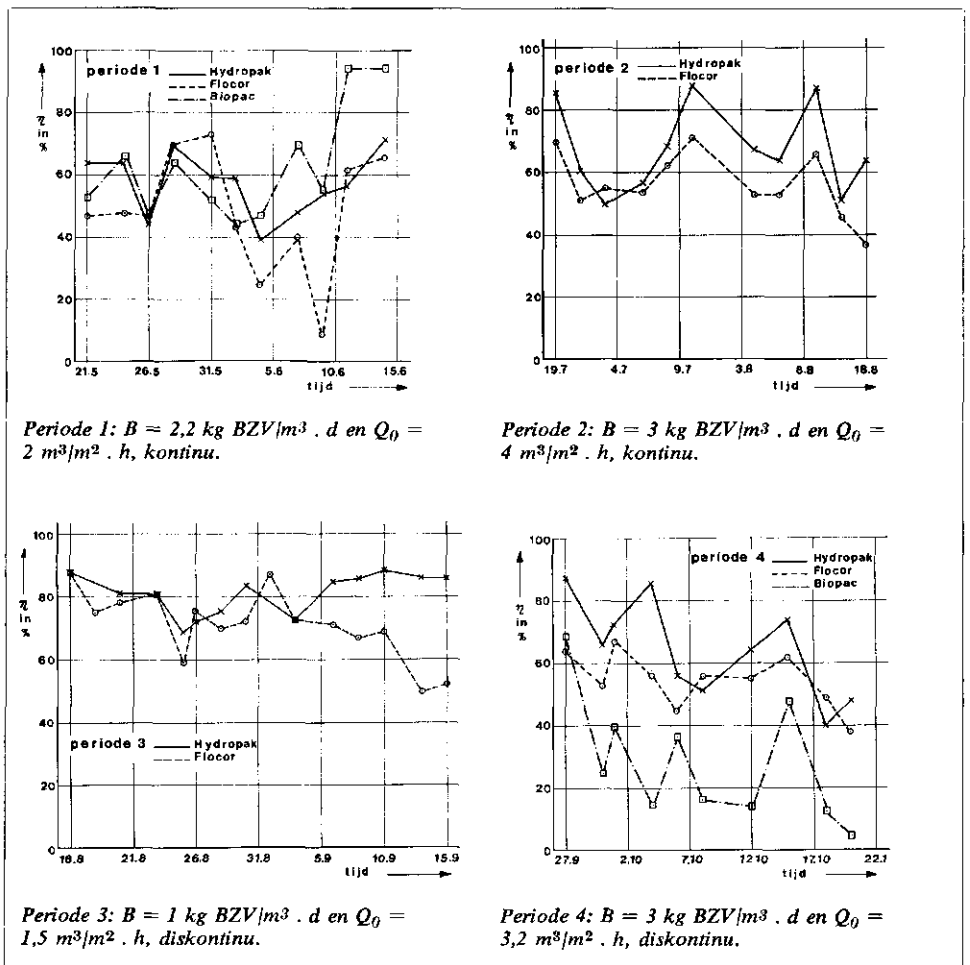
Het vetgehalte in het influent was hoog (ca. 100 mg/l, met pieken van 170 en 380 mg/l). Het effluent van de proefinstallaties bevatte weinig vet (ca. 20 mg/l), zodat hieruit volgt dat het grootste gedeelte van het vet in de oxydatiebedden wordt teruggehouden en in het slib terecht komt.

In afb. 13a t/m 13d is het verloop van het BZV-zuiveringsrendement van de drie proefinstallaties over de vier proefperioden weergegeven.

Over de perioden 2 en 3 zijn alleen de resultaten van de Hydropak- en Flocor-installatie beschikbaar omdat de Biopac-installatie vanwege de verstoppingsproblemen (opgetreden in periode 1) buiten bedrijf was gesteld.

Het CZV-zuiveringsrendement geeft een verloop, vergelijkbaar met dat van het BZV-zuiveringsrendement.

Afb. 13a t/m 13d - BZV-zuiveringsrendement van de proefinstallaties over de perioden 1 t/m 4.



TABEL III - Resultaten betreffende het zuiveringsrendement van de drie proefinstallaties.

Periode	Q ₀ m ³ /m ² · h	B kg BZV/m ³ · d	g ¹ kg ds/ kg BZV- verwijderd	zuiveringsrendement in %		
				BZV	CZV	Kj-N
Hydropak						
1	2,0	2,2	0,20	57	39	20
2	4,0	3,0	0,40	68	68	23
3	1,5	1,0 (d)	0,80	81	76	41
4	3,2	3,0 (d)	0,48	65	60	31
Flocor						
1	2,0	2,2	0,24	48	51	21
2	4,0	2,9	0,90	56	55	15
3	1,5	1,0 (d)	0,45	73	72	26
4	3,2	3,0 (d)	0,28	52	52	24
Biopac						
1	2,0	2,2	0,05	66	51	25
4	3,1	3,0 (d)	0,40	28	31	14

Het Kjeldahl-N-zuiveringsrendement is laag (ca. 20 %) hetgeen duidt op het volledig ontbreken van nitrifikatie (dit is ook te verwachten bij een hoogbelast systeem).

De resultaten betreffende de zuiveringsrendementen staan samengevat in tabel III. Uit het verloop van het zuiveringsrendement gedurende een periode blijkt dat het zuiveringsrendement van de drie installaties met de tijd sterk varieert.

Verder ligt het rendement van de Hydropak-installatie gemiddeld enigszins hoger dan dat van de Flocor-installatie, terwijl van de Biopac-installatie te weinig resultaten beschikbaar zijn om een goede vergelijking mogelijk te maken.

In tabel III zijn tevens weergegeven de resultaten van de berekeningen betreffende de specifieke slibproductie.

Uit deze resultaten blijkt, dat tussen de proefperiodes en tussen de proefinstallaties onderling aanzienlijke variaties optreden. Opvallend is wel de lage slibproductie in periode 1, hetgeen te verklaren is doordat de oxydatiebedden verstopt raken.

7. Interpretatie

7.1. Algemeen

Bij de interpretatie van de resultaten, met name bij de vergelijking van de drie proefinstallaties, moet aandacht worden gegeven aan verschillen tussen de proefinstallaties. De belangrijkste verschillen betreffen de wijze van recirkulatie, de verdeling over het oxydatiebed, de monsternamen en de afmetingen (hoogte) van het oxydatiebed. Bij het uitvoeren van het onderzoek zijn geen aanwijzingen gevonden dat vanwege bovenstaande verschillen, ingrijpende correcties op de resultaten zouden moeten worden toegepast.

Wat betreft de werking van de installaties in het algemeen kan worden gesteld dat het bedrijf met de drie proefinstallaties redelijk succesvol is verlopen. Door de proeven is

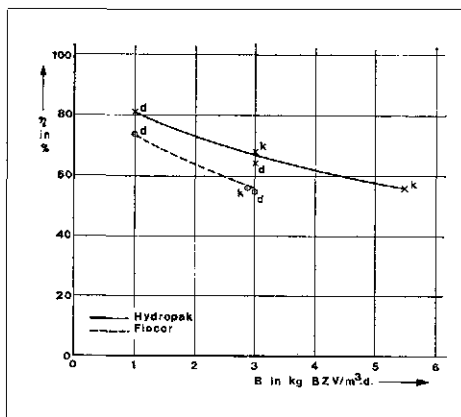
meer informatie verkregen betreffende de aan te houden ontwerpgrondslagen, de zuiveringsrendementen, de slibproductie (in mindere mate), diverse aspecten bij de bedrijfsvoering en de verschillen tussen de kunststofvulmaterialen.

Op de belangrijkste parameters zal in de volgende paragrafen nader worden ingegaan.

7.2. Verstoppingsgevoeligheid

In hoofdstuk 5 zijn de verstoppingsverschijnselen genoemd, die spoedig na het opstarten van de installaties optraden. Als belangrijkste oorzaak voor de verstoppingsproblemen werd beschouwd het hoge vetgehalte van het afvalwater. Tevens bleek uit de proefnemingen een verschil in verstoppingsgevoeligheid tussen de drie installaties. Met name de installatie gevuld met de losgestorte elementen (Biopac) bleek snel te verstopen. Het bleek niet mogelijk het oxydatiebed te reinigen, zelfs niet bij een extreem hoge hydraulische belasting. De installaties met kanaalvormige openingen, Flocor en Hydropak, zijn door een verhoging van de spoelbelasting schoongespoeld. Het verschil in resultaat van de verhoogde spoelwerking kan wellicht

Afb. 14 - BZV-zuiveringsrendement versus BZV-belasting; k en d = continue, diskontinue voeding.



worden verklaard uit de hoedanigheid van de vulmaterialen. In een oxydatiebed met losgestorte vulelementen gaat de energie van het water snel verloren; bij vullingen met kanaalvormige openingen kan plaatselijk in de kanalen een zeer hoge spoelkracht optreden, omdat het water dat in een kanaal terecht komt geen andere richting dan neerwaarts kan stromen.

Bij de losgestorte materialen zijn de verstoppingsproblemen in het algemeen groter bij kleine diameter van de elementen; daarom wordt bij hoogbelaste zuiverings-systemen dikwijls gebruik gemaakt van grote elementen, bijv. Biopac-90 elementen (diameter 90 mm) in plaats van Biopac-50 (diameter 50 mm). De tijdsduur ter beproefing van de grote elementen was te kort om een afgerond oordeel ten aanzien van de verstoppingsgevoeligheid van deze elementen te geven.

7.3. Invloed van diverse grootheden op het zuiveringsrendement

Bij de proefnemingen zijn bewust of onbewust een aantal grootheden gevarieerd. Nader kan worden geanalyseerd wat de invloed van die grootheden is op de werking van de installaties met name het zuiveringsrendement.

a. BZV-belasting

Bij een tweetal waarden voor de BZV-belasting (namelijk ca. 1 en 3 kg BZV/m³.d) zijn proefnemingen uitgevoerd; tevens zijn bij een BZV-belasting van ca. 5,5 kg BZV/m³.d waarnemingen gedaan — zij het gedurende een korte periode.

In afb. 14 staat de relatie tussen de BZV-belasting en het zuiveringsrendement weergegeven. Duidelijk blijkt de vermindering van het rendement bij hogere belasting. De waarden zijn ook in redelijke overeenstemming met die van andere onderzoeken, met name die van het Ruhrverband [2] (zie afb. 8).

b. Diskontinue voeding

Uit de vergelijking van de resultaten bij continue en diskontinue voeding blijkt dat slechts zeer geringe verschillen optreden tussen deze twee situaties. Blijkbaar kan het oxydatiebed een tijdelijk hogere belasting goed verwerken mits voldoende tijd voor herstel aanwezig is (zie ook afb. 14).

c. Kunststofvulmaterialen

Bij de vergelijking van de resultaten van de proefinstallaties kan een duidelijk verschil in zuiveringsrendement tussen de Hydropak en de Flocor-installatie worden aangetoond ten gunste van de eerstgenoemde. Een vergelijking met de Biopac-installatie kan niet worden uitgevoerd in verband met

het beperkt aantal metingen aan deze installatie.

Het verschil in zuiveringsrendement kan kwalitatief worden verklaard uit het verschil in specifiek oppervlak van het vulmateriaal; het specifieke oppervlak van de Hydropak- en Flocorvulling bedraagt ca. 200 resp. 85 m²/m³. Door het grotere specifieke oppervlak kan ook het werkzame oppervlak aan biologische huid groter zijn, hetgeen betekent dat een hogere zuiveringswerking wordt bereikt. Een en ander is ook gevonden in het eerder genoemde onderzoek te Stevenage [1].

d. Temperatuur

De temperatuur van het afvalwater bleek gedurende de proefperioden weinig te variëren (gemiddeld 20 °C). Uit metingen aan het effluent van de installatie bleek dat de effluenttemperatuur nauwelijks afwijkt van de influenttemperatuur. Door de geringe temperatuurvariatie was geen relatie van de temperatuur met het zuiveringsrendement af te leiden.

7.4. Slibproductie

Uit de resultaten van de proefnemingen, weergegeven in tabel III, blijkt dat grote variaties in de slibproductie optreden. Zowel tussen de diverse proefperioden als tussen de proefinstallaties onderling treden verschillen op die niet goed verklaarbaar zijn. De dagelijkse fluktuaties waren ook zeer groot. De gemiddelde waarde voor de specifieke slibproductie gedurende de perioden 2, 3 en 4 bedroeg 0,5 kg ds/kg BZV-verwijderd.

Opmerkelijk is alleen de lage slibproductie in periode 1 tijdens welke periode dan ook de verstoppingsverschijnselen zijn opgetreden.

8. Conclusies

Uit de resultaten van het praktijkonderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

1. Het praktijkonderzoek heeft aan de doelstelling beantwoord. Door een beperkte opdracht te stellen bleek het mogelijk in een kort tijdsbestek de gewenste gegevens te verzamelen, die nodig waren voor een verantwoord ontwerp van de nieuw te bouwen zuiveringsinstallatie. Het oorspronkelijke uitgangspunt — 70 % BZV-verwijdering bij een BZV-belasting van 3 kg BZV/m³. d — werd bevestigd.

2. Vanwege de aard van het afvalwater — vooral het hoge vetgehalte — moest veel aandacht worden besteed aan het voorkomen van verstoppingen van het oxydatiebed. De indruk bestaat dat in dit geval een oxydatiebed met losgestorte

elementen gevoeliger is voor verstoppingen dan een oxydatiebed met vullingen met kanaalvormige openingen; verhoging van de hydraulische belasting blijkt voor de laatstgenoemde installaties een goede mogelijkheid te zijn om verstoppingsproblemen te voorkomen.

3. De Hydropak-installatie leverde over het algemeen een hoger zuiveringsrendement dan de Flocor-installatie; dit verschil kan kwalitatief worden verklaard door het grotere specifieke oppervlak van de Hydropak-vulling (ca. 200 m²/m³) ten opzichte van de Flocor-vulling (ca. 85 m²/m³).

4. Variaties in het belastingpatroon van de installaties zoals diskontinue voeding en dagelijkse fluktuaties in de concentratie van het influent bleken weinig invloed te hebben op het zuiveringsrendement. Stootbelastingen konden goed worden verwerkt.

5. De slibproductie van de oxydatiebedden leverde grote verschillen per periode en proefinstallatie op, zodat geen duidelijke relaties af te leiden waren. De gemiddelde slibproductie bedroeg ca. 0,5 kg ds/kg BZV-verwijderd.

9. Verantwoording

Het praktijkonderzoek werd mogelijk gemaakt en begeleid door:

- Zuiveringschap Veluwe;
- Witteveen + Bos, raadgevend ingenieursbureau;
- Technische Hogeschool Twente.

De proefinstallaties zijn op basis van huurcontracten ter beschikking gesteld door:

- Hoechst Holland Verkoop NV (Hydropak);
- Hubert Sneek (Flocor);
- Hydronyl (Biopac).

De dagelijkse begeleiding vond plaats door stagiairs van de TH Twente, te weten de heren K. Sikkema en N. E. Hemkes. In eerste instantie vond door hen ook de verwerking van de resultaten plaats [13, 14]. Tevens heeft het personeel van de rioolwaterzuiveringsinrichting Terwolde, de heren J. J. Wessels en E. J. H. Schuiter ervoor gezorgd dat tal van praktische problemen snel en efficiënt werden verholpen. Tenslotte werd het grote aantal analyses met zorg verricht op het Rayonlaboratorium van het Zuiveringschap Veluwe te Apeldoorn en het W + B-laboratorium te Deventer, waarvoor onze dank uitgaat naar de dames D. Wouda en A. M. C. Edelhäusen-Puls en de heren K. C. Kip en C. van Zanten.

Voor gedetailleerde gegevens, vooral aangaande de praktijkproef, wordt verwezen naar de desbetreffende rapporten [15].

Literatuur

1. Bruce, A. M., Boon, A. G. *Aspects of high-rate biological treatment of domestic and industrial waste waters*. Wat. Pollut. Control, 70 (1971), No. 5, blz. 487-505.
2. *Untersuchungen an Tropfkörpern mit Kunststoff-Füllelementen*. Berichte zur Abwasser- und Abfalltechnik, 1975, deel 4.
3. Koot, A. C. J. *Behandeling van afvalwater*. Delft, Uitgeverij Waltman, 1974.
4. Chipperfield, P. N. J. *Performance of plastic filter media in industrial and domestic waste treatment*. Journal WPCF, 39 (1967), No. 11, blz. 1860-1874.
5. *Lehr und Handbuch der Abwassertechnik*. Berlin, 1975, Band 11, blz. 278 e.v.
6. Born, R. *Teilreinigung organisch verschmutzter Abwässer durch Tropfkörperfüllmaterial mit durchgehenden Reaktionsflächen*. Wasser, Luft und Betrieb, 15 (1971), No. 11, blz. 403.
7. Askew, M. W. *High-rate biofiltration; past and future (East Anglian Branch)*. Wat. Pollut. Control, 69 (1970), No. 4, blz. 445.
8. Audoin, L., Barabe, J. P., Brebion, G., Huriet, B. *The use of plastic material as a medium for trickling filters treating domestic sewage*. 5th Intern. Conf. Wat. Poll. Research (1970), 11-16, blz. 1-12.
9. Neumann, H., *Die Kläranlage der Tierkörperverwertungsanstalt in Icker — ein Beispiel für die Möglichkeiten des Belebungsverfahrens und für die des Einsatzes von Tropfkörpern mit Kunststoff-Füllelementen*. Städtehygiene (1972), No. 5, blz. 122-131.
10. Bruce, A. M. *Some factors affecting the efficiency of high-rate biological filters*. 5th Intern. Conf. Wat. Poll. Research (1970), 11-14, blz. 1-8.
11. Graaf, J. H. J. M. van der. *Laten biologische zuiveringsprocessen zich naar temperatuur optimaliseren?* H₂O, 9 (1976), No. 5, blz. 87-94.
12. Howland, W. E. *Effect of temperature in sewage treatment processes*. Sew. Ind. Wastes (1963), blz. 161.
13. Sikkema, K. *Praktijkonderzoek oxydatiebedden met kunststofvulling op de rwzi Terwolde*. Deventer, W + B-rapport (stageverslag TH Twente), augustus 1976.
14. Hemkes, N. E. *Praktijkonderzoek oxydatiebedden met kunststofvulling op de rwzi Terwolde*. Deventer, W + B-rapport (stageverslag TH Twente), november 1976.
15. Graaf, J. H. J. M. van der, Laurijsens, P. P. C. M., Visscher, K. *De toepassing van kunststofvulmaterialen in hoogbelaste oxydatiebedden, 1. Algemene beschouwing en 2. Praktijkproef*. Deventer, W + B-rapport, juni 1977.

