

NN31050.87-03

stora

19 87-03

SLIB/WATERSCHEIDING

Verkenning van alternatieven voor nabezinking

starling)

BIBLIOTHEEK
STARINGGEBOUW

Handwritten text, possibly a date or reference number.

stora

postbus 414, 2280 AK rijswijk



070-99.11.33

stichting toegepast onderzoek reiniging afvalwater

SLIB/WATERSCHEIDING

Verkenning van alternatieven voor nabezinking



GENERALE LANDBOUWCATALOGUS

0000 0309 6886

14 JUNI 1988

INHOUD

	Ten geleide	III
1	SAMENVATTING	1
2	INLEIDING	3
3	VERANTWOORDING VAN HET ONDERZOEK	4
3.1	Resultaten van eerder STORA-onderzoek	4
3.2	Keuze van de technieken	6
3.3	Beperkingen van het onderzoek	7
4	LAMELLENAFSCHEIDING	9
4.1	Theorie	9
4.2	Praktijk	12
4.3	Indikking	13
4.4	Vervuiling	15
4.5	Conclusies	16
5	FLOTATIE	17
5.1	Theorie	17
5.2	Praktijk	19
5.2.1	Proefinstallaties met vervanging van de nabezinking	19
5.2.2	Praktijkinstallatie waarin de nabezinktank is vervangen	21
5.2.3	Proefinstallaties na de nabezinking	21
5.2.4	Commentaar	22
5.3	Vergelijking van flotatie en nabezinking	23
5.4	Conclusies en aanbevelingen	24
6	MAGNETISCHE SCHEIDING	25
6.1	Theorie	25
6.2	Praktijk	27
6.3	Conclusies en aanbevelingen	29
7	FILTREREN EN ZEVEN	30
7.1	Theorie	30
7.2	Praktijk	31
7.3	Conclusies en aanbevelingen	33

8	CENTRIFUGEREN	34
8.1	Theorie	34
8.2	Praktijk	34
8.3	Conclusies en aanbevelingen	36
9	TOEPASSING VAN HYDROCYCLONEN	37
9.1	Theorie	37
9.2	Toepassing van hydrocyclonen op actiefslib	39
9.3	Praktijk	42
9.4	Conclusies	43
10	AKOESTISCH TRILLEN	44
10.1	Theorie	44
10.2	Praktijk	44
10.3	Conclusies en aanbevelingen	45
11	TWEETRAPSSCHEIDINGSTECHNIKEN	46
11.1	Theoretisch mogelijke tweetrapsscheidingen	46
11.2	Praktijk	49
11.3	Conclusies en aanbevelingen	50
12	EVALUATIE	51
12.1	Evaluatie van de besproken technieken	51
12.2	Evaluatie van tweetrapsscheidingsinstallaties	53
12.3	Verbetering van bestaande zuiveringsinrichtingen	54
13	CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN	55
13.1	Conclusies	55
13.2	Aanbevelingen	55
14	LITERATUUR	56
BIJLAGE I	VERSLAG BEZOEK WORLD FILTRATION CONGRESS 4	63

Ten geleide

Eerder STORA-onderzoek* naar het procesgebeuren in nabezinktanks heeft geleid tot richtlijnen voor verbetering van inloop- en ruimerconstructies, bedrijfsvoering en ontwerp van nabezinktanks.

Volgens deze STORA-richtlijn worden (vrijwel) alle nabezinktanks in Nederland ontworpen. Dergelijke tanks kenmerken zich door een lage oppervlaktebelasting en groot ruimtebeslag; de hoge kosten die hieruit voortvloeien vormden de aanleiding tot het onderzoek waarvan dit rapport het resultaat is.

Het onderzoek werd door het algemeen bestuur van de STORA op advies van de Onderzoekadviescommissie (OAC)** opgedragen aan de Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing van de Afdeling der Civiele Techniek TU Delft en namens de STORA begeleid door een commissie bestaande uit ir. A.E. van Giffen (voorzitter), ing. J.H.G. Dekkers, ir. A.H. Dirkwager en ir. T.W. M. Wouda.

Rijswijk, februari 1987.

De directeur van de STORA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

* Hydraulische en technologische aspecten van het nabezinkproces
(5 rapporten)

** De Onderzoekadviescommissie, die tot dit project adviseerde, bestond uit:
prof.ir. A.C.J. Koot (voorzitter), drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff (secretaris) en
ir. J. Boschloo, ir. R. den Engelse, prof.dr. P.G. Föhr, ir. A.E. van Giffen, ir. J.J. de
Graeff, dr.ir. P.J. Huiswaard, ir. R. Karper, drs. S.P. Klapwijk, prof.ir. J.H. Kop,
ir. Tj. Meijer, ir. L.P. Savelkoul, ir. H.M.J. Scheltinga, dr.ir. D.W. Scholte Ubink en
ir. M. Tiessens (leden)

SAMENVATTING

In dit rapport worden de resultaten gepresenteerd van literatuuronderzoek naar alternatieven voor nabezinking in het actief-slibproces.

Aanleiding voor het onderzoek was de op grond van praktijkproeven opgestelde STORA-richtlijn, die in het algemeen een lagere oppervlaktebelasting dan tot dan toe gebruikelijk voorschrijft. De onderhavige studie geeft aan welke technieken in aanmerking komen als alternatief voor nabezinking, waarbij aanbevelingen voor nader onderzoek worden gedaan.

Het onderzoek heeft zich beperkt tot de afscheiding van actiefslib met een slibindex kleiner dan 200 ml/g. Het mechanisme van nabezinking zelf is niet bij het onderzoek betrokken en wordt alleen als referentie voor de andere technieken gebruikt.

Bij het evalueren van de verschillende technieken zijn de economische aspecten buiten beschouwing gelaten.

Bij slib/waterscheiding zijn twee processen van belang, namelijk het verkrijgen van een goede effluentkwaliteit (clarificatie) en het behalen van een hoog drogestofgehalte in het retourslib (indikking).

Lamellenafschrijving is diverse keren als alternatief voor conventionele nabezinking toegepast. De theoretische voordelen van deze techniek (hoge oppervlaktebelasting ten gevolge van de korte bezinkweg en gunstige hydraulische omstandigheden) worden in de praktijk niet waargemaakt. Er ontstaat wel een goed effluent. Bij een te hoge belasting is de indikking van het slib de beperkende factor, waardoor er slib tussen de lamellen en vervolgens in het effluent terecht komt. Aangezien bij de meeste conventionele nabezinktanks in Nederland de indikking de beperkende factor is, bieden lamellenafscheiders als ééntrapssysteem geen uitkomst.

Mogelijk zijn lamellenafscheiders in combinatie met een andere techniek wel geschikt. In dergelijke tweetrapsconfiguraties ligt de nadruk bij de lamellenafscheider op clarificatie. Een andere mogelijkheid die perspectief lijkt te bieden in bestaande zuiveringsinrichtingen is het aanbrengen van lamellen in de beluchtingsruimte. Voor beide toepassingen is nader praktijkonderzoek nodig.

Flotatie is behalve voor indikking van spuislib ook enkele keren in plaats van nabezinking toegepast. Technisch gezien is flotatie een alternatief voor nabezinking. De omstandigheden moeten daarbij aangepast zijn aan het doel: het verkrijgen van een goede effluentkwaliteit. Hoge oppervlaktebelastingen tot maximaal $5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ zijn te bereiken. Bovendien levert flotatie retourslib met een hoog drogestofgehalte, zodat in de beluchtingsruimte een hoog drogestofgehalte kan worden gehandhaafd.

Flotatie werkt beter naarmate de slibindex hoger is. Globale berekeningen uit de literatuur wijzen erop dat flotatie in geval van licht slib goedkoper is dan nabezinking en duurder bij goed bezinkbaar slib.

Verder lijkt flotatie een geschikte techniek om in een tweetrapsafschrijving toe te passen, met name als een hoog te belasten eenheid voor de verwerking van regenwateraanvoeren. Hiertoe wordt een haalbaarheidsstudie aanbevolen.

Magnetische scheiding kan worden uitgevoerd met permanente magneten en wellicht ook met supergeleidende magneten.

Permanente magneten worden toegepast in combinatie met nabezinking en geven bij een twee maal zo hoge oppervlaktebelasting een betere clarificatie en indikking. Toepassing in kleine installaties is mogelijk.

Scheiding met behulp van supergeleidende magneten is een nieuwe techniek, die een alternatief voor nabezinking kan zijn. Een hoge oppervlaktebelasting is in principe mogelijk. Deze techniek lijkt alleen toepasbaar in grote installaties.

Voor beide processen moet er in ieder geval magnetiet of een ander magnetisch end materiaal en misschien ook een vlok(hulp)middel worden toegevoegd. Nader onderzoek op laboratoriumschaal naar de hechting van actiefslib aan magnetisch materiaal, eventueel gecombineerd met praktijkonderzoek op semi technische schaal lijkt zinrijk.

Filtreren en zeven zijn in plaats van nabezinking toegepast. Hiermee zijn oppervlaktebelastingen van maximaal $30 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{h}$ bereikbaar. Met deze techniek is een hoog droge stofgehalte in het retourslib te realiseren. Praktijkonderzoek en onderzoek naar de economische haalbaarheid wordt aanbevolen.

Centrifugeren is behalve voor slibindikking ook een enkele maal in plaats van nabezinking toegepast. Deze techniek heeft als voordeel dat op een klein oppervlak grote hoeveelden kuraak worden verwerkt. Er ontstaat retourslib met een hoog droge stofgehalte. De efficiëntkwaliiteit is daarentegen niet erg hoog. Derhalve bieden centrifuges de mogelijkheid om te worden toegepast in tweetrapsconfiguraties. Aanbevolen wordt om een haalbaarheidsstudie uit te voeren.

Hydrocyclonen zijn niet toepasbaar als vervanging van nabezinktanks. Door de hoge stroomsnelheden en snelheidsgradiënten in een hydrocycloon worden actief-slibvlokken tot kleine vlokjes uiteen geslagen. Bij de deeltjesgrootte die dan ontstaat is de massa te klein om ze met behulp van hydrocyclonen af te scheiden. Nader onderzoek naar deze techniek is niet zinvol.

Akoestisch trillen is alleen op laboratoriumschaal op actiefslib toegepast met wisselende resultaten. Onbekend is of met deze techniek een verbetering kan worden bereikt. Verkennend onderzoek op laboratoriumschaal wordt aanbevolen.

In afvalwaterzuiveringsinrichtingen treedt regelmatig slibverlies op in de nabezinking, meestal als gevolg van regenwateraanvoer. Door het slibverlies ontstaat een slechte effluentkwaliteit. Bij overmatig slibverlies daalt het drogestofgehalte in de beluchtingsruimte en kan de zuiverende werking van de actief-slibinstallatie in gevaar komen. Deze problemen zijn voor de STORA aanleiding geweest om onderzoek te verrichten naar de hydraulische en technologische aspecten van het nabezinkproces [1-5, 7]. Dit onderzoek heeft geleid tot een STORA-ontwerprichtlijn voor ronde en rechthoekige nabezinktanks, die in hoofdzaak op de slibvolumebelasting is gebaseerd. Toepassing van de richtlijn leidt tot nabezinktanks met een lagere oppervlaktebelasting dan tot nu toe gebruikelijk was. De kosten en het ruimtebeslag van nabezinktanks zijn daardoor hoger geworden.

Op grond van de uitkomsten heeft de STORA besloten om onderzoek te verrichten naar technieken met een hoger slib/waterscheidingsrendement.

De doelstelling van het onderzoek is:

- vaststellen welke technieken in aanmerking komen als alternatief voor nabezinking;
- op grond hiervan aanbevelingen doen voor nader onderzoek.

Er is uitsluitend literatuuronderzoek uitgevoerd. Hierbij is onder andere gebruik gemaakt van de computerbestanden van het Water Research Centre (Aqualine), Pollution Abstracts en Chemical Abstracts. De hierbij gebruikte trefwoorden waren gericht op een bepaalde techniek in combinatie met "actiefslib".

Er is contact opgenomen met de Abwassertechnische Vereinigung (ATV) in West-Duitsland en met het Water Research Centre (WRC) in Engeland. Door deze instituten is niet systematisch onderzoek verricht naar alternatieven voor nabezinking.

In april 1986 werd een bezoek gebracht aan het World Filtration Congress 4 te Oostende om op de hoogte te komen van recente ontwikkelingen in de scheidingstechniek van vaste deeltjes uit vloeistof. Een verslag van dit congres is als bijlage I toegevoegd.

In het eerstvolgende hoofdstuk wordt de aansluiting van dit onderzoek op eerdere STORA-onderzoeken behandeld, waarna een keuze wordt gemaakt uit de diverse scheidingstechnieken en de beperkingen van het onderzoek worden aangegeven.

In de volgende hoofdstukken zijn de als alternatief voor nabezinking in aanmerking komende technieken steeds afzonderlijk behandeld. Een apart hoofdstuk is gewijd aan mogelijke combinaties van scheidingstechnieken.

Het rapport eindigt met een evaluatie van de besproken technieken, waarbij de eventuele toepassing in bestaande zuiveringsinrichtingen is meegenomen, en een hoofdstuk met conclusies en aanbevelingen.

In STORA-verband is al onderzoek uitgevoerd naar de hydraulische en technologische aspecten van het nabezinkproces [1-5, 7]. In dit rapport ligt de nadruk op andere scheidingstechnieken dan het conventionele nabezinkproces. Om deze nieuwe technieken te kunnen plaatsen in het raamwerk van het eerdere STORA-onderzoek worden daarvan eerst de resultaten samengevat. Daarna wordt de keuze van de in dit onderzoek behandelde technieken kort toegelicht. Tot slot worden de beperkingen van het onderzoek aangegeven.

3.1 Resultaten van eerder STORA-onderzoek

Naast een inventarisatie van ontwerpgegevens en bedrijfservaring met nabezinktanks omvatte het onderzoek de uitvoering van een serie praktijkproeven om de toelaatbare belasting te bepalen. Door bij verschillende hydraulische belastingen te kijken of er wel of niet een sliboverstort optrad, werd de capaciteit van de nabezinktank bepaald. Met de resultaten van deze proeven zijn buitenlandse richtlijnen (de WRC-richtlijn gebaseerd op de zone-settling theorie en de ATV-richtlijn) gedeeltelijk bevestigd. De ATV-richtlijn bleek het beste aan te sluiten, maar moest aan de Nederlandse omstandigheden worden aangepast.

De slibvolumebelasting is de belangrijkste ontwerpparameter. Met de slibvolumebelasting is te voorspellen of er een sliboverstort zal ontstaan of niet. De toelaatbare slibvolumebelasting hangt af van het slibvolume (of de oppervlaktebelasting). De slibvolumebelasting is het produkt van oppervlaktebelasting, drogestofgehalte in de aanvoer van de nabezinktank en slibindex. Van deze drie factoren is de laatste van cruciaal belang. De slibindex is, voordat een actief-slibinstallatie in gebruik wordt genomen, moeilijk te voorspellen. Na de ingebruikname kan de slibindex, als die te hoog is, in principe worden verlaagd door het nemen van procestechnologische maatregelen. Welke maatregel in welk geval genomen moet worden, is vaak niet duidelijk. Voor de meeste proeven werd slib gebruikt met een slibindex I_{SV} kleiner dan $0,2 \text{ m}^3/\text{kg}$ (200 ml/g).

De proeven waren voornamelijk een simulatie van het optreden van een regenwateraanvoer. Er wordt dan meer actief-slib (als kg droge stof) per tijdseenheid naar de nabezinktank getransporteerd dan via het retour-slibdebiet uit de nabezinktank wordt afgevoerd. Er is dus een nettotransport van beluchtingsruimte naar nabezinktank.

Er zijn twee oorzaken waardoor, bij constant debiet, het nettotransport afneemt:

1. De aanvoer (kg droge stof) naar de nabezinktank neemt af, doordat het gemiddelde drogestofgehalte in de beluchtingsruimte afneemt.
2. De afvoer (kg droge stof) vanuit de nabezinktank neemt toe, doordat het drogestofgehalte van het retour-slib toeneemt. Dit wordt veroorzaakt door een toename van de gemiddelde verblijftijd van het slib in de nabezinktank.

Met het nul worden van het nettotransport naar de nabezinktank ontstaat er een nieuw evenwicht. Bij dit evenwicht zal in de nabezinktank een zekere slibmassa met een bepaald volume geborgen moeten

zijn. Als dit volume kleiner is dan de inhoud van de nabezinktank, zal er geen sliboverstort hebben plaatsgevonden. Is het volume groter dan de inhoud van de tank, dan zal er slib met het effluent afgevoerd worden.

Om dit laatste te voorkomen mag, volgens de STORA-richtlijn, de slibvolumebelasting de toelaatbare slibvolumebelasting niet overschrijden. Daarnaast moet het buffervolume voldoende zijn. Dit volume wordt bepaald met behulp van een schatting voor het gemiddelde drogestofgehalte (G_c) van het slib in de bufferzone, waarbij $G_c=0,48/I_{SV}$ kg/m^3 . Verder wordt als eis gesteld dat ten hoogste 30 % van de totale hoeveelheid (kg) droge stof die in nabezinktank en beluchtingsruimte aanwezig is, in de nabezinktank wordt gebufferd. Ook mag in verband met de BZV-reductie het drogestofgehalte in de beluchtingsruimte niet beneden 2 kg/m^3 dalen.

Bij vrijwel alle proeven was de effluentkwaliteit goed zolang er geen sliboverstort optrad. Dit zou er op wijzen dat niet de slib/waterscheiding (clarificatie) maatgevend was, maar alleen de benodigde bufferruimte (indikking) voor het slib. Toepassing van een plaat onder de inlooptrommel om kortsluitstroming te voorkomen gaf een slechtere effluentkwaliteit. Dit kwam waarschijnlijk doordat in mindere mate vlokkenfiltratie optrad door het gewijzigde stromingspatroon en de lagere slibspiegel.

De functies van een nabezinktank in een actief-slibinstallatie zijn clarificatie van het effluent, indikken van het slib en berging van het slib.

Een goede clarificatie is noodzakelijk om aan de effluenteisen te kunnen voldoen.

Indikken van slib is vereist om in de beluchtingsruimte een bepaald drogestofgehalte te kunnen handhaven. Als het drogestofgehalte van het retourslib hoger is, wordt het retourslibdebiet kleiner en worden de pompkosten daarmee lager. De slibverwerking is goedkoper bij een hoger drogestofgehalte van het spuislib.

Berging van slib is nodig als de slibaanvoer groter is dan de slibafvoercapaciteit gemeten als hoeveelheid droge stof.

Uit het voorgaande blijkt dat beluchtingsruimte en nabezinktank samen een dynamisch systeem vormen, dat reageert op een vergroting van de aanvoer. Dat geldt ook bij een (plotselinge) verandering van de bezinkeigenschappen van het slib.

In de STORA-rapporten wordt gesignaleerd dat er weinig gepubliceerd is over de dynamica van het bezinkproces. Meer inzicht in de dynamica is wel gewenst. Dit kan misschien leiden tot een vermindering van de hoeveelheid slib die in de nabezinktank wordt geborgen.

Voor het zuiveringsproces is het van belang dat zoveel mogelijk slib (kg droge stof) in de beluchtingsruimte aanwezig is. Om het zuiveringsrendement op peil te houden mag bij regenwateraanvoer, waarbij de BZV-aanvoer (kg/s) toeneemt ("first foul flush"), de slibbelasting niet te hoog worden.

Voor de omvang van de nabezinktank is het belangrijk dat er weinig slib (m^3) in de nabezinktank aanwezig is. Behalve de hoeveelheid (kg) is ook het gemiddelde drogestofgehalte van het slib in de nabezinktank van belang. Voor andere slib/waterscheidingsmethoden dan bezinking gelden dezelfde overwegingen.

De invloed van de grootte van het retourslibdebiet is niet duidelijk.⁽¹⁾ Het retourdebiet wordt niet meegerekend als hydraulische belasting van de nabezinktank. Een zeer groot retourdebiet brengt mogelijk de slib/waterscheiding in gevaar.

De conclusie van het STORA-onderzoek op grond van een beperkt aantal proeven met een verschillend retourslibdebiet is dat de capaciteit van de nabezinktank bij vergroting van het retourdebiet toeneemt als het slib een lage slibindex heeft en dat de capaciteit afneemt als het slib een hoge slibindex heeft. Een regelbaar retourslibdebiet wordt aanbevolen.

Door polyelektrolyten [7] te gebruiken kan het optreden van een slib-overstort vertraagd of mogelijk zelfs worden voorkomen.⁽²⁾

3.2 Keuze van de technieken

Om te komen tot een keuze van scheidingstechnieken kunnen verschillende uitgangspunten als basis dienen. Uitgaande van conventionele nabezinking waarbij de scheiding plaatsvindt door middel van de zwaartekracht, is het mogelijk om nog andere krachten in beschouwing te nemen, zoals centrifugaalkrachten, electro-magnetische krachten. Dit bleek echter een te smalle basis voor alle mogelijke technieken. Daarom is als criterium een aantal fysische eigenschappen van actiefslib gehanteerd, waarbij de nadruk komt te liggen op het verschil tussen eigenschappen van slibdeeltjes en water.

Bij het scheiden van slibdeeltjes en water heeft men te maken met enkele belangrijke invloedsfactoren, namelijk de soortelijke massa van het deeltje en de deeltjesgrootte. Bij het afscheiden van actiefslib heeft men voorts te maken met vlokkig slib. Dit betekent dat nog andere invloedsfactoren van belang zijn, namelijk de hechting en de

- (1) Twee identieke gevallen van een plotseling toegenomen debiet door regenwateraanvoer kunnen met elkaar worden vergeleken. In het ene geval wordt een hoog en in het andere geval een laag retourdebiet ingesteld. Dan is bij het hoge retourdebiet het nettotransport van slib uit de nabezinktank groter, omdat het drogestofgehalte van het retourslib hoger is dan het drogestofgehalte in de beluchtingsruimte. Maar ook is bij het hoge retourdebiet de verblijftijd van het slib in de nabezinktank kleiner, waardoor het drogestofgehalte van het retourslib minder snel toeneemt dan bij het lage retourdebiet. Ook is het gemiddelde drogestofgehalte in de nabezinktank lager, waardoor in hetzelfde volume minder slib (als massa) geborgen kan worden.
- (2) Opnieuw kunnen twee identieke gevallen van een plotseling toegenomen debiet (regenwateraanvoer) met elkaar worden vergeleken. In één geval worden polyelektrolyten toegevoegd en in het andere geval niet. Dan is bij toevoeging van polyelektrolyten de slibspiegelstijgsnelheid kleiner. Er ontstaat slib met een grotere dichtheid. Het drogestofgehalte van het retourslib neemt sneller toe. Er kan meer slib in de nabezinktank geborgen worden, omdat het gemiddelde drogestofgehalte in de nabezinktank hoger is.

Tabel 1. Criteria voor de keuze van de scheidingstechnieken.

criterium	techniek
soortelijke massa - groter soortelijk gewicht dan water - grotere massatraagheid dan water	- lamellenafscheider * - centrifuge * - hydrocycloon * - swirl
deeltjesgrootte - vlokken van 10 tot 2000 µm	- filtreren * - zeven *
hechting - aan gasbelletjes - aan zware deeltjes - aan elkaar - aan lange moleculen - aan magnetische deeltjes - aan elektrisch geladen deeltjes	- flotatie * - gefluïdiseerd bed - dekenfiltratie - flocculente bezinking - polyelektrolyten - magnetische scheiding * - elektrolyse - vlokvorming en vlokverwijdering
lading	- elektrolyse - ionenwisseling
trillingen - gevoelig voor radioactiviteit - gevoelig voor geluidstrillingen	- ioniserende straling - akoestisch trillen *

lading van de deeltjes. De hier genoemde invloedsfactoren zijn als criteria opgenomen in tabel 1. Hierbij is, indien mogelijk, nog een verdere onderverdeling gemaakt.

Uiteindelijk is er een selectie gemaakt van de op voorhand meest veelbelovende technieken. Deze technieken zijn in de tabel met een * aangegeven.

3.3 Beperkingen van het onderzoek

Het onderzoek heeft zich beperkt tot de literatuur en werd gericht op het vinden van alternatieven voor nabezinking als onderdeel van het actief-slibproces. Hoewel een deel van de technieken mogelijk ook geschikt is voor toepassing bij oxydatiebedden, is niet speciaal naar deze toepassing gekeken.

In de literatuur is vrij weinig over de kosten van de verschillende oplossingen gevonden. De economische aspecten zijn daarom slechts zijdelings bij het onderzoek betrokken.

Er is uitgegaan van een actief-slibinstallatie die een slib levert met een de slibindex kleiner of gelijk is aan 0,2 m³/kg (200 ml/g). Naar de oorzaken van het optreden van licht slib en de procestecnologische maatregelen die ertegen genomen kunnen worden [8], is niet gekeken. Wel is gekeken of een bepaalde techniek in het bijzonder geschikt of ongeschikt is voor het afscheiden van licht slib.

Hoewel slib op drager een alternatief voor nabezinking kan opleveren [6], is deze oplossing eveneens niet behandeld.

Bijzondere inloop- en ruimerconstructies die in een nabezinktank kunnen worden aangebracht, zijn niet in het onderzoek betrokken. In het reeds genoemde STORA-onderzoek [4] is dit al voor een deel behandeld.

Ook is er geen onderzoek gedaan naar meet- en regeltechnische maatregelen die de capaciteit van de nabezinktank kunnen verhogen. De dynamica van de belasting (regenwateraanvoeren) en de processen in de tank spelen hierbij een rol. Een aantal recente publicaties verdient wat dit betreft de aandacht. Er is dus alleen gekeken naar alternatieve technieken voor nabezinking en niet naar conventionele nabezinking zelf, omdat dan het onderzoek te omvangrijk zou worden en daarnaast weinig perspectief leek te bieden.

De theoretische voordelen van lamellen- of buisafscheiders zijn al lang bekend en worden bijvoorbeeld al beschreven door Hazen [13]. Zowel bij de drinkwaterbereiding als in de procesindustrie worden ze toegepast. De toepassing in de afvalwaterzuivering is zeer beperkt gebleven. De meest recente literatuur, die gevonden is, stamt uit 1980. Het betreft dan ook voornamelijk de enigszins verouderde buisafscheiders in plaats van de modernere lamellenafscheiders.

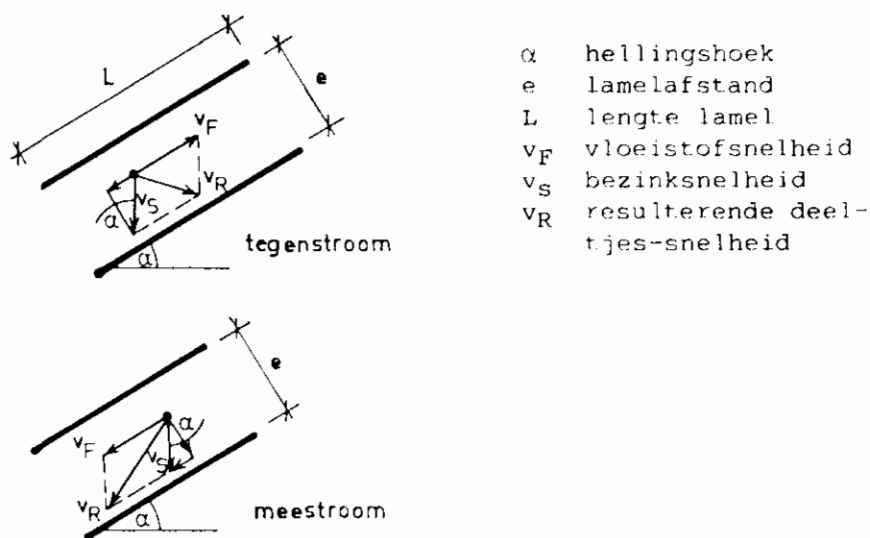
De theorie van lamellenafscheiding wordt besproken. Praktijkinstallaties uit de literatuur komen aan de orde. Ingegaan wordt op de indikking van slib en de vervuiling van lamellenafscheiders. Besloten wordt met een aantal conclusies.

4.1 Theorie

De berekening van het verwijderingsrendement van een horizontaal doorstroomde (rechthoekige) tank is gebaseerd op een aantal aannamen. Eén ervan is de gelijkmatige snelheidsverdeling over de dwarsdoorsnede.

Voor ongehinderde bezinking van discrete deeltjes hangt het verwijderingsrendement dan alleen af van de verhouding van debiet en tankoppervlak: de oppervlaktebelasting. De hoogte van de bezinktank is niet van invloed op het rendement. In verband met de bouwkosten is het dan aantrekkelijk om ondiepe tanks te construeren. De volgende stap is het boven elkaar plaatsen van één of meer tanks, waardoor bij gelijkblijvend grondoppervlak een groter bezinkoppervlak wordt verkregen. Bij een gelijke belasting per bezinkoppervlak kan de belasting per grondoppervlak verveelvoudigd worden.

Horizontale bodems zijn, zeker als ze zich vlak boven elkaar bevinden, slecht te reinigen. Dit is gezien het hoge drogestofgehalte van het afvalwater en de biologische afbreekbaarheid van de bezonken deeltjes een probleem. Beter geschikt zijn daarom zogenaamde



Figuur 1. De bezink- en stroomsnelheid in een lamellenbezinker bij mee- en tegenstroom [9].

lamellenafscheiders, waarbij valse bodems een hoek α met de waterspiegel maken. De grotere toelaatbare oppervlaktebelasting, veroorzaakt door het feit dat bezinkende deeltjes een kleinere afstand hoeven af te leggen voordat ze de bodem bereiken, blijft gehandhaafd. De bezonken deeltjes zullen zich onder invloed van de zwaartekracht langs de lamellen naar beneden bewegen en op de bodem van de tank terechtkomen. Met behulp van kettingruimers of slibschrapers kunnen ze vervolgens definitief verwijderd worden.

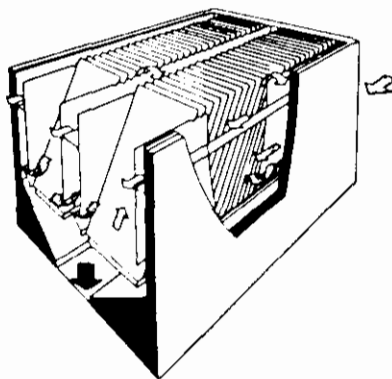
Afhankelijk van het feit of de beweging van de deeltjes op de lamellen evenwijdig aan, tegengesteld aan of loodrecht op de beweging van de waterstroom is, spreekt men respectievelijk van meestroom (direct-current), tegenstroom (counter-current) of dwarsstroom (cross-current). Figuur 1 laat zien de bezink- en stroomsnelheid in een lamellenafscheider bij mee- en tegenstroom. Figuur 2 is een voorbeeld van een lamellenafscheider volgens het dwarsstroom-principe.

Bij het toepassen van lamellen wordt de hydraulische straal R veel kleiner dan bij een conventionele nabezinktank. In vergelijking met conventionele nabezinking neemt daardoor bij gelijkblijvende stroomsnelheid de kengrootheid van Reynolds af en de kengrootheid van Froude toe. Als de oppervlaktebelasting wordt verhoogd, neemt de stroomsnelheid toe. Bij een verhoging van de stroomsnelheid worden de kengrootheden van Reynolds en Froude allebei groter.

Door Billmeier [9] wordt erop gewezen dat de stroming voor een efficiënte verwijdering van deeltjes bij voorkeur laminair ($Re < 500$) en stabiel ($Fr^2 > 10^{-5}$) moet zijn. Uitgaande van deze waarden kan een kritische stroomsnelheid gevonden worden, die afhangt van de hydraulische straal en de temperatuur van het water. Wordt de werkelijke stroomsnelheid groter, dan wordt de stroming turbulent. Bij een lagere stroomsnelheid is de stroming instabiel.

Op grond van de bezinksnelheid van de deeltjes die verwijderd moeten worden, kan de benodigde lengte van de lamellen (of buizen) in de stromingsrichting voor mee- en tegenstroom berekend worden. In verband met in- en uittreeverschijnselen wordt ten opzichte van de theoretische lengte een extra lengte van 30 % aanbevolen.

Bij tegenstroom is de benodigde lengte kleiner. Dit wordt geheel of gedeeltelijk teniet gedaan door het feit dat de afvoer van slib tegengewerkt wordt door de waterstroom. Om een gelijke slibafvoer als



Figuur 2. Een lamellenbezinker volgens het dwarsstroomprincipe [18].

bij meestroom te hebben moet daarom de hoek α bij meestroom iets groter zijn.

Yao [19] gaat uit van benaderingen voor het stromingspatroon in verschillende buisvormen bij tegenstroom. Voor buizen met een ronde en vierkante doorsnede wordt daarmee een andere formule gevonden dan Billmeier [9] vond. Yao beveelt aan om de verhouding L/e , zie figuur 1, tussen 20 en 40 te kiezen en de hoek α tussen 30° en 60° . Voor parallelle platen zou in verband met een stabiele stroming de verhouding van breedte B en afstand e van de platen tussen 2 en 5 moeten liggen.

De stroming tussen de lamellen is, in tegenstelling tot de stroming in een conventionele nabezinktank, laminair. Vlokvorming gebeurt in hoofdzaak onder invloed van turbulentie. De vlokvormingsfase moet daarom voltooid zijn voordat het water het laminaire stromingsgebied bereikt. Eventueel moet een vlokvormingsruimte worden aangebracht, waarin het mengsel van slib en water een bepaalde tijd verblijft en waar een zekere hoeveelheid energie wordt ingebracht. Mogelijk voordelig voor de vlokvorming is de verticale component van de stroming in het lamellenpakket, waardoor een situatie ontstaat die met een verticaal doorstroomde tank vergeleken kan worden (dekenfiltratie).

De bezinking in een lamellenafscheider is minder flocculent dan in een conventionele nabezinktank. Voor het rendement van de slib/waterscheiding is daarom in een lamellenafscheider de verblijftijd van minder en de oppervlaktebelasting van meer belang dan in een conventionele nabezinktank.

De indikking van het slib zal naar verwachting beter verlopen bij een grotere:

- dikte van de sliblaag;
- slibverblijftijd;
- turbulentie.

De dikte van de sliblaag zal op lamellen veel kleiner zijn dan in een nabezinktank.

De toelaatbare oppervlaktebelasting wordt geacht bij een lamellenafscheider groter te zijn dan bij een nabezinktank. Bij een gelijke diepte en vullingsgraad met slib zal de slibverblijftijd daardoor in de lamellenafscheider kleiner zijn. De kortere slibverblijftijd in de lamellenafscheider is waarschijnlijk gunstig voor het zuiverende vermogen van de actief-slibinstallatie vanwege het feit dat het slib minder lang zuurstofloos is.

Onder de lamellenafscheider wordt vaak een conus aangebracht die het slib opvangt en waarin het slib indikt. In die gevallen waarbij de indikking van het slib onvoldoende is, zal men geen lamellenafschers moeten toepassen.

De slechtere indikkingseigenschappen zijn mogelijk te compenseren door het retourslibdebiet te verhogen.

Vervuiling is een probleem dat de toepassing van lamellenafschers kan belemmeren. Het grote aantal lamellen maakt het gebruik van mechanische werktuigen, zoals kettingruimers, niet eenvoudig. Vervuiling moet daarom zoveel mogelijk worden voorkomen door de lamellen onder een vrij grote hoek α te plaatsen en te kiezen voor een glad materiaal.

4.2 Praktijk

Lamellenafscheiders zijn in een aantal gevallen toegepast voor de afscheiding van actiefslib en effluent. De belangrijkste ontwerp- en bedrijfsparameters zijn in tabel 2 samengevat.

In de meeste installaties zijn buisbezinkers gebruikt, bestaande uit buizen met een diameter van circa 0,05 m. De doorsnede van de buizen van de installatie in Wickham is zeshoekig en die in Winnipeg vierkant, de andere installaties hebben ronde buizen. Alleen de afscheider in Ajaccio heeft lamellen die op een onderlinge afstand van $e=0,1$ m zijn aangebracht. De hoek α die de lamellen met de waterspiegel maken, ligt tussen 55° en 60° . Voor zover bekend werken alle installaties volgens het tegenstroom-principe.

Tabel 2 is samengesteld uit waarden die door verschillende onderzoekers in de praktijk gevonden zijn. In de meeste gevallen betreft het een beperkt aantal proeven en zijn er geen maximaal toelaatbare belastingen bepaald.

Volgens Slechta [17] is er een aanzienlijke spreiding van de getallen en zijn ze voor een deel tegenstrijdig. Daarnaast constateert Heckel [14] dat de slibeigenschappen een grote invloed op de werking van de afscheider hebben, maar dat geen duidelijk verband met het drogestofgehalte van de aanvoer, het slibvolume of de slibindex te vinden is.

Om een indicatie van de orde van grootte van de parameters te hebben, zijn van de getallen gemiddelden bepaald. Ter vergelijking zijn richtwaarden voor een conventionele nabezinktank toegevoegd.

De toegepaste belasting per grondoppervlak blijkt te variëren van 1,3 tot $6,5 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Het gemiddelde van 3,6 ligt aanmerkelijk hoger dan de toelaatbare waarde voor een conventionele nabezinktank.

De belasting per oppervlak van buis of lamel varieert van 0,15 tot $0,7 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ met een gemiddelde van 0,4. Deze waarde is kleiner dan de oppervlaktebelasting van een conventionele nabezinktank waarmee ze vergeleken kan worden.

Als de drogestofbelasting van circa $12 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ de maximaal toelaatbare is, mag het drogestofgehalte in de beluchtingsruimte bij een oppervlaktebelasting van $3,6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ niet groter dan $3,3 \text{ kg}/\text{m}^3$ worden.

Het drogestofgehalte van het effluent varieert met de toegelaten oppervlaktebelasting en de slibeigenschappen. De toegepaste slibvolumebelasting kan van 0,43 oplopen tot $2,1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. Als de gemiddelde waarde van $1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ maatgevend is, wordt bij een slibgehalte in de beluchtingsruimte van $3 \text{ kg}/\text{m}^3$ en een slibindex van $0,15 \text{ m}^3/\text{kg}$ ($150 \text{ ml}/\text{g}$) de oppervlaktebelasting beperkt tot $2,2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$.

De verblijftijd van het water in het lamellenpakket ligt tussen 500 en 2000 s en is veel kleiner dan de 7000 s die voor een conventionele nabezinktank wordt aangehouden. De kengrootheid van Reynolds voor de stroming is in alle gevallen zo laag dat de stroming laminair is. De kengrootheid van Froude is in een aantal gevallen te laag om van een stabiele stroming verzekerd te zijn.

Door de oppervlaktebelasting te verhogen wordt de gewenste verhoging van de kengrootheid van Froude verkregen, terwijl tevens de kengrootheid van Reynolds toeneemt, hetgeen toelaatbaar is. Dezelfde belasting per oppervlakte van de lamellen kan gehandhaafd worden door

Tabel 2. Bedrijfsparameters voor verschillende in de praktijk toegepaste lamellenafscheiders, aangevuld met gemiddelde waarden en waarden voor een conventionele nabezinktank.

	opp	opp bel	opp bel lam	drst bel	drst geh inf	drst geh efl	slib ind	slib vol bel	verb tijd	leng te	Re	Fr ² 10 ⁻⁶
wickam, USA	3,7	3,6	0,4	7,6	2,1	30	0,07	0,55	870	1	11	11
idem	4,2	1,3-3,8	0,15-0,44	7,5-17,3	1,7-4,8	23-65	0,04-0,10	0,87	820-2520	1	4-12	1,3-12
Philomath, USA B	39	1,5-5,2	0,16-0,56	8,7-17,3	2,5	4-156	0,10-0,13	1,5	640-2220	1,07	5-16	2-20
Philomath, USA C	83	3,7-7,6	0,35-0,72	11-22	2,9	16	0,04	0,43-0,88	500-1030	1,22	12-24	11-47
Winnipeg, Canada	560	2,7	0,36	5,1	1,9	30	0,05-0,10	0,53	1900	0,61	8	6
Winnipeg clar gel	576	4	0,347	12	3	30	<0,08	0,9	380	0,61?	12	13
clar gel	576	3	0,257	13,8	4,6	30	>0,08	1,4	630	0,61?	9	8
indik gel	576	2	0,177	9	4,5	30	>0,08	0,9	950	0,61?	6	3
Ajaccio	371	3,8	0,7	-	-	30	-	-	-	-	24	7
?	9,6	6,5	0,55	21	3,3	16	<0,1	2,1	680	1,5	25	33
Gemiddeld		3,6	0,4	12	3,1			1,0	940		13	13
Conv. bezt H=2m L/H=5		1		2	2		0,15	0,3-0,4	7200		2000	0,1

clar gel oppervlakbelasting door clarificatie gelimiteerd
indik gel oppervlakbelasting door indikking gelimiteerd
opp horizontaal oppervlak (lengte x breedte) op een bepaalde hoogte van het buizen- of lamellenpakket in m²
opp bel hydraulische oppervlakbelasting, gerelateerd aan het grondoppervlak in m³/(m².h)
opp bel lam oppervlakbelasting lamellen, het debiet gedeeld door het horizontaal projecteerde oppervlak van alle lamellen in m³/(m².h)
drst bel drogestofbelasting, het drogestofgehalte van het influent vermenigvuldigd met de hydraulische oppervlakbelasting in kg/(m².h)
drst geh inf drogestofgehalte van het influent in kg/m³
drst geh efl drogestofgehalte van het effluent in g/m³
slib ind slibindex in m³/kg
slib vol bel slibvolumebelasting, de drogestofbelasting vermenigvuldigd met de slibindex in m³/(m².h)
verb tijd de verblijftijd in het buizen- of lamellenpakket in s
leng te de lengte van de lamel of buis in m
Re de kengrootheid van Reynolds bij 10°C
Fr² de kengrootheid van Froude in het kwadraat x 10⁻⁶

langere lamellen te gebruiken bij mee- of tegenstroom en bredere lamellen bij dwarsstroom. De hydraulische omstandigheden voor bezinking zijn aanmerkelijk beter dan in een conventionele nabezinktank.

4.3 Indikking

Literatuur

Volgens de theorie en tabel 2 kan het indikken van het slib, gekenmerkt door de toelaatbare drogestofbelasting, de beperking zijn voor toepassing van lamellenbezinkers. De in de literatuur gevonden opmer-

kingen over de indikking verdienen daarom in het bijzonder de aandacht.

Dick [10] stelt dat de indikking in veel gevallen maatgevend is voor de toelaatbare belasting van een conventionele nabezinktank. Wordt de oppervlaktebelasting met een factor 2 tot 4 verhoogd, bijvoorbeeld nadat in een bestaande nabezinktank lamellen aangebracht zijn, dan neemt de drogestofbelasting ook met deze factor toe. Aangezien de situatie onder de lamellen vergelijkbaar is met de situatie onderin een gewone nabezinktank, zal de toelaatbare drogestofbelasting niet hoger zijn. Misschien heeft het bezonken materiaal dat van de lamellen afkomstig is iets betere indikeigenschappen dan bezinkend slib in een nabezinktank.

De slechtere indikking kan leiden tot een lager drogestofgehalte van het retourslib, waardoor het drogestofgehalte in de beluchttingsruimte af zal nemen. Het indikkingsoppervlak is overigens naar verhouding groot, omdat de lamellen in een bestaande nabezinktank zijn aangebracht en het oorspronkelijke oppervlak voor indikking beschikbaar was.

Heckel [14] stelt dat de omstandigheden voor ongeninderde bezinking in een lamellenafscheider beter dan in een nabezinktank worden benaderd vanwege de kortere bezinkweg. Het stijgen van de slikspiegel tot in de buizen of lamellen geeft een slecht effluent.

Volgens Slechta [17] is de toelaatbare oppervlaktebelasting in een lamellenafscheider een factor 1,6 en de toelaatbare drogestofbelasting een factor 1,4 groter dan in een conventionele nabezinktank. Verslag wordt gedaan van een proefneming waarbij het hoge drogestofgehalte in het effluent werd verlaagd door een deel van de oude bezinktank in gebruik te nemen. Ook hier was en bleef het totale oppervlak van de omgebouwde nabezinktank beschikbaar voor indikking. Door het inschakelen van het oude deel werd wel de clarificatiecapaciteit maar niet de indikkingscapaciteit verhoogd. Gezien het feit dat de effluentkwaliteit na deze ingreep verbeterde, moet worden aangenomen dat de indikkingscapaciteit tijdens deze proef voldoende was.

Slechta concludeert dat een effluent met een drogestofgehalte kleiner dan 20 g/m^3 haalbaar is. De slibeigenschappen en belastingen waarmee deze kwaliteit bereikt wordt, lopen echter sterk uiteen. Met lamellenafschidders kan de effluentkwaliteit worden verhoogd bij een slecht bezinkbaar slib of grote aanvoerdebieten, mits de oppervlaktebelasting niet groter wordt dan $2,4 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ en de drogestofbelasting kleiner dan $7,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ blijft.

Girling [11] heeft proeven gedaan in een nabezinktank waarin voor een deel buiseenheden zijn aangebracht. De oppervlaktebelasting neemt toe met een factor 1,1 tot 1,25 ten opzichte van een conventionele nabezinktank. De drogestofbelasting kan een factor 1,5 groter zijn. Als de oppervlaktebelasting een factor 1,5 groter wordt gekozen, stijgt de slibdeken tot in de buizen en wordt er slib met het effluent meegevoerd.

Mendis [16] maakt op grond van de meting van bezinksnelheid en slib-index een onderscheid in drie categorieën:

- slibindex kleiner dan $0,075 \text{ m}^3/\text{kg}$ en clarificatie-limiterend;
- slibindex groter dan $0,075 \text{ m}^3/\text{kg}$ en clarificatie-limiterend;
- slibindex groter dan $0,075 \text{ m}^3/\text{kg}$ en indikking-limiterend.

De resultaten (toelaatbare belastingen) van de proeven die in deze categorieën horen zijn in tabel 2 te vinden. Als de indikking de capaciteit bepaalt, is de toelaatbare belasting van een conventionele nabezinktank even hoog als van een lamellen- of buizenafscheider. De laatste levert wel een betere effluentkwaliteit. Wordt de toelaatbare belasting overschreden, dan gaat de slibspiegel stijgen. Zodra deze de onderkant van het buizenpakket bereikt, neemt het drogestofgehalte in het effluent sterk toe. Door een grote kortsluitstroom tussen aanvoer en slibafvoer - aangetoond met behulp van tracers - is de slibspiegelstijging moeilijk door middel van een verhoging van het retourlibdebit te verminderen.

Commentaar

De stelling van Heckel [14] dat in de lamellenafscheider de omstandigheden voor gehinderde bezinking gunstig zijn, wordt door de resultaten van andere onderzoekers tegengesproken. Beneden de slibspiegel is de bezinking gehinderd. Als de slibspiegel in de ruimte onder de lamellen stijgt en de lamellen bereikt, neemt het drogestofgehalte in het effluent snel toe. De grootte van de afvoer van het bezonken slib langs de lamellen is dan mogelijkwijze de beperkende factor. De toepassing van lamellen levert in vergelijking met een conventionele nabezinktank een beter effluent op. De capaciteit van een nabezinktank wordt niet of nauwelijks verhoogd door het aanbrengen van lamellen, als de indikkingcapaciteit de beperkende factor is.

4.4 Vervuiling

Literatuur

Het toepassen van lamellen- of buizenafscidders in de afvalwaterzuivering roept onmiddellijk vragen op met betrekking tot vervuiling en mogelijk verstopping van de eenheid. De literatuur rapporteert hierover het volgende:

Culp [10] meldt dat er geen ophoping van slib is opgetreden gedurende de paar maanden dat de installatie werkte. Wel werd er op een bepaald moment een sterke algengroei geconstateerd.

Slechta [17] heeft bij dezelfde installatie wel vervuiling opgemerkt. Er komt slib in klonten bovendrijven met dezelfde vorm als de buizen (denitrificatie). Door dagelijks aan het oppervlak met een hogedrukstraal te spuiten wordt dit probleem opgelost. Daarnaast laat men het waterniveau iedere 3 tot 6 maanden tot beneden de onderkant van het buizenpakket zakken en wordt het buizenpakket schoongespoten. Bij een andere installatie is er geen vervuiling zolang het actiefslib in goede conditie (goed bezinkbaar) is. Door de lamellen in trilling te brengen kan voorkomen worden dat zich op de lamellen een laag actiefslib vormt. Als het slib slecht bezinkt en als er slib overstort, vervuilen de lamellen of buizen snel.

Tijdens de proeven die door Girling [11] zijn uitgevoerd was er sprake van enige vervuiling. Dit was geen serieus probleem, maar de proeftijd was te kort om hierover definitieve uitspraken te kunnen doen. Door de waterstand te verlagen werd het meeste vuil afgevoerd, terwijl de rest door middel van schoonspuiten goed te verwijderen was.

Commentaar

Een lamellenafscheider vergt meer onderhoud dan een conventionele nabezinktank. Zolang de slijpspiegel beneden het lamellenpakket blijft, lijkt het vervuilingsprobleem mee te vallen. De mogelijkheid om de lamelleneenheid enige tijd buiten werking te stellen en de waterstand te verlagen is essentieel voor het onderhoud.

4.5 Conclusies

- De theoretische voordelen van lamellenafschers worden in de praktijk niet waargemaakt.
- Een te hoge drogestofbelasting, die een stijgende slijpspiegel veroorzaakt, is hiervoor meestal verantwoordelijk.
- De toelaatbare drogestofbelasting van de lamellenafscheider is niet of niet veel hoger dan die van een conventionele nabezinktank.
- Bij toepassing van een lamellenafscheider is een hogere oppervlaktebelasting mogelijk, als niet de indikking (stijgende slijpspiegel) maar de clarificatie (te hoog drogestofgehalte in het effluent) de belasting beperkt.
- Als de indikking de beperkende factor is, kan met behulp van een lamellenafscheider wel een betere effluentkwaliteit, maar geen hogere oppervlaktebelasting worden bereikt.
- Het praktijkonderzoek van de STORA [1-5, 7] naar aspecten van het nabezinkproces geeft aan dat de meeste nabezinktanks in Nederland bij regenwateraanvoeren te maken hebben met een stijgende slijpspiegel veroorzaakt door een te kleine indikcapaciteit; hierdoor is het zonder meer toepassen van lamellenafschers in de Nederlandse situatie niet zinvol.
- De vervuiling van lamellenafschers zal naar verwachting geen onoverkomelijke bezwaren opleveren.

Flotatie is een scheidingstechniek waarbij deeltjes met een lagere soortelijke massa dan de omringende vloeistof worden afgescheiden. In een tank, die met een bepaald debiet wordt doorstroomd, zullen deze deeltjes onder invloed van de zwaartekracht opdrijven, in een drijf-laag vastgehouden en vervolgens verwijderd worden. Verschillende soorten deeltjes hechten zich aan kleine gasbubbelletjes. Hierdoor is het mogelijk om deeltjes te floteren die zelf een hogere soortelijke massa dan water hebben. Met behulp van flotatie is het mogelijk om verschillende mineralen te scheiden op grond van hun hechtings-eigenschappen aan gasbellen.

In de afvalwaterzuiveringstechniek wordt flotatie voornamelijk gebruikt voor het indikken van spuislib van actief-slibinstallaties. Deze toepassing wordt in de literatuur uitgebreid belicht. Een overzicht hiervan en de algemene principes van flotatie zijn in het literatuuronderzoek met betrekking tot slibindikking [33] van de STORA te vinden. Er wordt in hoofdzaak gekeken naar het drogestofgehalte dat in de drijf-laag bereikt kan worden. Het drogestofgehalte in het effluent is minder van belang aangezien dit de afvalwater-zuiveringsinrichting nogmaals passeert.

In de literatuur is aanmerkelijk minder te vinden over toepassing van flotatie in plaats van nabezinking in het actief-slibproces. Het drogestofgehalte in het effluent is nu van belang. Het drogestofgehalte in de drijf-laag is alleen belangrijk voor de grootte van het slibretourdebiet en het maximaal in de beluchtingsruimte te bereiken drogestofgehalte. Een deel van de literatuur betreft de toepassing van flotatie als derde zuiveringstrap (na conventionele bezinking). Ingegaan wordt op de theorie en praktijk van flotatie. De literatuur betreffende slib/waterscheiding door middel van flotatie passeert kort de revue. De belangrijkste afmetingen en procesparameters uit de literatuur worden in een tabel samengevat. Na commentaar op de resultaten uit de literatuur wordt besloten met een vergelijking tussen nabezinking en flotatie en een aantal conclusies.

5.1 Theorie

Actief-slibvlokken hebben afmetingen van 10 tot 5000 μm en vallen bij geringe mechanische krachten uiteen in vlokken kleiner dan 100 μm , zie Jedele [26]. De soortelijke massa van de slibvlokken ligt omstreeks 1070 kg/m^3 . Het gebruik van gasbubbelletjes om de soortelijke massa van de vlokken kleiner dan 1000 kg/m^3 te krijgen is noodzakelijk.

Het hechtingsmechanisme tussen gasbel en slibdeeltje is bij actief-slib anders dan bij mineraaldeeltjes. Actiefslib heeft een kleiner hechtoppervlak, is sterk hydrofiel en is net als de gasbellen negatief geladen. De hechting komt tot stand doordat gasbellen ingevangen worden in bestaande actief-slibvlokken of ingebouwd worden in zich vormende, grotere, actief-slibvlokken. Dit is alleen mogelijk als de gasbellen niet groter dan 100 μm zijn.

Flotatie met ingeblazen lucht kan niet toegepast worden, omdat de gasbellen groter dan 1 mm zijn. Vacuümflotatie, elektroflotatie en ontspanningsflotatie leveren wel de vereiste kleine gasbellen op.

Bij vacuümflotatie wordt met lucht onder atmosferische druk verzadigd

water plotseling onder een lagere druk gebracht. Het water raakt hierdoor oververzadigd en er ontstaan zeer kleine luchtbelletjes. Het drukverschil is ten hoogste 100 kPa (1 atm). Voor flotatie van actiefslib is de hoeveelheid vrijkomende lucht, die van het drukverschil afhangt, te klein voor een goede werking.

Bij elektroflotatie wordt water door middel van elektrolyse ontleed in waterstof en zuurstof. Er ontstaan genoeg kleine belletjes, maar nadelen zijn: het vrijkomen van knalgas en het ontstaan van stoffen die nadelig voor actiefslib zijn (zoals organochloorverbindingen en zuurstofradicalen).

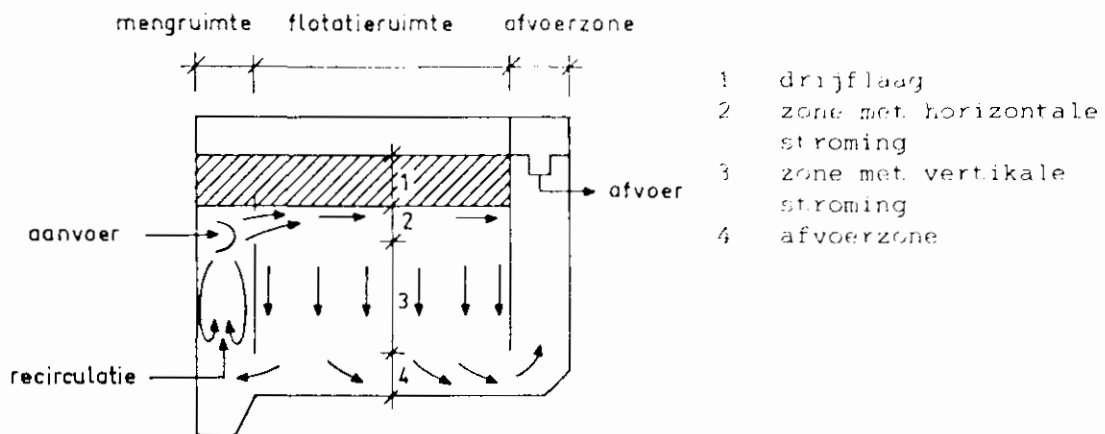
Het gevolg is dat vrijwel uitsluitend ontspanningsflotatie ("dissolved air flotation") wordt toegepast. Dit is te vergelijken met vacuümflotatie. Water, in het algemeen effluent van de flotatie-eenheid, wordt onder een druk van 500 kPa (5 atm) met lucht verzadigd. Volgens Bratby [20] kan dit efficiënt gebeuren in een tank met daarin een gepakt bed bestaande uit "Raschig" ringen met een diameter van 25 mm. De afmetingen van de gasbellen hangen af van de druk waarbij belucht is. Het verzadigde water (de recirculatiestroom) wordt onder atmosferische druk in de flotatie-eenheid gemengd met het slib-watermengsel uit de beluchtingsruimte.

Voor het uittreden van de gasbellen en de vorming van de vlokken is een bepaalde hoeveelheid energie (turbulentie) nodig. Vaak is de energie ten gevolge van het mengen en instromen in de tank voldoende. Te veel energie leidt tot beschadiging van de vlokken en daarmee tot een troebel effluent.

In de flotatieruimte moeten de opdrijvende deeltjes voldoende tijd hebben om het oppervlak te bereiken. Het effluent gaat onder een duikschot door en vervolgens over een overstortrand. Met de hoogte van de overstortrand kan de instelling van de vast aangebrachte drijfslaagruimer worden aangepast. Meestal is ook een slibruimer aangebracht om bezonken deeltjes te verwijderen. In figuur 3 is een dwarsdoorsnede van een flotatie-eenheid weergegeven.

De werking van de flotatie-eenheid hangt af van een groot aantal parameters. De werking kan afgemeten worden aan het drogestofgehalte in het effluent en het drogestofgehalte in de drijfslaag.

Van invloed is de gewichtsverhouding van de hoeveelheid lucht en de hoeveelheid droge stof. Deze hangt af van de druk tijdens het beluch-



Figuur 3. Dwarsdoorsnede van een flotatie-eenheid [26].

ten, de grootte van de recirculatiestroom en het drogestofgehalte van de aanvoer. De wijze waarop de drukval plaatsvindt, is van belang voor een efficiënte werking.

De effluentkwaliteit wordt beïnvloed door de hydraulische belasting, de drogestofbelasting en, vanwege het flocculente karakter van het slib, de verblijftijd in de flotatieruimte. Het al dan niet toevoegen van chemicaliën is niet alleen van invloed op de effluentkwaliteit, maar ook op het drogestofgehalte van de drijfslaag. Het laatste gehalte hangt ook af van de verblijftijd in de drijfslaag, de eigenschappen van het actiefslib (zoals de slibindex) en de werking van de drijfslaagruimer.

5.2 Praktijk

De belangrijkste gegevens over flotatie-installaties zijn in tabel 3 samengevat. De installaties zijn ingedeeld in proefinstallaties en praktijkinstallaties, die allebei in plaats van een nabezinktank gebruikt worden, en proefinstallaties die het effluent van een nabezinktank zuiveren. Na een korte bespreking van de resultaten per installatie worden de resultaten van commentaar voorzien.

5.2.1 Proefinstallaties met vervanging van de nabezinking

Gehr [25] heeft naast "batch"-proeven ook onderzoek gedaan met behulp van een proefinstallatie. Het actiefslib was afkomstig uit een laagbelaste installatie en een oxydatiesloot. Het gebruik van polyelektrolyten als vlokmiddel is noodzakelijk. Dit niet alleen vanwege de effluentkwaliteit, maar ook vanwege het handhaven van de stabiliteit van het flotatieproces. Het effluent bij gebruik van slib van de oxydatiesloot is van betere kwaliteit dan bij de laagbelaste installatie.

Door de firma Krofta [28] worden flotatie-eenheden gemaakt met een maximale diameter van 17 meter. Er wordt een speciale verdeelinrichting voor het influent toegepast, die met dezelfde snelheid terugdraait als waarmee het water wordt ingelaten. Daarnaast wordt een soort scheppen gebruikt om de drijfslaag te verwijderen.

Voorgesteld wordt om bij overbelaste actief-slibinstallaties de flotatie-eenheid tussen beluchtingsruimte en nabezinktank aan te brengen. Vooral in geval van licht slib wordt dit aanbevolen. Het gebruik van polyelektrolyten heeft voornamelijk invloed op de effluentkwaliteit. De bedrijfskosten bij toepassing van een flotatie-eenheid in plaats van nabezinking zijn hoger, maar de kapitaalkosten zijn lager.

In het "deep shaft" proces wordt flotatie soms als scheidingstechniek toegepast. Aanvankelijk waren de resultaten slecht ten gevolge van het hoge drogestofgehalte in het effluent. Meestal werd daarom overgegaan op afgassen en nabezinking. In Canada wordt flotatie wel met succes toegepast [21].

Door Weber [35] worden de resultaten weergegeven van het toepassen van een proefinstallatie bij overbelaste afvalwaterzuiveringsinrichtingen. Deze zuiveringsinrichtingen zijn gedurende korte tijd, de wijnoogst, overbelast. Er wordt een flotatie-eenheid van de firma Krofta gebruikt die op drie manieren kan worden toegepast: in plaats

van een tussenbezinkbassin naar nabezinkbassin of parallel aan (in plaats van) de nabezinkbassin. In laatste twee gevallen worden tijdens de campagne geen afwijkingen waargenomen, vermomd in effluentkwaliteit.

Onder normale belastingen wordt de afvoer van de zuiverende eenheden in staat zonder gebruik van de afvoer van de nabezinkbassin te worden gehouden en daarbij een goede effluentkwaliteit te behouden.

In het proefschrift van de toelating van de resultaten te vinden van onderzoek naar de toepassing van filtratie in plaats van nabezinking. Het doel van het onderzoek was het vaststellen van de maatgevende procesvariabelen en de wijze waarop met deze variabelen de goede effluentkwaliteit verlanpt wordt. De resultaten "laten" proeven zijn er ook proeven gedaan met een deel van de proefinstallaties.

Uit het onderzoek blijkt dat met het gebruik van de afvoer van de zuiverende eenheden kleiner is als er een lagere oppervlaktebelasting (of drogestofbelasting) wordt toegepast en dat de slijbindex hoger is. Het drogestofgehalte in de drijflaag is hoger wanneer de oppervlaktebelasting (of drogestofbelasting) lager is, dan ook als de slijbindex lager is. De drijflaag wordt verrijpt door de belastingen de laagste oppervlaktebelasting is te verrijpt door de verrijking onder te maken dan de 0,015 kg lucht/kg drogestof, die in verband met de te bereiken

Tabel 3. Bedrijfsparameters van de afvoer van de zuiverende eenheden
gevonden in de praktijk

	opp	opp bel	ds bel	ds inf	ds efl	ds dri	A/S	slijb ind	poly elek
proefinstallatie in plaats van nabezinking									
Gehr									
laagbelast a.s	0,9	4,9	10,5	1,0	1,0	27	0,020		1,5
oxydatiesloot	0,9	6,5	10,5	1,0	1,0	39	0,025		0,9
Krofta									
petroch.ind.	1,2	6,5	10,5	1,0	1,0	22			
Haltern WD	2,5	4,7	10,5	1,0	1,0	27	0,030	0,10	
papierfabriek	0,9	5,4	10,5	1,0	1,0	11			
Weber	2,5	4,7	10,5	1,0	1,0	14			
Jedele	0,7	3,2	10,5	1,0	1,0	27	0,015	0,05-0,1	<10
	0,7	3,2	10,5	1,0	1,0	19	0,015	0,1-0,2	
	0,7	3,2	10,5	1,0	1,0	14	0,015	0,2-0,3	
Engwirda	7	4	10,5	1,0	1,0		0,020		
praktijkinstallatie in plaats van nabezinking									
Mulbarger	257	10,5	10,5	1,0	1,0	10	0,020	0,05	
proefinstallatie na nabezinking									
Parson	1,0	10,5	10,5	1,0	1,0	10	0,020	0,17	
	1,0	10,5	10,5	1,0	1,0	6	0,020	0,17	7,5
Maddock	1,0	10,5	10,5	1,0	1,0	25			
	1,0	10,5	10,5	1,0	1,0	10			

- opp is oppervlak van de filteroppervlakte
- opp bel is de oppervlaktebelasting in kg drogestof/m²oppervlakte/dag
- ds bel is de drogestofbelasting in kg drogestof/m³oppervlakte/dag
- ds inf is het drogestofgehalte in het infuyswater in kg drogestof/m³oppervlakte/dag
- ds efl is het drogestofgehalte in het effluent in kg drogestof/m³oppervlakte/dag
- ds dri is het drogestofgehalte in de drijflaag in kg drogestof/m³oppervlakte/dag
- A/S is de verhouding van de oppervlaktebelasting tot de drogestofbelasting
- slijb ind is de slijbindex in mg/l
- poly elek is de hoeveelheid polypropyleen die wordt toegevoegd aan de drijflaag

ken effluentkwaliteit noodzakelijk is. Om bij een bepaalde effluentkwaliteit de maximale oppervlaktebelasting te bereiken, moet het drogestofgehalte van de aanvoer omstreeks 2 kg/m^3 liggen. Als het drogestofgehalte in de beluchtingsruimte hoger is, kan dit bereikt worden door een deel van het effluent van de flotatie-eenheid te recirculeren.

Aanbevelingen worden gedaan voor de lengte, breedte en hoogte van de flotatieruimte.

Wordt voor een actief-slibinstallatie, belast met 100.000 inwoner-equivalenten, een kostenvergelijking voor flotatie en nabezinking gemaakt, dan blijkt dat het toepassen van flotatie economischer is bij een slibindex groter dan $0,175 \text{ m}^3/\text{kg}$ (175 ml/g). Hierbij is geen rekening gehouden met de besparing op slibverwerking bij flotatie ten gevolge van het hogere drogestofgehalte van het spuislib. Wordt dit verschil wel meegerekend dan is flotatie bij slibindices boven $0,125\text{--}0,150 \text{ m}^3/\text{kg}$ goedkoper dan nabezinking.

Engwirda [23, 24] heeft onderzoek gedaan naar flotatie als onderdeel van een compacte actief-slibinstallatie, de zogenaamde multireactor. Het betreft onderzoek aan een proefinstallatie en een prototype van een praktijkinstallatie, waarvan afmetingen en capaciteit niet exact bekend zijn.

De beluchtingsruimte bestaat uit twee concentrische verticale schachten van ongeveer 20 m diep, enigszins te vergelijken met een deepshaft installatie. Het slib-watermengsel stroomt tussen buiten- en binnenschacht naar beneden en door de binnenschacht naar boven. Door de hogere druk is het zuurstofgehalte in de beluchtingsruimte hoger dan in een conventionele beluchtingstank.

Tijdens het naar boven stromen neemt de druk af, waardoor het water met lucht oververzadigd raakt. In principe moeten zich luchtbelletjes in het actiefslib of met actiefslib als nucleatiekern vormen. Het slib wordt dan in de boven de beluchtingsruimte gelegen flotatie-eenheid afgescheiden. Doordat het vormen van deze belletjes niet snel genoeg gaat, is de afscheiding slecht. Door de turbulentie te verhogen en onder hoge druk met lucht verzadigd water bij te mengen, was wel een goede slib/waterscheiding mogelijk.

5.2.2 **Praktijkinstallatie waarin de nabezinking is vervangen**

Door Mulbarger [30] is onderzoek gedaan aan een praktijkinstallatie met een capaciteit van $0,03 \text{ m}^3/\text{s}$ ($95 \text{ m}^3/\text{h}$). Het slib heeft goede bezinkeigenschappen. In plaats van de verhouding lucht/drogestof wordt een nieuwe parameter ingevoerd, bestaande uit de lucht/drogestofverhouding gedeeld door het produkt van de dynamische viscositeit van de vloeistof en de oppervlaktebelasting van de flotatie-eenheid. Deze parameter zou de werking van de flotatie-eenheid beter beschrijven.

Er wordt een kostenvergelijking gemaakt tussen slib/waterscheiding door middel van flotatie, wat direct spuislib met een hoog drogestofgehalte oplevert, en nabezinking gevolgd door indikking van het spuislib door middel van flotatie. Alléén flotatie blijkt ongeveer twee keer zo duur te zijn.

5.2.3 **Proefinstallaties na de nabezinking**

Door Parsons [31] is onderzocht in hoeverre door middel van flotatie effluent van een nabezinktank te zuiveren is. Hierbij is gebruik gemaakt van een flotatie-eenheid waarin lamellen voor een stabiele

stroming zorgen. Zonder toevoeging van polyelektrolyten is het mogelijk om stootbelastingen van droge stof op te vangen, echter er is nauwelijks een verlaging van het gemiddelde drogestofgehalte van het effluent. Door polyelektrolyten te gebruiken wordt het beter mogelijk om zowel stootbelastingen op te vangen als het totale drogestofgehalte in het effluent te verlagen.

Maddock [29] heeft onderzoek gedaan aan een proefinstallatie, die effluent van een nabezinktank zuiverde. Dit effluent bevatte een hoog gehalte aan droge stof (100 g/m^3). Vanwege de hoge bedrijfskosten moet de installatie automatisch in werking treden als de kwaliteit van het effluent slecht is.

Het drijfslaagruimmechanisme (kettingruimer) bleek niet te voldoen. Door de drijfslaagruiming verminderde de effluentkwaliteit aanzienlijk. Een gewijzigde versie voldeed evenmin, zodat een andere methode van slibruiming moet worden toegepast. Een drogestofgehalte van 15 g/m^3 in het effluent is te bereiken. Het verlagen van dit gehalte door het toevoegen van een aluminiumzout of een kationische polyelektrolyt is financieel onaantrekkelijk. Voor het verlagen zijn zeer hoge doseringen van polyelektrolyt noodzakelijk.

5.2.4 Commentaar

De door Krofta [28] voorgestelde plaatsing van de flotatie-eenheid tussen beluchtingsruimte en nabezinktank lijkt minder gelukkig. Deeltjes, die zich aan een klein luchtbelletje hechten en daardoor net blijven zweven, zullen zowel de flotatie-eenheid als de nabezinktank passeren. Net als bij deep-shaftinstallaties gebruikelijk is, zal een ontgassingsinstallatie voor de nabezinktank geplaatst moeten worden.

Door een hoger drogestofgehalte in de beluchtingsruimte toe te passen kan de beluchtingsruimte, uitgaande van een gelijke zuiveringscapaciteit, kleiner gedimensioneerd worden. Dit maakt het toepassen van flotatie goedkoper dan Jedele [26] en Kiefhaber [27] berekend hebben.

Volgens Mulbarger [30] is nabezinking goedkoper dan flotatie. Voor deze uitkomst kan een aantal oorzaken worden genoemd. Er werd goed bezinkbaar slib gebruikt, waardoor in de nabezinktank een hoge oppervlaktebelasting ($1,6 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$) toegepast kon worden. Goed bezinkbaar slib is minder goed floteerbaar. In de flotatie-eenheid werd een veel lagere oppervlaktebelasting en drogestofbelasting toegepast dan mogelijk is. De flotatie-eenheid is hierdoor onnodig groot en duur. De drijfslaagruiming was niet optimaal.

Voor de werking van de flotatie-eenheid is een goed drijfslaagruimmechanisme van belang. Een kettingruimer is volgens Maddock [29] niet geschikt. Door Krofta [28] en Jedele [26] worden alternatieve systemen gebruikt, die kennelijk goed voldoen.

Over het gebruik van chemicaliën, zoals polyelektrolyten, bestaat verschil van mening. Zo is het gebruik volgens Gehr [25] absoluut noodzakelijk en is er volgens Maddock [29] geen positief effect merkbaar, tenzij zeer hoge doseringen worden toegepast. Volgens Weber [35] en Jedele [26] is flotatie zonder gebruik van chemicaliën mogelijk. De verschillen in bevindingen zijn mogelijk te wijten aan verschil tussen de flotatie-installaties en verschil in eigenschappen van het slib.

De efficiëntie van flotatie is te verhogen door lamellen aan te brengen [32, 34].

Het gebruik van gassen, die beter in water oplossen dan lucht, zoals zuurstof en kooldioxyde, maken het mogelijk om efficiënter gas op te lossen. Flotatie wordt daardoor goedkoper, zie Conway [22].

Doordat flotatie-indikking effluent met een hoog drogestofgehalte opleverde, heeft lang de mening geheerst dat het onmogelijk was om met flotatie een goed effluent te verkrijgen. Eerder is al gesteld dat de optimalisatie bij indikking zich in de eerste plaats richt op het verkrijgen van een hoog drogestofgehalte in de drijfslaag. De resultaten van Jedele [26], Weber [35] en Engwirda [23, 24] geven aan dat het mogelijk is om met flotatie een goede effluentkwaliteit te bereiken.

5.3 Vergelijking van flotatie en nabezinking

Flotatie is een actief proces met als voordeel dat het proces beter beheersbaar is. De luchtinbreng en de recirculatie kunnen aan de omstandigheden aangepast worden. Nadelen van een actief systeem zijn de kwetsbaarheid, de moeilijke bediening en de hogere bedrijfskosten. Ook wordt de gevoeligheid voor storingen als nadeel genoemd, hoewel flotatie-indikking in het algemeen betrouwbaar werkt [33].

Bij flotatie wordt een hoog drogestofgehalte in het retour- en spuislib bereikt. Hierdoor kan het retourslibdebiet kleiner zijn en kan er, door het kleinere spuidebiet, bespaard worden op de hydraulische capaciteit van de slibverwerking. Verder is het mogelijk om in de beluchtingsruimte een hoger drogestofgehalte te handhaven.

Zowel retourslib als effluent hebben bij flotatie een hoog zuurstofgehalte. Het retourslib wordt bovendien vrij snel teruggevoerd naar de beluchtingsruimte. De activiteit van het retourslib is naar verwachting groter dan bij nabezinking waar het slib enige tijd zuurstofloos is.

Het hoge drogestofgehalte in de drijfslaag en het hoge zuurstofgehalte maken het bufferen van slib gemakkelijker. Er is een kleiner tankvolume nodig om een bepaalde hoeveelheid slib (als massa) te bergen. Het hogere zuurstofgehalte maakt het mogelijk om langer te wachten met het terugvoeren naar de beluchtingsruimte.

Bij flotatie is de slib/waterscheiding makkelijker en goedkoper naarmate de slibindex hoger is. Bij bezinking is de scheiding juist moeilijker en duurder bij een hoge slibindex. Bij een slibindex omstreeks $0,15 \text{ m}^3/\text{kg}$ (150 ml/g) is het toepassen van flotatie en nabezinking even duur. Boven deze waarde is het toepassen van flotatie goedkoper [26].

De effluentkwaliteit die bij flotatie of nabezinking bereikt wordt hangt (mede) af van de slibindex. Bij waarden omstreeks $0,15 \text{ m}^3/\text{kg}$ zal er weinig verschil in effluentkwaliteit zijn.

Bij flotatie zijn hogere oppervlaktebelastingen mogelijk dan bij nabezinking. Een flotatie-eenheid kan daarom kleiner dan een nabezinktank gedimensioneerd worden.

Flotatie is vrijwel nooit op praktischschaal toegepast als alternatief voor nabezinking.

Als voorbeeld wordt de oppervlaktebelasting van een nabezinktank en een flotatie-eenheid bepaald, uitgaande van een slijbindex van $0,15 \text{ m}^3/\text{kg}$ (150 ml/g).

Voor de nabezinktank wordt de STOKA-richtlijn [3] gebruikt, die uitgaat van een maximaal toelaatbare slijbvolumebelasting. De toelaatbare oppervlaktebelastingen voor de flotatie-eenheid zijn met de gegevens van Jedele [26] bepaald. Hierbij is de toelaatbare drogestofbelasting $9,1 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$. De resultaten voor drogestofgehalten in de beluchtingsruimte van respectievelijk 2, 4, 6, en $8 \text{ kg}/\text{m}^3$ zijn in tabel 4 samengevat. De toelaatbare oppervlaktebelasting is bij flotatie 3 tot 5 maal zo groot als bij nabezinking.

De effluentkwaliteit is bij nabezinking misschien iets beter.

Tabel 4. De toelaatbare oppervlaktebelasting in $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ bij toepassing van flotatie en nabezinking voor verschillende drogestofgehalten in de beluchtingsruimte. Verhouding van de toelaatbare oppervlaktebelasting bij toepassing van flotatie en nabezinking.

drogestofgehalte in de beluchtingsruimte, kg/m^3	2	4	6	8
flotatie	4,55	2,28	1,52	1,14
nabezinking	1,00	0,67	0,44	0,33
verhouding flotatie/nabezinking	4,6	3,4	3,5	3,5

5.4 Conclusies en aanbevelingen

Flotatie lijkt technisch gezien een alternatief voor nabezinking. De economische haalbaarheid van flotatie hangt af van de eigenschappen van het gebruikte actiefslib, met name van de slijbindex.

De toepassing van flotatie in plaats van nabezinking bevindt zich nog in het proef-stadium. Aanbevolen wordt om de economische haalbaarheid van flotatie te onderzoeken en daarna of daarnaast onderzoek op semi-technische en praktischschaal uit te voeren.

Bij het laatste onderzoek moet aan de orde komen:

- de te bereiken effluentkwaliteit;
- het vermogen om slib te bufferen (in verband met regenwateraanvoeren);
- de gevoeligheid voor overbelasting (in verband met regenwateraanvoeren);
- de noodzaak van dosering van poly-elektrolyten;
- de hogere bedrijfskosten tegenover de mogelijk lagere investeringskosten, waarbij rekening moet worden gehouden met de mogelijke besparing op de slibverwerking en de verkleining van de beluchtingsruimte.

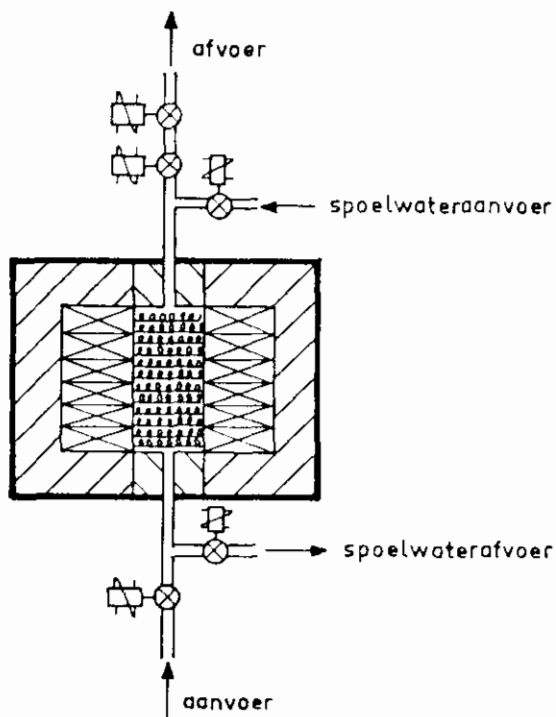
Het scheiden van stoffen op grond van hun magnetische eigenschappen wordt al lang toegepast. Het betreft dan stoffen met sterk magnetische eigenschappen (ferromagneten). Door de ontwikkeling van magnetische separatoren met een groter verloop van de magnetische veldsterkte (bijvoorbeeld de High Gradient Magnetic Separator - HGMS) werd het mogelijk om ook zwak magnetische materialen (paramagneten) te scheiden.

Als paramagnetische deeltjes, zoals magnetiet, zich binden aan vuildeeltjes in (afval-)water is het mogelijk om het water met behulp van magnetische scheiding te zuiveren.

In dit hoofdstuk komt de theorie van magnetische scheiding aan de orde. De mogelijke toepassingen op het gebied van de afvalwaterzuivering en met name de scheiding van actiefslib en effluent worden behandeld. Het hoofdstuk wordt besloten met een aantal conclusies.

6.1 Theorie

In figuur 4 is schematisch een magnetische scheidingsinstallatie weergegeven. Het apparaat bestaat uit een tank met aan- en afvoertleidingen. Om de tank is een elektromagneet aangebracht, die binnen de tank voor een sterk, min of meer homogeen, magneetveld zorgt. In de tank is een matrix van ferromagnetisch materiaal aangebracht, bestaande uit staalwol. Onder invloed van het magneetveld wordt het staalwol gemagnetiseerd. Vlakbij een draad van het staalwol heerst een sterkere veldsterkte dan ver van een draad. Er is dus een sterk verloop van het magneetveld over een kleine afstand: een grote gra-



Figuur 4. High gradient magnetic separator - HGMS [51].

diënt (High Gradient Magnetic Separator, HGMS). Dit verloop is vlak-bij de draad het grootst.

Door de tank stroomt een vloeistof met daarin paramagnetische deeltjes. De deeltjes worden door het veld gemagnetiseerd en gaan zich als kleine magneetjes gedragen. In een homogeen magnetisch veld is de kracht op de zuidpool even groot maar tegengesteld gericht aan de kracht op de noordpool. De nettokracht op het magneetje is dan nul.

Als de magnetische veldsterkte over de lengte van het magneetje verloopt zal de kracht op de noordpool groter (of kleiner) zijn dan de kracht op de zuidpool. Op het magneetje wordt netto een kracht uitgeoefend. Deze kracht is gericht in de richting van een toenemende veldsterkte (richting van de draad).

Behalve een magnetische kracht werken op het deeltje de zwaartekracht en de visceuze kracht ten gevolge van de vloeistofstroming. Afhankelijk van de grootte van deze krachten zal het deeltje aan het staaldraad "plakken" of met de vloeistof meegevoerd worden.

Van invloed zijn:

- de grootte van de magnetische veldsterkte;
- de matrix (zoals de diameter van de staaldraad);
- de magnetische eigenschappen van het deeltje;
- de afmetingen van het deeltje;
- de soortelijke massa van het deeltje;
- de stroomsnelheid van de vloeistof.

Nadat een bepaald volume water de installatie is gepasseerd, moet de matrix gereinigd worden om verstopping of doorslaan van deeltjes te voorkomen. Het magnetische veld wordt uitgeschakeld waardoor de matrix (vrijwel) niet meer magnetisch is en de deeltjes niet meer gemagnetiseerd worden. De aantrekkingskrachten tussen magnetische deeltjes en matrix zullen na het uitschakelen veel kleiner zijn. Door terugspoelen kunnen de deeltjes verwijderd worden. Voor het terugspoelen wordt een deel van het effluent gebruikt.

Met HGMS is het mogelijk om kleine magnetische deeltjes (bijvoorbeeld magnetiet (Fe_3O_4) met een korrel diameter van 1-10 μm) bij een hoge oppervlaktebelasting (ongeveer $0,1 m^3/(m^2.s)$, dit is $360 m^3/(m^2.h)$) te verwijderen.

Men kan een onderscheid maken tussen directe en indirecte magnetische scheiding. Bij directe scheiding zijn de deeltjes die verwijderd moeten worden zelf magnetisch. Bij indirecte scheiding zijn de deeltjes die verwijderd moeten worden zelf niet magnetisch, maar hechten ze zich aan deeltjes die dat wel zijn. Als magnetische kiem ("magnetic seeding") wordt vaak magnetiet gebruikt.

Het is ook mogelijk magnetische deeltjes af te scheiden zonder een matrix te gebruiken. De vormgeving van de tank en de plaatsing van de magneet zijn dusdanig dat in de tank een verloop van de magnetische veldsterkte (gradiënt) ontstaat. Men kan van een "Open Gradient Magnetic Separator" spreken.

Met een dergelijke installatie is het mogelijk om continu magnetische deeltjes ter plaatse van de hoogste gradiënt en niet-magnetische deeltjes ter plaatse van de laagste gradiënt af te tappen. Dit kan zonder dat het magneetveld uitgeschakeld en het filter teruggespoeld wordt. De gradiënten die op deze wijze bereikt kunnen worden, zijn bij gelijke magnetische veldsterkte veel kleiner dan bij gebruik van een matrix (HGMS).

Voor het opwekken van het magneetveld kunnen conventionele elektromagneten gebruikt worden. Aangezien het magneetveld niet in- en uitgeschakeld hoeft te worden, zijn permanente magneten ook geschikt. Daarnaast zijn supergeleidende magneetsystemen bruikbaar, waarmee grote magneetvelden opgewekt kunnen worden. In- en uitschakelen van dergelijke magneten moet bij voorkeur voorkomen worden.

Voor zover nu bekend wordt deze scheidingsmethode nog niet in de praktijk toegepast.

6.2 Praktijk

In de praktijk wordt HGMS toegepast voor de verwijdering van titaandioxyde uit kaolienklei. Kaolienklei wordt in de papierindustrie gebruikt om papier te coaten, waarvoor de verwijdering van het gekleurde titaandioxyde noodzakelijk is. HGMS is overwogen, maar nog niet in de praktijk toegepast voor de (gedeeltelijke) ontzwaveling van steenkool door verwijdering van pyriet (FeS_2), en voor de zuivering van met ijzeroxyden vervuild proceswater van de staalindustrie. In al deze gevallen gaat het om directe scheiding van magnetische deeltjes.

De mogelijkheid om HGMS toe te passen bij de waterzuivering wordt voor het eerst aangetoond door De Latour [44, 45]. Na het doseren van magnetiet en een vlokmiddel (aluminiumzout) kunnen met HGMS humus (kleur), gesuspendeerde deeltjes (troebeling), bacteriën (*E.coli*) en orthofosfaat verwijderd worden.

Deze resultaten worden aangevuld en bevestigd voor:

- humus en gesuspendeerde deeltjes [37];
- (darm-)bacteriën [49, 50];
- fosfaat [38];
- algen [40, 43];
- virussen (*E.coli*-bacteriofaag en poliovirus) [39, 41];
- zuurstofverbruikende stoffen [36];
- zware metalen [36];
- actiefslib [42, 54].

In het algemeen worden zuiveringsrendementen van 90 % bereikt na het doseren van tenminste kiemmateriaal (magnetiet) en meestal van vlokmiddel (aluminiumzout of ijzer(III)zout) en/of vlokhulpmiddel (poly-elektrolyt). Doordat het mogelijk is om kleine deeltjes efficiënt te verwijderen, kan de vlokvormingstijd kort zijn (3 minuten).

Door Faseur [42] is magnetische scheiding toegepast op actiefslib. De proeven werden uitgevoerd in een bezinkruimte met een volume van 0,5 liter, die in een magnetisch veld met lage veldsterkte van 0,04 tot 0,4 Tesla ("open gradient separator") was geplaatst.

Actiefslib hecht zich goed aan magnetische deeltjes (magnetiet). Er werd 0,001 kg magnetiet per kg droge stof gedoseerd.

Magnetische scheiding werd vergeleken met conventionele nabezinking.

De volgende voordelen worden genoemd:

- een ongeveer driemaal zo groot gebied;
- een drogestofgehalte in het retourslib die een factor 1,7 hoger is (15 in plaats van 9,6 kg/m³);
- een oppervlaktebelasting die tweemaal zo groot is (2,3 in plaats van 1,15 m³/(m².h));
- een halvering van de zuurstofverbruikende stoffen (BZV) in het effluent.

Bovendien zouden de exploitatie- en kapitaalkosten voor een installatie van 10.000 inwoner-equivalenten bij toepassing van magnetische scheiding lager zijn dan bij conventionele nabezinking. Behalve aan de kleinere afmetingen zou dit te danken zijn aan het feit dat de lage veldsterkte met permanente magneten kan worden opgewekt.

Door TNO [53] is in opdracht van Emit-Nymegen, fabrikant van onder andere supergeleidende magneten met een veldsterkte van 5 Tesla, een haalbaarheidsonderzoek verricht naar de toepassing van hoge gradiënt magnetische separatie.

De toepassingsmogelijkheden zijn onderverdeeld in drie categorieën: kansrijk, redelijk kansrijk en minder kansrijk. Dit is gedaan mede op grond van literatuuronderzoek, waarbij technische en economische overwegingen meespeelden. Op het gebied van de afvalwaterzuivering wordt de verwijdering uit effluent van zwevende stof, fosfaten en zware metalen als kansrijk bestempeld (zie ook Oder [52]).

Redelijk kansrijk zijn:

- afscheiding van colloïdale en gesuspendeerde deeltjes uit stedelijk afvalwater of overstortwater (zie ook Allen [36]);
- afscheiding van actief-slibvlokken uit effluentstromen van stedelijke afvalwaterzuiveringsinrichtingen;
- verwijdering van zware metalen uit voorbezonden afvalwater ten behoeve van een betere effluent- en slibkwaliteit.

Toepassing van magnetiet en HGMS bij slib op drager zuiverings-systemen wordt minder kansrijk genoemd.

Voor de verwijdering van gesuspendeerde deeltjes en humus uit grondwater is een proefinstallatie toegepast door Anderson [37] met een capaciteit van 0,001 m³/s (3,6 m³/h).

Door een aantal onderzoekers is gekeken of het kiemmateriaal meer dan eens te gebruiken is [37, 46-48]. Het bleek mogelijk om het materiaal zonder schoonmaken enkele malen door de installatie te voeren zonder dat de waterzuiverende werking veel verminderde. Na verloop van tijd is schoonmaken noodzakelijk. Dit kan mechanisch waarbij gebruik kan worden gemaakt van onder andere hydrocyclonen, ultrasone technieken en HGMS. Door het zo nu en dan reinigen met behulp van een base [37] of een zuur [46-48] wordt het aantal hergebruik-cyclussen verhoogd. Of dit ook geldt bij zeer hoge drogestofgehalten, zoals die in actief-slibinstallaties heersen, is onbekend.

Over de hechting van actiefslib aan magnetiet is weinig bekend. Volgens Faseur [42] is de hechting voldoende om bij lage magnetische gradiënten actiefslib/magnetietvlokken te verwijderen.

Wang [55] maakt gebruik van hechting van actiefslib aan magnetiet om spuislib in te dikken.

Of de hechting voldoende groot is om bij hogere magnetische gradiën-

ten en hoge waterstroomsnelheden slib van water te scheiden, is niet bekend. Ook de invloed van vlokmiddelen en vlokhulpmiddelen hierop is onbekend.

Er is weinig bekend over de invloed van magnetiet op de slibverwerking. In principe is het mogelijk om magnetietdeeltjes uit (ingedikt) slib te verwijderen en opnieuw te gebruiken.

6.3 Conclusies en aanbevelingen

- Zolang de gradiënt van het magnetische veld en de waterstroomsnelheid niet te groot zijn, lijkt de hechting van actiefslib aan magnetiet (of een ander magnetisch materiaal) groot genoeg.
- Magnetische scheiding van actiefslib en effluent is dan technisch mogelijk, waarbij permanente magneten gebruikt kunnen worden.
- De toelaatbare oppervlaktebelasting is groter dan bij een conventionele nabezinktank, de investeringen zijn relatief laag.
- Het is onduidelijk of de hechting tussen magnetiet (of een ander magnetisch materiaal) en actiefslib groot genoeg is om bij hogere magnetische veldsterkten (hogere gradiënten) en waterstroomsnelheden actiefslib en effluent te scheiden.
- De invloed van vlokmiddelen of vlokhulpmiddelen op deze hechting is niet bekend.
- Is de hechting groot genoeg, dan kunnen supergeleidende magneten en/of HGMS worden toegepast, waarmee hogere oppervlaktebelastingen te bereiken zijn. De investeringen zijn bij dergelijke technieken hoog.

Aanbevolen wordt om nader onderzoek te verrichten naar:

- de hechting van actiefslib aan magnetiet of een ander magnetisch materiaal en de invloed van vlokmiddelen en vlokhulpmiddelen hierop;
- de maximaal toepasbare magnetische gradiënten en veldsterkten.

Filters en zeven worden in de afvalwaterzuivering in hoofdzaak toegepast als derde zuiveringstrap om gesuspendeerde deeltjes te verwijderen. De literatuur beperkt zich vrijwel tot deze toepassing. Door de STORA [60, 61] is hiernaar literatuur- en praktijkonderzoek verricht. De toepassing van zeven en filters kan interessant zijn in tweetrapsscheidingsinstallaties, waarbij de eerste trap het grootste deel van het actiefslib verwijdert en de tweede (filtratie) trap voor de gewenste effluentkwaliteit zorgt. De eerste trap moet wel voldoende retourslib leveren om het actief-slibproces in stand te houden. Een nadeel van zeven en filters is dat ze in het algemeen slecht in staat zijn om stootbelastingen aan droge stof op te vangen. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op de theorie en praktijk van filtratie en zeping als alternatief voor nabezinking. Besloten wordt met een aantal conclusies.

7.1 Theorie

Bij filtratie zijn vier mechanismen van belang namelijk:

- zeefwerking, het tegenhouden van deeltjes groter dan de poriëdiameter van het filtermateriaal;
- bezinking van deeltjes op de korrels of vezels van het filter;
- adsorptie aan filtermateriaal (en aan reeds verwijderde deeltjes);
- chemische en biologische omzettingen in het filter waardoor de kwaliteit van het effluent toeneemt.

De eigenschappen van het filter samen met die van de te verwijderen deeltjes bepalen welke van deze processen een rol spelen.

Het eerste mechanisme speelt een hoofdrol als de dikte van het filter (de zeef) klein is ten opzichte van de grootte van de deeltjes. Er vindt dan een scherpe scheiding plaats tussen deeltjes groter dan de poriëdiameter, die verwijderd worden, en deeltjes kleiner dan de poriëdiameter, die doorgelaten worden. Naarmate er meer openingen van de zeef verstopt zijn, zal de hydraulische weerstand groter zijn. Als de hydraulische weerstand te groot geworden is, moet de zeef schoongemaakt worden.

In een bed- of dieptefilter, zoals een zandfilter, zullen deeltjes groter dan de opening tussen de korrels afgevangen worden (zeefwerking). Ook kleinere deeltjes worden ten gevolge van de overige drie mechanismen voor een deel verwijderd. De grotere deeltjes lopen een grotere kans om afgefiltreerd te worden dan de kleine deeltjes. Er is geen scherpe overgang, zoals bij zeven, van deeltjesgrootten die wel en deeltjesgrootten die niet verwijderd worden.

Als bij een zandfilter de zeefwerking niet overheerst, zullen de vervuulende deeltjes in het hele filterbed terechtkomen. De hoeveelheid vuil die een dergelijk zandfilter kan bevatten is veel groter dan de hoeveelheid die met een zeef kan worden afgevangen.

Het afgevangen slib moet bij voorkeur snel naar de beluchtingsruimte worden teruggevoerd, zodat de activiteit van het slib niet te veel afneemt en er geen denitrificatie optreedt. Regelmatig schoonmaken is daarom noodzakelijk.

Een zandfilter met een grote vuilopvangcapaciteit is daarom minder noodzakelijk en ook minder gewenst om het optreden van zuurstofloosheid en denitrificatie in het filterbed te voorkomen.

Belangrijk is in hoeverre het materiaal van zeef en filter goed schoon te maken is, zonder de activiteit van het slib en de effluentkwaliteit te verminderen.

7.2 Praktijk

Literatuur

Door Joyce [58] worden de resultaten besproken van proeven waarbij een microzeef als alternatief voor nabezinking wordt gebruikt. De installatie bestaat uit een cilinder die met zijn as verticaal in de beluchtingsruimte van de actief-slibinstallatie wordt geplaatst. De zeef draait om deze as en wordt aan één kant continu schoongemaakt met behulp van ultrasone trillingen. Deze reinigingsmethode werkt beter dan het schoonmaken door middel van sproeiërs.

Het slib/watermengsel stroomt van buiten naar binnen. Het effluent verlaat de zeeftrommel onder in het midden en passeert daarna een tweede filter buiten de beluchtingsruimte. Het geconcentreerde slib van het tweede filter wordt teruggevoerd naar de beluchtingsruimte. Er worden microzeven met een poriegrootte van 10 μm gebruikt. Hiermee is een effluent met een drogestofgehalte van 15-30 g/m^3 te bereiken. Het debiet door het eerste filter mag ten hoogste circa 30 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ bedragen, maar moet bij voorkeur tussen 5 en 10 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ liggen. Het is mogelijk om een hoog drogestofgehalte (6,5 kg/m^3) in de beluchtingsruimte te handhaven.

De scheidingsmethode bevordert de groei van draadvormige bacteriën. Draadvormige bacteriën zijn beter te filtreren dan andere bacteriën. Als voordelen worden genoemd: de compactheid, de kleinere beluchtingsruimte die vanwege het hoge drogestofgehalte mogelijk is, het selectief afscheiden van licht slib en het bestand zijn tegen stootbelastingen.

Belangrijke nadelen van het systeem zijn de hogere investerings- en bedrijfskosten in vergelijking met bijvoorbeeld een conventionele nabezinktank. Daarnaast is er, voor zover bekend, geen uitgebreide praktijkervaring met het systeem. De kosten zijn misschien te verlagen door de tweede trap te vervangen door zandfiltratie of nabezinking.

Fernbach [56] heeft proeven uitgevoerd met een installatie die lijkt op die van Joyce. De installatie bestaat uit een cilindervormige microzeef die verticaal om zijn as draait. De vloeistof afkomstig uit de beluchtingsruimte stroomt van binnen naar buiten door de cilinderwand. Het doorgelaten slib/watermengsel gaat naar de nabezinktank waar de nog aanwezige droge stof wordt verwijderd.

Het filter draait met een snelheid tussen de 1 en 60 omwentelingen per seconde. De microzeef wordt door middel van sproeiërs schoongespoeld. Het geconcentreerde slib wordt naar de beluchtingsruimte teruggevoerd. Er is een zeef gebruikt met een poriegrootte van 35 μm , die ongeveer de helft van het aangevoerde actiefslib tegenhoudt.

De proefinstallatie is bij diverse afvalwaterzuiveringsinrichtingen gebruikt. Het geconcentreerde slib heeft drogestofgehalten die kunnen oplopen tot 16 kg/m^3 . Hierdoor zijn hoge drogestofgehalten in de beluchtingsruimte te handhaven. Een beperkt aantal draadvormige bac-

teriën passeert de zeef. Door deze zeping ontstaan er kortere draden, waardoor het slib goed bezinkt. Het doorgelaten slib/watermengsel heeft een veel lagere slibindex dan het slib uit de beluchtingsruimte. Ook het zeven van een deelstroom uit de beluchtingsruimte is voldoende om licht slib te voorkomen.

Voordelen van het systeem zijn:

- de mogelijkheid om een kleinere nabezinktank toe te passen of bij een bestaande installatie een hogere belasting toe te laten;
- de ongevoeligheid voor draadvormers;
- het hogere drogestofgehalte van het retour- en spuislib;
- de onmiddellijke terugvoer van het slib naar de beluchtingsruimte.

Nadelen zijn ook hier de naar verwachting hogere kosten en het ontbreken van praktijkervaring.

Door Hüper [57] wordt een trommelfilter met een horizontale as beschreven, die na een nabezinktank (Dortmunder) wordt geplaatst. De zuiverende werking is te danken aan een zeefdoek met een poriediameter van 20 μm . Het filter wordt van buiten naar binnen doorstroomd. Naarmate de vervuiling van het filter toeneemt, zal het drukverschil over het filter groter worden. Dit drukverschil wordt gecompenseerd door de waterstand buiten het filter te verhogen.

Bij een bepaalde waterstand wordt het filter teruggespoeld door op een bepaalde plaats van buitenaf effluent door het filter te zuigen. Door de trommel te draaien wordt het hele filter gereinigd. Het teruggespoelde slib/watermengsel wordt naar de beluchtingsruimte verpompt.

Zo nu en dan moet het filter met behulp van een krachtige waterstraal gereinigd worden. Naar schatting moet het filterdoek ieder jaar vervangen worden.

Met het trommelfilter en een microzeef met een poriediameter van 25 μm zijn vergelijkende proeven uitgevoerd. De toevoerstream kwam uit een Dortmundtank en had verschillende drogestofgehalten tot een maximum van 3,0 kg/m^3 . Het verwijderingsrendement van het trommelfilter neemt sterk toe als het drogestofgehalte in de aanvoer toeneemt en kan oplopen tot 94 %. De microzeef bereikte ten hoogste een rendement van 33 %. Bij het trommelfilter hangt de toelaatbare oppervlaktebelasting af van het drogestofgehalte in de aanvoer. Naarmate het drogestofgehalte in de aanvoer hoger is, is de toelaatbare oppervlaktebelasting lager.

Een trommelfilter werd toegepast in een overbelaste zuiveringsinrichting van 4.000 inwoner-equivalenten. Bij hoge hydraulische belastingen bevat het effluent van de Dortmundtank een drogestofgehalte van 0,5 kg/m^3 . De ontwerp-oppervlaktebelasting van het trommelfilter bedraagt 6,6 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$, waarmee een verwijderingsrendement van 77 % en een rest-CZV van maximaal 36 g/m^3 werd beoogd.

Gedurende negen maanden werd de installatie bemonsterd. Bij oppervlaktebelastingen tussen 2,5 en 4,5 $\text{m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ werden CZV- en BZV-gehalten kleiner dan respectievelijk 25 en 13 g/m^3 gemeten. Een voordeel was verder dat bij droogweerafvoeren drijvende stoffen werden verwijderd.

Commentaar

Opvallend is dat de twee installaties van Joyce en Fernbach, die op het eerste oog vergelijkbaar zijn, een verschillende uitwerking op

draadvormers hadden. Dit verschil kan worden gezocht in:

- verschil in samenstelling van afvalwater;
- verschil in reinigingsmethode van de zeef;
- verschil in stromingsrichting in het ene geval van binnen naar buiten, waarbij de centrifugale kracht op het slib werkt en deze door de zeef drukt;
- verschil in poriegrootte van de zeef.

De vermindering van het aantal draadvormers wordt door Wagner [62] en Seydler [59] bevestigd. Beiden gebruiken een schotelcentrifuge om het optreden van licht slib te voorkomen. Het retourslib passeert de installatie en zowel het concentraat als het effluent worden naar de beluchtingsruimte teruggevoerd.

Door Hüper wordt niets vermeld over invloed op de hoeveelheid draadvormers.

7.3 Conclusies en aanbevelingen

- De toepassing van microzeven lijkt een interessant alternatief voor nabezinking. Vooral oppervlaktebelastingen van $30 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ betekenen een aanzienlijke verkleining van het benodigde oppervlak, zelfs als daarna nog een tweede trap noodzakelijk is.
- De poriediameter van de microzeef is van groot belang voor het verwijderingsrendement.
- De mogelijkheid om in de beluchtingsruimte een hoog drogestofgehalte te handhaven is een voordeel.
- Het door Fernbach [56] en Hüper [57] voorgestelde systeem bestaande uit een om zijn as draaiend cilindervormig microfilter, is een mogelijke oplossing voor kleinere afvalwaterzuiveringsinrichtingen, die overbelast zijn of regelmatig last ondervinden van licht slib.

Om te kunnen beoordelen of microzeving technisch gezien een alternatief vormt voor nabezinking is nader onderzoek noodzakelijk. Hierbij zou aan de orde moeten komen:

- de invloed van de installatie op draadvormige bacteriën;
- de mogelijke alternatieven voor de eventuele tweede trap;
- de economie van de oplossing, waarbij rekening moet worden gehouden met de mogelijke kostenbesparing ten gevolge van een kleinere beluchtingsruimte.

8 CENTRIFUGEREN

Centrifuges worden in de afvalwaterzuivering toegepast voor de mechanische indikking van spuislib [32]. Er zijn versnellingen te bereiken van vele malen de zwaartekrachtversnelling. In het hoofdstuk over zeping en filtratie is al vermeld dat door middel van een centrifuge in de retourslibleiding van een actief-slibinstallatie het optreden van draadvormers kan worden voorkomen.

Centrifuges kunnen ook gebruikt worden als alternatief voor nabezink-tanks.

Kort wordt ingegaan op de theorie van centrifuges. Een tweetal praktijkproeven wordt besproken. Een aantal conclusies wordt getrokken.

8.1 Theorie

In het STORA [33] rapport over slibindikking is informatie over decanteer-, schotel- en basketcentrifuges te vinden. Van de decanteercentrifuge is de hydraulische capaciteit beperkt en in de basketcentrifuge wordt discontinu slib ingedikt. De schotelcentrifuge, die in staat is om grote debieten (tot 140 m³/h) continu te verwerken is mogelijk geschikt als alternatief voor nabezinking.

In het oog springende voordelen ten opzichte van nabezinking zijn:

- retourslib met een hoog drogestofgehalte, waardoor het drogestofgehalte in de beluchtingsruimte hoog kan zijn en met een kleinere beluchtingsruimte kan worden volstaan;
- klein ruimtebeslag;
- door een hoog drogestofgehalte van het spuislib kan op de slibverwerking worden bespaard;
- gesloten systeem zonder eventuele stankproblemen;
- snelle recirculatie van het slib (niet zuurstofloos);
- minder afhankelijk van de bezinkeigenschappen van slib.

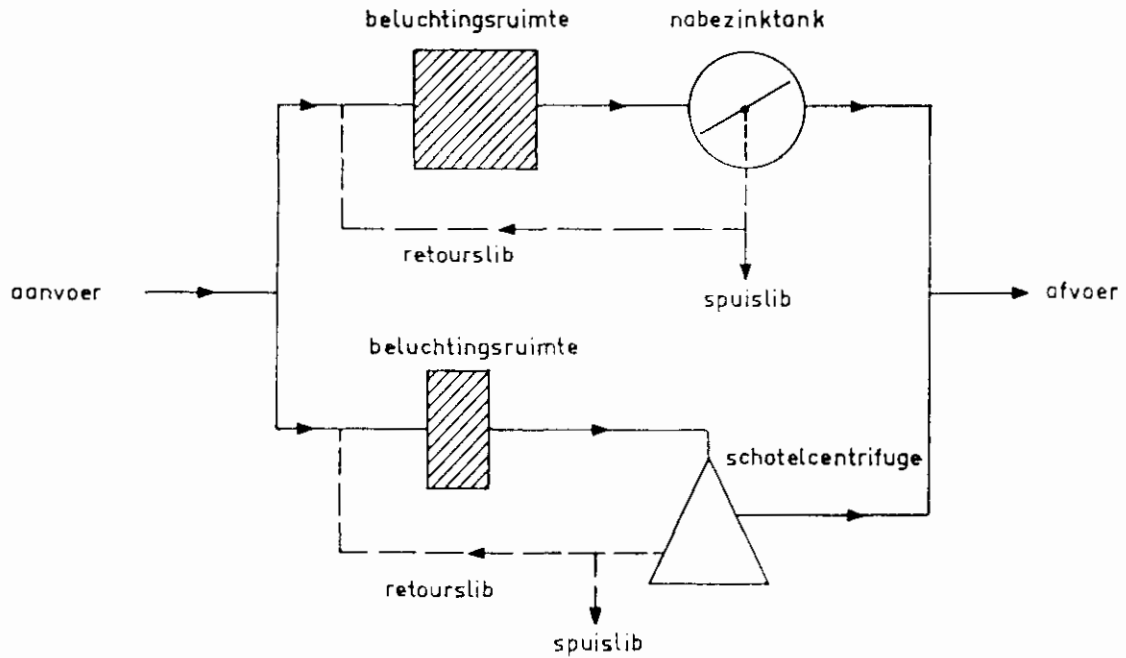
Nadelen zijn de hogere kosten en meer onderhoud.

8.2 Praktijk

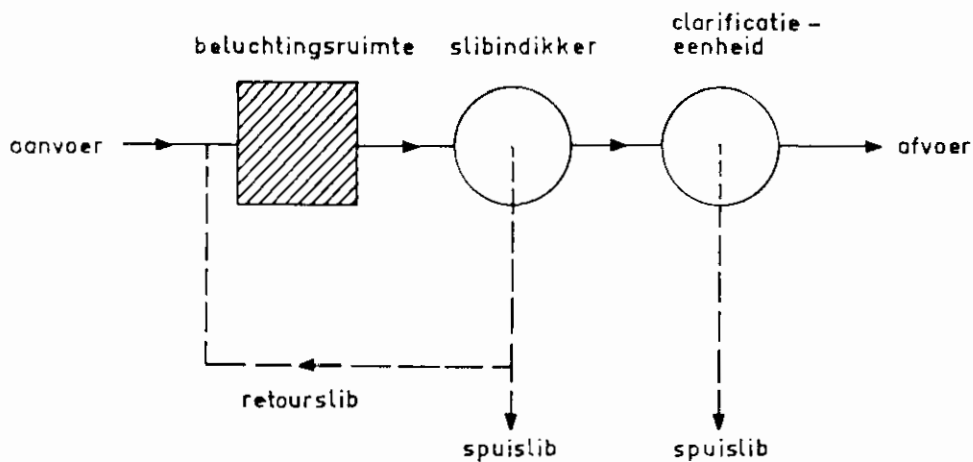
Door Wagner [65] worden de resultaten van proeven beschreven die geleid hebben tot het op de markt komen van het zogenaamde Biofugate-systeem [63]. In figuur 5 is de installatie schematisch weergegeven samen met de conventionele installatie, waarmee deze vergeleken is. Het sterk verontreinigde afvalwater is afkomstig van een kartonfabriek en veroorzaakt vaak licht slib. Bij de conventionele nabezinktank werd daarom een oppervlaktebelasting tussen 0,08 en 0,14 m³/(m².h) toegepast.

Als afscheider werd een schotelcentrifuge (düsenseparator) gebruikt, die 80 toeren per seconde maakt en een debiet van 2,5 tot 6 m³/h kan verwerken.

De onderzoeken werden beperkt door het geringe debiet van de schotelcentrifuge. Verder was de gebruikte retourslibpomp niet in staat om slib met een hoog drogestofgehalte te verpompen. Het maximaal in de beluchtingsruimte te bereiken drogestofgehalte werd daarvoor beperkt.



Figuur 5. Stroomschema van de proefinstallatie van Wagner [65].



Figuur 6. Stroomschema van de scheidingsmethode van Malm [64].

Vergelijking van de prestaties van beide straten geeft het volgende beeld:

- in de centrifugestraat is een capaciteitsvergroting in BZV-ruimtebelasting tijdens regenwaterafvoeren van een factor 2,8 ten opzichte van de droogweerafvoer mogelijk terwijl deze factor in de nabezinkstraat maximaal 1,9 is;
- de effluënten van de centrifugestraat en nabezinkstraat:
 - . hebben een gehalte aan affiltreerbare stof van respectievelijk 45 en 29 g/m³;
 - . hebben een BZV van respectievelijk 15 en 11 g/m³;
- de spreiding in de effluentkwaliteit is bij de centrifugestraat kleiner;

- het volume van het bezinkbare slib is in het effluent van de centrifugestraat kleiner.

De economische haalbaarheid van het gebruik van een centrifuge is niet bekeken. Het gebruik van een centrifuge zou vooral gunstig zijn bij:

- sterk met organische stoffen verontreinigd water;
- slecht bezinkbaar slib;
- plaatsgebrek.

Door Malm [64] (Alfa-Laval) is een patentaanvraag ingediend voor het toepassen van een slibafscheider die voor een hoog drogestofgehalte in het retourslib zorgt. Een schema van de afscheider is in figuur 6 weergegeven. De afscheider bestaat uit achtereenvolgens een grove zeef, een gepatenteerde fijne zeef (Microsorter) met een poriegrootte tussen 0,1 en 0,8 mm en een schotelcentrifuge waarin nozzles met een diameter tussen 0,9 en 1,5 mm zijn aangebracht. De zeven moeten verstopping van de nozzles van de centrifuge voorkomen.

Als alternatief voor de afscheider kan ook een flotatie-eenheid worden toegepast. Het effluent van de afscheider passeert voor het geloosd wordt nog een zuiveringstrap bestaande uit een nabezinktank al dan niet voorzien van een lamellenpakket of een flotatie-eenheid. Deze tweede trap zal vanwege het geringe drogestofgehalte van het influent een hoog rendement kunnen hebben.

Het grote voordeel van het gebruik van een centrifuge (of flotatie-eenheid) is dat het retourslib een drogestofgehalte van tenminste 20 kg/m^3 heeft in plaats van ten hoogste 8 kg/m^3 bij conventionele nabezinking. Het drogestofgehalte in de beluchtingsruimte kan dan bijvoorbeeld 15 in plaats van 3 kg/m^3 bedragen.

8.3 Conclusies en aanbevelingen

- Centrifuges zijn waarschijnlijk niet in staat om aan hoge effluent-eisen te voldoen.
- Met centrifuges kan ook slecht bezinkbaar slib worden afgescheiden en wordt de groei van draadvormers geremd.
- Centrifuges zijn waarschijnlijk beter dan conventionele nabezinktanks in staat om een variatie in belasting op te vangen.
- Niet duidelijk is of centrifuges economisch gezien een alternatief voor nabezinktanks vormen.

Aanbevolen wordt om de haalbaarheid met de nadruk op het economische aspect van de toepassing van centrifuges te onderzoeken, waarbij rekening gehouden moet worden met:

- het hogere drogestofgehalte dat in de beluchtingsruimte gehandhaafd kan worden;
- de besparing op de slibverwerking;
- de te bereiken effluentkwaliteit en de eventueel noodzakelijke tweede zuiveringstrap.

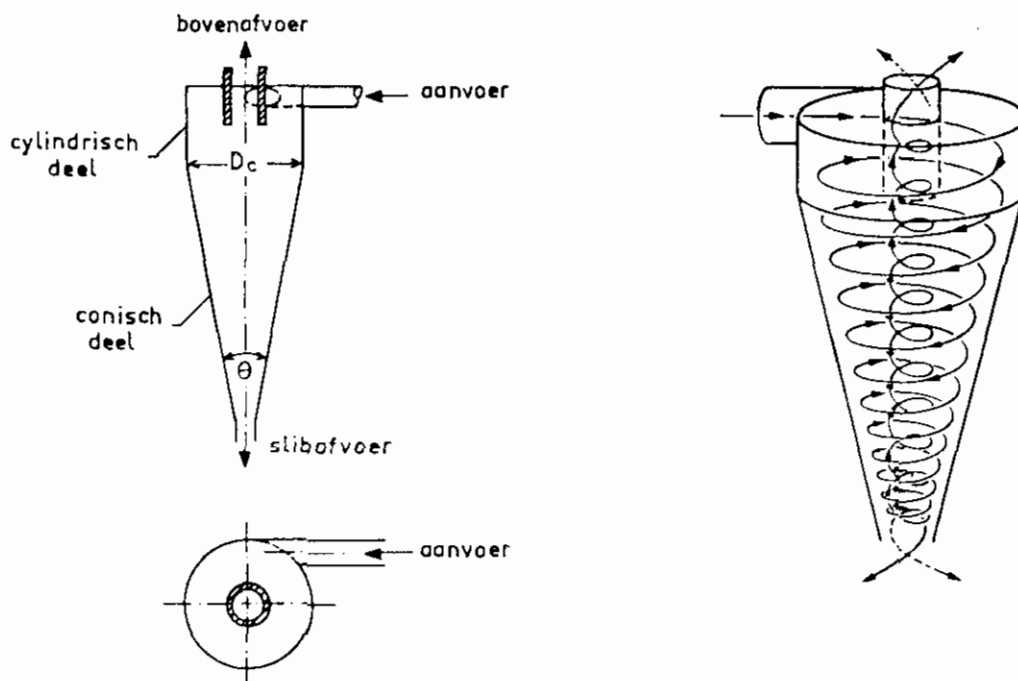
Hydrocyclonen worden gebruikt om vaste stof, gas of vloeistof uit een vloeistof af te scheiden.

In de afvalwaterzuivering worden hydrocyclonen op beperkte schaal toegepast om zand en slib afkomstig uit de voorbezinktank af te scheiden indien er geen zandvanger aanwezig is.

In dit hoofdstuk wordt de theorie van hydrocyclonen kort besproken. Ingegaan wordt op de stroomsnelheden en snelheidsgradiënten in de hydrocycloon. Deze bepalen de vlok-grootte van het actiefslib en daarmee of hydrocyclonen wel of niet toepasbaar zijn. De in de literatuur gevonden praktijkproeven met hydrocyclonen worden besproken. Tot slot worden conclusies getrokken over de toepasbaarheid van hydrocyclonen.

9.1 Theorie

Een hydrocycloon is een vat waarin drukenergie van de vloeistof wordt omgezet in een roterende vloeistofbeweging. Deze roterende beweging veroorzaakt een relatieve beweging van gesuspendeerd materiaal ten opzichte van de vloeistof, waardoor dit materiaal wordt afgescheiden. De rotatie wordt verkregen door tangentiële injectie van de vloeistof in het vat. Het bovenste deel van het vat, waarin de invoer plaatsvindt, is gewoonlijk cilindervormig. De cycloon kan over de hele lengte cilindervormig blijven, maar gebruikelijk is een taps toelopende vorm, zie figuur 7. De afvoer van de afgescheiden suspensie zit aan de onderkant. De afvoer van de vloeistofstroom aan de bovenkant ligt nagenoeg altijd in de as van de cycloon.



Figuur 7. Basisgegevens en stromingspatroon hydrocycloon [66].

Door deze vormgeving ontstaat het stromingspatroon in de hydrocycloon: een neerwaartse spiraal met daarbinnen een opwaartse spiraal. Na zijn intree begint de vloeistof een neerwaartse beweging langs de buitenkant van de hydrocycloon. Gecombineerd met de roterende beweging geeft dit de buitenste spiraal. De aanwezigheid van een afvoer in de as aan de bovenkant, gecombineerd met het gegeven dat alle vloeistof nooit via de onderafvoer kan verdwijnen (bij normale bedrijfsvoering) veroorzaakt een naar het centrum gerichte beweging van een deel van de vloeistofstroom die aan de buitenzijde naar beneden beweegt. Dichter bij de onderkant neemt deze hoeveelheid toe en de naar binnen bewegende vloeistof zal tenslotte zijn verticale stroomrichting omkeren en in het centrum van de cycloon naar boven bewegen. Deze spiraalstroming is afgebeeld in figuur 7.

Naast deze hoofdstroming zijn andere belangrijke verschijnselen:

- kortsluitstromer;
- een zone zonder verticale stroomsnelheden tussen de binnen- en buitenspiraal;
- een luchtkolom die in het midden ontstaat ten gevolge van de hoge rotatiesnelheid.

Een hydrocycloon wordt naar grootte aangeduid met de grootste binnendiameter, dus de binnendiameter van het cilindrische deel (D_c). Er bestaan vele varianten op de uitvoeringsvorm van hydrocyclonen. Dit betreft de aanvoer, de afvoer, de lengte van de cycloon, de hoek van de conus.

Voor de scheiding is de tangentiële component van de vloeistofsnelheid van belang. Daarnaast heeft de vloeistofsnelheid een binnenwaarts gerichte radiale component. Op het gesuspendeerd materiaal werken daardoor twee tegengestelde krachten:

- een radiaal naar buiten gerichte kracht ten gevolge van de centrifugale versnelling;
- een radiaal naar binnen gerichte kracht ten gevolge van de wrijving van naar het midden bewegende vloeistof.

Een hydrocycloon zal in het algemeen nooit een volledige scheiding opleveren. In de bovenafvoer zal nog enige vaste stof aanwezig zijn en met de benedenafvoer wordt ook vloeistof afgevoerd. In deze toepassing is het rendement van de bovenafvoer van belang. Aangezien dit rendement afhangt van de deeltjesgrootteverdeling wordt een deeltjesgrootte (d_{50}) ingevoerd waarvan 50 % van de deeltjes wordt afgescheiden.

Alle rendementstheorieën nemen als uitgangspunt de wet van Stokes, die het gedrag van deeltjes in een vloeistofstroom beschrijft. Hiermee wordt de naar buiten gerichte deeltjessnelheid ten gevolge van de stuwdruk berekend. Deze snelheid is evenredig met het kwadraat van de diameter.

Het gedrag van de deeltjes in het rotatieveld van een hydrocycloon is te beschrijven door de naar buiten gerichte snelheid van de deeltjes gelijk te stellen aan de radiale (naar binnen gerichte) vloeistofsnelheid. Voor ieder deeltje bestaat er in radiale richting een plaats waar beide snelheden aan elkaar gelijk zijn. De meeste theorieën stellen nu, dat wanneer deze plaats binnen de straal ligt waar de verticale snelheden gelijk zijn aan nul, het deeltje via de bovenafvoer zal verdwijnen omdat het zich in een opwaartse vloeistofstroom bevindt. De deeltjes die zich daarbuiten bevinden, verlaten met de onderafvoer de hydrocycloon. De deeltjes waarvan de "evenwichts-

straal" samenvalt met die waar de verticale snelheden nul zijn, hebben volgens deze redenering de diameter d_{50} . Een empirische formule waarmee het rendement van een cycloon is te berekenen wordt gegeven door Bradley [6]:

$$d_{50} = 6,1 \cdot 10^3 \left[\frac{D_c^3 \cdot \eta}{Q^{1,2} \cdot (\sigma - \rho)} \right]^{0,5}$$

waarin d_{50} deeltjesdiameter in μm die voor 50% wordt afgescheiden
 D_c cycloondiameter in m
 η dynamische viscositeit in Pa.s
 Q aanvoerdebiet in m^3/s
 σ deeltjesdichtheid in kg/m^3
 ρ vloeistofdichtheid in kg/m^3 .

De hydrocycloon is geschikt voor afscheiding van deeltjes van 5 tot 100 μm . Grotere deeltjes zijn eenvoudig door middel van bezinking te verwijderen. Deeltjes kleiner dan 5 μm kunnen alleen afgescheiden worden als het dichtheidsverschil tussen vloeistof en vaste stof groot is.

Om kleine deeltjes af te scheiden zijn hoge tangentiële snelheden nodig, die alleen met behulp van cyclonen met een kleine diameter te bereiken zijn. Deze cyclonen hebben bij een kleiner debiet eenzelfde drukverlies als grotere cyclonen. Door een aantal hydrocyclonen parallel te schakelen kan het debiet vergroot worden.

Deeltjes kleiner dan 2 μm zijn in het algemeen niet meer met een hydrocycloon te verwijderen en kunnen beter, al dan niet na vlokking, door middel van centrifugeren of bezinking worden afgescheiden.

Voordelen van hydrocyclonen zijn:

- simpele constructie en eenvoudige bediening;
- klein ruimtebeslag vanwege de hoge oppervlaktebelasting die tussen 500 en 1500 $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ligt;
- voor veel verschillende taken geschikt.

Nadelen zijn:

- energieverbruik in de vorm van vloeistofdruk;
- het optreden van hoge schuifkrachten, waardoor vlokken vernield kunnen worden;
- ondergrens aan de deeltjesgrootte die nog te verwijderen is bij 2-3 μm ;
- beperkt rendement;
- een bepaald type hydrocycloon is meestal maar voor één toepassing geschikt;
- hoge slijtage omdat de wand stil staat ten opzichte van de vloeistof.

9.2 Toepassing van hydrocyclonen op actiefslib

Inzicht in de grootte en dichtheid van actief-slibdeeltjes is bij toepassing van de rendementsformule onontbeerlijk. In hydrocyclonen treden veel hogere snelheden en schuifkrachten op dan in een beluchtingstank.

Metingen aan deeltjesgrootte en -dichtheid zijn door een aantal onderzoekers verricht. Alle metingen beperken zich echter tot de

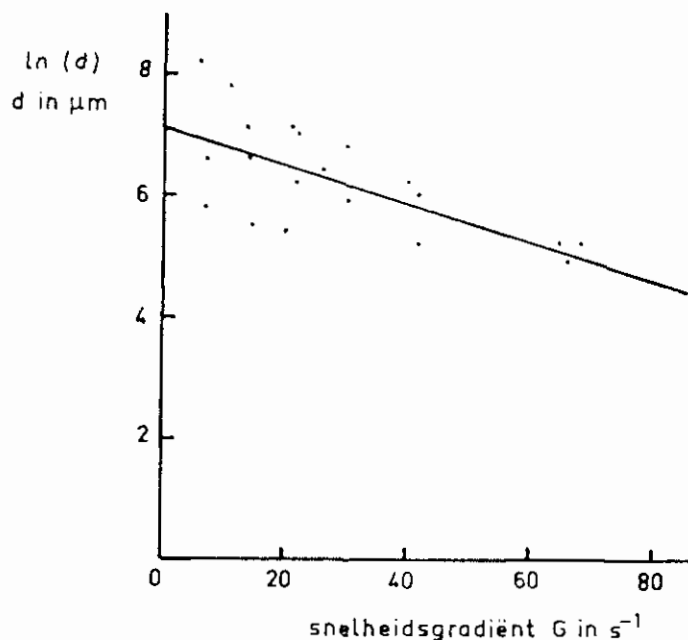
beluchttingsfase. Laubenberger [72] vermeldt voor actiefslib na 1 dag stabilisatie in een beluchtingstank een $d_{50} = 80 \mu\text{m}$. Uit onderzoek van Einstein [67] blijkt de vlokgruotte van actiefslib uit verschillende installaties te variëren van $d_{50} = 50$ tot $160 \mu\text{m}$. Laubenberger [71] heeft metingen gedaan aan vlokgruotten bij verschillende stroomsnelheden, gekenmerkt door de kengruotheid van Reynolds en de gemiddelde snelheidsgradiënt G (zie tabel 5). De hoogste Re -waarden liggen net in het turbulente gebied (het omslagpunt ligt bij $Re = 3500$). De vlokgruotte neemt af van 3700 tot $140 \mu\text{m}$. Laubenberger beweert in zijn artikel dat de omslag naar het turbulente gebied zich liet herkennen door een plotseling sterk kapotslaan van de vlokken. In de tabel komt dit echter niet tot uitdrukking. De in een hydrocycloon optredende G -waarden liggen een factor 10 tot 100 hoger dan de metingen van Laubenberger. Figuur 8 geeft een beeld van het verband tussen de diameter en de G -waarde waarbij gegevens van Lagvankar [70] en Laubenberger [71] zijn gebruikt. Lineaire regressie geeft als vergelijking:

$$\ln d = 7,12 - 3,15 \cdot 10^{-2} \cdot G \quad d \text{ in } \mu\text{m}, G \text{ in } \text{s}^{-1}$$

Tabel 5. De snelheidsgradiënt en vlokdiometer van actiefslib voor verschillende drogestofgehalten bij een aantal waarden van de kengruotheid van Reynolds.

d_s	Re	G	d
780	4600	67,73	180
	2820	41,50	400
	1755	25,90	630
	1440	21,25	1192
	946	13,61	1261
	416	6,14	3681
650	4430	64,41	179
	3220	46,81	271
	2080	30,21	381
	1485	21,58	511
	935	13,78	722
	473	6,97	750
440	4350	65,74	139
	2745	41,50	184
	1300	19,92	230
	955	14,61	250
	464	6,97	338

d_s drogestofgehalte in g/m^3
 Re kengruotheid van Reynolds
 G snelheidsgradiënt in s^{-1}
 d vlokdiometer in μm



Figuur 8. De snelheidsgradiënt als functie van de vlokdiаметer [69].

Extrapolatie naar de hoge G-waarden in hydrocyclonen is vanuit deze gegevens niet goed mogelijk, maar een G-waarde van 200 s^{-1} geeft volgens bovenstaande vergelijking een diameter van $2 \mu\text{m}$. Hoewel er geen metingen aan deeltjesdiameters van actiefslib bij zeer hoge schuifkrachten bekend zijn, kan met enige zekerheid worden aangenomen dat de optredende diameters overeenkomen met de ondergrens van wat met een hydrocycloon nog te verwijderen is.

Bovendien vermelden diverse onderzoekers dat de spreiding in deeltjesdiameters zeer groot is wanneer op slibvlokken iets hogere schuifkrachten worden uitgeoefend. Indien dit ook het geval is bij de zeer hoge schuifkrachten in een cycloon, dan zal het rendement ook daardoor achteruitgaan.

De dichtheid van actief-slibvlokken varieert met de diameter. Naarmate de vlok groter wordt zal deze relatief meer water bevatten omdat grote vlokken zijn opgebouwd uit zeer los aan elkaar gekleefde aggregaten met daartussen aan de vlok gebonden water. Jedele [26] geeft een formule voor de soortelijke massa van actief-slibvlokken:

$$\sigma = 31 \cdot d^{-1,3} \cdot (1000 - 0,5 \cdot \rho) + \rho$$

waarin σ = soortelijk massa van de vlok in kg/m^3

ρ = soortelijk massa van water in kg/m^3

d = vlokdiаметer in μm .

Dit geeft, er van uitgaande dat de formule voor het gehele bereik van d geldig is, het in tabel 6 gegeven verband.

Met de in paragraaf 9.1 gegeven rendementsformule kan voor diverse combinaties van basisgegevens de mediane diameter d_{50} worden berekend. Als gemiddelde temperatuur wordt 15°C genomen. Voor water is bij die temperatuur de dynamische viscositeit $\eta = 1,14 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Voor het invullen van de basisgegevens worden logische combinaties van cycloondiаметer en aanvoerdebiet gekozen.

Tabel 6. De soortelijke massa van de vlok voor verschillende vlok-diameters.

d µm	σ kg/m ³
20	1320
50	1100
100	1040

Tabel 7. Deeltjes met afmetingen die voor 50 % worden afgescheiden voor verschillende cycloonafmetingen en debieten.

D _c m	Q m ³ /s	d ₅₀ µm	
		σ = 1500 kg/m ³	σ = 1100 kg/m ³
0,05	1,67 · 10 ⁻³	5	11
0,15	8,33 · 10 ⁻³	9	21
0,50	83,3 · 10 ⁻³	14	32

Tabel 7 geeft een duidelijk beeld. Deeltjes kleiner dan 5 µm worden in geen geval afgescheiden. Indien de slibdeeltjes een lagere soortelijke massa hebben dan 1100 kg/m³ ligt de ondergrens op 11 µm. Deze grensdiameter wordt alleen verwijderd in een cycloon van kleine afmetingen, waarin het drukverlies erg hoog is en de deeltjes dientengevolge klein zijn.

Op grond van deze uitkomsten kan gesteld worden dat er alleen in kleine cyclonen kans is op enige scheiding van grote deeltjes. Het merendeel van de deeltjes zal echter met het effluent uit de cycloon stromen.

9.3 Praktijk

In de literatuur is maar weinig te vinden over het toepassen van hydrocyclonen voor de afscheiding van actiefslib.

Hunt [68] heeft geëxperimenteerd met drie uitvoeringsvormen van hydrocyclonen. Het verschil zat hem in de slibafvoer, die of open of gesloten was geconstrueerd. In de gesloten uitvoering werd de slibafvoer opgevangen in een vat, waarbij wel of geen filterconstructie was aangebracht om het recirculerende water te scheiden van meegevoerde slibdeeltjes. In deze proeven werd de bovenafvoer gerecirculeerd naar het voorraadvat, een bedrijfsvoering die ver van de praktijk staat. De resultaten waren slecht en voor zover er al sprake was van enig effect was dit dankzij het doseren van polyelektrolyten. Proeven met een eenmalige doorstroming in een normale hydrocycloon met open afvoer gaven bedroevende resultaten. Zonder dosering van polyelektrolyten gebeurde er helemaal niets.

Er zijn experimenten, met weinig succes, uitgevoerd met actiefslib in een cilindrische cycloon met een diameter van 0,075 m [73]; er worden geen resultaten vermeld.

9.4 Conclusies

- Door de hoge schuifkrachten in een cycloon worden slibvlokken kapotgeslagen tot deeltjes met kleine afmetingen.
- De soortelijke dichtheid van slibdeeltjes is bij deze afmetingen waarschijnlijk te laag om ze met succes te kunnen afscheiden in een hydrocycloon.
- De deeltjesgrootte van actiefslib is gespreid over een groot bereik, waardoor een cycloon minder geschikt is; deze werkt immers optimaal voor de afscheiding van deeltjes met één bepaalde diameter.
- Om kleine deeltjes met een lage dichtheid af te scheiden zijn cyclonen met zeer kleine afmetingen vereist, waarin de drukval en daarmee de schuifkrachten extreem hoog zijn.
- Het afscheiden van grote volumestromen actiefslib in cyclonen van minimale afmetingen vergt het inschakelen van een veelvoud van samengestelde hydrocyclonen, waardoor er een uitermate ingewikkelde constructie ontstaat.
- Op grond van bovenstaande punten komen hydrocyclonen niet in aanmerking voor de afscheiding van actiefslib op praktijkschaal.

Akoestische trillingen worden gebruikt voor het reinigen van oppervlakken. Meestal worden trillingen in het ultrasone frequentie-bereik gebruikt. Vuildeeltjes worden met deze techniek losgetrild.

In de afvalwaterzuivering worden ultrasone trillingen niet gebruikt. Wel wordt er om flocculatie te bevorderen energie ingebracht door te roeren.

Kort wordt ingegaan op de invloed van akoestische trillingen. Een aantal toepassingen op (actief-)slib wordt besproken. Tot slot wordt een aantal conclusies over toepassing op actiefeslib getrokken.

10.1 Theorie

Akoestische trillingen oefenen een kracht op de grenslaag tussen vaste deeltjes en vloeistof uit ten gevolge van het verschil in respons tussen vaste deeltjes en vloeistof. De effectieve viscositeit en oppervlaktespanning nemen hierdoor af. De deeltjes bewegen dan gemakkelijker ten opzichte van de vloeistof. Van dit effect wordt gebruik gemaakt bij ultrasone reiniging.

10.2 Praktijk

Literatuur

Door zowel Lyon [77] als Husmann [75] werd gebruik gemaakt van piezo-elektrische kristallen verbonden aan een radiozender (frequentie circa 200 kHz). Lyon beschrijft een gunstige invloed op de bezinking/indikking. Het volume van het slib na bezinking gedurende 15 minuten is na toepassing van ultrasone bestraling de helft van het volume zonder bestraling. Het water boven het slib is nogal troebel. Door Husmann worden een jaar later resultaten van proeven gepubliceerd, die de resultaten van Lyon tegenspreken. Een deel van het slib wordt door de ultrasone behandeling zeer fijn verdeeld. De daling van de slibspiegel zou hieraan te wijten zijn. Wordt van het bovenstaande water na filtratie het kaliumpermanganaatgetal bepaald, dan blijkt dat dit na ultrasone behandeling veel hoger is dan na gewone bezinking. Het slib is kennelijk zo fijn verdeeld dat de organische stof door het filter loopt.

Volgens Kempa [76] zijn er mogelijkheden voor ultrasone technieken bij de conditionering van spuislib. Door de behandeling ontstaat een dispersie, die beter reageert met chemicaliën. Er zijn dan minder chemicaliën nodig.

Door Muralidhara [78] wordt een elektro-akoestische filtratiemethode beschreven. Door de elkaar versterkende werking van elektrische velden, akoestische trillingen en vacuüm of druk worden goede resultaten bereikt. Door de behandeling van geflocculeerd, gecentrifugeerd actiefeslib wordt het vochtgehalte verlaagd van 82 % naar 62 %.

Dat actief-slibvlokken snel door akoestische trillingen vernield kunnen worden blijkt uit de volgende twee literatuurbronnen.

Williams [79] beschrijft een methode om met behulp van een trillende

draad (20 kHz) actief-slibvlokken uiteen te slaan, zodat aparte bacteriën ontstaan. De bacteriën zelf gaan niet kapot, zodat ze gedetamineerd kunnen worden.

Gaudy [74] gebruikt ultrasone technieken om actief-slibvlokken kapot te maken. De celinhoud en celwand worden door nog levende cellen verder afgebroken.

Commentaar

Behalve de twee elkaar tegensprekende artikelen van Lyon en Husmann zijn geen artikelen gevonden, die de invloed van akoestische trillingen op de bezinking of indikking van actiefslib beschrijven.

Mogelijke invloeden van ultrasone trillingen op de bezinksnelheid van actiefslib zijn:

- het selectief kapotmaken van cellen die slecht bezinken, zoals draadvormige bacteriën;
- het voor een deel kapotmaken van cellen, waarna de celinhoud, al dan niet in combinatie met vlokmiddelen, voor een goede flocculatie zorgt;
- het uitdrijven van water uit de reeds gevormde vlok.

De laatste mogelijkheid lijkt het meest interessant voor nader onderzoek. Bij dit onderzoek zou allereerst aan de orde moeten komen of het mogelijk is om door combinatie van gravitatiekrachten en ultrasone trillingen een snellere bezinking of indikking te verkrijgen. Zowel de frequentie als de amplitude van de gebruikte akoestische trillingen moeten gevarieerd kunnen worden. Naar verwachting zijn er trillingen met weinig energie nodig, aangezien het uiteenvallen van de vlok en het kapotgaan van de cellen voorkomen moeten worden. Kapotte vlokken veroorzaken waarschijnlijk een troebel, BZV-rijk, effluent. Ook de activiteit van het slib zal verminderen als teveel cellen worden vernield. Een mogelijke vermindering van de activiteit van het slib zal in het onderzoek betrokken moeten worden.

10.3 Conclusies en aanbevelingen

- Akoestische trillingen kunnen actief-slibvlokken en zelfs individuele cellen vernielen.
- Er zijn te weinig aanwijzingen dat bezinking door akoestisch trillingen versneld kan worden.

Aanbevolen wordt om verkennend onderzoek op laboratoriumschaal naar de invloed van akoestische trillingen op actiefslib uit te voeren.

Iedere scheidingsinstallatie zorgt voor een bepaalde clarificatie van het effluent en indikking van het slib. De processen indikking en clarificatie zijn niet geheel los van elkaar te zien: waar slib indikt, zal het effluent gezuiverd worden en omgekeerd. Uit de voorgaande hoofdstukken blijkt dat sommige scheidingstechnieken een betere clarificatie (laag drogestofgehalte in het effluent) en andere een betere indikking (hoog drogestofgehalte van het retourslib) bewerkstelligen.

Bedacht moet worden dat in de vorige hoofdstukken alleen is beoordeeld of de scheidingstechniek in staat was in één stap voor de gewenste clarificatie en indikking te zorgen. Het is heel goed mogelijk dat met een bepaalde techniek veel betere resultaten te bereiken zijn, indien deze alleen voor clarificatie (lamellen) of indikking (centrifugeren en flotatie) wordt toegepast.

Het ligt dan ook voor de hand om te kijken in hoeverre met een combinatie van scheidingstechnieken, in vergelijking met een ééntrapsscheiding, betere resultaten te bereiken zijn.

Geschikt voor het indikken van slib zijn:

- flotatie;
- zeven en filters;
- centrifuges;
- akoestische trillingen;
- bezinking.

Geschikt voor clarificatie van effluent zijn:

- flotatie;
- zeven en filters;
- lamellenbezinking;
- bezinking.

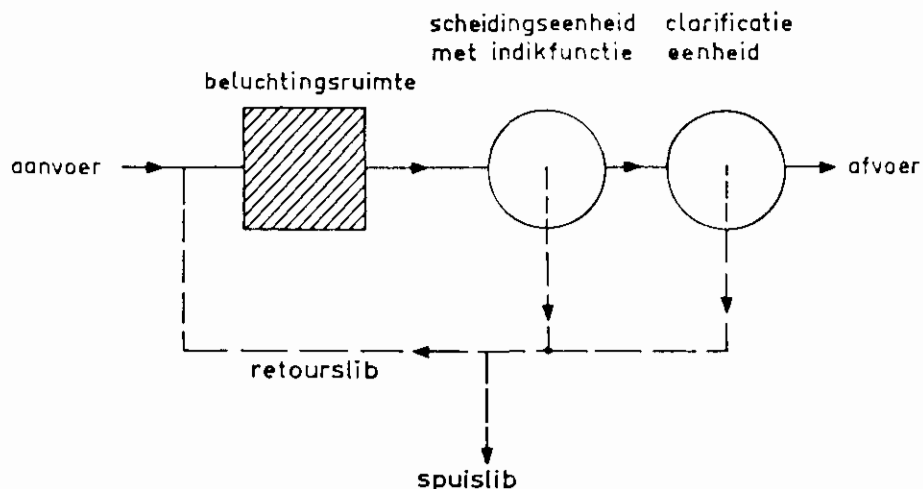
Van magnetische scheiding is niet duidelijk of deze speciaal geschikt zou kunnen zijn voor indikking dan wel clarificatie. Deze techniek is daarom buiten beschouwing gelaten.

11.1 Theoretisch mogelijke tweetrapsscheidingen

In het hiernavolgende worden vier mogelijkheden besproken. Combinatie A is een serieschakeling van twee scheidingsinstallaties, waardoor een clarificatie in twee stappen plaatsvindt. Combinatie B en C zijn ook serieschakelingen, maar met het doel een indikking in twee stappen te verkrijgen. In tegenstelling tot B passeert bij C het effluent van de tweede trap de eerste scheidingstrap. Combinatie D is een parallelschakeling van twee scheidingsinstallaties, waarvan er één alleen bij regenwateraanvoeren werkt.

Combinatie A bestaat uit twee in serie geschakelde ééntrapsscheidingsinstallaties. Het principeschema is in figuur 9 weergegeven. De tweede installatie is gekoppeld aan de effluentleiding van de eerste. De slibafvoerleidingen van beide installaties lopen naar de beluchtingsruimte.

Bij de eerste installatie staat de indikfunctie centraal: er moet een retourslib met een hoog drogestofgehalte worden geleverd; het droge-

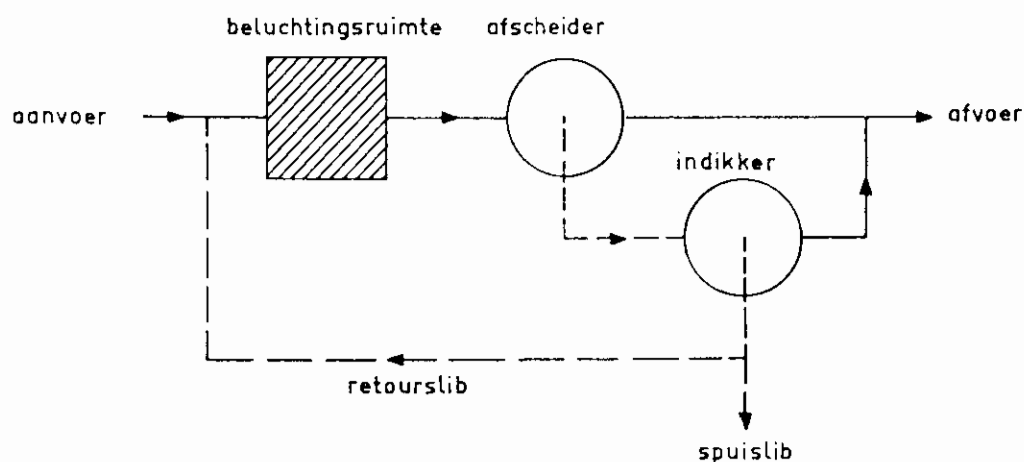


Figuur 9. Principeschema van combinatie A.

stofgehalte van het effluent is minder belangrijk. De tweede installatie heeft als belangrijkste taak om effluent van een goede kwaliteit te leveren; de clarificatie staat voorop. Door het lage drogestofgehalte van het influent is de drogestofbelasting van deze installatie lager dan bij een ééntapscheiding. De slib/waterscheiding wordt hierdoor vergemakkelijkt.

De meeste indikkers zijn te combineren met installaties die voor een goed effluent zorgen. De combinatie kan bijvoorbeeld bestaan uit een centrifuge gevolgd door een lamellenafscheider, zie Malm [64].

Een flotatie-eenheid als indikker is niet goed te combineren met een nageschakelde conventionele bezinking of lamellenbezinking, omdat een deel van de slibdeeltjes in de flotatie-eenheid aan gasbelletjes is gehecht. Het toepassen is alleen mogelijk als het effluent van de flotatie-eenheid een ontgassingsinstallatie passeert voordat het in het bezinkbassin terecht komt. Het toepassen van akoestische trillingen kan goed gecombineerd worden in één installatie met bezinking of lamellenbezinking.



Figuur 10. Principeschema van combinatie B.

Combinatie B bestaat uit een serieschakeling van twee scheidingsinstallaties, waarbij de tweede installatie in de slibafvoerleiding van de eerste installatie is aangebracht, zie figuur 10. Het effluent van beide installaties wordt afgevoerd naar het oppervlaktewater of een eventuele derde zuiveringstrap. Aangezien beide installaties een indikfunctie hebben, kan van een tweetrapsindikking worden gesproken. Het drogestofgehalte van de slibafvoer van de eerste trap is bijvoorbeeld tweemaal zo hoog als het drogestofgehalte van het influent: de indikfactor is twee. De volgende installatie zorgt voor een indikking tot het gewenste drogestofgehalte.

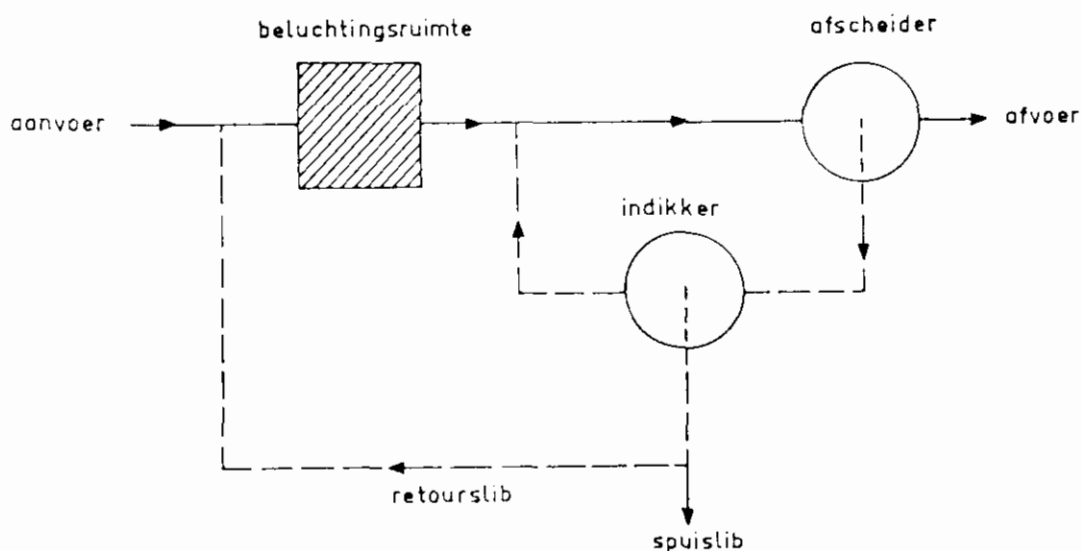
Ten opzichte van een ééntrapsscheiding hoeft de indikfactor van de eerste installatie niet zo groot te zijn. De tweede installatie krijgt een veel kleiner debiet te verwerken dan een ééntraps-scheidingsinstallatie.

Voor de eerste trap kunnen alle voor clarificatie geschikte installaties worden gebruikt. De combinatie zou kunnen bestaan uit een bezinktank en een centrifuge.

De tweede trap kan beter geen flotatie-eenheid zijn, omdat hiervoor het influent een laag drogestofgehalte moet hebben.

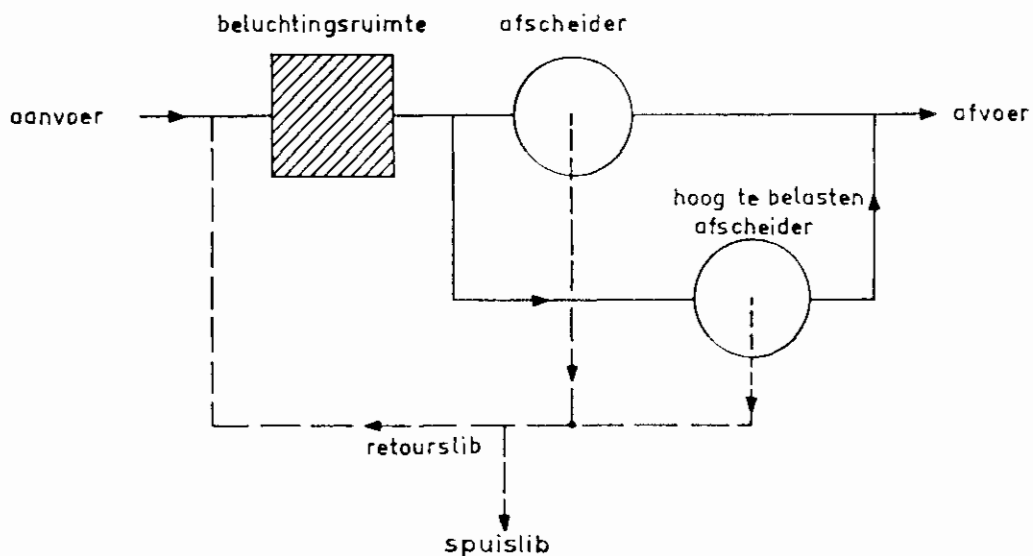
Combinatie C is een variant op combinatie B. Het principeschema is in figuur 11 weergegeven. Het effluent van de tweede trap wordt hier teruggevoerd naar de aanvoer van de eerste trap in plaats van afgevoerd met het effluent van de eerste trap. Een voordeel ten opzichte van combinatie B is dat een hoog drogestofgehalte van het effluent van de tweede installatie minder bezwaarlijk is.

Ook deze combinatie zou uit een nabezinktank of een lamellenafscheider met een centrifuge kunnen bestaan.



Figuur 11. Principeschema van combinatie C.

Combinatie D is in figuur 12 weergegeven. Het is een parallelschakeling van twee eenheden, die speciaal bedoeld is voor het opvangen van hydraulische afvoerpieken. Beide eenheden moeten voor voldoende indikking en clarificatie zorgen. Eén eenheid is voortdurend in be-



Figuur 12. Principeschema van combinatie D.

drijf, de andere eenheid wordt alleen ingeschakeld bij regenwateraanvoeren. Of het zinvol is om een dergelijke combinatie toe te passen hangt af van de kosten van de eenheden. Voor de droogweereenheid zijn lage exploitatiekosten van belang, terwijl voor de regenwater-eenheid lage investeringskosten belangrijk zijn.

Te denken valt aan een kleine nabezinktank, die bij droogweeraanvoeren en regenwateraanvoeren werkt, gecombineerd met een flotatie-eenheid, die alleen bij regenwateraanvoeren in werking treedt. De flotatie-eenheid kan, vanwege de hoge toelaatbare oppervlaktebelasting betrekkelijk klein zijn. Doordat de eenheid niet voortdurend werkt, zijn de hogere bedrijfskosten niet zo bezwaarlijk. De kosten van een dergelijke oplossing kunnen nog verder beperkt worden door de flotatie-eenheid mede te gebruiken als indikker voor het spuislib. Tijdens droogweeraanvoeren is de flotatie-eenheid hiervoor beschikbaar. Bij regenwateraanvoeren kan slib uit de retourafvalleiding van de flotatie-eenheid worden gespuid.

11.2 Praktijk

De praktijkervaring met tweetrapsscheiding beperkt zich in hoofdzaak tot derde zuiveringstrappen. Dit is vergelijkbaar met combinatie A. De tweede trap moet de zwevende stof tegenhouden, die de nabezinktank gepasseerd is.

Door, onder andere, de STORA zijn proeven gedaan met zeven en filters [60, 61].

In hoofdstuk 5 "Flotatie" zijn onderzoekers genoemd, die gekeken hebben naar flotatie als derde zuiveringstrap.

Met flotatie en centrifugeren is uitgebreid ervaring opgedaan voor slibindikking [33].

11.3 Conclusies en aanbevelingen

Bij tweetrapsconfiguraties is het beter mogelijk om de omstandigheden waarbij de scheidingsinstallatie werkt te optimaliseren. Voor een groot deel ontbreekt onderzoek naar de van belang zijnde invloedsfactoren.

Het onderzoek naar de mogelijkheid om tweetrapsscheiding toe te passen zou zich moeten richten op:

- de indikfactor van een installatie als functie van de bedrijfsparameters (drogestofgehalte van aanvoer, aan- en afvoerdebieten);
- het maximaal te bereiken drogestofgehalte in het retourslib (indiking);
- het maximaal in de beluchtingsruimte te handhaven drogestofgehalte;
- het minimaal te bereiken drogestofgehalte in de effluentstroom (clarificatie).

Behalve het uitvoeren van onderzoek naar de technische haalbaarheid wordt aanbevolen om de economische haalbaarheid van tweetrapsscheiding te onderzoeken.

In de hoofdstukken 4 tot en met 11 zijn technieken besproken die in aanmerking komen om conventionele nabezinking te vervangen. De technieken verschillen wat betreft ontwikkeling. Sommige technieken worden in de praktijk reeds toegepast, andere zijn alleen op laboratoriumschaal ontwikkeld en dan nog niet eens altijd voor actiefslib. Het zonder meer vergelijken van de verschillende alternatieven is daarom niet mogelijk. In dit hoofdstuk zal aan de hand van de karakteristieken van de verschillende technieken worden aangegeven welke in eerste instantie voor nader onderzoek in aanmerking komen. Sommige technieken lenen zich voor toepassing in bestaande installaties. De mogelijke verbetering die hiermee in bestaande zuiveringsinrichtingen kan worden bereikt, wordt aangegeven. Besloten wordt met conclusies en aanbevelingen.

12.1 Evaluatie van de besproken technieken

In tabel 8 zijn de verschillende technieken op een aantal aspecten gewaardeerd. De waardering kent een gradatie in vijf stappen en loopt van ++ (goed/veel/gunstig) via +, 0, en - naar -- (slecht/weinig/ongunstig). De waardering is zo goed mogelijk op grond van gegevens gedaan, maar blijft voor een deel arbitrair. Gezien het verschil in ontwikkeling van de technieken is het onvermijdelijk dat soms een vraagteken in de tabel verschijnt als een waardering onmogelijk is.

Er kunnen drie hoofdaspecten onderscheiden worden; de aanwezige kennis en ervaring, de technische aspecten en de economische aspecten. De eerste kolom van tabel 8 geeft aan hoe ver het onderzoek naar de techniek is gevorderd. Als er weinig onderzoek is verricht, kunnen er over de andere aspecten minder nauwkeurig uitspraken worden gedaan. Daarbij zal men onderzoek naar een bepaalde techniek meestal stopzetten als de resultaten technisch of economisch weinig perspectief bieden.

De tweede tot en met de vierde kolom geven de technische (= procesmatige) aspecten aan, namelijk de maximaal toelaatbare belasting, de te bereiken effluentkwaliteit (clarificatie) en het te behalen drogestofgehalte van het retourslib (indikking).

De laatste twee kolommen (investerings- en exploitatiekosten) betreffen het economische aspect van de oplossing. Met de meeste oplossingen is weinig praktijkervaring opgedaan, waardoor er weinig bekend is van de kosten. Het is hierdoor niet mogelijk om op economische gronden een techniek te selecteren.

Om toch tot aanbevelingen te komen, wordt gebruik gemaakt van de andere twee hoofdaspecten; de aanwezige kennis en de technische aspecten.

Op grond van deze aspecten worden de beschikbare technieken in vier categorieën ingedeeld, zie tabel 9. Er wordt een onderscheid gemaakt in technieken waarvan voldoende bekend is om technisch gezien nabezinking op korte termijn te vervangen en technieken waarvan onvoldoende bekend is. Hierbinnen wordt, op grond van de technische aspecten, onderscheid gemaakt tussen veelbelovende en kansarme technieken. De gemaakte indeling is nogal grof. Enige nuancering is aangebracht.

Tabel 8. Evaluatietabel van de verschillende alternatieven voor nabezinking.

techniek	aanwezig kennis	technische aspecten			econ. aspecten	
		belasting	clarificatie	indikking	inv. kosten	expl. kosten
conventionele bezinking	++	--	0	-	0	++
lamellenafscheiding	+	--	++	--	+	+
flotatie	+	+	0	++	+	0
magnetische scheiding	-	+	+	+	-	?
supergeleidende magn.sch.	--	++	?	?	--	?
filtreren en zeven	0	+	+	+	0	?
centrifugeren	0	+	-	++	-	?
hydrocyclonen	0	?	--	--	?	?
akoestisch trillen	--	?	?	+	?	+

aanwezige kennis en ervaring	++ veel praktijkervaring + praktijkervaring 0 toegepast op technische schaal - toegepast op semi-technische schaal -- toegepast op laboratoriumschaal
belasting	++ hoge drogestof- of oppervlaktebelasting mogelijk -- lage drogestof- of oppervlaktebelasting toelaatbaar
clarificatie	++ goede effluentkwaliteit mogelijk 0 redelijke effluentkwaliteit -- slechte effluentkwaliteit
indikking	++ hoog drogestofgehalte van het retourslib te bereiken -- laag drogestofgehalte van het retourslib
investeringskosten	++ lage investeringskosten 0 redelijke investeringskosten -- hoge investeringskosten
exploitatiekosten	++ lage exploitatiekosten 0 redelijke exploitatiekosten -- hoge exploitatiekosten

door veelbelovende technieken binnen een vak hoger te plaatsen dan kansarme technieken.

Aan de hand van tabel 9 kunnen aanbevelingen worden gedaan.

De technieken waarvan onvoldoende kennis aanwezig is, maar die wel veelbelovend lijken, moeten nader worden onderzocht op de technische mogelijkheden. Dit betreft magnetische scheiding, zowel met permanente als supergeleidende magneten.

Met de nu aanwezige kennis en ervaring kunnen deze technieken niet op korte termijn nabezinking vervangen.

Flotatie, centrifugeren en in mindere mate filtreren en zeven zijn alternatieven waar voldoende van bekend is. Zij kunnen technisch gezien nabezinking vervangen en lenen zich voor het uitvoeren van een

Tabel 9. Indeling van de verschillende alternatieven voor nabezinking op grond van de technische aspecten en de technische aspecten.

veelbe- lovend ↑	*	magnetische scheiding met rotatie met supergeleiders en magneten	*	centrifugeren	
waardering op grond van de technische aspecten ↓	*	magnetische scheiding	*	filtreren en zeven	
kansarm	*	akoestisch trillen	*	lamellenafscheiding	
				* hydrocyclonen	
		weinig	↑	↓	veel

haalbaarheidsstudie met het oog op het economische aspect. Afhankelijk van de resultaten van een meer grondig onderzoek komen ze in aanmerking om nabezinking op korte termijn te vervangen. Om deze technieken te optimaliseren is (vrijwel-)onderzoek meestal gewenst.

Naar een techniek waarvan onvoldoende bekend is en die kansarm lijkt, zoals akoestisch trillen, kan eerst nog (laboratorium-)onderzoek worden uitgevoerd, dit heeft evenwel geen hoge prioriteit.

Van hydrocyclonen is voldoende bekend om te kunnen zeggen dat ze niet als vervanging van nabezinking zullen dienen.

12.2 Evaluatie van tweetrapsscheidingsinstallaties

In tabel 10 zijn de voor- en nadelen van de eerder besproken combinaties in vergelijking met een ééntrapsinstallatie weergegeven.

De serieschakelingen A, B en C zijn zodanig dat een ééntrapscheiding in staat om het slib in te zetten. Deze beluchtingsruimte kan daardoor een hoger drogestofgehalte opgeleverd worden. De beluchtingsruimte kan, uitgaande van dezelfde ingangslading, kleiner gedimensioneerd worden. Eventueel kan er veel van het slib (massa) geborgen worden door het ingedikte slib te bufferen.

Combinatie A kan een beter effluentsediment dan een ééntrapsinstallatie.

De parallelschakeling D is door de vele combinaties in staat om hydraulische pieken op te vangen. Hierdoor is het mogelijk om tijdens regenwateraanvoeren een vast sedimentgehalte in de beluchtingsruimte te handhaven. Het zuigvermogen tijdens regenwaterafvoeren zal hierdoor hoger zijn.

Het uitvoeren van een onderzoek naar de economische haalbaarheid van tweetrapsscheidingsinstallaties en met name de parallelschakeling lijkt zinvol.

Tabel 10. De voor- en nadelen van een bepaalde tweetrapscheiding in vergelijking met ééntrapscheiding.

combinatie	clarificatie	indikking	opvang hydraulische pieken
A serieschakeling in effluentleiding	+	+	0
B serieschakeling in sibleiding	-	+	0
C als B met terugvoeren effluent van indikker	0	+	0
D parallelschakeling	0	0	+

+ = beter, 0 = geen verschil, - = slechter

12.3 Verbetering van bestaande zuiveringsinrichtingen

Voor de verbetering van de slib/waterscheiding in bestaande zuiveringsinrichtingen komen oplossingen in aanmerking, die op korte termijn na een haalbaarheidsstudie kunnen worden toegepast.

Methoden als het toepassen van vlokmiddel en vlokhulpmiddel, een andere bedrijfsvoering van de beluchtingsruimte, het toepassen van zuivere zuurstof, het bergen van de afvalwateraanvoer, meet- en regeltechnische voorzieningen en bijzondere inloop- en ruimconstructies in de nabezinktank zijn in een aantal gevallen geschikte oplossingen, maar worden hier verder buiten beschouwing gelaten.

Voor het verbeteren van de slib/waterscheiding bij bestaande zuiveringsinrichtingen zijn de volgende technieken van belang:

- lamellenbezinking;
- centrifugeren;
- flotatie;
- tweetrapscheidingsinstallaties.

Met lamellenafscheiding is de nodige ervaring opgedaan. In hoofdstuk 4 is aangegeven dat het toepassen van lamellen alleen zinvol is als de clarificatie en niet het indikken van het slib het probleem is. In Nederland vormt meestal het indikken het probleem. Mendis [16] beschrijft een methode om te bepalen of clarificatie dan wel indikking limiterend is voor de capaciteit van de nabezinktank.

Lamellen kunnen ook in de beluchtingsruimte (bijvoorbeeld bij oxydatiesloten) worden aangebracht. Hoewel dit ten koste van de inhoud van de beluchtingsruimte gaat, kan deze extra bezinkcapaciteit soms uitkomst bieden.

Als indikking limiterend is, komen voor toepassing in eerste instantie centrifugeren en flotatie in aanmerking, al dan niet in een tweetrapsconfiguratie. Met deze technieken is bij de indikking van spuislib de nodige ervaring opgedaan.

13 CONCLUSIES EN AANBEVELINGEN

13.1 Conclusies

- De invloed van het retour-slibdebiet op het proces in de nabezink-tank tijdens regenwateraanvoeren is onvoldoende onderzocht.
- Om nabezinking in het actief-slibproces te kunnen vervangen door een andere scheidingstechniek is nader onderzoek noodzakelijk.
- Lamellenafscheiding is alleen een geschikt alternatief als de clarificatie van het effluent onvoldoende en de indikking niet maatgevend is. In Nederland is de indikcapaciteit meestal maatgevend.
- Flotatie is technisch gezien een alternatief voor nabezinking. De effluentkwaliteit is mogelijk lager. Voor licht slib is flotatie waarschijnlijk goedkoper dan nabezinking.
- Magnetische scheiding, waarbij wel of geen supergeleidende magneet-systeem wordt gebruikt, bevindt zich nog in het laboratorium-stadium, zeer hoge oppervlaktebelastingen zijn misschien te realiseren.
- Filtreren en zeven zijn technisch onvoldoende ontwikkeld om in plaats van nabezinking toe te passen.
- Centrifugeren is in technisch opzicht een geschikt alternatief voor nabezinking.
- Hydrocyclonen zijn niet geschikt om nabezinking te vervangen.
- Akoestisch trillen heeft, voor zover bekend, geen positieve invloed op de bezinking van actiefslib.
- Tweekapsscheidingsinstallaties zijn in een aantal gevallen, technologisch gezien, een interessant alternatief voor conventionele nabezinking.
- Er zijn onvoldoende gegevens beschikbaar om de verschillende technieken op economische aspecten te beoordelen.

13.2 Aanbevelingen

- De haalbaarheid, met het accent op de economische aspecten, onderzoeken van flotatie, centrifugeren en tweetrappsscheiding.
- De technische en economische haalbaarheid van filtreren en zeven onderzoeken.
- Nader onderzoek uitvoeren naar magnetische scheiding.
- Laboratoriumonderzoek uitvoeren naar de invloed van akoestisch trillen op actiefslib.

Algemeen

- [1] Hydraulische en technologische aspecten van het nabezinkproces, Rijswijk, STORA, 1981, 1. Literatuur.
- [2] Hydraulische en technologische aspecten van het nabezinkproces, Rijswijk, STORA, 1981, 2. Ronde nabezinktanks (Ontwerpgegevens en bedrijfservaring).
- [3] Hydraulische en technologische aspecten van het nabezinkproces, Rijswijk, STORA, 1981, 2. Ronde nabezinktanks (Praktijkonderzoek).
- [4] Hydraulische en technologische aspecten van het nabezinkproces, Rijswijk, STORA, 1983, 2. Ronde nabezinktanks (Ruimer- en inlooperconstructies).
- [5] Hydraulische en technologische aspecten van het nabezinkproces, Rijswijk, STORA, 1983, 3. Rechthoekige nabezinktanks (inventarisatie en praktijkonderzoek).
- [6] Mogelijkheden van slib-opdrager-systemen voor de aerobe biologische zuivering van stedelijk afvalwater (literatuurstudie), STORA, VROM, EZ e.a., 1986.
- [7] Overbelasting van nabezinktanks, Voorkoming van slibverlies met polyelectrolyten, Rijswijk, STORA, 1981.
- [8] Voorkomen en bestrijden van licht slib, Rijswijk, STORA, 1981, 1. De rol van de biosorptie.

Lamellenafschieding

- [9] Billmeier, E. - Feststoffabscheider mit lamellen- und kastenförmigen Durchflussprofilen, Wasserwirtschaft, 69 (1979) 3: 73-78.
- [10] Culp, G.L. & Hsiung, K. & Conley, W.R. - Tube clarification process, operating experiences, Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the ASCE, 95 (1969) SA5: 829-847; 96 (1970) SA4: 1009-1011; 97 (1971) SA1: 103.
- [11] Girling, R.M. - Experiences with high rate settlers applied to an existing final clarifier, Winnipeg, Canada, Progress in Water Technology, 8 (1977) 6: 521-530.
- [12] Hansen, S.P. & Culp, G.L. & Stukenberg, J.R. - Practical application of idealized sedimentation theory in wastewater treatment, Journal Water Pollution Control Federation, 41 (1969) 8: 1421-1444.

- [13] Hazen, A. - On sedimentation, Transactions American Society of Civil Engineers, 53 (1904): 45-88.
- [14] Heckel, R. & Korn, H. - Rationalisierung von Absetzbecken mittels Röhrensedimentation, Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 24 (1974) 10: 341-346.
- [15] Leglise, J.P. & Broussaud, A. - La decantation lamellaire.
- [16] Mendis, J.B. & Benedek, A. - Tube settlers in secondary clarification of domestic wastewaters, Journal Water Pollution Control Federation, 52 (1980) 7: 1893-1897.
- [17] Slechta, A.F. & Conley, W.R. - Recent experiences in plant-scale application of the settling tube concept, Journal Water Pollution Control Federation, 43 (1971) 8: 1724-1738.
- [18] Wiesmann, U. & Binder, H. - Clarification and thickening of biosuspensions by sedimentation, Filtration and Separation, 22 (1985): 302-307.
- [19] Yao, K.M. - Theoretical study of high-rate sedimentation, Journal Water Pollution Control Federation, 42 (1970) 2: 218-228.

Flotatie

- [20] Bratby, J. & Marais, G.v.R. - Saturator performance in dissolved-air (pressure) flotation, Water Research, 9 (1975): 929-936.
- [21] Brignal, W.J. - Latest developments in the deep shaft wastewater treatment proces, Public Health Engineer, 10 (1982) 3: 159-163.
- [22] Conway, R.A. & Nelson, R.F. & Young, B.A. - High-solubility gas flotation, Journal Water Pollution Control Federation, 53 (1981) 7: 1198-1205.
- [23] Engwirda, S. - Flotatieclarificatie na beluchting onder verhoogde druk (I), H₂O, 18 (1985) 20: 418-421.
- [24] Engwirda, S. - Flotatieclarificatie na beluchting onder verhoogde druk (slot), H₂O, 19 (1986) 18: 410-415, 420.
- [25] Gehr, R. & Henry, J.G. - Assessing flotation behavior of different types of sewage suspensions, Progress in Water Technology, 12 (1980) 6: Tor 1-21.
- [26] Jedele, K. - Anwendung der Entspannungsflotation zur Trennung des belebten Schlammes vom Wasser, München, Oldenbourg, 1984, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, No 84.

- [27] Kiefhaber, K.P. & Neis, U. & Hanz, T. e.a. - Kosten der Flotation in der Abwasserreinigung, Korrespondenz Abwasser, 27 (1980) 5: 309-313.
- [28] Krofta, M. & Guss, D. & Wang, L.K. - Improved biological treatment with a secondary flotation clarifier, Lenox, Lenox institute for research Inc., 1981, Technical report No LIR/09-81/1, NTIS PB 82-154196.
- [29] Maddock, J.E.L. & Tomlinson, E.J. - The clarification of effluent from an activated-sludge plant using dissolved-air flotation, Water Pollution Control, 79 (1980): 117-125.
- [30] Mulbarger, M.C. & Huffman, D.D. - Mixed liquor solids separation by flotation, Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings of the ASCE, 96 (1970) SA 4: 861-871.
- [31] Parsons, W.A. - Activated sludge plant effluent polishing, Purdue University, Proceedings of the 32nd Industrial Waste Conference, (1977): 24-28.
- [32] Schade, H. - Optimierung von Flotationsanlagen durch Einsatz eines TPF-Abscheiders (Tilttable Plate Flotator) in der Abwassertechnik, Korrespondenz Abwasser, 29 (1982) 9: 629-636.
- [33] Slibindikking, Rijswijk, STORA, 1977, I. Literatuuronderzoek.
- [34] Tilted plate flotation, Effluent and Water Treatment Journal, 18 (1978) 6: 293.
- [35] Weber, J. & Hahn, H.H. - Flotation zur Sanierung saisonal überlasteter kommunaler Kläranlagen, Korrespondenz Abwasser, 31 (1984) 10: 820-824.

Magnetische scheidung

- [36] Allen, D.M. & Sargent, R.L. & Oberteuffer, J.A. - Treatment of combined sewer overflows by high gradient magnetic separation, Cincinnati, U.S. Environmental Protection Agency, 1977, Research Report no EPA 600/2-77-015, NTIS PB-264 935.
- [37] Anderson, N.J. & Kolarik, L.G. & Dixon, D.R. e.a. - Colour and turbidity removal with reusable magnetic particles, Water Research, 14 (1980): 959-966, 967-973; 16 (1982): 1327-1334; 17 (1983) 2: 141-147, 10: 1227-1233, 10: 1235-1243; 18 (1984) 5: 529-534.
- [38] Bitton, G. & Mitchell, R. & Latour, C. de e.a. - Phosphate removal by magnetic filtration, Water Research, 8 (1974): 107-109.
- [39] Bitton, G. & Mitchell, R. - The removal of Escherichia coli-bacteriophage T₇ by magnetic filtration, Water Research, 8 (1974): 549-551.

- [40] Bitton, G. & Fox, J.L. & Strickland, H.G. - Removal of algae from Florida lakes by magnetic filtration, *Applied Microbiology*, 30 (1975) 6: 905-908.
- [41] Bitton, G. & Pancorbo, O. & Gifford, G.E. - Factors affecting the adsorption of polio virus to magnetite in water and wastewater, *Water Research*, 10 (1976): 973-980.
- [42] Faseur, A. Dooren, J. van & Vanbrabant, R. e.a. - Electro-magnetic treatment of wastewaters, In: *Proceedings of the Fourth World Filtration Congress, Part I*, Vanbrabant, R. & Hermia, J. & Weiler, R.A., Ostend, 1986: 3.19-3.25.
- [43] Kurinobu, S. Uchiyama, S. - Recovery of plankton from red tide by HGMS, *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-18 (1982) 6: 1526-1528.
- [44] Latour, C. de - Magnetic separation in water pollution control, *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-9 (1973) 3: 314-316.
- [45] Latour, C. de & Kolm, H. - Magnetic separation in water pollution control II, *IEEE Transactions on Magnetics*, MAG-11 (1975) 5: 1570-1572.
- [46] Latour, C. de & Kolm, H.H. - High-gradient magnetic separation a water-treatment alternative, *Journal American Water Works Association*, 68 (1976) 6: 325-327.
- [47] Latour, C. de - Seeding principles of high gradient magnetic separation, *Journal American Water Works Association*, 68 (1976) 8: 443-446.
- [48] Latour, C. de - HGMS: Economics, applications and seed reuse, *Journal American Water Works Association*, 68 (1976) 9: 498-500.
- [49] MacRae, I.C. & Evans, S.K. - Factors influencing the adsorption of bacteria to magnetite in water and wastewater, *Water Research*, 17 (1983) 3: 271-277.
- [50] MacRae, I.C. & Evans, S.K. - Removal of bacteria from water by adsorption to magnetite, *Water Research*, 18 (1984) 11: 1377-1380.
- [51] Mitchell, R. & Bitton, G. & Oberteuffer, J.A. - High gradient magnetic filtration of magnetic and non-magnetic contaminants, from water, *Separation and Purification Methods*, 4 (1975) 2: 267-303.
- [52] Oder, R.R. & Horst, B.I. - Waste water processing with HGMS, *Filtration and Separation*, 13 (1976): 363-369, 377.
- [53] Rulkens, W.H. - *Haalbaarheidsstudie toepassingsmogelijkheden hoge gradiënt magnetische separatie (HGMS) voor de behandeling van afval(water)stromen*, 's-Gravenhage, TNO hoofdgroep maatschappelijke technologie, 1985.

- [54] Seishin Sangyo, K.K. - Separation of suspended matter from wastewater, Japans patent nr 84 66395, 1984.
- [55] Wang, L.K. & Wang, M.H. & Ziegler, R.C. e.a. - Thickening of sewage sludge with quaternary ammonium compounds and magnetic fields. In: Proceedings of the third national conference on complete waterreuse, Cecil, L.K. & Welch, P.C., New York, American Institute of Chemical Engineers, 1976: 252-258.

Filtreren en zeven

- [56] Fernbach, E. & Tchobanoglous, G. - Centrifugal screen concentrator for activated sludge process: Part I and II, Water and Sewage Works, 122 (1975) 1: 64-67; 2: 40-42.
- [57] Hüper, F. - Filteranlagen zur Sanierung hydraulisch überlasteter Nachklärungen, Korrespondenz Abwasser, 32 (1985) 10: 871-876.
- [58] Joyce, M. & Schultz, W. & Strom, A. - Replacement of activated sludge secondary clarifiers by dynamic straining, Cincinnati, Environmental Protection Agency, 1975, EPA 670/2-75-045.
- [59] Seydler, B. & Näher, G. - Maschinelle Bekämpfung von Blähschlamm in Kläranlagen, Wasser, Luft und Betrieb, 22 (1978) 10: 530-533.
- [60] Verwijdering van zwevende stof uit effluent, Rijswijk, STORA, 1980, 1. Literatuuronderzoek.
- [61] Verwijdering van zwevende stof uit effluent, Rijswijk, STORA, 1983, 2. Snelfiltratie en microzeving (praktijkproeven).
- [62] Wagner, F. - Verhinderung und Bekämpfung von Blähschlamm mit Separatoren, In: Die Sauerstoffzufuhr beim Belebungsverfahren, Probleme mit Blähschlamm, München, Oldenbourg, 1981, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft, No 70: 252-259.

Centrifugeren

- [63] Biofugat-verfahren, Separatoren ersetzen das Nachklärbecken bei der biologischen Reinigung organisch stark verschmutzter Abwässer, Kommunalwirtschaft, (1981) 9: 324-326.
- [64] Malm, L.G. & Aronsson, G. & Widlund, G.T. - Biological waste water purification, Duits patent nr 2741021, 1976.
- [65] Wagner, F. - Düsenseparatoren zur Abtrennung des gereinigten Abwassers vom belebten Schlamm, Wasserwirtschaft, 70 (1980) 6: 232-235.

Toepassing van hydrocyclonen

- [66] Bradley, D. - The hydrocyclone, Oxford, Pergamon Press, 1965.
- [67] Finstein, M.S. & Heukelekian, H. - Gross dimensions of activated sludge flocs with reference to bulking, Journal Water Pollution Control Federation, 39 (1967) 1: 33-40.
- [68] Hunt, D.B. & Kincannon, D.F. & Tiederman, W.G. - The hydrocyclone for solids-liquid separation in biological systems, Water and Sewage Works, 119 (1972) 5: 92-98.
- [69] Jong, F.W. de & Veldkamp, R.G. - Tussenrapport 2: Project "Slib/waterscheiding", Hydrocyclonen, Delft, TU Delft, Vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing, Rapport 86-15, 1986.
- [70] Lagvankar, A.L. & Gemell, R.S. - A size-density relationship for flocs, Journal American Water Works Association, 60 (1968) 9: 1040-1046, 1335.
- [71] Laubenberger, G. - Der Einfluss der hydraulischen Verhältnisse auf Grösse und Aktivität der Belebtschlammflocke, Gesundheits-Ingenieur, 91 (1970) 12: 354-357.
- [72] Laubenberger, G. & Hartmann, L. - Physical structure of activated sludge in aerobic stabilization, Water Research, 5 (1971): 335-341.
- [73] Water Pollution Research 1963, Industrial wastes, Hydrocyclones, London, Department of Scientific and Industrial Research, Her Majesty's Stationery Office, 1964: 71-73.

Akoestisch trillen

- [74] Gaudy Jr, A.F. & Yang, P.Y. & Obayashi, A.W. - Studies on the total oxidation of activated sludge with and without hydrolytic pretreatment, Journal Water Pollution Control Federation, 43 (1971) 1: 40-54.
- [75] Husmann, W. - Über den Einfluss von Ultraschall auf Abwasser und Klärschlamm, Gesundheits-Ingenieur, 73 (1952) 7/8: 127-129.
- [76] Kempa, E.S. - Sludge conditioning by ultrasounds, In: Sludge treatment, Kempa, E.S., Ostend, 1986, Pre-congress Fourth World Filtration Congress: 17-25.
- [77] Lyon, W.A. - The effect of ultrasonics on suspended matter in sewage, Sewage and Industrial Wastes, 23 (1951) 9: 1084-1095.
- [78] Muralidhara, H.S. & Senapati, N. & Ensminger, D. e.a. - A novel electro-acoustic separation process for fine particle suspensions, In: Proceedings of the Fourth World Filtration Congress, Part II, Vanbrabant, R. & Hermia, J. & Weiler, R.A., Ostend, 1986: 15.11-15.17.

[79] Williams, A.R. & Stafford, D.A. & Callely, A.G. e.a. - Ultra-
sonic dispersal of activated sludge flocs, The Journal of
Applied Bacteriology, 33 (1970): 656-663.

VERSLAG BEZOEK WORLD FILTRATION CONGRESS 4

In het kader van het STORA-project slib/waterscheiding werd een bezoek gebracht aan het vierde World Filtration Congress dat van 22 tot en met 25 april 1986 in Oostende, België, gehouden werd.

Tijdens het congres werden voordrachten gepresenteerd over onderzoek en toepassing van fasescheidingstechnieken. Behalve verschillende fasen (vast, vloeibaar en gas) kwam hierbij ook het hele spectrum van deeltjesgrootten aan de orde. Een deel van de voordrachten waarin het ging om afscheiding van vaste deeltjes, met de afmetingen van actief-slibvlokken, van water was van belang voor het STORA-project. Een nadeel was dat een zeer klein deel van de voordrachten betrekking had op afvalwaterzuivering. Hier staat als voordeel tegenover dat er nieuwe en nog niet eerder in de afvalwaterzuivering toegepaste scheidingstechnieken over het voetlicht kwamen.

Gelijktijdig met het congres werd een tentoonstelling gehouden waar verschillende fabrikanten hun produkten exposeerden.

Pre-congress

Voorafgaand aan het congres werd op 21 april de cursus slibverwerking van het "pre-congress" gevolgd.

In de algemene, inleidende voordrachten werd gesproken over:

- slibverwerkingstechnieken;
- bezinking en indikking van (actief-)slib;
- lamellenseparatoren.

Door Kempa werd gewezen op de mogelijkheden van de toepassing van ultrasone technieken bij de conditionering van spuislib.

Met name de informatie over bezinking en indikking en over lamellenseparatoren was goed bruikbaar.

Congress

In een vijftal sessies werd aandacht besteed aan "theory in water filtration", "cake filtration", "pressure and vacuumfiltration", "deep-bed filtration" en "filtermedia".

Een aantal van de gepresenteerde technieken en theorieën is toepasbaar op de filtratie van (drink-) water. Voor afvalwater blijft de toepassing beperkt tot tertiaire zuivering.

Een ander deel van de technieken houdt zich bezig met "cake filtration". De hoge drogestofgehalten die hiermee in de "cake" te bereiken zijn, maken deze technieken geschikt voor ontwatering van spuislib. Gezien de kleine debieten die verwerkt kunnen worden, zijn deze technieken geen alternatief voor nabezinking.

Door Pearce werden de resultaten van proeven gepresenteerd, waarbij de filtercake in trilling werd gebracht (frequenties van 0,1 tot 5000 Hz). Als hiermee de vorming van de cake wordt voorkomen, neemt de filtratiesnelheid toe. Door de toepassing van akoestische trillingen vindt er een betere ontwatering plaats, afhankelijk van de omstandigheden en het soort te ontwateren materiaal.

In de sessie met als onderwerp "magnetic separation" werd door Faseur verslag gedaan van proeven waarbij magnetische scheiding in plaats van nabezinking werd toegepast op actief-slibdeeltjes. In hoofdstuk 6 wordt aandacht aan deze proeven besteed.

Tijdens het congres werd met Faseur van gedachten gewisseld over de verdere ontwikkeling, onder andere schaalvergroting, van deze scheidingsstechniek.

Bij de sessie over "rapid filtration on multimedia" kwam de filtratie van effluent van een afvalwaterzuiveringsinrichting aan de orde. Een toepassing van belang voor tertiaire zuivering.

Centrifuges en hydrocyclonen waren het onderwerp van de sessie "centrifugal separation". Beide technieken zijn voor het STORA-onderzoek van belang. Er werden wiskundige beschrijvingen voor de vorming van de "cake" in centrifuges gepresenteerd. De resultaten van onderzoek aan een tweetraps hydrocycloon werden door afwezigheid van de spreker niet gepresenteerd, maar zijn wel in de "proceedings" te vinden.

Membranen stonden volop in de belangstelling. Als alternatief voor nabezinking zijn ze waarschijnlijk alleen aantrekkelijk als een effluent van zeer hoge kwaliteit moet worden geleverd, bijvoorbeeld in verband met hergebruik.

Een groot aantal voordrachten hield zich bezig met "cross-flow" technieken. Hierbij stroomt de te filtreren suspensie langs (evenwijdig aan) het membraan (de hoofdstroom). Een deel van de vloeistof (het filtraat) gaat door het membraan. De stromingsrichting van het filtraat staat loodrecht op de stromingsrichting van de hoofdstroom. Het debiet van de hoofdstroom is vele malen groter dan het debiet door het filter. De bedoeling is dat met de hoofdstroom vrijwel alle gesuspendeerde deeltjes worden afgevoerd. De vervuiling van het membraan wordt door deze techniek verminderd. Mogelijk is deze techniek toe te passen bij het zeven of filtreren van actiefslib.

In de sessie "new developments in filtration", tenslotte, werd door Muralidhara een elektro-akoestische filtratiemethode gepresenteerd. Deze is in hoofdstuk 10 over akoestische trillingen besproken.

Besluit

Het aantal voordrachten dat direct van belang was voor het STORA-project, was beperkt. Daar staat tegenover dat op vrij efficiënte wijze een overzicht van veel verschillende, mogelijk interessante, fasescheidingsstechnieken werd verkregen.