

# Een nieuw model voor de bezinking van actief-slib

## Inleiding

De bezinking van actief-slib is één van de laatste stappen in het biologisch zuiveringsproces, waar het ontwerp en de procesvoering vrijwel uitsluitend op empirie zijn gebaseerd. Begrippen als oppervlaktebelasting, vaste stof belasting, slib volume-index en de onlangs geïntroduceerde slib kwaliteitsindex [1] vinden in de allereerste plaats hun waarde in de eenvoud van hun definitie en in hun gemakkelijke hanteerbaarheid.

Een gestadige vergroting van het fundamen-



IR. E. EGGERS

sektie Biochemische Reactoren  
Afd. der Scheikundige Technologie, TH-Delft



M. VAN DOORN

Lab. voor Fysische Technologie  
Afd. der Technische Natuurkunde, TH Delft

teel inzicht in het zuiveringsproces en de daaruit afgeleide kinetische beschouwingen hebben voor wat betreft de biologische zuiveringsprocessen al een gedeeltelijk antwoord gegeven op de vraag of de empirische parameters uit het verleden op rationele wijze gebruikt konden blijven worden ten behoeve van ontwerp en procesvoering.

Een voorbeeld hiervan is de relatie tussen de slibbelasting in oxidatieve zuiveringsprocessen en de produktie van slib, waar de theorievorming over maintenance [2] belangrijk toe heeft bijgedragen.

Uit het geringe aantal publikaties over de fundamentele aspecten van de bezinking van geflokkuleerd organisch materiaal, kan afgeleid worden dat:

1. Het inzicht in het proces van de bezinking en in de daarvoor verantwoordelijke mechanismen onvoldoende vorm heeft gekregen.
2. Vanuit de praktijk van de zuiveringstechniek nauwelijks een geformuleerde behoefte is geweest aan optimalisering van het bezinkingsproces.

Zoals uit een recent artikel van Dick [3] onder de veelzeggende titel 'Folklore in the design of final settling tanks' blijkt, is het om verschillende redenen nuttig om het bezinkingsproces nauwkeuriger te bekijken:

1. Het scheidend vermogen van een bezin-

ker heeft een zeer grote betekenis voor het overall rendement van het zuiveringsproces. Het falen van de bezinker heeft meestal zeer ernstige konsekwenties voor de effluentkwaliteit. De opgeloste BOD van het effluent van een installatie heeft meestal waarden, lager dan 5 mg/l. De totale BOD van het effluent wordt in deze situaties vaak bepaald door de hoeveelheid vaste stof die zich aan het scheidingsproces weet te onttrekken. Het resultaat kan zijn een effluent-BOD van 20 mg/l of meer.

2. Een goed werkende zuiveringsinstallatie moet verzekerd zijn van een konstante hoge concentratie biomassa, een functie van het slibgehalte in de gekoncentreerde recycle-stroom uit de bezinker.
3. De groeiende aandacht voor slibontwatering en slibverwerking maakt duidelijk dat de primaire scheiding tussen slib en water, i.c. de bezinking, een steeds belangrijker rol gaat spelen.
4. Automatische procesregeling vindt bij biologische zuiveringsprocessen steeds meer toepassing.

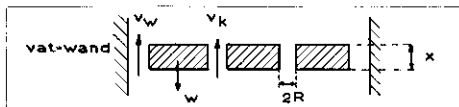
Het is noodzakelijk de diverse stappen van het zuiveringsproces in hun onderlinge samenhang te bezien en daarbij moet de vraag welke regelgrootheden moeten worden gebruikt, beantwoord worden vanuit de kennis over het proces.

Vooralsnog is onduidelijk welke economische voordelen met een verdergaande proceskundige studie en de daaruit voortvloeiende aanbevelingen behaald kunnen worden.

Het gaat om de vraag welke waarde uit een oogpunt van efficiency moet worden toegekend aan empirische ontwerpparameters.

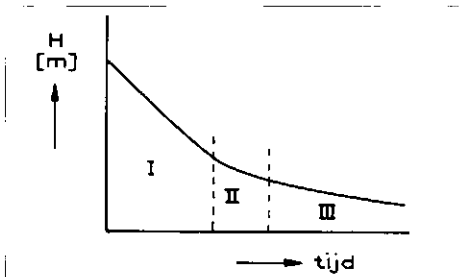
Of zoals Dick zegt: 'The intent is not to

Afb. 1 - Schematische weergave van bezinkende slibdeken.



Afb. 2 - Batch-bezinkingskurve.

H = hoogte van het grensvlak slib-vloeistof;  
I = zone-settling regime; II = overgangsregime;  
III = kompressieregime.



criticize empirical parameters that have been developed in the past, but to evaluate such parameters in the light of current understanding of factors influencing the performance of final sedimentation tanks. Such a critical assessment of the parameters seems necessary in order to evaluate the merit of their continued use'.

In ons onderzoek is getracht een bijdrage te leveren aan het inzicht in een aantal fundamentele aspecten van de bezinking van actief-slib.

Allereerst is daarbij een verklarend model opgesteld en zijn de geldigheidsgrenzen daarvan bepaald.

Vervolgens is het model uitgevoerd in batch-bezinkers op laboratoriumschaal, waarin gebruik gemaakt is van diverse aanvangskoncentraties actief-slib en van verschillende diameters van bezinkvaten. Veel aandacht is besteed aan automatisering van de metingen en daarvoor is in eigen beheer een automatische scheidingsvlakdetector ontwikkeld.

## Model

Het bezinkende slib wordt opgevat als een deken, waarin zich kanaaltjes bevinden om waterverdringing mogelijk te maken, de zgn. kanaaltjestheorie.

Schematisch gezien ziet een plak ter dikte X van de bezinkende slibdeken er als volgt uit (afb. 1).

De deken beweegt zich naar beneden met een snelheid w t.o.v. de stilstaande wand. Door de beweging van het slib wordt water door de kanaaltjes in het slib omhoog geperst met een snelheid  $v_k$  t.o.v. de stilstaande wand, voorzover het de stroming in het slib zelf betreft en met een snelheid  $v_w$  voor de stroming aan de wand.

Het model heeft betrekking op die bezinkingscondities waarin geen versnelling of vertraging van het slib plaatsvindt, m.a.w. w,  $v_k$  en  $v_w$  zijn konstant. In de literatuur [4] wordt dit bezinkingsregime ook wel zone-settling genoemd (zie afb. 2).

Het ontbreken van versnelling of vertraging van het slib in het beschouwde gebied, houdt in dat de resultante van de op het slib werkende krachten nul is. Dat betekent dat de zwaartekracht die op het slib werkt even groot is als de som van de afschuifkrachten. Die afschuifkrachten ontstaan door het snelheidsverschil tussen het slib en de vloeistof.

De krachtenbalans kan in mathematische vorm geschreven worden en leidt via een mathematische procedure, die in de bijlage wordt beschreven, zie ook [5], tot een verband tussen de bezinkingsnelheid w, de droge stof concentratie  $c_m$  en de diameter D van de bezinker.

Dit verband kan in vereenvoudigde vorm als volgt worden weergegeven:

$$w = A(D) \cdot c_m \cdot \exp. (-c_m/k) \quad (1)$$

waarin:

A (D) de term is waarmee de invloed van de diameter van het bezinkvat op de bezinking wordt beschreven en k een konstante is (uitgedrukt in kg/m<sup>3</sup>) waarin de mechanische eigenschappen van het slib zijn verdisconteerd.

**Experimenten algemeen**

De bezinksnelheid van actief-slib is bij 20 °C bepaald in bezinkcilinders met diameters 1,6 cm, 3 cm, 5,4 cm, 9,3 cm en 14 cm voor verschillende waarden van c<sub>m</sub>.

De slib suspensie werd betrokken van een actief-slibinstallatie met denitrificatie-inrichting op pilot-plant schaal (totaal volume: 30 liter). De verblijftijd van het slib in deze installatie bedroeg 25 dagen en de verblijftijd van de vloeistof 10 uur.

De installatie werd gedurende 12 uur belucht en vervolgens 12 uur onbelucht gehouden, dit om de denitrificatie te laten verlopen.

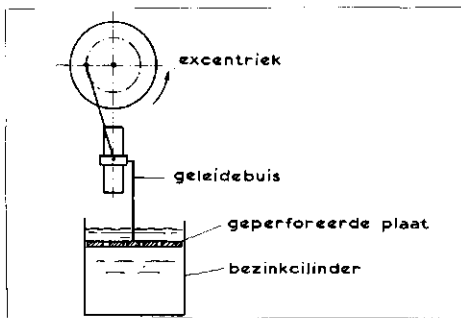
Aan deze suspensie werd een voldoende hoeveelheid onttrokken t.b.v. de betreffende bezinkcilinder. Alvorens het experiment te starten werd een geperforeerde pvc-plaat onder invloed van een excentriek 5 maal op en neer bewogen (zie afb. 3) met een amplitude van 10 cm en een hoeksnelheid van 1/3 π s<sup>-1</sup>.

De pvc-platen waren zodanig geperforeerd dat voor de diverse bezinkcilinders dezelfde stroomsnelheid door de gaatjes werd opgewekt. Door deze behandeling werd het slib nog juist niet gedeflokkuleerd en was het mogelijk om alle experimenten onder vrijwel identieke omstandigheden te laten starten.

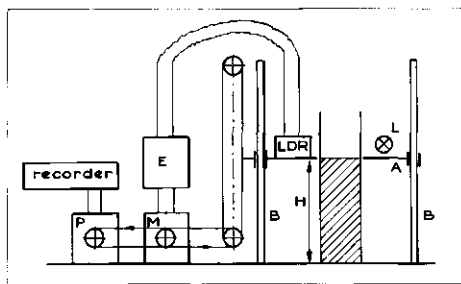
**Bezinksnelheidsmetingen**

Bij deze metingen werd de bezinksnelheid w bepaald door de hoogte H van het grensvlak slib-water als functie van de tijd te meten. Visuele meting van de positie van het grensvlak is een tijdrovende, arbitraire en daardoor onnauwkeurige zaak. Daarom is getracht tot automatisering van deze meting te komen. Hiervoor is een apparaat geconstrueerd, zoals afgebeeld in afb. 4.

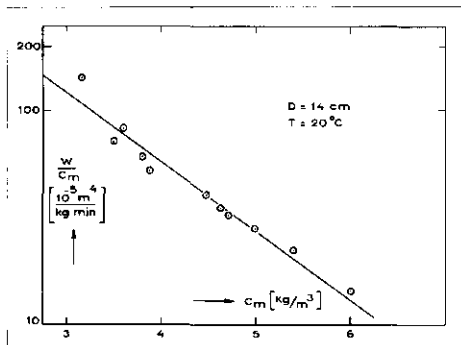
Plateau A kan bewegen langs de twee geleiders B. Op het plateau is een lampje L en een lichtvoetige weerstand (LDR) gemonteerd. Het plateau A kan samen met LDR en L vrij bewegen om de bezinkcilinder, waarin zich de silb suspensie bevindt. Door een motor M met twee draairichtingen wordt het plateau via een snaarmechanisme aangedreven en kan aldus zowel naar boven als naar beneden bewegen. Aan de motor is een lineaire spanningsdeler



Afb. 3 - Apparaat t.b.v. het uniformeren van de startcondities van de bezinkproeven.



Afb. 4 - Geautomatiseerde grensvlakdetector.



Afb. 5 - Grafiek ln (w/cm) als functie van c<sub>m</sub>.

P gekoppeld, zodat er een relatie bestaat tussen de stand van het plateau en de door de spanningsdeler afgegeven spanning. Deze spanning is weer te geven op een recorder als functie van de tijd. Door ijking kan dan direct de hoogte H van het grensvlak als functie van de tijd bepaald worden. Tussen LDR en M is een elektronisch netwerk geschakeld, dat afhankelijk van de weerstand van de LDR de draairichting van de motor bepaalt.

Wanneer het plateau zich boven het scheidingsvlak bevindt, valt er te veel licht vanuit L op de LDR, waardoor de weerstand te laag is. Dit zal tot gevolg hebben dat de motor het plateau laat dalen.

Wanneer het plateau onder het scheidingsvlak staat, zal de weerstand van de LDR te hoog zijn.

**Meetresultaten**

Wanneer vergelijking (1) iets omgewerkt wordt, vinden we

$$w = A(D) \cdot \exp. (-c_m/k) \quad (2)$$

c<sub>m</sub>

Dit betekent dat de waarden van A(D) en k bepaald kunnen worden door ln (w/cm) uit te zetten tegen c<sub>m</sub>.

Voor de bezinkproeven in de cilinder met een diameter van 14 cm luiden de resultaten (zie tabel I):

TABEL I.

w (cm/min)	c <sub>m</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	w/cm (10 <sup>-5</sup> m <sup>4</sup> /kg.min)
0,459	3,16	145,3
0,253	3,50	72,3
0,300	3,60	83,3
0,234	3,80	61,6
0,203	3,87	52,5
0,133	4,44	30,0
0,181	4,47	40,5
0,163	4,63	35,2
0,155	4,71	32,9
0,144	4,98	28,9
0,120	5,41	22,2
0,085	6,01	14,1

Deze resultaten zijn grafisch weergegeven in afb. 5.

Hieruit blijkt dat de meetpunten op semi-logaritmische schaal bij benadering door een rechte kunnen worden weergegeven. Uit vergelijking (2) en uit afb. 5 zijn dan op eenvoudige wijze A(D) en k te berekenen. Op dezelfde wijze vindt berekening van A(D) en k plaats voor de bezinkcilinders met andere diameters. Eenvoudigheidshalve volstaan we hier met het resultaat van de berekeningen. Voor de goede orde is ook voor elke diameter de korrelatiecoëfficiënt r voor het verband tussen ln (w/cm) en c<sub>m</sub> weergegeven (zie tabel II).

TABEL II.

D (cm)	k (kg/m <sup>3</sup> )	A(D) (10 <sup>-2</sup> m <sup>4</sup> /kg.min)	r
14,0	1,36	1,06	0,968
9,3	1,33	0,98	0,984
5,4	1,17	0,99	0,945
3,0	1,22	0,89	0,918
1,6	1,39	0,54	0,946

Uit de waarden van r blijkt dat de kans groter dan 99 % is dat de meetresultaten voldoen aan formule (2). Zie hiervoor [6].

Voor de konstante k wordt gevonden (zie [6]):

$$k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N k_i \pm \frac{t \cdot s}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

t = t-factor behorend bij het aantal vrijheidsgraden;

s = gemeten standaardafwijking;

N = aantal waarnemingen.

De waarden van  $k$  uit tabel II geven dan uiteindelijk:

$$k = (1,3 \pm 0,2) \text{ kg/m}^3$$

Dick et al [7] hebben volgens een andere methode  $k$ -waarden van slib bepaald. Voor drie verschillende soorten slib werden waarden gevonden van resp. 0,35, 1,36 en 1,43  $\text{kg/m}^3$ .

### Toetsing van de buisdiameterinvloed

Volgens het mathematisch model geldt voor het verband tussen  $A(D)$  en  $D$  het volgende verband (5):

$$A(D) = \frac{P}{Q + R/D} \quad (4)$$

waarin  $P$ ,  $Q$  en  $R$  door het systeem vastgelegde konstanten zijn.

Anders geschreven:

$$1/A(D) = Q/P + R/P \cdot 1/D \quad (5)$$

De waarden van  $Q/P$  en  $R/P$  zijn nu te bepalen uit een grafische weergave van  $1/A(D)$  vs.  $1/D$  (zie afb. 6).

Op deze wijze wordt gevonden:

$$1/A(D) = 0,77 + 1,59/D \quad (D \text{ in cm})$$

Als korrelatiecoëfficiënt tussen  $1/A(D)$  en  $1/D$  wordt gevonden  $r = 0,988$ .

Rekeninghoudend met een betrouwbaarheidsinterval van 95 % volgt:

$$1/A(D) = (0,77 \pm 0,21) + (1,59 \pm 0,07)/D$$

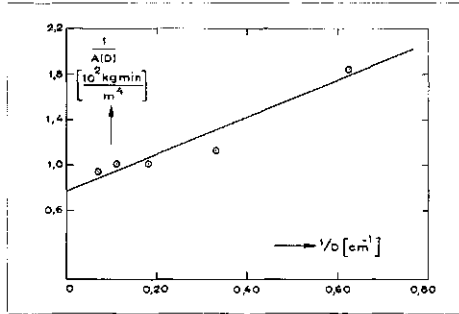
Voor oneindig brede bezinkbakken geldt dan:

$$(1/A(D))_{\infty} = 0,77 \pm 0,21 \quad (\times 10^2 \text{ kg} \cdot \text{min/m}^4)$$

Uit de gevonden relatie en dus ook uit afb. 6 blijkt dat het bezinkgedrag in een oneindig brede bezinker (op voorwaarde dat deze onder dezelfde condities functioneert als de laboratoriumbezinker) met een fout van maximaal 13 % voorspeld kan worden door bezinkproeven te doen in een cilinder van 14 cm diameter.

### Konklusies

1. Het model, gebaseerd op de 'kanaaltjes-theorie' voldoet redelijk, waar het gaat om de vorm van de bezinkcurve in het 'zone-settling' regime, voor concentraties droge stof tussen 2,9 en 6  $\text{kg/m}^3$ .
2. De bezinksneldheid  $w$  als functie van de droge stof concentratie  $c_m$  en de bezinkdiameter  $D$  kan worden geschreven als:  $w = A(D) \cdot c_m \cdot \exp(-c_m/k)$
3. De mechanische eigenschappen van het onderzochte slib worden gesymboliseerd in de faktor  $k$ . De waarde van  $k$  voor dit slib bedroeg  $(1,3 \pm 0,2) \text{ kg/m}^3$ .
4. Uit het verband tussen  $A(D)$  en de diameter  $D$



Afb. 6 - Grafiek  $1/A(D)$  als functie van  $1/D$ .

$A(D)^{-1} = (0,77 \pm 0,21) + (1,59 \pm 0,07)/D$  blijkt dat de afwijking tussen de bezinksneldheid in bezinkers met oneindig grote afmetingen en bezinkers met een diameter van 14 cm hoogstens 13 % bedraagt.

5. De ontwikkelde apparatuur blijkt uitstekend te voldoen waar het gaat om het uniformeren van de begincondities en de automatische registratie van de bezinksneldheid.

Het grote voordeel van deze apparatuur is dat men een indruk krijgt van het gehele bezinkproces, zoals dat door de hoogte van het scheidingsvlak als functie van de tijd wordt weergegeven.

### Diskussie

1. Vooral nog is het geldigheidsgebied van het gepresenteerde model vrij smal, nl. tussen 2,5  $\text{kg/m}^3$  en 6  $\text{kg/m}^3$  gehalte droge stof. Hierbij geldt waarschijnlijk dat buiten dit gebied een ander bezinkingsregime heerst: bij drogestofgehalten kleiner dan 2,5  $\text{kg/m}^3$  het zgn. klarificatieregime en voor gehalten groter dan 6  $\text{kg/m}^3$  het compressieregime. Echter, het beschouwde geldigheidsgebied omvat in zeer grote mate de concentraties droge stof zoals deze in de praktijk worden toegepast.

2. Bij het uitwerken van het model zijn een aantal modelparameters vertaald in meetbare parameters. Dit om de toetsing van het model mogelijk te maken. Hierbij zijn aannames gedaan wat betreft de betekenis van factoren als de dichtheid van nat slib en de volumeconcentratie van slib [5]. Vertaling van deze factoren naar meetbare parameters als de dichtheid van gedroogd slib en de concentratie aan droge stof introduceert een onnauwkeurigheid in het model die niet eenvoudig in een getal uit te drukken is.

3. Het model en de experimenten hebben betrekking op batch-bezinking. In de praktijk wordt meestal continu-bezinking toegepast. Toch zijn er geen redenen om aan te nemen dat het mechanisme van de

bezinking in continu-apparatuur onder dezelfde voorwaarden als in batch-bezinkers principieel afwijkt van de batch-bezinking. Verder onderzoek op dit gebied is gaande.

4. Het effect van roeren op het bezinkproces kan in het huidige stadium van modelvorming nog moeilijk worden voorspeld, omdat flokkulatie van biologisch materiaal een uiterst complex fysisch-biologisch proces is.

5. Van groot belang voor met name de regeling van biologische afvalwaterzuiveringsinstallaties is het verband tussen de biologische eigenschappen van het slib en de bezinkeigenschappen.

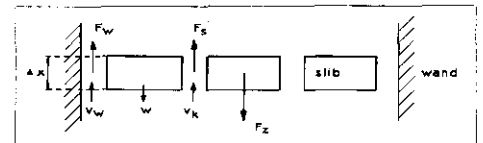
Bij wijze van voorbeeld en illustratie wordt daarom binnen de sectie Biochemische Reactoren onderzoek verricht om het verband op te helderen tussen de denitrificatie in de biologische trap van de zuiveringsinstallatie en de bezinkeigenschappen van het slib.

### Bijlage

#### waarin relatie (1) wordt afgeleid

Het verband tussen de bezinksneldheid  $w$ , de vaste stofconcentratie  $c_m$  en de diameter van de bezinkcilinder  $D$ .

Bij de modelbeschrijving is gesteld dat in het stationaire geval de zwaartekracht die op de plak slib ter dikte  $\Delta X$  gelijk is aan de som van de afschuifkrachten die ontstaan door de stroming door de kanaaltjes en aan de wand (zie afb. 7).



Afb. 7 - De op een plakje slib ter dikte  $\Delta X$  werkende krachten.

In formulevorm:

$$F_z = F_s + F_w \quad (6)$$

waarin:

$F_z$  = zwaartekracht, werkend op plakje  $\Delta X$ .  
 $F_s$  = afschuifkracht, uitgeoefend op het slib door de vloeistofstroming in de kanaaltjes.

$F_w$  = afschuifkracht, uitgeoefend op het slib door de vloeistofstroming aan de wand.

A.  $F_z$

Voor de zwaartekracht  $F_z$ , werkend op het plakje ter dikte  $\Delta X$  kan geschreven worden:

$$F_z = C_v (\rho_{ns} - \rho_w) \cdot g \cdot S \cdot \Delta X \quad (7)$$

waarin:

$C_v$  = volumeconcentratie van het slib.

$\rho_{ns}$  = dichtheid van slib met aangehecht water.  
 $\rho_w$  = dichtheid van water.  
 $g$  = zwaartekrachtversnelling.  
 $S$  = doorsnede van de bezinkcilinder.

**B.  $F_s$**

Voor de afschuifkracht kunnen we per plakje  $\Delta X$  schrijven:

$$F_s = n \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \Delta p_k \quad (8)$$

waarin:

$n$  = aantal kanaaltjes in de doorsnede.  
 $R$  = gemiddelde straal van de kanaaltjes in het slib.  
 $\Delta p_k$  = drukval over een kanaaltje ter lengte  $\Delta X$ .

Wanneer aan de voorwaarde dat het

$$\text{Reynolds-getal } Re = \frac{2 \cdot \rho_w \cdot v_k \cdot R}{\eta} < 2000$$

voldaan is, wordt het verband tussen het debiet  $\Phi_v$  en de drukval  $\frac{dp}{dx}$  voor stroming

door een kanaal met cirkelvormige doorsnede gegeven door de relatie van Hagen-Poiseuille:

$$\Phi_v = \frac{\pi R^4}{8\eta} \cdot \left(-\frac{dp}{dx}\right) \quad (9)$$

waarin:

$\eta$  = kinematische viscositeit.

Voor de totale volumestroom door alle alle kanaaltjes geldt:

$$n \cdot \Phi_v = S \cdot w \quad (10)$$

waaruit volgt:

$$\Phi_v = \frac{S \cdot w}{n} \quad (11)$$

Uit (8), (9) en (11) kan dan afgeleid worden de relatie voor de afschuifkracht  $F_s$  in een kanaaltje ter lengte  $\Delta X$ :

$$F_s = \frac{8\eta \cdot w \cdot S \cdot \Delta X}{R^2} \quad (12)$$

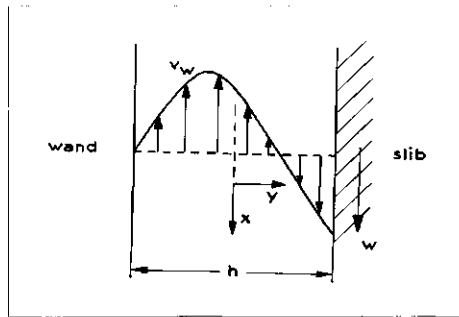
**C.  $F_w$**

In dit geval hebben we te maken met stroming tussen 2 oppervlakken, waarvan er één beweegt. Wanneer deze oppervlakken opgevat worden als verticale, parallelle vlakke platen, dan hebben we te maken met zgn. 'Couette'-stroming, waarvoor Hershey [8] als oplossing geeft in de stationaire toestand bij laminaire stroming ( $Re < 2000$ ).

$$v_w = \frac{-w}{2} \left(1 + \frac{2y}{h}\right) + \frac{h^2}{8\eta} \frac{dp_w}{dx} \left(1 - \frac{4y^2}{h^2}\right) \quad (13)$$

Hierbij geldt:

$\frac{dp_w}{dx}$  = drukval per lengte-eenheid aan de wand.  
 $Y$  = horizontale coördinaat.



Afb. 8 - Stromingsprofiel aan de wand.

Het stromingsprofiel aan de wand is geschetst in afb. 8, waarbij het slib naar beneden beweegt en de vloeistofstroom aan de wand omhoog.

Voor de gemiddelde snelheid  $\bar{V}_w$  aan de wand geldt:

$$\bar{V}_w = \frac{h^2}{12\eta} \cdot \frac{dp_w}{dx} \cdot \frac{w}{2} \quad (14)$$

Voor de kracht  $F_w$  aan de wand geldt nu:

$$F_w = \Delta p_w \cdot \frac{\pi}{2} \cdot D \cdot h \quad (15)$$

waarbij geldt:

$\Delta p_w$  = drukval door stroming aan de wand over een plakje slib ter dikte  $\Delta X$ .  
 $D$  = diameter van het bezinkvat.

Uit (14) en (15) volgt nu:

$$F_w = \frac{24 \cdot \eta}{h \cdot D} \cdot \left(\bar{V}_w + \frac{w}{2}\right) \cdot S \cdot \Delta X \quad (16)$$

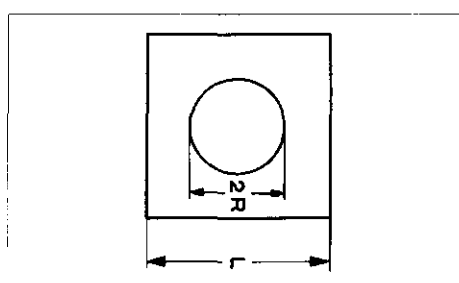
De krachtenbalans [6] is m.b.v. de relaties voor  $F_z$ ,  $F_s$  en  $F_w$  (resp. (7), (12) en (16)) reeds te schrijven als:

$$C_v (\rho_{ns} - \rho_w) \cdot g = \frac{8 \cdot \eta \cdot w}{R^2} + \frac{24\eta}{h \cdot D} \left(\bar{V}_w + \frac{w}{2}\right) \quad (17)$$

hetgeen in feite de gezochte relatie is tussen de bezinksnelheid  $w$ , de volumefractie  $C_v$  en de diameter  $D$  van de bezinkbak.

Om echter een experimenteel verifieerbare vorm te verkrijgen is het nodig (17) in meetbare parameters te schrijven.

Afb. 9 - Karakteristiek sliboppervlak met een kanaaltje.



Met het oog hierop zijn nog enkele aanvullende aannames nodig:

**D. Het gehalte nat slib  $\rho_{ns}$  en de droog slib concentratie  $\rho_{ds}$**

Berekend kan worden dat:

$$(\rho_{ns} - \rho_w) C_v = (\rho_{ds} - \rho_w) \frac{C_m}{\rho_{ds}} \quad (18)$$

waarin:

$\rho_{ds}$  = dichtheid van droog slib, gedroogd volgens het voorschrift van Standard Methods [9].

**E. Relatie tussen  $C_v$  en  $R^2$**

Wanneer de kanaaltjes regelmatig over het oppervlak verspreid zijn en het aantal kanaaltjes per oppervlakte-eenheid konstant is, dan kan er een eenvoudig verband afgeleid worden tussen  $C_v$  en  $R^2$ . In afb. 9 is een kanaaltje in doorsnede getekend met bijbehorend karakteristiek slib oppervlak  $L^2$ .

Wanneer  $n$  het aantal kanaaltjes per oppervlakte-eenheid is, dan geldt:

$$n L^2 = S \quad (19)$$

Eenvoudig is te zien, dat tussen  $R^2$  en  $C_v$  het volgende verband bestaat:

$$(1 - C_v) = \frac{\pi R^2}{L^2} \quad (20)$$

Uit (20) volgt dan:

$$R^2 = \frac{L^2}{\pi} (1 - C_v) \quad (21)$$

**F. Relatie tussen de snelheid aan de wand  $\bar{V}_w$  en de snelheid van bezinkend slib  $w$**

In een evenwichtssituatie geldt dat de drukval door stroming aan de wand

$\frac{dp}{dx} \Big|_w$  gelijk is aan de drukval door stroming in

de kanaaltjes  $\frac{dp}{dx} \Big|_k$ . Dan is dus het verdere

uitgangspunt:

$$\frac{dp}{dx} \Big|_w = \frac{dp}{dx} \Big|_k \quad (22)$$

Nu volgt uit (14):

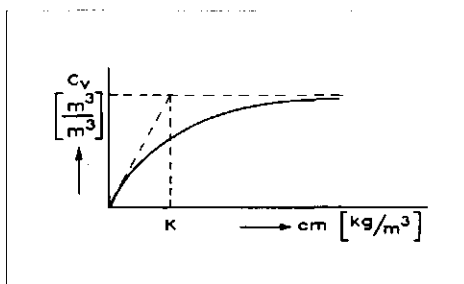
$$\frac{dp}{dx} \Big|_w = 12\eta \cdot \frac{\bar{V}_w + w/2}{h^2} \quad (23)$$

Uit (9) volgt:

$$\frac{dp}{dx} \Big|_k = \frac{V_k}{R^2} \cdot 8\eta \quad (24)$$

Uit (23) en (24) volgt dan:

$$\bar{V}_w + w/2 = \frac{2h^2}{3R^2} \cdot \bar{V}_k \quad (25)$$



Afb. 10 - Grafiek van het aangenomen verband tussen de volumefractie  $C_v$  en de massaconcentratie  $c_m$  van actief-slib.

Uit de continuïteitsvergelijking voor de stroming door de kanaaltjes geldt:

$$w = (1 - C_v) \cdot \bar{V}_k \quad (26)$$

Uit (25) en (26) en met  $h = \alpha \cdot R$  is dan te vinden:

$$\bar{V}_w + w/2 = \frac{2}{3} \frac{w}{1 - C_v} \alpha^2 \quad (27)$$

G. Relatie tussen massaconcentratie  $c_m$  en volumefractie  $C_v$

Voor deze relatie wordt aangenomen dat de toename van de volumefractie  $C_v$  bij verhoging van de massaconcentratie  $c_m$  recht evenredig is met de waterfractie  $(1 - C_v)$ .

Dan kan geschreven worden:

$$\frac{dC_v}{dc_m} = \frac{1}{k} (1 - C_v) \quad (28)$$

met als randvoorwaarde:

$$C_v = 0 \text{ voor } c_m = 0 \text{ kg/m}^3.$$

Oplossing van (28) geeft:

$$C_v = 1 - \exp(-c_m/k) \quad (29)$$

In afb. 10 is dit verband grafisch weergegeven.

De konstante  $k$  heeft de dimensie van massaconcentratie en karakteriseert de structuur van de slibvlokken en is uiteindelijk tevens een maat voor de elasticiteit en dus de compressibiliteit van het slib.

Wanneer nu (18), (21), (27) en (29) ingevuld worden in (17) dan resulteert de volgende vergelijking die geheel uit meetbare variabelen is opgebouwd:

$$w = \frac{(\rho_{ds} - \rho_w) \cdot g \cdot c_m \cdot \exp(-c_m/k)}{8\pi\eta\rho_{ds} \left( \frac{1}{L^2} + \frac{2\alpha^2}{h \cdot D} \right)} \quad (30)$$

Voor één soort actief-slib, gesuspendeerd in water bij konstante temperatuur geldt dan:

$$w = A(D) \cdot c_m \cdot \exp(-c_m/k) \quad (31)$$

## Symbolen en indices

### Symbolen

A	=	bezinkingsfactor	$(\text{m}^4 \text{s}^{-1} \text{kg}^{-1})$
c	=	massaconcentratie	$(\text{kg m}^{-3})$
C	=	volumeconcentratie	$(\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3})$
D	=	diameter van de bezinker	(m)
F	=	kracht werkend op slib	$(\text{kg m s}^{-2})$
g	=	zwaartekrachtsversnelling	$(\text{m s}^{-2})$
h	=	spleetbreedte slib-wand	(m)
k	=	karakteristieke slibkonstante	$(\text{kg m}^{-3})$
L	=	karakteristiek sliboppervlak-parameter	(m)
N	=	aantal waarnemingen	(—)
$\Delta p$	=	drukval over slibplak $\Delta X$	$(\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-2})$
P	=	systeemkonstante	
Q	=	systeemkonstante	
R	=	systeemkonstante	
r	=	korrelatiecoëfficiënt	
S	=	doorsnede van bezinkkolom	$(\text{m}^2)$
s	=	gemeten standaardafwijking	$(\text{kg m}^{-3})$
t	=	t-faktor	
v	=	snelheid van de vloeistof	$(\text{m s}^{-1})$
w	=	snelheid van het slib	$(\text{m s}^{-1})$
$\Delta X$	=	dikte van slib	(m)
y	=	horizontale coördinaat wandstroming	(m)
$\alpha$	=	$h/R_k$	(—)
$\eta$	=	kinematische viscositeit	$(\text{m}^2 \text{s}^{-1})$
$\rho$	=	dichtheid	$(\text{kg m}^{-3})$
$\Phi$	=	debiet	$(\text{m}^3 \text{s}^{-1})$

### Indices

ds	=	droge stof
i	=	waarnemingsindex
k	=	van het kanaaltje
m	=	gewichts-
ns	=	nat-slib
s	=	als gevolg van afschuiving
v	=	volume
w	=	aan de wand/van het water
z	=	als gevolg van de zwaartekracht
$\infty$	=	oneindig grote diameter

### Literatuur

1. Fitch, B., Kos, P., Journal of the WPCF 48, (8), (1976), 1979-1987.
2. Pirt, S. J., Proc. Royal Soc. London, 163, (B), (1965), 224-231.
3. Dick, R. I., Journal of the WPCF 48, (4), (1976), 633-644.
4. Fitch, E. B., in: Biological Treatment of Sewage and Industrial Wastes, vol. II, Anaerobic Digestion and Solids-liquid Separation, J. McCabe, W. W. Eckenfelder jr. (eds.), New York, 1958, 159-195.
5. Eggers, E., Kossen, N. W. F., in voorbereiding.
6. Davies, O. L., Statistical Methods in Research and Production, London, 1949, 270.
7. Dick, R. I., Ewing, B. B., Journal of the San. Eng. Div., ASCE, (1967), SA4, 9-29.
8. Hershey, D., Transport Analysis, New York, 1973, 136.
9. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 12th Ed., New York, 1965, p. 424-25.

