

# De theorie van continue sedimentatie

## 1. Inleiding

Bezinking en sedimentatie van dispersies onder invloed van de zwaartekracht is een unit operation welke niet alleen veelvuldig in de procesindustrie wordt toegepast, maar die ook een essentieel onderdeel vormt bij de mechanische zuivering van afvalwater.

Hazen [1] was één der eersten die sedimentatie aan een wetenschappelijk onderzoek onderwierp en daarmee de fundamentele grondslag legde voor het ontwerpen en het berekenen van bezinkbassins. Hij presenteerde in 1904 een theorie over continue



IR. T. W. M. WOUDA  
huidig adres:  
Gemeenschappelijke Technologische Dienst Oost-Brabant



IR. S. P. P. OTTENGRAF  
Laboratorium voor  
Fysische Technologie,  
TH Eindhoven



PROF. DR. K. RIETERMA  
Laboratorium voor  
Fysische Technologie,  
TH Eindhoven

sedimentatie zoals die uitgevoerd wordt in een bassin waaraan continu de door bezinking te zuiveren dispersie wordt toegevoerd en de gezuiverde vloeistof continu wordt afgevoerd. Hazen veronderstelde hierbij dat hij met een ideaal rechthoekig bassin te maken had waarin de toevoer aan één uiteinde uniform over de gehele hoogte geschiedde en de afvoer aan het andere uiteinde eveneens uniform over de gehele hoogte. Voorts veronderstelde hij dat overal in het bassin de vloeistof dezelfde snelheid had (uniform snelheidsprofiel). Hij kwam tot de conclusie dat indien geen zgn. 'hindered settling' voorkwam (lage concentratie van de dispersie), evenmin als uitvlokking van de gedispergeerde deeltjes, de afscheidingsgraad bepaald wordt door de verhouding van de bezinksnelheid en de zgn. oppervlakte belasting van het bassin (= toevoer debiet gedeeld door het oppervlak van de horizontale doorsnede van het bassin). De ideale bezinkbassins waar Hazen zijn theorie voor opgesteld heeft, bestaan in de praktijk niet. Met name zal het uniforme snelheidsprofiel meestal niet gerealiseerd kunnen worden en ontstaan allerlei afwijkingen van dit ideale profiel.

Voorts zal als regel de concentratie van de dispersie niet zo laag zijn dat geen rekening gehouden behoeft te worden met 'hindered settling'.

In deze publicatie zal nagegaan worden welke afwijkingen van de ideale bezinking het gevolg zijn van de genoemde factoren.

## 2. Oorzaken van een niet-uniform snelheidsprofiel

Afwijkingen van het ideale snelheidsprofiel kunnen het gevolg zijn van verschillende oorzaken:

a. Er is geen sprake van uniforme toe- en afvoer over de gehele hoogte van het bassin. Met name de afvoer zal meestal voornamelijk vlak onder de vloeistofspiegel gelegen zijn. Het zal duidelijk zijn dat het uniforme snelheidsprofiel hierdoor ernstig verstoord wordt.

b. Wand- en bodemeffecten veroorzaken een vertraging van de vloeistofstroming aan de wand resp. de bodem. Veelal zijn de grenslagen waar de vloeistofsnelheid tot nul vertraagd wordt echter in de praktijk niet erg dik zodat deze effecten geen al te grote invloed hebben.

c. De bodem is niet altijd vlak uitgevoerd, maar vertoont meestal een hoogte die van het ene uiteinde naar het andere uiteinde verloopt teneinde het verzamelen en het afvoeren van het bezonken slib te vergemakkelijken.

d. De wind kan aan het oppervlak van de vloeistof in het bassin een stroming in de windrichting induceren. De richting van deze stroming kan dus zowel een meestroming, een terugstroming als een dwarsstroming veroorzaken.

e. Eén van de belangrijkste oorzaken van afwijkingen van het ideale profiel is gelegen in dichtheidsverschillen tussen inlaat en bassin inhoud. Per definitie heeft de toegevoerde dispersie een gemiddeld hogere dichtheid dan de uitlaat, immers de zwaardere gedispergeerde deeltjes moeten door bezinking verwijderd worden. Het gevolg is dat zodra de zwaardere toevoer dispersie in het bassin binnen komt deze dispersie meteen naar de bodem zal zakken terwijl de lichtere, gezuiverde vloeistof zal opstijgen. Langs de bodem zal een versnelde vloeistofstroming ontstaan terwijl het zelfs mogelijk is dat langs het bovenoppervlak van de vloeistof een terugstroming ontstaat zodat de vloeistofinhoud in een circulerende beweging geraakt. Reeds heel geringe dichtheidsverschillen van bijv.  $0,1 \text{ kg/m}^3$  kunnen een aanzienlijk effect sorteren over de toch meestal vrij grote hoogte van een sedimentatie bassin. Een

maat hiervoor is het gemodificeerde Froude getal:

$$\left(\frac{\rho}{\Delta\rho}\right) \left(\frac{v_1^2}{gH}\right)$$

waarin:

$v_1$  = de door het dichtheidseffect extra geïnduceerde vloeistofsnelheid;

$\rho$  = de dichtheid van de vloeistof;

$\Delta\rho$  = het dichtheidsverschil tussen inlaat dispersie en gezuiverde afvoer;

$H$  = hoogte van het bassin;

$g$  = versnelling van de zwaartekracht.

De geïnduceerde vloeistofsnelheid  $v_1$  kan men met behulp van dit Froude getal afschatten door dit Froude getal = 1 te stellen. Opgemerkt moet worden dat dichtheidsverschillen van de boven genoemde orde-grootte ook kunnen ontstaan door temperatuurverschillen tussen inlaat en bassin inhoud, waarbij uiteraard de inlaat dispersie hierdoor zowel een relatief hogere als een relatief lagere dichtheid kan verkrijgen. In het laatste geval zou het effect van een hogere dichtheid als gevolg van de belading met disperse deeltjes in principe weer ongedaan gemaakt kunnen worden.

f. Ten gevolge van de kinetische energie van de inlaat (indien deze over een geringe hoogte geschiedt) kan eveneens een circulatie stroming aan de toevoerkant van het bassin ontstaan.

## 3. Literatuur

Het voorkomen van niet uniforme snelheidsprofielen in praktijkbassins wordt door verschillende auteurs gemeld [2, 3, 4].

Fair et al. [5] noemen deze verschijnselen kort-sluit effecten en stellen dat de efficiency van sedimentsbassins hierdoor nadelig beïnvloed wordt.

Anderson [2] geeft kwantitatieve beschouwingen van verschillende installaties, rechthoekige en ronde, van voorbezink- zowel als nabezinkbassins.

De intuïtief verwachte (negatieve) invloed van een niet uniforme snelheidsverdeling op de bezinkefficiency is door veel onderzoekers bestudeerd.

Sommige van hen [6, 7, 8] stellen dat de efficiency kan worden gerelateerd aan de verblijftijd spreiding in het bassin.

Takamatsu et al. [9] proberen de efficiency te beschrijven als functie van de recirculatieverhouding (d.w.z. de verhouding tussen het terugstroomdebiet en het vooruitstroomdebiet in het bassin). Een beperking van hun model is echter dat het in het geval van een bassin met weliswaar veranderende, maar overal voorwaartse snelheid niet kan worden toegepast.

Clements et al. [10, 11] en Price et al. [4]

voorspellen dat snelheidsverdelingen in een verticale lengtedoorsnede weinig effect op de efficiency zullen hebben, terwijl een snelheidsprofiel in een horizontaal vlak lagere efficiencies zal geven. Clements voert een parameter in de zgn. 'time ratio', waarvan hij claimt dat die een kwantitatieve voorspelling geeft van het effect van snelheidsprofielen in een horizontaal vlak. Eén van de meest vergaande theoretische conclusies wordt gegeven door Huisman [12]. Hij leidt af dat een niet uniform snelheidsprofiel over de hoogte van het bassin dezelfde efficiency geeft als in het 'ideale' geval. Deze conclusie is dus in mindere of meerdere mate in tegenspraak met die van bovenvermelde auteurs. Belangrijke voorwaarden die daarbij echter gelden zijn:

- de diepte van het bassin moet overal gelijk zijn;
- er mag geen 'hindered settling' plaatsvinden;
- alle vloeistofsnelheden zijn horizontaal gericht;
- de invloed van inlaat- en uitlaatzone wordt niet in de beschouwing meegenomen.

Een soortgelijke theorie was ook reeds ontwikkeld door Rietema en Ottengraf [15]. In de volgende paragraaf zal een model voor continue sedimentatie ontwikkeld worden, waarin deze beperkingen niet gelden.

4. Theorie

4.1. Aannamen bij het theoretisch model

In het navolgende model zal een theorie afgeleid worden voor continu doorstroomde sedimentatiebassins, gebaseerd op de volgende aannamen:

1. Het bassin heeft een rechthoekig horizontaal oppervlak en wordt als tweedimensionaal beschouwd, d.w.z. het systeem kan met twee coördinaten worden beschreven: de horizontale coördinaat  $x$  in de richting van de hoofdstroming en de verticale coördinaat  $y$ . In de  $z$ -richting zijn geen snelheden of snelheidsgradiënten. Een soortgelijke theorie kan ontwikkeld worden voor een cirkelvormig bassin, waarbij de stroming dan beschreven wordt in cylindercoördinaten en waarbij de tangentiële snelheid gelijk nul verondersteld wordt [14].
2. De vlakken van inlaat en uitlaat van het bassin zijn verticaal.
3. Het systeem is stationair.
4. De stroming door het bassin is laminair, althans turbulente menging kan worden verwaarloosd. In dat geval kunnen stroomlijnen aangegeven worden voor zowel de vloeistof als de deeltjes.

5. Er treedt geen voortgaande flocculatie op en de bezinkende deeltjes of vlokken zijn gelijk van afmetingen en dichtheid, zodat hun valsnelheid alleen een functie is van de volume fractie vloeistof  $\epsilon$ . (m.a.w. er mag wel 'hindered settling' optreden).

6. Zodra een deeltje de bodem bereikt, wordt het als afgescheiden beschouwd. Meesleping van deeltjes langs de bodem wordt verondersteld geen invloed op de afscheiding te hebben.

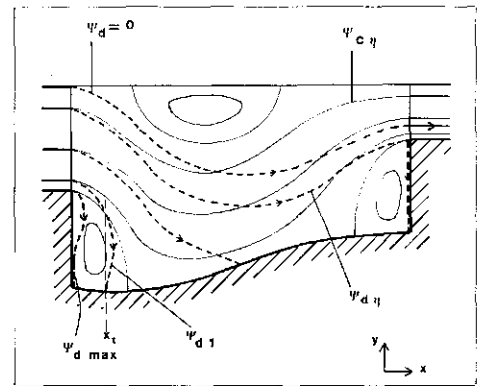
7. De dichtheden van deeltjes en vloeistof zijn constant.

Er zijn geen speciale aannamen nodig voor de hoogte waarover toe- c.q. afgevoerd wordt of over de vorm van de bodem. In principe wordt hierdoor dus iedere bassinvorm, ook die met variërende diepte, beschreven. In het sedimentatiebassin kan ten gevolge van dichtheidsgradiënten in de suspensie of een van de oorzaken, genoemd in paragraaf 2, een 'overall' circulatie ontstaan, terwijl ten gevolge van wind en eventueel de impuls van de inlaatstroming secundaire circulaties kunnen optreden (zie afb. 1).

4.2. Stroomlijnen, snelheidsvectoren, slipsnelheid, 'hindered settling'

In een systeem dat voldoet aan de aannamen 1, 3 en 4 uit de voorgaande paragraaf kunnen stromingsprofielen vaak met succes beschreven worden door gebruik te maken van stroomlijnen. Een stroomlijn is gedefinieerd als de weg waarlangs in de stationaire toestand een vloeistof elementje zich beweegt. In elk punt van zo'n stroomlijn wordt derhalve de richting van de stroming bepaald door de raaklijn in dat punt aan de stroomlijn. Stroomlijnen kunnen derhalve elkaar nooit snijden (anders zou in het snijpunt de vloeistof immers meerdere snelheden hebben in verschillende richtingen). Dit betekent dus dat de hoeveelheid vloeistof die tussen twee stroomlijnen stroomt overal tussen deze stroomlijnen constant is. Hieruit volgt weer dat verdichting (convergentie) van de stroomlijnen gepaard gaat met een toename van de snelheid en een divergentie van de stroomlijnen een afname van de snelheid betekent. In afb. 1 zijn enkele stroomlijnen geschetst. Bij de inlaat en uitlaat is de stroomsnelheid relatief hoog omdat de doorstroomde hoogte geringer is dan in het bassin. De stroomlijnen lopen daar dan ook dichter bij elkaar dan elders in het bassin.

Omdat het sedimenterende systeem uit twee afzonderlijke fasen bestaat, nl. de bezinkende deeltjes (disperse fase) en de vloeistof (continue fase) kan men voor beide fasen afzonderlijk een stelsel van stroomlijnen onderscheiden.



Afb. 1 - Stroomlijnen voor de continue en disperse fase in een continu werkend sedimentatiebassin. (--- stroomlijnen disperse fase) (— stroomlijnen continue fase)

Omdat de deeltjes bezinken zullen de stroomlijnen van de disperse fase de stroomlijnen van de continue fase wel snijden (onderling echter kunnen de disperse-fase stroomlijnen elkaar niet snijden). De stroomlijn van een deeltje dat bezinkt zal op een bepaalde plaats de bodem bereiken. De stroomlijn van een deeltje dat niet afgescheiden wordt zal daarentegen het bassin verlaten. In het bassin zal het nu mogelijk zijn een bovenste deeltjesstroomlijn te tekenen, waarboven geen deeltjes meer voorkomen.

De vloeistof- en deeltjessnelheid worden op iedere plaats in het bassin gegeven door snelheidsvectoren  $v$  en  $v_d$ . Naast deze snelheden wordt nog een derde snelheid gedefinieerd als

$$v = v - v_{-s} - v_{-d} - v_{-c} \tag{4.1}$$

Dit is de zgn. slipsnelheid van een deeltje, die in stilstaande vloeistof derhalve gelijk is aan de valsnelheid. (De slipsnelheid heeft de richting van de drukgradiënt). Aangezien bij sedimentatie de horizontale component van de drukgradiënt verwaarloosbaar is, heeft de slipsnelheid alleen een verticale component  $v_{sy}$ . Voor een enkel stationair vallend deeltje (met een bolvormig star oppervlak) kan uit een krachten balans de slipsnelheid worden afgeleid:

$$v_{s0} = \sqrt{\frac{4g(\rho_d - \rho_c)d}{3C_d \rho_c}} \tag{4.2}$$

(Zie voor verklaring van de symbolen de lijst aan het slot van dit artikel.)

De waarde van  $C_d$  is een functie van het Reynoldsgetal ( $Re$ )

$$Re = \frac{\rho_c v_{s0} d}{\mu_c} \tag{4.3}$$

Voor veel in de praktijk van de waterzuivering voorkomende deeltjes zal de wet van Stokes ( $C_d = 24/Re$ ) een voldoende nauwkeurige voorspelling van de bezinksnelheid van een ongestoord vallend deeltje op-

leveren. Deze wet die geldt indien  $Re < 0,1$  levert voor de ongestoorde valsnelheid in een oneindig uitgestrekt medium:

$$v_{s0} = \frac{(\rho_d - \rho_c) g d^2}{18 \mu_c} \quad (4.4)$$

In een dispersie kunnen deeltjes niet meer met hun eigen, ongestoorde, valsnelheid bezinken, omdat ze in hun bewegingen beïnvloed worden door andere deeltjes.

De valsnelheid van de deeltjes zal door deze invloed lager worden en men spreekt dan ook van 'hindered settling'. Door veel auteurs is aan dit verschijnsel aandacht besteed. Steeds wordt de gehinderde valsnelheid herleid tot een invloed van de volumefractie van de bezinkende deeltjes. Volstaan wordt hier met de relatie van Richardson-Zaki [13] te vermelden, welke het verband geeft tussen de ongehinderde ( $v_{s0}$ ) en de gehinderde valsnelheid ( $v_s$ ) van niet poreuze bolletjes met een star grensvlak, als functie van de volumefractie vloeistof  $\epsilon$ .

$$v_s = v_{s0} \epsilon^{n-1} \quad (4.5)$$

Hierin is  $n$  de macht in de door Richardson en Zaki afgeleide relatie (voor  $Re < 0,2$  is  $n = 4,65$ ).

Als  $C$  de gewichtconcentratie aan deeltjes voorstelt ( $kg/m^3$ ), dan geldt (uiteraard voor

$$\text{deze niet poreuze deeltjes}) \epsilon = 1 - \frac{C}{\rho_d}$$

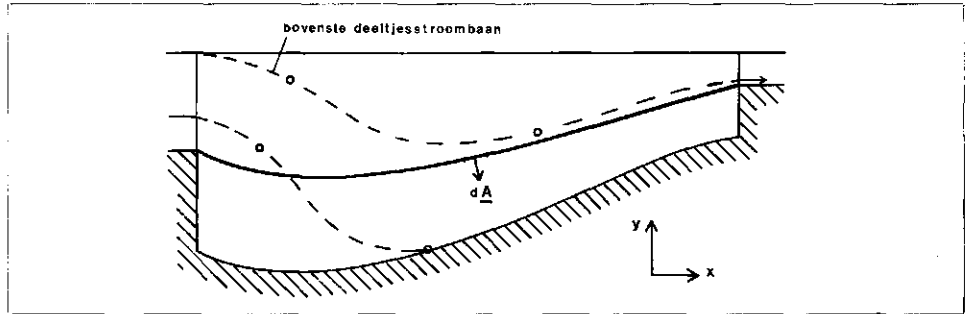
Voor poreuze agglomeraten (zoals actief slib) is een verband tussen de volumefractie van de vlokken en de gewichtconcentratie vaste stof niet zo eenvoudig. De volumefractie wordt hierbij in belangrijke mate mede bepaald door de 'inwendige porositeit'  $\epsilon_i$  van de vlok. Bedraagt de gewichtconcentratie (gebaseerd uitsluitend op de droge stof)  $C$ , dan wordt de volumefractie van de vlokken gegeven door

$$\epsilon = \frac{C}{\rho_d (1 - \epsilon_i)}$$

Het zal duidelijk zijn dat door dit effect hindered settling bij poreuze agglomeraten, waar waarden voor  $\epsilon_i$  van 0,95 of hoger reëel zijn, reeds bij lage vaste stof concentraties kan gaan optreden.

#### 4.3. Continuïteitsvergelijkingen en de conclusies die daaruit kunnen worden afgeleid

Beschouwt men de dispersie als een systeem dat bestaat uit twee fasen: de vloeistof (continue fase) en de bezinkende deeltjes (disperse fase), dan kan men voor beide fasen een massabalans opstellen over een volume elementje van de dispersie. De continuïteitsvergelijkingen, die uit deze massabalansen afgeleid kunnen worden luiden (bij constante dichtheden van continue fase en disperse fase) voor de continue fase



Afb. 2 - Schematische deeltjesstroomlijnen in een sedimentatiebassin. Een denkbeeldig oppervlak A strekt zich uit tussen de onderste punten van inlaat- en uitlaatzone.

$$\frac{\delta \epsilon}{\delta t} = - \operatorname{div} \left( \epsilon \underline{v} \right)_{-c} \quad (4.6)$$

en voor de disperse fase

$$\frac{\delta \epsilon}{\delta t} = \operatorname{div} \left\{ (1 - \epsilon) \underline{v} \right\}_{-d} \quad (4.7)$$

In de stationaire toestand is  $\frac{\delta \epsilon}{\delta t} = 0$ .

Met vgl. (4.1) en met behulp van enkele rekenregels uit de vectoranalyse laten 4.6 en 4.7 zich herschrijven tot

$$\epsilon \operatorname{div} \underline{v} + \underline{v} \cdot \operatorname{grad} \epsilon = 0 \quad (4.8)$$

en

$$(1 - \epsilon) \operatorname{div} (\underline{v} + \underline{v}_s) - (\underline{v} + \underline{v}_s) \cdot \operatorname{grad} \epsilon = 0 \quad (4.9)$$

Optellen van deze twee laatste vergelijkingen en substitutie van dit resultaat in vgl. (4.9) geeft vervolgens

$$\underline{v} \cdot \operatorname{grad} \epsilon = (1 - \epsilon) \left\{ \epsilon \operatorname{div} \underline{v} + \underline{v} \cdot \operatorname{grad} \epsilon \right\}_{-s} \quad (4.10)$$

Met behulp van vgl. (4.5) en bedenkend dat  $v_{sx} = 0$  volgt tenslotte

$$\underline{v} \cdot \operatorname{grad} \epsilon = n (1 - \epsilon) v_{sy} \frac{\delta \epsilon}{\delta y} \quad (4.11)$$

Indien de volumeconcentratie deeltjes laag is ( $\epsilon \rightarrow 1$ ), kan uit vgl. (4.11) een belangrijke conclusie worden getrokken. Omdat  $\operatorname{grad} \epsilon$

en  $\frac{\delta \epsilon}{\delta y}$  van dezelfde orde van grootte zijn en meestal  $v_{sy} \ll |v_d|$  kan in dat geval geconcludeerd worden dat

$$\underline{v} \cdot \operatorname{grad} \epsilon = 0 \quad (4.12)$$

Deze uitdrukking betekent dat de vector  $\operatorname{grad} \epsilon$  loodrecht op de richting van  $\underline{v}$  staat,

of anders geformuleerd, dat de waarde van  $\epsilon$  constant is langs een deeltjesstroomlijn. Dit houdt in dat indien voldaan is aan de voorwaarde dat in de toevoer de concentratie van de dispersie onafhankelijk is van de hoogte,  $\epsilon$  overal constant is beneden de bovenste deeltjesstroomlijn en daarmee ook de droge stofconcentratie  $C$ . In feite betekent dit niet anders dan dat bij bezinking van uniforme deeltjes twee zones te onder-

scheiden zijn: een deeltjesvrije zone en een zone daar beneden, waar de concentratie van de deeltjes overal constant is en gelijk aan de voedingsconcentratie. De scheiding tussen deze zones valt onder de gedane aanname uiteraard samen met de stroomlijn, die de baan van het bovenste deeltje in het bassin beschrijft. Uit het navolgende zal blijken, dat het met deze conclusie mogelijk is ook de efficiency van niet 'ideale' bassins (in de zin van de door Hazen gebruikte terminologie) te berekenen.

#### 4.4. Sedimentatie-efficiency

Men kan nu de efficiency berekenen voor een bassin waarin een niet uniform snelheidsprofiel heerst.

Hiertoe wordt gebruik gemaakt van een denkbeeldig oppervlak A, dat zich uitstrekt tussen de onderste punten van de inlaat en uitlaat en dat overal in het bassin beneden de stroomlijn van de bovenste deeltjes loopt (zie afb. 2).

Aan ieder oppervlakte-elementje  $dA$  wordt een vectorkarakter toegekend. Daarbij is de grootte van  $dA$  gelijk aan de absolute

waarde  $dA$  en de richting van  $dA$  is gegeven door die van de normaalvector op het oppervlak zoals aangegeven in de afbeelding. De netto hoeveelheid deeltjes, die door dit oppervlak verdwijnt komt op de bodem terecht en wordt afgescheiden (zie aanname 6). De totale hoeveelheid deeltjes  $M$ , die per seconde door dit oppervlak A stroomt volgt uit

$$M = \int_A \underline{C} \cdot \underline{v} \cdot dA \quad (4.13)$$

Met behulp van vgl. (4.1) en bedenkende dat  $C = C_0 = \text{konstant}$  volgt nu:

$$M = C_0 \int_A (\underline{v} \cdot \underline{dA} + \underline{v}_s \cdot \underline{dA}) \quad (4.14)$$

De eerste term tussen haken is nauw gerelateerd aan de netto vloeistofstroom door A welke  $\int_A \epsilon \underline{v} \cdot \underline{dA}$  bedraagt. Bij de gedane aanname dat de deeltjesconcentratie klein is, waardoor tevens de aangroeiensnelheid van de sedimentlaag verwaarloosd mag worden is

dit netto vloeistoftransport nul en volgt derhalve

$$\int_{A-c} v \cdot dA \approx \int_{A-c} \varepsilon v \cdot dA = 0$$

De tweede term is in feite de deeltjesstroom door A en is gelijk aan het produkt van  $v_{sy}$  en de horizontale projectie van het elementje  $|dA| = B dx$ .

Dus:

$$M = C_0 \int_0^L v_{sy} B dx = C_0 v_{sy} BL \quad (4.15)$$

Hierin zijn B en L de breedte en lengte van het bassin.

De totale hoeveelheid disperse fase die per seconde het bassin binnenkomt bedraagt bij een totaal dispersiedebiet Q (m<sup>3</sup>/s)

$$M_{tot} = Q C_0$$

Hiermee volgt voor de efficiency  $\eta$  van het bassin

$$\eta = \frac{M}{M_{tot}} = \frac{C_0 v_{sy} BL}{C_0 Q} = \frac{v_{sy}}{\omega} \quad (\text{als } v_{sy} < \omega) \quad (4.16)$$

$$\text{en } \eta = 1 \quad (\text{als } v_{sy} \geq \omega)$$

Hierin is  $\omega$  de oppervlaktebelasting van het bassin. Dit resultaat is in feite de bekende Hazen vergelijking, nu echter ook toepasbaar voor een niet ideaal bassin.

Uit het constant zijn van de concentratie beneden de bovenste deeltjes stroomlijn kan nog een belangrijke conclusie getrokken worden.

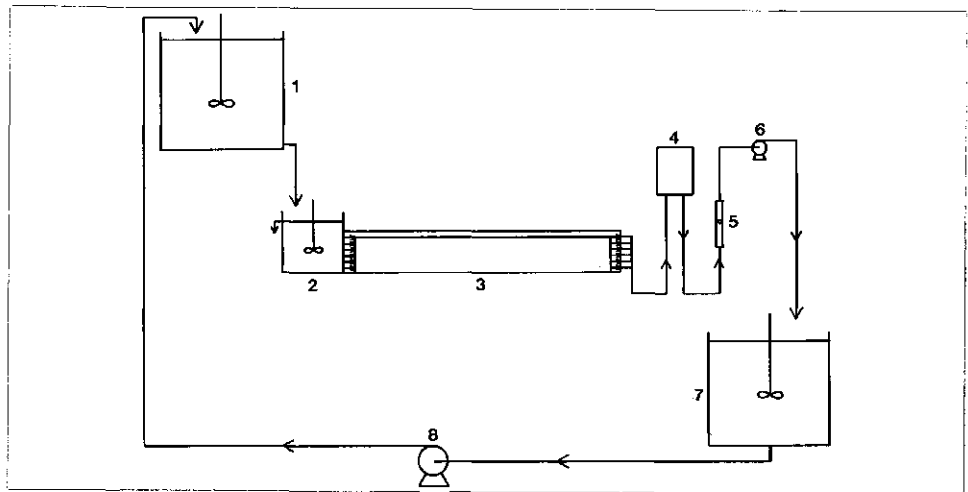
Vlak bij de bodem zal de vloeistof stroomlijn namelijk evenwijdig met de bodem lopen. Dit betekent dat vlak bij de bodem de snelheid waarmee een sedimentierend deeltje in verticale richting de bodem nadert gelijk is aan de slipsnelheid  $v_{sy}$ .

Aangezien de concentratie overal dezelfde is zal de snelheid waarmee de sedimentlaag aangroeit (gemeten in verticale richting!) eveneens overal dezelfde zijn, m.a.w. op elk moment is de sedimentlaag overal uniform in dikte (verticaal gemeten) tenminste zolang de disperse deeltjes voor minder dan 100 % afgescheiden worden.

Bedenkende dat stroomlijnen elkaar nooit kunnen snijden betekent dit voorts dat de onderste deeltjes stroomlijn die het bassin binnen treedt, aan het begin van het bassin (rechtstreeks onder de inlaat) op de bodem eindigt (zie afb. 1).

Voor een meer diepgaande beschouwing en bewijsvoering over deze materie wordt verwezen naar een eerdere publicatie [14]. Daarin komen een aantal andere aspecten aan de orde, o.a. het bewijs, dat het theoretische model ook geldt voor een cirkelvormig bassin.

In appendix I komt de invloed ter sprake van een dispersie met een valsnelheids-



Afb. 3 - Schematische opstelling van een twee-dimensionaal, rechthoekig sedimentatiebassin. (1) voorraadvat, 2 verdeelvat, 3 sedimentatiebassin, 4 Sigrist fotometer, 5 rotameter, 6 pomp, 7 opvangvat)

verdeling, terwijl een grafische methode wordt afgeleid om de overall efficiency van een dergelijke dispersie bij continue sedimentatie te bepalen.

In appendix II wordt de invloed van een snelheidsprofiel in het horizontale x-z vlak behandeld. Als toepassing wordt aan de hand van een vereenvoudigd snelheidsprofiel de invloed op de efficiency besproken.

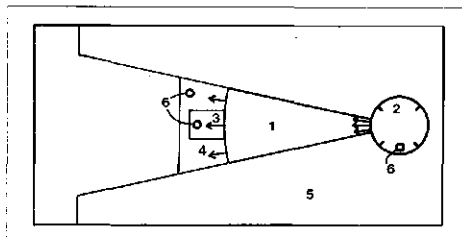
## 5. Experimenten

Experimenten zijn uitgevoerd met behulp van een dispersie bestaande uit een suspensie van harskorrels ( $\rho_d = 1040 \text{ kg/m}^3$ ) in water. Een aantal opstellingen zijn hierbij gebruikt, nl. rechthoekig en een cirkelvormig bassin.

Het eerste is een zgn. twee-dimensionaal, rechthoekig laboratoriummodel, vervaardigd uit perspex. De afmetingen zijn 91 x 3 x 12 cm (L x B x H). Een schema van de opstelling is in afb. 3 gegeven.

De suspensie bevindt zich in een voorraadvat (1) met een inhoud van 70 l. Van daar komt deze in een verdeelvat (2) van waaruit uniform over de gehele hoogte het sedimentatiebassin (3) gevoed wordt. De afvoer

Afb. 4 - Boven-aanzicht van het segment van een (1) cirkelvormig perspex modelbassin; (2) verdeelvat; (3) en (4) opvanggedeelte; (5) rechthoekige perspex bak, gevuld met water, om optische vertekening bij zij-aanzicht te voorkomen; (6) in hoogte regelbare overloopbuizen.



vindt over een gedeelte van de hoogte plaats, wordt opgemengd en door een Sigrist fotometer (4) gevoerd. Deze fotometer wordt gebruikt om te bepalen of de condities stationair zijn. Het debiet wordt met een rotameter (5) bepaald. De uitlaatsuspensie tenslotte wordt in een opvangvat (7) verzameld.

De tweede opstelling (zie afb. 4) bestaat uit een perspex segment van een cirkelvormig bassin (1), uitgevoerd met een verdeelbassin (2) en een opvanggedeelte (3+4). Het geheel is geplaatst in een rechthoekige perspex bak (5) gevuld met water, om optische vertekening bij dwarsaanzicht te voorkomen. De openingshoek van het bassin bedraagt 25°, de binnen- en buitenstraal zijn resp. 10 en 60 cm. De vloeistofhoogte in het bassin wordt op 25 cm gehouden. Evenals bij het rechthoekig model vindt de toevoer over de gehele hoogte en de afvoer over een gedeelte van de hoogte plaats. Het vloeistofniveau in het opvanggedeelte en verdeelbassin kan worden ingesteld met in hoogte regelbare overloopbuizen [6]. Bij de metingen wordt slechts suspensie uit het middengedeelte (3) opgevangen over 1/3 van het uitstroomoppervlak. Dit wordt gedaan omdat de stroming in dit gedeelte radiaal symmetrisch is (dus ideaal) en derhalve geen nadelige invloed op de efficiency kan veroorzaken d.m.v. randeffecten. Tot slot zij nog vermeld dat het gehele systeem (bezinkbassin, rechthoekige ombouw en voorraad vat van 200 l) gedurende één en hetzelfde experiment op constante (en tevens omgevings) temperatuur wordt gehouden om beïnvloeding van het snelheidsprofiel als gevolg van dichtheidsverschillen door temperatuurgradiënten te voorkomen.

Vóór de experimenten met de suspensie werden uitgevoerd is met water van kon-

stante temperatuur gecontroleerd, dat in dat geval het snelheidsprofiel in een verticale x-y doorsnede praktisch vlak ('ideaal') was. Dit gebeurde met behulp van een inktinjectie, terwijl het bassin alleen met water van constante temperatuur werd doorstroomd. (De inkt was op dezelfde dichtheid gebracht als van het ontvangende water). Uit het traject van de inkttraces bleek duidelijk dat het snelheidsprofiel in een verticale doorsnede praktisch vlak was.

Dat het handhaven van een uniforme temperatuur in het bassin hierbij van belang is, moge blijken uit het feit dat de specifieke

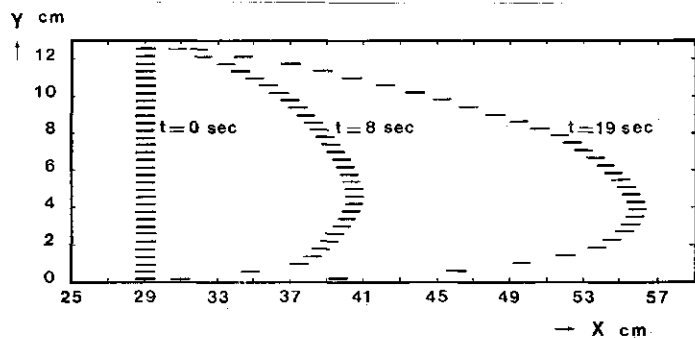
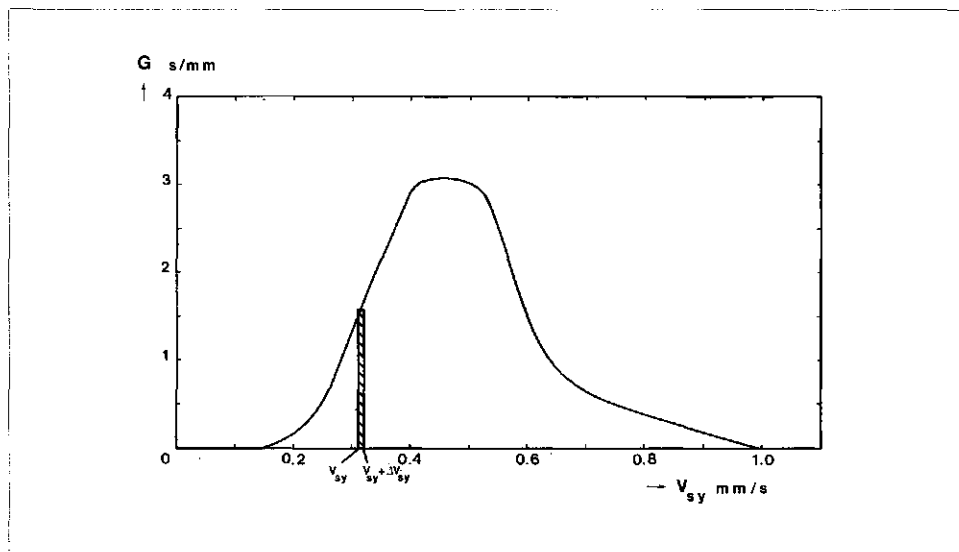
$$\text{dichtheidsvariatie voor water} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T} =$$

0,0002/°C bedraagt. Temperatuurverschillen in het bassin van ca. 1 °C veroorzaken dan reeds dichtheidsvariatiën die vergelijkbaar zijn met die tijdens de sedimentatie-experimenten (zie 6.1).

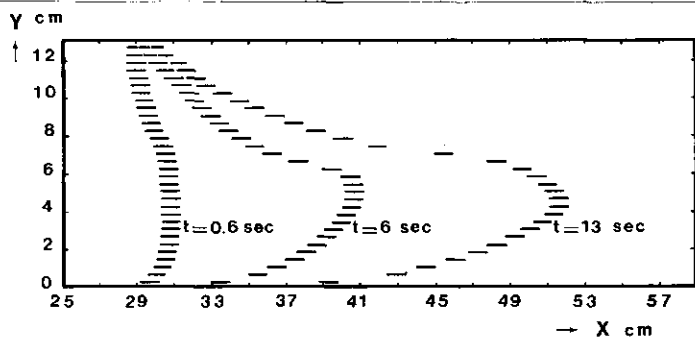
De deeltjessuspensie waarmee vervolgens de proeven zijn uitgevoerd bestaat uit water met harskorrels ( $\rho_d = 1040 \text{ kg/m}^3$ ). Van de deeltjes, die een spreiding in diameter (en dus in valsnelheid) bezitten, is een valsnelheidsverdeling opgenomen m.b.v. een sedimentatiebalans. Het resultaat is gegeven in afb. 5.

Om de theorie, zoals in paragraaf 4 beschreven, te toetsen zijn in het bassin verschillende snelheidsprofielen in het verticale x-y vlak gecreëerd. Dit gebeurt door proeven uit te voeren met verschillende droge stofconcentraties, waardoor de dichtheid van de inlaatsuspensie varieert. Bij deze verschillende concentraties wordt bij een aantal waarden voor de oppervlaktebelasting de efficiency bepaald en vergeleken met de voorspelde waarde, zoals deze volgt uit de theorie en de gemeten valsnelheidsverdeling.

Afb. 5 - Valsnelheidsverdeling G als functie van de valsnelheid  $v_{sy}$  van de gebruikte harskorrels in water.



Afb. 6 - Snelheidsprofiel in een x-y vlak, als het bassin wordt gevoed met een suspensie van 5 kg/m<sup>3</sup>. De superficiële snelheid (= Q/HB) bedraagt 0,7 cm/s. De kleurstof werd geïnjecteerd over de gehele hoogte van het bassin. De afbeelding toont de plaats van de tracer na 0,8 en 19 sec.



Afb. 7 - Snelheidsprofiel in een x-y vlak bij een concentratie van 20 kg/m<sup>3</sup>. De superficiële snelheid bedraagt 0,7 cm/s. De afbeelding toont de plaats van de tracer na 0,6, 6 en 13 sec.

## 6. Resultaten en discussie

### 6.1. Rechthoekig bassin

De verschillende snelheidsprofielen zijn verkregen door vier droge stof concentraties toe te passen:  $C_0 = 5, 10, 15$  en  $20 \text{ kg/m}^3$ , met bijbehorende waarden voor  $\epsilon_0 = 0,9952, 0,9904, 0,9856$  en  $0,9808$ . Deze waarden zijn zodanig, dat de afwijkingen met de gemeten valsnelheidsverdeling t.g.v. hindered settling verwaarloosbaar zijn.

Ten gevolge van de verschillende  $C_0$  waarden ontstaan verschillende dichtheidsgradiënten in het bassin. Deze resulteren in snelheidsprofielen, waarbij de snelheden in het onderste gedeelte van het bassin veel groter zijn dan in het bovenste gedeelte.

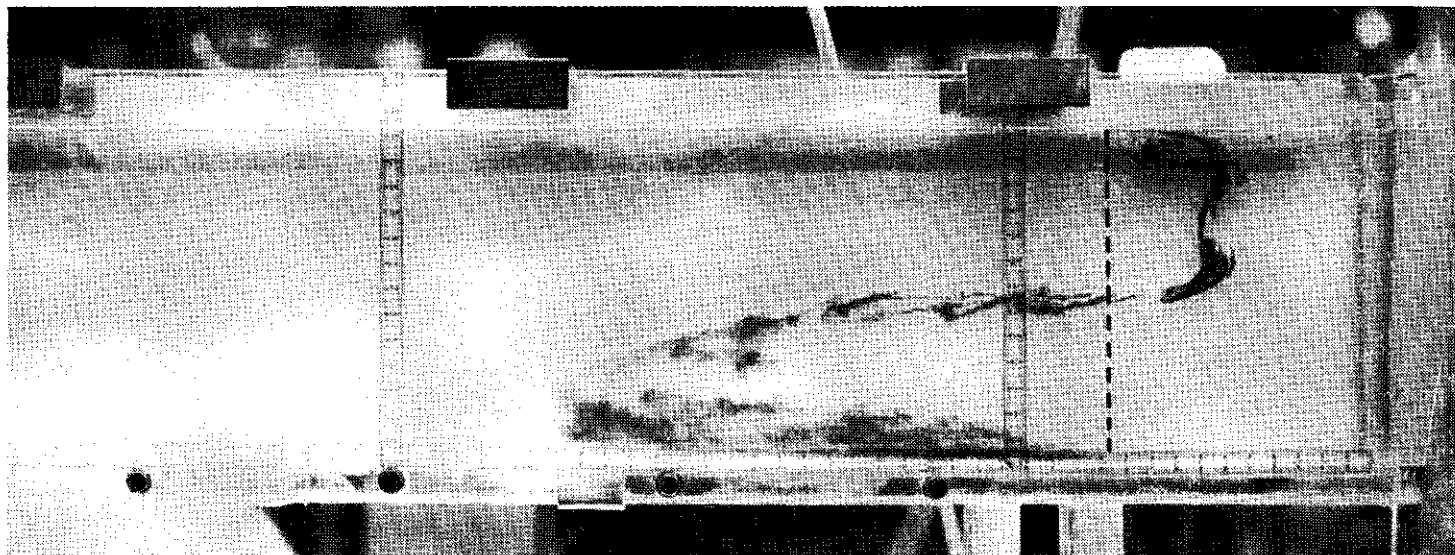
In afb. 6 en 7 is dit duidelijk geïllustreerd voor twee concentraties,  $C_0 = 5$  resp.  $20 \text{ kg/m}^3$ . De dichtheid van de inlaatsuspensie bedraagt dan  $1000,2$  resp.  $1000,8 \text{ kg/m}^3$  (indien  $\rho_c = 1000 \text{ kg/m}^3$ ). Ondanks deze uiterst geringe verschillen is het effect op het snelheidsprofiel zeer duidelijk.

De superpositie van de circulatiestroom en de (vlakke) hoofdstrooming resulteert bij de getoonde afb. in een profiel waarbij de snelheden overal in het bassin positief gericht zijn. Bij een aantal experimenten zijn de condities echter zodanig gekozen, dat in het bovenste gedeelte van het bassin zelfs terugstroming optrad.

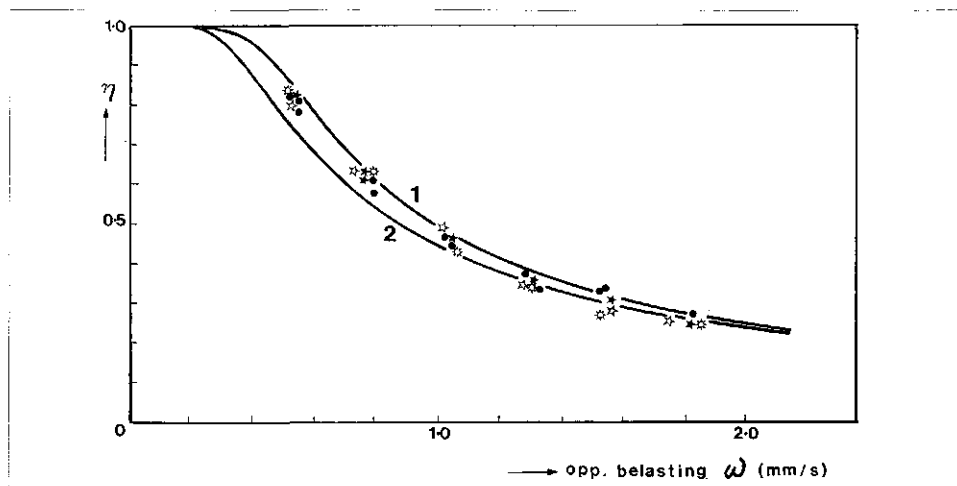
In afb. 8 is een opname gegeven waarbij m.b.v. een inktinjectie deze terugstroming duidelijk zichtbaar is gemaakt. De gemeten efficiëncies zijn gegeven in afb. 9.

De oppervlaktebelasting varieert tussen 0,5 en 2,0 mm/s. Bij de toegepaste vloeistofhoogte in het bassin zijn deze waarden laag genoeg om geen turbulenties in het bassin te veroorzaken.

De lijnen (1) en (2) zijn theoretische lijnen, berekend m.b.v. de valsnelheidsverdeling uit



Afb. 8 - Terugstroming aan de bovenzijde van het sedimentatiebassin door een dichtheidsgradiënt. (— — — oorspronkelijke inktinjectie)



Afb. 9 - Gemeten efficiëncies als functie van de oppervlaktebelasting  $\omega$  in het twee-dimensionaal, rechthoekig sedimentatiebassin. De verschillende snelheidsprofielen werden verkregen door toepassing van verschillende concentraties: 5 (●), 10 (★), 15 (open ster) en 20 (zonnetje)  $\text{kg/m}^3$ .

Lijn 1 geeft de efficiency bij een vlak snelheidsprofiel in het x-z vlak.  
Lijn 2 de berekende efficiency bij een parabolisch profiel in het x-z vlak.

afb. 5 en vgl. I.2 uit Appendix I. De lijn (1) geeft de theoretische efficiency indien in een horizontale x-z doorsnede een vlak snelheidsprofiel heerst. De lijn (2) geeft de theoretische efficiency indien in een dergelijke doorsnede een parabolisch profiel heerst (zie voor uitwerking Appendix II). Het werkelijke snelheidsprofiel in een x-z vak bleek bij de experimenten tussen beide profielen te liggen; de gemeten efficiëncies liggen eveneens tussen de theoretische lijnen.

### 6.2. Cirkelvormig bassin

De toegepaste concentraties bedragen bij deze experimenten 5, 15 en 30  $\text{kg/m}^3$ . Ook hier blijkt het snelheidsprofiel in het x-y vlak duidelijk beïnvloed te worden door de inlaatconcentratie. De gemeten sedimentatie-efficiëncies zijn voor een drietal waarden van de voedings-

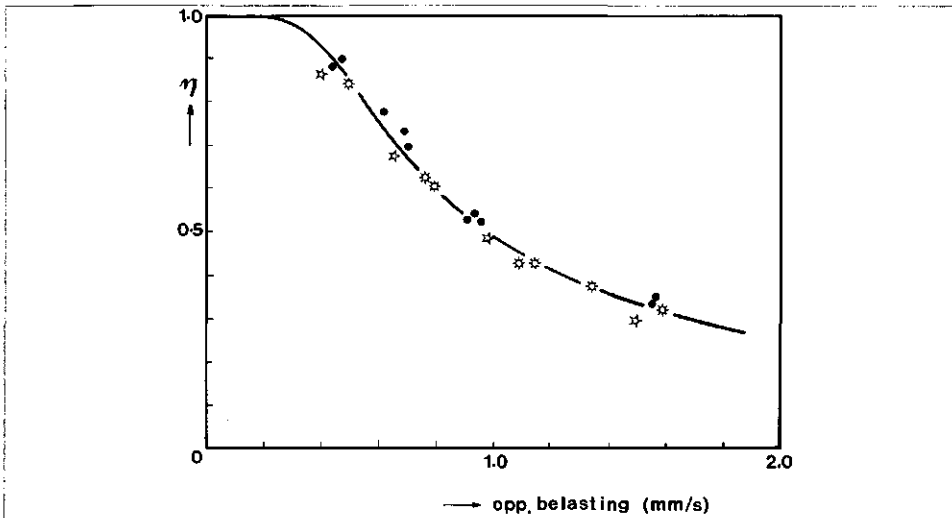
concentratie  $C_0$  weergegeven in afb. 10. De getrokken curve geeft weer het theoretische verloop aan tussen de efficiency  $\eta$  en de oppervlaktebelasting  $\omega$ , zoals dat verwacht wordt uit de valsnelheidsverdeling van de onderzochte suspensie. Ook hier blijkt evenals bij het rechthoekige bassin duidelijk, dat de efficiëncies goed voldoen aan de voorspelde waarden en dat het snelheidsprofiel derhalve geen invloed heeft op de resultaten. In tegenstelling tot de experimenten in het rechthoekig bassin is één theoretische lijn gegeven, omdat het snelheidsprofiel in een horizontale x-y doorsnede radiaal symetrisch bleek in dat deel van het segment waar gemeten werd. Zoals in par. 5 beschreven, is in het cirkelvormige bassin het effect van wandinvloeden voorkomen door slechts het effluent te bemonsteren, dat door het middengedeelte van het uitlaattoepervlak stroomde.

### 6.3. Beïnvloeding van het flocculatieproces

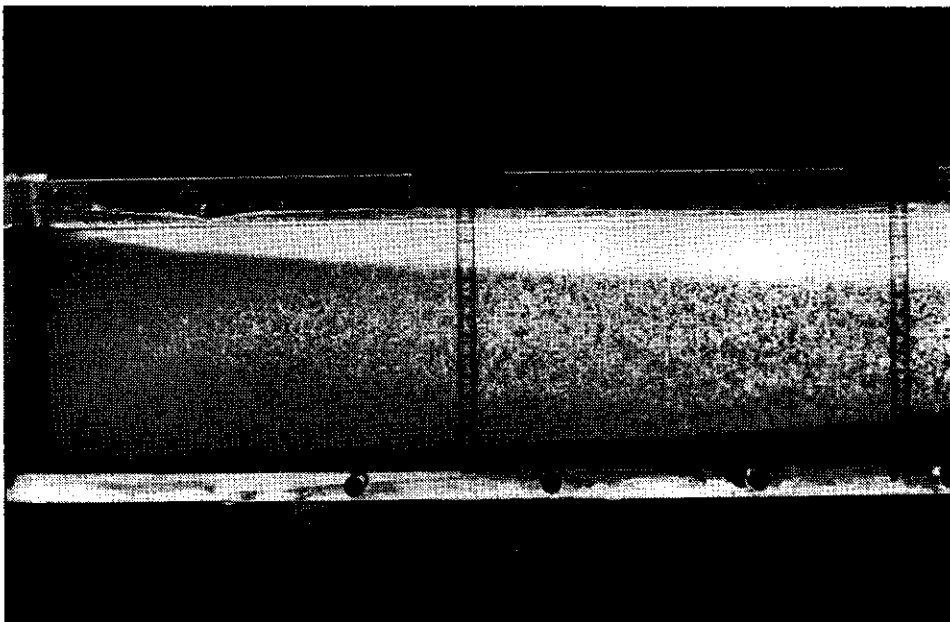
Het optreden van circulaties heeft op een bezinkbassin waarin flocculatie optreedt twee elkaar tegenwerkende effecten. Het positieve effect wordt veroorzaakt doordat de snelheidsgradiënten in het bassin de onderlinge ontmoetingskans van de suspensiedeeltjes vergroten (deeltjes in een stroombaan halen de deeltjes in een 'langzamere' stroombaan in of omgekeerd). Met vergroting van de ontmoetingskans neemt ook de flocculatiesnelheid toe. De grotere vlokken zullen in het algemeen sneller bezinken waardoor de efficiency toeneemt. Het negatieve effect kan door dezelfde snelheidsgradiënten worden veroorzaakt indien deze te groot worden. Actief slibvlokken hebben een zeer ijle structuur en relatief lage afschuifkrachten kunnen al het opbreken van vlokken in kleinere vlokken met een geringe valsnelheid ten gevolge hebben.

Experimenten op ons laboratorium hebben aangetoond, dat afschuifsnellheden van 1,20  $\text{sec}^{-1}$  of meer door dit opbreekeffect de sedimentatiesnelheid van actief slib vlokken reeds duidelijk verlagen. Dat flocculatie ook gunstig kan uitwerken op het sedimentatieproces, wordt geïllustreerd in afb. 11.

Deze afb. toont een opname van een continu doorstroomde laboratorium opstelling, waarin bezinking van een flocculerende  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  suspensie in water optreedt. Duidelijk is waar te nemen dat de bezonken laag in dikte toeneemt met de afstand in het bassin, hetgeen wijst op een toenemende bezinksnellheid van de vlokjes. In 4.4 werd er reeds op gewezen dat bij een constante bezinksnellheid van de deeltjes ook de dikte van de bezonken laag constant zou moeten zijn.



Afb. 10 - Gemeten efficiëncies in het cirkelvormig bassin. De toegepaste vaste stofconcentraties bedragen: 5 (●), 15 (open ster) en 30 (zonnetje) kg/m<sup>3</sup>. De getrokken curve geeft het theoretisch verloop weer.



Afb. 11 - Continue sedimentatie van een flocculerende Fe(OH)<sub>3</sub> suspensie in water.

## 7. Conclusies

Het gepresenteerde model geeft een aantal belangrijke uitbreidingen van de theorie op het gebied van continue sedimentatie van een niet flocculerende dispersie. Indien de volumeconcentratie van de disperse fase gering is, kunnen zowel voor het geval van 'unhindered' als 'hindered settling' uit het model de volgende conclusies getrokken worden:

— In een sedimentatiebassin zijn twee zones te onderscheiden:

1. een boven-zone, die deeltjes vrij is;
2. een beneden-zone waarin de deeltjesconcentratie constant is (althans bij een toevoerconcentratie die onafhankelijk is van de hoogte).

— De sedimentatie-efficiency volgt uit de Hazen vergelijking en blijkt onafhankelijk te zijn van de hoogte van inlaat- en uitlaatzone en onafhankelijk van de vorm van de bodem van het sedimentatiebassin noch af te hangen van het al dan niet constant zijn van de diepte van het bassin.

— In een sedimentatiebassin kunnen door verschillende oorzaken zeer aanzienlijke afwijkingen van het 'ideale' (= vlakke) snelheidsprofiel optreden. Zowel theoretisch als experimenteel is aangetoond dat afwijkingen van het vlakke snelheidsprofiel in een verticale lengte doorsnede geen invloed hebben op de sedimentatie-efficiency, maar dat afwijkingen in een horizontale doorsnede de efficiency negatief beïnvloeden.

den. Tevens kan hieruit de belangrijke conclusie getrokken worden, dat kennis van de verblijftijdsspreiding alléén nooit voldoende is om informatie te geven omtrent haar invloed op de sedimentatie-efficiency.

## Appendix I

### Invloed van een valsnelheidsverdeling

Als de deeltjes niet uniform van afmetingen, vorm en dichtheid zijn, zal er een valsnelheidsverdeling  $G(v_{sy})$  bestaan (zie afb. 5). Indien deze verdeling 'genormeerd' is, geldt

$$\int_0^{\infty} G(v_{sy}) \cdot dv_{sy} = 1 \quad (I.1)$$

Hierin is  $G(v_{sy}) \cdot dv_{sy}$  de massa fractie deeltjes met valsnelheid tussen  $v_{sy}$  en  $v_{sy} + dv_{sy}$ .

Voor deze massafractie wordt de efficiency gegeven door vgl. 4.16. Voor de overall efficiency van alle deeltjes met valsnelheid tussen  $v_{sy} = 0$  en  $v_{sy} = \infty$  volgt dan:

$$\eta_{\text{overall}} = \int_0^{\infty} \eta(v_{sy}) \cdot G(v_{sy}) \cdot dv_{sy} \quad \text{met}$$

$$\eta(v_{sy}) = \frac{v_{sy}}{\omega} \quad \text{indien } v_{sy} < \omega \quad (I.2)$$

$$\eta(v_{sy}) = 1 \quad \text{indien } v_{sy} \geq \omega$$

Met behulp van de zgn. cumulatieve valsnelheidsverdeling kan de efficiency op een eenvoudige wijze grafisch bepaald worden als functie van de oppervlaktebelasting  $\omega$ . De cumulatieve valsnelheidsverdeling  $F$  wordt gedefinieerd als

$$F(v_{sy}) = \int_0^{v_{sy}} G(v_{sy}) \cdot dv_{sy} \quad (I.3)$$

$F(v_{sy})$  is derhalve de massafractie deeltjes met een valsnelheid tussen 0 en  $v_{sy}$ . Het restant  $1 - F(v_{sy})$  heeft een snelheid tussen  $v_{sy}$  en  $\infty$ .

De algemene afleiding van deze grafische bepaling is als volgt. De hoeveelheid deeltjes (kg/s) met valsnelheid tussen  $v_{sy}$  en  $v_{sy} + dv_{sy}$ , die per tijdseenheid bezinkt tussen het begin en een afstand  $x$  in het bassin, bedraagt

$$Q C_0 \eta^i(v_{sy}) \cdot G(v_{sy}) \cdot dv_{sy} \quad \text{met}$$

$$\eta^i(v_{sy}) = \frac{v_{sy}}{\omega_x} = \frac{v_{sy}}{Q/Bx} \quad \text{als } v_{sy} < \omega_x \quad (I.4)$$

$$\eta^i(v_{sy}) = 1 \quad \text{als } v_{sy} \geq \omega_x$$

zoals met behulp van vgl. 4.16 is in te zien. De totale hoeveelheid  $M(x)$  die tussen 0 en  $x$  bezinkt, bedraagt dan:

$$M(x) = C_0 Bx \int_0^{\omega_x} v_{sy} G(v_{sy}) \cdot dv_{sy} +$$

$$Q C_0 \int_{\omega_x}^{\infty} G(v_{sy}) \cdot dv_{sy} \quad (I.5)$$



Hierin is  $\omega_x = \frac{Q}{Bx}$  gelijk aan de valsnelheid van die deeltjes, die op de plaats x net volledig bezonken zijn. Toepassing van partiële integratie levert:

$$M(x) = C_0 Bx [F(\omega_x) \cdot \omega_x - \int_0^{\omega_x} F(v_{sy}) \cdot dv_{sy}] + QC_0 [1 - F(\omega_x)] \quad (I.6)$$

en met  $\omega_x = \frac{Q}{Bx}$

$$M(x) = QC_0 [1 - \frac{Bx}{Q} \int_0^{\omega_x} F(v_{sy}) \cdot dv_{sy}] \quad (I.7)$$

De overall efficiency volgt door  $x = L$  te kiezen, waardoor

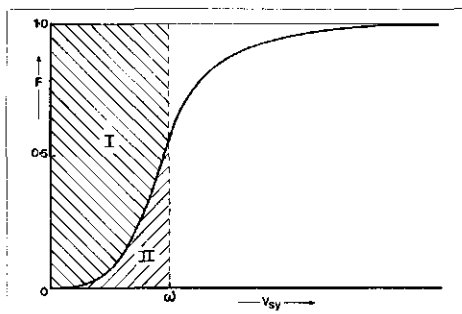
$$\omega_{x=L} = \frac{Q}{BL} = \omega$$

Dan volgt

$$\eta_{overall} = \frac{M(L)}{M_{tot}} = 1 - \frac{1}{\omega} \int_0^{\omega} F(v_{sy}) \cdot dv_{sy} \quad (I.8)$$

Door dus van de functie  $F(v_{sy})$  het oppervlak tussen  $v_{sy} = 0$  en  $v_{sy} = \omega$  te bepalen (zie afb. 12) volgt uit vgl. I.8 op eenvoudige wijze de efficiency

$$\eta_{overall} = \frac{\text{opp I}}{\text{opp I} + \text{II}}$$



Afb. 12 - Grafische bepaling van de sedimentatie-efficiency uit een gegeven valsnelheidsverdeling.

Vergelijking I.8 die door Huisman [12] reeds eerder afgeleid is voor een ideaal, horizontaal doorstroomd bassin, blijkt derhalve een algemene geldigheid te hebben, waarbij de hoogte van inlaat- en uitlaatzone noch de vorm van de bodem van enige invloed zijn. Uit de bewijsvoering zal het duidelijk zijn dat ook de diepte van het bassin niet constant hoeft te zijn.

**Appendix II**

*Invloed snelheidsprofiel in horizontaal x-z vlak*

In het voorgaande is steeds aangenomen dat er in de z-richting noch snelheden noch snelheidsgradiënten aanwezig zijn. Een

**Symbolenlijst**

A	hulppoppervlak bij berekening efficiency	[m <sup>2</sup> ]
B	breedte van het bassin	[m]
C	gewichtconcentratie vaste stof	[kg/m <sup>3</sup> ]
C <sub>d</sub>	meesleepcoëfficiënt	[—]
d	deeltjesdiameter	[m]
g	versnelling van de zwaartekracht	[m/s <sup>2</sup> ]
G	valsnelheidsverdeling van de deeltjes	[s/m]
F	de cumulatieve valsnelheidsverdeling	[s/m]
H	hoogte van het bassin	[m]
L	lengte van het bassin	[m]
M	netto deeltjesstroom die door oppervlak A passeert	[kg/s]
n	exponent in de Richardson-Zaki relatie	[—]
Q	totaal dispersiedebiet van het bassin	[m <sup>3</sup> /s]
Re	Reynoldsgetal	[—]
t	tijd	[s]
v	snelheidsvector van de continue fase	[m/s]
-c		
v	snelheidsvector van de disperse (deeltjes) fase	[m/s]
-d		
v	slipsnelheidsvector van de disperse fase	[m/s]
-s		
x, y, z	coördinaten in het catesiaanse stelsel	[m]
ε	volumefractie van de continue fase	[—]
η	sedimentatie-efficiency van het bassin	[—]
μ <sub>c</sub>	viscositeit van de continue fase	[kg/ms]
ρ <sub>c</sub>	dichtheid van de continue fase	[kg/m <sup>3</sup> ]
ρ <sub>d</sub>	dichtheid van de disperse fase	[kg/m <sup>3</sup> ]
ω	oppervlaktebelasting van het bassin	[m/s]

snelheidsprofiel in de z-richting compliceert de beschrijving van het systeem, omdat dit niet langer meer als twee-dimensionaal mag worden beschouwd.

Zolang echter de snelheden in z-richting nul zijn of met andere woorden zolang de stroomlijnen in het bassin evenwijdig aan de opstaande zijwanden lopen, kan de voorgaande theorie nog steeds worden toegepast. Indien een vloeistofbelasting Γ (per eenheid van breedte) gedefinieerd wordt volgens  $\Gamma(z) = v_{z(z)} \cdot H$ , dan volgt voor de sedimentatie efficiency  $\eta(z)$  in een dun plakje over de hoogte H lopend van z tot z + Δz:

$$\eta(z) = \frac{v_{sy} L}{\Gamma(z)} \text{ als } \Gamma(z) \geq v_{sy} \cdot L$$

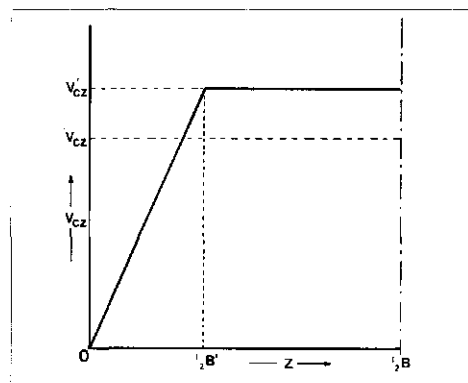
$$\text{en } \eta(z) = 1 \text{ als } \Gamma(z) \leq v_{sy} \cdot L$$

De overall efficiency  $\bar{\eta}$  kan nu berekend worden volgens:

$$\bar{\eta} = \frac{\int_0^B \eta(z) \cdot \Gamma(z) \cdot dz}{Q} \quad (II.1)$$

waarbij  $Q = \int_0^B \Gamma(z) \cdot dz$  weer het totale dispersiedebiet aan het bassin voorstelt.

Aangetoond kan worden [14] dat deze overall efficiency altijd lager is, dan in het geval van een vlak snelheidsprofiel in de z-richting. Ter toelichting zullen we het werkelijke snelheidsprofiel in de z-richting



Afb. 13 - Aangenomen snelheidsprofiel in een horizontaal x-z vlak.

benaderen met een profiel zoals geschetst in afb. 13.

De deeltjes worden uniform verondersteld.

De gemiddelde snelheid  $\bar{v}_{cz}$  is zodanig, dat bij een volledig vlak snelheidsprofiel met deze snelheid de efficiency juist gelijk één zou zijn, dus

$$\frac{v_{sy}}{\omega} = \frac{v_{sy} L}{\bar{v}_{cz} H} = 1$$

Voor het geschetste snelheidsprofiel geldt:

$$0 \leq z \leq \frac{1}{2} B' \quad v_{cz} = \frac{2 v'_{cz}}{B'} \cdot z$$

$$\frac{1}{2} B' < z \leq \frac{1}{2} B \quad v_{cz} = v'_{cz} = \bar{v}_{cz} \cdot \frac{2B}{2B - B'}$$



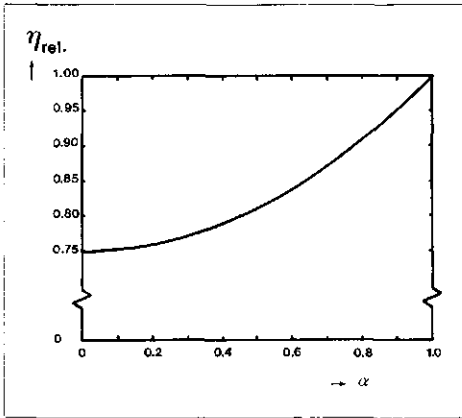
(het profiel is verder symmetrisch ten opzichte van de as  $z = \frac{1}{2} B$ ).

In het gedeelte  $0 \leq z \leq z_{kr}$  is

$v_{cz} \leq \bar{v}_{cz}$  en bezinken dus alle deeltjes. Met behulp van vgl. II.1 kan de relatieve efficiency (t.o.v. het 'ideale' geval met  $\eta = 1$ ) berekend worden. Het resultaat is

$$\eta_{relatief} = \frac{3 + \alpha^2}{4} \frac{B - B^1}{B}$$

Hierin is  $\alpha = \frac{B - B^1}{B}$



Afb. 14 - De relatieve sedimentatie-efficiency  $\eta_{rel}$  voor het in afb. 13 geschetste snelheidsprofiel.

In afb. 14 is  $\eta_{relatief}$  als functie van  $\alpha$  gegeven. Het is duidelijk dat in het limiet geval  $\alpha = 1$  (vlak profiel) de efficiency zijn maximale waarde 1 bereikt. Voor alle andere waarden van  $\alpha$  is deze lager. Bij de bespreking van de experimentele resultaten (zie par. 6) is de theoretische lijn (2) in afb. 9 bepaald met behulp van de aanname van een ander, en wel parabolisch, snelheidsprofiel:

$$v_{cz} = \frac{3}{2} \bar{v}_{cz} \left[ 1 - \frac{(2z - B)^2}{B^2} \right]$$

Uitwerking van vgl. II.1 voor de bezinking van uniforme deeltjes met een bezinksnelheid  $v_{sy}$  zou in dit geval leiden tot

$$\eta_{par.} = 1 - \left[ 1 - \frac{2}{3} \frac{v_{sy}}{\omega} \right]^{3/2} \quad \text{indien } v_{sy} < \omega$$

en  $\eta_{par.} = 0,82$  indien  $v_{sy} \geq \omega$

#### Literatuur

1. Hazen, A.; Trans. Am. Soc. Civ. Engrs.; paper 980, p. 45-71; (1904).
2. Anderson, N. E.; Sew. Works J.; p. 50-65; (1945).
3. Hamlin, M. J.; Tebbutt, T. H. Y.; Surveyor; p. 42-44; (1970).
4. Price, G. A.; Clements, M. S.; Wat. Poll. Contr.; p. 102-103; (1974).
5. Fair, G.; Geyer, J. C.; Okun, D. A.; Water and Wastewater Engineering; Wiley & Sons Inc.; New York; (1968).

6. Villemonte, J. R.; Rohlich, G. A.; Wallace, A. T.; 3rd Int. Conf. Wat. Poll. Res.; paper 16; pl-15; (1966).
7. Silveston, P. L.; Can. J. Chem. Eng.; 47; p. 521-524; (1969).
8. Morril, A. B.; J. Am. Water Works Assoc.; 24; p. 1442; (1932).
9. Takamatsu, T.; Naito, M.; Water Research; 1; p. 433-450; (1967).
10. Clements, M. S.; Proc. Inst. Civ. Engrs.; 38; p. 171-200; (1966).
11. Clements, M. S.; Khattab, A. F. M.; Proc. Inst. Civ. Engrs.; 40; p. 471-494; (1968).
12. Huisman, L.; Cursus 'het coagulatieproces in de waterzuivering' CB9; St. Postak. Vorm. Gez. Techn.; (1975-1976).
13. Richardson, J. F.; Zaki, W. N.; Trans. Inst. Chem. Engrs.; 32; p. 35-53; (1954).
14. Wouda, T. W. M.; Ottengraf, S. P. P.; Rietema, K.; Chem. Eng. Sci.; p. 351-358; (1977).
15. Ottengraf, S. P. P.; Collegedictaat Afvalwaterreiniging, no. 6.602; TH Eindhoven; (1967).



#### Een stem uit Brussel

*Uit de boodschap van de voorzitter van de Brusselse Intercommunale Waterleiding Maatschappij bij het jaarverslag over 1977: 'Nu durven wij hopen dat de bezuinigingsreflexen, die de verbruikers werden ingeprent zonder ernstige reden, althans voor zover het gaat om de bevolking die door onze Maatschappij wordt bevoorrad, snel worden vergeten en verdreven door een gerechtvaardigd verlangen om opnieuw ongehinderd van het comfort van overvloedig water te genieten. Voor de Maatschappij is het verbruiksprobleem vóór alles, en nog voor geruime tijd, een kostprijsprobleem... en vice versa. Hoofdzak is een verbruikstijging te verwekken om het lastenpakket beter te kunnen verdelen en vandaar, de kostende prijs per geproduceerde eenheid te kunnen drukken, tot grotere baat van alle verbruikers.'*

#### Actieve medewerking vereist bij aanpakken milieuproblemen

Minister Ginjaar van Volksgezondheid en Milieuhygiëne wil zijn beleid richten op de actieve medewerking van individuele burgers, bedrijven en instellingen bij het aanpakken van de milieuproblemen. 'Het is de taak van de overheid in samenwerking met particuliere organisaties de gehele bevolking indringend voor te lichten over de milieuproblemen en aan te geven wat van alle betrokkenen, burgers zowel als bedrijven, kan en moet worden verwacht', schrijft hij in de toelichting op zijn begroting. Naast de verdere ontwikkeling van een wettelijk instrumentarium om milieuverontreiniging en milieu-overlast tegen te gaan, wil minister Ginjaar zijn aandacht richten op het voorkomen en bestrijden van milieuintcidenten en het tegengaan van de verspreiding van gevaarlijke stoffen.

Overigens, zo merkt de bewindsman op, moet een zekere geleidelijkheid worden aangehouden bij het verbeteren van de milieuhygiënische situatie. De industrie moet de gelegenheid krijgen zich geleidelijk aan te passen aan de normen en voorschriften, zonder in onoverkomelijke kostenproblemen te geraken. Want ook al kunnen op macro-economisch niveau de gevolgen van het milieubeleid goed worden opgevangen, op het niveau van de afzonderlijke bedrijven kan dit tot problemen leiden. Steunverlening kan dan in een aantal gevallen een oplossing bieden.

Het aantal bedrijven dat als milieuhinderlijk wordt beschouwd, ligt globaal tussen 1.500 en 2.000, met een totaal aantal arbeidsplaatsen tussen 20.000 en 25.000, aldus minister Ginjaar.

De bewindsman kondigt twee nota's aan het parlement aan. De eerste gaat over de heffingen die milieuhinderlijke bedrijven zullen moeten betalen en de tweede behandelt de kwantificering van de totale overheidsbijdrage die met de volledige overheidsplannen ten aanzien van het milieu zijn gemoed.

#### Seminar over putverstopping

Het Institut für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung van de Technische Hochschule Darmstadt organiseert in samenwerking met de DVGW op 13 oktober a.s. een seminar 'Brunnenalterung — Theorie und Praxis, Regenerierungsmöglichkeiten'. Inlichtingen en aanmeldingen: Institut für Wasserversorgung, Abwasserbeseitigung und Raumplanung der TH Darmstadt, z.Hd. Herrn Dipl.-Ing. H.-H. Niehoff, Petersenstrasse 13, 6100 Darmstadt.