

# Slibindikking door zwaartekracht\* (I): theoretische grondslagen

## 1. Inleiding

Voor het biologische afvalwaterslib zijn er talloze mogelijkheden voor verwerking, variërend van het directe gebruik als meststof in de landbouw tot zeer geavanceerde verbrandingstechnieken.

Alle methodes hebben echter gemeen dat ze een vrij groot percentage uitmaken van de totale zuiveringskosten. Dit geldt ook voor de relatief eenvoudige methode van verspreiding over landbouwgronden, omdat hierbij de vervoerskosten een steeds belangrijker factor zullen vormen.



IR. R. G. VELDKAMP  
Laboratorium voor  
Gezondheidstechniek  
Technische Hogeschool Delft

Voor de kosten van slibbehandeling op een rioolwaterzuiveringsinrichting worden de volgende percentages van de totale jaarlijkse lasten vermeld: 25 tot 50 % [1], 40 tot 50 % [2], 25 tot 30 % [3].

Als eerste stap in de slibbehandeling wordt veelvuldig indikking toegepast. De inschakeling van een indikker voor een anaëroobe slibgisting betekent dat het volume van de gistingstank veel kleiner kan zijn, uitgaande van een bepaalde drogestofbelasting. Dat indikken hier een belangrijke kostenbesparing geeft is aangetoond door Stalman [4]. Omdat de kostenfactor voor andere slibbehandelingsmethoden zoals conditionering, ontwatering, droging, verbranding en transport aanzienlijk verkleind wordt bij verwerking van meer geconcentreerd slib, kan ook dan slibindikking kostenbesparend zijn.

Van de verschillende indikmogelijkheden wordt gravitatie-indikking, slibindikking door zwaartekracht, het meest toegepast. In dit artikel worden de belangrijkste theoretische grondslagen van de gravitatie-indikking beschreven. In een vervolgartikel zullen enige ontwerpruimtelijke aspecten worden behandeld, waarbij meermalen verwezen wordt naar de hierna volgende theorie.

## 2. Algemene beschouwingen

Het indikken van een suspensie zal met verschillende oogmerken geschieden, afhankelijk van het proces waarvan het deel uitmaakt.

In de industrie bouwt men indikkers om bijv. een bepaald produkt terug te winnen.

\* Uitgebreidere informatie over de gravitatie-indikking is te vinden in een recent verschenen STORA-rapport, getiteld 'Slibindikking door zwaartekracht-grondslagen'.

## Ten geleide

In het kader van het STORA-onderzoek op het gebied van slibindikking zijn drie deelprojecten uitgevoerd: een literatuuronderzoek, een inventarisatie van de ervaring met slibindikkers in Nederland en een experimenteel onderzoek.

Theoretische beschouwingen over het indikproces zijn veelal gebaseerd op sterk vereenvoudigde natuurkundige modellen met een beperkte waarde voor de praktijk. Daarenboven zijn vele proeven alleen op laboratoriumschaal uitgevoerd.

Daarom is bij het STORA-project weinig aandacht besteed aan de theorie; in plaats daarvan besloot de begeleidingscommissie ir. R. G. Veldkamp, werkzaam bij de Vakgroep Gezondheidstechniek van de Technische Hogeschool te Delft, de publicatiekosten te vergoeden van een literatuurstudie waarin de theoretische aspecten van het slibindikkingsproces ruimschoots aandacht zouden ontvangen.

Het resultaat van deze gang van zaken is dit artikel waarin de auteur zich heeft beperkt tot gravitatie-indikking, indikking door bezinking onder invloed van de zwaartekracht. Deze methode wordt in Nederland het meest toegepast.

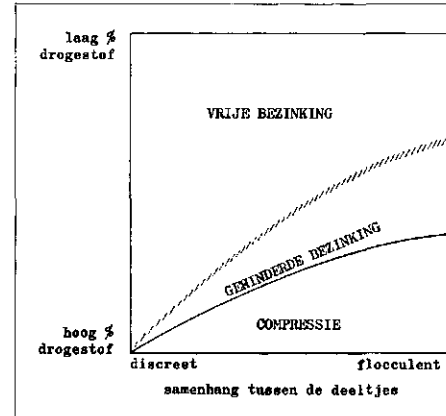
Tenslotte impliceert de benadering van de begeleidingscommissie dat noch zij, noch de Onderzoekadviescommissie van de STORA op energerlei wijze bij de uitvoering van deze studie betrokken zijn geweest; de verantwoordelijkheid hiervoor berust geheel bij de initiatiefnemer en auteur.

DRS. J. F. NOORTHOORN VAN DER KRUIJFF

In de drinkwaterbereiding en de afvalwaterzuivering bouwt men indikkers met de bedoeling om het watergehalte van het slib drastisch te verminderen.

De scheiding vaste stof - vloeistof wordt in de afvalwaterzuivering op diverse plaatsen toegepast waarvoor zowel bezinktanks als indikkers worden gebruikt. In principe vindt in elke bezinktank zowel bezinking als indikking plaats, met als gevolg dat in de literatuur aan het begrip indikking verschillende betekenissen worden toegekend.

Een bezinktank, bijv. een nabezinktank voor actiefslib, heeft als primaire functie het produceren van een helder effluent waarin zo weinig mogelijk drogestof voorkomt. Secundair vindt er onderin de nabezinktank ook indikking plaats. Een indikker heeft als primaire functie het leveren van slib met een zo hoog mogelijke concentratie drogestof; het tegengaan van verontreinigingen in het effluent van een indikker is van minder belang omdat deze stroom wordt teruggevoerd naar de rioolwaterzuiveringsinrichting. Het verband tussen de



Afb. 1 - Overzicht soorten bezinking.

verschillende soorten bezinking die op kunnen treden is schematisch weergegeven in afb. 1.

De linkerzijde van het diagram is representatief voor discrete deeltjes met weinig neiging tot uitvloeking, de rechterzijde voor flocculente deeltjes. De verdunning vertikaal uitgezet. Men onderscheidt drie gebieden. Voor grote verdunningen bezinken de deeltjes volgens de *vrije bezinking* hetzij als discrete deeltjes, hetzij als afzonderlijke vlokjes. Tijdens dit type bezinking bestaat er geen scherpe scheiding tussen bezinkende deeltjes en het bovenstaande water. Grotere deeltjes bezinken sneller dan kleinere en tijdens het bezinken ontstaat een concentratiegradiënt over de hoogte. Voor meer geconcentreerde suspensies bevinden de deeltjes zich dichter op elkaar en wijzigt het beeld van de bezinking; er ontstaat nu een scherpe scheiding tussen bezinkende slib en het bovenstaande water. Hiervoor is een aantal oorzaken aan te geven die er gezamenlijk op neerkomen dat grotere deeltjes worden vertraagd en kleinere worden versneld [5]. In het geval van flocculente deeltjes ontstaan er vlokken van dezelfde afmeting of er ontstaat een vlokkenstructuur waarin de kleinere vlokken worden ingekapseld tussen de grotere [6]. Het gevolg is dat de gehele suspensie gelijmatig naar beneden beweegt. Dit wordt genoemd *gehinderde bezinking* of *zonebezinking*. Dit type bezinking treedt altijd op bij indikking.

Voor nog meer geconcentreerde suspensies wordt het proces beschreven met de term *compressie* of *indikking*. Hierbij is er niet langer sprake van werkelijke bezinking omdat voor hoge concentraties de deeltjes met elkaar in contact komen. Op dat moment wordt in een bepaalde laag het gewicht van de erboven liggende lagen voornamelijk mechanisch ondersteund door krachten tussen de deeltjes onderling. Een verdere daling van de slibspiegel is het gevolg van de opwaartse verplaatsing van water.

it deze inleiding zal het duidelijk zijn at er zich gedurende indikking 2 processen spelen: bezinking en compressie. Een groot antal onderzoekers heeft het indikken tracht te beschrijven vanuit de bezinking, beperkte mate is de compressie beschre- en incidenteel is gepoogd het gehele idikproces in één mathematisch model te atten.

het volgende worden de diverse theorieën handeld in een min of meer chronolo- sche volgorde, waarbij een scheiding is maakt tussen de bezinking en de com- pressie.

**De theorie van Coe & Clevenger**

1916 is door Coe & Clevenger [7] de ondslog gelegd voor de berekening van ibindikkers. Zij hebben een verband gelegd ssen batch-bezinkproeven en continu- dikking. Coe & Clevenger gingen er stil- vijgend van uit dat in een in bedrijf zijnde dikker de bezinksnelheid een functie is n alleen de slibconcentratie.

een indikker komen op grotere diepten eeds hogere concentraties drogestof voor. ke laag heeft een bepaalde doorvoer- capaciteit, ook wel genoemd de flux, zijnde et aantal deeltjes dat (of de hoeveelheid rogestof die) per m<sup>2</sup> en per uur passeert. ij vonden dat wanneer een laag een lagere orvoercapaciteit had dan de laag er ak boven, het niet mogelijk was om rogestof met dezelfde snelheid af te voeren s waarmee het werd aangevoerd. Als dit t geval is zal de laag in dikte toenemen. ngekeerd is het mogelijk dat een laag in aat is meer drogestof door te laten dan t de erboven liggende laag wordt aange- erd, zodat de laag steeds dunner zal orden en na enige tijd is verdwenen. ngs experimentele weg werd een formule geleid waarmee de doorvoercapaciteit G or drogestof kan worden berekend:

$$v_i = \frac{1}{\frac{1}{c_j} - \frac{1}{c_u}} \tag{1}$$

ierin is G de mate waarin een laag met n bepaalde concentratie c<sub>i</sub> en een bezink- elheid v<sub>i</sub> deeltjes laat passeren in een ntinu werkende indikker tot een eind- ncentratie c<sub>u</sub>. Bovenstaande formule rmt de grondslag voor de bepaling van t oppervlak A van een indikker. Dit oet voldoende groot zijn om ervoor te rgen dat de aangevoerde hoeveelheid oge stof Q<sub>0</sub>c<sub>0</sub> niet tegengehouden wordt or de minimum doorvoercapaciteit G<sub>L</sub> n een bepaalde laag:

$$G_i = \frac{Q_0 c_0}{G_L} = \frac{Q_0 c_0}{v_i} \left( \frac{1}{c_i} - \frac{1}{c_u} \right) \tag{2}$$

$$A_{max} = \frac{Q_0 c_0}{G_L} \tag{3}$$

**4. De theorie van Kynch**

De veronderstellingen van Coe & Clevenger zijn veel later mathematisch geformuleerd door Kynch [8].

Voor zijn theorie gaat hij uit van de volgende basisveronderstelling: de bezink- snelheid op ieder punt is alleen afhankelijk van de plaatselijke concentratie, ongeacht het verloop van de concentratie.

Verder wordt aangenomen dat er geen compressieverschijnselen optreden, dat de wandeffecten zijn te verwaarlozen en dat de deeltjes gelijkvormig en even groot zijn. In de afleiding wordt gebruik gemaakt van het begrip deeltjesflux S, zijnde het aantal deeltjes dat een horizontaal vlak per opper- vlakte-eenheid en per tijdseenheid passeert:

$$S = cv \tag{4}$$

S wordt dus op iedere hoogte bepaald door de deeltjesconcentratie. Als S varieert met de hoogte h, dan moet ook de concentratie veranderen. Wanneer deze verandering continu is kan er een continuïteitsvergelij- king worden opgesteld voor een laagje dh, waarbij het verschil tussen de in- en uit- gaande flux gelijk moet zijn aan de concentratietoename. Per oppervlakte- eenheid wordt deze vergelijking:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = \frac{\delta S}{\delta h} \tag{5}$$

Wanneer vgl. 4 hierin wordt gesubstitueerd:

$$\frac{\delta c}{\delta t} + v^* \frac{\delta c}{\delta h} = 0 \tag{6}$$

Hierin is:

$$v^* = \frac{dS}{dc} \tag{7}$$

In een diagram kan de hoogte h van de slibkolom (of ook: de daling van de slib- spiegel) tegen de tijd t worden uitgezet, zodat de helling van een lijn in een dergelijk diagram een snelheid voorstelt. Indien in dit h-t-diagram en iso-concentratielijn wordt getekend, dan geldt voor 2 punten op een dergelijke lijn met de coördinaten (h, t) en (h + dh, t + dt):

$$c(h + dh, t + dt) = c(h, t)$$

$$\frac{\delta c}{\delta h} dh + \frac{\delta c}{\delta t} dt = 0$$

Substitutie van vgl. 6 geeft:

$$\frac{dh}{dt} = v^* \tag{8}$$

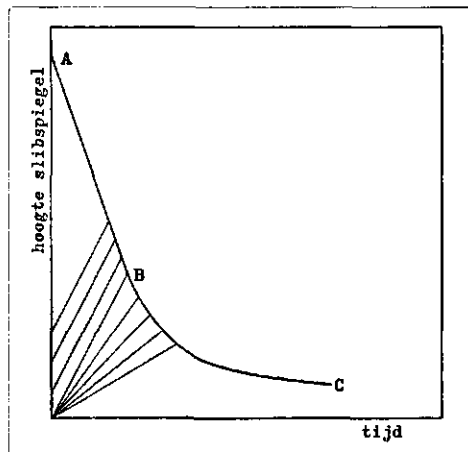
Omdat langs de lijn de concentratie con- stant is, is ook v\* constant, dus is dit de

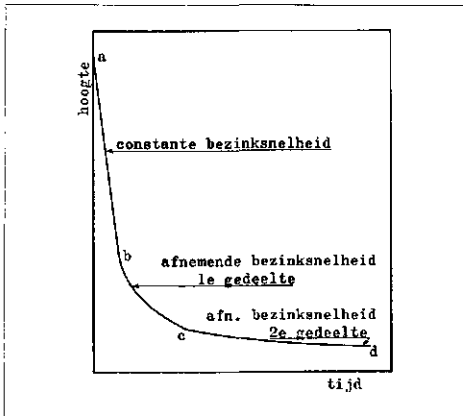
vergelijking van een rechte lijn met helling v\*. Wat is nu de betekenis van een dergel- ijke lijn?

In een batch-proef, uitgaande van een uniforme suspensie, zullen aanvankelijk alle deeltjes bezinken met dezelfde snelheid. Wanneer deeltjes de bodem bereiken zal zich daar een laag met een hogere concen- tratie opbouwen. Elk deeltje moet op zijn weg naar beneden deze laag en daaronder ook de nog hogere concentraties doorlopen. Wanneer in een van deze lagen met een bepaalde concentratie de doorvoercapaciteit kleiner is dan die van de juist erboven liggende laag betekent dit dat er een zone van die bepaalde concentratie wordt opge- bouwd omdat de deeltjes er minder gauw doorheen zakken dan de snelheid waarmee ze deze laag bereiken. Vgl. [8] geeft de opwaartse snelheid waarmee zo'n laag wordt opgebouwd. Voor een bepaalde concen- tratie is deze snelheid constant. Hoe hoger de concentraties, des te lager is de opwaartse snelheid waarmee deze concen- traties zich naar boven bewegen. Op een gegeven ogenblik zal een laag met een hogere concentratie de slibspiegel bereiken, waardoor de bezinksnelheid van de slibspie- gel zal verminderen. Dit is grafisch weer- gegeven in afb. 2. De kromme ABC geeft de daling van de slibspiegel in de tijd, waarbij als uitgangspunt is genomen een suspensie met een uniforme beginconcen- tratie.

Van A naar B zakt de slibspiegel met een constante snelheid. In het gedeelte OAB zijn de iso-concentratielijnen volgens vgl. 8 getrokken en deze lijnen lopen evenwijdig. Gedeelte AB is een rechte lijn. OB is de lijn waarvan de helling de snelheid voorstelt, waarmee de beginconcentratie zich naar boven beweegt. In punt B bereikt deze concen- tratie de slibspiegel, zodat na dit punt de bezinksnelheid van de slibspiegel zal afnemen tot de maximale concentratie is bereikt in punt C. In het gedeelte OBC zijn lijnen getekend die vanuit de oorsprong

Afb. 2 - Bezinkcurve volgens Kynch.





Afb. 3 - Bezinkcurve zonder vlokformingsperiode.

uitwaaiëren. Ze behoren bij een steeds hogere concentratie. De lijn OC stelt de stijging van de maximale concentratie voor en na punt C loopt de bezinkcurve horizontaal.

Verdere uitwerking van de theorie leert dat de snelheid  $v^*$  van vgl. 8 eveneens de snelheid is van een discontinuïteit tussen de concentraties  $c$  en  $c + dc$ . Een kleine verandering  $dc$  beweegt zich door de suspensie naar boven met een snelheid  $v^*$  zoals een geluidsgolf zich voortplant. Een lijn voor een constante concentratie in het  $h-t$ -diagram beschrijft dus de opwaartse beweging van een kleine concentratiesprong tussen de concentraties  $c$  en  $c + dc$ .

5. De methode van Yoshioka

De bezinksnelheid van een suspensie kan bepaald worden met behulp van een batchproef. In een cilinder wordt een homogeen geroerde suspensie bezonken waarbij de daling van de slijbspiegel met de tijd wordt genoteerd.

Wanneer de slijbspiegeldaling tegen de tijd wordt uitgezet verkrijgt men de zgn. bezinkcurve van afb. 3. Deze curve is opgebouwd uit 3 gedeeltes: het eerste rechte gedeelte ab geeft de constante bezinksnelheid van de beginconcentratie weer. Yoshioka et al [9, 10] gingen ervan uit dat de flux in een continu werkende indikker kon worden gesplitst in een flux  $G_b$  ten gevolge van de bezinking en een transportflux  $G_t$  ten gevolge van het afpompen van het ingedikte slijb onder uit de indikker:

$$G = G_b + G_t \tag{9}$$

De bezinkflux  $G_b$  is te bepalen uit de bezinkcurves van een serie batchproeven met verschillende concentraties:

$$G_b = c_i v_i \tag{10}$$

De fluxcurve voor batch-bezinking wordt verkregen door de flux uit te zetten tegen de concentratie, zoals in afb. 4. Voor lage

concentraties is de flux klein en voor zeer hoge concentraties is de flux eveneens klein omdat de bezinksnelheid zeer gering is. Ertussen ligt een optimum.

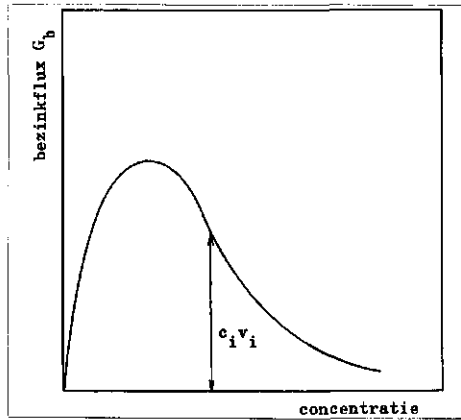
De transportflux  $G_t$  is het gevolg van een over de gehele indikker neerwaartse snelheid  $u$  door het afpompen van ingedikte slijb:

$$G_t = c_i u \tag{11}$$

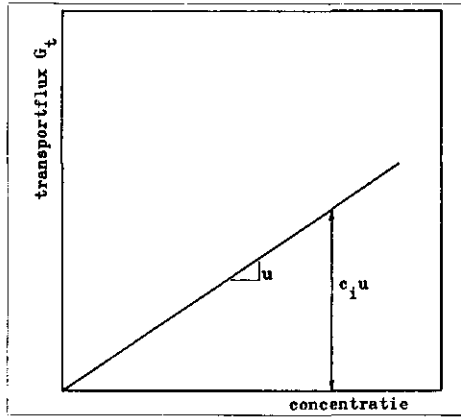
Voor een indikker met oppervlakte  $A$  en een aftapdebit  $Q_u$  is

$$u = Q_u / A$$

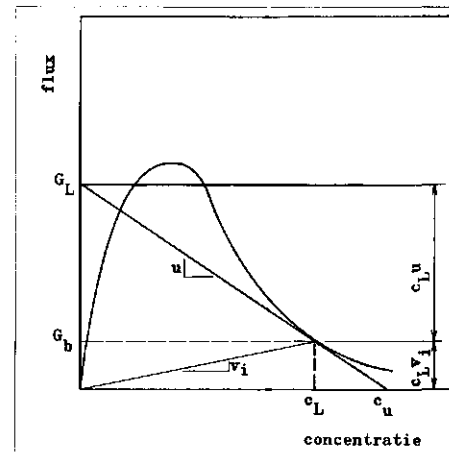
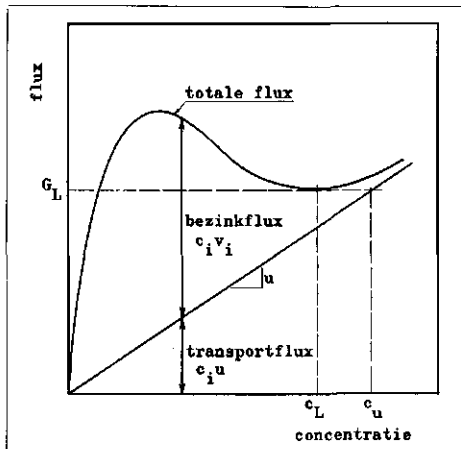
Afb. 4 - Bezinkfluxcurve.



Afb. 5 - Transportfluxlijn.



Afb. 6 - Totaalfluxcurve.



Afb. 7 - Constructie van Yoshioka.

De transportflux  $G_t$  varieert lineair met concentratie en wordt grafisch uitgezet als rechte lijn volgens afb. 5.

De totale flux verkrijgt men door beide grafieken te superponeren zoals in afb. 6

$$G = c_i v_i + c_i u \tag{1}$$

Yoshioka gaat nog een stap verder door de Kynch-theorie toe te passen op een continu werkende indikker. Volgens de Kynch-theorie bewegen lagen met een bepaald concentratie zich eenparig naar boven gedurende batchbezinking met een snelheid

$$v^* = \frac{dS}{dc} \text{ (zie vgl. 7).}$$

Dit is een raaklijn aan de batch-fluxcurve voor een bepaalde concentratie  $c$ .

Een indikker zal pas goed functioneren als de stijgsnelheid van deze concentraties wordt opgeheven door de neerwaarts gerichte transportflux die het gevolg is van de onttrekking van ingedikte slijb. De helling van een raaklijn aan de batch-fluxcurve is dan ook gelijk aan de snelheid  $v^*$ . Beschouwen we de batch-fluxcurve als beschikbare flux, de benodigde bezinkflux is te verkrijgen uit vgl. (1):

$$(vc)_{ben} = G(1 - c/c_u) \tag{1}$$

waarin

$$(vc)_{ben} = \text{de benodigde flux.}$$

Deze vergelijking stelt een werklijn voor in een fluxdiagram de  $vc$ -as snijdt in het punt  $G$  en de  $c$ -as in het punt  $c_u$ . Indien deze werklijn de fluxcurve raakt zoals in afb. 7 dan wordt voldaan aan de hiervoor gestelde voorwaarde dat het zich opwaartse bewegen van hogere concentraties wordt niet gedaan door de neerwaartse beweging ten gevolge van het afpompen van ingedikte slijb. Het snijpunt van deze werklijn met de verticale as is de grensflux  $G_L$ , de helling is de snelheid  $u$ .

Een toename van  $G$  doet de werklijn stijgen boven de fluxcurve in de buurt van het raakpunt. Dit betekent dat er een laag

net concentratie  $c_L$  gevormd wordt die steeds dikker wordt tot de overstortrand is bereikt. De indikker is overbelast. Met deze constructie is op simpele wijze elke edrijfsvoering van een indikker te controleren op de gevolgen. Wenst men een bepaalde indikconcentratie  $c_u$  te bereiken, dan kan men deze uitzetten op de horizontale as en vanuit dit punt een raaklijn aan de fluxcurve trekken; het snijpunt met de verticale as is de maximaal toelaatbare flux en de helling van de werklijn geeft de ftapsnelheid aan.

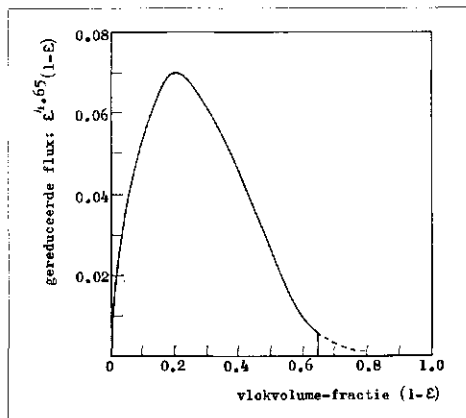
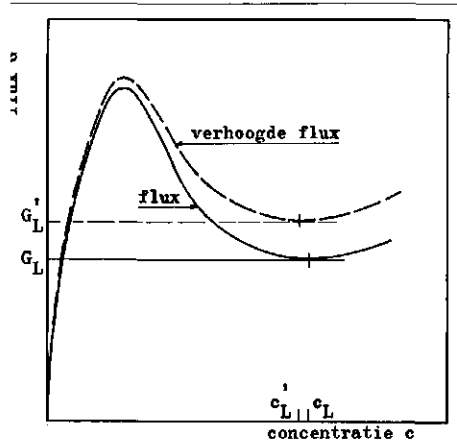
Vanneer de drogestofbelasting  $F$  de grensflux  $G_L$  overschrijdt dan kan niet al het slib de bodem bereiken vanwege de aanwezigheid van een doorvoerbepalende laag met concentratie  $c_L$  ergens in de indikker.

Onder die omstandigheden zal een gedeelte van  $G_L$  naar boven bewegen en via de overstort verdwijnen. Om deze ongewenste situatie te verhelpen zijn er 2 mogelijkheden, nl. het bouwen van een grotere indikker of het verhogen van het aftapdebiet. De eerste oplossing is een constructieve oplossing waarmee de diameter en dus het oppervlak van de indikker wordt vergroot, zodat de waarde van  $F$  verlaagd wordt.

De tweede oplossing is een operationele en is grafisch weergegeven in afb. 8. Door verhoging van het aftapdebiet wordt de helling van de lijn  $G_t = c_u u$  groter en roteert de totale fluxcurve naar links (zie stippellijn). Hierdoor verschuift het punt  $(c_L, G_L)$  naar boven. Het gevolg van deze ingreep is echter dat de concentratie  $c_u$  lager wordt, immers  $c_u = Q_o c_o / Q_u$ .

Door Talmadge & Fitch [11] is een methode ontwikkeld om op een snelle manier een fluxcurve te construeren. Daarbij maken zij volledig gebruik van de Kynchtheorie. Hun methode komt erop neer dat uit de meting van de slibspiegeldaling tijdens één bezinkproef, uitgaande van de beginconcentratie, de gehele fluxcurve is te

Afb. 8 - Verschuiving fluxcurve bij verhoogd ftapdebiet.



Afb. 9 - Gereduceerde fluxcurve voor uniforme bolvormige deeltjes.

berekenen. Gezien echter het feit dat de meeste slibsoorten (en zeker de meer flocculente) niet aan de theorie van Kynch beantwoorden zullen er, afhankelijk van het type slib, afwijkende uitkomsten worden gevonden. Dit is later door diverse onderzoekers bevestigd.

6. Kanaalvorming

Shannon et al [12, 13, 14, 15] hebben uitgebreide proeven genomen met vaste bolvormige deeltjes en met flocculente suspensies. De bezinking van vaste bolvormige deeltjes bleek bij benadering te voldoen aan de formule van Richardson & Zaki [16]:

$$v = v_o \epsilon^{4,65}$$

waarin:

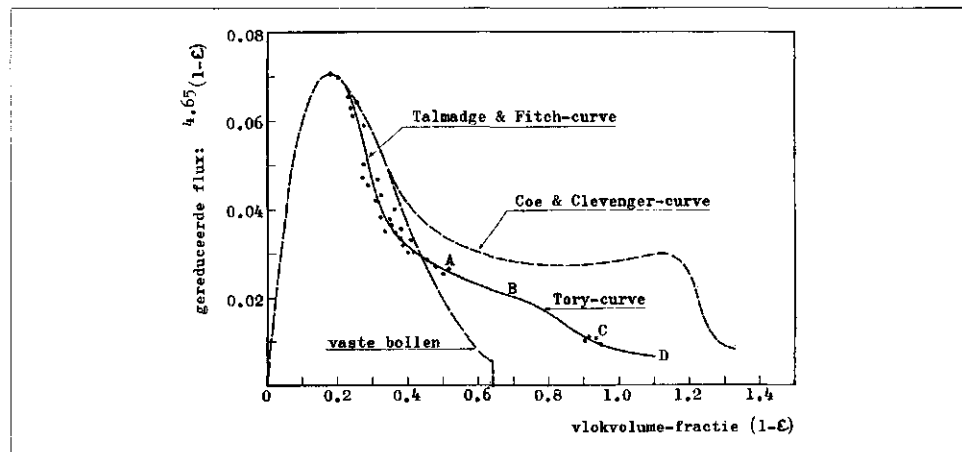
$v_o$  = de bezinksnelheid volgens de wet van Stokes;

$\epsilon$  = de porositeit.

Om de fluxcurves van diverse slibsoorten met elkaar te kunnen vergelijken werd het begrip 'gereduceerde fluxcurve' geïntroduceerd, later overgenomen in een iets andere notatie door Scott [17].

Hierbij worden dimensieloze grootheden tegen elkaar uitgezet, nl. de gereduceerde flux  $v(1-\epsilon)/v_o$  tegen de vlokvolume fractie

Afb. 10 - Verschillende gereduceerde fluxcurves bepaald door Scott (uit 17).



$$(1-\epsilon) = \frac{\text{volume vlokken}}{\text{volume dispensie}}$$

De gereduceerde fluxcurve voor de Richardson & Zaki-formule wordt dan  $\epsilon^{4,65}(1-\epsilon)$  tegen  $(1-\epsilon)$ : zie afb. 9. De maximum waarde ligt bij  $1-\epsilon = 0,177$  en de curve heeft een discontinuïteit voor  $1-\epsilon = 0,64$ , zijnde de dichtst mogelijke stapeling van uniforme bolvormige deeltjes. De fluxcurve springt naar nul omdat verdere bezinking niet mogelijk is.

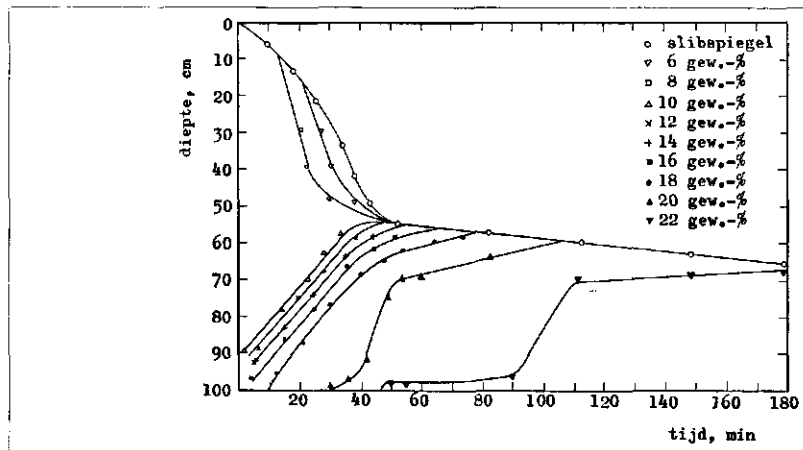
Shannon et al. vonden voor de meer flocculente suspensies afwijkingen die zich manifesteerden in een dubbel-concave fluxcurve, d.w.z. dat er na de eerste piek nog een tweede 'bult' werd gevonden.

Scott [16] heeft dit overduidelijk gedemonstreerd door uit een serie experimenten de gereduceerde fluxcurve te construeren volgens de methode van Coe & Clevenger en volgens die van Talmadge & Fitch, zoals te zien is in afb. 10. Hij gebruikt hierbij een door Michaels & Bolger [18] ontwikkelde formule. De Coe & Clevenger-curve volgt die van de bolvormige deeltjes tot een vlokvolume fractie van  $\pm 0,35$ , daarna ligt hij beduidend hoger. Voor hogere concentraties zijn er kennelijk andere factoren die een rol spelen. Al deze experimenten zijn gedaan met minerale suspensies maar uit proeven met actiefslib vond Vesilind [19] eveneens een grens tot welke de formule van Michaels & Bolger opgaat. Voor zijn proeven ligt de grens bij een vlokvolume fractie van 0,32 wat overeenkomt met een slibconcentratie van 6200 mg/l. Uit actiefslibproeven van Mancini [20] blijken bij dezelfde concentratie eveneens afwijkingen op te treden. Er moest dus een onderscheid worden gemaakt tussen de dunne slibsoorten met lage concentraties en de wat dichtere slibsoorten met concentraties die liggen tussen de eerstgenoemden en die waarbij er sprake is van compressie, hier genoemd overgangconcentraties (intermediate concentrations). Voor deze over-

gangsconcentraties zijn de gevonden snelheden dikwijls groter en dit moet het gevolg zijn van een of andere verandering in de structuur van het bezinkende slib, een soort toename van de porositeit. De meest aannemelijke verklaring hiervoor is de zgn. kanaalvorming.

Kanaalvorming is reeds door vele onderzoekers genoemd als een veel voorkomend verschijnsel bij het indikken van slib. Coe & Clevenger constateerden al dat het water dat uit de compressiezone wordt verdreven zijn weg naar boven zoekt via stroombuisjes of kanaaltjes die een soort drainagesysteem door de slibzone vormen. Kanaalvorming is dikwijls visueel waarneembaar, vooral bij minerale slibsoorten. Aan het oppervlak van de slibspiegel ontstaan kleine 'vulkaanachtige' verhogingen wanneer deze stroombanen door het oppervlak breken. Na de volledige vorming van deze kanalen is er een snelle afstroming van vloeistof in opwaartse richting mogelijk, waardoor de bezinkflux zal toenemen. Deze kanaalvorming is dus de oorzaak van de hoge ligging van de fluxcurve volgens Coe & Clevenger in afb. 10. De fluxcurve volgens Talmadge & Fitch, die is bepaald uit de bezinkcurve van de toevoerconcentratie, ligt beduidend lager en is te bepalen tot punt A. Het meest voor de hand liggende verloop voor hogere concentraties is de curve ABCD, waarmee inderdaad de dubbelconcaaf van Tory te voorschijn komt. Uit een vergelijk met praktijkproeven [17] blijkt het berekende indikkeroppervlak volgens de methode van Talmadge & Fitch vrij aardig te kloppen, die volgens de methode van Coe & Clevenger ligt ruwweg 20 % te laag. Volgens Scott kunnen batchbezinkproeven volgens de methode van Coe & Clevenger dan ook beter uitgevoerd worden in cilinders waarin zeer langzaam wordt geroerd. Dit verstoort het optreden van kanaalvorming en de resultaten zullen meer in overeenstemming zijn met de praktijk, want in een indikker heerst altijd enige turbulente ten gevolge van dichtheidsverschillen, de invloed van de slibscrapers en een eventueel roerwerk. Deze gedachten-gang ligt ook ten grondslag aan de ontwikkeling van de geroerde slibindex (stirred specific-volume) door White [21]. Voor de volledigheid moet vermeld worden dat niet altijd een verhoging van de bezinkflux ten gevolge van kanaalvorming is gevonden. Vesilind [22] vond voor actiefslib een verlaging van de flux boven een bepaalde concentratie. Hieruit blijkt dus dat actiefslib zich duidelijk anders gedraagt dan de minerale slibsoorten zoals het veel gebruikte calciumcarbonaat.

Een eveneens afwijkend gedrag kan worden geconstateerd uit de metingen van Gaudin



Afb. 11 - Iso-concentratielijnen bepaald door Gaudin & Fuerstenau (uit 23).

& Fuerstenau [23]. Deze onderzoekers hebben tijdens batchproeven met kaolienslib de concentratie over de hoogte op verschillende tijdstippen bepaald, waardoor er iso-concentratielijnen zichtbaar worden (zie afb. 11).

Volgens de theorie van Kynch ontstaan alle lagen met een concentratie hoger dan de beginconcentratie ogenblikkelijk op het begintijdstip van bezinking. Deze lagen ontstaan allen op de bodem en bewegen zich eenparig naar boven (zie afb. 2). Uit de metingen van Gaudin & Fuerstenau blijkt echter dat voor de hoge concentraties vanaf 18 gewichtsprocenten drogestof deze veronderstelling niet meer opgaat. Dezelfde bevindingen zijn te vinden in een publicatie van Scott [24]. De iso-concentratielijnen bereiken bovendien niet de slibspiegel, maar gaan er evenwijdig aan lopen. Het zijn compressieverschijnselen die deze afwijkingen veroorzaken. Scott geeft hiervoor de volgende verklaring: de hoge concentraties onderin de slibzone kunnen niet verkregen worden door alleen bezinking. Op een gegeven moment zijn de vlokken zo dicht opeengepakt dat ze niet meer als afzonderlijke deeltjes voorkomen maar als een driedimensionaal netwerk van vlokken waarin de deeltjes worden samen gehouden door aantrekkingskrachten. Dit netwerk bezit een zekere mechanische sterkte. Verdere indikking kan alleen ontstaan door afschuiving tussen de deeltjes waarbij het poriënwater wordt vrijgegeven dat oorspronkelijk binnen de vlok werd vastgehouden. Dit kan door het gewicht van erboven liggende lagen worden veroorzaakt. Het feit dat de hogere concentraties niet onmiddellijk bij de bodem ontstaan is te verklaren uit het feit dat er eerst een laag met een bepaalde dikte gevormd moet worden totdat het gewicht zo groot is dat onderin de schuifkrachten worden overschreden. Deze aldus ontstane hogere concentratie verschuift naar boven tot het niveau waarop het gewicht van de erboven

rustende laag nog te klein is om verdere afschuiving te veroorzaken. Dit verklaart waarom de iso-concentratielijnen nooit de slibspiegellijn zullen bereiken.

## 7. Inleiding compressietheorie

Met de in de vorige paragraaf gegeven beschrijving is het verschijnsel 'compressie' in woorden verklaard. Het is duidelijk dat juist deze compressieverschijnselen de oorzaak zijn van het afwijken van vele slibsoorten van de ideale bezinktheorie. Tijdens het indikken treden zowel het (gehinderd) bezinken als de compressie gelijktijdig op. Voor een beschrijving van het indikproces is het ene verschijnsel dus onlosmakelijk verbonden met het andere. Het fysische gedrag echter vertoont grote verschillen, omdat tijdens bezinking de deeltjes volledig door hydraulische krachten worden ondersteund, terwijl in de compressiefase een gedeelte van de hydraulische krachten wordt omgezet in mechanische krachten tussen de deeltjes onderling omdat ze met elkaar in contact komen. Dit verklaart ook waarom beide processen mathematisch verschillend beschreven worden. De grens tussen beide processen ligt in het compressiepunt van de bezinkcurve. Een zekere kennis van het gedrag van een bepaald soort slib tijdens compressie is van belang om een idee te krijgen over de te verwachten indikkingsgraad. Deze is afhankelijk van de hoogte van de compressiezone. Kennis van de compressietheorie is derhalve van belang voor het bepalen van de hoogte van de slibzone in een indikker.

## 8. De compressietheorie

Dat compressie een wezenlijk onderdeel is van het complete indikproces is reeds bekend door Coe & Clevenger, hoewel zij destijds niet geprobeerd hebben het compressieverschijnsel wiskundig te beschrijven. Dit is in 1949 gedaan door Roberts [25]. Deze ging er van uit dat compressie een

unctie is van de tijd, mathematisch uitgedrukt in de formule:

$$-\frac{dD}{dt} = k_R(D - D_\infty) \quad (14)$$

waarin:  
 D = de verdunning op een willekeurig tijdstip t.  
 D<sub>∞</sub> = de verdunning na oneindig lange tijd.  
 k<sub>R</sub> = een constante.

De bovenstaande formule betekent dat de snelheid waarmee er vloeistof uit de compressiezone wordt verdreven op elk tijdstip evenredig is met de nog aanwezige oeverveelheid vloeistof. Integratie van vgl. 14 geeft:

$$D - D_\infty = (D_c - D_\infty) \cdot e^{-k_R t} \quad (15)$$

waarin D<sub>c</sub> = de verdunning bij het begin van compressie.

De vgl. (D - D<sub>∞</sub>) uitgezet tegen t moet een rechte lijn opleveren.

Hiervoor moet door proberen de juiste waarde van D<sub>∞</sub> worden gevonden.

De meeste onderzoeken hebben aangetoond dat k<sub>R</sub> geen constante is, zodat de uiteindelijk bereikte concentratie, die met compressie aan worden bereikt, niet alleen afhankelijk is van de tijd.

Uchida et al. [9] vonden langs experimentele weg dat k<sub>R</sub> proportioneel is met  $\frac{1}{c_0 H_0}$ .

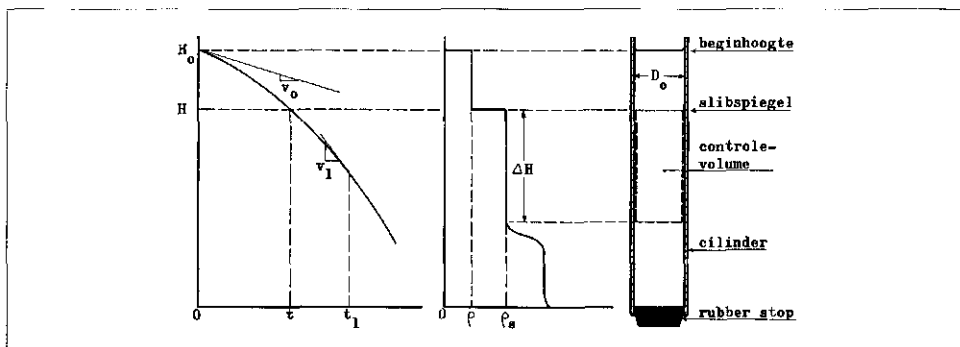
Het is door Tory & Shannon [26] in een formule verwerkt:

$$\frac{H}{c_0 H_0} - \frac{H_\infty}{c_0 H_0} = \frac{H_\infty}{c_0 H_0} \left[ 1 - e^{-k_s \frac{t-t_0}{c_0 H_0}} \right] \quad (16)$$

waarin k<sub>s</sub> = k<sub>R</sub> · c<sub>0</sub> H<sub>0</sub>.

Volgens deze formule is de eindconcentratie behalve van de tijd ook afhankelijk van het drogestofgehalte per oppervlakte-eenheid.

Een interessante bijdrage aan de compressietheorie is geleverd door Michaels & Bolger [18]. Zij beschouwen de bezinkende suspensie als een netwerk van gregaten die zijn opgebouwd uit vlokken en ingesloten water. Dit netwerk bezit een zekere mechanische sterkte zodat het in staat is de erop rustende slibmassa tijdszins te ondersteunen. Wanneer nu, tijdens batchbezinking, een slibvolume met een beginconcentratie wordt beschouwd, waarvan de hoogte ΔH genoemd wordt (zie afb. 12), dan werkt op dit slibvolume een aantal krachten die met elkaar in evenwicht zijn, namelijk het gewicht van de bezinkende slibmassa onder water, de naar boven gerichte drukgradiënt ten gevolge van



Afb. 12 - Grondslag van de Michaels & Bolger-theorie.

naar boven ontsnappende vloeistof, de wandwrijving en de ondersteunende kracht van het netwerk. Ter bepaling van de opwaartse drukgradiënt wordt de formule van Carman-Kozeny voor poriestroming gebruikt.

Uitwerking geeft:

$$v = v_\infty \left\{ 1 - \frac{D_y}{D_v} - \frac{H_y}{H_0} \right\} \quad (17)$$

$$v_\infty = \frac{g(\rho_s - \rho) \Phi_s \cdot \epsilon^3}{k_0 \cdot \mu \cdot L_p^2 \cdot S^2} \quad (18)$$

$$D_y = \frac{1}{g(\rho_s - \rho) \Phi_s} = \text{de „grensdiameter”} \quad (19)$$

$$H_y = \frac{\sigma_y}{g(\rho_s - \rho) \Phi_s} \cdot \frac{H_0}{H} = \text{de „grenshoogte”} \quad (20)$$

waarin v<sub>∞</sub> = de bezinksnelheid in een oneindig groot vat, dus zonder invloed van de wand en de bodem.

De term  $\frac{D_y}{D_v}$  duidt op de afname van de bezinksnelheid v<sub>∞</sub> t.g.v. de wandwrijving

en de term  $\frac{H_y}{H_0}$  staat voor de vermindering van de bezinksnelheid v<sub>∞</sub> t.g.v. de ondersteunende werking van meer geconcentreerde lagen op de bodem.

Voor een praktijkindikker is de diameter D<sub>v</sub> vele malen groter dan D<sub>y</sub> zodat vgl. 17 vereenvoudigt tot

$$v = v_\infty \left\{ 1 - \frac{H_y}{H_0} \right\} \quad (21)$$

In deze formule komen twee grootheden voor die gedurende de bezinking veranderen: σ<sub>y</sub> en ΔH. Door de grotere indikking van de compressiezone zal σ<sub>y</sub> voortdurend toenemen met als gevolg een afnemende bezinksnelheid v. Tijdens batchbezinking wordt ΔH steeds kleiner, waardoor de bezinksnelheid v eveneens afneemt; voort t = 0 is ΔH = H<sub>0</sub> en voor t = t<sub>0</sub> is ΔH = 0.

Dick & Ewing [27] hebben in hun proeven met actiefslib ook de invloed van de ondersteunende laag op de bezinking trachten te beschrijven, zij het op heel andere wijze. Zij deden bezinkproeven in kolommen bij verschillende vulhoogtes en vonden een merkbare invloed van de vulhoogte op de bezinksnelheid, in formulevorm:

$$\frac{H_0}{v} = R + \alpha H_0 \quad (22)$$

of anders geschreven:

$$v = \frac{H_0}{R + \alpha H_0} \quad (23)$$

Wanneer R = 0 dan is de bezinksnelheid onafhankelijk van de vulhoogte, maar dit is bij geen enkele proef voorgekomen. R geeft aan de mate waarin bezinking van het slib wordt vertraagd en R is groter naarmate de slibconcentratie stijgt. R is een maatstaf voor de ondersteuning die het slib onder de slibspiegel ondervindt van de onderliggende lagen. In het algemeen geeft goed bezinkend slib een lage R en bulkend slib een hoge R. De waarde van R bestrijkt echter een groot gebied voor slib met identieke bezinkeigenschappen uit verschillende zuiveringsinrichtingen. Uit hun onderzoek kan als belangrijk feit geconcludeerd worden dat batchproeven voor actiefslib moeten worden uitgevoerd bij dieptes die gelijk zijn aan praktijkomstandigheden.

Andere onderzoekers, zoals Behn [28] en Shirato et al. [29] hebben het compressieverschijnsel benaderd vanuit de consolidatietheorie van Terzaghi, zoals die wordt gebruikt in de grondmechanica. In de theorie van Terzaghi wordt de consolidatiecoëfficiënt konstant verondersteld, wat bij indikking zeker niet het geval is:

de coëfficiënt kan meer dan het honderdvoudige veranderen. Met een variabele consolidatiecoëfficiënt zijn de dan verkregen differentiaalvergelijkingen alleen nog numeriek op te lossen.

Uitgangspunt in deze theorieën is dat de vloeistofstroming door de poriën van het

naar boven ontsnappende water wordt beschreven met de wet van Darcy:

$$v' = -k' \frac{\delta \bar{p}}{\delta h} \quad (24)$$

$k'$  is hier niet constant, maar varieert over de hoogte:  $k' = k'(\sigma)$ .

Door Fitch [30] is eveneens een mathematische beschrijving gegeven met de wet van Darcy als uitgangspunt. Zijn formule is gebaseerd op de uitgangspunten van Michaels & Bolger.

Het is Kos [31, 32] geweest die tot op heden het meest diepgaande onderzoek heeft verricht naar de compressieverschijnselen. In voorgaande onderzoeken was duidelijk naar voren gekomen dat de krachtoverbrenging tussen de deeltjes onderling een belangrijke faktor is bij het indikken. De hierdoor ontstane druk tussen de deeltjes onderling (effectieve druk) zou dan ook een meetbare grootte moeten zijn. Shin & Dick [33] en Kalbskopf [34] hebben uit hun proefresultaten dergelijke drukken berekend; deze zijn zeer klein, namelijk 20 tot 200 Pa.

Kos heeft effectieve drukken werkelijk gemeten met behulp van zeer gevoelige apparatuur. De theoretische grondslagen voor zijn theorie heeft hij in feite al eerder ontwikkeld bij het opstellen van een betere mathematische beschrijving voor het ontwateren van slib met behulp van filterpersen [35]. Die theorie is zo algemeen dat hij later is toegepast op de indikking van slib. Het algemene uitgangspunt voor zijn theorie is, dat het indikproces wordt beschouwd als een consolidatieproces van een uitgedreven vloeistofstroom uit een vervormbaar verzadigd flocculent poreus medium. Het poreuze medium wordt in gedrag gelijkgesteld met een korrelig poreus medium met puntvormige contactvlakken, zoals in de grondmechanica. Het verschil zit hem in de grootte van de vormveranderingen. In eerder onderzoek [35] was gevonden dat de vervorming van de deeltjesmatrix onomkeerbaar is (de elasticiteit is te verwaarlozen). Dit geldt voor drukken die vele malen hoger zijn dan die welke tijdens het indikken optreden. Dit betekent dat de vervorming van de deeltjesmatrix veroorzaakt wordt door verplaatsing van de vlokken in een dichtere pakking en niet door vervorming van de deeltjes zelf.

De door Kos ontwikkelde formules voor batch-bezinking, die alleen numeriek oplosbaar zijn, worden verder niet behandeld. Voor continu bedreven indickers worden de formules veel eenvoudiger omdat de afgeleiden naar de tijd nul zijn. Dan zijn de drogestofbelasting, het concentratieprofiel over de hoogte, het aftapdebit  $Q_u$

en de aftapconcentratie  $c_u$  constant:

$$G_s = c \cdot v_s = \text{constant} = \frac{c_u Q_u}{A}$$

$$G_l = c_l \cdot v_l = \text{constant} = \frac{c_u Q_u}{A}$$

$$\rho \left( \frac{1}{c_u} - \frac{1}{\rho_s} \right)$$

Voorts geldt:

$$(v_s - v_l) \varepsilon = \frac{c_u Q_u}{A} \left( \frac{1}{c_l} - \frac{1}{c_u} \right) =$$

$$G_s \left( \frac{1}{c_l} - \frac{1}{c_u} \right) \quad (25)$$

Voor de vloeistofdruk geldt:

$$\frac{dp}{dx} = \rho \cdot g + \frac{\mu}{k} \cdot v \quad (26)$$

Dit is de wet van Darcy in een wat andere gedaante.

Verder is de effectieve druk + de vloeistofdruk = de totale druk:

$$\sigma(x) + p(x) = g \int_0^x (c + c_l) dx \quad (27)$$

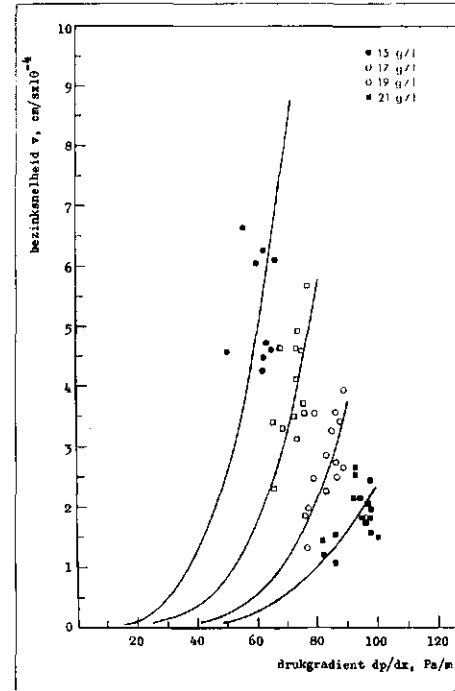
De concentraties en de drukken kunnen stapsgewijs berekend worden met de volgende formules:

$$c(x) = c_b + \int_a^x d\sigma \quad (28)$$

$$p(x) = g \cdot \rho \cdot x + \mu \int_{x_b}^x \frac{1}{k} \cdot v \cdot dx \quad (29)$$

$$\sigma(x) = \sigma_T(x) - p(x) \quad (30)$$

$$\sigma_T(x) = g \cdot \rho \cdot x + g \left( 1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right) \int_0^x c dx \quad (31)$$



Afb. 13 - Verband tussen superficiële snelheid  $v_s$  en hydrostaatische overdruk (bepaald door Kos, 32)

Daartoe moeten voor elke slibsoort 2 fysische grootheden gemeten worden en wel:

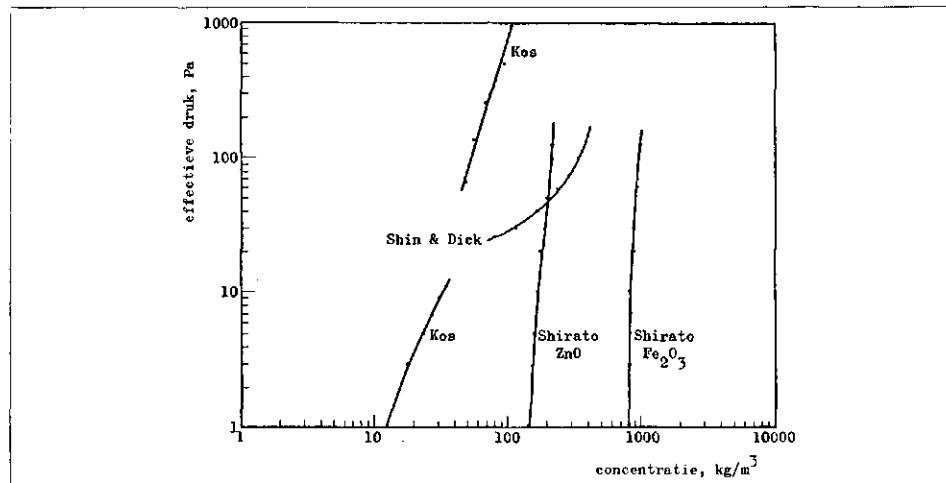
- de intrinsieke doorlatendheidscoëfficiënt  $k = k(c)$ ;
- de lineaire compressibiliteitsmodulus  $a = a(c)$ .

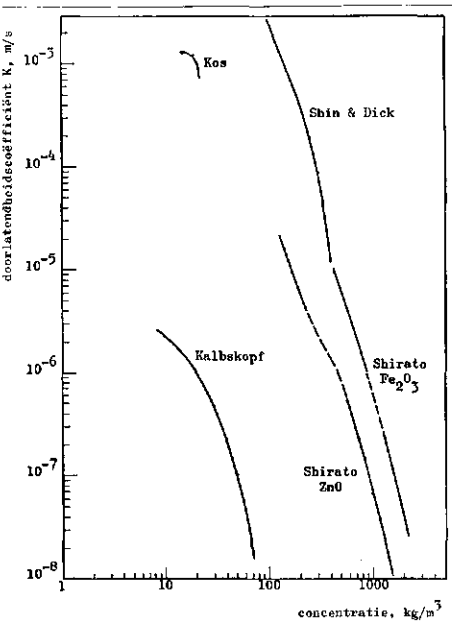
Door te beginnen met  $c = c_b$ , de concentratie van de bovengrens van de compressiezone, kan men stapsgewijs naar onderen doorrekenen tot  $c = c_u$ , de aftapconcentratie.

Kos heeft zijn theorie getoetst door continuproeven met slib uit een inrichting voor drinkwaterbereiding. De correlatie tussen de gemeten en numeriek berekende concentratieprofielen was goed.

In de theorie van Kos is aangenomen dat

Afb. 14 - Verband tussen drogestofconcentratie en effectieve druk van verschillende onderzoeken.





fb. 15 - Verband tussen drogestofconcentratie en doorlatendheidscoëfficiënt van verschillende onderzoeken.

le effectieve druk afhangt van de concentratie:  $\sigma = \sigma(c)$ . Voorts is de bezinksnelheid afhankelijk van de concentratie en van de hydraulische drukgradiënt

$$v = v\left(c, \frac{dp}{dx}\right)$$

usenen c en  $\sigma$  (dit is de compressibiliteit) is niet lineair.

en interessant aspect dat uit de proeven van Kos naar voren komt is te zien in fb. 13. Hierin is de snelheid v tegen de

$$\frac{dp}{dx}$$

tendheidscoëfficiënt k te bepalen als de helling van de raaklijn aan de curves. Dat k afhankelijk is van de concentratie is reeds bekend; ook hier wordt voor iedere concentratie een andere lijn gevonden. Uit de metingen blijkt echter verduidelijk dat voor één bepaalde concentratie het verband niet lineair is. Dit betekent dat k niet alleen afhankelijk is van de concentratie maar bovendien van de bezinksnelheid. Te concluderen is dat k klein is voor lage bezinksnelheden en toeneemt voor hogere. Wanneer het verband wel lineair is dan heeft men te maken met stroming door een poreus medium volgens de wet van Darcy. De stroming voldoet in werkelijkheid dus niet aan de wet van Darcy. Volgens Kos is dit een logisch gevolg van het stromingsbeeld door dit type media. Wanneer de bezinksnelheid erg gering is, dan is het naar boven stromende water niet in staat om kleine vlokjes te transporteren en moet het zich een weg zoeken door de

vlokkenmatrix. Voor hogere snelheden is de energie van het stromende water voldoende om niet alleen kleine vlokjes te verplaatsen, maar bovendien kanaaltjes te vormen in de vlokkenmatrix. Dit betekent dat de drukgradiënt in de vloeistoffase nooit evenredig aan de bezinksnelheid kan zijn omdat de vloeistof via kanaaltjes veel gemakkelijker ontsnapt dan via een ongestoord flocculent medium.

In afb. 14 zijn voor een aantal eerder genoemde experimenten [29, 32, 33, 35] de effectieve druk en de slibconcentratie tegen elkaar uitgezet. Hieruit is de compressiebiliteitsmodulus  $a = -\frac{dc}{d\sigma}$  te bepalen

als de helling van de curve t.o.v. de verticale as. De grote verschillen zijn waarschijnlijk het gevolg van de ver-

schillende manieren waarop de experimenten werden uitgevoerd. De compressiebiliteitsmodulus neemt in alle gevallen af bij toenemende concentraties.

In afb. 15 is de doorlatendheidscoëfficiënt K in m/s uitgezet tegen de slibconcentratie c voor de eerder genoemde experimenten, aangevuld met die van Kalbskopf [34]. De verschillen in doorlatendheid zijn nog groter dan in compressibiliteit. Voor actiefslib en ijzerhydroxideslib, toch allebei slibsoorten met een uitgesproken vlokkig karakter, verschilt de doorlatendheid een factor 1000. Ook nu kunnen de verschillen veroorzaakt zijn door de verschillende manieren waarop de experimenten werden uitgevoerd. Een ding komt echter duidelijk naar voren, nl. het feit dat de doorlatendheid zeer snel afneemt bij toenemende concentraties.

Lijst van gebruikte symbolen

a	lineaire compressiebiliteitsmodulus	$L^{-2} \cdot T^2$
A	oppervlak indikker	$L^2$
c	concentratie	$M \cdot L^{-3}$
$c_b$	concentratie bovengrens compressiezone	
$c_i$	concentratie van beschouwde laag i	
$c_L$	concentratie waarvoor flux maximaal is	
$c_o$	concentratie toevoer	
$c_u$	concentratie afgetapte slib	
$c_j$	dichtheidsfractie vloeistof = $\epsilon \cdot \rho$	$M \cdot L^{-3}$
D	verduunning = gew. vloeistof/gew. drogestof	—
$D_e$	verduunning bij begin van compressie	
$D_\infty$	verduunning voor $t = \infty$	
$D_v$	diameter bezinkvat	L
$D_y$	grensdiameter: diameter waarbij een slibkolom met uniforme concentratie juist gedragen wordt door de schuifspanning met de wand	L
F	drogestofbelasting	$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}$
g	versnelling zwaartekracht	$L \cdot T^{-2}$
G	totale flux	$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}$
$G_b$	bezinkflux, bepaald in batchproeven	
$G_j$	vloeistofflux	
$G_L$	minimumflux, grensflux	
$G_s$	drogestofflux	
$G_t$	transportflux in een indikker	
h	willekeurige hoogte	L
H	bedhoogte; hoogte slibzone	L
$H_e$	hoogte bij begin van compressie	
$H_o$	vulhoogte	
$H_\infty$	hoogte voor $t = \infty$	
$H_y$	grenshoogte: hoogte van een slibkolom met uniforme concentratie die door $\sigma_y$ ondersteund kan worden	L
k	intrinsieke doorlatendheidscoëfficiënt = $\frac{K\mu}{\rho g}$	$L^2$
$k'$	gemodificeerde doorlatendheidscoëfficiënt = $\frac{v}{\delta p / \delta x}$	$M^{-1} \cdot L^3 \cdot T$
$k_o$	vormfactor van Carman-Kozeny	—
$k_R$	constante van Roberts	$T^{-1}$
$k_s$	constante	$M \cdot L^{-2} \cdot T^{-1}$
K	hydraulische doorlatendheidscoëfficiënt	$L \cdot T^{-1}$
$L_p$	kronkelfactor van de poriën	—
p	vloeistofdruk	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$
$\bar{p}$	hydrostatische overdruk	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$
Q	debiet	$L^3 \cdot T^{-1}$
$Q_o$	toevoerdebiet	



### Vervolg lijst van gebruikte symbolen

	$Q_u$ aftapdebit ingedikt slib	
R	vertragsfactor van Dick & Ewing	T
s	specifieke grensooppervlak	$L^{-1}$
S	deteltjesflux volgens Kynch	$L^{-2}T^{-1}$
t	tijd	T
$t_c$	tijdstip waarop de compressie begint	T
u	snelheid t.g.v. aftappen slib = $Q_u/A$	$L.T^{-1}$
v	bezinksnelheid suspensie	$L.T^{-1}$
	$v'$ relatieve bezinksnelheid suspensie t.o.v. vloeistof	
	$v_\infty$ bezinksnelheid suspensie in een oneindig groot vat	
	$v_i$ bezinksnelheid suspensie met concentratie $c_i$	
	$v_o$ bezinksnelheid volgens Stokes	
	$v_s$ bezinksnelheid drogestofmatrix in punt x	
$v^*$	stijgsnelheid van een bepaalde concentratie volgens Kynch	$L.T^{-1}$
$v_l$	vloeistofsnelheid in punt x	$L.T^{-1}$
$\alpha$	constante	—
$\epsilon$	porositeit	—
$\mu$	dyn. viscositeit van de vloeistof	$M.L^{-1}T^{-1}$
$\rho$	dichtheid vloeistof	$M.L^{-3}$
$\rho_s$	dichtheid drogestof	$M.L^{-3}$
$\sigma$	effectieve druk (druk tussen de deeltjes overgebracht)	$M.L^{-1}T^{-2}$
$\sigma_y$	bezwijkdruk in de compressiezone	$M.L^{-1}T^{-2}$
$\sigma_T$	totale druk in de compressiezone	$M.L^{-1}T^{-2}$
$\tau_y$	bezwijkschuifspanning tussen compressiezone en wand	$M.L^{-1}T^{-2}$
$\Phi_s$	volumefractie drogestof	—

### Literatuur

- Dick, R. I., 1972, *Gravity thickening of waste sludges*. Filtration and Separation 9, p. 177-183.
- Lockyar, C. F., 1977, *Gravity thickening of biological sludges*. Water Research Centre, technical report TR39.
- Kaden, S. et al, 1972, *Aufgaben und Bedeutung der Abwasser-schlammbehandlung im Umweltschutz*. WWT 22, H. 9, p. 314-317.
- Stalman, V., 1967, *Grundlagen und Auswirkungen der Schwerkraftsedimentation*. Stuttgarter Berichte z. Siedlungswasserwirtschaft, H. 28, p. 73-89.
- Coulson, J. M.; Richardson, J. F., 1968, *Chemical Engineering, vol. 2: Unit Operations*. McGraw Hill Book Co., New York, p. 168-193.
- Fitch, E. B., 1957, *Sedimentation process fundamentals*. Biological treatment of sewage and industrial wastes, vol. II. (McCabe and Eckenfelder, eds.), New York, p. 159-170.
- Coe, H. S.; Clevenger, G. H., 1916, *Methods for determining the capacities of slime settling tanks*. Trans. Am. Inst. Mining Engrs. 55, p. 356-384.
- Kynch, G. J., 1952, *A theory of sedimentation*. Transactions of the Faraday Society 48, p. 166-176.
- Yoshioka, N. et al, 1955, *Batch settling of homogeneous flocculated slurries*. J. chem. Soc. Japan, Ind. chem. sect. 19, p. 616-626.
- Yoshioka, N. et al, 1957, *Continuous thickening of homogeneous flocculated slurries*. J. chem. Soc. Japan, Ind. chem. sect. 21, p. 66-74.
- Talmage, W. P.; Fitch, E. B., 1955, *Determining thickener unit areas*. Ind. and Eng. Chemistry 47, p. 38-41.
- Shannon, P. T.; Stroupe, E. P.; Tory, E. M., 1963, *Batch and continuous thickening; Basic theory; Solid flux for rigid spheres*. Ind. and Eng. Chem. Fundamentals 2, p. 203-211.
- Shannon, P. T.; DeHaas, R. D.; Stroupe, E. P.; Tory, E. M., 1964, *Batch and continuous thickening; Prediction of batch settling behaviour from initial rate data with results for rigid spheres*. Ind. and Eng. Chem. Fundamentals 3, p. 250-260.
- Shannon, P. T.; Tory, E. M., 1965, *Settling of slurries*. Ind. and Eng. Chemistry 57 nr. 2, p. 18-25.
- Shannon, P. T.; Tory, E. M., 1965, *Batch and continuous thickening; Prediction of batch settling behaviour from initial rate data with results for rigid spheres*. Ind. and Eng. Chem. Fundamentals 4, nr. 3, p. 367-368.
- Richardson, J. F.; Zaki, W. N., 1954, *Sedimentation and fluidisation: part 1*. Trans. Instn. Chem. Engrs. 32, p. 35-53.
- Scott, K. J., 1968, *Experimental study of continuous thickening of a flocculated silica slurry*. Ind. and Eng. Chem. Fundamentals 7, p. 582-595.
- Michaels, A. S.; Bolger, J. C., 1962, *Settling rates and sedimentation volumes of flocculated kaolin suspensions*. Ind. and Eng. Chem. Fundamentals 1, p. 24-33.
- Vesilind, P. A., 1968, *The design of thickeners from batch settling tests*. Water and Sewage Works 115, p. 418-419.
- Mancini, J. L., 1962, *Gravity clarifier and thickener design*. Proc. 17th Ind. Waste Conf. Purdue Univ., p. 267-277.
- White, M. J. D. 1975, *The settling of activated sludge — theory and practice*. Conf. of the Inst. of Chem Engrs., York.
- Vesilind, P. A., 1969, *Quiescent batch thickening of activated sludge in small cylinders*. Vatten 25, nr. 4, p. 456-462.
- Gaudin, A. M.; Fuerstenau, M. C., 1962, *Experimental and mathematical model of thickening*. Transactions, Am. Inst. of Mining, Metall. and Petr. Engineers 223, p. 122-129.
- Scott, K. J. 1968, *Theory of thickening: factors affecting settling rate of solids in flocculated pulps*. Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy 77, p. C85-C97.
- Roberts, E. J., 1949, *Thickening — Art or Science?* Transactions Am. Inst. Mining Engrs. 184, p. 61-64.
- Tory, E. M.; Shannon, P. T., 1965, *Reappraisal of the concept of settling in compression*. Ind. and Eng. Chem. Fundamentals 4, p. 194-204.
- Dick, R. I., 1968, Ewing, B. B., 1967,

*Evaluation of activated sludge thickening theories*. Journal of the San. Eng. Div., ASCE 93, nr. SA- p. 9-29. Discussion: 94, p. 182-191, 431-433, 533-558, 1280-1287.

28. Behn, V. C., 1953, *The sludge thickening operation in sewage treatment*. Dissertation, Dep of Sanitary Eng. and Water Resources, John Hopkins University.

29. Shirato, M. et al., 1970, *Analysis of settling of thick slurries due to consolidation*. Journal of Chem. Eng. of Japan 3, p. 98-104.

30. Fitch, E. B., 1966, *Current theory and thickener design*. Ind. and Eng. Chemistry 58, nr. 10, p. 18-28.

31. Kos, P.; Adrian, D. D., 1974, *Gravity thickening of water treatment plant sludges*. 94th Annual conference, AWWA, Boston, Mass.

32. Kos, P., 1977, *Gravity thickening of water-treatment-plant sludges*. Journal A.W.W.A. 69, p. 272-282.

33. Shin, B. S.; Dick, R. I., 1974, *Effect of permeability and compressibility of flocculent suspensions on thickening*. Proceedings 7th Intern. Conf. Water Poll. Research, p. 137-147.

34. Kalbskopf, K. H., 1971, *Theoretische Grundlagen, Bemessung und Verfahrenweise der Schlammendickung*. Gewässerschutz — Wasser Abwasser, Bd. 6, p. 73-88.

35. Kos, P.; Adrian, D. D., 1975, *Transport phenomena applied to sludge dewatering*. Journal of the Env. Eng. Div., ASCE 101, nr. EE6, p. 947-965.



### Ir. A. G. Soegies nieuwe cursus-leider PV Gezondheidstechniek

Tot opvolger van ir. J. L. N. Spangenberg als cursusleider van de stichtingen Postakademiale Vorming Gezondheidstechniek, Postakademiale Vorming Verkeerskunde en Postdoctoraal Onderwijs in de Civiele Techniek is per 1 juli 1980 benoemd ir. A. G. Soegies c.i. van de AGV Adviesgroep voor Verkeer en Vervoer te Utrecht.

### Congres Chemie-Mensch-Umwelt

Het Gottlieb Duttweiler-Instituut organiseert van 13 t/m 15 oktober 1980 in Rüslikon Zwitserland een internationaal congres onder het thema 'Chemie-Mensch-Umwelt Inlichtingen: Gottlieb Duttweiler-Instituut, Park 'Im Grüne', CH-8803 Rüslikon-Zürich.