

SUMMARY

Sedimentation

Sedimentation is the process of solid-liquid separation by gravity from a suspension of a liquid and solids with a higher density than the liquid. Its place in the waterpurification process. Theoretical considerations about sedimentation in still water of discrete particles and flocculent particles. Continuous sedimentation in an ideal basin with horizontal flow. Overflow rate. Disturbing factors; Reynolds- and Froude number. Design of rectangular settling tanks with horizontal flow and of circular tanks. Upflow sedimentation in clarifiers with a sludge blanket.

Bezinking

1. Inleiding

Wanneer een vloeistof vaste deeltjes bevat, kunnen die in het algemeen daaruit worden verwijderd door de vloeistof gedurende een bepaalde tijd in een bekken te laten staan of de vloeistof dit bekken langzaam te laten doorlopen. De vaste deeltjes scheiden zich dan van de vloeistof af onder invloed van de zwaartekracht.

Is de dichtheid (het gewicht) van de deeltjes groter dan van de vloeistof, dan zakken de deeltjes naar beneden en spreken we van bezinking (sedimentatie). Is daarentegen de dichtheid geringer dan van de vloeistof, dan drijven de vaste deeltjes op en spreken we van flotatie. In de waterleidingstechniek komt flotatie van vaste deeltjes sporadisch voor. Deze zal in het volgende dan ook niet meer in de beschouwing worden opgenomen, hoewel de theoretische principes geheel dezelfde zijn als van de bezinking. Bij de behandeling van afvalwater is de bezinking een zeer veel voorkomend onderdeel van het zuiveringsproces. We komen deze daar tegen bij:

1. de zandvang, waarin de zwaarste vaste delen uit het binnenkomende rioolwater worden verwijderd;
 2. de vóórbezinking, waarin zoveel mogelijk bezinkbare stof uit het afvalwater wordt verwijderd;
 3. de nabezinking, waarin de vaste stof, die zich bij een biologische of chemische behandeling in het water heeft gevormd, wordt verwijderd ten einde een zo zuiver mogelijk effluent te verkrijgen.
- In de Nederlandse techniek van de drinkwaterzuivering is het bezinkings-

proces echter veel minder gemeengoed. Hoewel in elk snelfilter en langzaam zandfilter sedimentatie voorkomt, speelt deze bij het ontwerp nauwelijks enige rol. Alleen die bedrijven kennen derhalve de sedimentatie van nabij, die oppervlaktewater moeten zuiveren en daarbij gebruik maken van het proces van coagulatie en flocculatie. Dit zijn er tot nog toe maar enkele. Dit in tegenstelling tot vele landen buiten Nederland, waar de chemisch-fysische zuivering van oppervlaktewater algemeen gebruikelijk is en waar met name in tropische en subtropische gebieden vaak het water bovendien moet worden onttrokken aan rivieren, die incidenteel zo veel vaste stof bevatten (t.g.v. erosie), dat een vóórbezinking gewenst kan worden. Ook in Nederland zal in de naaste toekomst met het schaarser worden van het grondwater het oppervlaktewater een steeds belangrijker rol gaan spelen in het zuiveringsproces. En daarmee ook de bezinking, aangezien om economische redenen de chemisch-fysische zuivering in veel gevallen aangewezen zal zijn.

Vanuit dit vooruitzicht lijkt het mij dan ook ten eerste gewenst om in deze voordracht vrij ruime aandacht te schenken aan de theoretische achtergronden van de bezinking om van daaruit nog enige beschouwingen te kunnen wijden aan de technische uitvoering en de praktische toepassing. Er zal in eerste instantie worden uitgegaan van het bezinken in een stilstaande vloeistofkolom van deeltjes, die tijdens het bezinkingsproces onveranderd blijven, z.g. discrete deeltjes, en die elkaar bovendien niet beïnvloeden.

Het ligt voor de hand, dat de bezinking sneller zal gaan naarmate de deeltjes groter zijn en hun dichtheid meer verschilt van die van de vloeistof.

Daarnaast zal ook de vorm van de deeltjes van invloed zijn op de bezinkingsnelheid. Komen de deeltjes in een grote hoeveelheid in de vloeistof voor, we spreken hierbij van een dichte suspensie, dan kunnen ze elkaar gaan hinderen bij de bezinking. Bij de zuivering van afvalwater komt deze gehinderde bezinking veelvuldig voor. Bij de drinkwaterzuivering is de hoeveelheid vaste stof in het water nooit zo groot, dat gehinderde bezinking optreedt. Slechts in een bepaald soort bezinkbekkens, werkend met opwaartse stroming en een vlokkende-ken, is daar sprake van.

Naast de bezinking van discrete deeltjes kennen we ook de bezinking van deeltjes, die tijdens het bezinkproces groter worden, doordat ze aan elkaar gaan zitten, uitvlokken. Veel suspensies vertonen reeds uit zichzelf de neiging tot uitvlokken. Dit kan worden ingeleid en bevorderd door het toevoegen van een speciaal flocculatiemiddel. De vlokken kunnen nog weer verzaagd worden door toevoeging van bijvoorbeeld klei of bentoniet. We spreken in al deze gevallen van flocculente bezinking. Wiskundig is deze flocculente bezinking veel moeilijker te benaderen dan de discrete bezinking. Het is dan ook gebruikelijk van deze laatste uit te gaan en voor de flocculente bezinking correctiefactoren in te voeren.

Discrete bezinking treedt op bij zand, glaskorrels en dergelijk inert materiaal en ook wanneer door voorafgaande coagulatie en flocculatie het uitvlokkingsproces reeds volledig heeft plaats gehad.

In de praktijk zal bezinking in stilstaande bekkens zeer zelden voorkomen. Zo goed als altijd zullen we te maken hebben met bekkens, die horizontaal of verticaal worden doorstroomd. Hierbij worden storingsmogelijkheden geïntroduceerd, met name

*) 20e Vacantie cursus in Drinkwatervoorziening, gehouden door de Afdeling der Weg- en Waterbouwkunde van de TH Delft, op 4 en 5 januari 1968. Les no. 3.

wandeffecten, turbulente stroming, kortsluitstromen, uitschuring van reeds op de bodem afgezette deeltjes door te grote horizontale snelheid. Het rendement van de bezinking wordt door deze zaken ongunstig beïnvloed.

Het ontwerp van het sedimentatiebekken zal dan ook zodanig moeten zijn, dat de storende factoren tot een minimum worden teruggebracht. Helaas zal het echter blijken, dat sommige een aan elkaar tegengestelde uitwerking op het ontwerp hebben en dat het beste compromis economisch onaantrekkelijk is. Voor de ontwerper verhoogt dit slechts de noodzaak om te kunnen beschikken over inzicht en ervaring.

2. Bezinking in stilstaand water

Dit is een intermitterende bezinking. Water met vaste deeltjes wordt in een bekken gelaten, staat daar een bepaalde tijd stil, gedurende welke het bezinkingsproces zich voltrekt en wordt daarna afgelaten. Hierop vindt opnieuw een vulling plaats.

Het karakter van de bezinking kan worden bestudeerd in het toestel van afb. 1, bestaande uit een lange kolom, liefst van glas of doorzichtig plastic, met op verschillende hoogten tappunten voor monsterneming.

Teneinde convectiestromen t.g.v. temperatuurverschillen met de omgeving te voorkomen, verdient het aanbeveling de kolom te plaatsen in een tweede kolom, gevuld met water van dezelfde temperatuur.

2.1 Bezinking van enkele gelijke discrete deeltjes

Een enkel discreet deeltje, dat zich in een vloeistof bevindt zal onder invloed van de zwaartekracht bezinken. Het ondervindt daarbij de weerstand van de vloeistof, de stuwdruk, die toeneemt naarmate de bezinkingsnelheid groter wordt. Wanneer de stuwdruk gelijk is geworden aan het schijnbare gewicht van het deeltje, zakt het met éénparige snelheid verder.

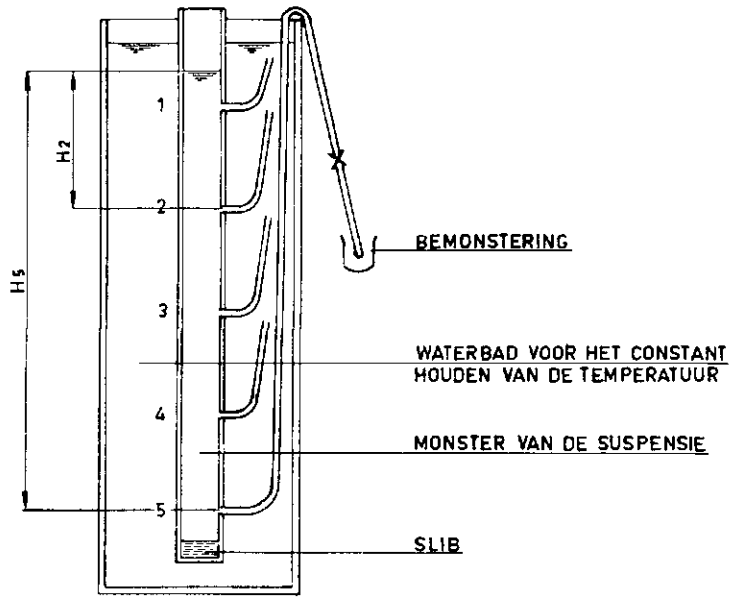
Voor het gewicht, de aandrijfkracht, K_d , geldt:

$$K_d = (\rho_d - \rho) g V \quad (1)$$

De stuwdruk of weerstand K_w werd reeds door Newton als volgt vastgesteld:

$$K_w = C_d \cdot A \cdot \frac{1}{2} \rho S^2 \quad (2)$$

ρ_d en ρ zijn de dichtheid van resp. deeltje en vloeistof, V en A resp. volume en geprojecteerd oppervlak van het deeltje, C_d een dimensieloze weerstandscoefficiënt en S de bezinkingsnelheid.



Afb. 1 - Toestel voor statische sedimentatie analyse's.

Door (1) gelijk (2) te stellen krijgen we:

$$S = \sqrt{\frac{2}{C_d} \cdot \frac{V}{A} \cdot g \cdot \frac{\rho_d - \rho}{\rho}} \quad (3) \quad Re = \frac{S R}{\nu}$$

Voor een bol met diameter D is $V = \frac{1}{6\pi} D^3$ en $A = \frac{1}{4\pi} D^2$

Dit in (3) geeft:

$$S_{bol} = \sqrt{\frac{4 \cdot g \cdot (\rho_d - \rho) \cdot D}{3 \cdot C_d \cdot \rho}} \quad (4) \quad Re = \frac{S D}{\nu}$$

Newton meende, dat C_d een constante was. Uit vele metingen is gebleken, dat dit niet het geval is. De grootte van C_d is afhankelijk van het stroombeeld rond het bezinkende deeltje,

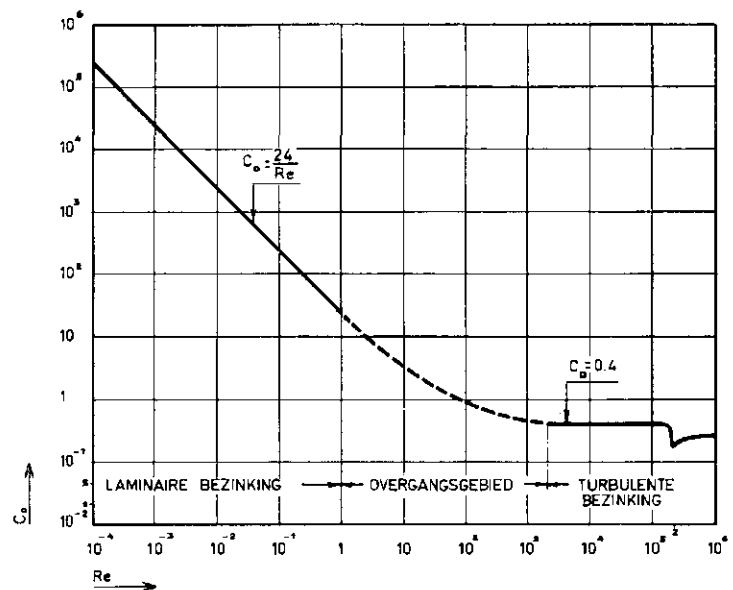
gekaracteriseerd door het getal van Reynolds.

ν is de kinematische viscositeitscoëfficiënt en R de hydraulische straal. Voor een bol is R (nat volume gedeeld door het oppervlak) = D , zodat

$$Re = \frac{S D}{\nu}$$

Het verband tussen C_d en Re voor bollen is weergegeven in afb. 2. Voor kleine waarden van Re tot aan $Re = 1$ geldt $C_d = \frac{24}{Re}$

Afb. 2 - De weerstandscoefficiënt voor bollen als een functie van het getal van Reynolds.



De vloeistofstroming rond het deeltje is laminair.

Bij waarden van Re die groter zijn van 2×10^3 is het stroombeeld geheel turbulent en heeft C_d de constante waarde van 0,4.

Tussen $Re = 1$ en $Re = 2.10^3$ ligt een overgangsgedebied waarvoor bij benadering geldt:

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34$$

(De discontinuïteit bij $Re = 2.10^3$ wordt daardoor veroorzaakt, dat bij deze waarde van Re de plaats waar de stroom rond het bolletje dit bolletje loslaat plotseling verandert. Het is dan ook zo, dat een C_d -lijn voor een deeltje met een zodanige vorm, dat de stroom altijd op dezelfde plaats loslaat (bijv. een schijfje), deze discontinuïteit niet vertoont).

Vullen we nu C_d in vergelijking (4) in dan levert dit voor laminaire bezinking:

$$S = \frac{1}{18} \cdot \frac{g}{\nu} \cdot \frac{\rho_a - \rho}{\rho} \cdot D^2 \quad (5) \text{ (Stokes)}$$

en voor turbulente bezinking:

$$S = \sqrt{\frac{10}{3} g \cdot \frac{\rho_a - \rho}{\rho}} \cdot D \quad (6)$$

In het overgangsgedebied moet S door proberen worden bepaald.

In afb. 3 zijn een aantal met deze formules berekende bezinksnelheden gegeven voor bolvormige deeltjes van verschillende dichtheid in water van $10^\circ C$.

Uit de formules blijkt tevens, dat de temperatuur van het water geen invloed heeft op de bezinksnelheid bij turbulente bezinking, maar wel bij laminaire bezinking.

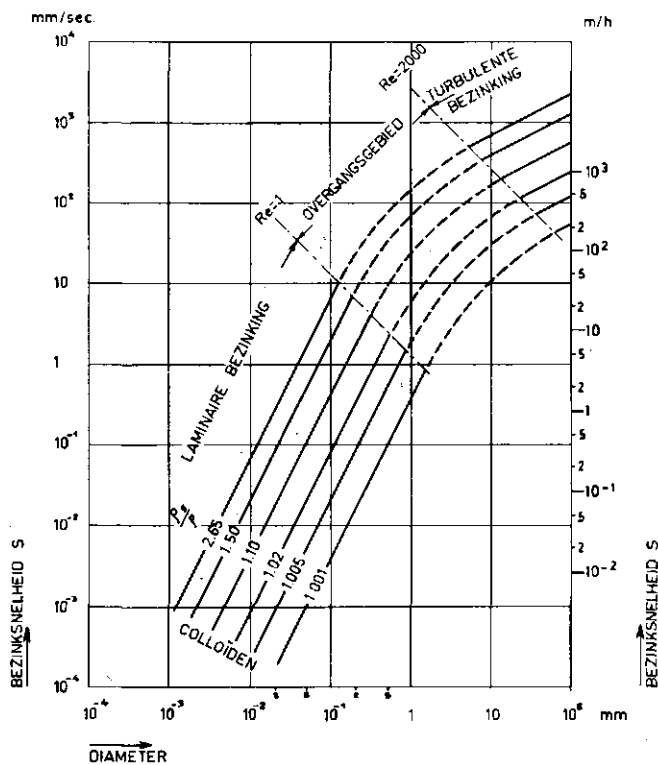
Bij $t = 0^\circ C$ is $\nu = 1,79 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$.

Bij $t = 10^\circ C$ is $\nu = 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$.

Bij $t = 20^\circ C$ is $\nu = 1,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$.

De bovenstaande gegevens hebben betrekking op deeltjes met een bolvorm. In werkelijkheid zal de vorm der deeltjes hiervan afwijken. Bij hetzelfde volume zal het oppervlak steeds groter zijn, waardoor de stuwdruk toeneemt. Ook zal de C_d in het turbulente gebied groter zijn. De werkelijke bezinksnelheid zal dan ook steeds lager zijn dan afb. 3 aangeeft.

Uit afb. 3 zien we tevens, dat zandkorreltjes met een diameter kleiner dan 0,1 mm laminair bezinken. Geflocculeerde deeltjes zijn over het algemeen ruimschoots groter dan 1 mm en bezinken derhalve hoofdzakelijk in



Afb. 3 - De bezinksnelheid van bollen in stilstaand water van $10^\circ C$ als functie van diameter en specifieke dichtheid $\frac{\rho_s}{\rho}$.

het overgangsgedebied of in het turbulente gebied. De bezinksnelheid is hier evenredig met \sqrt{D} . Hier volgt uit, dat het ver doorvoeren van de uitvloeking niet zo'n grote invloed heeft.

Tot nog toe spraken we over de bezinking van enkele deeltjes. Hierbij was de verticale waterverplaatsing, die het gevolg is van het zakken der deeltjes, verwaarloosbaar. Dit is niet meer zo, wanneer de deeltjesconcentratie zeer groot wordt. In dat geval komt er een reële opwaartse watersnelheid, waarmee de berekende relatieve bezinksnelheid moet worden vermindert om te komen tot de effectieve bezinksnelheid. Hier geldt dus:

$$S_0 = S - V \quad (7)$$

S_0 = effectieve bezinksnelheid
 S = relatieve bezinksnelheid
 V = opwaartse watersnelheid

Welk verband bestaat er nu tussen S en S_0 .

Stel de deeltjes hebben een diameter D en het aantal deeltjes per eenheid van lengte is in alle richtingen n .

De volumetrische concentratie C_v is nu:

$$C_v = \frac{1}{6\pi} D^3 \cdot n^3$$

Per eenheid van oppervlakte is de totale oppervlakte ingenomen door de deeltjes $= \frac{1}{4\pi} D^2 \cdot n^2$. Ter bepaling

van de verticale waterbeweging kunnen we ons de vaste deeltjes dus voorstellen als een met een snelheid S_0 zakkende staaf met een doorsnede van $\frac{1}{4\pi} D^2 \cdot n^2$ (per eenheid van oppervlakte). De ruimte, die door het zakken van de staaf vrijkomt, moet door water worden aangevuld, dat een opwaartse snelheid V heeft. Derhalve moet

$$S_0 \cdot \frac{1}{4\pi} D^2 n^2 = V (1 - \frac{1}{4\pi} D^2 n^2) \quad (8)$$

Hieruit is V te elimineren. Substitutie in (7) geeft:

$$S_0 = S (1 - \frac{1}{4\pi} D^2 \cdot n^2) \quad (9)$$

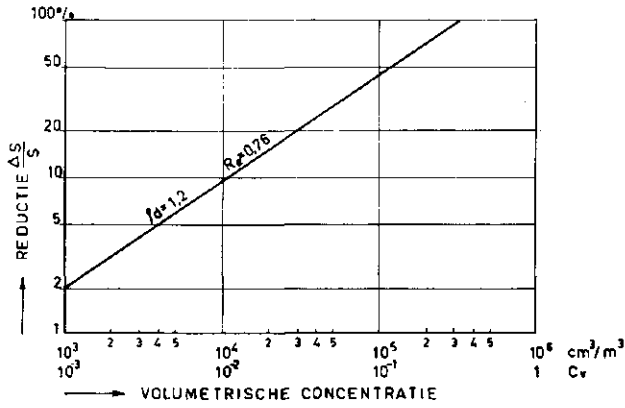
Invoering van de volumetrische concentratie C_v in vgl. 9 geeft tenslotte

$$S_0 = S (1 - 1,2 C_v^{2/3}) \quad (10)$$

Tengevolge van afwijkingen in de bolvorm zal de factor 1,2 in werkelijkheid groter zijn. Metingen hebben uitgewezen, dat deze varieert van 1,5 voor afgeronde zandkorrels tot 2,8 voor uitgevlokte deeltjes.

Afb. 4 geeft een voorbeeld van de afname van de bezinksnelheid als functie van de deeltjesconcentratie voor deeltjes met een dichtheid = 1,2 en een getal van Reynolds = 0,76.

Bij de bezinking van rivierslib is zelfs



Afb. 4 - Afname van de bezinksnelheid als functie van de concentratie der gesuspendeerde deeltjes.

bij zeer sterke slibconcentraties de invloed nog te verwaarlozen. Immers, stel het slibgehalte op 5000 mg/l met een s.g. van 2,65, dan is

$$C_v = \frac{5000}{2,65} \times 10^{-6} \text{ l/l} = 0,002$$

$$S_0 = S (1 - 2,0 \times 0,002^{2/3}) = S (1 - 0,032).$$

De effectieve bezinksnelheid is dus met ruim 3 % gedaald.

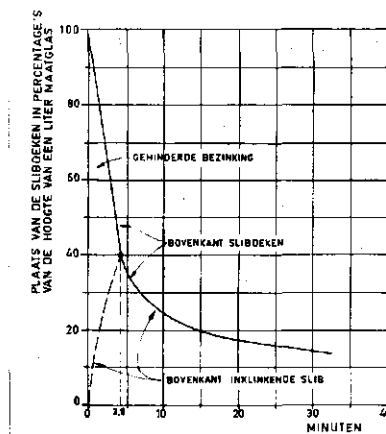
Wel kan in een vlokkendeken van daadwerkelijke gehinderde sedimentatie worden gesproken.

Ook bij de actief slibbezinking in de afvalwaterzuivering is sprake van sterk gehinderde bezinking. Zie afb. 5.

2.2 Bezinking van suspensies

In de voorgaande paragraaf is steeds gesproken over deeltjes die allen dezelfde diameter hebben. In werkelijkheid zullen we echter steeds te maken hebben met suspensies, waarin deeltjes van verschillende diameter voorkomen. Hoe groter de diameter, hoe sneller de deeltjes bezinken. Voor de veel voorkomende laminaire bezinking is: de bezinksnelheid evenredig met het kwadraat van de diameter, voor turbulente bezinking met de wortel uit de diameter. Voor de bestudering van het bezinkkarakter van een suspensie gebruiken we weer het toestel van afb. 1.

We gaan uit van een suspensie van



Afb. 5 - Bezinking en inklinking van actief slibsuspensie met oorspronkelijke hoeveelheid vaste stof van 2000 mg/l.

discrete deeltjes, zorgen er voor dat deze volkomen homogeen in de kolom komt en dat de temperatuur niet verandert. De beginconcentratie van de deeltjes is bekend en wordt gesteld op 100 %. Op verschillende hoogten worden nu op gezette tijden monsters aan de kolom onttrokken en hiervan wordt de deeltjes-concentratie bepaald. Door de voortgaande bezinking zal de concentratie steeds minder worden naarmate de tijd verstrijkt. In de onderstaande tabel zijn gegevens van 2 monsterpunten verzameld.

Beschouwen we eerst het monsterpunt op 1,20 m. Na 15 min. is hier nog 96 % van de deeltjes aanwezig. D.w.z. dat 4 % al voorbij dit punt is gezon-

ken en dus een bezinksnelheid heeft groter dan $\frac{60}{15} \times 1,20 = 4,80 \text{ m/h}$.

Alle deeltjes die een bezinksnelheid hebben kleiner dan 4,80 m/h komen op een diepte van 1,20 m na 15 min. nog onveranderd in concentratie voor. Na 30 min. is op 1,20 m diepte nog 81 % aanwezig. 19 % van de deeltjes heeft dus een bezinksnelheid groter dan $\frac{60}{30} \times 1,20 = 2,40 \text{ m/h}$. De deeltjes met een kleinere bezinksnelheid komen na een half uur op 1,20 m nog onveranderd voor. Door de meting voldoende lang door te zetten kunnen we dus een volledig inzicht krijgen in de verdeling van de bezinksnelheden van de suspensie. Door de homogeniteit van de suspensie en de eenparigheid van de bezinksnelheid levert het monsterpunt op 2,80 m in wezen dezelfde gegevens. Na bijv. 90 min is de deeltjesconcentratie op deze diepte 70 %. Dit wil dus zeggen dat 30 % van de deeltjes een bezinksnelheid heeft die groter is dan

$\frac{60}{90} \times 2,80 = 1,87 \text{ m/h}$.

In afb. 6 zijn de bezinksnelheden aan de hand van de bovenstaande meetgegevens in een frequentieverdeling uitgezet. Met een + zijn de meetgegevens van het monsterpunt op 1,20 m aangegeven en met een 0 die op 2,80 m.

Wat is nu het totale bezinkrendement van een suspensie die gedurende een tijd T staat in een tank met een hoogte H?

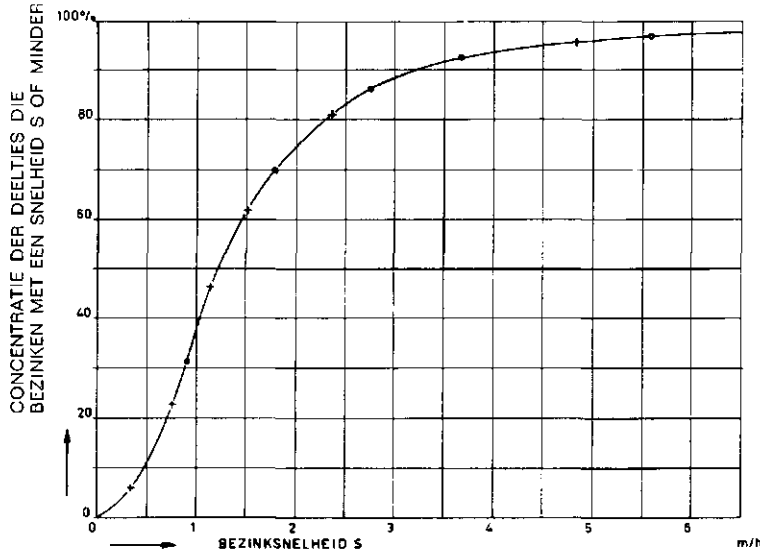
Alle deeltjes die een bezinksnelheid hebben groter dan $\frac{H}{T}$ bezinken voor

100 %. Deze bezinksnelheid noemen we de *kritische bezinksnelheid* S_0 , ook wel genoemd *oppervlaktebelasting*. Uit de frequentieverdeling gegeven in afb. 7 stellen we vast welke concentratie p_0 behoort bij S_0 . (De concentratie is niet meer in % uitgedrukt maar in een verhoudingsgetal waarbij de uitgangskoncentratie 1 is). $1-p_0$ is dus volledig bezonken. De deeltjes met een kleinere bezinksnelheid dan S_0 zijn in de tijd T niet volledig bezonken. Zij zijn slechts bezonken voor

zover ze zich een afstand $\frac{S}{S_0} \times H$ boven de bodem bevonden.

Het rendement van de bezinking van deeltjes met een bezinksnelheid S is dus $\frac{S}{S_0}$. De aanvangsconcentratie van deze deeltjes met bezinksnelheid S be-

diepte van het monsterpunt onder water	concentratie van de deeltjes na verschillende bezinktijden					
	15 min	30 min	45 min	60 min	90 min	180 min
1,20 m	96 %	81 %	62 %	46 %	23 %	6 %
2,80 m		97 %	93 %	86 %	70 %	32 %



Afb. 6 - Frequentieverdeling voor de bezinksnelheden van discrete deeltjes.

draagt dp . Het bezinkrendement is dus $\frac{S}{S_0} dp$. Het bezinkeffect van alle deeltjes met snelheden kleiner dan S_0 bedraagt dus $\int_0^{P_0} \frac{S}{S_0} dp$ en het totaal rendement van de gehele bezinking bedraagt dus:

$$r = 1 - p_0 + \int_0^{P_0} \frac{S}{S_0} dp. \quad (11)$$

De grootte van de integraal kan op eenvoudige wijze uit de frequentiegrafiek worden afgeleid.

$$\int_0^{P_0} \frac{S}{S_0} dp = \frac{1}{S_0} \int_0^{P_0} S dp$$

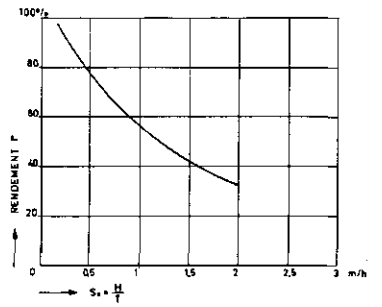
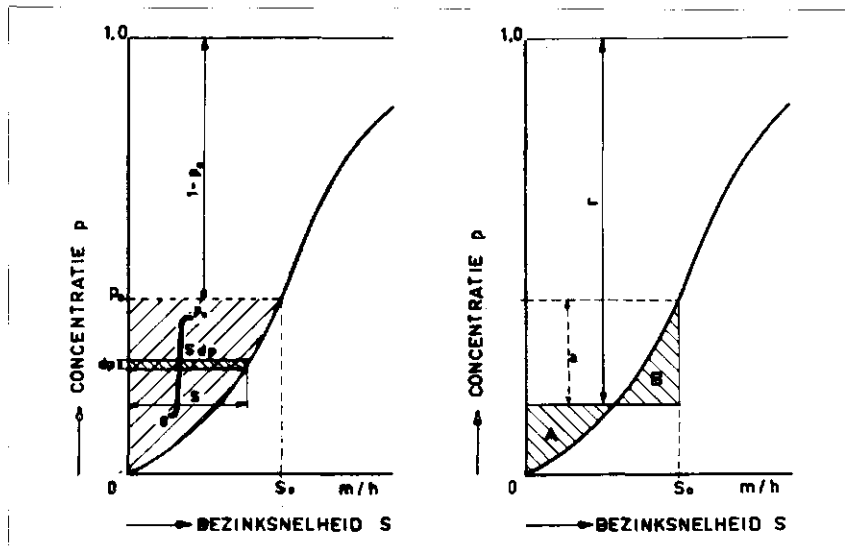
$\int_0^{P_0} S dp$ is de

oppervlakte van het schuin gearceerde gebied in het linker deel van afb. 7. In het rechter deel van afb. 7 is dit gebied rechthoekig van vorm gemaakt door de oppervlakken A en B aan elkaar gelijk te maken. Het quotient

van $\int_0^{P_0} S dp$ en S_0 is dus gelijk

aan a en het totaal rendement van de gehele bezinking is $r = 1 - p_0 + a$. Het blijkt dus, dat het rendement van de bezinking van een bepaalde suspensie geheel bepaald wordt door de kritische bezinksnelheid of oppervlaktebelasting $S_0 = \frac{H}{T}$. Naarmate de S_0 daalt neemt het rendement toe (zie afb. 8). We zien tevens, dat het rendement niet in absolute zin beïnvloed wordt door de diepte. Een

Afb. 7 - Frequentieverdeling voor de bezinksnelheden van discrete deeltjes.

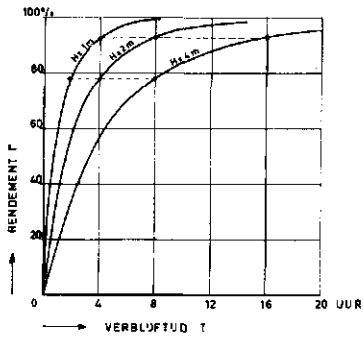


Afb. 8 - Rendement van de bezinking van discrete deeltjes als functie van de oppervlaktebelasting.

bepaalde hoeveelheid Q van een suspensie staat een tijd T in een tank met een hoogte H en bereikt daar door een bepaald bezinkrendement. In dezelfde tijd T kan in een tank van de halve hoogte hetzelfde rendement worden bereikt door in dit vat tweemaal gedurende een tijd $\frac{1}{2} T$ een hoeveelheid $\frac{1}{2} Q$ te laten bezinken. Wanneer we dus een bepaalde hoeveelheid Q willen behandelen in een bepaalde tijd T wordt het effect in het geheel niet door de tankdiepte beïnvloed. Zie afb. 9.

Houden we echter de verblijftijd constant en laten we de tankdiepte afnemen, dan neemt het rendement toe. De hoeveelheid behandeld water per tijdseenheid neemt evenwel in dezelfde mate af.

Zoals gesteld geldt de bovenstaande beschouwing alleen voor discrete deeltjes. Bij de bezinking van flocculente deeltjes heeft de tankdiepte een absolute invloed. Deze deeltjes worden tijdens de bezinking steeds groter en gaan dus voortdurend sneller bezinken. Bij flocculente bezinking kunnen we dan ook geen frequentieverdeling van de bezinksnelheid maken, die onafhankelijk is van de diepte. Elke diepte heeft zijn eigen frequentieverdeling. Afb. 10 is hiervan een voorbeeld. Duidelijk is te zien, dat de bezinksnelheden toenemen met de diepte. Bij het bepalen van het rendement van de bezinking van een bepaalde suspensie t.o.v. de oppervlaktebelasting moet hier nu dus de tankdiepte als parameter worden ingevoerd. Hoe het rendement bij eenzelfde oppervlakte belasting toeneemt met de diepte laat afb. 11 zien. Beschouwen we in afb. 12 het rendement t.o.v. de verblijftijd dan zien we nu, anders dan in afb. 9, dat het rendement in een 4 m diepe tank na 8 uur verblijftijd groter is dan in een 2 m diepe tank na 4 uur.



Afb. 9 - Rendement van de bezinking van discrete deeltjes als functie van de verblijftijd voor verschillende diepten van de bezinktank.

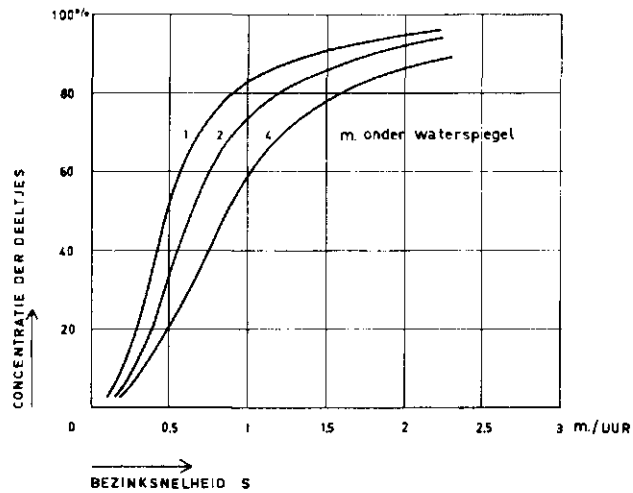
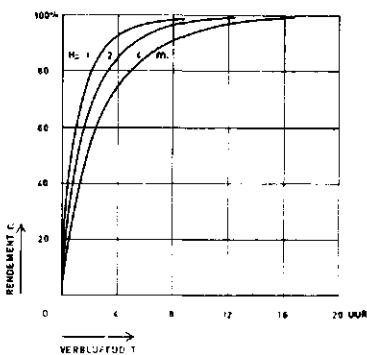
Wanneer we derhalve bij flocculente bezinking betrouwbare gegevens uit bezinkproeven willen verkrijgen zullen we er zorg voor moeten dragen, dat de diepte van de proeftank tenminste even groot is als de diepte van het werkelijke bezinkbekken.

3. Continue bezinking

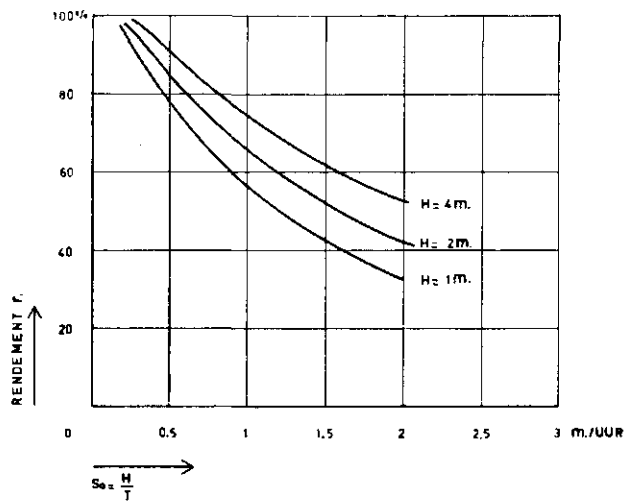
De discontinue bezinking in stilstaande bekken, zoals die in het vorige hoofdstuk is besproken wordt in de praktijk zeer weinig toegepast. Meestal laat men de bezinking continu verlopen in bekken die horizontaal of verticaal doorstroomd worden.

We beperken ons in dit hoofdstuk tot de horizontaal doorstroomde bekken, en wel die met een rechthoekige plattegrond. Afb. 13 toont een dergelijk bekken in principe. Het bestaat uit een inlaatzone waarin de suspensie zo goed mogelijk over de doorsnede van het bekken wordt verdeeld, een sedimentatiezone, waar het bezinkingsproces plaats vindt, een slibzone en een uitlaatzone. Terwijl het bekken door de suspensie horizontaal doorlopen wordt, zakken de vaste deeltjes

Afb. 12 - Rendement van de bezinking van flocculente deeltjes als functie van de verblijftijd voor verschillende diepten van de bezinktank.

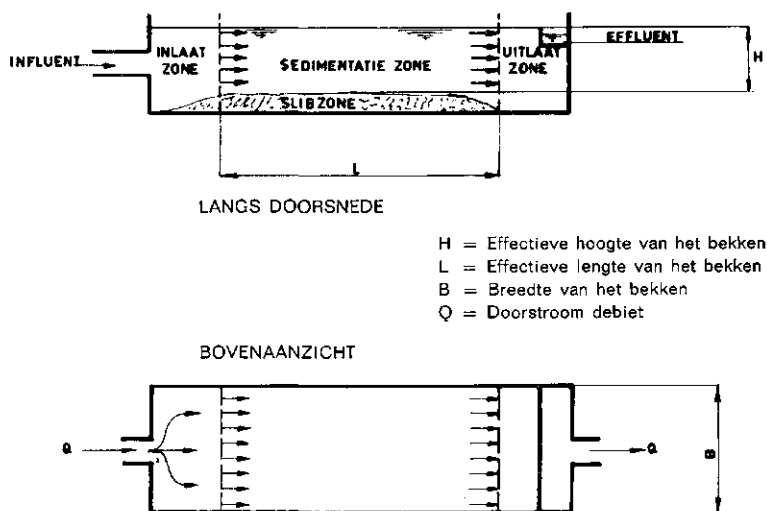


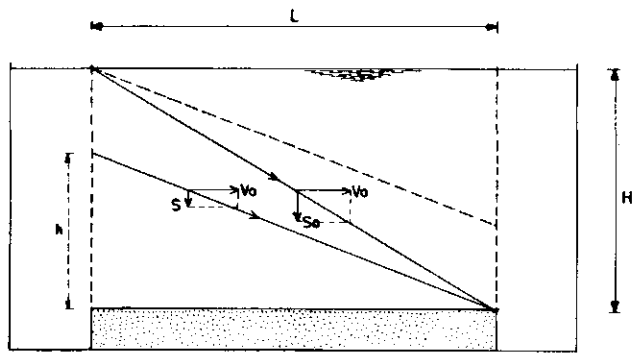
Afb. 10 - Gemeten frequentieverdeling voor de bezinksnelheid van flocculente deeltjes.



Afb. 11 - Rendement van de bezinking van flocculente deeltjes als functie van de oppervlaktebelasting voor verschillende diepten van de bezinktank.

Afb. 13 - Sedimentatiebekken met horizontale doorstroming.





Afb. 14 - Bezinking van discrete deeltjes in een ideaal bezinkbekken.

naar beneden. De grove deeltjes bezinken vóór in het bekken, naarmate de deeltjes fijner worden bezinken ze over een langer stuk van het bekken. De sliblaag zal zich in het algemeen dan ook niet horizontaal maar hellend afnemend naar het eind van het bekken opbouwen. Het verwijderen van de sliblaag kan continu geschieden, bijv. door mechanisch bewogen schrapers, zoals gebruikelijk is bij de afvalwaterzuivering waar de belasting zwaar is. Het kan ook discontinu plaats vinden door het bekken leeg te laten lopen en de sliblaag te verwijderen. Deze methode wordt nogal eens gevolgd bij de drinkwaterzuivering waar de belasting niet groot is. Terwille van de continuïteit in het bedrijf moeten dan uiteraard meerdere bekkens parallel werken.

3.1 Bezinking in een ideaal bekken

Ten behoeve van het uitwerken van

de theorie zullen we ons in eerste instantie weer beperken tot discrete deeltjes en daarbij uitgaan van een ideaal bassin. Dit is een bassin waar de suspensie volkomen regelmatig doorheen stroomt en waarin de bezinking op dezelfde wijze plaats vindt als in een stilstaand bassin van dezelfde diepte.

Het moet daartoe voldoen aan deze voorwaarden:

1. De concentratie van gesuspendeerd materiaal van elke grootte is gelijk in alle punten van de dwarsdoorsnede t.p.v. de inlaat.
2. De stroomrichting is horizontaal en de snelheid is overal gelijk. De verblijftijd van elk waterdeeltje is dus gelijk aan de theoretische verblijftijd.
3. Een deeltje is blijvend aan de suspensie onttrokken als het de bodem van het bekken heeft bereikt.

Afb. 14 toont een ideaal bassin met bezinking van discrete deeltjes. De

doorstroomsnelheid bedraagt $V_0 = \frac{Q}{BH}$

De afgelegde weg van deeltjes met een bezinkingsnelheid S_0 en S is ingetekend. Alle deeltjes met een bezinkingsnelheid groter dan S_0 bezinken voor 100%. Uit de op de eerder aangegeven wijze bepaalde frequentiekromme voor bezinkingsnelheden zien we weer dat de totale concentratie hiervan $1 - p_0$ bedraagt.

De deeltjes met bezinkingsnelheid S bezinken voor een gedeelte $\frac{h}{H}$ hetgeen

gelijk is aan $\frac{S}{S_0}$.

Het totale bezinkrendement is dus volkomen gelijk aan het in vergelijking 11 gevonden rendement voor stilstaande bezinking

$$= 1 - p_0 + \int_0^{p_0} \frac{S}{S_0} dp \quad (12)$$

en kan op de eerder beschreven manier worden bepaald uit de frequentieverdeling voor de bezinkingsnelheden. Het is dus geheel bepaald door de kritische bezinkingsnelheid of oppervlaktebelasting S_0 .

De grootte hiervan is weer gemakkelijk te bepalen.

$$S_0 = \frac{H}{T} \quad (13)$$

$$T = \frac{LHB}{Q} \quad (14)$$

14 ingevuld in 13 geeft

$$S_0 = \frac{H \cdot Q}{LHB} = \frac{Q}{LB} = \text{opp. v.h. bekken} \quad (15)$$

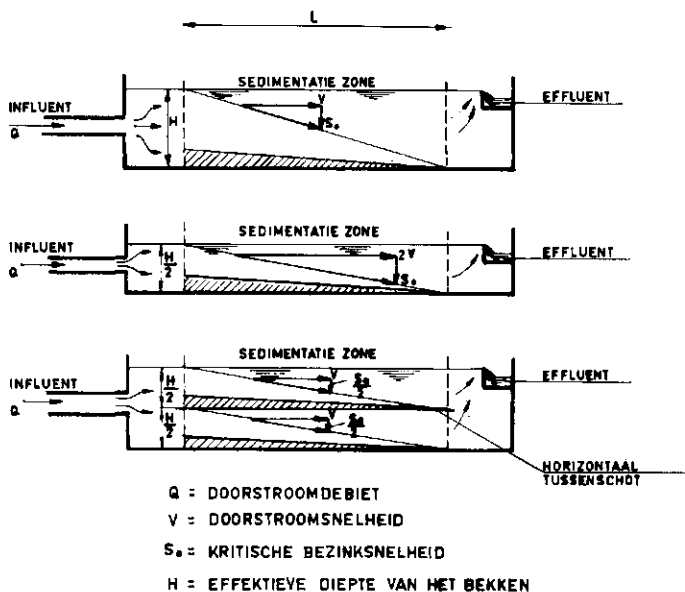
De benaming „oppervlaktebelasting” voor S_0 krijgt hier een duidelijker betekenis dan bij de bezinking in stilstaand water. Het bezinkingsrendement van een ideaal bekken dat horizontaal doorstroomd wordt door een bepaald suspensiedebiet wordt dus alleen bepaald door de grootte van de oppervlakte van het bekken. De diepte oefent hierop geen invloed uit. Afb. 15 laat dit nog eens zien. De drie bekkens krijgen hetzelfde debiet Q te verwerken. Het bovenste bekken heeft een hoogte H en het daaronderstaande bekken heeft een hoogte $\frac{1}{2} H$.

In beide gevallen is het rendement

$$S_0 = \frac{Q}{BL} \text{ en dus gelijk.}$$

Het is ook meekundig te zien door de kritische bezinkweg in te tekenen. In het bovenste bekken is de horizontale snelheid $= V$ en in het daaronderstaande bekken $= 2V$. Hieruit volgt dat S_0 in beide gevallen even

Afb. 15 - Horizontale doorstroming.



groot is. Het onderste bekken heeft weer een hoogte H , maar heeft op een hoogte $\frac{H}{2}$ een tussenbodem. De horizontale snelheid is nu weer V . De kritische bezinksnelheid is nu echter $\frac{S_0}{2}$, de helft van de eerste twee bekkens. Het bekken is als het ware twee maal zo groot geworden, de oppervlaktebelasting derhalve teruggevallen tot de helft waardoor het rendement aanzienlijk is verhoogd.

3.2 Storende factoren in werkelijke bekkens

In de praktijk voldoen bezinkbekkens nooit geheel aan de voorwaarden voor een ideaal bekken. Er is een aantal storende factoren waarvan de voornaamste zijn:

- storing door turbulente stroming
- storing door uitschuring
- storing door kortsluitstromen
- storing door samengroeien van de deeltjes.

De eerste drie factoren verkleinen het bezinkrendement, de laatste factor vergroot dit. Zij zullen achtereenvolgens nader besproken worden.

a. Storing door turbulente stroming
In het ideale bekken werd de bezinking in het geheel niet beïnvloed door de horizontale stroming door het bassin. Deze bezinking vereist een laminair stroombeeld. Wanneer echter het stroombeeld turbulent is wil dit zeggen dat er ook stroming in verticale richting voorkomt, neer- en opwaarts gericht. De bezinkweg van de deeltjes zal hierdoor beïnvloed worden en niet meer recht verlopen, maar gebogen zijn. Afb. 16 geeft hiervan enige voorbeelden. Het rendement van de bezinking zal achteruit gaan. Immers van alle deeltjes die bijvoorbeeld nog juist geheel in het ideale bekken zouden bezinken (bezinksnelheid S_0) is er een deel dat sneller bezinkt, hetgeen het rendement *niet* verhoogt en een deel, dat niet meer tot bezinking komt hetgeen rendementsverlaging betekent.

Het stroombeeld in het bekken wordt bepaald door het getal van Reynolds

$$Re = \frac{V_0 \cdot R}{\nu}$$

V_0 is de gemiddelde horizontale snelheid: $V_0 = \frac{Q}{BH}$

R is de hydraulische straal van het bekken: $R = \frac{BH}{B + 2H}$

ν is de kinematische viscositeitscoëfficiënt.

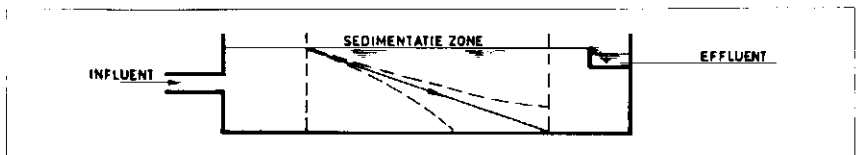
[Er dient uitdrukkelijk op gewezen te worden dat hier van een ander getal van Reynolds sprake is dan in hoofdstuk 2. In hoofdstuk 2 karakteriseerde Re het stroombeeld rondom het bezinkende deeltje als gevolg van de bezinking. Thans karakteriseert Re het gehele stroombeeld in het doorstroomd wordende bekken. Het eerste zouden we het mikrogetal van Reynolds kunnen noemen, het tweede het makrogetal van Reynolds].

Bij dit type bekkens (regelmatig van vorm, geen plaatselijke discontinuïteiten en storingen geldt, dat het stroombeeld laminair is zolang $Re < 2000$. In het algemeen is dus een klein getal van Reynolds vereist. Vullen we V_0 en R in Re in, dan krijgen we

$$Re = \frac{1}{\nu} \times \frac{Q}{BH} \times \frac{BH}{B + 2H} = \frac{Q}{\nu} \times \frac{1}{B + 2H}$$

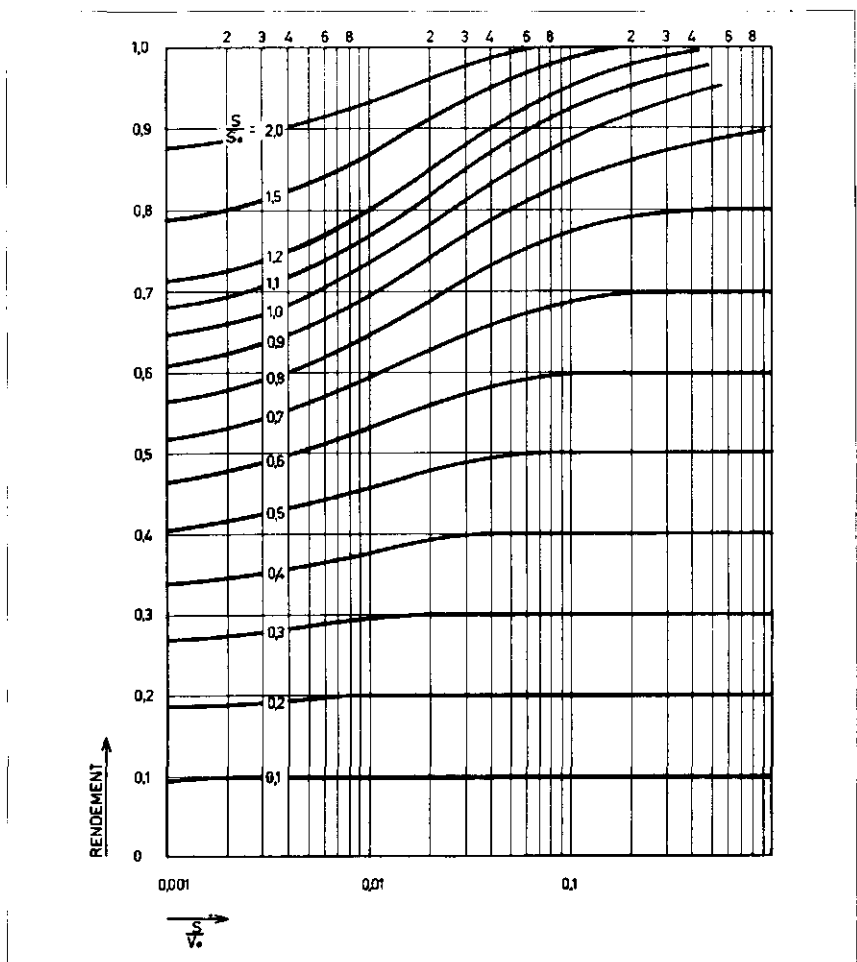
Dit eist dus brede en diepe bekkens. De horizontale stroomsnelheid V_0 zal hierin laag zijn. Wordt nu van een gewenste oppervlaktebelasting uitgegaan, dan betekent een grote breedte, dat de lengte kort zal zijn. Korte, brede, diepe bekkens zijn duur en werken storingen door kortsluitstromen in de hand.

Aan storingen door turbulentie zal in het algemeen dus moeilijk zijn te ontkomen. Het is daarom van belang te weten wat de invloed van de V_0 op het bezinkrendement zal zijn en als dit rendement onvoldoende zou blijken te zijn, hoe dit dan verbeterd kan worden. De door de Amerikanen



Afb. 16 - Het effect van turbulente stroming bij sedimentatie.

Afb. 17 - Rendement van bezinking van discrete deeltjes bij turbulente stroming.



T. R. Camp opgestelde grafieken van afb. 17 geven hierin een inzicht. Stel we sturen een bepaald debiet van een suspensie van gelijke deeltjes met een bezinksnelheid S door een bepaald bekken. De oppervlaktebelasting (of kritische bezinksnelheid) bedraagt

$$S_0 = \frac{Q}{B.L.}$$

Stel S is kleiner dan S_0 .

De bezinking kan dus niet volledig zijn en wanneer het bekken ideaal was zou het rendement $\frac{S}{S_0}$ bedragen.

Stel dit is 0,8. In de grafiek kunnen we nu zien, dat het bezinkrendement metterdaad het maximaal haalbare van 0,8 zal zijn als $\frac{S}{V_0} \cong 0,4$ D.w.z. als $V_0 \cong 2,5 S$. Wordt V_0 groter, bijv. $\frac{S}{V_0} = 0,1$ of $V_0 = 10 S$ dan daalt het rendement tot 0,77 enz.

Doordat overigens de $\frac{S}{V_0}$ schaal logarithmisch is, is de invloed van de turbulentie niet zo bijzonder groot. Bij het bovenstaande voorbeeld van $\frac{S}{S_0} = 0,8$ hebben we gezien dat het rendement 0,8 (maximaal) is bij $V_0 = 2,5 S$. Bij $V_0 = 10 S$ is het 0,77 en bij $V_0 = 100 S$ is het 0,65. Vanaf het maximaal haalbare betekent dit een achteruitgang van ca. 20% voor een 40-voudige snelheidsverhoging. Hebben we overigens uit andere overwegingen voor een bekend debiet van een suspensie van deeltjes met een bekende bezinksnelheid S de breedte en

de diepte van het bekken gekozen, dan is dus $\frac{S}{V_0}$ bekend. Willen we nu een bepaald bezinkrendement halen, dan kunnen we uit de grafiek aflezen hoe groot S_0 moet zijn. Doordat S bekend is is nu ook S_0 , de oppervlaktebelasting, bekend en kunnen we met de reeds vastgestelde B de L van het bekken uitrekenen.

b. Storing door uitschuring

In het ideale bekken zijn we ervan uitgegaan, dat deeltjes die eenmaal de bodem hadden bereikt definitief bezonken waren. We hebben berekend, dat de werking van dit ideale bekken slechts door de oppervlaktebelasting $S_0 = \frac{Q}{B.L.}$ wordt bepaald, onafhankelijk van de diepte. Laten we nu echter de diepte afnemen, dan neemt de horizontale snelheid V_0 evenredig toe en op een bepaald moment is deze zo groot, dat niet meer aan de voorwaarde, dat eenmaal bezonken deeltjes op de bodem blijven liggen, wordt voldaan. Ze zullen door de te grote V_0 weer worden opgenomen, uitschuring treedt op en het bezinkrendement vermindert. De kritische snelheid waarmee dit gebeurt wordt de sleepnelheid V_s genoemd. Volgens Camp is deze gelijk aan

$$V_s = \sqrt{\frac{8\beta}{f} \cdot g \cdot \frac{\rho_d - \rho}{\rho}} \cdot D \quad (16)$$

β = vormfactor, variërend van 0,04 voor uniforme zandkorrels tot 0,06 voor platte deeltjes.

f = wrijvingscoëfficiënt; gemiddelde waarde 0,03.

D = diameter van het deeltje.

Afb. 18 geeft de sleepnelheden t.o.v. de deeltjes diameter bij verschillende relatieve dichtheden en waarden van $\beta = 0,05$ en $f = 0,03$. Voor zandkorrels ($\rho_s/\rho = 2,65$) van 1 mm is deze ca. 2000 m/h en van 0,1 mm ca. 600 m/h.

Om uitschuring te voorkomen moet

$$V_0 \cong V_s. \text{ Daar } V_0 = \frac{Q}{BH} \text{ en}$$

$S_0 = \frac{Q}{BL}$ kan deze voorwaarden worden omgezet in:

$$\frac{L}{H} \cong \frac{V_s}{S_0}$$

Ook dit vraagt dus om korte diepe bekkens, die om aan de vereiste oppervlaktebelasting te komen, een grote breedte moeten hebben.

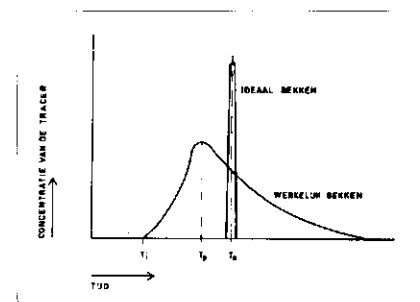
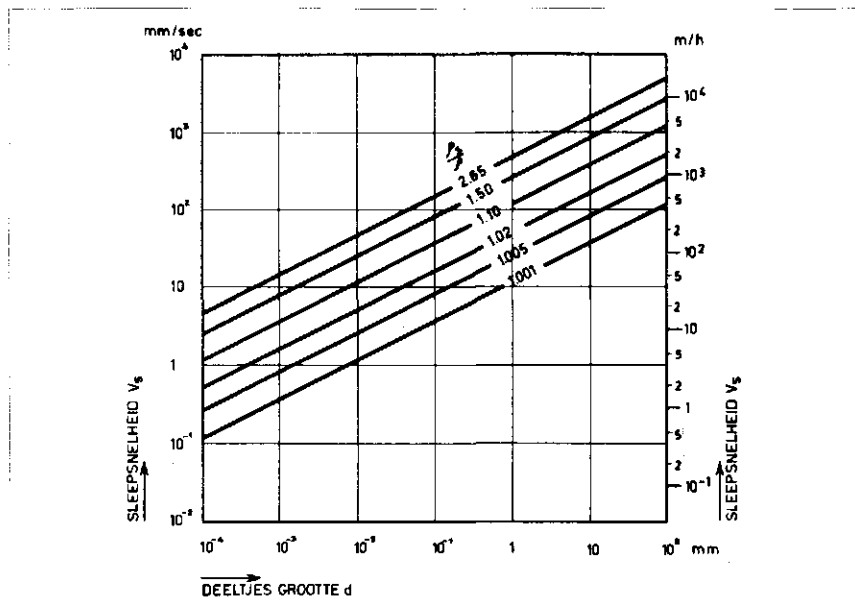
c. Storing door kortstluitstromen

Bij het ideale bekken zijn de stroomsnelheden op alle punten van de dwarsdoorsnede gelijk. De verblijftijd is voor alle deeltjes gelijk

$$T = \frac{B L H}{Q}$$

In werkelijke bekkens zal dit niet het geval zijn. De verblijftijd zal niet voor alle deeltjes gelijk zijn. Afb. 19 geeft een voorbeeld van een frequentieverdeling van de verblijftijd van deeltjes in een ideaal bekken en in een werkelijk bekken. De gemiddelde verblijftijd in het werkelijke bekken is echter gelijk aan die in het ideale bekken. De ongelijke snelheidsverdeling kan in de eerste plaats optreden over de

Afb. 18 - De sleepnelheid van bolvormige deeltjes als functie van diameter en specifieke dichtheid.



Afb. 19 - Frequentieverdeling voor de verblijftijden in een ideaal en in een werkelijk bezinkbekken zonder kortsluiting.

verticaal. Afb. 20 geeft hiervan een voorbeeld. Stromingspatroon II is van een ideaal bekken, stromingspatroon I is van een werkelijk bekken.

Stel dat de suspensie alleen bestaat uit deeltjes met bezinksnelheid S . Bij stromingspatroon I bezinken alle

deeltjes die zich binnen hoogte h_0' boven de bodem bevinden en bij stromingspatroon II die zich binnen een hoogte h_0 boven de bodem bevinden. Het gebied van de deeltjes, die niet tot bezinking komen, is bij patroon I dus dunner dan bij patroon II, de horizontale snelheid is echter evenredig groter dan bij patroon II, zodat het totale rendement gelijk blijft. Dat dit exact juist is kan als volgt worden berekend.

Stromingspatroon II, rendement is r

$$r = \frac{h_0}{H} = \frac{S L}{V_0 H} = \frac{S}{S_0} \quad (17)$$

Stromingspatroon I, rendement is r'
Vergelijking 17 is ook te schrijven:

$$\frac{h_0}{H} = \frac{Q}{B V_0} = \frac{B}{Q} h_0 V_0$$

Is r nu variabel dan wordt dit:

$$r = \frac{B}{Q} \int_0^{h_0} v dy$$

Voor stromingspatroon I geldt dus

$$r' = \frac{B}{Q} \int_0^{h_0'} v dy$$

$V = \frac{dx}{dt}$, $S = \frac{dy}{dt}$, dus $v dy = s dx$
terwijl y loopt van h_0' tot 0, loopt x van 0 tot L

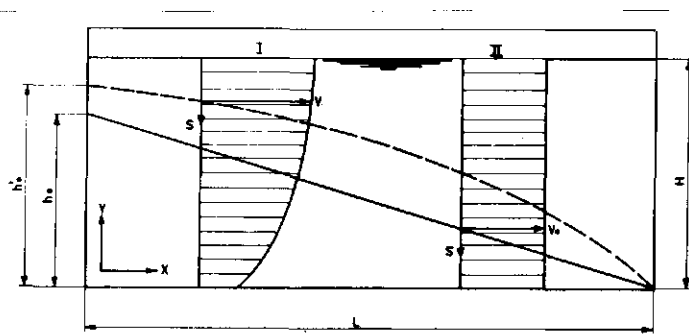
$$\text{dus } r' = \frac{B}{Q} \int_0^L s dx = \frac{B}{Q} S \cdot L = \frac{S}{S_0} \quad (18)$$

(17) = (18) dus voor beide stromingspatronen is het rendement gelijk.

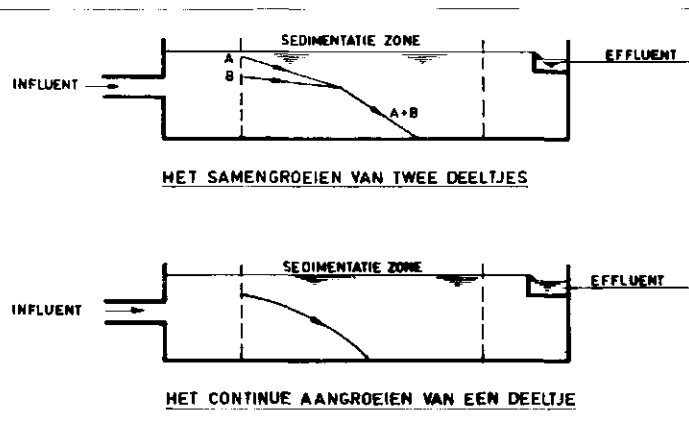
Dit geldt alleen als de gemiddelde verblijftijd gelijk is aan de ideale verblijftijd en als er homogeniteit is in dwarsrichting.

In het algemeen is deze homogeniteit er niet. Langs de wanden is de stroomsnelheid minder dan in het midden van het bassin. Dit heeft wel enige invloed op het rendement. We kunnen ons het bekken verdeeld denken in een aantal stroken met verschillende oppervlaktebelasting. Aangezien de lijn die het verband aangeeft tussen het rendement en de oppervlaktebelasting over het algemeen echter een slechts weinig hol gekromd beeld vertoont (zie afb. 8) is de storing op het gemiddelde rendement gering.

Dit is echter bepaald niet het geval wanneer in het bekken kortsluitstromen, dode hoeken en neren voorkomen. De gemiddelde verblijftijd wordt nu korter dan de theoretische. Bepaalde gedeelten van het bekken



Afb. 20 - Afgelegde wegen bij bezinking van discrete deeltjes bij verschillende stromingspatronen.



Afb. 21 - Sedimentatie van niet-discrete deeltjes.

doen niet mee, waardoor de oppervlaktebelasting van het overige deel toeneemt. Dit heeft een belangrijke daling van het rendement tengevolge. Deze kortsluitstromen kunnen in het algemeen worden voorkomen door een zo goed mogelijke verdeling van watertoevoer en -afvoer over de breedte van het bekken en door de verhoudingen tussen lengte, breedte en diepte van het bekken zodanig te kiezen, dat de storende invloeden zo weinig mogelijk kans krijgen, dus dat de stroming zo stabiel mogelijk is. De stabiliteit van een stroming wordt beter naarmate de verhouding tussen de traagheidskrachten en de zwaartekracht groter is. Deze worden weergegeven door het dimensieloze getal van Froude.

$$Fr = \frac{V_0^2}{gR}$$

V_0 = gemiddelde hor. snelheid
 R = hydraulische straal
Naarmate dit getal dus groter is, is de stabiliteit van het bekken groter.

$$V_0 = \frac{Q}{BH} \quad R = \frac{B \cdot H}{B + 2H}$$

Dus:

$$Fr = \frac{Q^2}{g} \frac{B + 2H}{B^3 \cdot H^3}$$

Om een groot Froude-getal te krijgen

moeten B en H dus klein zijn. Teneinde de vereiste oppervlaktebelasting te verkrijgen wordt L dus lang. Bovenstaande ontwerp is helaas tegengesteld aan de reeds geformuleerde ontwerpisen i.v.m. turbulentie en uitschuring. Dat wil zeggen, dat het Froude-getal toch weer zo klein mogelijk gehouden moet worden. Het is nog niet nauwkeurig bekend, bij welk minimum Froude-getal de stroming nog stabiel is. Ervaring wijst naar een waarde van 10^{-5} .

d. Storing door samengroeien

Bij de continue bezinking in horizontaal doorstroomde bekkens zijn tot nu toe slechts suspensies van discrete deeltjes besproken. De behandelde storende invloeden hadden hierbij slechts een negatief resultaat op het rendement.

In afb. 21 is een storing aangegeven, die positief werkt op het rendement. Dit is het samengroeien van deeltjes. Dit kan discontinu gebeuren wanneer twee deeltjes aan elkaar blijven zitten en de bezinkweg zich ontwikkelt als in de bovenste tekening is aangegeven. Of het kan continu gebeuren zoals op de onderste tekening is weergegeven. We kunnen nu spreken van floccu-

lente bezinking. De flocculente bezinking wordt door de turbulentie in de hand gewerkt. Het is nu niet meer alleen de oppervlaktebelasting die het rendement bepaalt (afgezien van storingen) maar ook de diepte krijgt een belangrijke invloed. Overigens kan verwezen worden naar hetgeen hierover in hoofdstuk 2 is behandeld. In het algemeen kan gesteld worden dat bij de drinkwaterzuivering elke bezinking wel in meer of mindere mate flocculent zal verlopen. Wanneer bij het ontwerp dus uitgegaan wordt van discrete bezinking, zit hierin een reserve.

4. Ontwerp van bezinkbekkens met horizontale doorstroming

De voorgaande theoretische beschouwingen zijn geheel gebaseerd geweest op bekkens met een rechthoekige plattegrond. In de praktijk komen deze veelvuldig voor, met name daar waar bij de zuivering van drinkwater de bezinking een onderdeel van het proces uitmaakt. Vooral bij de zuivering van afvalwater worden echter ook zeer vaak ronde bekkens toegepast.

4.1 Rechthoekige bekkens

Wanneer het debiet van de installatie bekend is, is de oppervlaktebelasting het eerste wat moet worden vastgesteld. Deze kan aan de hand van het gewenste bezinkingsrendement en van de frequentieverdeling van de bezinkingsnelheden worden gekozen en getoetst

aan uit de praktijk bekende vergelijkbare gegevens. Hiermede is de oppervlakte van het bekken bepaald, immers:

$$\text{oppervlaktebelasting} = S_0 = \frac{Q}{BL}$$

Nu komt het er nog op aan om breedte en lengte, waarvan het produkt bekend is zodanig te kiezen, dat zo weinig mogelijk negatieve storingen in de vorm van turbulentie, uitschuring en kortsluiting zullen optreden. We hebben gezien dat deze worden beheerst door het getal van Reynolds en het getal van Froude en dat deze getallen zo mogelijk respectievelijk kleiner moeten zijn dan 2000 en groter dan 10^{-5} . Dus:

$$Re = \frac{V_0 R}{\nu} < 2000$$

$$Fr = \frac{V_0^2}{gR} > 10^{-5}$$

We kunnen deze beide getallen op hun grenswaarde zetten en voor ν een gemiddelde waarde kiezen, bijvoorbeeld die van 10°C , d.w.z. $\nu = 1,31 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$. V_0 en R zijn nu de enige onbekenden en kunnen worden uitgerekend. Dit geeft $V_0 = 6,4 \text{ mm/sec}$ en $R = 0,41 \text{ m}$ (Voor $t = 5^\circ$ wordt $V_0 = 5,5 \text{ mm/sec}$ en $R = 0,55 \text{ m}$). Aan deze voorwaarden voldoen slechts de bovenaan in afb. 22 getekende zeer brede platte korte bekkens met een diepte van ongeveer 0,45 m of zeer hoge smalle lange bekkens met een breedte van ongeveer 0,90 m. Dergelijke afmetingen zijn economisch zeer onaantrekkelijk en zullen nooit worden gemaakt.

Bij de theoretische beschouwingen hebben we overigens al gezien, dat bij de praktisch toegepaste snelheden uitschuring niet zo vaak voorkomt en dat de rendementsachteruitgang door turbulentie niet zo groot is, bij flocculente bezinking door de optredende $\frac{dv}{dz}$ de vlokvorming zelfs in de hand werkt en dus positief beïnvloedt.

De invloed van kortsluitstromingen, gekenmerkt door een slecht Froudegetal, werkt in veel sterkere mate rendementsverlagend. Hier moet dus in de eerste plaats op worden gelet.

In de praktijk komt men de volgende ontwerpuitgangspunten het meeste tegen.

De oppervlaktebelasting ligt meestal tussen 1 m/h en 2 m/h, waarbij 1 m/h toch wel bepaald als laag moet worden beschouwd. De verhouding tussen lengte en breedte ligt meestal tussen 3 en 5 en is soms nog zelfs beduidend hoger. De diepte is zelden kleiner dan

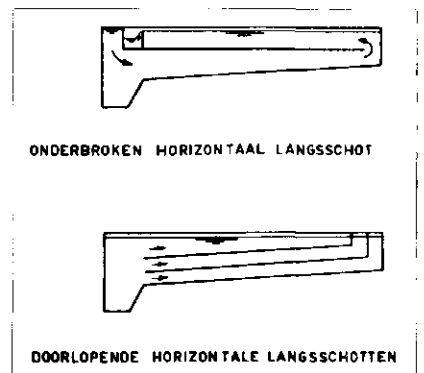
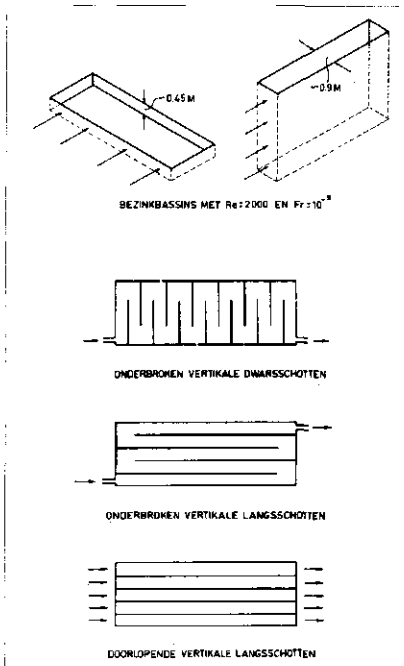
2 m en ligt zeer vaak tussen $3\frac{1}{2}$ en 4 m. Tesaamen met de oppervlaktebelasting bepaalt de diepte de verblijftijd in het bekken. Deze ligt meestal tussen 1 en 3 uur voor bezinking van vaste stof en tussen de 2 en 4 uur voor de bezinking na coagulatie.

Bij de bovenstaande afmetingen en verhoudingen komt men tot te lage Froude-getallen en te hoge getallen van Reynolds. Door in de bekkens schotten te plaatsen kan dit worden verbeterd. Dit is in afb. 22 aangegeven. Het kunnen zijn onderbroken schotten in langs- of dwarsrichting, dan wel doorlopende schotten in langsrichting. Door deze maatregelen neemt de horizontale snelheid toe en

$$\text{de hydraulische straal } R = \frac{B H}{B + 2H}$$

wordt kleiner. In het getal van Reynolds werken deze effecten tegen elkaar in, zodat het maar weinig groter wordt. Bij het Froude-getal werken de effecten in dezelfde richting, de vergroting van de snelheid zelfs kwadratisch. Het Froude-getal neemt dus belangrijk toe en het totale rendement wordt duidelijk verhoogd. Er dient wel op te worden gelet, dat de sleepkracht niet wordt overschreden. Door deze maatregelen kan nu zonder gevaar de oppervlaktebelasting worden vergroot van de genoemde 1 à 2 m/h tot 2 à 2,5 m/h. Een andere methode tot rendementsverhoging is aangegeven in afb. 23.

Afb. 22 - Vormgeving van rechthoekige horizontaal doorstroomde bezinkbekkens met inachtneming van gunstige waarden van Re en van het getal van Froude.



Afb. 23 - Vormgeving van rechthoekige horizontaal doorstroomde bezinkbekkens met inachtneming van gunstige waarden van Re en van het getal van Froude.

Hier is het bekken horizontaal verdeeld door een onderbroken of door doorlopende langsschotten. In het eerste geval is de V_0 vergroot en de R verkleind en in het tweede geval is alleen de R verkleind. Dit op zich zelf werkt reeds rendementsverhogend, doch in veel hogere mate wordt het rendement opgevoerd, doordat de

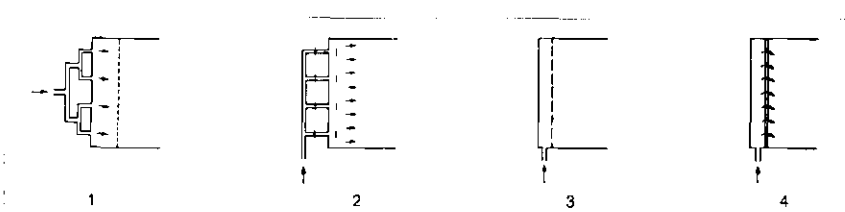
oppervlaktebelasting in het eerste geval tot de helft en in het tweede geval zelfs tot 1/3 is teruggebracht. De bezinkoppervlakte is immers resp. 2 en 3 x zo groot geworden.

Met dit type bekken kan per eenheid van terreinoppervlakte een zeer groot vermogen worden bereikt. Ze hebben het nadeel, dat de slibverwijdering moeilijker wordt. Bij de afvalwaterzuivering, waar de belasting zo hoog is, dat mechanische slibverwijdering nodig is, worden ze dan ook weinig toegepast. Bij de drinkwaterzuivering is de slibaanval meestal veel minder groot, waardoor de slibverwijdering op eenvoudiger wijze kan plaats vinden, bijv. door discontinu spoelen. Dan biedt deze bekkenvorm een aantrekkelijke oplossing. Vooral daar, waar de terreinoppervlakte beperkt is, de grondkosten hoog zijn, of door klimatologische omstandigheden een opstelling in de openlucht onmogelijk is. In verschillende nieuwe bedrijven in Zweden en rondom Parijs zijn bezinkingsbekkens van dit type toegepast.

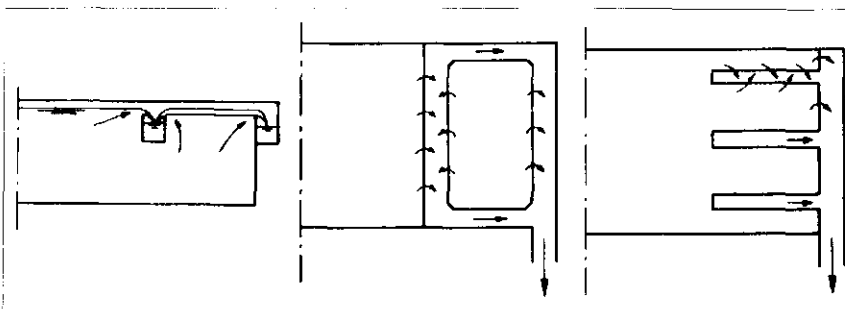
4.2 Inlaat- en uitlaatconstructies

Uit de voorgaande beschouwingen is gebleken, dat bij de inlaat een regelmatige verdeling van de suspensie over de gehele dwarsdoorsnede van het bekken ten zeerste gewenst is, doch dat hierbij in de allereerste plaats een zo gelijk mogelijke verdeling in breedterichting noodzakelijk is. Onregelmatigheden hierin verlagen het rendement, terwijl snelheidsverschillen over de vertikaal van weinig invloed op het rendement zijn. Dit leidt ertoe, dat bij het ontwerpen van inlaatconstructies dus vooral aandacht moet worden geschonken aan deze horizontale verdeling. In afb. 24 zijn hiervoor verschillende methoden aangegeven. De bekken worden praktisch altijd gevoed vanuit een enkel kanaal of een enkele leiding. In nr. 1 is de leiding zodanig vertakt, dat de weerstanden naar de verschillende inlaatpunten gelijk zijn en dus ook de debieten. In de nrs. 2, 3 en 4 zijn de intree weerstanden in het bekken groot gehouden t.o.v. de aanvoerweerstand. De snelheden in de aanvoerleidingen zijn meestal laag. Een gelijkmatige verdeling over de inlaatpunten kan hierdoor worden bewerkstelligd. Door achter de inlaten in het bassin stootplaten of een geperforeerd schot te plaatsen kan de regelmaat van het intreepatroon nog verder worden verbeterd.

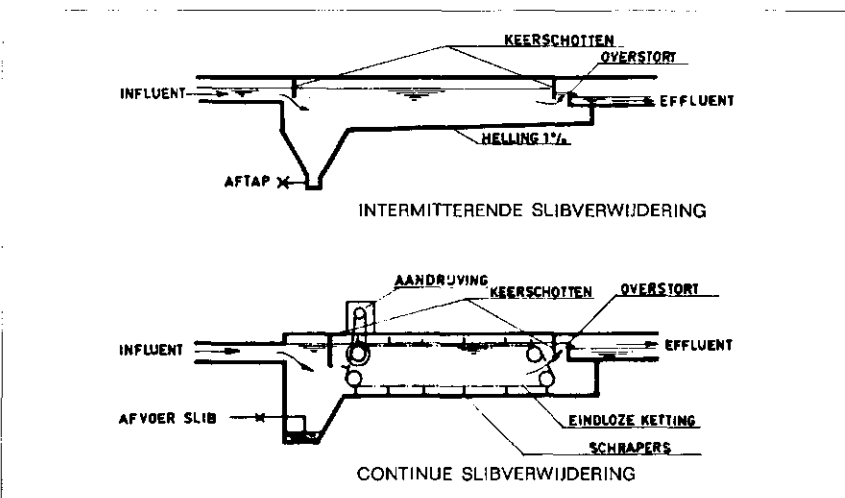
De uitlaat vindt in het algemeen plaats



Afb. 24 - Inlaatconstructies.



Afb. 25 - Afvoergoten.



Afb. 26 - Sedimentatiebekkens, Horizontale doorstroming.

via een overstort. Als deze over de volle breedte van het bekken wordt geplaatst, is een gelijkmatige afname over de breedte van het bassin verzekerd, hetgeen ten goede komt aan de stabiliteit van de stroming. Terwille hiervan moet ook de afvoer per meter overstortlengte niet te groot zijn. Een maximum van circa 10 m³/h wordt hiervoor opgegeven. Deze waarde is hoofdzakelijk afkomstig uit het bedrijf van bezinkbekkens in gebruik bij de behandeling van afvalwater. In de drinkwaterzuivering accepteert men bij bezinkbekkens na een chemische coagulatie en flocculatie meestal hogere afvoerwaarden. Achter deze bekken komen altijd nog snelfilters voor de verwijdering van de laatste vlokjes. Bij niet te krap gedimensioneerde bezinkbekkens en een goede vloeiende vorm van de overlaat worden met overlaatdebieten van 70 tot 100 m³/h per meter overlaatlengte de mee-

komende vlokjes niet zodanig kapot gemaakt, dat enigerlei moeilijkheid ontstaat met het verwijderen van deze laatste vlokjes in de achterliggende snelfilters. Op diverse manieren is de overstortlengte desgewenst te vergroten. Afb. 25 geeft hiervan enige voorbeelden.

4.3 Slibverwijdering

De slibverwijdering kan in het algemeen op twee manieren plaats vinden.

a. Intermitterend, door het bekken buiten dienst te stellen en het leeg te laten lopen. Hierna kan het slib met de hand worden verwijderd. Het bekken moet een hellende bodem hebben. Aangezien het meeste slib vlak bij de inlaat bezinkt wordt de helling daar soms steiler gemaakt dan in het tweede deel van het bekken (zie afb. 26). Deze slibzak wordt veelal toegepast bij bezinking na coagulatie, wan-

neer de belasting niet al te zwaar is. Tijdens het leeglopen van het bekken loopt een groot deel van het slib al mee.

De rest kan meestal eenvoudig worden weggespoten. Bij deze wijze van slibverwijdering moet wel gerekend worden op een behoorlijke ruimte voor de slibberging. De looptijd bedraagt enige weken tot enige maanden, in sommige gevallen bij zeer grote bekkens meer dan een jaar. Bij lange looptijden behoort men er wel zeker van te zijn, dat geen rotting van het slib kan gaan optreden. De spoelverliezen zijn gering en bedragen meestal tussen 0,5 % en 1,0 %.

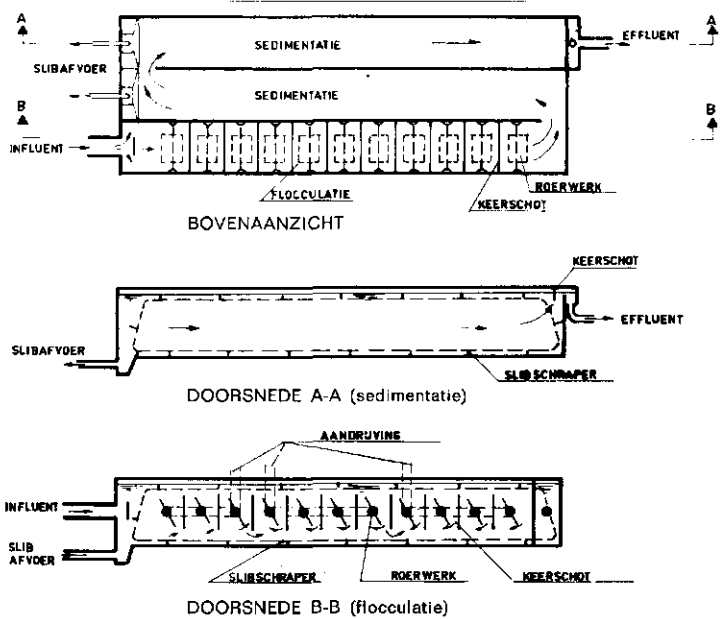
b. Continu met behulp van mechanische slibverwijderingsinstallaties. De meest voorkomende hiervan zijn de kettingschrapers, die het slib naar het einde van het bekken schuiven, vanwaar het wordt afgevoerd via een leiding. Daarnaast zijn er de enkele bodemschrapers, die zijn verbonden aan een zich dwars over het bekken bevindende brug, die langzaam in langsrichting van het bekken rijdt. Bij de teruggang is de schraper meestal boven water geheven. De bodemschraper heeft het voordeel, dat zich geen bewegende delen onder water bevinden. Dit is wel het geval met de kettingschrapers, die over het algemeen vrij veel onderhoud vragen, waarvoor het bekken weer buiten dienst gezet moet worden. Het spoelverlies ligt hier zelden beneden 3 %. Bij de afvalwaterzuivering komt men praktisch alleen mechanische slibverwijdering tegen.

4.4 Voorbeelden

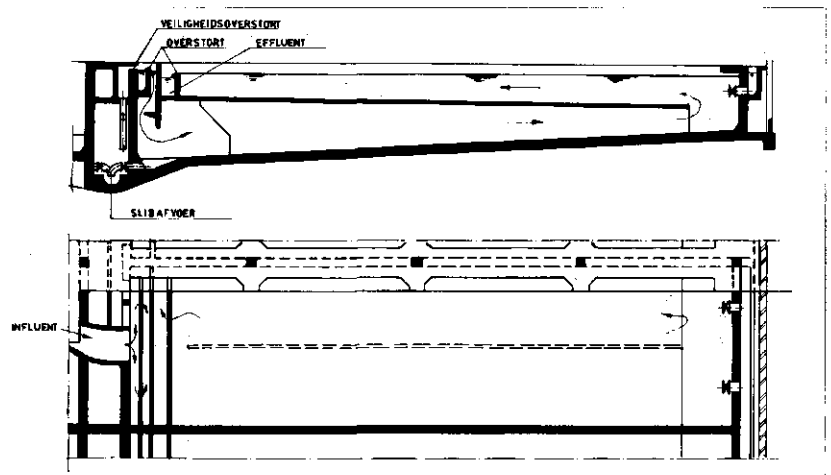
In afb. 26 zijn enkele voorbeelden gegeven van een eenvoudig sedimentatiebekken. In afb. 27 is het sedimentatiebekken direct verbonden aan het flocculatiebekken en door een onderbroken langsschot in twee delen verdeeld. In afb. 28 is een sedimentatiebekken getekend met een tussenbodem en omkerende stroomrichting, zoals uitgevoerd in de drinkwaterzuiveringsbedrijven van de stad Stockholm. Het werkt dus als een bekken van ongeveer dubbele lengte. In afb. 29 is het principe van een drielaags sedimentatiebekken gegeven, zoals die o.a. voorkomen bij de zuiveringsbedrijven Méry sur Oise en Choisy le Roi in de omgeving van Parijs.

4.5 Bezinkbekkens met ronde doorsnede

Naast de bekkens met rechthoekige plattegrond treft men ook veelvuldig

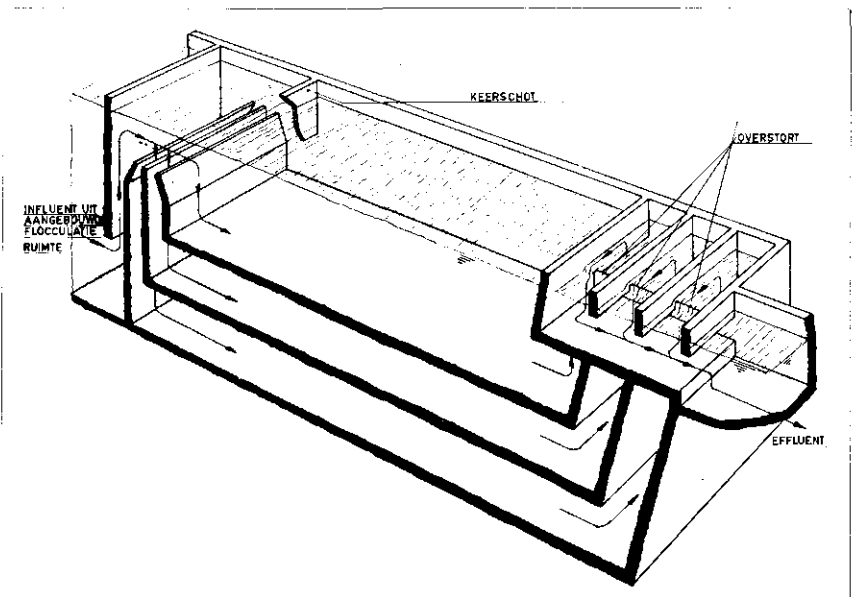


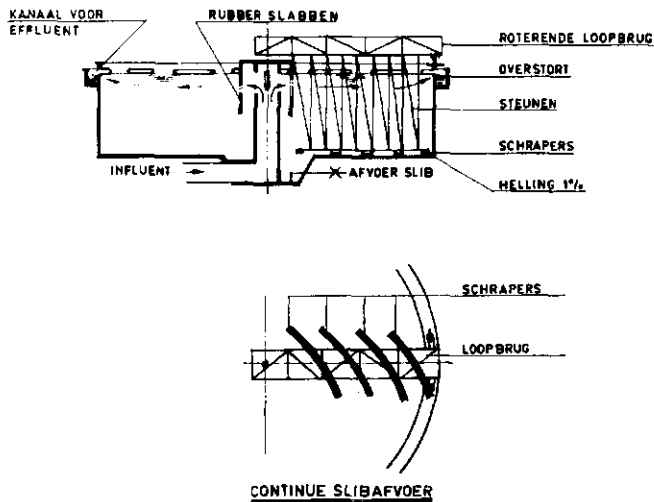
Afb. 27 - Flocculatie en sedimentatiebekken afvalwaterzuivering en ontharding. Horizontale doorstroming.



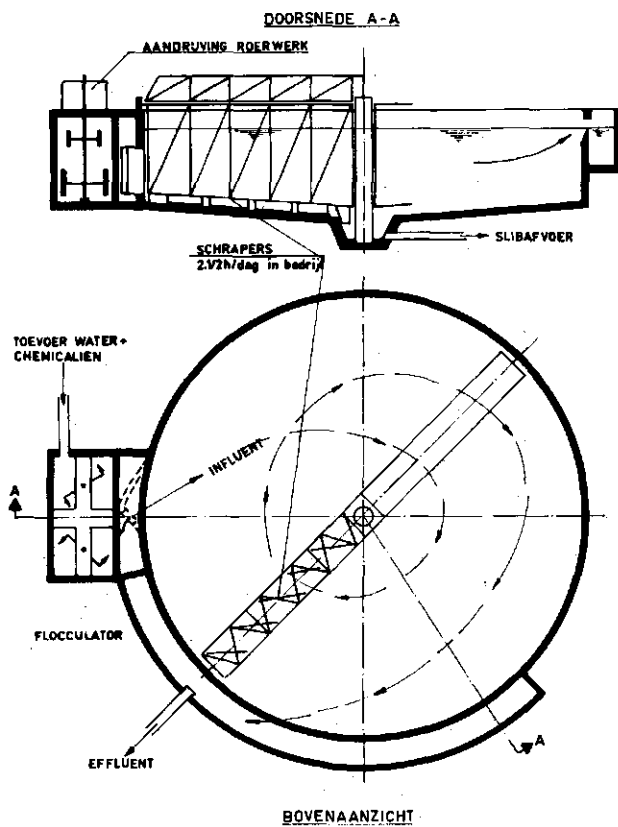
Afb. 28 - Sedimentatiebekken (Stockholm). Horizontale doorstroming.

Afb. 29 - Drielaags sedimentatiebekken.



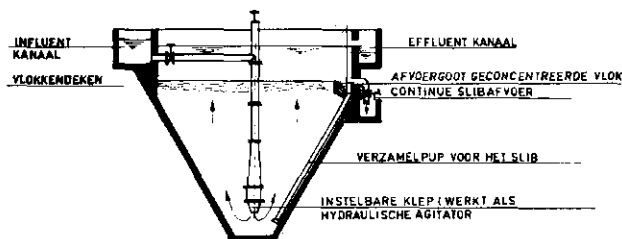


Afb. 30 - Flocculatie en sedimentatiebekkens Degrémont, Horizontale doorstroming.



Afb. 31 - Flocculatie en sedimentatiebassin Walton & Key, Clearifier. Spiraalvormige horizontale doorstroming.

Afb. 32 - Sedimentatie en flocculatietaank, The Candy Filter Comp. Verticale doorstroming.



ronde bekkens aan. De aanvoer vindt in het centrum plaats en de afvoer aan de buitenrand. Hydraulisch zijn deze tanks bepaald in het nadeel t.o.v. rechthoekige bekkens. Vooral in ronde bekkens met grote diameter is geen stabiele stroming te bewerkstelligen en in bekkens met kleine diameter is de ruimte, die door aan- en afvoerzone wordt ingenomen, relatief groot t.o.v. de bezinkingszone. Ook zijn de bouwkosten van kleine ronde tanks hoger dan van rechthoekige. Bij grote afmetingen (boven 40 m diameter) zijn de bouwkosten van ronde tanks echter lager dan van rechthoekige. Een duidelijk voordeel van ronde tanks is de grotere bedrijfszekerheid van het slibverwijderingsmechanisme. Het kan robuust worden opgezet en de rondgaande beweging, waarbij het slib naar het centrum wordt geschoven, is eenvoudig. Vooral in de afvalwaterzuivering is deze slibverwijdering een zeer belangrijk punt. Ronde tanks zijn bovendien gemakkelijk in grote eenheden te bouwen. Om deze redenen ontmoet men daarom waarschijnlijk juist bij de afvalwaterzuivering zoveel ronde tanks. In de afb. 30 en 31 zijn enige voorbeelden getekend.

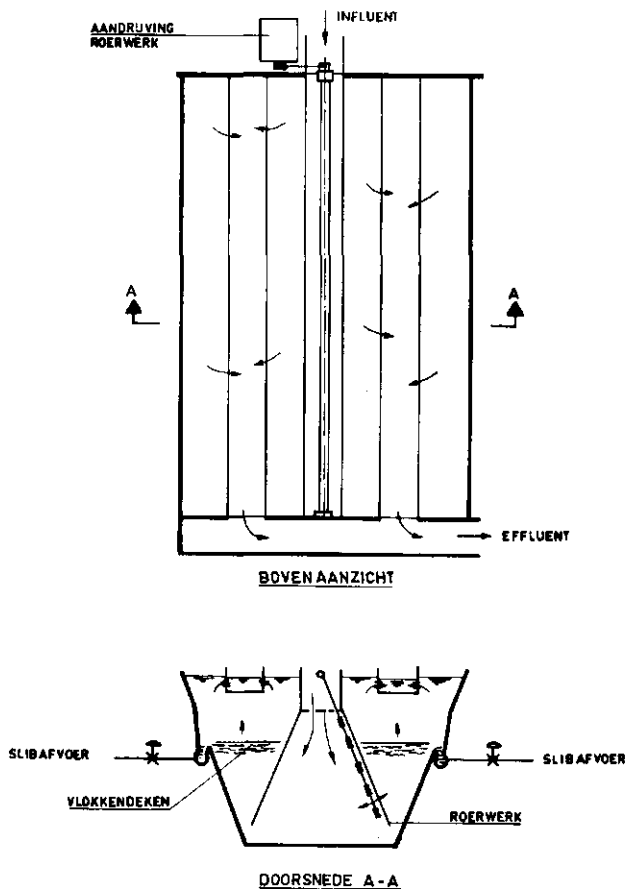
5. Bezinkbekkens met verticale doorstroming

Bij discrete bezinking geven bekkens met een verticale doorstroming duidelijk een lager rendement dan de bekkens met horizontale doorstroming. Immers, wanneer het debiet Q is en de oppervlakte is A , dan is de oppervlaktebelasting $\frac{Q}{A}$.

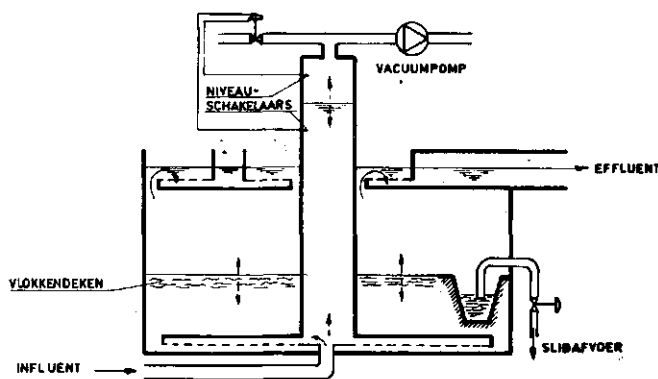
De opwaartse snelheid is echter ook gelijk aan $\frac{Q}{A}$ en alléén die deeltjes zullen bezinken, die een grotere bezinkingsnelheid hebben dan $\frac{Q}{A}$. Alle andere worden meegenomen. Het maximale rendement is gelijk aan de oppervlaktebelasting.

Bij horizontale doorstroming bezinkt ook nog een belangrijk deel van de deeltjes met een lagere bezinkingsnelheid dan de oppervlaktebelasting.

Voor flocculente bezinking ligt dit echter anders. De lichte vlokjes met een bezinkingsnelheid lager dan de opwaartse watersnelheid worden door het water meegevoerd en botsen op hun weg tegen zwaardere bezinkende vlokken aan. Zij verenigen zich daarmee en bezinken zo tesamen met toegevoerde bezinkingsnelheid. Inmiddels

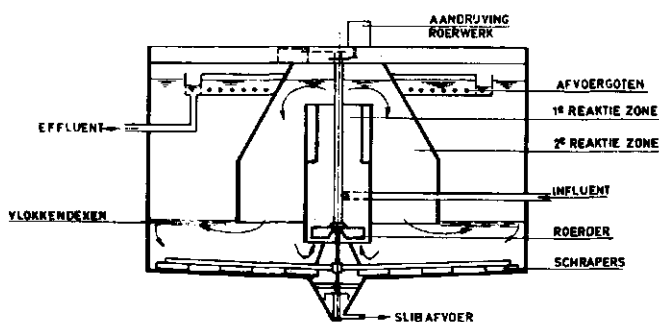


Afb. 33 - Flocculatie en sedimentatiebassin DWL Rotterdam, Verticale doorstroming.



Afb. 34 - Pulsator (Degrémont), Verticale doorstroming.

Afb. 35 - Sedimentatietank met vlokrecirculatie Bobby-Graver-reactivator William Bobby & Co. Ltd, Verticale doorstroming.



worden steeds nieuwe vlokken aangevoerd en na korte tijd ontstaat een toestand van gehinderde bezinking. De volumeconcentratie wordt op de duur zó hoog, dat een gehinderde bezinking ontstaat met een stromingstoestand, die voldoet aan de hydrodynamische principes van een gefluidiseerd bed van vlokken.

De karakteristieke eigenschappen van een gefluidiseerd bed in een vloeistof zijn:

- 1e een duidelijke bovenbegrenzing;
- 2e menging in het bed;
- 3e toename van de ruimte tussen de vlokken bij toenemende snelheid.

Tussen de open ruimte ϵ in een gefluidiseerd bed ($\epsilon = 1 - p$, als p de volumeconcentratie van de vlokken is) en de opwaartse snelheid, bestaat het volgende verband:

$$V = \frac{\alpha}{S}$$

V = opwaartse snelheid

S = bezinkingsnelheid van de deeltjes

α = coëfficiënt

α is afhankelijk van het getal van Reynolds en van de vlokvorm.

$\alpha \approx 2,5$ voor turbulente stroming en $\alpha > 5$ voor laminaire stroming.

Metingen op Al- en Fe-vlokken leverde $\alpha = 4$.

De bovenbegrenzing van het gefluidiseerde bed is in de meeste gevallen duidelijk waarneembaar.

Het gefluidiseerde bed als geheel wordt vlokkendekken genoemd. De vorming en de stabiliteit van de vlokkendekken wordt bevorderd door de bekkens naar boven toe wijder te maken, waardoor de opwaartse snelheid regelmatig afneemt. Deze verwijding is echter voor het verschijnsel niet principieel. Een nadeel van de verwijding is het ontstaan van een onstabiel stromingsbeeld.

Door Bond zijn metingen verricht t.a.v. de toelaatbare opwaartse snelheid. Voor een vlokkendekken van aluminiumvlok kwam hij tot de conclusie, dat een volkomen veilige opwaartse snelheid V_d t.p.v. de vlokkendekken $\frac{1}{2} S$ is, wanneer S de bezinkingsnelheid van de afzonderlijke deeltjes is. Voor S vond hij een snelheid van $5 - 6,5$ m/h.

Bij $V_d = 0,55 S$ komen er plaatselijk erupties in de vlokkendekken en gaan er kleine deeltjes mee omhoog en bij $V_d = 0,65 S$ is er geen duidelijke begrenzing van de vlokkendekken meer. In Rotterdam zijn metingen aan de ijzervlokken gedaan die hogere waarden aangeven.

Vlok- diameter in mm	Bezinksnelheden bij verschillende temp.		
	20° C	10° C	5° C
1,5	6,9 m/h	5,3 m/h	4,5 m/h
2,0	8,1 m/h	6,6 m/h	5,6 m/h

De dichtheid van de vlok $\rho_d = 1,003$. De maximale opwaartse snelheid t.p.v. de vlokkendecken bedraagt bij het in Rotterdam gebruikte type klaarbekken 4,5 à 5,0 m/h.

In de winter moet een coagulatie-hulpmiddel ter vergroting van de vlok worden toegevoegd. Bij deze opwaartse snelheid is de vlokkendecken niet meer volledig in rust. Erupties treden regelmatig op en continu worden enige vlokken mee omhoog gevoerd. Deze worden echter gemakkelijk door de achterliggende snelfilters opgevangen.

De waterhoogte boven de vlokkendecken moet zodanig zijn, dat het water zoveel mogelijk met verticale stroomlijnen uit de vlokkendecken komt. Wanneer de onderlinge afstand tussen de aan de oppervlakte gelegen afvoergoten 1 bedraagt en de waterhoogte boven de vlokkendecken h , dan geldt $h > \frac{1}{2} l$.

De opwaartse snelheden mogen ook niet te laag zijn, anders gaat plaatselijk bezinking optreden met kans op verstoppingen.

Samenvattend zijn voordelen van een sedimentatiebekken met vlokkendecken:

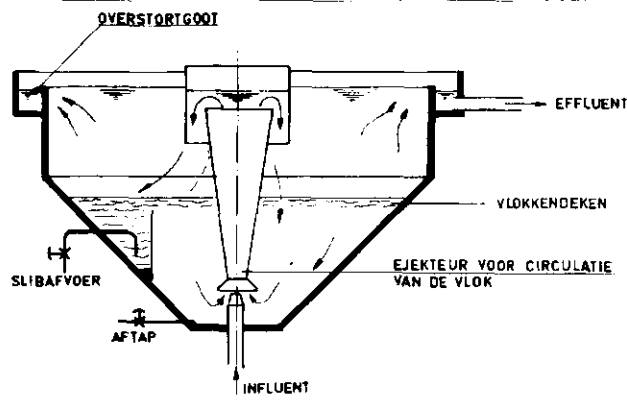
- 1e Het grote sedimentatierendement (oppervlaktebelasting tussen 2,5 m/h en 4,5 m/h;
- 2e Betrekkelijke korte verblijftijd ($\frac{1}{2}$ uur tot $1\frac{1}{2}$ uur).

Als nadelen gelden t.o.v. horizontale doorstromingsbekkens:

1. Hydraulisch labieler;
2. Gevoeliger voor zich wijzigende omstandigheden, waardoor een accuratere chemicaliëndosering en een nauwkeuriger controle nodig is.

De slibverwijdering vindt praktisch steeds plaats door bezinking aan de zijkanalen of in het centrum van het bekken en door discontinue afvoer.

Het sedimentatiebekken wordt meestal in één eenheid gecombineerd met de flocculatieruimte. Dit biedt tevens de mogelijkheid tot recirculatie van een gedeelte der vlok, wat een snelle ontmoetingskans van kleine nieuwe vlokken met grote oude vlokken vergroot. Er komen zowel ronde als rechthoekige bekken voor.



Afb. 36 - Sedimentatietank met vlokrecirculatie (Degrémont). Verticale doorstroming.

In de afb. 32 t/m 36 zijn enige uitvoeringstypen als voorbeeld gegeven.

6. Nabeschuiving

In de techniek van de drinkwaterzuivering komen bezinkbekkens hoofdzakelijk voor bij de behandeling van oppervlaktewater na een chemische coagulatie en flocculatie. In het verleden werden hoofdzakelijk éénlaagse bekken met horizontale doorstroming gebruikt. Deze zijn bij goede dimensionering betrouwbaar gebleken en zeer eenvoudig in exploitatie. Daar waar de slibbelasting niet te hoog is (dus in veruit de meeste gevallen) behoeft geen continu werkende mechanische of hydraulische slibverwijdering te worden aangebracht. Een nadeel van deze bekken is echter het grote oppervlak, dat ze innemen. Sedimentatiebekkens met verticale doorstroming en een vlokkendecken zijn in dit opzicht veel economischer, doch de exploitatie is moeilijker. On-

danks dat, is de toepassing echter juist door hun grotere economie terecht in belangrijke mate toegenomen.

Nu zijn een eenvoudige exploitatie en een grote economie in de bouw gecombineerd in het systeem van meerlaags horizontale doorstromings-sedimentatiebekkens. Echter op voorwaarde, dat geen mechanische slibverwijdering vereist is. Zoals boven vermeld, wordt aan deze voorwaarde bij de drinkwaterzuivering praktisch steeds voldaan, met name onder de Nederlandse omstandigheden.

Ik meen dan ook, dat, wanneer bij de drinkwaterzuivering een bezinking na chemische coagulatie en flocculatie in het zuiveringssysteem wordt opgenomen, in de eerste plaats een oplossing met een systeem van verticaal doorstroomde sedimentatiebekkens met vlokkendecken of een oplossing met een systeem van meerlaags horizontale doorstromings-bezinking als gelijkwaardige mogelijkheden moeten worden onderzocht.

Literatuur

1. Camp, T. R., *Sedimentation and the design of settling tanks*. ASCE Transactions. April 1945, blz. 895-959.
2. AWWA, *Capacity and loadings of suspended Solids Contact Units*. Journal AWWA. April 1951, blz. 263-292.
3. Camp, T. R., *Studies of Sedimentation Basin Design*. Sewage and Industrial Wastes. Jan. 1953, blz. 1-15.
4. Ingersoll, A. C., McKee, J. E., Brooks, N. H., *Fundamental Concepts of rectangular settling tanks*. ASCE Sanitary Engineering Division, Jan. 1955.
5. Fischerstrom, Claes N. H., *Sedimentation in rectangular basins*. ASCE Sanitary Engineering Division. Mei 1955.
6. AWWA, *Mixing and Sedimentation Basins*. Journal AWWA. Augustus 1955, blz. 768-791.
7. Fair, G. M. and Geijer, J. C., *Elements of Water Supply and wastewater disposal*. John Wiley & Sons, inc. New York 1958.
8. Huisman, L., *International Course in Sanitary Engineering*. Colledictaat.
9. Bond, A. W., *Behaviour of suspensions*. Journal of the Institution of Water Engineers. 1961, blz. 494-517.
10. Miller, D. G., *Sedimentation*. Water Research Association, Technical Paper, nr. 23. Mei 1962.
11. Bond, A. W., *Water-solids separation in an upflow: with particular reference to the use of a slurry pool for solids contact in water treatment*. Journal of the Institution of Water Engineers. Okt. 1966, blz. 477-490.
12. Stenhouse, J. I. T., *Settling of Particles in Dilute Suspensions*. Filtration & Separation. Sept./Okt. 1967, blz. 477-483.
13. Tesarik, Igor, *Flow in sludge-blanket clarifiers*. ASCE Journal of the Sanitary Engineering Division. Dec. 1967, blz. 105-121.