

1981-10

stora

Hydraulische en technologische aspecten

van

het nabezinkproces

1. Literatuur

Bibliotheek STOWA

stowa

alleen ter inzage, niet voor uitlening
nagebruik RETOUR s.v.p.

serie: nummer

81-10



0000 0945 3917

321 440 (81-10)
81-10

15 JUL 2004

stora

postbus 414, 2280 AK Rijswijk Z.H. ☎ 070 - 980.287 stichting toegepast onderzoek reiniging afvalwater

BIBLIOTHEEK DE HAAFF

Droevendaalsesteeg 3a
6708 PB Wageningen

Hydraulische en technologische aspecten

van

het nabezinkproces

1. Literatuur

STOWA
Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer
Postbus 8090
3503 RB Utrecht
tel. 030-321199
fax 030-321766

Publikaties en het publikatieoverzicht
kunt u uitsluitend bestellen bij:
Hageman Verpakkers BV
Postbus 281
2700 AC Zoetermeer
tel. 079-611188
fax 079-613927
o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.

1726247/172.2.11

Inhoud

Ten geleide

1	SAMENVATTING	I
2	INLEIDING	2 - 3
3	HET DOEL VAN DE NABEZINKING IN HET ACTIEF-SLIBPROCES	4 - 8
3.1	Inleiding	4
3.2	Scheiden van slib en water	4 - 5
3.3	Indikken	6 - 7
3.4	Bufferen	7 - 8
4	HET BEZINKPROCES	9 - 17
4.1	Onderscheid in fasen	9
4.1.1	<i>flocculatie fase</i>	9
4.1.2	<i>gehinderde bezinking (lineaire fase)</i>	9
4.1.3	<i>overgangsfase</i>	9
4.1.4	<i>samendrukkingsfase of compressiefase</i>	9
4.2	Kengrootheden voor het bezinken van actiefslib	10
4.3	Bezwaren van de onverdunde slibindex	10 - 13
4.3.1	<i>drogestofconcentratie</i>	10 - 13
4.3.2	<i>stromingseigenschappen van het slib</i>	13
4.3.3	<i>lineaire bezinksnelheid van de slibspiegel</i>	13
4.3.4	<i>diameter van de cylinder</i>	13 - 14
4.3.5	<i>laagdikte van het slib</i>	14
4.3.6	<i>temperatuur</i>	14 - 15
4.4	Gecorrigeerde slibvolume-indices volgens Stobbe en White	15 - 17
5	HYDRAULISCHE ASPECTEN VAN HET NABEZINKPROCES	18 - 31
5.1	Inleiding	18
5.2	Coagulatie en flocculatie	18
5.3	Dichtheidsstromingen	18 - 21
5.4	Invloed van de constructie op het nabezinkproces	21 - 27
5.4.1	<i>inleiding</i>	21
5.4.2	<i>invoerconstructies</i>	21 - 22
5.4.3	<i>effluentgoot</i>	23 - 24
5.4.4	<i>bodemhelling en ruiming</i>	24 - 27
5.5	Snelheidsmetingen	28
5.6	Verblijftijden van slib en water in nabezinktanks	28 - 31
6	WISKUNDIGE PROCESMODELLEN	32 - 49
6.1	Camp en Hazen	32
6.2	Zone settling (solid flux)	32 - 38
6.3	Samendrukkingstheorieën	38

6.4	Theorie van Merkel	38 - 41
6.5	Kalbskopf en de ATV-richtlijnen	41 - 45
6.6	Billmeier	45 - 47
6.7	Commentaar	48 - 49
6.7.1	<i>zone settling</i>	48
6.7.2	<i>samendrukkingstheorieën</i>	48
6.7.3	<i>Duitse onderzoeken</i>	48 - 49
7	DIMENSIONEREN VAN NABEZINKTANKS VOLGENS RICHTLIJNEN VAN EPA, WRC EN ATV	50 - 56
7.1	EPA-richtlijnen (Environmental Protection Agency)	50
7.2	WRC-richtlijnen (Water Research Centre)	50 - 52
7.3	ATV-richtlijnen (Abwassertechnische Verein)	52 - 54
7.4	Vergelijking van de WRC en ATV-richtlijnen	54 - 56
8	CONCLUSIES	57
9	LIJST VAN GEBRUIKTE SYMBOLEN	58 - 60
10	LITERATUUR	61 - 64

Ten geleide

De kwaliteit van het effluent van rioolwaterzuiveringsinrichtingen hangt in hoge mate af van het procesgebeuren in de nabezinktanks.

De theorieën en modellen die dit proces voor actief-slibinstallaties beschrijven voldoen niet in de praktijk.

Dit geldt ook voor de twee meest gebruikte - onderling niet vergelijkbare - ontwerprichtlijnen van het Engelse Water Research Centre en de Duitse Abwassertechnische Verein.

Dit STORA-onderzoek werd daarom gericht op het bepalen van de maximaal toelaatbare belasting en optimalisering van de werking van nabezinktanks; zowel ronde als rechthoekige tanks werden in het onderzoek betrokken.

Het resultaat, een aanzienlijke verdieping van kennis en inzicht, levert betere en meer genuanceerde criteria - ook in economische zin - voor het ontwerpen van nabezinktanks.

Het onderzoek wordt gerapporteerd onder de titel "Hydraulische en technologische aspecten van het nabezinkproces", in de volgende delen:

1. Literatuur.
2. Ronde nabezinktanks. Ontwerpgegevens en bedrijfservaring
 idem Praktijkonderzoek
 idem Ruimer- en inloopconstructies
3. Rechthoekige nabezinktanks. Inventarisatie en praktijkonderzoek.

Dit eerste deel beschrijft en evalueert de literatuur.

Het onderzoek werd door het algemeen bestuur van de STORA, op voorstel van de Onderzoekadviescommissie*, opgedragen aan DHV Raadgevend Ingenieursbureau B.V. en namens de STORA begeleid door ir. E.L.C. Koster (voorzitter), ir. A.H. Dirkzwager, ir. J. Ebbenhorst, ir. L.J.T. de Vreede en ir. T.W.M. Wouda.

Rijswijk, december 1981.

De directeur van de STORA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

* De Onderzoekadviescommissie, die tot dit project adviseerde, bestond uit:
prof.ir. A.C.J. Koot (voorzitter), drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff (secretaris) en
dr.ir. H.J. Eggink, ir. R. Karper, ir. C. Kuggeleijn, ir. M. van der Lugt, ir. Th.G.
Martijn, ir. H.A. Meijer, jhr.dr. J.J. Quarles van Ufford, ir. H.M.J. Scheltinga, dr.ir.
D.W. Scholte Ubink, ir. J. van Selm, ir. F.B. Veldkamp, ir. A.P. Vernimmen M.Sc. (leden).

SAMENVATTING

Het proces in nabezinktanks van actief-slibinstallaties is zeer complex. Pogingen tot het beschrijven ervan hebben geleid tot diverse theorieën. De meeste zijn slechts in laboratoriumopstellingen getoetst. Het is gevaarlijk deze theorieën zonder meer op praktijkschaal toe te passen.

Geen van deze theorieën kan worden bestempeld als in de praktijk ten volle bewezen. Bovendien kan een aantal verschijnselen die in nabezinktanks optreden, niet voldoende worden verklaard met de bestaande theorieën en wiskundige modellen.

Twee uitgewerkte modellen zijn voorzien van ontwerprichtlijnen die in de praktijk blijken op te gaan. Een van beide modellen is door later onderzoek nog verder uitgewerkt. Aan deze richtlijnen ligt uitgebreid praktijkonderzoek ten grondslag.

De eerste theorie wordt de "zone settling" theorie genoemd. Deze is door White (WRC)* praktisch toepasbaar gemaakt. De door hem gepropageerde geroerde slibvolume-index is getest op circa 30 zuiveringsinrichtingen. De capaciteit van nabezinktanks (uitgedrukt in drogestofbelasting) is tot op circa 20% nauwkeurig te voorspellen.

Onderzoekingen van Johnstone, Rachwal en Hanbury bevestigen dit. Parameters zijn oppervlakte, slibretourdebiet, aanvoerdebiet en slibindex. Verhoging van de slibretourcapaciteit geeft een vergroting van de capaciteit van de tank.

Er wordt geen rekening met de diepte van de tank gehouden. Criterium voor de effluentkwaliteit is "geen slibuitspoeling".

Het tweede model is in Duitsland ontwikkeld. Ook bij de ontwikkeling van dit model is uitgebreid praktijkonderzoek verricht. Het resulterende wiskundig model wordt gehanteerd door de ATV*. Dit model maakt gebruik van een verdunde slibindex. Verder wordt rekening gehouden met oppervlakte, diepte en aanvoerdebiet. De slibretourcapaciteit wordt wel in het ATV-model gehanteerd, maar heeft alleen invloed op de diepte door de berekening van de inhoud van de bufferzone. Verhoging van de slibretourcapaciteit veroorzaakt een verslechtering van de effluentkwaliteit. Criterium voor de capaciteit van een nabezinktank is het drogestofgehalte van het effluent (bijvoorbeeld 30 mg zwevende stof/l). Billmeier gebruikt een verder uitgewerkt model, waarin de diepte van de tank en de slibretourcapaciteit naast de slibvolumebelasting worden gehanteerd. Zo kan volgens Billmeier een diepere nabezinktank een grotere slibvolumebelasting verwerken. Onderzoek van Sickert aan zeer diepe tanks bevestigt dit.

Vergelijking van de richtlijnen van WRC en ATV kan alleen plaatsvinden, zodra meer van de verhouding tussen de geroerde en de verdunde slibvolume-index bekend is. Wanneer vooralsnog van gelijke indexwaarden wordt uitgegaan, blijken beide richtlijnen elkaar te benaderen voor een slibretourcapaciteit (als Q_r/A) van circa $0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{h}$. De onderzoeken en de meetgegevens zijn zodanig gepubliceerd dat een verdergaande vergelijking zeer moeilijk is.

Slechts Johnstone, Rachwal en Hanbury hebben gegevens verstrekt betreffende de stijgsnelheid van de slibspiegel na het instellen van een nieuw belastinggeval.

Over de dynamica van het bezinkproces is verder vrijwel niets gepubliceerd.

* WRC: Water Research Centre, Medmenham, Engeland

ATV: Abwassertechnische Verein, Duitsland

In Nederland gebouwde nabezinktanks zijn tot nu toe aan de hand van enkele vuistregels ontworpen. Niet alle nabezinktanks functioneren naar behoren. Bij regen stromen bij diverse inrichtingen grote hoeveelheden slib over de rand.

Het doel van het onderzoek is het verkrijgen van inzicht in de processen die zich in nabezinktanks voordoen. Dit zou kunnen leiden tot aanbevelingen voor het aanpassen van de bestaande ontwerprichtlijnen. Daarnaast zijn op beperkte schaal de in Nederland gebouwde nabezinktanks (ontwerpgegevens en bedrijfservaringen) geïnventariseerd en zijn praktijkproeven uitgevoerd. De resultaten daarvan worden in aparte STORA-rapporten vermeld.

De volgende beperkingen zijn bij dit literatuuronderzoek in acht genomen:

- het nabezinkproces wordt slechts bij actief-slibinstallaties beschouwd. Het bezinken van actiefslib wordt gezien als een wezenlijk ander proces dan het bezinken van primair slib uit ruw afvalwater of van humus uit de afloop van oxydatiebedden. De drogestofconcentraties en de bezinkbaarheid van de slibvlokken zijn sterk afwijkend, waardoor het proces anders verloopt;
- de bezinkeigenschappen van het slib worden als uitgangspunt genomen. Factoren die deze bezinkeigenschappen (kunnen) beïnvloeden, zoals de samenstelling van het afvalwater, slibleeftijd, etc., zijn dus niet nader onderzocht. Voor de problematiek van het licht slib wordt o.a. verwezen naar het onderzoek dat door TNO wordt verricht in opdracht van de STORA;
- er zijn geen artikelen verwerkt, die ingaan op bio-chemische eigenschappen van het slib, zoals het verband tussen bepaalde enzymen in het slib en de bezinkeigenschappen. Beschrijving van de bezinkbaarheid van slib houdt voor dit onderzoek op bij de beschrijving van bezinkproeven;
- in de literatuur zijn vele wiskundige modellen gevonden. In het rapport zijn alleen die modellen behandeld die gebaseerd zijn op of nauw verbonden zijn met praktijkproeven aan nabezinktanks.

Veel modellen zijn hooguit gekoppeld aan metingen aan laboratoriumopstellingen. Hierin zijn vrijwel alleen specifieke deelprocessen onderzocht (discrete bezinking, bezinking van metaaloxiden, gestandaardiseerde korreltjes, stromingsonderzoek met schoon water, dichtheidsstromingen van vloeistoffen met verschillende drogestofconcentraties, etc.).

Deze onderzoeken zijn vrijwel alle buiten beschouwing gebleven met als argument daarvoor de opmerking van Heisenberg dat veel natuurwetenschappelijk onderzoek in laboratoria slechts leidt tot de beschrijving van de eigenschappen van de gebruikte apparatuur en niet tot de gewenste beschrijving van het eigenlijke object. Dit bezwaar geldt zeker voor een groot deel van de gevonden onderzoeken die om welke reden dan ook alleen in het laboratorium zijn verricht en niet aan het oorspronkelijke object: de nabezinktank.

De geraadpleegde literatuurbronnen zijn de bibliografie van het Water Research Centre, een deel van de Chemical Abstracts en het Journal of

the Water Pollution Control Federation en de Dokumentation Wasser vanaf 1974, tot en met juni 1978. Deze zijn onderzocht op de trefwoorden: "clarifying, thickening, sedimentation, settling, activated sludge systems en sludge handling". De Chemical Abstracts hebben vrijwel geen relevante literatuur opgeleverd.

Als begindatum is 1974 gekozen, omdat de belangrijkste literatuur van voor die datum is verwerkt in het overzichtsartikel van Fitch, dat in 1975 is verschenen.

Naast de raadpleging van literatuur is ook informatie verzameld door het bezoeken van enkele wetenschapsmensen die veel onderzoek hebben besteed aan nabezinktanks. Achtereenvolgens zijn bezoeken afgelegd aan dr. M.J.D. White van het Water Research Centre, dr. G.C. Cox en dr. D.W.M. Johnstone van de Thames Water Authority in Groot Brittanië, aan prof. Dr.Ing. W. Bischofsberger en Dipl. Ing. H. Resch van de Lehrstuhl und Prüfamnt Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen im Institut für Bauingenieurwesen V - Technische Universität München en Dr. E. Billmeier van de Hochschule der Bundeswehr München, Institut für Siedlungswasserwesen, in West-Duitsland.

3.1 Inleiding

Het principe van het actief-slibproces is het biologisch zuiveren van afvalwater door in het water zwevende micro-organismen. Het te zuiveren influent wordt in de beluchtingsruimte met de biomassa (het actief-slib) gemengd en belucht. Het mengsel wordt na een zekere verblijftijd in de aëratietank naar de nabezinktank gevoerd. Hier worden slib en water van elkaar gescheiden. Het actiefslib wordt teruggevoerd naar de beluchtingsruimte. Het effluent wordt, na eventuele verdere behandeling, afgevoerd. Eventueel surplus-actiefslib wordt veelal uit de retourleiding aan het systeem onttrokken.

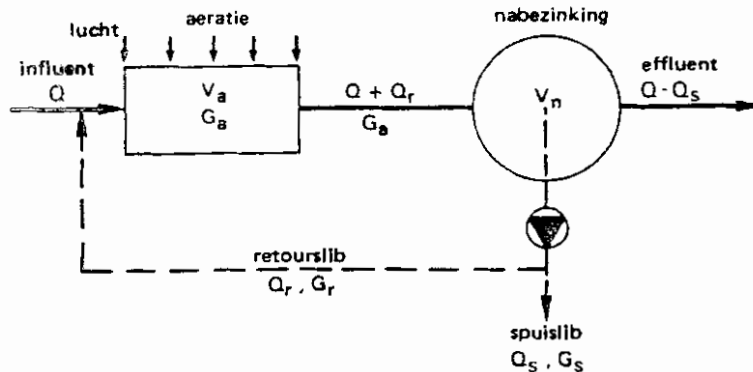
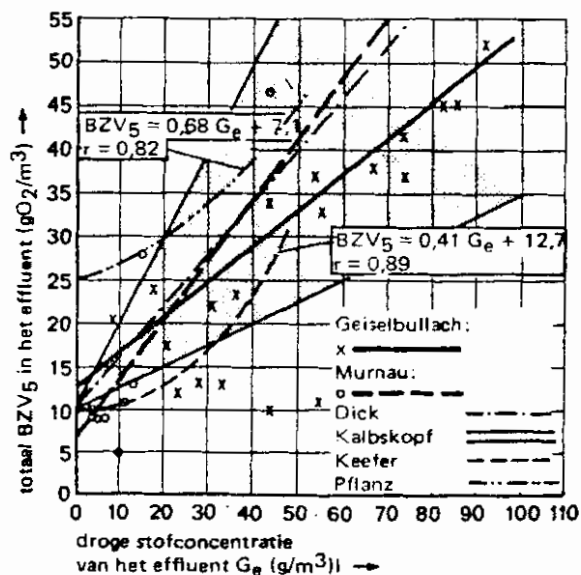


Fig. 1. Schematische weergave van het actief-slibproces

3.2 Scheiden van slib en water

Het scheiden van het gezuiverde afvalwater en het actiefslib is de belangrijkste functie van de nabezinktank. De nadruk bij dit scheiden ligt in het algemeen op het verkrijgen van helder effluent en dus een minimale hoeveelheid droge stof in het effluent.

Veel voorkomende effluenteisen zijn een bepaald maximaal zwevend stofgehalte of bezinksel, aangevuld met een zeker maximaal BZV-gehalte. Deze getallen zijn niet goed onderling vergelijkbaar. Enkele onderzoekers^{6,34} hebben getracht verband te leggen tussen de verschillende parameters (zie figuur 2, 3 en 4).

Fig. 2. Droge stof en BZV-concentraties in het effluent van de nabezinktanks⁶

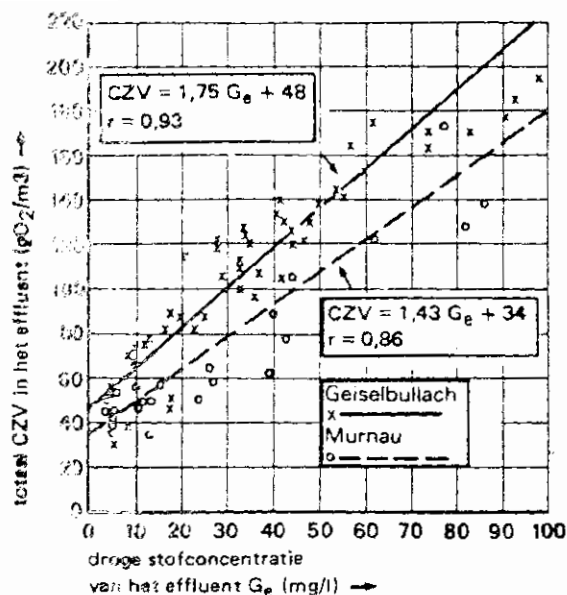


Fig. 3. Droge stof en CZV-concentraties in het effluent van de nabezinktank⁶

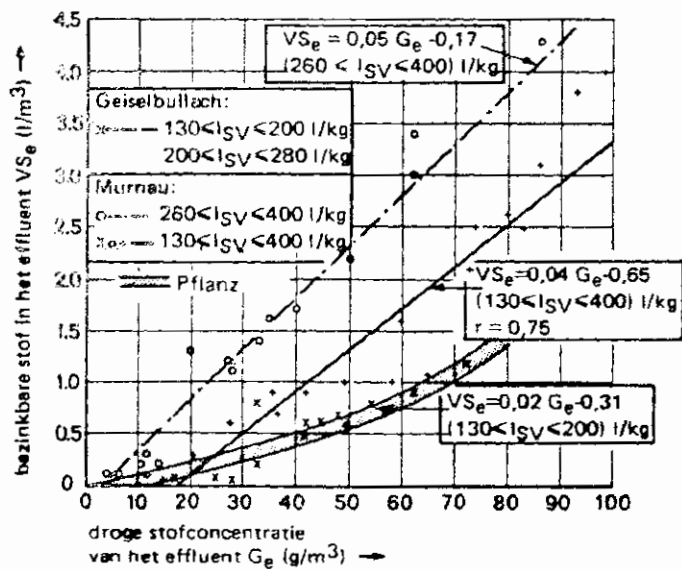


Fig. 4. Droge stof en bezinkbare stofconcentraties in het effluent van de nabezinktank⁶

3.3 Indikken

De tweede functie die de nabezinktank moet vervullen is het indikken van het actiefslib. Om een bepaald slibgehalte in de aëratietank te kunnen handhaven, is het nodig dat het slib in de nabezinktank voldoende kan indikken en slibretourcapaciteit toereikend is. Dit is te verduidelijken door het opstellen van een slibbalans.

Naar de beluchtingsruimte wordt gebracht:

$$Q \cdot G_i + Q_r \cdot G_r \quad (\text{kg/h})$$

In de beluchtingsruimte vindt slibaangroei plaats:

$$Q \cdot \Delta G \quad (\text{kg/h})$$

Naar de nabezinktank stroomt:

$$(Q + Q_r) \cdot G_a \quad (\text{kg/h})$$

Met het effluent stroomt weg:

$$(Q - Q_s) \cdot G_e \quad (\text{kg/h})$$

Teruggevoerd naar de aëratie:

$$Q_r \cdot G_r \quad (\text{kg/h})$$

Het spuislib bevat:

$$Q_s \cdot G_r \quad (\text{kg/h})$$

Wanneer het systeem zo bedreven wordt dat de totale slibhoeveelheid constant blijft, geldt:

$$Q \cdot (G_i + \Delta G) = Q_s \cdot G_r + (Q - Q_s) G_e \quad (\text{kg/h}) \quad (1)$$

Bij benadering geldt dat de surplusslibproductie in het algemeen klein is ten opzichte van het retourslib.

Dit geldt eveneens voor het slib in het effluent.

De balans over de nabezinktank wordt dan:

$$(Q + Q_r) \cdot G_a = Q_r \cdot G_r \quad (\text{kg/h}) \quad (2)$$

Wanneer ingevoerd wordt $\frac{Q_r}{Q} = R$, dan wordt (2):

$$\left(\frac{1 + R}{R}\right) \cdot G_a = G_r \quad (\text{kg/m}^3) \quad (3)$$

of

$$R = \frac{G_r}{G_r - G_a} \quad (./.) \quad (4)$$

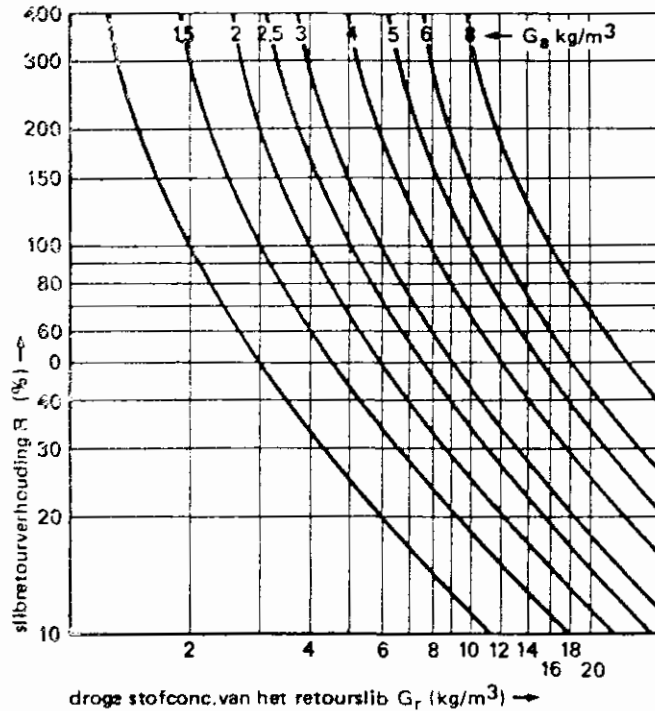


Fig. 5. Verband tussen de drogestofconcentraties in aanvoer van de nabezinktank en retourslib en de retourverhouding²⁷

Beperking van de slibretourverhouding wordt nagestreefd. Dit levert een kostenbesparing op. Tevens kan een hoge verhouding een slechtere effluentkwaliteit door turbulentie veroorzaken (zie figuur 6).

3.4

Bufferen

Het bufferen van actiefslib is de derde functie van de nabezinktank. Bij veranderende aanvoerdebieten zal de hoeveelheid droge stof, die naar de nabezinktank wordt afgevoerd, variëren. De hoeveelheid droge stof die teruggevoerd wordt naar de aëratietank, zal niet steeds gelijk zijn aan de aangevoerde hoeveelheid. In de nabezinking moet tijdelijk het verschil aan slib gebufferd kunnen worden.

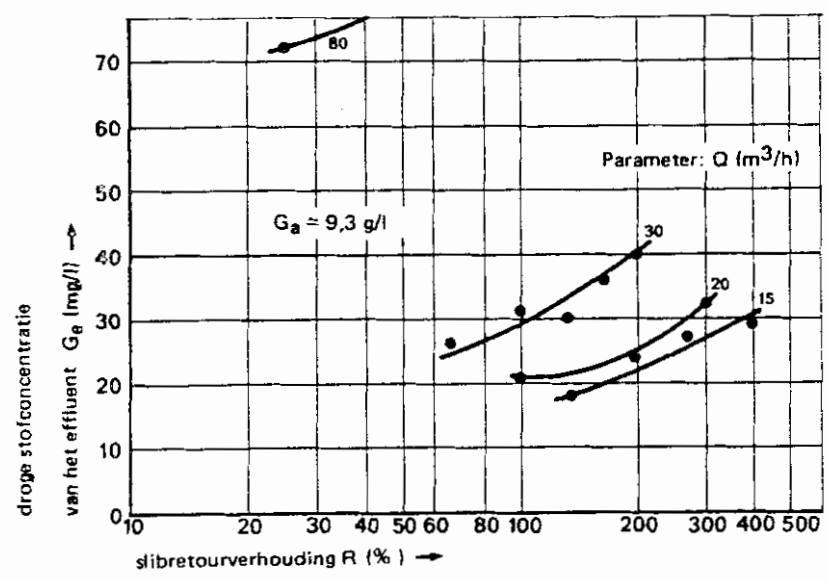
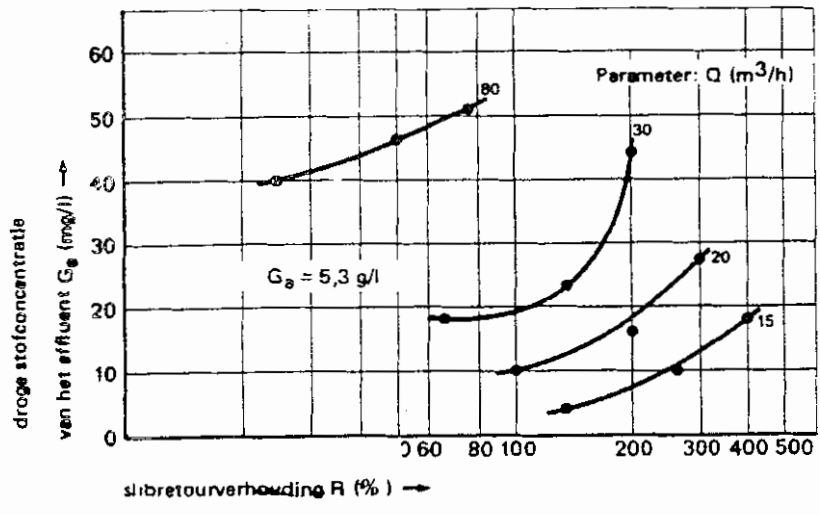


Fig. 6. Slibverhouding en drogestofconcentratie in het effluent³⁴

4 HET BEZINKPROCES

4.1 Onderscheid in fasen

Het verloop van het bezinkproces wordt gewoonlijk beschreven aan de hand van een bezinkproef in een maatcilinder. Het glas wordt gevuld met actiefslib en vervolgens goed gemengd. Het slib wordt daarna ter beschikking gezet. De vorming van een slibspiegel en de snelheid waarmee deze daalt, worden bestudeerd.

Er zijn duidelijk verschillende fasen te onderscheiden.²⁹

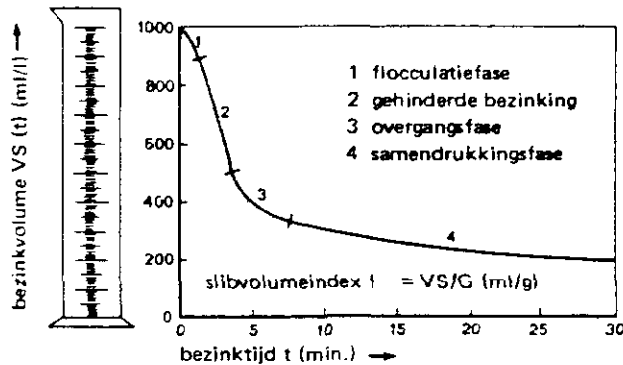


Fig. 7. De bezinking in een 1-l maatcilinder

4.1.1 *flocculatie fase*

Na de grote turbulentie van het vullen en mengen vormen zich grote vlokken. Hiermee begint het bezinkproces. Er ontstaat langzaam een duidelijke grens tussen het bovenstaande heldere water en het slib. Deze grens heet de slibspiegel.

4.1.2 *gehinderde bezinking (lineaire fase)*

De slibspiegel daalt met eenparige snelheid. De slibconcentratie vlak onder de slibspiegel blijft constant zolang het slib in deze fase verkeert. Er is evenwicht tussen de daling van de vlokken en de opwaartse stroming van het verdrongen water. De dikte van de sliblaag is niet van invloed op de gehinderde bezinking.

4.1.3 *overgangsfase*

Op de bodem van de cilinder vormt zich in de loop van de bezinkproef een laag van in verhouding tamelijk geconcentreerd slib. Wanneer deze laag zo dik geworden is dat de bovengrens ervan de slibspiegel bereikt, dan wordt de slibspiegelsnelheid kleiner. De concentratie van het slib, dat zich vlak onder de slibspiegel bevindt, wordt door Merkel gedefinieerd als de knikpuntsconcentratie G_c (zie ook figuur 28, p. 39).

4.1.4 *samendrukkingsfase of compressiefase*

De slibvlokken liggen op elkaar gestapeld. De onderliggende lagen worden samengedrukt door het gewicht van de bovenliggende lagen. Er wordt water tussen het slib uitgeperst, zodat de drogestofconcentratie toeneemt en de slibspiegel langzaam nog verder daalt. De hoogte van de indikkende laag is van invloed op de maat van de samendrukking van het slib.

4.2 Kengrootheden voor het bezinken van actiefslib

Voor het weergeven van de bezinkeigenschappen van actiefslib worden in het algemeen de beginbezinksnelheid en/of de slibvolume-index gebruikt.

Onder beginbezinksnelheid wordt verstaan de snelheid waarmee de slibspiegel in de lineaire fase daalt (zie figuur 6, p. 8).

De slibvolume-index wordt bepaald door het slibvolume na een half uur bezinken in een kolom (ml/l) te delen door de drogestofconcentratie (g/l, kg/m^3) van het slib aan het begin van de proef.

De bezinksnelheid en slibvolume-index worden in één en dezelfde proef bepaald. Het zou voor de hand liggen dat een direct verband tussen beiden bestaat; dit blijkt niet het geval (zie 4.3.3).

Er kleven grote bezwaren aan het gebruik van de onverdunde slibvolume-index. Dick en Vesilind¹⁵ geven aan dat een aantal factoren de bepaling van de slibvolume-index beïnvloedt. Deze factoren beïnvloeden het bezinkproces in de nabezinktank anders dan het proces in de bezinkkolom. Dit bemoeilijkt de interpretatie.

Hun conclusie is dat de slibvolume-index geen goede maat is voor de fysische eigenschappen van het slib. Vergelijk hiermee één van de conclusies van Heide, Kampf en Bloot²³ dat de bruikbaarheid van de slibindex als een algemeen kenmerk van de ontwaterbaarheid van slib nihil is. De onverdunde index kan hooguit bij de beoordeling van de bedrijfsvoering van één installatie gebruikt worden.

Het vergelijken van verschillende inrichtingen op grond van de onverdunde slibvolume-index wijzen ze af.

Vooralsnog wordt de onverdunde slibvolume-index veel gebruikt, zowel bij de bedrijfsvoering als bij het ontwerpen van installaties. Het is dus van belang dieper in te gaan op de bezwaren die Dick en Vesilind aanvoeren, om de beperkingen van de ongecorrigeerde slib-index aan te kunnen geven.

4.3 Bezwaren van de onverdunde slibindex

4.3.1 *drogestofconcentratie*

Bezinkproeven uitgevoerd met één slibsoort, maar met verschillende drogestofconcentraties aan het begin van de proeven, tonen aan dat deze beginconcentraties grote invloed uitoefenen op de index. Het verband tussen index en concentratie is niet voor alle slibsoorten hetzelfde¹⁵ (fig. 8).

De verklaring die hiervoor gegeven wordt, is dat bij toenemende concentraties het slib niet wil samengroeien tot een grof, open netwerk dat het bezinken zou bevorderen. De mate waarin dit samengroeien wordt belemmerd, hangt samen met de diameter van de cylinder. In de nabezinktank zelf hoeft dit niet noodzakelijkerwijze op te treden. Voor (zeer) hoge slibconcentratie geeft de slibindex geen enkele indicatie voor de bezinkeigenschappen van het slib, omdat naar mate de concentratie stijgt, de maximaal bereikbare index daalt. Deze is immers 1000/G. Er is evenwel een methode ontwikkeld om dit bezwaar te ondervangen.

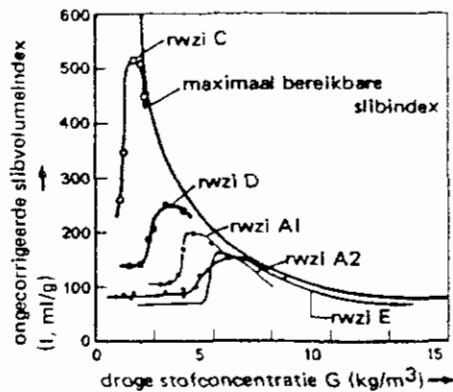


Fig. 8. Verband tussen de drogestofconcentratie en de onverdunde slibvolume-index¹⁵

Figuur 8 maakt zichtbaar dat de slibvolume-index een reproduceerbare waarde heeft voor slibvolumina kleiner dan circa 200 ml/l. Om bij hogere slibconcentraties eveneens een reproduceerbare waarde te krijgen wordt door Stobbe aangeraden het te bezinken slib te verdunnen, zodanig dat na een half uur bezinken circa 200 ml/l slibvolume wordt gevonden.

De verdunde slibvolume-index (I_{sv}) wordt bepaald door het verkregen slibvolume te delen door de verdunde concentratie. Het produkt (VS_v) van de verdunde slibvolume-index en de drogestofconcentratie in de beluchtingsruimte kan groter dan 1000 ml/l zijn.

Merkel²⁹ heeft getracht een verband te vinden tussen de verdunde slibindex en de niet-gecorrigeerde index. Met behulp hiervan zou de verdunde slibindex te voorspellen zijn zonder de proeven die nodig zijn om de juiste verdunning te vinden.

Het verband geldt voor het gebied $200 \text{ à } 300 < VS < 700 \text{ à } 800$ en luidt:

$$I_{sv} = I \cdot \left(\frac{300}{VS}\right)^{0,6} \quad (\text{ml/g}) \quad (4)$$

Hoe kan worden nagegaan of deze formule toepasbaar is?

Het beste zou zijn zelf uitgebreid bezinkproeven te verrichten en de uitkomsten te vergelijken met (4).

Een andere mogelijkheid is de meetgegevens die anderen reeds verzameld hebben hiervoor te gebruiken. Pflanz³⁴ heeft hiervoor bruikbare waarden gegeven in de vorm van fig. 9. Uiteraard zijn deze gegevens onvoldoende voor een algemene conclusie.

Uit de figuur zijn de slibvolumina en de bijbehorende aanvangsconcentraties af te lezen. Rechts in de figuur is de slibindex aangegeven. Met (4) kunnen de gemeten slibindices worden gecorrigeerd voor de aanvangsconcentratie. De gemeten en gecorrigeerde indices worden in figuur 10 uitgezet tegen de aanvangsconcentraties.

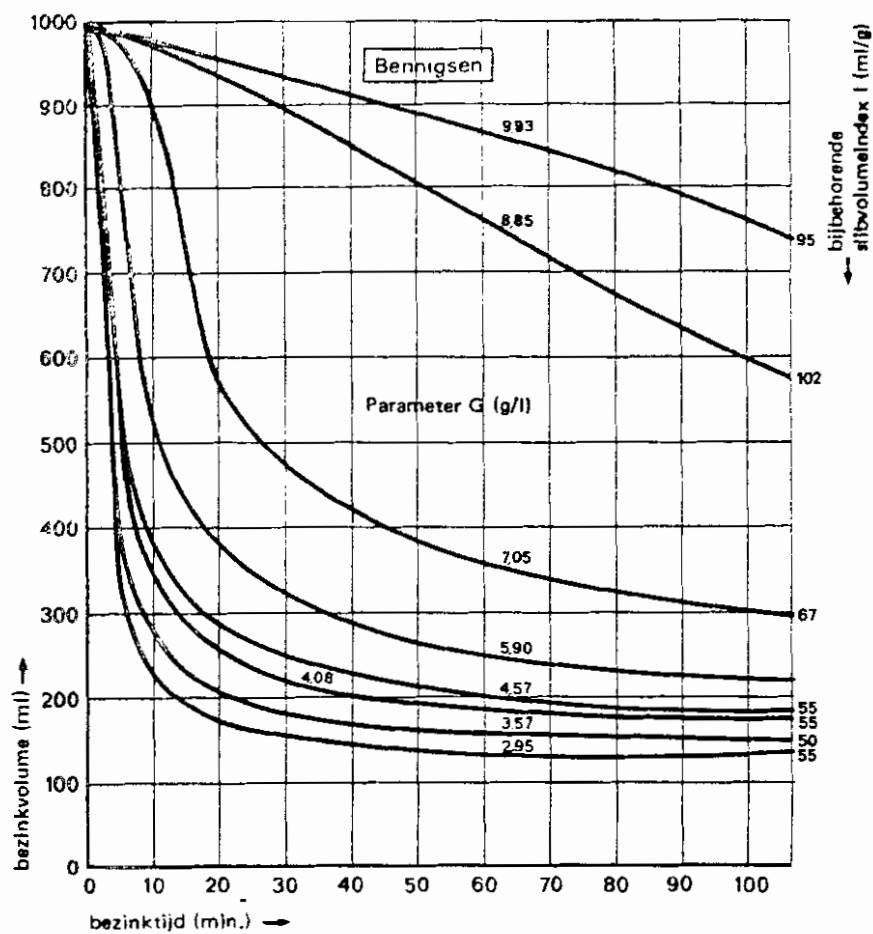


Fig. 9. Bezinkcurven van actiefslib afhankelijk van de beginconcentratie

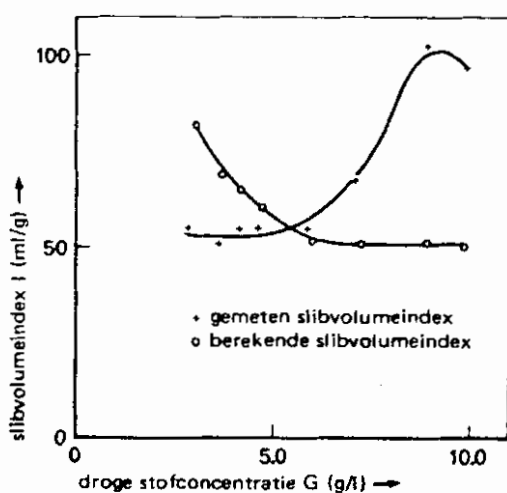


Fig. 10. De drogestofconcentratie en de slibvolume-index, volgens (4) gecorrigeerd en de onverdunde slibvolume-index.

Uit deze grafiek zou het volgende kunnen worden geconcludeerd. De formule is niet bruikbaar voor slibvolumina kleiner dan 300 ml/l. Dan wordt de met (4) gecorrigeerde index groter dan de gemeten index, hetgeen onwaarschijnlijk is.

De bovengrens lijkt minder strak te zijn, immers de punten behorend bij 900 en 940 ml/l vallen eigenlijk buiten het gebied ($300 < VS < 800$). De invloed van de aanvangsconcentratie op de index blijkt inderdaad door toepassing van de correctieformule sterk verminderd. Let op dat de slibmonsters met effluent verdund moeten worden. Daarmee wordt vermeden dat vreemde stoffen in het slib worden gebracht die de bezinkeigenschappen kunnen beïnvloeden.

De verdunde slibindexbepaling levert beter te reproduceren waarden en dus beter vergelijkingsmateriaal op. Deze methode is ook in Nederland gestandaardiseerd^{4,5}.

4.3.2 *stromingseigenschappen van het slib*

Dick en Vesilind stellen dat de stromingseigenschappen (bijvoorbeeld: deformatie) fundamenteel zijn voor het fysisch gedrag van het slib.

Zij betogen dat er geen consequent verband tussen de slibindex en parameters als plastische viscositeit en vloeisterkte is.

Wanneer men probeert het proces te beschrijven met dergelijke parameters dan is het onwaarschijnlijk dat de slibindex daarin zal voorkomen als beschrijver van de eigenschappen van het slib.

4.3.3 *lineaire bezinksnelheid van de slibspiegel*

Deze parameter wordt veel gebruikt in wiskundige modellen van het bezinkproces.

Ook tussen deze grootte en de slibindex is geen consequent verband aantoonbaar.

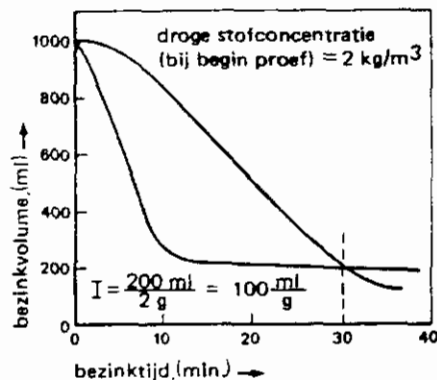


Fig. 11. Bezinkcurven van twee verschillende slibsoorten met dezelfde slibindex, maar verschillende lineaire bezinksnelheid¹⁵

Het is mogelijk dat het verband $I_{SV} : VS$ meer consequentie zou vertonen als Dick en Vesilind de gecorrigeerde index hadden gehanteerd. Bij gebrek aan meetgegevens is dit niet te verifiëren.

4.3.4 *diameter van de cylinder*

Wanneer bezinkproeven worden gedaan met eenzelfde slibsoort in cylinders met verschillende diameters blijken de indexwaarden sterk te ver-

schillen. Een verband tussen indexwaarde en diameter bestaat er volgens Dick en Vesilind niet.

Verschillende onderzoekers hebben hier wel naar gezocht^{35,17}.

Om dit bezwaar te ondervangen wordt een 1 liter maatcilinder met standaarddiameter 7,2 cm voorgeschreven (NEN-norm).

4.3.5 laagdikte van het slib

De laagdikte van het slib geeft een grote invloed op de bezinksnelheid. Dick en Vesilind veronderstellen dat bij kleine dieptes (zoals in de 1 liter cilinder) de bodem van het vat meer steun verleent aan de bezinkbare deeltjes en zo de bezinking vertraagt.

De invloed is groter naarmate het slib slechter wil bezinken. Het verdient aanbeveling om dan relatief hoge cilindrs te gebruiken voor de bezinkproeven om de effecten van de bezinkhoogte te beperken. White^{46,47} heeft dit met succes toegepast: bij zeer slecht bezinkbaar slib bleek dat de indexwaarden gevonden in zijn standaardcilinder (hoogte 50 cm) niet meer in zijn wiskundig model pasten. Wanneer hij dit slib echter in zeer hoge cilindrs liet bezinken (hoogte 2 à 3 m) konden de hiermee verkregen indexwaarden wel met succes in het model worden gebruikt (zie 6.2 en 7.2).

De bezinkproef is een batch proces, maar in de nabezinktanks vindt een min of meer continu stationair proces plaats. De hoogte waarop de gehinderde bezinking overgaat in samendrukking stijgt bij de bezinkproef, maar blijft in een nabezinktank in evenwicht, op een bepaalde hoogte constant.

Dit betekent dat de invloed van de laagdikte in de nabezinktank anders zal zijn dan in een bezinkcilinder.

4.3.6 temperatuur

De index is afhankelijk van de temperatuur. Dick geeft een grafiek (fig. 12) die aangeeft dat bij hogere temperaturen de slibindex kleiner wordt.

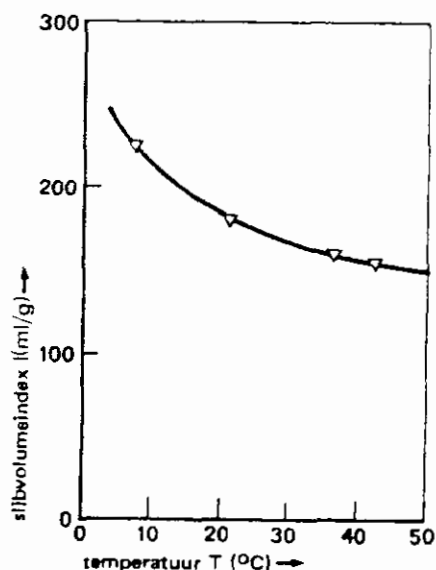


Fig. 12. De invloed van de temperatuur op de slibindex¹⁵

De bezinkeigenschappen zijn eveneens temperatuurafhankelijk. Bij hogere temperatuur bezinkt het slib beter, hetgeen overeenkomt met de lagere index. Of de temperatuur bij verschillende slibsoorten een andere invloed op de index uitoefent, is niet bekend. De invloed is beperkt wanneer de gebruikelijke watertemperaturen worden beschouwd.

4.4 Gecorrigeerde slibvolume-indices volgens Stobbe en White

Enkele invloeden op de bepaling van de slibindex kunnen worden verminderd door de laboratoriumproeven uit te voeren volgens gewijzigde voorschriften.

Stobbe⁴⁰ en White⁴⁶ hebben uitgewerkte voorstellen gedaan om de bepaling van de slibvolume-index te wijzigen. Hiermee wordt een aantal bezwaren ondervangen.

Stobbe stelt voor de bezinkproef met verdund slib te verrichten om zodoende de invloed van de begin drogestofconcentratie te verminderen. Deze methode wordt in Nederland en Duitsland tegenwoordig voorgeschreven.

White heeft een geheel ander voorstel.

Roeren heeft een verbeterende invloed op de bezinking bij laboratoriumproeven. Dick vermeldt dat de index die bij roeren bepaald is, nog wel enigszins van de concentratie afhankelijk is, maar in veel mindere mate (zie figuur 13). Door het roeren wordt de flocculatie bevorderd, brugvorming in de cylinder bij hoge concentraties voorkomen en kortsluitstromen langs de wand (speciaal bij lage concentratie) verminderd; deze storingen spelen in de nabezinktank een veel kleinere rol. Als gevolg hiervan geven bezinkproeven een onjuist beeld van de bezinking in de nabezinktank.

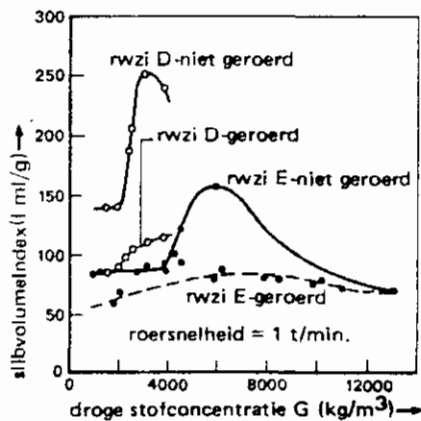


Fig. 13. Invloed van langzaam roeren op de slibvolume-index¹⁵

White heeft een standaardapparaat ontwikkeld, bestaande uit een plexiglas-kolom (diameter 10 cm, hoogte 50 cm) waarin roerstaven met een rotatiesnelheid van 1 omw./min. ronddraaien. Van één slibsoort worden bezinkproeven gedaan met verschillende verdunningen.

De bezinkvolumina worden ook hier na 30 minuten afgelezen. De door White geïntroduceerde SSVI (Stirred Specific Volume Index) wordt gedefinieerd bij 3,5 g/l drogestofconcentratie. Deze waarde wordt verkregen door interpolatie van de gevonden meetwaarden. Deze methode is in Engeland algemeen ingevoerd.

Op grond van ervaringen zijn door de ATV^{2,18} richtlijnen gegeven voor de te verwachten verdunde slibindex bij een te ontwerpen afvalwaterzuiveringsinrichting (zie tabel 1).

slibbelasting in kg BZV/kg d.s. d	> 0,05	≤ 0,05
	soort afvalwater	
verdunde slibindex in ml/g		
huishoudelijk	100	75
afvalwater met beperkt aandeel organische vervuiling van industriële oorsprong	100-150	75-100
afvalwater met aanzienlijk aandeel organische vervuiling van industriële oorsprong	150-200	100-150

Tabel 1. Ontwerprichtlijn voor de verdunde slibvolume-index volgens de ATV²

Volgens Wolf⁴⁹ zijn deze waarden eerder te laag dan te hoog. Ze moeten worden gezien als compromis tussen veiligheid en zuinigheid. Zijn bedrijfservaring met zuiveringsinrichtingen in Beieren is kort samengevat in tabel 2. Hij geeft ook nog aan dat er bij de inrichtingen die een index groter dan 200 ml/g hebben, zowel inrichtingen met als zonder industrieel afvalwater zijn.

verdunde slibvolume-index I_{sv}^* (ml/g)	% van de zuiveringsinrichtingen
< 100	20
100 - 150	20
150 - 200	30
200 - 300	15
> 300	15

Tabel 2. Verdunde slibvolume-index; bedrijfservaringen in Beieren⁴⁹

* variaties per inrichting ca. + 50% rond het gemiddelde.

White geeft als ontwerprichtlijn de waarden die in tabel 3 zijn vermeld.

slibleeftijd (d)	nitrificatie	SSVI (ml/g)
< 1,5	geen	80-140
1,5 < ... < 5	gedeeltelijk	120-160
> 5	volledig	< 100

Tabel 3. Ontwerprichtlijn voor de geroerde slibvolume-index volgens het WRC^{4,7}

De waarden die in tabel 3 genoemd worden kunnen aanzienlijk toenemen volgens White, wanneer het influent van de beluchtingstank aangerot is, toxische stoffen of buiten normale verhouding liggende hoeveelheden koolhydraten, stikstof of fosfaten bevat, of wanneer in de beluchtingsruimte onvoldoende zuurstof wordt ingebracht.

Bij TNO is vergelijkend onderzoek verricht naar de beide slib-indexmethoden. De conclusies van Voss^{4,5} zijn o.a. dat bij de verdunningsmethode altijd een duidelijk gebied is te onderscheiden waarin sprake is van een lineaire bezinksnelheid. Voorts, dat de geroerde index aanzienlijk minder gevoelig is voor de drogestofconcentratie. Beets³ en Heide en Kampf^{2,2} concluderen dat de geroerde index aanzienlijk minder gevoelig is voor de invloed van het drogestofgehalte dan de niet-geroerde, onverdunde index of, in sommige gevallen, dan de verdunde index (zie figuur 14).

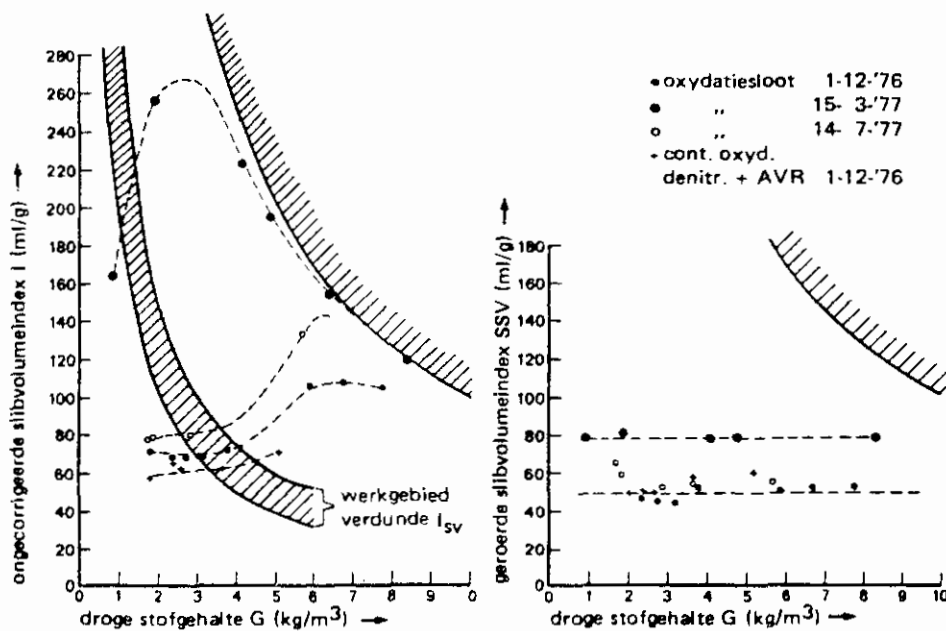


Fig. 14. Onverdunde index, verdunde index en geroerde index^{2,2}

5.1 Inleiding

In nabezinktanks van actief-slibinstallaties treedt in feite een combinatie van een aantal processen op.

Als belangrijkste deelprocessen kunnen worden genoemd: flocculatie, ontmenging (slib-water scheiding) en dichtheidsstromingen. In dit hoofdstuk zullen flocculatie en dichtheidsstromingen worden besproken.

(Veel van de literatuur die gewijd is aan coagulatie en flocculatie van actiefslib in nabezinktanks, is vrijwel geheel gericht op licht slib (bulking sludge, Blähschlamm). Dit aspect is in deze studie niet opgenomen).

5.2 Coagulatie en flocculatie

Literatuur over coagulatie en/of flocculatie die voert in de richting van de doelstelling van dit onderzoek is vrijwel geheel afwezig. Billmeier⁶ wijdt in zijn dissertatie een hoofdstuk aan dit onderwerp. Hij concludeert dat grote diepten, die voor de helderwater- en scheidingszones worden gebruikt, gunstig zijn voor het bevorderen van voldoende contacttijd en daarmee het aantal lichte slibvlokken in het effluent kunnen reduceren.

Hoge hydraulische belastingen en drogestofbelastingen werken nadelig op de vlokvorming in het gebied waar turbulente stroming heerst. In het daaraanluitende overgangsgebied en laminaire stromingsgebied treedt navlokking op, ook nog tijdens het bezinken. (In welk deel van de nabezinktank turbulente stroming heerst, geeft Billmeier niet duidelijk aan).

In het laminair doorstroomde gebied (de helderwaterzone en de scheidingszone boven de slibspiegel) komen de bezinkbare vlokken met diameter $\geq 100 \mu\text{m}$ evenals de daaraan coagulerende microvlokken tot naflocculatie. De ruimte waar dit kan optreden wordt in verticale maar ook in horizontale richting kleiner, wanneer de belasting toeneemt.

Voor de flocculatie is een grote weglengte van de vlok van groot belang. Grote weglengte betekent een groot oppervlak van de bezinktank en voldoende diepte in de helderwaterzone en de scheidingszone ($h_2 + h_3$) (zie fig. 30, p. 40). Bij grotere belastingen nemen de horizontale snelheden van de vlokken in V_2 en V_3 toe; dit is nadelig voor de naflocculatie.

Bij agglomeraten (macrovlokken) is de flocculatie begrensd. De beweging van een agglomeraat veroorzaakt een waterbeweging loodrecht op de vlokbeving. Deze secundaire stroming weerhoudt microvlokken van de gewenste botsing. Ook bij gunstige omstandigheden voor naflocculatie draagt dit verschijnsel bij tot het altijd aanwezig zijn van filtreerbare stof in het effluent.

5.3 Dichtheidsstromingen

Een belangrijk deelaspect van het nabezinkproces is de dichtheidsstroming, die ontstaat als gevolg van verschillen in soortelijk gewicht van twee vloeistoffen wanneer deze bij elkaar komen. De stroming is erop gericht dat de zwaardere vloeistof onder komt.

Schmidt-Bregas heeft optimale verhoudingen aangegeven tussen diepte en lengte c.q. diameter van de nabezinktank (zowel ronde als rechthoekige, horizontaal doorstroomde tank). Deze verhoudingen bevorderen de hydraulische werking van de nabezinktank. Merkel²⁹ stelt dat dit voor de nabezinktank van geen betekenis is. Alleen de dichtheidsstromingen bepalen het stromingsbeeld. Het bassin kan daarom relatief kort zijn.

In de nabezinktank zijn altijd dichtheidsverschillen aanwezig doordat in de aanvoer een hoeveelheid droge stof zit, die uitzakt. De dichtheid van de droge stof, ρ_{ds} bedraagt volgens Billmeier⁶ 1.005 tot 1.050 kg/m³. Het concentratieverschil veroorzaakt een dichtheidsverschil.

Een dichtheidsverschil kan ook ontstaan door een temperatuurverschil tussen de aanvoer en de inhoud van de tank. De invloed van een temperatuurverschil op dichtheidsstroming is in het algemeen klein; deze kan bovendien in twee richtingen werken, de aanvoer kan zowel warmer als kouder zijn dan de tankinhoud. De dichtheidsstroming ten gevolge van het verschil in drogestofconcentratie is vele malen sterker.

In de aanvoer van de nabezinktank zit in het algemeen een veel hogere drogestofconcentratie dan in de aanvoer van een voorbezinktank. Verder dikt actiefslib veel slechter in dan primair slib. Door deze twee verschijnselen is dichtheidsstroming in de nabezinktank een veel belangrijker fenomeen dan in de voorbezinktank.

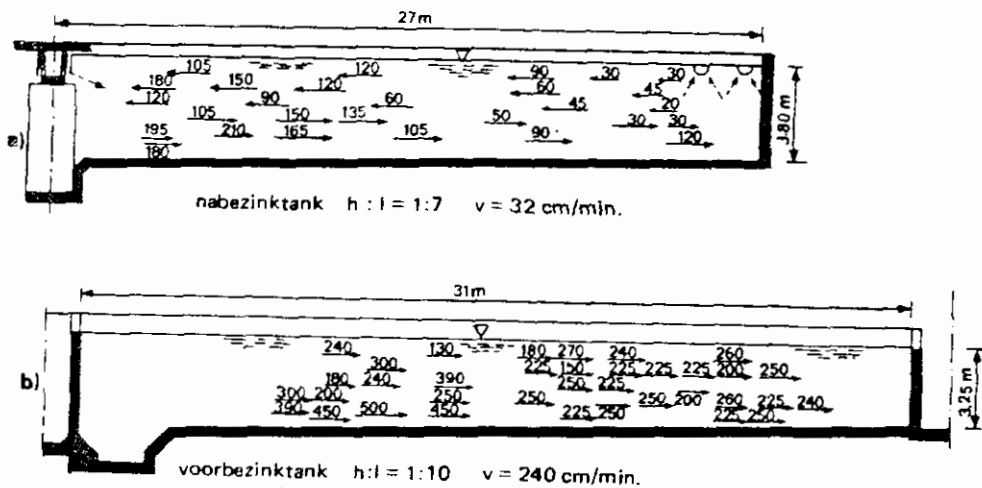


Fig. 15. Snelheidsmetingen in een voor- en een nabezinktank¹

Deze figuur geeft aan dat bovenin de nabezinktank terugstroming optreedt, terwijl dat in de voorbezinktank nergens voorkomt.

Anderson¹ stelt dat de snelheid van de dichtheidsstroom beïnvloed schijnt te worden door de geometrie van de tank en de invoersnelheid. Van Os³³ (Waterloopkundig Laboratorium) beschrijft het hydraulische proces aldus:

De inhoud van de nabezinktank kan worden gedacht te zijn opgebouwd uit twee stagnante lagen. Bovenin het heldere effluent en op de bodem het indikkende slib (fig. 16). Wanneer nu een slib-watermengsel de tank instroomt in een neerwaarts gerichte straal (jet), gaan twee krachten het stromingsproces beheersen: de impuls van de straal en de "buoyancy" als gevolg van de dichtheidsverschillen. Waar de jet onbeschermd (niet van de tankinhoud afgescheiden door een wand) door de

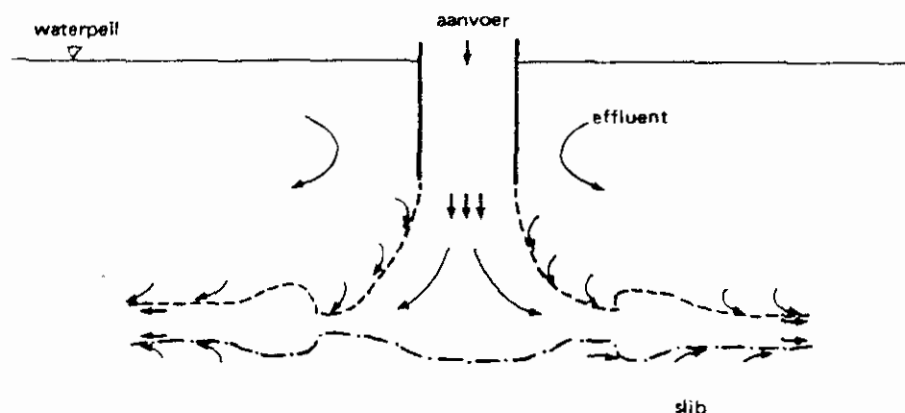


Fig. 16. Dichtheidsstromingen: invoer van slibwatermengsel tussen de stagnante lagen helder water en indikkend slib

effluentlaag stroomt, wordt effluent meegesleurd. Dit wordt "entrainment" genoemd. "Entrainment" treedt altijd op in de richting van de stromende laag, er is geen sprake van evenwichtige uitwisseling tussen straal en stagnante omgeving.

Daar waar de straal de zwaardere laag indikkend slib bereikt, wordt deze ingedeukt als gevolg van de impuls van de straal. De stroming verspreidt zich nu horizontaal tussen de twee stagnante lagen. Wederom treedt er nu "entrainment" op, maar nu aan weerszijde van de straal. Aan de bovenkant wordt de straal aangevuld met effluent, aan de onderkant met slib. Deze twee "entrainments" werken elkaar tegen, voor wat betreft de verandering van de dichtheid van de straal. Bovendien treedt bezinking van slibdrogestof uit de straal op. Als gevolg hiervan neemt dichtheid van de straal af: het dichtheidsverschil met de sliblaag neemt toe en met de effluentlaag af. De grenslaag aan de bovenkant van de straal vervaagt.

Wanneer de stroomsnelheid te groot wordt, kunnen zowel aan de onderzijde als aan de bovenzijde van de straal watersprongen ontstaan. Deze hebben een nadelige invloed op het bezinkingsproces door hun grote turbulentie. Het stromingspatroon in de jet kan worden gekenmerkt door het interne getal van Froude:

$$Fr = \frac{v_j}{\sqrt{\frac{\Delta \rho}{\rho_j} \cdot g \cdot d}} \quad (5)$$

Het boven beschreven proces kent dus twee interne getallen van Froude: één voor de beschrijving van de overgang tussen de jet en de bovenstaande stagnante laag en één voor die met de onderstaande stagnante laag. Om watersprongen te voorkomen moet worden gezorgd dat $Fr < 1$ (dan is de stroming stabiel).

Als gevolg van "entrainment" ontstaan neren. Het is mogelijk dat de verstoring die een en ander veroorzaakt, zijn invloed niet ver de tank in kan uitoefenen. Wellicht kan door beperking van de storingszone het netto bezinkoppervlak toenemen.

Een horizontale plaat om de storing aan de onderkant van de straal te voorkomen, kan niet worden toegepast omdat de plaats van de slibspiegel in de praktijk sterk wisselt.

Deze storingen zouden minder kunnen zijn, wanneer er geen invoertrommel zou zijn. In dat geval zal - bij ronde tanks - de wind een sterkere nadelige invloed kunnen uitoefenen op de gelijkmatige verdeling in alle richtingen. Wellicht is het een zwaarwegend argument voor het vergroten van de invoertrommels. Pogingen om de aanvoer gelijkmatig over de hoogte te verdelen, hebben geen nut, aangezien de aanvoer toch zal zakken naar de grenslaag effluent-indikkend slib, om zich daar te gaan verspreiden in horizontale zin.

5.4 Invloed van de constructie op het nabezinkproces

5.4.1 *inleiding*

De verschillende constructie-onderdelen van de nabezinktank, zoals inloop, ruimer en effluentgoot, alsmede dimensioneringsaspecten als bodemhelling en afmetingen van de slibzak, hebben alle een zekere invloed op het proces. Enkele hiervan zullen in deze paragraaf ter sprake komen.

5.4.2 *invoerconstructies*

Billmeier en Resch^{6, 38} hebben proeven gedaan met continue bezinking in kolommen van 0,5 m diameter en hoogten van 1,95, 2,45 en 2,95 m.

De invoerconstructie bestaat uit een pijp van circa 10 cm doorsnede met op circa 5 cm afstand onder het open einde van de buis een ronde horizontale plaat ("Prallteller") van circa 15 diameter (zie figuur 17).

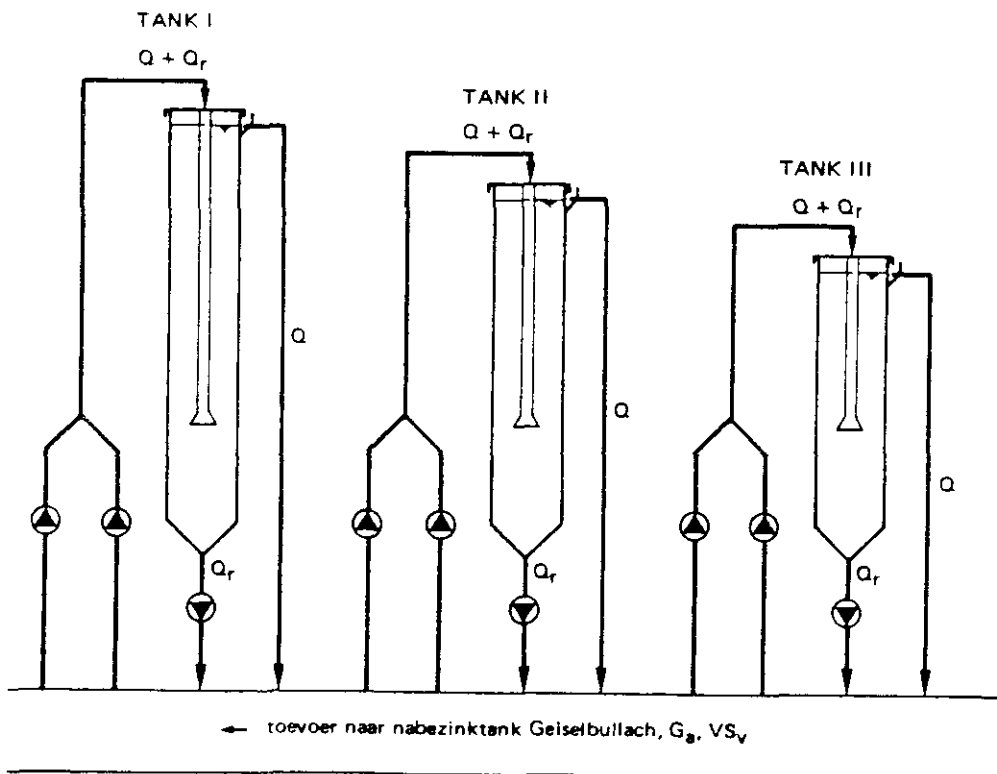


Fig. 17. Proefinstallatie van Billmeier en Resch⁶

Bij de proeven met deze installaties is gebleken dat, wanneer de aanvoeropening onder de slibspiegel is, er een scherpe slibspiegel ontstaat. Het water boven de slibspiegel is in het algemeen helderder (dekenfiltratie) dan wanneer de aanvoeropening boven de slibspiegel is. In dit laatste geval is er ook geen scherpe slibspiegel te onderscheiden en vaak is het effluent van slechtere kwaliteit. Bij een zeer lage aanvoeropening en bij grote slibretourdebieten vindt duidelijk kortsluiting plaats. Elders in de tank kunnen dan hogere drogestofgehalten worden waargenomen dan in het retourslib. Dergelijke verschijnselen komen ook in nabezinktanks voor.

Anderson¹ bericht van proeven op de Southwest Sewage Treatment Works van het Sanitary District of Chicago, uitgevoerd in 1940.

In ronde tanks (34,4 m diameter) zijn ongeveer 25 verschillende invoerconstructies getest, zoals trommels van 6,1 m en 1,2 m diameter, met dieptes van 0,9, 2,1 en 3,7 m, omgekeerde conische schotten, horizontale schotten op verschillende hoogten, schuine schotten rond de invoer om het water een roterende beweging te geven en een aantal horizontale platen met concentrisch geplaatste openingen.

De combinatie van de schuine schotten met de horizontale platen zou in een voorbezinktank met 6,1 m diameter voor wat betreft de hydraulische verblijftijd de beste resultaten opleveren.

Toch bleek geen enkele constructie positief te werken in de nabezinktanks, blijkbaar als gevolg van de dichtheidsstromen.

Ook zijn proeven gedaan met de invoer op andere plaatsen dan in het midden, met slechtere effluentkwaliteit als resultaat.

De conclusies na deze proeven luiden: de aanvoersnelheid moet zo laag mogelijk zijn zonder afhankelijk te zijn van de aanwezigheid van schotten. In de toevoerbuis moet de snelheid zo laag zijn dat er nog net geen bezinking optreedt bij gemiddelde aanvoer (ca. 30 cm/s) en de aanvoertrommel moet zo groot als praktisch mogelijk zijn om de kleinste horizontale snelheid te krijgen. De trommel moet boven water uitsteken en ca. 1 m in het water steken om lichte vlokken naar beneden te dwingen die anders langs de oppervlakte naar de overstortrand zouden drijven.

Fitch en Lutz²¹ geven aan dat het gunstiger zou zijn om de uitstroopening van de trommel laag te houden om de afstand, waarover het aangevoerde mengsel naar beneden stroomt, voordat het water in horizontale zin afbuigt, klein te houden. Dit beperkt de potentiële energie die voor de dichtheidsstroming beschikbaar is.

Men kan het ook zien als het afschermen van de "verdronken waterval" van de rest van de nabezinktank om "entrainment" en neer-vorming zoveel mogelijk tegen te gaan.

Wolf⁴⁹ geeft als aanwijzing - op grond van bedrijfservaring - dat de diameter van de inlooptrommel minstens 1/5 van de tankdiameter moet zijn om de uittreedsnelheden van het slib te beperken: "Bij een veel te kleine trommeldiameter kunnen leidschotten ongunstig werken door sterke wervelingen. Wanneer de trommeldiameter voldoende groot is kunnen leidschotten overbodig zijn".

De mesbelasting is een zeer veel gehanteerde ontwerpparameter. Anderson¹ hanteert $10 \text{ m}^3/\text{m.h}$ als richtlijn voor overstortranden die op ruime afstand van de wand gesitueerd zijn en $7,8 \text{ m}^3/\text{m.h}$ voor overstortranden nabij de tankwand. De dichtheidsstroming keert bij de wand om en veroorzaakt ter plaatse turbulentie.

Effluentgoten op de wand met slechts één overstortrand kunnen volgens Anderson daarom alleen worden toegepast bij tanks met een diameter kleiner dan ca. 27 m bij een oppervlaktebelasting van omstreeks $1,5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$. Bij grotere tanks moeten dan goten op consoles worden gebouwd. Deze constructiewijze is in Nederland zeer gebruikelijk, in tegenstelling tot bijvoorbeeld de Engelse bouwwijze.

Johnstone, Rachwal en Hanbury^{2,4} van Thames Water Authority hebben uitgebreid proeven verricht aan de nabezinktank van een carousel-installatie te Ash Vale.

Deze nabezinktank heeft een diameter van 31 m, kantdiepte 1,5 m, bodemhelling 1 : 12 en een effluentgoot op 1 m afstand van de wand. In eerste instantie ging over beide overstortranden de helft van het effluentdebiet.

Wanneer de slibspiegel hoger reikt dan 20 cm onder de bodem van de effluentgoot, wordt de stroomsnelheid van het heldere water tussen de gootbodem en de slibspiegel zo hoog dat slibvlokken meegesleurd worden. Er komen dan slibvlokken mee over de buitenste overstortrand. De slibspiegel kan dan nog een eind verder stijgen voordat ook over de binnenste rand wordt meegesleurd. Na deze constatering hebben de onderzoekers de buitenste rand verhoogd zodat effluent alleen nog over de binnenrand van de goot stroomt. De slibspiegel kan nu verder stijgen dan voorheen, totdat slibvlokken meegesleurd worden.

Bij in de toekomst te bouwen nabezinktanks gaan de ontwerpers van Thames Water terug naar de in Engeland beproefde overstortrand op de tankwand. De afwezigheid van consoles vereenvoudigt het schoonmaakwerk van goten en wanden aanzienlijk.

Wolf^{4,9} heeft de ervaring dat de mesbelasting geen betekenis heeft, zolang de slibspiegel meer dan ca. 1 m van de overstortrand verwijderd is.

Gelijke resultaten hebben de onderzoeken van Billmeier opgeleverd. De oude nabezinktank van Gaiselbullach (39,5 m diameter, 1,7 m kantdiepte, bodemhelling 1 : 65) heeft een effluentgoot op consoles; na de proeven van Billmeier is de installatie verdrievoudigd. De twee nieuwe nabezinktanks zijn identiek aan de oude, behalve de effluentgoot; deze is nu op de wand geplaatst met slechts één overstortrand. Het duikschot vóór de overstortrand dwingt het effluent er onder door te stromen. Wanneer dit schot te diep steekt en de slibspiegel erg hoog is, wordt door de hoge stroomsnelheden weer slib meegesleurd op gelijke wijze als bij de binnenliggende effluentgoot. Dit betekent dat een diep duikschot nadelig is voor het bufferend vermogen van de nabezinktank.

Ook Munch en Fitz Patrick^{3,2} komen op grond van praktijkproeven met tanks van 35,4 m diameter en 4,7 m kantdiepte tot de slotsom dat de mesbelasting pas dan van belang wordt, als de slibspiegelhoogte en de slibbezinkbaarheid onbeheersbaar geworden zijn.

Volgens Merkel³⁰ stijgt het effluent gelijkmatig verdeeld over de oppervlakte uit de sliblaag op. Daardoor is het mogelijk de effluentgoten gelijkmatig te verdelen over de oppervlakte, uitgezonderd de inloopzone. Speciaal bij rechthoekige tanks kan de waterstroom daardoor gelijkmatiger worden. "Bij deze tanks kan het juist zijn de effluentgoten vanaf ca. de helft van de tanklengte te laten beginnen".

5.4.4 *bodemhelling en ruiming*

Over de invloed van de ruimermechanismen op het bezinkproces zijn weinig artikelen verschenen die het vermelden waard zijn. Wel worden (reclame) artikelen gewijd aan eigen merkprodukten, maar deze dragen weinig bij aan de kennis omtrent de invloed van de ruimers op het procesgebeuren.

Renner³⁷ heeft onderzoek gedaan naar discontinue ruiming in een rechthoekige modeltank en heeft zijn waarnemingen nauwkeurig ver-
slagen.

In de modeltank - 14 m lang, 0,8 m breed en 1,4 m diep - loopt een kettingruimer, waaraan slechts één ruimerblad is gemonteerd. De ruimersnelheid kan worden gevarieerd tussen 0 en 6 cm/s. De tank heeft geen slibtrechter, de opening naar de retourslibleiding zit in de bodem op korte afstand van de toevoer.

Door ruiten in de zijwand kan het bezinkproces direct worden geobserveerd. De jet ligt op de laag indikkend slib. De dikte van de jet bedraagt 30-50 cm en de snelheid kan oplopen tot 5 cm/s.

De reikwijdte van de jet is afhankelijk van de concentratie G en van de oppervlaktebelasting; vaak komt de jet tot het eind^a van de tank. In de helder-waterlaag stroomt het water vaak terug. Daarbij zijn snelheden van 1 à 2 cm/s gemeten.

De slibspiegel stijgt vanaf het begin van de tank tot een maximum op $1/4$ à $1/3$ van de lengte, daarna daalt de slibspiegel weer.

Het slib in de laag onder de jet ligt zeer stabiel, het wordt ook bij jetsnelheden van 5 cm/s niet opgewerveld.

De dikte van de sliblaag was afhankelijk van de belasting, de retourcapaciteit en van de ruimercapaciteit.

Bij de discontinue ruiming zijn drie fasen te onderscheiden.

De eerste fase noemt Renner de ruimerpauze en begin van ruiming.

Door terugstromen van helder water in de invoerzone wordt de jet en zelfs het slib verdund.

Ook het ingedikte slib wil naar de retourstroomopening en verhoogt de concentratie in het retourslib. Hoge snelheden van de jet kunnen dit laatste zozeer belemmeren, dat de verdunning overheerst.

De slibretourverhouding speelt een belangrijke rol: bij $R > 100\%$ is tijdens de ruimerpauze G_r steeds kleiner dan G_a (zie figuur 18).

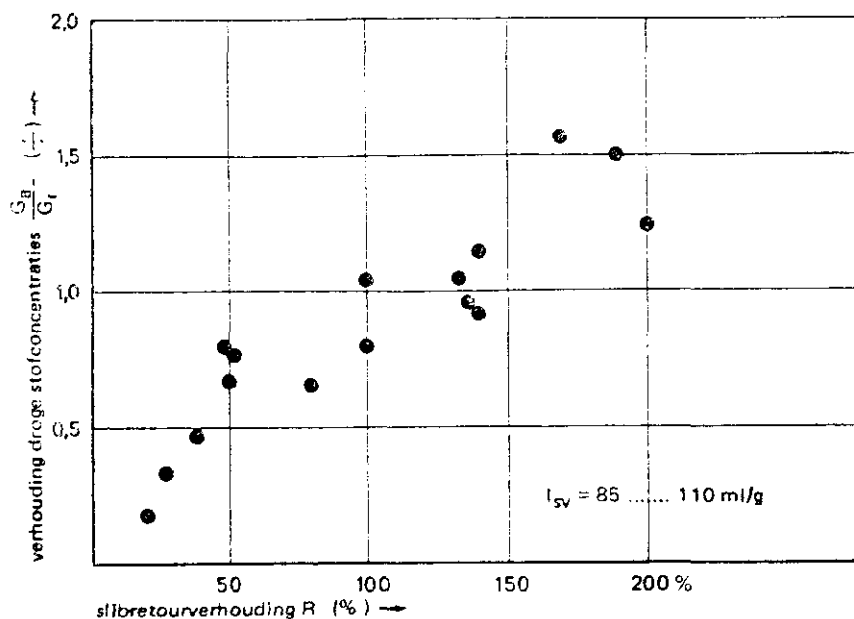


Fig. 18. Verhouding van drogestofconcentraties aanvoer en retourslib afhankelijk van de retourverhouding gedurende de eerste fase^{3,7}

De ruimer begint met achterin de tank een hoeveelheid slib vóór zich op te bouwen (zie figuur 19).

Voorin de tank wordt het slib nog niet beïnvloed door de ruimer. G_R neemt niet toe.

De drogestofconcentratie vlak vóór het ruimerschild neemt nauwelijks toe.

In de tweede fase is de ruimte voor het schild volgeraakt. De bovenste, nauwelijks, ingedikte, lagen schuiven over de ruimer heen en gaan op de bodem liggen. Voor het schild neemt de drogestofconcentratie toe. Voorin de tank is de invloed van de ruimer nog niet merkbaar. De derde fase kenmerkt zich doordat de slibspiegel voor de ruimer stijgt en de slibberg begint af te stromen in de richting van de retourslibopening. G_R neemt toe. De bewegende lagen worden steeds dikker, tot de hele slibberg tot afstroming komt.

Van doorslaggevende betekenis voor de ruimercapaciteit is bij een gegeven schildhoogte (h_r), de afstand van de ruimer tot de retourslibopening op het beginmoment van de derde fase(s). Per ruimerbeweging wordt namelijk alleen de slibhoeveelheid die op dat moment voor de ruimer ligt verwijderd uit de tank. Uit metingen is gebleken, dat s groter is naarmate de sliblaag dikker is en ook naarmate de ruimersnelheid kleiner is.

De ruimercapaciteit bedraagt:

$$V_r = h_r \cdot b \cdot s \cdot n \quad (\text{m}^3 \text{ slib/h}) \quad (6)$$

De ruimersnelheid heeft een optimum bij 4 à 5 cm/s; dan is V_r maximaal, onafhankelijk van de slibspiegelhoogte en van de ruimerbladhoogte. Dit alles geldt wanneer Q_r groot genoeg is.

De slibhoeveelheid die wordt opgestuwd door de ruimer bedraagt Q_{s1} :

$$Q_{s1} = b \cdot h_r \cdot v_r \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (7)$$

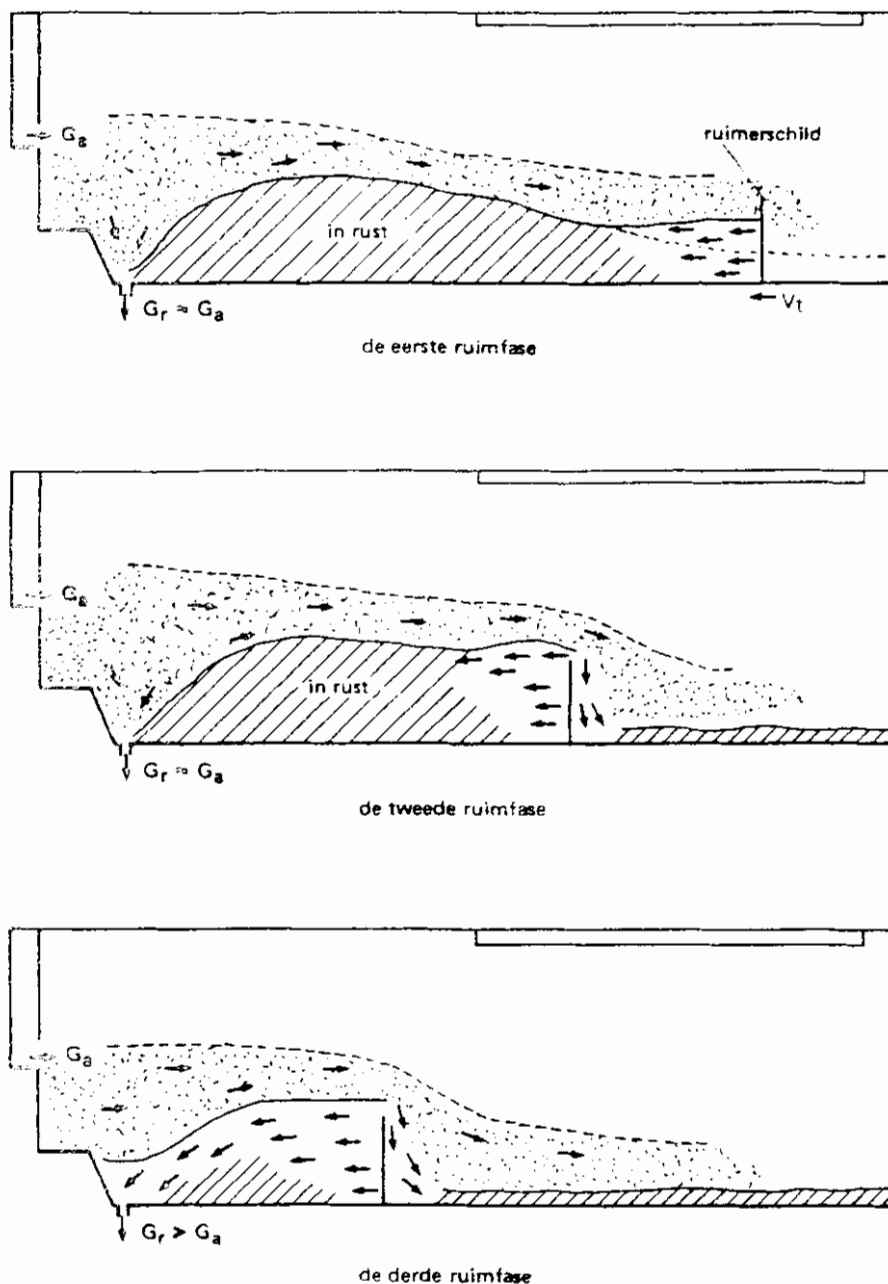


Fig. 19. De drie ruimfasen

Vaak is deze hoger dan Q_r . Wanneer dan de ruimer aan het einde van de derde fase omhoog gaat, stroomt het dikke slib terug in de tank, deze dichtheidsstrooming kan snelheden tot 15 cm/s krijgen. Dit kan worden voorkomen door slibtrechters te bouwen waarin slib gebufferd kan worden. Ook kan gebufferd worden door discontinue retourslibdebieten toe te passen, zodat vooral of uitsluitend tijdens de derde fase slib wordt onttrokken.

Bij de zuiveringsinrichting Emschermündung zijn geen slibtrechters gebouwd maar twee rijen slibafzuigopeningen, de eerste rij aan het begin van de tank, de volgende op eenderde van de tanklengte. Door

sturing zijn niet alle openingen gelijk open, maar alleen die, welke juist voor de ruimer zijn (waar het slib zich in de derde fase bevindt).

Dat de bodemhelling een belangrijke parameter is in het slibruimproces, wordt door het volgende duidelijk gemaakt.

Dortmundtanks hebben bodemhellingen van 60° .

Ook al hebben deze geen enkel ruimermechanisme, zij leveren geen problemen op voor wat betreft de slibbewegingen binnen de tank.

In Engeland zijn nabezinktanks gebouwd met bodemhelling van 30° met als ruimermechanisme één enkele ketting die langs de bodem naar beneden hangt en langs de rand van de tank wordt rondgesleept. De inrichting te Mogden heeft dergelijke nabezinktanks, die uitstekend voldoen.

De eerste zijn in 1937 gebouwd als compromis tussen de Dortmundtanks en tanks met vlakke bodem: Dortmund-tanks geven een goed effluent, tanks met vlakke bodem een beter ingedikt slib, volgens Busby¹⁰.

De in Nederland gebruikelijke bodemhelling in ronde tanks van 1 : 12 is alleen toe te passen wanneer ruimers worden toegepast, die zijn voorzien van ruimerbladen. Vlakke bodems voldoen vaak niet, wanneer het slib wordt geschoven naar een opening in de bodem, maar wel wanneer het slib direct wordt afgezogen (b.v. met hevels).

Busby¹⁰ heeft onderzoek verricht naar de problemen die nabezinktanks gaven bij inrichtingen in het Greater London gebied.

Bij alle tanks die problemen gaven werd in de beluchttingsfase genitricificeerd.

De oorzaak van de problemen werd gezocht bij de onvoldoende ruimercapaciteit, zodat in de nabezinktanks denitrificatie optreedt. De experimenten zijn dan ook alle gericht op het verbeteren van de slibretour. Het wetenschappelijke van de proefnemingen kan in twijfel getrokken worden, maar het is toch interessant kennis te nemen van de resultaten. Wanneer Busby schrijft over de verbetering van de werking van de nabezinktank, is niet duidelijk wat daarmee wordt bedoeld: gesproken wordt over sliblaagdikte en droge stof in effluent, maar er zijn geen meetgegevens gepubliceerd.

Bij de Riverside works (nabezinktanks: diameter 30,5 m, kantdiepte 2,9 m, bodemhelling 1 : 50, 3-armige gebogen ruimer, omtreksnelheid van de ruimer 2,6 cm/s) is de vorm van de ruimer verder omgebogen en bij het midden van de tank verlengd. Dit gaf geen verbetering.

Verbreiding van de ruimerbladen van 0,3 tot 0,6 m gaf een duidelijke verbetering van de werking van de tank.

Bij de Beckton Works (nabezinktanks: diameter 34,5 m, bodemhelling 1 : 50, dubbele ruimer, tipsnelheid 2 cm/s) is de diepte van de inlooptrommel verminderd van 2,1 m tot 1,2 m om de geconstateerde kortsluitstroom naar de slibretour te verminderen. Dit gaf weinig resultaat. Een tweede tank kreeg als vervolg op dit experiment bij de oorspronkelijke insteekdiepte onder de instroomopening een horizontale plaat. Het resultaat was een kleine vermindering van de kortsluitstroom, maar geen verandering in het rendement van de tank. Bij één tank zijn de ruimerbladen verbreed van 0,15 tot 0,4 m. Dit had hetzelfde gevolg als bij de tank van de Riverside Works: een duidelijke verbetering. Een volgende tank van de Beckton Works kreeg een dubbele spiraalruimer en een andere tank een jalouzieruimer. De omtreksnelheid van deze ruimers was 8 cm/s. De verbetering was niet zo duidelijk als bij verbreiding van de ruimerbladen. Verdere verbetering is nagestreefd door roerstaven in de slibtrechter, omdat men verwachtte dat slib in de trechter achterbleef. Dit gaf een extra verbetering van de werking van de tank te zien.

Ook is de invloed van de omtreksnelheid van de ruimer onderzocht. Boven de 4 cm/s werden fijne vlokjes in het effluentesignaleerd. Tussen de 3 en 4 cm/s was er geen aantoonbare verbetering. Geen van de veranderingen bleek voldoende om het probleem van slibverlies op te lossen.

5.5 Snelheidsmetingen

Er zijn diverse methoden voor het meten van de stromingsverschijnselen binnen nabezinktanks.

Proeven met merkstoffen (tracers) worden hiervoor het meest gebruikt en er is een scala van merkstoffen hiervoor beschikbaar.

Volgens Clements en Price¹² hebben chemische tracers een aantal nadelen: kleurstoffen worden geabsorbeerd aan zwevende stof en kunnen vervagen in het zonlicht; anorganische zouten zijn al aanwezig in afvalwater, zodat zij moeilijk nauwkeurig te meten zijn.

Radio-actieve tracers worden relatief gemakkelijk gemeten, maar de proeven hiermee zijn duur en niet ongevaarlijk.

Directe snelheidsmetingen zijn het meest nauwkeurig als men de snelheidsprofielen wil bepalen, maar het vinden van een geschikt meetinstrument is een groot probleem, voornamelijk vanwege het verstopt raken van openingen en vast gaan zitten van bewegende onderdelen.

Ondanks de voordelen van de lage prijs en de eenvoudige bediening hebben drijvers zeer beperkte aandacht gekregen.

Anderson¹ heeft een kleine drijver gebruikt om snelheidsmetingen te doen en Khattab¹² heeft de horizontale stromingspatronen in een ronde tank bepaald met een drijver van aluminium plaatmateriaal. Clements en Price¹², Wouda, Ottengraf en Rietema⁵⁰ geven aan dat, wanneer de horizontale watersnelheden uniform verdeeld zijn over de breedte van een rechthoekige tank, maar over de diepte varieert, de tank toch de efficiency van een ideale bezinktank heeft, zolang de sleepsnelheid van het slib niet wordt overschreden. Daarentegen doet een variatie in de horizontale snelheid over de breedte van de tank wel de efficiency van de tank verminderen. Tracermethoden maken geen onderscheid tussen kortsluitingen door dichtheidsstromen en kortsluitingen door ongelijke stroomverdeling in de breedte. Tracermethoden zijn daarom volgens Clements en Price ongeschikt om geldige algemene criteria af te geven voor het gedrag van nabezinktanks.

Met behulp van drijvers kunnen deze stromen wel worden onderscheiden. Laatstgenoemde auteurs hebben de methode naar eigen zeggen met succes toegepast.

5.6 Verblijftijden van slib en water in nabezinktanks

Tracerproeven zijn beter geschikt voor het bepalen van de werkelijke verblijftijden van slib en/of water in nabezinktanks. Er zijn (radio-actieve) tracers die aan slib hechten, waarmee slibverblijftijden bepaald kunnen worden. Daarnaast bestaan er tracers die zich juist niet hechten; deze zijn bruikbaar voor het bepalen van waterverblijftijden. Het blijkt echter zeer moeilijk om de meetgegevens op juiste wijze te interpreteren³⁶. Wanneer een tracerstoot in de aanvoer van de nabezinktank wordt gebracht, wordt op diverse plaatsen in de tank meer dan één tracerconcentratiepiek geregistreerd, die niet het gevolg kan zijn van, dankzij de retourslibstroom in de aanvoer, weerkerende tracer. De gemiddelde slibverblijftijd, gemeten aan de tracerconcentraties in de slibretour is zeer kort. In de orde van 0,25 h. Dit lijkt in tegen-

spraak met de hoeveelheden slib die zich op dat moment in de tank bevinden.

De theoretische verblijftijd van het water is gelijk aan het volume van de tank gedeeld door het debiet. Als ieder waterdeeltje dezelfde verblijftijd had, zou de tracer na de theoretische verblijftijd in dezelfde korte stoot in het effluent aantoonbaar zijn, als het in de aanvoer is toegediend (zie figuur 20: lijn F). De werkelijkheid ziet er anders uit:

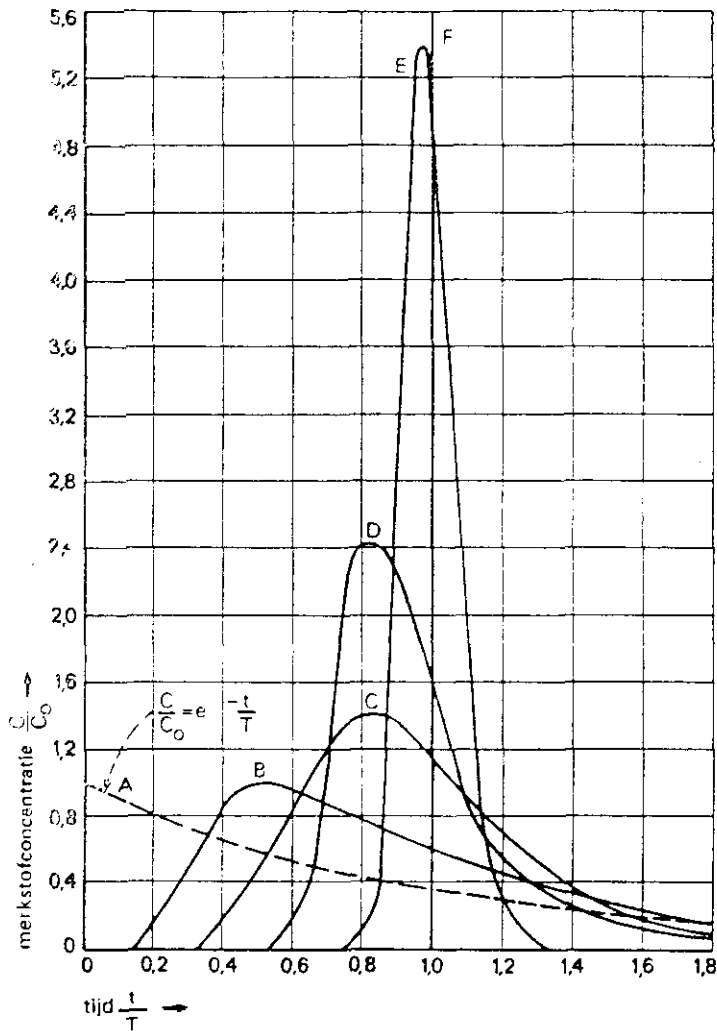


Fig. 20. Dispersiekommen voor tanks met verschillende vormen¹¹

De figuur is dimensieloos gemaakt door de gemeten tijd (t) te delen door de theoretische verblijftijd (T) en de gemeten tracerconcentratie in het effluent te delen door de concentratie die gevonden zou worden als momentaan de tracerstoot met de hele tankinhoud gemengd werd.

Lijn A is de theoretische curve voor een ideaal gemengde tank.

Lijn B is karakteristiek voor radiaal doorstroomde ronde tanks onder stabiele stroomcondities.

Lijn C karakteriseert de verblijftijdspreiding van het water in brede, relatief ondiepe, rechthoekige tanks.

Lijn D is typisch voor lange, smalle rechthoekige tanks en lijn E is karakteristiek voor in vergelijking met diepte en breedte zeer lange tanks met geleideschotten in de bochten.

Wanneer de aldus gemeten verblijftijden maatgevend zouden zijn voor het functioneren van bezinkproces, dan zouden in de praktijk rechthoekige tanks beter moeten functioneren. Dit wordt echter niet bevestigd door gepubliceerde onderzoeken. Pflanz³⁴ stelt dat zijn experimenten met ronde en rechthoekige tanks niet bevestigen dat een algemeen beter functioneren van één van beide bassintypen uitwijzen.

Billmeier⁶ definieert de effectieve verblijftijd door de volgende schematisering toe te passen. De totale toevoer van de nabezinktanks $Q + Q_R$ wordt gesplitst: de indikzone wordt alleen belast door de retourstroom Q_R . Het debiet Q doorstroomt de scheidingszone V_2 en de helderwaterzone V_3 . Wanneer V_2 en V_3 bekend zijn, kan dan de effectieve verblijftijd worden berekend (figuur 35, p. 45):

$$t_{\text{eff}} = \frac{(h_2 + h_3) \cdot A}{Q} \quad (\text{h}) \quad (8)$$

oftewel:

$$t_{\text{eff}} = \frac{(h_2 + h_3)}{q_A} \quad (\text{h}) \quad (9)$$

Figuur 21 toont het verband tussen de aldus gedefinieerde effectieve verblijftijd en de effluentkwaliteit.

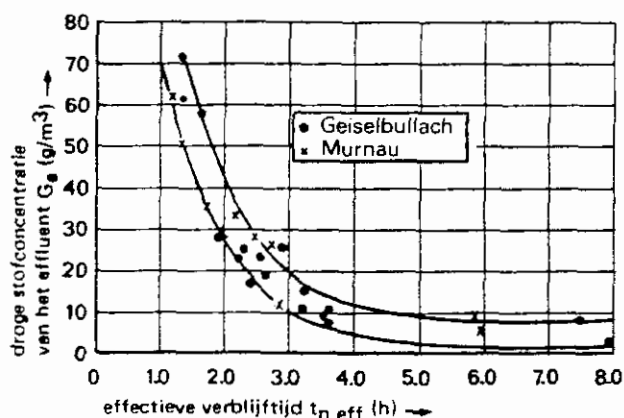


Fig. 21. Effectieve verblijftijd van het water en het drogestofgehalte in het effluent van de nabezinktank⁶

Hierdoor wordt, aldus Billmeier, de nauwe relatie tussen de flocculatie en de waterverblijftijd in de overwegend laminair doorstroomde ruimten V_2 en V_3 duidelijk aangetoond.

Volgens de theorie van Camp¹¹ wordt de bezinking altijd bepaald door de oppervlaktebelasting en is deze onafhankelijk van de diepte.

Fitch¹⁹ toont echter theoretisch en door middel van batchproeven met flocculerende suspensies aan dat het bezinkproces wel degelijk door de diepte wordt beïnvloed.

Hij concludeert dat het onverstandig zou zijn om waterverblijftijd als ontwerpfactor te verwaarlozen op grond van de theorie van Camp.

Er zijn aanwijzingen dat voor flocculerende suspensies de waterverblijftijd een zeer belangrijke factor is (zie 5.2).

Resch³⁸ heeft in de proefopstelling (zie fig. 17, p. 21) ook slibverblijftijden gemeten. Er blijkt een groot verschil te bestaan tussen de verblijftijden afhankelijk van de positie van de inloopopening. Is deze boven de slibspiegel dan blijkt het slib zich tamelijk gelijkmatig naar beneden te bewegen. Is de toevoer onder de slibspiegel dan blijkt het volgende: wordt de merkstof in de toevoer gemengd dan wordt deze al snel in de retourstroom geregistreerd; de gemiddelde slibverblijftijd lijkt kort. Wordt de tracer evenwel op de plaats van de slibspiegel in de bezinkruimte gebracht, dan blijkt de tracer zeer langzaam weg te zakken en duurt het lang voor deze in het retourslib geregistreerd wordt. Dat dit slib desondanks geen problemen geeft met bijvoorbeeld denitrificatie is te danken aan het feit, dat tussen de vlokken vers water naar boven stroomt en het slib dus vers gehouden wordt. Dit verschijnsel treedt vooral op in verticaal doorstroomde tanks, maar kennelijk toch ook in zekere mate in horizontaal doorstroomde tanks.

Camp en Hazen

Er zijn diverse modellen ontworpen, die het bezinkproces beschrijven. Het meest bekende is van Camp en Hazen¹¹.

Dit model dient als basis voor vele latere versies. Het beschrijft het bezinken van een discreet deeltje in een ideaal bekken (zie figuur 22).

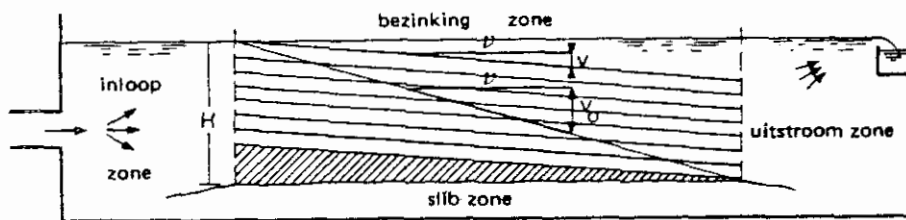


Fig. 22 . Zones in een rechthoekig, horizontaal doorstroomd, bezinkbassin voor continue bezinking¹¹

De weg die het deeltje aflegt, wordt beschreven door zijn bezink-snelheid en de horizontale watersnelheid door het bekken. De bezink-snelheid is afhankelijk van deeltjesgrootte en -vorm, dichtheidsverschillen, viscositeit en hydraulische kentallen, zoals de getallen van Reynolds en Froude. De theorie is verder ontwikkeld voor flocculente bezinking, door de deeltjesgrootte in de tijd te laten toenemen. De stroming in het bekken wordt beschouwd als ideaal verdeeld. Daarmee wordt verondersteld, dat voor deze stroming de getallen van Froude en Reynolds een geldige beschrijving geven. Reeds bezonken deeltjes zullen slechts dan weer in suspensie gaan, wanneer de watersnelheid een bepaalde grens, de sleepsnelheid, (beschreven met dezelfde grootheden als de bezink-snelheid) overschrijdt.

Zone settling (solid flux)

Enige theorieën zijn ontwikkeld voor het proces dat "zone settling" wordt genoemd. Dit is het proces waarbij bezinking optreedt met een duidelijke scheidingslijn tussen "helder" water en bezinkend slib (slibspiegel). Slibdeeltjes die zich juist onder de slibspiegel bevinden moeten alle dezelfde bezink-snelheid hebben. Dit gebeurt wanneer óf alle bezinkende delen dezelfde grootte hebben (gewoonlijk bij kunstmatige omstandigheden) óf de deeltjes samenbinden tot vlokken die of dezelfde grootte hebben of aan elkaar verbonden raken. Dit laatste treedt bij actiefslib in het algemeen op.

De ontwikkeling van een aantal belangrijke theorieën en modellen tot circa 1974 is door Fitch²⁰ behandeld in een overzichtsartikel. In het kort zal op enkele van deze modellen worden ingegaan.

Coe en Clevenger²⁰ zijn van de volgende twee aannamen uitgegaan. Ten eerste werkt de invloed van de slibretour over de gehele oppervlakte van de nabezinktank en wel overal evenveel. Ten tweede is de bezinksnelheid van de slibspiegel alleen afhankelijk van de drogestofconcentratie van het slib: $v_s = v(G)$. In het algemeen ziet dit verband bij goed bezinkbaar slib eruit als figuur 23. In 4.3.5 is uiteengezet dat de dikte van de sliblaag ook van invloed is. Deze invloed wordt buiten beschouwing gelaten.

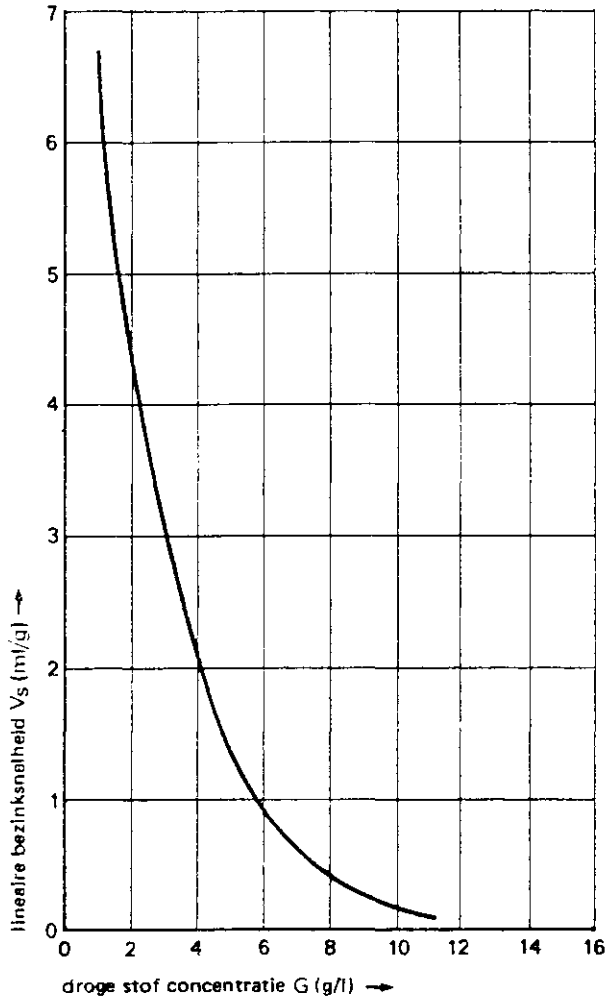


Fig. 23. Lineaire bezinksnelheid en drogestofgehalte bij goed bezinkbaar slib⁴⁶

Evenmin wordt rekening gehouden met de wijze van slibafvoer (bijvoorbeeld slibschuivers met centrale retourslibput of afzuiging met hevelleidingen) of met de vorm van de bezinktank (rond of rechthoekig). Dit wordt overigens in geen enkel model tot op heden ingebracht. Uit vele experimenten is gebleken dat de vlakken van gelijke concentraties een tamelijk horizontaal verloop hebben.

Er wordt nu een deel van de nabezinktank beschouwd, namelijk een zuil met een diepte gelijk aan die van de nabezinktank. Op elke willekeurige hoogte in de zuil is het drogestoftransport (in kg droge stof/m²/h) naar beneden ten gevolge van de zwaartekracht gelijk aan het produkt van de daar heersende concentratie en de bezinksnelheid:

$$v_s \cdot G \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{h})$$

In de nabezinktank is - in tegenstelling tot de cylinderproef - bovendien nog transport naar beneden ten gevolge van het slibretourdebiet.

Dit drogestoftransport is gelijk aan het produkt van de concentratie en het slibretourdebiet dat in de zuil naar beneden stroomt:

$$\frac{Q_r}{A} \cdot G \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{h})$$

Het drogestoftransport als gevolg van de zwaartekracht en de slibretour kan met behulp van figuur 21 worden uitgedrukt als afhankelijk van de slibconcentratie (zie figuur 24).

Beide drogestoftransporten kunnen worden gesommeerd (zie figuur 25).

In figuur 25 is een gebruikelijke concentratie van het instromende slib (G) aangegeven. Zolang de slibretourcapaciteit niet al te groot is, zal de kromme een maximum en een minimum vertonen.

De formule voor het totaal drogestoftransport luidt:

$$g_A = v_s \cdot G + \frac{Q_r}{A} \cdot G \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}) \quad (10)$$

Bij hoge belasting van de nabezinktank kan het noodzakelijk zijn dat de drogestofconcentratie van het retourslib hoger wordt dan de concentratie (G_L) die hoort bij het minimum in de kromme van figuur 23, punt b.

Bij praktijkproeven door Johnstone, Rachwal en Hanbury zijn de waargenomen drogestofconcentraties in het retourslib nooit zo hoog geweest dat de waarde G_L bereikt werd. Toch vond er tijdens hun experimenten bij hoge belastinggevallen wel degelijk een opeenstapeling van slib in de nabezinktank plaats. Bij de berekeningen ter verificatie van de theorie is daarom de waarde van de retourslibconcentratie G_r ingevuld in plaats van de G_L .

De toelaatbare drogestofbelasting (G_L) wordt bepaald door het punt b, waarvan de hoogte afhankelijk is van de bezinkbaarheid van het slib en de gekozen slibretourcapaciteit. Als de drogestofbelasting namelijk groter is dan G_L dan zal er een kritieke zone ontstaan in de nabezinktank met concentratie G_L . De droge stof kan niet even snel de kritieke zone verlaten als deze wordt aangevoerd.

Het teveel passeert de zone niet, zodat het slib accumuleert boven de kritieke zone. De slibspiegel stijgt en tenslotte stroomt het slib over de rand. Dit kan alleen door een grotere tankoppervlakte of een groter slibretourdebiet worden voorkomen (zie figuur 26).

Wanneer de drogestofbelasting kleiner is dan G_L , passeren de drogestofdeeltjes de kritieke zone sneller dan ze worden toegevoerd. De kritieke zone daalt en verdwijnt.

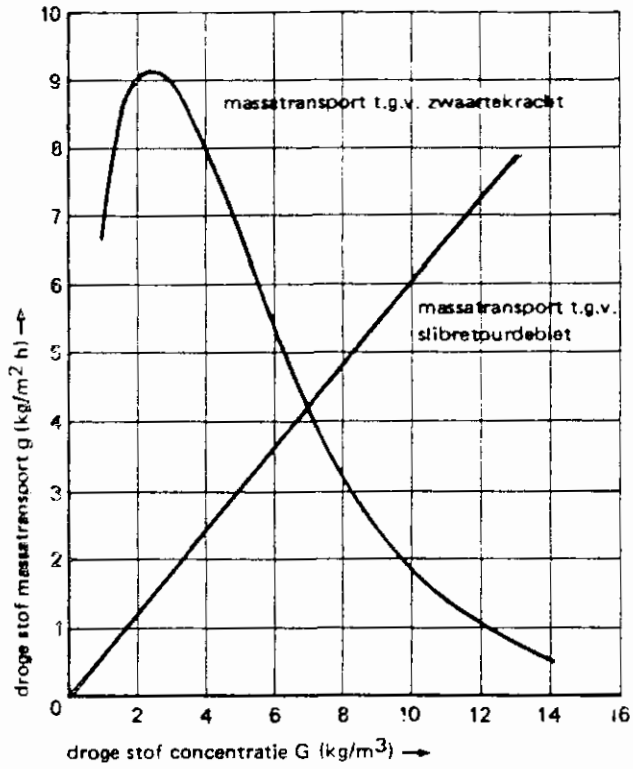


Fig. 24. Drogestofmassatransport en drogestofgehalte⁴⁶

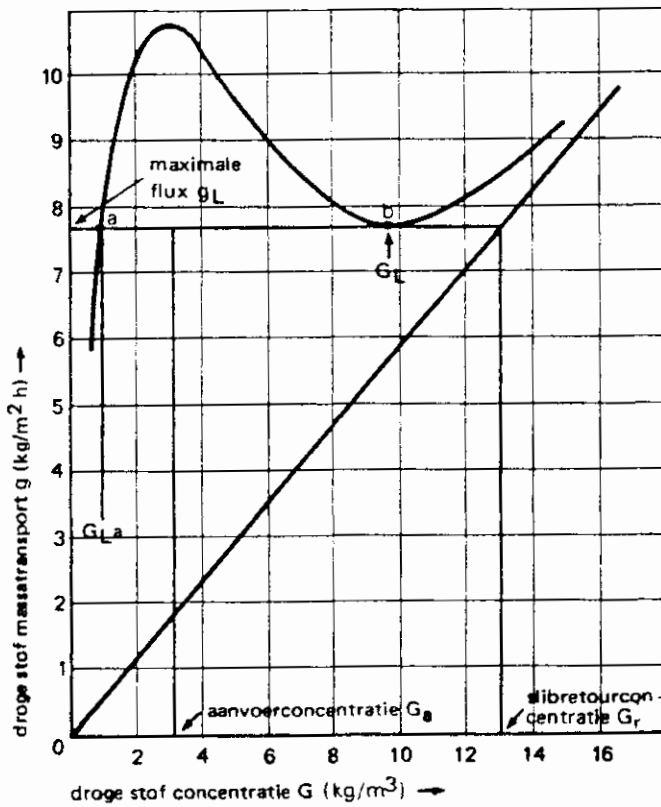


Fig. 25. Totale massatransport als functie van de drogestofconcentratie⁴⁶

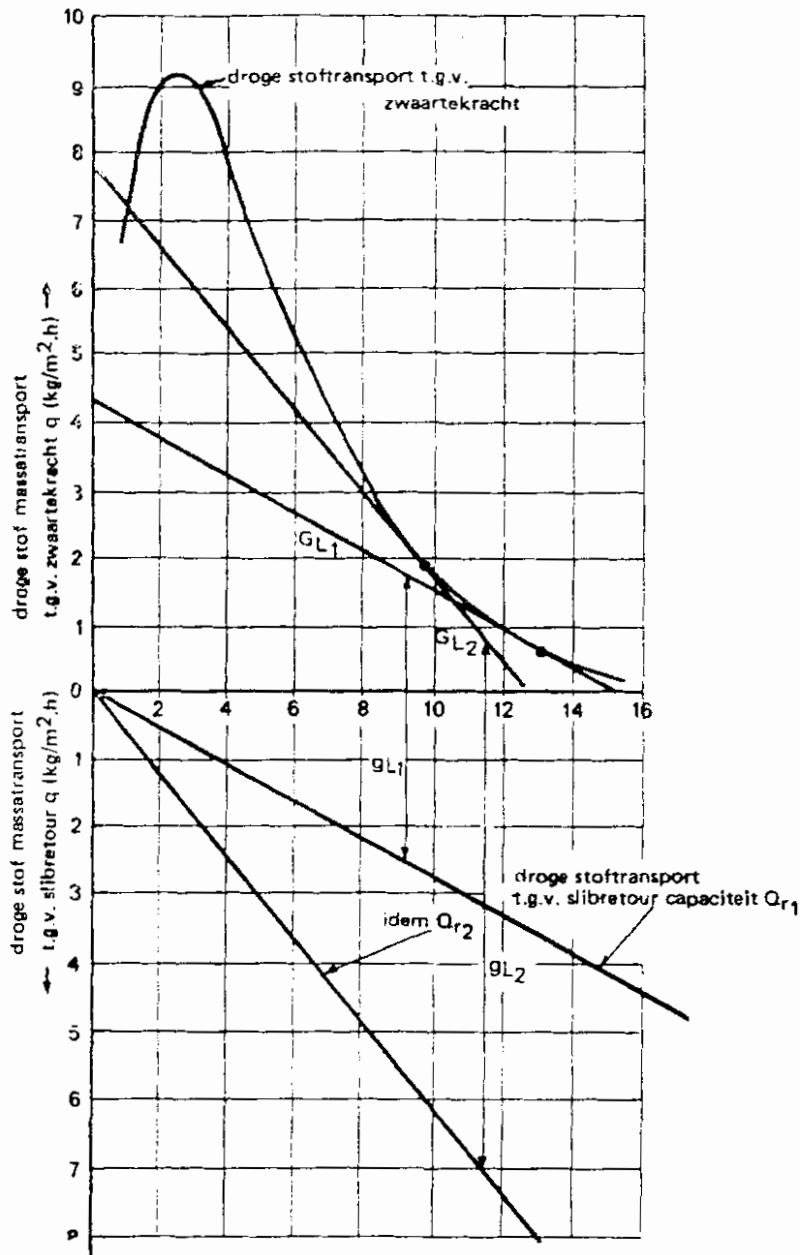


Fig. 26. Drogestofmassatransport tegen gevolgen van de zwaartekracht en verschillende slibretourdebieten en het drogestofgehalte

Dit betekent dat er volgens deze theorie geen eisen aan de diepte worden gesteld. Immers er dient te allen tijde voorkomen te worden, dat een kritieke zone kan optreden.

Punt a in figuur 25 geeft ook een mogelijke kritieke zone weer. Deze is echter instabiel en zal waarschijnlijk niet voorkomen in de praktijk. Alleen bij zeer slecht bezinkbaar slib, wanneer het influent wordt gemengd met voldoende water van de helderwaterlaag, zou het mogelijk zijn een concentratie G_0 en dus een kritieke zone te krijgen die bij punt a hoort.

Door verhoging van de slibretourcapaciteit schuift de kromme van figuur 25 omhoog zodat g_L toeneemt. Het maximum en het minimum van de kromme naderen naar elkaar totdat zij bij een zekere kritieke waarde voor Q_R/A aan elkaar gelijk zijn. Boven deze $(Q_R/A)_{krit.}$ is er geen waarde voor g_L , maar wordt de maximale drogestofbelasting bepaald volgens (10) waarin voor de concentratie wordt ingevuld de voedingsconcentratie G_a en de bijbehorende slibbezinkselheid v_a :

$$g_L = v_a \cdot G_a + \left(\frac{Q_R}{A}\right) \cdot G_a \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}) \quad (11)$$

De drogestofbelasting die wordt toegepast is:

$$g_t = G_a \cdot \frac{Q + Q_R}{A} \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}) \quad (12)$$

Deze laatste moet kleiner zijn dan g_L :

$$G_a \cdot \left(\frac{Q}{A} + \frac{Q_R}{A}\right) \leq v_a \cdot G_a + G_a \cdot \frac{Q_R}{A} \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}) \quad (13)$$

of:

$$\frac{Q}{A} \leq v_a \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (14)$$

Dat wil zeggen dat bij hoge slibretourcapaciteiten de oppervlaktebelasting lager moet zijn dan de bezinkselheid van het slib-watermengsel (fig. 27).

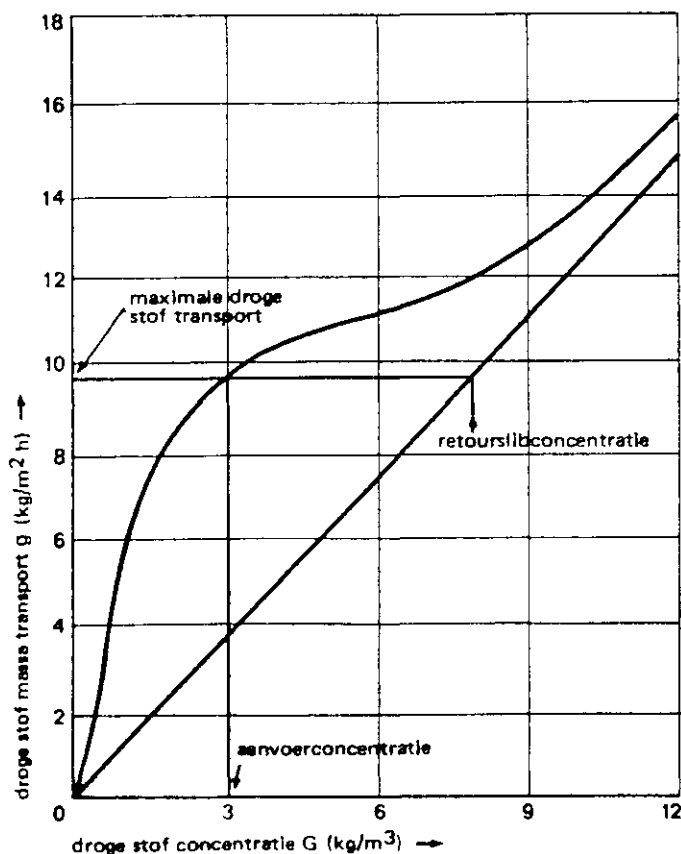


Fig. 27. Totaal drogestofmassatransport en drogestofconcentratie, bij een grotere retourslibcapaciteit dan de kritieke capaciteit en bij slecht bezinkbaar slib^{4,6}

Dit is een van de criteria waaraan voldaan moet worden wil men een efficiënte nabezinktank ontwerpen. (14) geldt ook indien (Q_r/A) lager is dan $(Q_r/A)_{\text{krit.}}$, wanneer de beginconcentratie G_a kleiner is dan de waarde G_o uit figuur 27.

Dit zal evenwel in de praktijk vrijwel niet voorkomen.

De waarde van $(Q_r/A)_{\text{krit.}}$ kan als volgt worden bepaald.

De bezinksnelheid wordt beschreven als functie van de beginconcentratie in de volgende vorm.

$$v_s = v_o \cdot e^{-kG} \quad (\text{m/h}) \quad (15)$$

waarin v_o en k constanten zijn die experimenteel vastgesteld moeten worden.

In de praktijk⁴⁶ blijkt deze vorm veelal goed te passen op gemeten waarden.

Substitutie van (10) in (15) levert:

$$g_A = v_o \cdot G \cdot e^{-kG} + \frac{Q_r}{A} G \quad (\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}) \quad (16)$$

Tweemaal differentiëren en oplossen voor (Q_r/A) geeft:

$$\left(\frac{Q_r}{A}\right)_{\text{krit.}} = v_o e^{-2} = 0.13 \cdot v_o \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (17)$$

6.3 Samendrukkingstheorieën

Coe en Clevenger zagen dat de daalsnelheid in "batch" proeven - voor sommige slibsoorten - in de compressiefase evenredig is met de slibhoogte. Daardoor waren ze in staat om af te leiden dat - voor die slibsoorten - de samendrukking een functie van de tijd is. Deze "wet" blijkt eigenlijk alleen toepasbaar te zijn bij toepassing in de erts-metallurgische sfeer. Coe en Clevenger: "Voor deze slibsoorten is de uiteindelijke consistentie een functie van de tijd gedurende welke het slib in de compressiefase verblijft". Zij leggen daarbij de nadruk op het feit dat bij slibsoorten "met een zeer visceuze homogene structuur", "deze wet van samendrukking als functie van tijd wellicht niet opgaat".²⁰

Ondanks deze waarschuwing van Coe en Clevenger heeft deze "wet" veel ingang gevonden. Fitch²⁰ behandelt in zijn overzichtsartikel de samendrukkingstheorieën van Roberts, Michaels en Bolger en Kos.

Het commentaar van Fitch op deze modellen komt neer op het feit dat het laatste woord nog niet is gevallen.

6.4 Theorie van Merkel

Merkel^{29,30,31} heeft van een groot aantal bezinkproeven de bezinksnelheid en het corresponderende slibvolume in grafiek gezet (zie figuur 28). Volgens deze grafiek kan zeer nauwkeurig het begin van de samendrukking-fase worden aangegeven; dit ligt bij de knikpuntsconcentratie. Deze weergave is onafhankelijk van de slibindex. De drogestofprofielen in nabezinktanks die Pflanz³⁴ heeft gevonden, vertonen nagenoeg horizontale vlakken van gelijke drogestofconcentratie. Hieruit volgt dat het effluent naar boven en het ingedikte slib naar beneden uit de sliblaag wordt afgegeven.

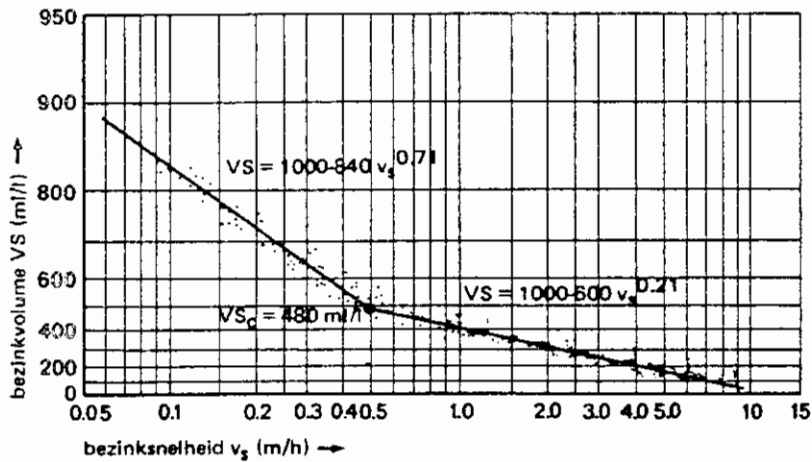


Fig. 28. Bezinksnellheid en slibvolume²⁹

Een continuïteitsvoorwaarde kan nu worden opgesteld: aan de slibspiegel heerst de drogestofconcentratie (G_o), daarbij behoort een bezinksnellheid (v_{so}). De gehele sliblaag zakt bovendien met een snelheid (Q_r/A).

Aan de oppervlakte is het drogestoftransport minstens gelijk aan het drogestoftransport over de bodem:

$$(v_{so} + \frac{Q_r}{A}) \cdot G_o \cdot A \geq Q_r \cdot G_r \quad (\text{kg/h}) \quad (18)$$

Invoering van retourverhouding R en oppervlaktebelasting q_A levert:

$$q_A \leq \frac{v_{so}}{R} \cdot \frac{G_o}{G_r - G_o} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (19)$$

Vlak onder de slibspiegel heerst bij benadering de drogestofconcentratie van de aanvoer, zodat met behulp van (3) (pagina 6):

$$q_A \leq \frac{v_{sa}}{R} \cdot \frac{G_a}{G_r - G_a} = v_{sa} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (20)$$

Deze vergelijkingen beschrijft de scheiding van slib en water, met de functies van figuur 28.

Het indikproces begint na het bereiken van de concentratie G_c . Wanneer $G_a \geq G_c$, dan geldt (20) ook voor het indikproces. Anders moet ingevuld worden $G_o = G_c$; in dat geval ontstaat uit (19) en (3):

$$q_A \leq \frac{v_{sc}}{G_a/G_c \cdot (1+R) - R} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (21)$$

Deze dimensioneringsgrondslag is grafisch weergegeven in het linkerveld van figuur 30.

Het indikproces wordt volgens Merkel niet alleen door de oppervlakte bepaald, maar is tevens tijdsafhankelijk. Deze afhankelijkheid leest Merkel af uit figuur 29.

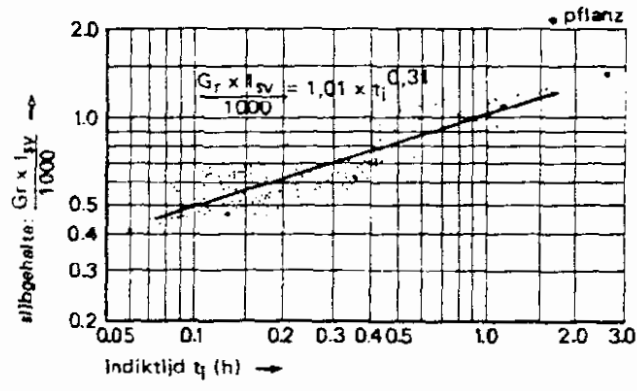


Fig. 29. Indikproces van actiefslib in de nabezinktank²⁹

Merkel heeft overigens naar het indikproces zelf geen onderzoek verricht: "Vooral de invloed van de sliblaagdikte, de verblijftijd van de droge stof in de indikzone en van de door bassinvorm, hydraulische belasting en slibruiming veroorzaakte stromingen moeten worden onderzocht". Aan de Lehrstuhl für Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität München, is hieraan onderzoek verricht door Günthert en Resch^{41, 42}.

De indiktijd definieert Merkel als volgt:

$$\text{indiktijd} = \frac{\text{het door het indikkende slib ingenomen volume}}{\text{slibretourdebiet}}$$

Te zamen met de formule die in figuur 29 vermeld is, ontwikkelt Merkel een formule voor de voor indikking benodigde sliblaagdikte (middenveld van figuur 30).

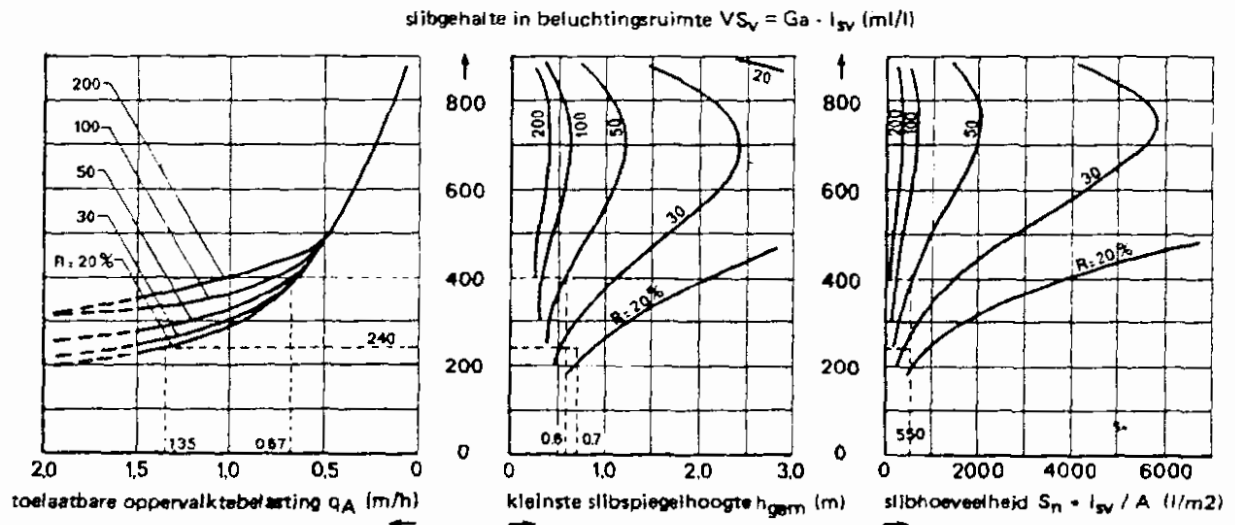


Fig. 30. Dimensionering van een horizontaal doorstroomde nabezinktank volgens Merkel²⁹

$$h_1 \geq q_A \cdot R \cdot \left(\frac{G_r \cdot I_{sv}}{1010} \right)^{3,2} - \left(\frac{G_o \cdot I_{sv}}{1010} \right)^{3,2} \quad (m) \quad (22)$$

De formule van figuur 29 gebruikt Merkel tevens om te schatten hoe de concentratie-opbouw in de indikkende laag is.

Integratie levert de hoeveelheid droge stof in deze laag (zie figuur 30, rechter veld). Door deze berekening te verrichten voor de twee belastinggevallen (droogweeraanvoer resp. regenweeraanvoer) kan berekend worden hoeveel slib er extra moet worden gebufferd in de nabezinktank tijdens regen. De daarvoor benodigde hoogte (h_4) wordt dan:

$$h_4 = \frac{S}{A \cdot G_c} \quad (m) \quad (23)$$

Merkel gaat hierbij uit van een geschematiseerd drogestofprofiel in de nabezinktank (zie fig. 31). De horizontale stroomsnelheden van de verschillende lagen zijn niet gelijk, maar zoals in het rechterveld van fig. 31 is weergegeven.

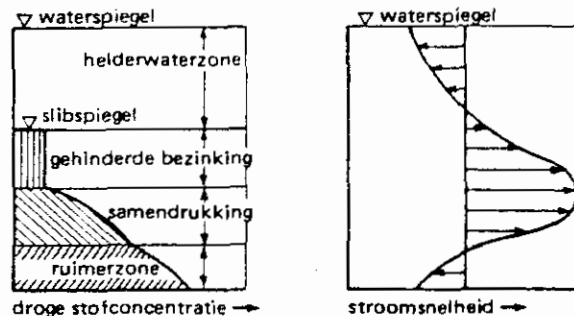


Fig. 31. Drogestof- en snelheidsprofiel in een horizontaal doorstroomde nabezinktank²⁹

5 Kalbskopf en de ATV-richtlijnen

Kalbskopf²⁵ is op deze weg verder gegaan.

Hij komt tot de definiëring van de slibvolumebelasting. De werking van de nabezinktank wordt gezien als niet alleen afhankelijk van de oppervlaktebelasting q_A en het drogestofgehalte van de aanvoer G_a , maar eveneens van de bezinkbaarheid van het slib. Dit laatste wordt dan uitgedrukt in de verdunde slibindex I_{sv} . De slibvolumebelasting wordt dan:

$$v_{sA} = q_A \cdot G_a \cdot I_{sv} \quad (1/m^2 \cdot h) \quad (24)$$

In deze ontwerpparameter is de slibretourcapaciteit niet verdisconteerd. Bloodgood⁹ heeft als richtlijn gegeven dat de slibretourcapaciteit zo groot moet zijn, dat het drogestofgehalte van het retourslib niet hoger oploopt dan de slibdichtheidsindex (beide hier in % uitgedrukt. Deze index is de reciproke waarde van de volume-index. De vereiste slibretourcapaciteit volgt dan uit (4). Omdat de bezinking in de nabezinktank beter verloopt dan in de maatcylinder, stelt Kalbskopf een 20% hogere waarde voor, zodat:

$$G_r = \frac{1200}{I_{sv}} \quad (kg/m^3) \quad (25)$$

Deze richtlijn is wel eenvoudig maar lijkt tamelijk willekeurig. Vosloo geeft aan dat de factor 1200 kan variëren. Hij vindt waarden tussen 500 en 2000.

De metingen die Pflanz aan de nabezinktank van Celle heeft uitgevoerd, hebben de resultaten opgeleverd, die in figuur 32 en tabel 4 zijn weergegeven.

Q (m ³ /h)	q _A (m/h)	t (h)	G _a (g/l)	G _A (kg/m ² .h)	VS _e (ml/l)	G _e (mg/l)
900	1,14	2	2,89	3,30	0,20	18
			4,15	4,73	0,60	42
			5,50	6,27	1,40	81
600	0,76	3	3,24	2,46	0,05	5
			4,20	3,19	0,20	13
			5,10	3,88	0,60	44
			5,80	4,41	1,00	63
			6,30	4,79	1,40	81
450	0,57	4	4,02	2,29	0,10	9
			4,74	2,70	0,15	13
			5,52	3,15	0,30	23
			6,24	3,56	0,50	36
			6,81	3,88	0,70	48
			7,19	4,10	0,85	56
			7,71	4,40	1,20	74
360	0,45	5	4,83	2,17	0,10	9
			5,62	2,53	0,20	18
			6,37	2,87	0,30	23
			6,82	3,07	0,40	30
			7,90	3,56	0,70	48
			8,65	3,89	0,95	60
300	0,38	6	5,82	2,21	0,10	9
			6,44	2,45	0,20	18
			7,47	2,84	0,30	23
			8,03	3,05	0,45	33
			9,08	3,45	0,60	42
			10,31	3,92	1,00	63
250	0,32	7,2	6,82	2,18	0,10	9
			9,95	2,83	0,20	18
			10,77	3,45	0,40	30

Tabel 4. Samenvatting van de meetgegevens van Celle
(augustus - november 1964)³⁴

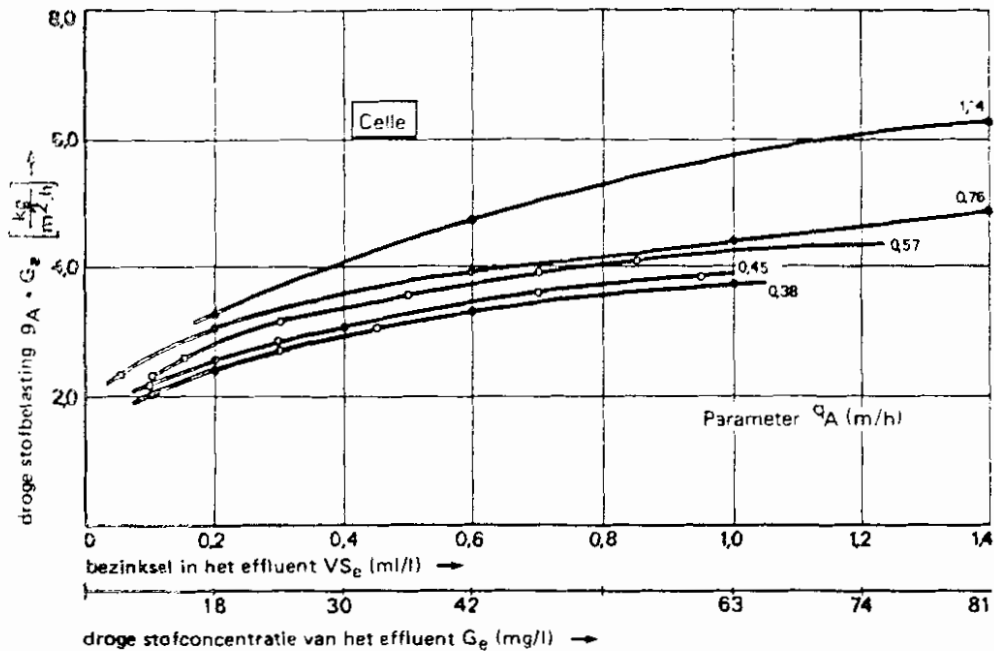


Fig. 32. Drogestofbelasting, oppervlaktebelasting en effluentkwaliteit^{3 4}

Door het drogestofgehalte van de aanvoer te vermenigvuldigen met de gemiddelde slibindex (volgens Pflanz 80 ml/g), is het slibvolume berekend en grafisch weergegeven (figuur 33).

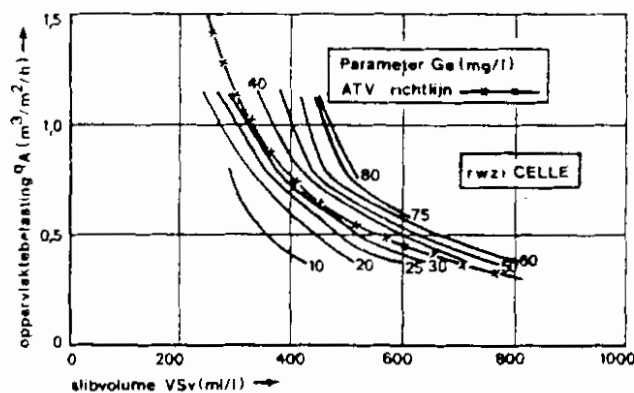


Fig. 33. Drogestofgehalte van het effluent, oppervlaktebelasting en slibvolume (Celle) en de ATV-richtlijn voor de toelaatbare oppervlaktebelasting

Dezelfde procedure is gevolgd bij de bewerking van de gegevens betreffende de zuiveringsinrichting van Fallingbostel (zie figuur 34).

Bij deze laatste zuiveringsinrichting was de verdunde slibvolume-index minder constant, er is gemeten bij waarden van 155, 201 en 306 ml/g.

Bestudering van de figuren 33 en 34 leidt tot de volgende conclusies: Bij hoge q_A ($> 0,7 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$) is de gevoeligheid vooral bij Celle voor veranderingen van het slibvolume bijzonder groot.

De ATV-richtlijnen geven de mogelijkheid om, wanneer een te grote diepte gebouwd zou moeten worden, het totaal oppervlak van de nabezinktank als compensatie te vergroten.
 Wanneer de concentratie in de beluchting bij regen te ver zou afnemen kan besloten worden de slibretourcapaciteit, binnen zekere grenzen, te verhogen.
 Wolf⁹ geeft als bedrijfservaring aan dat bij slibvolumebelastingen kleiner dan 300 l/m².h en bij normale slibretourverhoudingen de concentratie van filtreerbare droge stof onder 30 mg/l ligt.

6 Billmeier

Billmeier^{6,7,8} heeft het werk van Pflanz, Merkel en Kalbskopf verder ontwikkeld en komt tot het volgende model (figuur 35).

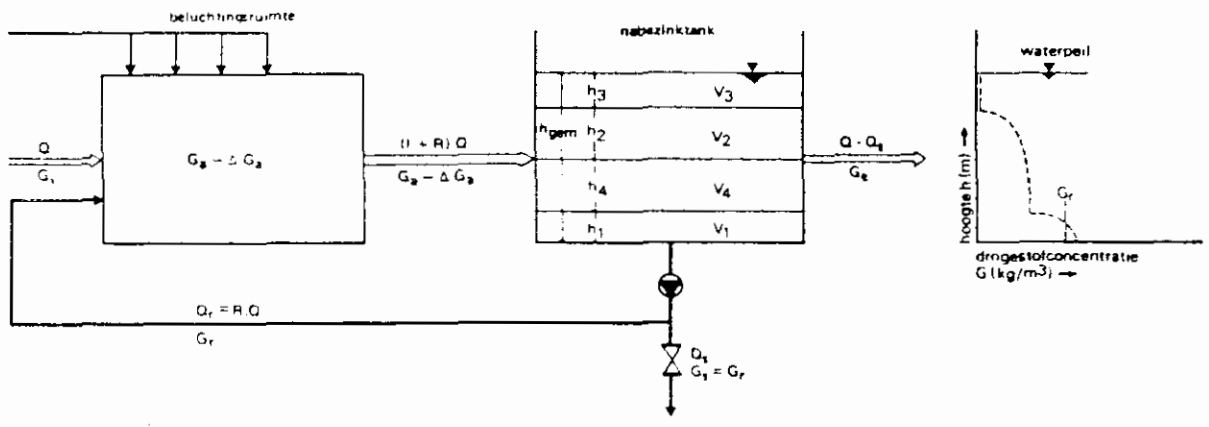


Fig. 35. Schematische weergave van het actief-slibstelsysteem

Rechts naast het model is een veel voorkomend drogestofprofiel in de nabezinktank geschetst, dat heeft geleid tot dit model (vergelijk figuur 31, p. 41).

In deze schematisering van het nabezinkproces worden vier aparte processen onderscheiden, die ieder hun eigen plaats in de tank hebben. Onderin de tank wordt het slib ingedikt, het proces in deze ruimte V₁ wordt onder andere beïnvloed door het ruimersysteem. Billmeier heeft vooral onderzoek gedaan aan de scheidingsruimte V₂ en de helderwaterzone V₃. De bovengrens van V₂ wordt gedefinieerd door de meetkundige plaats van de punten met een drogestofconcentratie van 0,050 kg/m³. De benedengrens van V₂ wordt bepaald door de grootste van de twee waarden: G_a of G_c. De ruimten V₂ en V₃ zijn in 34 onderzoeken aan technische nabezinktanks bepaald (zie figuur 36).

Billmeier komt op grond van zijn onderzoeken tot de definiëring van de specifieke ruimtebelasting:

$$\frac{G_A \cdot (1 + R)}{h_{gem.}} \quad (l/m^2 \cdot h)$$

Het verband tussen effluentkwaliteit en specifieke ruimtebelasting wordt in formulevorm gegeven in (26) en grafisch in figuur 37.

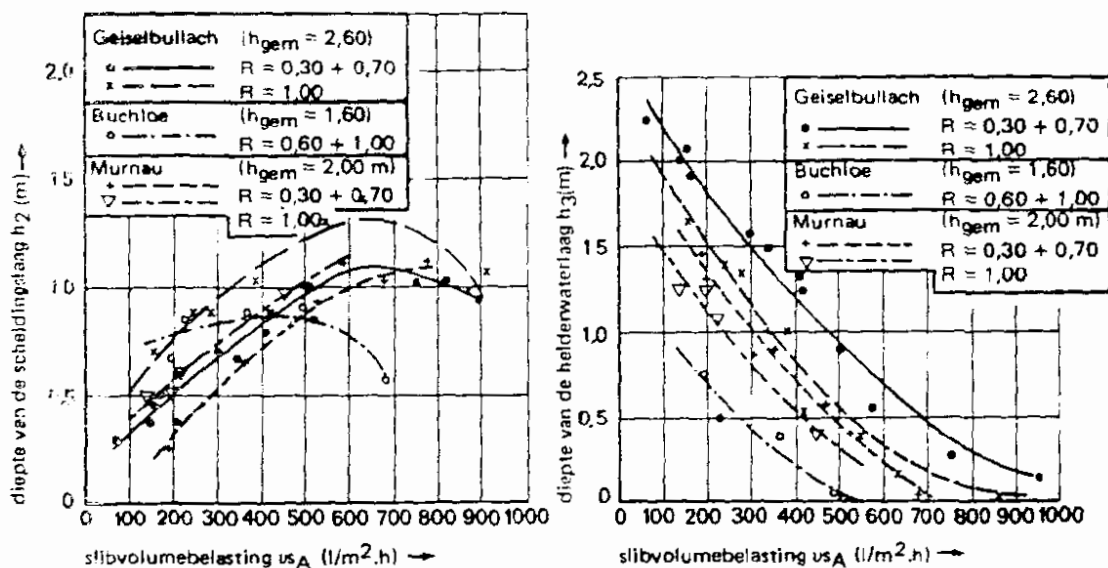


Fig. 36. Diepte van scheidingslaag en helderwaterlaag afhankelijk van de slibretourverhouding en de gemiddelde tankdiepte⁶

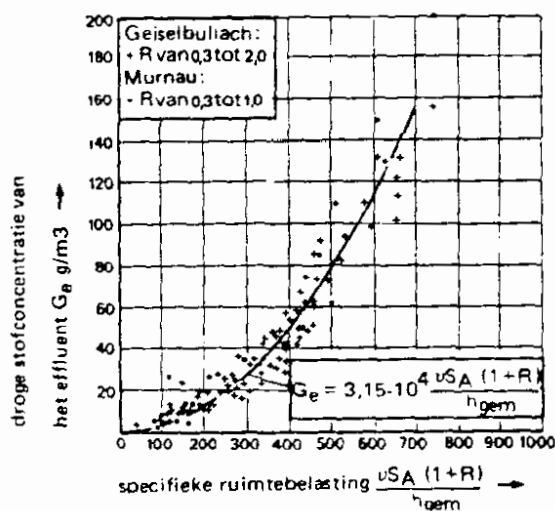


Fig. 37. Specifieke ruimtebelasting en drogestofbelasting in het effluent van de nabezinktank⁶

$$G_e = 3,15 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{u_A \cdot (1+R)^2}{h_{gem}} \quad (\text{mg/l}) \quad (26)$$

Formule (26) en figuur 36 kunnen worden samengevat. Bij $h_{gem} \leq 3,0$ m, $G_e = 10,30$ en 60 mg/l kunnen de vereiste diepten voor de scheidingszone en de helderwaterzone vastgesteld worden. Deze zijn in figuur 38 weergegeven.

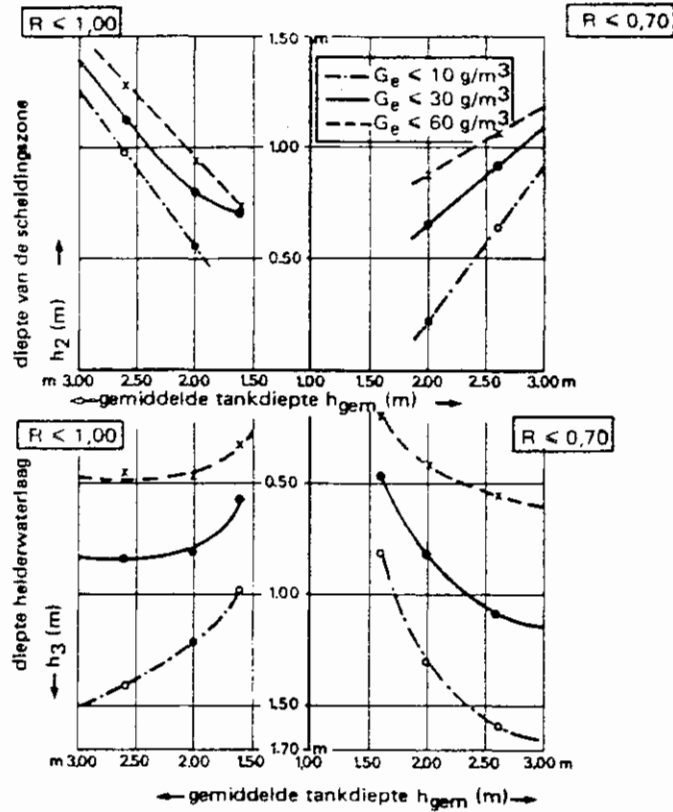


Fig. 38. Bepaling van de vereiste diepten voor scheidings- en helderwaterzone afhankelijk van gemiddelde tankdiepte en slibretourverhouding voor $G_e = 10, 30$ en 60 mg/l^6

Billmeier betoogt voorts dat de verschillende ruimten in de nabezinktank verschillend belast worden: de indikzone wordt slechts door het slibretourdebiet belast, de scheidingszone en de helderwaterzone worden hydraulisch alleen door het effluentdebiet belast. Wanneer nu de afmetingen van de verschillende ruimten bekend zijn, kan de effectieve verblijftijd worden berekend als in (27).

$$t_{\text{eff}} = \frac{(h_2 + h_3) \cdot A}{Q} = \frac{h_2 + h_3}{q_A} \quad (\text{h}) \quad (27)$$

Het verband tussen de drogestofconcentratie in het effluent en de effectieve verblijftijd van de metingen wordt weergegeven in figuur 21, p. 30. Volgens Billmeier wordt bevestigd dat de flocculatie afhankelijk is van de effectieve verblijftijd bij de overwegend laminaire stromingen. Er is een duidelijke samenhang tussen droge stof in het effluent en de specifieke ruimtebelasting volgens figuur 37. Deze specifieke ruimtebelasting heeft op grond van haar dimensies ($1/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) de voor flocculatie belangrijke parameter tijd als maatgevende grootte.

6.7 Commentaar

6.7.1 *zone settling*

Zonder op de theoretische inhouden in te gaan wordt vermeld, dat een aantal onderzoekers heeft bijgedragen aan verdere ontwikkeling van de zone settling-theorie. Kynch²⁸, Talmage en Fitch²⁰, Dick^{14,15,16}, White^{46,47,48} worden hierbij genoemd.

Volgens deze theorie is de enige concentratie die zich in een stationaire toestand kan handhaven de kritieke concentratie.

Een zone met deze concentratie kan echter alleen bestaan in een vol- of overbelaste nabezinktank. Zo is deze settling-theorie niet in staat om het gehele bezinkgedrag logisch te verklaren.

De verschillen tussen de theorieën en de meetgegevens, die ter staving van de bijbehorende theorie worden gepubliceerd, geven soms onderling sterk afwijkende beelden; "of de verschillen in beeld ook werkelijk afwijkende gedragingen van het slib weergeven of alleen een gevolg zijn van afwijkende meetmethoden is nog een open vraag", aldus Fitch²⁰. Munch en Fitzpatrick³² hebben proeven uitgevoerd aan een aantal nabezinktanks van de West-Southwest Sewage treatment works van Chicago. Hun eindconclusie luidt, dat de solid flux-theorie (zone settling) niet geschikt blijkt te zijn om aan te geven hoe men nabezinktanks moet bedienen. "Niet-ideale omstandigheden zoals dichtheidsstromen en de belemmering van slibindikking komen kennelijk voor bij hoge hydraulische belastingen".

Deze verschijnselen worden niet in de theorie in beschouwing genomen. Het gevolg is dat in de praktijk de maximaal toelaatbare drogestofbelasting veel lager is dan het theoretisch maximum.

6.7.2 *samendrukkingstheorieën*

Alle samendrukkingstheorieën gaan er van uit dat de bezinksnelheden in de samendrukkingsfase groter worden door kanaalvorming. Stilzwijgend veronderstelden Coe en Clevenger, dat het maatgevende massatransport niet in de samendrukkingsfase zou optreden, omdat dat vergroot zou kunnen worden door vergroting van de sliblaagdikte.

Kanaalvorming treedt zonder twijfel op. Dikwijls is het goed zichtbaar. Er worden verschillende mechanismen voorgesteld volgens welke kanaalvorming zou optreden. Geen ervan is volgens Fitch²⁰ plausibel. Het compressiepunt in de bezinkcurve wordt algemeen beschouwd als behorend bij het moment dat het slib vlak onder de slibspiegel in de samendrukkingsfase komt.

Uit het behandelde kan volgens Fitch worden afgeleid dat al het slib vlak na het compressiepunt inderdaad in de samendrukkingsfase is, maar dat het slib vlak onder de slibspiegel nog net voor het compressiepunt niet noodzakelijk in "zone settling" is. Ook is vaak in de bezinkcurve geen compressiepunt aan te wijzen. Dit kan een gevolg zijn van een zwakke kanaalvorming, en in ondiepe zones is de invloed op de bezinksnelheid klein. Mogelijk ontstaat de limiterende concentratie in een regio van door kanaalvorming verhoogde bezinksnelheden, maar er is nog geen methode ontwikkeld om deze door middel van batch-proeven te localiseren.

6.7.3 *Duitse onderzoeken*

De bijdrage van Merkel betreffende de knikpuntsconcentratie is belangrijk. Met name de constatering dat het slib, dat tijdens verhoogde aanvoerdebieten in de nabezinktank wordt gebufferd, de knikpuntsconcentratie heeft.

De uitwijding van Merkel over het indikproces onderin de nabezinktank is vooralsnog alleen theoretisch onderbouwd.

Als kwalitatieve benadering is de bijdrage van Merkel zeer belangrijk. De kwantitatieve waarde ervan kan pas worden beoordeeld, wanneer specifiek gericht onderzoek, zoals dat van Günthert en Resch, zal zijn verricht.

Uit figuur 30 (p. 40) linkerveld, volgt dat bij hoge oppervlaktebelastingen de slibretourverhouding van invloed wordt en wel zo dat bij een grotere R de oppervlaktebelasting mag toenemen bij gelijkblijvend slibvolume. Dit is in overeenstemming met de solid flux-theorie en met de WRC richtlijnen, maar blijkt in tegenspraak met de bevindingen van Pflanz en Billmeier. De effluentkwaliteit wordt slechter bij grotere retourdebieten. Als gevolg van verhoogde turbulentie wordt de stoorzone nabij de inloopconstructie groter ten koste van $(V_2 + V_3)$ (zie figuur 6, p. 8).

Merkel heeft zijn metingen verricht aan een compactinstallatie, waarvan de slibretourdebieten niet gemeten konden worden. Zijn berekeningen, waarin de slibretourdebieten een rol spelen, zijn dan ook niet op waarnemingen, maar op theoretische afleidingen gebaseerd.

Pflanz heeft metingen verricht aan zuiveringsinrichtingen die een slibbelasting hadden van 0,22, 0,87 en 1,41 kg BZV/kg droge stof per dag; Billmeier's zuiveringsinrichtingen werden met 0,34, 0,49 resp. 0,61 kg BZV/kg droge stof per dag belast. Al deze inrichtingen vertonen een breed overgangsgebied voor wat betreft de drogestofconcentratie van het effluent als functie van de belasting. Wanneer hiermee de metingen van Johnstone, Rachwal en Hanbury worden vergeleken, (slibbelasting van Ash Vale 0,05 kg BZV/kg droge stof per dag), lijkt het zeer waarschijnlijk (het staat niet als zodanig omschreven), dat een dergelijk breed tussengebied afwezig is: gewoonlijk is het drogestofgehalte in het effluent van Ash Vale minder dan 5 mg/l, uitgezonderd de tijden dat er slib uitgespoeld wordt.

De auteurs schrijven de zeer goede effluentkwaliteit toe aan de dekenfiltratie; er is een zeer duidelijke slibspiegel aanwezig. Mogelijk zweeft in het actief-slibmengsel van een hoger belaste zuiveringsinrichting meer licht materiaal, dat alleen door voldoende flocculatie tot bezinken kan worden gebracht.

Zeer interessant in verband met het voorstel van Billmeier om oppervlakte te sparen door in de diepte te bouwen (op grond van zijn "specifieke ruimtebelasting"), is het onderzoek van Sickert³⁹.

Deze heeft geëxperimenteerd met rechthoekige tanks van 18 m lang, 6 m breed en 7,4 tot 5,8 m diep. De lengte van de tanks is in drie delen verdeeld door circa 4 m diepe tussenschotten. Het slib wordt door kettingruimers getransporteerd.

De tank gedraagt zich als een verticaal doorstroomde tank. Oppervlaktebelastingen van 2 tot 2,5 m³/m².h zouden kunnen worden toegepast om een voldoende effluentkwaliteit te waarborgen.

Ook Resch heeft aan diepe verticaal doorstroomde nabezinktanks gemeten⁴². Deze onderzoekingen tonen duidelijk de hoge hydraulische belastbaarheid van deze tanks aan.

7 DIMENSIONEREN VAN NABEZINKTANKS VOLGENS RICHTLIJNEN VAN EPA, WRC EN ATV

7.1 EPA-richtlijnen (Environmental Protection Agency)

De geraadpleegde literatuur levert slechts enkele duidelijke aanwijzingen in welke richting de theorieën moeten worden omgezet in praktische uitvoeringen.

De EPA³⁵ volstaat met de opmerking dat het zeer de vraag is of een kromme (figuur 23, p. 33) die resulteert uit een groot aantal bezinkproeven ook werkelijk het gedrag van het slib in de bezinktank weergeeft: "Desondanks is deze benadering tot nu toe de beste als het gaat om het voorspellen van de drogestoftransportcapaciteit uit bezinkproeven". Als ontwerprichtlijn geeft de EPA de volgende tabel (tabel 5).

behandelingstype	hydraulische belasting m ³ /m ² .h		drogestofbelasting * kg/m ² .h		diepte m
	gemiddeld	piek	gemiddeld	piek	
oxydatiebedden	0,67-1,0	1,7-2,0	-	-	3,0-3,7
actiefslib (lucht, zonder extended aeration) **	0,67-1,3	1,7-2,0	4-6	10	3,7-4,6
actiefslib (met extended aeration) **	0,33-0,67	1,3	4-6	10	3,7-4,6
actiefslib (zuivere O ₂ met voorbezinking)	0,67-1,3	1,7-2,0	5-7	10	3,7-4,6

Tabel 5. Typische ontwerpparameters voor nabezinktanks, volgens EPA

* De toelaatbare drogestofbelasting wordt gewoonlijk bepaald door de indikeigenschappen van het slib bij lage bedrijfstemperaturen.

** ultralaag belaste installatie (ca. 0,05 g BOD/g d.s. d)

7.2 WRC-richtlijnen (Water Research Centre)

Het WRC heeft voor de beschrijving van de bezinkbaarheid van het slib de SSVI geïntroduceerd (zie 4.4).

De theoretische achtergrond is de solid flux theorie⁴⁶.

Op grond van proeven heeft White gevonden dat er een sterke correlatie is tussen de geroerde slibindex en de met hulp van (16) daarbij behorende berekende maximale drogestofbelasting (zie figuur 39; de slibdichtheidsindex SSD hierin is gelijk aan $100/SSVI$). De getrokken lijn is een "best-fit" lijn die de berekende drogestofbelasting benadert binnen grenzen $\pm 20\%$.

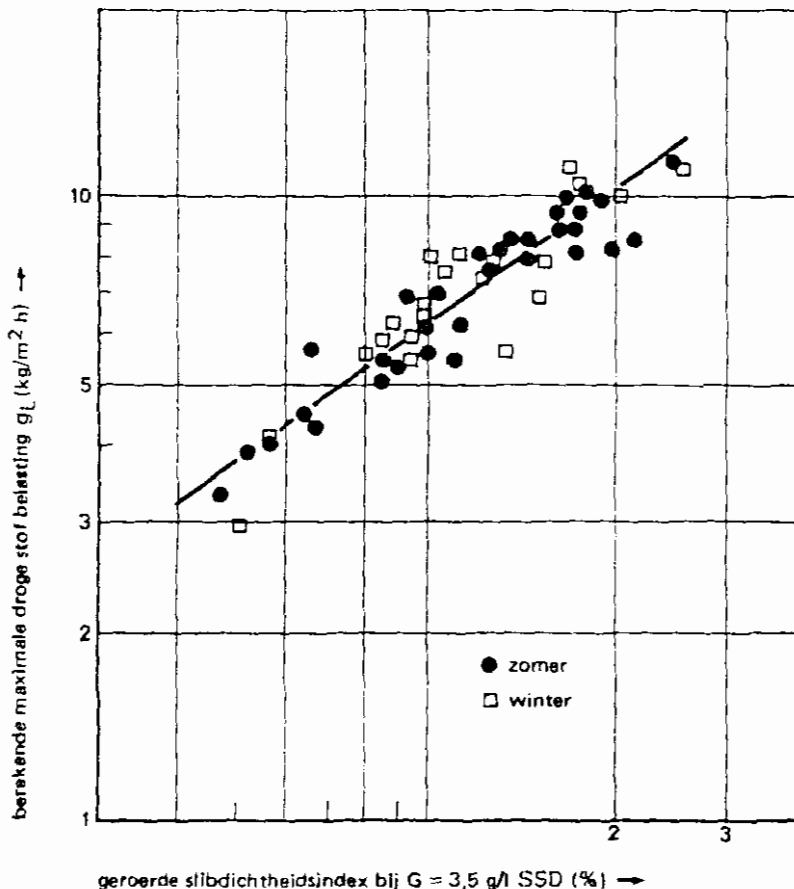


Fig. 39. Geroerde slibdichtheid en de berekende maximale drogestofbelasting bij een slibretourcapaciteit als (Q_r/A) van $0,6 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}^{4/6}$

Dergelijke lijnen kunnen eveneens worden geconstrueerd voor andere slibretourdebieten. Deze zijn afgebeeld in het tweede kwadrant van fig. 40. In het eerste kwadrant is de balans opgesteld, d.w.z. de toegepaste drogestofbelasting is het produkt van het drogestofgehalte G_a en de totale toevoer naar de nabezinktank $(Q + Q_r)$.

Deze gegevens zijn voor circa 30 installaties getoetst. De gemeten en de berekende maximale drogestofbelastingen zijn vergeleken. Sommige nabezinktanks worden bedreven met een slibretour kleiner dan de kritische waarde en bij andere is de slibretour groter dan de kritische waarde. Bij de laatste wordt de voorspelde maximale drogestofbelasting bepaald aan de hand van (11). De bruikbaarheid van de voorspelling blijkt groot te zijn, behalve bij zeer slecht bezinkbaar slib. Dan komt de voorspelling beter uit wanneer de SSVI wordt bepaald in een bezinkvat van grote hoogte, zodat de invloed van de laagdikte

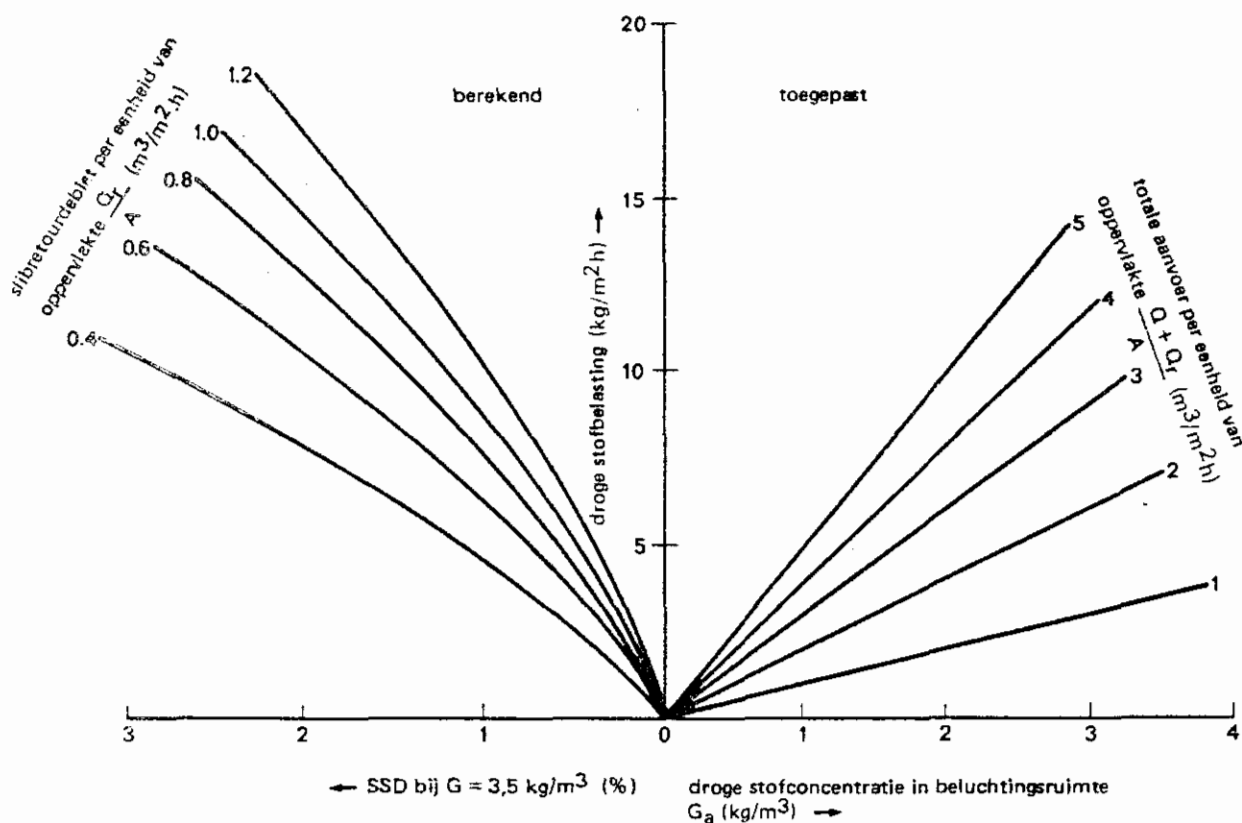


Fig. 40. Gemeten en berekende maximale drogestofbelasting, afhankelijk van de drogestofconcentratie, de SSD en de slibretourverhouding^{4,6}

in de "batch" proef vergelijkbaar wordt met die in de nabezinktank. Het criterium dat bij deze beschouwingen is gehanteerd, is "verlies van slib over de rand". Een exactere benadering van de effluentkwaliteit is niet gegeven. De gedachte kan rijzen, dat daarom de WRC-richtlijnen onvergelykbaar zijn met die van de ATV. Dit blijkt mee te vallen (zie 7.4).

Het overgangsgebied tussen "een goed effluent" en "slib over de rand" is namelijk niet zo breed dat de grens van 30 mg zwevende stof/l van de ATV ver verwijderd ligt van deze overgang. Dit wordt aannemelijk gemaakt door de solid flux-theorie en zichtbaar gemaakt in figuur 41.

Het is niet gelukt om de solid flux-theorie te toetsen aan de meetgegevens van Pflanz. De belangrijkste oorzaak die hiervoor is aan te wijzen, is de summiere berichtgeving ter zake van de bezinksnelheden van het slib van de onderzochte installaties.

7.3 ATV-richtlijnen (Abwassertechnische Verein)

In de ATV-richtlijnen^{2,18} wordt de verdunde slibvolume-index (zie 4.4) gebruikt. Het bij de berekeningen gehanteerde slibvolume VS_V is het produkt van de verdunde index en het drogestofgehalte van de aanvoer van de nabezinktank. Bij een bepaald slibvolume behoort een toelaatbare oppervlaktebelasting. Deze is ingetekend in de figuren 33 en 34 (pp. 43 en 44).

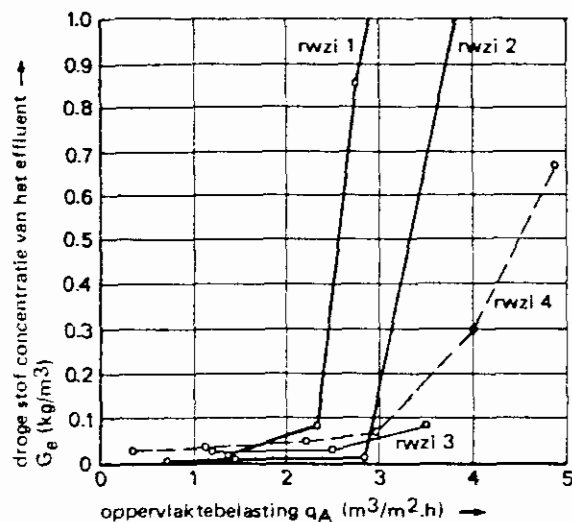


Fig. 41. Drogestofgehalte van het effluent en de oppervlaktebelasting van een aantal installaties²⁶

Er geldt een maximum van $1,6 m^3/m^2.h$. Deze lijn geldt voor tanks met een verhouding diepte : lengte (straal) > 10 . Bij voornamelijk verticaal doorstroomde tanks (diepte : lengte of straal $> 1 : 3$) met filterdeken mag de oppervlaktebelasting 30% meer bedragen met een maximum van $2,0 m^3/m^2.h$. Voor horizontaal doorstroomde tanks betekent dit een slibvolumebelasting van ongeveer 200 tot $400 l/m^2.h$. Dit geldt voor zowel droogweer- als regenweerafvoer.

Het drogestofgehalte van het retourslib G_r is afhankelijk van dat van de aanvoer naar de nabezinktank G_a en van de slibretourverhouding R volgens (3).

Het bereikbare drogestofgehalte in het retourslib is afhankelijk van de slibindex, volgens (25). Bij regenweerafvoer wordt aangenomen dat het bereikbare drogestofgehalte in het retourslib met $2 kg/m^3$ verder kan oplopen.

De gemiddelde diepte van de nabezinktank wordt opgebouwd gedacht als in figuur 35, p. 45.

Daarin is bij de diepte van de indikzone:

$$h_1 = \frac{G_a \cdot I_{sv}}{1000} \quad (m) \quad (28)$$

De diepte van de scheidingszone h_2 bedraagt $0,8 \text{ à } 1,0 m$. Wanneer de diepte van de bufferzone meer dan $1,0 m$ bedraagt mag h_2 tot $0,5 m$ worden gereduceerd.

De diepte van de helder-waterzone (h_3) dient $> 0,50 m$ te zijn. De diepte van de bufferzone wordt berekend met (29):

$$h_4 = \frac{\Delta G_a \cdot V_a \cdot I_{sv}}{500 \cdot A} \quad (m) \quad (29)$$

Hierin is ΔG_a het verschil in drogestofgehalte van de aëratieruimte tussen droog- en regenweeraanvoer. Deze wordt vastgesteld door bepaalde slibretourdebieten vooraf te kiezen of bij het handhaven van de toelaatbare oppervlaktebelasting uit het bijbehorende slibvolume.

De gemiddelde diepte moet minstens 2 m bedragen.

7.4 Vergelijking van de WRC en ATV-richtlijnen

De formule die de ATV-richtlijn voor de toelaatbare oppervlaktebelasting (fig. 33, p. 43) weergeeft, luidt:

$$q_{A,30} = 2400 \cdot VS_v^{-1,34} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (30)$$

De dimensioneringsformule van het WRC is:

$$g_A = 8,85 \cdot (\text{SSD})^{0,77} \cdot \left(\frac{Q_r}{A}\right)^{0,68} \quad (\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (31)$$

Om deze twee formules met elkaar te kunnen vergelijken, wordt gebruik gemaakt van de volgende vergelijkingen (definities):

$$\text{SSVI} = \frac{100}{\text{SSD}} \quad (\text{ml}/\text{g}) \quad (32)$$

$$g_A = \frac{Q + Q_r}{A} \cdot G_a \quad (\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (33)$$

$$VS_v = G_a \cdot I_{sv} \quad (\text{ml}/\text{l}) \quad (34)$$

(30) levert na invoering van (33) en (34):

$$q_A = 2400 \cdot I_{sv}^{-1,34} \cdot G_a^{-1,34} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (35)$$

(31) levert na invoering van (32) en (33):

$$q_A = 307 \cdot (\text{SSVI})^{-0,77} \cdot G_a^{-1} \cdot \left(\frac{Q_r}{A}\right)^{0,68} - \frac{Q_r}{A} \quad (\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}) \quad (36)$$

Om (35) en (36) te kunnen vergelijken, wordt verondersteld dat de geroerde index weinig verschilt van de verdunde index:

$$I_{sv} = \text{SSVI} \quad (\text{ml}/\text{g}) \quad (37)$$

Dan kunnen (35) en (36) in één grafiek worden weergegeven.

Voor verschillende waarden van G_a en Q_r/A levert dit figuur 42.

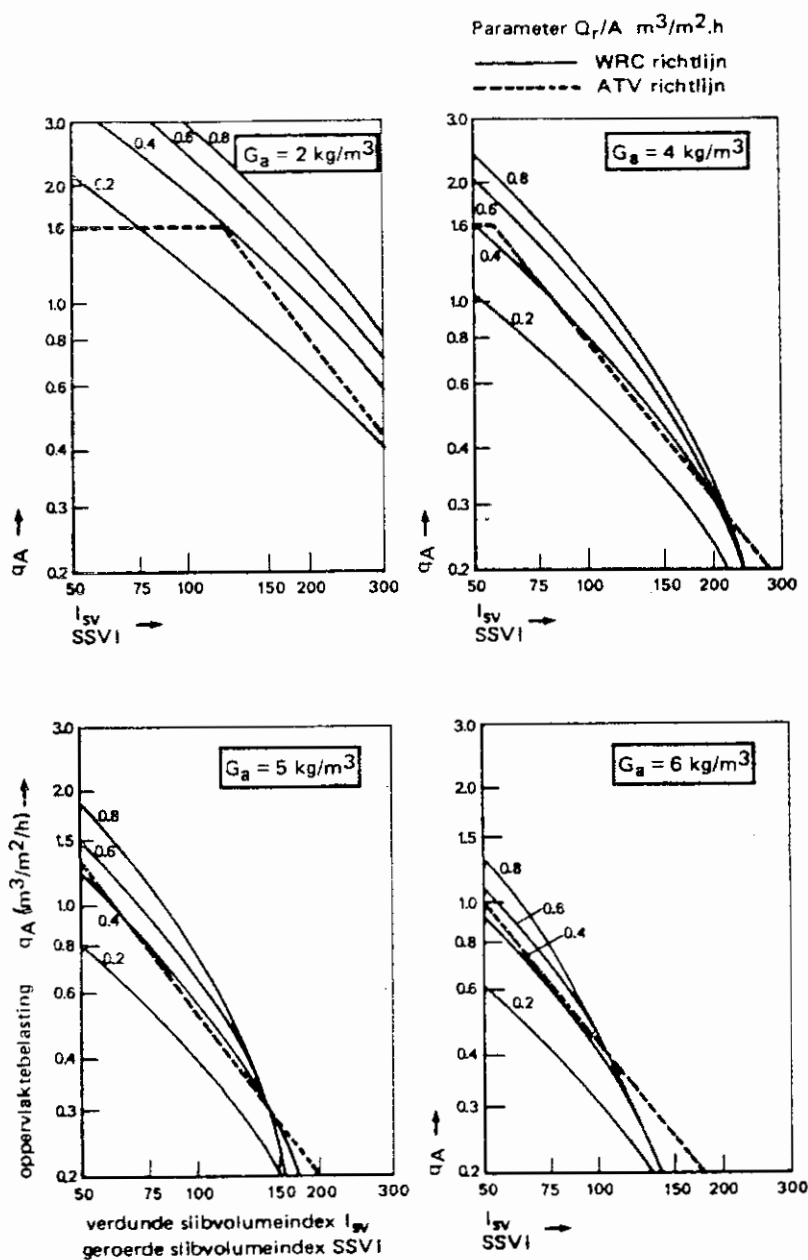


Fig. 42. Vergelijking van de ATV- en WRC-richtlijnen (met behulp van (35) en (36) bij $G_a = 2, 4, 5$ en 6 kg/m^3 en $Q_r/A = 0,2, 0,4, 0,6$ en $0,8 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$)

Aan de hand van deze grafieken kunnen de volgende conclusies worden getrokken.

- De richtlijnen lopen niet erg sterk uiteen.
- De WRC-richtlijn houdt duidelijk rekening met de slibretourcapaciteit. De ATV-richtlijn betreft de slibretourcapaciteit niet bij de dimensionering van de oppervlakte. Wel bij de diepte door de buffering te berekenen, wat de WRC daarentegen weer nalaat.

- Verhoging van de slibretourcapaciteit volgens de WRC-richtlijn is gunstig bij lage slibindexwaarden; bij hoge indexwaarden neemt deze invloed af en verdwijnt zelfs.

De ATV-richtlijn ligt zeer dicht in de buurt van de WRC-richtlijn die hoort bij:

$$Q_r/A = 0,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h.}$$

Pflanz en Billmeier hebben aangetoond, dat de effluentkwaliteit slechter wordt, naarmate de slibretourcapaciteit groter wordt (zie figuur 6, p. 8).

8 CONCLUSIES

Bijzonder veel publicaties zijn gewijd aan theorieën die zich alleen op laboratoriumonderzoek baseren. Wanneer deze theorieën door anderen aan praktijkinstallaties worden getoetst, blijken zij merendeels ongeschikt te zijn als beschrijving van het nabezinkproces.

Het nabezinkproces kan alleen goed worden onderzocht aan reële nabezinktanks.

Het nabezinkproces is een onderlinge beïnvloeding van een aantal deelprocessen. Genoemd kunnen worden coagulatie en flocculatie, dichtheidsstroming en scheiding van slib en water.

Belangrijke factoren die deze deelprocessen beïnvloeden zijn oppervlakte, diepte, afvalwaterdebiet, slibretourdebiet en bezinkbaarheid van het slib. Van secundair belang zijn de "constructieve" details als inloopconstructie, methode van slibruiming en effluentgoten. Directe invloeden van temperatuur en wind op het proces lijken van nog minder belang te zijn (hieronder wordt niet begrepen de temperatuursinvloed op de bezinkbaarheid van het slib).

Onvoldoende onderzoek is verricht naar de *dynamische* aspecten van het nabezinkproces. Bij het dimensioneren van nabezinktanks wordt in feite een compromis gesloten tussen veiligheid en zuinigheid.

Tevens blijkt nog onvoldoende uit de beschikbare kennis of de verdunde dan wel de geroerde slibindex de beste aanwijzing geeft voor de bezinkbaarheid van het slib in de nabezinktank. Daarbij is het belangrijk de slibindex te kunnen relateren aan het waargenomen proces in de nabezinktank, eerder dan te weten, hoe de index door diverse factoren - zoals de drogestofconcentratie - wordt beïnvloed. Immers, ook het nabezinkproces wordt door deze factoren beïnvloed.

symbool	betekenis (definitie)	dimensie
A	oppervlakte van de nabezinktank	m ²
b	breedte van de (rechthoekige) nabezinktank	m
d	dikte van de jet	m
F _r	getal van Froude	./.
G	drogestofconcentratie	kg/m ³
G _a	idem, in de aëratietank	kg/m ³
G _c	idem, behorend bij knikpunt in figuur 28: $G_c = \frac{480}{I_{sv}}$	kg/m ³
G _e	idem, in het effluent van de nabezinktank	kg/m ³
G _i	idem, in het influent van de actief-slibinstallatie	kg/m ³
G _L	idem, behorend bij het minimum in figuur 25	kg/m ³
G _{La}	idem, behorend bij punt a in figuur 25	kg/m ³
G _r	idem, in het retourslib	kg/m ³
G _s	idem, in het spuislib	kg/m ³
G _o	idem, vlak onder de slibspiegel in de nabezinktank	kg/m ³
g	drogestofmassatransport	kg/m ² .h
g _L	idem, maximum waarde ("limiting")	kg/m ² .h
g _A	drogestofbelasting : $g_A = G_a \cdot \left(\frac{Q + Q_r}{A}\right)$	kg/m ² .h
g _t	idem, toegepaste	kg/m ² .h
h ₁	hoogte van de laag indikkend slib	m
h ₂	hoogte van de scheidingslaag	m
h ₃	hoogte van de laag helder water	m
h ₄	hoogte van de bufferzone	m
h _{gem.}	gemiddelde diepte van de nabezinktank: $h_{gem.} = h_1 + h_2 + h_3 + h_4$	m
h _r	hoogte van het ruimerschild	m

symbool	betekenis (definitie)	dimensie
I	slibvolume-index	ml/g
I_{sv}	verdunde slibindex	ml/g
k	konstante in (15)	m ³ /kg
n	aantal ruimerbewegingen per tijdseenheid	./h
Q	afvalwaterdebiet	m ³ /h
Q_r	retourslibdebiet	m ³ /h
Q_s	spuislibdebiet	m ³ /h
Q_{s1}	door de ruimer voortgestuwde slibhoeveelheid	m ³ /h
q_A	oppervlaktebelasting: $q_A = \frac{Q}{A}$	m ³ /h
R	slibretourverhouding: $R = \frac{Q_r}{Q}$./.
s	afstand	m
S_a	hoeveelheid droge stof, in aëratieruimte	kg
S_n	idem, in nabezinktank	kg
SSD	geroerde slibdichtheidsindex $SSD = \frac{100}{SSVI}$	%
SSVI	geroerde slibvolume-index	ml/g
T	temperatuur	°C
t	tijd	h
t_{eff}	effectieve verblijftijd van het water in de nabezinktank	h
V_a	volume van de aëratietank	m ³
v_a	lineaire bezinksnelheid van het slib bij drogestofconcentratie $\approx G_a$	m/h
v_j	snelheid van de jet t.o.v. de stagnante laag	m/h
V_n	volume van de nabezinktank	m ³
V_r	ruimercapaciteit	m ³ /h
v_r	ruimersnelheid	m/h
VS	slibvolume na $\frac{1}{2}$ uur bezinking in 1-1 maatcylinder	ml/l

symbool	betekenis (definitie)	dimensie
VS_c	slibvolume bij knikpunt van figuur 28: $VS_c = 480 \text{ ml/l}$	ml/l
VS_e	bezinksel in effluent	ml/l
VS_v	gecorrigeerd slibvolume: $VS_v = I_{sv} \cdot G_a$	ml/l
v_s	bezinkselnelheid van de slibspiegel in de lineaire fase	m/h
v_{sa}	idem, behorend bij drogestofconcentratie $= G_a$	m/h
v_{so}	idem, behorend bij drogestofconcentratie $= G_o$	m/h
vs_A	slibvolumebelasting: $vs_A = q_A \cdot VS_v$	$l/m^2 \cdot h$
V_1	volume van de indikzone: $V_1 = A \cdot h_1$	m^3
V_2	volume van de scheidingszone: $V_2 = A \cdot h_2$	m^3
V_3	volume van de helderwaterlaag: $V_3 = A \cdot h_3$	m^3
V_4	volume van de bufferzone: $V_4 = A \cdot h_4$	m^3
ΔG	toename in drogestofconcentratie ten gevolge van slibaangroei	kg/m
ΔG_a	verschil in drogestofconcentratie in de aëratieruimte tussen droog- en regenweeraanvoer	kg/m^3
ρ_{ds}	dichtheid van de droge stof	kg/m^3
ρ_j	dichtheid van de jet	kg/m^3
$\Delta \rho$	dichtheidsverschil tussen jet en stagnante laag	kg/m^3
ΔS	te bufferen hoeveelheid droge stof in nabezinktank tijdens verhoogde aanvoer	kg

LITERATUUR

- 1 Anderson, N.E. - Design of final settling tanks for activated sludge, Sewage Works Journal, Vol. XVII, no. 1, Januari 1945.
- 2 Arbeitsbericht des ATV-Fachausschusses 2.5 Absetzverfahren - Die Bemessung der Nachklärbecken von Belebungsanlagen, Korrespondenz Abwasser 8/1973, 20e jaargang: 193-198.
- 3 Beets, J.D. - Bestudering van de verschillen, overeenkomsten en toepasbaarheid van de verschillende methoden van slibindexbepaling, praktikumverslag, juli/augustus 1977.
- 4 Bepaling van het bezinkselvolume, Nederlandse Norm, NEN 3235, 4.4, mei 1975.
- 5 Berekening van de slibindex, Nederlandse Norm, NEN 3235, 4.5, mei 1975.
- 6 Billmeier, E. - Verbesserte Bemessungsvorschläge für horizontal durchströmte Nachklärbecken von Belebungsanlagen, Berichte aus dem Institut für Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Institut für Bauingenieurwesen V, Technische Universität München, Nr. 21.
- 7 Billmeier, E. - Bemessung von Absetzbecken unter besonderer Berücksichtigung der Vor- und Nachklärung, Berichte aus dem Institut für Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Institut für Bauingenieurwesen V, Technische Universität München, Nr. 5.
- 8 Billmeier, E. - Möglichkeiten der Mischwasserbehandlung in der Nachklärbecken von Belebungsanlagen, Berichte aus Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, München (1976), H.12.
- 9 Bloodgood, D.E. - Discussion of Dr. Edwards' Paper, Sewage Works Journal, november 1940: 1085 - 1086
- 10 Busby, P.R.A. - Problems in the operation of final sedimentation tanks of activated sludge plants in the Greater London area, Prog. Wat. Tech. Vol. 8, No. 6, 461-464.
- 11 Camp, T.R. - Studies of Sedimentation basin design, Sewage and Industrial Wastes, Vol. 25, No. 1, januari 1953: 1-14.
- 12 Clements, M.S. en Price, G.A. - A two float technique for examination of flow characteristics of sedimentation tanks, Jnl. Instr. Municipal Engr., Vol. 99, februari 1972: 53-58.
- 13 Dick, R.I. - Role of activated sludge final settling tanks, Journal San. Eng. Div., april 1970: 423-436
- 14 Dick, R.I. - Folklore in the design of final settling tanks, J.W.P.C.F., 48, 1976: 633-644

- 15 Dick, R.I. en Vesilind, P.A. - The Sludge Volume Index - What is it?, J.W.P.C.F., Vol. 41, no. 7, juli 1969: 1285-1291
- 16 Dick, R.I. en Young, K.W. - Analysis of thickening performance of final settling tanks, presented at 27th Ind. Waste Conf., Purdue Univ. mei 1972: 34-54
- 17 Eggers, E. en Van Doorn, M. - Een nieuw model voor de bezinking van actief-slib, H₂O (10) 1977, nr. 13: 304-308.
- 18 Erläuterungen und Ergänzungen zum Arbeitsbericht des ATV-Fachausschusses 2.5. Absetzverfahren: Die Bemessung der Nachklärbecken von Belebungsanlagen, Korrespondenz Abwasser, 8/1976, 23e jaargang : 231-235.
- 19 Fitch, E.B. - The significance of detention in sedimentation, Sewage and Ind. Wastes, Vol. 29, no. 10, oktober 1957, 1123-1133.
- 20 Fitch, B. - Current theory and thickener design (1975), Filtration & Separation, deel 1 in juli/augustus 1975: 355-359, deel 2 in september/oktober 1975: 480-488, 553 en deel 3 in november/december 1975: 636-638.
- 21 Fitch, E.B. en Lutz, W.A. - Feedwells for density stabilization, J.W.P.C.F., vol. 32, no. 2, februari 1960: 147-156.
- 22 Heide, B.A. en Kampf, R. - Simultane defosfatering met AVR, H₂O (11), 1978, nr. 19: 439-444.
- 23 Heide, B.A., Kampf, R. en Bloot, F. - Slibverwerking bij de aërobe en verdergaande zuivering van afvalwater in zeer laag belaste actiefslibsystemen, karakterisering, eigenschappen, conditionering en ontwatering, TNO, maart 1977.
- 24 Johnstone, D.W.M., Rachwal, A.J. en Hanbury, M.J. - Settlement characteristics and settlement tank performance in the carousel systems, uncorrected paper to be presented 14th March 1978 at London, Institute of Water Pollution Control.
- 25 Kalbskopf, K.H. - Discussion of the design parameter for the secondary sedimentation, Water Research, vol. 6, 1972, 429-431.
- 26 Konicek, Z., Handova, Z. en Pardus, I - Separation and gravity thickening in secondary sedimentation tanks, Prog. Wat. tech., vol. 7 nr. 2, 1975: 149-160.
- 27 Koot, A.C.J. - Behandeling van afvalwater, uitgeverij Waltman, Delft.
- 28 Kynch, G.J. - A theory of sedimentation, Transactions of the Faraday Society, vol. 48, nr. 350, februari 1952: 166-176

- 29 Merkel, W. - Untersuchungen über das Verhalten des belebten Schlammes im System Belebungsbecken - Nachklärbecken, Gewässerschutz. Wasser, Abwasser, Aachen, 1971.
- 30 Merkel, W. - Die Bemessung horizontal durchströmter Nachklärbecken von Belebungsanlagen, GWF-Wasser/Abwasser, 112 (1971) H.12: 596-600.
- 31 Merkel, W. - Die Bemessung vertikal durchströmter Nachklärbecken von Belebungsanlagen, GWF-Wasser/Abwasser, 115 (1974) H.6: 272-282.
- 32 Munch, W.L. en Fitzpatrick, J.A. - Performance of circular final clarifiers at an activated sludge plant, J.W.P.C.F., februari 1978: 265-276.
- 33 Van Os, A.G. - Persoonlijke mededeling, mei 1978.
- 34 Pflanz, P. - Ueber das Absetzen des belebten Schlammes in horizontal durchströmten Nachklärbecken, Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Hochschule Hannover, Heft 25, Hannover 1966.
- 35 Process design manual for suspended solids removal, U.S. Environmental Protection Agency, Technology Transfer, EPA 625/1-75-0030-, januari 1975.
- 36 Radio-activiteitsmetingen in nabezinktanks van de BASF-Ludwigshafen, interne DHV notities, 1976.
- 37 Renner, H. - Untersuchungen zur diskontinuierlichen Schlammräumung in rechteckigen, langsdurchströmten Nachklärbecken von Belebungsanlagen, Veröffentlichungen Institut für Siedlungs- und Industrierwasserwirtschaft, Grundwasserhydraulik, Schutz- und Landwirtschaftlichen Wasserbau, Technische Universität Graz, heft 4: 60-90.
- 38 Resch, H. - Persoonlijke mededeling, augustus 1978.
- 39 Sickert, E. - Experiments with deep sedimentation tanks in Hambury, Prog. Wat. Techn., Vol. 8, no. 6, 1977: 509-514.
- 40 Stobbe, G. - Ueber das Verhalten von belebten Schlammes in aufsteigender Wasserbewegung, Veröffentlichungen des Institutes für Siedlungswasserwirtschaft der Technischen Hochschule Hannover, heft 18, Hannover 1964.
- 41 Untersuchungen über die Leistung von Nachklärbecken bei Belebungsanlagen - Schlammräumung, Kurzbericht 11, Lehrstuhl für Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität München, 1978.

- 42 Untersuchungen über die Leistung von vertikal durchströmten Nachklärbecken bei Belebungsanlagen, Kurzbericht 10, Lehrstuhl für Wassergütewirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität München, 1978.
- 43 Vosloo, P.B.B. - Settlement and sludge return in activated sludge type package plants, Water Pollution Control 1975: 197-198
- 44 Vosloo, P.B.B. - Some factors relating to the design of activated sludge plants, Water Pollution Control 1970, 69 (5): 486-495
- 45 Voss, M.C.M. - Bepaling van de parameters voor de bezinking van actief slib, praktikumverslag, mei 1977.
- 46 White, M.J.D. - Settling of activated sludge, W.R.C., technical Report, TR11, mei 1975.
- 47 White, M.J.D. - Design and control of secondary settlement tanks, Wat. Poll. Contr. 75, nr. 4, 1976: 459-467
- 48 White, M.J.D. - Instruction Manual for WRC Settling apparatus for activated sludge, WRC, Technical Memorandum, TM103, maart 1975.
- 49 Wolf, P. - Nachklärbecken von Belebungsanlagen, Erfahrungen bei der Bemessung und Ueberwachung, Stuttgarter Berichte zur Siedlungswasserwirtschaft.
- 50 Wouda, T.W.M., Rietema, K. en Ottengraf, S.P.P. - Continuous Sedimentation theory, effects of density gradients and velocity profiles on sedimentation efficiency, Chemical Engineering Science, vol. 32, 1977: 351-358.