

## Optimalisering van grote nabezinktanks

Modellering van de fysische processen

## Optimalisering van grote nabezinktanks

Modellering van de fysische processen

92-14

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

Publicaties en het publicatieoverzicht  
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.

## INHOUD

TEN GELEIDE	2
SAMENVATTING	3
1 INLEIDING	4
1.1 Probleemstelling	4
1.2 Doelstelling	4
1.3 Opzet van het onderzoek	4
1.4 Opzet van het rapport	5
2 WERKING VAN EN PROCESSEN IN DE NABEZINKTANK	6
2.1 De rol van de nabezinktank	6
2.2 Processen in nabezinktanks	7
3 MODELLERING	9
3.1 Literatuuronderzoek	9
3.2 Fysische modellering van stroming zonder sediment	10
3.2.1 ontwerp van het schaalmodel	11
3.2.2 werking van het model	12
3.2.3 metingen	14
3.3 Fysische modellering van de stroming met sediment	16
3.3.1 proefopstelling	16
3.3.2 meetmethoden	18
3.4 Mathematische modellering van stroming zonder sediment	19
3.4.1 algemeen	19
3.4.2 basisvergelijkingen	20
4 NUMERIEKE MODELLERING IN PHOENICS	21
4.1 Opbouw van het rekenrooster	21
4.2 Randvoorwaarden	23
4.2.1 open randen	23
4.2.2 dichte randen	25
5 RESULTATEN	27
5.1 Resultaten van de fysische- en mathematische modellering van stroming zonder sediment	27
5.1.1 varianten met dicht duikschot en geen deflectieschot	27
5.1.2 varianten met geperforeerd duikschot en geen deflectieschot	29
5.1.3 varianten met verschillende deflectieschotten	29
5.1.4 varianten met deflectieschot type 'Assen'	34
5.2 Resultaten van de fysische modellering van meerfasestroming	36
5.2.1 de proeven	36
5.2.2 visualisering	36
5.2.3 beschrijving van de stroming in het model	37
5.2.4 meetresultaten	38
6 CONCLUSIES	44
7 AANBEVELINGEN	46
SYMBOLENLIJST	48
LITERATUUR	49
BIJLAGE      Uitwerking van het interne Froude-getal	51

## Ten geleide

In Nederland worden nabezinktanks bij actiefslibinstallaties ontworpen volgens de in 1981 opgestelde STORA-richtlijnen, die gebaseerd zijn op praktijkonderzoek aan een groot aantal nabezinktanks. De diameters van de destijds beschouwde nabezinktanks waren niet groter dan 44 m.

Inmiddels zijn in Nederland ronde nabezinktanks gebouwd met diameters tussen 50 en 60 m, waarbij in de praktijk gebleken is dat de toelaatbare oppervlaktebelasting c.q. de slibvolumebelasting soms aanmerkelijk lager is dan op grond van de STORA-richtlijnen zou mogen worden verwacht. Duidelijke oorzaken voor dit afwijkend gedrag ontbreken.

Om inzicht te krijgen in het functioneren van de grotere nabezinktanks is onderzoek opgezet langs twee lijnen: fundamenteel en theoretisch onderzoek aan de stromingsverschijnselen van een slib/watermengsel in een ronde tank, en inventarisatie van de praktijkproblemen gevolgd door experimenten in de praktijk aan de werking van grote nabezinktanks en aan constructieve voorzieningen ter verbetering van de werking daarvan.

In het thans voorliggende rapport worden door de Technische Universiteit Delft de mathematische beschrijving van de stroming in een ronde tank en experimenten op laboratoriumschaal in een fysisch model behandeld.

Het onderzoek werd in 1989, op advies van de Onderzoekadviescommissie (OAC), door het bestuur van de STOWA opgedragen aan DHV Raadgevend Ingenieursbureau B.V. (projectteam bestaande uit ing. P.C.A.M. van Helvoort, ir. R.P. Niermans en ir. R.W. Stapel). Via DHV was de vakgroep Gezondheidstechniek en Waterbeheersing van de Technische Universiteit Delft (prof.ir. J.H. Kop, ir. B. van der Veer en ir. E.A. Vermeer) bij dit project betrokken. Voor de begeleiding van het onderzoek zorgde een commissie bestaande uit ir. J. Ebbenhorst (voorzitter), ir. T.P. de Graaf, ing. J.J. Jonk, dr.ir. C. Kranenburg, ing. J.J. Verbraaken en ir. T.W.M. Wouda

Utrecht, december 1992

De directeur van de STOWA

drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff

- De Onderzoekadviescommissie, die tot dit project adviseerde, bestond uit:  
prof.ir. J.H. Kop (voorzitter), drs. J.F. Noorthoorn van der Kruijff (secretaris) en ir. J. Boschloo, dr.ir. J.A. Don, ir. R. den Engelse, ir. A.E. van Giffen, ir. J.J. de Graeff, prof.dr.ir. J.J. Heijnen, dr.ir. P.J. Huiswaard, ir. C. Kerstens, dr. S.P. Klapwijk, ir. A.B. van Luin, ir. G. Martijnse, ir. Tj. Meijer, ir. L.P. Savelkoul, en ir. M. Tiessens (leden).

## SAMENVATTING

In de praktijk van de afvalwaterzuivering blijkt bij grote ronde nabezinktanks zo nu en dan slib met het effluent te worden geloosd. Het niet goed functioneren van de tanks zou in eerste instantie te wijten zijn aan het niet-uniforme en het niet-stationaire karakter van de stroming in deze tanks.

Hierbij spelen de volgende processen, in opklimmende moeilijkheidsgraad wat de theoretische benadering en beschrijving betreft, een rol:

- constante influentaanlevering;
- dichtheidsstromen en gehinderde bezinking, zowel discreet als flocculent;
- niet-constante influentaanlevering;
- windinvloeden;
- invloed van bodemschrapers.

Om tot een beschrijving van deze bezinktankprocessen te kunnen komen, vond eerst een literatuuronderzoek plaats naar de mathematische en fysische modellering van water- en sedimentbeweging in bezinktanks.

Vervolgens hebben de mathematische modellering van stationaire stroming zonder sediment en zonder de invloed van wind en bodemschrapers en onderzoek met een fysisch model op laboratoriumschaal (1:8) aan stationaire stroming zonder sediment en met sediment, plaatsgevonden. Het effect van dichtheidsstromingen werd daarbij geobserveerd, in afwezigheid van wind en bodemschrapers. De invloed van verschillende typen inloopconstructies en deflectieschotten op de stroming in de tank is in dit onderzoek betrokken.

De voor de mathematische modellering benodigde theorie omvat de Navier-Stokes vergelijkingen voor de water- en sedimentbeweging en een  $k-\epsilon$  turbulentiemodel. De mathematische modellering van de stroming in een nabezinktank vond plaats met behulp van het computerprogramma PHOENICS.

Het fysisch model is gedimensioneerd volgens het getal van Reynolds voor in eerste instantie stroming zonder sediment. In het fysische model zijn op verschillende plaatsen stroomsnelheidsmetingen uitgevoerd. De meetresultaten hiervan hebben mede gediend voor het ijken van het mathematische model. De met het mathematische model berekende stroomsnelheden zijn vergeleken met de gemeten stroomsnelheden in het fysische model.

In het fysische model zijn stromingsproeven met sediment uitgevoerd. Vanwege het optreden van dichtheidsstromen is geschaald volgens het interne Froude getal. Voor de modellering van actief slib is in het fysisch model gebruik gemaakt van kaoliniet. De uitgevoerde concentratiemetingen hebben meer inzicht gegeven in de fysische processen in de tank en in de invloed van de verschillende inlaatconstructies op de efficiency.

Er worden aanbevelingen gedaan voor vervolgonderzoek naar de mathematische en fysische modellering van dichtheidsstromen in nabezinktanks, voor zowel een twee- en driedimensionale benadering voor meerfasestroming, eerst zonder en daarna met ruimer- en windeffecten.

Mede aan de hand van de vergrote inzichten is een aantal constructieve veranderingen van nabezinktanks naar voren gekomen, dat nader onderzocht zou moeten worden.

## 1 INLEIDING

### 1.1 Probleemstelling

In de praktijk is gebleken dat grote<sup>1</sup> ronde nabezinktanks slib met het effluent verliezen, met als direct gevolg het lozen van slib op het oppervlaktewater. De voornaamste oorzaak van het niet goed functioneren van grote ronde nabezinktanks wordt gezocht in zowel het niet uniforme als het niet stationaire karakter van de stroming in deze tanks.

### 1.2 Doelstelling

Het uiteindelijke doel van het onderzoek is het aan de hand van een theoretische benadering ontwikkelen van nieuwe of aangepaste ontwerprichtlijnen voor grote ronde nabezinktanks.

Er wordt getracht dit doel op de volgende wijze te bereiken:

- waar mogelijk de bewegingsverschijnselen van water en vaste delen in de tank, mathematisch te formuleren;
- ter ijking van de mathematische modellering en ter bestudering van bepaalde kunstmatige ingrepen (ook voor die ingrepen waarvoor niet een voldoende dekkende mathematische formulering ontwikkeld kan worden), het bouwen en doormeten van een fysisch tankmodel op laboratoriumschaal;
- op basis van deze mathematische formulering voorspellende mathematische modellen te ontwikkelen voor de bewegingsverschijnselen in bestaande tanks, tanks op laboratorium-schaal en prototypen (pilot plants), zowel voor als na kunstmatige ingrepen, zoals het aanbrengen van deflectieschotten, perforaties in inlooptrommels.

Verwacht wordt dat het onderzoek zal leiden tot een verbetering van het inzicht in de stroming van het actief slib-watermengsel en dat met dit inzicht een vergroting van de sedimentatiecapaciteit van grote nabezinktanks kan worden verkregen c.q. een permanent lager gemiddeld zwevendstofgehalte met fluctuaties van een geringere amplitude.

### 1.3 Opzet van het onderzoek

Met het oog op de in principe niet begrensde omvang van het onderzoek en de opklimmende graad van moeilijkheid en bewerkelijkheid, is het onderzoek bewust beperkt.

Het onderzoek, waarvan het onderhavige rapport de samenvattende verslaglegging is, betrof:

- 1) algemeen literatuuronderzoek;
- 2) mathematische formulering en mathematische modellering van stationaire rotatiesymmetrische stroming (ronde tank);
- 3) het bouwen en doormeten van een fysisch tankmodel op laboratoriumschaal (taartpunt) ter controle van de opgestelde mathematische formulering en modellering;
- 4) het geven van een aanzet voor vervolgonderzoek naar de stroming met sediment in het fysische model.

---

<sup>1</sup> In het kader van dit project zijn dit tanks met een diameter in het algemeen  $\geq 50$  m.

Bij zowel het fysische- als bij het mathematische model is de invloed van enkele kunstmatige ingrepen bestudeerd, zoals het aanbrengen van deflectieschotten en veranderingen aan de inlooptrommel, waaronder perforatie van de trommel.

De aandacht is beperkt gebleven tot een vereenvoudigde situatie van stationaire stroming zonder de invloed van een draaiende slibruimer en wind.

Bij vervolgonderzoek moet gedacht worden aan het uitbreiden van de modellering tot stroming met sediment en vervolgens in successie, de invloeden van een slibruimer, wind en niet-stationaire effecten hierin te betrekken.

Het streven is om daarmee de onderzoeksresultaten te kunnen vertalen naar ontwerpgrondslagen voor grote ronde nabezinktanks met mechanische slibruiming.

#### 1.4 Opzet van het rapport

In hoofdstuk 2 worden in het kort de werking van de nabezinktank (2.1) en de processen die in de tank optreden (2.2) beschreven.

In hoofdstuk 3 zijn aan de hand van de resultaten van het literatuuronderzoek (3.1) de belangrijkste aspecten behandeld, die van belang zijn voor de modellering van de processen die in een nabezinktank optreden. Voor wat betreft de fysische modellering van de waterbeweging in het schaalmodel (3.2), spelen aspecten als het ontwerp en de werking van het model, de schaling van debieten in de tank, de meetmethode en de verwerking van de meetgegevens, een belangrijke rol. Voor de fysische modellering van stroming met sediment (3.3) is, naast een schaling van de debieten, ook de bepaling van een representatieve vervanger van het "actief slib" noodzakelijk. In 3.4 worden de basisvergelijkingen voor de mathematische modellering van de stroming in een tank gegeven.

Voor de numerieke modellering (hoofdstuk 4) zijn, naast de oplossing van het stelsel differentiaalvergelijkingen, de schematisering van de nabezinktank in een rekenrooster (4.1) en diverse randvoorwaarden (4.2) van belang (ook voor de diverse varianten met een geperforeerd duikschot en deflectieschotten).

In hoofdstuk 5 zijn de belangrijkste resultaten gegeven van de modellering van de stroming zonder sediment, in zowel het fysische- als het mathematische model (5.1) en van stroming met sediment in het fysische model (5.2).

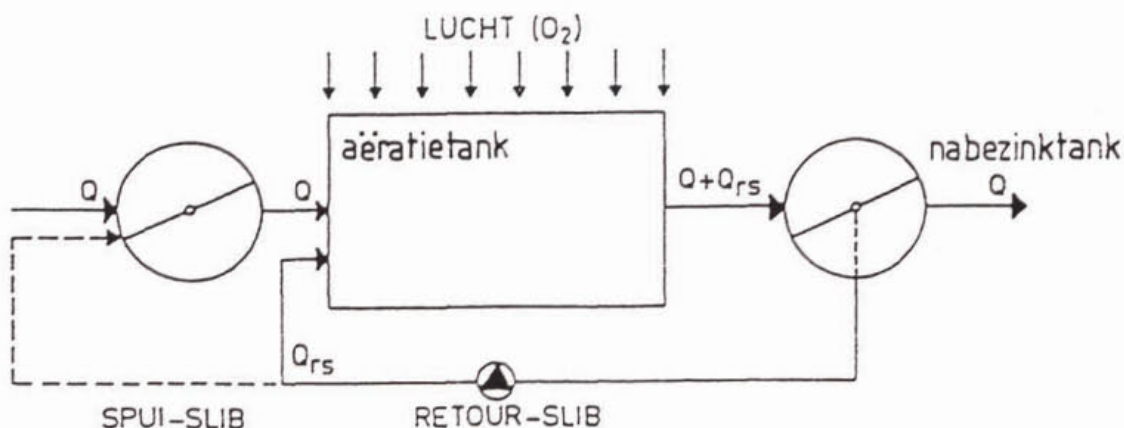
De conclusies van het onderzoek zijn gegeven in hoofdstuk 6.

In hoofdstuk 7 worden, op grond van de bevindingen uit het onderzoek, aanbevelingen gedaan voor een mogelijk vervolg.

## 2 WERKING VAN EN PROCESSEN IN DE NABEZINKTANK

### 2.1 De rol van de nabezinktank

Bij de biologische zuivering van afvalwater vormt de nabezinktank in het algemeen de laatste stap in het behandelingsproces (figuur 1). Nadat het actief slib zijn zuiverende werking in de aëratietank heeft verricht, moet in de nabezinktank het actief slib weer gescheiden worden van het inmiddels gezuiverde afvalwater, zodat (1) een deel van het actief slib weer gebruikt kan worden in het zuiveringsproces en (2) zo min mogelijk slib wordt geloosd op het oppervlaktewater.



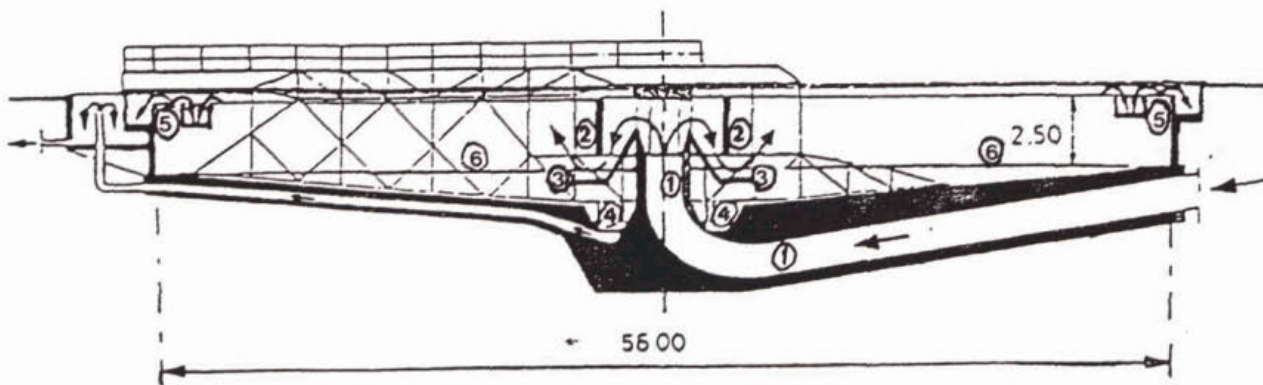
Figuur 1 Schema van een actiefslibinstallatie

Bestaande nabezinktanks kunnen worden onderscheiden in vorm (rechthoekig of rond), doorstromingstype (vertikaal of horizontaal), influentaanvoer (centraal of periferisch) en in afmeting. Dit onderzoek heeft betrekking op grote ronde nabezinktanks met een diameter van circa 50 meter of meer, influentaanvoer in het centrum van de tank, effluentafvoer aan de omtrek van de tank en retour-slibafvoer door zogenaamde mechanische slibruiming, dat wil zeggen ronddraaiende ruimers en centrale afzuiging in het midden van de tank.

N.B. Retour-slibafvoer door semi-gelijkmatig verdeeld afzuigen onderaan de ronddraaiende arm(en) van de ruimer ("stofzuigerprincipe") is niet in het onderzoek betrokken.

In figuur 2 is een dwarsdoorsnede gegeven van een dergelijke ronde tank. Via de influentbuis wordt het water uit de aëratietank in het centrum van de nabezinktank aangevoerd. Het grootste deel hiervan doorstroomt de tank en verlaat deze via de overstort aan de omtrek. Het onderweg in de tank bezonken slib wordt door een ronddraaiende schraper naar de slibzak in het centrum getransporteerd. De rest van het influent c.q. de retourstroom, doorloopt niet de tank maar stroomt direkt terug via de slibzak en neemt het daar door de schraper bijeengebrachte slib mee terug naar de aëratietank.





- verklaring van nummers bij tekening
- |                   |                  |
|-------------------|------------------|
| 1. influentbuis   | 4. slibzak       |
| 2. duikschot      | 5. overstortrand |
| 3. deflektieschot | 6. schrapper     |

Figuur 2 Dwarsdoorsnede van een cirkelvormige tank

In de praktijk worden in combinatie met de influentbuis, een duikschot en eventueel deflektieschotten geplaatst. Het doel van het duikschot is enerzijds het vernietigen van instroomenergie en anderzijds het gelijkmatig verdelen van de instroming over de tank. Het doel van deflektieschotten is het zodanig richting geven aan de stromingen, dat ongunstige neren zoveel mogelijk worden voorkomen en een zo goed mogelijke richting aan de stromingen in de tank wordt gegeven met het oog op effectieve sedimentatie van het slib enerzijds en voldoende decanteren van het "supernatant" anderzijds. Apart of in combinatie met deflektieschotten tracht men dit ook wel te bereiken door middel van het perforeren van de inlooptrommel. De vorm van de deflektieschotten loopt zeer uiteen. Ze kunnen al dan niet onder een bepaalde hoek en variërend over de diepte worden geplaatst.

Drijvende delen en licht "opdrijvend" slib worden door middel van een drijf-laagafstrijker verwijderd. Het effluent wordt uit de tank verwijderd via een overlaat over de gehele omtrek van de tank. De overlaat kan zowel enkel, dubbel- als driezijdig (zie fig. 2) zijn uitgevoerd. De bodem van de tank wordt veelal onder een helling van ongeveer 1:12 gelegd, waarbij de diepte gaande van centrum naar periferie afneemt. De kantdiepte bedraagt in het algemeen 1.5 à 2.0 m, hetgeen resulteert in geringe kantdieptes ten opzichte van de tankdiameter.

## 2.2 Processen in nabezinktanks

De praktijk van de nabezinktanks betreft voornamelijk flocculente bezinking die zowel gehinderd als ongehinderd kan zijn.

Nadat het sediment is bezonken vindt, alvorens het wordt verwijderd door de slibruimers, verdichting plaats (uitdrijven van poriënwater) door slibaccumulatie.

Uitgaande van een hydraulische situatie, waarin het influentdebiet opgedeeld kan worden in een hoofdstroom direct naar de effluentgoot en een retourslibstroom direct (via een kortsluitstroom) of indirect (via de indikzone) naar de centrale afzuiging, kunnen in het stroombeeld in nabezinkbekkens de volgende verschijnselen worden waargenomen:

- 1) hydraulische macro-neervorming bij stationaire stroming (en geen invloed van schrapers en wind) met mogelijke gevolgen als kortsluitstromen, opwerveling van neergeslagen slib; verschijnselen die aanleiding kunnen geven tot ongewenst verlies van droge stof uit de nabezinktank;
- 2) hydraulische macro-neervorming bij stationaire stroming door dynamische (niet mechanische) verschijnselen, voornamelijk wind;

- 3) hydraulische micro-neervorming ("turbulentie") door entrainment (= meesleping), vooral van belang bij grensvlakken tussen vloeistofgedeelten met verschillende dichtheden, "grensvlak" tussen slib en water bijvoorbeeld;
- 4) beïnvloeding van stroming en turbulentie (neervorming) door verschillen in temperatuur en drogestofgehalte van tankwater en inkomend water;
- 5) beïnvloeding van stroming en turbulentie (neervorming) met name door de beweging, schraap- en schuifwerking van de door het water bewegende delen van de slibuimer;
- 6) labiele stroomverschijnselen als gevolg van niet-stationaire invoer in de tank: wisselend influentdebiet, wisselend retourslibdebiet, aan- en afslaan van pompen.

3.1    Literatuuronderzoek

Het literatuuronderzoek (STOWA, 1992) waarmee het onderzoek is aangevangen, bestreek de belangrijkste literatuurbronnen op het gebied van nabezinktanks, namelijk de Engels/Amerikaanse, de Franse, de Duitse en de Nederlandse literatuur.

De met behulp van het literatuuronderzoek gevonden artikelen betreffen globaal gezien drie onderwerpen: (1) mathematische modellen, (2) experimentele modellen en (3) ontwerprichtlijnen.

De publicaties met betrekking tot ontwerprichtlijnen blijken niet gebaseerd te zijn op theoretisch onderzoek en zijn derhalve (nog) niet van belang voor dit onderzoek.

In de literatuur is een aantal eenvoudige transportmodellen gevonden, welke uitgaan van een uniforme stroming. In de praktijk blijkt de stroming in bezinktanks niet uniform te zijn wegens het ontstaan van circulatiestromingen. Door de grote afhankelijkheid tussen de stroming en de sedimentbeweging in bezinktanks heeft het niet-uniforme karakter van de stroming tot gevolg, dat ook de sedimentatie niet goed wordt beschreven. Het bepalen van de invloed van schotten en andere voorzieningen op de stroming en het sedimentatiegedrag in de tank is met dergelijke modellen niet mogelijk.

Voor een goede beschrijving van de stroming en de sedimentatiebeweging is de mathematische formulering van het complete stelsel van hydraulische vergelijkingen noodzakelijk. De onderzochte literatuur, die betrekking heeft op de mathematische formulering van tankprocessen, richt zich voornamelijk op primaire bezinktanks, waarin in het algemeen een discrete niet gehinderde bezinking van sediment plaatsvindt. Voor de lage concentraties, die in deze tanks voorkomen (orde 200 mg/l), is het mogelijk de vergelijkingen voor de water- en sedimentbeweging los te koppelen. Hierdoor ontstaat een stelsel basisvergelijkingen, dat voor de waterbeweging bestaat uit de continueitsvergelijking, de Navier-Stokes vergelijkingen en een turbulentiemodel, en voor de sedimentbeweging uit de convectie-diffusievergelijking.

In de literatuur zijn vier publicaties gevonden waarin de basisvergelijkingen worden opgelost. Van belang voor dit onderzoek zijn die van (1) Schamber e.a. (1981 en 1983), (2) Imam e.a. (1983) en (3) Stamou e.a. (1989). Voor het beschrijven van de turbulentie maakt Imam gebruik van een  $\nu_t$ - $\epsilon^2$  model, terwijl Schamber en Stamou gebruik maken van het meer geavanceerde  $k$ - $\epsilon^2$  turbulentiemodel. Een voordeel van het  $\nu_t$ - $\epsilon$  model ten opzichte van het  $k$ - $\epsilon$  model is dat er minder vergelijkingen behoeven te worden opgelost. Een nadeel van het  $\nu_t$ - $\epsilon$  model is echter dat er moeilijker waarden voor de diverse parameters te vinden zijn. Berekeningen van Schamber en Stamou tonen aan dat de variatie van  $\epsilon$  over de doorsnede van de tank groot is.

Schamber, Imam en Stamou gebruiken allen een andere numerieke oplossingsmethode voor de basisvergelijkingen.

---

<sup>2</sup>  $\nu_t$  = turbulente kinematische viscositeit [ $m^2/s$ ]  
 $k$  = turbulentie energie per massa-eenheid [ $m^2/s^2$ ]  
 $\epsilon$  = dissipatie van de turbulentie energie [ $m^2/s^3$ ]

Alleen Schamber heeft de basisvergelijkingen ook voor ronde nabezinktanks opgelost.

Imam en Stamou hebben de uitkomsten van hun model vergeleken met experimenteel bepaalde waarden. De sedimentbeweging blijkt bij beide modellen goed weergegeven te kunnen worden. De stroming blijkt bij beide modellen minder goed overeen te komen. Imam wijt het minder goed weergegeven van de stroming nabij de bodem aan het  $\nu_t$ - $\epsilon$  model. Stamou schrijft de verschillen toe aan drie-dimensionale effecten, die optreden in rechthoekige bezinktanks en die in zijn model niet geschematiseerd zijn.

Er is slechts één artikel gevonden over de modellering van dichtheidsstromen in nabezinktanks (DeVantier e.a., 1987). De resultaten van dit model zijn niet vergeleken met experimenteel bepaalde waarden, maar geven wel een kwalitatief beeld van de invloed van dichtheidsgradiënten op de stroming.

Veel experimenteel onderzoek is gericht op het bepalen van stromingseigenschappen in rechthoekige bezinktanks. Er is weinig onderzoek verricht naar stromingeigenschappen en sedimentbewegingen in ronde tanks.

Een goed en uitgebreid overzicht van de beschikbare literatuur op het gebied van experimentele studies naar de stroming in bezinktanks wordt gegeven door McCorquodale e.a. (1988).

De belangrijkste conclusies, die uit dit overzicht getrokken kunnen worden, zijn:

- alle experimentele modellen geven een duidelijke circulatiestroming;
- sedimentatietanks in de praktijk lenen zich niet goed voor gedetailleerde observaties en metingen;
- tracermethoden geven weinig informatie over de interne stroming in een tank en hebben vaak geleid tot verkeerde criteria voor tankprocessen;
- een laser-doppler snelheidsmeter is zeer geschikt bij de lage stroomsnelheden in sedimentatietanks;
- de meeste kinetische energie van de stroming, die de tank binnenkomt, gaat verloren aan turbulente wervels in de inlaatzone;
- veel experimenten richten zich op verschillende soorten inlaatconstructies, zoals schotten en diffusoren;
- experimenteel onderzoek heeft zich voornamelijk gericht op stromingseigenschappen in rechthoekige tanks zonder sedimentbeweging.

Op de TUD is het computermodel PHOENICS operationeel waarmee, naar wordt verwacht de fysische processen in nabezinktanks, goed kunnen worden gemodelleerd.

### 3.2 Fysische modellering van stroming zonder sediment

Fysisch onderzoek naar het stromingsgedrag in nabezinktanks kan in principe worden uitgevoerd, zowel in een praktijktank als in een fysisch laboratoriummodel. Over het algemeen heeft het uitvoeren van onderzoek in de praktijk het nadeel, dat de processen die zich afspelen moeilijk beheersbaar zijn, en minder eenvoudig meet- en zichtbaar te maken zijn dan in een laboratoriummodel.

Meer in het bijzonder kan het laboratoriummodel worden gebruikt voor:

- de ijking van het mathematische model;
- het kwalitatief voorspellen van het mengselgedrag (voor die gevallen waarbij een mathematische modellering (nog) niet mogelijk was).

Hier wordt in het kort het uiteindelijke ontwerp van het model, de werking ervan, de bepaling van de debieten door het model, de meetmethode (locatie, apparatuur) en de verwerking van de meetgegevens besproken.

### 3.2.1 ontwerp van het schaalmodel

In het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de Faculteit der Civiele Techniek is op schaal een deel van een nabezinktank gebouwd. Er is uitgegaan van een prototype van een grote ronde nabezinktank. Vooralnog zijn invloeden van wind en slibruimer niet meegenomen in het onderzoek. De stroming kan dan worden gemodelleerd als radiaal symmetrisch, dat wil zeggen dat de stroomsnelheid in tangentiële richting gelijk is aan nul. Daarom kan volstaan worden met het bouwen van een sector in plaats van een geheel rond model. Een sector is eenvoudiger te realiseren, alle plaatsen in de doorsnede zijn gemakkelijk bereikbaar voor het uitvoeren van metingen en als de wanden van glas gemaakt worden is met behulp van kleurstof een goed beeld te verkrijgen van de snelheidsverdeling over de vertikaal. Glas is bovendien zeer glad zodat beïnvloeding van de stroming minimaal wordt. De bodem van het model is evenals die van het prototype gemaakt van glad afgewerkt beton. In verband met de uitvoerbaarheid en de bereikbaarheid is de schaal van het model 1:8 gekozen, waarmee de ruimtelijke afmetingen van het model vast liggen. Dit is enigszins anders voor de inloopconstructie in het centrum van de tank. Met name hier zou de stroming in het model anders kunnen zijn dan in een praktijktank, doordat een sector van 60 graden is genomen in plaats van een geheel rond model. Bij de vormgeving is er naar gestreefd om de instroming en de retourstroom radiaal symmetrisch te maken.

Voor het ontwerp van het schaalmodel is uitgegaan van de volgende gegevens, afkomstig van nabezinktanks uit de praktijk:

Ronde nabezinktank;	
Diameter	= 48 m (r = 24 m);
Kantdiepte	= 2 m (min. 1,5 en max. 2,5 m);
Diepte in het centrum	= 4 m bij een bodemhelling 1:12;
Straal inlooptrommel	= 2 m.

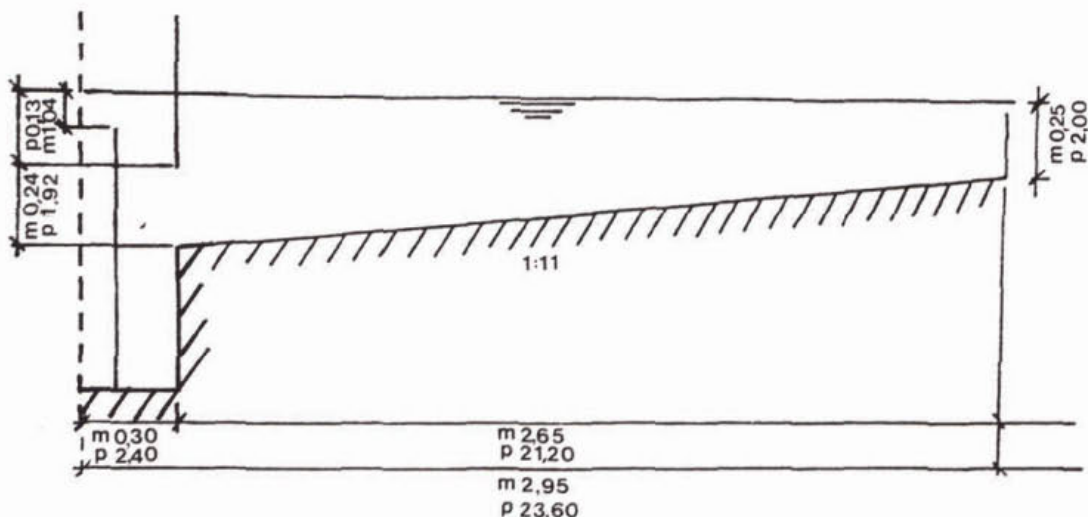
Voor de bepaling van de praktijkdebieten voor RegenWaterAfvoer(RWA) en DroogWeerAfvoer(DWA) en de omzetting van deze debieten naar de modeldebieten, inclusief de gekozen retourstromen, zijn als uitgangspunten gehanteerd:

- $Q_{RWA} = 3 \cdot Q_{DWA}$
- RWA:  $Q_{retour} = \frac{1}{2} \cdot Q_{RWA}$
- DWA:  $Q_{retour} = 0,8 \cdot Q_{DWA}$
- Oppervlaktebelasting bij RWA: 0,6-1 m/h (op de tank).

Het model is geschaald op het Reynolds-getal ( $Re$ ), vanwege het in eerste instantie modelleren van stroming zonder sediment. Binnen het op Reynolds geschaalde model is later ten behoeve van meerfase- stroming, geschaald op het intern Froude getal ( $Fr$ ). Voor de definities van 'Re' en 'Fr' wordt verwezen naar de symbolenlijst.

De uit praktische overwegingen gekozen schaal van 1:8 en de arbitrair vastgestelde "taartpunt" met een hoek van 60° hebben geresulteerd in een model waarvan de afmetingen zijn (zie ook figuur 3):

Straal r	= 2,95 m (van hart tot kant);
Bodemhelling	= 1:11;
Kantdiepte	= 0,25 m;
Hartdiepte	= 0,52 m;
Straal inlooptrommel	= 0,25 m.



Figuur 3 Afmetingen van schaalmodel en prototype

Uitgaande van deze afmetingen van het laboratoriummodel en van de bovenstaande uitgangspunten voor de verdeling van de tankdebiëten, zijn de volgende debiëten voor het model bepaald, waarbij voor de oppervlaktebelasting bij RWA het maximum van 1 m/h (ofwel  $1 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) is genomen:

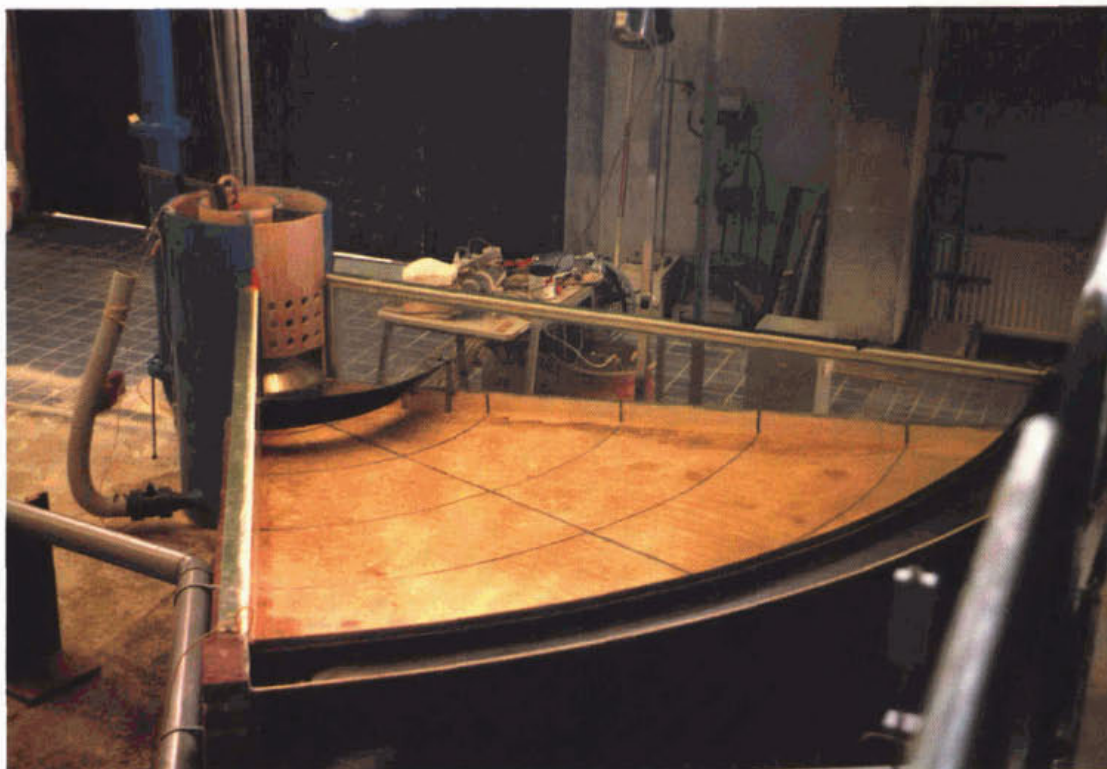
- RWA: inkomend debiet =  $0.0114 \text{ m}^3/\text{s}$ , waarvan  $0.0076 \text{ m}^3/\text{s}$  de tank instroomt en  $0.0038 \text{ m}^3/\text{s}$  retour stroomt;
- DWA: inkomend debiet =  $0.0066 \text{ m}^3/\text{s}$ , waarvan  $0.0033 \text{ m}^3/\text{s}$  de tank instroomt en  $0.0033 \text{ m}^3/\text{s}$  retour stroomt.

In figuur 3 zijn ook de afmetingen van een praktijktank gegeven, indien het ontworpen model (m) zou worden teruggeschaald naar praktijkafmetingen (p).

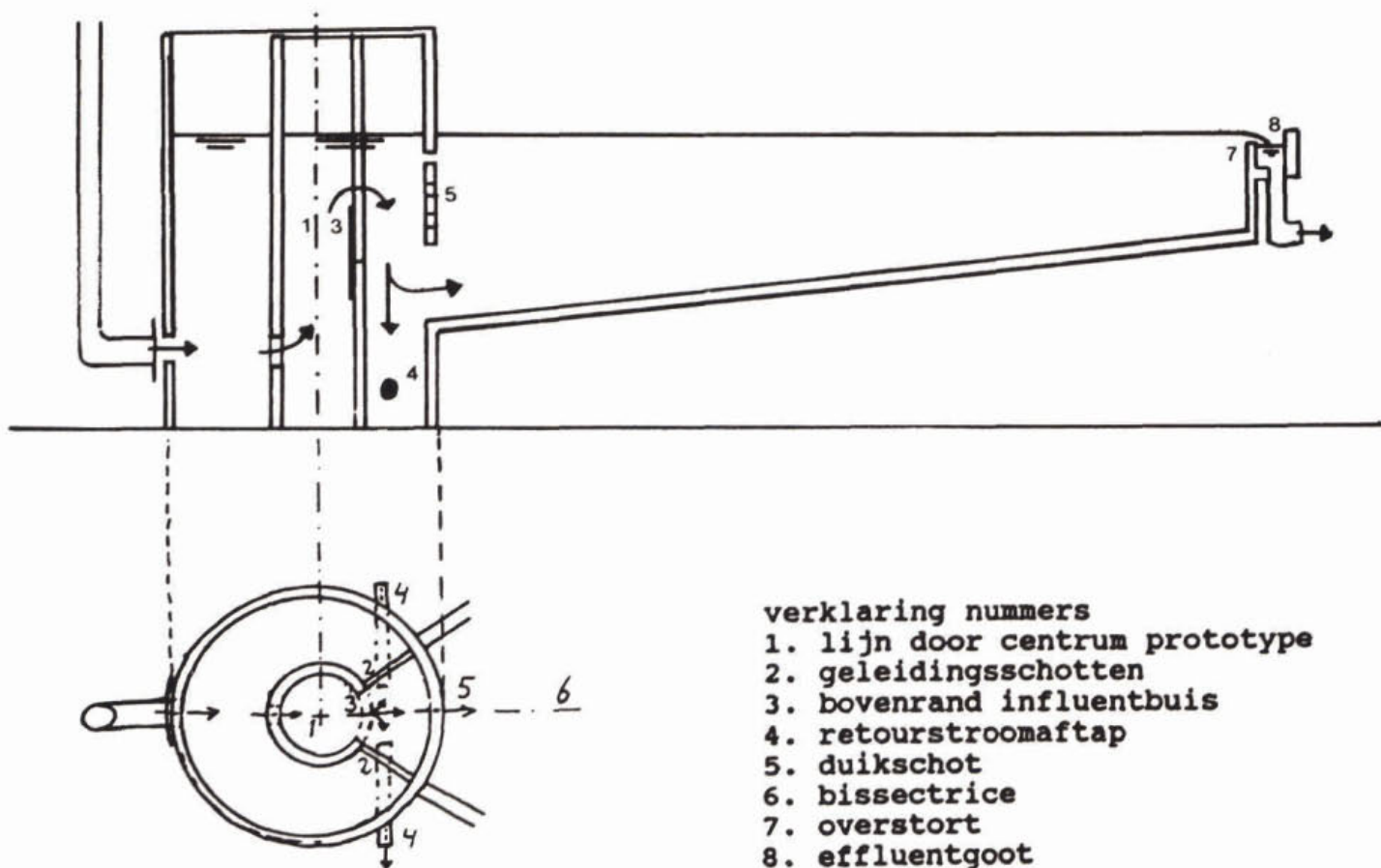
### 3.2.2 werking van het model

In de figuren 4 en 5 zijn respectievelijk een foto en een tekening van de doorsnede van het model gegeven. Door middel van pijlen is de stroomrichting aangegeven. Het water van het systeem wordt aangevoerd via een leiding. Vervolgens komt het in de buitenste ring van de inlaatconstructie terecht en via een opening stroomt het van onderaf de binnenste ring in. Deze binnenste ring stelt de influentbuis van het prototype voor. De stroming gaat over de rand van de influentbuis en vervolgens deels de tank in en deels weg via de retourstroomaftap. Tussen de influentbuis en het duikschot zijn geleidingsschotten aangebracht in het verlengde van de wanden van de tank. Hiermee wordt voorkomen dat de stroming bij het binnentreden van de tank een scherpe hoek passeert. De stroming zou dan loslaten van de wanden en niet radiaal symmetrisch binnenkomen maar geconcentreerd in het midden. De geleidingsschotten lopen door tot op de bodem van de inlaatconstructie, die een halve meter lager ligt dan de bodem van de tank. Onderin de geleidingsschotten zijn de retourstroomaftappen aangebracht, tegenover elkaar voor de symmetrie. Wat de inlaatconstructie betreft, zijn er verschillende varianten mogelijk, deze zijn geschetst in figuur 6.

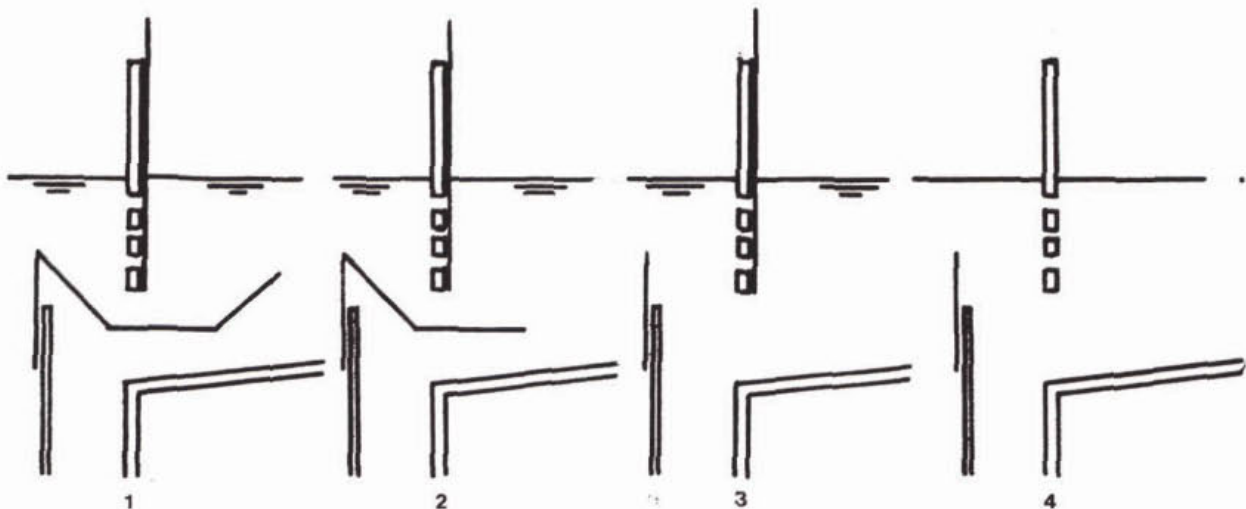
Het debiet door de tank kan worden geregeld via de hoogte van de instroomopening in combinatie met de instelling van het retourstroomdebiet.



Figuur 4 Foto van het model met deflectieschot met extensie



Figuur 5 Schets van doorsnede model zonder deflectieschot



Figuur 6 Schets van de vier varianten van de inlaatconstructie

- variant 1: gesloten duikschot met deflectieschot met extensie
- variant 2: gesloten duikschot met deflectieschot
- variant 3: gesloten duikschot zonder deflectieschot
- variant 4: geperforeerd duikschot zonder deflectieschot

### 3.2.3 metingen

De stroomsnelheid van de vloeistof in de tank is gemeten met een elektromagnetische stroommeter (EMS). Aan een geknikte staaf in het water is een zwart schijfje, de probe, bevestigd. Dit wekt een elektromagnetisch veld op. De door dit veld bewegende waterdeeltjes veroorzaken een potentiaalverschil, hetgeen wordt gemeten met de EMS.

In totaal zijn per proef 19 vertikalen bemeten, verdeeld over 6 meetraaien (fig. 7) met per vertikaal 4 tot 6 meetpunten (fig. 8). Bij de bepaling van de locatie van de meetvertikalen, is uitgegaan van de symmetrie van de tank dat wil zeggen er is in één helft van de tank gemeten (de rechter). Alleen in de raaien 1 en 2 is, vanwege ruimtegebrek voor de EMS, in de linkerzijde van de tank gemeten.

In raai 3 zijn 5 vertikalen bemeten om inzicht te krijgen in de uniformiteit van de stroming over de breedte van de tank. Hieruit is gebleken dat volstaan kon worden met 3 meetvertikalen.

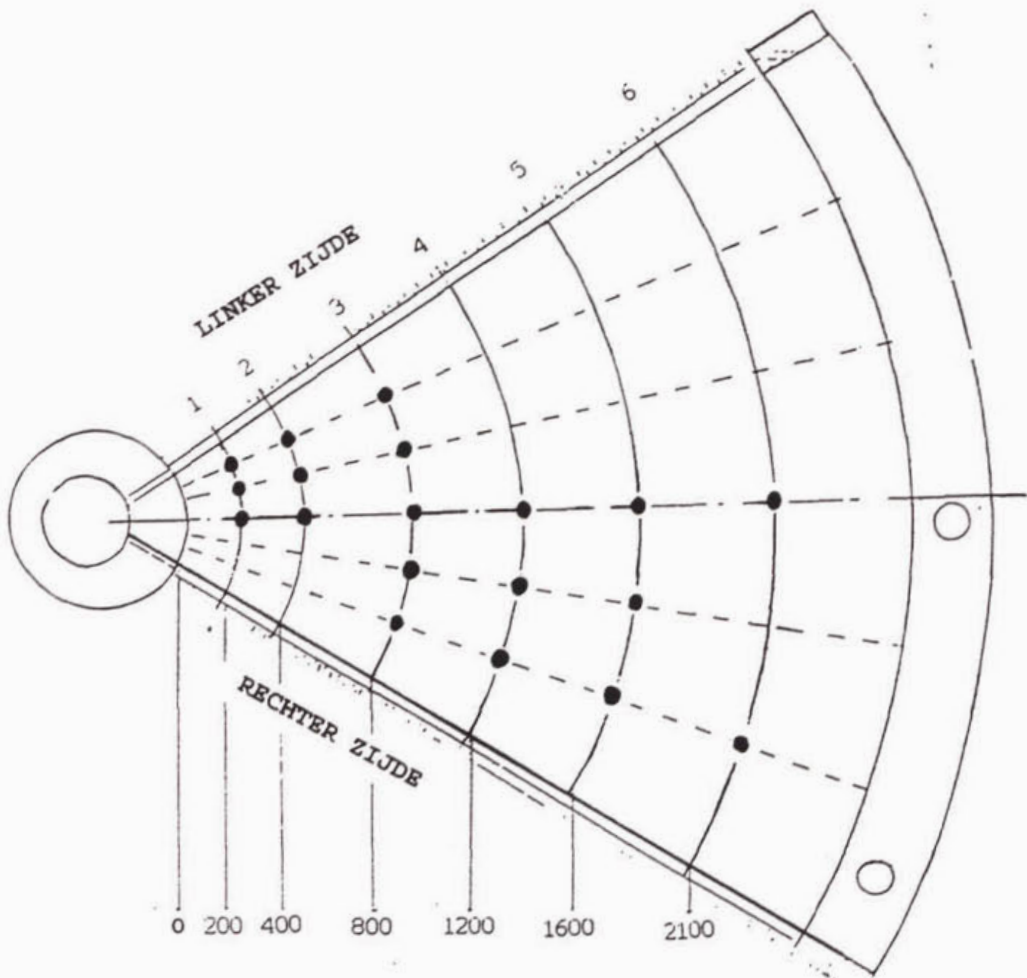
Met de EMS worden series momentane snelheden gemeten. De interesse gaat niet uit naar deze momentane waarden, maar naar de gemiddelde snelheden. Om van de meting tot deze gemiddelde snelheden te komen, zijn drie computerprogramma's geschreven.

- a. De momentane meetwaarden zijn eerst opgeslagen in datafiles met het programma DACON.
- b. De opgeslagen meetwaarden stellen geen snelheden voor, maar dienen via verschillende stappen omgerekend te worden naar momentane snelheden, waarna ze kunnen worden gemiddeld. Bij een meettijd van vijf minuten en een meetfrequentie van 100 Hertz worden dan 30.000 metingen uitgevoerd. Omdat de meting tegelijkertijd plaatsvindt in twee richtingen, worden er 60.000 meetwaarden opgeslagen. Voor de verwerking van de gegevens is het programma FIN geschreven.

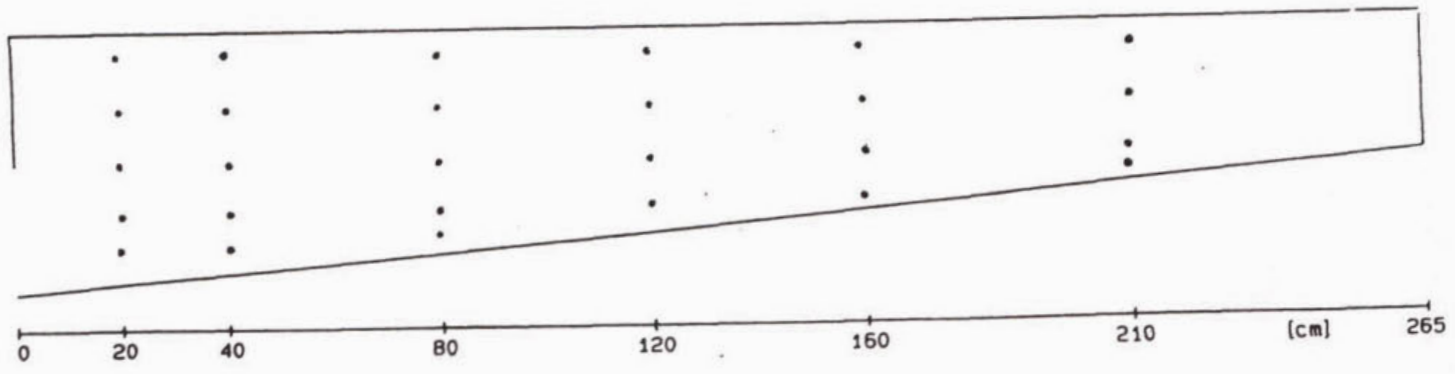


c. Van tijd tot tijd dient tijdens het meten de nulzetting van de EMS bepaald te worden. Er wordt dan een meting verricht in stilstaand water. Het programma CORREC berekent uit de datafile een waarde die gebruikt wordt om de snelheidsmetingen te corrigeren.

De genoemde programma's zijn besproken door van Marle (1991;2). In dat rapport wordt ook aandacht besteed aan de nauwkeurigheid van de gebruikte EMS. Voor de bepaling van de stroomsnelheid in een raai (op een bepaalde diepte), zijn voor iedere raai de meetresultaten gemiddeld over de drie vertikalen.



Figuur 7 Verdeling van meetvertikalen over de tank



Figuur 8 Verdeling van meetpunten over de vertikaal

### 3.3 Fysische modellering van de stroming met sediment

In deze paragraaf worden in het kort de proefopstelling en de meetmethode besproken. De resultaten van de proeven komen in hoofdstuk 6 aan de orde.

#### 3.3.1 proefopstelling

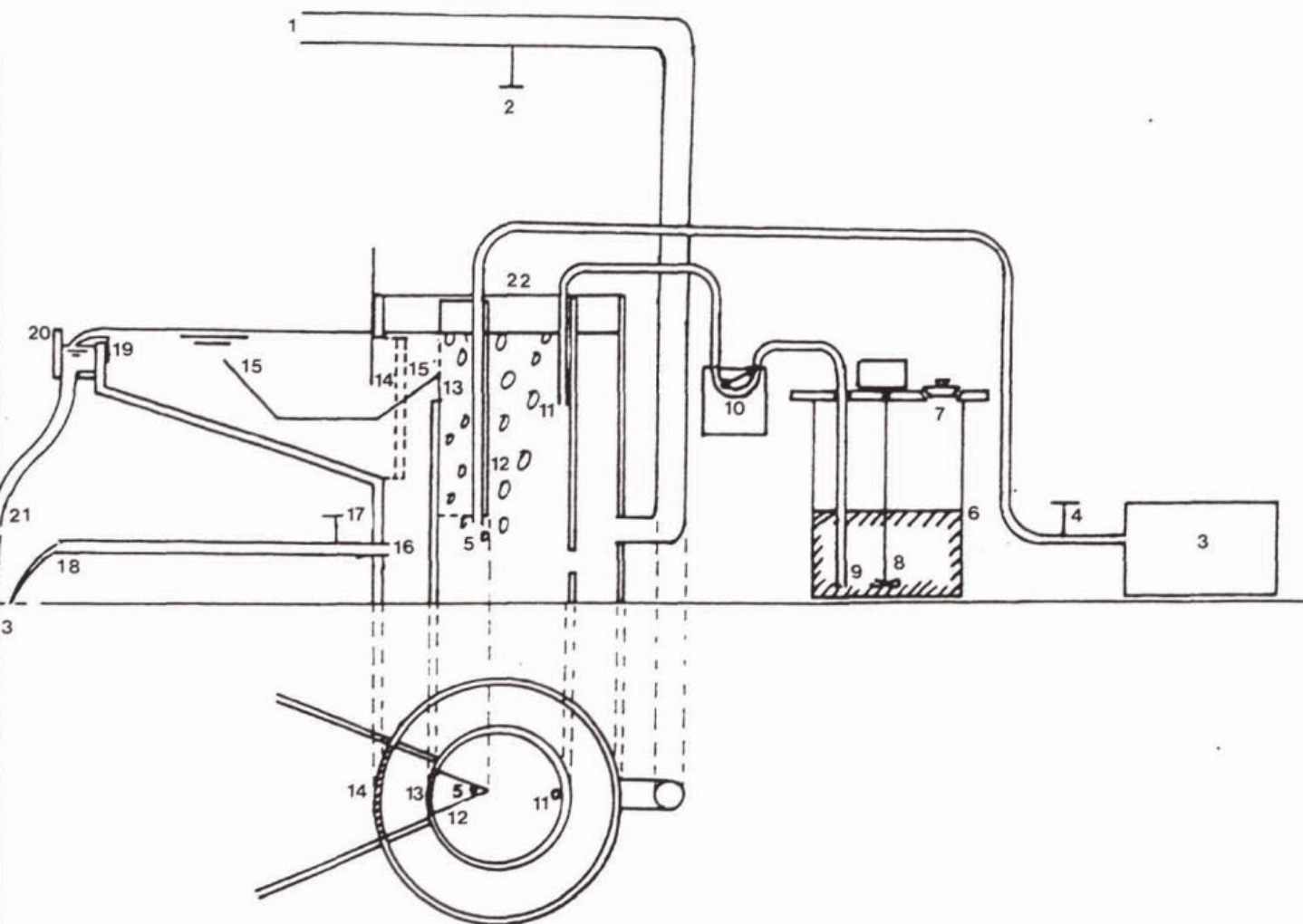
In figuur 9 is een schets gegeven van de proefopstelling. Zuiver water uit het systeem van het laboratorium wordt toegevoerd bij 1. Dit water heeft een constante temperatuur van 21°C met variaties van hoogstens 1°C. Deze temperatuur is gelijk aan die van de omgeving, zodat ook het water in de tank deze temperatuur houdt. Dichtheidsverschillen tussen influent en tank kunnen dus verwaarloosd worden. Met een afsluiter is het totale debiet ingesteld op 0,56 l/s (afwijking <2%). Dit debiet is zo gering dat het buiten het meetgebied van de beschikbare manometers valt. Het wordt daarom volumetrisch bepaald bij het lozingspunt van het effluent, als de retourstroomkranen dicht zijn.

Al eerder is vermeld dat geschaald is volgens het intern Froudegetal. Hierdoor valt het Reynoldsgetal in het model veel lager uit dan in het prototype. Daarom wordt kunstmatig turbulentie opgewekt bij de instroming door lucht in te blazen. Vanuit een compressor wordt lucht onder druk naar de instroomopening geperst. Met een kraan is de luchttoevoer regelbaar. Vanuit het uitmondingspunt van de luchtleiding beweegt de lucht zich aan twee kanten van het schot (12) omhoog. Aan de linkerkant wordt hierdoor de gewenste turbulentie opgewekt en meegevoerd de tank in. Aan de rechterkant vindt hierdoor sterke menging plaats van het watervolume waar de kaolinietsuspensie en de kleurstof worden toegevoegd.

Het influent heeft, omdat het sedimentdeeltjes bevat, een hogere dichtheid dan het water in de tank. Uitgaande van een relatief dichtheidsverschil in het prototype van 0,002 is voor deze proef een relatief dichtheidsverschil berekend van 0,0013. Deze wordt bereikt door per uur 4,2 kg kaoliniet in de tank te brengen. Om de menging te bevorderen, wordt het kaoliniet al voor het toevoegen aan de instroming van de tank in suspensie gebracht. Aan de 4,2 kg kaoliniet wordt zoveel water toegevoegd, dat 20 l suspensie in de tank wordt gebracht. Dit volume is te verwaarlozen ten opzichte van het totale debiet (1%).

Via een slangenpompje, dat ingesteld is op een debiet van 20 l/h, wordt de suspensie naar de toevoer (11) gepompt.

Het influent stroomt over de rand van de influentbuis (13) en vervolgens onder het duikschot (14) door. Het deflectieschot (15) leidt het influent omhoog. Na het passeren van het deflectieschot verlaat een deel van het debiet de tank via de retourlibaftap (in figuur 9 is ter vereenvoudiging slechts één kraan weergegeven). De situatie die wordt nagebootst is die van regenweerafvoer (RWA). De verhouding tussen het debiet door de tank en het retourslib is dan 2:1. Iedere retourlibaftap is ingesteld op 0,093 l/s (afwijking <4%). De retourstroom wordt geloosd op het riool bij punt (18). De rest van het debiet doorloopt de tank, verlaat deze via de overstortgoot en wordt ook geloosd op het riool.



Figuur 9 Vereenvoudigde schets van de proefopstelling, hier met deflectieschot met extensie (niet op schaal)

- |    |                                                           |    |                                            |
|----|-----------------------------------------------------------|----|--------------------------------------------|
| 1  | aanvoer schoon water                                      | 13 | instelbare bovenrand influentbuis          |
| 2  | regelbare afsluiter (ingesteld op 0,56 l/s)               | 14 | instelbaar duikschot                       |
| 3  | compressor                                                | 15 | deflectieschot, kan verwijderd worden      |
| 4  | regelbare afsluiter                                       | 16 | aftap retourslib                           |
| 5  | uitmonding luchttoevoerleiding                            | 17 | regelbare afsluiter (retourslib 0,187 l/s) |
| 6  | mengvat kaolinietsuspensie                                | 18 | lozingspunt retourslib                     |
| 7  | opening voor toevoegen water en kaoliniet                 | 19 | overstortrand                              |
| 8  | propellor                                                 | 20 | effluentgoot                               |
| 9  | aftappunt kaoliniet                                       | 21 | lozingspunt effluent                       |
| 10 | slangpompje                                               | 22 | punt waar kleurstof wordt toegevoegd       |
| 11 | uitmonding kaoliniettoevoer                               | 23 | afvoerput naar riool                       |
| 12 | omleidingsschot voor goede menging kaoliniet en kleurstof |    |                                            |

### 3.3.2 meetmethoden

#### Kaolinietconcentratiemeting

Voor het meten van de concentratie aan kaoliniet op diverse plaatsen in de tank, is gebruik gemaakt van een optische slibmeter (OSLIM) en een HACH Turbidimeter.

##### optische slibmeter (OSLIM)

De vloeistof uit de tank gaat door een cuvet waarin infrarood licht door de vloeistof schijnt. Naarmate de concentratie kaoliniet hoger is, is de vloeistof troebeler en absorbeert meer licht. Met een fotodiode wordt de doorgelaten hoeveelheid licht gemeten. Een bepaalde hoeveelheid licht geeft een bepaalde spanning, die afgelezen wordt op een voltmeter. Om te bepalen welk voltage overeen komt met welke concentratie dient de OSLIM geijkt te worden. Dit gebeurt door eerst een kleine hoeveelheid vloeistof met daarin de maximaal te verwachten concentratie kaoliniet aan te maken. De OSLIM wordt zo ingesteld, dat het hoogst meetbare voltage overeenkomt met deze concentratie. Vervolgens wordt aan de vloeistof steeds een bekende hoeveelheid zuiver water toegevoegd ter verdunning, totdat de laagste concentratie die nog van belang is, bereikt is. Steeds wordt de corresponderende spanning afgelezen en uit de serie bekende concentraties, gekoppeld aan de gemeten spanningen, kan een ijkgrafiek gemaakt worden.

Gemeten zijn:

- influentconcentraties. Hierbij werden het aan- en afvoerbuisje in de stroming gedompeld tussen de influentbuis en het duikschot;
- concentraties in de tank. Hierbij werden het aan- en afvoerbuisje gemonteerd aan een peilnaald op een balk boven de stroming. Op deze wijze kon het meetpunt zowel in horizontale als in verticale richting gevarieerd worden. Er werden vier vertikalen doorgemeten op 80, 130, 180 en 260 cm vanaf het duikschot (laatstgenoemde vertikaal bevindt zich 5 cm voor de overstortrand). In de vertikalen werd van de bodem tot het oppervlak om de 2 cm gemeten. Met het meten van deze dichtheidsprofielen over de vertikaal werd aangevangen nadat uit de effluentconcentratie bleek dat een evenwichtssituatie was bereikt in de tank. In de verschillende proeven werden dezelfde vertikalen op ongeveer dezelfde tijdstippen vanaf het begin van de proef doorgemeten. De vertikaal op 80 cm afstand van het duikschot werd steeds twee maal doorgemeten, als eerste en als laatste meting, om te controleren of inderdaad een evenwicht was bereikt. Verder werd vlak na het begin van de proef het verloop van de concentratie in de tijd gemeten op twee vaste punten in de stroming, namelijk vlak bij de bodem op 80 cm en op 260 cm vanaf het duikschot.

Voor het nemen van monsters van het effluent kan de OSLIM niet gebruikt worden. De situatie bij het monsterpunt is niet geschikt voor de continue aanvoer van de OSLIM - de metingen zouden verstoord worden doordat luchtballen aangezogen zouden worden. Daarom is hiervoor gebruik gemaakt van de turbidimeter.

##### Hach Turbidimeter

Voor het meten van kaolinietconcentraties in het effluent is een Hach Turbidimeter gebruikt. Ook hier wordt gebruik gemaakt van licht, dat valt op een meetcel; door een detector wordt de hoeveelheid doorgelaten licht gemeten.

De meetcel is een buisje van speciaal glas voor een minimale optische verstoring van de meting. Om een monster door te meten wordt de meetcel uit het apparaat gehaald en na enige keren spoelen met de monstervloeistof volledig gevuld. De meetcel moet ook van buiten schoon zijn, mag niet met de vingers worden betast en dient droog te zijn. Voor de vergelijkbaarheid van de metingen wordt steeds dezelfde meetcel gebruikt, die in dezelfde stand in de turbidimeter wordt gezet. Vervolgens kan de waarde van de troebelheid afgelezen worden in NTU (Nephelometric Turbidity Units). Om deze waarden te relateren aan kaolinietconcentraties dient een ijkgrafiek gemaakt te worden op dezelfde wijze als beschreven voor de OSLIM.

Door de wijze van monsternamen is de turbidimeter meer geschikt voor het meten van de effluentconcentratie dan de OSLIM. Een nadeel van de turbidimeter is dat in de meetcel nog bezinking op kan treden. In het effluent komen echter alleen nog lage concentraties van de slechtst bezinkbare deeltjes voor zodat dit nadeel nauwelijks speelt.

Gemeten zijn de kaolinietconcentraties in het effluent, en wel om de 6 minuten. Het monster werd genomen bij het eind van de afvoerbuis die aan de effluentgoot is bevestigd, vanuit de vrij uitstromende straal. Op de weg vanaf de overstortrand naar het monsterpunt bezinkt enig kaoliniet in de effluentgoot en in de afvoerbuis, ondanks de vrij hoge stroomsnelheden. In de effluentgoot was dit duidelijk te zien doordat de goot bij het opdrogen na de proef wit gekleurd was.

#### Temperatuur

Dichtheidsstromen worden veroorzaakt door concentratieverschillen, maar ook door temperatuurverschillen. Een temperatuurverschil van  $1^{\circ}\text{C}$  in water veroorzaakt een relatief dichtheidsverschil  $\epsilon=0,0002$ . Tijdens de proeven is de temperatuur van het water in de influentbuis en in de tank gemeten. Het maximaal gemeten verschil bedroeg  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Dit veroorzaakt een  $\epsilon=0,0001$ . Ten opzichte van de nagestreefde  $\epsilon=0,0013$  is dit een aanvaardbare afwijking.

#### Slibspiegelhoogte

Op vijf plaatsen zijn op het glas van de zijwand van het model strippen aangebracht, met daarop in centimeters de afstand vanaf de waterspiegel naar beneden aangegeven. De strippen bevinden zich op 18, 68, 122, 173 en 225 cm vanaf het duikschot, de laatste vertikaal bevindt zich dus circa 10 centimeter voor de overstort. Hiermee kan op verschillende plaatsen in het model de hoogte van de slibspiegel worden afgelezen. In combinatie met het tijdstip van de meting wordt zo informatie verkregen over het verloop van de slibspiegel over de doorsnede en in de tijd.

### 3.4 Mathematische modellering van stroming zonder sediment

#### 3.4.1 algemeen

De eerste en meest bekende mathematische modellering voor het ontwerp van bezinkbekkens is afkomstig van Hazen (1904). Hazen schematiseerde het bezinkingsproces tot een ideale bezinking in een ideale bezinktank, dat wil zeggen een tank waarin de turbulente diffusie van gesuspendeerd sediment wordt verwaarloosd ten opzichte van de valsnelheid en waarin geen resuspensie van reeds gesedimenteerd materiaal plaatsvindt. In theorie betekent dit, dat het rendement van de bezinktank alleen wordt bepaald door de oppervlaktebelasting ( $s_0$ ) en niet door de diepte van de tank. Dit geldt in feite alleen bij tanks met verticale wanden en vlakke bodem.

De oppervlaktebelasting is gedefiniëerd als:

$$s_0 = Q/A$$

waarin,

$s_0$	= oppervlaktebelasting	(m/s), (m/h), (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h)
$Q$	= aanvoerdebiet	(m <sup>3</sup> /s), (m <sup>3</sup> /h)
$A$	= horizontale tankoppervlak	(m <sup>2</sup> )

Indien de deeltjesvalsnelheid  $W_s$  (van een mengsel met uniforme deeltjes) groter is dan de oppervlaktebelasting  $s_0$ , is het rendement gelijk aan 1, anders is het rendement gelijk aan  $W_s/s_0$ .

Latere onderzoekers (zie STORA, 1992) hebben vereenvoudigde transportmodellen ontwikkeld, die niet de complete hydraulische vergelijkingen oplossen. De vereenvoudigingen bestaan hieruit, dat een longitudinale, uniforme stroming wordt aangenomen. De aanname heeft tot gevolg, dat typische (na)bezinktankverschijnselen als turbulente diffusie, circulatiestromen, dichtheidsstromen, kortsluitstromen en het sedimentatiegedrag, door de grote invloed die de stroming en de sedimentbeweging op elkaar uitoefenen, niet kunnen worden beschreven. Bovendien kan het effect van schotten of andere geometrische onregelmatigheden met dergelijke modellen niet worden berekend, noch worden voorspeld. Het weergeven van de genoemde complexe verschijnselen wordt in principe pas mogelijk, indien de complete hydraulische vergelijkingen worden opgelost.

### 3.4.2 basisvergelijkingen

In STORA (1992) zijn de basisvergelijkingen opgesteld, waarvan hier alleen de (niet volledige) resultaten worden gebruikt, die betrekking hebben op een radiale, stationaire stroming (ronde tank).

Voor de waterbeweging zijn de vergelijkingen achtereenvolgens:

I: De continuïteitsvergelijking:

$$\frac{\delta \bar{u}}{\delta r} + \frac{\bar{u}}{r} + \frac{\delta \bar{w}}{\delta z} = 0$$

II: De Navier-Stokesvergelijkingen:

$$\bar{u} \frac{\delta \bar{u}}{\delta r} + \bar{w} \frac{\delta \bar{u}}{\delta z} + \frac{\delta(\bar{u}'\bar{u}')}{\delta r} + \frac{\delta(\bar{u}'\bar{w}')}{\delta z} - \frac{(\bar{v}'\bar{v}')}{r} = -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta r}$$

$$\bar{u} \frac{\delta \bar{w}}{\delta r} + \bar{w} \frac{\delta \bar{w}}{\delta z} + \frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta z} + \frac{\delta(\bar{u}'\bar{w}')}{\delta r} + \frac{\delta(\bar{w}'\bar{w}')}{\delta z} = -g$$

III: De k- $\epsilon$  turbulentievergelijkingen

$$\bar{u} \frac{\delta k}{\delta r} + \bar{w} \frac{\delta k}{\delta z} = Pr - \epsilon + D(k) + G$$

$$\bar{u} \frac{\delta \epsilon}{\delta r} + \bar{w} \frac{\delta \epsilon}{\delta z} = a_1 \frac{\epsilon}{k} Pr + (1-a_2)G - a_2 \frac{\epsilon^2}{k} + D(\epsilon)$$

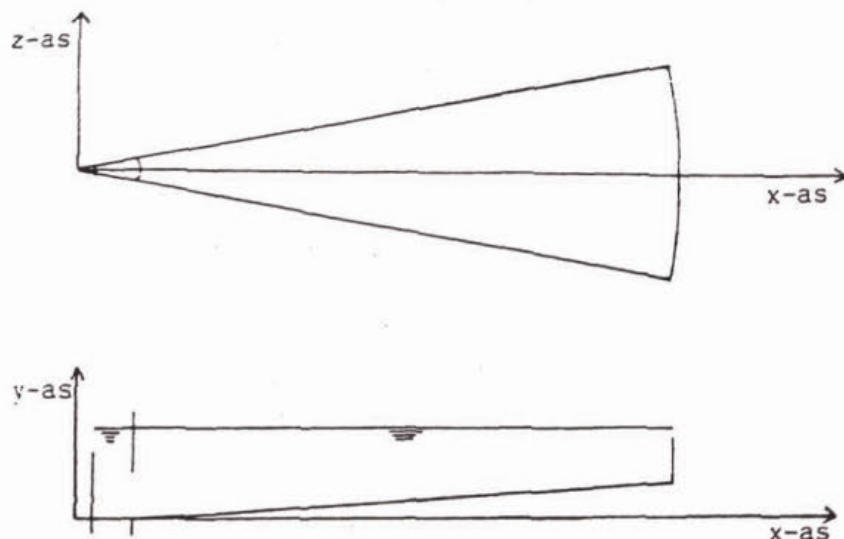
Voor het numeriek oplossen van de vergelijkingen voor de waterbeweging is gebruik gemaakt van het op de TUD aanwezige computerprogramma PHOENICS. Hier worden in het kort de aspecten behandeld die voor de modellering van belang zijn, alvorens daadwerkelijke rekenresultaten kunnen worden verkregen. Voor de detaillering van deze aspecten wordt verwezen naar het rapport van Melis (1991).

Voor de te modelleren afmetingen van de tank is uitgegaan van de afmetingen van het laboratoriummodel (figuur 3).

4.1 Opbouw van het rekenrooster

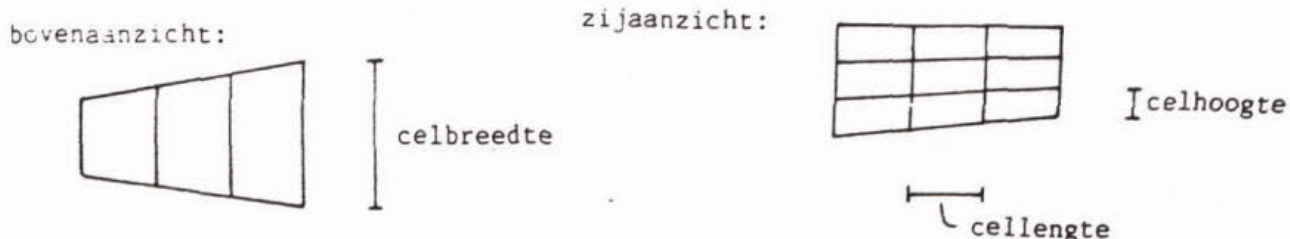
Inherent aan dit soort numerieke problemen is dat het te schematiseren "object" gediscrètiseerd moet worden, dat wil zeggen dat het object moet worden opgedeeld in meerdere "rekencellen". Voor iedere cel worden de te bepalen grootheden (snelheden, druk,  $k$  en  $\epsilon$ ) berekend waarbij het noodzakelijk is om voor iedere cel de coördinaten van de hoekpunten te kennen.

Vanwege de schuine tankbodem is in PHOENICS het werken met cilindercoördinaten niet mogelijk. Daarom is gebruik gemaakt van 'Body Fitted Coordinates' (BFC) waarbij de coördinaten van de hoekpunten worden opgegeven ten opzichte van een cartesisch assenstelsel, zie figuur 10.



Figuur 10 Gebruikte assenstelsel

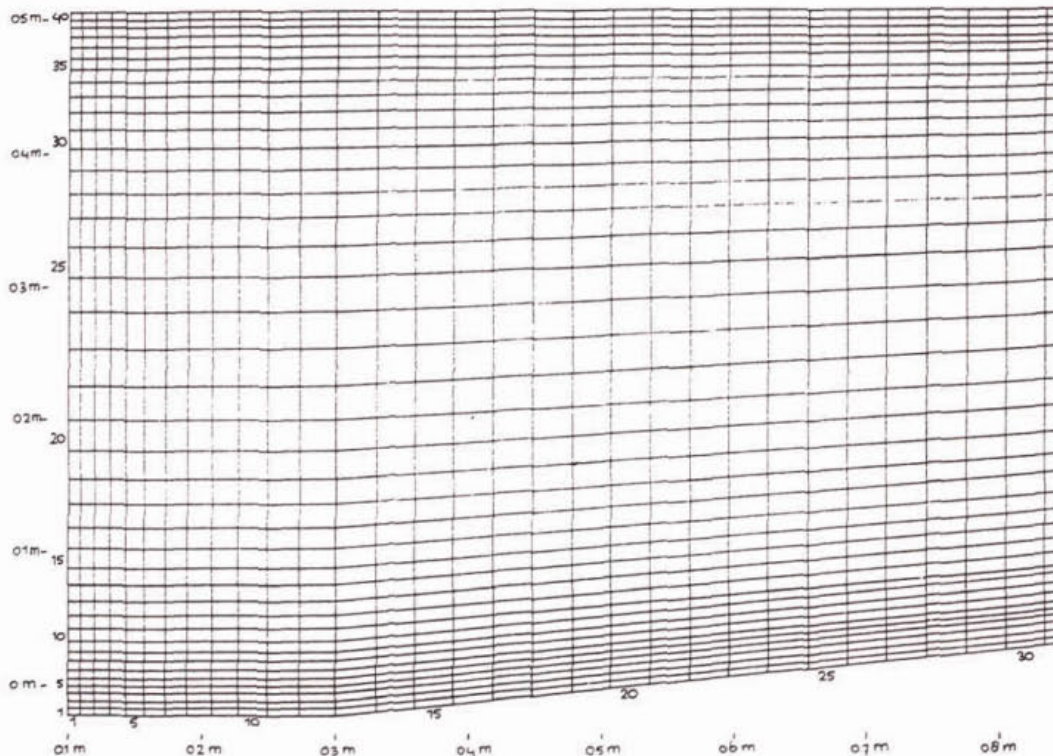
Er is gebruik gemaakt van een drie-dimensionaal rooster, zodat de vorm van de taartpunt behouden is gebleven. Echter, omdat er twee-dimensionaal vertikaal is gerekend, is er in tangentiële richting maar één cel (Figuur 11).



Figuur 11 Boven- en zijaanzicht van de cellen

Voorwaarde voor toepassing van de BFC is dat de hoek van de taartpunt ( $\alpha$ ) niet te groot is. In het onderzoek is bepaald dat voor  $\alpha = 0,04$  rad, de gemaakte fout slechts 0,1 % is.

In figuur 12 is het resultaat gegeven van de schematisatie van de tankgeometrie in rekencellen.



Figuur 12 Schematisatie van de tankgeometrie in rekencellen

Er wordt een onderscheid gemaakt tussen de inlooptrommel met een lengte van 0,20 m en de tank met een lengte van 2,65 m. Hiermee is ervoor gezorgd dat de scheiding tussen de inlooptrommel en de tank precies gelijk valt met een celwand. Dit is nodig in verband met het feit dat snelheden berekend worden aan de celwand.

Bij de bepaling van het aantal cellen waarin de tank moet worden verdeeld, is gebruik gemaakt van de ervaringsregel voor numerieke berekeningen dat een bepaalde celafmeting (hoogte, breedte of lengte) beter niet meer dan 1,1 maal groter of kleiner is dan die afmetingen van de vorige cel, wil men niet te grote fouten maken.

In x-richting is de tank verdeeld over 90 cellen van gelijke lengte. Voor het inlooptstuk moest voor een oplopende cellengte worden gekozen omdat anders de overgang van de inlooptrommel naar de tank te groot zou worden. De inlooptrommel bestaat in x-richting uit 12 cellen.

Voor de bepaling van het aantal cellen in y-richting is het noodzakelijk het niveau van de waterspiegel in de tank te kennen. Dit niveau is bepaald aan de hand van de formule voor een scherpe overlaat.

Vanwege de op te leggen randvoorwaarden bij de bodem en de waterspiegel, moeten de celhoogten op die plaatsen klein zijn. Dit is vooral van belang voor het verkrijgen van een logaritmisch snelheidsprofiel.



Omdat de celhoogten bij de bodem en de waterspiegel klein moeten zijn, is het niet handig om een equidistante verdeling langs de vertikaal toe te passen: dit zou te veel cellen geven (lange rekentijd, dus duur). Beter is het om de celhoogten tot het midden van de vertikaal met een factor te laten toenemen en daarna op dezelfde manier te laten afnemen.

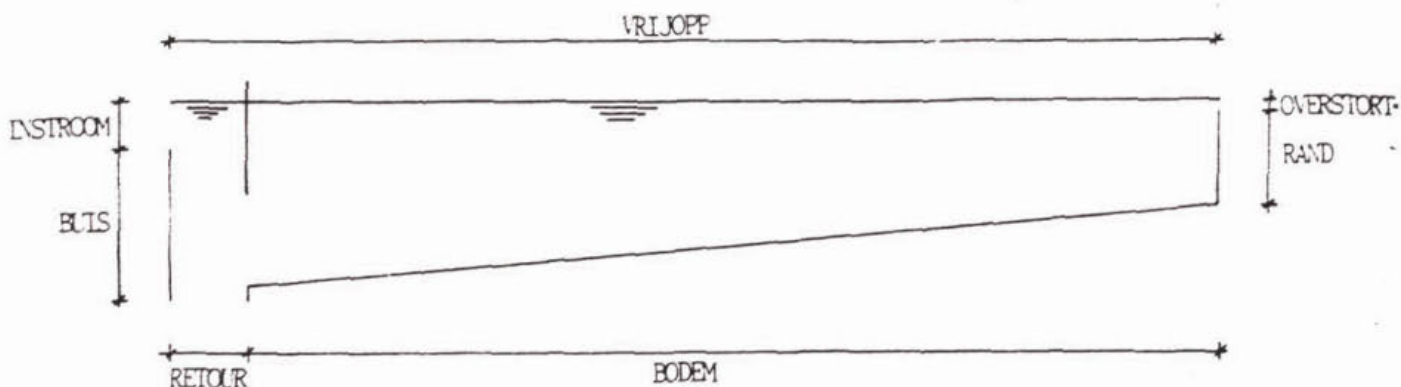
Om de retourstroom te kunnen modelleren worden er bij het inloopstuk nog vier cellen toegevoegd onder de x-as en dus bij de tank nog vier cellen onder de tankbodem. De hoogte van deze cellen wordt gelijk gekozen aan de hoogte van de eerste cel boven de x-as in het inloopstuk.

Resultierend geeft dit in y-richting een totaal van 40 cellen (2\*18+4).

#### 4.2 Randvoorwaarden

Voor het oplossen van het stelsel differentiaalvergelijkingen zijn er voor iedere variabele randvoorwaarden nodig. Naast de variabelen druk  $p$  en snelheden  $u$  en  $v$ , zijn er ook de variabelen  $k$  en  $\epsilon$  vanwege het gebruik van het  $k$ - $\epsilon$ -model.

Voor een overzicht van de randen zie figuur 13.



Figuur 13 Overzicht van de randen

##### 4.2.1 open randen

###### instroom

Bij de instroming moet een massaflux opgegeven worden via de druk. De waarde van de flux is:  $\rho * u_{in}$

Verder moeten er waarden opgegeven worden van de snelheid  $u$ ,  $k$  en  $\epsilon$ . De waarde van  $u_{in}$  wordt berekend met de formule:

$$u = \frac{Q}{h * b}$$

- $b$  wordt bepaald door de hoek van de taartpunt (in dit geval  $60^\circ$ ) en de afstand van de instroom tot het middelpunt van de tank (0,10 m);  
Er geldt:  $b = 2 \cdot \pi \cdot r / 6 = 0,105$  m;
- $h$  is afhankelijk van de stand van de influentbuis:  
influentbuis op normale stand:  $h = 0,13$  m  
influentbuis op lage stand :  $h = 0,22$  m

De volgende situaties zijn bekeken:

- influentbuis op normale stand en RWA:  $u_{in} = 0,835 \text{ m/s};$
- influentbuis op lage stand en RWA:  $u_{in} = 0,494 \text{ m/s};$
- influentbuis op normale stand en DWA:  $u_{in} = 0,484 \text{ m/s}.$

Waarde van  $k_{in} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2$

Waarde van  $\epsilon_{in} = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}^2$

De waarden voor  $k$  en  $\epsilon$  bij de instroming zijn bepaald door, voor verschillende combinaties van  $k$  en  $\epsilon$  bij de instroming, de berekeningen te vergelijken met de metingen. De beste resultaten werden verkregen bij de bovenstaande lage waarden voor  $k$  en  $\epsilon$ . Overigens bleek de invloed van de opgegeven waarden voor  $k$  en  $\epsilon$  bij de instroming, op de waarden in de rest van de tank, gering.

#### retourstroom

Ook hier moet een massaflux opgegeven worden via de druk. De waarde van de

flux is:  $\rho * v_{retour}$

Verder moet een waarde opgegeven worden van  $v_{retour}$ . Deze is afhankelijk van de debietstoestand en de retourstroomopening. De retourstroomopening is altijd  $4,19 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$ .

De volgende twee situaties komen voor:

- RWA:  $v_{retour} = 0,091 \text{ m/s}$
- DWA:  $v_{retour} = 0,079 \text{ m/s}$

#### overstort

Er wordt uitgegaan van de zogenaamde rigid-lid aanname. Deze benadering houdt in dat de waterspiegel wordt vastgehouden, terwijl er een druk ongelijk aan nul wordt toegelaten. De druk is in dit geval een maat voor de uitwijking die de waterspiegel eigenlijk heeft.

Aangenomen wordt dat bij de overstort de waterspiegel geen uitwijking heeft en de druk hydrostatisch is, zodat geldt:

druk  $P = 0$ .

#### vrije oppervlak

Voor deze rand wordt een symmetrie-as aangenomen voor alle variabelen, behalve voor  $\epsilon$ . Er blijkt namelijk dat, indien dit ook zou gelden voor  $\epsilon$ , de turbulente-viscositeit bij de waterspiegel veel te groot zou worden. Dat houdt verband met de dan te grote lengteschalen. Een manier om de lengteschalen te onderdrukken is het opleggen van de volgende randvoorwaarde voor  $\epsilon$ :

$$e = \frac{(\sqrt{(C_\mu C_D)} * k)^{1,5}}{\kappa * (\delta + 0,07 * h)}$$

waarin  $h = \text{waterdiepte [m]}$

#### 4.2.2 dichte randen

##### buis en rand

De buis kan beschouwd worden als een hydraulisch gladde wand waardoor gebruik kan worden gemaakt van de standaard routines in Phoenics voor de randvoorwaarden voor de snelheid,  $k$  en  $\epsilon$ . Het programma berekent een schuifspanning met een logaritmisch snelheidsprofiel. De formules voor  $k$  en  $\epsilon$  zijn:

$$k = \frac{\tau}{\sqrt{(C_\mu C_D)} * \rho}$$

$$\epsilon = \frac{(C_D/\kappa) * k^{3/2}}{\delta}$$

waarin,

- $\tau$  = schuifspanning [N/m<sup>2</sup>]
- $C_\mu$  = 0,5478 [-]
- $C_D$  = 0,1643 [-]
- $\rho$  = dichtheid van water [kg/m<sup>3</sup>]
- $\kappa$  = constante van Von Karman = 0,435 [-]
- $\delta$  = afstand tussen celmiddenpunt en wand [m]

Voor de rand geldt hetzelfde als voor de buis.

##### de tankbodem

De bodem kan niet beschouwd worden als een hydraulisch gladde wand, zodat de standaard routines in PHOENICS niet voldoen. Er wordt gebruik gemaakt van zelfgeschreven routines. Hierin wordt een schuifspanningssnelheid berekend die afhankelijk is van de equivalente ruweidslengte. Op die manier kan rekening gehouden worden met de ruweid van de bodem.

De vergelijkingen voor  $k$  en  $\epsilon$  zijn:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{(C_\mu C_D)}}$$

$$\epsilon = \frac{|u_*^3|}{\kappa * \delta}$$

waarin  $u_*$  = schuifspanningssnelheid [m/s]

Via de snelheid wordt de schuifspanning als een impulsbron opgelegd:

$$\tau = -u_* |u_*| \rho$$

Verder zijn voor alle varianten de cellen onder de tankbodem geblokkeerd omdat deze extra cellen alleen voor het inloopstuk nodig zijn om de retourstroom te kunnen modelleren.

## het duikschot en deflectieschot

De modellering van het duikschot heeft plaatsgevonden door het afsluiten van celwanden.

In het laboratoriummodel is ook een aantal varianten bemeten met een geperforeerd duikschot.

De relevante gegevens van het geperforeerde duikschot zijn:

- oppervlakte natte deel duikschot =  $0,078 \text{ m}^2$ ;
- 12 openingen met een diameter van 3,5 cm, zodat de totale oppervlakte van de openingen  $0,0115 \text{ m}^2$  is;
- openheid duikschot = 14,7 %.
- na het duikschot, op bijna 1 cm, is gaas geplaatst met een openheid van 47,3%.

Voor de mathematische modellering van het geperforeerde duikschot zijn de volgende aspecten van belang:

- de invloed van het gaas is niet precies bekend: breekt het alleen de stroming of vermindert het ook de openheid van het duikschot;
- de perforatie bestaat uit ronde openingen waartussen dichte delen. Dit is eigenlijk niet te modelleren in een twee-dimensionaal model. In het rekenmodel betekent een opening een sleuf over de hele breedte. Ook kan in het rekenmodel geen contractiefcoëfficiënt ingevoerd worden;
- door de dichte delen tussen de openingen is het mogelijk dat de snelheid niet over de hele breedte dezelfde is;
- door de ronde openingen ontstaat een straalstroming die zich drie-dimensionaal verbreedt. Dit betekent dat de verbreding in het twee-dimensionale model altijd anders is.

De beste overeenkomst tussen de berekening en de meting werd gevonden door het geperforeerde duikschot te modelleren door middel van één opening van 4,12 cm bovenin met een porositeit van 90%, waarbij als extra randvoorwaarde is opgegeven dat de verticale snelheid in de opening gelijk aan nul is. De openheid van het gehele duikschot is hierbij gelijk aan die van het fysisch model nl. 14,7 %. Met de invloed van het gaas is geen rekening gehouden.

De verschillende typen deflectieschotten zijn ingevoerd door middel van het dichtmaken van celwanden.

## 5 RESULTATEN

### 5.1 Resultaten van de fysische- en mathematische modellering van stroming zonder sediment

Hier worden enkele resultaten gegeven van de modellering van de stroming in een nabezinktank voor diverse varianten.

Bij het doormeten van een variant worden veel minder snelheden gemeten dan met het mathematisch model berekend worden. Om de resultaten van een meting en een berekening te kunnen vergelijken, zijn de berekende snelheden bepaald op die plaatsen waar ook snelheden gemeten zijn.

Voor een totaal overzicht van de resultaten van de diverse varianten wordt verwezen naar de oorspronkelijke rapporten dat wil zeggen voor de resultaten van de mathematische modellering naar Melis (1991) en voor de fysische metingen naar Getachew (1991).

#### 5.1.1 varianten met dicht duikschot en geen deflectieschot

Er zijn vier varianten doorgemeten in het laboratoriummodel met een dicht duikschot en geen deflectieschot. Dit zijn:

- var. 1: DWA, normale stand influentbuis, normale stand dicht duikschot
- var. 1: RWA, normale stand influentbuis, normale stand dicht duikschot
- var. 2: RWA, normale stand influentbuis, lage stand dicht duikschot
- var. 3: RWA, lage stand influentbuis en normale stand dicht duikschot

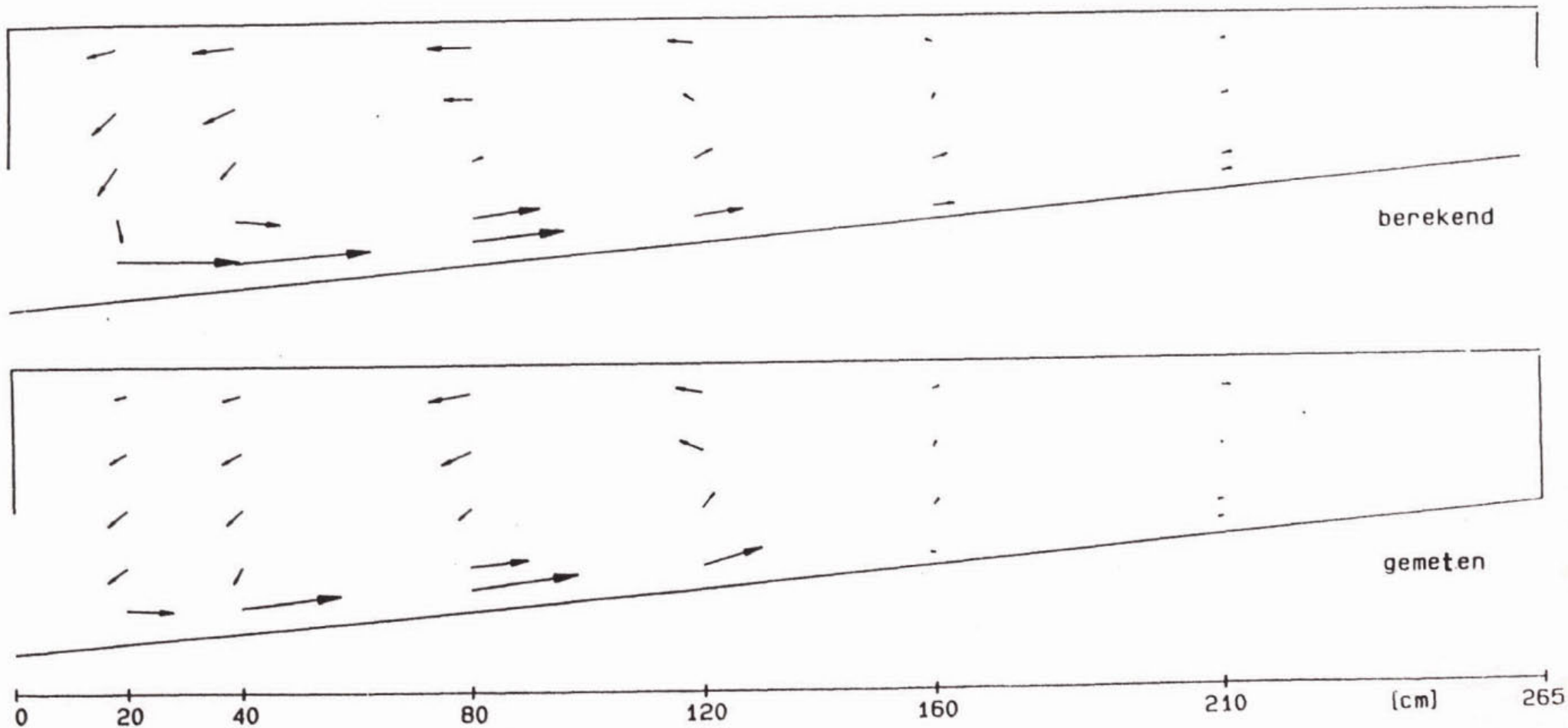
In figuur 14 is het resultaat weergegeven van variant 1 RWA.

Uit een vergelijking van de resultaten blijkt het volgende:

- De berekende lengte en het centrum van de neer komen goed overeen met de gemeten waarden. De neer is een belangrijk kenmerk van de stroming, zodat het ook belangrijk is dat deze goed gemodelleerd is.
- De berekende grootte van de snelheden komt vrij goed overeen met de gemeten waarden. Op grond van debietsbehoud kan geconcludeerd worden dat beneden het laagste meetpunt in de eerste vertikaal nog een grotere snelheid optreedt. De sterkere bodemstraal drijft enerzijds een neer aan en zuigt anderzijds de bovenliggende vloeistof mee. Dit verschijnsel heet "entrainment" d.w.z. aanzuiging van niet of zwak turbulente vloeistof door een aangrenzende turbulente stroming. Uit de berekeningen blijkt dat deze entrainment niet correct gemodelleerd wordt. De entrainment zal beter gemodelleerd worden naarmate het gebruikte rooster fijner is.
- Bij de metingen is een tweede neer aan het einde van de tank aanwezig. Deze blijkt niet uit de berekeningen. Het is bekend dat bij de meeste numerieke modellen loslating van de stroming niet optreedt als daar geen duidelijk punt voor gegeven is, b.v. een obstakel. Het gebruikte  $k-\epsilon$ -model is ook meer toegespitst op aanliggende stroming dan op recirculerende stroming. Het is mogelijk dat de loslating van de stroming sterk afhankelijk is van de hoogte van de eerste cel boven de bodem en deze in dit geval te groot is.

RWA: retourdebiet = 3,8 l/s , tankdebiet = 7,6 l/s  
influentbuis : normale stand  
duikschot : normale stand, dicht  
deflectieschot: geen

schaal tankafmetingen : — = 10 cm  
schaal snelheidsvectoren: —→ = 0,1 m/s



Figuur 14 Gemeten en berekende gemiddelde snelheden voor variant 1

### 5.1.2 varianten met geperforeerd duikschot en geen deflectieschot

Er zijn vier varianten doorgemeten met een geperforeerd duikschot en geen deflectieschot. Dit zijn:

- variant 4: RWA, lage stand influentbuis, normale stand geperforeerd duikschot, zonder gaas
- variant 5: RWA, normale stand influentbuis, normale stand geperforeerd duikschot, met gaas
- variant 6: RWA, lage stand influentbuis, normale stand geperforeerd duikschot, met gaas
- variant 7: DWA, normale stand influentbuis, normale stand geperforeerd duikschot, met gaas

Voor de vergelijking van de resultaten zijn weer de berekende snelheden bepaald op die plaatsen waar ook snelheden gemeten zijn.

In de figuren 15 en 16 zijn de resultaten gegeven voor respectievelijk de varianten 5: RWA en 6: RWA. Er blijkt het volgende:

- De gekozen manier van modelleren van een geperforeerd duikschot is goed voor variant 5: RWA. De berekende lengten van de beide neren en de centra van de neren komen overeen met de gemeten waarden.
- Bij variant 6: RWA is de neer na het duikschot bij de berekening korter dan bij de meting. Voor deze variant zijn nog andere manieren van modelleren geprobeerd, b.v. opening lager; die leverden geen beter resultaat op (nog kortere neer). Dus ook voor deze variant is de eerst gekozen manier de beste.
- Ook hier is de entrainment niet correct gemodelleerd en treedt de neer aan het einde van de tank op de bodem niet op bij de berekeningen.
- De stroming door het duikschot wordt sterk beïnvloed door de stroming in het inloopstuk. Misschien is in dit geval het inloopstuk te grof gemodelleerd; vanwege de hoge rekenkosten is niet gerekend met een fijner rooster.

### 5.1.3 varianten met verschillende deflectieschotten

Er zijn drie verschillende deflectieschotten gemaakt die schematisch zijn weergegeven in figuur 17.

De optredende snelheden langs de deflectieschotten zijn hoog. Bij een vrij grof rooster wordt dan de k-waarde in het algemeen te hoog, hetgeen een veel te grote wrijving betekent. Een betere modellering is mogelijk door als randvoorwaarde op te geven dat de k-waarde in de cellen direct boven het deflectieschot nul moet zijn.

Bij de varianten met deflectieschot is steeds gemeten met RWA en met de influentbuis en het duikschot op normale stand. Voor elk deflectieschot zijn twee situaties doorgemeten, n.l. met dicht duikschot en met geperforeerd duikschot. Dit heeft zes varianten gegeven:

- variant 8: RWA, dicht duikschot, deflectieschot b
- variant 9: RWA, geperforeerd duikschot, deflectieschot b
- variant 10: RWA, dicht duikschot, deflectieschot c
- variant 11: RWA, geperforeerd duikschot, deflectieschot c
- variant 12: RWA, geperforeerd duikschot, deflectieschot a
- variant 13: RWA, dicht duikschot, deflectieschot a

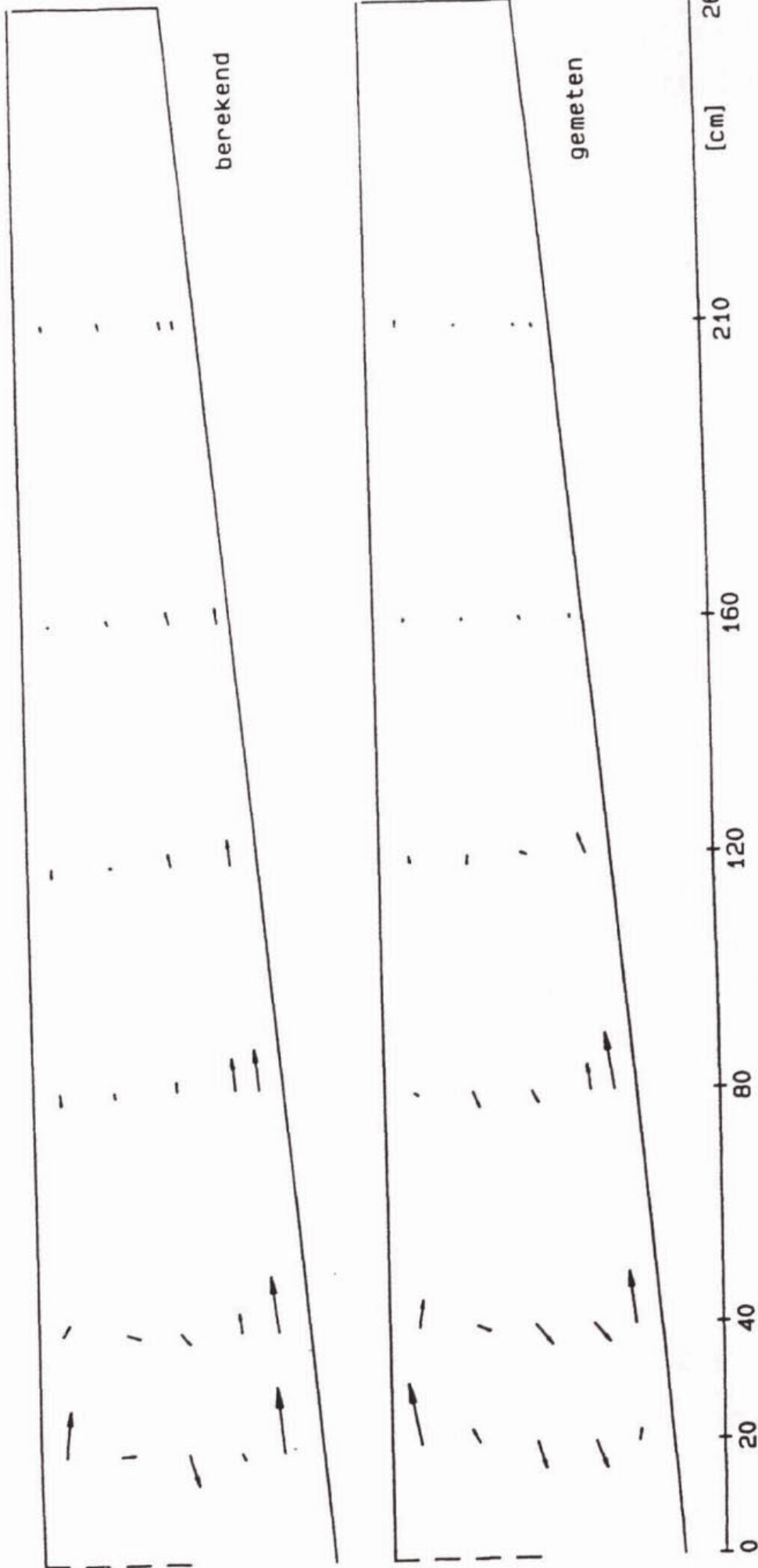
RWA: retourdebiet = 3,8 l/s . tankdebiet = 7,6 l/s

influentbuis : normale stand

duikschot : normale stand, geperforeerd, met gaas

deflectieschot: geen

schaal tankafmetingen : — = 10 cm  
schaal snelheidsvectoren: —→ = 0,1 m/s

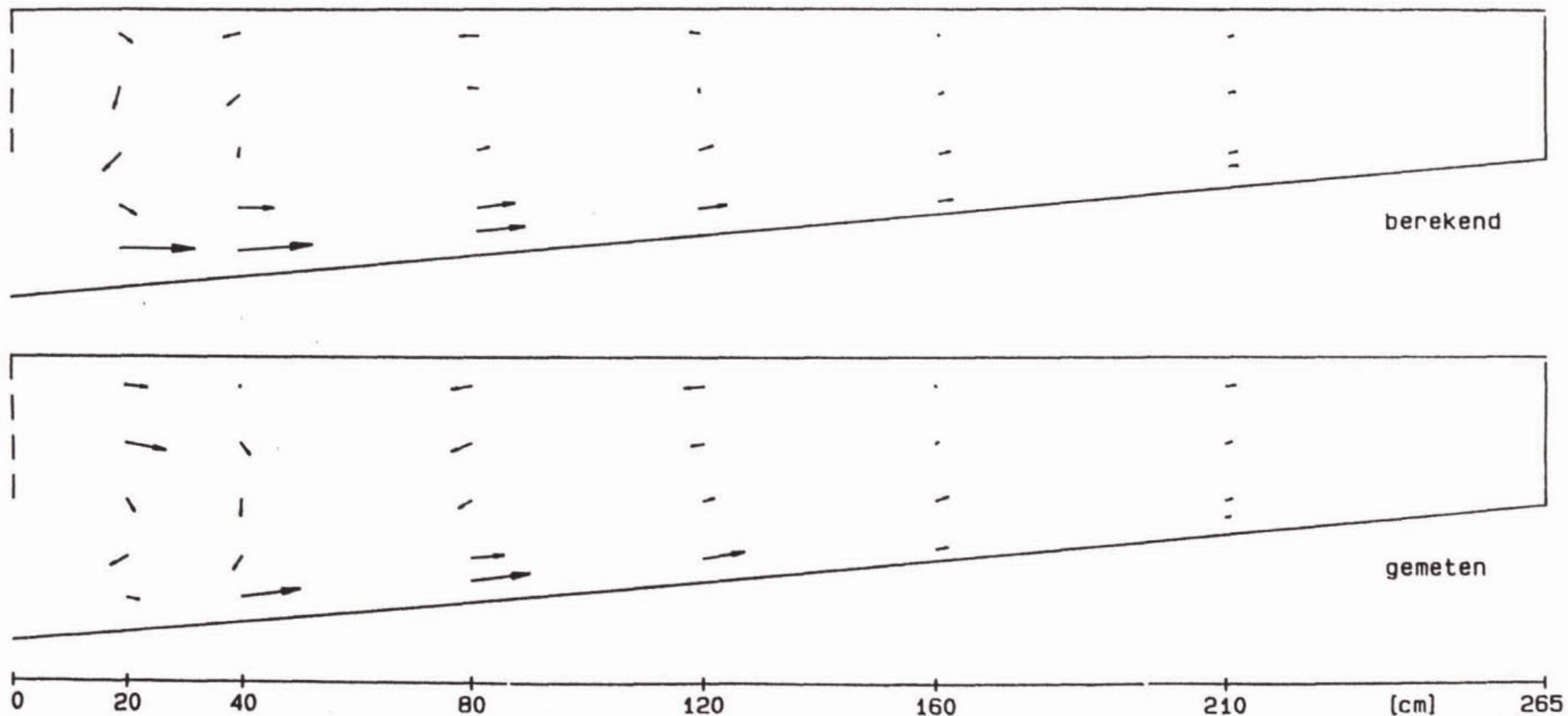


Figuur 15 Gemeten en berekende gemiddelde snelheden voor variant 5

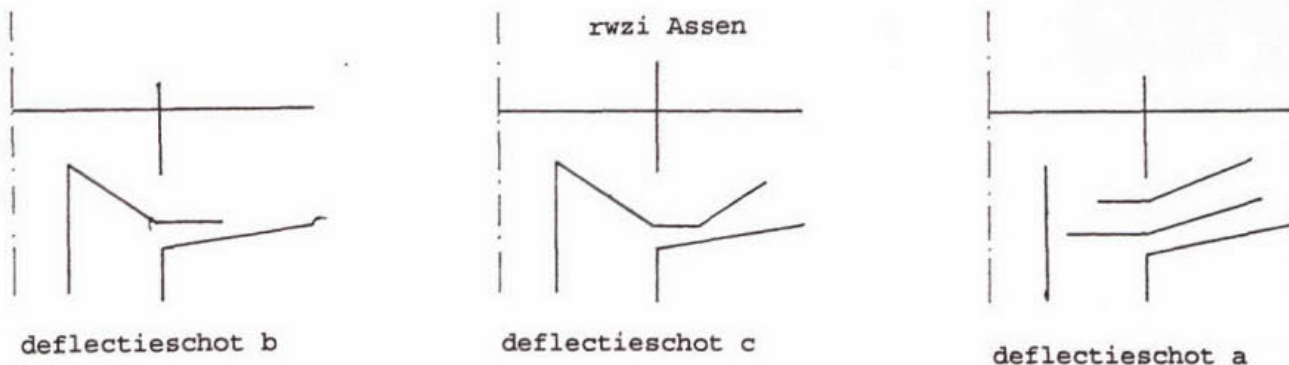


RWA: retourdebiet = 3,8 l/s , tankdebiet = 7,6 l/s  
influentbuis : lage stand  
duikschot : normale stand, geperforeerd, met gaas  
deflectieschot: geen

schaal tankafmetingen : — = 10 cm  
schaal snelheidsvectoren: → = 0,1 m/s



Figuur 16 Gemeten en berekende gemiddelde snelheden voor variant 6



Figuur 17 De deflectieschotten a,b en c.

Net als bij de andere varianten zijn de berekende snelheden bepaald op die plaatsen waar de snelheden gemeten zijn. In figuur 18 is het resultaat gegeven van variant 12: RWA met deflectie schot a en geperforeerd duikschot.

Er blijkt het volgende:

- In de eerste helft van de tank komen de resultaten van berekende en gemeten waarden goed overeen, afgezien van de entrainment.
- Bij de metingen gaat de stroming met een steeds iets kleinere snelheid door en is het einde van de neer achterin de tank. Bij de berekeningen is te zien, dat de stroming snel vertraagd wordt, waardoor de neer korter is dan bij de metingen. Dit kan veroorzaakt worden door een te hoge numerieke viscositeit, hetgeen een bekend verschijnsel is bij numerieke modellering. Deze numerieke viscositeit kan verminderd worden door het rooster te verfijnen.
- Bij de varianten met deflectieschot (a) stroomt in het laboratoriummodel meer water door de opening tussen het duikschot en het eerste deflectieschot dan door de opening tussen de twee deflectieschotten. Bij het mathematisch model is de stroming gelijkmatiger verdeeld. Dit kan een gevolg zijn van het te grof modelleren van het inloopstuk.

RWA: retourdebiet = 3,8 l/s, tankdebiet = 7,6 l/s

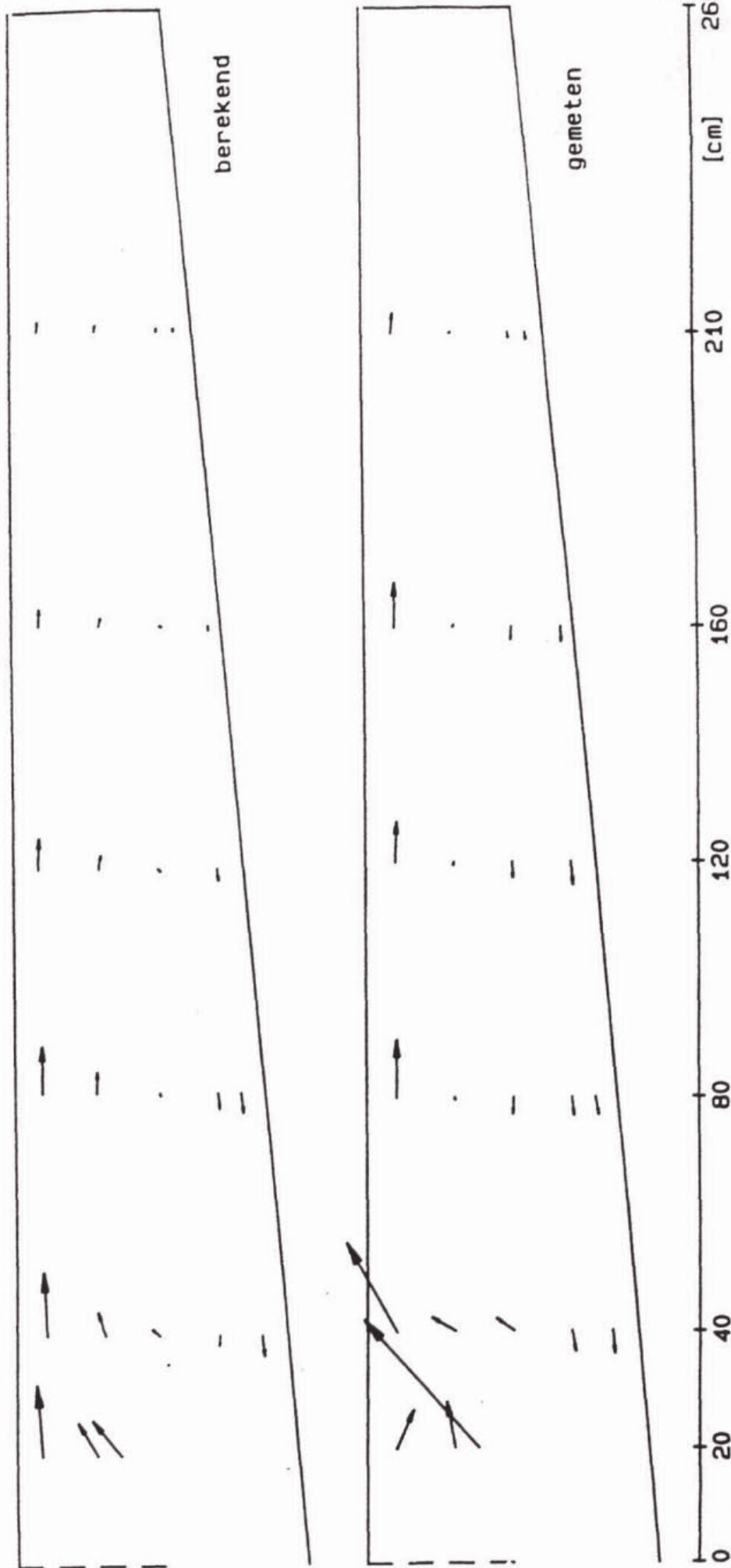
influentbuis : normale stand

duikschot : normale stand, geperforeerd, met gaas

deflectieschot: type a

schaal tankafmetingen : — = 10 cm

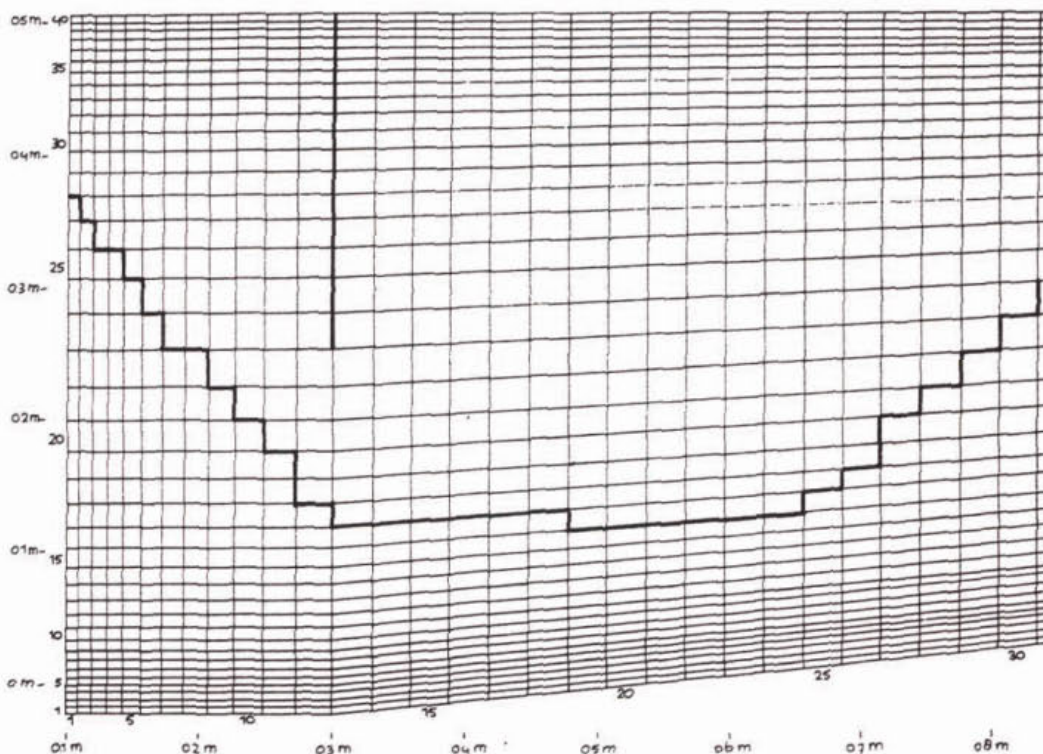
schaal snelheidsvectoren: → = 0,1 m/s



Figuur 18 Gemeten en berekende gemiddelde snelheden voor variant 12

#### 5.1.4 varianten met deflectieschot type 'Assen'

In de nabezinktank van de rwzi Assen zijn metingen uitgevoerd door DHV. Hierbij is een deflectieschot gebruikt met een vorm zoals weergegeven in figuur 19.



Figuur 19 Deflectieschot type 'Assen'

Dit deflectieschot lijkt op deflectieschot type b (zie fig. 17). Om een indruk te krijgen van het stromingsbeeld bij dit type deflectieschot is daarmee een berekening uitgevoerd (variant A1). Daarnaast zijn nog de volgende varianten van type 'Assen' berekend:

- het horizontale deel van het deflectieschot in de tank langer, variant A2;
- het totale deflectieschot hoger, variant A3;

In figuur 20 is het stromingsbeeld in de tank gegeven van variant A1. Uit een vergelijking van de varianten A1 tot en met A3 is gebleken dat:

- de lengte van de neer en het centrum van de neer voor alle varianten hetzelfde zijn;
- de snelheden in het begin verschillen van grootte en richting, maar deze verschillen na een halve meter in de tank al verdwenen zijn.

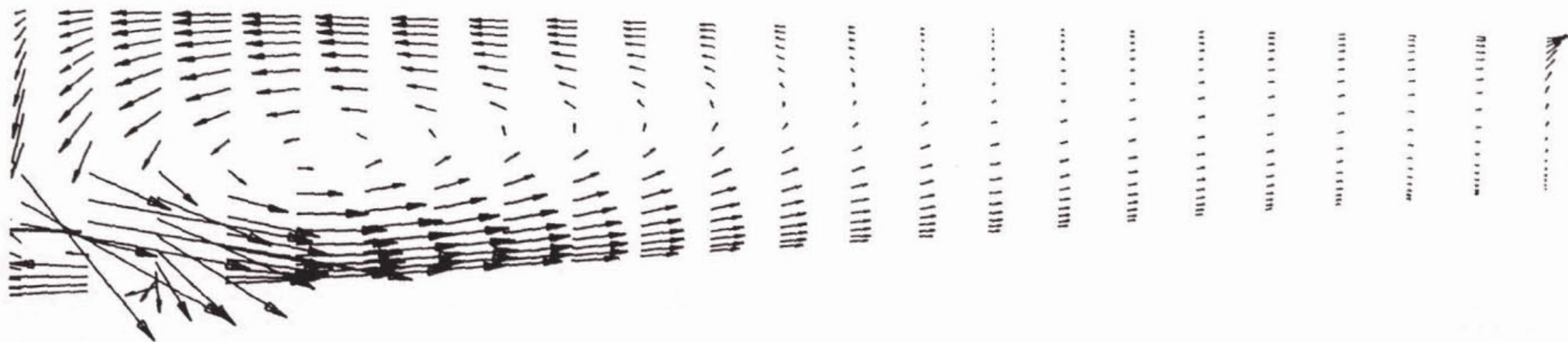
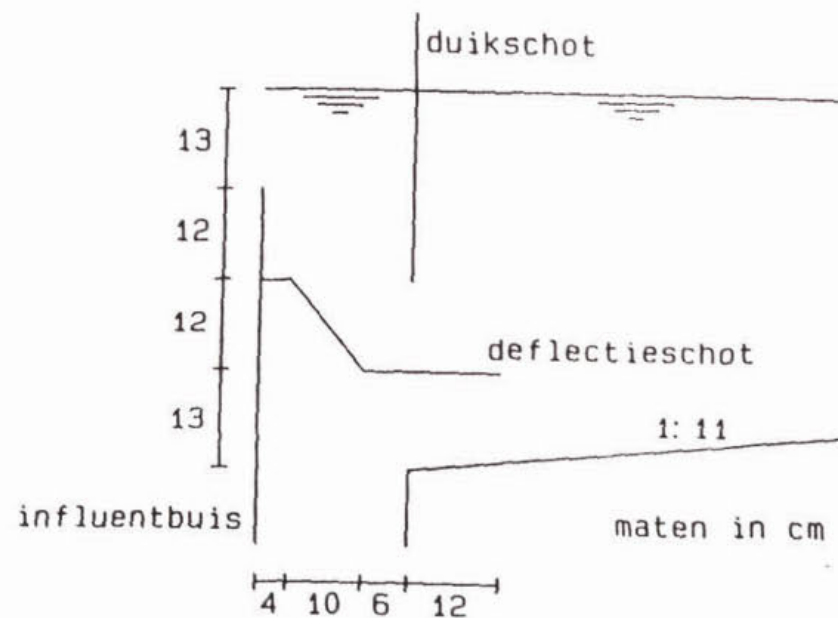
RWA: retourdebiet = 3,8 l/s , tankdebiet = 7,6 l/s

influentbuis : normale stand

duikschot : normale stand, dicht

deflectieschot: type assen

schaal snelheidsvectoren:  $\rightarrow = 0,1 \text{ m/s}$



Figuur 20 Berekende stromingsbeeld voor variant A1

## 5.2 Resultaten van de fysische modellering van meerfasestroming

### 5.2.1 de proeven

Zoals eerder is beschreven, zijn vier verschillende varianten van de inlaatconstructie toegepast:

1. gesloten duikschot, deflectieschot met extensie schuin omhoog
2. gesloten duikschot, deflectieschot zonder extensie
3. gesloten duikschot, geen deflectieschot
4. geperforeerd duikschot, geen deflectieschot.

De vier varianten zijn voor ongeveer een uur beproefd (proeven a,b,c en d), waarbij videoopnamen werden gemaakt en kaolinietconcentraties zijn gemeten in influent en effluent. In de tank waren drie en soms meer verschillende lagen waar te nemen. Verder leek het er op dat tegen het eind van de proef de hoeveelheid kaoliniet in het effluent zich ging stabiliseren. Om dit te onderzoeken werden variant 3 en 4 voor langere tijd beproefd (proeven e en f). Hierbij werd ook nagegaan of snelheids- en dichtheidsprofielen in de tank gemeten konden worden. Tenslotte werd een definitieve proevenserie uitgevoerd waarbij in alle varianten gedurende twee uur de influent- en effluentconcentraties, en dichtheids- en snelheidsprofielen in de tank (proeven g,h,i en j) werden geregistreerd.

Voor een uitgebreide beschrijving van de proeven en de resultaten ervan wordt verwezen naar het rapport van Van Marle (1991;1).

### 5.2.2 visualisering

Om de optredende verschijnselen te visualiseren zijn video-opnamen gemaakt. De camera is zodanig opgesteld dat vanuit dat punt een deel van de zijkant in beeld gebracht wordt, vanaf de instroomopening tot halverwege de tank. Via een spiegel is tegelijkertijd het bovenaanzicht van de stroming te volgen. Dit bovenaanzicht reikt van de rand van het deflectieschot tot de overstortrand. Voor het maken van goede opnamen van de zijkant van de tank bij de overstortrand dient de camera tijdelijk verplaatst te worden. (Dit is slechts korte tijd interessant, namelijk op het moment dat de dichtheidsstroming weerkaatst tegen het einde van de tank).

In beeld verschijnt ook de tijd, die gestart wordt zodra het kaoliniet verpompt wordt. Hierdoor kunnen opnamen van de verschillende varianten op dezelfde tijdstippen vergeleken worden.

Verschijnselen die in beeld gebracht worden, zijn onder andere:

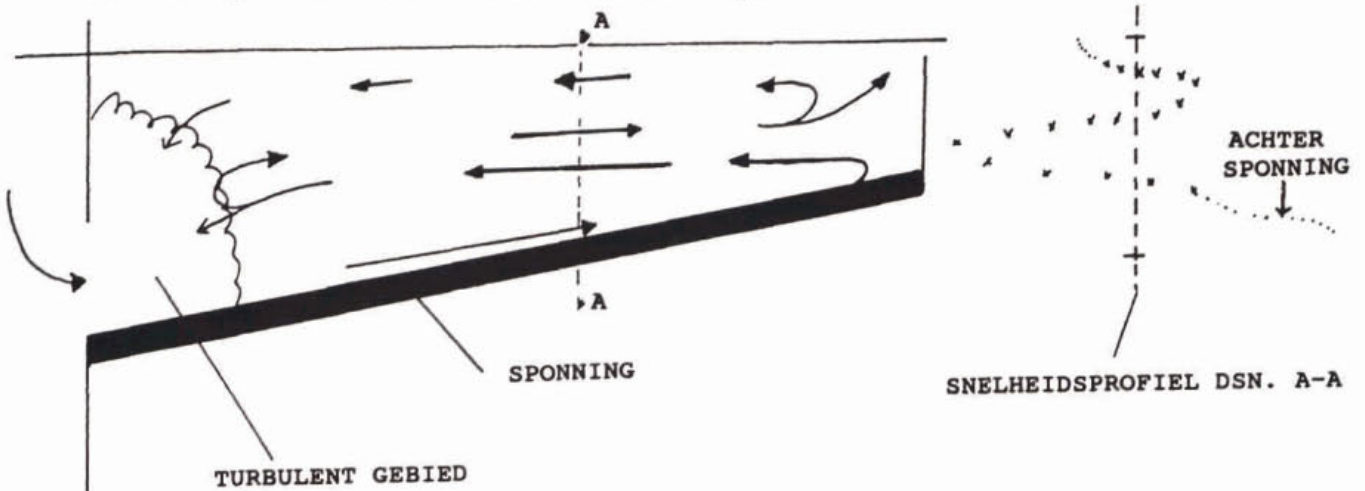
- het zich instellen van de dichtheidsstroming;
- het stijgen van de slibspiegel, de tank wordt opgevuld met de kaoliniet-suspensie;
- snelheidsprofielen. Kaliumpermanganaat wordt aangebracht in een vertikaal vlak bij het glas. Uit de vormen die de oorspronkelijke rechte kleurstoflijn aanneemt, is af te leiden hoe de snelheid is verdeeld over de vertikaal.

Voordat de proef met kaoliniet werd uitgevoerd, is eerst kaliumpermanganaat toegevoegd aan de homogene stroming. Uit een vergelijking van de kaolinietproef met deze referentie kan geconcludeerd worden dat de waargenomen verschijnselen inderdaad veroorzaakt worden door het dichtheidsverschil tussen het influent en het water in de tank.

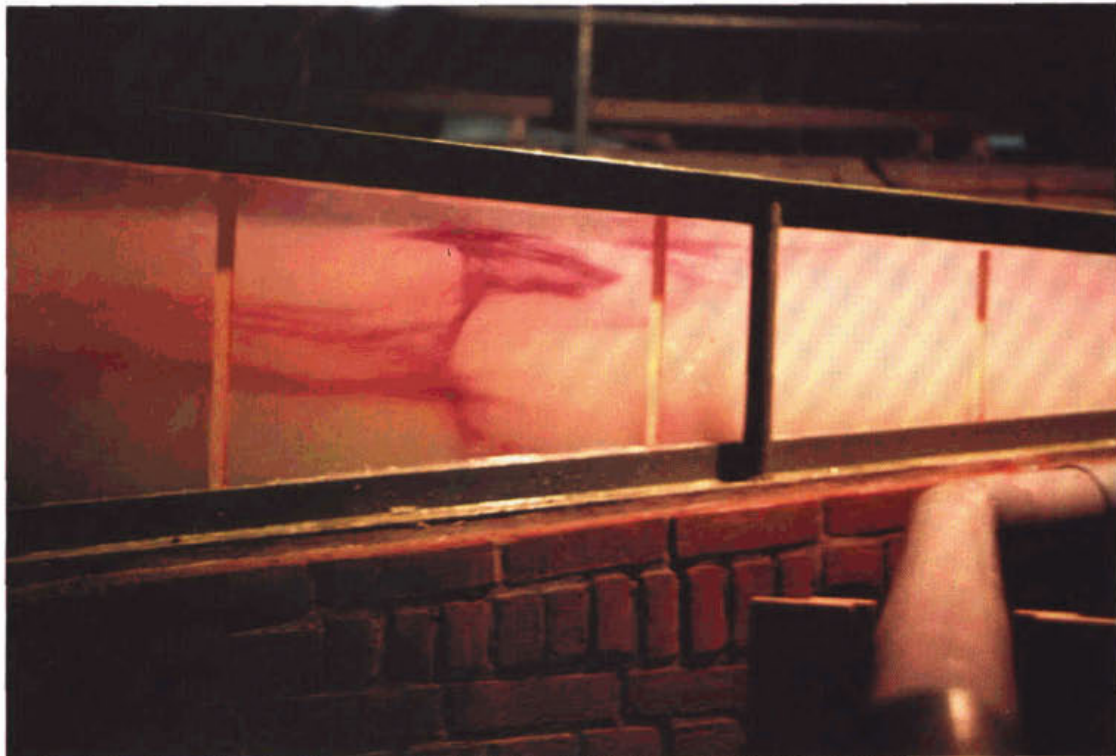
Behalve deze video-opnamen is ook een groot aantal foto's gemaakt.

### 5.2.3 beschrijving van de stroming in het model

De stroming in het model kan worden geschematiseerd tot een stroming in vier lagen zoals geschetst is in figuur 21. Op de foto in figuur 22 is te zien hoe de stroming er in werkelijkheid (in het model) heeft uitgezien. Met kaliumpermanganaat is vertikaal langs het glas een kleurstofvertikaal gemaakt. De kleurstof blijft deels op dezelfde plaats aan het glas kleven en wordt deels meegenomen door de vloeistof die er langs stroomt. Op deze wijze wordt een snelheidsprofiel over de vertikaal verkregen.



Figuur 21 Schematisatie van de vierlagenstroming in het model (evenwichtssituatie; het snelheidsprofiel is overgenomen van een videobeeld).



Figuur 22 Foto van de stroming in de tank voor variant 2 na circa 40 minuten stromen (bijna evenwicht).

Als laag 1 de rechterkant bereikt, kan de vloeistof met kaoliniet door het dichtheidsverschil met het zuivere water erboven nog niet hoog genoeg komen om over te storten en moet dus vanwege de continuïteit terug gaan stromen. Als laag 3 de rechterkant bereikt, ligt hij hoger dan laag 1 en bovendien is het dichtheidsverschil met zuiver water veel kleiner. Blijkbaar is dat voldoende om mogelijk te maken dat laag 3 overstort.

Dat zich een evenwichtssituatie instelt, blijkt uit het feit dat de effluentconcentratie zich stabiliseert. Bovendien blijven ook de dichtheidsprofielen constant. Van de eerste vertikaal zijn namelijk steeds twee metingen met een tijdstap van een uur uitgevoerd.

In de evenwichtssituatie, zoals geschetst in figuur 21, gaan zowel aan de linkerkant als aan de rechterkant lagen in elkaar over. Links is de situatie turbulent, het Reynoldsgetal is daar op grond van de snelheden slechts 569, maar de luchtinblazing in de influentpijp maakt de stroming duidelijk turbulent. Rechts is de situatie laminair, er is daar geen luchtinblazing en het Reynoldsgetal is 104. Tijdens de proeven is te zien dat links entrainment optreedt, waardoor laag 1 en laag 3 ook vloeistof uit een hogere laag, met een geringere dichtheid, opnemen. Rechts is dit voor laag 2 niet het geval.

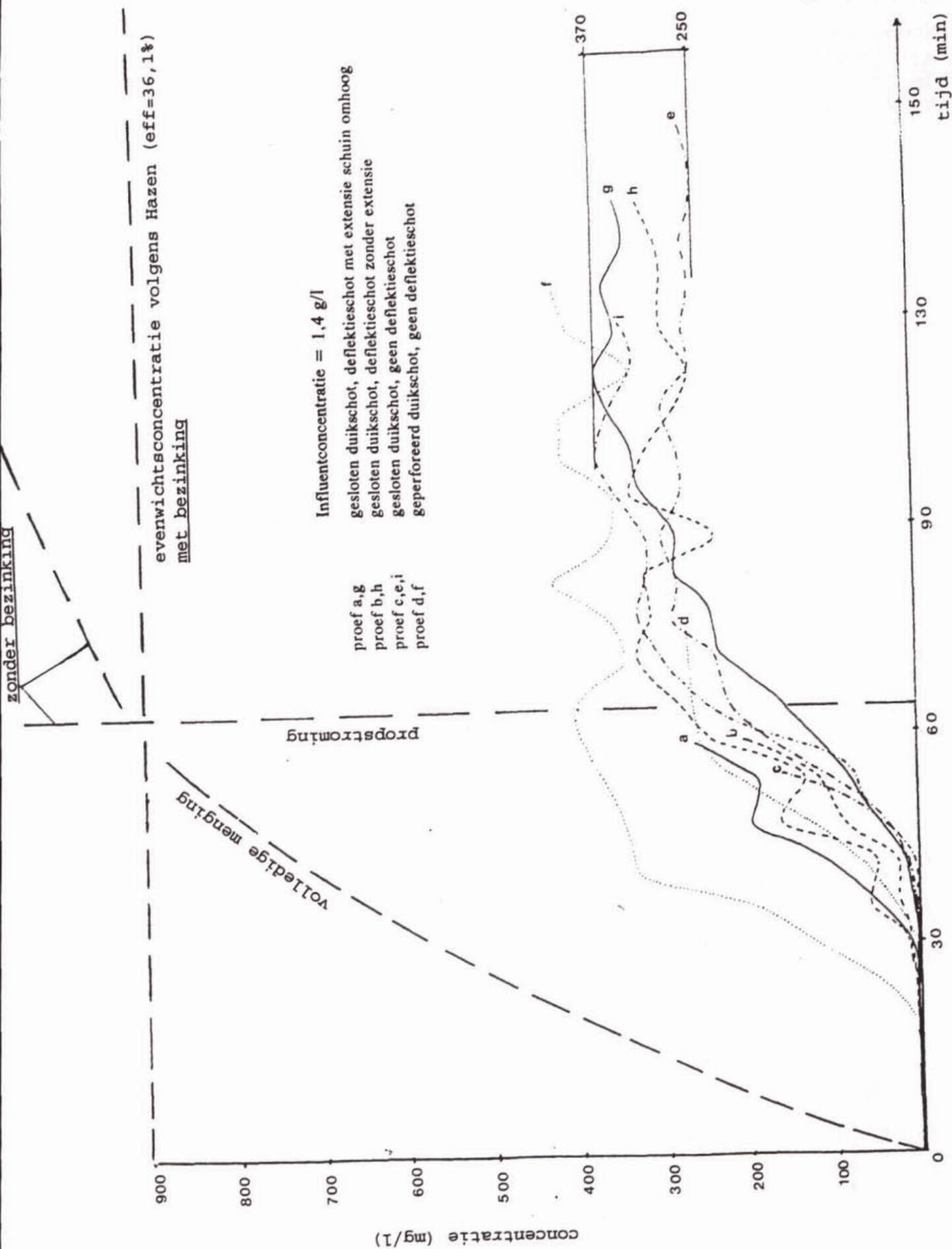
Door het steeds terugvallen van deeltjes in onderliggende lagen wordt de verblijfstijd van de deeltjes in de tank sterk vergroot en ook veel groter dan die van de vloeistof. Dit is zeer belangrijk, omdat in werkelijkheid geen sprake is van discrete, maar van flocculente bezinking. De kans dat een deeltje flocculeert, neemt toe naarmate het langer in de tank verblijft. Flocculatie doet de bezinkingsnelheid toenemen, zodat het deeltje, terugvallend uit laag 2, wel in laag 1 kan bezinken. Een deeltje dat in laag 1 bezinkt, bereikt de bodem en is daarmee verwijderd uit de vloeistof.

#### 5.2.4 meetresultaten

In figuur 23 zijn alle effluentlijnen uit de proeven a tot en met i gegeven. In de figuur zijn tevens de resultaten gegeven van voorspellingen van de effluentconcentraties zoals die verkregen zijn met behulp van drie eenvoudige theoretische benaderingen te weten (1) propstroming, (2) volledige menging en (3) de wet van Hazen.

Bij propstroming wordt ervan uitgegaan dat het sediment zich alleen verplaatst met de snelheid van de stroming, dus alleen convectief en geen diffusief transport. Bij de benadering van volledige menging wordt er juist uitgegaan van een oneindig snelle diffusie. De beide voorgaande theoretische modellen gelden voor de situatie die ontstaat wanneer vanaf een bepaald moment plotseling de influentconcentratie verandert. In beide gevallen wordt na verloop van tijd een evenwicht bereikt. Wanneer geen bezinking op zou treden zou de evenwichtconcentratie van het effluent gelijk zijn aan de influentconcentratie; de efficiëntie van de bezinking zou dan 0% zijn. Er treedt echter wel bezinking op. De wet van Hazen (zie par. 3.4.1) is ook toe te passen op elk willekeurig snelheidsprofiel in de vertikaal.





Figuur 23

Resultaten van de metingen van de effluentconcentraties voor de verschillende proeven en een vergelijking met theoretische modellen (het feit dat de drie lijnen elkaar in één punt snijden berust op toeval).

Hieruit valt het volgende op te merken:

- de curves van variant 3 (proef c, e en i, streep-stip-curves) liggen dicht bij elkaar;
- de curves van variant 2 (proef b en h, onderbroken lijn) liggen dicht bij elkaar en vertonen dezelfde periodiciteit;
- de curves van variant 1 (proef a en g, doorgetrokken lijn) liggen ver uit elkaar;
- de curves van variant 4 (proef d en f) zijn niet vergelijkbaar omdat bij proef f afwijkende omstandigheden golden.

Wat de evenwichtsconcentraties betreft, is de grootste afwijking tussen curves van dezelfde variant die tussen proef i en e. Beide proeven betreffen dezelfde variant en alle curves van andere varianten liggen ertussen. Hieruit blijkt, dat de verschillen tussen proeven met dezelfde variant reeds zo groot zijn dat uit de effluentcurves niet zonder meer conclusies kunnen worden getrokken over de bezinkings-efficiëntie van de varianten. De proeven zijn kwantitatief in ieder geval niet reproduceerbaar, kwalitatief zijn wel overeenkomsten zichtbaar.

Er kan nagegaan worden wat hiervan de oorzaak is. De debieten  $Q$  en  $Q_r$  zijn vrij nauwkeurig in te stellen. Het temperatuurverschil tussen influent en tankwater is steeds gecontroleerd en bleek verwaarloosbaar. De mate van turbulentie in de instroompip is op het gezicht gelijk gehouden. Het leek er niet op, dat hier grote fluctuaties in voorkwamen. Van de toegevoerde kaoliniet bleek na afloop van de proef steeds een vrij groot gedeelte bezonken te zijn in de influentbuis. Dit maakt de toegevoegde hoeveelheid kaoliniet minder betrouwbaar. De instelling van de pomp voor de kaoliniettoevoer is vanaf het begin van de proevenserie niet gewijzigd. Het bleek echter, dat ondanks spoelen na iedere proef de slangen langzamerhand dichtslibden in de loop van de proeven, met name bij de langer durende proeven. Bij het vervangen van de slang nam de toevoer dan opeens sterk toe. Bij vergelijking van de gemeten influentcurves achteraf blijken deze zowel tijdens de proeven als van proef tot proef te variëren. Te verwachten is, dat dit de resultaten sterk heeft beïnvloed. De kaolinietsuspensie is steeds 1 à 2 uur tevoren klaargemaakt. Dit ene uur verschil kan de flocculatie aanzienlijk vergroten, maar het is ook zeer goed mogelijk, dat door de heftige waterbeweging in het vat de vlokken na enige tijd niet meer groeien, doordat er een evenwicht is tussen het aangroeien en uiteenslaan. In dat geval maakt het dus niet uit hoe lang van te voren de suspensie is klaargemaakt. Voor het reproduceerbaar maken van de proefresultaten dient dit onderzocht te worden. Het belangrijkste is echter, dat de kaoliniettoevoer controleerbaar wordt.

In figuur 23 valt op dat de theoretische efficiëntie (36,1%) veel lager is dan de gemeten efficiëntie. Dit verschil wordt veroorzaakt doordat de bezinking in het model niet discreet is, maar flocculent. De flocculatie verbetert de efficiëntie dus aanzienlijk. Dat de flocculatie zo effectief is, is mede te verklaren uit de lange verblijftijd van de deeltjes in de tank door het steeds terugvallen naar diepere lagen.

Het moment van overstorten volgens de propstroomtheorie in figuur 23 valt ruim 30 minuten nadat bij de meeste proeven voor het eerst kaoliniet werd waargenomen in het effluent en zo'n 10 minuten voordat meestal de evenwichtsconcentratie werd bereikt. Deze spreiding is het gevolg van menging. Met name in het begin van de proef vindt er veel menging plaats, namelijk voordat de tweede laag geheel gevormd is. Door de entrainment vlak na het quikschot wordt dan helder water aangezogen en opgemengd met het influent. Hierdoor neemt de hoeveelheid helder water in de tank sneller af en wordt, eerder dan

volgens de propstroomtheorie wordt voorspeld, kaoliniet in het effluent waargenomen.

In de literatuur wordt wel melding gemaakt van golfpatronen in dichtheidsstromen, die zich in radiale richting verbreden. Tijdens de proeven was dit met name bij variant 3 duidelijk te zien. In de eerste 10 minuten van de proef bestaat de dichtheidsstroming die zich naar rechts beweegt uit een serie frontjes. Pieken en dalen in de concentratie volgen elkaar op en al golvend gaat de concentratie langzamerhand omhoog. Hier zijn de gemeten concentraties op eenzelfde punt in de loop van de tijd aangegeven. Tijdens het meten is ook genoteerd wat er bij het meetpunt, de inlaatbuis van de OSLIM, te zien was. Het bleek dat ieder front dat passeerde, terugkaatste tegen de rechterkant en op de terugweg nogmaals voorbij het meetpunt kwam.

Met bovenstaande waarneming kan wellicht ook de effluentcurve verklaard worden, die langzaam golvend naar de evenwichtsconcentratie toe stijgt. Ook bij de ontwikkeling van laag 3 gaat het om een zich radiaal verbredende stroming en dus zal de stroming zich in frontjes naar rechts bewegen. Doordat laag 3 vlak onder de overstortrand ligt, zal slechts een deel van het front terugkaatsen, terwijl de rest overstort. Dit geeft een piek in de effluentcurve en deze stijgt langzaam golvend naar een evenwicht.

In figuur 23 is te zien dat de effluentcurve van proef f het eerst begint te stijgen en het hoogste evenwicht bereikt. Van de influentconcentratie kan gezegd worden dat deze lager was dan bij alle andere proeven. In het onderstaande zal getracht worden te verklaren, dat een lagere influentconcentratie tot een hogere effluentconcentratie kan leiden.

Dichtheidsverschillen tussen influent en tank onderdrukken menging. Bij kleinere dichtheidsverschillen zijn de grenzen tussen de lagen minder scherp en is er meer turbulentie na het duikschot. Er vindt dan meer entrainment plaats waardoor meer water opgemengd wordt met laag 1. Hierdoor neemt de hoeveelheid helder water in de tank sneller af en begint de effluentconcentratie eerder te stijgen.

Door meer entrainment stroomt er meer vloeistof door de lagen 1 en 2. De lagen zijn daardoor minder compact en de bovenkant van laag 2 ligt hoger. Het kan zijn dat hierdoor enige kortsluiting optreedt tussen laag 2 en de overstortrand, waardoor de evenwichtsconcentratie hoger ligt. Daarvoor zijn echter nog twee mogelijke oorzaken aan te voeren.

Normaal voorkomt het verschil in dichtheid het contact tussen het influent en laag 3. Het influent dat door de perforatie van het duikschot heen komt, mengt niet op met het water in de tank. Het influent dat onder het duikschot doorstroomt, blijft dicht bij de bodem en gaat op in laag 1. Als nu het verschil in dichtheid afneemt, zal er influent direct in laag 3 binnenstromen, hetzij door het geperforeerde duikschot heen, hetzij na eerst onder het duikschot door te zijn gestroomd. Via laag 3 vindt dan kortsluiting plaats tussen influent en overstort. Door de korte verblijftijd zal er veel minder flocculatie en dus een hogere evenwichtsconcentratie optreden.

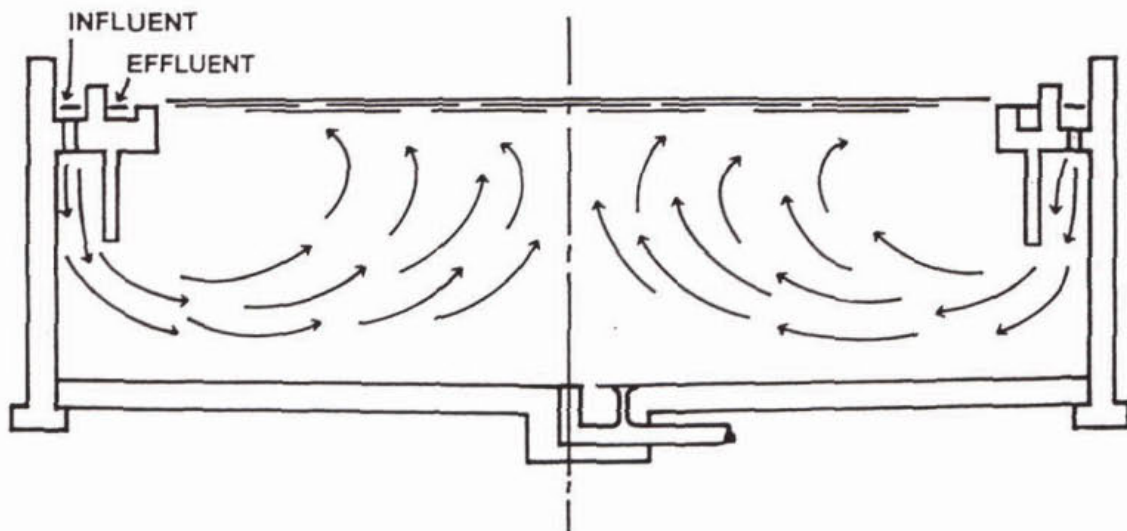
### 5.3 constructieve veranderingen

Ten behoeve van het onderhavige onderzoek is een (beperkt) literatuuronderzoek uitgevoerd. Hierbij is een aantal publicaties gevonden waarin constructieve veranderingen van nabezinktanks zijn onderzocht die een verbetering van de effluentkwaliteit kunnen geven. Omdat deze verbeteringen ook voor "de optimalisering van grote nabezinktanks" van belang worden geacht, wordt aanbevolen deze veranderingen in het eventuele vervolgonderzoek mee te nemen.

De onvermijdelijke dichtheidsstroming die optreedt in nabezinktanks kan kortsluiting veroorzaken. Bij kortsluiting neemt door de kortere verblijftijd de flocculatie en daarmee de bezinksnelheid af, zodat meer slib in het effluent terecht komt. In de literatuur wordt vaak gesteld dat uniforme stroming ideaal zou zijn. Echter, het blijkt dat deze niet te verwezenlijken is, en pogingen daartoe door verandering van de inlaat kunnen zelfs tot verslechtering van de effluentkwaliteit leiden (Bender, 1987). Ook uit het laboratoriumonderzoek is gebleken dat er zelfs bij zeer uiteenlopende inlaatconstructies nauwelijks een verschil optreedt in effluentkwaliteit. Wel is het mogelijk om, zonder de dichtheidsstroming te stoppen, kortsluiting te voorkomen. Verbeteringen zijn te verwachten bij:

- een grotere tankdiepte (Parker, 1983; Tenday-Xavier, 1988; Anderson, 1945);
- een horizontaal schot, bevestigd aan de tankwand onder de effluentgoot (Stukenberg, 1983);
- het naar binnen toe verplaatsen van de effluentgoot (Anderson, 1945), maar dan wel over een aanzienlijke afstand;
- het plaatsen van een vertikaal schot op de tankbodem om de dichtheidsstroming af te remmen (Schlegel, 1990);
- het plaatsen van een tussenduikschot in de tank met als doel het stabiliseren van de hoofdneer in de tank en het tegengaan van kortsluitstromen langs het wateroppervlak richting omlooprand (overlaat).

Het succes van deze maatregelen is mede te verklaren aan de hand van de waarnemingen die gedaan zijn in het laboratoriummodel. De dichtheidsstroming gaat met een grote snelheid richting de rand en wordt daar vervolgens omhoog gestuwd. Als op deze plaats de effluentgoot is bevestigd, kan deze een te grote zuigende werking uitoefenen, waardoor er een kortsluitstroming op kan treden. De bovengenoemde maatregelen hebben alle het effect dat het contact tussen de dichtheidsstroming en de effluentgoot bemoeilijkt wordt. Bij het laboratoriumonderzoek is waargenomen dat als er geen kortsluitstroming optreedt, de dichtheidsstroming terugkaatst vanaf de wand en over de onderste laag terugstroomt. Kortsluitstroming zou dus ook voorkomen kunnen worden door de inlaatconstructie en de effluentgoot aan dezelfde kant te plaatsen (figuur 25).



Figuur 25 Nabezinktank met inlaatconstructie en effluentgoot op dezelfde plaats (buitenrand).

De stroming gaat over de bodem heen en langs het oppervlak terug, zodat kortsluiting onmogelijk is. Ook bij RWA zal het langer duren voordat sliboverstort plaatsvindt. Bij ronde tanks is het zo dat wanneer de effluentgoot in het centrum ligt, hier een zeer grote "zuigkracht" van uitgaat ten gevolge van de kleine omtrek. Dat blijkt ook uit de slechte ervaringen met zogenaamde RIMFLO-tanks in Zwitserland (in dat geval ligt de inlaat aan de omtrek en de effluentgoot in het centrum). Daarom is het beter om zowel de inlaat als de effluentgoot aan de buitenrand te plaatsen. Dit heeft tot goede resultaten geleid (Boyle, 1976; Augustus, 1985).

In deze twee publicaties worden ook details gegeven van de inlaatconstructie en de effluentgoot. Als de slibafvoer gewoon in het centrum blijft, is een groot bijkomend voordeel dat de slibafvoer verbeterd wordt. In de conventionele opzet stromen dichtheidsstroming en bezonken slib namelijk met relatief grote snelheden over elkaar heen in tegengestelde richting. In een tank met inlaatconstructie en effluentgoot aan de omtrek stromen beide naar het centrum en heeft de dichtheidsstroming een soort slibruimende werking (Gould, 1945). Een nadeel kan zijn dat in dit geval het totale debiet ( $Q+Q_r$ ) door de tank stroomt waardoor hogere snelheden optreden. De laatste vermelding die over dit soort tanks werd gevonden is Augustus (1985). Daar vraagt de auteur zich ook af waarom men niet op grote schaal is overgegaan tot het gebruik van deze tanks. Daarom zou het parallel en onder dezelfde omstandigheden gebruiken van een conventionele en een "peripheral feed peripheral effluent" tank op een afvalwaterzuivering, verhelderend zijn en mogelijk onomstotelijk het voordeel van laatstgenoemd ontwerp aantonen.

## 6 CONCLUSIES

De hiernavolgende conclusies zijn gebaseerd op mathematische en fysische modelleringsproeven voor rotatiesymmetrische stroming in een model van een nabezinktank, schaal 1:8, zonder invloed van mechanische ruiming en windefecten.

De mathematische modellering is bij dit onderzoek beperkt tot éénfasestroming in zoet water zonder toevoeging van vaste stoffen. De fysische proeven zijn uitgevoerd voor één- en meerfasestroming in zoet water met toevoeging van kaoliniet.

### éénfasestroming:

#### Mathematische modellering:

- Het computermodel PHOENICS is binnen acceptabele marges zonder meer bruikbaar en betrouwbaar voor het voorspellen van de plaats en de grootte van de snelheidsvectoren in het geval van éénfasestroming in een tank met dicht duikschot, al of niet met de toevoeging van deflectieschotten.
- Bij de toepassing van een geperforeerd duikschot kan niet zonder meer van één inputgegeven (bijv. debiet) worden uitgegaan. Dit wordt veroorzaakt door de optredende drie-dimensionale stroming achter het geperforeerde duikschot, hetgeen niet eenvoudig met een twee-dimensionaal model is te modelleren.
- Kleine variaties op een bepaald type deflectieschot hebben weinig invloed op het stromingsbeeld in de tank.
- Enige verschillen met de resultaten van de metingen in het fysische model, worden gevonden in de weergave van (1) entrainment, (2) de neer aan het einde van de tank bij de bodem en (3) de vertraging van de stroming in de tweede helft van de tank. Mogelijk kunnen betere resultaten worden verkregen door op sommige plaatsen een verfijning van het rekenrooster toe te passen.

#### Fysische modellering:

Voor éénfasestroming geldt bij een dicht duikschot:

- Bij de afwezigheid van een deflectieschot, of bij de aanwezigheid van het deflectieschot type 'Assen', is er geen stroming richting inlaat langs de bodem van de tank, buiten de zone direct bij de inlaat. Buiten de zone direct bij de inlaat is de stroming langs het wateroppervlak in de richting van de inlaat gericht.
- Bij de aanwezigheid van de deflectieschotten met opgaande knik over de bodem van de gehele tank is er stroming richting inlaat, terwijl de stroming langs het wateroppervlak praktisch over de gehele tank van de inlaat af is.

Voor éénfasestroming geldt bij een geperforeerd duikschot:

- Bij de afwezigheid van een deflectieschot, of bij de aanwezigheid van het deflectieschot type 'Assen', is er geen stroming richting inlaat langs de bodem van de tank, buiten de zone direct bij de inlaat. Buiten de zone direct bij de inlaat is de stroming langs het wateroppervlak in de richting van de inlaat.

- Bij de aanwezigheid van de deflectieschotten met opgaande knik over de bodem van de gehele tank is er stroming richting inlaat, terwijl de stroming langs het wateroppervlak praktisch over de gehele tank van de inlaat af is gericht.
- De grote neer in de tank ligt iets verder van de inlaat af en wordt minder sterk aangedreven (kleinere snelheidsvectoren) dan in de situatie met dicht duikschot.

meerfasestroming:

De samenstelling van het influent in de praktijk, zoet water + actief slib, geeft duidelijk aanleiding tot dichtheidsstroming (meerfasestroming). De situatie in het model, zoet water + een bepaalde concentratie aan kaoliniet, wordt voldoende representatief geacht voor modellering van de in de praktijk voorkomende stroming van mengsels van actief slib en zoet water, bij stilstaande ruimer en afwezigheid van windeffecten; qua bezinkingsmodellering echter niet, of niet geheel. Kaoliniet heeft een veel hogere dichtheid dan actief slib en daardoor neemt de bezonken laag nauwelijks ruimte in in het water, waardoor men geen zone met gehinderde bezinking krijgt, zoals in de praktijk met de actief slibdeken.

Naar aanleiding van de resultaten van de proeven met dichtheidsstroming wordt het volgende geconcludeerd:

- Het stromingspatroon in de tank bij dichtheidsstromingen van kaoliniet + water en dus ook van actief slib + water, verschilt volkomen van het stromingspatroon bij de éénfasestroming; mathematische en fysische modellering van de stromingen in de tank op basis van de éénfasestroming hebben geen betekenis voor het modelleren c.q. voorspellen, van de situatie in de tank bij de stroming van actief slibmengsels; in dat geval ontwikkelt zich een stroming in drie lagen, met naar boven toe afnemende dichtheid en, om en om, tegengestelde stromingsrichtingen.
- Het verschil in efficiëntie tussen de verschillende inlaatconstructies is niet significant bij normale influentconcentraties. Bij lagere influentconcentraties echter is de dichtheidsstroming minder uitgesproken. De vorm van de inlaatconstructie gaat dan een grotere rol spelen omdat de stroming meer op een éénfasestroming gaat lijken. De voor- en nadelen van verschillende soorten inlaatconstructies bij éénfasestroming zijn in de bovenstaande conclusies weergegeven.
- Maatregelen bij de inlaatconstructie om de stroming beter over de vertikaal te verdelen, hebben weinig of geen zin; door het optreden van dichtheidsstromingen zal er namelijk toch steeds een niet gelijkmatige snelheidsverdeling over de vertikaal ontstaan; het is trouwens de vraag, of gelijkmatige verdeling van de stroming over de vertikaal moet worden nagestreefd, aangezien de snelheidsverdeling over de vertikaal geen invloed blijkt te hebben op de efficiëntie van de bezinking.

Gezien de complexiteit van de te beschrijven verschijnselen (dichtheidsstroming, wind- en ruimereffecten) en de nog betrekkelijk geringe hoeveelheid onderzoek die naar deze verschijnselen in nabezinktanks is verricht, wordt voorgesteld in verder onderzoek een splitsing aan te brengen, zowel bij de mathematische als bij de fysische modellering.

De genoemde splitsing zou moeten liggen bij de overgang van een tweedimensionale benadering van de meerfasestroming naar een drie-dimensionale benadering, zonder ruimer- en windeffecten.

#### Mathematische modellering:

De éénfasestroming in nabezinktanks kan met behulp van PHOENICS goed worden gemodelleerd. Voor de mathematische modellering van dichtheidsstromen met PHOENICS is niet meer duidelijkheid verkregen. Vast staat alleen, dat de mathematische modellering van dichtheidsstroming een aanzienlijke (computer)inspanning zal vergen.

Aanbevolen wordt om in vervolgonderzoek als volgt verder te gaan met de mathematische modellering van dichtheidsstromen met PHOENICS:

- tweedimensionale benadering voor meerfasestroming;
- driedimensionale benadering voor meerfasestroming zonder ruimer- en windeffecten;
- driedimensionale benadering voor meerfasestroming met windeffecten, doch zonder ruimereffecten;
- driedimensionale benadering voor meerfasestroming met ruimereffecten doch zonder windeffecten;
- driedimensionale benadering voor meerfasestroming met ruimer- en windeffecten.

In vervolgonderzoek zou de verificatie van de PHOENICS-resultaten plaats kunnen vinden door metingen in situ (schaal 1:1) en/of metingen in een volledig rond, laboratoriummodel.

#### Fysische modellering:

De meerfasestroming in nabezinktanks kan met behulp van het laboratoriummodel voldoende representatief worden weergegeven door een mengsel van zoet water en een bepaalde concentratie aan kaoliniet.

Aanbevolen wordt om in vervolgonderzoek als volgt verder te gaan met de fysische modellering van dichtheidsstromen in het laboratoriummodel:

- (verbeterde) tweedimensionale benadering voor meerfasestroming met behulp van het aanwezige laboratoriummodel;
- driedimensionale benadering voor meerfasestroming zonder ruimer- en windeffecten;
- driedimensionale benadering voor meerfasestroming met windeffecten, doch zonder ruimereffecten;
- driedimensionale benadering voor meerfasestroming met ruimereffecten doch zonder windeffecten;
- driedimensionale benadering voor meerfasestroming met ruimer- en windeffecten.

De metingen kunnen plaatsvinden door metingen in situ (schaal 1:1) en/of metingen in een volledig rond, laboratoriummodel.



De literatuur wijst op constructieve veranderingen van nabezinktanks die een verbetering van de effluentkwaliteit kunnen geven. Aanbevolen wordt deze veranderingen in vervolgonderzoek mee te nemen. Een andere mogelijkheid is om het ontwerp met zowel influentaanvoer als effluentafvoer aan de omtrek in te bouwen in het model dat nu in het laboratorium staat. Ook de andere genoemde ontwerpaanpassingen van de conventionele tank zouden hier nagebouwd kunnen worden. Zo kan het gedrag van al deze ontwerpvarianten onder dezelfde omstandigheden (goed controleerbaar in het laboratorium) vergeleken worden. Verwacht wordt dat dit waardevolle gegevens voor de praktijk op zal leveren.

SYMBOLENLIJST

A	horizontale tankoppervlak	(m <sup>2</sup> )
b	breedte	(m)
C <sub>p</sub> , C <sub>D</sub> , C <sub>e</sub>	constanten	(-)
D(ε)	turbulente diffusie-term voor ε	(m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
D(k)	turbulente diffusie-term voor k	(m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
F	Froudegetal	(-)
F <sub>i</sub>	intern Froudegetal	(-)
g	zwaartekrachtsversnelling	(m <sup>2</sup> /s)
G	viskeuze dissipatie door dichtheidsverschillen	(m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
h	waterdiepte	(m)
k	turbulentie-energie per massa-eenheid	(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
p	druk	(N/m <sup>2</sup> )
Pr	Produktie-term voor k	(m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
R	hydraulische straal	(m)
Re	getal van Reynolds	(-)
Q	debiet	(m <sup>3</sup> /s), (m <sup>3</sup> /h)
r	straal	(m)
s <sub>0</sub>	oppervlaktebelasting	(m/s), (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> h)
u	tijdsgemiddelde snelheidscomponent in r-richting	(m/s)
u'	turbulente snelheidscomponent in r-richting	(m/s)
$\bar{u}$	gemiddelde snelheid in r-richting	(m/s)
u <sub>s</sub>	schuifspanningssnelheid	(m/s)
v	tijdsgemiddelde tangentiële snelheidscomponent	(m/s)
v'	turbulente tangentiële snelheidscomponent	(m/s)
$\bar{v}$	gemiddelde tangentiële snelheid	(m/s)
w	tijdsgemiddelde snelheidscomponent in z-richting	(m/s)
w'	turbulente snelheidscomponent in z-richting	(m/s)
$\bar{w}$	gemiddelde snelheid in z-richting	(m/s)
z	vertikale coördinaat	(m)
α	hoek laboratoriummodel	(rad)
δ	afstand tussen celmiddenpunt en wand	(m)
ε	dissipatie van de turbulentie energie	(m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
κ	constante van Von Karman	(-)
ν	moleculaire kinematische viscositeit	(m <sup>2</sup> /s)
ν <sub>t</sub>	turbulente kinematische viscositeit	(m <sup>2</sup> /s)
ρ	dichtheid	(kg/m <sup>3</sup> )
τ	schuifspanning	(N/m <sup>2</sup> )

Indices

DWA	Droog Weer Afvoer
RWA	Regen Weer Afvoer
in	influent
m	model
p	prototype

Definitities

$$Re = \frac{u * h}{\nu}$$

$$Fr = \frac{u}{(g * h)^{0.5}}$$

## LITERATUUR

- Anderson N.E. (1945)  
"Design of settling tanks for activated sludge"  
Sewage Works Journal 17 (1), pp. 50-63, 1945.
- Augustus M. (1985)  
"Clarifier design"  
WPCF Washington D.C., Manual of Practice no. FD-8, 1985.
- Bender J.H. (1987)  
"Don't bother with secondary clarifier distributed inlets"  
WATER / Engineering and Management, okt.1987
- Boyle W.H. (1976)  
"Improved secondary clarifier performance: peripheral vs center effluent arrangement"  
Water and Sewage Works, oct.1976, pp.90-94, 1976
- DeVantier B.A. & Larock B.E. (1987)  
"Modelling Sediment-Induced Density Currents in Sedimentation Basins"  
J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 113, No. 1
- Getachew N. (1991)  
"Optimalisering van grote nabezinktanks; Bundel stroommetingen in het fysische model"  
TU Delft, Fac. der Civiele Techniek
- Gould R.H. (1945)  
Discussie van "Design of settling tanks for activated sludge" door N.E. Anderson,  
Sewage Works Journal 17 (1), 50-63, 1945
- Hazen A. (1904)  
"On Sedimentation"  
Transactions, ASCE, No. 980, Vol. 53
- Imam E.H., McCorquodale J. A. & Bewtra J. K. (1983)  
"Numerical Modelling of Sedimentation Tanks"  
J. Hydr. Engrg., ASCE, Vol. 109, No. 12
- Marle C. van (1991;1)  
"Optimalisering van grote nabezinktanks; Proeven met sediment in een laboratoriummodel van een nabezinktank"  
TU Delft, Fac. der Civiele Techniek; STORA project 1.1.6
- Marle C. van (1991;2)  
"Optimalisering van grote nabezinktanks; Programma verwerking meetgegevens"  
TU Delft, Fac. der Civiele Techniek; STORA project 1.1.6
- Melis L.L.M. (1991)  
"Optimalisering van grote nabezinktanks; Mathematisch model voor de waterbeweging"  
TU Delft, Fac. der Civiele Techniek; STORA project 1.1.6

- McCorquodale J. A. e.a. (1988)  
 "Experimental Study of Flow in Settling Tanks"  
 J. Envir. Engrg., Vol. 114, no. 5
- Parker D.C. (1983)  
 "Assessment of secondary clarifier design concepts"  
 J.W.P.C.F. 55, 349, 1983
- Schamber D. R. & Larock B. E. (1981)  
 "Numerical Analysis of Flow in Sedimentation Basins"  
 J. Hydr. Div., ASCE, Vol. 107, No. HY5
- Schamber D. R. & Larock B. E. (1983)  
 "Partical Concentration Predictions in Settling Basins"  
 J. Envir. Eng. Div., ASCE, Vol. 109, No. 3
- Schlegel S. (1990)  
 "Modifikationen des Nachklärbeckens zur Reduzierung des  
 Feststoffabtriebes"  
 ATV-Seminar für die Abwasserpraxis, "Verminderung von Feststoffen im  
 Klaranlagenablauf", Lehrgang nr. 12187/12.069, Technische Akademie  
 Esslingen
- Seyfried C.F. (1990)  
 "Gestaltung der Zu- und Abläufe van Nachklärbecken"  
 ATV-Seminar für die Abwasserpraxis, "Verminderung von Feststoffen im  
 Klaranlagenablauf", Lehrgang nr. 12187/12.069, Technische Akademie  
 Esslingen
- Stamou A.I., Adams E. W. & Rodi W. (1989)  
 "Numerical modelling of flow and settling in primary rectangular clari-  
 fiers"  
 J. Hydr. Res., Vol. 27, No. 5
- STOWA (1992)  
 "Optimalisering van grote nabezinktanks, Literatuurstudie modellen"  
 STOWA, project 1.1.6
- Stukenberg J.R.; Rodman L.C. en Touslee J.E. (1983)  
 "Activated sludge clarifier design improvements"  
 J.W.P.C.F. 55, 4, pp.341-348, 1983
- Tendaj-Xavier M., Hultgren J. (1988)  
 "The influence of the depth on the secondary sedimentation efficiency at  
 Bromma sewage treatment plant"  
 Wat.Sci.and Technol., 20, no.4/5, pp.143-152, 1988

BIJLAGE      Uitwerking van het interne Froude-getal

Voor de fysische modellering van stroming met sediment is geschaald volgens het interne Froude-getal  $F_i$  dat als volgt is gedefinieerd:

$$F_i = \frac{u}{\sqrt{g \cdot h \cdot \epsilon}} = \frac{Q}{hb \sqrt{g \cdot h \cdot \epsilon}} \quad \text{met } \epsilon = \frac{\rho_i - \rho_t}{\rho_t}$$

waarin:

$u$	= vloeistofsnelheid in horizontale richting	(m/s)
$g$	= versnelling van de zwaartekracht	(m/s <sup>2</sup> )
$h$	= diepte van het beschouwde vloeistofgedeelte in de tank	(m)
$b$	= breedte van het beschouwde vloeistofgedeelte in de tank	(m)
$\epsilon$	= dichtheidsratio	(-)
$\rho_i$	= dichtheid van de aanvoerstroom in de nabezinktank	(kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_t$	= dichtheid van het beschouwde vloeistofgedeelte in de tank	(kg/m <sup>3</sup> )

De onderstaande tabel geeft een overzicht van de waarden van de parameters zoals deze in het (sector)model zijn toegepast. Daarnaast zijn de teruggeschaalde waarden voor het prototype van een ronde tank (praktijksituatie) gegeven, die goed overeenkomen met de waarden die in de praktijk worden gevonden.

		model (sector)	prototype (ronde tank)
$b_{\text{inlaat}}$	[m]	0,31	15
$h_{\text{inlaat}}$	[m]	0,25	2
$Q_{\text{totaal}}$	[m <sup>3</sup> /s]	$5,6 \cdot 10^{-4}$	0,75
$Q_{\text{tank}} (= Q_{\text{RWA}})$	[m <sup>3</sup> /s]	$3,7 \cdot 10^{-4}$	0,5
$Q_{\text{retour}} (= \frac{1}{2} \cdot Q_{\text{RWA}})$	[m <sup>3</sup> /s]	$1,9 \cdot 10^{-4}$	0,25
$\epsilon$	[-]	0,00086	0,0012
$F_i$ (met $Q=Q_{\text{tank}}$ )	[-]	0,11	0,11
Oppervlakte belasting	[m/h]	0,30	1,04

