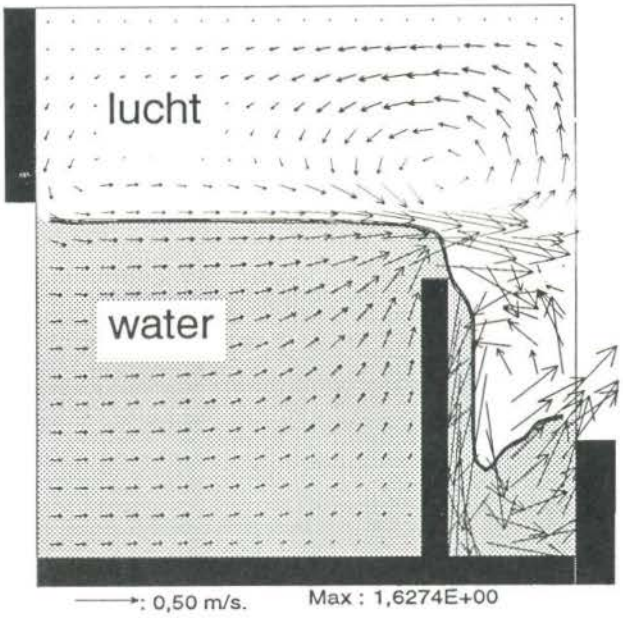
0244

Het modelleren van een vrij wateroppervlak in bergbezinktanks

Tussenrapport 3 van het Rionedproject 92-05 "Onderzoek bergbezinktanks"

Maart 1993

Ir. J. Kluck



TU Delft
Technische Universiteit Delft

Faculteit der Civiele Techniek
Vakgroep Gezondheidstechniek & Waterbeheersing
Sectie Milieu & Gezondheidstechniek

Het modelleren van een vrij wateroppervlak in bergbezinktanks

Tussenrapport 3 van het Rionedproject 92-05 "Onderzoek bergbezinktanks".

maart 1993

ir. J. Kluck
Vakgroep Gezondheidstechniek & Waterbeheersing
Faculteit der Civiele Techniek
Technische Universiteit Delft

INHOUDSOPGAVE

1 INLEIDING 1

2 BEREKENINGEN MET HET MATHEMATISCHE MODEL 2
- 2.1 Simulatie van het vullen tot aan de evenwichtssituatie 2
- 2.2 Effect van veranderingen in de configuratie 6

3 PROBLEMEN BIJ HET MODELLEREN VAN EEN VRIJ WATEROPPERVLAK 8
- 3.1 Tijdstap 8
- 3.2 Hoogte van het wateroppervlak 9
- 3.3 Vereenvoudigde modellen 10
- 3.4 Luchtstroming 11
- 3.5 Conclusies 11

4 SCHAALOPSTELLING VAN EEN BERGBEZINKTANK 13
- 4.1 Vooronderzoek 13
- 4.2 Meetinstellingen 14
- 4.3 Bezinking 17

5 TOEKOMSTIG ONDERZOEK 18

LITERATUURLIJST 19

1 INLEIDING

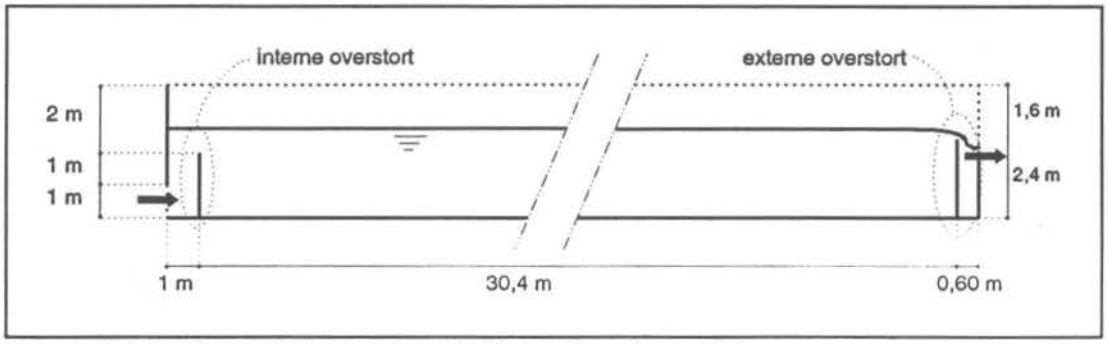
Dit is het derde rapport van het onderzoek naar het hydraulische gedrag van bergbezinktanks met het oog op de optimalisering van de bezinking. Het sluit aan op de eerdere rapporten [*Kluck 1992-a*] en [*Kluck 1992-b*], waarin de reden en het doel van dit onderzoek staan beschreven. Tevens is daarin de keuze voor het programma PHOENICS beargumenteerd voor het mathematisch modelleren van de stroming en de bezinking in een bergbezinktank. Aansluitend is een begin gemaakt met het opzetten van een mathematisch model dat de stroming beschrijft.
Van december 1992 tot en met februari 1993 is verder gewerkt aan het opzetten van het stromingsmodel. Onder andere het berekenen van een vrij wateroppervlak is aan het model toegevoegd. Resultaten hiervan staan beschreven in hoofdstuk 2. Vervolgens komen in hoofdstuk 3 de problemen die er nog zijn met de modellering van het vrije wateroppervlak aan de orde. De problemen zijn nog niet volledig opgelost, maar de resultaten zien er aannemelijk uit. Om de resultaten te controleren en het model te kalibreren zijn meetgegevens nodig. In hoofdstuk 4 is een samenvatting gegeven van een voorstel om te meten aan een schaalopstelling van een bergbezinktank. Tot slot wordt in hoofdstuk 5 het vervolg van dit onderzoek aangegeven.

Uit de reacties op twee presentaties van dit onderzoek in het kader van het Post Academisch Onderwijs aan de TUD in januari 1993 (Cursus: Toepassingen van vuiluitworpmodellen) is gebleken dat er interesse is voor het onderzoek onder waterkwaliteitsbeheerders, gemeenten en adviesbureaus.

2 BEREKENINGEN MET HET MATHEMATISCHE MODEL

2.1 SIMULATIE VAN HET VULLEN TOT AAN DE EVENWICHTSSITUATIE

Uitgaande van het model van de bergbezinktank in Amersfoort, zoals dat beschreven staat in [*Kluck 1992-b*], is het stromingsmodel verder ontwikkeld. Het berekenen van het vrije wateroppervlak is aan het model toegevoegd. Het bleek ook mogelijk het vullen van de tank te simuleren.

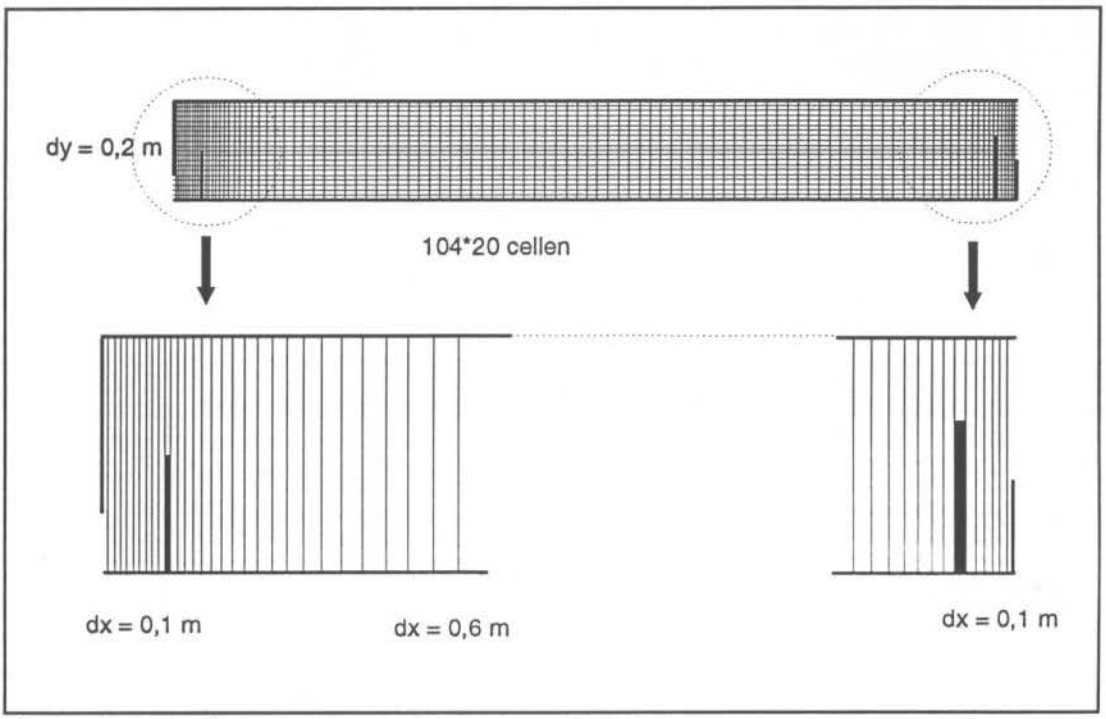


Figuur 2.1: Zij-aanzicht van het 2-dimensionale model.

Het mathematische model stelt een tank met een lengte van 32 m voor. De invoer vindt links-onder plaats. Zie figuur 2.1. Het water stroomt vervolgens over de interne overstort (H_i = 2,0 m) de tank in. De externe overstort is hoger dan de interne overstort (H_e = 2,4 m). De waterstand wordt door PHOENICS berekend. Hierbij wordt stroming van lucht boven het water gesimuleerd. Om voldoende ruimte te hebben voor deze stroming, is het rekenmodel 4 m hoog. Langs de bovenrand is als randvoorwaarde opgegeven dat de luchtdruk nul is. Afhankelijk van de druk in het model zal lucht door de bovenrand de tank in- of uitstromen.
Het water stroomt superkritisch over de externe overstort, zodat de benedenstroomse situatie geen invloed heeft op de stroming bovenstrooms. De rechter begrenzing is 0,60 m verder gelegd, omdat het opleggen van een goede randvoorwaarde ter plaatse van de externe overstort problemen opleverde. Dit is nader uitgewerkt in hoofdstuk 3.

Langs de bodem vindt wrijving plaats, zoals is uitgelegd in [*Kluck 1992-b*]. Het model is 2-dimensionaal. Dus in feite betreft het hier een model van een oneindig brede tank zonder zijwanden. Langs de verticale wanden (voorwand, overstorten en achterwand) is geen wrijving opgegeven. Gezien de verhouding tussen de lengte en de hoogte van de tank en de richting van de hoofdstroming is het effect van die wrijving beperkt.

In figuur 2.2 is het rekenrooster weergegeven waarmee de tank is gemodelleerd. Alle cellen zijn 0,20 m hoog, dus 20 cellen in verticale richting. In de x-richting (horizontaal) varieert de celgrootte. Het verschil in lengte van twee aangrenzende cellen is kleiner dan 20%. In de buurt van de overstorten zijn de cellen kleiner (maar minimaal 0,10 m). In het midden van de tank, waar de



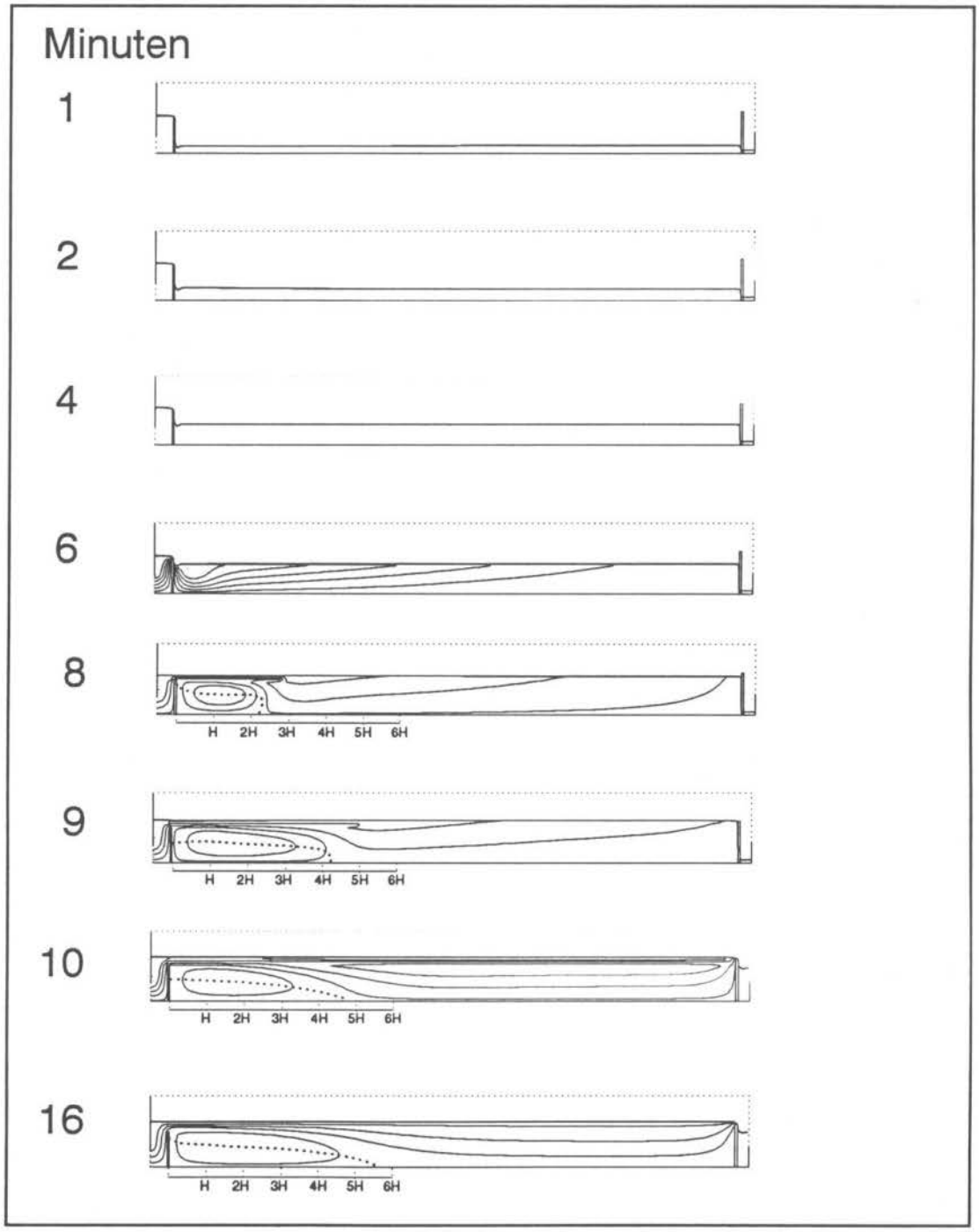
Figuur 2.2: Rekenrooster.

stroming minder sterk fluctueert zijn ze het grootst (maximaal 0,60 m). Dit resulteert in 104 cellen in de x-richting. De verhouding tussen lengte en hoogte van een cel ligt hiermee tussen 2:1 en 1:3. Een model van 104*20 cellen kan nog zonder geheugenproblemen worden doorgerekend op een PC. Het probleem is echter dat bij het berekenen van het wateroppervlak een kleine tijdstap moet worden gekozen om divergentie te voorkomen. Hierdoor wordt de rekentijd lang. Dit probleem wordt in het volgende hoofdstuk behandeld.

Als invoer is een constante mesbelasting van 0,125 m^2/s gekozen. Gedurende de onderzoeksperiode van de NWRW is dit debiet in de tank van Amersfoort tussen de 1 en 2 keer per jaar overschreden [*NWRW 8.1* en *NWRW eindrapport, 1989*]. Het vullen van de tank is gesimuleerd en vervolgens is doorgerekend totdat de veranderingen zo klein waren dat evenwicht praktisch leek was bereikt. Het resultaat ziet er aannemelijk uit. Er vormt zich een neer benedenstrooms van de interne overstort. Voorbij de neer verdeelt het water zich over de gehele hoogte. In figuur 2.3 is het verloop van de waterstand op verschillende tijdstippen weergegeven. Vanaf t = 6 minuten zijn ook stroomlijnen weergegeven. Tussen twee stroomlijnen stroomt een constante hoeveelheid massa. Voor t = 6, 8 en 9 minuten eindigen deze lijnen op verschillende plaatsen bij het wateroppervlak. Dit geeft aan dat de waterstand nog stijgt. Bij t = 9 minuten begint water over de externe overstort te stromen. Daarna komen de stroomlijnen net boven de externe overstort samen. Dit betekent dat het water over de externe overstort stroomt.

N.B: De stroomlijnen zijn berekend door het grafische pakket van PHOENICS. De aanname dat tussen de stroomlijnen evenveel massa stroomt klopt niet overal in de figuren. Bijvoorbeeld de knikken in de stroomlijnen achter de neer voor t = 8 en t = 9 minuten zijn onlogisch. Bij nadere inspectie van de stroming op die punten (met behulp van plaatjes van

snelheidsvectoren) is gebleken dat het water zich daar netjes verspreidt en dat de figuur met de stroomlijnen bedrieglijk is. Voor t = 10 minuten lijkt het erop alsof, voorbij de neer aan de bodem, zich een zeer grote tweede neer aan het oppervlak heeft ontwikkeld, omdat een stroomlijn daar gesloten is. Dit is niet het geval. Het stromingsbeeld is overeenkomstig met dat voor t = 16 minuten.



Figuur 2.3: Berekend stromingsbeeld in de bergbezinktank op verschillende tijdstippen.

Aan de stroomlijnen is wel duidelijk te zien dat de neer achter de interne overstort groeit. Voor de duidelijkheid is een stippellijn getrokken, waaronder het water weer terug (naar links) stroomt. De plek waar deze lijn de bodem snijdt, geeft de neerlengte aan. Na 16 minuten veranderde de stroming nog slechts zeer weinig. Aangenomen wordt dat dan de evenwichtssituatie is bereikt (de belasting is continu).

Er kunnen een aantal kritische kanttekeningen bij deze resultaten worden geplaatst:

1) de resultaten zijn (nog) niet vergeleken met meetresultaten;
2) de neerlengte lijkt te kort;
3) de hoogte van het wateroppervlak is te laag;
4) de stroming van lucht boven het water is onlogisch.

ad 1) Zonder een vergelijking tussen meetgegevens van een prototype of een schaalopstelling van een tank enerzijds en berekeningsresultaten van een simulatie van de bemeten stroming anderzijds, zijn de berekeningsresultaten onbetrouwbaar. Hier wordt in hoofdstuk 4 nader op ingegaan.

ad 2) Volgens de berekeningen is de lengte van de neer in de uiteindelijke situatie gelijk aan 5 tot 6 keer H; de hoogte van de interne overstort. Volgens [*Tropea, 1982*] is de neerlengte in werkelijkheid gelijk aan 7 tot 9 keer de drempelhoogte H. Uit proefmetingen aan een schaalopstelling van een bergbezinktank (zie hoofdstuk 4) bleek de neerlengte gelijk te zijn aan 8*H. Met het (tot binnen zekere grenzen) kloppend maken van de neerlengte uit de berekeningen met de werkelijkheid wordt gewacht tot de meetgegevens van de schaalopstelling beschikbaar zijn.
De verwachting is dat de neerlengte in het mathematische model kan worden verbeterd door aan het k-ϵ turbulentiemodel te sleutelen. Dit turbulentie-model staat er om bekend de neerlengtes te kort te berekenen. Het k-ϵ model schijnt de turbulente kinetische energie (k) wel goed te modelleren, maar een te kleine dissipatie van turbulente kinetische energie (ϵ) te voorspellen. Dit heeft een te grote turbulente viscositeit ν_t tot gevolg. Een te grote turbulente viscositeit zorgt voor een te snelle uitwisseling van verschillen in snelheden en resulteert dus in een te kleine neer.

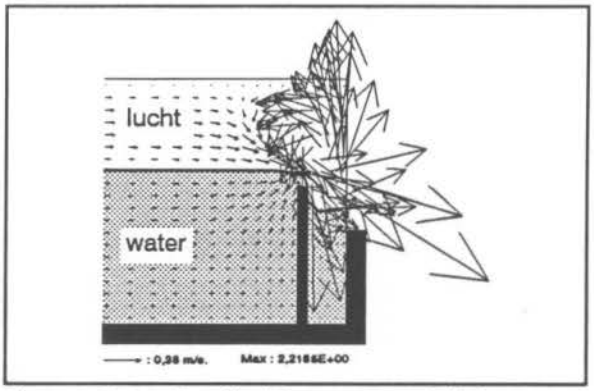
Bij een andere opzet van het model bleek de neerlengte echter wel 8*H te worden. De reden voor de verschillen in de resultaten van deze mathematische modellen moet nog worden uitgezocht.

ad 3) Het verschil tussen de kruin van de externe overstort en de bovenstroomse waterstand is in het mathematische model 0,12 m. Bij een mesbelasting q gelijk aan 0,125 m^2/s kan dit verschil voor een korte overlaat worden geschat met:

$$h = \left(\frac{q}{1,8}\right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0,125}{1,8}\right)^{\frac{2}{3}} = 0,17 \text{ m}$$

Uit een gedetailleerde berekening van de stroming over een korte overlaat, is gebleken dat bij bijna evenwicht de door PHOENICS berekende hoogte 10 tot 20% lager is dan de geschatte waarde. Het verschil is hier nog groter. Dit wordt mogelijk veroorzaakt doordat de stroming boven de overlaat slechts door één cel gaat, zodat het resultaat onnauwkeurig is. De problemen die het modelleren van een wateroppervlak met zich mee brengen worden besproken in hoofdstuk 3.

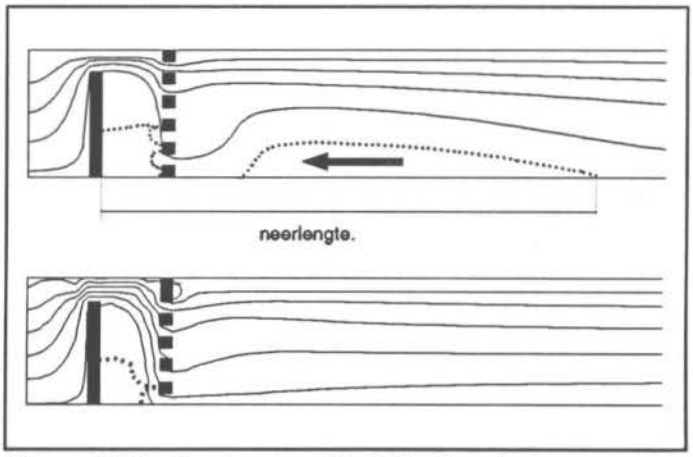
ad 4) Zoals blijkt uit figuur 2.4 is de snelheid van de lucht boven het water veel te groot. Aan de snelheidsvectoren in de figuur is te zien dat de lucht voor de rechter modelrand blijft circuleren en niet het model uitstroomt. Dit is onlogisch omdat de bovenkant van het model geheel open is. Daar zou voldoende lucht het model weer in kunnen stromen om te compenseren voor een uitstroming boven het wateroppervlak rechts. Ook deze problemen worden in hoofdstuk 3 behandeld.



Figuur 2.4: Snelheidsvectoren bij de externe overstort.

2.2 EFFECT VAN VERANDERINGEN IN DE CONFIGURATIE

Naast de berekeningen met het hierboven beschreven model, zijn ook een aantal berekeningen uitgevoerd met modellen van andere configuraties van bergbezinktanks. De hoogte van de interne overstort, de lengte-diepte verhouding en het debiet zijn gevarieerd. Modellen met diffusieschotten met verschillende doorlatendheid en op verschillende plaatsen achter de interne overstort zijn doorgerekend. Het doorgerekende diffusieschot bestaat uit een muur die is opgebouwd uit groepjes van open en gesloten cellen die elkaar afwisselen, zodat openingen en blokkades van telkens 20 cm hoog ontstaan. Zie figuur 2.5. Bij een bepaalde keuze van afstand tot de interne overstort, doorlatendheid van de muur (gaten) en afstand tussen de bodem en het eerste gat, verdwijnt de neer achter de interne overstort bijna volledig. In figuur 2.5 zijn de stroomlijnen ter plaatse van de interne overstort en het diffusieschot weergegeven voor twee verschillende schotten. De stippellijn geeft aan waar het water weer terug



Figuur 2.5: Korte neer bij diffusieschot.

(naar links) stroomt. Met het schot in het onderste plaatje is de neer volledig verdwenen, zodat in een groter deel van de tank vuil kan bezinken.
Zowel berekeningen met als berekeningen zonder vrij wateroppervlak zijn uitgevoerd. Dit leverde geen noemenswaardige verschillen op.

Het heeft echter nog geen zin uit deze berekening conclusies te trekken betreffende de optimale doorlatendheid en lokatie van een diffusieschot. De berekende resultaten zijn nog niet gecontroleerd aan de hand van meetgegevens. Bovendien geldt dit resultaat voor een bepaald debiet. Pas nadat het stromingsmodel gekalibreerd is aan de hand van meetgegevens zullen de mogelijkheden van een diffusieschot verder worden uitgezocht.

Hoewel het model tot nu toe 2-dimensionaal is, is ook onderzoek gedaan naar de lengte-breedte verhouding van de tank op de stroming. Voor het simuleren van een bredere tank werd het debiet per strekkende meter breedte zodanig verkleind en de lengte of diepte zo vergroot, dat de (fictieve) totale inhoud van de tank constant bleef. De resultaten toonden aan dat de neerlengte slechts afhankelijk is van de overstorthoogte. Hieruit volgt dat bij een korte diepe bak, zal de neer een groter gedeelte van de tank beslaan dan bij een lange ondiepe tank. Maar dat is logisch. Behalve allerlei praktische bezwaren heeft een lange tank het nadeel dat de gemiddelde stroomsnelheid toeneemt. Boven een bepaalde snelheid zal minder bezinken en zelfs materiaal weer worden opgewoeld.

Nogmaals: Het onderzoeken van effecten van veranderingen in de configuratie is uitgesteld tot na het kalibreren van het model aan meetgegevens.

3 PROBLEMEN BIJ HET MODELLEREN VAN EEN VRIJ WATEROPPERVLAK

De resultaten van de laatste berekeningen met modellen waarbij het wateroppervlak door PHOENICS wordt berekend zien er goed uit. Met enige beperkingen kan er mee worden gewerkt. De grootste beperking is dat de tijdstap klein dient te zijn om divergentie te voorkomen. Verder blijkt de waterstand iets te laag te worden berekend. Met behulp van sterk vereenvoudigde modellen is nog een probleem aan het licht gekomen (zie paragraaf 3.3), maar de gevolgen daarvan zijn nog niet duidelijk. Tot slot blijkt het simuleren van de stroming van lucht boven het water tot onlogische resultaten te leiden.

De methode die wordt gebruikt om de plaats van het wateroppervlak te bepalen is de zogenoemde Height of Liquid methode van PHOENICS [*CHAM, 1992*]: De stroming van het water en de zich daarboven bevindende lucht wordt gesimuleerd. De stroming van lucht en water wordt tegelijk opgelost, waarbij wordt aangenomen dat het om één en dezelfde "vloeistof" gaat, met een dichtheid en viscositeit afhankelijk van de hoeveelheid water of lucht in een cel. De grens tussen water en lucht wordt bepaald uit de hoeveelheid water die zich in een kolom bevindt. Uit een water-massabalans wordt bepaald in welke cel de grens tussen lucht en water zich bevindt en voor welk deel die cel gevuld is met water. De cellen boven deze cel bevatten alleen lucht en eronder alleen water. De grenscel kan dus gedeeltelijk gevuld zijn. De dichtheid en de viscositeit in die cel worden aan de hand van de vulling berekend. Deze methode geeft goede resultaten zolang het wateroppervlak niet te stijl is en geen dubbele wateroppervlakken ontstaan, door bijvoorbeeld insluiting van lucht. Omdat het wateroppervlak achter de interne overstort tijdens het vullen zeer stijl is, betekent dit dat de daar berekende stroming zeer kritisch zal moeten worden bekeken.

3.1 TIJDSTAP

Bij het modelleren van een stroming met een vrij wateroppervlak doen zich convergentie problemen voor wanneer het Courant getal groter is dan 1. Het Courant getal N_c is gelijk aan de snelheid maal de tijdstap gedeeld door de cellengte of de celbreedte.

$$N_c = u\frac{Dt}{Dx}$$

De problemen zijn grotendeels opgelost, door het model zo op te zetten dat het Courant getal strikt kleiner dan 1 blijft. De eis dat het Courant getal kleiner dient te zijn dan 1 is als volgt te verklaren: De afstand die een druppel water in een tijdstap aflegt, is gelijk aan Dt*u. Als deze afstand groter is dan Dx springt die druppel over een cel heen. De verandering in stroming wordt in dat geval niet goed aan elke volgende cel doorgegeven en de berekening divergeert. Deze eis was ook een voorwaarde voor convergentie bij de berekeningen zonder vrij wateroppervlak. De eis komt voort uit de gekozen discretisatiemethode: fully-upwind [*Stelling en Booij 1991*].

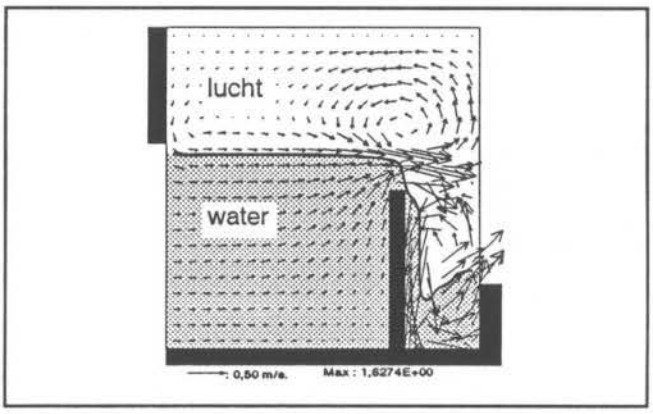
Het verschil tussen modellen met vrij wateroppervlak en de eerdere berekeningen zonder vrij wateroppervlak is dat de snelheden in bepaalde situaties bij de modellen met vrij wateroppervlak hoger zijn. Terwijl in de modellen zonder vrij oppervlak boven een overstort meteen alle cellen gevuld waren, moet bij een model met vrij wateroppervlak zich eerst een waterhoogte ontwikkelen. Bij een kleine waterhoogte is de snelheid groot opdat voldoende debiet doorstroomt. Het feit dat de waterstand te laag wordt uitgerekend zorgt er voor dat de snelheid boven de kruin te groot zal zijn. Daar komt nog bij dat de waterstand net boven de kruin lager is dan voor de kruin, zodat de snelheid boven de kruin extra groot is. Dit resulteert in kleine tijdstappen om het Courant getal kleiner dan 1 te houden en dus in langere rekentijden voor het modellen van stromingen met vrij wateroppervlak dan voor stromingen zonder vrij wateroppervlak.

Het lijkt de moeite waard uit te zoeken of de berekeningen met wateroppervlak sneller kunnen of niet. Gedacht wordt aan het toepassen van andere discretisatiemethodes dan de fully-upwind methode die nu wordt gebruikt. Hier dient in de toekomst aan te worden gewerkt. Bovendien zal het model zo aangepast moeten worden dat de waterhoogte boven de overstort meer in overeenstemming is met de werkelijke waterhoogte. Naar verwachting is deze hoger dan de waterhoogte die nu wordt berekend. Dit zal een gunstige invloed op de rekentijd hebben, omdat een hogere waterstand zal resulteren in een lagere stroomsnelheid boven de overstort zodat met grotere tijdstappen kan worden gerekend.

3.2 HOOGTE VAN HET WATEROPPERVLAK

Zoals is aangegeven in de vorige paragraaf wordt het verschil tussen de kruinhoogte van de externe overstort en de bovenstroomse waterstand kleiner berekend dan verwacht. Het verschil tussen de geschatte waarde (0,17 m) en de berekende waarde (0,12 m) is groot (30% van 17 cm), maar het rekenrooster is ook erg grof in verticale richting. De celhoogte is 0,20 m, zodat de scheiding tussen lucht en water zich in de eerste cel boven de overstort bevindt.

Een model van een hele bergbezinktank met kleinere cellen zal resulteren in zeer lange rekentijden. Bij een model met kleinere cellen dienen de tijdstappen ook kleiner te zijn en duurt de berekening extra lang. Daarom is een model van alleen de overstort gemaakt. Wanneer de cellen zo klein worden gekozen, dat de grens tussen lucht en water zich in de 2e cel boven de kruin of in de 3e cel bovenstrooms van de kruin bevindt, dan is het verschil tussen berekende en verwachte waterhoogte 20%. Zie figuur 3.1. Zoals was te verwachten hangt de nauwkeurigheid nauw samen met de celgrootte.



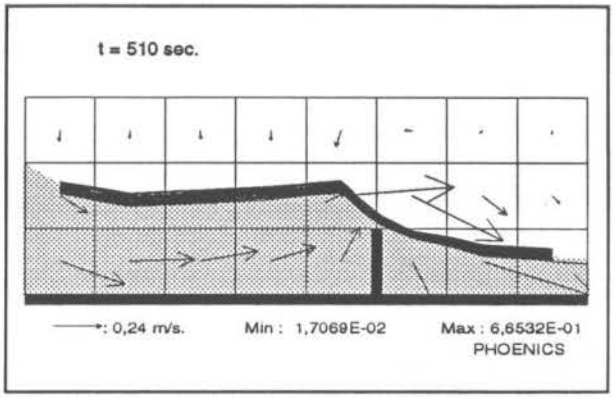
Figuur 3.1: Model overstort.

Opgemerkt wordt dat de geschatte waarde niet noodzakelijkerwijs ook de werkelijke waarde is. Dit moet met behulp van zelf gemeten meetgegevens of met gegevens uit de literatuur nog worden uitgezocht.

Een te lage waterstand heeft tot gevolg dat de snelheid hoog moet zijn om toch al het water af te voeren. Omdat deze verschillen in snelheid bovenin de tank, in de buurt van de overstorten plaatsvinden, zal de invloed op de in de toekomst te modelleren bezinking klein zijn.

3.3 VEREENVOUDIGDE MODELLEN

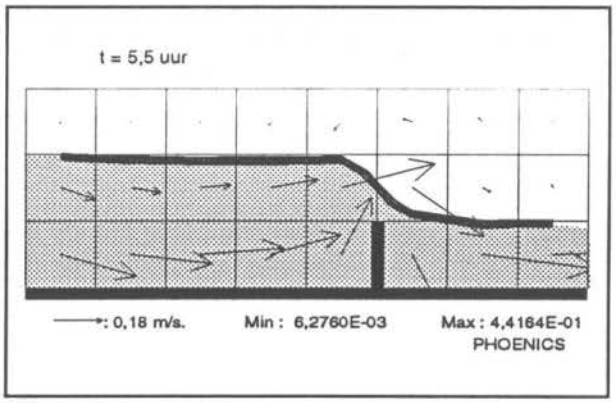
Om meer inzicht te verkrijgen in de wijze waarop in PHOENICS de waterstand wordt berekend zijn enige sterk vereenvoudigde modellen opgezet van een stroming met een vrij wateroppervlak. Hierbij is naar voren gekomen dat de grens tussen lucht en water na een groot aantal iteraties precies op de celgrens komt te liggen.



Figuur 3.2: Wateroppervlak na 510 sec.

De bergbezinktank is teruggebracht tot een model van 1.6 m lang verdeeld in 8 kolom van 0,20 m en 3 rijen van 0,20 m (= 0,60 m) hoog. Het water stroomt links door de twee onderste cellen met een horizontale snelheid van 0,1 m/s binnen. Ten behoeve van de uitstroming is de gehele rechter zijde van het model open. Als overstort is de rechter wand van de 5e cel van links in de onderste rij dicht gemaakt. Zie figuur 3.2. Aan de bodem treedt wrijving op en aan de bovenrand is een druk nul opgegeven en kan lucht in- en uitstromen. Uitgaande van een beginsituatie waarbij de onderste twee rijen gevuld zijn, zakt de waterstand eerst. Na 510 seconden lijkt evenwicht te zijn bereikt. Het water wordt opgestuwd om over de gesloten wand te stromen en valt daarachter omlaag en stroomt het model uit (figuur 3.2). De gesimuleerde tijd van 510 s dient ruimschoots voldoende te zijn om evenwicht te bereiken, daar het water bij een snelheid van 0,1 m/s slechts 16 s nodig heeft om van links naar rechts door het model te stromen.

De berekeningsresultaten leken inderdaad niet meer te veranderen, maar bij een nadere vergelijking van de resultaten bleek dat de stroming een groot aantal tijdstappen later toch nog was veranderd. Na 5,5 uur gesimuleerde tijd (dat is 1200 keer de verblijftijd!) bleek de scheiding tussen lucht en water zich precies op een celgrens te bevinden. Zie figuur 3.3.



Figuur 3.3: Wateroppervlak na 5,5 uur.

Soortgelijke berekeningen zijn ook uitgevoerd voor andere vereenvoudigde stromingssituaties. Het resultaat was steeds hetzelfde, zodat geconcludeerd wordt dat PHOENICS een voorkeur heeft voor celgrenzen wat betreft de grens tussen lucht en water. Dit is natuurlijk niet goed. Pas bij fijnere rekenroosters lijkt het vrij wateroppervlak niet naar de celgrens toe te lopen. Een verklaring hiervoor is nog niet gevonden. Opgemerkt wordt dat dit slechts langzaam (in veel iteraties) optreedt, zodat bij een in de tijd variërend wateroppervlak het effect beperkt zal zijn. Bij voldoende kleine cellen is de fout bovendien klein.

3.4 LUCHTSTROMING

In de cellen die gedeeltelijk met water en gedeeltelijk met lucht zijn gevuld, is de snelheid van lucht en water gelijk. Door het verschil in soortelijke dichtheid is de snelheid van het water maatgevend. Boven de overstort, waar de grootste watersnelheden optreden wordt de lucht dus flink aangezwengeld. De mate waarin dit gebeurt wordt nogal beïnvloed door de mate waarin de gedeeltelijk gevulde cel met water gevuld is. Wanneer de grens tussen lucht en water precies op een celgrens ligt, dan kan de lucht bijna stilstaan terwijl het water stroomt (zie figuur 3.3). Het rondtollen van de lucht zoals weergeven in figuur 2.4 zou echter niet moeten optreden. De lucht zou samen met het water rechts uit het model moeten stromen. Dat dit niet het geval is en dat de lucht naar boven afbuigt en rondtolt, kan het gevolg zijn van een verkeerde randvoorwaarde of van een fout in de wijze waarop het vrij wateroppervlak wordt berekend. Hierover wordt contact opgenomen met CHAM.
Vanwege deze problemen is de uitstroomrand in de modellen voorbij de externe overstort gekozen en niet precies ter hoogte van de externe overstort. Omdat de stroming boven de overstort superkritisch is, behoort de stroming achter de overstort geen invloed te hebben op de bovenstroomse stroming.

3.5 CONCLUSIES

Er zijn nogal wat problemen met het modelleren van een vrij wateroppervlak. Met name aan de problemen met de luchtstroming zal worden gewerkt. Voor het gehele model van een bergbezinktank is de invloed van een verschil in waterstand beperkt. Een verschil van 0,05 m op 2,5 m is slechts een verschil van 2%. Voor de gemiddelde snelheid en voor de bezinking, die in de toekomst aan het model zal worden toegevoegd, is dit zeker verwaarloosbaar. Toch zal nog worden geprobeerd deze problemen op te lossen, vooral om kortere rekentijden te verkrijgen.
Donderdag 8 maart 1993, op een landelijke bijeenkomst van gebruikers van PHOENICS, zullen deze problemen worden gepresenteerd. Dan zal ook iemand van CHAM aanwezig zijn. De problemen zijn reeds naar CHAM opgestuurd (met de mededeling dat ze op de PHOENICS-bijeenkomst zullen worden gepresenteerd), zodat medewerkers van CHAM zich kunnen voorbereiden op een antwoord.

Opgemerkt wordt dat voor de stroming in een volledig gevulde tank de verschillen in de resultaten van berekeningen met en zonder vrij oppervlak klein zijn indien de belasting constant is of slechts langzaam varieert. De variaties in waterstand zijn slechts klein ten opzichte van de totale diepte. Voor deze

stromingssituaties kunnen (om rekentijd te sparen) berekeningen zonder vrij wateroppervlak worden uitgevoerd.
Bij een plotselinge verandering van het debiet heeft het modelleren van een vrij oppervlak echter wel invloed. Zonder vrij oppervlak zal de verandering in debiet zich ogenblikkelijk in het gehele model doen gelden, terwijl met een vrij oppervlak de schok door het wateroppervlak wordt opgevangen en enige tijd nodig is voordat benedenstrooms de stroming verandert.
Voor het modelleren van het vullen van de tank is het modelleren van een vrij wateroppervlak natuurlijk ook wenselijk. Het vullen dient gemodelleerd te worden omdat dit een belangrijk onderdeel is van de stromings- en bezinkingsprocessen in tanks. Het is mogelijk dat dan reeds vuil bezinkt, of juist helemaal niet.

4 SCHAALOPSTELLING VAN EEN BERGBEZINKTANK

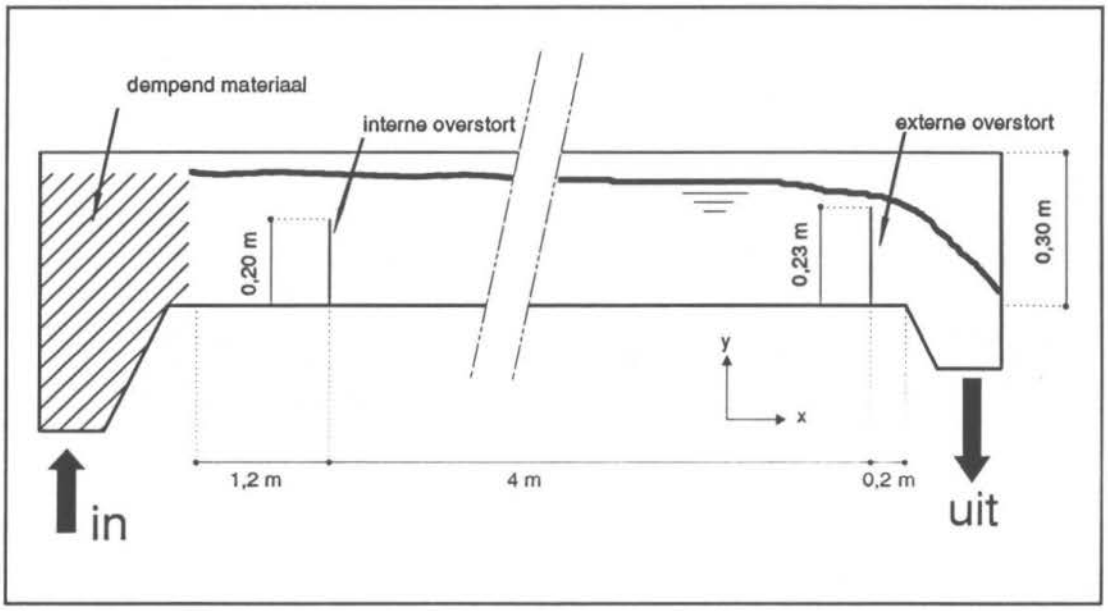
De resultaten van de berekeningen met het mathematische model zien er aannemelijk uit. Er zijn enkele berekeningen uitgevoerd om het model en de mogelijkheden van PHOENICS te testen, maar dat betrof telkens slechts een gedeelte van de stroming. Om te onderzoeken of de door PHOENICS voorspelde stromingscondities conform de werkelijkheid zijn, dienen de berekeningsresultaten te worden vergeleken met meetgegevens. Meetgegevens van echte bergbezinktanks zijn niet beschikbaar. Het uitvoeren van metingen aan een echte bergbezinktank is bovendien erg duur en heeft als praktisch bezwaar dat een interessante regenval zich slechts enkele keren per jaar voordoet, en natuurlijk juist dan wanneer, om wat voor reden dan ook, net even niet wordt gemeten. Het nauwkeurig meten in een echte tank levert bovendien allerlei problemen op.
Bij gebrek aan meetgegevens wordt voorgesteld zelf in een meetopstelling te gaan meten. In een meetopstelling kan (binnen zekere grenzen) elke gewenste afvoer worden gesimuleerd, kunnen metingen worden herhaald, etc. In de meetopstelling wordt de stroming in een echte bergbezinktank (prototype) op schaal nagebootst. De stromingscondities in de meetopstelling (goot) dienen vergelijkbaar te zijn met die in het prototype.
Met behulp van PHOENICS wordt een mathematisch model gemaakt van de meetgoot. De voorspelde stromingssituaties zullen worden vergeleken met de meetgegevens. Zonodig wordt het rekenmodel aangepast om de stroming in de meetgoot goed weer te kunnen geven. Het is de verwachting dat wanneer met PHOENICS de meetgoot juist kan worden gemodelleerd, de resultaten kunnen worden vertaald naar het prototype, dus dat met PHOENICS ook de stromingen in het prototype en andere bergbezinktanks kunnen worden gemodelleerd.

4.1 VOORONDERZOEK

Voor het uitvoeren van de metingen is in het laboratorium van vloeistofmechanica op de Faculteit der Civiele Techniek een goot beschikbaar. De maten van de meetopstelling zijn gegeven in figuur 4.1. Om te onderzoeken of de goot geschikt is, is enige dagen de stroming onderzocht; met behulp van een kleurstof is de stroming over een overstort zichtbaar gemaakt.
Een belangrijke vraag, die door het observeren van de stroming in dit vooronderzoek diende te worden beantwoord, is of de optredende stroming kan worden gemodelleerd met een 2-dimensionaal rekenmodel. De stroming blijkt niet uniform te zijn in breedte-richting, maar blijkt in de breedte te variëren. Kleine wervels met verticale as bewegen door de goot. Bij een middeling over een voldoende lange tijd (enige minuten), zal ondanks de neren met verticale as de over de breedte gemiddelde snelheid kunnen worden bepaald. Met deze gemiddelde snelheden kan het 2-dimensionale mathematische model worden gekalibreerd.
Uit de observaties van de stroming is bovendien gebleken dat de neer gelijk is aan ca. 8 keer de hoogte van de drempel (of interne overstort).

4.2 MEETINSTELLINGEN

Uit het vooronderzoek is gebleken dat de beschikbare meetgoot geschikt is om de stroming in een bergbezinktank op schaal na te bootsen. Voorgesteld wordt om de in deze paragraaf beschreven proeven uit te voeren.



Figuur 4.1: Meetgoot.

In de meetgoot zullen om te beginnen alleen stationaire stroomsituaties worden bemeten, dus stromingen in de evenwichtssituatie. Het schaalmodel wordt zo ingericht dat de stroming zo veel mogelijk overeen komt met die in een echte bergbezinktank. Als prototype is een rechthoekige bergbezinktank van $32*8*2,5\ m^3$ gekozen. De meetgoot is weergegeven in figuur 4.1. Het water wordt linksonder in de goot gevoerd. Op 1,20 m na het begin van de goot staat het eerste schotje, dat de functie heeft van de interne overstort in een bergbezinktank. Net voor het einde van de tank, op 4 m van het eerste schotje staat een tweede schotje. Dit komt overeen met de externe overstort. De hoogte van de schotjes zal per proef variëren. De breedte van de meetgoot is 1.02 m.
De toevoer naar het eerste schotje wordt gedempt om een zo rustig en gelijkmatig mogelijke stroming te verkrijgen. Om de volgende redenen is hiervoor gekozen:

1) Om met PHOENICS een model van de meetgoot te kunnen maken, dienen de variabelen aan de instroomzijde van het model bekend te zijn. De stroming die turbulent uit de pijp in de tank komt is niet te beschrijven. Helaas is tussen het begin van de goot en het eerste schotje niet voldoende ruimte beschikbaar om een stroming in evenwichtssituatie te bereiken. Maar met voldoende dempende onderdelen in de woelbak, zal de stroming rustig te krijgen zijn. Onderzocht moet worden hoe de instroom in het mathematische model kan worden beschreven.
2) Het mathematische model is nog een 2-dimensionaal model. Daarom dient de stroming in de meetgoot zo veel mogelijk uniform over de breedte te zijn.

Bij het kiezen van de te bemeten stroomsituaties is erop gelet dat:

* het Reynolds-getal van dezelfde orde van grootte is als in het prototype;
* het Froude-getal van dezelfde orde van grootte is als in het prototype;
* de verhouding tussen de hoogte van de interne overstort en de lengte van de tank ongeveer gelijk aan die van het prototype;
* de gemiddelde snelheden niet te laag zijn in verband met de meetnauwkeurigheid.

Het eerste en het tweede schotje zullen bij de eerste stromingssituaties respectievelijk 0,20 en 0,23 m hoog zijn. Daarna worden ze verlaagd tot respectievelijk 0,14 en 0,17 m. Bij de eerste proef zal het debiet 30 l/s (mesbelasting q = 0,029 m^2/s) zijn. Dit is het maximale debiet dat door de goot kan worden gevoerd wanneer het tweede schotje 0,23 m hoog is. De waterdiepte is dan 0,30 m. In deze situatie staat het water tot net onder de bovenrand van de goot. Vervolgens zal met dezelfde schotjes worden gemeten bij een debiet van 15 l/s. Daarna worden de schotjes herhaald met de lage schotjes.

In tabel 4.1 staan de voorgestelde instellingen schematisch beschreven. De breedte (1,02 m) en de lengte tussen de overstorten (4,00 m) zijn constant.

Tabel 4.1: Meetinstellingen.

	Q (l/s)	h_{over} (cm)	He (cm)	Hi (cm)	h (cm)	u_{gem} (cm/s)
1	30	7	23	20	30	10.0
2	15	4	23	20	27	5.5
3	30	7	17	14	24	12.5
4	15	4	17	14	21	7.1

h = waterdiepte
H_i = Hoogte interne overstort (drempelhoogte)
H_e = Hoogte externe overstort
h_{over} = $(Q/1.8*B)^{(2/3)}$ (verschil tussen kruin tweede schotje en bovenstroomse waterstand)
u_{gem} = gemiddelde snelheid.
Q = debiet

Indien mogelijk zal ook het effect van verandering van het debiet in de tijd worden onderzocht. Tevens wordt voorgesteld enige metingen met een diffusieschot of deflectieschot uit te voeren. Het gaat er hierbij niet om een optimale stroming te krijgen (kleine neer) door een juiste locatie en vorm van bijvoorbeeld het diffusieschot, doch slechts om meetgegevens te verzamelen waarmee het mathematische model kan worden gekalibreerd.

Vergelijking stroming in goot en prototype.
De in te stellen stroming in de meetgoot is vergeleken met de stroming bij een debiet van 1 m^3/s in het prototype. Zoals blijkt uit tabel 4.2 komen de voorgestelde stromingen in de goot redelijk overeen met die in het prototype. Zowel de stroming in het prototype als in de goot zijn turbulent. De volgende variabelen worden gebruikt:

Re = Reynolds-getal = $u_{gem} * R/\nu$
R = hydraulische straal = $b*h/(b+2h)$
Fr = Froude-getal = $u_{gem}/\sqrt{(9.81*h)}$
L = lengte (= 4 m in de goot, 32 m in het prototype)
B = breedte (= 1 m in de goot, 8 m in het prototype)

Tabel 4.2: Vergelijking stromingssituaties in meetgoot en prototype.

	Goot: Stroomsituatie nummer:				Prototype
	1	2	3	4	
H_i (m)	0,20	0,20	0,14	0,14	2
H_e (m)	0,23	0,23	0,17	0,17	2,4
Q (m^3/s)	0,030	0,015	0,030	0,015	1,0
h (m)	0,30	0,27	0,24	0,21	2,6
u_{gem} (m/s)	0,10	0,06	0,13	0,07	0,05
L/H_i (-)	20	20	29	29	16
Re (-)	20.000	10.000	20.000	10.000	80.000
Fr (-)	0,06	0,03	0,08	0,05	0,01

Metingen.
De snelheden en de turbulente fluctuaties van de snelheden zullen worden gemeten in x-richting (horizontale hoofd stroomrichting) en y-richting (verticaal). De snelheden zullen worden gemeten met behulp van een Electro Magnetische Snelheidsmeter (EMS) en worden opgeslagen en verwerkt met de op het laboratorium aanwezige apparatuur. Om op verschillende punten in de goot de snelheden te meten zal de EMS bij een constant debiet worden verplaatst. Op het laboratorium is slechts één haakse EMS aanwezig, waarmee gelijktijdig in x- en y-richting kan worden gemeten. Hierdoor is het slechts mogelijk om op één punt tegelijk te meten. Bij een stationaire stromingssituatie is dat geen probleem. Een in de tijd variërende stromingssituatie bemeten is hiermee niet goed mogelijk. Verwacht wordt dat de meetgegevens van een stationaire stromingssituatie voldoende zullen zijn om het stromingsmodel te kalibreren. Voorheen zijn ijkmetingen met de haakse EMS uitgevoerd [*Wit 1992*]. De EMS is geijkt voor snelheden tussen de 0,5 en 100 cm/s. Bij een gemiddelde snelheid van 5 tot 15 cm/s (zie tabel 4.1) ligt de onnauwkeurigheid tussen 2 en 4%. Kleinere snelheden dan de gemiddelde kunnen dan nog worden gemeten. Het is de verwachting dat de snelheid tot 1,5 cm van de bodem kan worden gemeten.

Daarnaast zullen de waterstand en de lengte van de neer worden opgemeten met behulp van een meetlat of meetlint en een pijlstok. De waterstanden zijn van belang voor het controleren van de berekeningen van het vrije wateroppervlak.

4.3 BEZINKING

In de goot kan geen fijn materiaal worden gebruikt om te laten bezinken, omdat het water uit een algemeen basin wordt gebruikt en na gebruik weer wordt teruggevoerd. Misschien is het echter wel mogelijk de bezinking te onderzoeken van grotere deeltjes die het achter de meetgoot kunnen worden afgevangen. De bezinksnelheden van deze deeltjes moet natuurlijk zo klein zijn dat ze te vergelijken zijn met materiaal dat in werkelijkheid in bergbezinktanks moet bezinken.

5 TOEKOMSTIG ONDERZOEK

De komende maanden zal worden gemeten aan de schaalopstelling. De planning is dat een maand continu wordt gemeten. Een mathematisch model van de meetopstelling zal worden opgezet en de meetresultaten zullen worden vergeleken met de berekende stroomsnelheden en waarden voor variabelen waarmee de turbulente wordt beschreven. Vervolgens zal, indien nodig, het model worden verbeterd, zodat de stromingen in schaalopstelling goed worden beschreven door het mathematische model. Daarnaast zal worden gewerkt aan de problemen met het modelleren van een vrij wateroppervlak. Verder zal worden uitgezocht wat de nadelen zijn van de fully-upwind discretisatie en of betere discretisatie methodes kunnen worden toegepast. Het doel is sneller een voldoende nauwkeurig resultaat te verkrijgen.
Wanneer het bovenstaande is voltooid zal verder worden gegaan met het uitzoeken van de effecten van veranderingen in de configuratie op de stroming; lengte/breedte, lengte/diepte, aanpassen in- en uitstroom constructie, deflectie-schotten, diffusieschotten, rechthoekig/rond. Ook het effect van een niet-stationaire belasting zal worden onderzocht. In eerste instantie zal een plotselinge debietsverandering worden onderzocht. Later zal de werking van de bergbezinktank voor meer realistische debieten worden beoordeeld. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de NWRW-gegevens.

LITERATUURLIJST

CHAM, 1992, *The height of liquid method for free surface flows, lecture notes*, PHOENICS advanced seminar, London.

Kluck, J, 1992-a, *Onderzoek aan bergbezinktanks: Stand van zaken*, TUD, Delft.

Kluck J., 1992-b, *Een mathematisch model voor het hydraulische gedrag van bergbezinktanks*, TUD, Delft.

NWRW, *Rendement randvoorziening bergbezinkbassin Amersfoort*, nr. 8.1.

NWRW, 1989, *Eindrapportage en evaluatie van het onderzoek 1982-1989*, eindrapport.

Stelling G.S. en Booij N., 1991, *Computational modelling in open channel hydraulics*, TUD, dictaat B84, Delft.

Tropea C., 1982, *Die turbulente Stufenstromung in Flachkanalen und offenen Gerinnen*.

Wit P.J. de, 1992, *Instruments used in the research on cohesive sediments*, TUD, report no. 8-92, Delft.