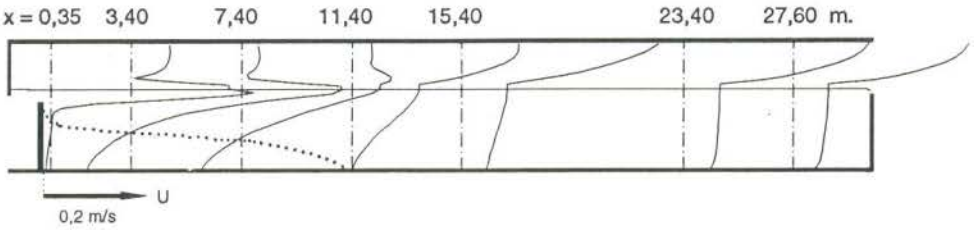
0244

Modellering van de waterbeweging in bergbezinktanks met PHOENICS

Tussenrapport 4 van het Rionedproject 92-05 "Onderzoek bergbezinktanks"

Juni 1993

Ir. J. Kluck



TU Delft
Technische Universiteit Delft

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

De modellering van de waterbeweging in bergbezinktanks met PHOENICS

Tussenrapport 4 van het Rionedproject 92-05 "Onderzoek bergbezinktanks".

juni 1993

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

INHOUDSOPGAVE

1 INLEIDING 1

2 RANDVOORWAARDEN 2
- 2.1 Instroom 2
- 2.2 Uitstroom 4
- 2.3 Wanden 5
- 2.4 Referentiedruk 7
- 2.5 Wateroppervlak 8

3 VERBETEREN VAN HET STROMINGSMODEL 11
- 3.1 Rekenrooster 11
- 3.2 Wateroppervlak 13
- 3.3 Berekeningen zonder wateroppervlak 15

4 AANPASSINGEN IN DE CONFIGURATIE 16
- 4.1 Rechthoekige tanks 16
- 4.2 Niet rechthoekige tanks 18
- 4.3 Schotten 18

5 VERVOLG VAN HET ONDERZOEK 20

SYMBOLENLIJST 21

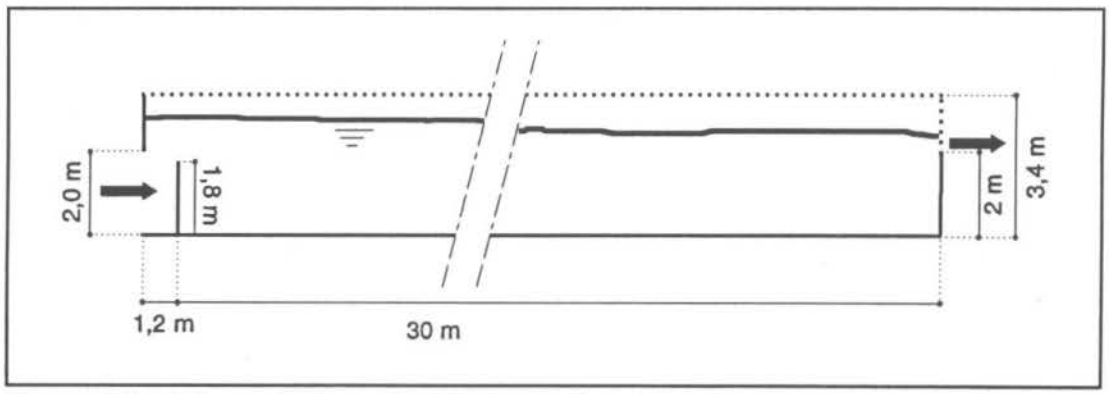
LITERATUURLIJST 22

1 INLEIDING

Dit is het vierde rapport naar het hydraulische gedrag van bergbezinktanks met het oog op de optimalisering van de bezinking. Het geeft een verslag van wat in de afgelopen 3 maanden is gedaan.
In hoofdstuk 2 zijn de randvoorwaarden beschreven die gebruikt worden om de stroming te simuleren. Hoofdstuk 3 handelt over het verder verbeteren van de modellering van de waterbeweging. Vooral het modelleren van het wateroppervlak heeft veel tijd gekost, maar heeft geresulteerd in een bevredigend mathematisch model. De modellering van de waterbeweging moet nog worden gekalibreerd aan de hand van meetgegevens. Het meten aan een meetopstelling is in de vergadering van maart 1993 door de begeleidingscommissie in principe goedgekeurd. In overleg met de begeleidingscommissie is echter besloten de eerst een samenvattend rapport met resultaten van de modellering van de waterbeweging te maken. Dit heeft geresulteerd in een intern rapport: Modellering waterbeweging, juni 1993. De onderdelen van dat interne rapport, die niet in de eerdere rapporten van dit onderzoek ([*Kluck, 1992-a*], [*Kluck, 1992-b*] en [*Kluck, 1993*]) zijn vermeld, staan in hoofdstuk 4. Om in dat interne rapport voldoende resultaten te kunnen verwerken, is de afgelopen 3 maanden veel tijd besteed aan het doorrekenen van allerlei verschillende stromingssituaties en was er geen tijd om te meten en het mathematische model te kalibreren. Tot slot is in hoofdstuk 5 aangegeven hoe het onderzoek wordt vervolgd. Voor verdere informatie wordt ook verwezen naar de eerdere rapporten.

2 RANDVOORWAARDEN

In dit hoofdstuk wordt uitgelegd wat de randvoorwaarden zijn die nodig zijn om de stroming te beschrijven. Als voorbeeld is bijna hetzelfde 2-dimensionale stromingsmodel genomen als in [*Kluck, 1992-b*] en [*Kluck, 1993*]. Zie figuur 2.1.



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

Voor een uitgebreide beschrijving van de wijze waarop de randvoorwaarden in PHOENICS moeten worden opgegeven wordt verwezen naar de PHOENICS-handleidingen [*CHAM*]. Hier wordt verstaan met een korte uitleg.
De randvoorwaarden worden als extra bronnen aan de differentiaalvergelijking toegevoegd. Niet alleen aan de randen, maar aan elke cel in het rekenschema kan een bron worden toegevoegd. Daarnaast is het mogelijk om celwanden dicht te maken. In het invoerbestand geeft de PHOENICS-gebruiker op waar een bepaalde randvoorwaarde dient te gelden en geeft vervolgens (via een omweg) een waarde aan de bron. De bron (source s) is gelijk aan

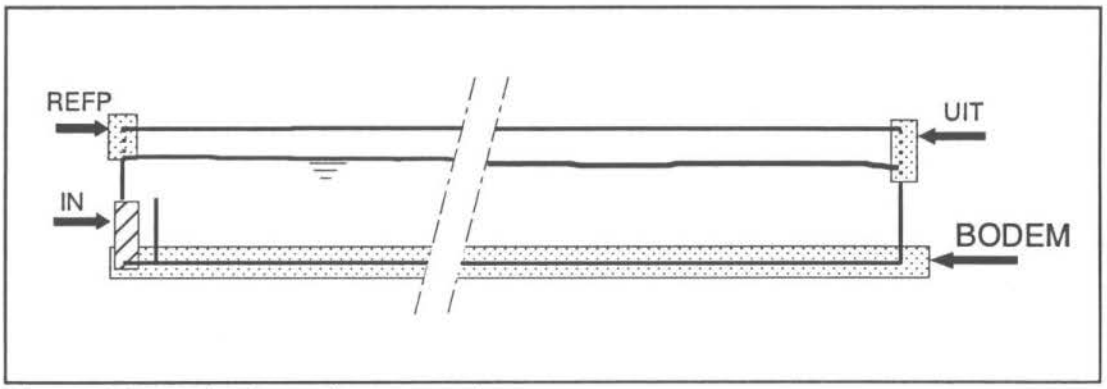
$$s = (\varphi_s - \varphi)\, aS$$

φ = variabele in de cel;
φ_s = door gebruiker opgegeven waarde van de variabele om de bron in te voeren;
aS = door gebruiker opgegeven waarde van een coëfficiënt om de bron in te voeren.

De bron is hiermee dus afhankelijk van de waarde van φ in de cel. Zie ook paragraaf 3.3 van [*Kluck, 1992-b*] en de PHOENICS-handleidingen. Het is tevens mogelijk als randvoorwaarde een bepaalde variabele een vaste waarde te geven, of een vaste bron op te leggen. Ten slotte is het mogelijk om door middel van zelf toegevoegde subroutines speciale randvoorwaarden op te leggen, waarbij deze afhankelijk kunnen zijn van allerlei lokale grootheden.

2.1 INSTROOM

De instroom-randvoorwaarde geldt voor de cellen in de meest linkse kolom die behoren tot het gebied IN in figuur 2.2. Bij de instroom wordt als randvoorwaarde een hoeveelheid massa die per seconde de tank binnenkomt opgegeven. Een debiet van 1 m^3/s is aangenomen. Bij een bak van $30*8*2\,m^3$ (lengte-



Figuur 2.2: Lokatie randvoorwaarden.

*breedte*diepte) komt dit overeen met een oppervlaktebelasting van 15 m/uur. Voorlopig is aangenomen dat dit debiet binnenkomt over een hoogte van 2 m, zodat de instroomsnelheid 0,0625 m/s wordt. De instroom kan in de tijd variëren, maar voorlopig is een constant debiet aangenomen.

Ook de waarden voor de turbulente kinetische energie, k, en de dissipatie van turbulente kinetische energie, ϵ, dienen bij de instroom te worden opgegeven. Er zijn echter geen meetgegevens beschikbaar waaruit de waarden van k en ϵ bij het instroompunt kunnen worden afgeleid. Wanneer in het model niets wordt opgegeven, zijn k en ϵ bij IN gelijk aan nul. k en ϵ zullen zich vervolgens in de tank ontwikkelen. Een schatting van de waarden van k en ϵ kan worden gemaakt met [*Melis, 1991*]:

$$k = u_*^2 \quad \text{met } u_* = \frac{u_{gem}}{15}$$

en

$$\epsilon = C_\mu C_D \frac{k^2}{\nu_t} \quad \text{met } \nu_t = \frac{1}{6}\kappa u_* h$$

waarbij

C_μ, C_D = constanten van het k-ϵ turbulentie model met $C_\mu * C_D = 0{,}09$;
h = waterdiepte (m);
u_{gem} = over de diepte gemiddelde horizontale stroomsnelheid (m/s);
u_* = schuifspanningssnelheid (m/s);
κ = constante van Von Karman = 0,435[1];
ν_t = turbulente viscositeit (m^2/s).

De werkelijke waarden zullen afhangen van de instroom-configuratie. Voor een instroomopening van 2 m hoog over de volledige breedte volgen de waarden k = $2*10^{-5}$ en ϵ = $5*10^{-8}$. Wanneer het water binnenstroomt door een buis met een diameter van 1,5 m, dan volgt k = $1*10^{-3}$ en ϵ = $2*10^{-5}$.

[1]De empirische waarde van κ blijkt voor verschillende stromingscondities redelijk constant te zijn (verschillen kleiner dan 10%).

Om de invloed van de randvoorwaarden te onderzoeken zijn berekeningen uitgevoerd met verschillende waarden voor k en ϵ. Gebleken is dat voor hoge waarden van k (5*10-4 tot 5*10-3) de neerlengte L_n een stuk korter is (7 m in plaats van 11 m) dan voor lage waarden van k (5*10-6 tot 5*10-4). Zie tabel 2.1. Dit is logisch, want een hoge waarde voor k komt overeen met veel turbulentie, en dus veel menging. Hierdoor zal de neer korter zijn. De waarde van ϵ heeft minder invloed op de neerlengte. Bij een hoge waarde zal k sneller verdwijnen en de neer dus weer langer zijn.
Volgens de literatuur [*Tropea, 1982*] dient de neerlengte 7 tot 9 keer de hoogte van de interne overstort H te zijn. Uit de berekeningen volgde slechts een neerlengte van ten hoogste6 keer H. Daarom is voor de toekomstige modellen gekozen voor lage waarde van k ($k = 5*10^{-5}$) en een daarbij aan de hoge kant geschatte waarde van ϵ ($\epsilon = 5*10^{-6}$). Bij deze waarden blijkt overigens de produktie van k en ϵ voorbij de neer al snel belangrijker te zijn dan de invoer. De exacte waarde voor k en ϵ bij IN zijn dan niet meer van belang.

Tabel 2.1: Neerlengte bij verschillende instroom-waarden van k en ϵ.

k (m^2/s^2)	ϵ (m^2/s^3)	L_n (m)	L_n/H
5E-3	5E-5	7	3,9
5E-3	5E-4	8	4,4
5E-4	5E-6	8	4,4
5E-4	5E-5	10	5,6
5E-4	5E-4	10	5,6
5E-5	5E-6	11	6,1
5E-5	5E-5	11	6,1
5E-6	5E-6	11	6,1

Voor het schaalopstelling van de bergbezinktank andere waarden gelden. Bij de schaalopstelling wordt de turbulentie voor de instroom zoveel mogelijk gedempt. De turbulentie zal vervolgens worden opgemeten om waarden voor k en ϵ bij IN in het mathematische model van het schaalmodel in te kunnen voeren.

2.2 UITSTROOM

De uitstroom uit het model vindt plaats boven de externe overstort aan de rechterrand van het model in de meest rechter kolom. Zie UIT in figuur 2.2. In het geval van een berekening zonder wateroppervlak[(2)] betreft dit alleen water, maar bij een berekening met een wateroppervlak moet ook met uitstroom van lucht rekening worden gehouden. In hoofdstuk 3 is aangegeven hoe de uitstroom bij een berekening met wateroppervlak is geregeld.

[(2)]Wanneer bij een constante belasting de lokatie van het wateroppervlak bekend is, kan de bovenrand van het model precies ter plekke van het wateroppervlak worden gekozen. Dit is dan een volledig gevuld model. Zie ook paragrafen 3.2 en 3.3.

Bij een berekening zonder wateroppervlak wordt bij de uitstroom een referentie druk opgegeven en stroomt vanzelf evenveel water naar buiten als bij IN binnenstroomt.

2.3 WANDEN

Volgens de handleiding van PHOENICS kan de stroming langs een hydraulisch ruwe wand, met y_0 als lengtemaat voor de ruwheid, door PHOENICS worden berekend. Het is echter niet geheel duidelijk wat er allemaal gebeurt als deze randvoorwaarde wordt gebruikt. Daarom wordt gebruik gemaakt van zelf geschreven subroutines om de randvoorwaarden, die bij een hydraulisch ruwe wand horen, op te leggen. Voorlopig wordt alleen aan de bodem wrijving berekend. Het betreft de onderste cellen van het model, in figuur 2.2 aangegeven met BODEM.

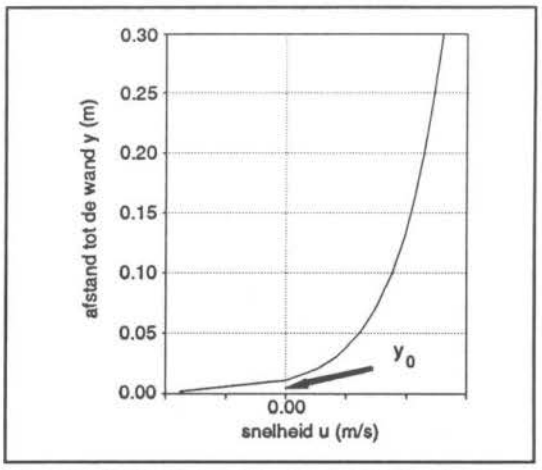
Voor het modelleren van de stroming bij de bodem wordt gebruik gemaakt van de relatie tussen de horizontale stroomsnelheid en schuifspanningssnelheid in het gebied dat het turbulente binnengebied wordt genoemd [*Booij, 1986*]. Het turbulente binnengebied begint op een kleine afstand van de bodem en beslaat bij een stroming over een vlakke bodem (zonder obstakels) ongeveer 1/6 deel van de waterdiepte. In het turbulente binnengebied overheersen de turbulente schuifspanningen. Onder het turbulente binnengebied, meteen tegen de bodem, bevindt zich de viskeuze sublaag, waarin de viskeuze schuifspanning overheerst. Tussen het turbulente binnengebied en de viskeuze sublaag ligt het overgangsgebied, de bufferlaag. De viskeuze sublaag en de bufferlaag worden niet gemodelleerd, omdat de schaal van modelleren dan te detaillistisch wordt. Bovendien ontbreken de gegevens om dat deel van de stroming goed te modelleren. In het turbulente binnengebied neemt de snelheid[3] evenwijdig aan de bodem (u) toe naarmate de afstand tot de bodem groter wordt. De relatie blijkt een logaritmische te zijn:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left[\frac{y}{y_0} \right]$$

met

y = afstand van de bodem tot het punt waarop de snelheid wordt berekend.

y_0 = afstand tussen de bodem en begin van het turbulente binnengebied. Zie figuur 2.3. De snelheid tussen de bodem en y_0 wordt gelijk aan 0 genomen.



Figuur 2.3: Logaritmisch snelheidsprofiel.

Om de wrijving goed weer te kunnen geven dienen de cellen bij de bodem zo klein te zijn dat op zijn minst enige cellen in het turbulente binnengebied vallen. De grootte van y_0 hangt af van de ruwheid van de bodem. Daarbij is het van belang of de bodem hydraulisch glad of ruw is. Een wand is hydraulisch

[3] In feite het gemiddelde van de turbulente snelheden op een punt.

glad wanneer $k_n * u_* / \nu < 5$, hydraulisch ruw voor waarden boven 60 en daartussen ligt een overgangsgebied.
k_n = equivalente ruwheidslengte als maat voor de ruwheid van de wand (m);
ν = kinematische viscositeit (m^2/s).
De waarde van u_* (voor het bepalen van y_0) wordt geschat met $u_* = u/15$.

Volgens [*Battjes, 1990*] is k_n voor niet afgewerkt beton gelijk aan $2*10^{-3}$ m. Dit betekent voor een gemiddelde snelheid $u_{gem} = 0{,}05$ m/s dat $k_n * u_* / \nu = 6$ dus overgangsgebied. Op de bodem zullen slib, zand, stenen en wat nog meer meegevoerd wordt de ruwheid van de bodem vergroten, zodat een grotere waarde voor de equivalente ruwheidslengte van Nikuradse moet worden aangenomen. Oud beton en vast grind komen overeen met $k_n = 2*10^{-2}$ m. De bodem is dan een hydraulisch ruwe wand ($k_n * u_* / \nu = 65$). Voor bedding-transport (dus als materiaal over de bodem wordt getransporteerd) wordt zelfs een k_n-waarde van 0,1 m opgegeven.

Voor het overgangsgebied en hydraulisch ruwe wanden kan de waarde van y_0 worden geschat aan de hand van de volgende formule:

$$y_0 = 0{,}11 \frac{\nu}{u_*} + \frac{k_n}{30}$$

Voor waarden van k_n van $2*10^{-3}$, $2*10^{-2}$ en 0,1 m resulteert dat in waarden voor y_0 van respectievelijk 0,03, 0,7 en 3 mm. In het model is gekozen voor y_0 = 1 mm.

In de modelleringen zullen de eerste cellen op een afstand y_0 van de bodem beginnen. In feite zal de bak y_0 m dieper zijn dan wat in de berekeningen wordt aangenomen, maar dit is een verwaarloosbare afstand ten opzichte van de andere maten van de tank. Bovendien neemt de stroming dicht bij de rand tot nul af.

Uit de PHOENICS-berekeningen volgt de waarde van de gemiddelde snelheid in de cel bij de bodem, parallel aan de bodem. Met deze waarde wordt de waarde van de schuifspanningssnelheid u_* bepaald met [*Melis, 1991*]

$$u_* = \frac{\bar{u}\,\kappa}{\ln\left[\frac{dy}{y_0}\right] - 1 + \frac{y_0}{dy}}$$

dy = celhoogte (of dikte) van de cel bij de bodem.

De bodemwrijving wordt in de berekeningen van PHOENICS (voor de cellen langs de bodem) verrekend door de schuifspanning als een impulsbron aan de impulsvergelijkingen toe te voegen. De schuifspanning is gelijk aan:

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

Behalve de schuifspanning dienen ook de grootheden k en ϵ bij de bodem te worden bepaald. Aangenomen wordt dat in de cel het dichtst bij de bodem geldt dat de produktie van turbulente kinetische energie (k) gelijk is aan de

vernietiging van turbulente kinetische energie (ϵ). Wanneer bovendien geldt dat de verandering in snelheid loodrecht op de bodem veel groter is dan de verandering evenwijdig aan de bodem, dan kan de produktie van k worden uitgerekend met:

$$\text{produktie van k} = \nu_t \frac{\partial u}{\partial y} * \frac{\partial u}{\partial y} = \epsilon$$

Met

$$\tau = \rho \nu_t \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \epsilon = C_D \frac{k^{1,5}}{\kappa y} \quad \text{en} \quad \nu_t = C_\mu C_D \frac{k^2}{\epsilon}$$

geeft dit

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

$$\epsilon = \left(\frac{C_D}{C_\mu^3}\right)^{\frac{1}{4}} \frac{u_*^3}{\kappa y} = \frac{u_*^3}{\kappa y}$$

met
y = ½dy (m);
C_μ = constante van het k-ϵ turbulentie model = 0,5478;
C_D = constante van het k-ϵ turbulentie model = 0,1643.

Uit de berekeningen is gebleken dat de waarden in de eerste twee rijen cellen boven de bodem voor k en ϵ overeenkomen met de daar berekende waarde voor u_*. Bij evenwicht behoort volgens de impulsbalans voor de onderste twee cellen de term $\rho\nu_t du/dy$ gelijk te zijn aan de impuls door bodemwrijving $\rho u_* u_*$. Uit de meetresultaten is dit ook gebleken. Hierbij is voor ν_t het gemiddelde genomen van de waarde voor de twee onderste cellen. Elke cel is 0,20 m hoog, zodat y = 0,10 m.

$\rho\nu_t du/dy = 3{,}53 * 10^{-2}$ kg/ms^2
$\rho u_* u_* = 3{,}75 * 10^{-2}$ kg/ms^2.

Ter vergelijking: Bij een horizontale snelheid van ongeveer 0,06 m/s, is de doorvoer van impuls door convectie ongeveer 3,6 kg/ms^2.

2.4 REFERENTIEDRUK

In de lucht dient een referentiedruk te worden opgegeven. Deze randvoorwaarde fungeert als een soort ventiel, waardoor, indien nodig, lucht naar binnen of naar buiten kan stromen. In figuur 2.2 is voor deze randvoorwaarde de linkerwand boven het water gekozen (REFP), maar ook de bovenkant is geschikt.

2.5 WATEROPPERVLAK

In deze paragraaf wordt uitgelegd welke randvoorwaarde dient te worden opgelegd om, in een volledig met water gevuld model, aan de bovenrand een vrij wateroppervlak weer te geven. Het handelt niet over de methode van en problemen met het berekenen van een vrij wateroppervlak. Zie daarvoor paragraaf 3.2.

Wanneer de plaats van het wateroppervlak niet wordt berekend, maar wordt aangenomen dat het model tot aan de bovenkant met water is gevuld, dan dienen speciale randvoorwaarden te worden opgelegd om een vrij wateroppervlak weer te geven. NB: Deze randvoorwaarde is niet terug te vinden in figuur 2.2, omdat dat een model met berekening van het wateroppervlak betreft.
De grootte van de turbulente wervels in de buurt van het wateroppervlak is beperkt door de aanwezigheid van het wateroppervlak. Er treedt enige demping op, zodat ϵ een minimale waarde heeft. Een minimale waarde voor ϵ betekent dat ν_t niet te groot kan worden, wat overeenkomt met een beperking van de wervellengte. Wanneer het model volledig gevuld is (bij een berekening zonder vrij wateroppervlak), wordt, om ervoor te zorgen dat ϵ niet te klein wordt, aan de bovenkant met de volgende empirische formule een randvoorwaarde opgelegd [*Rodi, 1980*]:

$$\epsilon = \frac{(\sqrt{C_{\mu D}}k)^{1.5}}{\kappa(y_w + 0.07h)} = \frac{C_D k^{1.5}}{\kappa h a} \cdot \frac{1}{1 + \frac{y_w}{ah}}$$

y_w = afstand tot het wateroppervlak (m);
h = waterdiepte (m);
a = 0,07 [*Hossain, 1980*].

Uit deze functie volgt een waarde van ϵ bij het oppervlak (y_w = 0) gelijk aan:

$$\epsilon = \frac{C_D k^{1.5}}{\kappa h a}$$

Hoe verder van het oppervlak des te lager is ϵ. In de eerste cel onder het wateroppervlak wordt voor ϵ een vaste waarde opgegeven, afhankelijk van de afstand van het midden van de cel tot aan het oppervlak.

Voor k kan een symmetrie randvoorwaarde worden aangenomen. Dit betekent dat geen randvoorwaarde hoeft te worden opgegeven, want de symmetrie randvoorwaarde voor k is standaard geldig.

Om deze randvoorwaarde te controleren is de evenwichtsstroming over een vlakke bodem (dus zonder overstorten) nogmaals onderzocht. De stroming door een volledig met water gevulde goot met een lengte van 40 m en een diepte van 2 m is hiertoe twee keer gemodelleerd; Een model zonder bovenstaande randvoorwaarde voor en een model met bovenstaande randvoorwaarde voor ϵ.
Bij de inlaat zijn de waarden van u, k en ϵ opgegeven volgens de theorie van een logaritmisch snelheidsprofiel:

$$u = \frac{u_*}{\kappa} \ln \frac{y}{y_0}$$

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu C_D}} \left(\frac{h-y}{h} \right)$$

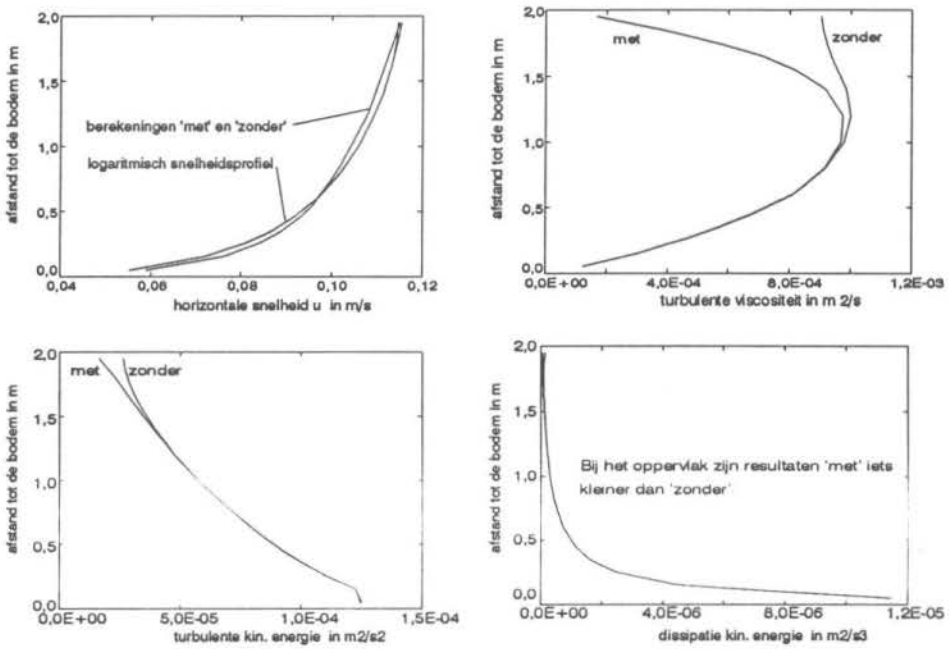
$$\epsilon = \frac{u_*^3}{\kappa y} \left(\frac{h-y}{h-dy} \right)$$

Met dy is de hoogte van de onderste cel en u. wordt berekend uit de gehele doorsnede:

$$u_* = \frac{\kappa u_{gem}}{\ln \left(\frac{y}{Y_0} \right) - 1 + \frac{y_0}{h}}$$

In figuren 2.4 zijn voor de evenwichtssituatie de horizontale snelheid, u, de turbulente viscositeit, ν_t, de turbulente kinetische energie, k, en de dissipatie daarvan, ϵ, uitgezet tegen de hoogte op 25 m van de interne overstort. Uit de figuren blijkt dat de extra randvoorwaarde voor ϵ een verwaarloosbare invloed heeft op het snelheidsprofiel. Alleen de waarden voor ν_t verschillen aanzienlijk. De waarden van ν_t voor het model met de ϵ-randvoorwaarde zijn bij het wateroppervlak lager en lijken meer op een parabool. Een parabolische verdeling voor ν_t komt overeen met de theorie van een logaritmisch snelheidsprofiel. Ook de lage waarden voor k bij het oppervlak komen overeen met een beperkte turbulentie aan het oppervlak door demping.

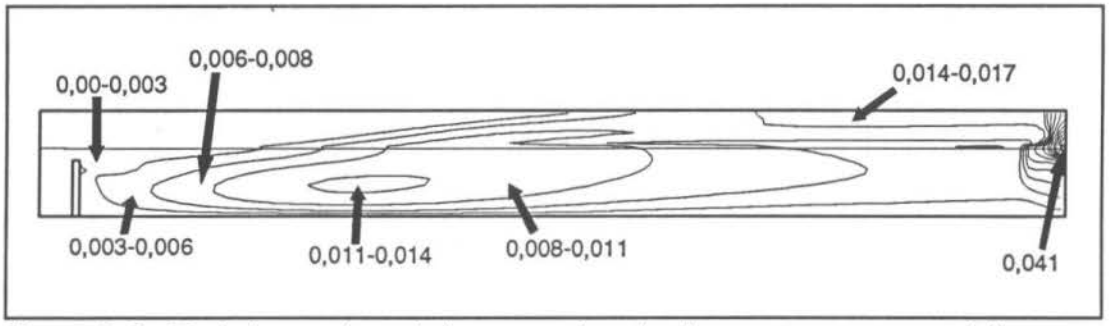
Let op: dit is een berekening zonder wateroppervlak. Bij een berekening met wateroppervlak is het lastig een randvoorwaarde precies bij het wateroppervlak op te leggen. Ten eerste varieert de lokatie en ten tweede varieert de afstand tussen het midden van de cel en het wateroppervlak. Maar met een verwijzing naar een zelf geschreven subroutine moet het mogelijk zijn om deze randvoorwaarde op te leggen. Een berekening met wateroppervlak voor de stroming over een vlakke bodem is niet uitgevoerd.
Uit berekeningen met wateroppervlak zonder deze randvoorwaarde is gebleken dat de waarden van k en ϵ in de lucht een verwaarloosbare invloed op de waterstroming hebben. De waarde van ν_t voorbij de neer bij het oppervlak blijkt zoals te verwachten was, zonder bovengenoemde randvoorwaarde te hoog te worden (zie figuur 2.5). Volgens de theorie moet de waarden bij het wateroppervlak klein zijn zoals die van de berekeningen met ϵ-randvoorwaarde in figuur 2.4. De invloed van deze hoge waarden op de snelheid lijkt klein te zijn. In figuur 2.5 is tevens de waterspiegel aangegeven.



Figuur 2.4: Vergelijking van berekening zonder randvoorwaarde voor ϵ met berekeningen met ϵ-randvoorwaarde; waarden van u, ν_t, k, en ϵ in de 80ste cel van links; 25 m van de interne overstort.

Hieruit kan worden geconcludeerd dat voor een stromingssituatie zonder overstorten het voor de snelheid niet uitmaakt of met de beperking van de turbulentie aan het oppervlak rekening wordt gehouden, of niet. Voor berekeningen met overstorten en dus met een neer is het echter waarschijnlijk wel van belang. De turbulente viscositeit bepaalt in belangrijke mate de uitwisseling van impuls en beïnvloedt zo de neerlengte. Ook voor de toekomstige modellering van bezinkbare stoffen is het te verwachten dat het van belang is dat de turbulente viscositeit de juiste waarde heeft. Daarom zal in de toekomst deze randvoorwaarde aangepast worden en gebruikt worden bij berekeningen met wateroppervlak.

Omdat niet bekend is wat de waarden van k, ϵ en ν_t moeten zijn bij het oppervlak, en zeker niet na een neer, kunnen ze niet aan de hand van de theorie worden gecontroleerd.



Figuur 2.5: Turbulente viscositeiten voor berekening met wateroppervlak.

3 VERBETEREN VAN HET STROMINGSMODEL

3.1 REKENROOSTER

Hoe fijnmaziger het rekenrooster, des te nauwkeuriger het resultaat. Echter een erg fijnmazig rekenrooster resulteert in lange rekentijden. Om de rekentijd te beperken dient het aantal cellen klein te zijn. Bij meer dan circa 120*30 cellen wordt het rekenrooster zelfs te groot voor de PC[4], zodat naar een werkstation moet worden uitgeweken. Vooral bij het testen is het belangrijk dat de rekentijden beperkt blijven. Wanneer het rekenrooster te grof wordt gekozen, heeft dat een negatieve invloed op de nauwkeurigheid van de berekeningen.
Bij het opstellen van het rekenrooster kunnen de volgende vuistregels worden gehanteerd:

* De maximale celgrootte wordt bepaald door het feit dat een constructie of opening minstens door een paar cellen moet worden beschreven, om de stroming betrouwbaar weer te geven.
* Om de bodemwrijving goed te kunnen modelleren dienen de onderste 40 à 50 cm minstens door 2 of 3 cellen te worden beschreven.
* De celvorm dient niet te veel van een vierkant af te wijken. Aangenomen is dat een verschil van een factor 4 het maximum is.
* Verder mogen de lengtes van twee aangrenzende cellen niet meer dan met een factor 1,1 tot 1,2 van elkaar verschillen om numerieke onnauwkeurigheid te voorkomen.

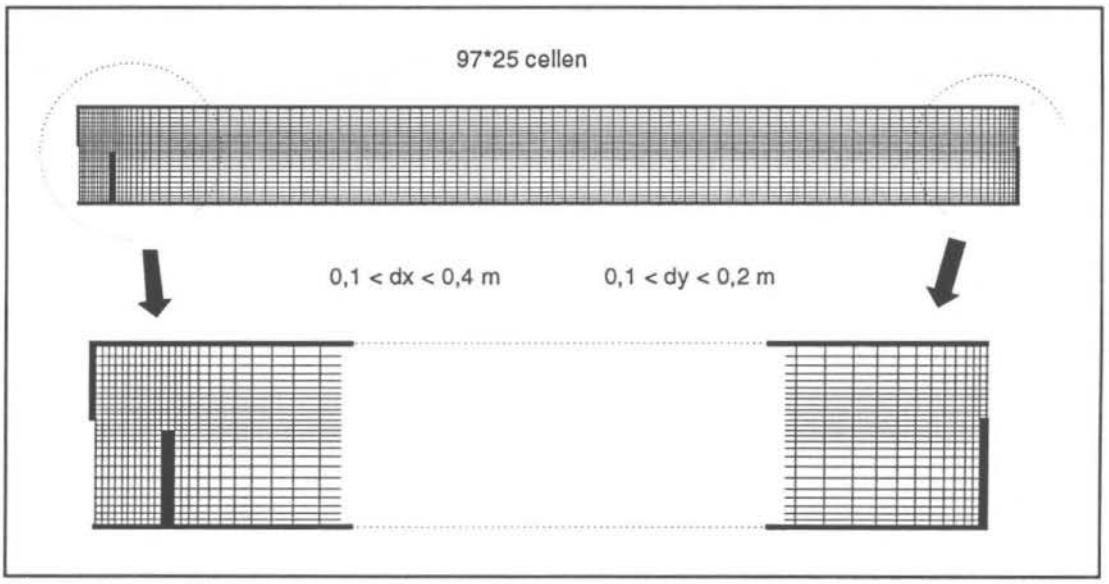
Een controle betreffende de grootte van de cellen is de volgende: Wanneer na verfijning van het rekenrooster de resultaten niet meer, of slechts weinig, verschillen, dan kan worden geconcludeerd dat het rooster fijnmazig genoeg was.

Daar waar de variabelen het meest variëren, dienen de cellen het kleinste te zijn; bijvoorbeeld bij de bodem en bij de overstorten. Daar waar haast geen verschillen optreden kunnen grote cellen worden gebruikt. Omdat het rekengebied in rijen en kolommen wordt opgedeeld, heeft een verfijning van de cellen in een deel van het model tot gevolg dat alle cellen in de betreffende rijen en kolommen kleiner worden. Rekening houdend met de eis voor redelijk vierkante cellen, wordt hierdoor de maximale celgrootte ook in andere delen van het rekengebied verkleind.
De methode die bij PHOENICS aangeboden wordt om de cellen te vergroten gaat uit van een exponentiële toename van de celmaten. Hierdoor nemen de cellengtes juist bij de wanden snel toe. Dit leidt tot onnauwkeurige resultaten. Binnen PHOENICS bestaat geen methode om de cellen met een constante factor (b.v. 1,2) te vergroten of te verkleinen tot een maximale cellengte is bereikt. Hiervoor is een eigen subroutine geschreven.
Wanneer een minimale cellengte van 0,1 m, een maximale cellengte van 0,8 m en een vergrotingsfactor van maximaal 1,1 wordt aangehouden, resulteert deze methode voor een tank zoals gegeven in figuur 2.1 in een rekenrooster van

---

[4] 80486, 33 MHz, 4Mb intern geheugen. Grotere roosters kunnen wel op deze PC worden doorgerekend, maar dan worden telkens tussenresultaten naar de schijf weggeschreven en van de schijf gelezen. Dit vertraagt de berekening zozeer dat het niet praktisch is hiermee te werken.

97*25 = 2425 cellen (zie figuur 3.1). Indien voor de minimale en de maximale cellengte en voor de vergrotingsfactor respectievelijk 0,2, 0,8 en 1,2 wordt aangenomen, resulteert dit in 53*15 = 795 cellen. De rekentijd is dan ongeveer 3 keer zo klein.
Het laatste model is naar verwachting te grof. In de eerste plaats is de waterdiepte boven de externe overstort kleiner dan 20 cm, zodat die door slechts één cel wordt beschreven. Boven de interne overstort zit de scheiding tussen lucht en water in de tweede cel boven de kruin interne overstort. In de tweede plaats is de numerieke diffusie erg groot. De numerieke diffusie ν_n is ongeveer gelijk aan u*dx. Boven de interne overstort is u ≈ 0,4 m/s. De cellengte dx = 0,2 zodat ν_n = 0,08 m^2/s. Dit is veel groter dan de turbulente viscositeit, die kleiner is dan 0,01 m^2/s. Ook boven de neer en voorbij de neer blijft ν_n erg belangrijk.



Figuur 3.1: Rekenrooster.

Uit berekeningen is gebleken dat de verschillen tussen de resultaten van het grove en het fijnmazige model voor de evenwichtssituatie beperkt zijn. Uiteindelijk resulteren beide roosters in hetzelfde stromingsbeeld met ongeveer gelijke waarden voor de neerlengtes. Indien de interesse uitgaat naar de veranderingen van het stromingsbeeld in de tijd, dan is het grove model niet goed. Volgens berekeningen met het grove model ontwikkelt de neer zich eerst zo ver dat ze de gehele tank beslaat. Vervolgens zakt de neer in en breekt door midden, waarna het achterste gedeelte verdwijnt en het voorste gedeelte ongeveer even lang wordt als de neer die wordt berekend met een fijnmazig model. Met een fijnmazig model neemt de neerlengte bijna meteen de uiteindelijke lengte aan. Deze eindsituatie werd na 4 minuten gesimuleerde tijd bereikt, terwijl bij het grove model dit ongeveer 10 minuten (gesimuleerde tijd) kost.

De waarden van de numerieke viscositeit bij het fijnmazige model zijn de helft van die bij het grove model, dus ongeveer 0,04 m^2/s. De snelheden zijn immers gelijk aan die van het grove model. Alleen de cellengte is gehalveerd. De waarde van de turbulente viscositeit is nog steeds kleiner dan 0,01 m^2/s. Hieruit kan worden geconcludeerd dat ook het fijnmazige model eigenlijk nog te grof is.

Een berekening met een nog fijnmaziger rekenrooster moet nog worden uitgevoerd: minimale cellengte 0,05 m, maximale cellengte 0,20 m en vergrotingsfactor kleiner dan 1,1.
Het is de verwachting dat bij een dergelijk fijnmazig model, waarbij de numerieke diffusie klein is ten opzichte van de turbulente diffusie, de neerlengte langer zal zijn.

Binnen PHOENICS bestaat ook de mogelijkheid het rekenrooster alleen plaatselijk te verfijnen, zonder dat bijvoorbeeld over de gehele hoogte een aantal kolommen smaller wordt. De truc die daarbij wordt toegepast is dat buiten het model een extra rekengebied wordt gedefinieerd. Dit gedeelte met kleinere cellen wordt vervolgens naar de plek gekopieerd die gedetailleerder moet worden berekend. Volgens de handleiding van PHOENICS worden dan de juiste verbindingen gelegd, zodat de juiste transporten worden doorgegeven. Deze mogelijkheden moeten voor dit onderzoek nog worden onderzocht.

3.2 WATEROPPERVLAK

Het heeft veel tijd gekost voordat de problemen met het modelleren van het wateroppervlak zover waren opgelost dat een bevredigend resultaat werd bereikt. Op vragen die naar de gebruikers-ondersteuning van CHAM, de eigenaar van PHOENICS, werden gestuurd kwam geen antwoord terug. Uiteindelijk is zelf een methode ontwikkeld waarmee redelijke resultaten worden bereikt. Bij een constante belasting stelt zich een stabiele eindsituatie in, met een wateroppervlak dat er realistisch uit ziet. Pas wanneer de berekeningen geverifieerd kunnen worden aan de hand van meetgegevens, zal hier een definitief oordeel over kunnen worden geveld. Er zijn nog enige problemen, maar die lijken het stromingsbeeld niet te beïnvloeden. De belangrijkste is dat, nadat de evenwichtssituatie voor de andere variabelen is bereikt, de drukken in de lucht steeds verder afnemen. De methode die nu wordt gebruikt is ter beoordeling naar CHAM opgestuurd. Uiteindelijk was de reactie van CHAM dat de drukval een probleem is, maar dat de resultaten (snelheden, variabelen voor de turbulentie en het wateroppervlak) waarschijnlijk goed zijn.

De gebruikte methode is de volgende: Anders dan in [*Kluck, 1993*] waar ook de stroming voorbij de externe overstort werd gemodelleerd, is besloten de uitstroomrand van het model precies boven de externe overstort te leggen (UIT in figuur 2.2). De waterstand boven de overstort volgt uit de PHOENICS-berekeningen. Het debiet over de overstortrand dat bij deze waterstand hoort kan worden berekend uit een Q-h relatie in de vorm van:

$$Q = C*B*h^{\frac{3}{2}}$$

met

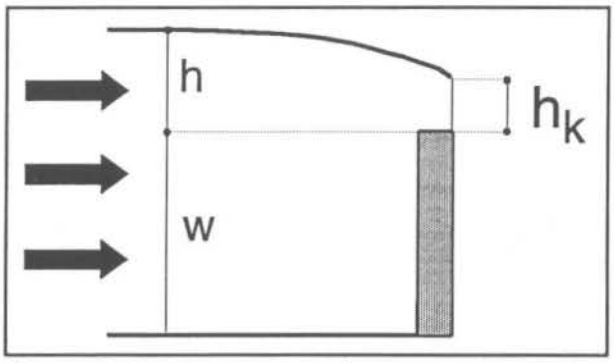
h = verschil tussen de bovenstrooms waterspiegel en kruin van de overstort (zie figuur 3.2) (m);

B = Breedte overstort (m);

C = constante.

De constante C kan gelijk aan 1,80 worden gekozen. Volgens [*Franke*] is de waterstand h_k precies boven de kruin 0,85 keer de bovenstroomse waterstand h, indien h << w. Het debiet volgt dan uit:

$$Q = 2,3 * B * h_k^{\frac{3}{2}}$$



Figuur 3.2: Externe overlaat.

De vorm en de breedte van de kruin beïnvloeden de waarde van C. Bij een overlaat met een vlakke bovenkant dient volgens [*Franke*] de constante te worden vermenigvuldigd met de volgende empirisch gevonden factor:

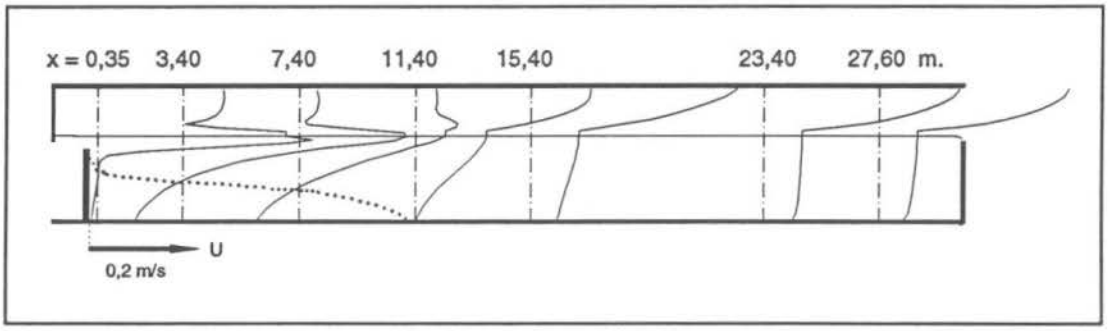
$$f = 0,70 + 0,185h/a,$$

waarin a gelijk is aan de breedte van de kruin. In het model is de uitstroomrand 1 cel breed (0,1 of 0,2 m). De waterdiepte h varieert tussen nul cm (geen uitstroom water) en ongeveer 17 cm (bij een mesbelasting van 0,125 m^2/s). Voorlopig is echter aangenomen dat f gelijk is aan 1 en dus dat de formule met C = 2,3 geldig is.

Uitgaande van de waterstand boven de externe overstort wordt vervolgens de gemiddelde snelheid uitgerekend, waarmee het water uit het model stroomt. Afhankelijk van de vulgraad van een cel waar de randvoorwaarde geldt, stroomt dan water en/of lucht uit het model: 100% gevuld; alleen water, 0% gevuld; alleen lucht en gedeeltelijk gevuld; zowel water als lucht.

De hoogte van het model boven de waterspeigel, dus het aantal rijen cellen dat beschikbaar is voor de modellering van de luchtstroom, bleek slechts een beperkte invloed te hebben op de waterstroming.

In figuur 3.3 zijn voo enige doorsnedes de horizontale snelheden gegeven op x m van de interne overstort. Tevens is de berekende waterspiegel gegeven. Onder de stippellijn stroomt het water terug (naar links in de figuur). De luchtstroom heeft een verwaarloosbare invloed op de waterstroming. In figuur 2.5 zijn de bij deze berekening horende waarden van de turbulente viscositeit gegeven.



Figuur 3.3: Doorsneden met horizontale snelheden.

3.3 BEREKENINGEN ZONDER WATEROPPERVLAK

Om een berekening met wateroppervlak goed uit te kunnen voeren, dienen de tijdstappen behoorlijk klein te blijven: Het Courant getal moet kleiner dan 1 zijn [*Kluck, 1993*]. Bij een berekening zonder wateroppervlak kunnen veel grotere tijdstappen worden gebruikt. Bovendien is het rekengebied kleiner, omdat het bovenste gedeelte wegvalt. Het water zit dan tegen het plafond van de tank aan. Wanneer de druk in de bovenste cel te hoog is, geeft dat aan dat het wateroppervlak boven het plafond zou liggen, en vice versa berekening zonder wateroppervlak gaat circa 6 keer sneller dan een berekening met wateroppervlak.

Teneinde de rekentijden bij het opzetten van het model en bij het testen van verschillende configuraties te beperken, is onderzocht of de berekeningen zonder wateroppervlak veel verschillen van die met een wateroppervlak. De bovenkant van het model wordt daar gekozen, waar volgens een eerdere berekening met wateroppervlak het wateroppervlak zich bevindt. Dit levert niet veel problemen op, omdat de waterspiegel in een bergbezinktank bijna horizontaal ligt. Gebleken is dat de resultaten van berekeningen met en zonder vrij wateroppervlak slechts weinig van elkaar verschillen. Zelfs wanneer in een berekening zonder vrij wateroppervlak de bovenkant van het model 10 cm te hoog wordt gekozen, zijn de verschillen beperkt.

In het vervolg wordt eerst zowel een berekening met als een berekening zonder wateroppervlak uitgevoerd. Indien de verschillen beperkt zijn, worden vervolgens allerlei variaties doorgerekend zonder wateroppervlak. Wanneer de mesbelasting wordt gevarieerd, dienen de uitkomsten opnieuw te worden gecontroleerd met een model waarin ook het wateroppervlak wordt berekend.

4 AANPASSINGEN IN DE CONFIGURATIE

Uitgaande van het in paragraaf 3.1 beschreven rekenrooster en de randvoorwaarden van hoofdstuk 2 is het effect van veranderingen in tankvorm en het toevoegen van duikschotten of diffusieschotten op de stroming onderzocht. Hierbij wordt nogmaals opgemerkt dat het model nog niet gekalibreerd is aan de hand van meetgegevens, zodat de resultaten slechts een indicatie geven van de veranderingen in het stromingsbeeld. Bovendien betreft het nog steeds alleen de modellering van de stroming van water, dus zonder bezinkbare deeltjes.

4.1 RECHTHOEKIGE TANKS

Het volume van de tank heeft de grootste invloed op de vuiluitworp. Daarom is het effect van veranderingen in de vorm onderzocht bij een constant volume. Bij het beoordelen van de verschillende vormen is gelet op de grootte van de neer (minimaal neervolume) en de grootte van de gemiddelde horizontale snelheid (een lage snelheid).

Lengte-breedte-diepte.
Wanneer de verhoudingen tussen lengte, breedte en diepte worden veranderd, blijft het stromingsbeeld gelijk: Achter de interne overstort ontstaat een neer waar het water overheen stroomt. Daar voorbij verdeelt het water zich over de gehele diepte.

Uit berekeningen is gebleken dat bij een constante mesbelasting de neerlengte ongeveer gelijk blijft aan 6 keer de hoogte van de interne overstort. Zie tabel 4.1, waar de resultaten staan van berekeningen bij een gelijke breedte, maar verschillende lengtes en dieptes. Duidelijk is dat bij een korte, diepe tank de neer een groter percentage van het totale volume inneemt. Hierbij is het volume van de neer geschat op: $3/4 * L_n * H * B$. Het volume van de tank is 480 m^3.

Tabel 4.1: Neren bij verschillende H/L-verhoudingen en een breedte van B = 8 m.

H (m)	L (m)	L_n (m)	L_n/H (-)	V_n/V %
1,4	37,5	8	5,7	14
1,8	30	11	6,1	25
2,8	20	17	5,7	60

L = lengte tank (m);
q = debiet per meter breedte (m^2/s);
H = hoogte interne overstort (m);
V_n = volume neer (m^3);
V = volume tank onder rand externe overstort (m^3);

Ook bij een andere mesbelasting was er geen duidelijke invloed op de neerlengte. Bij een mesbelasting van 0,0625, 0,125 en 0,250 m^2/s bleek de neerlengte, uitgedrukt in de hoogte van de interne overstort H, gelijk te zijn aan respectievelijk 6,7, 6,1 en 6,7 keer H. Zie tabel 4.2. De verschillen zijn klein en zijn

waarschijnlijk veroorzaakt door verschillen in model-opbouw: aantal en grootte van de tijdstappen. In tabel 4.2 is tevens berekend welk percentage van het totale volume door de neer in beslag wordt genomen.

Tabel 4.2: Neren bij verschillende belastingen, bij H = 1,8 m.

q (m^2/s)	L_n (m)	L_n/H (-)	V_n/V %
0,0625	12	6,7	27
0,125	11	6,1	25
0,250	12	6,7	27

Indien verhouding H en h (de hoogte van de externe overstort) H/h constant wordt aangenomen, kan de verhouding V_n/V worden omgeschreven tot:

$$\frac{V_n}{V} = \frac{\frac{3}{4}L_n HB}{hBL} = \frac{\frac{3}{4}6H^2B}{hBL} = c_1\frac{H}{L} = c_1\frac{h}{L}$$

Dus een klein volume van de neer vraagt om een lange, ondiepe tank.
Deze eis komt min of meer overeen met de eis die volgt uit een hoge waarde voor het Froude getal. Het Froude getal wordt bij het ontwerpen van bergbezinktanks gebruikt om de kans op kortsluitstroming aan te geven. Een hogere waarde duidt op een stroming die minder gevoelig is voor kortsluitstroming.

$$Fr = \frac{u}{\sqrt{gh}} = \frac{Q}{V\sqrt{g}}\frac{L}{\sqrt{h}} = c_2\frac{L}{\sqrt{h}}$$

In een lange, ondiepe tank zullen minder snel kortsluitstromen optreden. Een neer is een kortsluitstroming. Omdat het model nog 2-dimensionaal is, is het nog niet mogelijk kortsluitstromen in het horizontale vlak te onderzoeken.

De gemiddelde snelheid is u = Q/(B*h). Bij zowel een constant volume V als debiet Q is u alleen afhankelijk van de lengte.

$$u = \frac{Q}{V}L = c_3L$$

Om de gemiddelde snelheid zo klein mogelijk te houden, dient de tank juist kort te zijn.

Het Reynolds-getal geeft een maat voor de optredende turbulentie. Aangenomen wordt dat de turbulentie de bezinking hindert, zodat de turbulentie zo klein mogelijk dient te zijn.

$$Re = u_{gem}\frac{R}{\nu} = \frac{Q*B}{V\nu}\frac{hL}{B+2h} = c_4\frac{hL}{B+2h}$$

Een kleine waarde van het Reynolds-getal vraagt dus om een korte brede tank.

Bovenstaande eisen zijn strijdig. Op basis van ervaring wordt in de praktijk zo ontworpen dat voor Re, Fr, u en mogelijk ook de verblijftijd of de oppervlaktebelasting redelijke waarden voorkomen. Om een gefundeerde uitspraak te kunnen doen over een optimale verhouding tussen lengte-diepte en breedte, dient ook het bezinkproces te worden gemodelleerd.

4.2 NIET RECHTHOEKIGE TANKS

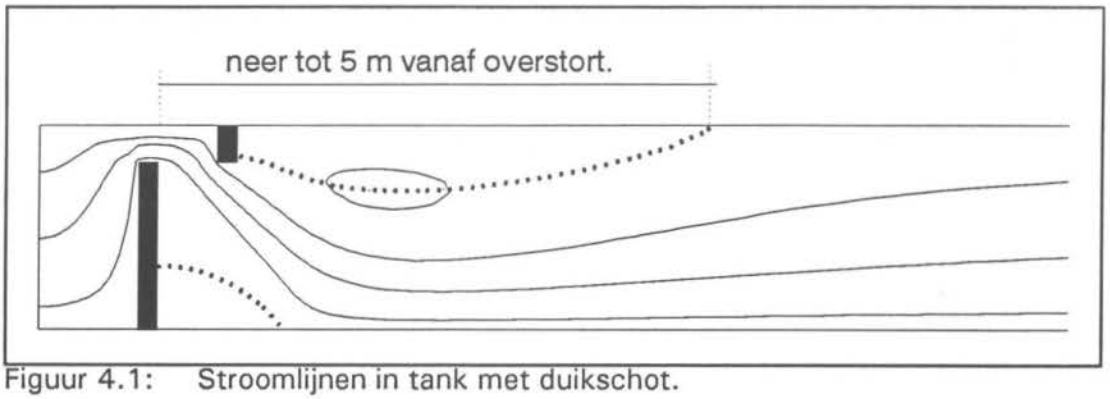
Het is mogelijk met het simulatieprogramma de stroming door allerlei verschillend gevormde tanks te modelleren. Ook vormen die niet met rechthoekige cellen of met cellen uit een polair stelsel kunnen worden beschreven, kunnen worden gemodelleerd. Voorbeelden hiervan zijn tanks met een schuine bodem, of met een krom of schuin deflectieschot. Ook het modelleren van stroming door buizen zoals een bergbezinkriool behoort tot de mogelijkheden. Wanneer de breedte niet constant is, of niet toeneemt zoals bij een taartpunt uit een ronde tank, dan zal een 3-dimensionaal model moeten worden opgesteld. Het is de verwachting dat dit geen grote problemen met zich mee zal brengen. Alleen de rekentijd zal aanzienlijk toenemen.

Enige berekeningen met ronde tanks waarbij het water in het midden binnenkomt en aan de buitenrand wordt afgevoerd, of andersom, zijn uitgevoerd. Hierbij is aangenomen dat het gaat om een 2-dimensionale stroming in een taartpunt uit een ronde tank. De bodem kan onder een helling liggen, die dan wordt weergegeven door een getrapte bodem of, wat realistischer is maar meer rekentijd kost, door een echte schuine bodem.

4.3 SCHOTTEN

Door de celwanden van enige cellen dicht te maken, zijn schotten in het mathematische model aangebracht. Berekeningen zijn uitgevoerd met en zonder berekening van het vrije wateroppervlak. Het is mogelijk de neer aanzienlijk te verkleinen door het water met behulp van een duikschot omlaag te leiden, of door het water met een diffusieschot gelijkmatig over de gehele hoogte te verdelen. Voor de resultaten van berekeningen met diffusieschotten wordt verwezen nar [*Kluck, 1993*].

Bij een juiste keuze van lokatie en grootte van het duikschot verdwijnt de neer aan de bodem bijna volledig en blijft de neer aan de bovenkant achter het duikschot beperkt. Zie figuur 4.1. Het volume van de bovenste neer is geheel verloren voor de bezinking, omdat het vuil dat in de neer bezinkt, weer in de stroming eronder terecht komt. In de doorgerekende modellen bleek de neerlengte ongeveer gelijk te worden aan 5 m, en besloeg de neer een hoogte van slechts 1.2 m. Dus het volume van de neer is beperkt. Bij de bodem onder de neer zal echter weinig bezinken, omdat daar de stroomsnelheden groot zijn. Het gebied waarin over de gehele hoogte de snelheden bijna uniform zijn, is aanzienlijk groter dan bij de modellen zonder duikschot.



Figuur 4.1: Stroomlijnen in tank met duikschot.

De diepte en lokatie van het 'beste' duikschot zal afhangen van het debiet. Pas wanneer het model gekalibreerd is, zal voor een model met wisselende belastingen het ideale duikschot worden berekend. Hier is slechts aangetoond dat het plaatsen van zo'n schot zin heeft om de neer te verkleinen en dat het mogelijk is de stroming rond een duikschot met het programma te berekenen.

De afstand tussen de overstort en het duikschot dient niet te klein te zijn om verstoppingen tegen te gaan.

5 VERVOLG VAN HET ONDERZOEK

Bij het opzetten van een model dat de waterbeweging beschrijft, ontbreekt het kalibreren van het model. Tot nu toe is het stromingsmodel alleen gecontroleerd aan de hand van de stromingstheorie en enige bemeten bekende stromingssituaties uit de literatuur. Of de resultaten ook overeen komen met de werkelijkheid kan pas met zekerheid worden gezegd, wanneer de resultaten vergeleken zijn met meetgegevens.

Zoals beschreven in [*Kluck, 1993*] zal in het vervolg van dit onderzoek aan een meetopstelling worden gemeten om gegevens te verzamelen waarmee het stromingsmodel kan worden gekalibreerd. Wanneer het stromingsmodel voldoende nauwkeurig de stroming in de meetopstelling beschrijft, is het de verwachting dat met het model ook de stroming in een prototype voldoende nauwkeurig kan worden beschreven. Vooral de neerlengte en de stroming rond de deflectie- en diffusieschotten behoeven de nodige aandacht bij het meten en bij het vergelijken van meetresultaten met berekeningen.
Hopelijk kan uit de meetgegevens ook een randvoorwaarde bij het wateroppervlak worden afgeleid. Volledig theoretisch onderbouwde randvoorwaarden voor de niet direct-meetbare grootheden k, ϵ en ν_t, zijn de auteur nog niet bekend. Hier zal literatuuronderzoek naar worden gedaan. In september 1993 zal een conferentie over onder andere de mathematische modellering van turbulente stromingen, 2-fase stromingen en dichtheidsstromen worden bijgewoond.

Nu het contact met CHAM eindelijk een beetje van de grond is gekomen, zal alsnog worden geprobeerd de laatste problemen met het wateroppervlak op te lossen. Verder moet worden onderzocht of met de gekozen methode voor het berekenen van het wateroppervlak de stroming over een overstort voldoende nauwkeurig kan worden beschreven. Het is niet zeker of de gebruikte methode bij grote waterstandsvariaties, die tijdens het vullen achter de interne overstort optreden, de juiste resultaten oplevert. Ook dit aspect zal aan de hand van meetgegevens moeten worden onderzocht. Zoals is te zien in figuur 2.3 van [*Kluck, 1993*], is het wel mogelijk het vullen van de tank met de gekozen methode te simuleren. Pas bij een (bijna) volle tank is het verval over de interne overstort klein. Bij een volle tank kan de waterstand zonder problemen variëren en kunnen verschillende belastingen of in de tijd variërende belastingen worden gesimuleerd.

Verder zal het mathematische model worden aangepast opdat ook het bezinkproces kan worden beschreven. In de eerste plaats zal het gaan om bezinking van uniforme deeltjes met constante valsnelheden. Het is de bedoeling dat ook de bezinking zal worden gemeten in een schaalopstelling, om de berekende bezinking te verifiëren. Onderzocht zal worden of dichtheidsstromen een rol spelen in bergbezinktanks en indien dat zo is, zullen deze worden gemodelleerd.

Uit de meetgegevens van het NWRW-onderzoek zullen maatgevende debieten en vuilconcentraties worden bepaald en door het model worden gevoerd. Ook de stroming en bezinking tijdens het vullen van de tank zullen worden gemodelleerd.

SYMBOLENLIJST

a	=	breedte kruin	(m)
A	=	oppervlak	(m^2)
B	=	breedte	(m)
C	=	constante	
$C_\mu C_D$	=	constanten van het k-ϵ turbulentiemodel	
d_y	=	celhoogte	(m)
g	=	versnelling ten gevolge van de zwaartekracht	(m/s^2)
h	=	waterdiepte	(m)
H	=	hoogte interne overstort of drempel	(m)
h	=	waterdiepte (vanaf de bodem of vanaf de kruin van de externe overstort)	(m)
k	=	turbulente kinetische energie	(m^2/s^2)
k_n	=	equivalente ruwheidslengte van Nikuradse	(m)
L	=	lengte maat	(m)
L_n	=	lengte neer	(m)
Q	=	debiet	(m^3/s)
R	=	hydraulische straal	(m)
q	=	debiet per strekkende meter	($m^3/m^1.s$)
s	=	bronnen	(kg/s)
u	=	horizontale snelheid	(m/s)
u_{gem}	=	over de diepte gemiddelde horizontale snelheid	(m/s)
u_*	=	schuifspanningssnelheid	(m/s)
V	=	volume	(m^3)
V_n	=	volume neer	(m^3)
y	=	afstand tot de wand of bodem	(m)
y_0	=	maat voor de ruwheid van de wand / bodem	(m)
y_w	=	afstand tot wateroppervlak	(m)
ϵ	=	dissipatie van turbulente kinetische energie	(m^2/s^3)
κ	=	constante van von Karman (= 0,4)	(-)
μ	=	dynamische viscositeit	(kg/ms)
ν	=	kinematische viscositeit	(m^2/s)
ν_n	=	numerieke viscositeit	(m^2/s)
ν_l	=	laminaire viscositeit = kinematische viscositeit	(m^2/s)
ν_t	=	turbulente viscositeit	(m^2/s)
ρ	=	dichtheid	(kg/m^3)
φ	=	variabele	
τ	=	schuifspanning.	(kg/ms^2)

LITERATUURLIJST

Battjes J.A., 1990, *Vloeistofmechanica*, TUD, college dictaat b70, Delft.

Booij R., 1986, *Turbulentie in de waterloopkunde*, TUD, college dictaat b82, Delft.

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

CHAM, *PHOENICS Equations*, CHAM, TR99, London.

CHAM, 1991, *The PHOENICS reference manual part a + b*, CHAM, TR200a + b, London.

CHAM, 1987, *PHOENICS beginners guide*, CHAM, TR100, London.

Franke P.G., *Abfluss uber Wehre and Uberfalle*, Abriss der Hydraulic, T.U. Munchen.

Hossain P.S., 1980, *Mathematische Modellierung von turbulente Auftriebströmungen*, University of Karlsruhe.

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.

Kluck, J, 1993, *Het modelleren van een vrij wateroppervlak in bergbezinktanks*, TUD, Delft.

Melis H., 1991, *Mathematisch model voor de waterbeweging*, Stora 1.1.6, TUD, Delft.

Rodi W., 1980, *Turbulence models and their application in hydraulics - a state of the art review*, University of Karlsruhe, Karlsruhe.