

1997-19_optimaal-functionerende-bergbezinkbassins

stowa

Stichting RIONED



TUDelft

Het ontwerp van optimaal
functionerende bergbezinkbassins

97-19

Het ontwerp van optimaal functionerende bergbezinkbassins



Jeroen Kluck
mei 1997
Technische Universiteit Delft

97-19

Publikaties en het publikatieoverzicht
van de Stowa kunt u uitsluitend
bestellen bij:
Hageman Verpakkers BV
Postbus 281
2700 AC Zoetermeer
tel. 079-3611188
fax 079-3613927
o.v.v. ISBN- of bestelnummer en
een duidelijk afleveradres.
ISBN nr. 90.74476.83.X

INHOUDSOPGAVE

Voorwoord
Samenvatting

1 Inleiding	1
1.1 Situatieschets	1
1.1.1 Reductie van de effecten van de vuiluitwerp	1
1.1.2 Opmerkingen bij de huidige eisen aan rioolstelsels	3
1.1.3 Ontwerpgrondslagen voor bergbezinkbassins	4
1.2 Probleemstelling	5
1.3 Doel	5
2 Huidige Nederlandse ontwerpgrondslagen voor bergbezinkbassins	6
3 Mathematisch model van stroming en bezinking	12
3.1 Opzet van het mathematisch model	12
3.1.1 Bodem en wanden	13
3.1.2 Wateroppervlak	14
3.1.3 Instroom	14
3.1.4 Uitstroom	15
3.2 Voorbeeld van een 2-dimensionale evenwichtssituatie	15
3.3 Verificatie van de simulaties	15
4 Mathematisch model voor het ontwerpen	17
4.1 Voorbeeld van een simulatie van het vullen van een bassin	17
4.2 Diffusiewand	19
5 Ontwerpformules	21
5.1 Inleiding	21
5.2 Simulaties voor het afleiden van ontwerpformules	21
5.3 Afleiding van de ontwerpformules	22
5.4 Verschillen met Camp	24
5.5 Conclusie	27
6 Gevoeligheidsanalyse	28
6.1 Tijdsafhankelijk 2-dimensionaal	28
6.2 3-dimensionale effecten	29
6.3 Effect van parameters in de stromingssimulaties op het rendement	31
6.4 Effect van de parameters in diffusie termen op het rendement	31
6.5 Conclusie	31

7 Kortsluitstromingen	33
8 Samenstelling van het overstortend water	34
9 Kosten	35
10 Conclusies	37
11 Tot slot, naar het ontwerp van optimaal functionerende bergbezinkbassins . . .	39

Literatuur

Symbolenlijst

Voorwoord

In begin van de jaren 90 werd duidelijk dat in de nabije toekomst zeer veel bergbezinkbassins zouden worden gebouwd. Een goede ontwerpmethode was dus wenselijk. In opdracht van Stichting RIONED en STOWA is destijds aan de Technische Universiteit van Delft onderzoek gestart om ontwerpmethoden te onderzoeken. Aanvankelijk was het onderzoek gericht op het bereiken van een voor de praktijk bruikbaar resultaat. Gaandeweg echter bleek dat zoveel diende te worden onderzocht dat het geschikt werd als promotieonderzoek. In dat kader is de afgelopen vijf jaar onderzoek verricht naar de stroming en bezinking in bergbezinkbassins. Het onderzoek werd begeleid door een begeleidingscommissie bestaande uit vertegenwoordigers van de universiteit, uit de praktijk, van Stichting RIONED en STOWA, om zorg te dragen voor een wetenschappelijk en praktisch resultaat. De heren prof.ir. J.B.M. Wiggers, prof.dr.ir. G.S. Stelling, dr.ir. P.J. Huiswaard, ir. P.C. Stamperius en ir. A.S. Beenen zeg ik hartelijk dank voor hun inspanning.

Een van de resultaten van dit onderzoek is dit op de praktijk gericht rapport. Meer achtergronden zijn te vinden in het proefschrift, dat in mei 1997 is gepubliceerd.

In de tussentijd zijn reeds veel bergbezinkbassins aangelegd, omdat men natuurlijk niet kon wachten op de resultaten van dit onderzoek. Uit het onderzoek is gelukkig gebleken dat de gemeenten die niet hebben gewacht (of hebben kunnen wachten), in het algemeen niet opgezaaid zitten met bassins waarvan nu kan worden gezegd: "Ja, maar dat is eigenlijk helemaal fout" (als ze volgens de gangbare inzichten correct zijn ontworpen). Dit onderzoek heeft geresulteerd in een vergelijking waarmee het rendement door bezinking kan worden voorspeld. Deze vergelijking is gebaseerd op een realistischere beschrijving van de werking van bergbezinkbassins dan de aannames waarop de huidige ontwerpmethode is gebaseerd. Met de resultaten van dit onderzoek kunnen daarom betere ontwerpen worden gemaakt.

Samenvatting

Om de vervuiling van het oppervlaktewater tegen te gaan zal een groot aantal bergbezinkbassins worden aangelegd. Het is echter niet zeker of de huidige ontwerpmethoden resulteren in bergbezinkbassins met een optimale vuilreductie. Om te onderzoeken op welke wijze bassins moeten worden ontworpen voor het verkrijgen van een optimaal rendement zijn simulaties van de stroming en bezinking in bergbezinkbassins uitgevoerd. Hiervoor is het stromingssimulatiepakket PHOENICS aangepast en toegepast. De simulaties hebben inzicht verschaft in de processen in de bassins en kunnen in uiteenlopende situaties worden gebruikt voor het ontwerp van bassins rekening houdend met het vullen en variaties in de stromingscondities.

Het gebruik van het model is echter te tijdrovend en ingewikkeld om te worden gebruikt voor het ontwerpen van elk bassin. Daarom is voor de meest voorkomende gevallen (2-dimensionale stroming in rechthoekige bassins) een vergelijking afgeleid waarmee het rendement door bezinking in de evenwichtssituatie kan worden voorspeld. Hiermee kunnen op eenvoudige wijze verschillende ontwerpen worden geëvalueerd. Op basis van deze vergelijking is ten slotte een methode ontwikkeld waarmee het functioneren van een bassin bij een belasting met een regenreeks van enige jaren kan worden beoordeeld, met inbegrip van het vullen en variaties in de belasting.

De stromingssimulaties lieten zien dat de bezinking binnen bepaalde grenzen ongevoelig is voor aanpassingen aan het ontwerp. De oppervlaktebelasting heeft de grootste invloed. Hoe lager deze is (dus hoe groter het oppervlak van het bassin is), des te hoger is het rendement door bezinking. Daarnaast is de horizontale stroomsnelheid van belang. Wanneer deze groter wordt dan 0,15 m/s, neemt het rendement aanzienlijk af. Voor lagere snelheden is het rendement alleen een functie van de valsnelheid en de oppervlaktebelasting.

Het toevoegen van stroomgeleiders en diffusiewanden bleek slechts een beperkte invloed op het rendement te hebben. Wanneer in de stroming grote 3-dimensionale structuren aanwezig zijn, is het rendement lager dan in 2-dimensionale stromingssituaties. Een diffusiewand kan helpen de stroming meer 2-dimensionaal te maken.

1 Inleiding

Bij hevige regenval kunnen gemengde rioolstelsels niet al het water afvoeren en stort een gedeelte van het rioolwater (een mengsel van regenwater, vuil van de straten, huishoudelijk afvalwater en opgewoeld sediment uit het stelsel) via overstorten over op het oppervlaktewater. Dit kan lokaal tot ernstige vervuiling leiden. Om deze vervuiling door overstortend rioolwater te beperken, kunnen verschillende maatregelen worden genomen. Het aanleggen van bergbezinkbassins is een van de mogelijke oplossingen.

Het is echter onzeker of bergbezinkbassins, die volgens de huidige richtlijnen worden ontworpen, resulteren in een optimale reductie van de vuiluitworp. De huidige ontwerpmethoden gaan uit van een continue doorstroming van de bassins en van ideale stromingscondities voor bezinking in een gedeelte van het bassin, terwijl in de rest van het bassin de bezinking wordt verwaarloosd.

Teneinde te onderzoeken of de huidige ontwerpmethoden leiden tot goede ontwerpen, zijn de processen in de bassins met een mathematisch model gesimuleerd. Dit heeft enerzijds geresulteerd in de kennis en de hulpmiddelen om de stroming en bezinking in verschillende randvoorzieningen te simuleren en te beoordelen en anderzijds in een formule waarmee het rendement van rechthoekige bassins kan worden voorspeld.

1.1 Situatieschets

In 1990 was 93% van alle huishoudens in Nederland aangesloten op een rioleringsstelsel (RIONED, 1994). 75% van de lengte van de rioolstelsels is van het gemengde type (RIONED, 1994). Omdat de capaciteiten van de afvoer en de zuivering beperkt zijn, kan bij hevige neerslag niet al het water door het stelsel worden afgevoerd. Het overschot wordt via overstorten op het oppervlaktewater geloosd. Dit kan leiden tot ernstige vervuiling van het oppervlaktewater.

1.1.1 Reductie van de effecten van de vuiluitworp

Er bestaan verschillende methoden om de effecten van de vuiluitworp te verminderen.

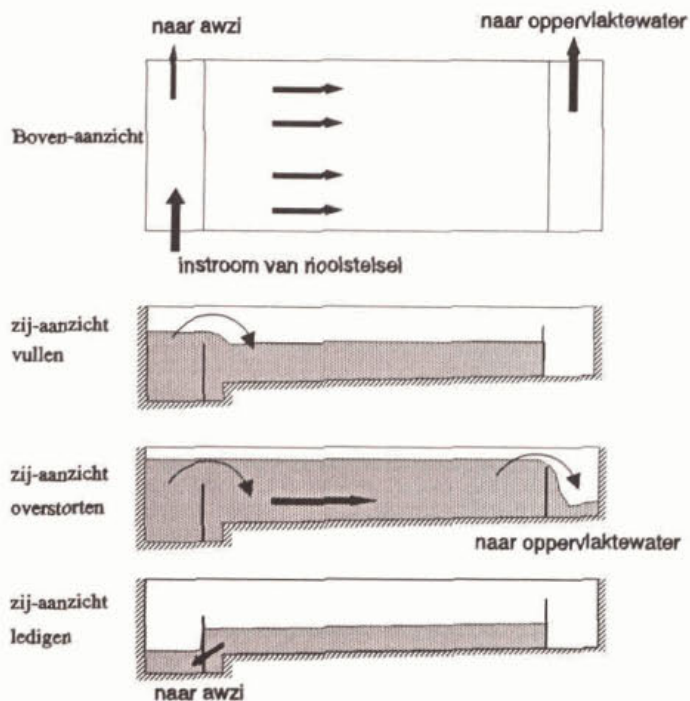
- * Het doorspoelen van het oppervlaktewater spoelt de nadelige effecten weg, maar vermindert de geloosde hoeveelheid vuil echter niet en is daarmee geen echte oplossing.
- * Een andere methode is aanpassing van het rioolstelsel. Enerzijds kan de berging worden vergroot. Dit vermindert het volume en de frequentie van de overstorten. Bedacht moet worden dat, wanneer het vergroten van de berging leidt tot meer bezinking in het stelsel tijdens droogweer of bij geringe neerslag, het mogelijk is dat de extra hoeveelheid sediment tijdens hevige neerslag gedeeltelijk via de overstort verdwijnt. Hierdoor gaat een gedeelte van het positieve effect verloren. Anderzijds kan de pompovercapaciteit worden verhoogd. In dat geval moet de afvalwaterzuiveringsinrichting de extra hoeveelheid water kunnen verwerken. Daarbij moet worden

bedacht dat het rendement van de zuivering doorgaans afneemt bij toenemende belasting, doordat meer bezinkbare stoffen uit de nabezinktank worden gespoeld, zodat de winst gedeeltelijk verloren kan gaan.

- * De opeenhoping van slib in het stelsel kan worden voorkomen door het stelsel goed te ontwerpen en/of regelmatig schoon te maken. Hierdoor zal bij hevige neerslag minder vuil via de overstorten verdwijnen.
- * Een beter concept is te voorkomen dat grote hoeveelheden relatief schoon regenwater in het stelsel terecht komen, zich vermengen met het afvalwater en het slib opwoelen. De afvoer van regenwater kan worden beperkt door terreinen met relatief schone oppervlakken van het stelsel af te koppelen. Het water van veel daken en verkeersarme straten is schoon genoeg om in de grond te worden geïnfiltrerd.
- * Ten slotte kunnen randvoorzieningen bij de overstorten worden aangelegd om overstortend water te bergen of het vuil gedeeltelijk tegen te houden.

Welke oplossing in de praktijk wordt gekozen hangt van de lokale situatie af. Dit onderzoek richt zich op randvoorzieningen.

Er bestaan verschillende soorten randvoorzieningen. De randvoorzieningen verminderen de vuiluitworp door het overstortende volume te verkleinen, door de concentratie aan vuil in het overstortende water te verminderen, of door een combinatie van deze twee. Dit onderzoek richt zich op bergbezinkbassins, die de vuiluitworp door middel van berging en bezinking reduceren.



Figuur 1: Rechthoekig bergbezinkbassin.

In Nederland worden bergbezinkbassins doorgaans in nevenaansluiting aangelegd. Dit betekent dat alleen bij hevige neerslag water door de bassins stroomt (zie figuur 1). Pas wanneer de waterstand in het rioolstelsel boven de drempel van de interne overstort stijgt, loopt water het bassin in. Als het bassin vol is, stroomt het water over de externe overstort en wordt het afgevoerd naar het oppervlaktewater. De stromingscondities in het bassin dienen bij het doorstromen van het bassin zodanig te zijn dat een gedeelte van het vuil naar de bodem zinkt, waardoor het uitstromende water schoner is dan het instromende water. Wanneer de waterstand in het rioolstelsel is gedaald, stroomt het water vanuit het bassin terug naar het stelsel, of het wordt teruggepompt.

Door middel van een spoelinstallatie wordt tijdens het ledigen het bezonken

materiaal opgewoeld, zodat de bak uiteindelijk schoon is. De bodem van het bassin wordt doorgaans onder een helling (b.v. 1%) gelegd om de reiniging te bevorderen.

1.1.2 Opmerkingen bij de huidige eisen aan rioolstelsels

Om de vervuiling van het oppervlaktewater door overstortingen uit de gemengde rioolstelsels zoveel mogelijk tegen te gaan, werden voorheen door de waterkwaliteitsbeheerder voornamelijk alleen aan de frequentie waarmee de overstortingen plaatsvinden, grenzen gesteld. Echter niet alleen de frequentie van overstortingen is belangrijk, maar ook de hoeveelheid vuil die in het oppervlaktewater terechtkomt.

Om de vervuiling van oppervlaktewater door overstortend rioolwater te beperken heeft de CUWVO VI subwerkgroep "Eisen rioolwateroverstorten" in 1992 voorgesteld dat uit de bestaande gemengde rioleringsystemen niet meer vuil mag overstorten dan uit het volgende referentiestelsel (CUWVO, 1992):

- * Een onderdrempelberging van 7 mm,
- * een pompoevercapaciteit van 0,7 mm/h,
- * plus 2 mm extra berging in de vorm van bergbezinkbassins achter de overstorten.

Andere randvoorzieningen dan bergbezinkbassins, of andere maatregelen zijn toegestaan, indien dit resulteert in rioleringsystemen met gelijke of kleinere vuiluitwerpen. In veel situaties komt dit echter neer op het aanleggen van 2 mm extra berging in de vorm van bergbezinkbassins c.q. qua vuiluitworp gelijkwaardige randvoorzieningen, daar de 7 mm onderdrempelberging veelal reeds aanwezig is.

Het voldoen aan deze eis wordt de basisinspanning genoemd. Wanneer dit niet resulteert in een water van een voldoende kwaliteit, worden aanvullende maatregelen geëist.

Er kleven enige bezwaren aan deze methode:

- 1) De definitie van het referentiestelsel voor stelsels met meerdere overstorten is niet eenduidig.
- 2) De grootte van de berekende vuiluitworp (zowel uit het bestaande stelsel, het aangepaste stelsel als die uit het referentiestelsel) hangt af van de wijze waarop deze wordt berekend. Het is vooralsnog onmogelijk de vuiluitworp exact te berekenen. Met name aannames ten aanzien van het optreden van erosie van slib of juist het bezinken van vuil zijn nog zo onzeker dat verschillende vuiluitworberekeningen zeer verschillende resultaten kunnen geven. Zie ook (Aalderink, 1995).
- 3) Deze eisen nodigen uit tot het voldoen aan de basisinspanning zonder dat beoordeeld wordt of hiermee het gewenste effect op het oppervlaktewater wordt bereikt. Voorkomen dient te worden dat in eerste instantie maatregelen worden genomen (om aan de basisinspanning te voldoen) die later niet in overeenstemming zijn met aanvullende maatregelen.
- 4) Het is daarnaast mogelijk dat de wens om aan de basisinspanning te voldoen leidt tot maatregelen die in werkelijkheid amper effect op de waterkwaliteit zullen hebben.

De huidige leidraad voor het controleren van het hydraulisch functioneren van rioolstelsel (Leidraad riolering, 1995) schrijft voorts voor dat de werking van een stelsel moet worden beoordeeld aan de hand van regenreeksberekeningen met een periode van 10 jaar of 25 jaar tot en met het jaar 1997 en een periode van 25 jaar vanaf het jaar 1998. Voor elke overstort

resulteert dit soort berekeningen in reeksen van overstortende debieten als functie van de tijd. Deze overstortingsreeksen dienen te worden beoordeeld.

Indien in Nederland 2 mm berging in bergbezinkbassins gerealiseerd gaat worden, brengt dit de volgende kosten met zich mee:

Aangenomen dat per inwoner 50 m² verhard oppervlak aanwezig is, waarvan het regenwater afgevoerd moet worden; dan zal in Nederland met 15.000.000 inwoners voor 2 mm berging 1.500.000 m³ berging nodig zijn. Als de kosten van de berging worden gesteld op f 1.000,- à f 1.500,-/m³, betekent dit een totaal bedrag van circa 2 miljard gulden! Het effect van deze investeringen is echter slecht, tot in het geheel niet, te kwantificeren.

Indien slechts bij een gedeelte van de gemengde rioolstelsels bergbezinkbassins aangelegd worden, gaat het nog steeds om een zeer groot bedrag. Om die redenen is onderzoek naar het functioneren van bergbezinkbassins zeker op zijn plaats. Indien de gemeenschap, naar aanleiding van de CUWVO-aanbevelingen, circa 2 miljard gulden over heeft voor het verbeteren van de oppervlaktewaterkwaliteit, is het zaak bassins te bouwen waarvan vaststaat dat zij een zo hoog mogelijk rendement opleveren.

1.1.3 Ontwerpgrondslagen voor bergbezinkbassins

Gezien het grote aantal bergbezinkbassins dat naar verwachting zal worden gebouwd, bestaat behoefte aan een goede ontwerpmethod. Het is echter niet zeker of de huidige Nederlandse ontwerpmethod. resulteert in bassins met een optimaal rendement. Een nadere omschrijving van de huidige Nederlandse ontwerpmethod. volgt in hoofdstuk 2. Hier wordt volstaan met het opsommen van de uitgangspunten waardoor deze ontwerpmethod. mogelijk niet tot het optimale rendement leidt:

- a) Het ontwerp wordt gebaseerd op de bezinking bij permanente belasting.
- b) Aangenomen wordt dat bezinking alleen in de zogenaamde bezinkzone optreedt. De bezinkzone is het gedeelte van het bassin waar het water vrijwel uniform verdeeld over de hoogte stroomt.
- c) Het rendement wordt bepaald aan de hand van de Camp-grafiek. Deze grafiek is in 1946 door Camp afgeleid op basis van de analytische oplossing van de 1-dimensionale transportvergelijking van bezinkbaar materiaal (Camp, 1946).
- d) Het effect van opwoeling of hindering van depositie op de bodem door te hoge bodemschuifspanningen wordt in rekening gebracht op basis van de bodemschuifspanning bij uniforme stroming.

Bij punt a kan worden opgeworpen dat het niet zeker is of een ontwerp gebaseerd op de voorspelling van het rendement bij permanente belasting het beste rendement voor tijdsafhankelijke belastingen geeft. Het zal duidelijk zijn dat permanente belastingen in de praktijk niet voorkomen, want het debiet en de concentratie variëren in de tijd. Daarnaast moet worden bedacht dat het vullen van het bassin invloed heeft op de bezinking. Het effect hiervan kan in de huidige Nederlandse ontwerpmethod. niet worden meegenomen.

De aanname dat materiaal alleen in de bezinkzone bezinkt (punt b) is een aanname aan de veilige kant: indien wel overal materiaal bezinkt, wordt het rendement onderschat. Wanneer alle bergbezinkbassins op deze wijze zouden worden ontworpen zou dat geen probleem zijn, ware het niet dat deze aanname het resultaat in de richting van smalle bassins stuurt, omdat daarbij de bezinkzone een zo groot mogelijk deel van het bassin beslaat. Het is daarmee niet zeker of dit resulteert in het beste ontwerp.

Voor punt c kan worden opgemerkt dat de stroming niet 1-dimensionaal is. De werkelijke verdeling van de snelheid en turbulentie beïnvloedt de bezinking.

Punt d omvat zoveel onzekerheden, dat de invloed van deze aanname niet duidelijk is. Ten eerste is niet bekend welke waarde van de bodemschuifspanning kritiek is. Ten tweede wordt de bodemschuifspanning niet goed weergegeven door de waarde op basis van uniforme stroming wanneer de stroming in extreme mate niet uniform is (b.v. in de neer). Daar staat tegenover dat in de ontwerpmethode bezinking in de neer wordt verwaarloosd en alleen wordt berekend voor het gedeelte van het bassin waar de stroming uniform wordt verondersteld. Hierdoor is het verrekenen van het effect van hoge bodemschuifspanningen op basis van uniforme stroming logisch.

Het is daarmee niet zeker of deze ontwerpmethode resulteert in bassins met een optimaal rendement. Bovendien kan met deze methode de invloed van aanpassingen aan het ontwerp zoals verandering in vorm anders dan rechthoekig, of het toepassen van schotten niet worden berekend of voorspeld.

In het buitenland gehanteerde ontwerpgrondslagen zijn gebaseerd op meetgegevens aan lokale stelsels. Het gebruik van deze ontwerpgrondslagen geeft niet met zekerheid goede ontwerpen voor de Nederlandse situatie.

1.2 Probleemstelling

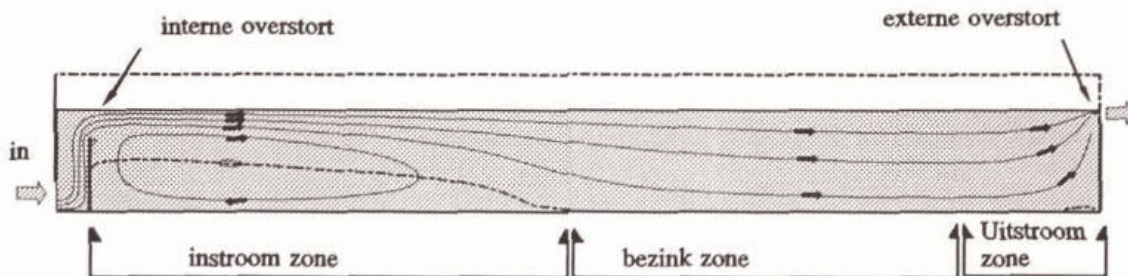
Gezien de grote hoeveelheid extra berging die naar verwachting in Nederland in de vorm van bergbezinkbassins zal worden aangelegd, is het zeker de moeite waard de vuilreducerende werking van bergbezinkbassins te onderzoeken. Het is niet zeker of de huidige ontwerpgrondslagen leiden tot bassins met een optimaal rendement. Daarom dient meer inzicht in de stroming en de bezinking in bergbezinkbassins te worden verkregen, zodat ontwerpformules kunnen worden opgesteld met het oog op het bereiken van een zo hoog mogelijk rendement van de bassins.

1.3 Doel

Het doel van dit onderzoek is het opstellen van richtlijnen voor het ontwerp van bergbezinkbassins. Hiertoe worden mathematische modellen opgesteld, die de tijdsafhankelijke verschijnselen (stroming en bezinking) in bergbezinkbassins beschrijven. Hiermee kan de reductie van de vuiluitworp van bergbezinkbassins worden bepaald en zal het vermoedelijk beter mogelijk zijn om per situatie de beste oplossingen te kiezen.

2 Huidige Nederlandse ontwerpgrondslagen voor bergbezinkbassins

In Nederland wordt bij het ontwerpen van bergbezinkbassins uitgegaan van stationaire stromingscondities in het bassin. Het bassin wordt op soortgelijke wijze ontworpen als een bezinktank voor de afvalwaterzuivering. Het bassin wordt opgedeeld in drie zones: de instroomzone met de neer, de bezinkzone waarvoor wordt aangenomen dat het water uniform over de hoogte verdeeld is en de uitstroomzone, waar de stroming beïnvloed wordt door de uitstroom over de externe overstort. Zie figuur 2. Aangenomen wordt dat bezinking alleen in de bezinkzone optreedt. De instroomzone heeft een lengte van 6 tot 8 keer de hoogte van de interne overstort en kan daarmee een aanzienlijk deel van het bassin beslaan.



Figuur 2: Instroom-, bezink-, en uitstroomzone in een bergbezinkbassin.

De bezinking in de bezinkzone wordt gebaseerd op de volgende voor de bezinking ideale omstandigheden:

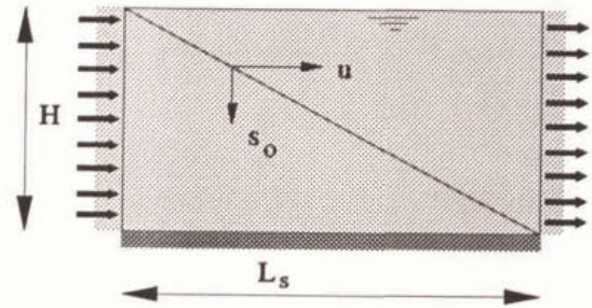
- * stationaire stroming;
- * geen kortsluitstromen;
- * geen turbulentie;
- * een homogene concentratieverdeling van de te bezinken stoffen over de verticaal bij het begin van de bezinkzone;
- * geen coagulatie;
- * geen opwoeling van eerder bezonken slib.

Voor een rechthoekig bassin met een gemiddelde doorstroomsnelheid u betekenen deze ideale condities het volgende: een bezinkbaar deeltje dat zich bij binnenkomst in de bezinkzone (met lengte L_s en diepte H) bij het wateroppervlak bevindt, bereikt net voor het einde van de bezinkzone de bodem als de bezinksnelheid, v_s , gelijk is aan $u \cdot H / L_s$. Deze verhouding wordt de oppervlaktebelasting s_0 genoemd⁽¹⁾. Zie figuur 3. Alle deeltjes met een bezinksnelheid groter dan of gelijk aan s_0 bezinken onder deze ideale omstandigheden. Van de deeltjes met een lagere bezinksnelheid zal een gedeelte bezinken. Afhankelijk van hun plaats in de

⁽¹⁾ De oppervlaktebelasting s_0 kan hierbij worden beschouwd als de verhouding van Q/A_s , met Q is het debiet door de tank en A_s het oppervlak van de bezinkzone ($= L_s \cdot B$, met B is de breedte van de tank).

verticaal bij binnenkomst zullen ze de bodem wel of niet voor het einde van het bassin halen. Vanwege de aangenomen homogene concentratieverdeling van de bezinkbare deeltjes bij binnenkomst van de bezinkzone, wordt van deze deeltjes een gedeelte v_s/s_o verwijderd.

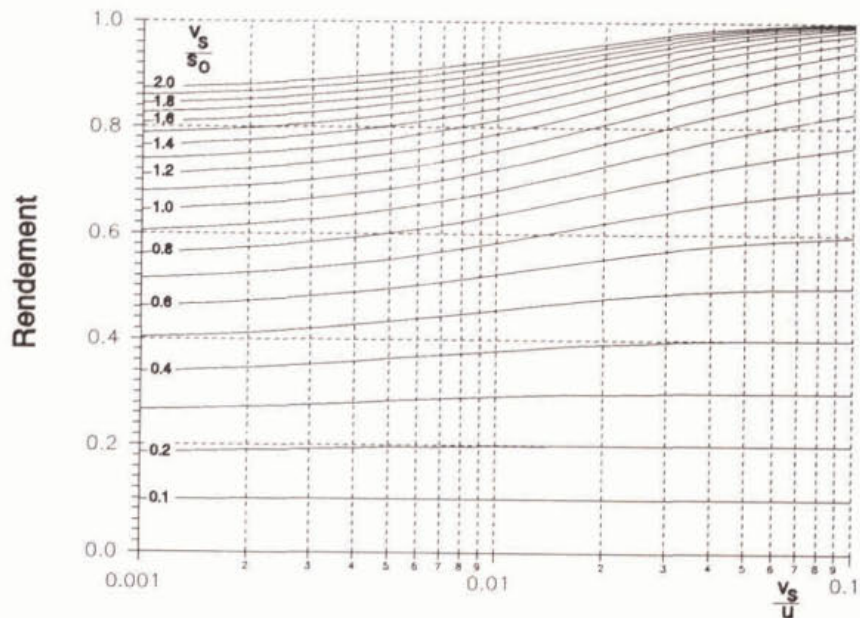
De stroming in een bergbezinkbassin is in het algemeen turbulent. De turbulentie veroorzaakt een verspreiding van het zinkende materiaal, zodat de bezinking wordt gehinderd. Het effect van turbulentie op bezinking wordt in de Nederlandse ontwerpmethoden meegenomen door het rendement te bepalen met behulp van de grafiek van Camp. Camp (1946) heeft deze grafiek opgesteld op basis van de analytische oplossing van de 1-dimensionale transportvergelijking met bezinking in een uniforme stroming voor stationaire situaties. Aan de hand



Figuur 3: Oppervlaktebelasting $s_o = u \cdot H / L_s$.

van de valsnelheid, de gemiddelde horizontale stroomsnelheid en de oppervlaktebelasting kan in de grafiek het verwachte rendement door bezinking worden afgelezen. Zie figuur 4.

In de Nederlandse ontwerpmethode wordt het rendement meestal voor deeltjes met een valsnelheid van 5 of 10 m/h bepaald. Indien de verdeling van de bezinksnelheden van de bezinkbare deeltjes bekend is, kan het verwijderingsrendement door bezinking worden berekend door voor de voorkomende valsnelheden het rendement te bepalen en dan het gewogen gemiddelde rendement te bepalen.



Figuur 4: De Camp-grafiek voorspelt het rendement door bezinking bij turbulente stromingssituaties aan de hand van v_s/s_o en v_s/u .

Uitgaande van bovenstaande theorie, kan aan de hand van een gewenste vuilreductie en de bekende of geschatte verdeling van de bezinksnelheden een maximaal toelaatbare oppervlaktebelasting worden gekozen.

Het debiet volgt uit hydraulische berekeningen. Deze hydraulische berekeningen kunnen heel eenvoudig zijn: b.v. een gekozen kritieke regenintensiteit vermenigvuldigd met het

afwaterende oppervlak min de pompoevercapaciteit geeft het debiet. Het is ook mogelijk het debiet te baseren op regenreeksberekeningen. Hiermee kunnen overstortingsreeksen worden bepaald, waar dan weer een maatgevende belasting uit zou kunnen worden bepaald. Vervolgens wordt het oppervlak van de bezinkzone A_s berekend als functie van het debiet Q met $A_s = Q/s_0$.

Het volume van het bassin is vaak een uitgangspunt. In veel gevallen wordt een bassin ontworpen waarvan het volume reeds vast staat. Het bassin dient dan zo te worden ontworpen dat dat volume een zo hoog mogelijk rendement oplevert. Het is ook mogelijk dat een bepaalde reductie van de vuiluitworp door bezinking gewenst is (op basis van de aannames in de berekeningen). In die gevallen volgt het volume uit de berekeningen. Wanneer het ontwerp op de gehele vuiluitworp-reductie van het bassin moet worden gebaseerd, moet zowel berging en bezinking worden meegenomen. Daartoe dient het verloop van de debieten over de overstorten als gevolg van een regenreeks bekend te zijn.

De diepte en de breedte van het bassin volgen uit richtlijnen uit de praktijk (b.v. $L/B = 5$ tot 10) of uit de volgende twee kengetallen voor de stroming in het bassin: het getal van Reynolds en het Froude-getal. Het getal van Reynolds geeft een indicatie van de turbulentie van de stroming en het Froude-getal van de kans op het optreden van kortsluitstromen, wat betekent dat het water niet uniform verdeeld door het bassin stroomt.

Het getal van Reynolds

Dit getal geeft de verhouding tussen de massakrachten en de visceuse krachten.

$$Re = \frac{uR}{\nu} = \frac{Q}{(B+2H)\nu} \quad (1)$$

R = hydraulische straal = $B \cdot H / (B + 2H)$

ν = kinematische viscositeit $\approx 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Bij lage snelheden en hoge viscositeiten, dus bij lage waarden voor het getal van Reynolds, is de stroming niet turbulent maar laminair. Laminaire stroming treedt op als het getal van Reynolds kleiner is dan 1600 à 2000. Het getal van Reynolds blijkt echter alleen bij zeer kleine debieten daarvoor klein genoeg te zijn. In het algemeen is de stroming turbulent.

Het is voor de bezinking gunstig de turbulentie te beperken. Daartoe moeten voor een bepaald debiet de doorstroomsnelheid en de hydraulische straal klein zijn. Dit vraagt om een brede diepe bak.

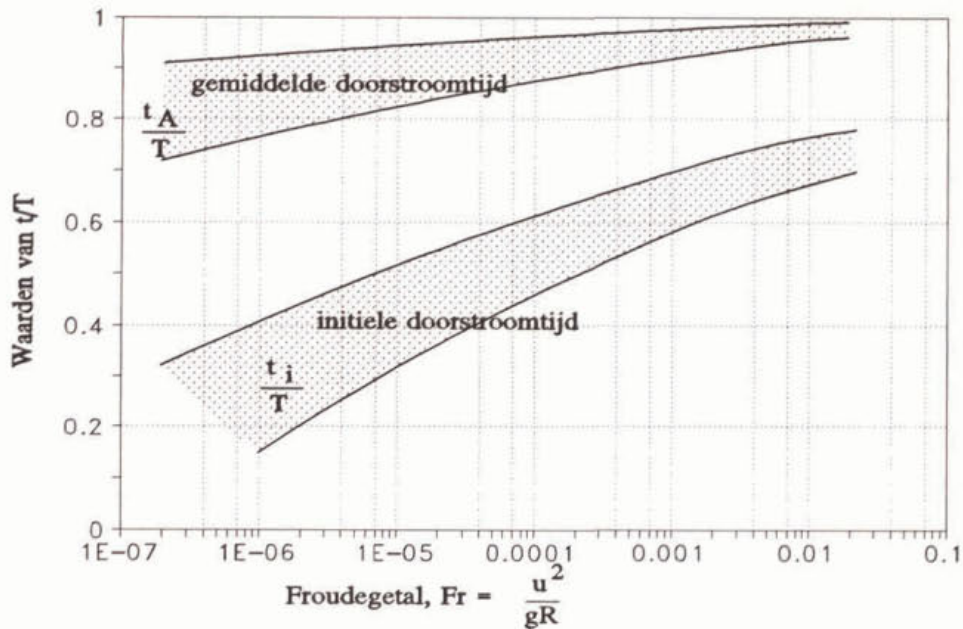
Froude-getal

Het Froude-getal geeft de verhouding tussen massakrachten en zwaartekracht weer.

$$Fr = \frac{u^2}{gR} \quad (2)$$

g = zwaartekrachtversnelling in m^2/s .

Het Froude-getal geeft een indicatie van de kans op kortsluitstroming. De aanwezigheid van kortsluitstromen verkleint het bezinkeffect. Voor stabiele stroming wordt in het algemeen



Figuur 5: Gemiddelde en initiële doorstroomtijden in relatie tot het Froude-getal.

aangeraden het bassin zo te dimensioneren dat het Froude-getal groter is dan 10^{-5} . Een hogere waarde van het Froude-getal verhoogt de stabiliteit van de stroming, maar dan treedt ook meer turbulentie op. Een hoge waarde voor het Froude-getal vraagt om een smalle ondiepe bak.

Omdat een hoge waarde voor het Froude-getal resulteert in meer turbulentie, en de turbulentie juist moet worden beperkt, lijkt het optimaal om een bassin te ontwerpen met precies $Fr = 1 \cdot 10^{-5}$, zodat de stroming in het bassin nog net stabiel zou zijn bij een zo laag mogelijke graad van turbulentie. Dit is echter niet de juiste aanpak, omdat de grens aan het Froude-getal geen harde is, maar slechts een indicatie van de kans op kortsluitstroming geeft. Dit kan worden verduidelijkt aan de hand van de grafiek waaruit de kritieke waarde voor het Froude-getal is afgeleid:

De grafiek (figuur 5) is het resultaat van metingen van de verblijftijden van een kleurstof in een proefopstelling (Camp, 1946). De initiële doorstroomtijd (t_i) is de tijd tussen het moment van instroom en de eerste uitstroom van kleurstof. Daarnaast is de gemiddelde doorstroomtijd (t_A) gemeten. Kleine waarden van t_i en t_A in verhouding tot de theoretische verblijftijd ($T = V/Q$) duiden op kortsluitstromingen. De experimenten resulteerden in twee banden, zoals aangegeven in de figuur. De dimensieloze variabelen t_i/T en t_A/T nemen af met afnemende waarden voor het Froude-getal, zodat lage waarden van het Froude-getal overeenkomen met een grote kans op kortsluitstromingen. Er is echter geen duidelijk verschil in het verloop van de doorstroomtijden bij een Froude-getal van $1 \cdot 10^{-5}$. Het precies dimensioneren van een bassin bij $Fr = 1 \cdot 10^{-5}$ is daarom ongegrond.

Een ander punt dat hiermee samenhangt betreft het beoordelen van het functioneren van bassins bij tijdsafhankelijke belastingen. In (Noord-Brabantse waterkwaliteitsbeheerders, 1995) is voorgesteld aan te nemen dat het rendement door bezinking gelijk wordt aan nul als

de grens voor het Froude-getal wordt onderschreden. Gezien de herkomst van de grens lijkt dat niet juist. Dit kan als volgt worden aangetoond.

Wanneer de onderste lijnen van de banden in de grafiek als maatgevend worden gekozen (deze komen overeen met het grootste effect door kortsluitstromingen), kan worden afgelezen dat bij een situatie waarvoor geldt dat $Fr = 1 \cdot 10^{-5}$ de gemiddelde doorstroomtijd (t_A) gelijk is aan 83% van de theoretische doorstroomtijd (T). De initiële doorstroomtijd (t_i) is dan 32% van de theoretische doorstroomtijd. Voor een half zo groot debiet zal het Froude-getal vier keer zo klein zijn: $2,5 \cdot 10^{-6}$. Bij deze waarde van het Froude-getal geldt dat t_A is 79% van T en t_i is 22% van T (ondergrens). Aangezien de theoretische verblijftijd bij een half zo groot debiet twee keer zo groot is, zijn de gemiddelde en initiële verblijftijden echter wel toegenomen: tot 190% en 138% van hun originele waarden. Voor de bezinking zijn de condities door het halveren van het debiet alleen maar gunstiger geworden.

Op grond van bovenstaande beschouwing blijkt er geen reden te zijn aan te nemen dat het rendement door bezinking gelijk is aan nul bij afnemende debieten voor waarden van $Fr < 1 \cdot 10^{-5}$.

Ten aanzien van de definitie van het Froude-getal dient nog een opmerking te worden geplaatst. Voor de lengtemaat in de noemer van het Froude-getal zou in principe zowel de waterdiepte als de hydraulische straal kunnen worden gebruikt. In (Noord-Brabantse waterkwaliteitsbeheerders, 1995) is de diepte gekozen. Echter, aangezien de waarde van $1 \cdot 10^{-5}$ gebaseerd is op de hydraulische straal R als lengtemaat (Camp, 1946), dient ook voor het beoordelen van de stroming het Froude-getal te worden gebaseerd op de hydraulische straal.

Het bassin wordt zodanig gedimensioneerd dat aan de eisen voor het getal van Reynolds en het Froude-getal zo goed mogelijk wordt voldaan. Aan de eis voor het Froude-getal wordt in het algemeen bij grote debieten voldaan.

Voorts wordt gecontroleerd of de schuifspanning niet te groot is, omdat dan opwoeling van bezonken materiaal of hindering van depositie kan worden verwacht. Deze schuifspanning (gebaseerd op uniforme stroming in het bassin) wordt te groot geacht als deze groter is dan 0,1 tot 0,25 N/m². In plaats van de schuifspanning wordt ook wel een grens aan de gemiddelde horizontale snelheid gesteld. Deze dient dan kleiner dan 0,1 m/s te zijn.

Nogmaals wordt opgemerkt dat deze berekeningen zijn opgesteld voor stationaire stromingscondities, zoals die zich min of meer voordoen bij bezinktanks bij de afvalwaterzuivering. Dus voor een constant debiet door het bassin en constante invoerconcentraties. Bij bergbezinkbassins zullen deze variëren. Hierdoor is met deze theorie de werkelijke vuilreductie door bezinking niet goed te voorspellen.

De wijze waarop het functioneren van rioolstelsels wordt beoordeeld is in de loop der jaren veranderd van het doorrekenen van enkele gekozen belastingen naar het doorrekenen van regenreeksen. Daarmee kan de instroom in een mogelijke randvoorziening worden berekend. De huidige ontwerpmethode biedt echter niet de mogelijkheid het functioneren van randvoorzieningen bij zulke belastingen goed te beoordelen. De Noord-Brabantse waterkwaliteitsbeheerders (1995) beschrijven een methode, waarbij rekening wordt gehouden met het effect van het vullen en leeglopen van de bassins. Voor het bepalen van het rendement wordt

aangenomen dat bij elk debiet de stroming in de evenwichtssituatie is en wordt voor elk debiet het rendement met Camp-grafiek bepaald. Daarmee wordt het effect van variaties in het debiet niet goed meegenomen.

3 Mathematisch model van stroming en bezinking

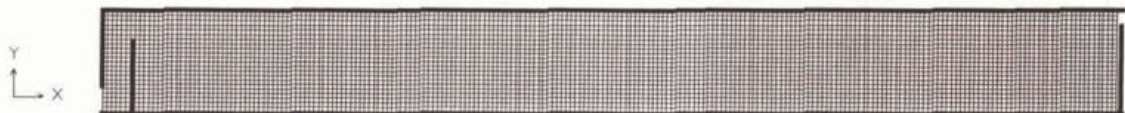
Teneinde meer inzicht te verkrijgen in de processen die zich in bergbezinkvoorzieningen voordoen, worden de stroming en het transport van vuil gesimuleerd. Een andere methode is meten in bestaande bassins of in schaalopstellingen van bassins. Om betrouwbare meetgegevens te verkrijgen, dient de meetopstelling goed toegankelijk te zijn. Bovendien dient het mogelijk te zijn de situatie tijdens het meten te beheersen en te besturen. Dit maakt het meten in bestaande bassins ongeschikt. Het is in de praktijk niet mogelijk alle processen te beheersen. Het is ten eerste niet zeker wanneer water door het bassin zal stromen en zeker niet met welk debiet. Een oplossing zou zijn water het bassin in te pompen. Echter ook de toegankelijkheid van de bassins is een probleem.

Het meten in een schaalopstelling biedt wel de mogelijkheid de invoer naar eigen wensen aan te passen in een goed toegankelijke situatie. Een groot probleem is het op kleine schaal brengen van de bezinking en tevens te kunnen meten. Een ander probleem is dat voor onderzoek naar het effect van bepaalde ontwerpgrontheden op het functioneren zeer veel metingen moeten worden uitgevoerd. Bovendien zijn metingen zeer tijdrovend en daardoor duur.

Het simuleren van de processen in een mathematisch model geeft (wanneer het model eenmaal is opgezet en getest) de mogelijkheid om een reeks van verschillende situaties door te rekenen en te beoordelen. Zo'n mathematisch model berekent op basis van balanswetten de processen in het bassin. De ruimte en zonodig ook de tijd worden in stukjes verdeeld en uitgaande van een beginsituatie wordt de situatie in de volgende stap berekend.

3.1 Opzet van het mathematisch model

Een deterministisch model voor een zo nauwkeurig mogelijke berekening van de rendementen van bergbezinkbassins is opgesteld. Met het model kunnen de processen van stroming en bezinking in 2- en 3-dimensionale stromingssituaties worden gesimuleerd. De situaties kunnen stationair of tijdsafhankelijk zijn. In de stromingssimulaties wordt het stroomgebied (het bassin) opgedeeld in een groot aantal kleine cellen, zie bijvoorbeeld figuur 6.



Figuur 6: Voorbeeld van een rekenrooster voor een 2-dimensionaal model van een rechthoekige tank.

Voor elke cel worden transportvergelijkingen opgelost.

- * De continuïteitsvergelijking voor de hoeveelheid water.
- * De Navier-Stokes vergelijkingen voor de impuls in de verschillende richtingen.
- * Vergelijkingen voor de bezinkbare deeltjes.

- * Vergelijkingen van variabelen waarmee de turbulentie wordt beschreven. Hiervoor is het $k-\epsilon$ turbulentiemodel toegepast. De turbulentie wordt daarbij weergegeven door twee variabelen: k , de kinetische energie van de turbulente beweging en ϵ , de dissipatie van die energie.

Het softwarepakket PHOENICS is gekozen om de transportvergelijkingen op te lossen. Dit pakket is ontworpen voor allerlei stromingssituaties, maar is vooral geschikt vanwege de mogelijkheid zelf extra vergelijkingen en relaties toe te voegen. Kluck (1997) geeft een nadere beschrijving van de opzet van het model.

Bergbezinkbassins zijn 3-dimensionaal, maar in veel gevallen kan de stroming zonder problemen worden vereenvoudigd tot twee dimensies: lengte en hoogte. Voor die gevallen waarin de vorm van het bassin of de wijze van in- en uitstroom zodanig is dat de stroming niet tot twee dimensies kan worden vereenvoudigd, dienen 3-dimensionale simulaties te worden uitgevoerd.

De processen van stroming en bezinking in bergbezinkbassins zijn tijdsafhankelijk. Ten eerste variëren het debiet en de concentratie in de tijd. Ten tweede is het vullen een tijdsafhankelijk proces. Met het model kunnen zowel stromingssituaties met variaties in de tijd als evenwichtssituaties worden gesimuleerd. Tijdens het vullen van het bassin en bij variaties in het instroomdebiet varieert het niveau van het wateroppervlak. Voor een goede simulatie van dit verschijnsel, is gekozen voor een methode waarmee de variatie in het niveau van het wateroppervlak wordt gesimuleerd.

Het transport van bezinkbaar materiaal is als volgt gesimuleerd. Gekozen is het bezinkbare materiaal te kenmerken door een valsnelheid of een reeks van valsnelheden. Het model berekent de bezinking van discrete deeltjes met deze valsnelheden. Het bezinkbare materiaal beweegt met het water mee (convectief transport) en ten opzichte van het water onder invloed van de zwaartekracht. Daarnaast worden concentratieverschillen tussen naburige cellen verminderd door diffusie van materiaal (diffusief transport). Voor elke cel dienen deze transporten in evenwicht te zijn met de verandering van de concentratie in de cel. Binnen PHOENICS bestaat weliswaar een methode om deze vergelijkingen op te lossen, maar die methode gaat niet samen met de methode voor het simuleren van de lokatie van het wateroppervlak. Daarom zijn nieuwe vergelijkingen voor het transport van bezinkbaar materiaal aan PHOENICS toegevoegd.

In combinatie met de begin- en randvoorwaarden resulteert het oplossen van deze transportvergelijkingen in stromingssimulaties.

3.1.1 Bodem en wanden

Langs de bodem en wanden treedt wrijving op. De mate van wrijving is afhankelijk van de stromingscondities en de ruwheid van de wand. In de simulaties wordt ervan uitgegaan dat de snelheid evenwijdig aan de wand een logaritmische functie is van de afstand tot de wand. Dit resulteert in het algemeen in een goede simulatie van de stroming bij de wand.

Daarnaast zijn bij de bodem de processen van depositie en opwoeling van belang. Deze processen zijn gerelateerd aan de bodemschuifspanning, die wordt berekend op basis van de lokale waarden voor de variabelen waarmee de stroming wordt beschreven. Het ontbreekt aan voldoende gegevens over de bodemschuifspanning waarbij materiaal blijft liggen of wordt opgewoeld. In de ontwerp praktijk voor bergbezinkbassins wordt aangenomen dat onder een schuifspanning van 0,1 tot 0,25 N/m² materiaal blijft liggen. De schuifspanning wordt dan

berekend op basis van een gemiddelde stroomsnelheid over de gehele waterdiepte (zie hoofdstuk 2). Slechts een beperkt hoeveelheid meetgegevens die het gedrag van slib in rioolstelsels beschrijven is voorhanden. Wotherspoon en Ashley (1992) voorspellen opwoeling voor waarden voor de bodemschuifspanning tussen 0,01 tot 5 N/m². Door consolidatie van het slib neemt de schuifspanning waarbij materiaal wordt opgewoeld in de tijd toe. In bergbezinkbassins is de tijd voor consolidatie beperkt. Dit proces is daarom niet meegenomen.

Ook in de waterbouwkunde is het beschrijven van depositie en erosie van belang. Uit de kustwaterbouwkunde zijn gegevens bekend over depositie en opwoeling van fijn slib. Bij gebrek aan meetgegevens is een model van Winterwerp (1993) gekozen. Dit model kent twee kritieke waarden voor de schuifspanning bij de bodem. Wanneer de bodemschuifspanning, τ_b , kleiner is dan de kritieke waarde voor depositie, τ_d , treedt depositie op zoals aangegeven in figuur 7. Voor waarden van de bodemschuifspanning tussen τ_d en de kritieke waarde voor erosie τ_e , treedt geen depositie op en geen erosie. Pas als τ_b groter is dan τ_e treedt erosie op, zoals aangegeven in de figuur.

Voor $0 < \tau_b < \tau_d$: $D = c v_s (1 - \tau_b / \tau_d) A_b$,

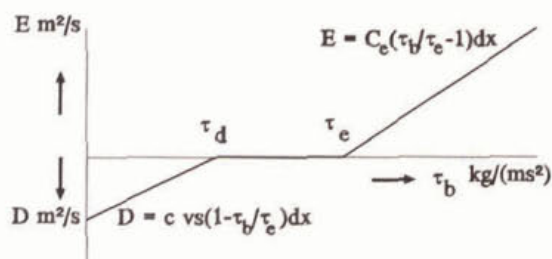
$$E = 0$$

Voor $\tau_d < \tau_b < \tau_e$: $D = 0$ en

$$E = 0$$

Voor $\tau_e < \tau_b$: $D = 0$ en

$$E = C_e (\tau_b / \tau_e - 1) A_b$$



met A_b is het bezinkoppervlak, C_e is een constante, D is de depositieflux en E de erosieflux.

Figuur 7: Sedimentatie op de bodem en erosie hangen af van de bodemschuifspanning τ_b .

Aangenomen wordt dat het bezonken materiaal de stroming niet beïnvloedt. Het model houdt bij hoeveel materiaal op de bodem ligt, zodat beoordeeld kan worden of materiaal beschikbaar is om te worden opgewoeld. De waarde van τ_b wordt bepaald aan de hand van de lokale snelheid evenwijdig aan de bodem en niet aan de hand van de gemiddelde doorstroomsnelheid, zoals in de huidige Nederlandse ontwerpmethodode.

3.1.2 Wateroppervlak

In de evenwichtssituatie kan de lokatie van het wateroppervlak vast worden aangenomen. Bij variaties in de stroming bevindt het wateroppervlak zich ergens in het rekengebied. Bij het wateroppervlak worden randvoorwaarden opgelegd om de demping van turbulentie door het wateroppervlak in rekening te brengen.

3.1.3 Instroom

De instroom van water wordt opgegeven als een massastroom, een daarbij horende snelheid loodrecht op het instroomvlak en waarden voor de turbulentie. De instroom van vuil wordt opgegeven via de vuilconcentratie in het instromende water. De concentratie is dimensieloos. Zo mogelijk wordt deze gelijk gesteld aan 1,0 en worden de vuiltransporten in verhouding tot de instroom beoordeeld.

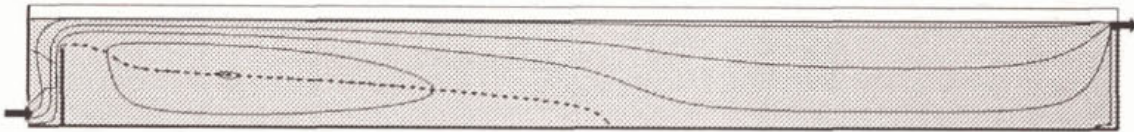
3.1.4 Uitstroom

De uitstroom van water en vuil vindt plaats boven de externe overstort. Aan de hand van een relatie tussen de waterhoogte ter plaatse van de externe overstort en het debiet over de overstort wordt de massa-uitstroom bepaald. Deze methode geeft behalve voor simulaties van de evenwichtssituatie ook goede resultaten voor in de tijd variërende situaties, waarbij mogelijk de uitstroom eerst gelijk aan nul is en op gang moet komen en mogelijk weer ophoudt.

De uitstroom aan vuil is gelijk aan het uitstromende debiet vermenigvuldigd met de concentratie boven de externe overstort.

3.2 Voorbeeld van een 2-dimensionale evenwichtssituatie

Een voorbeeld van een 2-dimensionale stromingssimulatie van de evenwichtssituatie is gegeven in figuur 8.



Figuur 8: Stroomlijnen volgens 2-dimensionale stromingssimulatie van de evenwichtssituatie voor $L = 30,0 \text{ m}$, $B = 8,0 \text{ m}$, $H_e = 3,28 \text{ m}$ en $Q = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Het water is gearceerd. Boven het water bevindt zich lucht. Het water komt links het model binnen en stroomt over de interne overstort. Achter de interne overstort ontstaat een lange neer. De stippellijn geeft aan waar de horizontale snelheid gelijk aan nul is. Beneden deze lijn stroomt het water terug naar links. Voorbij de neer verdeelt het water zich over de gehele diepte. De oppervlaktebelasting is ongeveer 12 m/h .



Figuur 9: Relatieve concentratiecontourlijnen (instroomconcentratie = $1,0$) van deeltjes met een valsnelheid van $5,4 \text{ m/h}$.

Voor deeltjes met een valsnelheid van $5,4 \text{ m/h}$ is in figuur 9 de verdeling van de bezinkbare stoffen gegeven. Duidelijk is dat de laagste concentraties niet bij de externe overstort maar links daarvan optreden.

3.3 Verificatie van de simulaties

De simulaties van de stroming en bezinking moeten worden vergeleken met meetgegevens om te controleren of ze de werkelijkheid voldoende nauwkeurig beschrijven. Meetgegevens

van de stroming in bergbezinkbassins zijn niet beschikbaar. Wel zijn metingen uitgevoerd aan schaalopstellingen van bergbezinkbassins in het laboratorium voor vloeistofmechanica van de Faculteit der Civiele Techniek van de TU Delft. Deze gegevens zijn gebruikt voor het valideren van de stromingssimulaties.

Met PHOENICS is daartoe de stroming in de meetopstelling gesimuleerd. De resultaten kwamen afdoende overeen met de meetgegevens om de stromingssimulaties te kunnen vertrouwen. Naast deze meetgegevens is gebruik gemaakt van nauwkeurige meetgegevens van een andere stromingssituatie: stroming over een plotselinge verdieping (backward facing step). Deze stromingssituatie bevat een neer, net zoals het bergbezinkbassin en kan daarom goed worden gebruikt om de simulatie van zo'n neer te testen. De simulatieresultaten kwamen goed overeen met de meetgegevens.

Verschillen in meetgegevens en simulatieresultaten kunnen worden verkleind door een ander turbulentiemodel toe te passen. Gekozen is echter voor het standaard $k-\epsilon$ turbulentiemodel, omdat dit voor veel verschillende situaties redelijke resultaten geeft. De vergelijking van de stroming in bovenbeschreven situaties met meetgegevens is gegeven in (Kluck, 1997).

De meetopstellingen zijn enige malen kleiner dan echte bergbezinkbassins. Niettemin wordt op basis van deze meetgegevens geoordeeld dat de stromingssimulaties ook de stroming in echte bergbezinkbassins voldoende nauwkeurig beschrijven.

Vervolgens zijn gegevens nodig voor de validatie van het transport van bezinkbaar materiaal. Deze zijn echter in nog mindere mate voor handen dan stromingsgegevens. De beschikbare metingen van het transport van materiaal in een schaalmodel van een bergbezinkbassin, geven slechts een globale indicatie van dat transport, zodat het niet mogelijk is een goede validatie uit te voeren.

De conceptuele opzet van het model met slechts enige modelparameters die nog veranderd zouden kunnen worden, geeft vertrouwen in de werking van het model. Tot de eerste set modelparameters behoren de constanten in het turbulentiemodel. De vergelijking met de meetgegevens van stromingssituaties heeft laten zien dat het standaard $k-\epsilon$ model voldoende nauwkeurig werkt. Een andere modelparameter beïnvloedt in het model de mate van diffusie door turbulentie. Een gevoeligheidsanalyse waarin de diffusie-term met een factor 3 werd vergroot en verkleind wordt in hoofdstuk 6 beschreven. Een laatste groep modelparameters vormen de kritieke waarden voor de schuifspanning bij de bodem voor het beschrijven van depositie en opwoeling. De gevoeligheid van de resultaten van dit onderzoek voor variaties in deze modelparameters wordt ook in hoofdstuk 6 beschreven.

Meetgegevens van het stoftransport aan bassins zijn wenselijk om de simulatie van het stoftransport te valideren. Ook zonder deze meetgegevens wordt toch verwacht dat de resultaten van de stromingssimulaties betrouwbaar zijn voor het beoordelen van effecten van aanpassingen aan het ontwerp op de bezinking in het bassin.

Bij gebrek aan gegevens van instromende concentraties is in dit onderzoek gewerkt met vuileenheden. Voor de instroomconcentratie wordt een dimensieloze concentratie gelijk aan 1,0 aangenomen. De instroom van vuil is dan gelijk aan het debiet vermenigvuldigd met deze concentratie. De uitstroom is gelijk aan de uitstroomconcentratie vermenigvuldigd met het uitstroomdebiet. Om de discussie over de in- en uitstroom van vuil te verduidelijken wordt hier de grootheid vuileenheid (v.e.) geïntroduceerd. De in- en uitstroom zijn nu gelijk aan respectievelijk $c_{in}Q_{in}$ en $c_{uit}Q_{uit}$ vuileenheden per seconde (v.e./s). De in- of uitgestroomde vuilvracht wordt gegeven in vuileenheden (v.e.).

4 Mathematisch model voor het ontwerpen

Met het mathematische model kunnen de stroming en bezinking in bergbezinkbassins met verschillende vormen worden gesimuleerd. Het model kan dus worden gebruikt voor het beoordelen van verschillende stromingssituaties en dus voor het ontwerpen. In dit hoofdstuk worden enige voorbeelden van zulke simulaties gegeven.

4.1 Voorbeeld van een simulatie van het vullen van een bassin

Als voorbeeld wordt de stroming en bezinking in een bassin gesimuleerd. Het debiet en de instroomconcentratie zijn constant verondersteld. In eerste instantie is het bassin leeg. Het vullen van het bassin wordt gesimuleerd totdat een evenwichtssituatie is bereikt. Het bassin is 2-dimensionaal gesimuleerd. Het bassin is 30 m lang. Het water stroomt aan de linkerkant over de onderste 0,57 m binnen met een constant debiet van $q = 0,1 \text{ m}^3/(\text{s}\cdot\text{m})$, wat overeenkomt met $0,8 \text{ m}^2/\text{s}$ in het 8 m brede bassin. De oppervlaktebelasting van het bassin is 12 m/h. De hoogten van de interne en externe overstorten zijn respectievelijk 1,5 en 2,0 m.

L 30 m
 H_i 1,5 m
 H_e 2,0 m
 q $0,1 \text{ m}^2/\text{s}$ ($B = 8 \text{ m}$, $Q = 0,8 \text{ m}^3/\text{s}$)
 s_o 12 m/h.

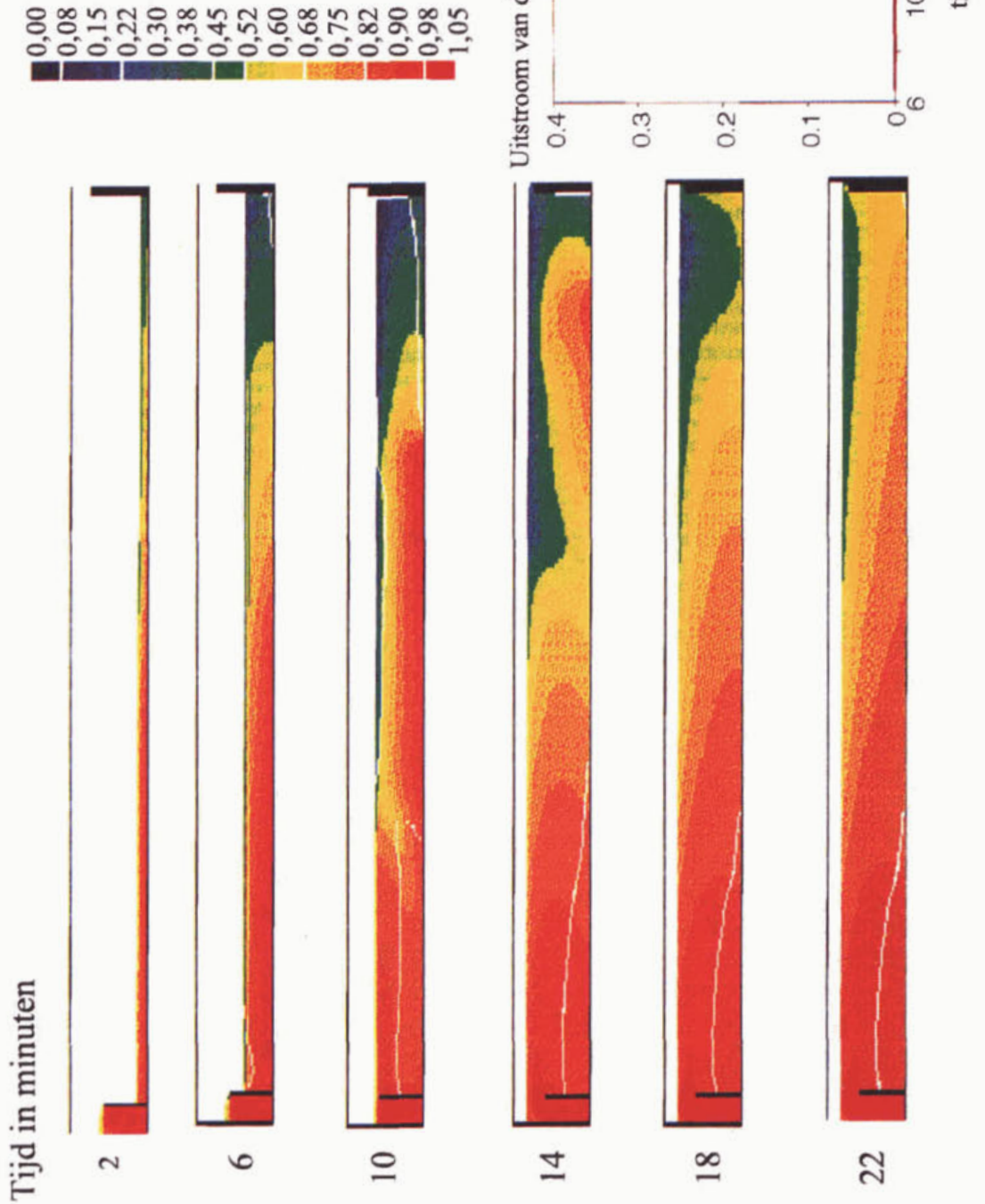
Figuur 10 geeft de verdeling van deeltjes met een valsnelheid van 5,4 m/h tijdens het vullen van een bassin totdat een evenwichtssituatie is bereikt. De stroming van water en lucht is gesimuleerd, maar alleen de stroming van water is weergegeven. De figuur geeft de situaties na 2, 6, 10, 18 en 22 minuten.

Stroming: Het water met de bezinkbare deeltjes stroomt aan de linkerkant over de interne overstort het bassin in. De witte lijnen geven aan waar de horizontale snelheid gelijk is aan nul. Na 6 minuten stroomt het water in het grootste gedeelte van het bassin naar rechts. Alleen bij het wateroppervlak, vlak achter de interne overstort, stroomt water naar links. Achter de interne overstort draait het water rechtsom in een neer. Als de interne overstort verdronken raakt, draait de richting van het rondkolkende water om en ontstaat een lange neer. Na twaalf minuten is het bassin vol en stroomt water over de externe overstort. De stroming bereikt dan snel een evenwichtssituatie. De concentratie bereikt pas later een evenwichtssituatie.

Concentratie: De kleuren geven de concentraties van het vuil aan. De instroomconcentratie is gelijk aan 1,0 gekozen. Blauw duidt op schoon water en rood is de maximum concentratie aan vuil (in de figuur 1,05). Door bezinking en hindering van depositie op de bodem, komen concentraties hoger dan de instroomconcentratie voor. Door bezinking worden de concentraties bij de externe overstort tijdens het vullen lager dan de instroomconcentratie. Een ander opvallend punt is dat een pluim met hoge concentraties naar voren schiet, terwijl schoner water van bij de externe overstort aan het wateroppervlak naar links stroomt. Dit is ook zichtbaar in de grafiek rechts onder in de figuur. Deze geeft de uitstroom van het

Concentraties van bezinkbaar materiaal tijdens het vullen van een tank

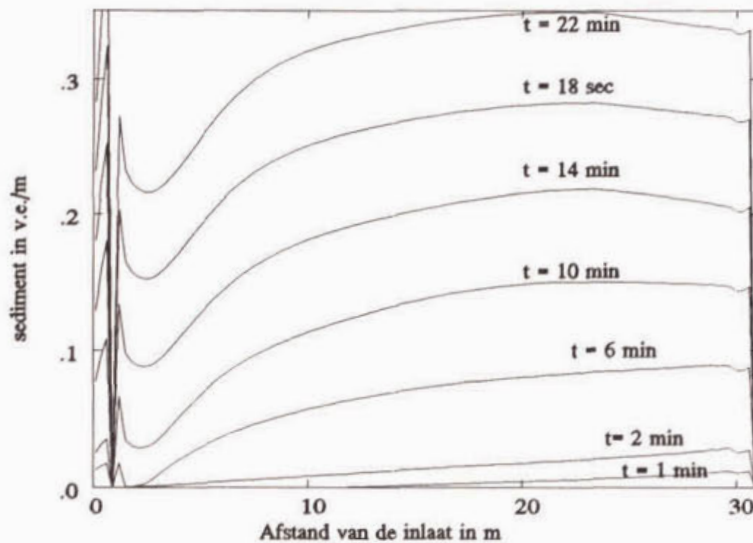
$L = 30 \text{ m}$
 $B = 8 \text{ m}$
 $H_e = 2 \text{ m}$
 $Q = 0.8 \text{ m}^3/\text{s}$
 $V_s = 5.4 \text{ m/h}$



Figuur 10: Verdeling van bezinkbare deeltjes met een valsnelheid van 5,4 m/h tijdens het vullen. De oppervlaktebelasting is 12 m/h

bezinkbare materiaal in de tijd.

Figuur 11 geeft de ophoping van vuil op de bodem in vuileenheden per meter breedte van het bassin (2-dimensionale simulatie).



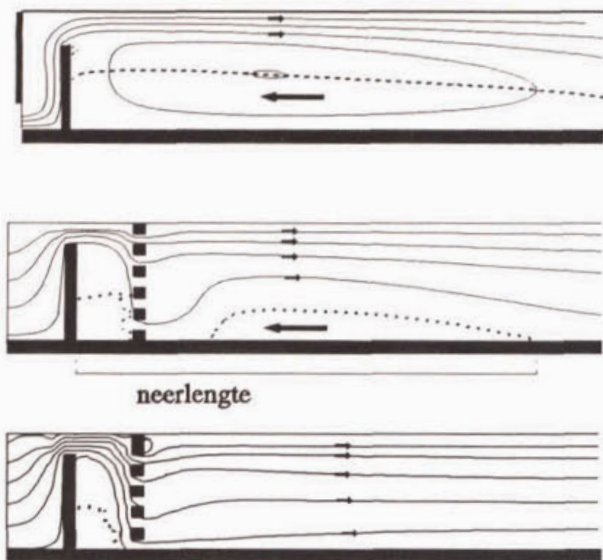
Figuur 11: Ophoping van sediment op de bodem. De x-as geeft de afstand tot de instroom.

4.2 Diffusiewand

Met het mathematische model kan het effect van aanpassingen in de stroming op de bezinking worden onderzocht. In het algemeen wordt aangenomen dat in de neer geen bezinking optreedt en daarmee dat het verhinderen van zo'n neer een positief effect heeft op de bezinking in het bassin. Voor het onderzoeken van het effect van een diffusiewand wordt uitgegaan van de evenwichtssituatie.

Door het toevoegen van een diffusiewand kan de neer bijna volledig worden weggewerkt. Zie figuur 12. De vormgeving van de diffusiewand heeft invloed op de mate waarin de neer wordt weggewerkt. Het rendement door bezinking (in de evenwichtssituatie) blijkt echter niet zoveel hoger als zou worden verwacht op basis van de verlenging van de bezinkzone.

Bijvoorbeeld: in een bassin van 40 m lang met een 2 m hoge interne overstort heeft de neer een lengte van circa 14 m. De lengte van de bezinkzone is dan 26 m. Wanneer door het toevoegen van een diffusiewand de neer volledig wordt weggewerkt en als wordt aangenomen dat de bezinkzone op 5 m achter de interne overstort weer begint, is de bezinkzone 35 m lang. De oppervlaktebelasting is dan $26/35$ keer kleiner, zodat het rendement door bezinking groter zal zijn. Afhankelijk van de valsnelheid, de gemiddelde stroomsnelheid en de oppervlaktebelasting zal (volgens deze aanpak) het rendement ongeveer 8 tot 12 % (absoluut) groter zijn. Volgens de resultaten van de stromingssimulaties is de toename van het rendement een stuk minder: 0 tot 6%.



Figuur 12: Effect van een diffusiewand op de stroomlijnen.

5 Ontwerpformules

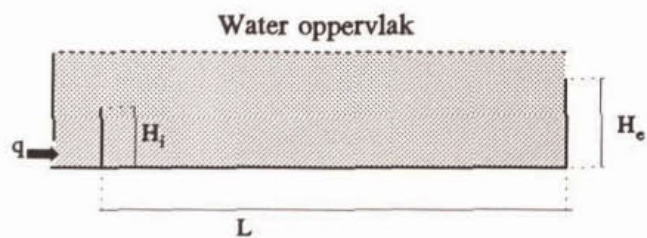
5.1 Inleiding

Het is in de praktijk niet mogelijk uitgebreide stromingssimulaties uit te voeren voor elk ontwerp dat wordt gemaakt. Ten eerste is de rekentijd daarvoor te lang, ten tweede vereist dit simuleren een duur stromingssimulatiepakket en de nodige ervaring met zulke pakketten. Gelukkig is dat ook niet nodig. Voor rechthoekige bassins met een 2-dimensionale doorstroming zijn stromingssimulaties uitgevoerd van de evenwichtssituatie. Aan de hand van deze simulaties zijn ontwerpformules opgesteld waarmee het rendement kan worden voorspeld.

5.2 Simulaties voor het afleiden van ontwerpformules

Om ontwerpformules af te leiden is een groot aantal stromingssimulaties uitgevoerd van de evenwichtssituatie in rechthoekige bassins met een 2-dimensionale doorstroming. Omdat het wateroppervlak in de evenwichtssituatie niet van plaats verandert, is deze niet berekend en is de bovenkant van het stroomgebied zo gekozen dat deze samenvalt met het wateroppervlak.

Figuur 13 geeft de algemene lay-out van het 2-dimensionale stroomgebied. In de verschillende berekeningen zijn het debiet (per meter breedte in dit 2-dimensionale geval), de lengte tussen de overstorten, de hoogte van de overstorten en de valsnelheden gevarieerd. De valsnelheid varieerde tussen 0,25 en 25 m/h. De hoogte van de interne overstort H_i was 75% van de hoogte van de externe overstort



Figuur 13: Lay-out van het 2-dimensionale stroomgebied.

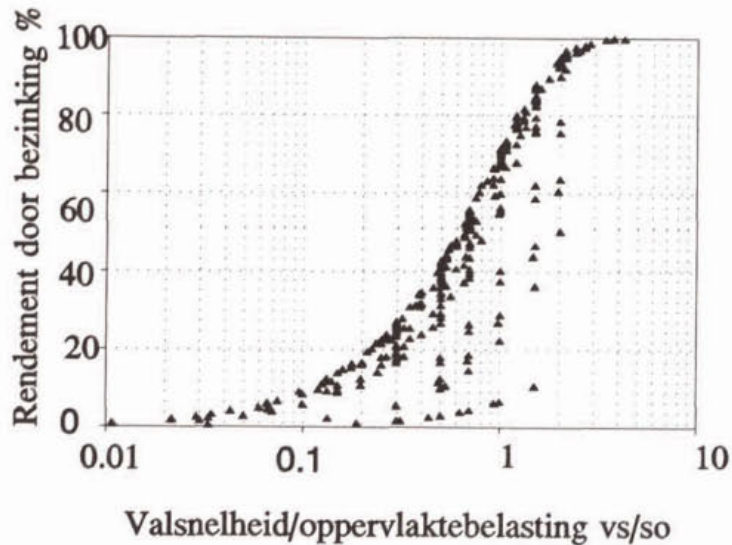
H_e . Omdat het volume van een bassin in belangrijke mate het totaalrendement bepaalt, is bij gelijke belasting en gelijk volume het effect onderzocht van variaties in de verhouding tussen lengte en breedte. In de 2-dimensionale situatie wordt dit bereikt door combinaties met gelijke waarden voor de gemiddelde verblijftijd $T=q/(L*H_e)$ door te rekenen. Deze combinaties kunnen worden beschouwd als die van 3-dimensionale bassins met gelijk volume en belasting.

In de evenwichtssituatie is het rendement, RR, in het geheel toe te schrijven aan bezinking. Het is een functie van de instroom van vuil (IN) en de uitstroom van vuil (UIT):

$$RR = \frac{IN-UIT}{IN} \quad (3)$$

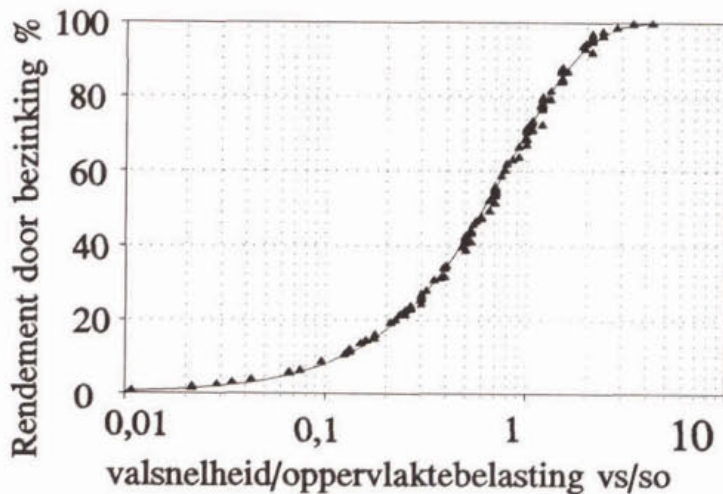
5.3 Afleiding van de ontwerpformules

Elke simulatie resulteerde in het rendement door bezinking voor vijf verschillende valsnelheden.



Figuur 14: Berekende rendementen versus v_s/s_o voor evenwichtssituaties in rechthoekige tanks.

Figuur 14 geeft alle berekende rendementen. De x-as geeft de valsnelheid v_s gedeeld door de oppervlaktebelasting s_o . Alle punten blijken beneden een duidelijke lijn te liggen. Wanneer alleen die punten worden weergegeven, die horen bij simulaties waarin de gemiddelde horizontale snelheid u kleiner is dan 0,15 m/s, blijken deze punten de bovenste lijn te vormen. Zie figuur 15.



Figuur 15: Berekende rendementen versus v_s/s_o voor de evenwichtssituatie in rechthoekige tanks met $u < 0.1$ m/s en de lijn volgens vergelijking 4.

Deze punten kunnen zeer goed worden beschreven met de volgende vergelijking:

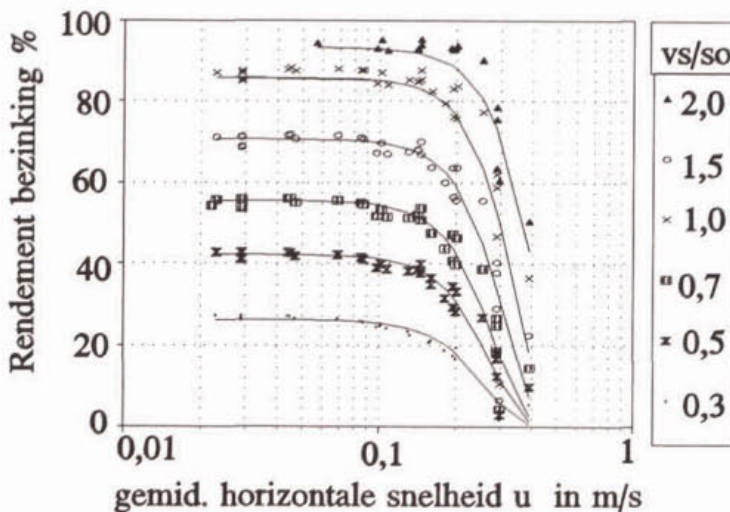
$$R_0 = 100 * \left(1 - e^{-1,22 * \left(\frac{v_s}{s_0} \right)^{1,16}} \right) \% \quad (4)$$

Voor situaties waarin de gemiddelde horizontale snelheid kleiner is dan 0,15 m/s geeft R_0 het rendement door bezinking in rechthoekige bassins in de evenwichtssituatie. Voor grotere waarden van u neemt het rendement snel af. Dit heeft de volgende twee oorzaken. In de eerste plaats hoort bij een hogere gemiddelde horizontale snelheid een hogere graad van turbulentie. Dit veroorzaakt meer diffusie en heeft dus een negatief effect op de bezinking. In de tweede plaats wordt de depositie van deeltjes op de bodem gehinderd als de schuifspanning bij de bodem boven een kritieke waarde komt.

Voor situaties met u groter dan 0,15 m/s kan de volgende vergelijking worden gebruikt.

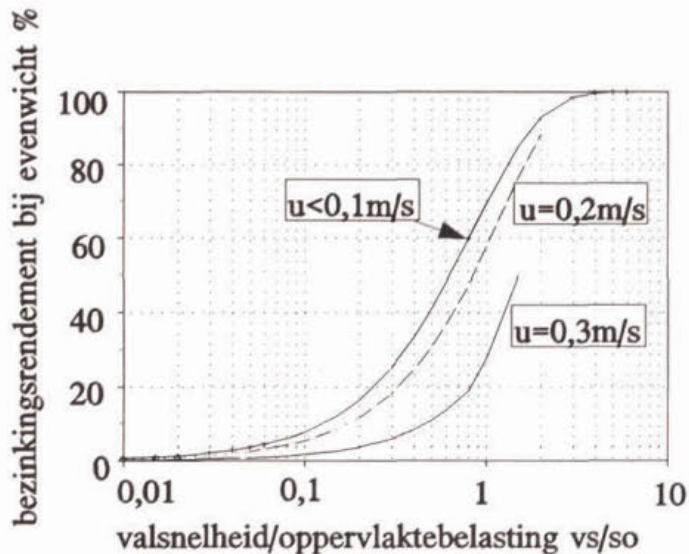
$$RR = 100 * \left(1 - e^{-1,22 * \left(\frac{v_s}{s_0} \right)^{1,16}} \right) * e^{A_1 * u^{A_2}} \% \quad (5)$$

- met $A_1 = 100$ als $v_s/s_0 < 0,8$
 en $A_1 = 146,7 - 58,3 * v_s/s_0$ als $0,8 \leq v_s/s_0 < 2,5$
 en $A_1 = 0$ als $v_s/s_0 > 2,5$
 $A_2 = 3,38 + 0,4 * v_s/s_0$ als $v_s/s_0 < 1,3$
 en $A_2 = 3,9$ als $v_s/s_0 \geq 1,3$



Figuur 16: Rendement versus u voor verscheidene waarden van v_s/s_0 .

Voor waarden van u kleiner dan 0,15 m/s geeft deze vergelijking praktisch dezelfde rendementen als vergelijking voor R_0 (vergelijking 4), maar bij toenemende horizontale snelheden wordt de voorspelling slechter. Zie figuur 16, die is gebruikt om de vergelijking op te stellen. Vergelijking 5 geeft het rendement RR door bezinking voor de evenwichtssituatie in rechthoekige bassins bij 2-dimensionale doorstroming. De vergelijking is grafisch weergegeven in figuur 17.



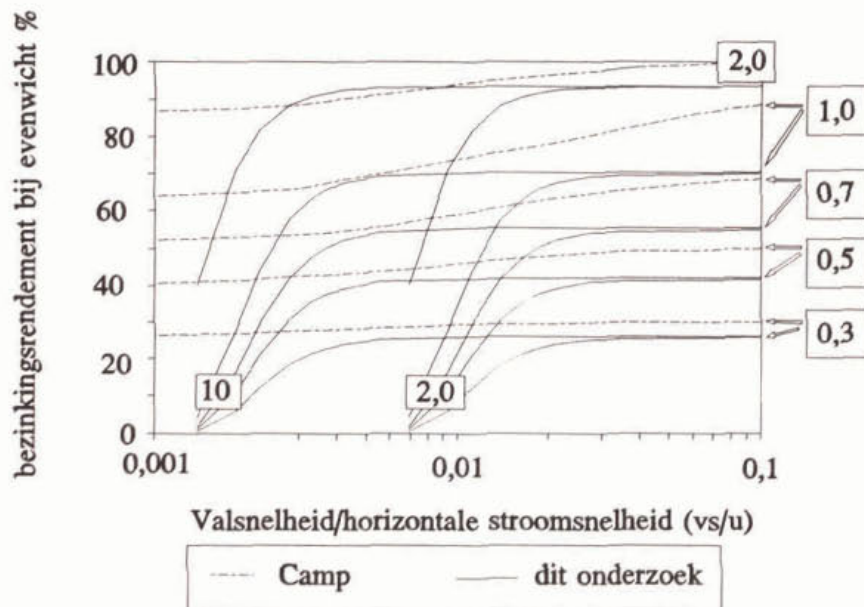
Figuur 17: Voorspelling van het rendement als een functie van v_s/s_0 en u voor evenwichtssituaties in rechthoekige tanks, volgens vergelijking 5.

5.4 Verschillen met Camp

In de huidige Nederlandse ontwerpmethode wordt het rendement door bezinking voorspeld met behulp van de grafiek van Camp (figuur 4). In deze paragraaf worden het rendement door bezinking volgens de Camp-grafiek en dat volgens vergelijking 5 met elkaar vergeleken. Om deze vergelijking te kunnen maken moet een valsnelheid worden gekozen. Figuur 18 geeft de lijnen volgens Camp en die volgens vergelijking 5 bij valsnelheden van 2 en 10 m/h. In tegenstelling tot de lijnen volgens de Camp-grafiek geven de lijnen van het onderhavige onderzoek een duidelijke afname in het rendement aan voor afnemende waarden van v_s/u . Dit wordt veroorzaakt door de hogere diffusie door turbulentie en door hindering van depositie bij hogere waarden van de horizontale snelheid. Deze afname is niet aanwezig in de lijnen volgens Camp, omdat daar hindering van depositie niet in de vergelijkingen was opgenomen en de diffusie door turbulentie in rekening was gebracht op basis van 1-dimensionale stroming.

Ook voor hoge waarden van v_s/u verschillen de rendementen volgens vergelijking 5 van die volgens de Camp-grafiek. De Camp-grafiek voorspelt voor hoge waarden van v_s/u een rendement gelijk aan de verhouding v_s/s_0 of 100%. Zoals figuur 18 laat zien, komt vergelijking 5 lager uit.

De rendementen zijn moeilijk te vergelijken. Dit is het gevolg van het feit dat de rendementen volgens de Camp-grafiek gebaseerd zijn op bezinking in een gedeelte van het bassin waarvoor de stroming uniform is aangenomen (bezinkzone), terwijl die volgens het onderhavige onderzoek gelden voor bezinking in het gehele bassin (inclusief de neer). De oppervlaktebelasting gebaseerd op alleen de bezinkzone is hoger dan die gebaseerd op het gehele bassin. Om de rendementen volgens beide methoden te kunnen vergelijken, moeten de rendementen volgens de resultaten van dit onderzoek worden vergeleken met die volgens Camp met lagere waarden voor v_s/s_o .

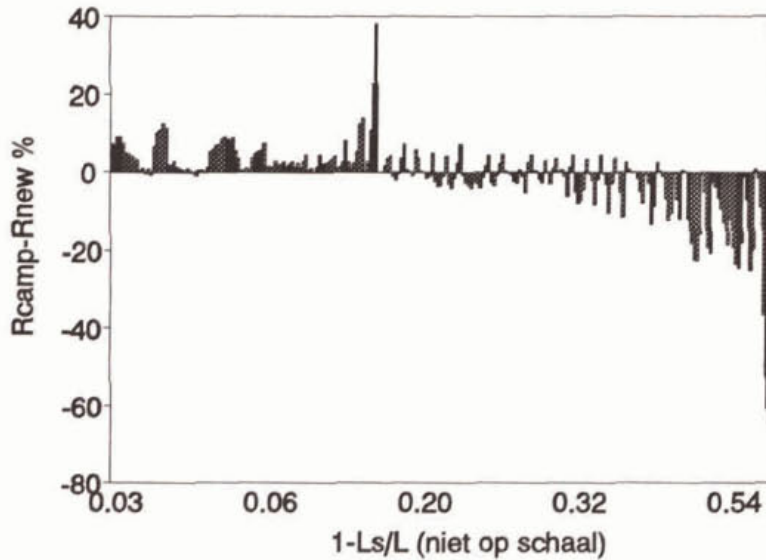


Figuur 18: Presentatie van de resultaten van dit onderzoek en het rendement volgens Camp. Voor Camp is s_o gebaseerd op de bezinkzone, voor dit onderzoek op de gehele tank.

Voor een situatie waarin de bezinkzone 80% van het bassin beslaat, is de oppervlaktebelasting op basis van de bezinkzone 125% van die op basis van het gehele bassin. Om de rendementen te kunnen vergelijken zou het rendement volgens dit onderzoek voor $v_s/s_o = 1$ moeten worden vergeleken met een rendement volgens Camp voor $v_s/s_o = 0.8$. In dat geval komt het rendement volgens dit onderzoek hoger uit.

Voor een betere vergelijking van de resultaten moeten ontwerpen van bassins op basis van de beide rekenmethodes worden vergeleken. Daartoe is voor verschillende maten van bassins en verschillende belastingen het rendement berekend volgens de Camp-grafiek en volgens vergelijking 5.

Figuur 19 geeft de verschillen in rendementen. De verticale as geeft het verschil tussen het rendement volgens de Camp-grafiek en vergelijking 5. Een positieve waarde duidt op een hogere voorspelling door de Camp-grafiek. Om deze vergelijking te kunnen maken, is de aanname gedaan dat de neer een lengte van 7 keer de hoogte van de interne drempel heeft. De lengte van de uitstroomzone is verwaarloosd. De lengte van de bezinkzone is dan $L_s = L - 7 \cdot H_i$.



Figuur 19: Het rendement volgens Camp min het rendement volgens dit onderzoek.

In de figuur nemen de waarden van $1-L_s/L$ van links naar rechts toe, zodat de lengte van de bezinkzone (en dus de toename van de oppervlaktebelasting voor Camp) rechts in de grafiek het belangrijkste is.

In elke simulatie zijn de rendementen voor vijf verschillende valsnelheden berekend. De verschillen tussen de rendementen volgens Camp en vergelijking 5 kunnen groot zijn. De grootste overschatting (door Camp ten opzichte van de resultaten van dit onderzoek) van het rendement (34%) werd berekend voor de situatie met een hoge horizontale stroomsnelheid (0,44 m/s). In alle gevallen waarin het rendement volgens Camp hoger is dan volgens vergelijking 5 was de gemiddelde horizontale snelheid hoger dan 0,15 m/s en dus het gevolg van het niet meenemen van hindering van depositie door Camp. In de Nederlandse ontwerppraktijk wordt een ontwerp zo gemaakt dat de waarden van de stroomsnelheid of de schuifspanning zo klein zijn dat erosie of hindering van depositie niet wordt verwacht. Hierdoor is dit verschil tussen vergelijking 5 en de Camp-grafiek voor de praktijk niet van belang.

De rendementen volgens de Camp-grafiek waren lager dan die volgens dit onderzoek voor de gevallen waarin de neer aanzienlijk werd gereduceerd. De grootste onderschatting (61%) werd berekend voor een diep bassin, waarin de neer tot enige meters was gereduceerd. Het effect is het duidelijkst voor de gevallen waarin de valsnelheid ongeveer gelijk is aan de oppervlaktebelasting.

Vergelijking 5 geeft een realistischer voorspelling van het rendement door bezinking in de evenwichtssituatie dan de Camp-grafiek. Dit is het gevolg van de in dit onderzoek realistischer beschrijving van de processen in de bassins:

- A) Dit onderzoek baseert de resultaten op stromingssimulaties in het gehele bassin en niet op een aangenomen uniforme stroming in een gedeelte van het bassin.
- B) Het effect van turbulentie op de verspreiding van bezinkbare deeltjes wordt in rekening gebracht op basis van (gesimuleerde) lokale waarden van de turbulentie. In

de Camp-grafiek wordt dit effect in rekening gebracht op basis van de turbulentie in een 1-dimensionale stromingssituatie.

- C) Hindering van depositie en het effect van erosie worden in rekening gebracht op basis van lokale snelheden bij de bodem. Deze effecten zijn niet aanwezig in de Camp-grafiek.

Vergelijking 5 kan eenvoudig in een rekenmachine of een computerprogramma worden ingevoerd.

Om bovenstaande redenen zou de nieuwe vergelijking moeten worden gebruikt.

5.5 Conclusie

Aan de hand van de simulaties is een vergelijking afgeleid waarmee het rendement door bezinking voor de evenwichtssituatie bij 2-dimensionale stroming in rechthoekige bassins kan worden voorspeld. Dit rendement is een functie van v_s/s_o en u . Het hoogste rendement wordt verkregen in bassins met hoge waarden voor v_s/s_o , dus lage oppervlaktebelastingen. Dit betekent dat voor het verkrijgen van een zo hoog mogelijk rendement het bassin zo ondiep mogelijk dient te zijn. Voor waarden van u kleiner dan 0,15 m/s hangt het rendement alleen af van v_s/s_o . Dit betekent dat de verhouding tussen lengte en breedte dan geen invloed heeft op het rendement. Voor stroomsnelheden groter dan 0,15 m/s neemt het rendement sterk af. Bassins zouden daarom zo moeten worden ontworpen dat de gemiddelde horizontale snelheid niet te vaak groter is dan 0,15 m/s. Dit kan worden bereikt door een voldoende groot doorstroomoppervlak te ontwerpen, of door de aanleg van een by-pass voor de interne overstort, die het debiet door het bassin beperkt.

De opgestelde vergelijking (vergelijking 5) is gebaseerd op een realistischere beschrijving van de processen in een bassin en geeft daarom een realistischere voorspelling dan de Camp-grafiek.

6 Gevoeligheidsanalyse

De vergelijking voor de voorspelling van het rendement is gebaseerd op simulaties van 2-dimensionale stromingssituaties in de evenwichtssituatie. In werkelijkheid wordt de evenwichtssituatie mogelijk niet bereikt en kunnen 3-dimensionale stromingen belangrijk zijn. Een ander punt is dat het model enige parameters bevat, waarvan de exacte waarden onbekend zijn, maar die invloed kunnen hebben op de bezinking en dus op het rendement.

Om te onderzoeken of de vergelijking ook kan worden gebruikt voor het vullen van het bassin en voor veranderingen in het debiet (dus voor tijdsafhankelijke belastingen) zijn simulaties uitgevoerd van het vullen van het bassin en van sprongen in het debiet (paragraaf 6.1).

Om te onderzoeken hoezeer de aanname dat de stroming in een bassin 2-dimensionaal is de uitkomst beïnvloedt, zijn ook simulaties in drie dimensies uitgevoerd (paragraaf 6.2).

Tot slot is de gevoeligheid van het model onderzocht voor variaties in de randvoorwaarde voor depositie en opwoeling bij de bodem en voor de mate van invloed van turbulentie op de verspreiding van materiaal.

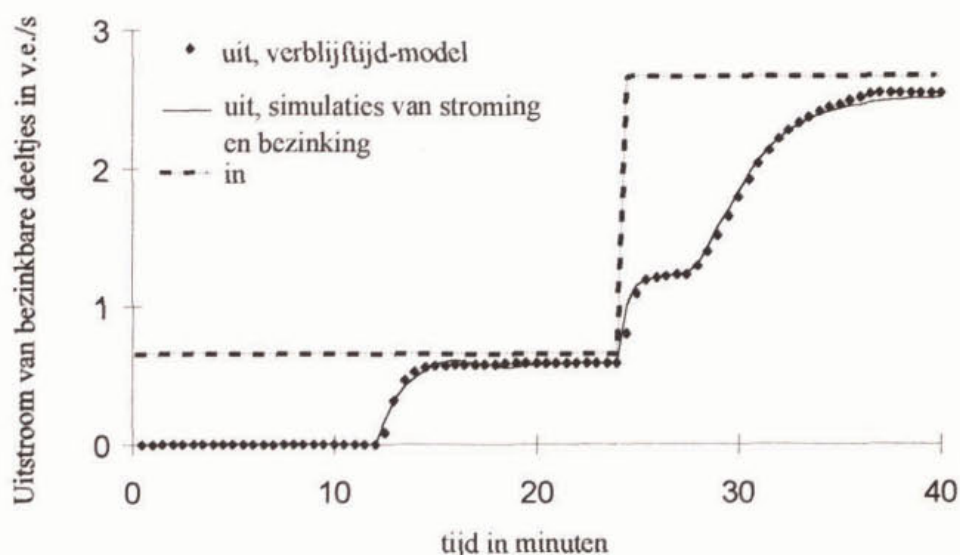
6.1 Tijdsafhankelijk 2-dimensionaal

De vergelijking voor de voorspelling van het rendement is gebaseerd op simulaties van de evenwichtssituatie. Zoals in hoofdstuk 1 is gesteld, is het niet zeker of een ontwerp gebaseerd op de voorspelling van het rendement bij permanente belasting het beste rendement voor tijdsafhankelijke belastingen geeft. Het zal duidelijk zijn dat permanente belastingen in de praktijk niet voorkomen, het debiet en de concentratie variëren immers in de tijd. Daarnaast moet worden bedacht dat het vullen van het bassin invloed heeft op de bezinking.

Om te onderzoeken in hoeverre de vergelijking kan worden gebruikt voor het voorspellen van het rendement voor bassins die in eerste instantie leeg zijn en belast worden met veranderende belastingen, zijn simulaties van het vullen en van sprongen in het debiet uitgevoerd. Voor een beschrijving van deze simulaties wordt verwezen naar (Kluck, 1997). De resultaten van deze simulaties leiden net zoals de simulaties van de evenwichtssituatie tot de conclusies dat de oppervlaktebelasting zeer belangrijk is voor het rendement en dat de verhouding van L/B niet zo belangrijk is.

Aan de hand van de simulaties is een rekenmethode opgezet die de vuiluitworp voorspelt voor bassins die in eerste instantie leeg zijn en onderworpen zijn aan veranderende belastingen. Deze rekenmethode bepaalt het rendement op basis van vergelijking 5 en de verblijftijd van het water en vuil in het bassin. De kern van de methode is dat vergelijking 5 herschreven wordt door de oppervlaktebelasting te vervangen door $s_0 = H/T$. De verblijftijd wordt zo nauwkeurig mogelijk berekend op basis van het tijdsafhankelijke debiet door te bepalen wanneer een druppel die het bassin uitstroomt het bassin is binnengestroomd. Zie voor een nadere uitleg van de methode (de Cock e.a., 1997). Voor de verschillende gesimuleerde tijdsafhankelijke belastingen bleek de rekenmethode zeer goed de vuiluitworp te kunnen voorspellen. Ook voor het bergbezinkbassin in Amersfoort kwam de vuiluitworp

volgens de rekenmethode goed overeen met de meetgegevens (gegevens uit RIONED, 1995). Hierbij was de valsnelheid echter niet bekend, zodat deze moest worden gekozen. Zie figuur 20, waarin op de verticale as de in- en uitstroom van bezinkbare deeltjes per seconden (ve./s = vuileenheden per seconde) zijn gegeven. De ene uitstroom is het resultaat van de simulaties van stroming en bezinking, de andere is berekend met van de Cock e.a. (1997).



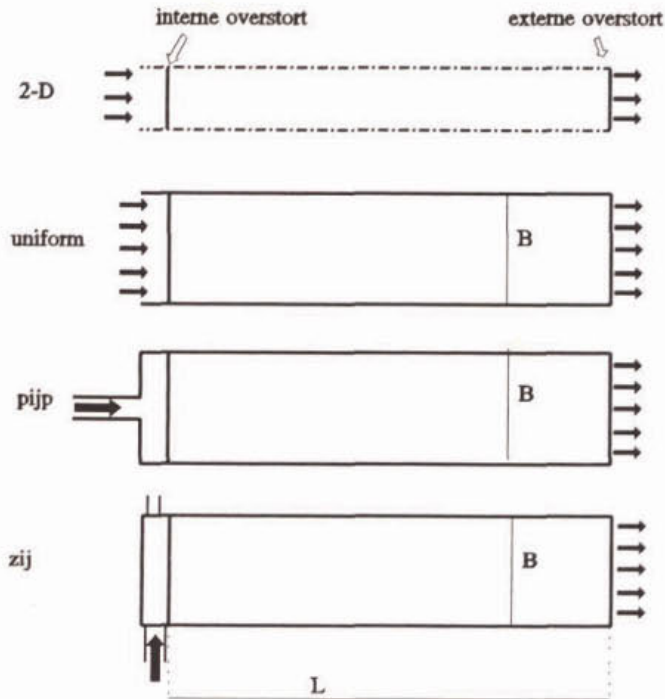
Figuur 20: Uitstroom uit een tank volgens stromingssimulaties en vereenvoudigde rekenmethode (de Cock e.a. 1997).

Met behulp van deze rekenmethode is het mogelijk het effect van een bassin voor een overstortingsreeks (uitstroom uit een rioolstelsel als gevolg van een regenreeks) te bepalen.

6.2 3-dimensionale effecten

Stromingssimulaties in drie dimensies zijn uitgevoerd om te onderzoeken in hoeverre de vergelijking gebaseerd op 2-dimensionale stromingssimulaties geldig is voor de realiteit, waarin de stroming altijd enigszins en soms zeer 3-dimensionaal is. Tevens geeft dit inzicht in het effect van 3-dimensionale stroming op het rendement.

De stroming in een bergbezinkbassin is niet 2-dimensionaal, maar 3-dimensionaal. Door wrijving langs de wanden zal zelfs bij een perfect over de breedte verdeelde instroom een 3-dimensionaal stromingspatroon ontstaan. Om 3-dimensionale effecten op het rendement door bezinking te onderzoeken zijn stromingssimulaties uitgevoerd van de situaties in figuur 21: Een 2-dimensionale simulatie (**2-D**), een 3-dimensionale simulatie met een uniforme instroom (**uniform**), een 3-dimensionale simulatie met een invoer via een pijp in de hoofdstroomrichting bij de bodem voor de interne overstort (**pijp**) en een 3-dimensionale simulatie met een invoer via een pijp loodrecht op de hoofdstroomrichting (**zij**). Het debiet is $0,42 \text{ m}^3/\text{s}$ en het bassin is $L*B*H_e = 28,75*5*2,4 \text{ m}^3$. Tabel 3 geeft de rendementen voor 5 valsnelheden. Er is amper verschil voor de situaties die min of meer 2-dimensionaal zijn. Alleen het laatste geval met een instroom voor de interne overstort loodrecht op de hoofdstroomrichting (zoals



Figuur 21: Bovenaanzicht van 2- en 3-dimensionale stromingssituaties.

bij het bassin van Amersfoort) ontstaat een sterk 3-dimensionale stroming en is het rendement aanzienlijk lager.

Tabel 3: Rendementen door bezinking volgens 2-dimensionale en 3-dimensionale simulaties van hetzelfde bassin met verschillende instroomconfiguraties.

	model			
	2-D	3-D uniform	3-D pijp	3-D zij
v_s m/h	RR %	RR %	RR %	RR %
0,25	2,2	2,3	2,2	2,2
1,54	13,5	13,6	13,6	12,5
6,19	47,1	47,4	48,2	38,9
13,9	80,5	80,8	82,4	64,3
24,7	96,6	96,6	97,3	83,3

Op basis van bovenstaande resultaten is de vereenvoudiging van de stroming tot 2-dimensionaal voor de meeste gevallen toegestaan. Verder wordt geconcludeerd dat een ontwerp zo moet worden gemaakt dat grote 3-dimensionale stromingssituaties worden voorkomen.

Voor het voorspellen van het rendement van bassins met een 3-dimensionale doorstroming is geen rendementsformule afgeleid. Door middel van stromingssimulaties kan een schatting worden gemaakt en inzicht worden verkregen hoe voor de bezinking de stromingssituaties kunnen worden verbeterd.

6.3 Effect van parameters in de stromingssimulaties op het rendement

Over de relatie tussen snelheid, turbulentie, schuifspanning, concentratie en sediment is nog niet voldoende bekend. Nochtans is zo'n relatie in een randvoorwaarde voor depositie en opwoeling gestopt (Hoofdstuk 3). Onderzocht is in welke mate variaties in de parameters in deze randvoorwaarde het rendement beïnvloeden. Dit effect bleek voor gevallen waarin $u < 0,15$ m/s klein te zijn⁽²⁾.

Als eerste test is de waarde voor de kritische schuifspanning τ_d waarboven geen materiaal meer sedimenteert op zo'n wijze gevarieerd dat depositie totaal werd verhinderd ($\tau_d = 0$). Vervolgens werd de waarde verhoogd, zodat depositie eerder optrad. Voor kleine waarden van de horizontale snelheid (u) bleek het verschil zeer klein. De simulaties lieten verder zien dat de waarde voor u waarboven het rendement omlaag duikt iets varieert voor de verschillende waarden van τ_d , maar dat 0,15 m/s nog steeds een goede grens is.

6.4 Effect van de parameters in diffusie termen op het rendement

Volgens het eddy-viscositeitsconcept is de diffusie van materiaal door turbulentie evenredig met de eddy-viscositeit. In de berekening van deze diffusie wordt een constante toegepast waardoor de eddy-viscositeit wordt gedeeld: het Schmidt-getal. Doorgaans wordt hiervoor een waarde tussen 0,5 en 2 aangenomen. Er zijn geen gegevens beschikbaar aan de hand waarvan kan worden besloten welke waarde moet worden gekozen, zodat standaard de waarde 1,0 is aangehouden. Om het effect van variaties in deze waarde te onderzoeken zijn ook simulaties uitgevoerd met waarden voor het Schmidt-getal gelijk aan 1/3 en 3, wat overeenkomt met een 3 keer zo groot en 3 keer zo klein effect van diffusie (laminair en turbulent) op de verspreiding van materiaal. Tevens zijn simulaties uitgevoerd voor zeer hoge waarden van het Schmidt getal, zodat diffusie werd onderdrukt. Het effect was klein en acceptabel. Alleen wanneer de depositie gehinderd was, zodat de concentraties bij de bodem hoger werden, werd het effect belangrijk.

6.5 Conclusie

De gevonden vergelijking voor het rendement door bezinking voor 2-dimensionale bassins in de evenwichtsvergelijking (vergelijking 5) blijkt bruikbaar voor tijdsafhankelijke situaties. Voor stromingssituaties met min of meer 2-dimensionale stroming blijkt een vereenvoudiging tot 2-dimensionaal te voldoen. Bij belangrijke 3-dimensionale stromingsstructuren wordt het rendement lager.

⁽²⁾ In goed ontworpen tanks zal u in de meeste gevallen kleiner dan 0,10 m/s zijn.

Het effect van variaties in de wijze van berekening of parameters in de bodemrandvoorwaarde is verwaarloosbaar voor situaties waarin de horizontale snelheid kleiner is dan ongeveer 0,15 m/s. Voor hogere waarden wordt het effect onzekerder. Aangeraden wordt om bassins zo te ontwerpen dat u niet te groot wordt.

7 Kortsluitstromingen

Wanneer de stroomsnelheid laag wordt en het doorstroomoppervlak groot, neemt de kans op kortsluitstromingen toe. Camp heeft metingen uitgevoerd aan een bassin om een schatting te geven van de kans op kortsluitstromingen aan de hand van de waarde van het Froude-getal (Camp, 1946). Deze methode is beschreven in hoofdstuk 2.

De stromingssimulaties uitgevoerd in het kader van dit onderzoek zijn niet geschikt om de kans op kortsluitstromingen te onderzoeken. De 2-dimensionale stromingssimulaties laten geen variaties in de breedte toe. Echter, ook de 3-dimensionale simulaties geven, door de wijze waarop de turbulentie is gemodelleerd, onvoldoende inzicht in de kans op kortsluitstromingen. Een relatie tussen het rendement en Froude-getal kan daarom niet worden onderzocht. Om zo'n relatie af te leiden dienen metingen te worden verricht. De gesimuleerde grote, over de tijd gemiddelde stromingsstructuren zijn een vorm van kortsluitstromingen. Aangetoond is dat zo'n kortsluitstroming in het verticale vlak, zoals een neer, geen groot effect heeft op het rendement. Een neer in het horizontale vlak en grote 3-D structuren hebben daarentegen een veel groter effect op het rendement. Deze dienen te worden voorkomen.

Bij gebrek aan andere gegevens dan die in figuur 5, dient het Froude-getal te worden gehandhaafd voor het beoordelen van de kans op dichtheidstromingen.

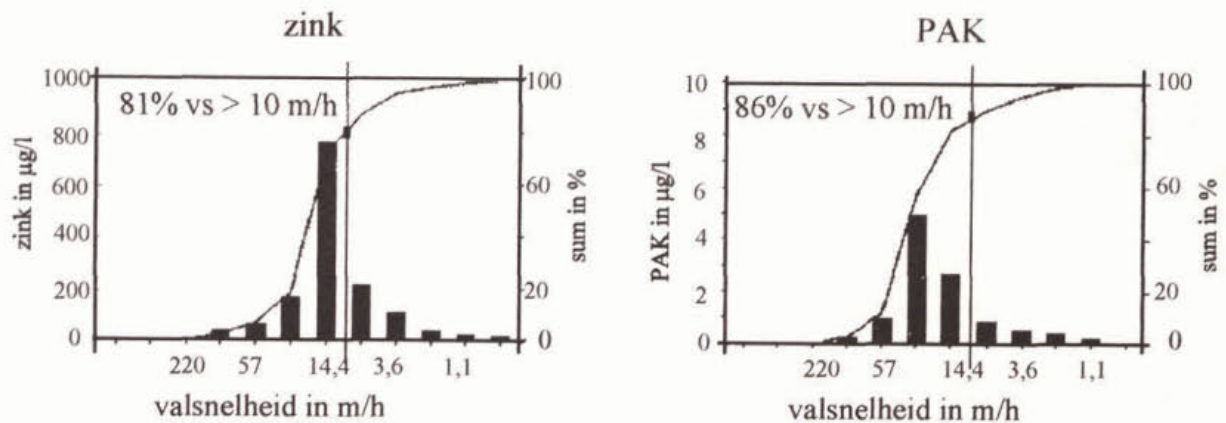
Daarbij dienen de opmerkingen in hoofdstuk 2 ter harte te worden genomen:

- * De grens van $1 \cdot 10^{-5}$ is geen strikte grens.
- * Bij overschrijding van deze grens dient niet te worden aangenomen dat het rendement nul wordt.

8 Samenstelling van het overstortend water

De samenstelling van het overstortende water is ondanks de in het verleden uitgevoerde meetcampagnes nog niet voldoende bekend. Voor het voorspellen van het functioneren van randvoorzieningen die door middel van bezinking vuil tegenhouden en voor het goed ontwerpen van deze randvoorzieningen dient de samenstelling van de instroom bekend te zijn. Aangezien de valsnelheid in zeer grote mate het rendement door bezinking bepaalt, zouden voor verschillende vuilparameters (zoals BZV, zware metalen, etc.) relaties tussen concentraties van vuil in het overstortende water en valsnelheid bekend moeten zijn. Michelbach en Wörle (1994) en Pargneux (1995) beschrijven speciaal daarvoor ontworpen bezinkkolommen waarmee zulke relaties rechtstreeks kunnen worden gemeten. Figuur 22 geeft een voorbeeld van zo'n relatie. Zoals blijkt verschillen de resultaten per gebeurtenis. Daarnaast zullen de resultaten per lokatie verschillen. Aan de hand van zulke relaties is het mogelijk te besluiten welke valsnelheden moeten worden aangenomen bij het ontwerpen. Daarnaast maken zulke relaties een betere schatting van hoeveel vuil wordt tegengehouden mogelijk.

Relaties zoals in figuur 22 (maar dan voor overstortend water) zijn vooralsnog onvoldoende beschikbaar. Zonder dit soort relaties dienen bergbezinkvoorzieningen te worden ontworpen op aangenomen maatgevende valsnelheden. In Nederland wordt veelal 5 of 10 m/h aangenomen. Gezien het belang van de valsnelheid voor de bezinking verdient het aanbeveling dit soort relaties in de nabij toekomst voor verschillende rioolstelsels te onderzoeken. Naar verwachting zullen de relaties per situatie en per geval verschillen.



Figuur 22: Voorbeeld van een relatie tussen valsnelheid en drogestofgehalte in water uit gemengd stelsel. Naar Michelbach en Wörle (1997)

9 Kosten

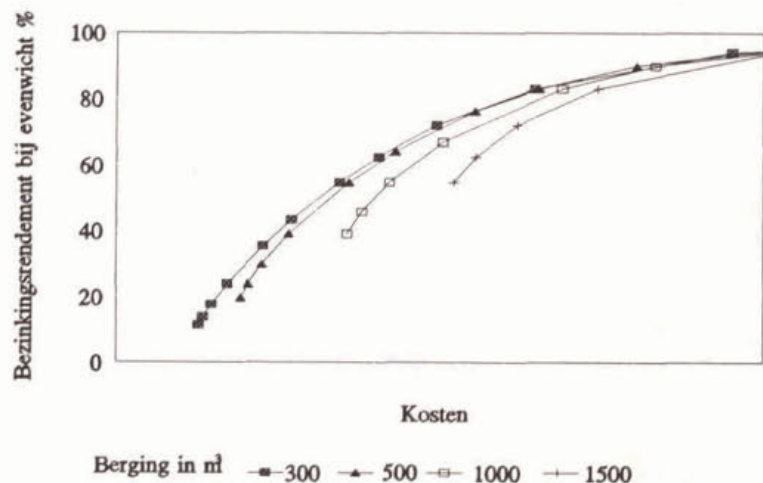
De kosten van bergbezinkvoorzieningen variëren tussen 200 en 5.000 gulden per m³. Wanneer ze van beton worden gemaakt zijn de kosten in het algemeen hoger dan 1.000 gulden per kubieke meter. De kosten per kubieke meter nemen af met toenemend volume. Meer informatie wordt gegeven in de Leidraad riolering (1995).

Om investeringen te beoordelen dienen de kosten te worden afgewogen tegen de baten, i.e. de reductie van de vuilemissie. Enerzijds kunnen kosten versus volume en vorm worden geschat. Anderzijds kan met de resultaten van dit onderzoek een relatie worden gelegd tussen vorm en het bezinkingsrendement bij evenwicht. Daarmee kunnen relaties tussen kosten en dit rendement worden gelegd. Zulke relaties kunnen worden opgesteld voor verschillende waarden voor berging, voor verschillende verhoudingen tussen lengte en breedte en voor een zodanige verhouding dat de horizontale stroomsnelheid net niet te groot is.

Hieronder wordt een voorbeeld gegeven. Dit voorbeeld geeft echter alleen de relatie tussen kosten en rendement door bezinking bij evenwicht, terwijl voor een goede afweging van de kosten en de baten ook het effect van berging op de vuilemissie moet worden meegenomen. Het rendement door berging is veelal zeker zo belangrijk als dat door bezinking. Voor het maken van een goede afweging tussen het vergroten van het oppervlak van het bassin (meer bezinking) of het vergroten van het volume (berging) dienen beide effecten meegenomen te worden. Daartoe zal het functioneren van verschillende bassins ten gevolge van een regenreeks moeten worden onderzocht. Op basis van zulke berekeningen kan een goed gefundeerde keuze worden gemaakt.

Voorbeeld

Als voorbeeld voor de relatie tussen reductie van de vuilemissie door bezinking bij evenwicht is voor verschillende volumes het rendement bij verschillende bassindieptes berekend. Daarbij is de verhouding tussen lengte en breedte zo gekozen dat de horizontale snelheid niet groter dan 0,1 m/s werd en dus het rendement hoger is naarmate het bassin ondieper is (oppervlaktebelasting lager). Voorts is aangenomen dat de kosten van het bassin toenemen naarmate het bassin ondieper wordt, omdat meer grond en meer beton wordt gebruikt en omdat de overspanning van het dak steeds groter wordt. Voor een gekozen belasting en valsnelheid resulteerde dit in figuur 23.



Figuur 23: Relatie kosten versus rendement door bezinking in evenwichtssituatie voor voorbeeldsituatie.

Omdat de kosten afhankelijk zijn van de aannamen, zijn expres geen waarden op de kostenas weergegeven.

Voor de gekozen aannamen kan worden geconcludeerd dat de kosten en de rendementen toenemen bij afnemende diepten. Er bestaat voor elk volume een punt met een optimale verhouding tussen rendement en kosten. Het vergroten van het volume verhoogt de kosten, maar maakt dat een hoger rendement wordt bereikt. Het vergroten van het volume vergroot bovendien het rendement door berging, wat niet is weergegeven. Om een goede afweging van de kosten en de baten te kunnen maken dient ook het rendement door berging mee te worden genomen.

10 Conclusies

Om de vervuiling van het oppervlaktewater te verminderen zullen veel bergbezinkbassins worden aangelegd. Het is echter niet zeker of de huidige ontwerpmethoden resulteren in ontwerpen met een optimaal rendement. Om te onderzoeken op welke wijze bassins moeten worden ontworpen voor het verkrijgen van een optimaal rendement, is het stromingssimulatiepakket PHOENICS aangepast en toegepast voor de simulatie van de stroming en bezinking in bergbezinkbassins. Op basis van zulke simulaties kunnen bassins voor uiteenlopende situaties worden ontworpen, rekening houdend met het vullen en variaties in de stromingscondities.

Voor rechthoekige bassins is een vergelijking afgeleid waarmee op basis van de vorm van het bassin en de belasting (valsnelheid van het vuil en debiet) het rendement door bezinking in de evenwichtssituatie kan worden voorspeld (vergelijking 5).

De stromingssimulaties lieten zien dat wanneer de gemiddelde horizontale stroomsnelheid niet groter is dan ongeveer 0,15 m/s, het rendement door bezinking in de evenwichtssituatie alleen afhankelijk is van de verhouding v_x/s_o . Dit betekent dat de verhouding tussen lengte en breedte dan niet van belang is. Hierbij dient te worden aangetekend dat dit het resultaat was van 2-dimensionale simulaties.

Wanneer de gemiddelde horizontale stroomsnelheid groter is dan ongeveer 0,15 m/s, is het rendement aanzienlijk lager. Daarom dient een ontwerp zo te worden gemaakt dat deze kritieke stroomsnelheid niet te vaak worden overschreden. Met een by-pass voor de interne overstort kan worden voorkomen dat de gemiddelde horizontale stroomsnelheid te groot wordt.

De rendementen volgens dit onderzoek verschillen van die volgens Camp. Aangezien de aannames in dit onderzoek realistischer zijn dan die waarop de grafiek van Camp is gebaseerd, zijn de resultaten ook realistischer.

Het feit dat de verhouding tussen lengte en breedte het rendement niet noemenswaardig beïnvloedt (als de horizontale stroomsnelheid niet te groot is) betekent dat de aanname dat bezinking alleen in de bezinkzone optreedt niet juist is. Uit dat oogpunt heeft het vernietigen van de neer (om de bezinkzone te vergroten) door het plaatsen van een duikschot of een diffusiewand weinig zin. Stromingssimulaties lieten dit zien.

Sterk 3-dimensionale stromingssituaties hebben een beduidend lager rendement door bezinking in de evenwichtssituatie dan grotendeels 2-dimensionale stromingssituaties. Daarom dienen bassins zo te worden ontworpen dat verwacht kan worden dat de stromingssituatie praktisch 2-dimensionaal is. Voor het creëren van 2-dimensionale stromingssituaties kan een diffusiewand wel nuttig zijn.

De valsnelheid heeft een zeer grote invloed op het rendement. Om de werking van een bassin nauwkeuriger te kunnen voorspellen en optimale ontwerpen te kunnen maken, dienen relaties

tussen vuil en valsnelheden van de vuildeeltjes bekend te zijn. Daarvoor zijn metingen noodzakelijk.

Voor elk bassinvolume bestaat een optimale verhouding tussen rendement door bezinking en kosten. De verhoudingen zullen per situatie anders zijn. Om een goede afweging van de kosten en de baten te kunnen maken dient ook het rendement door bezinking mee te worden genomen.

11 Tot slot, naar het ontwerp van optimaal functionerende bergbezinkbassins

Met de resultaten van dit onderzoek is het mogelijk bergbezinkvoorzieningen beter te ontwerpen. Voorheen werden deze ontworpen op basis van het functioneren in een evenwichtssituatie, waarbij het rendement werd gebaseerd op de bezinking volgens een 1-dimensionale transportvergelijking voor een gedeelte van het bassin (de bezinkzone). De resultaten van het onderhavige onderzoek zijn gebaseerd op een realistischer beschrijving van de processen en geven daarom een realistischer voorspelling van het rendement in de evenwichtssituatie.

Een volgende stap op weg naar het ontwerpen van optimaal functionerende randvoorzieningen is het gebruik van een rekenmethode waarin de effecten van het vullen en variaties in de tijd worden meegenomen en het functioneren van bergbezinkvoorzieningen wordt beoordeeld voor regenreeksen. Op basis van de in het onderhavige onderzoek afgeleide vergelijking voor het rendement in de evenwichtssituaties is zo'n methode ontwikkeld. Met zo'n rekenmethode kan het effect door berging en bezinking realistischer worden meegenomen, dan in de huidige ontwerppraktijk.

Daarnaast vereist het ontwerpen van optimaal functionerende bergbezinkbassins dat de samenstelling van de instroom in het bassin beter bekend is, zodat een ontwerp van een bassin kan worden gebaseerd op de verdeling van de valsnelheden in relatie tot het instromende vuil.

Wanneer aan deze punten is voldaan, kunnen optimale bergbezinkvoorzieningen worden ontworpen. Dat wil zeggen, bergbezinkvoorzieningen met een zo hoog mogelijk rendement in verhouding tot de kosten.

Het ontwerpen van een bergbezinkbassin op de wijze zoals aangegeven in het vorige hoofdstuk garandeert echter zeker niet een goede waterkwaliteit. Het effect van lozingen op de waterkwaliteit is nog onvoldoende bekend.

Literatuur

- Aalderink R.H. (1995). *Cursus "Vuiluitworp uit rioolstelsels", Mogelijkheden beperkingen van vuiluitworpmodellen; resultaten van een vergelijkend onderzoek*, PATO, Delft.
- Camp T.R. (1946). *Sedimentation and the design of settling tanks*, Trans ASCE, 111, pp 895-936.
- Cock D. de, Cock J. de, Kluck J. en Veldkamp R.G. (1997), *Een conceptueel model voor de vuiluitworp van bergbezinkbekkens bij niet-permanente belasting*, Stichting RIONED.
- CUWVO VI (1992). *Aanbevelingen voor het beleid en de vergunninglening met betrekking tot overstorting uit rioolstelsels en regenwaterlozingen*, CUWVO VI: subwerkgroep Eisen rioolwateroverstorten.
- Kluck J. (1997). *The design of optimally functioning storm water tanks*. Proefschrift Technische Universiteit Delft, ISBN 90-407-1452-5, Delft University Press.
- Koot A.C.J. (1980). *Behandeling van afvalwater*, 1980, Waltman, Delft.
- Michelbach S. en Wörle C. (1994). *Settleable solids from combined sewers: settling, stormwater treatment, and sedimentation rates in rivers*. Wat. Sci. Tech. Vol 29, no. 1-2, pp 95-102.
- Noord-Brabantse waterkwaliteitsbeheerders (1995). *Handleiding ontwerp randvoorzieningen II 1995*.
- NWRW 8.1 (1987). *Rendement randvoorziening bergbezinkbassin Amersfoort*.
- Pargneux L. le (1995), *Testing of the settling tube to determine settling distributions of sludge*, Ecole Nationale des Ponts et Chaussees, Parijs.
- RIONED (1994). *Het riool in cijfers 1994*, Stichting RIONED, Ede
- RIONED (1995). *Sewer overflow pollution, standardized research data of the NWRW project 1982-1989*, project nr. 89-1 "Standardization of Sewer Network Calculations", subproject SR1, Stichting RIONED, Ede.
- Leidraad Riolering (1995), Verschillende auteurs, *Leidraad Riolering, Module C2100-1, 1995: Rioleringsberekeningen, hydraulisch functioneren*, Samson H.D. Tjeenk Willink, Alphen aan den Rijn.
- Winterwerp J.C. et al. (1993). *Erosion of natural sediments from the Netherlands, Model simulations and sensitivity analysis*, Delft Hydraulics, Delft.
- Wotherspoon D.J.J. en Ashley R.M. (1992). *Reological measurements of the yield strength of combined sewer sediment deposits*. in Proc. First IAWQ workshop on sewer sediment, Brussels. Wat. Sci. Techn. 25, pp 165-169.

Symbolen

A_s	oppervlak bezinkzone
A_b	bezinkoppervlak
B	breedte
C_c	constante
c_{in}	instroomconcentratie bezinkbare deeltjes
c_{uit}	uitstroomconcentratie bezinkbare deeltjes
D	depositieflux
E	erosieflux
v_s	valsnelheid
u	horizontale stroomsnelheid
Fr	Froude-getal
g	zwaartekrachtversnelling
H	waterdiepte
H_i	hoogte interne overstort
H_e	hoogte externe overstort
IN	vuilvracht in
k	kinetische energie van de turbulente beweging
L	lengte
L_s	lengte bezinkzone
s_o	oppervlaktebelasting
Q	debiet
Q_{in}	instroomdebiet
Q_{uit}	uitstroomdebiet
q	debiet per strekkende meter
R	hydraulische straal
R_0	rendement door bezinking in evenwichtssituatie zonder hindering van depositie
Re	getal van Reynolds
RR	rendement
T	verblijftijd
t_A	gemiddelde doorstroomtijd
t_i	initiële doorstroomtijd
UIT	vuilvracht uit
V	volume
ϵ	dissipatie van de energie van de turbulente beweging
ν	kinematische viscositeit
τ_b	bodemschuifspanning
τ_c	kritische waarde van bodemschuifspanning voor erosie
τ_d	kritische waarde van bodemschuifspanning voor depositie

