
Plan van aanpak voor vervolgonderzoek ten behoeve van de verbetering van het hydraulisch rekenmodel voor geometrisch open filterconstructies in open waterlopen

ir. M. Hauer
augustus 1997

Inhoudsopgave

| | | |
|----|-----------------------------------|---------|
| 1. | Inleiding | pag. 01 |
| 2. | Probleembeschrijving | pag. 03 |
| 3. | Aanbevolen activiteiten | pag. 12 |
| | Literatuur | pag. 13 |

1. Inleiding

Dit plan van aanpak is geschreven als een logisch vervolg op de resultaten van het onlangs voltooide project FILTERS [3]. Eén van de belangrijkste resultaten van dit project betreft de constatering dat er grote onzekerheden bestaan op het gebied van de formulering van een betrouwbaar stabiliteitscriterium voor de basislaag (en eventuele filterlagen) onder bodemverdedigingen in een open waterloop. Bij gebrek aan bruikbare meetgegevens voor niet uniforme stroombeelden zijn de analyses daarbij nog beperkt gebleven tot de situatie bij een uniforme, relatief laag turbulente stroming in de open waterloop. Voor niet uniforme en/of relatief hoog turbulente stroombeelden is alleen een mogelijke formulering voor de stabiliteitscriteria van toplaag, filterlagen en basislaag aangegeven - de praktische waarde van deze formulering kon echter nog niet getoetst worden.

Tijdens de laatste fase van het project FILTERS zijn (losstaand van dit project) in het Laboratorium voor Vloeistofmechanica van de TU Delft ook proeven uitgevoerd. Deze proeven betreffen de metingen die Patrick van Os ten behoeve van zijn afstudeerscriptie heeft verricht. Het verslag van de proeven van Patrick Van Os was op het moment van schrijven van dit plan van aanpak nog niet gereed. De auteur heeft echter enkele malen toegekeken bij deze proeven en heeft zodoende al enige weet van wat er bij deze proeven zoal is opgemeten. Bij de proeven van Patrick van Os zijn voor het eerst ook

instantane signalen voor de stroomsnelheden *in de poriën* van een poreus medium opgemeten. Deze informatie ontbrak nog bij het opstellen van een stabiliteitscriterium voor de basislaag ten behoeve van het project FILTERS. Uit een eerste beschouwing van de resultaten van Van Os kan worden geconcludeerd dat het bij de opstelling van dit stabiliteitscriterium veronderstelde beeld van de fysica (relatief kleine gemiddelde stroomsnelheden met relatief grote fluctuaties bij een toplaag in een open waterloop) in grote lijnen inderdaad overeenstemt met het werkelijke fysische beeld van de stroming in de toplaag. Van Os heeft echter ook enkele zaken gemeten die hiervan afwijken. Zijn metingen moeten echter eerst nog verder worden uitgewerkt voordat hieraan definitieve conclusies kunnen worden verbonden. Desalniettemin zullen de eerste indrukken over de meetresultaten van Van Os bij het opstellen van dit plan van aanpak toch in de beschouwingen worden meegenomen.

In hoofdstuk 2 zal de problematiek eerst in het kort in kaart worden gebracht. Het gaat daarbij om een ordening van de diverse aspecten die een rol spelen bij het bepalen van het kritieke stadium voor instabiliteit van een basislaag onder een toplaag. Deze worden in dit hoofdstuk op overzichtelijke wijze op een rij gezet. Uit dit rijtje volgen daarna als vanzelfsprekend de te ondernemen activiteiten. Deze worden in hoofdstuk 3 besproken.

Voor de beschrijving van de relatie tussen belasting en stabiliteit van loskorrelig materiaal onder bodemverdedigingen in een open waterloop komen verschillende parameters in aanmerking: de snelheid in de poriën (u), het verhang op het grensvlak (i), de druk op de korrels (p) en de schuifspanning op de korrels (τ). Bij een keuze daartussen spelen o.a. de volgende aspecten een rol:

- correcte beschrijving van het stabiliteitsmechanisme
- praktische hanteerbaarheid bij het ontwerpen
- optimaal gebruik van in het verleden uitgevoerde onderzoeken

Voor het gebruik van de parameter u pleit het feit dat dit goed aansluit bij de informatie die uit stromingsmodellen komt en dat de stabiliteit van bodemverdedigingen in stroming veelal beschreven wordt met snelheden (incl. fluctuaties). Het (gemiddelde) verhang i wordt doorgaans gebruikt om de stabiliteit te beschrijven van een filtergrensvlak bij een filterbakproef of een daarmee vergelijkbare praktijksituatie (bijv. filter onder een drempel of caisson). Dit is echter een wezenlijk andere situatie dan de situatie bij een bodemverdediging in een open waterloop. Tijdens de eerder genoemde studie [3] in het kader van het project FILTERS [3] kwam naar voren dat in deze situatie vooral de turbulente drukfluctuaties (p) een belangrijke rol spelen bij de belastingoverdracht in de poriën van het filter. De snelheidsfluctuaties in de poriën zijn in sterke mate gerelateerd aan deze drukfluctuaties. De schuifspanning τ tenslotte, wordt veel gebruikt bij de beschrijving van de stabiliteit van de korrels van een toplaag in een stroming in een open waterloop. Het is echter niet gebruikelijk deze parameter te hanteren bij de beschrijving van de stabiliteit van een filtergrensvlak *onder* die toplaag.

- Op grond van bovengenoemde criteria en overwegingen wordt toegewerkt naar een uiteindelijke beschrijving op basis van de snelheid in de poriën (u) omdat dat voor de ontwerppraktijk het meeste perspectief biedt.

Om de resultaten van de in het verleden uitgevoerde filterbakproeven te kunnen gebruiken zal daarbij een relatie moeten worden gelegd met het verhang i . Waar de drukfluctuaties nodig zijn om het mechanisme te kunnen begrijpen, zullen deze in het onderzoek moeten worden meegenomen. In verband met de praktische hanteerbaarheid van het op te stellen stabiliteitscriterium (aansluiting bij informatie uit stromingsmodellen) zal echter wel worden gestreefd naar een beschrijving waarin uitsluitend snelheden voorkomen. Toekomstig onderzoek zal moeten uitwijzen of dit werkelijk haalbaar is.

2. Probleembeschrijving

In bijlage D van de eindrapportage [3] voor het project FILTERS is een modellering beschreven voor het stabiliteitscriterium voor een basislaag, die direct is gelegen onder een toplaag in een open waterloop met een uniform stroombeeld. Binnen dit criterium is sprake van een belasting door de som van een tijdsgemiddeld verhang \bar{i} en een belasting door een in de tijd fluctuerend verhang, dat samenhangt met de doordringing van turbulente drukfluctuaties vanuit de grenslaag in de waterloop tot onderin de toplaag. De maximum amplitude van het fluctuerend verhang is daarbij met i'' aangeduidt. Bij het in [3] beschreven stabiliteitscriterium is sprake van falen van de basislaag wanneer de som ($\bar{i} + i''$) groter wordt dan het kritiek verhang i_{cr} , waarbij deeltjes uit de basislaag gaan eroderen. Voor de waarden voor het kritiek verhang is daarbij uitgegaan van de tijdens filterbakproeven opgemeten waarden, zoals beschreven door de Forchheimerrelatie en de formule van Klein Breteler in de meest recente CUR-leidraad [8]. Binnen deze modellering geeft de amplitude i'' het verschil weer tussen de situatie bij een filter in een open waterloop en de situatie bij een filterbakproef (filter onder een drempel, zonder contact met turbulente grenslaag in waterloop erboven, $i'' = 0$).

Voor de amplitude i'' van de fluctuaties is in [3] onderstaande formulering gehanteerd:

$$i'' = \alpha \cdot \bar{i} \quad \text{met} \quad \alpha = f(h, d_t, n_t, D_{15t}, L, T) \quad (1)$$

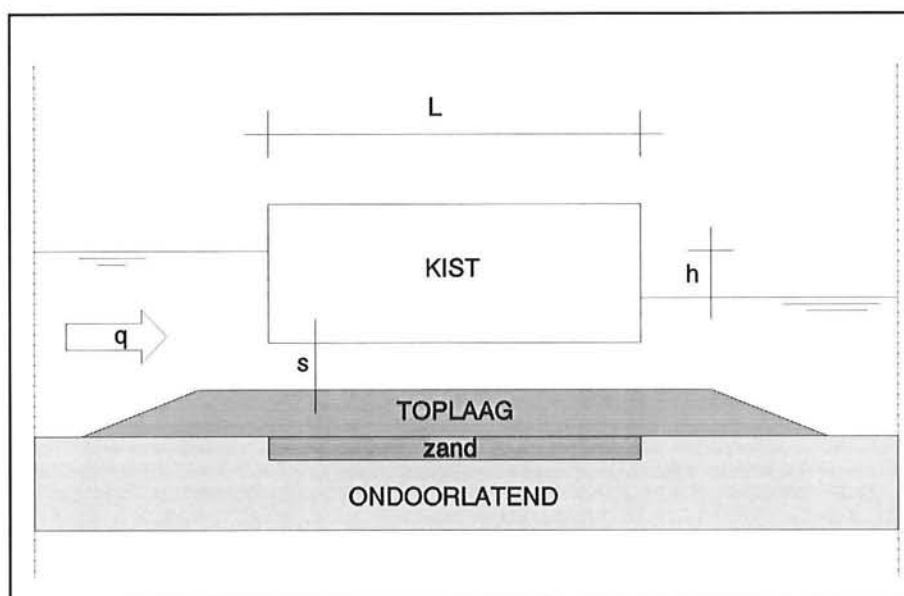
| | | | |
|---------|-----------|---|---|
| waarin: | h | = | waterdiepte |
| | d_t | = | dikte toplaag |
| | n_t | = | porositeit toplaag |
| | D_{15t} | = | D_{15} toplaag |
| | T | = | karakteristieke periode van de drukfluctuaties in de grenslaag |
| | L | = | karakteristieke lengteschaal van drukfluctuaties in de grenslaag |

Deze formulering is opgesteld met behulp van inzichten die zijn opgedaan tijdens de bestudering van meetresultaten van één van de modelproeven die in het kader van het WL-onderzoek Q572 [7] zijn uitgevoerd. Deze bestudering is als bijlage C ook in de eindrapportage [3] opgenomen. Voor meer details wordt verwezen naar de genoemde bijlagen C en D.

Formulering (1) kan worden vergeleken met resultaten van het modelonderzoek van Patrick van Os. Hierbij zij vooraf opgemerkt dat de in dit plan van aanpak gegeven

getalswaarden voor de metingen van Van Os als voorlopige, grove inschattingen moeten worden opgevat - het nog te voltooien meetverslag van Van Os zal één en ander nog nader moeten bevestigen. De gegeven informatie en getalswaarden zijn gebaseerd op de indrukken die de auteur als toeschouwer heeft opgedaan tijdens enkele meetsessies en tijdens enkele gesprekken met Van Os.

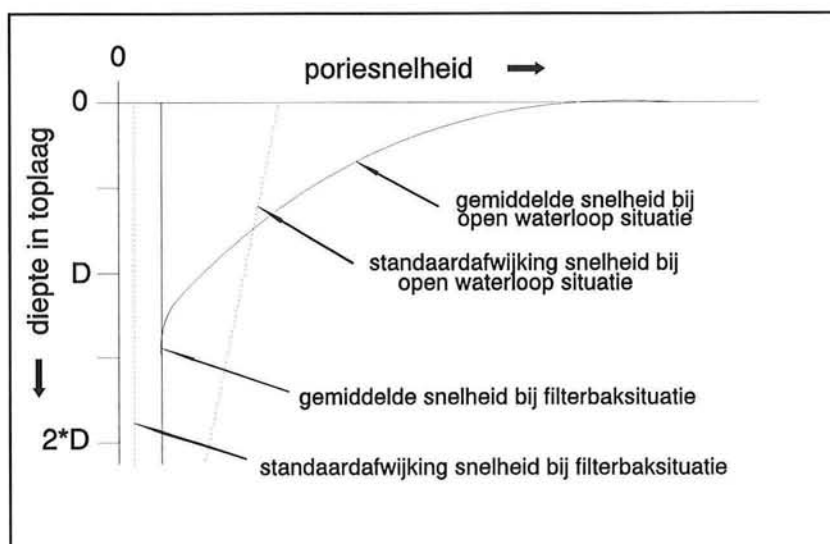
In figuur 1 is een schets van de proefopstelling van Van Os gegeven. Zijn opstelling bestond uit een stroomgoot, waarin een in de hoogte verstelbare houten kist was aangebracht. Door de kist geheel neer te laten, tot op de toplaag van grind, kon een analoge situatie als bij een filterbakproef worden gecreëerd. Door de kist iets op te heffen ontstond er spleetstroming tussen de onderkant van de kist en de bovenkant van de toplaag. Daarnaast kon de kist ook geheel worden opgeheven (onderkant kist boven waterspiegel), waarbij een analoge situatie als bij de proeven voor WL-onderzoek Q572 (open waterloop situatie) optrad. De stroming door de goot werd ingesteld door het debiet door de goot in te stellen, waarbij de hiermee corresponderende verhangen zijn bepaald met behulp van metingen voor stijghoogteverschillen.



Figuur 1: Schets van de proefopstelling van Van Os

Binnen het proeven programma van Van Os was sprake van twee verschillende onderdelen. Ten eerste is gelet op de stabiliteit van het zand onder de toplaag bij verschillende spleetbreedten. Bij dit onderdeel zijn nog geen snelheden in een porie van de toplaag opgemeten. Pas in een later stadium is Van Os ook snelheden in een porie van de toplaag gaan opmeten. Toen was de zandlaag onder de toplaag echter alweer verwijderd, zodat tijdens dit onderdeel niet kon worden gelet op de stabiliteit van de zandlaag.

De poriesnelheden zijn hierbij opgemeten met behulp van een Laser Doppler meter, welke met behulp van een constructie met kleine buizen tussen de grindstenen van de toplaag was ingebouwd. Bij de metingen is het momentaan signaal voor de horizontale stroomsnelheid op een vast punt in een vaste porie geregistreerd.



Figuur 2: Schets van de metingen van Van Os

Door tijdens een proef de toplaag telkens in stapjes op te hogen kwam het (vaste) meetpunt steeds dieper in de toplaag te liggen, waardoor het mogelijk was om signalen op te meten op verschillende diepten in de toplaag. Door de constructie van de meetinstallatie zal wel enige verstoring van het stroombeeld hebben plaatsgevonden. Er wordt echter ingeschat dat deze verstoring geen werkelijk grote invloed op de resultaten zal hebben gehad. In figuur 2 is in een schets weergegeven hoe de meetresultaten voor de poriesnelheden er globaal uit zagen voor zowel de filterbaksituatie (kist geheel neergelaten) als de open waterloop situatie (kist geheel opgeheven).

In deze figuur is aangegeven dat er bij de filterbaksituatie sprake is van een over de hoogte constante gemiddelde poriesnelheid u_0 met een relatief kleine standaardafwijking, die overigens toch nog ca. 20 tot 40 procent van de gemiddelde poriesnelheid u_0 kan bedragen. Voor de open waterloop situatie ziet het plaatje er heel anders uit. Er is sprake van een interactie tussen de stroomsnelheden in de turbulente grenslaag in de waterloop en de poriesnelheden in de toplaag. Hierbij dempt de gemiddelde snelheid heel snel uit (deze invloed is alleen merkbaar in een bovenste zone van de toplaag met een dikte van ca. 1 tot 1.5 maal de kenmerkende diameter D ($= D_{50}$ van het grind) van de toplaag - beneden deze zone is bij een gelijk verhang als bij de filterbaksituatie weer sprake van een over de hoogte constante snelheid u_0). De standaardafwijking van de poriesnelheden dempt echter veel minder snel uit. Hierdoor ontstaat onderin de toplaag (bij een toplaagdikte van 2 maal de diameter D) de situatie dat de standaardafwijking van het meetsignaal ca. 200 tot 300 procent van de gemiddelde snelheid bedraagt. Er zijn op dit punt bijvoorbeeld poriesnelheden opgemeten die fluctueerden tussen -0.030 m/s en $+0.040$ m/s met als gemiddelde waarde $+0.005$ m/s.

Dit beeld stemt in grote lijnen overeen met de modellering volgens formulering (1). Bij het fitten van deze formulering (bijlage E van eindrapportage [3]) bleken de maximum amplitudes i'' van de fluctuaties eveneens veel groter te zijn dan de tijdsgemiddelde componenten i . Hierbij is gebruik gemaakt van een blackbox benadering voor formulering (1), waarbij de parameter α niet expliciet als functie van de diverse van belang zijnde parameters maar simpelweg als evenredigheidsconstante is beschouwd. Uit een beschouwing van meetgegevens van een twaalfstal proeven met filters in een open

waterloop met uniforme stroming kon worden opgemaakt dat de parameter α in formulering (1) tijdens deze proeven gemiddeld de waarde $\alpha = 50$ had, waarbij een forse spreiding $5 < \alpha < 100$ aanwezig was. Wanneer men in eerste instantie uitgaat van de gemiddelde waarde $\alpha = i''/\underline{i} = 50$ en voorts een overwegend turbulente stroming in de toplaag veronderstelt (de verhangen zijn dan evenredig met het kwadraat van de stroomsnelheden), dan volgt dat voor de maximum amplitude van de fluctuaties in de poriesnelheden bij benadering gemiddeld $u'' \approx \sqrt{50} * \underline{u} \approx 7 * \underline{u}$ moet gelden. Dit stemt heel redelijk overeen met de door Van Os opgemeten ranges (in het gegeven voorbeeld geldt bijvoorbeeld $u''/\underline{u} = (0.040 - 0.005)/0.005 = 7$).

Bij de metingen van Van Os zijn echter ook een aantal van formulering (1) afwijkende verschijnselen opgemeten. Allereerst verloopt de demping van de standaardafwijking van de poriesnelheden vrijwel lineair met de diepte in de toplaag. Binnen de modellering voor formule (1) (bijlage D in [3]) is daarentegen een exponentieele demping voor de maximum amplitude van de fluctuerende drukgradienten voorspeld. De hieraan gekoppelde standaardafwijkingen bij de poriesnelheden zouden dan ook exponentieel moeten dempen. Dit is echter niet het geval. De demping van de *gemiddelde* poriesnelheden is daarentegen binnen de modellering in [3] wel goed weergegeven: deze zou exponentieel moeten dempen, hetgeen ook door Van Os is opgemeten.

Een ander aspect betreft de tijdschalen die Van Os heeft opgemeten. Binnen de analyse in bijlage C van [3] is aangenomen dat de lengte- en tijdschalen van de drukfluctuaties niet veranderen wanneer deze zich voortplanten in een poreus medium, hetgeen een vanuit grondmechanisch oogpunt gebruikelijk standpunt is. De grondmechanische berekeningen betreffen hierbij echter doorgaans de macroscopische stroming (filtersnelheden) in een zandpakket van vele tienduizenden zandkorrels dik met daarboven een waterloop of zee met golven met golflengtes van eveneens vele tienduizenden zandkorreldiameters lengte. In een dergelijk geval kan men inderdaad werken met een macroscopische beschrijving van de golfvoortplanting in het zandpakket. In het bij de filterstudies onderzochte geval is daarentegen sprake van een poreus pakket van slechts enkele korrels dik, met daarboven een grenslaag met drukfluctuaties met lengteschalen van eveneens slechts enkele korreldiameters lengte. Tijdens de proeven van Van Os kwamen dan ook andere verschijnselen naar voren. Er is sprake van een interactie tussen de lengte- en tijdschalen die in de turbulente grenslaag optreden en de lengte- en tijdschalen die horen bij de turbulentie die ontstaat als gevolg van het herhaaldelijk versnellen en vertragen van het water wanneer dit tussen de stenen door stroomt. De laatstgenoemde turbulente fluctuaties treden ook op bij een filterbaksituatie. De lengte- en tijdschalen die bij deze fluctuaties horen hangen samen met de structuur en de grootte van de poriën in de toplaag (deze bepalen immers de maximum wervelgrootte) en kunnen als een materiaaleigenschap van de toplaag worden opgevat. Als gevolg van de interactie tussen deze materiaaleigenschap en de (opgelegde) structuur van de turbulentie in de grenslaag blijken de spectra bij de meetsignalen in de grenslaag en de meetsignalen in een porie op enige diepte in de toplaag niet hetzelfde beeld voor de tijdschalen op te leveren. Over de invloed van deze afwijkingen op de geldigheid van formulering (1) valt vooralsnog echter concreet nog niet veel te zeggen.

De nadere bestudering van het toekomstig meetverslag van Van Os kan wellicht nog meer afwijkingen aan de dag brengen. Voorlopig wordt hier volstaan met bovenstaande opmerkingen, waaruit kan worden geconcludeerd dat de modellering in de rapportage [3] voor het project FILTERS weliswaar in grote lijnen in overeenstemming is met de

meetsignalen van Van Os, maar dat er nog wel enkele vraagtekens kunnen worden gezet bij enkele details binnen deze modellering. Om hier meer inzicht in te kunnen verwerven zal echter nog nader, toekomstig (model)onderzoek nodig zijn. De resultaten van Van Os (die slechts één type toplaagmateriaal en slechts één type zand als basis gebruikt heeft) moeten vooral worden beschouwd als indicaties voor de structuur van het te onderzoeken fenomeen. Wanneer men er echt meer van wil weten, dan zal men nog proeven met verschillende typen toplaagmateriaal en verschillende typen zand moeten uitvoeren, waarbij men ook de randvoorwaarde in de turbulente grenslaag moet variëren (diverse, onderling verschillende stroombeelden onderzoeken). Zonder deze metingen zal men op dit punt niet veel verder komen. Er zal in eerste instantie vooral gemeten moeten worden. Deze metingen zullen ook inzicht kunnen opleveren in de mogelijkheden voor een herformulering van het in rapport [3] met behulp van formule (1) opgestelde stabiliteitscriterium voor de basislaag. Het gaat daarbij om een zodanige herformulering dat het stabiliteitscriterium makkelijker kan aansluiten bij de informatie die de gangbare turbulentie modellen (o.a. κ - ϵ modellen) opleveren. Ook extrapolatie naar niet uniforme stroombeelden moet met de herformulering eenvoudiger te realiseren zijn.

Beschouw in dit verband het volgende. In bijlage C van rapport [3] is voor de beweging van een mootje water in de grenslaag met een eenheidsvolume $\Delta x \cdot \Delta y \cdot \Delta z$ onderstaande bewegingsvergelijking gehanteerd (kracht = massa * versnelling):

$$\frac{\Delta p}{\Delta x} = \rho_w \cdot \frac{\Delta u}{\Delta t} \quad (2)$$

Het quotient $\Delta x / \Delta t$ betreft hierbij een horizontale snelheid, welke het quotient is van de karakteristieke lengteschaal en de karakteristieke tijdschaal van de fluctuaties (deze snelheid beschrijft de reistijd van de wervels). Volgens de diverse literatuur is het redelijk om aan te nemen dat deze snelheid evenredig is met de snelheid Δu zelf. Er kan dan worden geschreven:

$$\Delta p = \rho_w \cdot \Delta u \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta p \approx (\Delta u)^2 \quad (3)$$

In bijlage D van rapport [3] is daarnaast voor de relatie tussen de standaardafwijking van de drukfluctuaties en de standaardafwijking van de instantane stroomsnelheden in de grenslaag nog onderstaande verband gegeven:

$$\sigma(p_g) = \alpha_5 \cdot \rho_w \cdot \sigma(u_g)^2 \Rightarrow \sigma(p_g) \approx \sigma(u_g)^2 \quad (4)$$

De formules (3) en (4) wijzen beide op een directe relatie tussen de fluctuaties in de drukken en de fluctuaties in de snelheden. Dit geldt dan in de grenslaag. Wanneer men deze relatie beschouwt voor een moot van de toplaag van een zekere lengte (zoals bij de analyse in bijlage C van rapport [3] is gedaan), dan gaat deze relatie echter niet meer op. Er is echter geen directe aanleiding om te veronderstellen dat een relatie als relatie (4)

in een porie zelf ook niet opgaat. Waarschijnlijk gaat deze relatie in een porie net zo goed op als in de grenslaag. In dat geval zou dan ook moeten gelden:

$$\sigma(p_{porie}) \cong \sigma(u_{porie})^2 \quad (5)$$

Het is voorts aannemelijk dat de standaardafwijking van de drukfluctuaties in deze porie is gerelateerd aan de standaardafwijking van de drukfluctuaties in de grenslaag:

$$\sigma(p_{porie}) = f(\sigma(p_g)) \quad (6)$$

De combinatie van de formules (4) t/m (6) levert dan het volgende inzicht op:

$$\sigma(u_{porie})^2 = f(\sigma(u_g)^2) \quad (7)$$

De poriesnelheden zijn in dit geval dus direct te relateren aan de stroomsnelheden in de grenslaag. Als dit inderdaad waar is, dan zal men bij het opstellen van een stabiliteitscriterium voor de basislaag voor wat betreft de beschrijving van de belasting vanuit de waterloop kunnen volstaan met alleen de stroomsnelheden in de grenslaag (gemiddelde waarde en standaardafwijking). Drukken en drukgradienten kunnen dan verder buiten beschouwing blijven, waardoor het criterium makkelijk zal kunnen aansluiten bij resultaten van gangbare turbulentiemodellen als bijvoorbeeld $k-\epsilon$ modellen en het criterium ook voor niet uniforme stroombeelden wellicht relatief eenvoudig toepasbare ontwerpregels zal kunnen opleveren. Gelet op al deze voordelen zal het zeker de moeite waard zijn om met behulp van toekomstige proeven ook na te gaan of er inderdaad (los van de drukken) een directe relatie bestaat tussen de poriesnelheden en de stroomsnelheden in de grenslaag. Met het oog op de achterliggende fysica is dit op voorhand zeker niet ondenkbeeldig. Overigens zullen in het stabiliteitscriterium voor de basislaag naast stroomsnelheden uiteraard ook materiaalparameters (kenmerkende korreldiameters, porositeit, laagdikte) van toplaag en basislaag moeten voorkomen.

Naast de studie naar een dergelijke relatie tussen de momentane stroomsnelheden in de grenslaag en de momentane poriesnelheden in een porie direct boven de basislaag, zal ook nog moeten worden nagedacht over de relatie die er bestaat tussen de momentane poriesnelheden in die porie en het begin van erosie van deeltjes uit de basislaag. In dit verband is het nuttig om eens stil te staan bij de reeds voor verschillende typen stroombeelden opgestelde stabiliteitscriteria voor de toplaag [1, 4, 9].

Bij de beoordeling van de stabiliteit van een toplaag gaat men nogal eens uit van het criterium dat door Izbash hiervoor is opgesteld. Dit luidt in algemene zin:

$$\frac{u_{cr}}{\sqrt{\Delta \cdot g \cdot D}} = \beta \quad (8)$$

Deze formulering is voor uniforme stroming gelijkvormig aan de formulering van Shields. Voor niet uniforme en/of hoog turbulente stroming is het criterium van Izbash vaak makkelijker te definiëren. Per stroombeeld wordt dan een karakteristieke stroomsnelheid gedefinieerd, waarbij van zowel gemiddelde waarden als piekwaarden kan worden uitgegaan. Er is sprake van erosie wanneer deze stroomsnelheid een waarde $u_{cr} = \beta \cdot \sqrt{\Delta \cdot g \cdot D}$ overschrijdt. De parameter β kan hierbij per stroombeeld bij de hiervoor opgestelde definitie voor de karakteristieke stroomsnelheid worden bepaald uit meetgegevens van modelproeven. Bij een keuze voor een modellering met *gemiddelde* stroomsnelheden geldt voor uniforme, laag turbulente ($r \approx 0.10$) gootstroming $\beta \approx 1.7$ (onderzoek Izbash), terwijl voor stroombeelden met hogere turbulentie-intensiteiten in het algemeen kleinere waarden voor β (tot $\beta \approx 0.5$ bij zeer hoge turbulentie) worden gevonden. Dit kleiner worden van β met toenemende turbulentie-intensiteit r is een gevolg van het gegeven dat in het algemeen niet de gemiddelde waarde maar de piekwaarde van de stroomsnelheid het begin van erosie bepaalt. Men kan daarom eigenlijk beter uitgaan van een modellering met piekwaarden. In de praktijk wordt hierbij meestal voor een modellering met de 1 %-waarde gekozen:

$$u_{piek} = u_{1\%} = \underline{u} + 3 \cdot \sigma(u) = (1 + 3 \cdot r) \cdot \underline{u} \quad (9)$$

De invloed van de turbulentiegraad komt hierin tot uiting via de standaardafwijking van de stroomsnelheid. Men kan met behulp van formule (9) voor de modellering met *gemiddelde* stroomsnelheden een formule voor een correctiefactor voor β afleiden, waarin de invloed van de turbulentiegraad expliciet wordt weergegeven. Deze formule luidt:

$$\beta = \left(\frac{1 + 3 \cdot 0.1}{1 + 3 \cdot r} \right) \cdot \beta_{uniforme\ stroming} = \left(\frac{1.3}{1 + 3 \cdot r} \right) \cdot 1.7 \quad (10)$$

De waarde $\beta = 1.7$ van Izbash is gerelateerd aan de pieksnelheden bij uniforme gootstroming met $r \approx 0.10$. Dit komt tot uitdrukking in de teller van de correctiefactor. In de noemer komt dan de invloed van een hiervan afwijkende turbulentiegraad tot uitdrukking. Formule (10) stemt in het algemeen goed overeen met de diverse meetresultaten.

Men kan deze manier van denken wellicht ook toepassen bij de beoordeling van de stabiliteit van de basislaag onder een geometrisch open filterconstructie. Daarbij moet worden bedacht dat met het oog op deze beoordeling in het verleden vooral heel veel onderzoek in de filterbak is verricht. Men zal moeten refereren aan deze situatie om van al dit vroegere werk te kunnen profiteren. Dit betekent dat men moet aansluiten bij de gangbare ontwerpformules, die zijn gebaseerd op al het onderzoek in de filterbak (zie o.a. [6] & [11]). Deze ontwerpformules kunnen in algemene zin worden beschreven met een

relatie die vergelijkbaar is met relatie (8):

$$\frac{v_{f, cr}}{\sqrt{\Delta \cdot g \cdot D_{50b}}} = \gamma \cdot f \left(\frac{D_{15t}}{D_{50b}}, n_t \right) \quad (11)$$

waarin:

- $v_{f, cr}$ = kritieke filtersnelheid
- Δ = relatieve dichtheid basislaag
- D_{50b} = D_{50} basislaag
- D_{15t} = D_{15} toplaag
- n_t = porositeit toplaag
- g = versnelling zwaartekracht
- γ = evenredigheidsconstante
- $f(\dots)$ = functie van ...

Wanneer wordt aangenomen dat de poriesnelheid bij een filterbakproef evenredig is met de filtersnelheid, dan kan (11) in algemene vorm ook worden geschreven als:

$$\frac{u_{porie, cr}}{\sqrt{\Delta \cdot g \cdot D_{50b}}} = \gamma_p \cdot f \left(\frac{D_{15t}}{D_{50b}}, n_t \right) \quad (12)$$

De evenredigheidsconstante γ zal hierbij uiteraard een andere grootte krijgen dan in relatie (11). Daarom is deze evenredigheidsconstante in relatie (12) met γ_p aangeduidt. De rol van deze evenredigheidsconstante in relatie (12) valt te vergelijken met de rol van de evenredigheidsconstante β in relatie (8). Met het oog op deze vergelijkbare rol zou men de invloed van een afwijkende turbulentieintensiteit voor de poriesnelheid wellicht in rekening kunnen brengen door voor de constante γ_p een soortgelijke correctiefactor te hanteren als in relatie (10) voor β is aangegeven. Om aan te kunnen sluiten bij het met behulp van filterbakproeven opgestelde stabiliteitscriterium (12) (of (11)) zal de filterbaksituatie dan uiteraard als norm moeten gelden. Wanneer men ook voor de poriesnelheden weer uitgaat van de 1 % piekwaarden conform relatie (9), dan volgt met dit alles voor de correctiefactor voor de evenredigheidsconstante γ_p :

$$\gamma_p = \left(\frac{1 + 3 \cdot r_{p, filterbak}}{1 + 3 \cdot r_p} \right) \cdot \gamma_{p, filterbak} \quad \text{waarin} \quad r_p = \frac{\sigma(u_{porie})}{\mu(u_{porie})} \quad (13)$$

Wanneer men uitgaat van de eerste indicaties die Van Os voor de gemiddelde waarden en standaardafwijkingen voor de stroomsnelheden in een porie van een toplaag in een open waterloop situatie op een diepte van twee maal de steendiameter van de toplaag heeft opgemeten, dan vindt men voor deze situatie $r_p \approx 2$ à 3 (standaardafwijking is 2 à 3 maal zo groot als het gemiddelde). Voor de filterbak situatie vindt men met zijn metingen daarentegen $r_{p, filterbak} \approx 0.2$ à 0.4 . Uitgaande van de gemiddeldes van deze metingen vindt men dan:

$$\gamma_{p, \text{openwaterloop}} = \left(\frac{1 + 3 \cdot 0.3}{1 + 3 \cdot 2.5} \right) \cdot \gamma_{p, \text{filterbak}} = 0.22 \cdot \gamma_{p, \text{filterbak}} \quad (14)$$

Wanneer men ervan uitgaat dat de evenredigheidsconstante γ in relatie (11) een gelijkwaardige reductie ondervindt als γ_p in relatie (12), dan betekent het resultaat in vergelijking (14) dat men bij de situatie van een filterlaag met een dikte van twee maal de nominale steendiameter in een open waterloop met relatief laag turbulente ($r \approx 0.10$) uniforme stroming in verband met de doordringing van de turbulentie uit de waterloop hooguit een tijdsgemiddelde filtersnelheid mag toelaten van ca. 22 % van de kritieke filtersnelheid bij een filterbakproef. Wanneer men verder uitgaat van de realistische aanname dat de stroming in de filterlaag in al de genoemde meetsituaties een overwegend turbulent karakter zal hebben gehad, dan kan worden aangenomen dat het kritiek verhang evenredig is met het kwadraat van de kritieke filtersnelheid. In dat geval zou men volgens het resultaat in vergelijking (14) in de open waterloop situatie in verband met de doordringing van de turbulentie hooguit een tijdsgemiddeld verhang van ca. $(0.22)^2 \cdot 100 = 4.8$ % van het kritiek verhang bij een filterbakproef mogen toelaten. Deze waarde stemt qua orde van grootte redelijk overeen met de werkelijk geconstateerde verschillen (zie o.a. bijlage A in de eindrapportage voor het project FILTERS [3]), zeker wanneer wordt bedacht dat er sprake is van een grote spreiding in de diverse gegevens en dat de getalswaarden voor de metingen van Van Os nog slechts eerste indrukken betreffen.

Al met al biedt deze overeenstemming voldoende reden om aan te nemen dat het mogelijk moet zijn om met behulp van de hiervoor geschetste wijze van modelleren voor diverse, verschillende stroombeelden in de waterloop op relatief eenvoudige wijze direct te kunnen aansluiten op de stabiliteitscriteria die reeds voor de filterbaksituatie zijn opgesteld. Nader onderzoek zal moeten uitwijzen hoe de preciese vorm van de formules (11) t/m (13) eruit zal moeten zien.

Samenvattend kan worden gesteld dat er twee problemen zijn die men in de nabije toekomst zal moeten bestuderen:

1. Is het mogelijk om een direct verband aan te tonen tussen het signaal voor de instantane horizontale stroomsnelheden in de grenslaag (gemiddelde waarde en standaardafwijking) en het signaal voor de instantane poriesnelheden in een porie onderin de toplaag (grenzend aan de basislaag)? M.a.w.: kan men "buiten de drukken om" modelleren? En zo ja: hoe ziet dit verband er dan uit, welke parameters (bijv. toplaagdikte, kenmerkende korreldiameters, grating, porositeit) spelen hierbij een rol?
2. Is het mogelijk om bij de beoordeling van de kritieke fase voor erosie van de basislaag met behulp van een formule als formule (13) voor ieder type signaal voor de instantane poriesnelheden direct aan te kunnen sluiten op het reeds bestaande criterium voor de filterbaksituatie? En zo ja: hoe moeten de formules (11) t/m (13) er dan eigenlijk precies uitzien?

Indien deze twee vragen inderdaad allebei met "ja" kunnen worden beantwoord, dan zal men na de bestudering van deze twee problemen in staat zijn om bij ieder willekeurig

signaal voor de instantane stroomsnelheden in de grenslaag boven een granulaire toplaag op een verantwoorde wijze te kunnen beoordelen of de basislaag onder die toplaag stabiel blijft of niet. Men zal dan dus zowel de situatie bij lage turbulentie als de situatie bij hoge turbulentie kunnen beoordelen, waarbij dan wel de gemiddelde waarde en de standaardafwijking van de horizontale stroomsnelheid in de grenslaag bekend zullen moeten zijn. Deze gegevens zullen moeten volgen uit gegevens van modelproeven en/of uit resultaten van gangbare turbulentiemodellen voor de berekening van de stroming in de waterloop.

De situatie bij een geometrisch open filterconstructie met meerdere lagen (bijv. een toplaag met $D_{50} = 1$ m. op een filterlaag met $D_{50} = 0.025$ m. op een basis van zand met $D_{50} = 0.0005$ m.) is binnen dit alles dan nog niet aan de orde gekomen. Dit is echter meer een onderdeel voor de wat langere termijn. Men zal eerst moeten begrijpen hoe een en ander in elkaar steekt in de eenvoudigste situatie van alleen een toplaag direct op een basis. Zolang als men nog niet over deze kennis beschikt, heeft het geen zin al vooruit te lopen op meer complexe filterconstructies. Daarom wordt aanbevolen om de onderzoeksinspanningen voor de korte termijn alleen te richten op het zoeken van antwoorden op de twee vragen die op de vorige pagina aan de orde zijn gesteld. Zonder modelonderzoek zal men hierbij niet veel verder komen. Deze twee vragen zijn eigenlijk alleen te beantwoorden met behulp van de nodige meetgegevens. In hoofdstuk 3 wordt hier nader op ingegaan.

3. Aanbevolen activiteiten

Allereerst zij opgemerkt dat het niet de bedoeling is in dit plan van aanpak al een gedetailleerde beschrijving voor een proevenprogramma op te stellen. Hiermee zal in ieder geval nog moeten worden gewacht tot het definitieve meetrapport van Patrick van Os beschikbaar is. Dit rapport zal eerst moeten worden bestudeerd om te onderzoeken of hier nog andere relevante informatie uit naar voren komt - informatie die van belang kan zijn bij de opstelling voor een volgend proevenprogramma. In dit plan van aanpak zullen voor wat betreft de opzet van een dergelijk proevenprogramma voorlopig alleen nog maar een aantal aandachtspunten op een rij worden gezet. Dit rijtje betreft de volgende zaken:

- Welke signalen/grootheden moeten bij de proeven worden gevarieerd? Wanneer men de relatie tussen de stroomsnelheidssignalen in de grenslaag en in de poriën goed wil onderzoeken, dan zal men de instantane stroomsnelheidssignalen in de grenslaag voldoende moeten variëren om een breed geldigheidsgebied voor de af te leiden relatie te kunnen verkrijgen. Men zal dus meerdere typen stroombeelden in de waterloop moeten instellen (bijv. ook stroming met extra turbulentie (klutsen), spleetstroming (als bij Van Os), belasting door golven, niet uniforme stroombeelden (o.a. stroming rond een pijler, wervelstraten achter spuisluis), etc.). Daarnaast zal men binnen het proevenprogramma ook de materiaalparameters van toplaag en basislaag moeten variëren.
- Wat moet worden opgemeten? Om de relatie tussen de stroomsnelheidssignalen in de grenslaag en in de poriën goed te kunnen bepalen zal men in ieder geval deze twee signalen moeten opmeten. Het is het beste om deze signalen telkens simultaan op te meten. Daarbij zal ook telkens moeten worden opgelet bij welk signaal in de poriën de basislaag instabiel wordt. Het verdient hierbij verder de aanbeveling om naast stroomsnelheden ook drukken te meten, zowel in de

grenslaag als in de poriën. Hoewel het, zoals in het vorig hoofdstuk is uiteengezet, niet de bedoeling is om de drukken expliciet in de modellering voor de ontwerpformules op te nemen, zullen de drukmetingen toch aanvullende informatie kunnen bieden, welke informatie van belang kan zijn bij het verkrijgen van een beter inzicht in de empirisch opgemeten relatie tussen de stroomsnelheidssignalen in de grenslaag en in de poriën.

Tot zover het rijtje aandachtspunten. Voor dit moment zou het te ver voeren om hier al dieper op in te gaan. Zoals reeds opgemerkt, is nu eerst de nadere bestudering van het binnen korte termijn te verwachten eindverslag van de metingen van Van Os aan de orde. Deze activiteit wordt als eerste aanbevolen. Het is de bedoeling dat deze activiteit zal uitmonden in de opstelling van een concreet voorstel voor een proevenprogramma, waarna het feitelijk toekomstig (model)onderzoek van start zal kunnen gaan.

Literatuur

- [1] **L.C. van Rijn**, Handbook sediment transport by currents and waves, second edition, Delft Hydraulics, verslag H461, Delft, januari 1990
- [2] **W. Xingkui & H.L. Fontijn**, Experimental study of the hydrodynamic forces on a bed element in an open channel with a backward-facing step, Journal of Fluids and Structures, 1993 (7), p.p. 299 - 318
- [3] **M. Hauer & T. van der Meulen**, Probabilistische analyse van onzekerheden bij ontwerp en uitvoering van een enkellaagse geometrisch open filterconstructie in een open waterloop, TU Delft, augustus 1997
- [4] **F.J. Havinga & L.C. van Rijn**, Sediment concentrations and sediment transport in case of irregular non-breaking waves with a current, Delft Hydraulics, verslag H840, Delft, december 1992
- [5] **H. den Adel & J.B. Sellmeijer**, Transportmodel voor filters, GD-rapport CO-325970/6, Delft, februari 1992
- [6] **M. Klein Breteler, H. den Adel & M.A. Koenders**, Talubekledingen van gezette steen - ontwerpregels voor het filter, WL-verslag M 1795/H 195, deel XXI, Delft, juni 1992
- [7] **J.J.A. van Huijsstee & H.J. Verhey**, Verruiming ontwerpregels voor filters in bodemverdedigingen - gelijktijdige instabiliteit van toplaag en basislaag, WL-verslag Q572, Delft, 1991
- [8] **CUR**, rapport 161, Filters in de waterbouw, Gouda, 1993
- [9] **Delft Hydraulics**, Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, WL-verslag M1115, delen VII, VIII, Xa, Xb en Xc, Delft, 1982 - 1986
- [10] **I. Nezu**, Turbulent structure in open channel flows, Kyoto University, Japan, July 1977
- [11] **Delft Hydraulics**, Verslag modelonderzoek granulaire filters, stroming evenwijdig aan scheidingsvlak, WL-verslag M898, deel IV, Delft, 1984