

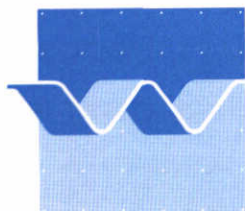
Rijkswaterstaat
Dienst Weg- en Waterbouwkunde

Literatuurinventarisatie
stabiliteitsvoorspellers en - gegevens

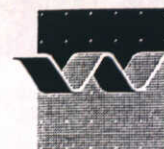
Bureaustudie
april 1998

Literatuurinventarisatie
stabiliteitsvoorspellers en - gegevens

Gert Jan Akkerman , Henk Verheij



wL | delft hydraulics



OPDRACHTGEVER: Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde

TITEL: Literatuurinventarisatie stabiliteitsvoorspellers en -gegevens

SAMENVATTING:

In het kader van het samenwerkingsproject STEENSTABILITEIT worden diverse deelprojecten uitgevoerd. Voor 1998 is de onderhavige literatuurstudie (Q2395.10) het eerste deelproject. Doel is een aanzet te geven om tot betere stabiliteitsvoorspellers te komen en de toegang tot relevante literatuur en gegevens bij het verdere project te vergemakkelijken.

REFERENTIES: Samenwerkingsverband DWW / WL| DELFT HYDRAULICS, overeenkomst DWW-1382

REV.	AUTEUR	DATUM	OPMERKINGEN	REVIEW	GOEDKEURING
1	G.J. Akkerman	24/03/98		L.C. van Rijn	
2	G.J. Akkerman	16/04/98		L.C. van Rijn	H.J. Opdam
TREFWOORDEN			INHOUD		STATUS
stroombestendigheid, materiaaltransport, korrel-stabiliteit, begin van beweging, turbulentie			TEKST:	circa 35	Definitief rapport
			TABELLEN:	1	
			FIGUREN:	-	
			APPENDICES		
PROJECTNUMMER: Q2395.10					

Inhoud

1	Inleiding	1-1
2	Stand van zaken	2-1
2.1	Huidige werkwijze bij stabiliteitsbepaling bodemverdedigingen	2-1
2.2	Gewenste werkwijze bij stabiliteitsbepaling bodemverdedigingen	2-1
3	Concepten voor stabiliteitsvoorspellers	3-1
3.1	Overzicht typen voorspellers	3-1
3.2	Uitwerking voorspellers	3-4
3.2.1	Type A: Gerelateerd aan de verticaalgemiddelde stroomsnelheid	3-4
3.2.2	Type B: Gerelateerd aan de lokale stroomsnelheid nabij de bodem	3-7
3.3	Stabiliteitscriterium voor individuele korrels (microschaal)	3-8
3.4	Principe-keuze van stabiliteitsvoorspellers	3-9
4	Relevante meetgegevens	4-1
5	Referenties	5-1
5.1	Referenties zonder relevante meetdata	5-1
5.2	Referenties relevante meetdata	5-3

Bijlagen

- A Mogelijke definitie van schade
- B Opmerkingen ten aanzien van toepassing stabiliteitsvoorspellers bij rekenmodellen
- C Details relevante onderzoeken

I Inleiding

In het kader van de Samenwerkingsovereenkomst STEENSTABILITEIT tussen Rijkswaterstaat Dienst Weg- en Waterbouwkunde (hierna aangeduid met DWW) en WL | DELFT HYDRAULICS (contract nr. DWW-1382) wordt de stabiliteit van steenachtig materiaal nabij constructies onderzocht via bureaustudies, experimenteel en numeriek onderzoek. Een belangrijke katalysator is daarbij de steeds toenemende simulatiekracht van rekenmodellen, die het stroombeeld thans al in redelijk nauwkeurige mate kunnen voorspellen. Deze voorspelkracht zal in de nabije toekomst verder toenemen. Daarbij is het wel nodig dat een geëigende stabiliteitsvoorspeller wordt ontwikkeld die een goede beschrijving geeft van de steenstabiliteit in termen van overschrijding van een belastingniveau(s), dan wel (bij voorkeur) in termen van overschrijding van een zekere steenverplaatsing.

Omdat stroomaanval (nog) niet in alle gevallen goed door rekenmodellen kan worden voorspeld, zijn schaalmodellen hiervoor soms nog onontbeerlijk.

De stabiliteitsvoorspeller zal dus, zo mogelijk, zowel aansluiting moeten vinden bij rekenmodellen als bij schaalmodellen.

Met name de rol van verhoogde turbulentie, zoals die benedenstrooms van constructies optreedt, zal in de stabiliteitsvoorspeller goed moeten worden ingebracht.

In het kader van de Samenwerkingsovereenkomst thans de volgende fasering in het onderzoek voorzien: relatief lage en hoge drempels (1998), onderstroomde constructies en uitlaten (1999), rivierwerken (2000), en scheepsgeïnduceerde waterbeweging (2001).

Binnen het dit jaar uitgewerkte projectplan 1998 met betrekking tot drempelconstructies (hoge en lage stuw drempels, backward-facing steps, stroombrekers, overlaten) worden de volgende deelstudies onderscheiden:

- literatuurinventarisatie (Q2395.10)
- probabilistische analyse (Q2395.20)
- schematisatie turbulentie (Q2395.30)
- k-ε berekeningen (is reeds uitgevoerd in ander kader (Q2369, 1998))
- gidsproef (Q2395.40)
- evaluatie (Q2395.50)

Dit rapport heeft betrekking op de inventarisatie van literatuur die van belang is voor het ontwikkelen van een geëigende stabiliteitsvoorspeller. Daarbij wordt ook een overzicht gegeven van huidige en mogelijke stabiliteitsconcepten. Veel inspanning is gegeven om tot een consistent overzicht te komen, waartoe een aantal relaties zijn herschreven, dan wel aangevuld. Aansluitend wordt aan de hand van veelbelovende concepten nagegaan welke meetgegevens daarvoor beschikbaar zijn, gericht op drempelconstructies. Het overzicht van stabiliteitsconcepten is wel breder toepasbaar dan alleen voor drempels.

Het doel van deze inventarisatie is op snelle wijze de benodigde informatie te verzamelen ten behoeve van latere fasen en aldus een goed startpunt te creëren.

Achtereenvolgens komen aan de orde: Stand van zaken (Hoofdstuk 2), Concepten voor stabiliteitsvoorspellers (Hoofdstuk 3), en Relevante meetgegevens voor drempelconstructies (Hoofdstuk 4). Een overzicht van referenties is in Hoofdstuk 5 weergegeven.

Binnen het Samenwerkingsverband is de DWW vertegenwoordigd door ir. P.K. Klok (projectleider na 1 maart 1998) en dr.ir. G.J.C.M. Hoffmans (projectleider tot 1 maart 1998 en daarna projectadviseur). Door hen werd ook een inhoudelijke bijdrage geleverd (advies en review).

Namens WL | DELFT HYDRAULICS is de studie uitgevoerd door ir. G.J. Akkerman (tevens projectleider) en ir. H.J. Verheij. Prof.dr.ir. L.C. van Rijn trad op als adviseur en verzorgde de kwaliteitsborging.

2 Stand van zaken

2.1 Huidige werkwijze bij stabiliteitsbepaling bodemverdedigingen

De dimensionering van bodem- en oeververdedigingen bij constructies wordt tot op heden vooral onderzocht met geometrisch gelijkvormige schaalmodellen, waarin zowel stroombeeld als stabiliteit van de steenconstructies moeten worden gemodelleerd. Deze onderzoeken zijn tijdrovend en kostbaar. Dit laatste wordt ook vooral veroorzaakt door de tijdroverende wijze van stabiliteitsbepaling: stap voor stap opzoeken van kritische condities en het iteratief toewerken naar een meest optimaal ontwerp (steenafmetingen en lay-out). Desondanks rechtvaardigen de hoge kosten van verdedigingswerken de onderzoekskosten veelal ruimschoots.

Aangezien er steeds meer inzicht komt in de relatie tussen fysische grootheden (stroomsnelheid, schuifspanning, waterdiepte) die destabiliserend werken en de stabiliserende parameters (relatieve dichtheid, korrelafmetingen) wordt bij het voorontwerp vaak volstaan met het schatten van het te verwachten stroombeeld, waarna de benodigde steenafmetingen worden berekend op basis van ervaring. Daarbij is het effect van de constructie verdisconteerd in een zogenaamde "invloedsfactor" k . Bij onderzoeken in het kader van de recent gebouwde stormvloedkeringen in Nederland zijn bijvoorbeeld veel waarden van k (afhankelijk van de specifieke geometrische kenmerken van de constructies) bepaald. Daarbij kan aan verschillende parameters worden gerelateerd, bijvoorbeeld aan de gemiddelde stroomsnelheid in de constructie, de verticaalgemiddelde stroomsnelheid boven de bodemverdediging, of het verval (Stormvloedkering Oosterschelde). Deze meetgegevens zijn onlangs opgeslagen in een databestand (STABASE) en er zijn hiermee diverse analyses uitgevoerd (meest recent: Hoffmans, 1997). Een weerslag van deze "engineering aanpak" is bijvoorbeeld te vinden in Franken, Ariëns en Klatter (1995).

2.2 Gewenste werkwijze bij stabiliteitsbepaling bodemververdedigingen

Steeds vaker kan met rekenmodellen het stroombeeld redelijk nauwkeurig worden bepaald. De verwachting is dat deze simulatiemodellen, in combinatie met goede stabiliteitsvoorspellers, in de nabije toekomst fysisch schaalonderzoek veelal overbodig kunnen maken en tot lagere onderzoekskosten kunnen leiden bij het ontwerp van bodemverdedigingen.

Belangrijk daarbij is dat de stabiliteitsvoorspeller betrouwbaar is en goed aansluit bij de berekende grootheden in de rekenmodellen. Voor het eerste is verificatie nodig aan modelmetingen.

Transportvoorspeller

Bij voorkeur zou een transportvoorspeller moeten worden ontwikkeld waarmee het mogelijk is de ruimtelijke verplaatsingen van de stenen van een bodemverdediging (hierna met "korrels" aan de duiden) in de tijd te voorspellen. Omdat nabij constructies vaak sprake zal zijn van verhoogde turbulentie zal dit een stochastische voorspeller moeten zijn. De transportgradiënten bepalen de erosie van de bestortingslagen ("veroudering"). Dit is niet alleen van belang bij het vooraf ontwerpen, maar ook bij het vaststellen van de reststerkte van bestaande verdedigingen en het tijdig treffen van maatregelen (monitoring en onderhoudsstrategie afstemmen op de verwachte veroudering). Dit laatste is vooral van belang voor constructies die "scherp" zijn ontworpen, dan wel waarvoor de randvoorwaarden zijn verslechterd in de loop van de tijd (hogere afvoeren, meer extreme golfwerking dan bij het ontwerp rekening was gehouden etcetera).

Het ontwikkelen van een geëigende transportvoorspeller is belangrijk, maar de ontwikkeling hiervan tot een praktisch bruikbaar concept kan nog vrij veel inspanning vergen. Derhalve is het zinvol om, vooruitlopend op een bruikbare transportvoorspeller, een goede stabiliteitsvoorspeller te hebben, waarbij de kans op overschrijding van een zeker stabiliteitsniveau wordt vastgesteld.

Stabiliteitsvoorspeller

Behalve met de "klassieke stabiliteitsparameters" (gemiddelde stroomsnelheid, waterdiepte) dient ook met een aantal andere parameters rekening te worden gehouden:

- de ruimtelijke verdeling van de stroming;
- de intensiteit, ruimtelijke en tijdsstructuur van de turbulentie, zowel van snelheidsfluctuaties als de bijbehorende druk- en wandschuifspanningsfluctuaties;
- de verhouding tussen de ruimtelijke afmetingen van de turbulente stroming en de grootte van de stenen;
- de doorlatendheid van de bodembescherming;
- eigenschappen van het water en de korrels.

De "sleutel" voor aansluiting van de stabiliteitsvoorspeller aan de resultaten van rekenmodellen is de berekende turbulente kinetische energie k_0 . In rekenmodellen kan deze in principe aan de bodem worden berekend ($k_{0,b}$).

Rekenmodellen zijn in principe in staat lokale stroomsnelheden en turbulenties te berekenen, niet slechts dieptegemiddelde stroomsnelheden en turbulenties. Belangrijk daarbij is een goede keuze van het referentieniveau voor de stroomaanval. Ligt dit te ver boven de korrels, bijvoorbeeld de verticaalgemiddelde snelheid en turbulentie, dan is er benedenstrooms van constructies sprake van te weinig representatieve stroombeeldkenmerken om de aanval op de korrels te karakteriseren. Ligt anderzijds het niveau ter hoogte van de korrels, dan is de stroomaanval weliswaar buitengewoon representatief, maar er is er door de verstoringe invloed van de korrels in de grenslaag nabij de bodem sprake van toevallige en moeilijk te kwantificeren verstoringen, die afhankelijk zijn van de toevalligheid in korrelafmeting, -vorm en -ligging. Bovendien zijn de fluctuaties in snelheid en druk dan bijzonder sterk (De Ruiter, 1980).

In het kader van onderzoek naar de stabiliteit van de (tijdelijke) grindafdekking van de grondverbetering van de Stormvloedkering Oosterschelde (Werkgroep EKOR, 1982) werd daarom een niveau van 2.5 maal de ruwheidswaarde k_s aangehouden als beste referentieniveau voor de stroomaanval en als onderbegrenzing van de logaritmische snelheidsverticaal; dit niveau is ook op theoretische gronden in de literatuur aangegeven

(Dyer, 1980). De bepaling van k_s kan daarbij geschieden door voor k_s een waarde van $2D_n$ aan te houden wanneer de bodemverdediging zorgvuldig (in de zin van ruimtelijke vlakheid) is aangebracht. In de praktijk zal een waarde van $2.5 D_n$ redelijk zijn. Overigens kan de k_s bij bestaande verdedigingen ook uit meting van het onderste deel van de snelheidsverticaal worden afgeleid. Voor een breukstenen verdediging ligt de referentiehoogte in de praktijk veelal tussen 0.5 m en 2 m boven de bodem. In verband met de variatie in steenafmetingen van bodemverdedigingen, is koppeling van de referentiehoogte aan k_s , dus op circa zes maal de korreldiameter boven de bodem, aan te bevelen in plaats van uit te gaan van een vaste hoogte boven de bodem.

Gestreefd moet worden naar een synthese bij de ontwerpmethodiek op een zodanige manier dat enerzijds de specifieke toepasbaarheid wordt benut (bureauvoorspellingen, stroombeeldvoorspellingen) maar anderzijds zoveel mogelijk van een consistent concept wordt uitgegaan.

In het voorliggend rapport ligt de nadruk op stabiliteitsvoorspellers en relevante gegevens. Zoals hiervoor aangegeven, kwam tijdens deze inventarisatie ook de wenselijkheid naar voren om transportvoorspellers in beschouwing te nemen in relatie met rekenmogelijkheden (met name turbulentiemodellering); dit aspect zal bij het desbetreffende deelproject (turbulentiemodellering: Q2395.30) worden opgepakt.

3 Concepten voor stabiliteitsvoorspellers

3.1 Overzicht typen voorspellers

Alleen stroomaanval

Uitgangspunt is dat de stroming permanent is, of (in de tijd gezien) geleidelijk verandert; het effect van eventuele golfwerking is derhalve niet meegenomen. Voor een combinatie van oscillerende stroming als gevolg van golfwerking en “gewone” stroming is dit niet wezenlijk, omdat het effect van de golfwerking in principe kan worden gesuperponeerd op die van de stroomwerking (het principe werd gepresenteerd in Bijker, 1967). Dit kan door het bepalen van de resultante van de effectieve schuifspanning als gevolg van de orbitaalbeweging en die als gevolg van de stroming. Bij het bepalen van het effect op de korrels moet daarbij wel rekening worden gehouden met de afwijkende grenslaagontwikkeling (voor een overzicht zie bijvoorbeeld Van Rijn, 1993).

Instationaire loslating

Wel kan in een permanente aanstroomsituatie de stroming nabij constructies enigermate instationair zijn als gevolg van instabiele stroomloslating, “kwispelen” van bodemstralen en vrije stralen en dergelijke. Dit effect wordt vooralsnog in de turbulentie verdisconteerd. Het is denkbaar dat bij een regelmatig oscillerende stroomloslating een “superpositie”-concept zoals bij golven en stroming beter zou kunnen worden toegepast. Dit is hier vooralsnog niet uitgewerkt omdat dergelijke oscillaties zeer constructie-specifiek zijn en er doorgaans sprake zal zijn van zeer onregelmatige loslaatverschijnselen.

Voor zover rekenmodellen in staat zijn deze instabiliteiten te voorspellen, zijn twee methoden denkbaar. De ene is dat de locale maxima van snelheden nabij de bodem worden bepaald en de daarbij horende (resterende) turbulentie. De andere methode is juist van de tijdgemiddelde lokale waarden uit te gaan; de rekenmodellen moeten hier dan wel de juiste turbulentie voor kunnen genereren, hetgeen nog enige zorg vergt (de thans gebruikelijke bepaling van de turbulentie, uitgaande van de tijdgemiddelde schuifspanningssnelheid, voldoet niet).

Gemiddelde en lokale stroomsnelheid

Ten aanzien van het vaststellen van benodigde steenzwaarte op een bodemverdediging is een parallel te trekken met ontgroningen: van globale stroombeeldkenmerken naar meer lokale en specifieke stroombeeldkenmerken. Daarbij speelt de lokale stroomsnelheid, bij voorkeur nabij de bodem, en de turbulentie de belangrijkste rol.

Tot dusverre wordt meestal gerefereerd aan de verticaalgemiddelde stroomsnelheid u , al dan niet voorzien van coëfficiënten om de invloed van afwijkingen van het uniforme stroombeeld weer te geven. Het is wenselijk hierbij minder empirie (coëfficiënten) en meer theorie en rekenmogelijkheden te benutten.

Wanneer turbulentie niet sterk afwijkt van die bij uniforme stroming, zoals in versnellingsgebieden of in prismatische kanalen kan grote winst worden geboekt door in een plat vlak gezien de lokale stroomsnelheid (bijvoorbeeld voor oevers nabij de teen van de

oever) en in de verticaal gezien zo mogelijk ook de snelheid nabij de bodem aan te houden. Voor dit laatste kan bijvoorbeeld een snelheid net buiten het verstoringgebied van de individuele korrels (op circa 2.5 maal de equivalente korrelruwheid k_s) als referentie worden aangehouden; het voordeel daarvan is dat deze consistent is, ruimtelijk op schaal van de korrels, en dat deze goed gemeten kan worden in schaalmodellen, dan wel berekend in rekenmodellen.

Stabiliteitscriterium of transportcriterium

Stabiliteit is doorgaans gekoppeld aan (subjectieve) verplaatsingscriteria, zoals de Shieldsparameter Ψ_c (≈ 0.06 voor grof materiaal), die een redelijk grote mate van instabiliteit representeert; derhalve wordt bij het ontwerp van flexibele constructies vaak gewerkt met een gereduceerde Ψ_c -waarde van 0.03 of 0.035, waarbij nauwelijks steenverplaatsing optreedt.

Een verdere stap bij de stabiliteitsbepaling zou zijn het koppelen van stroomaanval aan verplaatsingsgedrag van de stenen, bijvoorbeeld: een toelaatbaar aantal stenen dat verplaatst gedurende de levensduur van de constructie. Daarbij is niet alleen het transport van de stenen van belang, maar ook de *gradiënten van het transport* over het oppervlak waarover de flexibele constructie aanwezig is. Soms kan dat laatste worden geschat doordat een *erosielengte* kan worden aangegeven, gekoppeld aan een vormgeving van een constructie. In zijn algemeenheid echter zullen de gradiënten van het transport moeten worden bepaald uit berekeningen of in een schaalmodel. In een schaalmodel gebeurt dat automatisch; in een rekenmodel ook, mits de goede stabiliteitsvoorspeller (gekoppeld aan transport) kan worden gebruikt. Koppeling aan transport kan aan het aantal stenen dat lokaal wordt verplaatst (bijvoorbeeld aantal verplaatste stenen N per m^2 , overeenkomstig Graf, 1977), dan wel aan het dimensieloze transport Φ .

Door Van Rijn (1993) is via analyse van "pick-up" van de korrels en spronglengtes een transportformulering afgeleid. Dit concept is vrij fundamenteel en bleek goede resultaten op te leveren. Wel is er daarbij sprake van een ondergrens (nultransport), gerelateerd aan een kritieke stroomsnelheid. Voor de zeer lage transporten die kunnen worden verwacht van de korrels van een bodemverdediging, is deze aanpak niet geschikt.

Een betere transportvoorspeller is de transportrelatie van Paintal (1973), die voor zeer lage transportstadia een empirische relatie heeft gepresenteerd voor het transport Φ als functie van het belastingniveau Ψ . Hierbij heeft Paintal fijne en grovere materialen toegepast.

Door WL|DELFT HYDRAULICS zijn in M1115 deel Xb.1 (1981) deze metingen gecorrigeerd voor viscositeitsinvloed (correctie invloed van fijne materialen) en werd voor materiaal van circa 0.01 m en groter gevonden:

$$\Phi = 1.64 * 10^{10} \Psi^{10.9} \quad (3.1)$$

Hierin is Φ = dimensieloos transport (-):

$$\Phi = \frac{S}{\sqrt{\Delta g D^3}} \quad (3.2)$$

met S = getransporteerd korrelvolume in m^3/ms en ψ = belastingparameter = $u_*^2/\Delta g D$.

Met een gradiënt-transportberekening kan de toestand van de flexibele constructie in de tijd worden beschreven. Een dergelijk gedragsmodel is van belang voor bepaling van een optimale onderhoudsstrategie. Hoewel een dergelijke modellering nog niet onder handbereik lijkt te zijn verdient het aanbeveling om hieraan aandacht te schenken omdat dit een belangrijke spin-off zal kunnen geven naar het optimaal dimensioneren en onderhouden van flexibele constructies.

Bij transportbenaderingen wordt niet rekening gehouden met excessieve turbulentie en doorgaans ook niet in de spreiding in materiaaleigenschappen. Dit laatste is wel het geval bij transportvoorspellers voor uiteenlopende fracties, zoals voor gegradeerd materiaal. Transportvoorspellers zijn niet voor complexe (en specifieke) stroomsituaties nabij constructies afgeleid. Wel kan met stochastische concepten worden gerekend op basis van spreiding in de belasting en de verwachting is dat deze ook gelden voor niet-uniforme stroming.

Een methode voor het in rekening brengen van turbulentie op het transport is in Van Rijn (1993) aangegeven. Hierbij zijn, onder aanname van een normale verdeling van de schuifspanning, instantane (effectieve) kritieke schuifspanning en de standaardafwijking van de optredende schuifspanning bekend verondersteld.

Het transportconcept volgens Paintal is hier niet verder uitgewerkt in termen van het in rekening brengen van turbulentie, locale stroming en dergelijke. Omdat echter het transport aan het belastingniveau is gekoppeld, kan via de Paintal formule op directe wijze kansen op overschrijding van belastingniveau's worden vertaald in kansen op korreltransporten. Deze werkwijze is ook in het kader van de grindafdeklaag van de Stormvloedkering Oosterschelde (EKOR, 1982) gevolgd. Het bijzondere daarbij was dat de voorspelde transporten van het zeegrind bij benadering ook daadwerkelijk werden gemeten.

Voor het in rekening brengen van de effecten van spreiding in de materiaaleigenschappen kunnen met name transportvoorspellers voor gegradeerde materialen van belang zijn; wel is hierbij doorgaans sprake van hogere transportniveau's dan die welke relevant zijn bij steenstabiliteit. De methodiek is echter vermoedelijk ook goed toepasbaar voor bijvoorbeeld een Paintal-achtige transportformule.

Om tot een schadeverwachting te komen moeten twee zaken worden vastgesteld: de gradiënt van het transport (positieve gradiënt in stroomrichting -> erosie; negatieve gradiënt -> afzetting) en de definitie van schade. Op een mogelijke aanpak bij de schadebepaling wordt in Bijlage A verder ingegaan.

In latere instantie, bij het onderdeel dat zich met turbulentiemodellering bezig houdt (Q2395.30), zal de haalbaarheid van een transportmodellering verder worden uitgewerkt. Dit is dan juist zinvol, omdat er sprake is van een wisselwerking tussen de detailprocessen die het transport beschrijven en de detailprocessen die het stroombeeld voorspellen in rekenmodellen. Vooralsnog wordt hier volstaan met het aangeven van typen stabiliteitsvoorspellers.

Typen stabiliteitsvoorspellers

De volgende typen kunnen worden onderscheiden:

- Type A : stabiliteitsvoorspellers gerelateerd aan verticaalgemiddelde stroomsnelheid
- Type B : stabiliteitsvoorspellers gerelateerd aan lokale stroomsnelheid
- Type C : stabiliteitsvoorspellers voor individuele korrels (microschaal ;

krachtenevenwicht op individuele korrels)

Typen A en B zijn praktisch bruikbaar, waarbij naar verwachting type B zeer nuttig zal blijken te zijn; type C is vooralsnog niet praktisch bruikbaar, maar wordt in deze inventarisatie wel kort aangegeven; dit fundamentele spoor zal mogelijk door de Technische Universiteit Delft (verder) kunnen worden opgepakt.

Ook kan onderscheid worden gemaakt tussen voorspellers waarbij de spreiding in belasting en sterkte impliciet (onzichtbaar) wordt meegenomen en voorspellers waarbij deze spreidingen zijn geëxpliciteerd.

3.2 Uitwerking voorspellers

3.2.1 Type A: Gerelateerd aan de verticaalgemiddelde stroomsnelheid

3.2.1.1 Zonder expliciteren van spreiding in belasting en sterkte

Shields: uniforme stroming

$$\frac{\tau_c}{\Delta \rho g D} = \frac{u_{*c}^2}{\Delta g D} = \Psi_c \quad (3.4)$$

of uitgedrukt in de kritieke verticaalgemiddelde stroomsnelheid u_c :

$$\frac{u_c^2}{C^2 \Delta D} = \Psi_c \quad (3.5)$$

Modificatie voor niet-uniforme stroming met invloedsfactor k , hier bijvoorbeeld gedefinieerd als:

$$\frac{(ku_c)^2}{C^2 \Delta D} = \Psi_c \quad (3.6)$$

Op deze wijze gedefinieerd is k groter dan 1 bij verhoogde stroomaanval.

3.2.1.2 Met expliciteren van spreiding in belasting

Dit kan worden gedaan door introduceren van een verticaalgemiddeld turbulentiefactor $k_{t,o}$. Door Hoffmans (1997) is hiervoor de volgende uitdrukking afgeleid:

$$\frac{(k_{t,o} \cdot u_c)^2}{C^2 \Delta D} = \frac{0.7(r_u u_c)^2}{g \Delta D} = \Psi_c \quad (3.7)$$

waarbij voor uniforme stroming de dieptegemiddelde turbulentie-intensiteit r_u is te schrijven

$$\text{als} \quad r_u = \sqrt{1.45 \frac{g}{C^2}} \quad (3.8)$$

hetgeen leidt tot de Shieldsrelatie (3.5) voor uniforme stroming.

Opmerking: de welbekende stabiliteitsrelatie van Pilarczyk (1995) is gebaseerd op Shields, met in aanvulling daarop diverse beïnvloedingscoëfficiënten voor turbulentie (globale kengetallen), inbedding stenen, hellingen, al dan niet “aangepaste” stroming.

Voor niet-uniforme stroming benedenstreams van constructies kan r_u worden geschreven als (Hoffmans, 1993, 1994):

$$r_u = \sqrt{c_s + 1.45 \frac{g}{C^2}} \quad (3.9)$$

waarmee wordt verkregen:

$$\frac{0.7(c_s + 1.45 \frac{g}{C^2}) u_c^2}{g \Delta D} = \Psi_c \quad (3.10)$$

De coëfficiënt c_s hierin is afhankelijk van de geometrie van de constructie en de randvoorwaarden:

* voor drempels met subcritische stroming:

$c_s =$ functie (drempelhoogte, lengte bodemverdediging, benedenwaterstand (Hoffmans, 1993))

* voor horizontale vlakke stralen:

$c_s =$ functie (spleethoogte, lengte bodemverdediging, benedenwaterstand (Hoffmans, 1994))

Een volgende stap is het in beschouwing nemen van de turbulentie aan de bodem. De invloedsfactor op de stroomsnelheid kan worden aangegeven met $k_{t,b}$. Daarbij is het mogelijk als benadering voor de invloed van de bodemturbulentie de volgende schatting te maken:

$$\frac{(k_{t,b} \cdot u_c)^2}{C^2 \Delta D} = \frac{u_c^2}{C^2 \Delta D} \left(\frac{1 + \alpha_e r_{u,b}}{1.45} \right)^2 = \Psi_c \quad (3.11)$$

met $r_{u,b}$ = lokale turbulentie-intensiteit nabij de bodem, α_e = maat voor extremiteit van de verdeling (voor normale verdeling = 3). Hierbij wordt uitgegaan van een referentie-waarde van $r_{u,b}$ in uniforme stroming van 0.15 (Akkerman, 1998). Verder geeft deze uitdrukking aan dat bij benadering de maximumwaarde van de stroomsnelheid kan worden aangehouden als zijnde verantwoordelijk voor de stabiliteit.

Wanneer de spreiding in de belasting bekend is of kan worden geschat, kan de turbulentie expliciet worden meegenomen, zoals bijvoorbeeld de stabiliteitsvoorspeller van de (drempelvormige) grindafdeklaag van de Stormvloedkering Oosterschelde (EKOR, 1982):

$$\frac{(k_{t,b} O_s k_* u_c)^2}{C^2 \Delta D} = \Psi_c \quad (3.12)$$

met $k_{t,b}$ = turbulentiefactor (inclusief microgetij), O_s = getijcycluscoëfficiënt, k_* = coëfficiënt van vervorming snelheidsverticaal over de afdeklaag (lage drempelvorm).

De coëfficiënt k_* werd in EKOR gedefinieerd als correctiefactor op de vertaling van verticaalgemiddelde stroomsnelheid en snelheid op 1m boven de bodem: hierbij is $k_* = 1.0$ bij een logaritmische verticaal; bij een uitgebuikt stroomprofiel (aanstroomzijde drempel) is $k_* > 1.0$ en bij een ingesnoerd profiel (benedenstreamse talud) is $k_* < 1.0$. De precieze waarden van k_* werden bepaald aan de hand van computerberekeningen van het stroombeeld boven de drempel. Het toepassen van de factor k_* betekent dat er feitelijk sprake is van het relateren aan de lokale stroomsnelheid (nabij de bodem). Verder is deze stabiliteitsvoorspeller constructie- en randvoorwaarde-specifiek en dient hier meer ter illustratie. Aan het voldoen van deze

voorspeller in de praktijk kan wel worden gesteld dat het algemene concept, zoals waarvan hier is uitgegaan, bruikbaar is als de precieze stroomomstandigheden bekend zijn.

3.2.1.3 Met expliciteren van spreiding in belasting en sterkte

a) voor normale verdelingen

Uitgangspunt: bepaalde mate van overlapping (γ) bepaalt stabiliteit:

$$\frac{u_c^2 (1 + r_\tau \gamma)}{C^2 \Delta D (1 - r_{\tau\tau} \gamma)} = \Psi_c^1 \quad (3.13)$$

met

r_τ = variantie optredende schuifspanning ($= \sigma_\tau / \tau$) en

$r_{\tau\tau}$ = variantie weerstand biedende schuifspanning ($= \sigma_{\tau\tau} / \tau_\tau$),

waarin $\sigma_{\tau\tau}$ = standaardafwijking van de sterkte een τ_τ = sterkte, uitgedrukt in weerstand biedende schuifspanning (evenredig met ΔD).

Ψ_c^1 = aangepaste Shieldsparameter.

Met $\gamma = 0.625$ (Boutovskaia, 1997) en $r_\tau = 0.4$ en $r_{\tau\tau} = 0.3$ (geldend voor uniforme stroming) wordt een goede overeenkomst verkregen met Shields voor het criterium dat door hem is afgeleid (overeenkomstig "general movement of the bed"); dit betekent door gelijkstelling van (3.4) en (3.13), na invulling in (3.13) dat $\Psi_c^1 = 1.538 \Psi_c$. Dus:

$$\frac{0.65 u_c^2 (1 + r_\tau \gamma)}{C^2 \Delta D (1 - r_{\tau\tau} \gamma)} = \Psi_c \quad (3.14)$$

b) voor niet-normale verdelingen

Hierbij kan een factor α_e voor de scheefheid worden ingevoerd, die de verhouding weergeeft van de maximale afwijking tot de standaardafwijking: voor normale verdelingen is die 3, voor scheve verdelingen zal die afwijken. Hierbij is α_e voor de optredende schuifspanning gerelateerd aan dat deel van de verdeling dat *boven* het gemiddelde ligt en de scheefheid α_{er} voor de weerstand biedende schuifspanning van dat deel van de verdeling dat *onder* het gemiddelde ligt.

Daarmee wordt (3.13) geschreven als:

$$\frac{u_c^2 (1 + \frac{\alpha_e}{3} r_\tau \gamma)}{C^2 \Delta D (1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_{\tau\tau} \gamma)} = \Psi_c^1 \quad (3.15)$$

Hierbij is de waarde van Ψ_c^1 niet meer absoluut gedefinieerd. Koppeling aan de bekende Shieldswaarde Ψ_c via $\Psi_c^1 = 1.538 \Psi_c$, zoals hiervoor bij (3.14), is feitelijk niet juist omdat dit geldt voor uniforme stroming en daarbij uit metingen bepaalde waarden van r_τ en $r_{\tau\tau}$. Wordt dit omwille van praktische toepasbaarheid hier toch gedaan dan wordt, vergelijkbaar met (3.14) de volgende uitdrukking gevonden:

$$\frac{0.65 u_c^2 (1 + \frac{\alpha_e}{3} r_\tau \gamma)}{C^2 \Delta D (1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_{\tau\tau} \gamma)} = \Psi_c \quad (3.16)$$

Er zal in werkelijkheid vrijwel altijd sprake zijn van niet-normale verdelingen (bij de belasting blijkt dit doordat de schuifspanning niet lineair is met de instantane stroomsnelheid - welke laatste vaak als normaal wordt beschouwd -). Omwille van de eenvoud zal het toch vaak nodig, dan wel wenselijk, zijn om normale verdelingen aan te nemen.

Door het in aanmerking nemen van spreidingen wordt het probleem van bepaling van de invloedsfactor k in (3.6) dus verschoven naar het bepalen van waarden van de varianties in optredende belasting en weerstand en de overlappingsfactor γ . Deze laatste is voor (normale verdelingen) mogelijk een constante en alleen gekoppeld aan het schadeniveau Ψ_c (zie ook Akkerman, 1998).

3.2.2 Type B: Gerelateerd aan de lokale stroomsnelheid nabij de bodem

Opmerking: tenzij anders aangegeven wordt als praktische definitie hier gehanteerd: de stroomsnelheid juist boven de verstoring als gevolg van de ruwheidselementen (circa 2.5 maal k_s boven de bodem)

3.2.2.1 Zonder expliciteren van spreiding in belasting en sterkte

Introductie van de lokale invloedsfactor k_l in combinatie met de lokale kritieke stroomsnelheid $u_{c,l}$, waarbij $u_{c,l}$ als volgt is gedefiniëerd:

2DH stroming: $u_{c,l}$ = kritieke verticaalgemiddelde stroomsnelheid in as van straal als functie van x, y

2DV stroming: $u_{c,l}$ = kritieke gemiddelde stroomsnelheid in straal als functie van x

3D stroming: $u_{c,l}$ = kritieke gemiddelde stroomsnelheid in straal als functie van x, y

$$\frac{(k_l u_{c,l})^2}{C^2 \Delta D} = \Psi_c \quad (3.17)$$

Bij stroming met een duidelijk straalkarakter (vrije stralen, wandstralen) blijkt deze formulering zeer bruikbaar, omdat de variatie in k_l doorgaans veel kleiner is dan de variatie in k , zoals bleek uit analyse met het STABASE databestand (Akkerman (1994)); een verklaring dat de turbulentie-invloed op k_l daar klein lijkt te zijn is dat bij deze analyse sprake was van het in beschouwing nemen van de zwaarst aangevallen locatie; dit is doorgaans op die plaats waar volledige reattachement heeft plaatsgevonden en bijgevolg de turbulentie doorgaans niet excessief hoog is.

In zijn algemeenheid, ook geldend voor minder geprononceerde stralen als hiervoor bedoeld, is de stabiliteitsvoorspeller met een stroomsnelheid aan de bodem $u_{c,b}$ en bijbehorende invloedsfactor $k_{l,b}$ te schrijven als:

$$\frac{(k_{l,b} u_{c,b})^2}{c_b^2 \Delta D} = \Psi_c \quad (3.18)$$

De coëfficiënt c_b is nu in de plaats gekomen van de ruwheidswaarde C ; door het in beschouwing nemen van de stroomaanval nabij de bodem kan worden verwacht dat deze niet meer van de waterdiepte en de k_s afhankelijk is. Verwacht kan aldus worden dat c_b een constante waarde zal hebben; wel is de eenheid gelijk aan die van C : $m^{1/2}/s$.

Bij voorkeur dient de referentiediepte aan de bodem zo gekozen te worden dat deze juist boven de beïnvloeding ligt van de individuele korrels (op circa 2.5 maal k_s).

3.2.2.2 Met expliciteren van spreiding in belasting

Door May et al (1993) worden de $k_{l,b}$ en c_b samengenomen:

$$\frac{(u_{c,b})^2}{\Delta D} = \frac{2g}{c} \quad (3.19)$$

met $c = 0.36$ voor $r_{u,b} < 0.1$ en $c = 12.3 r_{u,b} - 0.87$ voor $r_{u,b} \geq 0.1$, met $r_{u,b}$ als turbulentie-intensiteit op 1/10 van de waterdiepte. Opgemerkt wordt dat ook $u_{c,b}$ door May is gedefinieerd op 1/10 van de waterdiepte en dat D gedefinieerd is als D_n . Bij de meeste proeven lag het niveau van 1/10 van de waterdiepte buiten de lokale beïnvloeding door de steentjes (2 tot 3 maal k_s). May et al. hebben ook een vergelijking gemaakt met Izbash (1970) wat voor c resulteerde in een waarde van 0.33; dit stemt goed overeen met hun waarde van 0.36.

Een andere aanpak is die waarbij naar de piekwaarden van de belasting wordt gekeken, uitgaande van een referentie waarde van de turbulentie intensiteit aan de bodem van 0.15 (uniforme stroming), zoals ook al bij (3.11) is aangegeven. Hiervoor kan worden geschreven:

$$\frac{u_{c,b}^2}{c_b^2 \Delta D} \left(\frac{1 + \alpha_e r_{u,b}}{1.45} \right)^2 = \Psi_c \quad (3.20)$$

Bij een normale verdeling geldt als referentiewaarde voor α_e : $\alpha_e = 3.0$.

3.2.2.3 Met expliciteren van spreiding in belasting en sterkte

Bij koppeling met de lokale stroomsnelheid, hierna $u_{c,b}$ genoemd, kan de ruwheidsfactor C worden vervangen door een coëfficiënt die min of meer constant zou moeten zijn (c_b in $m^{1/2}/s$). De invloedsfactor van de optredende schuifspanning aan de bodem als gevolg van de aanwezigheid van de constructie, aangeduid met $k_{l,b}$ in relatie (11) kan nu vervallen. Het primaire effect (grootte van de optredende schuifspanning) zit namelijk al verwerkt in de grootte van de lokale optredende stroomsnelheid en het secundaire effect (turbulentie-effect) zit al in de verdelingen van de belasting en sterkte, zoals in rekening worden gebracht overeenkomstig (3.16). We vinden nu met Ψ_c^{11} als gemodificeerde Shieldswaarde (voor een verklaring van symbolen zie (3.16)):

$$\frac{u_{c,b}^2}{c_b^2 \Delta D} \frac{\left(1 + \frac{\alpha_e}{3} r_r \gamma\right)}{\left(1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_r \gamma\right)} = \Psi_c^{11} \quad (3.21)$$

Wederom wordt opgemerkt dat door het in aanmerking nemen van spreidingen het probleem van bepaling van de invloedsfactor k in (3.6) wordt verschoven naar het bepalen van waarden van de varianties in optredende belasting en weerstand en de overlappingsfactor γ . Deze laatste is voor (normale verdelingen) mogelijk een constante en alleen gekoppeld aan het schadeniveau Ψ_c .

3.3 Stabiliteitscriterium voor individuele korrels (microschaal)

Opmerking: omdat hier de micro-eigenschappen worden bekeken is onderscheid in wel en geen spreiding in belasting en sterkte hier niet gemaakt.

Schuifspanning en drukfluctuaties

Bij stroming oefent een ruwe wand een schuifspanning uit op de bovenliggende waterkolom. Omgekeerd oefent de stroming een kracht uit op de bodem. Hoewel doorgaans over een schuifspanning op de bodem wordt gesproken, bestaat deze kracht feitelijk slechts voor een klein deel uit schuifspanning; belangrijker voor de stabiliteit van korrels op de bodem zijn de sleep- en liftkrachten die op de individuele korrels worden uitgeoefend. De stabiliteitsbedreigende "schuifspanning" is dus slechts een rekengrootheid waarin allerlei krachten (vooral drukkrachten) op de korrels zijn verdisconteerd.

Hieromtrent bestaat echter veel verwarring en er is, ons inziens ten onrechte, sprake van een richting die zich bezig houdt met het "schuifspanningsconcept" en een richting die het "druk(fluctuatie)concept" aanhangt. Voor de begrenzing van waterloop en de bovenste laag korrels is dit onderscheid dus niet wezenlijk.

Krachtenevenwicht en individuele korrelverplaatsing

Aan de hand van beschouwingen vanuit het krachtenevenwicht op een korrel kan de juistheid van het Shields-concept worden aangetoond. Het probleem voor praktische toepassing van de microschaal-benadering is dat er vooralsnog geen zicht is op een juiste bepaling, hetzij in schaalmodellen, hetzij in rekenmodellen, van het instantane detailstroombeeld en de afgeleide belastingen (vooral drukken) bij een arrangement van korrels (zoals bij bodemverdedigingen). Dit geldt des te meer wanneer naar individueel verplaatsingsgedrag wordt gekeken. Wel is fundamenteel onderzoek op dit gebied van belang vanwege de spin-off naar meer globale modellering. Dit kan met name worden verwacht bij het in rekening brengen van turbulentie nabij de bodem in de stabiliteitsvoorspellers. Relevante referenties zijn bijvoorbeeld White (1940), Akkerman (1998) en Booij (1998). Dit aspect zal in een later deelproject (Q2395.30) verder worden uitgewerkt.

3.4 Principe-keuze van stabiliteitsvoorspellers

In het navolgende is een selectie gemaakt van stabiliteitsvoorspellers waarvoor is nagegaan of er relevante data voor beschikbaar zijn in de literatuur. Daarbij is er van uitgegaan dat er een term aanwezig moet zijn die de turbulentie in beschouwing neemt. "Engineering"-voorspellers met invloedsfactoren, gerelateerd aan de constructie, zonder dat de turbulentie-invloed expliciet wordt gemaakt, blijven hier buiten beschouwing.

Stabiliteitscriteria voor individuele korrels (microschaal) blijven verder buiten beschouwing omdat deze vooralsnog niet praktisch bruikbaar zijn.

Koppeling van de turbulentie aan rekengrootheden in simulatiemodellen (zoals de turbulente kinetische energie) is hier niet relevant; dit aspect komt bij het desbetreffende deelproject aan de orde.

De opbouw van alle voorspellers is vergelijkbaar: er is steeds sprake van een destabiliserende term in de teller, een stabiliserende term in de noemer en de ratio van beiden is als een zeker stabiliteitscriterium op te vatten.

Verticaalgemiddelde voorspellers

1. Voorspeller gebaseerd op u_c en met in rekening brengen van verticaal-gemiddelde en constructie-afhankelijke spreiding in belasting (3.10):

$$\frac{0.7(c_s + 1.45 \frac{g}{C^2})u_c^2}{g \Delta D} = \Psi_c$$

Opmerking: het constructie-specifieke zit nu verwerkt in de waarde van c_s .

2. Voorspeller gebaseerd op u_c waarin ook de spreiding in sterkte is meegenomen met veronderstelde normale verdelingen van belasting en spreiding (3.13):

$$\frac{u_c^2 (1 + r_r \gamma)}{C^2 \Delta D (1 - r_r \gamma)} = \Psi_c^1$$

Opmerking: dit is een algemene uitdrukking, waar de afhankelijkheid van de turbulentie met de constructie nog niet expliciet aangegeven is.

Het probleem ligt verder in de bepaling van Ψ_c^1 ; voor uniforme stroming en veronderstelde normale verdelingen is aan te nemen $\Psi_c^1 = 1.533 \Psi_c$. Vooral nog zou dit ook voor niet-uniforme stroming kunnen worden aangehouden (dit dient echter nog wel te worden getoetst).

Lokale voorspellers

3. Voorspeller gebaseerd op $u_{c,b}$, en in rekening brengen van spreiding in belasting nabij de bodem (3.20):

$$\frac{u_{c,b}^2}{c_b^2 \Delta D} \left(\frac{1 + \alpha_e r_{u,b}}{1.45} \right)^2 = \Psi_c$$

Opmerking: de waarde van c_b is naar verwachting nu niet meer afhankelijk van de ruwheid; de invloed van de constructie komt tot uitdrukking in α_e en r_r .

4. Voorspeller gebaseerd op $u_{c,b}$, en in rekening van spreiding in belasting en sterkte (3.21); hierbij zijn ook niet-normale verdelingen meegenomen:

$$\frac{u_{c,b}^2}{c_b^2 \Delta D} \frac{(1 + \frac{\alpha_e}{3} r_r \gamma)}{(1 - \frac{\alpha_{er}}{3} r_r \gamma)} = \Psi_c^{11}$$

Opmerking: de waarde Ψ_c^{11} is thans niet bekend en zou voor uniforme stroming en normale verdelingen kunnen worden vastgesteld door heranalyse van het werk van Boutovskaia (1997) (echter nu met c_b in plaats van C en met in rekening brengen van de spreiding in sterkte).

4 Relevante meetgegevens

In het kader van deze literatuurinventarisatie is literatuur verzameld betreffende stabiliteitsgegevens die van belang kunnen zijn voor toetsing van stabiliteitsvoorspellers. Hierbij is vooralsnog sprake van een brede inventarisatie zowel wat betreft de gegevens als wat betreft de relevante voor de stabiliteitsvoorspellers. Het gaat daarbij in eerste instantie niet om de precieze gegevens zelf, maar om aan te geven of er bruikbare gegevens zijn of niet, zodat hier in later stadium gemakkelijk toegang toe kan worden verkregen.

De literatuur in dit project is vooralsnog beperkt tot verticaal vernauwende constructies waarbij de vernauwing aan de bodem is gesitueerd (drempels, bodemschuiven, bodemoverlaten, backward-facing steps en dergelijke).

Hoewel in het projectplan van het samenwerkingsproject STEENSTABILITEIT voor 1998 niet duidelijk is aangegeven wat de rol van de hier geïdentificeerde gegevens zou kunnen zijn, is het denkbaar dat ze een sturende rol kunnen vervullen bij het verwerpen of aanvaarden van een stabiliteitsconcept. Met name geldt dit voor het onderdeel "schematisatie turbulentie" dat in deelproject Q2395.30 zal worden bestudeerd, als ook voor het onderdeel "evaluatie" (deelproject Q2395.50), waarin tot een keuze van een bruikbaar concept wordt gekomen.

Gekozen is voor het maken van een overzichtstabel, Tabel 4-1, waarbij voor de beschouwde stabiliteitsvoorspeller de benodigde en de aanwezige gegevens voor de diverse onderzoeken wordt aangegeven.

Bijzonderheden van de relevante onderzoeken zijn in Bijlage C weergegeven.

De overzichtstabel is hierna aangegeven. Het blijkt dat vele gegevens, nodig voor toetsing van de stabiliteitsconcepten, ontbreken. Dit benadrukt de noodzaak tot het doen van gerichte experimenten, welke in het kader van het samenwerkingsproject ook zijn voorzien.

5 Referenties

5.1 Referenties zonder relevante meetdata

Abt, S.R. et al (1987): Development of riprap design criteria by riprap testing in flumes, phase I and phase II, CSU, report nr NUREG/CR-4651 and ORNL/TM-10100

Akkerman, G.J. (1994): STABASE, Databestand bodemverdedigingen, tool-evaluatie, WL|Delft Hydraulics, interne notitie, Q1899.

Akkerman, G.J. (1998): Project Filters, toplaagstabiliteit granulaire filters benedenstrooms van constructies, WL|Delft Hydraulics, rapprt Q2332, Delft.

Albertson, M.L. (1953): Effect of shape on the fall velocity of gravel particles, Proc. 5th Hydr. Conf., Univ. of Iowa, Bulletin No 34.

Bijker, E.W. (1967): Some considerations about Scales for Coastal Models with Movable Beds, Dissertation, , Delft University of Technology.

Bonneville, R. (1963): Essais de Synthèse des Lois de Debut d'entraînement des Sediments sous l'action d'un Courant en Regime Uniforme, Bull du CREC, No 5, Chatou.

Booij, R.(1998): Erosie onder een geometrisch open filter, Rapport 2-98, TUDelft.

Boutovskaia, L.(1997): analyse gamma van experimenten uit M648/M863 Informele notitie DWW (in beheer bij Hoffmans).

Breusers, H.N.C. (1965): Geleidelijke Sluiting IV, Invloed van vorm en gradering op het begin van beweging van bodemmateriaal, WL / DELFT HYDRAULICS , Rapport modelonderzoek M731-VI.

Breusers, H.N.C., Schukking, W.H.P. (1971): Begin van beweging van bodemmateriaal, WL / DELFT HYDRAULICS, Speurwerkverslag S159-I.

Breusers, H.N.C. (1972): Drukfluctuaties in turbulente stromingen, verslag literatuuronderzoek, WL|Delft Hydraulics rapport S230, Delft.

Breusers, H.N.C (1976): Begin van beweging van bodemmateriaal, literatuur 1971-1974, WL / DELFT HYDRAULICS, Speurwerkverslag S159-II.

Dyer, K.R. (1980): Velocity profiles over rippled bed and the threshold of movement of sand, Est. and Coast. Mar. Sc., pp 181-199.

Franken, A., Ariëns, E., Klatter, L. (1995): Handleiding voor het ontwerpen van bodemverdedigingen achter tweedimensionale uitstroombouwwerken, Rijkswaterstaat, Bouwdienst, doc. nr. BOD-R-95002.

Graf, W.H. et al. (1977): Les phenomenes de deposition et d'erosion dans un canal alluvionnaire, Journal of Hydraulic Research, Vol. 15, No. 2.

Grass, A.J. (1970): Initial instability of fine bed sands,

Journ of the Hydr. Div, Proc ASCE, HY3, March 1970.

Hoffmans, G.J.C.M. (1992): Two-dimensional mathematical modelling of local-scour holes. Communications on Hydr. and Geotech. Engrg., No.92-7, Delft Univ. of Technology.

Hoffmans, G.J.C.M. (1993): Two-dimensional modelling of local-scour holes, Dissertation, Delft University of Technology.

Hoffmans, G.J.C.M. (1993): A study concerning the influence of the relative turbulence intensity of local scour holes, Rijkswaterstaat, DWW, Report W-DWW-93-251, February 1993.

Hoffmans, G.J.C.M. (1994): Ontgroningen door horizontale stralen, Rijkswaterstaat, DWW, Conceptnota.

Hoffmans, G.J.C.M. (1997): Rekenregels, steenstabiliteit Rijkswaterstaat, DWW, informele notitie 7 maart 1997.

Hoffmans, G.J.C.M. (1997): Startnotitie steenstabiliteit, Rijkswaterstaat, DWW, informele notitie 16 september 1997.

Izbash, S.V., Khaldre, Kh.Yu. (1970); Hydraulics of River Channel Closure, Butterworths, London.

Komar, P.D. (1960): Entrainment of sediments from deposits of mixed grains and densities, Advances in fluvial dynamics and stratigraphy. Edited by Carling and Dawson, Wiley and Sons, New York.

Laan, G.J. (1996): De relatie tussen eisen aan loskorrelige steenmaterialen en ontwerpparameters, informatie ten behoeve van waterbouwkundige constructies, RWS DWW, Rapport P-DWW-96-069.

May, R.W.P., Escameia, M. (1993): Riprap stability in highly turbulent flows, structures, Preprints International Riprap Workshop pp. 679-691, Ft Collins, USA.

Paintal, A.S. (1971): Concept of critical shear stress in loose boundary channels, Journ. of Hydr. Research 9, No 1, pp 91-113.

Pilarczyk, K.W. (1995): Simplified Unification of Stability Formulae for Revetments under Current and Wave Attack, in: River, Coastal and Shoreline Protection, pp. 53-77, Wiley & Sons.

Rijn, L.C. van (1993): Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas Aqua Publications, De Hare 28, 8375 GD Oldemarkt.

Rijn, L.C. van (1997): Cross-shore modelling of graded sediments, WL | DELFT HYDRAULICS, Basic research Z2181.

Ruiter, J.C.C. (1980): Stochastisch model voor het in beweging komen van sedimentkorrels als functie van lokale variabelen, WL / DELFT HYDRAULICS, Rivieren, Concept-nota R657-IX.

Ruiter, J.C.C. (1982): The mechanism of sediment transport on bed forms, Euromech 156: Mechanics of Sediment Transport/Istanbul.

Shields, A. (1936): Anwendung der Aehnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung, Mitt. der Preus. Versuchsanstalt fuer Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, Berlin.

- Simons, D.B. (1960): Uniform water conveyance channels in alluvial material, Proc. Am. Civ. Eng. 86, HY5, Paper 2484 pp 31-71.
- Verheij, H.J. (1997): Stroming in granulaire filters, oriënterende experimenten WL / DELFT HYDRAULICS, meetverslag Q2331.
- Verwey, A. and R.C.Agtersloot (1998): Turbulentie opwekking door drempels van steenbestorting, berekeningen met Delft3D, WL | DELFT HYDRAULICS, rapport Q2369, Delft.
- Vroeg, H. de, and R.Bijker (1989): Stability analysis of gravelcover on part of pipeline, Mobil Camelot Project, Delft Hydraulics, report H1018, Delft.
- Wal, M. van der, et al (1982): Aantasting van dwarsprofielen in vaarwegen, erosie en stabiliteit van bodem en oevers, inleiding tot relevante verschijnselen, WL | DELFT HYDRAULICS, rapport M1115 deel VIII, Delft.
- Werkgroep EKOR (1982): Stormvloedkering Oosterschelde, Onderzoek korrelstabiliteit, Deltadienst, nota en bijlagen, 21 EKOR-N-82025.
- White, C.H. (1940): The equilibrium of grains on the bed of a stream, Proc. Royal Soc. London, Series A, Vol. 174.
- Xing, W. and H.L.Fontijn (?): Experimental study of the hydrodynamic forces on a bed element in an open channel with a backward-facing step,

5.2 Referenties relevante meetdata

- Akkerman, G.J. (1985): Hydraulic design criteria for rockfill closure of tidal gaps, vertical closure method, WL / DELFT HYDRAULICS, Evaluation report M 1741 -IV.
- Akkerman, G.J. (1988): Stormvloedkering Nieuwe Waterweg -STORCOM -, oriënterend onderzoek naar de stabiliteit van de bodemverdediging, WL / DELFT HYDRAULICS, verslag modelonderzoek Q870.
- Akkerman, G.J. (1993): Fysische validatie rekenprogramma CLODES, WL / DELFT HYDRAULICS, verslag modelonderzoek Q1380.
- Eijsink, W.D. (1984): Stormvloedkering Oosterschelde, stabiliteit bodemverdediging, WL / DELFT HYDRAULICS, Verslag modelonderzoek M 2010.
- Escarameia, M. and R.W.P.May (1992): Turbulence downstream of structures, HR Wallingford, report SR313, Wallingford.
- Meijer, D.G. (1992): Bodemverdediging van de Stormvloedkering in het Hartelkanaal, WL / DELFT HYDRAULICS, Verslag modelonderzoek Q 1522.
- Schukking, W.P.H. et al. (1972): Systematisch onderzoek naar twee- en driedimensionale ontgroningen, WL / DELFT HYDRAULICS, Verslag modelonderzoek M 648/863, Band I, II en III.
- Uwland, J. (1982): Stabiliteit stortsteen onmiddellijk na constructies, WL / DELFT HYDRAULICS, Verslag modelonderzoek M1834.
- Werf, A vd (1966): Stroombestendigheid sluitgatdrempel -stabiliteit los materiaal achter een dam met een brede kruin, WL / DELFT HYDRAULICS, Verslag modelonderzoek M 711-IV

A Mogelijke definitie van schade

Hierna wordt een mogelijk schadeconcept uitgewerkt, gebaseerd op eerdere, praktische ervaring. Er zijn meerdere methoden denkbaar; de hier aangegeven methode dient daarom uitsluitend als bijdrage bij het vaststellen van een meest geschikte methodiek voor het bepalen van toestand van een bodemverdediging.

Een veelgebruikte definitie van schade, bijvoorbeeld bij golfbreker-ontwerp, is een die is gerlateerd aan het erosiegebied A_e . De schade S is hierbij gedefinieerd als het aantal vierkanten met een zijde gelijk aan de korreldiameter D_n die in het erosiegebied A_e passen, ofwel:

$$s = \frac{A_e}{D_n^2} \quad (\text{A.1})$$

Dit is dus nagenoeg gelijk aan het aantal korrels dat in een *bovenlaag* uit schadegebied A_e verdwijnt.

Opmerking: bij een 2-dimensionale benadering wordt A_e soms vervangen door een kenmerkende erosielengte L_e en wordt de schade per m^1 dam beschouwd.

Hierna wordt een meer universeel schadecriterium afgeleid, dat uitgaat van het gradiënt-bodemtransport, zoals bijvoorbeeld met Paintal berekend. Uit de transportberekeningen wordt een gradiënt van het totale volume S_b berekend, inclusief poriën (poriegehalte n_p):

$$\frac{\partial S_b}{\partial x} = \frac{\partial S}{\partial x(1-n_p)} \quad (\text{A.2})$$

Vanwege continuïteit geldt:

$$\frac{\partial S_b}{\partial x} = - \frac{\partial z_b}{\partial t} \quad (\text{A.3})$$

met z_b = bodemniveau (opwaarts positief).

Er kan nu een schadeniveau s_n worden gedefinieerd als zijn de weggeërodeerde gemiddelde dikte van het korrelmateriaal in het schadegebied gedeeld door de oorspronkelijke dikte. Deze laatste kan worden gesteld op $n_i D_n$, met bijvoorbeeld $n_i = 1.5$ of 2 voor een anderhalves-respectievelijk en dubbellaags-systeem. Bij het bereiken van $s_n = 1$ kan dan worden gesteld dat het functioneren van de bodemverdediging niet langer meer gegarandeerd kan worden, omdat lokaal de bodemverdediging is verdwenen.

Als de transportgradiënt tijdens het erosieproces niet verandert, kan het schadeniveau s_n dus als volgt worden geschreven als functie van de tijd t :

$$s_n = \frac{1}{n_i D_n} \frac{\partial S_b}{\partial x} t \quad (\text{A.4})$$

met t als representatieve tijdsduur (s) waarin er sprake is van erosie van de korrellagen.

Bij tijdsafhankelijke stroming kan s_n worden gesommeerd over gediscretiseerde stroomsituaties.

Opgemerkt kan worden dat in het verleden in de schaalmodellen voor de bodemverdediging van de Stormvloedkering Oosterschelde s_n direct kon worden bepaald via tellen van stenen die uit het schadegebied waren verplaatst. Daarbij was steeds sprake van een (oorspronkelijk) tweelaags-systeem (laagdikte $2D_n$). Dit betekende dat $s_n = 0.5$, (toendertijd werd s_n met schadeconcentratie aangeduid) er één laag stenen uit het schadegebied was verdwenen: dit was bij het tweelaags-systeem de maximale toegestane schade. Dit concept van bepalen van de schadeconcentratie (gerelateerd aan laagdikte) bleek zeer bruikbaar bij het verdere ontwerp van de bodemverdediging van de Stormvloedkering Oosterschelde. Te verwachten is dat bij ontwerp en onderhoud dit in zijn algemeenheid een praktisch goed bruikbaar concept is. Een schadedefinitie die aan het aantal stenen is gekoppeld lijkt minder zinvol.

Beperkingen

Als beperkingen van deze methode kunnen de volgende worden genoemd:

- Verondersteld is dat er van een redelijk homogene optredende schade sprake is, m.a.w. dat het gemiddeld te verwachten transport goed overeenkomt met de berekende volgens Paintal. Dit zal minder het geval zijn wanneer zeer extreme gebeurtenissen het transport bepalen, bijvoorbeeld ingeval van extreme/kortdurende/hoofturbulente belasting. In het laatste geval zal rekening gehouden moeten worden met spreidingen en kansen (probabilistische aanpak).
- Paintal geldt feitelijk voor uniforme stroming. Wanneer sprake is van over korte afstand veranderende stroming (rapidly varied flow) kan de spronglengte van korrels veranderen: een voorbeeld is nabij de boeg van een schip, waar de stroomversnelling aanzienlijk langere spronglengtes en daarmee grotere transporten veroorzaakt dan op grond van Paintal wordt voorspeld.
- De pakking van getransporteerde korrels is minder dicht dan van korrels die in het bed aanwezig zijn. Overigens kan dit als secundair effect worden aangemerkt.

B Opmerkingen ten aanzien van toepassing stabiliteitsvoorspellers bij rekenmodellen

Stabiliteitsvoorspellers kunnen worden gekoppeld aan rekenuitkomsten, metingen etcetera. Bij de toenemende voorspelkracht van rekenmodellen is de afstemming van de stabiliteitsvoorspellers aan relevante rekengrootheden van belang. Bij dat laatste is vooral de voorspelde turbulentie van belang. Dit zal bij het betreffende deelproject verder worden uitgezocht. Volstaan wordt hierna met het vermelden van globale "state-of-the-art" uitgangspunten bij het toepassen van de huidige beschikbare rekenmodellen.

Belangrijk is dat bij de bepaling van de turbulentie aan de bodem rekening wordt gehouden met gebieden waar kleine stroomsnelheden kunnen voorkomen, echter in combinatie met zeer hoge turbulentie (zoals bij bodemneren). Met de thans gebezigde formulering volgens

$k_{o,b} = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}}$ is dit niet mogelijk. Met name op dit aspect zal bij de turbulentiemodellering

worden ingegaan.

SOBEK

SOBEK is een 1-dimensionaal rekenmodel waarmee dwarsprofielgemiddelde stroomsnelheden worden berekend bij geleidelijk veranderende doorsneden. Feitelijk worden ook lokale verticaal gemiddelde snelheden berekend; deze worden echter niet uitgevoerd. Het is in principe mogelijk SOBEK met deze functionaliteit uit te breiden. Turbulentie wordt in SOBEK niet gemodelleerd. Een andere beperking is dat overgangen van sub- naar superkritische stroming nog niet kunnen worden berekend.

De berekende parameters die voor de korrelstabiliteit van belang zijn beperken zich daarmee tot de globale parameters (u_c) en h (en daarmee C).

SUPSUB

SUPSUB is een 1-dimensionaal rekenmodel, vergelijkbaar met SOBEK, maar met de mogelijkheid om stroomovergangen (sub-/superkritisch) te berekenen. Alhoewel in superkritische stroming het water zeer turbulent kan zijn, wordt dit niet expliciet in SUPSUB berekend. Dit programma zal te zijner tijd deel uit gaan maken van SOBEK.

CFX

CFX is een rekenpakket voor gesloten leidingen waarmee in 3 dimensies turbulente stroming kan worden gemodelleerd m.b.v. verschillende turbulentiemodellen (k - ϵ , Reynolds-stress, algebraïsch, etcetera) en waarbij ook verticale versnellingen worden meegenomen. Toepassingen zijn in principe beperkt tot "rigid-lid" (geen vrije waterspiegel). Ten aanzien van de turbulentiemodellering zijn problemen geconstateerd, vooral bij de turbulentie-opwekking nabij het wateroppervlak (Verwey et al., 1998).

Probleem, zoals bij alle rekenmodellen, is dat de turbulente kinetische energie k_o moet worden gemodelleerd en ergens moet worden opgelegd. Dit wordt thans aan de bodem gedaan (gekoppeld aan de ruwheidswaarde k_s). Feitelijk willen we $k_{o,b}$ berekenen. Dit zou direct

kunnen worden gedaan aan de hand van de fluctuaties van de drie stroomsnelheidscomponenten op een bepaalde plaats. Deze laatste worden echter niet berekend in een k-ε rekenmodel (feitelijk is het andersom: k_s wordt berekend, waaruit een indruk van de turbulentie-intensiteit wordt verkregen). Groot voordeel van CFX ten opzichte van 1-D modellen is dat de lokale stroomsnelheid (bijvoorbeeld op 2 tot 3 maal de k_s boven de bodem) kan worden berekend.

DELFT3D

DELFT3D is een rekenpakket waarmee 3-dimensionale stroming kan worden berekend voor situaties met een vrije wateroppervlak. Daarbij moet worden opgemerkt dat verticale versnellingen vooralsnog niet kunnen worden gemodelleerd. Daar staat tegenover dat er wel een goed vrije-waterspiegel afhandeling plaats vindt en dat er meer vertrouwen is omtrent de turbulentieformulering. Overigens geldt voor de turbulentievoorspelling en voorspelling van de lokale stroomsnelheid bij DELFT3D hetzelfde als hiervoor is genoemd bij CFX.

DUCT-SUSTRA

DUCT-SUSTRA is een specifiek rekenmodel voor het voorspellen van ontgroningen achter bodemverdedigingen. Daarbij is bewezen, aan de hand van gevalideerde voorspellingen, dat dit model de erosie goed beschrijft en dat dus de invloeden die het erosieproces beïnvloeden voldoende representatief worden weergegeven. Kanttekening bij dit model is dat het geen generieke modellering betreft en dat er veel aandacht is geweest voor het vinden van de juiste turbulentiemodellering voor de verschillende stroomzones (menglaag, reattachement zone, neer etcetera).

Bij de nadere studie omtrent de turbulentiemodellering (Q2395.30) zal dit model mede in beschouwing worden genomen als referentie voor de ontwikkeling van specifieke rekenmodellen, naast de meer generieke rekenmodellen zoals DELFT3D.

C Details relevante onderzoeken

In het navolgende is, in aanvulling op de in de tabel vermelde aanwezigheid van gegevens, relevante informatie opgenomen ten aanzien van deze onderzoeken.

Dit zijn de volgende onderzoeken:

- | | |
|------------------------|--|
| WL-M648/M863 (1972): | Systematisch onderzoek naar twee- en driedimensionaal ontgrondingen |
| WL-M711-IV (1966): | Stroombestendigheid sluitgatrempel - stabiliteit los materiaal achter een dam met brede kruin |
| WL-M1741-IV (1985): | Hydraulic design criteria for rockfill closure of tidal gaps - vertical closure method |
| WL-M 1834 (1982): | Stabiliteit stortsteen onmiddellijk na constructies |
| WL-M2010 (1984): | Stormvloedkering Oosterschelde - stabiliteit bodemverdediging |
| WL-Q870 (1988): | STORCOM Stormvloedkering Nieuwe Waterweg - Oriënterend onderzoek naar de stabiliteit van de bodemverdediging |
| WL-Q1380 (1993): | Fysische validatie CLODES |
| WL-Q1522 (1992): | Bodemverdediging van de Stormvloedkering in het Hartelkanaal |
| HR Wallingford (1992): | Channel Protection - Turbulence downstream of structures |

Naam onderzoek/onderzoekers

WL-M648/M863 (1972): Systematisch onderzoek naar twee- en driedimensionaal ontgroningen

onderzoeker: W.H.P.Schukking

Type constructie

Afsluitdam

Relevante details proefopstelling

Stroomgoten waarvan de ene met breedte 0,50m en max.waterdiepte 0,30m, en de andere met breedte 1,0m en max.waterdiepte 0,60m.

Bodemmateriaal was zand, bakeliet en polystyreen

Relevante details metingen

Snelheidsmetingen uitgevoerd met een micromolen in de gootas in 10 à 15 punten in de verticaal, inclusief turbulentie

Opmerkingen

-

Naam onderzoek/onderzoekers

WL-M711-IV (1966): Stroombestendigheid sluitgatrempel - stabiliteit los materiaal achter een dam met brede kruin

onderzoeker: A. van der Werf

Type constructie

Bodemverdediging achter een breedkruinige, overstroombare dam met trapeziumvormige doorsnede.

Relevante details proefopstelling

Proeven uitgevoerd in Grote Stroomgoot (breedte 1,40 m, waterdiepten 0,5 à 1,0 m)
Gevarieerd zijn: kruinniveau, kruinbreedte, drempelhoogte, waterdiepte, steendiameter bodemverdediging
Bodemmateriaal: basalt en profier ($D_{50} = 0,008$ à $0,050\text{m}$)
Constance benedenwaterstand
Schade bepaald door tellen van verplaatste gekleurde stenen

Relevante details metingen

Begin van bewegen is gedefinieerd als het moment waarbij in trilling geraakte stenen omhoog worden gewipt en weggrollen.
Geen turbulentiemetingen

Opmerkingen

De interpretatie van de metingen wordt bemoeilijkt doordat het schadeniveau van proef tot proef sterk varieerde met als gevolg wisselende ψ -waarden

Naam onderzoek/onderzoekers

WL-M1741-IV (1985): Hydraulic design criteria for rockfill closure of tidal gaps -
vertical closure method

onderzoeker: G.J.Akkerman and J.L.M.Konter

Type constructie

afsluitdam

Relevante details proefopstelling

-

Relevante details metingen

Geen turbulentiemetingen

Opmerkingen

Betreft resultaten enkele proeven stabiliteit bodemverdediging achter een afsluitdam

Naam onderzoek/onderzoekers

WL-M1834 (1982): Stabiliteit stortsteen onmiddellijk na constructies

onderzoeker: J.Uwland

Type constructie

Verticale afstapconstructie al dan niet met doosdrempel of zigzag-overlaat

Relevante details proefopstelling

Gevarieerd werden afstaphoogte, benedenwaterstand, debiet, steendiameter.

Waterdiepte: 0,10 à 0,40m

Bodemmateriaal: D50 = 1 - 3 mm

Relevante details metingen

Zeer nauwkeurige metingen met o.a. relatief lage benedenwaterstanden (tot onder de kruin van de uitstroomconstructie).

Begin van bewegen gedefinieerd als de situatie dat binnen een redelijke tijd (enkele minuten modeltijd) tenminste 5 stenen zijn verplaatst.

Snelheids- en turbulentiemetingen in gootas met micromolen (4 meetpunten in de verticaal)

Opmerkingen

Alleen experimenten met vrije waterspiegel relevant (series I en II)

Naam onderzoek/onderzoekers

WL-M2010 (1984): Stormvloedkering Oosterschelde - stabiliteit
bodemverdediging

onderzoeker: W.D.Eysink

Type constructie

schuifconstructie

Relevante details proefopstelling

Proeven uitgevoerd in de Tussenpadgoot (breedte 0,80m) en de Grote Stroomgoot (breedte 3,0m)

Waterdiepte varieerde van 0,30, tot 2,0m

Zeefkrommes bodemmateriaal beschikbaar

Relevante details metingen

Snelheidsmetingen uitgevoerd met micromolen (Tussenpadgoot) en OTT-molen (Grote stroomgoot). Ook turbulentie geregistreerd.

Opmerkingen

Betreft onderzoek naar de stabiliteit van de zijranden van bestorte blokkenmatten

Naam onderzoek/onderzoekers

WL-Q1380 (1993): Fysische validatie CLODES

onderzoeker: G.J.Akkerman

Type constructie

Afsluitdam met en zonder damkoppen

Relevante details proefopstelling

Bodemmateriaal: D50 = 5 - 10 - 15 mm

Relevante details metingen

Bij enkele metingen een duidelijke 2D-stroming (geen uitbouw damkoppen op de afsluitdam), bij andere was er een damuitbouw van 75% en dientengevolge een overwegend 3D-stroming boven de bodemverdediging.

Snelheidsmetingen met micromolen (geen turbulentiemetingen)

Opmerkingen

Betreft onderzoek in kader van validatie van het rekenprogramma CLODES, in het bijzonder proeven zonder damkoppen.

Naam onderzoek/onderzoekers

WL-Q1522 (1992): Bodemverdediging van de Stormvloedkering in het Hartelkanaal

onderzoeker: D.G.Meijer

Type constructie

Overspoelde schuif Hartelkering

Relevante details proefopstelling

Proeven uitgevoerd in Sluisfaciliteit

Zowel de grote als de kleine schuif en de middenpijler zijn in het model aangebracht. De stroming is hoofdzakelijk 2D.

Proeven zijn uitgevoerd waarbij de schuiven volledig waren gesloten en er alleen sprake was van overspoelend water. Bij andere proeven waren de schuiven gedeeltelijk geheven.

Relevante details metingen

Constante benedenwaterstanden lager dan de kruin van de schuif

Begin van bewegen was gedefinieerd als het moment waarop enkele (circa 5 à 10) stenen verplaatsen van het ene vak naar het andere vak.

Snelheids- en turbulentiemetingen met micromolen: 4 metingen in de verticaal

Opmerkingen

-

Naam onderzoek/onderzoekers

HR Wallingford (1992): Channel Protection - Turbulence downstream of structures

onderzoekers: M.Escameia and R.W.P.May
report SR 313

Type constructie

Schuif met watersprong

Relevante details proefopstelling

Schuif bevond zich 2,88 m bovenstrooms van de 2,60m lange meetsectie
Maximale waterdiepte 0,35 m
Loskorrelig bodemmateriaal (en betonblokken) op bodem en taluds onderzocht;
karakteristieke diameters: $D_{50} = 4,6$ à $11,8$ mm (zeefkrommes beschikbaar).

Relevante details metingen

Snelheids- en turbulentiemetingen (in 3 dimensies) gemeten in de gootas op diverse punten in de verticaal met een 3D-ultrasone snelheidsmeter met max.frequentie 12,5 Hz. Stabiliteit bepaald met controle oppervlak: vooraf vastgesteld aantal steentjes in bepaalde tijd.

Opmerkingen

Hogere turbulentie gecreerd door middel van een watersprong.



wL | delft hydraulics

**Rotterdamseweg 185
postbus 177
2600 MH Delft
telefoon 015 285 85 85
telefax 015 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl**

**Rotterdamseweg 185
p.o. box 177
2600 MH Delft
The Netherlands
telephone +31 15 285 85 85
telefax +31 15 285 85 82
e-mail info@wldelft.nl
internet www.wldelft.nl**

