

# Ontgrondingen door ondergedompelde stralen

G.J.C.M. Hoffmans

februari 1995

W-DWW-94-303



## Inhoudsopgave

1.	Inleiding	
1.1	Probleemstelling	3
1.2	Doelstelling	3
1.3	Werkwijze en afbakening	3
2.	Databestand	
2.1	Inleiding	4
2.2	Experimentele gegevens	4
3.	Wijze van toetsen	
3.1	Inleiding	7
3.2	Gemiddelde	7
3.3	Discrepantie verhouding	7
4.	Horizontale stralen	
4.1	Onderstroming zonder bodembescherming	7
4.2	Onderstroming met relatief korte bodembescherming	9
4.3	Onderstroming met relatief lange bodembescherming	9
4.4	Ronde stralen	9
5.	Verticale en schuine stralen	
5.1	Vlakke stralen	9
5.2	Ronde stralen	10
6.	Evaluatie	
6.1	Verificatie ontgrondingsformules	11
6.2	Conclusies en aanbevelingen	12

## SYMBOLLEN

## LITERATUUR

## BIJLAGEN

A	Ontgrondingsformules
B	Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Schoklitsch)
C	Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Müller)
D	Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Shalash)
E	Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Qayoum)
F	Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Altinbilek)
G	Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Rajaratnam)
H	Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Hassan)
I	Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Chatterjee et al.)
J	Overzicht verificatie '2D-horizontaal'
K	Toetsing ontgrondingsformules '2D-schuin' (databestand: Rajaratnam)
L	Toetsing ontgrondingsformules '2D-verticaal' (databestand: Rajaratnam en Akashi et al.)
M	Toetsing ontgrondingsformules '3D-horizontaal' (databestand: Clarke en Rajaratnam et al.)
N	Toetsing ontgrondingsformules '3D-verticaal' (databestand: Clarke, Westrich en Rajaratnam)
O	Experimentele data



## 1. Inleiding

### 1.1 Probleemstelling

Breusers en Raudkivi (1991) geven een uitgebreid overzicht van de beschikbare literatuur over lokale ontgrondingen. Gebaseerd op theoretische achtergronden leidt Breusers vergelijkingen af die het erosieproces benedenstrooms van uitlaatconstructies (horizontale stralen) beschrijven. Tevens worden verscheidene ontgrondingsformules voor het voorspellen van de evenwichtsdiepte achter onderstroomde stuwten bediscussieerd. Veelal zijn deze ontgrondingsformules van empirische aard en sommige formules bevatten coëfficiënten die niet dimensieloos zijn. Breusers toont aan dat de berekeningsresultaten van deze formules onderling een grote spreiding vertonen en dat voor een goede advisering onderzoek op modelschaal vereist is.

Voor een ontwerper is het geen eenvoudige opgave om in een oriënterende studie een goede afschatting van de dimensies van een ontgrondingskuil te geven. De ontwerper kan immers uit verschillende ontgrondingsformules kiezen. Vrijwel alle formules zijn geschikt voor die experimenten waarop ze zijn gekalibreerd. Indien deze relaties worden toegepast buiten het bereik van de geijkte hydraulische condities zijn de berekeningsresultaten onbetrouwbaar vanwege het empirische karakter.

### 1.2 Doelstelling

Het doel van het handboek ontgrondingen is een antwoord te geven op ontgrondingsvraagstukken zoals een ontwerper van waterbouwkundige constructies die tegenkomt. Verschillende deelstudies worden voor het afronden van dit handboek uitgevoerd. Het verifiëren van ontgrondingsformules staat centraal in deze studies.

Hier is de voorspellingskracht van formules bepaald die het ontgrondingsproces van ondergedompelde stralen weergeven. Bovendien is op basis van de continuïteitsvergelijking en een hypothese voor de turbulentie in de ontgrondingskuil een modificatie op de Dietz ontgrondingsformule gegeven. De invloed van de lengte van de bodembescherming op het ontgrondingsproces is in deze formules verdisconteerd.

### 1.3 Werkwijze en afbakening

Diverse straaltypen kunnen worden onderscheiden, te weten vlakke (2D), ronde (3D), verticale, horizontale en schuine stralen. In tabel 1 staan combinaties van stralen die in deze studie nader zijn onderzocht. Voor het verzamelen van data is de oorspronkelijke literatuur geraadpleegd. Het databestand bevat hydraulische en morfologische gegevens (afvoeren, waterstanden, evenwichtsdiepten, materiaaleigenschappen) en de tijdsduur van beproeven.

Verschillende ontgrondingsformules zijn aan de hand van gootexperimenten met technieken uit de statistiek getoetst. De theoretische achtergronden van deze relaties worden hier niet besproken. Hiervoor wordt naar de desbetreffende literatuur verwezen.

	vlakke stralen (2D)	ronde stralen (3D)
verticaal/schuin	x/x	x/(-)
horizontaal	x	x

Tabel 1 Onderzochte straaltypen (aangeduid met een x)

## 2. Databestand

### 2.1 Inleiding

In het algemeen zijn goed gedocumenteerde gegevens van experimenten schaars. In publikaties treft men vaak experimentele data in dimensieloze vorm aan, waardoor de grootte van de fysische parameters niet altijd te achterhalen is.

Verschillende onderzoekers (Schoklitsch, 1935; Müller, 1944; Tarapore 1956; Shalash 1959; Qayoum, 1960; Altinbilek, 1973; Rajaratnam et al., 1981, 1983; Hassan, 1985) onderzochten het ontgrondingsproces dat door horizontale stralen wordt ingeleid. De stroming van deze stralen was hoofdzakelijk tweedimensionaal en te vergelijken met een onderstroming die benedenstrooms van stuwen optreedt (figuur 1).

Rajaratnam (Rajaratnam et al. 1977, 1981, Rajaratnam 1981a, 1981b) voerde verschillende experimentele studies uit, waarin allerlei straaltypen met bijbehorende ontgrondingskuilen nader werden bestudeerd (figuren 2, 3 en 4). Het tijdsafhankelijke ontgrondingsproces geïnitieerd door vlakke verticale stralen is ondermeer door Akashi en Saitou (1986) geanalyseerd. Clarke (1962) en Westrich (1974) verrichtten onderzoek naar het erosiegedrag van ondergedompelde *ronde* stralen.

De onderzoeksresultaten van bovengenoemde onderzoekers zijn in een databestand gezet. Ofschoon de hydraulische en morfologische parameters in de experimenten zijn gevarieerd is het bereik hiervan beperkt; in het bestand zijn geen experimenten op prototypeschaal opgenomen.

### 2.2 Experimentele gegevens

Het databestand 'horizontale stralen (2D)' bevat de volgende experimentele gegevens: korrel diameter ( $d$ ), benedenstroomse waterdiepte ( $h_t$ ), verval ( $H$ ) of de snelheid in de vena contracta ( $U_1 = U_0/\mu$ ,  $\mu$  is afvoer coëfficiënt en  $U_0$  is de buissnelheid), debiet ( $q$ ), lengte bodembescherming ( $L$ ), tijdsduur van beproeven ( $t$ ) (tabel 2).

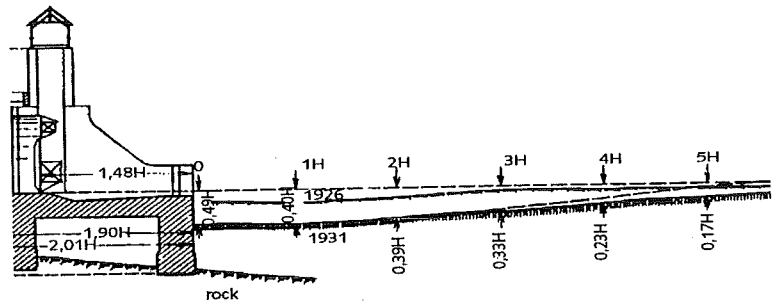
onderzoeker	type	$d$ (mm)	$h_t$ (m)	$H$ (m)	$U_1$ (m/s)	$q$ (m <sup>2</sup> /s)	$L$ (m)	$t$ (uur)
Schoklitsch	Fig.1 (2D)	1.5-17.2	-	0.17-1.0	-	0.026-0.150	0.26-1.5	-
Müller	Fig.1 (2D)	0.43-5.5	0.04-0.10	0.06-0.14	-	0.004-0.026	0.03-0.15	48-700
Shalash	Fig.1 (2D)	0.52-2.7	0.05-0.08	0.11-0.13	-	0.011-0.028	0.00-0.90	24-370
Qayoum	Fig.1 (2D)	2.5-9.7	0.06-0.13	0.02-0.11	-	0.008-0.024	0.0	>2
Altinbilek	Fig.1 (2D)	1.3-6.5	0.16-0.25	-	0.55-2.76	0.003-0.021	0.0	0.5-11
Rajaratnam	Fig.1 (2D)	1.0-2.38	0.01-0.33	-	0.55-2.33	0.007-0.065	0.0	8-66
Hassan	Fig.1 (2D)	0.85-1.7	0.24-0.42	-	1.17-3.21	0.008-0.033	0.2-0.57	>3
Chatterjee	Fig.1 (2D)	0.76-6.2	0.29-0.31	-	0.84-2.42	0.016-0.043	0.66	0.2-4.7
onderzoeker	type	$d$ (mm)	$h_t$ (m)	$H$ (m)	$U_0$ (m/s)	$D$ (mm)	$L$ (m)	$t$ (uur)
Clarke	Fig.2 (3D)	0.82-2.4	0.16-0.28	-	2.55-12.0	4.8-14.3	-	4-134
Rajaratnam	Fig.2 (3D)	1.4	0.61	-	1.28-1.81	25.4	-	-

Tabel 2 Overzicht databestand 'horizontale stralen'

In het databestand 'verticale en schuine stralen (2D)' zitten naast  $d$ ,  $q$  en  $t$  ook de parameters: valhoogte ( $H_p$ ), gemiddelde buissnelheid ( $U_0$ ) en valhoek ( $\theta$ ) (tabel 3). Bovengenoemde parameters hebben betrekking op tweedimensionale ontgroningen. Voor driedimensionale ontgroningen (ronde stralen) is de pijpdiameter ( $D$ ) aan het bestand toegevoegd. Voor meer informatie omtrent de experimentele gegevens wordt naar bijlage O verwezen.

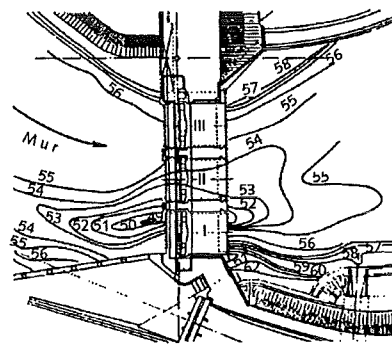
In de proevenserie van Schoklitsch was de benedenstroomse waterdiepte minimaal en niet specifiek gegeven. In deze gevallen is  $h_t$  met de impulsvergelijking berekend. Onderzoekers hebben of het verval of de gemiddelde snelheid in de vena contracta gerapporteerd. Deze parameters die het ontgroningsproces in hoge mate beïnvloeden zijn als volgt met elkaar gerelateerd ( $g$  is de zwaartekracht).

$$H = \frac{1}{2} U_1^2 / g \quad (1)$$

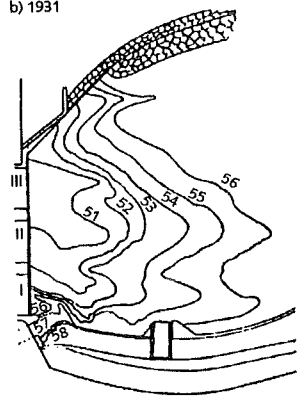


H = 11.6 m

a) 1926



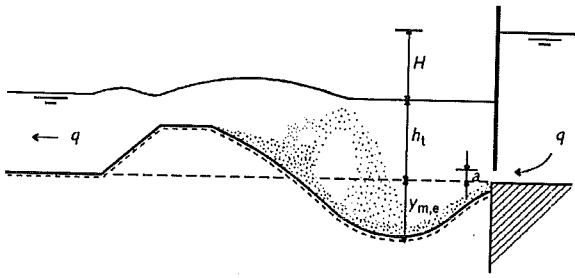
b) 1931



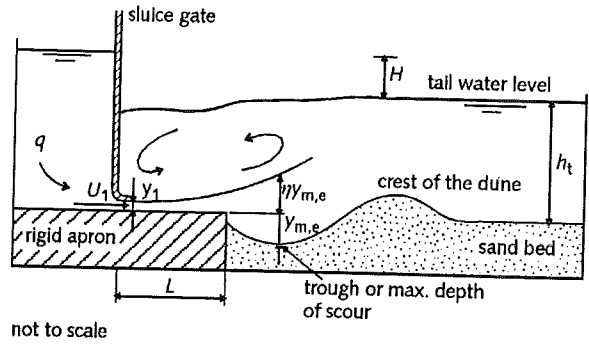
Figuur 1a Prototype ontgroning (Schoklitsch, 1935)

onderzoeker	type	$d$ (mm)	$H_p$ (m)	$U_0$ (m/s)	$q$ (m <sup>2</sup> /s)	$\theta$ (rad)	$t$ (uur)
Rajaratnam	Fig.3 (2D)	1.2-2.38	0.01-0.13	0.77-2.78	0.002-0.007	0.17-1.57	24-112
Akashi	Fig.3 (2D)	0.69-0.96	0.08-0.39	0.70-1.49	0.014-0.030	1.57	2-4
onderzoeker	type	$d$ (mm)	$H_p$ (m)	$U_0$ (m/s)	$D$ (mm)	$\theta$ (rad)	$t$ (uur)
Clarke	(3D)	0.82-2.4	0.127	0.27-3.88	23.8-47.8	1.57	1.5-4.7
Westrich	(3D)	0.90-1.2	0.06-1.08	1.05-8.32	20-40	1.57	1.2-21
Rajaratnam	(3D)	1.2-2.38	0.15-0.28	2.99-4.60	9.8	1.57	-

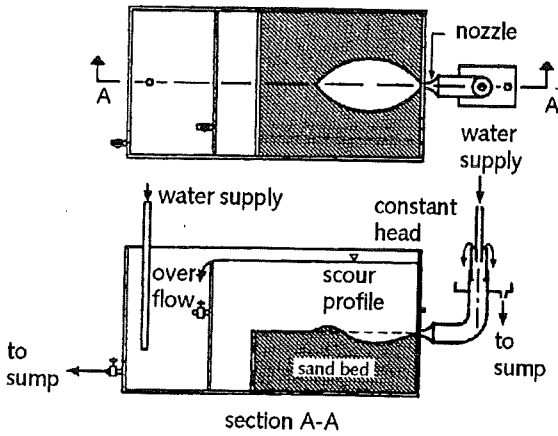
Tabel 3 Overzicht databestand 'verticale en schuine stralen'



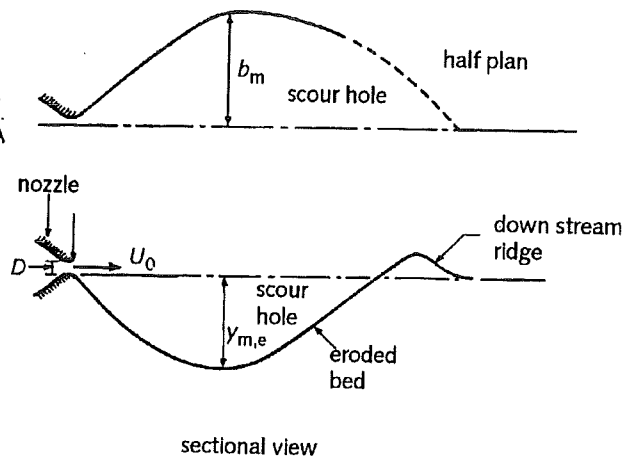
Figuur 1b Horizontale stralen (2D)



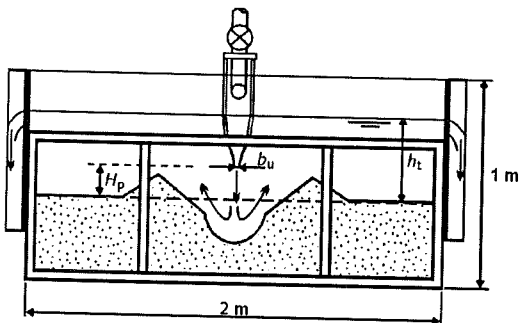
Figuur 1c Horizontale stralen (2D)



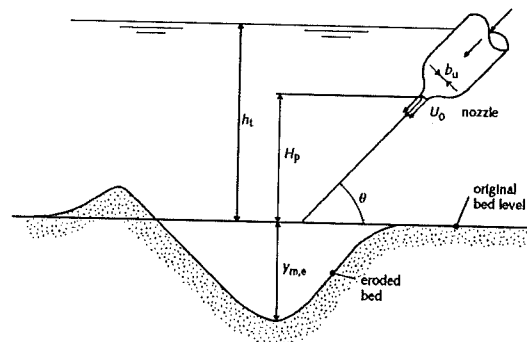
Water Jet Arrangement



Figuur 2 Horizontale stralen (3D)



Figuur 3a Verticale stralen (2D)



Figuur 3b Schuine stralen (2D)



### 3. Wijze van toetsen

#### 3.1 Inleiding

Verskillende methodieken kunnen worden aangewend om ontgrondingsformules te toetsen. In deze studie worden een stochastische schatter en een spreidingscore bepaald om de berekeningsresultaten van ontgrondingsformules versus metingen te interpreteren.

#### 3.2 Gemiddelde

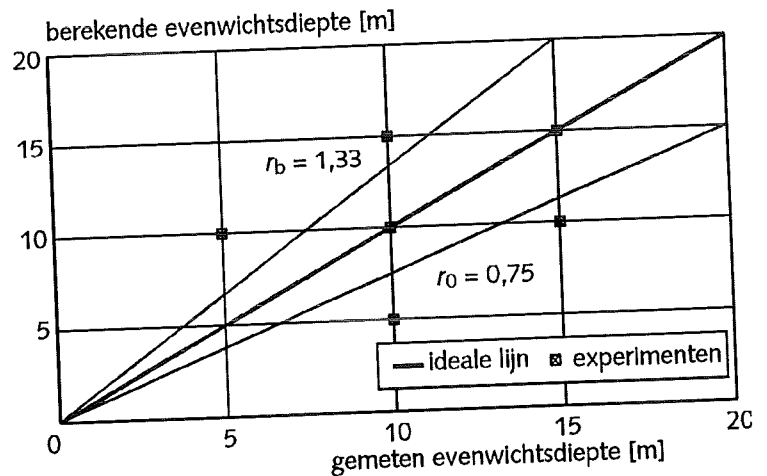
De algemene ligging van een reeks waarnemingen wordt meestal door een representatief getal aangegeven in de vorm van een gemiddelde. Voor het toetsen van ontgrondingsformules is een gemiddelde ( $x_m$ ) gebruikt dat als volgt is weergegeven:

$$x_m = \frac{\sum_{i=1}^n (y_{m,e})_{i,berekend}}{\sum_{i=1}^n (y_{m,e})_{i,gemeten}} \quad (2)$$

In (2) is  $y_{m,e}$  de evenwichtsdiepte en  $n$  is het aantal experimenten.

#### 3.3 Discrepantieverhouding

Aangezien een eerste orde moment niets over de spreiding van de waarnemingen zegt wordt een percentage berekend dat kenmerkend is voor het aantal waarnemingen dat binnen een gedefinieerd gebied ligt. Dit gebied heeft een ondergrens ( $r_o$ ) en een bovengrens ( $r_b$ ) die beiden arbitrair worden bepaald. De discrepantieverhouding ( $r$ ) is het quotiënt van de berekende en gemeten waterdiepte in de evenwichtsfase (figuur 4).



score:  $2/6 \times 100 = 33\%$

Figuur 4 Discrepantieverhouding

### 4. Horizontale stralen

#### 4.1 Onderstroming zonder bodembescherming

Voor het bepalen van de evenwichtsdiepte benedenstreams van uitlaatconstructies (type A) is gebruik gemaakt van een hypothese voor de turbulentie in de ontgrondingskuil. Tevens is aangenomen dat de stroming tweedimensionaal is (secundaire stromingen worden verwaarloosd) en dat het ontgrondingsproces in de evenwichtsfase verkeert.

Met de continuïteitsvergelijking kan voor het diepste punt van de kuil worden afgeleid (figuur 1c).

$$q = (1 + \eta) y_{m,e} U_{c,w} \quad (3)$$

waarin  $\eta$  een constante is en  $U_{c,w}$  is een nader te bepalen kritische gemiddelde snelheid. Volgens Dietz (1969) is  $U_{c,w}$  afhankelijk van de turbulente kinetische energie in de menglaag en de grootte van de snelheid in de vena contracta.

$$U_{c,w} = U_c / \omega(r_{0,ml}) \quad U_c = 2.5 \sqrt{\psi_c \Delta g d_{50}} \ln(12h_t/k_s) \quad (4)$$

In (4) is  $U_c$  de kritische dieptegemiddelde snelheid (uniforme stroming),  $\omega$  is een coëfficiënt afhankelijk van turbulentie en snelheid,  $r_{0,ml} (= \sqrt{(u'_{ml})^2}/U_c)$  is de relatieve turbulentie intensiteit in de menglaag,  $u'_{ml}$  is de fluctuerende snelheid in de menglaag,  $\Delta$  is de relatieve dichtheid,  $d_{50}$  is de gemiddelde korrel diameter,  $k_s (= 3d_{90})$  is de effectieve bodemruwheid en  $\psi_c$  is de kritische mobiliteits-parameter die in deze studie met analytische uitdrukkingen is berekend (figuur 5).

De evenwichtsdiepte is dan (combinatie van (3) en (4)):

$$y_{m,e} = \omega_0 q / U_c \quad (5)$$

In de menglaag wordt turbulente kinetische energie opgewekt en is aldaar constant (Townsend, 1976). Het fitten van ruim 80 experimenten heeft opgeleverd dat  $\omega_0$  nagenoeg constant is ( $\omega_0 \approx 4.0$ ) en dat de standaardafwijking van  $\omega_0$  ongeveer gelijk is aan 0.5. Op basis hiervan is het aannemelijk te veronderstellen dat  $\omega_0$  een maat is voor de turbulente kinetische energie in de menglaag. Voor experimenten met een stabiele watersprong (Long et al. 1990) is de relatieve turbulentie intensiteit in de menglaag gelijk aan 0.22 ( $0.19 < r_{0,ml} < 0.26$ ), zodat  $\omega_0$  als volgt kan worden weergegeven.

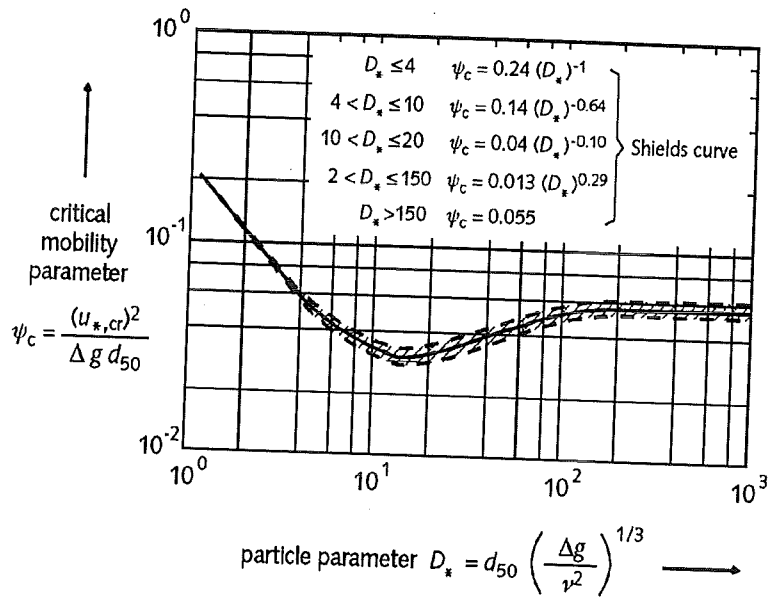
$$\omega_0 = 18 r_{0,ml} \quad (6)$$

Ofschoon in de praktijk altijd naar stabiele watersprongen wordt gestreefd, kunnen instabiele watersprongen (figuur 6a) optreden mits de benedenstroomse waterdiepte minimaal is (bijvoorbeeld Rajaratnam, 1983). De stroming die dan optreedt is superkritisch en komt vrijwel overeen met een wandstroming. In dergelijke gevallen wordt de turbulentie onderdrukt en met name door de bodemruwheid bepaald. In uniforme stromingen is de relatieve turbulentie intensiteit  $r_0$  ongeveer 0.10 ( $0.05 < r_0 < 0.15$ ), aanzienlijk minder ten opzichte van niet uniforme stromingen.

Breusers veronderstelde dat de ontgrondingsdiepte in de evenwichtsfase wordt bepaald door de conditie dat de maximale snelheid niet groter is dan de kritische snelheid die vereist is om sedimentdeeltje te doen laten bewegen. Gebruikmakend van straaltheorieën stelden Breusers en Raudkivi (1991) de volgende vergelijking voor de evenwichtsdiepte voor.

$$y_{m,e} = 0.008 y_1 \left( U_1 / u_{*,c} \right)^2 \quad (7)$$

In (7) is  $u_{*,c}$  de kritische bodemschuif-spanningssnelheid en  $y_1$  is de dikte van straal in de vena contracta.



Figuur 5 Shieldscurve (van Rijn, 1984)

#### 4.2 Onderstroming met relatief korte bodembescherming

De aanval in de kuil is door een bodembescherming minder hevig, immers de snelheid in de straal neemt af. In vlakke stralen is volgens Rajaratnam de snelheid in de menglaag omgekeerd evenredig met de wortel uit de afstand. De invloed hiervan op de evenwichtsdiepte wordt in deze studie als volgt gemodelleerd:

$$y_{m,e} = \omega_1(r_{0,m})q/U_c \quad \omega_1 = \omega_0 / \left( 0.4 \sqrt{L/(h_t - a)} + 1 \right) \quad (8)$$

Hierin is  $L$  de lengte van de bodembescherming en  $a$  is de spleethoogte onder de stuw. Bovengenoemde vergelijking geeft alleen bruikbare resultaten voor  $0 < L \leq 7(h_t - a)$ . Merk verder op dat voor  $L = 0$  (8) in (5) overgaat.

#### 4.3 Onderstroming met relatief lange bodembescherming

Ter bepaling van de evenwichtsdiepte achter onderstroomde stuwen met een relatief lange bodembescherming wordt wederom de 'Dietz-methode' toegepast. Indien de bodembescherming 7 keer langer is dan de hoogte van de verdronken watersprong is de evenwichtsdiepte (Dietz, 1969):

$$y_{m,e} = \omega_2(r_0)q/U_c - h_t \quad \omega_2 = 1 + 3r_0 \quad (9)$$

De relatieve turbulentie intensiteit als functie van  $L$  is:

$$r_0 = \sqrt{0.0225 \left( 1 - \frac{h_t - a}{h_t} \right)^{-2} \left( \frac{L - 6(h_t - a)}{6.67h_t} + 1 \right)^{-1.08} + 1.45 \frac{g}{C^2}} \quad (10)$$

waarin  $C$  de Chézy coëfficiënt is. Vergelijking (10) is gebaseerd op de transportvergelijkingen van de turbulente kinetische energie en de dissipatie. De afname van de relatieve turbulentie intensiteit achter de watersprong is identiek met de afname van de relatieve intensiteit achter drempels (drempelhoogte is vervangen door de hoogte van de watersprong) (Hoffmans en Booij, 1993).

#### 4.4 Ronde stralen (horizontaal)

Voor lokale ontgroningen die door horizontale ronde stralen worden geïnitieerd leidde Rajaratnam en Berry (1977) de volgende vergelijking af:

$$y_{m,e} = 0.4D \left( U_0 / \sqrt{\Delta g d_{50}} - 2 \right) \quad 2 < U_0 / \sqrt{\Delta g d_{50}} < 14 \quad (11)$$

Vergelijking (11) is gebaseerd op ruim 30 gootexperimenten waarin verschillende mengsels werden beproefd (lucht en polystyreen, lucht en zand en water en zand). Eveneens werden de snelheden, pijpdiameter en de korrel diameter van het ontgrondingsmateriaal gevarieerd.

Op basis van experimenten van Rajaratnam en Berry (1977) en Clarke (1962) vonden Breusers en Raudkivi (1991) voor horizontale stralen het volgende verband:

$$y_{m,e} = 0.08DU_0/u_{*,c} \quad (12)$$

### 5. Verticale en schuine stralen

#### 5.1 Vlakke stralen

Het Buckingham  $\Pi$ -theorema wordt toegepast, indien voor het beschrijven van een fysisch probleem geen

goede theoretische onderbouwing voorhanden is. Dit is een methode waarbij fysische variabelen worden geïnventariseerd die een mogelijke rol spelen in het proces. Deze variabelen worden tot dimensieloze parameters herleid en gerelateerd aan de te onderzoeken variabele.

Baserend op experimenten van Rajaratnam (1981b) hebben Breusers en Raudkivi (1991) voor verticale vlakke stralen de volgende relatie afgeleid:

$$y_{m,e} = \frac{0.23 U_0}{\sqrt{\Delta g d_{50}}} \sqrt{H_p b_u} \quad (13)$$

Het is aannemelijk te veronderstellen dat de evenwichtsdiepte recht evenredig met het Froude getal is, maar dat de evenwichtsdiepte toeneemt met een groter wordende valhoogte ( $H_p$ ) is minder aannemelijk. Een limietwaarde van  $H_p$  naar oneindig geeft een oneindig grote evenwichtsdiepte, terwijl bij een dergelijke situatie geen erosie zal plaatsvinden omdat de snelheden nabij de bodem nul zijn. Daarom heeft (13) een beperkt geldigheidsgebied. Ofschoon verschillende varianten op deze vergelijking mogelijk zijn zal hier niet verder op worden ingegaan.

Op basis van straaltheorieën voor vlakke stralen gaven Breusers en Raudkivi (1991) de volgende vergelijking:

$$y_{m,e} = c_b b_u (U_0/u_{*,c})^2 \quad (14)$$

waarin  $b_u$  de breedte van de straal is. Voor een eerste schatting is  $c_b$  hier gelijkgesteld aan  $c_b = 0.005$ .

## 5.2 Ronde stralen

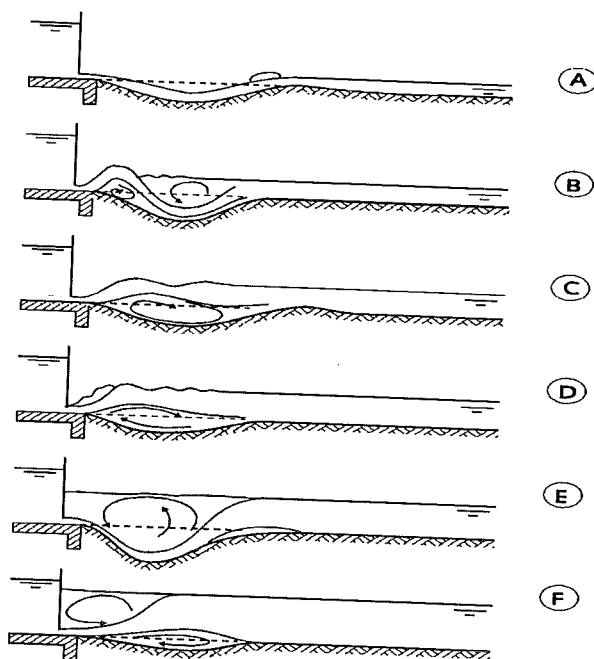
In alle experimentele studies van Rajaratnam wordt de evenwichtsdiepte gerelateerd aan het Froude getal. Hoewel Rajaratnam geen ontgrondingsformule voor verticale stralen afleidt wordt in deze studie onderzocht in hoeverre (11) hiervoor kan worden aangewend.

Volgens Breusers en Raudkivi (1991) kan voor (verticale) ronde stralen de evenwichtsdiepte door de volgende formules worden weergegeven.

$$y_{m,e} = 0.075 D U_0 / u_{*,c} \quad U_0 / u_{*,c} \leq 100 \quad (15a)$$

$$y_{m,e} = 0.35 D (U_0 / u_{*,c})^{2/3} \quad U_0 / u_{*,c} > 100 \quad (15b)$$

Opgemerkt dient te worden dat in de manual van Breusers en Raudkivi (1991) enkele beschrijvingen staan (figuur 6.8 blz. 108 en vergelijkingen 6.26a en 6.26b). De vergelijkingen die Breusers voor verticale ronde stralen geeft komen niet overeen met de hier gepresenteerde vergelijkingen.



Figuur 6 Straaltypen (Schoklitsch, 1935)

## 6. Evaluatie

### 6.1 Verificatie ontgrondingsformules

Voor de toetsing van ontgrondingsformules zijn enkele kenmerkende stromingen onderscheiden (tabel 1). Voor onderstromingen is een verfijning aangebracht waarin de lengte van de bodembescherming karakteristiek is (tabel 4).

straaltype		kenmerken
2D-horizontaal	type A	$L = 0$
	type B	$0 < L \leq 7(h_t - a)$
	type C	$L > 7(h_t - a)$

Tabel 4 Typen 2D-horizontaal

Tabel 5 toont de berekeningsresultaten van de onderzochte ontgrondingsformules die relatief de grootste voorspellingskracht hebben. Meer informatie betreffende de overige voorspellers kan in de bijlagen worden gevonden waar ook een samenvatting van de ontgrondingsformules wordt gegeven. Voor het fitten van de twee nieuwe voorspellers zijn 110 experimenten gebruikt (Müller (21), Shalash (14), Qayoum (48), Altinbilek (13) en Rajaratnam (14)). Op basis van diverse experimenten van Shalash is de nieuwe voorspeller (type C) geïjkt. De experimentele data van respectievelijk Schoklitsch (1935), Hassan (1985) en Chatterjee et al. (1994) is niet gebruikt voor het kalibreren van de nieuwe voorspellers, aangezien of de tijdsduur van proeven

onderstroming: $L \leq 7(h_t - a)$ ( $n=110$ )	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Dietz/Hoffmans (8)	68%	98%	99%	1.04
Qayoum	55%	86%	96%	1.32
Altinbilek	40%	93%	100%	1.16
onderstroming: $L > 7(h_t - a)$ ( $n = 9$ )	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Shalash	89%	100%	100%	1.01
Dietz/Hoffmans (9)	56%	100%	100%	1.10
Chatterjee et al.	56%	78%	78%	0.79
horizontale ronde stralen ( $n = 31$ )	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Rajaratnam/Berry (11)	74%	97%	97%	1.00
Breusers/Raudkivi (12)	81%	94%	97%	1.09
verticale ronde stralen ( $n = 27$ )	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Rajaratnam/Berry (11)	70%	96%	100%	1.28
Breusers/Raudkivi (15)	63%	96%	100%	1.23

Tabel 5 Toetsing ontgrondingsformules

onbekend is of de tijdsduur is onvoldoende lang voor het verkrijgen van een evenwichtssituatie. Ofschoon Chatterjee et al. beweren dat hun experimenten tot een evenwichtssituatie zijn doorgezet is hieromtrent enige twijfel. De maximale tijdsduur van deze proeven lag in de range van 0,2 tot 4,7 uur wat relatief kort is ten opzichte van de langeduurproeven van bijvoorbeeld Müller en Shalash (bijlage O).

De 7 langeduurproeven van Tarapore (1956) zijn eveneens niet aangewend voor het ijken van de gemodificeerde Dietz relatie, omdat het stromingspatroon benedenstrooms van de stuw sterk driedimensionaal was (the pattern deviated considerably from being two-dimensional p.30). Wervelstraten met verticale assen traden op waardoor de dikte van de vena contracta en de aldaar heersende snelheid hoogstwaarschijnlijk over de breedte van de goot in grootte variëren.

## 6.2 Conclusies en aanbevelingen

De ontwikkelde formules voldoen aan de dynamische gelijkvormigheid. In hoeverre deze voor prototype situaties (bijvoorbeeld Stormvloedkering Nieuwe Waterweg) geschikt zijn is hier niet onderzocht. De verificatie van de ontwikkelde voorspellers is (nog) niet uitgevoerd.

Dit onderzoek heeft ondermeer aangetoond dat de constante  $\omega_0$  gecorreleerd is met de relatieve turbulentie intensiteit in de menglaag. Ofschoon de twee nieuwe voorspellers (8) en (9) niet onverdienstelijk scores, zullen hoogstwaarschijnlijk de berekeningsresultaten van beide voorspellers benedenstrooms van de watersprong niet overeenkomen. Nader onderzoek naar de grootte van de discontinuïteit is vereist. Bovendien is het gewenst om de spreiding van de relatieve turbulentie intensiteit in de menglaag en de afname van de snelheid in de menglaag nader te analyseren.

De redenen dat de experimenten van Schoklitsch (1935), Hassan (1985) en Chatterjee et al. (1994) niet meedingen voor het ijken van de nieuwe voorspellers is in paragraaf 6.1 geschetst. Niettemin is het aan te bevelen om in eigen huis enkele langeduurproeven uit te voeren om enerzijds de onzekerheid met betrekking tot de experimentele data van Chatterjee et al. op te heffen en anderzijds de gekozen uitgangspunten in de gemodificeerde Dietz theorie te verifiëren. Tevens zou dan aandacht kunnen worden besteed aan het complexe stromingsbeeld achter dergelijke uitlaatconstructies.

De formule van Schoklitsch voldoet niet aan de dynamische gelijkvormigheid (schaaleffecten!). De coëfficiënten in de overige formules zijn dimensieloos.

De formule van Shalash is een uitbreiding van de formule van Müller. Ofschoon de invloed van de lengte van de bodembescherming in de formule van Shalash is verdisconteerd, is het resultaat mager voor met name ontgrondingen zonder bodembescherming.

Naarmate de bodembescherming langer wordt, neemt de voorspellingskracht van de ontgrondingsformules van respectievelijk Müller, Qayoum, Altinbilek en Breusers (7) af (type C). Deze formules overschatten de evenwichtsdiepte bij een relatief lange bodembescherming, omdat deze voorspellers geen rekening houden met zowel de afnemende snelheid als de afnemende turbulente kinetische energie.

De voorspellingskracht van de Breusers ontgrondingsformule (7) is voor type A-ontgrondingen enigszins teleurstellend. Hoewel het gemiddelde  $x_m$  ongeveer gelijk is aan 1, is de spreiding relatief groot (bijlage J).

De ontgrondingsformule van Chatterjee et al. scoort voor type C ontgrondingen (onderstroming met relatief lange bodembescherming) redelijk. Overall berekent deze formule een te kleine evenwichtsdiepte; het gemiddelde  $x_m$  is kleiner dan 1.

Verder toont deze analyse aan dat de twee onderzochte ontgrondingsformules (Rajaratnam en Berry, 1977 en Breusers en Raudkivi, 1991) voor horizontale ronde stralen nagenoeg eenzelfde nauwkeurigheid hebben.

Met betrekking tot de verticale stralen (zowel rond als vlak) geven de huidige ontwerpregels een mager resultaat. De invloed van de valhoogte wordt in deze formules verwaarloosd.

## Symbolen

$a$	=	spleethoogte onder de stuw/hoogte gat (m)
$b_u$	=	dikte van de straal (m)
$c_i$	=	coëfficiënt (-)
$C$	=	Chézy coëfficiënt ( $m^{1/2}/s$ )
$d$	=	korreldiameter (m)
$d_g$	=	( $\approx d_{50}$ ) geometrisch gemiddelde korreldiameter (m) (Altinbilek)
$D$	=	buisdiameter (m)
$Fr$	=	$U_1/(gy_1)^{0.5}$ , Froude getal (-)
$g$	=	$9.81 m/s^2$ , zwaartekracht
$h_t$	=	bendenstroomse waterdiepte (m)
$H$	=	verval (m)
$H_p$	=	valhoogte (m)
$k_s$	=	effectieve ruwheid (m)
$L$	=	lengte bodembescherming (m)
$L_m$	=	$1.5H$ (m) (Shalash)
$n$	=	aantal (-)
$q$	=	debiet ( $m^2/s$ )
$Q$	=	debiet ( $m^3/s$ )
$r$	=	discrepantie verhouding (-)
$r_o$	=	( $= \sqrt{(u')^2}/U$ ) relatieve turbulentie intensiteit (-)
$r_{o,ml}$	=	( $= \sqrt{(u'_{ml})^2}/U_1$ ) relatieve turbulentie intensiteit in de menglaag (-)
$t$	=	tijdsduur ontgrondingsproef (s)
$u'$	=	fluctuerende snelheid (m/s)
$u_{*,c}$	=	kritische bodemschuifspanningssnelheid (m/s)
$U$	=	dieptegemiddelde snelheid (m/s)
$U_o$	=	snelheid van de straal ter hoogte van het mondstuk (m/s)
$U_1$	=	gemiddelde snelheid in de vena contracta/in buis (m/s)
$u_{*,c}$	=	kritische bodemschuifspanningssnelheid (m/s)
$U_c$	=	kritische dieptegemiddelde snelheid (uniforme stroming) (m/s)
$U_{c,w}$	=	kritische gemiddelde snelheid (m/s)
$x_m$	=	gemiddelde (-)
$y_1$	=	$\mu a$ , dikte straal in de vena contracta (m)
$y_{m,e}$	=	evenwichtsdiepte (m)
$\Delta$	=	relatieve dichtheid (zand/water: $\Delta = 1.65$ )
$\theta$	=	hoek van straalbuis met de horizontaal
$\mu$	=	afvoerconstante (rechthoekig: $\mu = 0.65$ , rond: $\mu = 0.97$ )
$\nu$	=	kinematische viscositeit (water: $\nu = 10^{-6} m^2/s$ )
$\phi$	=	angle of repose (Altinbilek)
$\psi_c$	=	0.03-0.06 kritische mobiliteits-parameter
$\omega$	=	coëfficiënt afhankelijk van turbulentie en snelheid

## Literatuur

- Altinbilek, H.D., and Y. Basmaci, 1973, Localized scour at the downstream of outlet structures, Proc. 11th Congress on large dams, Madrid, pp.105-121.
- Akashi, N. and T. Saitou, 1986, Influence of water surface on scour from vertical submerged jet, Journal of Hydrosience and Hydraulic Engineering, Vol.4, No.2, pp.55-69.
- Breusers, H.N.C. and A.J. Raudkivi, 1991, Scouring, Hydraulic Structures Design Manual, IAHR, Balkema, Rotterdam.
- Chatterjee, S.S., S.N. Ghosh, and M. Chatterjee, 1994, Local scour due to submerged horizontal jet, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.120, No.8, pp.973-992.
- Clarke, F.R.W., 1962, The action of submerged jets on moveable material, Thesis for the diploma of Imperial College, Department of Civil Engineering, Imperial College, London.
- Dietz, J.W., 1969, Kolkbildung in feinen oder leichten Sohlmaterialien bei strömendem Abfluß, Mitteilungen, Heft 155, pp.1-121.
- Hassan, N.M.K. and R. Narayanan, 1985, Local scour downstream of an apron, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.111, No.11, pp.1371-1385.
- Hoffmans, G.J.C.M. and R. Booij, 1993, The influence of upstream turbulence on local-scour holes, 25th IAHR-congress, Tokyo, pp.471-478.
- Long, D., Steffler, P.M. and N. Rajaratnam, 1990, LDA study of flow structure in submerged hydraulic jump, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.28, No.4, pp.437-460.
- Müller, R., 1944, Experimentelle und theoretische Untersuchungen über das Kolkproblem, Mitteilungen aus der Versuchsanstalt für Wasserbau, Nr.5, Zürich.
- Qayoum, A., 1960, Die Gesetzmäßigkeit der Kolkbildung hinter unterströmten Wehren unter spezieller Berücksichtigung der Gestaltung eines beweglichen Sturzbettes, Dissertation, Technischen Hochschule Carolo-Wilhelmina, Braunschweig.
- Rajaratnam, N. and B. Berry, 1977, Erosion by circular turbulent wall jets, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.15, No.3, pp.277-289.
- Rajaratnam, N., Pochylko, D.S. and R.K. Macdougall, 1981, Further studies on the erosion of sand beds by plane water jets, Water Resources Engineering, Rep. WRE 81, Dept. of Civil Engineering, University of Alberta, Canada.
- Rajaratnam, N., 1981, Erosion by plane turbulent jets, Journal of Hydraulic Research, IAHR, Vol.19, No.4, pp.339-358.
- Rajaratnam, N., 1982a, Erosion by submerged circular jets, Journal of the Hydraulics Division, ASCE, Vol. 108, No.HY2, pp.262-267.
- Rajaratnam, N., 1982b, Erosion by unsubmerged plane water jets, In: Applying Research to Hydraulic Practice, Jackson, ASCE, New York, pp.280-288.
- Rajaratnam, N. and R.K. Macdougall, 1983, Erosion by plane wall jets with minimum tailwater, Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, Vol.109, No.7, pp.1061-1064.
- van Rijn, L.C., 1984, Sediment transport, Part I: Bed load transport, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.110, No.10, pp.1431-1455.
- Schoklitsch, A., 1935, Stauraumverlandung und Kolkabwehr, Wien, Verlag von Julius Springer.
- Schoklitsch, A., 1962, Die kolkbildung, Handbuch des Wasserbaues, Erster Band, pp. 200-210.
- Shalash, M.S.E., 1959, Die Kolkbildung beim Ausfluß unter Schützen, Dissertation, Technischen Hochschule München.
- Tarapore, Z.S., 1956, Scour below a submerged sluice gate, A thesis submitted to the Graduate Faculty of the University of Minnesota, Minneapolis, USA.
- Townsend, A.A., 1976, The structure of turbulent shear flow, Cambridge University Press, Cambridge.



- Valentin, F., 1967, Considerations concerning scour in the case of flow under gates, 12th IAHR-congress, Fort Collins, paper C11.
- Westrich, B., 1974, Erosion eines gleichkörnigen Sandbettes durch stationäre und pulsierende Strahlen, Dissertation, Universität Karlsruhe.

## BIJLAGEN

- A Ontgrondingsformules
- B Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Schoklitsch)
- C Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Müller)
- D Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Shalash)
- E Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Qayoum)
- F Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Altinbilek)
- G Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Rajaratnam)
- H Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Hassan)
- I Toetsing ontgrondingsformules '2D-horizontaal' (databestand: Chatterjee et al.)
- J Overzicht verificatie '2D-horizontaal'
- K Toetsing ontgrondingsformules '2D-schuin' (databestand: Rajaratnam)
- L Toetsing ontgrondingsformules '2D-verticaal' (databestand: Rajaratnam en Akashi et al.)
- M Toetsing ontgrondingsformules '3D-horizontaal' (databestand: Clarke en Rajaranam et al.)
- N Toetsing ontgrondingsformules '3D-verticaal' (databestand: Clarke, Westrich en Rajaratnam)
- O Experimentele data

2D-HORIZONTAAL  
Schoklitsch (1935)

$$y_{m,e} = 0.378 q^{0.35} \sqrt{H + h_t}$$

Müller (1944)

$$y_{m,e} = c_m q^{0.60} H^{0.5} / (g^{0.3} d_{90}^{0.4}) - h_t \quad 1.30 \leq c_m \leq 1.93$$

Shalash (1959)

$$y_{m,e} = 1.21 q^{0.6} H^{0.5} (L_m/L)^{0.6} / (g^{0.3} d_{90}^{0.4}) - h_t$$

Qayoum (1960)

$$y_{m,e} = 2.78 q^{0.66} H^{0.225} (h_t/q^{2/3})^{0.4} / (g^{0.2} d_{90}^{0.215}) - h_t$$

Valentin (1967)

$$y_{m,e} = y_1 \exp\left(2.3 \left(\frac{Fr - 2.0}{4.7} - 0.55 \log \frac{d_{90}}{y_1}\right)\right)$$

Altinbilek (1973)

$$y_{m,e} = y_1 \sqrt{\frac{y_1}{d_g} \tan \phi} \left(\frac{Fr}{\sqrt{\Delta}}\right)^{1.5} \quad \phi = 40^\circ$$

Breusers en Raudkivi (1991/A)

$$y_{m,e} = 0.008 y_1 (U_1/u_{*,c})^2 \quad u_{*,c} = \sqrt{\Psi_c \Delta g d_{50}}$$

Chatterjee et al. (1994)

$$y_{m,e} = 0.775 a U_1 / \sqrt{g a}$$

2D-VERTICAAL

Breusers en Raudkivi (1991/B)

$$y_{m,e} = \frac{0.23 U_0}{\sqrt{\Delta g d_{50}}} \sqrt{H_p b_u}$$

Breusers en Raudkivi (1991/C)

$$y_{m,e} = 0.005 b_u (U_0/u_{*,c})^2 \quad u_{*,c} = \sqrt{\Psi_c \Delta g d_{50}}$$

3D-HORIZONTAAL

Rajaratnam en Berry (1977)

$$y_{m,e} = 0.4 D \left( U_0 / \sqrt{\Delta g d_{50}} - 2 \right) \quad 2 < U_0 / \sqrt{\Delta g d_{50}} < 14$$

Breusers en Raudkivi (1991/D)

$$y_{m,e} = 0.08D U_0/u_{*,c} \quad u_{*,c} = \sqrt{\Psi_c \Delta g d_{50}}$$

3D-VERTICAAL

Rajaratnam en Berry (1977)

$$y_{m,e} = 0.4D \left( U_0/\sqrt{\Delta g d_{50}} - 2 \right) \quad 2 < U_0/\sqrt{\Delta g d_{50}} < 14$$

Breusers en Raudkivi (1991/E)

$$y_{m,e} = 0.075D U_0/u_{*,c} \quad U_0/u_{*,c} \leq 100$$

$$y_{m,e} = 0.35D \left( U_0/u_{*,c} \right)^{2/3} \quad U_0/u_{*,c} > 100$$

Samenvatting nieuwe voorspellers

2D-HORIZONTAAL korte bodembescherming;  $0 < L \leq 7(h_t - a)$

$$y_{m,e} = 4 \left( 0.4 \sqrt{L/(h_t - a)} + 1 \right)^{-1} q/U_c \quad U_c = 2.5 \sqrt{\Psi_c \Delta g d_{50}} \ln(12h_t/k_s)$$

2D-HORIZONTAAL lange bodembescherming  $L > 7(h_t - a)$

$$y_{m,e} = (1 + 3r_0) q/U_c - h_t$$

$$r_0 = \sqrt{0.0225 \left( 1 - \frac{h_t - a}{h_t} \right)^{-2} \left( \frac{L - 6(h_t - a)}{6.67h_t} + 1 \right)^{-1.08} + 1.45 \frac{g}{C^2}}$$

Gegevens:	$d_{50}$	=	1.5, 4.5, 10.2, 17.2 mm
	$d_{90}$	=	niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )
	$h_t$	=	niet gerapporteerd
	$h_1$	=	0.17-1.0 m ( $H + h_t$ )
	$H$	=	niet gerapporteerd
	$L$	=	0.25-1.5 m; $1.5*(H + h_t)$
	$q$	=	0.026-0.15 m <sup>2</sup> /s
	$t$	=	niet gerapporteerd

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Schoklitsch	65%	95%	100%	0.90
Müller ( $c_m = 1.30$ )	15%	30%	70%	2.49
( $c_m = 1.93$ )	0%	10%	20%	4.43
Shalash	20%	55%	75%	1.21
Qayoum	0%	0%	10%	4.00
Valentin	20%	50%	95%	2.12
Altinbilek	0%	0%	20%	3.94
Breusers/Raudkivi (A)	10%	25%	60%	4.52
Chatterjee et al.	80%	90%	95%	1.14

## Opmerkingen:

- 1) De waterdiepte benedenstrooms van de watersprong is met de impulsvergelijking berekend (collegedictaat De Vries).
- 2) Enkele honderden experimenten zijn onder begeleiding van Schoklitsch uitgevoerd. Hieruit is een selectie gemaakt. Willekeurig zijn twintig experimenten gekozen. De evenwichtsdiepte is zo goed mogelijk uit de grafieken afgelezen. Een kleine afleesfout is derhalve onvermijdelijk. De  $d_{90}$  is geschat ( $d_{90} = 2d_{50}$ ).
- 3) Ofschoon de ontgrondingsformule van Schoklitsch een redelijke score geeft, mag deze relatie niet zondermeer worden toegepast voor het voorspellen van ontgrondingen in prototype situaties. Deze formule voldoet namelijk niet aan de dynamische gelijkvormigheid (schaaleffecten!). De coëfficiënten in de overige formules zijn dimensieloos.
- 4) De ontgrondingsformule van Chatterjee et al. scoort opmerkelijk goed.
- 5) De ontgrondingsformules van Müller en Shalash geven beide een overschatte waarde van de evenwichtsdiepte. Omdat de formules van zowel Müller als Shalash gebaseerd zijn op langeduurproeven (100-400 uren), is hoogstwaarschijnlijk in de proevenserie van Schoklitsch de evenwichtssituatie niet bereikt.
- 6) In 1962 geeft Schoklitsch de volgende formule voor de evenwichtsdiepte (hier vereenvoudigd weergegeven):

$$y_{m,e} = 4.5\alpha q^{1/3} \sqrt{H + h_t} t^{1.6}$$

waarin  $\alpha$  een constante is ( $\alpha = 0.36$  voor een horizontale bodem met  $L = 1.5(H + h_t)$ ) en  $t$  de tijd in uren. Op basis van bovengenoemde relatie kan met de data van Schoklitsch (1935) worden afgeleid dat de tijd van beproeven niet meer is geweest dan enkele uren; beduidend minder dan de tijdsduur van de langeduurproeven van Müller en Shalash.

- 7) Omdat de tijdsduur van de experimenten en enkele relevante ontgrondingsparameters niet zijn gerapporteerd, is de data van Schoklitsch hier niet gebruikt voor de ijking van de nieuwe voorspellers.

Gegevens:	$d_{50}$	=	0.43, 0.76, 0.9, 1.9, 3.67 mm
	$d_{90}$	=	0.70, 1.30, 1.4, 2.7, 5.50 mm
	$h_t$	=	0.039-0.096 m
	$H$	=	0.056-0.144 m
	$L$	=	0.025-0.145 m
	$q$	=	0.0040-0.0255 m <sup>2</sup> /s
	$t$	=	> 48 uur

	0.75 < r < 1.33	0.50 < r < 2.00	0.33 < r < 3.00	$x_m$
Schoklitsch	10%	24%	52%	0.28
Müller ( $c_m = 1.30$ )	86%	100%	100%	0.94
( $c_m = 1.93$ )	10%	71%	100%	1.65
Shalash	14%	76%	100%	1.66
Qayoum	19%	76%	90%	1.41
Valentin	33%	90%	95%	0.62
Altinbilek	24%	90%	100%	1.30
Breusers/Raudkivi (A)	43%	67%	90%	1.88
Chatterjee et al.	19%	43%	57%	0.36
Dietz/Hoffmans	67%	100%	100%	1.00

## Opmerkingen:

- 1) De minimale tijdsduur van de experimenten bedroeg 48 uur, waardoor deze proeven uitermate geschikt zijn voor het toetsen van evenwichtsvoorspellers. Er zijn geen "afleesfouten" met betrekking tot de experimentele data  $h_t$ ,  $H$ ,  $L$ ,  $q$  en  $y_{m,e}$ . Deze gegevens zijn namelijk uit tabellen overgenomen (tabel 1, blz 19).
- 2) In 19 van de 21 experimenten ontstond een verdrongen watersprong (bedekt gewellter Strahl). Dit verklaart de gunstige score voor de ontgrondingsformule van Müller met  $c_m = 1.30$ .
- 3) De verhouding tussen de lengte van de bodembescherming en de hoogte van de watersprong  $L/(h_t - a)$  was in alle proeven kleiner dan 6.
- 4) Naarmate de lengte  $L$  van de bodembescherming toeneemt, nemen de snelheden in de straal af. De aanval in de kuil is met een stukje bodembescherming ten opzichte van een situatie zonder bodembescherming minder groot. In de formule van Shalash wordt de afname van de snelheden verdisconteerd door een dempingsfactor  $L_m/L$  met  $L_m = 1.5H$ . Ondanks de goede bedoelingen van Shalash is de overschatting van  $y_{m,e}$  aan deze dempingsfactor te wijten. In de experimenten die onder begeleiding van Müller zijn uitgevoerd, was de lengte  $L$  ( $\approx 0.06$  m) van de bodembescherming kleiner dan  $L_m$ . Indien het verval groter is dan 5 cm wat het geval was in de experimenten van Müller wordt in plaats van een reductie van de maximale ontgrondingsdiepte een verhoging verkregen.
- 5) De ontgrondingsformules van Schoklitsch, Valentin en Chatterjee et al. voorspellen een onderschatte evenwichtsdiepte wat hoogstwaarschijnlijk te verklaren is doordat uitgegaan is van een vaste verhouding tussen de lengte van de bodembescherming en het verval (invloed lengte zit niet in formules).
- 6) Omdat de lengte van de bodembescherming niet in de voorspellers van respectievelijk Qayoum, Altinbilek en Breusers is verdisconteerd, geven deze voorspellers een overschatte evenwichtsdiepte.

Toetsing ontgrondingsformules (8 experimenten Shalash, 1959, 2D-horizontaal: type A)

Bijlage D

Gegevens:  $d_{50}$  = 0.52, 1.65, 2.18 mm  
 $d_{90}$  = 0.73, 1.87, 2.65 mm  
 $h_t$  = 0.052-0.084 m  
 $H$  = 0.106-0.13 m  
 $L$  = 0.0 m  
 $q$  = 0.0113-0.0277 m<sup>2</sup>/s  
 $t$  = > 24 uur

	0.75 < r < 1.33	0.50 < r < 2.00	0.33 < r < 3.00	$x_m$
Schoklitsch	0%	0%	0%	0.21
Müller ( $c_m = 1.30$ )	100%	100%	100%	1.08
( $c_m = 1.93$ )	0%	88%	100%	1.78
Shalash	100%	100%	100%	0.98
Qayoum	38%	100%	100%	1.28
Valentin	0%	100%	100%	0.65
Altinbilek	100%	100%	100%	1.19
Breusers/Raudkivi (A)	25%	75%	88%	1.90
Chatterjee et al.	0%	0%	38%	0.27
Dietz/Hoffmans	88%	100%	100%	1.15

Toetsing ontgrondingsformules (6 experimenten Shalash, 1959, 2D-horizontaal: type B)

Gegevens:  $d_{50}$  = 0.52, 1.65, 2.18 mm  
 $d_{90}$  = 0.73, 1.87, 2.65 mm  
 $h_t$  = 0.074-0.084 m  
 $H$  = 0.116-0.13 m  
 $L$  = 0.3 m  
 $q$  = 0.0183-0.0277 m<sup>2</sup>/s  
 $t$  = > 24 uur

	0.75 < r < 1.33	0.50 < r < 2.00	0.33 < r < 3.00	$x_m$
Schoklitsch	0%	17%	67%	0.36
Müller ( $c_m = 1.30$ )	0%	83%	100%	1.85
( $c_m = 1.93$ )	0%	0%	33%	3.05
Shalash	100%	100%	100%	1.09
Qayoum	0%	33%	100%	2.22
Valentin	100%	100%	100%	1.09
Altinbilek	0%	33%	100%	2.04
Breusers/Raudkivi (A)	0%	0%	83%	3.20
Chatterjee et al.	0%	67%	83%	0.47
Dietz/Hoffmans	100%	100%	100%	1.04

Toetsing ontgrondingsformules (9 experimenten Shalash, 1959, 2D-horizontaal: type C)

Gegevens:

$d_{50}$	=	0.52, 1.65, 2.18 mm
$d_{90}$	=	0.73, 1.87, 2.65 mm
$h_t$	=	0.052-0.084 m
$H$	=	0.106-0.13 m
$L$	=	0.3, 0.6, 0.9 m
$q$	=	0.0090-0.030 m <sup>2</sup> /s
$t$	=	> 120 uur

	0.75 < r < 1.33	0.50 < r < 2.00	0.33 < r < 3.00	$x_m$
Schoklitsch	33%	56%	89%	0.61
Müller ( $c_m = 1.30$ )	0%	11%	11%	3.64
( $c_m = 1.93$ )	0%	0%	11%	5.89
Shalash	89%	100%	100%	1.01
Qayoum	0%	11%	11%	3.98
Valentin	11%	44%	78%	2.21
Altinbilek	0%	11%	11%	4.02
Breusers/Raudkivi (A)	0%	0%	0%	7.92
Chatterjee et al.	56%	78%	78%	0.79
Dietz/Hoffmans	56%	100%	100%	1.10

Opmerkingen:

- 1) De ontgrondingsgegevens zijn goed gedocumenteerd (tabellen 1 en 3, blz 23-25 proefschrift van Shalash). De tijdsduur van elk experiment bedroeg minstens 24 uur; voldoende lang om een evenwichtskuil te genereren.
- 2) De experimenten die onder begeleiding van Shalash zijn uitgevoerd zijn hier in drie typen onderverdeeld, te weten: type A, type B en type C. In de derde serie (type C) zijn alleen die experimenten geselecteerd waarvan de tijd van beproeven langer was dan 120 uur.
- 3) Shalash heeft zijn ontgrondingsformule zeer goed gefit.
- 4) De ontgrondingsformule van Valentin scoort uitmuntend voor de tweede serie (type B), terwijl deze score in de overige series beduidend minder is.
- 5) Naarmate de bodembescherming langer wordt, neemt de voorspellingskracht van de ontgrondingsformules van respectievelijk Müller, Qayoum, Altinbilek en Breusers af. Deze formules overschatten de evenwichtsdiepte in de series (type B en C), omdat de invloed van zowel de afnemende snelheid als de afnemende turbulente kinetische energie niet in deze voorspellers zit opgesloten. Daarentegen neemt de voorspellingskracht van de ontgrondingsformules van Schoklitsch en Chatterjee et al. toe. Een mogelijke verklaring hiervoor is dat de lengte van de bodembescherming impliciet in deze ontgrondingsformules is verdisconteerd.
- 6) Overall geven de nieuwe voorspellers een redelijk resultaat. De berekeningsresultaten van de nieuwe voorspellers voor respectievelijk type B en type C zullen hoogstwaarschijnlijk benedenstrooms van de watersprong niet overeenkomen. Nader onderzoek naar de grootte van de discontinuïteit is vereist.



Gegevens:  $d_{50}$  = 2.5, 4.0, 6.0, 8.5 mm  
 $d_{90}$  = 2.9, 4.8, 6.8, 9.7 mm  
 $h_t$  = 0.058-0.131 m  
 $H$  = 0.019-0.111 m  
 $L$  = 0.0 m  
 $q$  = 0.0058-0.0235 m<sup>2</sup>/s  
 $t$  = geëxtrapoleerd

	0.75 < r < 1.33	0.50 < r < 2.00	0.33 < r < 3.00	$x_m$
Schoklitsch	0%	4%	54%	0.34
Müller ( $c_m = 1.30$ ) ( $c_m = 1.93$ )	0% 23%	0% 52%	19% 75%	0.08 0.58
Shalash	0%	0%	10%	0.01
Qayoum	94%	100%	100%	1.15
Valentin	0%	10%	90%	0.39
Altinbilek	44%	100%	100%	0.74
Breusers/Raudkivi (A)	0%	19%	48%	0.36
Chatterjee et al.	0%	15%	75%	0.38
Dietz/Hoffmans	69%	100%	100%	0.87

Opmerkingen:

- 1) Qayoum geeft geen specifieke informatie omtrent de verdeling van de korreldiameter (zeefkromme). Daarom zijn de waarden van  $d_{50}$  en  $d_{90}$  hier lineair geïnterpoleerd (bijvoorbeeld  $d = 2-3$  mm,  $d_{50} = 2.5$  mm en  $d_{90} = 2.9$  mm).
- 2) Er zijn geen "afleesfouten" met betrekking tot de experimentele data  $h_t$ ,  $H$ ,  $L$ ,  $q$  en  $y_{m,e}$ , aangezien deze gegevens uit tabellen zijn overgenomen (blz. 63, 64, 65 en 88).
- 3) In navolging van Hartung (1957)<sup>1</sup> heeft Qayoum de experimenten in verschillende series ingedeeld. In elke serie zijn enkele langeduurproeven (80 uur) uitgevoerd. Op basis van deze resultaten zijn de korteduurproeven (2-2.5 uur) gecorrigeerd.
- 4) De score van de ontgrondingsformule van Qayoum is zeer goed. De nieuwe voorspeller scoort voldoende. De scores van de overige formules zijn matig. Opvallend is dat de verhouding tussen de berekende en gemeten evenwichtsdiepte voor alle formules uitgezonderd die van Qayoum kleiner is dan één.

<sup>1</sup> Hartung, W., 1957, Die Gesetzmäßigkeit der Kolkbildung hinter überströmten Wehren, Dissertation, Technischen Hochschule Braunschweig.

Gegevens:

$a$	=	0.004-0.02 m
$d_{50}$	=	1.3, 6.5 mm
$d_{90}$	=	niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )
$h_t$	=	0.155-0.25 m
$L$	=	0 m
$q$	=	0.0031-0.0214 m <sup>2</sup> /s
$t$	=	> 2 uur (2-10 uren)
$U_1$	=	0.55-2.76 m/s
$\mu$	=	0.58-0.63 (berekend)

	0.75 < r < 1.33	0.50 < r < 2.00	0.33 < r < 3.00	$x_m$
Schoklitsch	15%	54%	92%	0.50
Müller ( $c_m = 1.30$ )	0%	0%	0%	< 0
( $c_m = 1.93$ )	0%	15%	31%	< 0
Shalash	0%	0%	0%	< 0
Qayoum	46%	85%	92%	1.12
Valentin	23%	62%	92%	1.85
Altinbilek	77%	100%	100%	1.21
Breusers/Raudkivi (A)	38%	85%	100%	1.14
Chatterjee et al.	15%	38%	85%	0.45
Dietz/Hoffmans	62%	100%	100%	0.97

Opmerkingen:

- 1) De evenwichtsdiepte is zo goed mogelijk uit de grafieken afgelezen. Een kleine afleesfout is daarom onvermijdelijk. De overige parameters zijn uit tabellen overgenomen. Altinbilek gebruikt een geometrisch gemiddelde korreldiameter  $d_g$ . In deze studie is aangenomen dat  $d_g \approx d_{50}$ . De  $d_{90}$  is geschat  $d_{90} = 2d_{50}$ .
- 2) De ontgrondingsformule van Altinbilek scoort relatief het beste. De nieuwe voorspeller scoort voldoende. Breusers heeft de data van Altinbilek aangewend om zijn relatie te kalibreren.
- 3) Omdat de tailwaterdiepte in deze proevenserie van Altinbilek gemiddeld 2 keer zo groot is als de tailwaterdiepte in de proevenseries van Müller en Shalash geven de voorspellers van zowel Müller als Shalash een negatieve evenwichtsdiepte.

Gegevens:

$a$	=	0.0071-0.0498 m
$d_{50}$	=	1.2, 2.38 mm
$d_{90}$	=	niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )
$h_t$	=	0.33 m
$L$	=	0.0 m
$t$	=	> 6 uur (6-64 uur)
$U_1$	=	0.87-2.22 m/s
$\mu$	=	0.97 (geschat)

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Schoklitsch	43%	93%	100%	0.68
Müller ( $c_m = 1.30$ ) ( $c_m = 1.93$ )	0% 0%	0% 7%	0% 14%	< 0 < 0
Shalash	0%	0%	0%	< 0
Qayoum	14%	71%	93%	1.48
Valentin	43%	100%	100%	1.16
Altinbilek	0%	86%	100%	1.90
Breusers/Raudkivi (A)	7%	57%	100%	2.01
Chatterjee et al.	0%	29%	100%	0.43
Dietz/Hoffmans	50%	86%	93%	1.63

## Toetsing ontgrondingsformules (12 experimenten Rajaratnam, 1983, 2D-horizontaal: type A)

Gegevens:

$a$	=	0.0064-0.0381 m
$d_{50}$	=	1.0, 2.38 mm
$d_{90}$	=	niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )
$h_t$	=	0.01-0.04 m (MINIMALE TAILWATERDIEPTE)
$L$	=	0.0 m
$t$	=	> 6 uur (6-41 uur)
$U_1$	=	0.55-2.33 m/s
$\mu$	=	0.97 (geschat)

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Schoklitsch	0%	0%	50%	0.35
Müller ( $c_m = 1.30$ ) ( $c_m = 1.93$ )	33% 0%	67% 17%	92% 67%	1.96 3.01
Shalash	42%	67%	100%	1.80
Qayoum	33%	83%	100%	1.47
Valentin	50%	83%	92%	1.30
Altinbilek	0%	42%	92%	2.16
Breusers/Raudkivi (A)	0%	8%	58%	2.98
Chatterjee et al.	0%	17%	92%	0.41
Dietz/Hoffmans	83%	100%	100%	1.14

Opmerkingen:

- 1) Ofschoon de ontgrondingsgegevens goed zijn gerapporteerd is geen specifieke informatie verstrekt omtrent de gradering van het bodemmateriaal ( $d_{90} = 2d_{50}$ ). De experimenten lenen zich voor ijking en verificatie van voorspellers voor de evenwichtsdiepte gezien de relatief lange tijdsduur die in de range van 8 tot 64 uur ligt.
- 2) Rajaratnam bericht dat de evenwichtsdiepte met het Froude getal is gecorreleerd (dus lineair met de snelheid  $U_1$ ).
- 3) Vrijwel alle voorspellers geven een overschatte waarde van de evenwichtsdiepte voor experimenten waarin de benedenstroomse waterdiepte relatief klein is (Rajaratnam, 1983). Volgens Rajaratnam was in deze proevenserie de stroming nagenoeg superkritisch (instabiele watersprong). In zulke gevallen is het turbulentieniveau relatief laag. De turbulentie wordt dan grotendeels door de bodemruwheid bepaald ( $0.05 < r_0 < 0.1$ ). In de berekening is aangenomen dat  $r_0 = 0.075$ , zodat  $\omega_b$  gelijk is aan 1.35 ( $\omega_0 = 18r_0$ ).

Gegevens:	$a$	=	0.0059-0.0153 m
	$d_{50}$	=	0.85, 1.65 mm
	$d_{90}$	=	niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )
	$h_t$	=	0.235-0.416 m
	$L$	=	0.200-0.565 m
	$t$	=	> 3 uur (3-6 uur)
	$U_1$	=	1.166-3.213 m/s
	$\mu$	=	0.97 (geschat)

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Schoklitsch	58%	81%	100%	1.33
Müller ( $c_m = 1.30$ ) ( $c_m = 1.93$ )	4% 8%	4% 23%	8% 38%	< 0 1.28
Shalash	4%	8%	12%	< 0
Qayoum	4%	12%	23%	4.30
Valentin	23%	50%	58%	4.86
Altinbilek	0%	8%	12%	4.62
Breusers/Raudkivi (A)	0%	8%	12%	6.05
Chatterjee et al.	58%	88%	100%	0.92
Dietz/Hoffmans	12%	42%	85%	2.14

## Opmerkingen:

- 1) De experimentele data is goed gerapporteerd (tabelvorm). De beproevingsperiode is ongeveer 3 uur wat relatief kort is.
- 2) De ontgrondingsformules van respectievelijk Müller ( $c_m = 1.30$ ) en Shalash voorspellen een onderschatte evenwichtsdiepte.
- 3) De onderlinge verschillen tussen de formules van Qayoum, Valentin, Altinbilek en Breusers zijn klein. Allen geven een overschatte waarde van de evenwichtsdiepte, aangezien de invloed van de lengte van de bodembescherming niet in deze formules is verdisconteerd.
- 4) In deze proevenserie scoren de twee ontgrondingsformules van Schoklitsch en Chatterjee et al. relatief het beste.
- 5) Omdat de tijdsduur van de proeven niet is gegeven is er twijfel betreffende de gemeten evenwichtsdiepte. Bij het bestuderen van de data blijkt dat de evenwichtsdiepte bij vele proeven dezelfde waarde heeft. In 14 experimenten (Hassan 35 tot en met Hassan 48) bedroeg de evenwichtsdiepte 5.0 cm (bijlage O).

Gegevens:

$a$	=	0.02-0.05 m
$d_{50}$	=	0.76, 4.30 mm
$d_{90}$	=	0.93, 6.15
$h_t$	=	0.29-0.31 m
$L$	=	0.66 m
$t$	=	0.2-4.7 uur
$U_1$	=	0.84-2.42 m/s
$\mu$	=	0.46-0.88 (berekend).

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Schoklitsch	93%	100%	100%	1.15
Müller ( $c_m = 1.30$ )	4%	7%	11%	< 0
( $c_m = 1.93$ )	11%	25%	36%	1.45
Shalash	4%	4%	4%	< 0
Qayoum	0%	0%	25%	4.35
Valentin	32%	50%	75%	2.14
Altinbilek	0%	0%	46%	3.83
Breusers/Raudkivi (A)	7%	46%	54%	6.03
Chatterjee et al.	100%	100%	100%	1.00
Dietz/Hoffmans	0%	54%	82%	2.21

## Opmerkingen:

- 1) De experimentele data is goed gerapporteerd (tabelvorm). De beproevingsperiode varieert van 0,2 tot 5 uur wat in vergelijking tot de langeduursproeven van Müller en Shalash relatief kort is.
- 2) De evenwichtsdiepte is niet gerapporteerd maar hier berekend met de ontgrondingsformule van Chatterjee et al., Hierdoor is de score van Chatterjee et al. uitmuntend.
- 3) Chatterjee et al. en Hassan & Narayanan hebben nagenoeg dezelfde experimenten uitgevoerd (zie ook opmerkingen bijlage H).

$n = 83$	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Dietz/Hoffmans	66%	98%	99%	1.04
Qayoum	67%	93%	98%	1.22
Altinbilek	47%	98%	100%	1.05
Valentin	11%	42%	93%	0.75
Breusers/Raudkivi (A)	10%	41%	69%	0.99
Müller ( $c_m = 1.93$ )	13%	42%	60%	0.53
Schoklitsch	10%	27%	63%	0.39
Chatterjee et al.	2%	19%	77%	0.38
Müller ( $c_m = 1.30$ )	10%	10%	20%	< 0
Shalash	10%	10%	16%	< 0

## Berekeningsresultaten ontgrondingsformules (kalibratie nieuwe voorspeller 'type A')

$n = 27$	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Dietz/Hoffmans	74%	100%	100%	1.01
Müller ( $c_m = 1.30$ )	67%	96%	100%	1.18
Valentin	48%	93%	96%	0.75
Shalash	33%	81%	100%	1.51
Breusers/Raudkivi (A)	33%	52%	89%	2.24
Altinbilek	19%	78%	100%	1.50
Qayoum	15%	67%	93%	1.63
Müller ( $c_m = 1.93$ )	7%	56%	85%	2.02
Chatterjee et al.	15%	48%	63%	0.39
Schoklitsch	7%	22%	56%	0.30

## Berekeningsresultaten ontgrondingsformules (kalibratie nieuwe voorspeller 'type B')

$n = 9$	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Shalash	89%	100%	100%	1.01
Dietz/Hoffmans	56%	100%	100%	1.10
Chatterjee et al.	56%	78%	78%	0.79
Schoklitsch	33%	56%	89%	0.61
Valentin	11%	44%	78%	2.21
Müller ( $c_m = 1.30$ )	0%	11%	11%	3.64
Qayoum	0%	11%	11%	3.98
Altinbilek	0%	11%	11%	4.02
Müller ( $c_m = 1.93$ )	0%	0%	11%	5.89
Breusers/Raudkivi (A)	0%	0%	0%	7.92

## Berekeningsresultaten ontgrondingsformules (kalibratie nieuwe voorspeller 'type C')

Toetsing ontgrondingsformules (14 experimenten Rajaratnam et al., 1981, 2D-schuin)

Bijlage K

Gegevens:  $b_u = 2.5$  mm  
 $d_{50} = 1.2, 2.38$  mm  
 $d_{90} =$  niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )  
 $H_p = 0.029-0.043$  m  
 $U_o = 1.39-2.77$  m/s  
 $t = 24-111.9$  uur  
 $\theta = 45^\circ$

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Breusers/Raudkivi (B)	0%	79%	100%	0.55
Breusers/Raudkivi (C)	57%	93%	100%	1.16

Toetsing ontgrondingsformules (8 experimenten Rajaratnam et al., 1981, 2D-schuin)

Gegevens:  $b_u = 2.5$  mm  
 $d_{50} = 1.2$  mm  
 $d_{90} =$  niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )  
 $H_p = 0.015-0.030$  m  
 $U_o = 1.12-2.45$  m/s  
 $t = 24-66$  uur  
 $\theta = 60^\circ$

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Breusers/Raudkivi (B)	0%	100%	100%	0.62
Breusers/Raudkivi (C)	13%	63%	100%	1.92

Toetsing ontgrondingsformules (7 experimenten Rajaratnam et al., 1981, 2D-schuin)

Gegevens:  $b_u = 2.5$  mm  
 $d_{50} = 1.2$  mm  
 $d_{90} =$  niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )  
 $H_p = 0.037-0.049$  m  
 $U_o = 1.23-2.16$  m/s  
 $t = 24-69.5$  uur  
 $\theta = 30^\circ$

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Breusers/Raudkivi (B)	0%	14%	100%	0.44
Breusers/Raudkivi (C)	29%	100%	100%	0.78

Toetsing ontgrondingsformules (4 experimenten Rajaratnam et al., 1981, 2D-schuin)

Gegevens:  $b_u = 2.5$  mm  
 $d_{50} = 1.2$  mm  
 $d_{90} =$  niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )  
 $H_p = 0.043$  m  
 $U_o = 1.27-2.24$  m/s  
 $t = 24-25$  uur  
 $\theta = 10^\circ$

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Breusers/Raudkivi (B)	50%	75%	100%	0.58
Breusers/Raudkivi (C)	100%	100%	100%	1.11



Toetsing ontgrondingsformules (17 experimenten Rajaratnam, 1981, 2D-verticaal)

Bijlage L

Gegevens:

$b_u$	=	2.5 mm
$d_{50}$	=	1.2, 2.38 mm
$d_{90}$	=	niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )
$H_p$	=	0.013-0.127 m
$U_o$	=	0.94-2.78 m/s
$t$	=	niet gerapporteerd
$\theta$	=	$90^\circ$

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Breusers/Raudkivi (B)	76%	94%	100%	0.88
Breusers/Raudkivi (C)	41%	65%	100%	1.28

Toetsing ontgrondingsformules (16 experimenten Akashi en Saitou, 1986, 2D-verticaal)

Gegevens:

$b_u$	=	20 mm
$d_{50}$	=	0.69, 0.96 mm
$d_{90}$	=	niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )
$H_p$	=	0.075-0.386 m
$U_o$	=	0.70-1.49 m/s
$t$	=	> 2 uur (2-4 uur)
$\theta$	=	$90^\circ$

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Breusers/Raudkivi (B)	13%	44%	94%	0.53
Breusers/Raudkivi (C)	6%	38%	88%	2.27

Opmerkingen:

- 1) De experimentele data van Rajaratnam is goed gedocumenteerd (tabellen). De  $d_{90}$  is geschat ( $d_{90} = 2d_{50}$ ).
- 2) De evenwichtsdiepte aangaande de experimenten van Akashi is uit grafieken afgelezen (afleesfouten).
- 3) De door Breusers geïntroduceerde voorspellers geven overall een mager resultaat. Daarom is een vervolgonderzoek naar het erosieproces wat door vlakke verticale stralen wordt ingeleid noodzakelijk.

Toetsing ontgrondingsformules (27 experimenten Clarke, 1962, 3D-horizontaal)

Bijlage M

Gegevens:

$d_{50}$	=	0.82, 2.02 mm (zand)
$d_{90}$	=	0.95, 2.40 mm
$D$	=	2.4, 14.3 mm
$h_t$	=	0.159-0.279 m
$U_0$	=	2.1-12.0 m/s
$t$	=	4-134 uur

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Rajaratnam/Berry	70%	96%	96%	1.00
Breusers/Raudkivi (D)	78%	93%	96%	1.08

Toetsing ontgrondingsformules (4 experimenten Rajaratnam and Berry, 1977, 3D-horizontaal)

Gegevens:

$d_{50}$	=	1.4 mm (zand)
$d_{90}$	=	niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )
$D$	=	25.4 mm
$h_t$	=	0.61 m
$U_0$	=	1.28-1.82 m/s
$t$	=	> 24 uur

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Rajaratnam/Berry	100%	100%	100%	1.00
Breusers/Raudkivi (D)	100%	100%	100%	1.15

Opmerkingen:

- 1) De experimentele gegevens van Clarke en Rajaratnam en Berry zijn goed gedocumenteerd.
- 2) De experimenten zijn vrijwel zeker tot een evenwichtssituatie doorgezet.
- 3) Beide voorspellers geven een goed resultaat.

Gegevens:

$D$	=	23.8-47.8 mm
$d_{50}$	=	0.82, 1.27, 2.02 mm
$d_{90}$	=	0.95, 1.50, 2.40 mm
$H_p$	=	0.127 m
$U_0$	=	0.55-3.88 m/s
$t$	=	1.5-4.7 uur

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Rajaratnam/Berry	20%	27%	40%	7.00
Breusers/Raudkivi (E)	0%	7%	33%	8.21

## Toetsing ontgrondingsformules (18 experimenten Westrich, 1974, 3D-verticaal)

Gegevens:

$D$	=	20-40 mm
$d_{50}$	=	0.9 mm
$d_{90}$	=	1.2
$H_p$	=	0.064-1.08 m
$U_0$	=	1.05-8.33 m/s
$t$	=	> 2 uur (2-21 uur)

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Rajaratnam/Berry	56%	94%	100%	1.28
Breusers/Raudkivi (E)	50%	94%	100%	1.26

## Toetsing ontgrondingsformules (9 experimenten Rajaratnam, 1982, 3D-verticaal)

Gegevens:

$D$	=	0.98 mm
$d_{50}$	=	1.2, 2.38 mm
$d_{90}$	=	niet gerapporteerd ( $d_{90} = 2d_{50}$ )
$H_p$	=	0.149-0.279 m
$U_0$	=	2.99-4.54 m/s
$t$	=	24 uur

	$0.75 < r < 1.33$	$0.50 < r < 2.00$	$0.33 < r < 3.00$	$x_m$
Rajaratnam/Berry	89%	100%	100%	1.00
Breusers/Raudkivi (E)	89%	100%	100%	1.00

## Opmerkingen

- 1) De experimentele data van Clarke en Rajaratnam is goed gedocumenteerd (tabellen). De  $d_{90}$  is geschat ( $d_{90} = 2d_{50}$ ).
- 2) De data van Westrich is uit tabellen en grafieken gehaald (afleesfouten voor de evenwichtsdiepte en de snelheid van de straal). De  $d_{50}$  en de  $d_{90}$  zijn uit een zeefkromme gehaald.
- 3) In de serie van Clarke voorspellen beide ontgrondingsformules een significante overschatte evenwichtsdiepte. Hoogstwaarschijnlijk zijn de experimenten van Clarke niet tot een evenwichtsfase doorgezet.
- 4) De voorspeller van Rajaratnam geeft over het algemeen een iets beter resultaat.
- 5) Beide voorspellers hebben een beperkt geldigheidsgebied, aangezien de invloed van de valhoogte niet in de formules zitten.

Experimentele data '2D-horizontaal'

Bijlage O

serie	$q$ (m <sup>2</sup> /s)	$U_1$ (m/s)	$H+h_c$ (m)	$L$ (m)	$d_{s0}$ (m)	$d_{90}$ (m)	$Y_{s,e}$ (m)	$a$ (m)	$\mu$ (-)	tijd (uren)
Schokli01	0.0560		0.170	0.255	0.01020		0.025		0.65	
Schokli02	0.0560		0.170	0.255	0.00450		0.060		0.65	
Schokli03	0.0560		0.170	0.255	0.00150		0.085		0.65	
Schokli04	0.0560		0.210	0.315	0.01720		0.040		0.65	
Schokli05	0.0560		0.210	0.315	0.01020		0.060		0.65	
Schokli06	0.0560		0.210	0.315	0.00450		0.080		0.65	
Schokli07	0.0560		0.210	0.315	0.00150		0.100		0.65	
Schokli08	0.0560		0.280	0.420	0.01720		0.075		0.65	
Schokli09	0.0560		0.280	0.420	0.00450		0.085		0.65	
Schokli10	0.0560		0.280	0.420	0.00150		0.100		0.65	
Schokli11	0.0560		0.330	0.495	0.01720		0.080		0.65	
Schokli12	0.0560		0.330	0.495	0.00450		0.090		0.65	
Schokli13	0.0560		0.330	0.495	0.00150		0.100		0.65	
Schokli14	0.0260		0.280	0.420	0.00150		0.065		0.65	
Schokli15	0.0330		0.280	0.420	0.00150		0.070		0.65	
Schokli16	0.0560		0.280	0.420	0.00150		0.100		0.65	
Schokli17	0.0890		0.280	0.420	0.00150		0.120		0.65	
Schokli18	0.0560		1.000	1.500	0.01020		0.140		0.65	
Schokli19	0.1100		1.000	1.500	0.01020		0.180		0.65	
Schokli20	0.1500		1.000	1.500	0.01020		0.200		0.65	
Müller 01	0.0157		0.144	0.096	0.145	0.00190	0.00270	0.116	0.65	440
Müller 02	0.0040		0.058	0.039	0.058	0.00076	0.00130	0.047	0.65	165
Müller 03	0.0133		0.058	0.039	0.058	0.00076	0.00130	0.216	0.65	700
Müller 04	0.0098		0.057	0.039	0.058	0.00076	0.00130	0.105	0.65	210
Müller 05	0.0114		0.058	0.038	0.058	0.00076	0.00130	0.208	0.65	665
Müller 06	0.0072		0.057	0.039	0.058	0.00076	0.00130	0.084	0.65	280
Müller 07	0.0040		0.057	0.039	0.058	0.00190	0.00270	0.020	0.65	148
Müller 08	0.0073		0.058	0.039	0.058	0.00190	0.00270	0.046	0.65	118
Müller 09	0.0098		0.058	0.039	0.058	0.00190	0.00270	0.062	0.65	263
Müller 10	0.0072		0.056	0.040	0.058	0.00367	0.00550	0.023	0.65	72
Müller 11	0.0090		0.056	0.040	0.058	0.00367	0.00550	0.033	0.65	48
Müller 12	0.0040		0.057	0.039	0.058	0.00043	0.00070	0.054	0.65	336
Müller 13	0.0072		0.057	0.039	0.058	0.00043	0.00070	0.097	0.65	240
Müller 14	0.0090		0.058	0.039	0.058	0.00043	0.00070	0.114	0.65	408
Müller 15	0.0102		0.101	0.049	0.058	0.00043	0.00070	0.143	0.65	285
Müller 16	0.0102		0.102	0.049	0.058	0.00367	0.00550	0.047	0.65	400
Müller 17	0.0183		0.076	0.074	0.058	0.00367	0.00550	0.063	0.65	144
Müller 18	0.0255		0.075	0.075	0.058	0.00367	0.00550	0.089	0.65	224
Müller 19	0.0255		0.125	0.075	0.058	0.00367	0.00550	0.120	0.65	197
Müller 20	0.0183		0.080	0.070	0.025	0.00090	0.00140	0.188	0.65	188
Müller 21	0.0255		0.075	0.075	0.025	0.00090	0.00140	0.223	0.65	168
Shal01 S1	0.0113		0.106	0.052	0.000	0.00052	0.00073	0.201	0.65	370
Shal15 S1	0.0246		0.116	0.084	0.000	0.00052	0.00073	0.342	0.65	>24
Shal16 S1	0.0113		0.106	0.052	0.000	0.00165	0.00187	0.118	0.65	>24
Shal20 S1	0.0183		0.130	0.074	0.000	0.00165	0.00187	0.166	0.65	>24
Shal22 S1	0.0246		0.116	0.084	0.000	0.00165	0.00187	0.209	0.65	>24
Shal26 S1	0.0277		0.130	0.074	0.000	0.00165	0.00187	0.232	0.65	>24
Shal28 S1	0.0246		0.116	0.084	0.000	0.00218	0.00265	0.172	0.65	>24
Shal32 S1	0.0277		0.130	0.074	0.000	0.00218	0.00265	0.178	0.65	>24
Shal03 S2	0.0246		0.116	0.084	0.300	0.00052	0.00073	0.197	0.65	192
Shal10 S2	0.0183		0.130	0.074	0.300	0.00165	0.00187	0.104	0.65	144
Shal11 S2	0.0277		0.130	0.074	0.300	0.00165	0.00187	0.149	0.65	168
Shal12 S2	0.0277		0.130	0.074	0.300	0.00218	0.00265	0.112	0.65	192
Shal23 S2	0.0246		0.116	0.084	0.300	0.00165	0.00187	0.116	0.65	>24
Shal29 S2	0.0246		0.116	0.084	0.300	0.00218	0.00265	0.087	0.65	>24
Shal02 S3	0.0113		0.106	0.052	0.300	0.00052	0.00073	0.120	0.65	192
Shal17 S3	0.0113		0.106	0.052	0.300	0.00165	0.00187	0.062	0.65	>24
Shal04 S3	0.0113		0.106	0.052	0.600	0.00052	0.00073	0.063	0.65	120
Shal05 S3	0.0246		0.116	0.084	0.600	0.00052	0.00073	0.110	0.65	144
Shal08 S3	0.0183		0.130	0.074	0.600	0.00165	0.00187	0.045	0.65	120
Shal09 S3	0.0277		0.130	0.074	0.600	0.00165	0.00187	0.080	0.65	120

serie	$q$ (m <sup>2</sup> /s)	$U_1$ (m/s)	$H$ (m)	$h_c$ (m)	$L$ (m)	$d_{s0}$ (m)	$d_{90}$ (m)	$Y_{a,e}$ (m)	$a$ (m)	$\mu$ (-)	tijd (uren)
Shal13 S3	0.0277		0.130	0.074	0.600	0.00218	0.00265	0.061		0.65	144
Shal18 S3	0.0113		0.106	0.052	0.600	0.00165	0.00187	0.027		0.65	>24
Shal24 S3	0.0246		0.116	0.084	0.600	0.00165	0.00187	0.047		0.65	>24
Shal30 S3	0.0246		0.116	0.084	0.600	0.00218	0.00265	0.029		0.65	>24
Shal06 S3	0.0113		0.106	0.052	0.900	0.00052	0.00073	0.035		0.65	120
Shal07 S3	0.0246		0.116	0.084	0.900	0.00052	0.00073	0.076		0.65	120
Shal14 S3	0.0277		0.130	0.074	0.900	0.00218	0.00265	0.021		0.65	120
Shal19 S3	0.0113		0.106	0.052	0.900	0.00165	0.00187	0.009		0.65	>24
Shal21 S3	0.0183		0.130	0.074	0.900	0.00165	0.00187	0.026		0.65	>24
Shal25 S3	0.0246		0.116	0.084	0.900	0.00165	0.00187	0.013		0.65	>24
Shal27 S3	0.0277		0.130	0.074	0.900	0.00165	0.00187	0.046		0.65	>24
Shal31 S3	0.0246		0.116	0.084	0.900	0.00218	0.00265	0.006		0.65	>24
Qayoum101	0.0130		0.043	0.120	0.000	0.00600	0.00680	0.051		0.65	>2
Qayoum102	0.0130		0.043	0.100	0.000	0.00600	0.00680	0.057		0.65	>2
Qayoum103	0.0130		0.062	0.120	0.000	0.00600	0.00680	0.075		0.65	>2
Qayoum104	0.0130		0.059	0.100	0.000	0.00600	0.00680	0.083		0.65	>2
Qayoum105	0.0130		0.054	0.086	0.000	0.00600	0.00680	0.081		0.65	>2
Qayoum106	0.0130		0.055	0.070	0.000	0.00600	0.00680	0.087		0.65	>2
Qayoum107	0.0130		0.076	0.104	0.000	0.00600	0.00680	0.089		0.65	>2
Qayoum108	0.0130		0.073	0.088	0.000	0.00600	0.00680	0.093		0.65	>2
Qayoum109	0.0130		0.074	0.071	0.000	0.00600	0.00680	0.093		0.65	>2
Qayoum110	0.0130		0.076	0.058	0.000	0.00600	0.00680	0.098		0.65	>2
Qayoum111	0.0130		0.083	0.120	0.000	0.00600	0.00680	0.088		0.65	>2
Qayoum112	0.0130		0.085	0.074	0.000	0.00600	0.00680	0.100		0.65	>2
Qayoum113	0.0130		0.106	0.073	0.000	0.00600	0.00680	0.110		0.65	>2
Qayoum114	0.0130		0.109	0.071	0.000	0.00600	0.00680	0.112		0.65	>2
Qayoum115	0.0130		0.102	0.059	0.000	0.00600	0.00680	0.112		0.65	>2
Qayoum116	0.0130		0.094	0.088	0.000	0.00600	0.00680	0.099		0.65	>2
Qayoum117	0.0130		0.091	0.071	0.000	0.00600	0.00680	0.105		0.65	>2
Qayoum201	0.0170		0.039	0.121	0.000	0.00400	0.00480	0.099		0.65	>2
Qayoum202	0.0170		0.039	0.101	0.000	0.00400	0.00480	0.105		0.65	>2
Qayoum203	0.0170		0.038	0.082	0.000	0.00400	0.00480	0.115		0.65	>2
Qayoum204	0.0170		0.060	0.121	0.000	0.00400	0.00480	0.124		0.65	>2
Qayoum205	0.0170		0.058	0.101	0.000	0.00400	0.00480	0.129		0.65	>2
Qayoum206	0.0170		0.055	0.085	0.000	0.00400	0.00480	0.133		0.65	>2
Qayoum207	0.0170		0.078	0.121	0.000	0.00400	0.00480	0.134		0.65	>2
Qayoum208	0.0170		0.079	0.103	0.000	0.00400	0.00480	0.146		0.65	>2
Qayoum209	0.0170		0.076	0.085	0.000	0.00400	0.00480	0.150		0.65	>2
Qayoum210	0.0170		0.097	0.103	0.000	0.00400	0.00480	0.160		0.65	>2
Qayoum211	0.0170		0.094	0.085	0.000	0.00400	0.00480	0.158		0.65	>2
Qayoum301	0.0130		0.021	0.100	0.000	0.00250	0.00290	0.070		0.65	>2
Qayoum302	0.0130		0.019	0.120	0.000	0.00250	0.00290	0.065		0.65	>2
Qayoum303	0.0130		0.020	0.080	0.000	0.00250	0.00290	0.079		0.65	>2
Qayoum304	0.0130		0.060	0.100	0.000	0.00250	0.00290	0.113		0.65	>2
Qayoum305	0.0130		0.060	0.120	0.000	0.00250	0.00290	0.112		0.65	>2
Qayoum306	0.0130		0.059	0.080	0.000	0.00250	0.00290	0.121		0.65	>2
Qayoum307	0.0130		0.082	0.100	0.000	0.00250	0.00290	0.131		0.65	>2
Qayoum308	0.0130		0.078	0.080	0.000	0.00250	0.00290	0.138		0.65	>2
Qayoum309	0.0130		0.038	0.100	0.000	0.00250	0.00290	0.096		0.65	>2
Qayoum310	0.0130		0.040	0.120	0.000	0.00250	0.00290	0.092		0.65	>2
Qayoum401	0.0235		0.090	0.131	0.000	0.00850	0.00970	0.125		0.65	>2
Qayoum402	0.0081		0.040	0.061	0.000	0.00400	0.00480	0.064		0.65	>2
Qayoum403	0.0165		0.082	0.125	0.000	0.00850	0.00970	0.087		0.65	>2
Qayoum404	0.0058		0.039	0.060	0.000	0.00400	0.00480	0.045		0.65	>2
Qayoum405	0.0138		0.088	0.116	0.000	0.00850	0.00970	0.081		0.65	>2
Qayoum406	0.0081		0.062	0.081	0.000	0.00600	0.00680	0.056		0.65	>2
Qayoum407	0.0098		0.111	0.086	0.000	0.00850	0.00970	0.068		0.65	>2
Qayoum408	0.0058		0.078	0.061	0.000	0.00600	0.00680	0.049		0.65	>2
Qayoum409	0.0170		0.036	0.099	0.000	0.00400	0.00480	0.087		0.65	>2
Qayoum410	0.0081		0.021	0.060	0.000	0.00250	0.00290	0.055		0.65	>2
Altin 03	0.0103	1.650		0.194	0.000	0.00650		0.060	0.0100	0.62	2
Altin 04	0.0119	1.920		0.206	0.000	0.00650		0.061	0.0100	0.62	2
Altin 05	0.0214	1.700		0.227	0.000	0.00650		0.073	0.0200	0.61	2
Altin 06	0.0163	2.520		0.193	0.000	0.00650		0.104	0.0100	0.58	0.5
Altin 08	0.0087	2.760		0.178	0.000	0.00650		0.083	0.0050	0.62	2

serie	$q$ (m <sup>2</sup> /s)	$U_1$ (m/s)	$H$ (m)	$h_t$ (m)	$L$ (m)	$d_{50}$ (m)	$d_{90}$ (m)	$Y_{e,s}$ (m)	$a$ (m)	$\mu$ (-)	tijd (uren)
Altin 15	0.0068	1.090		0.210	0.000	0.00130		0.061	0.0100	0.63	6.5
Altin 17	0.0191	1.500		0.250	0.000	0.00130		0.155	0.0200	0.63	1.5
Altin 21	0.0164	1.350		0.200	0.000	0.00130		0.150	0.0200	0.61	5
Altin 22	0.0110	1.760		0.215	0.000	0.00130		0.140	0.0100	0.63	6.5
Altin 23	0.0071	1.900		0.205	0.000	0.00130		0.110	0.0060	0.63	4
Altin 24	0.0031	1.280		0.155	0.000	0.00130		0.055	0.0040	0.62	5
Altin 25	0.0067	0.550		0.194	0.000	0.00130		0.045	0.0200	0.60	>8
Altin 26	0.0118	0.950		0.249	0.000	0.00130		0.100	0.0200	0.63	11
Raj81 31		1.309		0.330	0.000	0.00238		0.200	0.0498	0.97	21
Raj81 32		1.800		0.330	0.000	0.00238		0.081	0.0071	0.97	48
Raj81 33		1.949		0.330	0.000	0.00238		0.095	0.0071	0.97	25
Raj81 34		2.217		0.330	0.000	0.00238		0.106	0.0071	0.97	66
Raj81 35		1.342		0.330	0.000	0.00238		0.077	0.0132	0.97	23
Raj81 36		1.736		0.330	0.000	0.00238		0.077	0.0071	0.97	23
Raj81 37		1.793		0.330	0.000	0.00120		0.103	0.0071	0.97	64
Raj81 38		0.921		0.330	0.000	0.00120		0.036	0.0071	0.97	8
Raj81 39		1.949		0.330	0.000	0.00120		0.111	0.0071	0.97	16
Raj81 310		1.797		0.330	0.000	0.00120		0.104	0.0071	0.97	25
Raj81 311		1.223		0.330	0.000	0.00120		0.069	0.0071	0.97	22
Raj81 312		0.866		0.330	0.000	0.00238		0.083	0.0498	0.97	17.5
Raj81 313		1.110		0.330	0.000	0.00238		0.061	0.0132	0.97	65
Raj81 314		1.345		0.330	0.000	0.00238		0.073	0.0132	0.97	40
Raj83 11		1.660		0.040	0.000	0.00238		0.137	0.0381	0.97	6
Raj83 12		2.320		0.020	0.000	0.00238		0.153	0.0127	0.97	41
Raj83 13		0.980		0.040	0.000	0.00238		0.101	0.0333	0.97	41
Raj83 14		1.710		0.040	0.000	0.00238		0.191	0.0333	0.97	41
Raj83 21		1.750		0.020	0.000	0.00100		0.165	0.0127	0.97	41
Raj83 22		1.060		0.020	0.000	0.00100		0.089	0.0127	0.97	41
Raj83 23		0.550		0.020	0.000	0.00100		0.027	0.0127	0.97	41
Raj83 24		0.950		0.020	0.000	0.00100		0.075	0.0127	0.97	41
Raj83 25		0.760		0.020	0.000	0.00100		0.051	0.0127	0.97	41
Raj83 26		1.270		0.020	0.000	0.00100		0.093	0.0127	0.97	41
Raj83 27		2.330		0.010	0.000	0.00100		0.101	0.0064	0.97	41
Raj83 28		1.960		0.010	0.000	0.00100		0.099	0.0064	0.97	41
Hassan 31		1.166		0.308	0.565	0.00165		0.038	0.0104	0.97	>3
Hassan 32		1.659		0.416	0.565	0.00165		0.038	0.0104	0.97	>3
Hassan 33		2.306		0.326	0.565	0.00165		0.084	0.0104	0.97	>3
Hassan 34		3.193		0.294	0.565	0.00165		0.084	0.0104	0.97	>3
Hassan 35		1.677		0.305	0.565	0.00165		0.050	0.0104	0.97	>3
Hassan 36		2.313		0.316	0.565	0.00165		0.050	0.0104	0.97	>3
Hassan 37		3.213		0.307	0.565	0.00165		0.050	0.0104	0.97	>3
Hassan 38		2.672		0.310	0.565	0.00165		0.050	0.0059	0.97	>3
Hassan 39		1.219		0.304	0.565	0.00165		0.050	0.0153	0.97	>3
Hassan 40		2.279		0.309	0.400	0.00165		0.050	0.0059	0.97	>3
Hassan 41		1.679		0.304	0.400	0.00165		0.050	0.0104	0.97	>3
Hassan 42		1.672		0.305	0.200	0.00165		0.050	0.0104	0.97	>3
Hassan 43		2.277		0.309	0.200	0.00165		0.050	0.0059	0.97	>3
Hassan 44		1.307		0.304	0.200	0.00165		0.050	0.0059	0.97	>3
Hassan 45		1.310		0.235	0.200	0.00165		0.050	0.0059	0.97	>3
Hassan 46		1.619		0.283	0.300	0.00165		0.050	0.0140	0.97	>3
Hassan 47		1.624		0.283	0.400	0.00165		0.050	0.0140	0.97	>3
Hassan 48		1.302		0.278	0.565	0.00165		0.050	0.0140	0.97	>3
Hassan 60		1.172		0.310	0.565	0.00165		0.027	0.0104	0.97	>3
Hassan 61		2.290		0.309	0.565	0.00165		0.027	0.0059	0.97	>3
Hassan 62		1.172		0.309	0.200	0.00165		0.027	0.0104	0.97	>3
Hassan 63		2.287		0.309	0.200	0.00165		0.027	0.0059	0.97	>3
Hassan 64		1.545		0.315	0.300	0.00165		0.027	0.0153	0.97	>3
Hassan 65		1.538		0.304	0.565	0.00165		0.027	0.0153	0.97	>3
Hassan 77		1.170		0.308	0.565	0.00085		0.073	0.0104	0.97	>3
Hassan 78		2.277		0.308	0.200	0.00085		0.073	0.0059	0.97	>3
Chatter01	0.0159	1.280		0.286	0.660	0.00076	0.00093	0.045	0.0200	0.62	0.83
Chatter02	0.0204	1.560		0.291	0.660	0.00076	0.00093	0.055	0.0200	0.65	0.50
Chatter03	0.0259	1.840		0.297	0.660	0.00076	0.00093	0.064	0.0200	0.70	0.22
Chatter04	0.0159	0.875		0.286	0.660	0.00076	0.00093	0.038	0.0300	0.61	2.50
Chatter05	0.0210	1.138		0.287	0.660	0.00076	0.00093	0.049	0.0300	0.62	1.33

serie	$q$ (m <sup>3</sup> /s)	$U_1$ (m/s)	$H$ (m)	$h_t$ (m)	$L$ (m)	$d_{50}$ (m)	$d_{90}$ (m)	$y_{n,e}$ (m)	$a$ (m)	$\mu$ (-)	tijd (uren)
Chatter06	0.0313	1.639		0.304	0.660	0.00076	0.00093	0.070	0.0300	0.64	0.25
Chatter07	0.0342	2.016		0.298	0.660	0.00076	0.00093	0.086	0.0300	0.57	0.17
Chatter08	0.0160	0.875		0.291	0.660	0.00076	0.00093	0.043	0.0400	0.46	2.00
Chatter09	0.0197	1.000		0.292	0.660	0.00076	0.00093	0.050	0.0400	0.49	1.75
Chatter10	0.0232	1.146		0.295	0.660	0.00076	0.00093	0.057	0.0400	0.51	1.17
Chatter11	0.0216	0.715		0.292	0.660	0.00076	0.00093	0.040	0.0500	0.60	3.00
Chatter12	0.0244	0.840		0.295	0.660	0.00076	0.00093	0.047	0.0500	0.58	2.17
Chatter13	0.0270	0.960		0.297	0.660	0.00076	0.00093	0.055	0.0500	0.56	1.50
Chatter14	0.0220	1.495		0.291	0.660	0.00430	0.00615	0.052	0.0200	0.74	2.25
Chatter15	0.0246	1.670		0.295	0.660	0.00430	0.00615	0.058	0.0200	0.74	1.58
Chatter16	0.0275	1.850		0.298	0.660	0.00430	0.00615	0.065	0.0200	0.74	1.08
Chatter17	0.0425	2.420		0.310	0.660	0.00430	0.00615	0.085	0.0200	0.88	0.33
Chatter18	0.0264	1.321		0.299	0.660	0.00430	0.00615	0.057	0.0300	0.67	2.58
Chatter19	0.0306	1.461		0.303	0.660	0.00430	0.00615	0.063	0.0300	0.70	2.25
Chatter20	0.0330	1.640		0.305	0.660	0.00430	0.00615	0.070	0.0300	0.67	1.67
Chatter21	0.0378	1.782		0.308	0.660	0.00430	0.00615	0.076	0.0300	0.71	1.33
Chatter22	0.0283	1.075		0.286	0.660	0.00430	0.00615	0.053	0.0400	0.66	4.00
Chatter23	0.0343	1.171		0.301	0.660	0.00430	0.00615	0.058	0.0400	0.73	3.67
Chatter24	0.0333	1.302		0.305	0.660	0.00430	0.00615	0.064	0.0400	0.64	3.33
Chatter25	0.0419	1.470		0.307	0.660	0.00430	0.00615	0.073	0.0400	0.71	2.67
Chatter26	0.0312	0.940		0.302	0.660	0.00430	0.00615	0.052	0.0500	0.66	4.67
Chatter27	0.0350	1.040		0.306	0.660	0.00430	0.00615	0.058	0.0500	0.67	3.83
Chatter28	0.0410	1.180		0.310	0.660	0.00430	0.00615	0.065	0.0500	0.69	3.25

Experimentele data '3D-horizontaal'

Serie	$\theta$ (rad)	$D$ (m)	$U_0$ (m/s)	$h_t$ (m)	$d_{50}$ (m)	$d_{90}$ (m)	$y_{m,e}$ (m)	tijd (uur)
ClarkeH54	0.00	0.0048	6.50	0.279	0.00082	0.00095	0.117	
ClarkeH45	0.00	0.0048	5.59	0.279	0.00082	0.00095	0.091	41.8
ClarkeH42	0.00	0.0048	4.29	0.279	0.00082	0.00095	0.080	91.3
ClarkeH49	0.00	0.0048	2.55	0.279	0.00082	0.00095	0.058	48.3
ClarkeH39	0.00	0.0048	9.54	0.279	0.00082	0.00095	0.145	46.2
ClarkeH48	0.00	0.0048	8.18	0.279	0.00082	0.00095	0.134	134.2
ClarkeH53	0.00	0.0024	6.51	0.279	0.00082	0.00095	0.063	65.5
ClarkeH55	0.00	0.0024	6.70	0.159	0.00082	0.00095	0.065	46.7
ClarkeH59	0.00	0.0024	8.23	0.159	0.00082	0.00095	0.069	26.7
ClarkeH60	0.00	0.0024	2.94	0.159	0.00082	0.00095	0.036	77.5
ClarkeH54	0.00	0.0024	9.66	0.279	0.00082	0.00095	0.085	93.0
ClarkeH56	0.00	0.0024	9.75	0.159	0.00082	0.00095	0.084	70.3
ClarkeH57	0.00	0.0024	4.52	0.159	0.00082	0.00095	0.043	46.7
ClarkeH58	0.00	0.0024	10.88	0.159	0.00082	0.00095	0.092	94.3
ClarkeH61	0.00	0.0024	4.19	0.279	0.00082	0.00095	0.047	30.8
ClarkeH62	0.00	0.0024	2.54	0.279	0.00082	0.00095	0.036	68.3
ClarkeH63	0.00	0.0024	8.23	0.279	0.00082	0.00095	0.078	60.0
ClarkeH64	0.00	0.0024	12.02	0.279	0.00082	0.00095	0.105	120.0
ClarkeH68	0.00	0.0143	5.75	0.279	0.00082	0.00095	0.152	
ClarkeH69	0.00	0.0143	2.13	0.279	0.00082	0.00095	0.101	21.0
ClarkeH70	0.00	0.0143	3.09	0.279	0.00082	0.00095	0.114	4.0
ClarkeH71	0.00	0.0048	6.50	0.279	0.00202	0.00240	0.086	28.7
ClarkeH72	0.00	0.0048	3.02	0.279	0.00202	0.00240	0.114	73.3
ClarkeH73	0.00	0.0048	4.29	0.279	0.00202	0.00240	0.064	47.5
ClarkeH74	0.00	0.0048	2.55	0.279	0.00202	0.00240	0.044	28.3
ClarkeH75	0.00	0.0048	8.18	0.279	0.00202	0.00240	0.098	78.3
ClarkeH76	0.00	0.0024	12.02	0.279	0.00202	0.00240	0.065	92.8
Raj331CH1	0.00	0.0254	1.28	0.61	0.0014		0.081	>24
Raj332CH1	0.00	0.0254	1.57	0.61	0.0014		0.094	>24
Raj333CH1	0.00	0.0254	1.68	0.61	0.0014		0.098	>24
Raj334CH1	0.00	0.0254	1.81	0.61	0.0014		0.117	>24

Experimentele data '2D-schuin'

Serie	$\theta$ (rad)	$b_u$ (m)	$U_0$ (m/s)	$H_p$ (m)	$d_{50}$ (m)	$d_{90}$ (m)	$y_{m,e}$ (m)	tijd (uur)
Raj A4511	0.79	0.0025	2.530	0.030	0.00238		0.048	26.0
Raj A4512	0.79	0.0025	2.460	0.029	0.00238		0.044	24.9
Raj A4513	0.79	0.0025	1.580	0.029	0.00238		0.026	23.7
Raj A4514	0.79	0.0025	2.770	0.043	0.00238		0.055	24.0
Raj A4515	0.79	0.0025	2.040	0.041	0.00238		0.042	111.9
Raj A4516	0.79	0.0025	1.390	0.041	0.00238		0.031	24.0
Raj A4517	0.79	0.0025	1.840	0.040	0.00238		0.034	24.5
Raj A4521	0.79	0.0025	1.860	0.029	0.00120		0.042	66.5
Raj A4522	0.79	0.0025	2.310	0.029	0.00120		0.060	24.0
Raj A4523	0.79	0.0025	2.520	0.029	0.00120		0.069	24.0
Raj A4524	0.79	0.0025	1.620	0.042	0.00120		0.060	24.0
Raj A4525	0.79	0.0025	2.530	0.041	0.00120		0.069	24.8
Raj A4526	0.79	0.0025	1.620	0.041	0.00120		0.056	66.1
Raj A4527	0.79	0.0025	1.420	0.029	0.00120		0.044	24.0
Raj A6021	1.05	0.0025	2.090	0.017	0.00120		0.038	24.0



Serie	$\theta$ (rad)	$b_u$ (m)	$U_0$ (m/s)	$H_p$ (m)	$d_{50}$ (m)	$d_{90}$ (m)	$y_{m,e}$ (m)	tijd (uur)
Raj A6022	1.05	0.0025	2.080	0.016	0.00120		0.041	24.0
Raj A6023	1.05	0.0025	2.260	0.015	0.00120		0.043	24.0
Raj A6024	1.05	0.0025	1.760	0.015	0.00120		0.031	66.0
Raj A6025	1.05	0.0025	1.890	0.028	0.00120		0.038	24.0
Raj A6026	1.05	0.0025	2.450	0.029	0.00120		0.056	24.0
Raj A6027	1.05	0.0025	2.050	0.030	0.00120		0.041	24.0
Raj A6028	1.05	0.0025	1.120	0.030	0.00120		0.023	24.0
Raj A3021	0.52	0.0025	1.980	0.037	0.00120		0.083	24.0
Raj A3022	0.52	0.0025	1.430	0.037	0.00120		0.054	24.0
Raj A3023	0.52	0.0025	1.230	0.037	0.00120		0.044	41.0
Raj A3024	0.52	0.0025	2.160	0.049	0.00120		0.093	49.7
Raj A3025	0.52	0.0025	1.270	0.049	0.00120		0.045	69.5
Raj A3026	0.52	0.0025	1.630	0.049	0.00120		0.067	24.0
Raj A3027	0.52	0.0025	1.430	0.049	0.00120		0.056	24.0
Raj A1021	0.17	0.0025	1.270	0.043	0.00120		0.028	24.0
Raj A1022	0.17	0.0025	1.530	0.043	0.00120		0.035	24.0
Raj A1023	0.17	0.0025	2.240	0.043	0.00120		0.092	24.0
Raj A1024	0.17	0.0025	1.740	0.043	0.00120		0.048	25.0

Experimentele data '2D-verticaal'

Raj B 11	1.57	0.0025	1.79	0.076	0.00120		0.046	
Raj B 12	1.57	0.0025	1.32	0.076	0.00120		0.039	
Raj B 13	1.57	0.0025	1.92	0.076	0.00120		0.046	
Raj B 14	1.57	0.0025	1.39	0.064	0.00120		0.028	
Raj B 15	1.57	0.0025	2.14	0.064	0.00120		0.040	
Raj B 16	1.57	0.0025	1.87	0.038	0.00120		0.031	
Raj B 17	1.57	0.0025	2.57	0.013	0.00120		0.051	
Raj B 18	1.57	0.0025	1.78	0.013	0.00120		0.029	
Raj B 19	1.57	0.0025	0.94	0.076	0.00120		0.037	
Raj B110	1.57	0.0025	0.77	0.076	0.00120		0.024	
Raj B111	1.57	0.0025	2.78	0.076	0.00238		0.038	
Raj B112	1.57	0.0025	1.66	0.076	0.00238		0.030	
Raj B113	1.57	0.0025	1.86	0.076	0.00238		0.033	
Raj B114	1.57	0.0025	2.39	0.076	0.00238		0.038	
Raj B115	1.57	0.0025	2.70	0.127	0.00238		0.061	
Raj B116	1.57	0.0025	2.44	0.127	0.00238		0.048	
Raj B117	1.57	0.0025	1.22	0.038	0.00238		0.018	
Akashi 01	1.57	0.0200	1.30	0.386	0.00069		0.180	2
Akashi 02	1.57	0.0200	1.30	0.187	0.00069		0.180	2
Akashi 03	1.57	0.0200	1.30	0.135	0.00069		0.200	2
Akashi 04	1.57	0.0200	1.30	0.084	0.00069		0.250	2
Akashi 05	1.57	0.0200	1.48	0.110	0.00096		0.160	2
Akashi 06	1.57	0.0200	1.49	0.154	0.00096		0.070	2-4
Akashi 07	1.57	0.0200	0.70	0.096	0.00096		0.060	2-4
Akashi 08	1.57	0.0200	0.70	0.080	0.00096		0.120	2-4
Akashi 09	1.57	0.0200	1.28	0.085	0.00096		0.200	2-4
Akashi 10	1.57	0.0200	1.32	0.188	0.00096		0.140	2-4
Akashi 11	1.57	0.0200	0.72	0.075	0.00096		0.140	2-4
Akashi 12	1.57	0.0200	0.70	0.124	0.00096		0.070	2-4
Akashi 13	1.57	0.0200	1.30	0.240	0.00069		0.120	2-4
Akashi 14	1.57	0.0200	1.32	0.136	0.00069		0.240	2-4
Akashi 15	1.57	0.0200	0.76	0.127	0.00069		0.080	2-4
Akashi 16	1.57	0.0200	0.98	0.224	0.00069		0.160	2-4

Experimentele data '3D-verticaal'

Serie	$\theta$ (rad)	D (m)	$U_0$ (m/s)	$H_p$ (m)	$d_{50}$ (m)	$d_{90}$ (m)	$y_{m,e}$ (m)	tijd (uur)
Clarke 24	1.57	0.0478	2.46	0.127	0.00082	0.00095	0.028	3.0
Clarke 22	1.57	0.0478	1.68	0.127	0.00082	0.00095	0.022	2.0
Clarke 23	1.57	0.0478	2.01	0.127	0.00082	0.00095	0.026	3.5
Clarke 21	1.57	0.0478	1.36	0.127	0.00082	0.00095	0.020	4.0
Clarke 28	1.57	0.0238	0.99	0.127	0.00082	0.00095	0.027	3.5
Clarke 26	1.57	0.0478	0.27	0.127	0.00082	0.00095	0.020	3.0
Clarke 27	1.57	0.0238	0.55	0.127	0.00082	0.00095	0.020	3.0
Clarke 25	1.57	0.0478	2.69	0.127	0.00082	0.00095	0.035	4.7
Clarke 32	1.57	0.0238	3.88	0.127	0.00082	0.00095	0.025	3.0
Clarke 30	1.57	0.0238	1.63	0.127	0.00082	0.00095	0.019	3.0
Clarke 31	1.57	0.0238	2.74	0.127	0.00082	0.00095	0.022	4.3
Clarke 29	1.57	0.0238	1.36	0.127	0.00082	0.00095	0.020	3.0
Clarke 41	1.57	0.0238	0.81	0.127	0.00202	0.00240	0.021	1.7
Clarke 40	1.57	0.0238	0.66	0.127	0.00202	0.00240	0.015	4.0
Clarke 58	1.57	0.0238	0.81	0.127	0.00127	0.00150	0.021	1.5
Westrich1	1.57	0.0400	1.05	0.800	0.00090	0.00120	0.100	15.0
Westrich2	1.57	0.0400	1.52	1.080	0.00090	0.00120	0.151	21.0
Westrich3	1.57	0.0200	2.31	0.760	0.00090	0.00120	0.114	15.0
Westrich4	1.57	0.0400	1.49	0.920	0.00090	0.00120	0.156	18.0
Westrich5	1.57	0.0400	1.56	0.800	0.00090	0.00120	0.168	15.0
Westrich6	1.57	0.0400	1.95	1.000	0.00090	0.00120	0.240	19.0
Westrich7	1.57	0.0400	1.57	0.540	0.00090	0.00120	0.167	10.0
Westrich8	1.57	0.0400	1.42	0.380	0.00090	0.00120	0.129	7.3
Westrich9	1.57	0.0400	2.58	0.580	0.00090	0.00120	0.232	11.0
Westric10	1.57	0.0400	3.07	0.580	0.00090	0.00120	0.261	11.0
Westric11	1.57	0.0400	3.49	0.580	0.00090	0.00120	0.278	11.0
Westric12	1.57	0.0400	4.00	0.580	0.00090	0.00120	0.197	11.0
Westric13	1.57	0.0400	4.15	0.580	0.00090	0.00120	0.302	11.0
Westric14	1.57	0.0400	4.65	0.580	0.00090	0.00120	0.464	11.0
Westric15	1.57	0.0400	8.32	0.580	0.00090	0.00120	0.754	11.0
Westric16	1.57	0.0400	1.59	0.160	0.00090	0.00120	0.256	3.1
Westric17	1.57	0.0400	2.91	0.160	0.00090	0.00120	0.320	3.1
Westric18	1.57	0.0400	1.64	0.064	0.00090	0.00120	0.256	1.2
Raj CV11	1.57	0.0098	3.11	0.172	0.00238		0.058	>24
Raj CV12	1.57	0.0098	3.48	0.279	0.00238		0.078	>24
Raj CV13	1.57	0.0098	3.23	0.248	0.00238		0.070	>24
Raj CV14	1.57	0.0098	2.99	0.175	0.00238		0.059	>24
Raj CV15	1.57	0.0098	4.54	0.226	0.00238		0.088	>24
Raj CV16	1.57	0.0098	4.38	0.149	0.00238		0.050	>24
Raj CV17	1.57	0.0098	4.60	0.251	0.00120		0.109	>24
Raj CV18	1.57	0.0098	3.36	0.276	0.00120		0.086	>24
Raj CV19	1.57	0.0098	3.00	0.200	0.00120		0.073	>24