

Aanbeveling “Overloop van coupures en sluisdeuren”

Eenvoudige methode

Voor coupures met daarachter bestrating en waarbij het water gemakkelijk afgevoerd wordt, is in de meeste situaties een veilige waarde van het toelaatbare overloopdebiet $0.03 \text{ m}^2/\text{s}$. Voor sluisdeuren met daarachter een bodembescherming en wel benedenwater is een maximum overloopdebiet van $1 \text{ m}^2/\text{s}$ in de meeste situaties veilig genoeg.

Gedetailleerde methode

In plaats van bovengenoemde waarden te hanteren is het beter en ook veiliger gebruik te maken van de gedetailleerde methode voor zowel de coupure als de sluisdeur. Voor deze gedetailleerde methode worden eerste 2 formules gepresenteerd (Zie ook de “Toelichting overloop van coupures en sluisdeuren”).

Het debiet over een scherpe, volkomen overlaat wordt berekend volgens:

$$q = 1.705 h_o^{3/2} \quad (1)$$

waarin: q	= debiet per m breedte	$[\text{m}^2/\text{s}]$
h_o	= overstorthoogte boven de kruin	$[\text{m}]$

(NB. Is de coupure niet als een scherpe, volkomen overlaat te beschouwen dan moet de hierbij behorende formule gebruikt worden).

De erosiediepte y_s van de benedenstroomse bestrating, bodembescherming of zandlaag wordt berekend volgens:

$$y_s = 0.4 q^{0.6} H^{0.4} d_{50}^{-0.3} - 0.5 h \quad (2)$$

waarin: y_s	= erosie diepte als evenwichtswaarde	$[\text{m}]$
y_s	> of = 0	
q	= debiet per m breedte	$[\text{m}^2/\text{s}]$
H	= hoogteverschil boven- en benedenstroomse waterstand	$[\text{m}]$
	= $z + h_o + h$	
z	= hoogte coupure of sluisdeur boven benedenstr. bodem	$[\text{m}]$
h	= waterdiepte benedenstrooms	$[\text{m}]$
h_o	= overstorthoogte boven de kruin	$[\text{m}]$
d_{50}	= diameter korrels of stenen	$[\text{m}]$

De gedetailleerde methode is als volgt:

- Eerst wordt met formule (1) het overloopdebiet berekend bij een gegeven overstorthoogte. Vervolgens wordt met formule (2) de erosie van de stenen (bestrating of een laag stortsteen) berekend en daarna de kuildiepte van het onderliggende zand.

- Blijft de erosie van de stenen beperkt tot een deel van de laagdikte (bijv. de helft) dan is dit de grens van wel of niet bezwijken van de toplaag. Is deze erosie groter dan kan er vanuit gegaan worden dat ook de berekende kuildiepte in het zand ontstaat.
- Wanneer de berekende erosie van de stenen niet is toegestaan dan wordt het overloopdebiet verminderd door de overstorthoogte te verkleinen tot de toelaatbare erosie van de stenen bereikt wordt.
- Wanneer het bezwijken van laag stenen wel is toegestaan maar de berekende kuildiepte van het zand te groot is, dan wordt eveneens het overloopdebiet verminderd door de overstorthoogte te verkleinen tot de kuildiepte toelaatbaar is.

Voor een coupure met een ander soort bestrating (asfalt, ed.) of een kleilaag als bedekking geeft de methode geen oplossing.

Voorbeeld

Uitgegaan wordt van een coupure van $z = 1$ m hoogte, een benedenstroomse waterdiepte van $h = 0.10$ m en een laag straatstenen met $d_{50} = 0.1$ m. Bij een overstorthoogte $h_0 = 0.082$ m is volgens formule (1) het overloopdebiet $q = 0.04$ m²/s (of 40 l/s/m); het waterstandsverschil is $H = 0.982$ m. Dit geeft volgens formule (2) een erosie van de straatstenen van $y_s = 0.065$ m. Onder het wegdek ligt zand met $d_{50} = 0.0003$ m. Bezwijkt de laag straatstenen dan ontstaat vervolgens in het zand volgens formule (2) een kuildiepte van $y_s = 0.60$ m. Dit alles voor een overloopdebiet van $q = 0.04$ m²/s.

Wordt de kans te groot geacht dat bij dit overloopdebiet de stenen toch uitspoelen (erosie 0.065 m t.o.v. een laagdikte van 0.10 m) en is de kuildiepte van het zand ook te groot (0.60 m) vanwege mogelijke instabiliteit constructie dan moet het overloopdebiet verminderd worden.

Uitgegaan wordt weer van de coupure van $z = 1$ m hoogte, de benedenstroomse waterdiepte van $h = 0.10$ m en de laag straatstenen met $d_{50} = 0.1$ m. Bij een overstorthoogte $h_0 = 0.052$ m is volgens formule (1) het overloopdebiet $q = 0.02$ m²/s en het waterstandsverschil $H = 0.952$ m. Dit geeft volgens formule (2) een erosie van de stenen $y_s = 0.025$ m. Hierbij kan gesteld worden dat de laag straatstenen in tact blijft. Mocht het wegdek onverhoopt toch wegspoelen, dan komt het zand met $d_{50} = 0.0003$ m weer bloot. In het zand ontstaat volgens formule (2) kuilen met een diepte van $y_s = 0.38$ m. Dit alles voor een overloopdebiet van $q = 0.02$ m²/s.

Toelichting op “Overloop van coupures en sluisdeuren”

1 Inleiding

Bij dijken wordt volgens de TAW-leidraden een overloopdebiet toegelaten van $0.010 \text{ m}^2/\text{s}$ (of 10 l/s/m) zonder dat de hoogwaterkering wat dat betreft gevaar loopt.

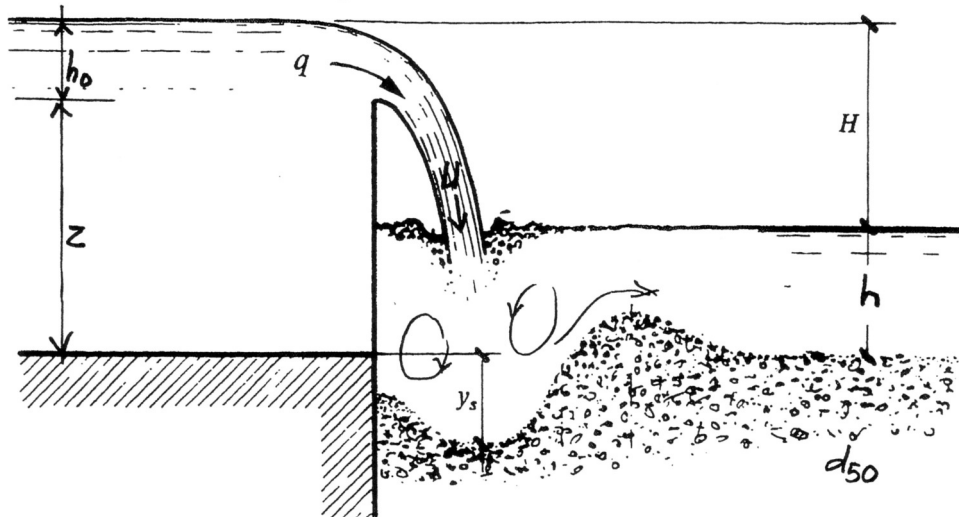
De vraagstelling van VNK (Veiligheid Nederland in Kaart) is een formulering te geven wat het toelaatbaar overloopdebiet is over coupures en sluisdeuren zonder dat dit de constructie zelf in gevaar brengt wat betreft stabiliteit. Dit om bestaande kunstwerken te beoordelen op hun veiligheid tegen overlopen en hiermede op overstromingskansen van het achterliggende gebied. Bij VNK wordt tot nu toe voor coupures en aansluitende grondconstructies $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ en voor sluizen in waterkeringen $1 \text{ m}^2/\text{s}$ als maximum overloopdebiet aangehouden.

Deze notitie bestaat uit 2 delen. Vanuit de literatuur wordt nagegaan welke erosie achter overstortende stralen ontstaat (hoofdstuk 2). Vervolgens wordt in hoofdstuk 3 afgeleid wat de toelaatbare overloopdebieten zijn van een aantal voorbeelden van coupures in dijken en sluizen in hoogwaterkeringen zoals deze in Nederland gebruikt worden. In hoofdstuk 4 wordt de conclusie vermeld.

Hieruit kan het uiteindelijke doel van deze notitie afgeleid worden, te weten een methode te ontwikkelen wat de toelaatbare overloopdebieten van coupures en sluisdeuren zijn.

Opgemerkt wordt dat niet gekeken wordt naar bijzondere of afwijkende situaties en of het achterliggende gebied het overlopende water wel kan bergen.

2 Theorieën erosie van een overstortende straal



We beschouwen een straal die over een hoge deur, schuif of klep heen stort en terechtkomt in het achterland of benedenwater. De straal heeft bij het treffen van het wateroppervlak een hoeveelheid impuls die evenredig is met het product van debiet en snelheid van de straal. De straal dringt door in het benedenwater en komt als het water ondiep is met verminderde snelheid (en impuls) onder een hoek aan de bodem terecht. De bodemdeeltjes of stenen zijn veelal niet bestand tegen deze impuls en zullen eroderen. Voor en achter de straal zullen neren met een horizontale as ontstaan waar het geërodeerde materiaal in circuleert. Een deel van het opgewerkte bodemmateriaal zal dan in benedenstroomse richting getransporteerd worden en op zeker afstand weer neergeslagen worden. Wanneer de straal direct op de bodem terechtkomt zonder dat sprake is van een dikke waterlaag omdat het water direct kan wegstromen (zoals bij coupures), zullen de gronddeeltjes of stenen nog eerder eroderen waarbij ook een erosiekuil ontstaat.

De erosie van de bodem achter een overstortende straal is afhankelijk van het debiet q in de straal per m breedte, de snelheid U van de straal bij het raken van het wateroppervlak (of bodem bij afwezigheid van benedenwater), de waterdiepte aan de benedenstroomse zijde h en de karakteristieke diameter van de bodemdeeltjes d :

- Het debiet per m breedte q van een overstortende straal over een scherpe rand is bij een volkomen overlaat)* evenredig met $1.7 h_0^{3/2}$ met h_0 als overstorthoogte boven de kruin (hoogteverschil tussen energiehogte bovenstrooms en bovenkant deur). De erosie is ongeveer recht evenredig met het debiet.
- De snelheid van de straal aan het wateroppervlak U is evenredig met $\sqrt{2gH}$ met H als totaal verval (hoogteverschil tussen boven- en benedenstroomse energiehogten of waterstanden bij lage stroomsnelheden). De erosie is ongeveer evenredig met de wortel uit het totale verval.
- De waterdiepte waar de straal in terechtkomt zorgt voor afname van de snelheid in de straal voordat deze de bodem bereikt. Bovendien zorgt de waterdiepte ervoor dat het opgewerkte sediment een verticale beweging kan maken zonder direct getransporteerd te worden. De erosie wordt ongeveer verminderd met de grootte van de waterdiepte.

- De erosie van de bodem hangt met name af van de kritische snelheid van de bodemdeeltjes die op zijn beurt wordt bepaald door $\sqrt{(\Delta g d)}$ met Δ als relatieve dichtheid en d als karakteristieke diameter van de korrels of stenen (veelal d_{50} , diameter die door 50% van de deeltjes wordt overschreden of ook wel d_{90}). De erosie is omgekeerd evenredig met de wortel uit de diameter.

)* Voor een onvolkomen overlaat wanneer $H < 1/3 h_0$ heeft de benedenwaterstand wel invloed op het debiet en moet een andere formulering gebruikt worden.

Dit leidt tot een erosieformulering in zijn eenvoudigste vorm:

$$(y_s + h) \text{ evenredig met } q H^{0.5} d_{50}^{-0.5} \quad (1)$$

waarin: y_s	= erosie diepte	[m]
h	= waterdiepte benedenstrooms	[m]
q	= debiet per m breedte	[m ² /s]
H	= hoogteverschil boven- en benedenstroomse waterstand	[m]
d_{50}	= diameter korrels of stenen	[m]

Uit de vele experimenten die naar de verschijnselen uitgevoerd zijn, blijkt dat er ook andere mechanismen een rol spelen zoals de energie dissipatie van de stroming in de erosiekuil. Hierdoor zal de formulering volgens (1) niet direct voldoen. De erosieformule wordt daarom in algemenere vorm geschreven als:

$$y_s = \alpha q^{i1} H^{i2} d^{i3} - \beta h \quad (2)$$

waarin: α	= coëfficiënt	[m]
$i1$	= macht van q	[-]
$i2$	= macht van H	[-]
$i3$	= macht van d	[-]
β	= coëfficiënt	[m]

In de literatuur worden vele experimenten genoemd en daaruit afgeleide formules. Breusers en Rausdkivi (lit. [1], Scouring, IAHR-manual, 1991, Balkema) en Hoffmans/Verheij (lit. [2], Scour Manual, 1997, Balkema) geven een overzicht van een aantal formules:

Schoklitsch (1932): $y_s = 4.75 q^{0.57} H^{0.2} d^{-0.32} - h$ (3)
 Waarin: d in mm
 q in m²/s
 y_s , H en h in m

Veronese (1938): $y_s = 3.68 q^{0.54} H^{0.225} d^{-0.42} - h$ (4)
 Waarin: d in mm
 q in m²/s
 y_s , H en h in m

$$y_s = 1.9 q^{0.54} H^{0.225} d^{-0.42} - h$$

(voor $d < 5$ mm)

Mason (1984): $y_s = 3.27 q^{0.6} H^{0.05} h^{0.15} g^{-0.3} d^{-0.1} - h$ (5)
 Waarin: d in m
 q in m²/s
 y_s , H en h in m

Bormann (1991): $y_s = K_b q^{0.6} U \sin \theta d_{90}^{-0.4} / (2\Delta g)^{0.8} - h$ (6)
 Waarin: $K_b = C_d^2 (\sin \phi / \sin (\phi + \theta))^{0.8}$
 $C_d = 1.8$
 $\phi = 25^\circ$
 U = snelheid bij wateroppervlak in m/s
 q in m²/s
 y_s en h in m

Δ als relatieve dichtheid

θ als hoek straal met oppervlak (tussen 60 en 90°)

Fallbusch (1994): $y_s = c_{2v} q^{0.5} U^{0.5} \sqrt{(\sin \theta / g) - h}$ (7)

Waarin: $c_{2v} = 20 / \lambda$

$\lambda = 1.5$ bij $d_{90} = 0.1$ mm

$\lambda = 3$ bij $d_{90} = 1$ mm

$\lambda = 8$ bij $d_{90} > 10$ mm

Bovenstaande formules zijn meestal gebaseerd op een reeks van experimenten met een bepaalde geometrie, debiet en bodemsamenstelling. Voor een andere geometrie, debiet en bodemsamenstelling kunnen de formules veelal niet gebruikt worden.

D'Agostino en Ferro hebben in de Journal of Hydraulic Engineering (lit. [3], January 2004) een uitgebreide reeks, nieuwe experimenten gepresenteerd. Uit hun onderzoek bleek dat de waterdiepte benedenstrooms h een minder grote invloed had dan uit de andere experimenten en vorige formules bleek.

In hun artikel zijn verder de uitkomsten van een zestal andere reeksen van experimenten van andere onderzoekers gepresenteerd. Daarbij is een ingewikkelde formule bedacht (hier niet gepresenteerd) die voor de in totaal 7 reeksen experimenten redelijk voldoet en waarbij de parameters dimensieloos gemaakt zijn. Helaas is daarbij de fysica zoals verwoord in formules (1) en (2) en die andere onderzoekers tot nu toe ook in bepaalde vorm hanteerden (formules (3) t/m (7)), niet terug te vinden.

Daarom is hier gezocht naar een nieuwe formulering volgens formule (2) die het beste de fysica beschrijft en past op de resultaten van de 7 reeksen experimenten. Dit heeft geresulteerd in de volgende formule, zie ook tabel 1:

$$y_s = 0.8 q^{0.6} H^{0.4} d_{50}^{-0.3} g^{-0.3} - 0.5 h \quad (8a)$$

of

$$y_s = 0.4 q^{0.6} H^{0.4} d_{50}^{-0.3} - 0.5 h \quad (8b)$$

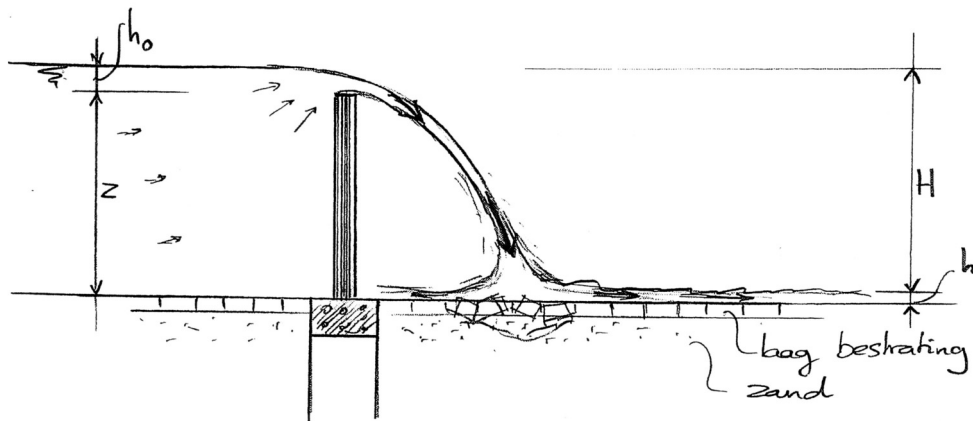
waarin: y_s	= erosie diepte als evenwichtswaarde	[m]
y_s	> of = 0	
q	= debiet per m breedte	[m ² /s]
H	= hoogteverschil boven- en benedenstroomse waterstand	[m]
d_{50}	= diameter korrels of stenen	[m]
h	= waterdiepte benedenstrooms	[m]

Deze formule heeft als voordeel dat deze eenvoudig is, qua dimensies klopt en zelden aanleiding geeft tot onderschatting van de erosiediepte. Alleen zeer grote overstorthoogten boven de kruin kan in onderschatting resulteren. Deze formule (8) wordt daarom toegepast in het verdere onderzoek naar de toelaatbare debieten over coupures en sluisdeuren.

3 Berekening toelaatbaar overloopdebiet

Voor de berekening van het toelaatbaar overloopdebiet maken we gebruik van formule (8). In tabel 2 zijn situaties doorgerekend voor een overstortende coupure met een wegdek van straatstenen en een overstortende sluisdeur met bodembescherming benedenstrooms.

Coupure



Er zijn 2 coupures uitgerekend met een hoogte van $z = 1$ en 2 m. Als bodembescherming is gedacht aan een wegdek met losse straatstenen met $d_{50} = 0.10$ m. Het onderling verband van de stenen wordt als reserve op de stabiliteit aangehouden. Als ondergrond van de stenen is gedacht aan zand (geen cohesie), te weten $d_{50} = 0.001$ m (grof zand) en $d_{50} = 0.0003$ m (fijn zand). Benedenstrooms van de coupure wordt een waterdiepte aangehouden van $h = 0.10$ of 0.20 m. Gerekend is met diverse overloopdebieten q . Gesteld wordt dat het wegdek bezwijkt als de erosie van de straatstenen $y_s = 0.06$ m of meer bedraagt. Daarna volgt dan de ontgroning van het onderliggende zand waarbij ook grenzen aan gesteld worden.

Voor de coupure van 1 m hoog en een benedenstroomse waterdiepte van 0.10 m blijkt de laag straatstenen in tact te blijven bij een debiet van 40 l/s/m (overstorthoogte 0.082 m, valhoogte straal ca. 1 m). Mocht het wegdek bij dit debiet toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 0.60 m.

Is voor dezelfde coupure van 1 m hoog de benedenstroomse waterdiepte 0.20 m dan blijkt de laag straatstenen in tact te blijven tot een debiet van 75 l/s/m (overstorthoogte 0.125 m, valhoogte straal ca. 0.90 m). Mocht het wegdek bij dit debiet toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 0.85 m.

Voor de coupure van 2 m hoog en benedenstroomse waterdiepte van 0.10 m blijkt de laag straatstenen in tact te blijven bij een debiet van 25 l/s/m (overstorthoogte 0.06 m, valhoogte straal ca. 2 m). Mochten de stenen bij dit debiet toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 0.60 m.

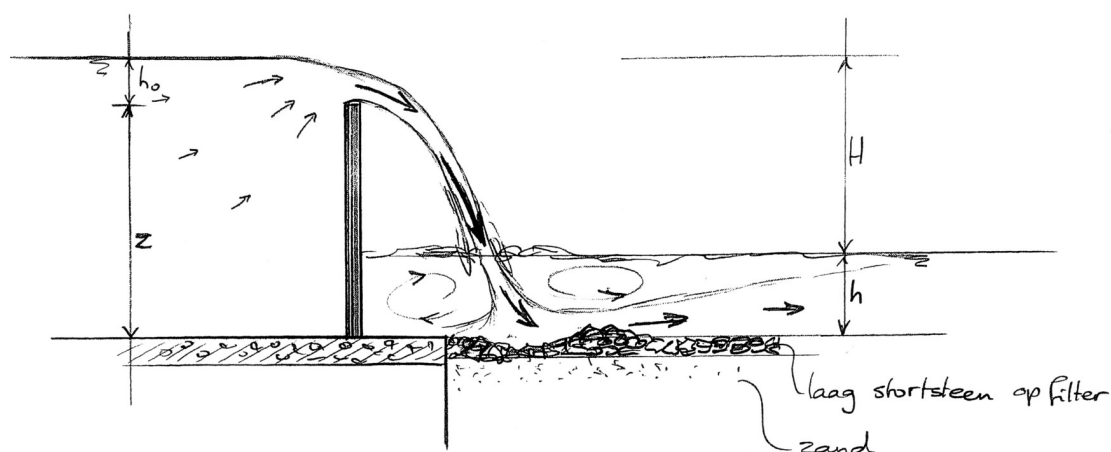
Is voor dezelfde coupure van 2 m de benedenstroomse waterdiepte 0.20 m dan blijkt de laag straatstenen in tact te blijven bij een debiet van 45 l/s/m (overstorthoogte 0.089 m, valhoogte straal ca. 1.90 m). Mochten de stenen bij dit debiet toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 0.85 m.

Zijn de berekende kuildieptes van het zand te groot voor de constructie (instabiliteitsproblemen) dan moeten het overloopdebiet verminderd worden zodat of de kuildiepte van de zandlaag aanvaardbaar is of dat nauwelijks erosie van de stenen optreedt.

Is benedenstrooms van de coupure alleen los zand aanwezig en geen bestrating dan kunnen de uiteindelijke kuildieptes bepaald worden met formule (8) of direct uit tabel 2 gehaald worden.

Voor klei of kleig zand aan de benedenstroomse zijde zijn geen gegevens voorhanden maar zal aanleiding geven tot een kleinere ontgrondingsdiepte dan zand.

Sluisdeur



Er zijn 2 sluisdeuren uitgerekend met een hoogte z van 4 resp. 6 m. Als benedenstroomse bodembescherming is aangehouden stortsteen met een diameter van $d_{50} = 0.10$ m (ongeveer sortering 50/150 mm) en $d_{50} = 0.15$ m (ongeveer sortering 80/200 mm). Aangenomen wordt dat de laagdikte van de toplaag van de stortsteen tenminste 0.25 m is. Gesteld wordt dat de laag stortsteen bezwijkt als de erosie y_s meer dan 0.15 m bedraagt. Als de toplaag verdwijnt wordt aangenomen dat de rest van de filterlagen ook direct bezwijken. Daaronder bevindt zich grof zand (aangenomen als $d_{50} = 0.001$ m) dat dan verder ontgrondt. Ook aan de maximum kuildiepte kunnen grenzen gesteld worden. Benedenstrooms van de sluisdeur is een waterdiepte h aangehouden van 2 of 3 m. Gerekend is met diverse overstortdebieten q per m breedte over een scherpe rand (bovenkant beplating).

Opgemerkt wordt dat geen rekening gehouden wordt met het ongunstige effect bij puntdeuren waar de stroming zich vooral in de sluisas concentreert en niet gelijkmatig over de breedte verdeeld is. Dit wordt veroorzaakt door het feit dat de overstortende straal loodrecht op de deur staat. Het effect kan in rekening gebracht worden door het debiet per m' deurbreedte met bijv. 50% te verhogen.

Voor de sluisdeur van 4 m hoog en een benedenstroomse waterdiepte van 2 m blijkt de stortsteen met $d_{50} = 0.10$ m in tact te blijven bij een debiet van $0.95 \text{ m}^3/\text{s/m}$ (overstorthoogte 0.68 m). Mocht de bodembescherming toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 3.5 m.

Bij dezelfde situatie maar met stortsteen $d_{50} = 0.15$ m blijkt de stortsteen in tact te blijven tot een debiet van $1.15 \text{ m}^3/\text{s/m}$ (overstorthoogte 0.77 m). Mocht de bodembescherming toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 4 m.

Voor de sluisdeur van 4 m hoog en een benedenstroomse waterdiepte van 3 m blijkt de stortsteen met $d_{50} = 0.10$ m in tact te blijven bij een debiet van $2.03 \text{ m}^3/\text{s/m}$ (overstorthoogte 1.12 m). Mocht de bodembescherming toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 5 m.

Bij dezelfde situatie maar met stortsteen $d_{50} = 0.15$ m blijkt de stortsteen in tact te blijven tot een debiet van $2.40 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (overstorthoogte 1.25 m). Mocht de bodembescherming toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 6 m.

Voor de sluisdeur van 6 m hoog en een benedenstroomse waterdiepte van 2 m blijkt de stortsteen met $d_{50} = 0.10$ m in tact te blijven bij een debiet van $0.67 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (overstorthoogte 0.54 m). Mocht de bodembescherming toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 3.5 m.

Bij dezelfde situatie maar met stortsteen $d_{50} = 0.15$ m blijkt de stortsteen in tact te blijven tot een debiet van $0.81 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (overstorthoogte 0.61 m). Mocht de bodembescherming toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 4 m.

Voor de sluisdeur van 6 m hoog en een benedenstroomse waterdiepte van 3 m blijkt de stortsteen met $d_{50} = 0.10$ m in tact te blijven bij een debiet van $1.35 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (overstorthoogte 0.87 m). Mocht de bodembescherming toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 5 m.

Bij dezelfde situatie maar met stortsteen $d_{50} = 0.15$ m blijkt de stortsteen in tact te blijven tot een debiet van $1.63 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ (overstorthoogte 0.97 m). Mocht de bodembescherming toch bezwijken dan ontstaan door ontgroning van het onderliggende zand kuilen tot maximaal 6 m.

Zijn de berekende kuildieptes van het zand te groot voor de constructie (instabiliteitsproblemen) dan moeten het overloopdebiet verminderd worden zodat òf de kuildiepte van de zandlaag aanvaardbaar is òf dat nauwelijks erosie van de stenen optreedt.

Doet zich een andere geometrie of stromingssituatie voor dan kan met bovengenoemde methode het toegestane overloopdebiet afgeleid worden.

4 Conclusie en aanbevelingen

Bij de huidige beoordelingsmethode van waterkerende kunstwerken wordt aangenomen dat de standzekerheid in gevaar komt als de volgende overloopdebieten worden overschreden: voor coupures en aansluitende grondconstructies $0.1 \text{ m}^2/\text{s}$ en voor sluizen in waterkeringen $1 \text{ m}^2/\text{s}$.

Uit hoofdstuk 3 blijkt dat bovengenoemde waarde voor coupures meestal te hoog is tenzij er sprake is van een dicht rijdek. Een waarde van $0.03 \text{ m}^2/\text{s}$ is in de meeste situaties veilig voor coupures met daarachter bestrating en geen benedenwater.

Voor sluisdeuren met daarachter een bodembescherming en benedenwater is een maximum overloopdebiet van $1 \text{ m}^2/\text{s}$ in de meeste situaties wel veilig genoeg.

In plaats van bovengenoemde waarden te hanteren is het veiliger gebruik te maken van de in hoofdstuk 3 gepresenteerde methode voor zowel de coupure als de sluisdeur:

- Eerst wordt het overloopdebiet berekend bij een gegeven overstorthoogte. Vervolgens wordt met formule (8b) de erosie van de stenen (bestrating of een laag stortsteen) berekend en daarna de kuildiepte in het onderliggende zand.
- Blijft de erosie van de stenen beperkt tot een deel van de laagdikte (bijv. de helft) dan is dit de grens van wel of niet bezwijken van de top laag. Is deze erosie groter dan kan er vanuit gegaan worden dat ook de berekende kuildiepte in het zand ontstaat.
- Wanneer de berekende erosie van de stenen niet is toegestaan dan wordt het overloopdebiet verminderd door de overstorthoogte te verkleinen tot de toelaatbare erosie van de stenen bereikt wordt.
- Wanneer het bezwijken van laag stenen wel is toegestaan maar de berekende kuildiepte van het zand te groot is, dan wordt eveneens het overloopdebiet verminderd door de overstorthoogte te verkleinen tot de kuildiepte toelaatbaar is.

Zie ook het hierna volgende voorbeeld.

Voorbeeld

Uitgegaan wordt van een coupure van $z = 1 \text{ m}$ hoogte, een benedenstroomse waterdiepte van $h = 0.10 \text{ m}$ en een laag straatstenen met $d_{50} = 0.1 \text{ m}$. Bij een overstorthoogte $h_0 = 0.082 \text{ m}$ is volgens formule $q = 1.705 h_0^{3/2}$ het overloopdebiet $q = 40 \text{ l/s/m}$; het waterstandsverschil is $H = 0.982 \text{ m}$. Dit geeft volgens formule (8b) een erosie van de straatstenen van $y_s = 0.065 \text{ m}$. Onder het wegdek ligt zand met $d_{50} = 0.0003 \text{ m}$. Bezwijkt de laag straatstenen dan ontstaat vervolgens in het zand volgens formule (8b) een kuildiepte van $y_s = 0.60 \text{ m}$. Dit alles voor een overloopdebiet van $q = 40 \text{ l/s/m}$.

Wordt de kans te groot geacht dat bij dit overloopdebiet de stenen toch uitspoelen (erosie 0.065 m t.o.v. een laagdikte van 0.10 m) en is de kuildiepte van het zand ook te groot (0.60 m) vanwege mogelijke instabiliteit constructie dan moet het overloopdebiet verminderd worden.

Uitgegaan wordt weer van de coupure van $z = 1 \text{ m}$ hoogte, de benedenstroomse waterdiepte van $h = 0.10 \text{ m}$ en de laag straatstenen met $d_{50} = 0.1 \text{ m}$. Bij een overstorthoogte $h_0 = 0.052 \text{ m}$ is volgens formule $q = 1.705 h_0^{3/2}$ het overloopdebiet $q = 20 \text{ l/s/m}$ en het waterstandsverschil $H = 0.952 \text{ m}$. Dit geeft volgens formule (8b) een erosie van de stenen $y_s = 0.025 \text{ m}$. Hierbij kan gesteld worden dat de laag straatstenen in tact blijft. Mocht het wegdek onverhoopt toch wegspoelen, dan komt het zand met $d_{50} = 0.0003 \text{ m}$ weer bloot. In het zand ontstaat volgens formule (8b) kuilen met een diepte van $y_s = 0.38 \text{ m}$. Dit alles voor een overloopdebiet van $q = 20 \text{ l/s/m}$.