

Notitie / Memo

HaskoningDHV Nederland B.V.
Maritime & Aviation

Aan: Rijkswaterstaat PPO
Van: Peter de Vries
Datum: 15 januari 2019
Kopie: Archief
Ons kenmerk: BF1645MANT1901151247
Classificatie: Projectgerelateerd

Onderwerp: Controle bestorting kribben nabij overnachtingshaven Spijk

1 Inleiding

Het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat is voornemens een overnachtingshaven te realiseren in de Boven-Rijn nabij Spijk. Hiermee wordt het aantal ligplaatsen voor grotere schepen vergroot. Royal HaskoningDHV werkt momenteel aan de contractvoorbereiding en bijbehorende referentieontwerp. Voor de aanleg van de haven is al een planprocedure doorlopen. In deze planprocedure is geconstateerd dat de bij hoogwatercondities haven een opstuwingspiek op de rivier benedenstrooms van de haven veroorzaakt. In deze memo wordt het technisch ontwerp van de gekozen compenserende maatregel, het verflauwen van de benedenstroomse taluds van 5 kribben tussen kmr 860,7 en 861,5, uitgewerkt tot een vergunbaar ontwerp.

In hoofdstuk 2 worden uitgangspunten voor de ontwerpberoeeningen gegeven. In hoofdstuk 3 worden de controleberoeeningen uitgevoerd. De conclusie met betrekking tot de stabiliteit van de breuksteen bestorting op de kribben wordt gegeven in hoofdstuk 4. Referenties staan vermeld in hoofdstuk 5.

In Bijlagen 1 en 2 zijn rekensheets opgenomen voor de maatgevende situaties.

2 Uitgangspunten

In dit hoofdstuk worden uitgangspunten voor de controleberoeeningen gedefinieerd. Hieronder vallen het ontwerp van de verflauwde kribben, hydraulische randvoorwaarden, de controlemethode en enkele overige uitgangspunten.

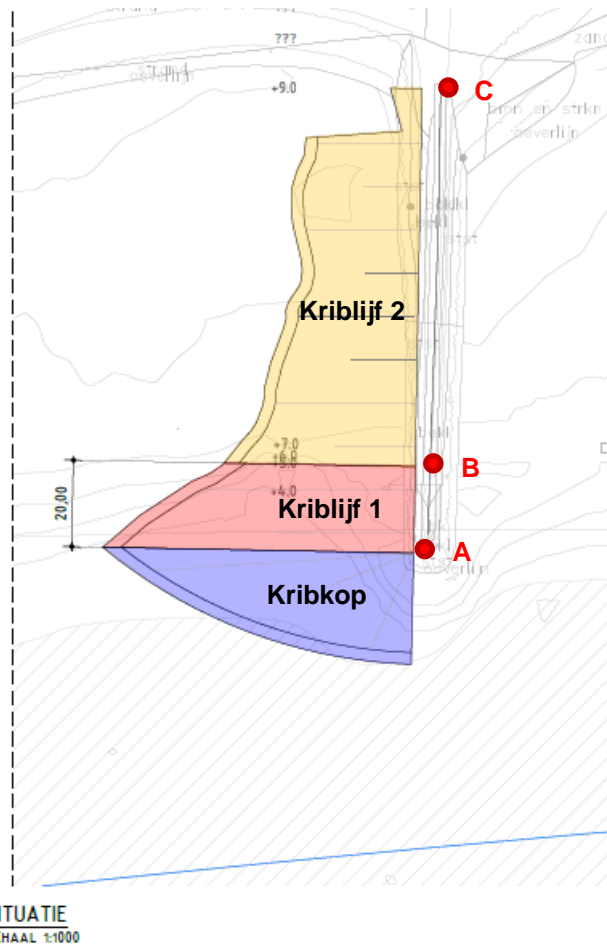
2.1 Ontwerp verflauwde kribben

Op basis van het rivierkundig ontwerp is de geometrie en ruwheid van de aanpassingen van de kribben vastgesteld. Hierbij is gerekend op een oppervlak van breuksteen, dat erosiebestendig is onder de voorkomende hydraulische belastingen.

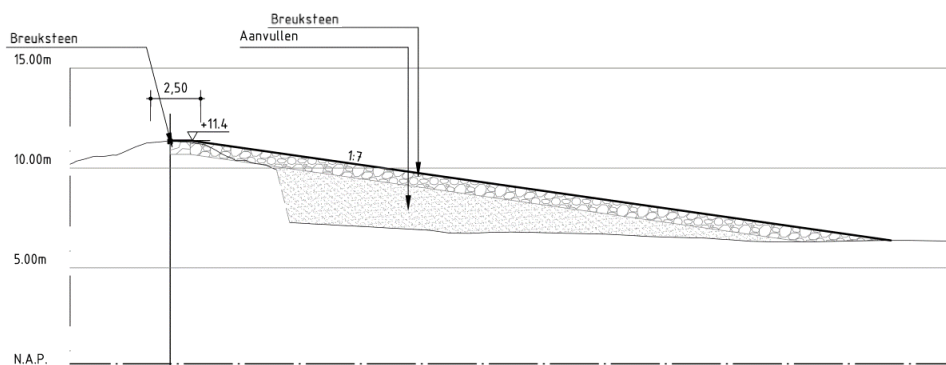
In Figuur 1 en

Figuur 2 is de geometrie toegelicht.

- Kribkop: Rivierwaarts vanaf punt A
- Kriblijf 1: Tussen punt A en B
- Kriblijf 2: Tussen punt B en C



Figuur 1 – Bovenaanzicht krib met aanduidingen, op basis van [1]



Figuur 2 – Principe doorsnede verflauwde krib over kriblijf [1]

2.2 Hydraulische randvoorwaarden

In deze paragraaf worden de hydraulische belastingen gedefinieerd om de bestorting van de kribben te controleren.

- Natuurlijke stroming. Als gevolg van een hoogwatersituatie kan er water over de gehele lengte van de kribben stromen. De bestorting op de kribben dient stabiel te zijn voor drie verschillende situaties. Deze zijn gedefinieerd aan de hand van drie verschillende afvoeren bij Lobith: $Q = 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$, $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$ en $16.000 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - De waterstand is bepaald op basis van de betrekkinglijnen Bovenrijn-Waal [3].
 - De stroomsnelheden bij de verschillende locaties langs de krib zijn bepaald op basis van [2]. Deze zijn bepaald op basis van WAQUA-berekeningen met daarop een onzekerheidsmarge voor turbulentie.

Tabel 1 – Waterstand en stroomsnelheden bij verschillende afvoeren

Parameter		Afvoer Q			Bron
		6.000 m ³ /s	10.000 m ³ /s	16.000 m ³ /s	
Kruinniveau	z_k [NAP+m]	11,4	11,4	11,4	[2]
Waterstand	z_w [NAP+m]	13,8	16,1	18,2	[4]
Waterdiepte boven krib	h [m]	2,4	4,7	6,8	
Stroomsnelheid kribkop	U_k [m/s]	1,5	2,0	2,25	[3]
Stroomsnelheid kriblijf 1	U_{l1} [m/s]	1,5	2,0	2,0	[3]
Stroomsnelheid kriblijf 2	U_{l2} [m/s]	1,25	1,5	1,5	[3]

De natuurlijke stroming in hoogwatersituatie wordt maatgevend geacht over de stroomsnelheid in normale situaties ($Q < 6.000 \text{ m}^3/\text{s}$).

- Scheepvaart geïnduceerde stroming ten gevolge van schroefstralen en retourstroming. Deze is sterk afhankelijk van de afstand van het schip tot de krib, de snelheid van het schip en de lading van het schip. Als ontwerpuitgangspunt wordt hier 2,0 m/s aangehouden, dit is gelijk aan de waarde die op basis van de notitie “Maatgevende verkeerssituatie op de Waal” [4] is gehanteerd. Vanwege het feit dat deze belasting snel dissipeert wordt deze alleen van toepassing geacht op de kribkop.
- Scheepsgolven: de hoogte van de primaire scheepsgolf bedraagt 0,5 - 0,7 m, incidenteel is een maximale golfhoogte van 1,0 m mogelijk, met periode van 2 tot 5 s (CEMT-klasse VIc) [5]. De hoogte van de secundaire golven (boeg en hekgolf 4) bedraagt 0,5 - 0,7 m, incidenteel is een maximale golfhoogte van 1,0 m mogelijk, met periode van 2 tot 3 s (CEMT-klasse VIc) [5]. Omdat er enige dissipatie van de golfhoogte langs de krib plaatsvindt worden de golfhoogtes langs het lijf lager aangenomen. Onderstaande tabel geeft de resultaten voor de golfwerking op de kribkop en het kriblijf.

Tabel 1 – Primaire- en secundaire scheepsgolven

Locatie	Primair		Secundair	
	Hoogte (H)	Periode (T)	Hoogte (H)	Secundair (T)
Kribkop	1,0	5,0	1,0	3,0
Kriblijf 1	0,7	5,0	0,7	3,0
Kriblijf 2	0,5	5,0	0,5	3,0

- Windgolven: de hoogte van de windgolven op lijf en kop bedraagt 0,4 m met periode van 2 s bij een maatgevende windsnelheid 12 m/s [2] en een strijklengte van 2 km [6].

2.3 Methode

De stabiliteit van de breuksteen bestorting wordt uitgerekend aan de hand van:

- De Richtlijn Ontwerp Waterbouw (ROW) [8] is leidend voor de aanpak van de bepaling van de benodigde steenmassa. Ook bevat de ROW een verzameling generieke eisen die voor Rijkswaterstaat van belang zijn bij het ontwerp en de uitvoering van waterbouwkundige constructies.
- De Rock manual [7] geeft formules voor de bepaling van de belastingen en benodigde steenmassa. Hiervoor worden de formules van Pilarczyk en Izbash gebruikt.
- De benodigde steensortering wordt bepaald aan de hand van de NEN-EN 13883.

2.4 Overig

De volgende generieke parameters worden gebruikt in de bepaling van de vereiste breuksteen bestorting.

Tabel 2 – Generieke ontwerpparameters

Parameter		Waarde	Toelichting
Taludhelling	β [-]	Kribkop: 1:3 Kriblijf 1 & 2: 1:10	Kop: aanname Lijf: op basis van [1]
Dichtheid water	ρ_w [kg/m ³]	1000 kg/m ³	Aanname
Dichtheid stortsteen	ρ_s [kg/m ³]	2650 kg/m ³	Aanname
Hoek van interne wrijving	ϕ [°]	35 graden	Aanname
Stromingsrichting op talud	ψ [°]	Kribkop: 90 graden Kriblijf 1 & 2: 0 graden	Aanname
Factor invloed taludhelling	k_{sl} [-]	Kribkop: 0,83 Kriblijf 1 & 2: 1,14	O.b.v. ψ , β en ϕ
Robuustheidsfactor	f_r [-]	1,1	O.b.v. [8]
Factor karakteristieke steendiameter	f_n [-]	0,84	O.b.v. [8], voor de omrekening tussen D_{50} en D_{n50}

3 Ontwerpberekeningen

De verflauwde kribben worden voor de volgende belastingen gecontroleerd:

1. Natuurlijke stroming als gevolg van hoogwater
2. Stroomsnelheid door retourstroming en schroefstralen
3. Primaire- en secundaire scheepsgolven

Deze worden in onderstaande paragrafen gepresenteerd. NB: Natuurlijke stroming in normale situatie wordt als niet-maatgevend geacht ten opzichte van de natuurlijke stroming in hoogwatersituaties. Windgolven worden als niet-maatgevend geacht ten opzichte van de scheepsgolven. Deze worden daarom beide niet gepresenteerd.

3.1 Natuurlijke stroming in hoogwatersituaties

De vereiste steendiameter als gevolg van natuurlijke stroming in hoogwatersituaties wordt bepaald met behulp van de formule van Pilarczyk [7][8].

$$D = \frac{\phi_{sc}}{\Delta} \frac{0.035}{\psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U^2}{2g}$$

Hiertoe worden de volgende parameters als invoer aangenomen.

Tabel 3 – Invoerparameters berekening natuurlijke stroming

Parameter		Waarde	Toelichting
Stroomsnelheid	U [m/s]	Variabel	Zie Tabel
Waterdiepte	h [m]	Variabel	Zie Tabel
Stabiliteitsfactor	ϕ_{sc} [-]	1,5	O.b.v. [8]
Mobiliteitsparameter	ψ_{cr} [-]	0,035	Losse stortsteen [7]
Turbulentie correctie parameter	kt^2 [-]	2	Non-uniforme stroming [7]

De berekeningen zijn weergegeven in Appendix 1. De resultaten van de berekening zijn gegeven in onderstaande tabel. De maatgevende steendiameter per onderdeel van de krib is als dikgedrukt weergegeven. De berekende steendiameter uit de Pilarczyk formule is vermenigvuldigd met een robuustheidsfactor van $f_r = 1,1$, conform [8].

Tabel 4 – Vereiste steendiameter als gevolg van natuurlijke stroming, weergegeven per hoogwaterafvoer Q

Locatie	Steendiameter Dn50 [m]		
	Q=6.000 m3/s	Q=10.000 m3/s	Q=16.000 m3/s
Kribkop	0,15	0,27	0,33
Kriblijf 1	0,11	0,18	0,17
Kriblijf 2	0,07	0,09	0,08

3.2 Stroomsnelheid door retourstroming en schroefstralen

De stromingsbelasting door retourstroming en schroefstralen wordt conform [8] bepaald op basis van de formule van Izbash:

$$D_{50} = 0,84 * D_{n50} > \frac{1}{k_{sl}} * \phi_{iz,cr} * \frac{U_b^2}{2g\Delta}$$

Hier toe worden de volgende parameters als invoer aangenomen.

Tabel 6 – Invoerparameters berekening retourstroming en schroefstralen

Parameter		Waarde	Toelichting
Stroomsnelheid	U [m/s]	2,0	Zie par. 2.2
Factor invloed taludhelling	k_{sl} [-]	0,83	O.b.v. ψ , β en ϕ
Stabiliteitscoëfficiënt	$\phi_{iz,cr}$ [-]	2,5	O.b.v. [8]
Relatieve dichtheid	Δ [-]	1,65	O.b.v. ρ_w en ρ_s

Het resultaat van de berekening is weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 7 – Vereiste steendiameter kribkop als gevolg van retourstroming en schroefstralen

Locatie	Steendiameter Dn50 [m]
Kribkop	0,34

3.3 Scheepsgolf

De vereiste steendiameter als gevolg van de scheepsgolven wordt bepaald met behulp van [7] en [7]. Hier toe worden de volgende parameters als invoer aangenomen.

Tabel 8 – Invoerparameters berekening natuurlijke stroming

Parameter		Waarde	Toelichting
Bodemniveau	z_b [NAP+m]	3,0	O.b.v. [1]
Waterstand	z_w [NAP+m]	7,4	Bij afvoer $Q=1000 \text{ m}^3/\text{s}$ [4]
Aantal schepen	N [-]	20000	Aanname
Vaarsnelheid schip	v_s [m/s]	3,0	Aanname
Afstand schip tot krib	y_s [m]	Kribkop: 20 m Kriblijf 1: 30 m Kriblijf 2: 50 m	Aanname o.b.v. [4]
Hoogte scheepsgolven	H [m]	Variabel	Zie par. 2.2
Periode scheepsgolven	T [s]	Variabel	Zie par. 2.2
Schadegetal	S [-]	2	Keuze op basis van [8]: in verband met hoge frequentie van voorkomen van stroomsnelheden ($f > 1/100$ jaar) en taludhellingen tot 1:3.
Permeabiliteit	P [-]	0,4	Aanname

Parameter		Waarde	Toelichting
Scheepscoëfficiënt	α_i [-]	1	Aanname: beladen schepen
Inkomende golfhoek	β [°]	45	Aanname
Coëfficiënt voor schuine inval	c_β [-]	0,42	Aanname: korte golven

De berekeningen zijn weergegeven in Appendix 2. De resultaten van de berekening zijn gegeven in onderstaande tabel. De maatgevende steendiameter per onderdeel van de krib is als dikgedrukt weergegeven. De berekende steendiameter uit de Pilarczyk formule is vermenigvuldigd met een robuustheidsfactor van $f_r = 1,1$, conform [8].

Tabel 9 – Vereiste steendiameter als gevolg van natuurlijke stroming

Locatie	Steendiameter Dn50 [m]	
	Primaire golf	Secundaire golf
Kribkop	0,26	0,25
Kriblijf 1	0,18	0,20
Kriblijf 2	0,13	0,15

4 Conclusie

Uit bovenstaande berekeningen kan het volgende worden geconcludeerd:

- Voor de kribkop is de stroomsnelheid door retourstroming en schroefstralen maatgevend.
- Voor kriblijf 1 en kriblijf 2 is de secundaire scheepsgolf maatgevend.
- De resultaten van de berekeningen staan weergegeven in onderstaande tabel.

Tabel 10 – Vereiste steendiameter als gevolg van natuurlijke stroming

Locatie	Vereiste diameter [m]	Vereiste sortering o.b.v. EN 13383
Kribkop	0,34	40-200kg
Kriblijf 1	0,20	10-60kg
Kriblijf 2	0,15	5-40kg

De volgende onderdelen dienen in vervolgfases nader te worden gedetailleerd:

- Stabiliteit teen- of overgangsconstructie.
Voor het ontwerp van de aansluiting van de bodemverdediging op de bestaande waterbodembod dient geverifieerd te worden of en waar de bestaande 'harde' laag gebruikt kan worden als teenconstructie, of dat aanvullende maatregelen nodig zijn.
- Stabiliteit en grondichtheid van de overgangsconstructie/aansluiting op bestaande krib.
- Aard van het vulmateriaal, mede in relatie tot de filterconstructie onder de toplaag van breuksteen en de bepaling van overhoogte in verband met zetting en klink.

5 Referenties

- [1] Royal HaskoningDHV, 2018, Compenserende maatregelen benedenstroomse opstuwing door aanleg Overnachtingshaven Spijk, Situatie en doorsneden, BF1645-VO-SIT-003, D1.0 03-12-2018
- [2] Royal HaskoningDHV, 2018, Aanvulling op de rivierkundige beoordeling van de Overnachtingshaven Spijk tbv ontwerp compenserende maatregelen voor opstuwing (verflauwde kribben), BF1645WATNT1811071717, 05-12-2018
- [3] Rijkswaterstaat, 2014, Betrekkingslijnen Bovenrijn-Waal 2014, Betrekkingslijn 2014 km-raai 861
- [4] Deltares, 2012, Maatgevende verkeerssituatie op de Waal, 13-01-2012
- [5] TAW, 2008, Technisch rapport Ontwerpbelastingen voor het rivierengebied
- [6] TAW, 1985, Leidraad voor het ontwerpen van rivierdijken. Deel 1 – Bovenrivierengebied
- [7] CIRIA/CUR/CETMEF, 2007, The rock manual: the use of rock in hydraulic engineering
- [8] Rijkswaterstaat, 2018, Richtlijn Ontwerp Waterbouw, versie 1.0, 06-07-2018

Appendix 1: Berekeningen natuurlijke stroming

Appendix 1.1: kribkop

STABILITY UNDER CURRENT ATTACK - PILARCZYK

For armourstone and alternative protection elements (ie gabions)

Project: BF1645 OH Spijk
Standard: The Rock Manual 2007 - C683 - section 5.2.3.1
Date: 15-1-2019
By: P.A.L. de Vries

Boundary conditions

U = 2,25 [m/s] Depth averaged flow velocity
h = 6,8 [m] Water depth
Stone density ρ_r = 2650 [kg/m³]
Water density ρ_w = 1000 [kg/m³]

Correction factors in Pilarczyk - formula

- Type of protection / transition? : exposed edges of rip-rap and armourstone
Recommended stability correction parameter ϕ_{sc} = 1,5
Chosen value ϕ_{sc} = (supersedes recommended value if filled in)

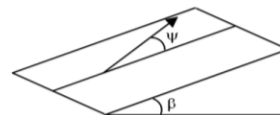
- Type of protection system? : rip-rap and armourstone
Recommended mobility correction parameter Ψ_{cr} = 0,035
Chosen value Ψ_{cr} = 0,035 (supersedes recommended value if filled in)

- Type of flow / turbulence level? : non-uniform flow, sharp outer bends
Recommended turbulence correction parameter k_t^2 = 2
Chosen value k_t^2 = 2 (supersedes recommended value if filled in)

- Type of velocity profile? : not fully developed velocity profile
For determination of k_h eq. 2 is used
 $k_s = 2$ * D_n (typically 1 to 3 D_n) (eq. 1) $k_h = \frac{2}{\log^2(1 + 12h/k_s)}$
 $k_h = 0,53$ (eq. 2) $k_h = (1 + h/D_n)^{-0,2}$

- Relative density Δ
With rip-rap and armourstone the relative density is $\rho_r/\rho_w - 1$
With box gabions and gabion mattresses, the relative density is $(1 - n_v)(\rho_r/\rho_w - 1)$ with $n_v \approx 0,4$
 $\Delta = 1,65$

- Flat bed or sloping bed? sloping
Armourstone on slope 1 : 3,0 --> $\beta = 18,4$ [°]
Current angle $\psi = 90$ [°]
Internal friction $\phi = 35$ [°]



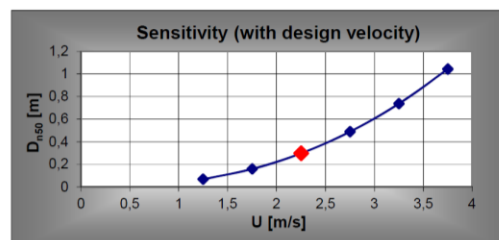
Slope factor $k_{sl} = \frac{\cos \psi \sin \beta + \sqrt{\cos^2 \beta \tan^2 \phi - \sin^2 \psi \sin^2 \beta}}{\tan \phi} = 0,83$

Determination of required stone size

$D = \frac{\phi_{sc} \cdot 0,035}{\Delta \cdot \Psi_{cr}} k_n k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U^2}{2g} = 0,298$ [m]

Note
For rip-rap and armourstone $D = D_{n50}$
For box gabions, etc. $D =$ thickness of element

REQUIRED SIZE		CHOICE (EN13383 gradings)		
D_{n50} [m]	W_{50} [kg]	Class	W_{50} [kg]	d_{n50}
0,298	70,4	40-200kg	120	0,36
0,33				



Appendix 1.2: kriblijf 1

STABILITY UNDER CURRENT ATTACK - PILARCZYK

For armourstone and alternative protection elements (ie gabions)

Project: BF1645 OH Spijk
Standard: The Rock Manual 2007 - C683 - section 5.2.3.1
Date: 15-1-2019
By: P.A.L. de Vries

Boundary conditions

U = 2 [m/s] Depth averaged flow velocity
h = 4,7 [m] Water depth
Stone density ρ_r = 2650 [kg/m³]
Water density ρ_w = 1000 [kg/m³]

Correction factors in Pilarczyk - formula

- Type of protection / transition? : exposed edges of rip-rap and armourstone
Recommended stability correction parameter ϕ_{sc} = 1,5
Chosen value ϕ_{sc} = (supersedes recommended value if filled in)

- Type of protection system? : rip-rap and armourstone
Recommended mobility correction parameter Ψ_{cr} = 0,035
Chosen value Ψ_{cr} = 0,035 (supersedes recommended value if filled in)

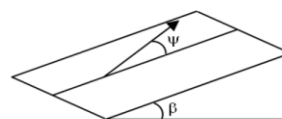
- Type of flow / turbulence level? : non-uniform flow, sharp outer bends
Recommended turbulence correction parameter k_t^2 = 2
Chosen value k_t^2 = 2 (supersedes recommended value if filled in)

- Type of velocity profile? : not fully developed velocity profile
For determination of k_h eq. 2 is used
 $k_s = 2 * D_n$ (typically 1 to 3D_n) (eq. 1) $k_h = \frac{2}{\log^2(1 + 12h/k_s)}$
 $k_h = 0,51$ (eq. 2) $k_h = (1 + h/D_n)^{-0.2}$

- Relative density Δ
With rip-rap and armourstone the relative density is $\rho_r/\rho_w - 1$
With box gabions and gabion mattresses, the relative density is $(1 - n_v)(\rho_r/\rho_w - 1)$ with $n_v \approx 0.4$
 $\Delta = 1,65$

- Flat bed or sloping bed? sloping
Armourstone on slope 1 : 10,0 --> $\beta = 5,7$ [°]
Current angle $\psi = 0$ [°]
Internal friction $\phi = 35$ [°]

$$\text{Slope factor } k_{sl} = \frac{\cos \psi \sin \beta + \sqrt{\cos^2 \beta \tan^2 \phi - \sin^2 \psi \sin^2 \beta}}{\tan \phi} = 1,14$$



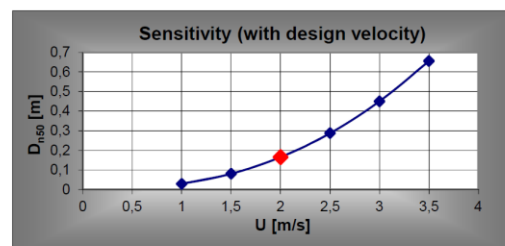
Determination of required stone size

$$D = \frac{\phi_{sc}}{\Delta} \frac{0.035}{\Psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U^2}{2g} = 0,166 \text{ [m]}$$

Note

For rip-rap and armourstone $D = D_{n50}$
For box gabions, etc. $D =$ thickness of element

REQUIRED SIZE		CHOICE (EN13383 gradings)		
D_{n50} [m]	W_{50} [kg]	Class	W_{50} [kg]	d_{n50}
0,166	12,1	5-40kg	22,5	0,20



Appendix 1.3: kriblijf 2

STABILITY UNDER CURRENT ATTACK - PILARCZYK

For armourstone and alternative protection elements (ie gabions)

Project: BF1645 OH Spijk
Standard: The Rock Manual 2007 - C683 - section 5.2.3.1
Date: 11-1-2019
By: P.A.L. de Vries



Boundary conditions

U = 1,5 [m/s] Depth averaged flow velocity
h = 4,7 [m] Water depth
Stone density ρ_r = 2650 [kg/m³]
Water density ρ_w = 1000 [kg/m³]

Correction factors in Pilarczyk - formula

- Type of protection / transition? : exposed edges of rip-rap and armourstone
Recommended stability correction parameter ϕ_{sc} = 1,5
Chosen value ϕ_{sc} = (supersedes recommended value if filled in)

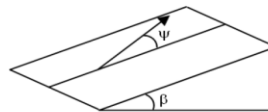
- Type of protection system? : rip-rap and armourstone
Recommended mobility correction parameter Ψ_{cr} = 0,035
Chosen value Ψ_{cr} = 0,035 (supersedes recommended value if filled in)

- Type of flow / turbulence level? : non-uniform flow, sharp outer bends
Recommended turbulence correction parameter k_t^2 = 2
Chosen value k_t^2 = 2 (supersedes recommended value if filled in)

- Type of velocity profile? : not fully developed velocity profile
For determination of k_h eq. 2 is used
 k_s = 2 * D_n (typically 1 to 3 D_n) (eq. 1) $k_h = \frac{2}{\log^2(1 + 12h/k_s)}$
 k_h = 0,44 (eq. 2) $k_h = (1 + h/D_n)^{-0.2}$

- Relative density Δ
With rip-rap and armourstone the relative density is $\frac{\rho_r}{\rho_w} - 1$
With box gabions and gabion mattresses, the relative density is $(1 - n_v)(\rho_r/\rho_w - 1)$ with $n_v \approx 0.4$
 Δ = 1,65

- Flat bed or sloping bed? sloping
Armourstone on slope 1 : 10,0 --> β = 5,7 [°]
Current angle ψ = 0 [°]
Internal friction ϕ = 35 [°]



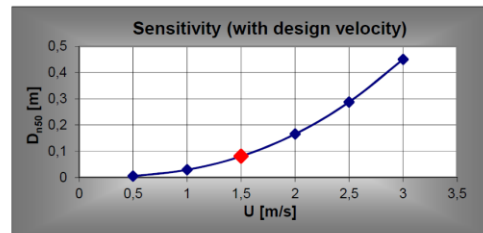
Slope factor $k_{sl} = \frac{\cos \psi \sin \beta + \sqrt{\cos^2 \beta \tan^2 \phi - \sin^2 \psi \sin^2 \beta}}{\tan \phi} = 1,14$

Determination of required stone size

$$D = \frac{\phi_{sc}}{\Delta} \frac{0.035}{\Psi_{cr}} k_h k_{sl}^{-1} k_t^2 \frac{U^2}{2g} = 0,081 \text{ [m]}$$

Note
For rip-rap and armourstone $D = D_{n50}$
For box gabions, etc. D = thickness of element

REQUIRED SIZE		CHOICE (EN13383 gradings)		
D_{n50} [m]	W_{50} [kg]	Class	W_{50} [kg]	d_{n50}
0,081	1,4	50-150 mm	1,57	0,08



Appendix 2: Berekeningen primaire- en secundaire scheepsgolven

Appendix 2.1: Primaire scheepsgolf kribkop

STABILITY OF ROCK AGAINST SHIP INDUCED WAVE ATTACK

INPUT:

Constants:	$g = 9.807 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	hour := 3600 · sec
Water level:	SWL := 7.4m CD	Damage figure: $S_{\text{max}} := 2.0$
Bed level:	$h_{\text{bed}} := 3\text{m}$ CD	Notional permeability factor: $P := 0.4$
No. of passing design ships: (in lifetime)	$N_{\text{ww}} := 20000$	Slope gradient: $\cot\alpha := 3.0$
Ship sailing speed:	$V_s := 3.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	Density of water: $\rho_w := 1000 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Sailing distance to bank:	$y_s := 20\text{m}$	Density of rock: $\rho_a := 2650 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Transversal stern wave height:	$z_{\text{max}} := 1.0\text{m}$	Coefficient: $\alpha_i := 1$

DERIVED PARAMETERS AND FORMULAE:

Water depth:	$h := \text{SWL} - h_{\text{bed}}$	$h = 4.4\text{m}$
Secondary wave height:	$H_i := 1.2 \cdot \alpha_i \cdot h \cdot \left(\frac{y_s}{h}\right)^{-\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{V_s}{\sqrt{g \cdot h}}\right)^4$	$H_i = 0.139\text{m}$
Secondary wave period:	$T_i := 5.1 \cdot \frac{V_s}{g}$	$T_i = 1.56\text{s}$
Secondary wave length:	$L_i := \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{V_s^2}{g}$	$L_i = 3.844\text{m}$
Wave steepness:	$s_{\text{ww}} := \frac{2 \cdot \pi \cdot H_i}{g \cdot T_i^2}$	$s = 0.037$
	$\tan\alpha := \frac{1}{\cot\alpha}$	$\tan\alpha = 0.333$
Iribarren numbers: (breaker parameter)	$\xi_i := \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s}}$	$\xi_i = 1.74$
Relative density:	$\Delta := \frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w}$	$\Delta = 1.65$
Minimum rock size for secondary ship waves (= interference peaks):		
	$D_{n50H} := \frac{H_i}{8.2 \cdot P^{0.18} \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \cdot \xi_i^{-0.5} \cdot \Delta}$	$D_{n50H} = 0.037\text{m}$

Minimum rock size for transversal stern wave:

Formula:
$$D_{n50z} := 0.84 \cdot \frac{z_{\max}}{1.5 \cdot \cot \alpha \cdot \frac{1}{3} \cdot \Delta}$$

$$D_{n50z} = 0.235 \text{ m}$$

Convert rock diameter into rock weight:

$$V_{nH} := D_{n50H}^3 = 5.239 \times 10^{-5} \text{ m}^3 \quad W_{50H} := V_{nH} \cdot \rho_a = 0.14 \text{ kg}$$

$$V_{nz} := D_{n50z}^3 = 0.013 \text{ m}^3 \quad W_{50z} := V_{nz} \cdot \rho_a = 34.53 \text{ kg}$$

OUTPUT:

Minimum rock size for secondary ship waves (= interference peaks):

$$D_{n50H} = 0.04 \text{ m}$$

$$W_{50H} = 0.14 \text{ kg}$$

For design purpose $\frac{H_i}{\Delta \cdot D_{n50}}$ should be 2 to 3:

$$\frac{H_i}{\Delta \cdot D_{n50H}} = 2.246$$

Minimum rock size for transversal stern wave:

$$D_{n50z} = 0.24 \text{ m}$$

$$W_{50z} = 34.53 \text{ kg}$$

For design purpose $\frac{z_{\max}}{\Delta \cdot D_{n50}}$ should be 2 to 3:

$$\frac{z_{\max}}{D_{n50z} \cdot \Delta} = 2.575$$

Appendix 2.2: Secundaire scheepsgolf kriblijf 1

STABILITY OF ROCK AGAINST WAVE ATTACK - DEEP WATER

INPUT:

Constants:	$g = 9.807 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	hour := 3600·sec	
Significant wave height:	$H_s := 0.7\text{m}$	Damage figure:	$S_{\text{max}} := 2.0$
Mean wave period:	$T_m := 3\cdot\text{sec}$	Notional permeability factor:	$P := 0.4$
Storm duration:	$S_d := 6.0\cdot\text{hour}$	Slope gradient:	$\cot\alpha := 3$
Incoming wave direction:	$\beta := 45\text{deg}$	Fourier asperity roughness:	$P_R := 0.01$
$H_{2\%} / H_s$ (Rayleigh = 1.4):	$R_{2\%} := 1.4$	Density of rock:	$\rho_a := 2650 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Density of water:	$\rho_w := 1025 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Coefficient for oblique waves:	$c_\beta := 0.42$

DERIVED PARAMETERS AND FORMULAE:

$$H_{s_{\text{eq}}} := \begin{cases} H_s & \text{if } \beta - 10 < 20 \cdot \text{deg} \\ H_s \left[(1 - c_\beta) \cdot (\cos(\beta - 10 \cdot \text{deg}))^2 + c_\beta \right] & \text{if } 20 \cdot \text{deg} \leq \beta \end{cases} \quad H_{s_{\text{eq}}} = 0.566 \text{ m}$$

$$\text{Wave steepness:} \quad s_m := \frac{2 \cdot \pi \cdot H_s}{g \cdot T_m^2} \quad s_m = 0.050$$

$$\tan\alpha := \frac{1}{\cot\alpha} \quad \tan\alpha = 0.333$$

$$\text{Coefficients:} \quad C_{pl} := (5.5 + 70 \cdot P_R) \quad C_{pl} = 6.2$$

$$C_s := (0.6 + 40 \cdot P_R) \quad C_s = 1.0$$

$$\text{Iribarren numbers:} \quad \xi_m := \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s_m}} \quad \xi_m = 1.49$$

$$\xi_{\text{cr}} := \left(\frac{C_{pl}}{C_s} \cdot P^{0.31} \cdot \sqrt{\tan\alpha} \right) \left[\frac{1}{(P+0.5)} \right] \quad \xi_{\text{cr}} = 3.01$$

$$\text{Relative density:} \quad \Delta := \frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w} \quad \Delta = 1.59$$

$$\text{Number of waves:} \quad N_w := \frac{S_d}{T_m} \quad N_w = 7200$$

Van der Meer formulae:

$$D_{nplunging} := \frac{H_{seq}}{C_{pl} \cdot P^{0.18} \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}}\right)^{0.2} \cdot \xi_m^{-0.5} \cdot \Delta} \cdot \frac{R_{2\%}}{1.4} = 0.176 \text{ m} \quad (\text{plunging})$$

$$D_{nsurging} := \frac{H_{seq}}{C_s \cdot P^{-0.13} \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}}\right)^{0.2} \cdot \sqrt{\cot\alpha} \cdot \xi_m \cdot P \cdot \Delta} \cdot \frac{R_{2\%}}{1.4} = 0.33 \text{ m} \quad (\text{surging})$$

$$D_{n50} := \begin{cases} D_{nplunging} & \text{if } \xi_m < \xi_{cr} \\ D_{nsurging} & \text{if } \xi_m \geq \xi_{cr} \\ D_{nplunging} & \text{if } \cot\alpha \geq 4 \end{cases} = 0.176$$

Convert rock diameter into rock weight:

$$V_n := D_{n50}^3 = 5.427 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad \frac{H_{seq}}{\Delta \cdot D_{n50}} = 2.033$$

$$W_{50} := V_n \cdot \rho_a = 14 \text{ kg}$$

OUTPUT:

Nominal median rock diameter: **$D_{n50} = 0.18 \text{ m}$**

Median rock weight: **$W_{50} = 14 \text{ kg}$**

Appendix 2.3: Secundaire scheepsgolf kriblijf 2

STABILITY OF ROCK AGAINST WAVE ATTACK - DEEP WATER

INPUT:

Constants:	$g = 9.807 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$	hour := 3600·sec	
Significant wave height:	$H_s := 0.5\text{m}$	Damage figure:	$S_{\max} := 2.0$
Mean wave period:	$T_m := 3\text{sec}$	Notional permeability factor:	$P := 0.4$
Storm duration:	$S_d := 6.0\text{hour}$	Slope gradient:	$\cot\alpha := 3$
Incoming wave direction:	$\beta := 45\text{deg}$	Fourier asperity roughness:	$P_R := 0.01$
$H_{2\%} / H_s$ (Rayleigh = 1.4):	$R_{2\%} := 1.4$	Density of rock:	$\rho_a := 2650 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Density of water:	$\rho_w := 1025 \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	Coefficient for oblique waves:	$c_\beta := 0.42$

DERIVED PARAMETERS AND FORMULAE:

$H_{\text{seq}} := \begin{cases} H_s & \text{if } \beta - 10 < 20\text{-deg} \\ H_s \left[(1 - c_\beta) \cdot (\cos(\beta - 10\text{-deg}))^2 + c_\beta \right] & \text{if } 20\text{-deg} \leq \beta \end{cases}$		$H_{\text{seq}} = 0.405\text{m}$
Wave steepness:	$s_m := \frac{2 \cdot \pi \cdot H_s}{g \cdot T_m^2}$	$s_m = 0.036$
	$\tan\alpha := \frac{1}{\cot\alpha}$	$\tan\alpha = 0.333$
Coefficients:	$C_{pl} := (5.5 + 70 \cdot P_R)$	$C_{pl} = 6.2$
	$C_s := (0.6 + 40 \cdot P_R)$	$C_s = 1.0$
Iribarren numbers:	$\xi_m := \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s_m}}$	$\xi_m = 1.77$
	$\xi_{cr} := \left(\frac{C_{pl}}{C_s} \cdot P^{0.31} \cdot \sqrt{\tan\alpha} \right) \left[\frac{1}{(P+0.5)} \right]$	$\xi_{cr} = 3.01$
Relative density:	$\Delta := \frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w}$	$\Delta = 1.59$
Number of waves:	$N_w := \frac{S_d}{T_m}$	$N_w = 7200$

Van der Meer formulae:

$$D_{nplunging} := \frac{H_{seq}}{C_{pl} \cdot P^{0.18} \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}}\right)^{0.2} \cdot \xi_m^{-0.5} \cdot \Delta} \cdot \frac{R_{2\%}}{1.4} = 0.137\text{m} \quad (\text{plunging})$$

$$D_{nsurging} := \frac{H_{seq}}{C_s \cdot P^{-0.13} \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}}\right)^{0.2} \cdot \sqrt{\cot\alpha} \cdot \xi_m^P \cdot \Delta} \cdot \frac{R_{2\%}}{1.4} = 0.22\text{m} \quad (\text{surging})$$

$$D_{n50} := \begin{cases} D_{nplunging} & \text{if } \xi_m < \xi_{cr} \\ D_{nsurging} & \text{if } \xi_m \geq \xi_{cr} \\ D_{nplunging} & \text{if } \cot\alpha \geq 4 \end{cases} = 0.137$$

Convert rock diameter into rock weight:

$$V_n := D_{n50}^3 = 2.545 \times 10^{-3} \text{ m}^3 \quad \frac{H_{seq}}{\Delta \cdot D_{n50}} = 1.869$$

$$W_{50} := V_n \cdot \rho_a = 7 \text{ kg}$$

OUTPUT:

Nominal median rock diameter: $D_{n50} = 0.14 \text{ m}$

Median rock weight: $W_{50} = 7 \text{ kg}$