Notitie / Memo

HaskoningDHV Nederland B.V.
Water & Maritime

Aan:	Quintijn van Agten
Van:	Stanley Versteeg
Datum:	20 maart 2025
Kopie:	Daniel Peters
Ons kenmerk:	BJ5649-WM-ME-241128-1108
Classificatie:	Projectgerelateerd
Gecontroleerd door	Click or tap here to enter text.

Onderwerp: **Bodembescherming nevengeul Coehoorn**

De vispassage Coehoorn langs de Maas, ter hoogte van Grave, wordt ongeveer 3200 meter lang en heeft een verval van ongeveer 3 meter. De bedding van de nevengeul is over de grootste strekking vrij breed, waardoor hoge stroomsnelheden hier niet voorkomen. Echter ter hoogte van de John S. Thompsonbrug en Sluis- en Stuwcomplex Grave, wordt de nevengeul versmald. Hier kunnen grotere stroomsnelheden voor komen. Om deze reden is op deze locatie een bodembescherming gewenst, om erosie van de waterbodem tegen te gaan.

Daarnaast loopt de geul op 3 locaties door duikers, waar rondom de in- en uitstroomopeningen van een hogere belasting op de bodem van de geul optreedt. Ook hier is een bodembescherming nodig om erosie van de bodem tegen te gaan.

1 Ontwerp van de bodembescherming

1.1 Ontwerpbelasting

In de nevengeul moet de bodembescherming worden aangebracht rondom punten waar de loop van de geul moet worden vastgelegd. Dit is rondom de pijlers van de John S. Thompsonbrug en bij de uitstroom van duikers in het tracé van de watergang.

De bodembescherming wordt ontworpen met de stroomsnelheid in de nevengeul als belasting. De verschillende ontwerpbelastingen zijn weergegeven in Tabel 1-1 hieronder.

Tabel 1-1 ontwerpbelastingen voor de bodembescherming van de nevengeul Coehoorn

Ontwerpsituatie	Stroomsnelheid [m/s]
Rondom brugpijler	1,5 – 1,65
In- en uitstroom duiker	1

De bodembescherming rondom de brugpijler wordt ontworpen voor stroomsnelheden van 1,5 en 1,65 m/s. Dit zijn de maximale stroomsnelheden afgeleid uit het rivierkundige model D-Hydro incl. de geul. Rondom de in- en uitstroom van de duikers in het tracé wordt ontworpen met een stroomsnelheid van 1 m/s.

1.2 Ontwerpmethode

De bodembescherming bestaat uit een toplaag en een filterconstructie, de ontwerpmethode van beide onderdelen is beschreven in deze paragraaf.

1.2.1 Toplaag

De benodigde gradering van de toplaag van de bodembescherming is bepaald aan de hand van de Izbash-methode, zoals voorgeschreven in de Rock Manual (1). De formule behorende bij deze methode is hieronder weergegeven:

$$D_{50} = \beta_{ib} * \frac{1}{k_{slr}} * \frac{U_b^2}{2*g*\Delta_r} \quad [1]$$

Waarin:

D_{50} Nominale steendiameter [m]
β_{iz} Izbash factor voor verhoogde turbulentie [-] (= 1.4 voor niet-uniforme, turbulente stroming)
k_{slr} Factor voor de taludhelling van de bodem en oever bescherming [-] (= 1 voor vlakke bodem)
U_b Stroomsnelheid op de bodem [m/s]
Δ_r Relatieve dichtheid van breuksteen [-] (= 1.6 voor Maasgrind in zoet water)

1.2.2 Filterconstructie

Om uitwassing van bodemmateriaal door de toplaag van de bodembescherming te voorkomen, moet deze worden beschermd met behulp van een filterconstructie. Voor dit filter kan worden gekozen voor toepassing van een geotextiel of een granulaire filterconstructie.

Granulair gesloten filterconstructie
Wanneer wordt gekozen voor toepassing van een granulair filter, zijn de Terzaghi filterregels voor granulair gesloten filters van toepassing, als beschreven in de Rock Manual (1):

$\frac{D_{top(15)}}{D_{onder(85)}} < 3.3$	als de laagdikte	$d_{top} = 2 * D_{top}$
$\frac{D_{top(15)}}{D_{onder(85)}} < 5$	als de laagdikte	$d_{top} \geq 5 * D_{top}$
$\frac{D_{top(15)}}{D_{onder(85)}} < 10$	als de laagdikte	$d_{top} \geq 10 * D_{top}$

Wanneer de filterconstructie uit meerdere lagen bestaat, moet voor iedere laagscheiding aan bovenstaande voorwaarden worden voldaan.

Geotextiel
Ook een geotextiel kan worden gebruikt om het uitwassen van bodemmateriaal door de bodembescherming te voorkomen. Hiervoor is de maaswijdte van het geotextiel van belang, welke wordt bepaald door het materiaal van de onderlaag. Hiervoor geldt:

$$O_{90} < D_{50,bodem}$$

De O_{90} van het geotextiel moet dus kleiner zijn dan de nominale korreldiameter van de ondergrond.

Granulair open filterconstructie
Omdat gekozen is voor een geometrisch open filterconstructie zonder toepassing van geotextiel, is de afname van de stroomsnelheid over de hoogte van de filterlaag de leidende factor voor het bepalen van de benodigde laagdikte van de bodembescherming.

De laagdikte van het geometrisch open filter is bepaald aan de hand van onderstaande formule [2] als voorgesteld door Stefan van der Sande in CUR-K680-15 (CUR, 2015).

$$D_F = d_{f50} * \alpha_d * ln\left(\frac{d_{f50}}{d_{b50}} * \frac{\Delta_f}{\Delta_b} * \frac{\Psi_f}{\Psi_{c,b}} * \frac{1-\gamma V_{g,f}}{1-\gamma V_{g,b}}\right) \qquad [2]$$

Waarin:

D_F	=	Minimaal benodigde laagdikte van de filterlaag
d_{f50}	=	Korreldiameter van het filter materiaal waarbij 50% van de deeltjes fijner is
d_{b50}	=	Korreldiameter van het bodemmateriaal waarbij 50% van de deeltjes fijner is
α_d	=	Deterministische coefficient ($\alpha_d = 0.82$)
Δ_f	=	Relatieve dichtheid van de toegepaste filterlaag (= 1.6 voor Maasgrind in zoet water)
Δ_b	=	Relatieve dichtheid van het bodemmateriaal (= 1.65, o.b.v. 2650 kg/m^3 in zoet water)
ψ_f	=	Shields parameter voor het filtermateriaal
$\psi_{c,b}$	=	Kritieke Shields parameter voor het bodemmateriaal
γ	=	Transport parameter ($\gamma = 0.625$)
V_g	=	Variatiecoëfficiënt voor de non-uniformiteit van het filter of bodemmateriaal gebaseerd op de hypothese van Grass ($V_g = 1 - d_{15}/d_{50}$)

Aan de hand van bovenstaande formule [2] en de geotechnische analyse en zeefkrommen van de ondergrond op het niveau van de geulbodem, gecombineerd met de in Tabel 1 bepaalde sortering voor de filterlaag, is de benodigde laagdikte van dit filter bepaald.

1.3 Ontwerp van de bodembescherming

1.3.1 Toplaag

Om erosie van de bodem tegen te gaan wordt een bodembescherming aangelegd met een toplaag van breuksteen. Voor het ontwerp van deze toplaag wordt de Izbash vergelijking toegepast. De bodem rondom de uitstroomopening van de duikers en de bodem van de nevengeul is vlak en zonder helling aangenomen, daarnaast is ook de oeverbescherming voor een 1:2 talud bepaald.

De invoer en het resultaat van deze berekening is weergegeven in Tabel 1-2 hieronder.

Tabel 1-2 Ontwerpberekening van de toplaag van de bodembescherming (op de vlakke bodem)

Parameter		Waarde			Eenheid
Materiaaleigenschappen					
Dichtheid van breuksteen	ρ_r	2600			kg/m^3
Dichtheid van water	ρ_w	1000			kg/m^3
Hoek van interne wrijving van breuksteen	Φ_r	40			Graden
Belastingsituatie					
Izbash factor voor verhoogde turbulentie	β_{iz}	1,4			-
Stroomsnelheid van het water	U_b	1	1,5	1,65	m/s
Uitkomst van de berekening (vlakke bodem)					
Factor voor de taludhelling van de bodembescherming	k_{slr}	1			-
Steendiameter	D_{50}	0,05	0,10	0,12	m
Nominale steendiameter	D_{n50}	0,04	0,08	0,10	m
Gemiddelde massa	M_{50}	0,14	1,58	2,79	kg
Minimaal benodigde gradering	-	45-125	63-180	90-250	mm
Minimale laagdikte	t_l	0,25	0,25	0,32	m
Uitkomt van de berekening (oeverbescherming op een 1:2 taludhelling)					
Factor voor de taludhelling van de oeverbescherming	k_{slr}	0,718			-
Steendiameter	D_{50}	0,06	0,14	0,17	m
Nominale steendiameter	D_{n50}	0,05	0,12	0,14	m
Gemiddelde massa	M_{50}	0,37	4,25	7,53	kg
Minimaal benodigde gradering	-	45-125	90-250	110-250	mm
Minimale laagdikte	t_l	0,25	0,32	0,35	m

Voor de bepaling van de benodigde gradering van de toplaag van de bodem- en oeverbescherming zijn standaardgraderingen gebruikt, de graderingen en bijbehorende steendiameters zijn weergegeven in Tabel 1-3 hieronder.

Tabel 1-3 steengradering en bijbehorende steendiameters

Steengradering	D_{50}
45-125 mm	80 mm
63-180 mm	114 mm
90-250 mm	160 mm
110-250 mm	170 mm

Zoals te zien in Tabel 1-2 hangt de toe te passen steengradering af van de stroomsnelheid van het water in de nevengeul, op de locatie van de bodembescherming.

Zie bijlage 1 voor de bepaling van de steendiameter onder de invloed van stroming. Zie bijlage 2 voor de bepaling van de D_{50} voor de 110-250 mm sortering.

Bodembescherming rondom de brugpijlers
Rondom de brugpijlers van de John S. Thompsonbrug wordt een stroomsnelheid van 1,5 tot 1,65 m/s verwacht. Op deze locatie wordt geadviseerd een steengradering van 90 – 250 mm met een laagdikte van 0,32 m aan te brengen op de bodem van de geul.

Indien het stromingsmodel uitwijst dat de stroomsnelheid van het water in de geul een snelheid van 1,65 m/s bereikt, wordt op het talud een steensortering van 110 – 250 mm aangeraden met een laagdikte van 0,35 m.

Bodembescherming rondom de in- en uitstroomopening van duikers
Rondom de uitstroomopening van de duikers in het tracé wordt een stroomsnelheid van 1 m/s verwacht. Op deze locatie voldoet een bodembescherming met een toplaag bestaande uit een 45-125 mm gradering. Ten behoeve van de maakbaarheid wordt hier een minimale laagdikte van 25 centimeter geadviseerd voor de toplaag.

1.3.2 Filterconstructie (granulair open filterconstructie)

Aan de hand van bovenstaande formule [2], gecombineerd met de benodigde steensortering zoals bepaald in Tabel 1-2, is de minimaal benodigde laagdikte van de filterlaag bepaald.

Hierbij is als uitgangspunt genomen dat de losse bodemdeeltjes niet mogen bewegen, hetgeen overeenkomt met een kritische Shield's parameter voor het bodemmateriaal van $\psi_{c,b} = 0{,}023$.

Zoals beschreven in formule [2] is de benodigde filterlaagdikte afhankelijk van de Shields parameter van de gradering van de filterlaag.

Rondom de pijlers van de Thompsonbrug

Voor de filterlaag van 110 – 250 mm geldt dat $D_{15,f} = 0{,}122$ m en $D_{50,f} = 0{,}175$ m, daarmee is $V_{g,f} = 1 - \frac{d_{15}}{d_{50}} = 0{,}35625$.

Voor de bodem is aangenomen dat $D_{15,b} = 0{,}261$ mm en $D_{50,b} = 0{,}379$ mm, daarmee is $V_{g,b} = 1 - \frac{d_{15}}{d_{50}} = 0{,}31135$.

Voor de benodigde filterdikte geldt dan dat:

$$D_F = d_{f50} * \alpha_d * ln\left(\frac{d_{f50}}{d_{b50}} * \frac{\Delta_f}{\Delta_b} * \frac{\Psi_f}{\Psi_{c,b}} * \frac{1 - \gamma V_{g,f}}{1 - \gamma V_{g,b}}\right)$$
$$= 0{,}175 * 0{,}82 * ln\left(\frac{0{,}175}{0{,}000379} * \frac{1{,}6}{1{,}65} * \frac{0{,}0307}{0{,}023} * \frac{1 - 0{,}625 * 0{,}356}{1 - 0{,}625 * 0{,}311}\right) = 0{,}92\ m$$

De minimaal benodigde filterlaagdikte voor een geometrisch open filter rondom de pijlers van de Thompsonbrug is daarmee berekend op 0,92 m.

1.3.3 Filterconstructie (gesloten filter met geotextiel)

Om het uitwassen van materiaal uit de bodem door de toplaag te voorkomen moet er een filterlaag worden aangebracht tussen de toplaag en de ondergrond. De samenstelling van deze filterlaag wordt bepaald door het type filter (geotextiel of granulair materiaal), de gradering van de toplaag en de samenstelling van de ondergrond.

Bij toepassing van een geotextiel als filter, kan deze direct op de ondergrond worden aangebracht. Alle toplaag graderingen als gepresenteerd in Tabel 1-2 kunnen direct op het geotextiel worden aangebracht, er is geen granulaire filterconstructie nodig tussen de toplaag en het geotextiel.

De maaswijdte van het geotextiel wordt bepaald door de samenstelling van de ondergrond, hiervoor geldt $O_{90} < D_{50,bodem}$. Aangenomen is dat de gradering van boorlocatie 20 aanwezig is op de locatie van de Thompsonbrug, met een D50 van 0,379 mm. Daarmee geldt dus dan O_{90} kleiner of gelijk moet zijn aan 0,379 mm.

1.4 Conclusie

Om de bodem van de nevengeul rondom de Thompsonbrug te beschermen tegen erosie onder de invloed van stroomsnelheden tot 1,65 m/s, moet een bodembescherming worden aangebracht.

Deze bodembescherming wordt uitgevoerd in een sortering van 110 – 250 mm met een D_{50} van 170 mm, zowel op de bodem als op het talud van de geul. De dikte van de bodembescherming rondom de brugpijlers krijgt een dikte van **0,4 m of 40 centimeter**, dit om de constructie van de bodembescherming te vereenvoudigen en de noodzaak tot onderhoud te verminderen.

Onder de bodembescherming rondom de brugpijlers dient een geotextiel te worden aangebracht, met een $O_{90} < 0{,}379$ mm.

Op locaties in de nevengeul waar een stroomsnelheid van 1 m/s wordt verwacht (rondom de in- en uitstroomopeningen van duikers), wordt de bodembescherming uitgevoerd in een sortering van 45 – 125 mm met een minimale dikte van **0,25 m of 25 centimeter**. Ook hier wordt de bodembescherming aangebracht op een geotextiel.

Bijlage 1 – Berekening steendiameter onder invloed van stroming

SCOUR PROTECTION DESIGN AGAINST FLOW (DUTCH METHOD)

INPUT:

Flow parameters:

Flow velocity **near bed/slope**: $U_b := 1.65 \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{s}^{-1}$

Angle of flow attack: $\psi := 90 \cdot \mathbf{deg}$

Bed / slope gradient: $\cot\alpha := 2$

Izbash factor: $\beta_{iz} := 1.4$

Material parameters:

Density of water: $\rho_w := 1000 \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{m}^{-3}$

Density of quarry rock: $\rho_r := 2600 \cdot \mathbf{kg} \cdot \mathbf{m}^{-3}$

Angle of repose for rock: $\phi_r := 40 \cdot \mathbf{deg}$

Rock layer thickness coeff.: $K_t := 0.95$

FORMULAE AND DERIVED PARAMETERS:

Relative density of rock: $\Delta_r := \frac{\rho_r}{\rho_w} - 1$ $\quad \Delta_r = 1.6$

Slope angle: $\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{1}{\cot\alpha}\right)$ $\quad \alpha = 26.6\ \mathbf{deg}$

Bed / slope factor - rock: $k_{slr} := \frac{\cos(\psi)\cdot\sin(\alpha) + \sqrt{\cos(\alpha)^2 \cdot \tan(\phi_r)^2 - \sin(\psi)^2 \cdot \sin(\alpha)^2}}{\tan(\phi_r)}$ $\quad k_{slr} = 0.718$

Quarry rock (Izbash) (*Dutch method*):

Min. average median rock diameter: $D_{50} := \beta_{iz} \cdot \frac{1}{k_{slr}} \cdot \frac{U_b^2}{2 \cdot g \cdot \Delta_r}$ $\quad D_{50} = 0.1691\ \mathbf{m}$

Average nominal median rock diameter: $D_{n50} := 0.843 \cdot D_{50}$ $\quad D_{n50} = 0.1425\ \mathbf{m}$

Minimum average median rock mass: $M_{50} := D_{n50}^3 \cdot \rho_r$ $\quad M_{50} = 7.5306\ \mathbf{kg}$

$$\text{Grading} := \begin{cases} \text{if } M_{50} \le M_{50a} \\ \quad \text{“5-40kg”} \\ \text{if } M_{50a} \le M_{50} < M_{50b} \\ \quad \text{“10-60kg”} \\ \text{if } M_{50b} \le M_{50} < M_{50c} \\ \quad \text{“40-200kg”} \\ \text{if } M_{50c} \le M_{50} < M_{50d} \\ \quad \text{“60-300kg”} \\ \text{if } M_{50d} \le M_{50} < M_{50e} \\ \quad \text{“300-1000kg”} \end{cases} \qquad t_l := \begin{cases} \text{if Grading} = \text{“5-40kg”} \\ \quad 2 \cdot K_t \cdot D_{n50a} \\ \text{if Grading} = \text{“10-60kg”} \\ \quad 2 \cdot K_t \cdot D_{n50b} \\ \text{if Grading} = \text{“40-200kg”} \\ \quad 2 \cdot K_t \cdot D_{n50c} \\ \text{if Grading} = \text{“60-300kg”} \\ \quad 2 \cdot K_t \cdot D_{n50d} \\ \text{if Grading} = \text{“300-1000kg”} \\ \quad 2 \cdot K_t \cdot D_{n50e} \end{cases}$$

Minimum required rock grading: $\text{Grading} = \text{“5-40kg”}$

Average rock layer thickness: $t_l = 0.38\ \mathbf{m}$

OUTPUT:

Loose quarry rock: $\text{Grading} = \text{“5-40kg”}$ $\quad D_{n50} = 0.1425\ \mathbf{m}$ $\quad M_{50} = 7.53\ \mathbf{kg}$ $\quad t_l = 0.38\ \mathbf{m}$

Bijlage 2 – Grindsortering 110 – 250 mm

MASS DISTRIBUTION OF ROCK GRADING 110 - 250 MM

INPUT:

Nominal Lower Limit of the rock grade: $NLL := 110 \cdot mm$ $y_{NLL} := 10\%$

Nominal Upper Limit of the rock grade: $NUL := 250 \cdot mm$ $y_{NUL} := 95\%$

DERIVED PARAMETERS AND FORMULAE:

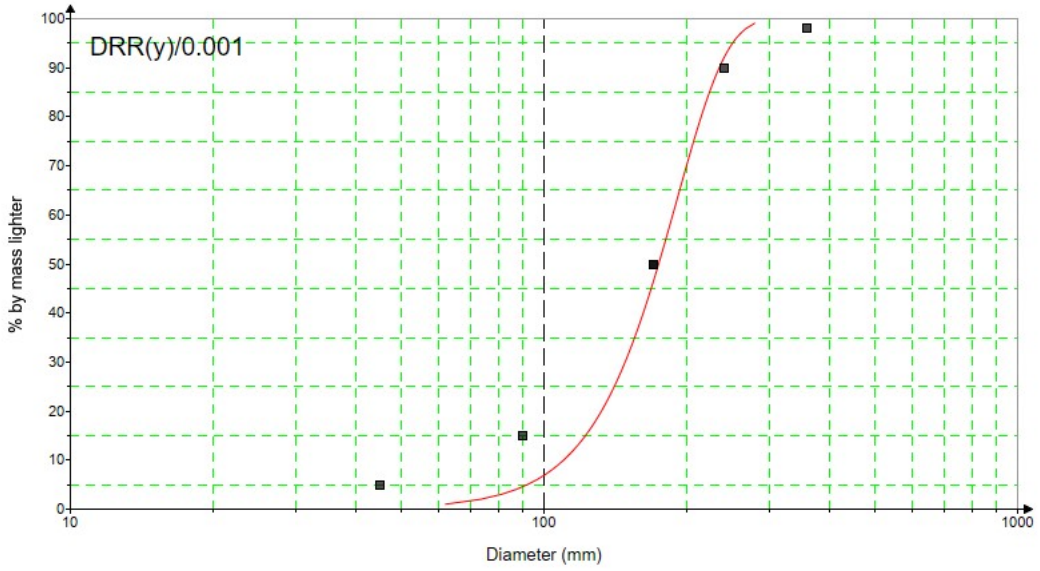
$$n_{RRM} := \frac{\log\left(\frac{\ln(1-y_{NUL})}{\ln(1-y_{NLL})}\right)}{\log\left(\left(\frac{NUL}{NLL}\right)^3\right)} = 1.36 \qquad n_{RRD} := 3 \cdot n_{RRM} = 4.078 \qquad D_{50} := NLL \cdot \left(\frac{\ln(1-y_{NLL})}{\ln\left(\frac{1}{2}\right)}\right)^{\frac{-1}{n_{RRD}}} = 174.6\ mm$$

Calculate M_y, when y is given (to calculate M_{10}, M_{15}, M_{85} etc.)

$$D_{RR}(y) := D_{50} \cdot \left(\frac{\ln\left(1-\frac{y}{100}\right)}{\ln\left(\frac{1}{2}\right)}\right)^{\frac{1}{n_{RRD}}}$$

$$YY(D) := 1 - \exp\left(\ln\left(\frac{1}{2}\right) \cdot \left(\frac{D}{D_{50}}\right)^{n_{RRD}}\right) \qquad YY\left(D_{RR}(30)\right) = 0.3$$

$y := 1, 2 .. 99$



Criteria to ensure internal stability of the rock grading:

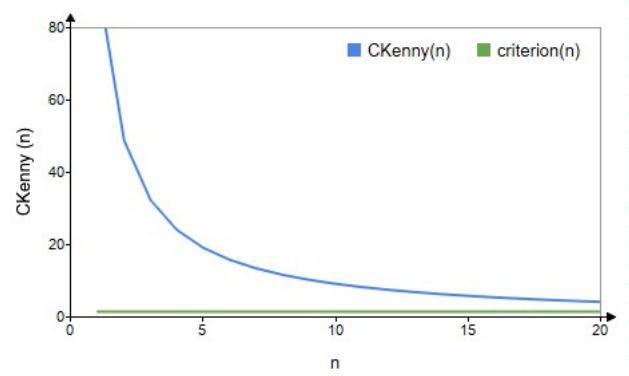
OR 1 : $F_D(n) := YY\left(D_{RR}(n)\right)$ $F_{4D}(n) := YY\left(4 \cdot D_{RR}(n)\right)$ $C_{Kenny}(n) := \frac{F_{4D}(n)}{F_D(n)} - 1$

OR 2 : $D_{10}/D_5 < 3$ **AND** $D_{20}/D_{10} < 3$ **AND** $D_{30}/D_{15} < 3$ **AND** $D_{40}/D_{20} < 3$

OR 3 : $D_{60}/D_{10} < 10$

OUTPUT:

1 : $n := 1 .. 20$ $\text{criterion}(n) := 1.3$ Criterion: $C_{Kenny} > 1.3$



2 : $\frac{D_{RR}(10)}{D_{RR}(5)} = 1.2$ $\frac{D_{RR}(20)}{D_{RR}(10)} = 1.2$ $\frac{D_{RR}(30)}{D_{RR}(15)} = 1.2$ $\frac{D_{RR}(40)}{D_{RR}(20)} = 1.2$

3 : $\frac{D_{RR}(60)}{D_{RR}(10)} = 1.7$