DEELRAPPORT - EROSIE BESCHERMENDE MAATREGELEN

Definitief Ontwerp

PROJECT

Meanderende Maas

PLANUITWERKING

28 juni 2023

Projectnummer	528-12T032858		
Projectomschrijving	Fase 1: Planuitwerking Meanderende Maas, Ravenstein -Lith		
Opdrachtgever	Waterschap Aa en Maas		
Contract-/besteknummer	SOK MeMa 21-07-2021		
Documentnummer	32858-ONT-00040 / WSB 4.4.02		
Versienummer	5.0	**Versiedatum**	28-6-2023

Naam en paraaf		
Opsteller	Gecontroleerd	Vrijgegeven
[redacted]	[redacted]	[redacted]

DOCUMENTHISTORIE		
Revisienummer	Revisiedatum	Omschrijving
1.2	8-3-2022	Verwerking interne review
1.3	13-5-2022	Concept versie Definitief Ontwerp
2.0	25-5-2022	Definitieve versie Definitief Ontwerp
2.2	23-9-2022	Concept versie; Revisie Definitieve versie Definitief Ontwerp o.b.v. opmerkingen RWS GPO + actualisaties t.g.v. wijzigingen van ontwerpnota DO Rivier (concept OL4) waarin de actualisaties n.a.v. cultuurhistorie, archeologie, omgeving, ecologie en rivierkunde zijn doorgevoerd conform vastgestelde wijzigingen met IPM.
3.0	7-10-2022	Definitieve versie 3.0; Verwerken laatste opmerkingen op versie 2.2.
4.0	3-2-2023	Wijziging kaart Vlak van Vrije Ruimte o.b.v. opmerking WSAM over begrenzing VvR in meander DU t.b.v. intredelijn
5.0	28-6-2023	aanpassing sortering bestorting in h 5.10 van 45-125 naar 63-180 cf eis Bevoegd Gezag--door Flach

INHOUDSOPGAVE

1. INLEIDING EN ALGEMENE PROJECT INFORMATIE 4

1.1. Doel van dit document 4
1.2. Leeswijzer 4
1.3. Algemene project informatie 4
1.4. Onderscheid eindbeeld en tussentijdse situatie 5

2. ONTWERPUITGANGSPUNTEN 7

2.1. Toegestane erosie binnen de Vlakken van Vrije Ruimte 7
2.2. Uitgangspunten hydraulische belastingen 8
2.3. Uitgangspunten nautische belastingen 10
2.4. Uitgangspunten sterkte 11

3. SYSTEEMANALYSE 13

3.1. Vlakken van Vrije Ruimte DO 13
3.2. Optredende belastingen DO 15
3.3. Aandachtlocaties oever- en bodembescherming DO 20

4. REDENEERLIJN EROSIE BESCHERMENDE MAATREGELEN 22

5. ONTWERP EROSIEBESCHERMEDE MAATREGEL 23

5.1. Instroomdrempel Appeltern 23
5.1. Instroomdrempel en duiker Diedensche Uiterdijk oost 25
5.2. Instroomdrempel en duiker Diedensche Uiterdijk west (Rulstraat) 27
5.3. Instroom meander De Waarden 29
5.4. Kades recreatievaargeul meander De Waarden 31
5.5. Aansluiting Maas - Burgemeester Delenkanaal 34
5.6. Geulen in Lelyzone Ossekamp en De Waarden 36
5.7. Uitstroom westelijke geul Ossekamp 40
5.8. Instroom geul Maasbommel west 42
5.9. Uitstroom geul Maasbommel west 45
5.10. Fietspad geul Maasbommel West 47
5.11. N329 achter instroomdrempel Appeltern 49
5.12. Autobrug in De Waarden 50
5.13. Veerweg Maasbommel en omgeving 51

6. ONTWERP SAMENVATTING 53

REFERENTIES 54

BIJLAGEN 55

1. INLEIDING EN ALGEMENE PROJECT INFORMATIE

1.1. Doel van dit document

Dit document betreft het deelrapport Analyse erosie beschermende maatregelen. Het doel van dit document is het presenteren en onderbouwen van het ontwerp voor de erosie beschermende maatregelen binnen het Definitief Ontwerp (DO) voor het rivierdeel van het project Meanderende Maas. Het rivierdeel omvat de ingrepen binnen de uiterwaarden in het projectgebied (subsystemen Rivier en Meander). Het deelrapport bouwt voort op het Voorlopig Ontwerp (VO) en onderbouwt de gemaakte ontwerpkeuzes en doorgevoerde ontwerpoptimalisaties in het DO. Dit deelrapport dient als bijlage bij de ontwerpnota Rivier en kan zodoende niet zelfstandig gelezen worden.

1.2. Leeswijzer

Hoofdstuk 2 presenteert de gebruikte ontwerpuitgangspunten en hydraulische uitgangspunten. Hoofdstuk 3 geeft een beschrijving van het systeem (systeemanalyse) waaruit erosiegevoelige locaties volgen (hierna vermeld als aandachtslocaties). De gebruikte redeneerlijn welke gebruikt is om het type erosie beschermende maatregel te bepalen voor de aandachtslocaties is gegeven in hoofdstuk 4. Daarna worden in hoofdstuk 5 achtereenvolgens de erosie beschermende maatregelen voor de betreffende de aandachtslocaties uitgewerkt. Het deelrapport sluit af met een samenvatting van het ontwerp in hoofdstuk 6.

1.3. Algemene project informatie

Het project 'Planuitwerking van de Meanderende Maas' behelst de planuitwerking van 26 km versterking van de dijk tussen Ravenstein en Lith, het treffen van verruimingsmaatregelen in de Maas tussen genoemde plaatsen en het realiseren van het NatuurNetwerkBrabant (NNB) door ontwikkeling van een grote eenheid van rivier- en moeraslandschap en realiseren van KRW- en PAGW doelen.

De aanleiding voor de dijkversterking en rivierverruimingsmaatregelen zijn de nieuwe wettelijke veiligheidsnormen uit 2017. Hierdoor is het nodig om de dijk tussen Lith en Ravenstein te verbeteren waardoor 270.000 bewoners en bedrijven achter de Brabantse dijk en omgeving beter beschermd zijn tegen overstroming bij hoog water in de Maas.

Het projectgebied omvat ca. 2650 hectare. Het gaat hierbij niet enkel om de dijk tussen het Brabantse Ravenstein en Lith, maar ook de uiterwaarden aan beide zijden van het 18 kilometer lange Maastraject. Aan de Gelderse zijde voldoet de dijk vooralsnog aan de vigerende normen. De Gelderse dijk is dus geen onderdeel van het project.

Het inrichtingsdoel van het Rivierdeel van project Meanderende Maas is om de verbetering van waterveiligheid te laten samengaan met een investering in de kwaliteit van natuur en landschap ter realisering van het Natuur Netwerk Brabant. Het doel is om een ecologisch, economisch en sociaal vitaal gebied te ontwikkelen. Voor het buitendijkse gebied zijn de volgende hoofduitgangspunten aangehouden:

- Realiseren van een substantiële waterstandsverlaging door rivierverruiming;
- Realiseren van het NNB, rivier- en moeraslandschap, KRW-waarden en PAGW doel betreffende riviernatuur van goede kwaliteit;
- Herstel van de oude meanders en verlaging van de uiterwaarden met het oorspronkelijk geomorfologisch landschap als basis;
- De ruimtelijke impact van de nieuwe meanders en de gekanaliseerde Maas dient in evenwicht te blijven;
- Bijdragen aan recreatieve mogelijkheden, beleving, ruimtelijke kwaliteit.

Figuur 1-1: Eindbeeld met herstelde Meanderbogen met ondiep open water en rietmoeras.

Figuur 1-2: Inrichtingskaart van het Voorlopig Ontwerp; 26 km versterking van de dijk tussen Ravenstein en Lith en inrichting van de uiterwaarden.

1.4. Onderscheid eindbeeld en tussentijdse situatie

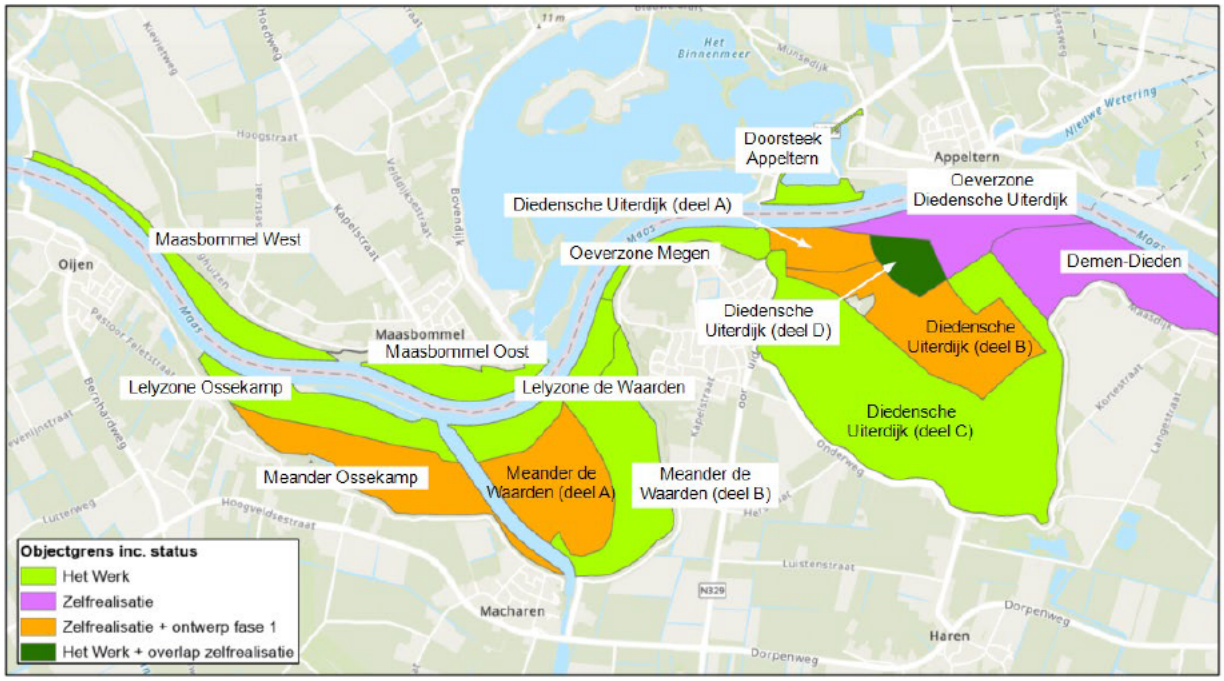
Het projectgebied van het rivierdeel van het project Meanderende Maas omvat de objectgrenzen zoals getoond in onderstaand figuur. Hierin is in kleur onderscheid gemaakt naar de status van de verschillende deelgebieden. Een deel van de gebieden is onderdeel van het Werk (Scope van de werkzaamheden die opdrachtnemer in fase gaat realiseren op grond van de Realisatieovereenkomst) en een deel van de objecten is onderdeel van de Zelfrealisatie (Werkzaamheden t.b.v. het project Meanderen Maas die wel onderdeel zijn van de Planuitwerking maar niet van het Werk). Het eindbeeld

voor meanderende Maas wordt gevormd door de deelgebieden binnen Het Werk als voor de Zelfrealisatie (de oranje, de licht en donkergroen deelgebieden).

In dit deelrapport wordt onderscheid gemaakt tussen het eindbeeld en de tussentijdse situatie. Het eindbeeld omvat de inrichting van het gebied na realisatie van het project Meanderende Maas, ofwel de deelgebieden binnen Het Werk en de deelgebieden in Zelfrealisatie. De tussentijdse situatie omvat de inrichting van het gebied na realisatie van de deelgebieden binnen Het Werk.

In dit deelrapport is de benodigde erosiebescherming voor het eindbeeld ontworpen. De vergunning/projectplannen worden eind 2022 aangevraagd voor enkel Het Werk, ofwel de tussentijdse situatie. Om na te gaan of de tussentijdse situatie (het nog niet uitvoeren van de zelfrealisatie gebieden) tot andere belastingen of een ander ontwerp leidt, is naast de controle op het eindbeeld ook gecontroleerd wat de belastingen zijn in de tussentijdse situatie. Een toelichting op de rivierkundige situatie in deze tussentijdse situatie is opgenomen in deelrapport rivierkundige beoordeling, hoofdstuk 7. In dat hoofdstuk is een rivierkundige toetsing uitgevoerd van de situatie na uitvoering van het Werk (tussentijdse situatie zonder zelfrealisaties).

Binnen de tussentijdse situatie is alleen 'Het Werk' uitgevoerd en de werkzaamheden binnen de zelfrealisatie deelgebieden nog niet. Deze deelgebieden betreffen voornamelijk de diepe uiterwaarden van Ossekamp, De Waarden en de Diedensche Uiterdijk. Het enige deelgebied binnen de tussentijdse situatie die grenst aan het zomerbed is Diedensche Uiterdijk deel A. Doordat de meeste verschillen tussen het volledige DO en de tussentijdse situatie zich in de diepere uiterwaarden bevinden is de impact van de zelfrealisatie gebieden op de rivierkundige effecten gering. De effecten worden in grote mate bepaald door de deelgebieden binnen Het Werk.



Figuur 1-3: Overzicht van deelgebieden (objecten) ontwerp Rivier. De deelgebieden binnen de realisatieopdracht (het Werk) zijn lichtgroen en donkergroen gekleurd, de deelgebieden in zelfrealisatie zijn oranje en paars gekleurd. Voor het donkergroene gebied is een overlap tussen de zelfrealisatie ODU en het Werk.

2. ONTWERPUITGANGSPUNTEN

Het project Meanderende Maas leidt tot veranderingen in het stroombeeld in de uiterwaarden van de Maas. Deze veranderingen kunnen leiden tot ongewenste erosie van de bestaande bodem of bestaande oevers van geulen, strangen en natuurvriendelijke oevers. Tevens kan door deze veranderingen ongewenste erosie optreden langs bestaande objecten in het projectgebied. Daar waar die erosie tot ongewenste schade leidt, is oever- of bodembescherming vereist om deze schade te voorkomen.
Ook worden binnen het project Meanderende Maas nieuwe geulen, drempels en kades gerealiseerd. Erosie langs de bodem of oevers van deze geulen of erosie van deze kades en drempels kan leiden tot ongewenste schade aan deze objecten of aan omliggende objecten. Om dit te voorkomen is oever- en/of bodembescherming vereist.
Erosie in het buitendijks gebied kan ook een directe of indirecte invloed hebben op de veiligheid van de waterkeringen. Direct wanneer bijvoorbeeld hoge stroomsnelheden optreden langs de waterkering en indirect wanneer wijzigingen in de uiterwaard leiden tot significant effecten op de waterstanden, stroomsnelheden en resulterende erosie in het gebied.

De volgende specifieke eisen zijn in het project vereist omtrent erosie bescherming:

- SES-100: De nevengeul dient gedurende de levensduur niet zijdelings te verplaatsen richting de primaire waterkering en tenminste buiten de beschermingszone van de primaire waterkering te blijven; [1]
- SES-101: De nevengeul dient gedurende de levensduur niet zijdelings te verplaatsen richting het zomerbed van de rivier, waardoor er kans bestaat dat de nevengeul een kortsluiting veroorzaakt met het zomerbed;[2]
- SES-103: De aanpassingen in de uiterwaard dienen niet te leiden tot bodemerosie langs de primaire waterkering;
- SES-104: De stabiliteit van belangrijke, te handhaven, constructies in de uiterwaard mag niet verminderen door erosie;
- SES-123: De haventoegang Oss dient scheepvaartklasse CEMT-Va, diepgang=3,5 m, lengte= 110 m, breedte= 11,4m vlot en veilig te verwerken;
- SES-298: Alle objecten in het Buitendijks watersysteem binnen het areaal van Rijkswaterstaat die bijdragen aan kerntaken RWS moeten duurzaam, doelmatig en kosteneffectief onderhouden kunnen worden door RWS vanuit technisch-, omgevings-, financieel- en juridisch perspectief;
- SES-314: De instroomopeningen van Meanders en geulen, die op de waterlijn liggen, dienen erosiebestendig te zijn en geschikt voor de passage van grazers indien de 'eilandjes' worden begraasd;
- SES-671: Voor civiele maatregelen (bijv. NVO's of nevengeulen) dient helder te zijn wat de maximale toegestane erosie is, en deze dienst vastgelegd te zijn in een erosielimietlijn. Deze lijn dient opgenomen te worden in het projectplan Waterwet, waarna deze na vaststelling overgenomen wordt op de waterstaatslegger.

2.1. Toegestane erosie binnen de Vlakken van Vrije Ruimte

Om te analyseren of erosie tot ongewenste schade leidt is de methodiek van de Legger Rijkswaterstaatswerken 2021 [1] gehanteerd. Hierin staat dat beperkte erosie van de bodem of oevers van geulen, strangen en natuurvriendelijke oevers is toegestaan binnen het Vlak van Vrije Ruimte (VVR). Uitgangspunt voor project Meanderende Maas is dan ook dat beperkte erosie binnen deze VVR

[1] [2] Deze eisen zijn afkomstig uit het rivierkundig beoordelingskader van RWS. De eisen betreffen eisen aan begrenzing van het horizontale vlak waar binnen erosie plaats vindt. Erosie heeft ook een verticale component. Hier wordt in de eis niet over gesproken. De marge die voor de verticale component aangehouden kan worden is dat er een stabiel talud in stand moet blijven buiten de opgelegde begrenzing, ofwel een 1:3 talud.

is toegestaan. Erosie (tot) buiten het VVR is niet toegestaan en dient te worden voorkomen middels erosie beschermende maatregelen (indien het risico dat er erosie ontstaat op deze locaties reëel is).

In de Legger Rijkswaterstaatswerken is gewerkt met erosielimietlijnen en het vlak van vrije ruimte (VVR) [1]. Met de erosielimietlijnen en het VVR is aangegeven binnen welk vrijheidsveld een dynamisch object maximaal mag bewegen, zonder dat oevererosie of zijdelingse verplaatsing leidt tot een hoger waterveiligheidsrisico of overlast aan belangen van derden. Tevens mag erosie niet leiden tot functieverlies van een object. Geulen en strangen zijn met een specifiek doel of functie aangelegd, zoals hoogwaterveiligheid (verlaging van de waterstanden tijdens hoogwater) of een bijdrage leveren aan landelijke natuurdoelen vanuit de bv. Kaderrichtlijn Water of Natura 2000.
De grens die niet mag worden overschreden wordt de limietwaarde of erosielimietlijn genoemd. Dit is bijvoorbeeld de grens die gevormd wordt door de beschermingszone van een waterkering of een perceelgrens van een particuliere eigenaar.

Naast ongewenste erosie buiten het VVR is erosie aan of rondom bestaande/nieuwe (statische) objecten niet gewenst. Op locaties waar erosie verregaande gevolgen kan hebben, wordt geen erosie toegestaan. Dit geldt bijvoorbeeld ter plaatse van de landhoofden van een brug, ter plaatse van in- en uitstroomdrempels of ter plaatse van in- en uitstroomopeningen van nevengeulen. De positie en dimensies van in- en uitstroomopeningen van nevengeulen en dienen vast te liggen om de werking van het riviersysteem te waarborgen.

In paragraaf 3.2 zijn de vlakken van vrije ruimte in het projectgebied toegelicht en gepresenteerd.

2.2. Uitgangspunten hydraulische belastingen

Hydraulische belastingen welke kunnen leiden tot ongewenste erosie kunnen het gevolg zijn van stroming, windgolven en scheepvaart. Voor rivieren is vaak de combinatie van belastingen door stroming en scheepvaart maatgevend [2]. Achtereenvolgens zijn bovenstaande belastingen in dit hoofdstuk behandeld.

2.2.1. Stromingsbelasting

In relatie tot stroming kunnen maatgevende hydraulische condities zowel optreden bij hoogwater als op het moment van overstromen van een kade, drempel of oever op het moment dat een relatief kleine waterschijf (ca. 30-50 cm) over een oppervlak stroomt.

2.2.1.1. Debiet

Het debiet in de Maas is variabel en sterk afhankelijk van de mate van regenval. Op basis van meetgegevens tussen 1991-2015 [3] volgt bij Lith een jaargemiddeld debiet van 307 m^3/s en een zomer gemiddelde van 169 m^3/s. Als maatgevende afvoer wordt bij project Meanderende Maas een debiet van 4.118 m^3/s bij Borgharen aangehouden. Dit debiet heeft een herhalingstijd van 3.000 jaar. De kans dat een debiet van tenminste 4.118 m^3/s optreedt gedurende de levensduur (van 50 jaar) is kleiner dan 5%. Deze 1/3000 jaar afvoer geldt als de hoogwaterreferentie voor vergunningverlening langs de bedijkte Maas conform het Rivierkundig beoordelingskader van RWS.

De HR (WTI 2017) hanteert een topduur van de gestandaardiseerde hoogwatergolf (trapezium vormige afvoergolf) van 90 uur voor deeltraject 5 (kmr 180-220) van de Maas. Rondom de top stijgt de waterstand in 60 uur van het niveau -0,5 (overeenkomstig ca 3300 m^3/s) tot de piekwaarde van 0 m (overeenkomstig 4118 m^3/s), en daalt daarna van de piekwaarde tot het niveau van -0,1 m (overeenkomstig 3800 m^3/s) in 30 uur.

Met behulp van het 2D-stromingsmodel WAQUA zijn stroomsnelheden in het projectgebied bepaald voor verschillende stationaire debieten: 1.250, 1.500, 2.000, 2.300, 4.118 m^3/s[3]. De herhalingstijden van deze debieten zijn respectievelijk 1/4 (4 dagen/jaar), 1/2 (2 dagen/jaar), 5, 10 en 3000 jaar [4]. De debieten zijn opgelegd ter plaatse van Borgharen, bovenstrooms van het projectgebied waar de Maas Nederland binnen stroomt. Door topvervlakking van de afvoergolf zijn de daadwerkelijk optredende debieten ter plekke van het projectgebied lager dan de optredende debieten bij Borgharen. Met dit effect is rekening gehouden in de WAQUA-berekeningen.

De duur van de verschillende mogelijke hoogwatergolven, afhankelijk van de grootte van het debiet, is niet gespecificeerd voor de Maas. Echter, na analyse van de hoogwatergolven in de afgelopen 30 jaar (incl. hoogwaters 1993, 1995 en 2021 met een debiet tot ca. 3000 m^3/s) is aangenomen dat de duur van een hoogwatergolf in de orde grootte van 5 tot 10 dagen is. Tevens wordt een conservatieve (hoge) snelheid van 2 cm per uur aangehouden voor zowel stijgend en zakkend hoogwater op de Maas in het projectgebied. Ook deze snelheid is bepaald o.b.v. een analyse van de hoogwatergolven in de afgelopen 30 jaar.

2.2.1.2. Overstromen

Niet enkel extreme afvoeren kunnen leiden tot hoge stroomsnelheden en overeenkomstige ongewenste erosie in de uiterwaard, maar ook het moment van overstromen van een kade, drempel of oever kan leiden tot ongewenste, lokale hoge stroomsnelheden en turbulentie.

Voor een indicatie van de optredende hydraulische belastingen bij overstromen van kades, drempels of oevers zijn handberekening gemaakt op basis van overlaatformules [5]. Hierbij is gerekend met een kritisch verval wat mogelijk kan gaan optreden (afhankelijk van stijgsnelheid of lokale situatie van opvullen van de achterliggende uiterwaard).

2.2.1.3. Turbulentie

De dieptegemiddelde stroomsnelheden welke volgen uit de berekeningen met WAQUA zijn niet gelijk aan de reële stroomsnelheden in het veld. In de berekeningen voor erosie beschermende maatregelen is een turbulentie-factor k_t^2 toegepast om een vertaling te maken van dieptegemiddeld naar reële stroomsnelheden. Afhankelijk van de locatie is een inschatting gemaakt van deze factor. De kwalitatieve beschrijving uit The Rock Manual [6] (Tabel 5.53) is hiervoor aangehouden, zie Tabel 2-1.

Tabel 2-1: Turbulentiefactoren

Beschrijving	k_t^2 (−)
Uniforme stroming (turbulentieniveau = 10%)	1,0
Verhoogde turbulentie in buitenbocht (turbulentieniveau = ~20%)	1,5
Hoge turbulentie in scherpe bocht (turbulentieniveau = ~30%)	2,0
Zeer hoge turbulentie of watersprong (turbulentieniveau > 30%)	>2,0
Schroefstraal	5,2

2.2.2. Windgolfbelasting

Wind gegenereerde golven kunnen leiden tot ongewenste erosie aan de oevers of bodem van geulen of ongewenste erosie aan kades en drempels. Voor de bepaling van de in het projectgebied aanwezige wind gegenereerde golven is gebruik gemaakt van de Young & Verhagen methode [6]. Hierbij is voor de

[3] De debieten zijn vastgesteld met de rivierkundigen van RWS-ZN en vastgelegd in de TUN Rivier. De debieten z j zodanig bepaald dat met deze afvoeren de effecten op scheepvaart (dwarsstroming en morfologie), beheer en onderhoud (schade en morfologie) en hoogwaterveiligheid (opstuwing, waterstandsdaling) kan worden bepaald conform de aspecten uit het rivierkundig beoordelingskader.

windsnelheid uitgegaan van de EN1991 (Eurocode I). Hieruit volgt voor de projectlocatie een maatgevende windsnelheid van 24,5 m/s. De belangrijkste parameter voor wind gegenereerde golven is de effectieve strijklengte. Deze is in riviergebieden vaak klein waardoor windgolven vaak niet maatgevend zijn voor ontwerpdoeleinden.

2.3. Uitgangspunten nautische belastingen

2.3.1. Maatgevende schepen

De maatgevende schepen op de Maas, het Burgermeester Delenkanaal en in de recreatievaargeul in meander De Waarden worden in deze subparagraaf besproken. Tabel 2-2 geeft een overzicht van de dimensies van de ontwerpenschepen weer.

2.3.1.1. Afmetingen

In de Richtlijnen Vaarwegen 2020 [7] staan de CEMT-schepen en de recreatievaart ingedeeld in klassen. Zowel de Maas als het Burgemeester Delenkanaal is een vaarweg van CEMT-klasse Va. Bij uitzondering varen er soms tweebaksduwstellen (lang) op zowel het Burgemeester Delenkanaal als de Maas, dit type schip is echter niet maatgevend vanwege de lage vaarfrequentie. In de recreatievaargeul is enkel recreatievaart aanwezig.

De kleinste officiële klasse recreatievaart volgens Richtlijnen Vaarwegen 2020 [7] is M-D; motorboten met een lengte tot 12,0 m en breedte tot 3,75 m. De Richtlijnen Vaarwegen 2020 heeft geen aparte klasse voor sloepen (BRTN-classificering klasse F). Voor het ontwerprecreatieschip in meander De Waarden wordt daarom afgeweken van de Richtlijnen Vaarwegen 2020. De dimensies van de bootklasse M-D zijn namelijk niet in overeenstemming met de te verwachtten sloepen. Daarom is voor de sloep een ontwerpschip gedefinieerd die van toepassing zijn op de nieuwe geul om oeverdimensionering te voorkomen. Voor details wordt verwezen naar de recreatievaargeul rapportage [8].

2.3.1.2. Vaarsnelheid

Beroepsvaart op de Maas vaart circa 8 knopen (14,8 km/h) [9]. Voor het ontwerp is op basis hiervan een vaarsnelheid van 4,2 m/s (15 km/u) aangehouden. De maximale vaarsnelheid aan de Burgemeester Delenkanaalzijde is 2 m/s (7 km/u). De maximale toegestane vaarsnelheid van de sloepen in de recreatievaargeul is 1,1 m/s (4 km/u) [8]. Voor een robuust ontwerp wordt ook gekeken naar een toeslag van 30% op de toegestane vaarsnelheid van sloepen.

Tabel 2-2: Maatgevende scheepsafmetingen

Parameter	Sloepen [8]	CEMT-klasse Va [7]
lengte [m]	7,0	110 - 135
breedte [m]	3,0	11,4
diepgang [m]	1,0	1,8 - 3,5
scheepshoogte [m]	0,75-1,5	-
laadvermogen [t]	-	2.900 - 3.735
hoofdschroefvermogen [kW]	0.75	1.375 - 1.750
boegschroefvermogen [kW]	-	435 - 705
diameter schroef [m]	0,4	1,8
gebaseerd op	11 persoonssloep	Groot Rijnschip

2.4. Uitgangspunten sterkte

2.4.1. Sterkte klei- en grasbekleding

Een grasbekleding kan een doeltreffende bekledingsconstructie zijn om de taluds te beschermen tegen hydraulische belastingen. De weerstand tegen erosie wordt geleverd door de samenhang van gras (toplaag) en klei (onderlaag). Een grasmat ontwikkelt zich alleen goed boven water en is bestand tegen een kortstondige overstroming, conform CUR201 [2].

2.4.1.1. Stroming

Afhankelijk van de kwaliteit van de grasmat, kan een grasbekleding stroomsnelheden tot 1,5 à 2,5 m/s weerstaan gedurende 100 uur achter elkaar, conform CUR201 [2]. De Rock Manual presenteert voor klei met gras een waarde van 2,0 m/s [6], dezelfde orde grootte, maar zonder een tijdsduur van de belasting. Voor een versterkte grasmat op klei, met bv. geotextiel, presenteert de Rock Manual een kritieke stroomsnelheid tot 3,0 m/s. Voor het ontwerp is een waarde van 2,0 m/s (gedurende 100 uur) aangehouden als kritieke stroomsnelheid voor klei met een graszode met gesloten begroeiing en een hoge worteldichtheid. Hierbij is de worteldichtheid van de grasbekleding[4], wat betreft sterkte, belangrijker dan de graslengte. Een grote graslengte is voor beheerder echter lastig omdat bij grote graslengte gaten en scheuren niet zichtbaar zijn.

Voor klei zonder grasbekleding geven de CUR201 [2] (blz. 38), en de Rock Manual [6] (blz. 657) beiden tabellen met een range kritieke stroomsnelheden afhankelijk van het type klei. Een overzicht daarvan is opgenomen in Tabel 2-3. Voor het ontwerp is een kritieke stroomsnelheid van 0,8 m/s genomen voor klei op onbeschermde klei-taluds onder water.

Tabel 2-3: Kritieke stroomsnelheden zand en klei

Grondsoort	Kritieke stroomsnelheid (m/s)
Zand	0,30
Zandige klei	0,40
Slappe klei	0,60
Redelijk vaste (compacte) klei	0,80
Vaste klei	1,20
Stijve klei	1,50

2.4.1.2. Golven

Grasbekledingen kunnen golfhoogtes weerstaan tot ongeveer 1,5 m afhankelijk van de opbouw van de onderlaag en doorworteling van de grasmat. In principe zijn windgolven in het rivierengebied tijdens een hoogwater niet hoger dan enkele decimeters. Een goede, erosiebestendige grasbekleding is dan altijd toereikend [10]. Bij klei zonder grasmat of de overgang van kale klei onder water naar geschikte grasmat boven water kan een dergelijke golfhoogte wel schade (ongewenste erosie) veroorzaken.

Voor een golfhoogte kleiner dan 0,4 m is in enkele etmalen bij een grasmat van gedegen kwaliteit (goede doorworteling en voldoende dikke onderlagen) zeer weinig erosie (bovengrondse delen intact) te verwachten [10]. Bij een golfhoogte van 0,4 – 1,0 m is in enkele etmalen enkel zeer beperkte erosie (bovengrondse delen binnen 1 etmaal sterkt aangetast) te verwachten.

Voor het ontwerp is een conservatieve kritieke golfhoogte van 0,4 m aangenomen voor een goede, erosiebestendige grasbekleding. Een dergelijke grasbekleding bevat een graszode met een gesloten

[4] TAW, erosiebestendigheid grasbekleding, TR 12, augustus 1998

begroeiing en een hoge worteldichtheid en een onderlaag van minimaal matig erosiebeschermende klei (*schrale klei*, voormalig erosieklasse 2) en een dikte van 0,8 meter [11].

2.4.2. Sterkte oevervegetatie

Vegetatie kan een duurzame, effectieve en kosten efficiënte erosiebeschermende maatregel zijn om oevers te verdedigen tegen hoge hydraulische belastingen. Een oevervegetatie zorgt voor een afname van de stromingsbelasting op de onderliggende kale klei. Tevens zorgt de wapenende werking van de ondergrondse delen van de vegetatie voor weerstand tegen erosie. De toelaatbare stroomsnelheid op de bodem kan bij een 5 meter brede rietkraag bijvoorbeeld met een factor 2,5 worden verhoogd [2].

2.4.3. Sterkte steenbestorting en zuilen

Wanneer de belasting te hoog is voor klei- en/of grasbekleding met of zonder een versterkte oevervegetatie, kan gekeken worden naar steenbestorting of betonelementen. De stabiliteit van dit soort bekleding is afhankelijk van de kritische schuifspanning in relatie tot de optredende belasting. Daarnaast is de stabiliteit afhankelijk van enkele ontwerp dimensies. Voor het ontwerp van harde bekleding wordt, zoals het ROW [12] voorschrijft, gekeken naar de steen stabiliteit formules uit sectie 4.3.4 van de Rock Manual [6].

3. SYSTEEMANALYSE

3.1. Vlakken van Vrije Ruimte DO

Voor het Definitief Ontwerp zijn conform de limietwaarden uit *Legger Rijkswaterstaatswerken* [1] Vlakken van Vrije Ruimte (VVR) opgesteld. Met de VVR wordt aangegeven binnen welk vrijheidsveld een dynamisch object maximaal mag bewegen, zonder dat oevererosie of zijdelingse verplaatsing leidt tot overlast/schade aan belangen/eigendommen van derden of leidt tot functieverlies van het object. Met de VVR wordt inzichtelijk op welke erosiegevoelige locaties erosie ongewenst is. Als er binnen het VVR nauwelijks tot geen ruimte is op een erosiegevoelige plek dan is bescherming noodzakelijk.

Binnen het project Meanderende Maas wordt afgeweken van twee van de algemeen gestelde limietwaarden uit [1] voor het bepalen van de VVR, respectievelijk:

1. *Zomerbed (alleen van toepassing op geulen); 50 m uit het vlak "zomerbed" uit de BKN. Indien een geul of strang binnen de 50 m zone is ontworpen/vergund, dan de contour van het ontwerp uit het Projectplan aanhouden.*
   RWS Team Uiterwaarden eist, conform de recente versie van de Legger Rijkswaterstaatwerken, dat de breedte tussen het zomerbed en de geulen morfologisch voldoende veilig is zodat schade aan de oever voorkomen wordt. Als veilige afstand rekent RWS een breedte van 50 m. Bij een breedte minder dan 50 m moet aangetoond zijn dat nadelige morfologische effecten uitblijven (bv. door beschermende maatregelen) en de oever veilig is.
   In het DO is de afstand tussen zomerbed en de KRW geulen in Lelyzone De Waarden en Maasbommel West op delen kleiner dan 50 m. Er is in het DO een afstand van 25 m aangehouden (in VO was dit nog op sommige locaties slechts 10 m). Het aanhouden van een afstand van 50 m is niet mogelijk vanwege de strijdigheid met (1) het in acht nemen van de KRW eisen qua geulprofiel en (2) de gewenste stroomvoerendheid van de geul vanwege de doelstelling voor waterstandsdaling. Het vlak van vrije ruimte van de geulen ligt ten minste 25 m uit de oeverlijn van de Maas. Om de stabiliteit van de oevers van de geul Maasbommel West en de instroomdrempels bij de geulen in Lelyzone De Waarden te waarborgen moeten erosiebeschermende maatregelen worden gerealiseerd. Deze maatregelen zorgen ervoor dat de oevers morfologisch stabiel zijn.
2. *Generieke begrenzing NVO's (Natuurvriendelijke Oevers); 75 meter gerekend vanaf de insteek (specifiek voor Maas).*
   In tegenstelling tot deze limietwaarde wordt de begrenzing van NVO's binnen project Meanderende Maas bepaald aan de hand van het te verwachten evenwichtsprofiel van de NVO, ook wel maximale erosieafstand. Dit evenwichtsprofiel volgt uit de fungerende vergunning van de NVO of wordt bepaald met behulp van de formules in sectie 4.6 uit [13]. Om deze begrenzing wordt een 10 m bufferzone gelegd om kortsluiting tussen de NVO en een (neven)geul te voorkomen. In het ontwerpproces van de locatie van de geulen is de som van de NVO-begrenzing en de 10 m bufferzone als randvoorwaarde gesteld. Wanneer deze som groter is dan 25 m, dan wordt de insteek van de geul tenminste buiten de NVO-begrenzing plus 10 m bufferzone gelegd.

Onderstaand is per deelgebied een toelichting gegeven op het opgestelde VVR. De Vlakken van Vrije Ruimte zijn weergegeven in Figuur 3-1. Er is in bijlage H ook een figuur opgenomen met het VVR voor elk deelgebied.

3.1.1. De Waarden

De VVR van de meanderboog in de Diedensche Uiterdijk is aan de dijkzijde begrensd door de buitenbeschermingszone van de dijk. Verdere erosie van de meanderboog richting de dijk is hier onder geen voorwaarde toegestaan. Verder wordt de bewegingsruimte van de meanderboog begrensd door particuliere percelen, verharde wegen en het zomerbed van de Maas. Na toepassing van deze limietwaarden zou de VVR van de Diedensche Uiterdijk bijna het gehele centrale deel van de uiterwaard

(tot aan de Rulstraat en de enkele particuliere percelen) kunnen omvatten. Erosie van de meander en rietmoerassen leidt in dit centrale deel niet tot schade of functieverlies. Echter, om duidelijkheid te scheppen voor de beheerder in welke zone enige erosie zou kunnen ontstaan en tot waar dit 'normaal' is, is het VVR beperkt tot de meander en omliggende moeraszones. Dit biedt o.i. meer inzicht voor beheerder dan een VVR over het gehele centrale deel van de Diedensche Uiterdijk.

3.1.2. De Waarden

De VVR van de meanderboog in De Waarden is begrensd door de buitenbeschermingszone van de dijk. Verdere erosie van de meanderboog richting de dijk is hier onder geen voorwaarde toegestaan. Verder wordt het VVR begrensd door particuliere percelen, verharde wegen, bufferzone tussen geulen en NVO's en het zomerbed van de Maas. De kades tussen het rietmoeras en de recreatiegeul zijn met een zone van 10 m breed uit de VVR gesneden omdat schade aan dit object kan leiden tot functieverlies van het object rietmoeras. Er is vereist dat er een scheiding is tussen het rietmoeras en de recreatiegeul. Het VVR van de westelijke lelyzone is aan de noordzijde begrensd door het VVR van de bestaande NVO plus een 10 m bufferzone. De VVR van de NVO is gelijk aan het te verwachten evenwichtsprofiel. Uitgaande van een evenwichtstalud van 1:20 en maaiveld niveau van NAP+5,4 m is de maximale erosie-afstand van de NVO 10 m (NVO is ontsteend tot stuwpeil (ca. NAP +4,9 m)). Zodoende is voor de afstand tussen de geulen en de Maasoever tenminste 25 m aangehouden (zie par. 3.1).

3.1.3. Ossekamp

De VVR van de Ossekamp is begrensd door de buitenbeschermingszone van de dijk, bestaande wateren en het zomerbed van de Maas. Tevens is de van oost naar west gesitueerde steilrand, de zuidelijke begrenzing van de Lelyzone, deel van de limietwaarden van de VVR. Extensieve schade aan de steilrand is niet wenselijk omdat dit afdoet aan de functie van het object. Tevens geldt dat dit in fase 1 (Het Werk) van het project de begrenzing is tot de particuliere eigendommen. Pas in fase 2 (zelfrealisatie) wordt dit ingericht als natuurgebied (met PAGW en NNB doelen).

3.1.4. Geul Maasbommel West

Het VVR van de geul Maasbommel West is aan de noordzijde gedeeltelijk begrensd door de buitenbeschermingszone van de dijk en particuliere eigendommen. Echter, grotendeels ligt de VVR binnen de buitenbeschermingszone van de dijk. Hier wordt de oeverlijn (limietlijn) van het ontwerp aangehouden als begrenzing[5]. Aan de zuidzijde is het VVR begrensd door het VVR van de bestaande NVO langs de Maas plus een 10 m bufferzone. De VVR van de NVO is gelijk aan het te verwachten evenwichtsprofiel. De NVO is ontsteend tot 1 m onder stuwpeil. Uit het betreffende projectplan volgt dat de te verwachten maximale erosie-afstand (na 20 jaar) 18 m is. Deze afstand is aangehouden als VVR van de NVO. Zodoende is geul Maasbommel West zo ontworpen dat de minimale afstand tussen de oevers van de Maas en de insteek van de geul 28 m is.

3.1.5. Drempel Appeltern

Drempel Appeltern heeft nauwelijks vrije ruimte. Om de functie te kunnen vervullen van een drempel tussen uiterwaard en zomerbed is erosie van de drempel niet toelaatbaar. Enige schade aan de plaszijde van de drempel is toelaatbaar omdat dit niet tot functieverlies leidt. Voor het VVR is een zone van 50 plus 10 m beheerzone aangehouden gemeten vanaf de insteeklijn van de drempel aan de Maasoever.

[5] Dit is in overeenstemming met de voorschriften van RWS [1]. Verdere erosie richting de dijk is hier onder geen voorwaarde toegestaan.

3.2. Optredende belastingen DO

3.2.1. Stroming

Figuur 3-1 toont de maatgevende stroomsnelheid bij een afvoer van 4.118 m^3/s voor het totale eindbeeld van het ontwerp project meanderende Maas, ofwel Het Werk en de zelfrealisaties binnen project Meanderende Maas. De stroomsnelheden die plaatsvinden na uitvoering van enkel de deelgebieden vallend binnen Het Werk zijn voor deze deelgebieden gelijk aan die getoond in figuur 3-1. Het ontwerp van de erosie beschermende maatregelen binnen het Werk kunnen daarom gebaseerd worden op de stroomsnelheden binnen het totale eindbeeld. Zie voor een nadere toelichting van deze verschillen het deelrapport rivierkundige beoordeling, hoofdstuk 7. In dit hoofdstuk is een rivierkundige toetsing uitgevoerd van de situatie na uitvoering van het Werk (tussentijdse situatie zonder zelfrealisaties).

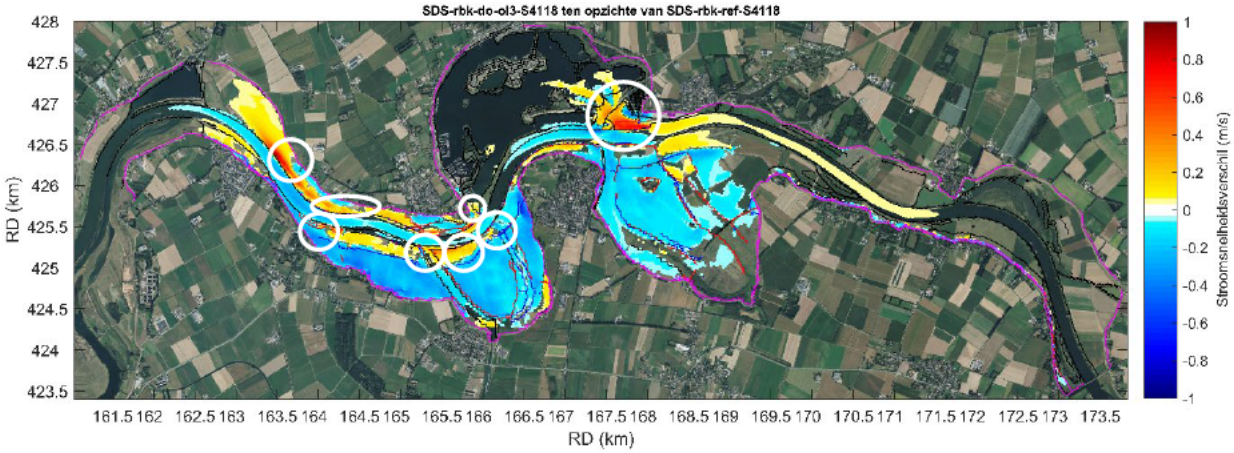
Er is gebleken dat lagere afvoeren dan 4.118 m^3/s niet in hogere, maatgevende dieptegemiddelde stroomsnelheden resulteren. Wel is er specifiek bij overstromen van kades nog naar de situatie gekeken dat de kruin net overstroomt en er kritische stroming over een talud optreedt. Stroomsnelheden lager dan 0,8 m/s zijn niet beschouwd, omdat een kritieke stroomsnelheid voor erosie van 0,8 m/s wordt aangenomen voor onbeschermde klei-taluds.

In Figuur 3-1 zijn alle aandachtslocaties omcirkelt waar hoge dieptegemiddelde stroomsnelheden (> 0,8 m/s) aanwezig zijn binnen de VVR. Hierbij is rekening gehouden met de turbulentiefactoren uit hoofdstuk 2. Hierbij zijn ook locaties beschouwd waar de stroomsnelheid toeneemt ten opzichte van de huidige situatie. De stromingsverschillen tussen het DO en de referentie situatie bij een afvoer van 4.118 m^3/s zijn getoond in Figuur 3-2. De uiterwaarden stromen ook mee, echter is de stroomsnelheid bij een afvoer van 4.118 m^3/s lager dan 0,8 m/s.

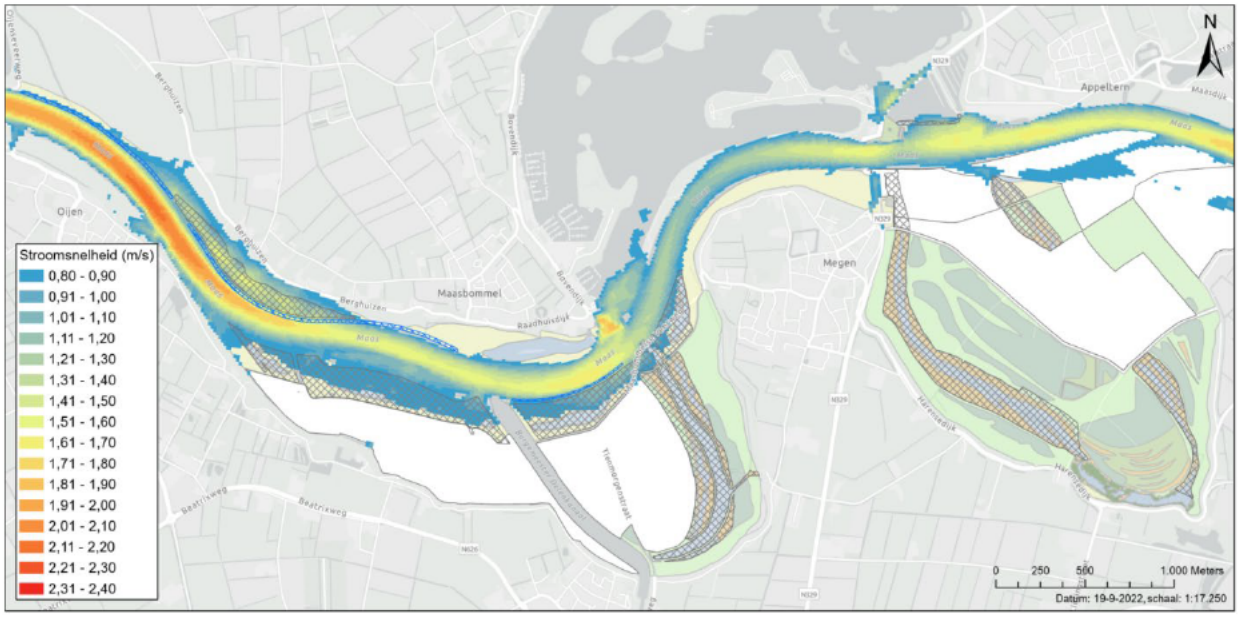
Voor stroomsnelheden langs de dijk geldt bij Waterschap Rivierenland en Waterschap Aa en Maas een norm voor de maximale stroomsnelheid van 1 m/s (per mail bevestigde norm door dijkbeheerder). Een met grasbekleed dijklichaam moet deze stroomsnelheid goed kunnen weerstaan. Na analyse van de stroomsnelheden langs de dijk, zie [14], is geconstateerd dat de stroomsnelheden langs de dijk in de toekomstige situatie (DO) lager zijn dan in de huidige situatie. Nergens langs het dijklichaam aan Brabantse en Gelderse zijde is sprake van een overschrijding van deze norm.

Zoals ook toegelicht in paragraaf 1.4, is in dit deelrapport de benodigde erosiebescherming voor het eindbeeld ontworpen (Het Werk + zelfrealisatie). Om na te gaan of de tussentijdse situatie (het nog niet uitvoeren van de zelfrealisatie gebieden) tot andere belastingen of een ander ontwerp leidt, is naast de controle op het eindbeeld ook gecontroleerd wat de belastingen zijn in de tussentijdse situatie.
Figuur 3-3 toont de dieptegemiddelde stroomsnelheden (> 0,8 m/s) bij een afvoer van 4.118 m^3/s. Uit de rivierkundige analyse blijkt dat de stroomsnelheden in de tussentijdse situatie ofwel gelijk, ofwel lager zijn in vergelijking met de stroomsnelheden in de eindsituatie. Ook de locaties met stroomsnelheden > 0,8 m/s nemen af. De locaties waar bescherming nodig is in de tussentijdse situatie blijven gelijk aan die op basis van de stroomsnelheden in het eindbeeld. Het eindbeeld is om deze redenen leidend voor het ontwerp van de erosiebescherming.

Figuur 3-1:Stroomsnelheden bij een afvoer van 4.118 m³/s te Borgharen voor het totale eindbeeld 'het Werk + zelfrealisatie' van het DO van project Meanderende Maas. Stroomsnelheden lager dan 0,8 m/s zijn niet weergegeven. Paarse lijnen laten NVO's zien. De rode cirkels tonen de aandachtslocaties voor stroming.



Figuur 3-2: Verschil in stroomsnelheid (m/s) tussen het totale eindbeeld van het DO van project Meanderende Maas en de Referentie situatie in 2D bij een afvoer van 4.118 m³/s te Borgharen. De witte cirkels tonen de aandachtslocaties voor stroming

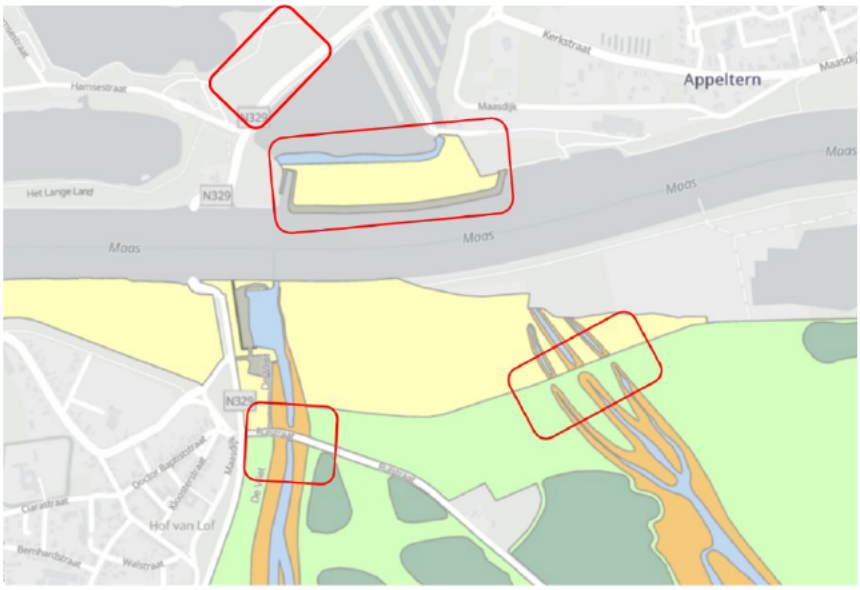


Figuur 3-3: Stroomsnelheden bij een afvoer van 4.118 m³/s te Borgharen voor de tussentijdse situatie 'het Werk' van het DO van project Meanderende Maas. Stroomsnelheden lager dan 0,8 m/s zijn niet weergegeven.

3.2.2. Overstromen

Het DO bevat vijf aandachtslocaties waar het moment van overstromen van een kade, drempel of oever kan leiden tot ongewenste hoge stroomsnelheden, turbulentie en erosie. Deze locaties zijn de instroomdrempel Appeltern, de N329 achter de drempel Appeltern, de kades aan de recreatievaargeul in De Waarden, en de twee drempels in de Diedensche Uiterdijk, respectievelijk instroomdrempel Diedensche Uiterdijk west (ter hoogte van de Rulstraat) en instroomdrempel Diedensche Uiterdijk oost. Figuur 3-4 toont de locatie van de aandachtslocaties in deelgebied Diedensche Uiterdijk.

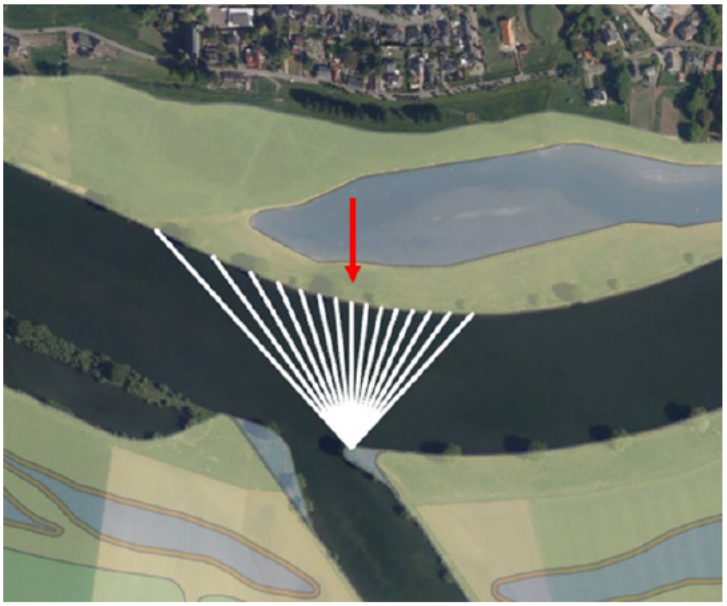
De zogenaamde overlaatwerking welke leidt tot hoge belastingen is niet aanwezig bij het instromen van de geulen in de Lelyzones en bij geul Maasbommel West (en Oost). Het maaiveld rondom het benedenstroomse eind van deze geulen is lager dan het maaiveld aan de bovenstroomse eind. Zodoende loopt de geul bij stijgend hoogwater vol via de benedenstroomse zijde en is er geen overlaatwerking aan de bovenstroomse zijde.



Figuur 3-4: Aandachtslocaties stroomsnelheid bij overstromen

3.2.3. Windgolven

Om de effectieve strijklengte voor windgolven te bepalen is gebruik gemaakt van de Leidraad Ontwerpen van Rivierdijken deel 1 (TAW,1985). De effectieve strijklengte is op verschillende locaties voor verschillende windrichtingen berekend met 12 wind sectoren. De effectieve strijklengte wordt berekend door een gewogen gemiddelde te nemen van de strijklengten van de 12 windsectoren. De maatgevende situatie voor windgolven komt voor op de kop bij de overgang van het Burgemeester Delenkanaal met de Maas. Hier geldt een maximale effectieve strijklengte van 317 m, dat voor komt bij een windrichting van 300 graden. De maatgevende wind gegenereerde golfhoogte bij een windsnelheid van 24,5 m/s (NEN-EN 1991-1-4, gebied III) bedraagt 0,22 m.



Figuur 3-5: Voorbeeld bepaling effectieve strijklengte t.b.v. wind gegenereerde golven

3.2.4. Scheepvaartbelasting

Hydraulische belastingen ten gevolge van nautisch verkeer kunnen ook de nodige erosie veroorzaken. De volgende belastingen kunnen optreden:

- primaire scheepsgolven (haalgolven);
- secundaire scheepsgolven (interferentiepieken);
- retourstroming;
- schroefstraalbelasting.

De belastingen zijn onder andere afhankelijk van het scheepstype, de vaarsnelheid, het dwarsprofiel van de vaarweg, de waterdiepte en de afstand van het schip tot de oever of dam. De maatgevende belastingen zijn hieronder toegelicht.

3.2.4.1. Primaire scheepsgolven en retourstroming

De haalgolven van de varende maatgevende schepen zijn hydraulische belastingen rond de waterlijn. De retourstroming kan ook dieper optreden. De golfhoogte en de retourstroming zijn bepaald met behulp van The Rock Manual, paragraaf 4.3.4 [6]. De belangrijkste invoerparameters zijn weergegeven in Tabel 3-1. De tabel toont ook de optredende primaire scheepsgolven en retourstroming op de verschillende locaties.

3.2.4.2. Secundaire scheepsgolven

De maatgevende secundaire scheepsgolven, de interferentiepieken, zijn een combinatie van de transversale en divergerende golven veroorzaakt door het varende schip. De golfhoogte is onder andere afhankelijk van het scheepstype, de vaarsnelheid en het dwarsprofiel van de vaarweg. De golfhoogtes zijn bepaald met behulp van The Rock Manual, paragraaf 4.3.4. [6]. De berekende secundaire scheepsgolven zijn weergegeven in Tabel 3-1.

3.2.4.3. Schroefstraalbelasting

De schroefstraalbelasting op de verschillende locaties is hieronder toegelicht.

Beroepsvaart op de Maas
Belasting door schroefstralen van de beroepsvaart op de Maas is niet relevant, omdat de schepen geen bijzondere manoeuvres uitvoeren waarbij schroefstralen in de richting van erosiegevoelige oevers zijn. Uitzondering hierop is de aansluiting van het Burgemeester Delenkanaal op de Maas. Scheepvaart moet hier draaien en gebruikt daarvoor mogelijk de boegschroef. De schepen hebben echter een vaarsnelheid en enige afstand van de oever waardoor de mate van boegschroefgebruik en de impact op de omgeving gering zal zijn.

Beroepsvaart aan de Burgemeester Delenkanaal
Belasting door schroefstralen van de beroepsvaart op het Burgemeester Delenkanaal is niet relevant. De beroepsvaart in het Burgemeester Delenkanaal vaart parallel aan en op enige afstand van de oevers (aangenomen afstand van 15 m, Tabel 3-1). De schroefstralen zijn dus niet gericht op de oever.

Sloepen
De stroming ten gevolge van de hoofdschroeven en de golven veroorzaakt door de sloepen zorgen voor belastingen op de oevers in meander De Waarden. De belastingen kunnen optreden in het horizontale verlengde van de schroef, op de bodem en op andere locaties op het talud. Een sloepboot heeft één hoofdschroef en geen boegschroeven. De stroomsnelheden ten gevolge van de hoofdschroefstralen zijn bepaald met behulp van The Rock Manual, paragraaf 4.3.4. [6].

Tabel 3-1: Belasting door schepen

Parameter	Symbool	Sloepen (recreatiegeul)	CEMT-klasse Va (Maas)	CEMT-klasse Va (Burg. Delenkanaal)
maximale vaarsnelheid (m/s)	v_s	1,1	4,2	2,0
turbulentiefactor (-)	k_t^2	1,5	1,5	1,5
talud (-)	cot α	3	3	3
breedte kanaal waterlijn (m)	b_w	12	150	80
afstand schip-oever (m)	y_s	2,5	15	15
waterdiepte (m)[6]	h	1,2	7,0	4,6
haalgolfhoogte (m)	z	0,17	0,86	0,33
secundaire scheepsgolf (m)	H_i	0,01	0,43	0,03
retourstroming (m/s)	U_r	0,54	0,60	0,54
stroming ten gevolge van hoofdschroefstraal (m/s)	$U_{p,talud,max}$	0,72	-	-
aantal schepen in levensduur (bron: BIVAS- reizen 2018 IVS90)	N	125.000	500.000	250.000

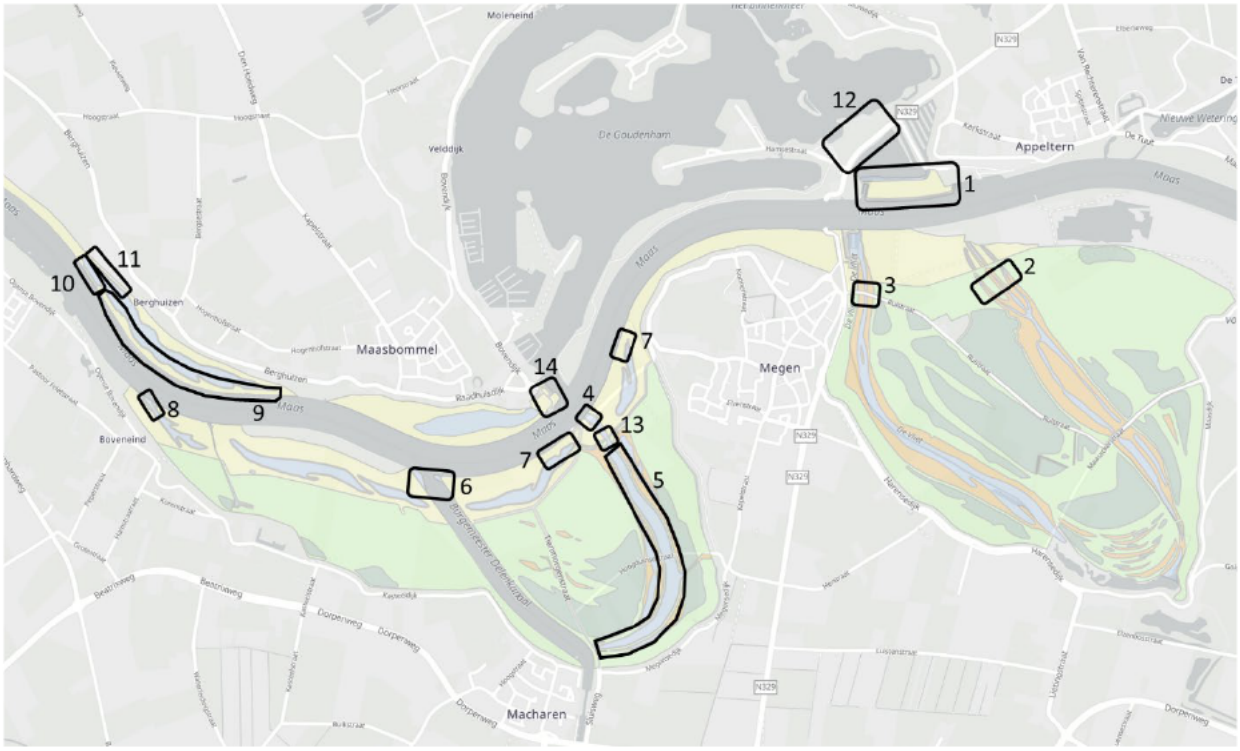
3.3. Aandachtlocaties oever- en bodembescherming DO

In het DO zijn, aanvullend op het VO, de potentieel erosiegevoelige locaties geïntroduceerd. Voor een uitvoerige beschrijving van alle gemaakte ontwerpkeuzes in het DO wordt verwezen naar ontwerpnota DO Rivier [15]. Enkele voorbeelden zijn de in- en uitstroomdrempels van de meander in de Diedensche Uiterdijk en de kades tussen het rietmoeras en de recreatiegeul in De Waarden. Na analyse van de hydraulische belastingen en de aanwezige ruimte binnen het VVR zijn erosiegevoelige locaties in het DO bepaald. Wanneer uit de analyse blijkt dat de verandering zal leiden tot ongewenste erosie, zal voor

[6] Voor de waterdiepte is uitgegaan van het stuwpeil van NAP +4,9 m. Waterstanden onder de NAP +4,7 m komen minder dan 1% van de tijd voor. Voor het ontwerp van de erosiebescherming is rekening gehouden met een extra marge voor fluctuatie in waterstanden.

de locatie een erosie beschermende maatregelen vereist zijn. De analyse heeft geleid tot 14 aandachtslocaties welke zijn opgesomd in onderstaande lijst en getoond in Figuur 3-6.

1. Instroomdrempel Appeltern;
2. Instroomdrempel Diedensche Uiterdijk oost;
3. Instroomdrempel en duiker Diedensche Uiterdijk west (Rulstraat);
4. Instroom meander De Waarden;
5. Kades recreatievaargeul meander De Waarden;
6. Aansluiting Burgemeester Delenkanaal;
7. Geulen in Lelyzone Ossekamp en De Waarden;
8. Uitstroom westelijke geul Ossekamp;
9. Instroom Geul Maasbommel west;
10. Uitstroom Geul Maasbommel west;
11. Fietspad Geul Maasbommel west.
12. N329 achter instroomdrempel Appeltern
13. Autobrug in De Waarden
14. Veerweg Maasbommel en omgeving



Figuur 3-6: Aandachtslocaties voor mogelijke erosie. Op deze 14 locaties is een ontwerp gemaakt voor erosiebescherming,

4. REDENEERLIJN EROSIE BESCHERMENDE MAATREGELEN

In hoofdstuk 3 zijn de aandachtslocaties bepaald waar een erosie beschermende maatregel vereist is binnen het DO. Dit hoofdstuk beschrijft de redeneerlijn naar de ontwerprichting voor deze aandachtslocaties. In deze redeneerlijn wordt naar de hydraulische belastingen van de aandachtslocaties gekeken. Deze belasting wordt naast de ontwerpuitgangspunten over sterkte en de aanwezige ruimte binnen het Vlak van Vrije Ruimte gehouden. Daarnaast worden de ambities op duurzaamheid en de ruimtelijke kwaliteit van het project in acht genomen, waarin wordt gestreefd naar zoveel mogelijk natuurlijke oplossingen voor oeverbescherming.

Bij natuurlijk oplossingen wordt gedacht aan zachte oever beschermende maatregelen veelal van natuurlijke materialen zoals hout en riet, met uitzondering van steen dat onder harde oplossingen valt. Deze oever beschermende maatregelen hebben als functie de oever te versterken en de belasting te reduceren en zodoende erosie te beperken.

Redeneerlijn erosie beschermende maatregelen
Na identificatie van de erosiegevoelige locaties volgen er twee opties:

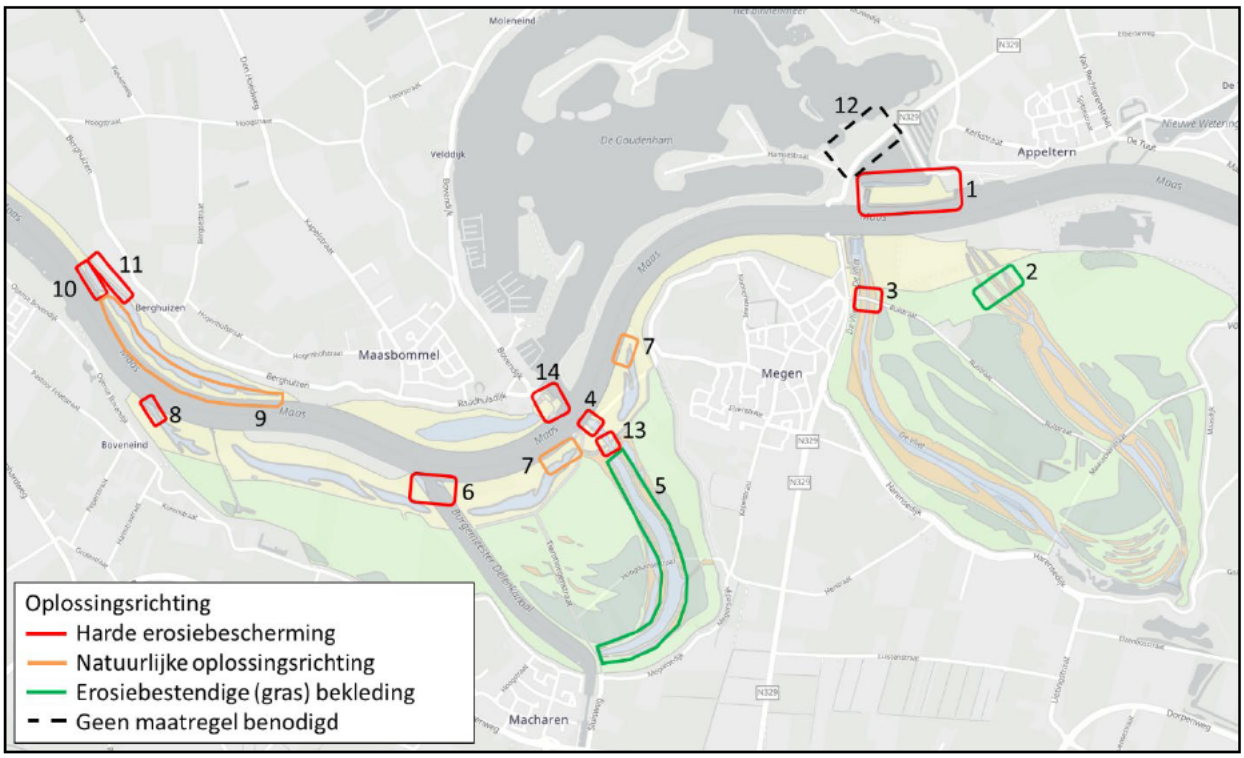
I. Wanneer de schade aan een waterlichaam, zonder erosie beschermende maatregel, tijdens één periode van hoogwater zich beperkt binnen het VVR en daarmee het risico op schade buiten het VVR laag is; erosie is toegestaan;
II. Wanneer het risico op schade aan een waterlichaam, zonder erosie beschermende maatregel, buiten het VVR tijdens één periode van hoogwater groot is, of erosie van/rondom een waterlichaam of object nooit toegestaan is vanuit het functietype van het object; erosie is niet toegestaan;

In geval van *optie I* is er geen erosie beschermende maatregel nodig.
In geval van *optie II* wordt er een ontwerpoplossing gezocht door middel van het doorlopen van onderstaande redeneerlijn:

1. Een erosiebestendige kleibekleding is voldoende tenzij,
   - deze niet maakbaar of niet wenselijk is (bijvoorbeeld vanuit landschappelijk oogpunt);
   - de optredende stroombelasting hoger is dan 0,8 m/s en/of enige golfhoogte optreedt/ golven breken op een talud;
2. Indien niet wordt voldaan aan randvoorwaarden van stap 1, dan volstaat een erosiebestendige grasbekleding tenzij,
   - deze niet maakbaar of niet wenselijk is (bijvoorbeeld onderwater);
   - de optredende stroombelasting hoger is dan 2 m/s en/of de golfhoogte groter is dan 0,4 m;
3. Indien niet wordt voldaan aan randvoorwaarden van stap 1 en 2, dan volstaat een natuurlijke oplossingsrichting tenzij,
   - deze niet maakbaar of niet wenselijk is (bijvoorbeeld onderwater);
   - deze niet toepasbaar is omdat de reductie van de stroombelasting en golfhoogte niet voldoende is om ongewenste erosie tegen te gaan;
4. Indien niet wordt voldaan aan randvoorwaarden van stap 1, 2 en 3, dan is een harde erosiebescherming vereist, zoals stortsteen of betonzuilen (basalton).

5. ONTWERP EROSIEBESCHERMEDE MAATREGEL

Voor elk van de in paragraaf 3.3 benoemde aandachtslocaties is de redeneerlijn uit hoofdstuk 4 doorlopen. Figuur 5-1 toont samengevat het resultaat van deze analyse. Dit hoofdstuk toont achtereenvolgens voor elke aandachtslocatie de systeemanalyse de redeneerlijn en het ontwerp van de erosiebestendige maatregel.



Figuur 5-1: Oplossingsrichting locaties erosie beschermende maatregel op aandachtslocaties.

5.1. Instroomdrempel Appeltern

5.1.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
Westelijk van Appeltern ligt het grote recreatiegebied de Gouden Ham. In het VO is vanuit de waterstandsdoelstelling een doorsteek bij Appeltern voorgesteld in de vorm van een drempelverlaging. Het verlagen van de oever tussen de provinciale weg en het terrein van SF Beton naar NAP+5,4 m levert een belangrijke bijdrage aan deze doelstelling.

Optredende hydraulische belastingen
Voor deze locatie gelden hydraulische randvoorwaarden zoal getoond in Tabel 5-1. Voor de belastingen is uitgegaan van scheepsgolven van vaarklasse CEMT-Va (zie par. 2.3) en windgolven (zie par. 2.2). Voor de stroomsnelheid is gekeken naar de dieptegemiddelde stroomsnelheid op de locatie en een turbulentiefactor voor een buitenbocht van een rivier (toegelicht in par. 2.2). De stroomsnelheid bij overstromen aan de plaszijde van de drempel is gering omdat de waterstand in de plas meebeweegt met de waterstand in de Maas. Er is dus bij stijgend hoogwater nauwelijks verval over de drempel.

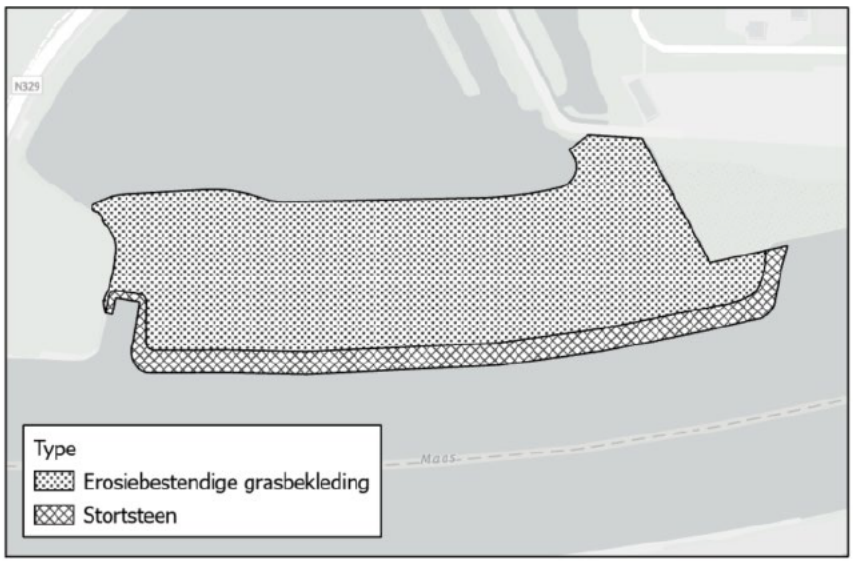
Tabel 5-1: Optredende hydraulische belastingen instroomdrempel Appeltern

Belasting	
Stroomsnelheid	1,54 m/s en k_t^2 = 2,0 voor hoge turbulentie Overstromen: 0,45 m/s
Scheepvaartgolven (CEMT-Va Maas)	0,43 m
Windgolven	0,22 m, niet maatgevend

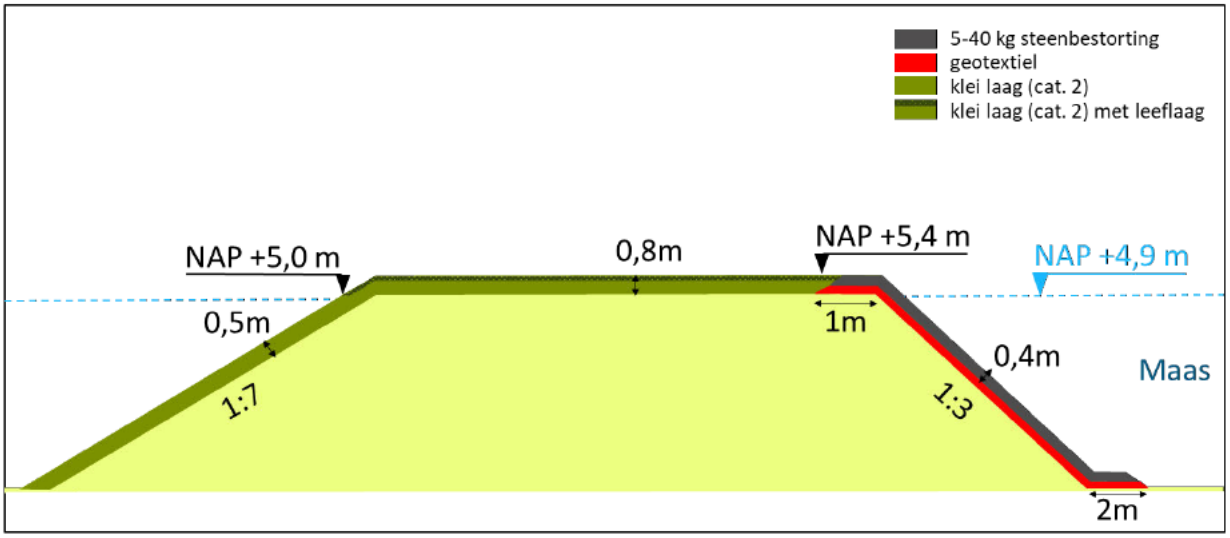
5.1.2. Ontwerp

Redeneerlijn
Voor het ontwerpprincipe van de erosie beschermende maatregelen is de redeneerlijn gebruikt zoals beschreven in hoofdstuk 4. Uit deze redeneerlijn volgt dat voor deze locatie gekeken zal worden naar een harde erosiebescherming, zoals stortsteen of betonzuilen. Voor deze locatie is namelijk geen erosie toegestaan, omdat de locatie en het profiel van de drempel vast dient te liggen voor het goed functioneren van het riviersysteem en de nautische functie van de Maas. De hydraulische randvoorwaarden laten een ander type oplossing niet toe.

Ontwerptoelichting
Voor het ontwerp (zie Figuur 5-2 en Figuur 5-3) is, zoals het ROW [12] voorschrijft, gekeken naar steen stabiliteit formules uit sectie 4.3.4 van de Rock Manual [6]. Dit is gedaan voor de maatgevende scheepsgolven en de maatgevende stromingsbelasting. De windgolven zijn niet maatgevend. Voor de stromingsbelasting is gebruik gemaakt van de formule van Izbash. Er is gekozen voor een 1:3 talud steenbestorting met breuksteengradering 5-40 kg aanwezig tot NAP +5,4 m aan de Maaszijde. Voor de kruin en over het 1:7 binnentalud is gekozen voor een erosie beschermende gras- met kleibekleding. De grasbekleding bestaat uit een leeflaag en een onderlaag van klei (categorie 2 klei) met een laagdikte van 0,8 m. Voor het gedeelte onder NAP +5,0 m is gekozen voor een kleibekleding (categorie 2 klei) van 0,5 m. Op de kruin is een inkassing van de steenbestorting van <1 m beoogd, voor de teen geldt een minimale breedte van 2 m.
De steenbestorting heeft een minimale laagdikte van 0,4 m (tweemaal Dn50,gem, exclusief uitvoerings-toleranties). Vanwege de kleiige onderlaag is voor de filterconstructie gekozen voor een geotextiel. De specificaties van het type geotextiel kunnen in het UO worden vastgelegd.



Figuur 5-2: Ontwerp erosie beschermende maatregel drempel Appeltern



Figuur 5-3: Dwarsdoorsnede ontwerp drempel Appeltern

5.1. Instroomdrempel en duiker Diedensche Uiterdijk oost

5.1.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving

De meanderboog in de Diedensche Uiterdijk wordt ontworpen als geïsoleerde laagdynamische geul. Dit geeft de hoogste waterkwaliteit. Om de geul te voeden door rivierkwel in plaats van directe instroom van Maaswater wordt de geul aan beide zijden begrensd met een drempel. De locaties van de instroomdrempels zijn de Rulstraat (kruinhoogte NAP +6,3 m) en de rand van de Lelyzone (kruinhoogte NAP +6,6 m) aan het bovenstroomse einde van de geul. Deze sectie gaat in op de erosie beschermende maatregelen welke nodig zijn bij de drempel aan de rand van de Lelyzone; de instroomdrempel Diedensche Uiterdijk oost.

Optredende hydraulische belastingen
De optredende hydraulische belasting op de drempel is reeds bepaald in hoofdstuk 2. Belasting van windgolven en scheepvaart wordt als niet relevant geacht voor de drempel aan de rand van de Lelyzone. Enkel belasting door langstroming van de Maas en stroming over de drempel bij stijgend hoogwater is voor deze locatie van belang. Zie Tabel 5-2.

Middels overlaatformules uit sectie 5.1.2.3 van de Rock Manual [6] zijn stroomsnelheden berekend over de drempel. Hierin is aangenomen dat superkritische stroming optreedt en dat het maximaal optredend verval over de drempel 0,5 m is. De tijd benodigd voor het Maaspeil om tot 0,5 m boven de drempelhoogte te stijgen is 25 uur (stijgsnelheid 2 cm per uur). Binnen deze periode is de uiterwaard (c.q. meanderboog) al zodanig opgevuld met Maaswater via de lagergelegen drempel ter hoogte van de Rulstraat dat het maximaal optredend verval over de oostelijke drempel 0,5 m zal zijn.

Tabel 5-2: Optredende hydraulische belastingen instroomdrempel Diedensche Uiterdijk oost

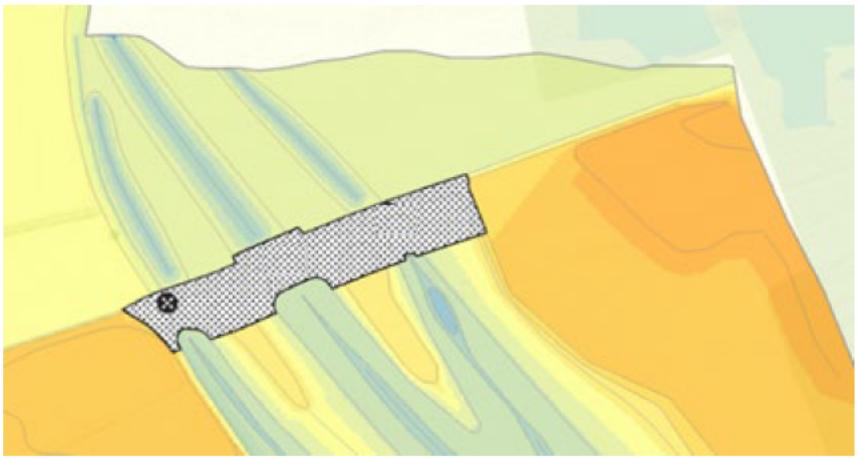
Belasting	
Stroomsnelheid	Langstroming: 0,40 m/s en k_t^2 = 1,0 voor normale turbulentie. Overstromen: 1,80 m/s
Scheepvaartgolven (CEMT-va)	n.v.t.
Windgolven	n.v.t.

5.1.2. Ontwerp

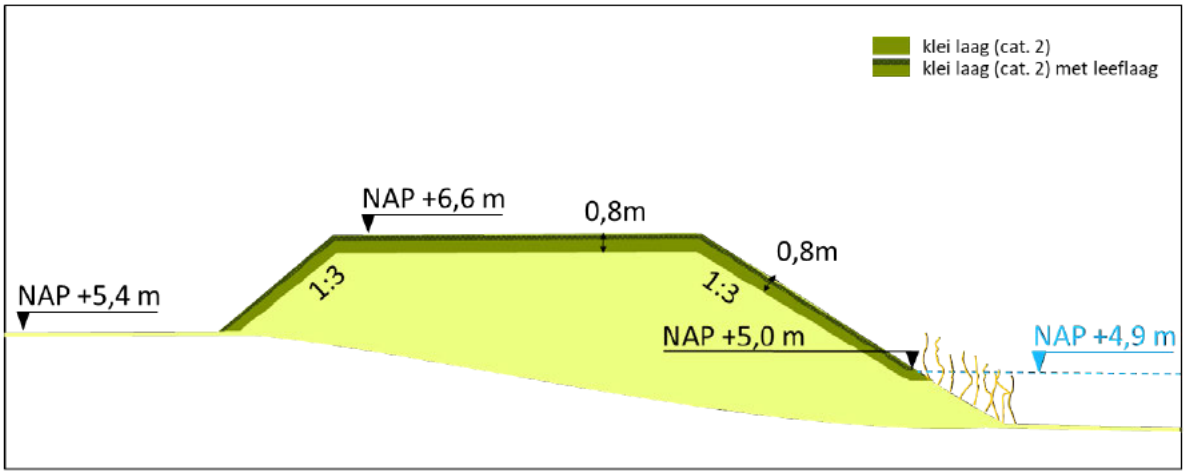
Redeneerlijn
Schade aan de oostelijke instoomdrempel in de Diedensche Uiterdijk is in principe ongewenst om de werking van het watersysteem in de uiterwaard te waarborgen. Enkel in zeer extreme gevallen is erosie van de drempel toegestaan omdat de waterveiligheid van de dijk en binnendijkse gebieden niet in gevaar zal komen.

Door het flauwe talud aan de uiterwaardzijde van deze drempel (< 1:10) zal deze drempel niet werken als een (volkomen) overlaat met vallend water en bijhorende grote erosiekracht op het talud aan de meanderboogzijde tot gevolg. Tevens is het verval over deze drempel zeer beperkt omdat de uiterwaard (c.q. meanderboog) al significant gevuld zal zijn via de drempel in de Rulstraat voordat de instroomdrempel Diedensche Uiterdijk oost in werking treedt. Zodoende worden er geen hogere snelheden verwacht dan 2,0 m/s en voldoet een erosiebestendige grasbekleding als erosie beschermende maatregel.

Ontwerptoelichting
Zie Figuur 5-4 en Figuur 5-5 voor het ontwerp van de erosie beschermende maatregel. Op het horizontale deel van de drempel tussen de meanderboog en Lelyzone en op de aansluitende taluds met een niveau boven NAP +5,0 m bestaat de grasbekleding uit een leeflaag en een onderlaag van klei (categorie 2 klei) met een dikte van 0,8 m. Concreet betekent dit dat een erosie beschermende grasbekleding benodigd is van ca. 30 m breed (gemeten vanaf het hart van de drempel) op het talud aan de meanderboogzijde. Het aansluitende onderwatertalud aan meanderboogzijde van de drempel hoeft niet aanvullend verdedigd te worden omdat hier een robuust rietmoeras wordt ontwikkeld dat zorgt voor een afname van de stromingsbelasting op de onderliggende kale klei. Tevens zorgt de wapenende werking van de ondergrondse delen van de vegetatie voor weerstand tegen erosie. De aanname is hier dat de belastingen zodanig zijn afgenomen dat geen erosie beschermende maatregelen vereist zijn.



Figuur 5-4: Ontwerp erosie beschermende maatregel instroomdrempel Diedensche Uiterdijk oost



Figuur 5-5: Dwarsdoorsnede ontwerp instroomdrempel Diedensche Uiterdijk oost

5.2. Instroomdrempel en duiker Diedensche Uiterdijk west (Rulstraat)

Voor de instroomdrempel en duiker in de Diedensche Uiterdijk t.h.v. de Rulstraat is nog geen erosie beschermende maatregel ontworpen omdat het ontwerp nog nadere afgewogen wordt i.r.t. de bereikbaarheid van de Rulstraat. Het gepresenteerde ontwerp is een ontwerprichting gebaseerd op de verwachtte belasting i.r.t. het beoogde ontwerp.

5.2.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
De meanderboog in de Diedensche Uiterdijk wordt ontworpen als geïsoleerde laagdynamische geul. Dit geeft de hoogste waterkwaliteit. Om de geul te voeden door rivierkwel in plaats van directe instroom van Maaswater wordt de geul aan beide zijden begrensd met een drempel. De locaties van de instroomdrempels zijn de Rulstraat (kruinhoogte NAP +6,3 m) en de rand van de Lelyzone (kruinhoogte NAP +6,6 m) aan het bovenstroomse einde van de geul. Deze sectie gaat in op de erosie beschermende maatregelen welke nodig zijn bij de Rulstraat; *instroomdrempel Diedensche Uiterdijk west*.

Optredende hydraulische belastingen
Middels overlaatformules uit sectie 5.1.2.3 van de Rock Manual [6] zijn stroomsnelheden berekend over de drempel.

Tabel 5-3: Optredende hydraulische belastingen instroomdrempel Diedensche Uiterdijk west

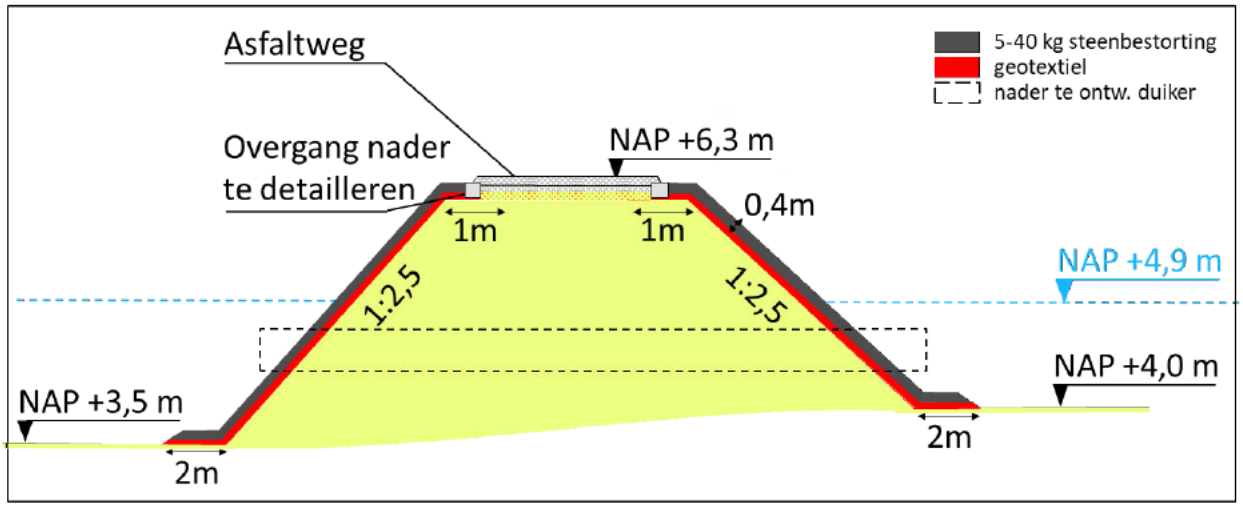
Belasting	
Stroomsnelheid	Overstromen: 1,2 m/s

5.2.2. Ontwerp

Redeneerlijn
Voor het ontwerpprincipe van de erosie beschermende maatregelen is de redeneerlijn gebruikt zoals beschreven in hoofdstuk 4. Uit deze redeneerlijn volgt dat voor deze locatie gekeken zal worden naar een harde erosiebescherming, zoals stortsteen of betonzuilen. Voor deze locatie is namelijk geen erosie toegestaan, omdat de functie en het tracé van de Rulstraat behouden moeten blijven. De beperkte afstand tot de oever en de hydraulische randvoorwaarden laten een ander type oplossing niet toe.

Ontwerptoelichting
Voor het ontwerp (zie Figuur 5-6 en Figuur 5-7) is, zoals het ROW [12] voorschrijft, gekeken naar steen stabiliteit formules uit sectie 4.3.4 van de Rock Manual [6]. Dit is gedaan voor de maatgevende maatgevende stromingsbelasting. Voor de stromingsbelasting is gebruik gemaakt van de formule van Izbash. Er is gekozen voor een 1:2,5 talud steenbestorting met breuksteengradering 5-40 kg aanwezig tot NAP +6,6 m. Op de kruin is een inkassing van <1 m beoogd, voor de teen geldt een minimale breedte van 2 m.
De steenbestorting heeft een minimale laagdikte van 0,4 m (tweemaal Dn50,gem, exclusief uitvoerings-toleranties). Vanwege de kleiige onderlaag is voor de filterconstructie gekozen voor een geotextiel. De specificaties van het type geotextiel kunnen in het UO worden vastgelegd. In de UO fase dient er een goede overgang ontworpen te worden tussen de steenbestorting, het geotextiel en deze asfaltweg.

Figuur 5-6: Ontwerp erosie beschermende maatregel instroomdrempel Diedensche Uiterdijk west



Figuur 5-7: Dwarsdoorsnede ontwerp instroomdrempel en duiker Diedensche Uiterdijk west

5.3. Instroom meander De Waarden

5.3.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
De doelstelling voor de Waarden is de inrichting tot een gevarieerd rivier- en moeraslandschap. In het VO is de oude Maasloop in De Waarden hersteld. De Waarden is hierin aangetakt op de Maas en bevaarbaar voor kleine sloepjes. In de huidige situatie is er een oeverbescherming ter plaatse van de instroom. In de nieuwe situatie wordt de meander ontgraven en het maaiveld verlaagd tot NAP +5,4 m. Aan de benedenstroomse kant van de meander komt geen verbinding met het Burgemeester Delenkanaal in verband met de nautische veiligheid. De instroomopening wordt zo recht mogelijk aangelegd conform de historische loop richting het noorden.

Optredende hydraulische belastingen
Voor deze locatie gelden hydraulische randvoorwaarden zoal getoond in Tabel 5-4. Voor de belastingen is uitgegaan van scheepsgolven van vaarklasse CEMT-Va en sloepen (zie 2.3). Voor de stroomsnelheid is gekeken naar de dieptegemiddelde stroomsnelheid op de locatie en een turbulentiefactor voor een buitenbocht van een rivier (toegelicht in 2.2).

Tabel 5-4: Optredende hydraulische belastingen instroom meander De Waarden

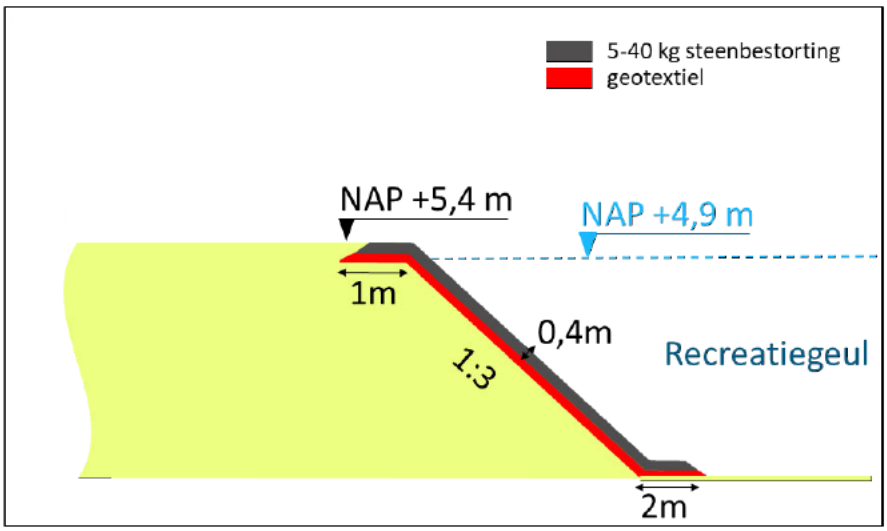
Belasting	
Stroomsnelheid	1,20 m/s en k_t^2 = 1,5 voor verhoogde turbulentie in buitenbocht
Scheepvaartgolven (CEMT-Va Maas en sloepen recreatiegeul)	0,43 m
Windgolven	0,22 m, niet maatgevend

5.3.2. Ontwerp

Redeneerlijn
Voor het ontwerpprincipe van de erosie beschermende maatregelen is de redeneerlijn gebruikt zoals beschreven in hoofdstuk 4. Uit deze redeneerlijn volgt dat voor deze locatie gekeken zal worden naar een harde erosiebescherming, zoals stortsteen of betonzuilen. Voor deze locatie is namelijk geen erosie toegestaan, omdat de locatie van de instroom ten opzichte van de Maas vast dient te liggen voor het goed functioneren van het riviersysteem en de nautische functie van de Maas. De hydraulische randvoorwaarden laten een ander type oplossing niet toe.

Ontwerptoelichting
Voor het ontwerp (zie Figuur 5-8 en Figuur 5-9) is, zoals het ROW [12] voorschrijft, gekeken naar steen stabiliteit formules uit sectie 4.3.4 van de Rock Manual [6]. Dit is gedaan voor de maatgevende scheepsgolven en de maatgevende stromingsbelasting. De windgolven zijn niet maatgevend. Voor de stromingsbelasting is gebruik gemaakt van de formule van Izbash. Er is gekozen voor een 1:3 talud steenbestorting met breuksteengradering 5-40 kg aanwezig tot NAP +5,4 m. Op de kruin is een inkassing van <1 m beoogd, voor de teen geldt een minimale breedte van 2 m.
De steenbestorting heeft een minimale laagdikte van 0,4 m (tweemaal Dn50,gem, exclusief uitvoerings-toleranties). Vanwege de kleiige onderlaag is voor de filterconstructie gekozen voor een geotextiel. De specificaties van het type geotextiel kunnen in het UO worden vastgelegd.

Figuur 5-8: Ontwerp erosie beschermende maatregel instroom meander De Waarden



Figuur 5-9: Dwarsdoorsnede ontwerp instroom meander De Waarden

5.4. Kades recreatievaargeul meander De Waarden

5.4.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
In deelgebied De Waarden wordt binnen de historische contour van de meanderboog een groot areaal rietmoeras gerealiseerd. Aan weerszijden van de recreatiegeul wordt binnen de breedte van de historische contour van eind 19e eeuw 13 hectare waterriet ontwikkeld. Om periodieke peilfluctuatie van de rietmoerassen mogelijk te maken, worden lage kades rondom de recreatiegeul aangelegd. De kade is zodanig hoog dat golfslag van recreatie er niet overheen kan, maar een regulier winterhoogwater wel. Hoogteligging bedraagt dan ca. 5,5m + NAP (ca. 0,5 m boven stuwpeil).

Optredende hydraulische belastingen
De optredende hydraulische belasting op de kades zijn reeds bepaald in hoofdstuk 2. Belasting van windgolven wordt als niet relevant geacht voor de kades tussen recreatievaargeul De Waarden en de omliggende rietmoerassen vanwege de beperkte strijklengte en de aanwezige rietbegroeiing langs de kade. Belasting door stroming over de kades bij stijgend hoogwater en belasting door recreatiescheepvaart is voor de kades van belang. Zie Tabel 5-5.

Middels overlaatformules uit sectie 5.1.2.3 van de Rock Manual [6] zijn stroomsnelheden berekend over de kade. Hierin is aangenomen dat superkritische stroming optreedt en dat het maximaal optredend verval over de drempel 0,5 m is (conservatief). De tijd benodigd voor het Maaspeil om tot 0,5 m boven de kruinhoogte van de kade te stijgen is 25 uur (stijgsnelheid 2 cm per uur). Binnen deze periode zijn de rietmoerassen geheel al geruime tijd gevuld met Maaswater zodat het maximaal optredend verval 0,5 m zal zijn.

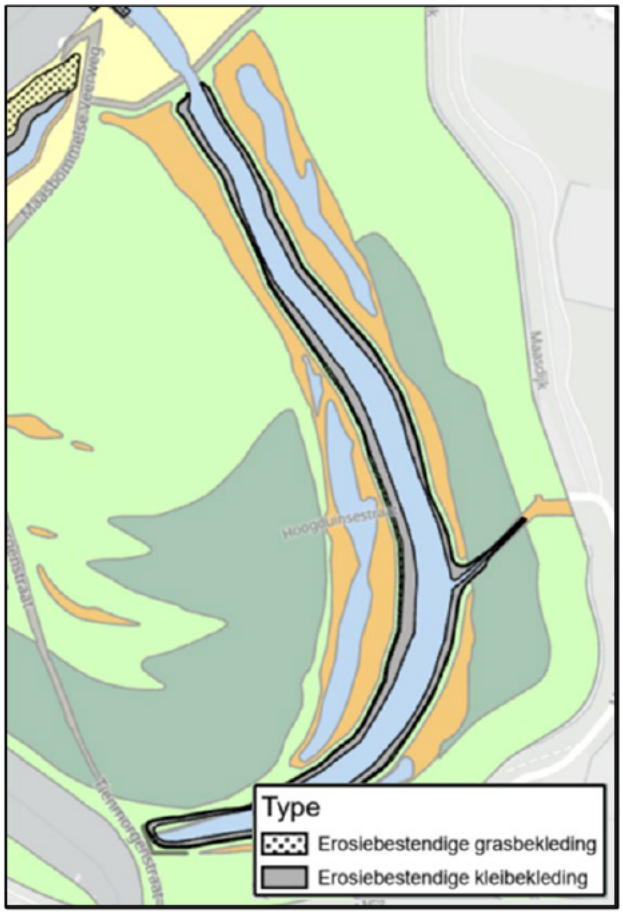
Tabel 5-5: Optredende hydraulische belastingen kades recreatievaargeul meander De Waarden

Belasting	
Stroomsnelheid	0,72 m/s op taluds recreatievaargeulzijde (schroefstraalbelasting) 1,21-1,81 m/s door overlopen op talud aan rietmoeraszijde
Scheepvaartgolven (Sloepen recreatiegeul)	0,17 m
Windgolven	n.v.t.

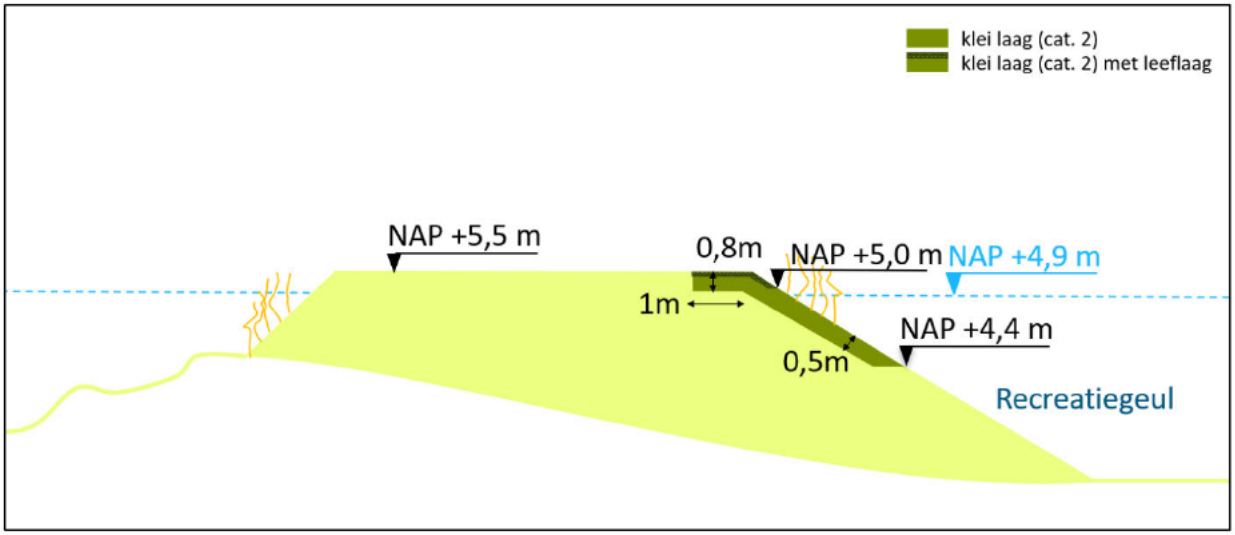
5.4.2. Ontwerp

Redeneerlijn
Erosie van de kade tussen de recreatiegeul en de rietmoerassen is niet gewenst omdat dit afdoet aan de beoogde functie van de kade en de robuustheid van het achterliggend rietmoeras. Zodoende is een erosie beschermende maatregel nodig. Uit de redeneerlijn uit hoofdstuk 4 volgt dat een erosiebestendige grasbekleding (met kleilaag) op de gehele kade voldoet als erosie beschermende maatregel om erosie van de kade door golf- en stroombelasting te voorkomen. De optredende stroombelasting door recreatievaart (sloepen) en overlopen is lager dan de kritische stroomsnelheid van 2,0 m/s welke een klei- met grasbekleding 100 uur kan weerstaan. Voor een conservatieve benadering is ook gekeken naar een toeslag van 30% op de vaarsnelheid. Ook dan blijven de hydraulische belastingen onder de kritische waarden. Voor de onbeschermde kleitaluds aan de recreatiegeulzijde volgt uit de redeneerlijn dat hier geen aanvullende erosie beschermende maatregel benodigd is. Echter, wanneer sloepen zeer dicht langs de oever varen kan een marginale overschrijding van de kritische stroomsnelheid voor erosie van kale klei optreden. Het ontstaan van oevervegetatie langs de kade zorgt voor een reducerend effect op de optredende hydraulische belastingen en voorkomt tevens dat sloepen te dicht bij de oever komen. Hiermee wordt het risico op optredende erosie gereduceerd. Beperkte schade aan recreatievaargeulzijde van de kade is acceptabel omdat de gevolgen van de schade zeer beperkt zijn. Zelfs bij volledig falen van de kade (zeer gering risico) is de consequentie beperkt; enkel de frequentie van instromen van de rietmoerassen wijzigt, wat negatieve gevolgen kan hebben voor een robuuste ontwikkeling van het rietmoeras. Vanwege de onzekerheid over de optredende erosie wordt aanbevolen om de relevante locaties te inspecteren en de kleitaluds en bovenliggende grasbekleding indien nodig te herstellen. Daarnaast zou de kade kunnen overstromen, echter door aanwezigheid van duikers in de kade zal het waterpeil uitwisselen tussen rechter- en linkerzijde. Daarmee is er nauwelijks verhang over de kade. Een met gras beklede oever heeft hier voldoende sterkte.

Ontwerptoelichting
Zie Figuur 5-10 en Figuur 5-11 voor het ontwerp van de erosie beschermende maatregel. Op de taluds met een niveau boven NAP +5,0 m is gekozen voor een grasbekleding met kleilaag, bestaande uit een leeflaag en een onderlaag (categorie 2 klei) met een dikte van 0,8 m. Het aansluitende onderwatertalud aan recreatievaargeulzijde van de kade bestaat uit een erosiebestendige kleibekleding (categorie 2 klei) met een laagdikte van 0,5 m, inclusief rietkraag, tot een niveau van NAP +4,4 m. Onder dit niveau wordt geen hydraulische belasting meer verwacht bij een normaal stuwpeil van NAP +4,9 m, waterstanden onder NAP +4,7 m komen minder dan 1% van de tijd voor.



Figuur 5-10: Ontwerp erosie beschermende maatregel kades recreatievaargeul meander De Waarden

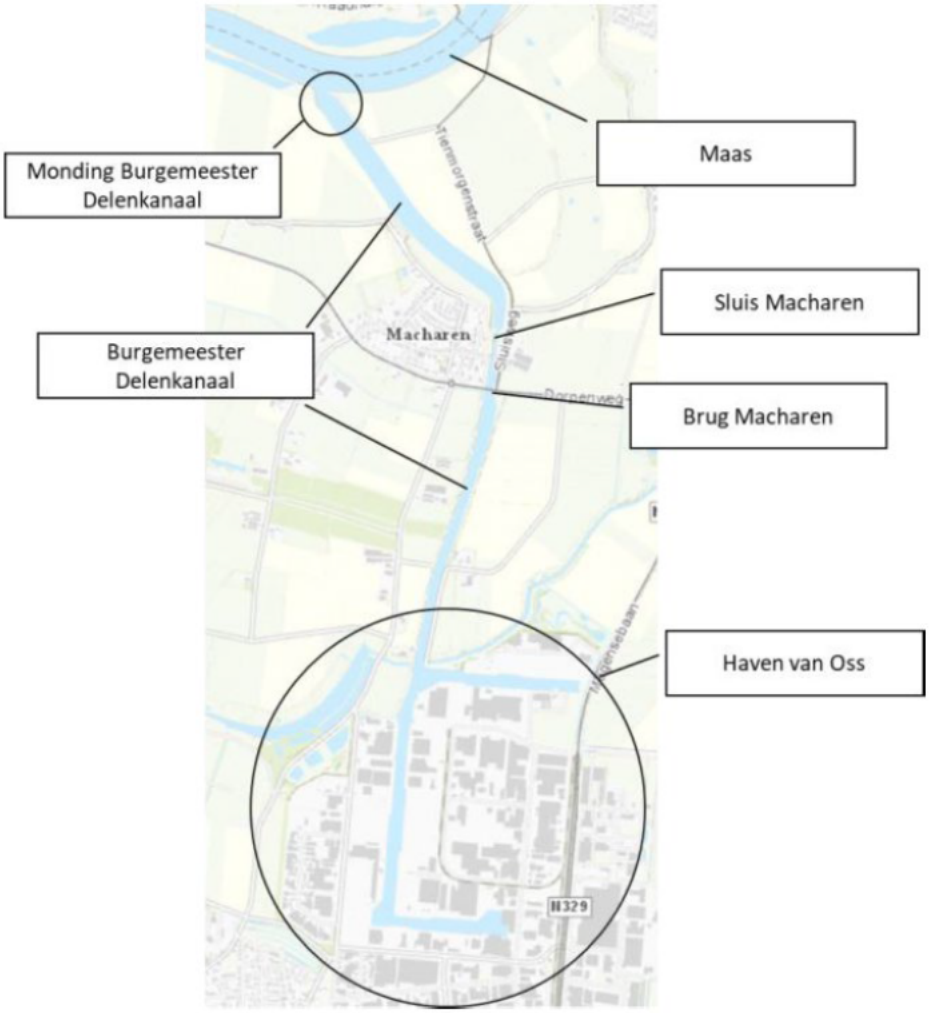


Figuur 5-11: Dwarsdoorsnede ontwerp kades recreatievaargeul meander De Waarden

5.5. Aansluiting Maas - Burgemeester Delenkanaal

5.5.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
Het Burgemeester Delenkanaal is het toegangskanaal voor de haven van Oss vanaf de Maas. Het kanaal heeft een lengte van circa 5,0 km. Na de relatief smalle aansluiting op de Maas (circa 55 m op stuwpeilniveau) is de eerste 1,0 km van het kanaal tot aan de bocht van Macharen relatief breed (circa 100 m). Na de bocht bevindt zich de Sluis van Macharen en de Brug van Macharen.
In het gehele kanaal is pleziervaart niet toegestaan, enkel beroepsvaart is toegestaan in het kanaal. Op basis van intensiteit metingen is ingeschat dat circa 25% van de schepen die het Burgemeester Delenkanaal invaart vanuit bovenstroomse richting komt en dat 75% van de schepen vanuit benedenstroomse richting (Lith) komt. Deze zelfde percentages gelden ook voor uitgaande schepen. Het kanaal wordt beheerd door de gemeente Oss. Voor een situatietekening van de locaties, zie Figuur 5-12.



Figuur 5-12: Situatietekening aansluiting Maas - Burgemeester Delenkanaal

Het DO is niet gewijzigd ten opzichte van het VO. In het VO is de uitstroomopening van het kanaal aangepast waarbij de hoeken van de opening afgerond zijn om grotere zichtlijnen en meer

manoeuvreerruimte te creëren. Hiermee neemt de nautische veiligheid bij de monding toe. In het VO is bij de uitstroomopening van het Burgemeester Delenkanaal in de Maas een ontwerp gemaakt voor de bestorting aan beide oevers. De bestorting ter plaatse van de bochten in de huidige situatie wordt weggehaald. Het bodemniveau van het Burgemeester Delenkanaal ligt ongeveer op NAP +0 m, en het maaiveld aan beide zijden van het Burgemeester Delenkanaal ligt na de maaiveldverlaging van de Lelyzones op NAP+ 5,4 m. De nieuwe taluds krijgen een taludhelling van 1:3.

Optredende hydraulische belastingen
Voor deze locatie gelden hydraulische randvoorwaarden zoal getoond in Tabel 5-6. Voor de belastingen is uitgegaan van scheepsgolven van vaarklasse CEMT-Va (zie 2.3) en windgolven (zie 2.2). Voor de stroomsnelheid is gekeken naar de dieptegemiddelde stroomsnelheid op de locatie en een turbulentiefactor voor een buitenbocht van een rivier (toegelicht in 2.2).

Tabel 5-6: Optredende hydraulische belastingen aansluiting Maas - Burgemeester Delenkanaal

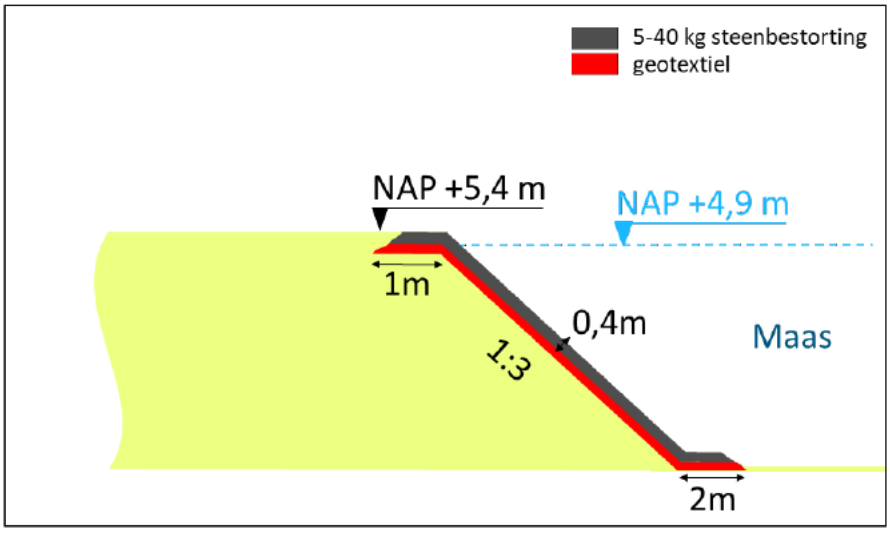
Belasting	
Stroomsnelheid	1,20 m/s en k_t^2 = 1,5 voor buitenbocht
Scheepvaartgolven (CEMT-Va Maas en Burgemeester Delenkanaal)	0,43 m
Windgolven	0,22 m, niet maatgevend

5.5.2. Ontwerp

Redeneerlijn
Voor het ontwerpprincipe van de erosie beschermende maatregelen is de redeneerlijn gebruikt zoals beschreven in hoofdstuk 4. Uit deze redeneerlijn volgt dat voor deze locatie gekeken zal worden naar een harde erosiebescherming, zoals stortsteen of betonzuilen. Voor deze locatie is namelijk geen erosie toegestaan, omdat de locatie en het profiel van de vaarweg vast dienen te liggen voor het goed functioneren van het riviersysteem en de nautische functie van deze aansluiting op de Maas. De hydraulische randvoorwaarden laten een ander type oplossing niet toe.

Ontwerptoelichting
Voor het ontwerp (zie Figuur 5-13 en Figuur 5-14) is, zoals het ROW [12] voorschrijft, gekeken naar steen stabiliteit formules uit sectie 4.3.4 van de Rock Manual [6]. Dit is gedaan voor de maatgevende scheepsgolven en de maatgevende stromingsbelasting. De windgolven zijn niet maatgevend. Voor de stromingsbelasting is gebruik gemaakt van de formule van Izbash. Er is gekozen voor een 1:3 talud steenbestorting met breuksteengradering 5-40 kg aanwezig tot NAP +5,4 m. Op de kruin is een inkassing van <1 m beoogd, voor de teen geldt een minimale breedte van 2 m.
De steenbestorting heeft een minimale laagdikte van 0,4 m (tweemaal Dn50,gem, exclusief uitvoerings-toleranties). Vanwege de kleiige onderlaag is voor de filterconstructie gekozen voor een geotextiel. De specificaties van het type geotextiel kunnen in het UO worden vastgelegd.

Figuur 5-13: Ontwerp erosie beschermende maatregel aansluiting Maas - Burgemeester Delenkanaal



Figuur 5-14: Dwarsdoorsnede ontwerp aansluiting Maas - Burgemeester Delenkanaal

5.6. Geulen in Lelyzone Ossekamp en De Waarden

5.6.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
In de Lelyzones van Ossekamp en De Waarden is het maaiveld ontgraven tot een halve meter boven stuwpeil (nieuwe maaiveld op NAP +5,4 m). Tevens zijn in de Lelyzones smalle geulen met natuurvriendelijke oevers ontworpen. De geïsoleerde geulen leveren een bijdrage aan de waterstandsdoelstelling en hebben een KRW-doel. Het maaiveld aan de benedenstroomse zijde van de geulen ligt een aantal decimeter lager dan aan de bovenstroomse zijde. Hiermee blijft het verhang bij hoogwater over de bovenstroomse instroomdrempel gering, blijven de belastingen op de oevers lager en zijn minder erosie beschermende maatregelen vereist.

Optredende hydraulische belastingen
De optredende hydraulische belasting zijn reeds bepaald in hoofdstuk 2. Scheepvaartbelasting en belasting van windgolven worden als niet relevant geacht voor de oevers de geulen in de Lelyzones. Enkel belasting door stromend water bij hoge afvoeren is voor de oevers van belang. Hierbij wordt een turbulentiefactor (kt^2) van 1,50 aangenomen door verhoogde turbulentie van stromend water over de Maasoever. Zie Tabel 5-7. Tevens is er geen extra stromingsbelasting (overlaatwerking) aanwezig bij overstromen van de Maasoever omdat de geulen vanaf de benedenstroomse zijde vol zullen lopen bij stijgende waterstanden.

Tabel 5-7: Optredende hydraulische belastingen geulen in Lelyzone Ossekamp en De Waarden

Belasting	
Stroomsnelheid	1,25 m/s en k_t^2 = 1,5 voor buitenbocht
Scheepvaartgolven (CEMT-va)	n.v.t.
Windgolven	n.v.t.

5.6.2. Ontwerp

Redeneerlijn
Voor de met steen bestorte oevers van de Maas is aangehouden dat een afstand tussen de geuloever en het zomerbed tenminste 25 m breed moet zijn om morfologisch stabiel te zijn. Daarbij dienen de oevers en drempels van de geul te worden beschermd als de stroomsnelheden daar aanleiding toe geven.

De Maasoevers langs Ossekamp en de oevers ten oosten van de veerstoep in De Waarden zijn beschermd met steenbestorting. Vanuit de rivierzijde is er door deze steenbestorting geen (grootschalige) erosie te verwachten richting geulen. De Maasoevers zelf zijn geen onderdeel van het ontwerp (buiten scope). De stabiliteit van deze oevers is niet verder onderzocht. Voor de oevers van de KRW-geulen in deze gebieden geldt dat in principe erosie is toegestaan. Echter, binnen het VVR hebben enkele delen van de geulen slechts zeer beperkte ruimte om te eroderen in de richting van het zomerbed van de Maas. Daar waar de stroomsnelheden daar reden voor geven én de afstand tussen oeverlijn geul en het zomerbed minder dan 50 m is, moet de oever van de KRW-geul versterkt worden. Op deze manier wordt geborgd dat de afstand tussen zomerbed en oeverlijn geul tenminste 25 m blijft. Conclusies is dat er geen beschermende maatregelen noodzakelijk langs de geulen in Lelyzone Ossekamp.

Voor het deel ten westen van de veerstoep in Lelyzone De waarden geldt dat deze oever is ontsteend. De steenbestorting is verwijderd tot stuwpeil. Gerekend dat hier door erosie een evenwichtstalud kan ontstaan met helling van 1:20 naar maaiveld, dan kan er na maaiveldverlaging een maximale erosiezone van 10 m ontstaan op lange termijn (20*(5,4-4,9)). Vanuit de rivierzijde is er dan met de 25 m zone voldoende afstand tussen geul en zomerbed. De Maasoevers zelf zijn geen onderdeel van het ontwerp (buiten scope). De stabiliteit van deze oevers is niet verder onderzocht. Daar waar de stroomsnelheden daar reden voor geven én de afstand tussen oeverlijn geul en zomerbed minder dan 50 m is, moet de oever van de KRW-geul versterkt worden. Op deze manier wordt geborgd dat de afstand tussen zomerbed en oeverlijn geul op lange termijn tenminste 25 m blijft.

Uit de redeneerlijn uit hoofdstuk 4 volgt dat, voor de gebieden waar een erosie beschermende maatregel vereist is, het horizontale deel van de drempel tussen het zomerbed en de KRW-geulen op NAP +5,4 m en het aansluitende talud aan beide zijden met een maaiveldniveau tot NAP +5,0 m een erosiebestendige grasbekleding (met kleilaag) voldoet als erosie beschermende maatregel. De optredende stroombelasting bij de maatgevende afvoer is aanzienlijk lager dan de kritische

stroomsnelheid van 2,0 m/s welke een klei- met grasbekleding 100 uur kan weerstaan. Aangezien hoogwatergolven op de Maas gemiddeld 5-10 dagen duren is enige erosie toch te verwachten. De hoeveelheid schade aan de klei- met grasbekleding gedurende een hoogwatergolf is moeilijk in te schatten. Vanwege de onzekerheid over de optredende erosie tijdens een hoogwatergolf wordt aanbevolen om na een hoogwatergolf (met een debiet gelijk of hoger aan 2.300 m^3/s te Borgharen) de relevante locaties te inspecteren en de grasbekleding indien nodig te herstellen. Beperkte schade aan de klei- met grasbekleding is acceptabel vanwege de grote herhalingstijd van de situaties die schade veroorzaken. Daarnaast zijn de gevolgen van de schade beperkt (enkel schade aan de grasmat en de ondergrond, geen functieverlies van zomerbed of geulen).

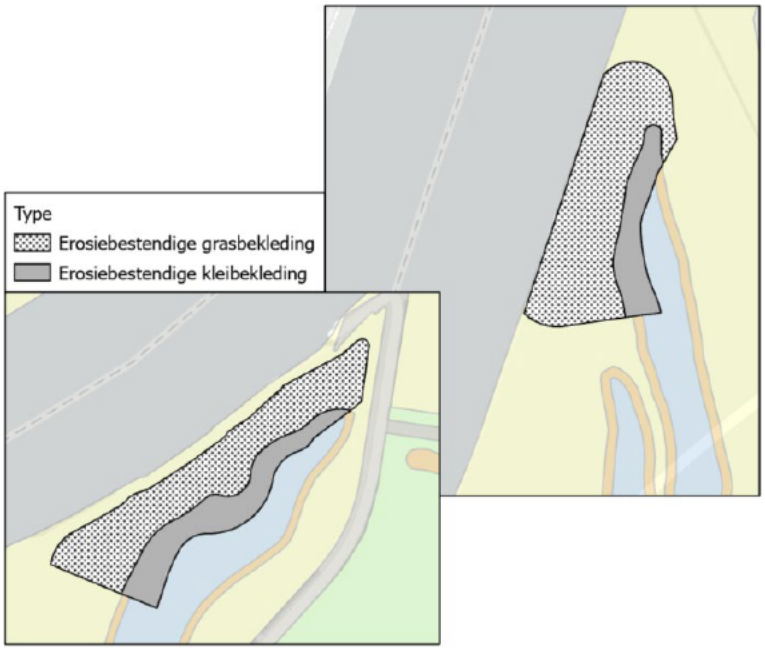
Het aansluitende onderwatertalud aan de achterzijde van de drempels tot boven een niveau van NAP +3 m bestaat uit een erosiebestendige kleibekleding met een oevervegetatie om de belasting van stroming op de oever te reduceren (natuurlijke oplossing). De bodem van de geulen in de Lelyzone mag dynamisch zijn. Dit draagt bij aan de gewenste KRW-doelen van de geulen.

Ontwerptoelichting
Langs de oevers van de geulen in Lelyzone Ossekamp zijn geen beschermende maatregelen noodzakelijk, bij de instroomdrempels van de geulen in Lelyzone De Waarden wel.

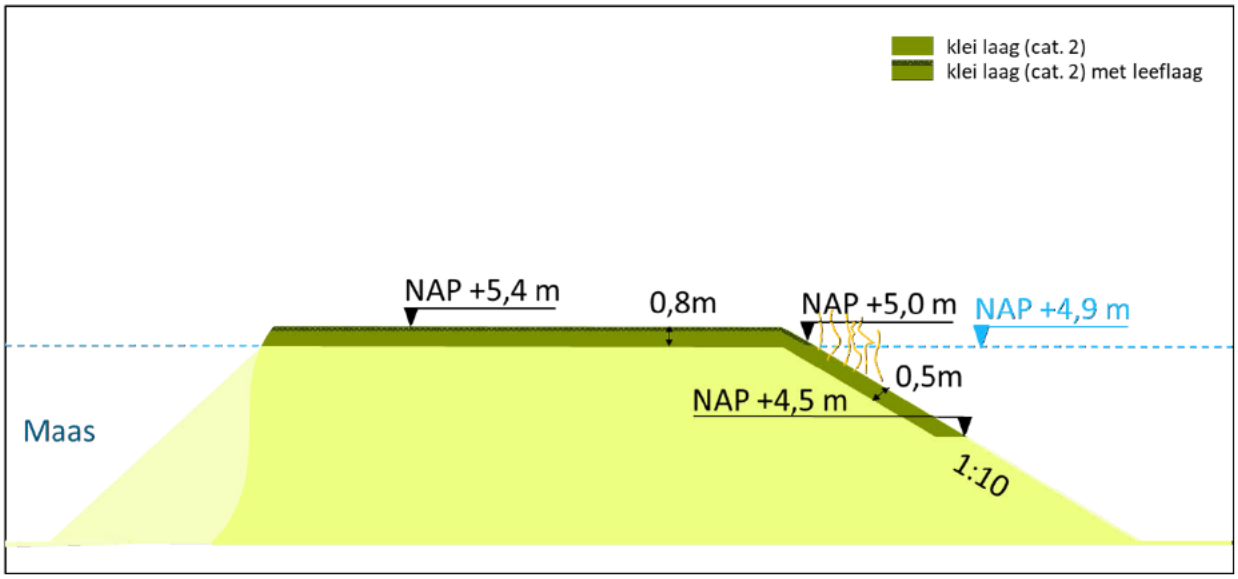
Zie Figuur 5-15 en Figuur 5-16 voor het ontwerp van de erosie beschermende maatregel in De Waarden. Op het horizontale deel van de drempel tussen het zomerbed en de geulen (NAP +5,4 m) en op het aansluitende talud met een niveau boven NAP +5,0 m bestaat de grasbekleding uit een leeflaag en een onderlaag van klei (categorie 2 klei) met een dikte 0,8 m. Een erosie beschermende grasbekleding is niet vereist binnen de VVR van de aanwezige NVO's, omdat erosie hier is toegestaan.

Het aansluitende onderwatertalud aan de achterzijde van de drempel tot een niveau van NAP +4,5 m bestaat uit een erosiebestendige kleibekleding (categorie 2 klei) met een laagdikte van 0,5 m met oevervegetatie. Deze oevervegetatie in de vorm van een rietkraag van 5 meter breed zorgt voor een afname van de stromingsbelasting op de onderliggende kale klei. Tevens zorgt de wapenende werking van de ondergrondse delen van de vegetatie voor weerstand tegen erosie. De toelaatbare (kritische) stroomsnelheid kan met een factor 2,5 worden verhoogd [2]. Zodoende is de kritische stromingsbelasting voor een erosiebestendige kleibekleding met oevervegetatie 2,0 m/s (0,8 m/s * 2,5 = 2,0 m/s) en voldoen de oevers van de geulen in de Lelyzones van Ossekamp en De Waarden.

Na realisatie van de geulen wordt riet aangeplant daar waar de oevervegetatie een oever beschermende functie heeft. De meest effectieve aanplantmethode is om grond vermengd met wortelstokken en wortels van riet aan te brengen [2]. Riet wordt aangeplant in de zone tussen NAP +5,0 m tot NAP +4,5 m om de ontwikkeling van een robuuste erosiebestendige rietkraag te stimuleren Onder dit niveau wordt geen hydraulische belasting meer verwacht bij een normaal stuwpeil van NAP +4,9 m, waterstanden onder NAP +4,7 m komen minder dan 1% van de tijd voor. Omdat de oevers van de geulen allen flauw zijn (ca. 1:10) zal binnen 0,5 - 2 jaar de gewenste rietkraag van ca. 5 m ontstaan. Hierbij wordt het risico genomen dat direct na realisatie, wanneer nog geen sprake is van begroeiing, enige erosie van de oevers plaatsvindt tijdens een hoogwater. Echter, omdat de oevers niet zwaar door golfslag worden aangevallen en de kans op een extreem hoogwater direct na realisatie klein is, kan het risico genomen worden van taludbeschadiging in de periode dat de rietkraag zich nog niet voldoende heeft ontwikkeld. Enige erosie aan de achterzijde van de drempel is immers acceptabel voor de werking van het riviersysteem. De kosten voor eventueel herstelwerk zijn in de regel lager zijn dan de kosten van de (tijdelijke) voorziening, zoals een doorgroeibaar geotextiel [2].



Figuur 5-15: Ontwerp erosiebeschermende maatregel geulen in Lelyzone De Waarden



Figuur 5-16: Dwarsdoorsnede ontwerp geulen Lelyzone De Waarden

5.7. Uitstroom westelijke geul Ossekamp

5.7.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
Zie locatiebeschrijving in sectie 5.6.1. De uitstroom van de westelijke geul Ossekamp staat in open verbinding met de Maas. Om te voorkomen dat de locatie van deze uitstroom ten opzichte van de Maas veranderd en de functie van de geul in het geding komt, zijn er erosie beschermende maatregelen nodig.

Optredende hydraulische belastingen
Voor deze locatie gelden hydraulische randvoorwaarden zoal getoond in Tabel 5-8. Voor de belastingen is uitgegaan van scheepsgolven van vaarklasse CEMT-Va (zie 2.3) en windgolven (zie 2.2). Voor de stroomsnelheid is gekeken naar de dieptegemiddelde stroomsnelheid op de locatie en een turbulentiefactor voor een buitenbocht van een rivier (toegelicht in 2.2).

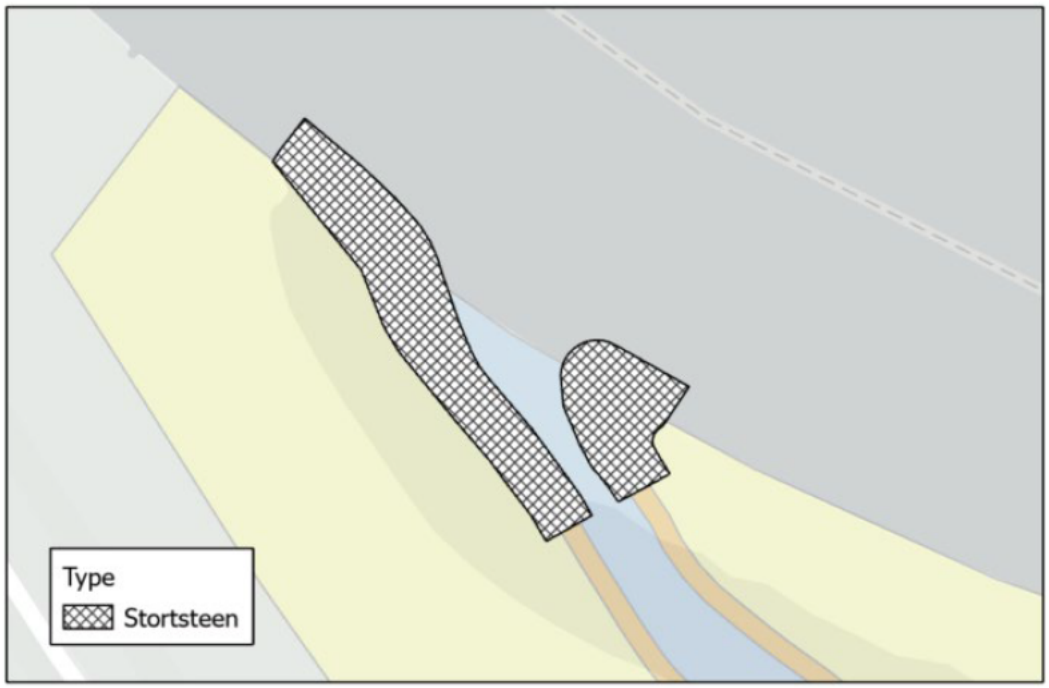
Tabel 5-8: Optredende hydraulische belastingen uitstroom westelijke geul Ossekamp

Belasting	
Stroomsnelheid	0,90 m/s en k_t^2 = 1,5 voor buitenbocht
Scheepvaartgolven (CEMT-Va Maas)	0,43 m
Windgolven	0,22 m, niet maatgevend

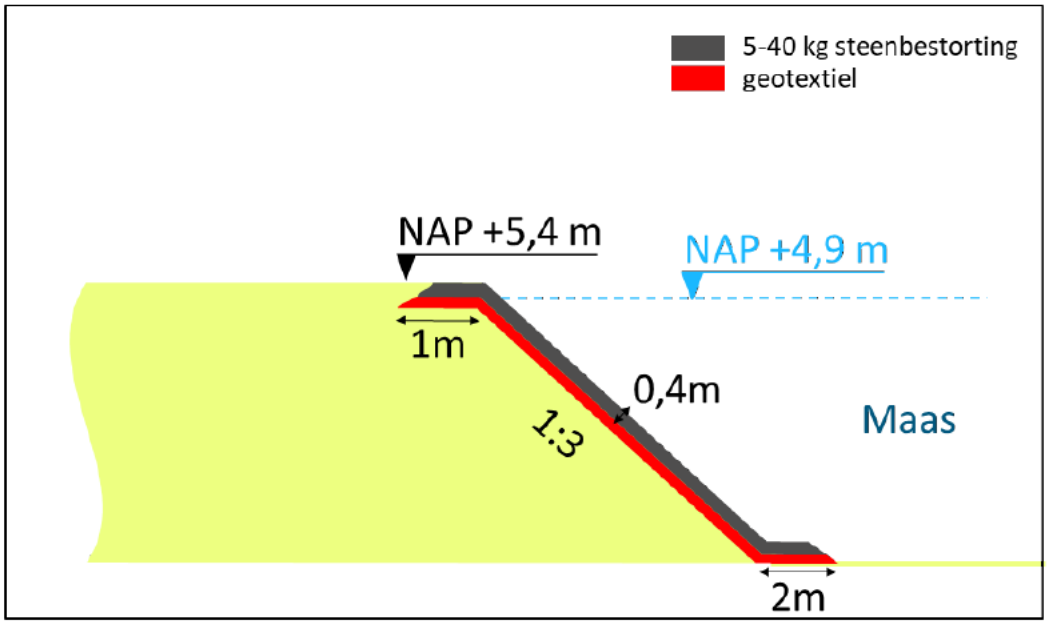
5.7.2. Ontwerp

Redeneerlijn
Voor het ontwerpprincipe van de erosie beschermende maatregelen is de redeneerlijn gebruikt zoals beschreven in hoofdstuk 4. Uit deze redeneerlijn volgt dat voor deze locatie gekeken zal worden naar een harde erosiebescherming, zoals stortsteen of betonzuilen. Voor deze locatie is namelijk geen erosie toegestaan, omdat de locatie van de uitstroom ten opzichte van de Maas vast dient te liggen voor het goed functioneren van het riviersysteem en de nautische functie van de Maas. De hydraulische randvoorwaarden laten een ander type oplossing niet toe.

Ontwerptoelichting
Voor het ontwerp (zie Figuur 5-17 en Figuur 5-18) is, zoals het ROW [12] voorschrijft, gekeken naar steen stabiliteit formules uit sectie 4.3.4 van de Rock Manual [6]. Dit is gedaan voor de maatgevende scheepsgolven en de maatgevende stromingsbelasting. De windgolven zijn niet maatgevend. Voor de stromingsbelasting is gebruik gemaakt van de formule van Izbash. Er is gekozen voor een 1:3 talud steenbestorting met breuksteengradering 5-40 kg aanwezig tot NAP +5,4 m. Op de kruin is een inkassing van <1 m beoogd, voor de teen geldt een minimale breedte van 2 m.
De steenbestorting heeft een minimale laagdikte van 0,4 m (tweemaal Dn50,gem, exclusief uitvoerings-toleranties). Vanwege de kleiige onderlaag is voor de filterconstructie gekozen voor een geotextiel. De specificaties van het type geotextiel kunnen in het UO worden vastgelegd.



Figuur 5-17: Ontwerp erosiebeschermende maatregel uitstroom westelijke geul Ossekamp



Figuur 5-18: Dwarsdoorsnede ontwerp uitstroom westelijke geul Ossekamp

5.8. Instroom geul Maasbommel west

5.8.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
In deelgebied Maasbommel West wordt een 1,5 km lange KRW-geul met smalle rietkragen gerealiseerd. In de graslanden rondom de geul ontwikkelt zich kruiden- en faunarijk grasland. De geul Maasbommel West bestaat uit aaneengesloten dieper delen met flauw oplopende oevers zodat zo veel mogelijk variatie ontstaat waarmee de KRW-doelen worden behaald. Daarnaast is de geul ontworpen om, samen met een integrale maaiveldverlaging tot NAP +5,4m, een zo groot mogelijk waterstandsdaling te realiseren.

De geul wordt gecreëerd met een brede en natuurlijk gevormde drempel aan de bovenstroomse zijde liggend op het zomerbed. De bovenzijde van deze drempel ligt op NAP +5,4m en grenst aan de oever van het zomerbed met de Maas. De geul kan instromen en uitstromen over de gehele lengte van de geul langs de Maas (circa 900 m).

Optredende hydraulische belastingen
De optredende hydraulische belasting zijn reeds bepaald in hoofdstuk 2. Scheepvaartbelasting en belasting van windgolven worden als niet relevant geacht voor de oevers van geul Maasbommel West. Enkel belasting door stromend water bij hoge afvoeren is voor de oevers van belang. Hierbij wordt een turbulentiefactor (kt^2) van 1,50 aangenomen door verhoogde turbulentie van stromend water over de drempel. Zie Tabel 5-9. Tevens is er geen extra stromingsbelasting (overlaatwerking) aanwezig bij overstromen van de drempel omdat de geul vanaf de benedenstroomse zijde zal vollopen tot NAP +5,4 m (de hoogte van de drempel).

Tabel 5-9: Optredende hydraulische belastingen instroom geul Maasbommel west

Belasting	
Stroomsnelheid	1,51 m/s en k_t^2 = 1,5 voor buitenbocht
Scheepvaartgolven (CEMT-va)	n.v.t.
Windgolven	n.v.t.

5.8.2. Ontwerp

Redeneerlijn
Voor de met steen bestorte oevers van de Maas is aangehouden dat een afstand tussen oever geul en het zomerbed tenminste 25 m breed moet zijn om morfologisch stabiel te zijn. Daarbij dienen de oevers en instroomdrempels van de geul te worden beschermd als de stroomsnelheden daar aanleiding toe geven.

De Maasoevers langs geul Maasbommel-West is ontsteend. De steenbestorting is verwijderd tot één meter onder stuwpeil en een NVO is ingericht. Uit de vergunning van de NVO volgt dat de Maasoever op lange termijn maximaal 18 meter kan terug schreiden. Vanuit de rivierzijde is er dan met de 28 m zone (18 m + 10 m buffer) voldoende afstand tussen geul en zomerbed. De Maasoevers zelf zijn geen onderdeel van het ontwerp (buiten scope). De stabiliteit van deze oevers is niet verder onderzocht. Daar waar de stroomsnelheden daar reden voor geven én de afstand tussen oeverlijn geul en zomerbed minder dan 50 m is, moet de oever van de KRW-geul versterkt worden. Op deze manier wordt geborgd dat de afstand tussen zomerbed en de oeverlijn geul op lange termijn tenminste 28 m blijft.

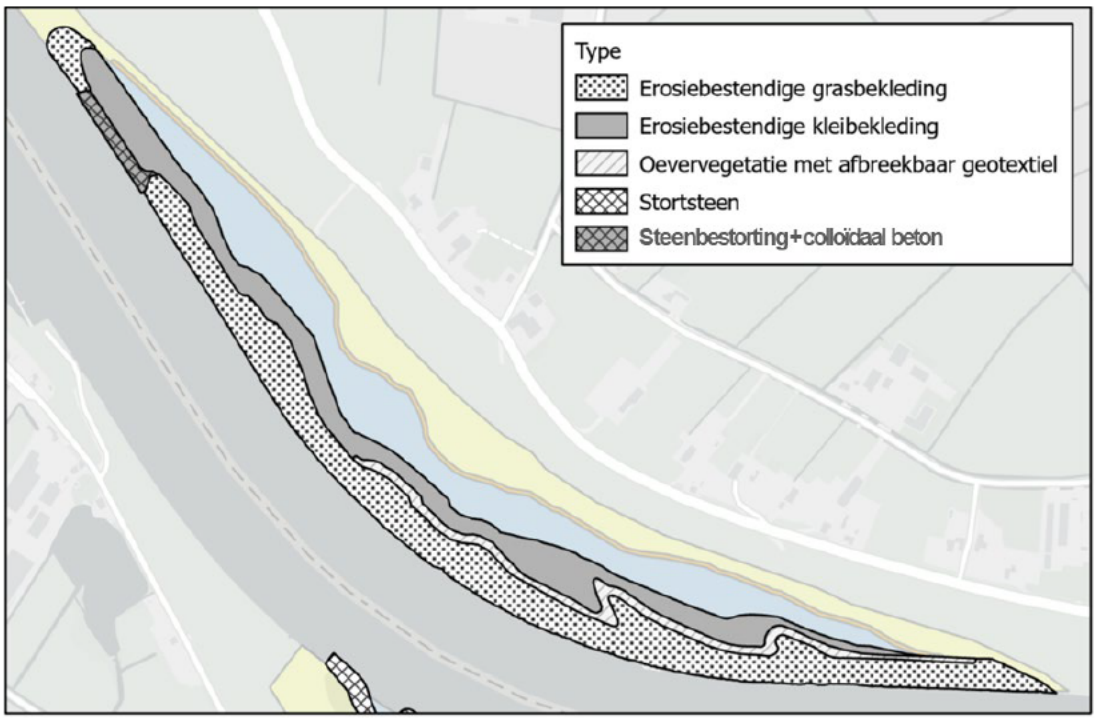
Uit de redeneerlijn uit hoofdstuk 4 volgt dat voor het horizontale deel van de instroomdrempel op NAP +5,4 m en het aansluitende talud aan beide zijden met een maaiveldniveau tot NAP +5,0 m een erosiebestendige grasbekleding (met kleilaag) voldoet als erosie beschermende maatregel. Dit is benodigde voor de gehele zone tussen zomerbed en geul, omdat de afstand tussen oeverlijn geul en zomerbed overal minder dan 50 m is. De optredende stroombelasting bij de maatgevende afvoer is lager dan de kritische stroomsnelheid van 2,0 m/s welke een klei- met grasbekleding 100 uur kan weerstaan. Aangezien hoogwatergolven op de Maas gemiddeld 5-10 dagen duren is enige erosie te verwachten. De hoeveelheid schade aan de klei- met grasbekleding gedurende een hoogwatergolf is moeilijk in te schatten. Vanwege de onzekerheid over de optredende erosie tijdens een hoogwatergolf wordt aanbevolen om na een hoogwatergolf (met een debiet gelijk of hoger aan 2.300 m^3/s te Borgharen) de relevante locaties te inspecteren en de grasbekleding indien nodig te herstellen. Beperkte schade aan de klei- met grasbekleding is acceptabel vanwege de grote herhalingstijd van de situaties die schade veroorzaken. Daarnaast zijn de gevolgen van de schade beperkt (enkel schade aan de grasmat en de ondergrond, geen functieverlies van zomerbed of geulen). Het op de drempelzone aansluitende onderwatertalud van de geul bestaat uit een erosiebestendige kleibekleding met een oevervegetatie om de belasting van stroming op de bodem te reduceren (natuurlijke oplossing).

Ontwerptoelichting
Op het horizontale deel van de instroomdrempel (NAP +5,4 m) en op het aansluitende talud met een niveau boven NAP +5,0 m bestaat de grasbekleding uit een leeflaag en een onderlaag van klei (categorie 2 klei) met een dikte 0,8 m.

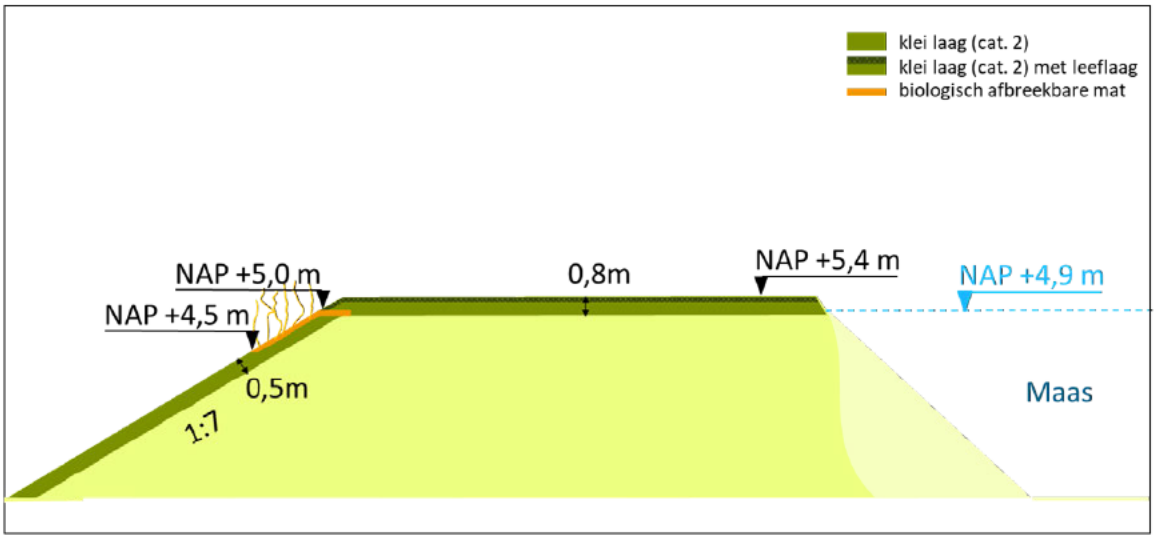
Het aansluitende onderwatertalud aan de achterzijde van de drempel tot de bodem van de geul bestaat uit een erosiebestendige kleibekleding (categorie 2 klei) met een laagdikte van 0,5 m met oevervegetatie. Hier is een raakvlak met de maatregel die nodig is vanwege de kwelbeperkende laag in de geul Maasbommel west. Voor erosiebescherming volstaat een kleilaag met een laagdikte van 0,5 m categorie 2 klei. Voor de kwelbeperkende laag zijn de specificaties strikter met een minimale kleidikte van 0,5 m van categorie 1 klei.
De oevervegetatie in de vorm van een rietkraag van ca. 5 meter breed zorgt voor een afname van de stromingsbelasting op de onderliggende kale grond. Tevens zorgt de wapenende werking van de ondergrondse delen van de vegetatie voor weerstand tegen erosie. De toelaatbare (kritische) stroomsnelheid kan met een factor 2,5 worden verhoogd [2]. Zodoende is de kritische stromingsbelasting voor een erosiebestendige kleibekleding met oevervegetatie 2,0 m/s (0,8 m/s * 2,5 = 2,0 m/s) en voldoet de instroomdrempel tussen de Maas en geul Maasbommel West. De kleilaag onder een niveau van NAP +4,9 m is echter niet onderdeel van het ontwerp van de erosiebeschermende maatregelen, aangezien de kleilaag al onderdeel is van het DO (dit in verband met eisen aan kwelbeperking).

Bij realisatie van geul Maasbommel West, wanneer nog geen sprake is van begroeiing, dient een geotextiel van natuurlijk, biologisch afbreekbaar materiaal (jute, kokos, vlas of sisal) bij een deel van de geul te worden toegepast. Dit deel dient op een hoogte van NAP +5,0 m tot NAP +4,5 m te zijn aangebracht (zie Figuur 5-19 en Figuur 5-20). Onder dit niveau wordt geen hydraulische belasting meer verwacht bij een normaal stuwpeil van NAP +4,9 m, waterstanden onder NAP +4,7 m komen minder dan 1% van de tijd voor. Het geotextiel dient om de waterbeweging als gevolg van stroming te reduceren, zodat de onderliggende kale klei minder wordt belast. Het natuurlijk afbreekbaar geotextiel wordt toegepast bij de zuidelijk, bovenstroomse helft van de geul omdat de stroomlijnen van de rivier hier relatief recht op de oever liggen en de betreffende belastingen op de oever hier het hoogst zijn. Na verloop van tijd (0,5 tot 2,0 jaar) zal de oevervegetatie de bescherming van het natuurlijk afbreekbaar geotextiel overnemen. In deze periode zal de oevervegetatie zich tot een diepte van maximaal 0,5 m ontwikkelen. Omdat de oevers van geul Maasbommel West allen flauw zijn (ca. 1:10) zal binnen deze periode een gewenste rietkraag van ca. 5 m ontstaan.

Aanplant is aan te bevelen daar waar de oevervegetatie een oever beschermende functie heeft. Dit geldt voor zowel de bovenstroomse (beschermde) helft als voor de benedenstroomse (onbeschermde) helft van de oever tussen de geul en het zomerbed. De ontwikkeling van de oevervegetatie wordt hiermee bevorderd. De meest effectieve aanplantmethode is om grond vermengd met wortelstokken en wortels van riet onder een geotextiel aan te brengen. Van belang is dan de doorgroeibaarheid van het geotextiel voor stengels [2].



Figuur 5-19: Ontwerp erosiebeschermende maatregel instroom geul Maasbommel west



Figuur 5-20: Dwarsdoorsnede ontwerp instroom geul Maasbommel west

5.9. Uitstroom geul Maasbommel west

5.9.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
Aan de benedenstroomse zijde van de geul Maasbommel West wordt een drempel gerealiseerd op NAP +5,1 m zodat de geul vanaf de benedenstroomse zijde vol stroomt bij hoogwater. Dit is een verlaging ten opzichte van het omliggend maaiveld welke een hoogte heeft van NAP +5,4 m. Voor deze drempel is het vereist dat hij passeerbaar is voor wandelaars en vee (SES-314). Bij normaal waterpeil (stuwpeil; NAP +4,9m) voorkomt deze drempel dat de geul Maasbommel West aangetakt is aan de Maas.

Optredende hydraulische belastingen
Voor deze locatie gelden hydraulische randvoorwaarden zoal getoond in Tabel 5-10. Voor de belastingen is uitgegaan van scheepsgolven van vaarklasse CEMT-Va (zie par 2.3) en windgolven (zie par 2.2). Voor de stroomsnelheid is gekeken naar de dieptegemiddelde stroomsnelheid op de locatie en een turbulentiefactor voor een buitenbocht van een rivier (toegelicht in par 2.2).

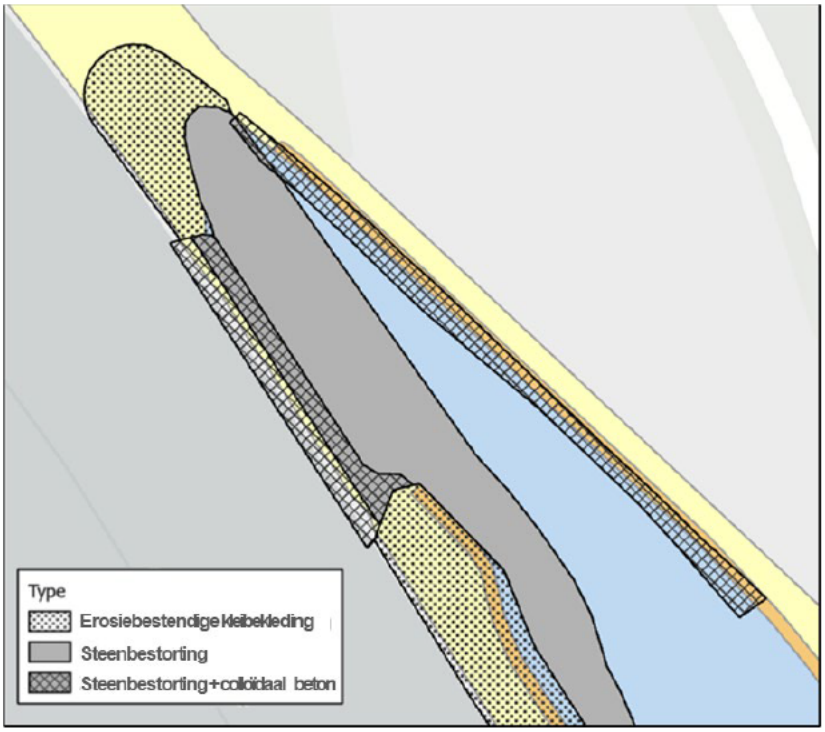
Tabel 5-10: Optredende hydraulische belastingen uitstroom geul Maasbommel west

Belasting	
Stroomsnelheid	1,18 m/s en k_t^2 = 1,5 voor buitenbocht
Scheepvaartgolven (CEMT-Va Maas)	0,43 m
Windgolven	0,22 m, niet maatgevend

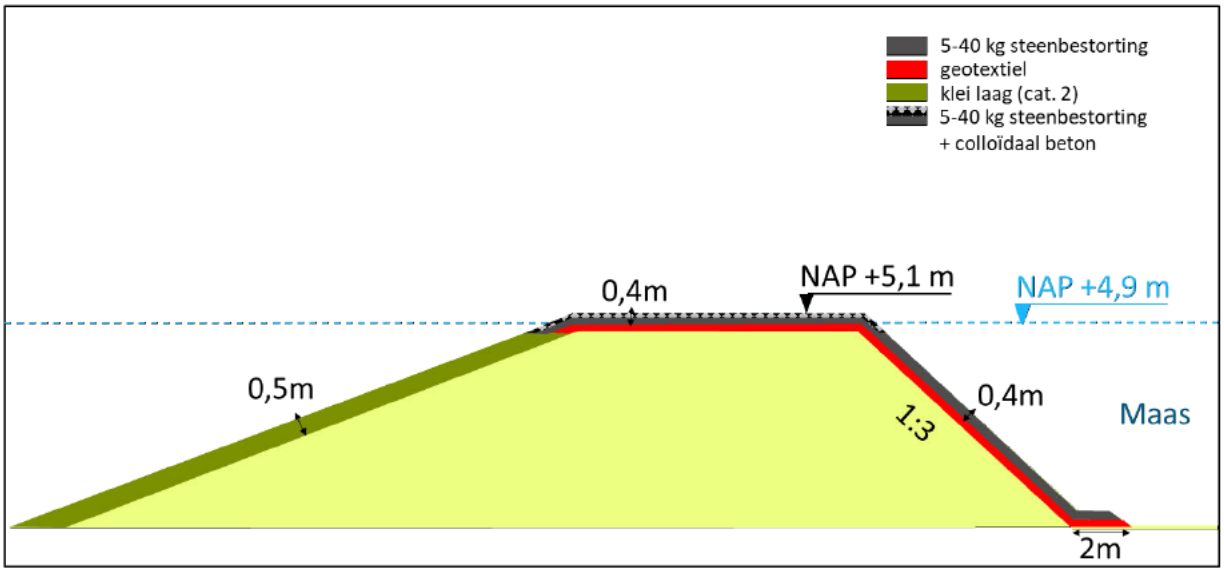
5.9.2. Ontwerp

Redeneerlijn
Voor het ontwerpprincipe van de erosie beschermende maatregelen is de redeneerlijn gebruikt zoals beschreven in hoofdstuk 4. Uit deze redeneerlijn volgt dat voor deze locatie gekeken zal worden naar een harde erosiebescherming, zoals stortsteen of betonzuilen. Voor deze locatie is namelijk geen erosie toegestaan, omdat de locatie en het profiel van de uitstroom vast dient te liggen voor het goed functioneren van het riviersysteem en de nautische functie van de Maas. De hydraulische randvoorwaarden laten een ander type oplossing niet toe.

Ontwerptoelichting
Voor het ontwerp (zie Figuur 5-21 en Figuur 5-22) is, zoals het ROW [12] voorschrijft, gekeken naar steen stabiliteit formules uit sectie 4.3.4 van de Rock Manual [6]. Dit is gedaan voor de maatgevende scheepsgolven en de maatgevende stromingsbelasting. De windgolven zijn niet maatgevend. Voor de stromingsbelasting is gebruik gemaakt van de formule van Izbash. Er is gekozen voor een 1:3 talud steenbestorting met breuksteengradering 5-40 kg aanwezig tot NAP +5,1 m. Op de kruin is, om de drempel passeerbaar te maken voor wandelaars en vee, een oplossing gekozen van een 5-40 kg breuksteengradering met colloïdaal beton opvulling.
De steenbestorting heeft een minimale laagdikte van 0,4 m (tweemaal Dn50,gem, exclusief uitvoerings-toleranties). Vanwege de kleiige onderlaag is voor de filterconstructie gekozen voor een geotextiel. De specificaties van het type geotextiel kunnen in het UO worden vastgelegd. Het aansluitende onderwatertalud aan de achterzijde van de drempel tot de bodem van de geul bestaat uit een erosiebestendige kleibekleding. Hier is een raakvlak met de maatregel die nodig is vanwege de kwelbeperkende laag in de geul Maasbommel west. Voor erosiebescherming volstaat een kleilaag met een laagdikte van 0,5 m categorie 2 klei. Voor de kwelbeperkende laag zijn de specificaties strikter met een minimale kleidikte van 0,5 m van categorie 1 klei.



Figuur 5-21: Ontwerp erosiebeschermende maatregel uitstroom geul Maasbommel west



Figuur 5-22: Dwarsdoorsnede ontwerp uitstroom geul Maasbommel west

5.10. Fietspad geul Maasbommel West

5.10.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
Aan de benedenstroomse zijde van de geul Maasbommel West wordt langs de geul een fietspad gerealiseerd. De afstand van het fietspad tot aan de oever is over een bepaald deel van het traject beperkt (<12m). Om schade aan het fietspad te voorkomen door mogelijk uittredende erosie aan de oever, is een erosiebeschermende maatregel noodzakelijk.

Optredende hydraulische belastingen

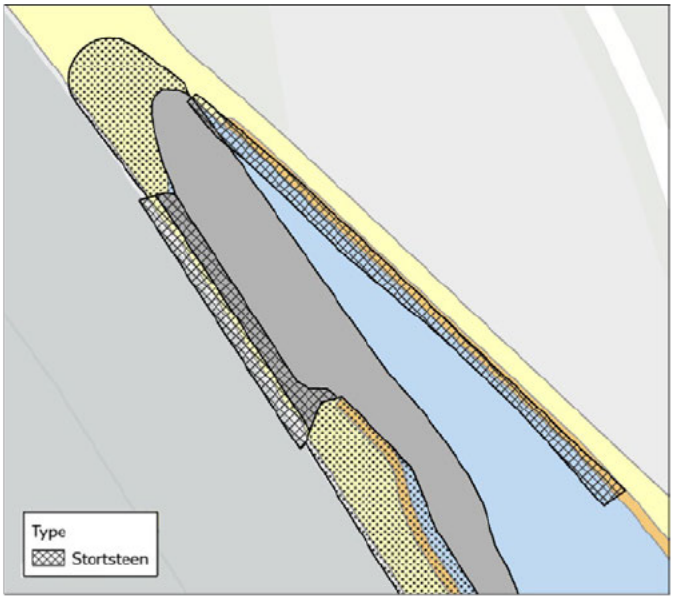
Tabel 5-11: Optredende hydraulische belastingen fietspad geul Maasbommel west

Belasting	
Stroomsnelheid	1 m/s en k_t^2 = 1,5 voor buitenbocht

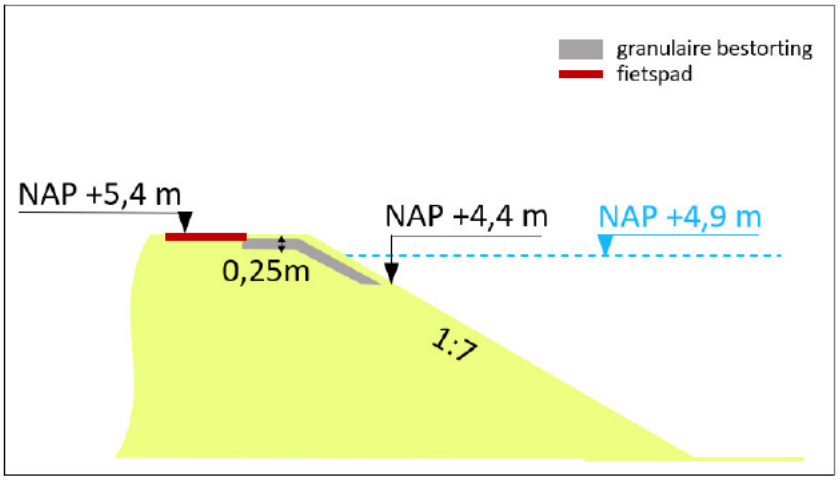
5.10.2. Ontwerp

Redeneerlijn
Voor het ontwerpprincipe van de erosie beschermende maatregelen is de redeneerlijn gebruikt zoals beschreven in hoofdstuk 4. Uit deze redeneerlijn volgt dat voor deze locatie gekeken zal worden naar een harde erosiebescherming, zoals stortsteen of betonzuilen. Voor deze locatie is namelijk geen erosie toegestaan, omdat de functie en het tracé van het fietspad behouden moeten blijven. De beperkte afstand tot de oever en de hydraulische randvoorwaarden laten een ander type oplossing niet toe.

Ontwerptoelichting
Voor het ontwerp (zie Figuur 5-23 en Figuur 5-24) is gekozen voor een granulaire bestorting 48 - 125 mm gravel gradering met minimale een laagdikte van driemaal Dn50 (exclusief uitvoerings-toleranties) dat dient als buffer voor eventuele erosie aan de oever. Echter, om aan eisen van het Bevoegd Gezag te voldoen zal een bestorting van 63 - 180 mm toegepast worden, of op een andere manier worden zekergesteld das de bestorting niet deels wegspoelt. De granulaire bestorting zal vanaf de rand van het fietspad aangelegd worden en zal doorlopen tot een halve meter onder het stuwpeil (NAP +4,4m). Onder dit niveau wordt geen hydraulische belasting meer verwacht bij een normaal stuwpeil van NAP +4,9 m, waterstanden onder NAP +4,7 m komen minder dan 1% van de tijd voor. Er kan worden gekozen om de bestorting in te graven.



Figuur 5-23: Ontwerp erosiebeschermende maatregel fietspad geul Maasbommel west

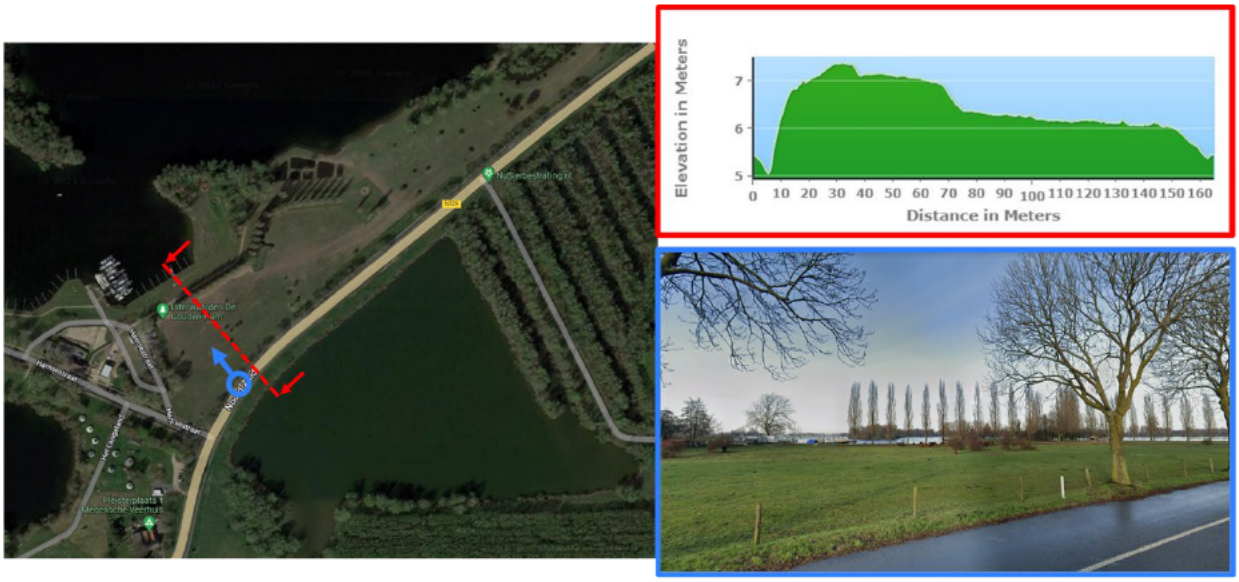


Figuur 5-24: Dwarsdoorsnede ontwerp fietspad geul Maasbommel west

5.11. N329 achter instroomdrempel Appeltern

5.11.1. Systeemanalyse

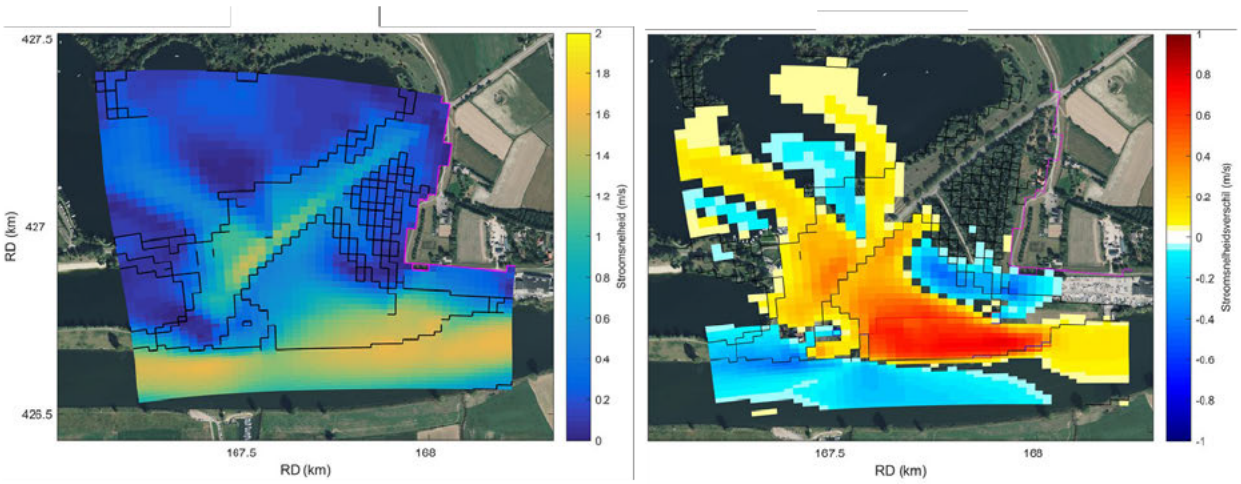
Locatiebeschrijving
Aan de benedenstroomse zijde van de instroomdrempel Appeltern kan in de DO situatie een toename van de stroomsnelheid van 0,3 à 0,4 m/s worden verwacht bij een afvoer van 4.118 m^3/s (1 in 3000 jaar situatie). Om eventuele ongewenste schade te voorkomen is een analyse nodig.



Figuur 5-25: Overzicht N329

De dwarsdoorsnede van de N329 (getoond in Figuur 5-25) bestaat uit een buitentalud van 1:7, een kruinhoogte op het laagste punt van NAP +7,3m en een relatief flauw binnentalud tussen 1:20 en 1:200.

Optredende hydraulische belastingen
Uit de analyse op stroomsnelheden blijkt dat er de 1 in 10 jaar situatie (afvoer van 2300 m^3/s) geen verschil optreedt in stroomsnelheden ten opzichte van de referentie situatie. Dit is wel het geval voor de 1 in 3000 jaar situatie (afvoer van 4118 m^3/s) waarbij de toename 0,3 á 0,4 m/s bedraagt. Figuur 5-26 toont de stroomsnelheden en het verschil in stroomsnelheid ten opzichte van de referentie situatie tijdens een afvoer van 4118 m^3/s.



Figuur 5-26: Stroomsnelheid N329 (links) en verschil t.o.v. referentie situatie bij een afvoer van 4.118 m³/s

Tabel 5-12: Optredende hydraulische belastingen fietspad geul Maasbommel west

Belasting	
Stroomsnelheid	1,4 m/s bij een afvoer van 4.118 m³/s

5.11.2. Ontwerp

Redenering
Voor deze specifieke locatie is afgeweken van de redeneerlijn en apart geanalyseerd of de verhoging van de hydraulische belasting ervoor zorgt dat er erosie beschermende maatregelen benodigd zijn.

Gezien de stroomsnelheden bij een 1/10 jaar situatie niet verschillen met het referentie model (huidige situatie) en de verandering in de 1/3000 jaar situatie relatief laag is (orde +0,4 m/s) is de verwachting dat er geen aanvullende verdediging benodigd is. Op basis van literatuur en de bewezen sterkte van deze locatie, ligt de kritieke stroomsnelheid voor de grasbekleding op deze locatie (met een relatief flauw talud) rond de 3 m/s. De stroomsnelheid in de 1/3000 jaar situatie blijft daar met 1.4 m/s ruim onder.

De beheer en onderhoudsstrategie dient wel op te anticiperen op eventuele erosie na extreme afvoeren. Er kan altijd lokaal schade optreden die na een hoogwater moet worden gerepareerd. Na een dergelijke situatie kan gericht worden gekeken naar eventuele aanvullende verdediging.

5.12. Autobrug in De Waarden

5.12.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
De autobrug De Waarden is een object in de Maasbommelse veerweg. De weg dient als ontsluiting richting de veerpont Megen-Maasbommel. De te realiseren meander De Waarden komt in open verbinding te staan met de Maas. Om te voorkomen dat er erosie plaatsvindt rondom de brugpijlers of landhoofd is een oever- en bodembescherming noodzakelijk.

Optredende hydraulische belastingen
De volgende stroomsnelheden kunnen optreden onder de brug:

- Max. stroomsnelheid door waterstand stijging bij hoogwatergolf = 0,7 m/s
- Max. stroomsnelheid bij piek hoogwater (afvoer van 4118 m3/s) = 1.0 m/s
- Max. stroomsnelheid door schroefstraal sloep op talud naast brug = 0,7 m/s
- Max. stroomsnelheid door schroefstraal sloep op bodem onder brug= 0.9 m/s

Hiervan is de stroomsnelheid van 1.0 m/s door de maximale afvoer maatgevend.

Tabel 5-13: Optredende hydraulische belastingen Autobrug in De Waarden

Belasting	
Stroomsnelheid	1,0 m/s
Scheepvaartgolven (Sloepen recreatiegeul)	0,17 m
Windgolven	n.v.t.

5.12.2. Ontwerp

Redeneerlijn
De taluds onder de brug en aan weerszijden naast de brug dienen tot drie keer de breedte van de doorvaart te worden voorzien van een afdoende bodemverdediging en beschoeiing tegen mogelijke uitspoeling en afzakking.

Ontwerptoelichting
Om erosie bij een maatgevende stroomsnelheid van 1,0 m/s te weerstaan is een Dn50 van 0.017m nodig. Als ontwerpoplossing voor de bodem- en oeververdediging is gekozen voor de Betomat PE-GF van Holcim met een tegel dikte van 0.07m (of gelijkwaardig) https://holcimcoastal.nl/betomat-type-pe-gr/. Deze kan aangesloten worden op de pijlers met stampbeton. Deze matten kunnen eenvoudig op schuine ondergronden en onder water worden aangebracht.

5.13. Veerweg Maasbommel en omgeving

5.13.1. Systeemanalyse

Locatiebeschrijving
Aan de Gelderse zijde wordt de veerweg richting de veer Megen – Maasbommel verlaagd naar NAP +6,0 m (huidige hoogte ca. NAP +6,8 m. De ligging van de weg blijft gelijk. De weg ligt binnen gemeentegrenzen gemeente West Maas en Waal. Het omliggende maaiveld wordt ook verlaagd naar NAP +5,4 aan de westzijde en NAP +5,7 m aan de oostzijde. Aan de oostzijde ligt een camperterrein. Hier wordt de aanwezige (half)verharding vervangen door een asfaltverharding.

Legenda

- Hoogtelijnen
- Lantaarnpaal
- Stroompunt & watertap
- Bolders
- Schakelkast
- Verharding
- Grasbeton
- Grastalud
- Gras

Figuur 5-27: Inrichting terrein rondom de verlaagde veerweg bij Maasbommel Oost

Optredende hydraulische belastingen
De stroomsnelheden bij een hoogwatergolf ter plaatse van dit terrein end e weg zijn bij een piekafvoer van 4.118 m^3/s zeer hoog, tot ca 2,0 m/s.

Tabel 5-14: Optredende hydraulische belastingen Veerweg Maasbommel en omgeving

Belasting	
Stroomsnelheid	2,0 m/s

5.13.2. Ontwerp

Redeneerlijn en ontwerptoelichting
In de huidige situatie ontstaat er bij een hoogwatergolf schade aan de halfverharding van het parkeerterrein bij het restaurant en de halfverharding van het camperterrein. Omdat in de toekomstige situatie de veerweg op een talud komt te liggen, een aantal decimeter boven het omliggende maaiveld, kan bij dergelijke stroomsnelheden ook schade aan de rand van wegdek ontstaan. Het nieuwe wegdek zal aan de rand worden beschermd met een dubbele rij grasbetonstenen op een talud 1:7. Het nieuwe wegdek wordt niet uitgevoerd in halfverharding, maar in asfalt.

6. ONTWERP SAMENVATTING

Het doel van dit document is het presenteren en onderbouwen van het ontwerp voor de erosie beschermende maatregelen binnen het Definitief Ontwerp (DO) voor het rivierdeel van het project Meanderende Maas. Het rivierdeel omvat de ingrepen binnen de uiterwaarden in het projectgebied (subsystemen Rivier en Meander). Het deelrapport bouwt voort op het Voorlopig Ontwerp (VO) en onderbouwt de gemaakte ontwerpkeuzes en doorgevoerde ontwerpoptimalisaties in het DO.

Uit een systeemanalyse blijkt dat 14 locaties aandacht vereisen en gekeken moet worden of erosie beschermende maatregelen nodig zijn om hun functie te waarborgen. De 14 aandachtslocaties zijn opgesomd in onderstaande lijst.

1. Instroomdrempel Appeltern;
2. Instroomdrempel Diedensche Uiterdijk oost;
3. Instroomdrempel en duiker Diedensche Uiterdijk west (Rulstraat);
4. Instroom meander De Waarden;
5. Kades recreatievaargeul meander De Waarden;
6. Aansluiting Burgemeester Delenkanaal;
7. Geulen in Lelyzone Ossekamp en De Waarden;
8. Uitstroom westelijke geul Ossekamp;
9. Instroom Geul Maasbommel west;
10. Uitstroom Geul Maasbommel west;
11. Fietspad Geul Maasbommel west;
12. N329 achter instroomdrempel Appeltern.
13. Autobrug in De Waarden
14. Veerweg Maasbommel en omgeving

Voor deze 14 locaties is gekeken of en welke maatregel nodig is. Hiervoor is een redeneerlijn gebruikt, waar onderscheid is gemaakt tussen klei/gras bekleding, natuurlijke oplossingsrichtingen of, wanneer de belastingen dermate hoog zijn, een harde erosie beschermende maatregel.

Voor locatie 12 is uit de analyse gebleken dat geen maatregel getroffen hoeft te worden maar dat de beheer en onderhoudsstrategie wel dient te anticiperen op eventuele erosie op deze locatie. Er kan dan gericht worden gekeken naar eventuele aanvullende verdediging.

REFERENTIES

[1] Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat (RWS), „Ontwerp Besluit en Toelichting Legger rijkswaterstaatswerken inclusief Vegetatielegger, Actualisatie 2021," 2021.

[2] RWS, „CUR 201 Natuurvriendelijke oevers: belasting en sterkte," Ministerie van Verkeer en Waterstaat, 1999.

[3] Rijkswaterstaat, „Statistisch overzicht afvoeren en waterstanden Watersysteem Maas en Kanalen 1991-2015, PUC_164021_31," Rijkswaterstaat, 8 januari 2019.

[4] Boskalis/Royal HaskoningDHV, „Technische Uitgangspunten Notitie Rivierkunde, BH6403-RHDHV-TUN Rivier_DO_v2.0," 16 augustus 2021.

[5] G. Schiereck, Introduction to bed, bank, shore protection, Delft: TU Delft, Department Hydraulic Engineering, 1993.

[6] CIRIA; CUR; CETMEF, The Rock Manual. The use of rock in hydraulic engineering (2nd edition), London: C683, CIRIA, 2007.

[7] Rijkswaterstaat, „Richtlijnen Vaarwegen 2020," 2020.

[8] Projectorganisatie Meanderende Maas, „Recreatievaart beoordeling, 117909-2.3.1d/21-000.550," 13 januari 2021.

[9] Projectorganisatie Meanderende Maas, „Ontwerp monding Burgemeester Delenkanaal, 117909-2.3.1d/21-000.548," 13 januari 2021.

[10] Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, „Technisch rapport erosiebestendigheid van grasland als dijkbekleding (TR-12)," Technische Adviescommissie voor de Waterkeringen, Delft, 1998.

[11] „Handreiking Grasbekleding," Stowa, 2022. [Online]. Available: https://handreikinggrasbekleding.nl/. [Geopend 26 januari 2022].

[12] Rijkswaterstaat, „Richtlijn Ontwerp Waterbouw," Rijkswaterstaat GPO, 2020.

[13] Deltares, „WAQBANK - User manual," 2014.

[14] Boskalis/RoyalHaskoningDHV, „Deelrapport Rivierkundige beoordeling, WSB.4.4-0038, versie 2.0," 7 oktober 2022.

[15] Boskalis/Royal HaskoningDHV, „Ontwerpnota DO Rivier, 32858-ONT-00020 / WSB.4.4-0020, versie 4.0," 7 oktober 2022.

[16] Ingenieursteam Meanderende Maas, „Voorkeursalternatief Meanderende Maas," 18 december 2019.

[17] Ingenieursteam Meanderende Maas, „Beeldkwaliteitsplan Meanderende Maas," 6 november 2020.

BIJLAGEN

Bijlage A: Optredende scheepvaart belastingen Maas

Bijlage B: Optredende windgolf belastingen Maas

Bijlage C: Optredende schroefstraal belastingen sloepen

Bijlage D: Voorbeeld steengrootte t.b.v. scheepvaart Maas

Bijlage E: Voorbeeld steengrootte t.b.v. windgolven Maas

Bijlage F: Voorbeeld steengrootte t.b.v. stroming Burgemeester Delenkanaal

Bijlage G: Vlakken van Vrije Ruimte

BIJLAGE A

Optredende scheepsgolf belastingen Maas

SHIP INDUCED WAVES AND WATER MOTIONS

INPUT:

Constants: $g = 9.807\,m \cdot s^{-2}$ hour $:= 3600 \cdot sec$ knot $:= \frac{1853.25 \cdot m}{3600 \cdot sec}$

Waterway info:

Still water: $SWL := 0 \cdot m$ CD

Bed level: $h_{bed} := -7 \cdot m$ CD

Width at bed: $b_b := 108 \cdot m$

Bank slope gradient: $\cot\alpha := 3.0$

Sailing distance to channel axis: $y := 54.3 \cdot m$

Vessel info:

Lenght: $L_s := 110 \cdot m$

Breadth: $B_s := 11.4 \cdot m$

Draught: $T_s := 3.5 \cdot m$

Midship coefficient: $C_m := 0.9$

Ship speed: $V_s := 4.2 \cdot \frac{m}{s}$

Ship speed coefficient: $f_v := 0.75$

Ship type coefficient: $\alpha_i := 1$

FORMULAE AND DERIVED PARAMETERS:

Water depth: $h := SWL - h_{bed}$ $h = 7\,m$

Waterway width at SWL: $b_w := b_b + 2 \cdot h \cdot \cot\alpha$ $b_w = 150\,m$

Waterway cross sectional area: $A_c := 0.5 \cdot (b_b + b_w) \cdot h$ $A_c = 903\,m^2$

Submerged ship cross section: $A_m := C_m \cdot B_s \cdot T_s$ $A_m = 36\,m^2$

Sailing distance to bank: $y_s := 0.5 \cdot b_w - \frac{B_s}{2} - y$ $y_s = 15\,m$

Calculation of vessel limit speed:

Factor F_L: $X := 0.01$ Given $X = \left[\frac{2}{3} \cdot \left(1 - \frac{A_m}{A_c} + 0.5 \cdot X^2\right)\right]^{\frac{3}{2}}$

$F_L := \mathrm{Find}(X) = 0.759$ $F_L = 0.759$

Vessel limit speed:

$V_{L1} := F_L \cdot \sqrt{g \cdot \frac{A_c}{b_w}}$ $V_{L1} = 5.84\,m \cdot s^{-1}$

$V_{L2} := \sqrt{\frac{g \cdot L_s}{2 \cdot \pi}}$ $V_{L2} = 13.1\,m \cdot s^{-1}$

$V_{L3} := \sqrt{g \cdot h}$ $V_{L3} = 8.29\,m \cdot s^{-1}$

$V_L := \min(V_{L1}, V_{L2}, V_{L3})$ $V_L = 5.84 \cdot m \cdot s^{-1}$

$V_L = 11.3 \cdot knot$

Maximum actual vessel speed: $V_{smax} := f_v \cdot V_L$ $V_{smax} = \blacksquare \cdot m \cdot s^{-1}$

$V_{smax} = \blacksquare \cdot knot$

Design vessel speed $V_{sdesign} := \min(V_s, V_{smax})$

Mean water level depression and mean return flow velocity:

Factor for effect of V_s: $\alpha_s := 1.4 - 0.4 \cdot \frac{V_s}{V_L}$ $\alpha_s = 1.112$

Mean water level depression: $Y := 0.01 \cdot m$ Given

$$Y = \frac{V_s^2}{2 \cdot g} \cdot \left[\alpha_s \cdot \left[\frac{A_c}{b_b \cdot (h - Y) + \cot\alpha \cdot (h - Y)^2 - A_m} \right]^2 - 1 \right]$$

$\Delta h := \mathrm{Find}(Y)$ $\Delta h = 0.312\,m$

Cr. sectional area next to ship $A_{cx} := b_b \cdot (h - \Delta h) + \cot\alpha \cdot (h - \Delta h)^2 - A_m$ $A_{cx} = 821\,m^2$

Mean return flow velocity: $U_r := V_s \cdot \left(\frac{A_c}{A_{cx}} - 1 \right)$ $U_r = 0.422\,m \cdot s^{-1}$

Maximum water level depression and maximum return flow velocity:

Max. water level depression:

$$\Delta h_{max} := \begin{cases} \left(1 + 2 \cdot \frac{y \cdot h}{A_c}\right) \cdot \Delta h & \text{if } \frac{b_w}{L_s} < 1.5 \\ \left(1 + 4 \cdot \frac{y \cdot h}{A_c}\right) \cdot \Delta h & \text{if } \frac{b_w}{L_s} \geq 1.5 \end{cases}$$

$\Delta h_{max} = 0.574\,m$

Maximum return current:

$$U_{rmax} := \begin{cases} \left(1 + \frac{y \cdot h}{A_c}\right) \cdot U_r & \text{if } \frac{b_w}{L_s} < 1.5 \\ \left(1 + 3 \cdot \frac{y \cdot h}{A_c}\right) \cdot U_r & \text{if } \frac{b_w}{L_s} \geq 1.5 \end{cases}$$

$U_{rmax} = 0.599\,m \cdot s^{-1}$

Return current underneath $U_{r_keel} := 1.5 \cdot U_r$ $U_{r_keel} = 0.632\,m \cdot s^{-1}$

Height of front wave and steepness:

Height of front wave: $\Delta h_f := 0.1 \cdot \Delta h + \Delta h_{max}$ $\Delta h_f = 0.61\,m$

Steepness of front wave: $i_f := \frac{0.03}{m} \cdot \Delta h_f = 0.018$ $i_f = 0.018$

Stern (transversal) wave height, steepness and velocity:

Stern wave height: $z_{max} := 1.5 \cdot \Delta h_{max}$ $z_{max} = 0.86\,m$

Stern wave steepness: $z_0 := 0.16 \cdot y_s - 2.6m$ $z_0 = -0.2\,m$

$i_{max} := \frac{z_{max}}{z_0}$ $\mathrm{if}(i_{max} \geq 0.15, 0.15, i_{max})$ $i_{max} = -4.306$

Secondary ship waves (interference peaks):

Secondary ship wave height: $H_i := 1.2 \cdot \alpha_i \cdot h \cdot \left(\frac{y_s}{h}\right)^{-0.333} \cdot \left(\frac{V_s}{\sqrt{g \cdot h}}\right)^4$ $H_i = 0.43\,m$

Secondary ship wave length: $L_i := \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{V_s^2}{g} = 7.535\,m$ $L_i = 7.535\,m$

Secondary ship wave period: $T_i := 5.1 \cdot \frac{V_s}{g} = 2.184\,s$ $T_i = 2.184\,s$

OUTPUT :

Maximum water level depression:	$\Delta h_{rmax} = 0.57\,m$
Maximum return current:	$U_{rmax} = 0.6\,m \cdot s^{-1}$
Return current underneath ship:	$U_{r_keel} = 0.632\,m \cdot s^{-1}$
Front wave height:	$\Delta h_f = 0.61\,m$
Front wave steepness:	$i_f = 0.018$
Stern wave height:	$z_{max} = 0.86\,m$
Stern wave steepness:	$i_{max} = -4.306$
Secondary ship wave height:	$H_i = 0.43\,m$
Secondary ship wave length:	$L_i = 7.5\,m$
Secondary ship wave period:	$T_i = 2.184\,s$

BIJLAGE B

Optredende windgolf belastingen Maas

WIND GENERATED WAVE GROWTH IN RESERVOIRS AND LAKES

INPUT:

Constants:	$g = 9.807\,m\cdot s^{-2}$	$knot := \frac{1853.25\cdot m}{3600\cdot sec}$	$hour := 3600\cdot sec$
Wind speed:	$U_{10} := 24.5\cdot \frac{m}{sec}$		
Wind fetch:	$F := 0.317\cdot km$	Wind	$\phi := 0\cdot deg$
Water depth:	$d := 7m$	Wave direction:	$\theta := 0\cdot deg$

DERIVED PARAMETERS AND FORMULAE (YOUNG & VERHAGEN 1999):

$$A1 := 0.493\cdot\left[\frac{g\cdot d}{(U_{10})^2}\right]^{0.75} \qquad B1 := 0.00313\cdot\left(\frac{g\cdot F}{U_{10}^{\,2}}\right)^{0.57}$$

$$A2 := 0.331\cdot\left(\frac{g\cdot d}{U_{10}^{\,2}}\right)^{1.01} \qquad B2 := 0.0005215\cdot\left(\frac{g\cdot F}{U_{10}^{\,2}}\right)^{0.73}$$

$$H_{s_YV} := \frac{U_{10}^{\,2}}{g}\cdot 0.241\cdot\left(\tanh(A1)\cdot\tanh\left(\frac{B1}{\tanh(A1)}\right)\right)^{0.87} = 0.22\,m$$

$$T_{p_YV} := \frac{U_{10}}{g}\cdot 7.519\left(\tanh(A2)\cdot\tanh\left(\frac{B2}{\tanh(A2)}\right)\right)^{0.37} = 1.786\,s$$

DERIVED PARAMETERS AND FORMULAE (DONELAN):

$$H_{s_D} := \begin{cases} 0.00366\cdot\left[\frac{g\cdot F}{(U_{10}\cdot\cos(\theta-\phi))^2}\right]^{0.38}\cdot\frac{(U_{10}\cdot\cos(\theta-\phi))^2}{g} & \text{if } \frac{g\cdot F}{(U_{10}\cdot\cos(\theta-\phi))^2} \le 9.47\cdot 10^4 \\ 0.285\cdot\frac{(U_{10}\cdot\cos(\theta-\phi))^2}{g} & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$T_{p_D} := \begin{cases} 0.542\cdot\left[\frac{g\cdot F}{(U_{10}\cdot\cos(\theta-\phi))^2}\right]^{0.23}\cdot U_{10}\cdot\frac{\cos(\theta-\phi)}{g} & \text{if } \frac{g\cdot F}{(U_{10}\cdot\cos(\theta-\phi))^2} \le 9.47\cdot 10^4 \\ 7.56\cdot\left(U_{10}\cdot\frac{\cos(\theta-\phi)}{g}\right) & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$t_{min_D} := \begin{cases} 30.1\cdot\left[\frac{g\cdot F}{(U_{10}\cdot\cos(\theta-\phi))^2}\right]^{0.77}\cdot U_{10}\cdot\frac{\cos(\theta-\phi)}{g} & \text{if } \frac{g\cdot F}{(U_{10}\cdot\cos(\theta-\phi))^2} \le 9.47\cdot 10^4 \\ 30.1\cdot(9.47\cdot 10^4)^{0.77}\cdot U_{10}\cdot\frac{\cos(\theta-\phi)}{g} & \text{otherwise} \end{cases}$$

OUTPUT:

Significant wave height:	$H_{s_YV} = 0.22\,m$	$H_{s_D} = 0.42\,m$
Peak wave period:	$T_{p_YV} = 1.8\,s$	$T_{p_D} = 2\,s$
Minimum needed duration:	t_{min_YV} not applicable	$t_{min_D} = 266.798\,s$

BIJLAGE C

Optredende schroefstraal belasting sloepen

INPUT:

Constants $g = 9.807\,m \cdot s^{-2}$ $hour := 3600 \cdot sec$ $W = 1\,m^2 \cdot kg \cdot s^{-3}$

Berth information:		**Deberthing information:**	
Still water	$SWL := 0.0 \cdot m$ CD	Distance ship aft - slope	$y_{as} := 3.0 \cdot m$
Bed level:	$h_{bed} := -1.2 \cdot m$ CD	Distance ship side - slope (toe):	$y_{ss} := 4.5 \cdot m$
Slope gradient:	$\cot\alpha := 3.0$	**Other information:**	
Vessel information:		Density of	$\rho_w := 1000 \cdot kg \cdot m^{-3}$
Lenght	$L_s := 7 \cdot m$	Factor of confinement influen	$f := 1.5$
Breadth:	$B_s := 3 \cdot m$		
Draught:	$T_s := 1 \cdot m$		
Main engine(s) /		*Transverse*	
Total power of main	$P_p := 0.75 \cdot kW$	Total power of thruster	$P_t := 0 \cdot kW$
%-age of power	$P_{papp} := 100\%$	%-age of power	$P_{tapp} := 50\%$
Number of	$N_p := 1$	Number of	$N_t := 2$
Propeller	$D_p := 0.4m$	Thruster	$D_t := 2.85m$
Type of	$T_p := \text{"Non-ducted"}$	Type of	$T_t := \text{"Ducted"}$
Distance between	$y_p := 0.1m$	Distance between	$y_t := 4.5m$
Distance of propeller tip to	$h_{ptk} := 0.1m$	Distance of thruster tip to	$h_{ttk} := 1.60m$
Distance of propeller to ship stern:	$L_{ps} := 0.1m$	Thruster duct length:	$L_{ts} := 8m$

FORMULAE AND DERIVED PARAMETERS:

Water	$h := SWL - h_{bed}$	$h = 1.2m$
Underkeel clearance:	$K_c := h - T_s$	$K_c = 0.2\,m$
Distance propeller axis to keel:	$h_{pk} := \frac{D_p}{2} + h_{ptk}$	$h_{pk} = 0.3m$
Distance propeller axis to bed:	$h_p := K_c + h_{pk}$	$h_p = 0.5m$
Distance thruster axis to keel:	$h_{tk} := \frac{D_t}{2} + h_{ttk}$	$h_{tk} = 3.03m$
Distance thruster axis to bed:	$h_t := K_c + h_{tk}$	$h_t = 3.23m$
Distance propeller to slope (axis)	$L_p := y_{as} + L_{ps} + h_p \cdot \cot\alpha$	$L_p = 4.6m$
Distance thruster to slope (axis):	$L_t := y_{ss} + 0.5 \cdot B_s - 0.5 \cdot L_{ts} + h_t \cdot \cot\alpha$	$L_t = 11.68m$

Main propeller(s) flow:

Propellor orifice outflow velocity:

$$U_{p0} := \begin{cases} 1.48 \cdot \left(\dfrac{P_{papp} \cdot \dfrac{P_p}{N_p}}{\rho_w \cdot D_p^{\,2}} \right)^{\frac{1}{3}} & \text{if } T_p = \text{"Non-ducted"} \\ 1.17 \cdot \left(\dfrac{P_{papp} \cdot \dfrac{P_p}{N_p}}{\rho_w \cdot D_p^{\,2}} \right)^{\frac{1}{3}} & \text{otherwise} \end{cases} \qquad U_{p0} = 2.48\,m \cdot s^{-1}$$

Factor K:

$$K := \frac{15.4}{1 \cdot \cot\alpha^{\,2}} \qquad K = 1.711$$

Distance X_{Umax} :

$$X_{Umax_p} := K \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2}{K}} - 1 \right) \cdot L_p \qquad X_{Umax_p} = 3.72\,m$$

Maximum flow velocity on slope, from 1 propeller:

$$U_{p_slope1} := \begin{cases} f \cdot 2.8 \cdot U_{p0} \left(\dfrac{0.707 \cdot D_p}{X_{Umax_p}} \right) \cdot \exp\left[-15.4 \cdot \left(\dfrac{\dfrac{L_p}{X_{Umax_p}} - 1}{\cot\alpha} \right)^2 \right] & \text{if } T_p = \text{"Non-ducte} \\ f \cdot 2.8 \cdot U_{p0} \left(\dfrac{1 \cdot D_p}{X_{Umax_p}} \right) \cdot \exp\left[-15.4 \cdot \left(\dfrac{\dfrac{L_p}{X_{Umax_p}} - 1}{\cot\alpha} \right)^2 \right] & \text{if } T_p = \text{"Ducted"} \end{cases}$$

$$U_{p_slope1} = 0.72\,m \cdot s^{-1}$$

Maximum slope velocity from 2 propellers:

$$h_{p_Umax} := \frac{\left(L_p - X_{Umax_p} \right)}{\cot\alpha} \qquad h_{p_Umax} = 0.293\,m$$

$$U_{p_slope2} := \begin{cases} U_{p_slope1} & \text{if } \dfrac{h_{p_Umax}}{0.5 \cdot y_p} \le 0.578 \\ 2 \cdot \dfrac{h_{p_Umax}}{\sqrt{h_p^{\,2} + (0.5 \cdot y_p)^2}} \cdot U_{p_slope1} & \text{if } 0.578 < \dfrac{h_{p_Umax}}{0.5 \cdot y_p} < 1 \\ \sqrt{2} \cdot U_{p_slope1} & \text{if } \dfrac{h_{p_Umax}}{0.5 \cdot y_p} \ge 1 \end{cases}$$

$$U_{p_slope2} = 1.02\,m \cdot s^{-1}$$

Maximum slope flow velocity:

$$U_{p_slope} := \begin{cases} U_{p_slope1} & \text{if } N_p = 1 \\ U_{p_slope2} & \text{if } N_p = 2 \end{cases}$$

Transverse thruster(s) flow:

Thruster orifice outflow velocity: $U_{t0} := 1.15 \cdot \left(\frac{P_{tapp} \cdot \frac{P_t}{N_t}}{\rho_w \cdot D_t^2} \right)^{\frac{1}{3}}$ $U_{t0} = 0$

Factor K: $K := \frac{15.4}{1 \cdot \cot\alpha^2}$ $K = 1.711$

Distance X_{Umax}: $X_{Umax_t} := K \cdot \left(\sqrt{1 + \frac{2}{K}} - 1 \right) \cdot L_t$ $X_{Umax_t} = 9.44\,m$

Maximum flow velocit slope, from 1 thruster:

$$U_{t_slope1} := \begin{cases} f \cdot 2.8 \cdot U_{t0} \left(\frac{0.707 \cdot D_t}{X_{Umax_t}} \right) \cdot \exp\left[-15.4 \cdot \left(\frac{\frac{L_t}{X_{Umax_t}} - 1}{\cot\alpha} \right)^2 \right] & \text{if } T_t = \text{"Non-duc} \\ f \cdot 2.8 \cdot U_{t0} \left(\frac{1 \cdot D_t}{X_{Umax_t}} \right) \cdot \exp\left[-15.4 \cdot \left(\frac{\frac{L_t}{X_{Umax_t}} - 1}{\cot\alpha} \right)^2 \right] & \text{if } T_t = \text{"Ducted"} \end{cases}$$

$U_{t_slope1} = 0$

Maximum slope velocity from 2 thrusters: $h_{t_Umax} := \frac{(L_t - X_{Umax_t})}{\cot\alpha}$ $h_{t_Umax} = 0.744\,m$

$$U_{t_slope2} := \begin{cases} U_{t_slope1} & \text{if } \frac{h_{t_Umax}}{0.5 \cdot y_t} \le 0.578 \\ 2 \cdot \frac{h_{t_Umax}}{\sqrt{h_t^2 + (0.5 \cdot y_t)^2}} \cdot U_{t_slope1} & \text{if } 0.578 < \frac{h_{t_Umax}}{0.5 \cdot y_t} < 1 \\ \sqrt{2} \cdot U_{t_slope1} & \text{if } \frac{h_{t_Umax}}{0.5 \cdot y_t} \ge 1 \end{cases}$$

$U_{t_slope2} = 0$

Maximum slope flow velocity:

$$U_{t_slope} := \begin{cases} U_{t_slope1} & \text{if } N_t = 1 \\ U_{t_slope2} & \text{if } N_t = 2 \end{cases}$$

$U_{t_slope} = 0$

OUTPUT:

Main propeller(s) flow:

Propellor outflow velocity: $U_{p0} = 2.48 \cdot \frac{m}{s}$

Maximum flow velocity at bed: $U_{p_slope} = 0.72 \cdot \frac{m}{s}$

Transverse thruster(s) flow:

Thruster orifice outflow velocity: $U_{t0} = 0 \cdot \frac{m}{s}$

Maximum flow velocity at bed: $U_{t_slope} = 0 \cdot \frac{m}{s}$

BIJLAGE D

Voorbeeld steengrootte t.b.v. scheepvaart Maas

STABILITY OF ROCK AGAINST SHIP INDUCED WAVE ATTACK

INPUT:

Constants:	$g = 9.807\,m \cdot s^{-2}$	hour := 3600 · sec	
Water level:	$SWL := 0m$ CD	Damage figure:	$S := 5.0$
Bed level:	$h_{bed} := -7m$ CD	Notional permeability	$P := 0.1$
No. of passing design ships: (in lifetime)	$N := 500000$	Slope gradient:	$\cot\alpha := 3.0$
Ship sailing speed:	$V_s := 4.2\frac{m}{s}$	Density of water:	$\rho_w := 1000 \cdot \frac{kg}{m^3}$
Sailing distance to bank:	$y_s := 15m$	Density of rock	$\rho_a := 2650 \cdot \frac{kg}{m^3}$
Transversal stern wave height:	$z_{max} := 0.86m$	Coefficient:	$\alpha_i := 1$

DERIVED PARAMETERS AND FORMULAE:

Water depth:	$h := SWL - h_{bed}$	$h = 7m$
Secondary wave height:	$H_i := 1.2 \cdot \alpha_i \cdot h \cdot \left(\frac{y_s}{h}\right)^{-\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{V_s}{\sqrt{g \cdot h}}\right)^4$	$H_i = 0.43m$
Secondary wave period:	$T_i := 5.1 \cdot \frac{V_s}{g}$	$T_i = 2.184s$
Secondary wave length:	$L_i := \frac{4 \cdot \pi}{3} \cdot \frac{V_s^2}{g}$	$L_i = 7.535m$
Wave steepness:	$s := \frac{2 \cdot \pi \cdot H_i}{g \cdot T_i^2}$	$s = 0.058$
	$\tan\alpha := \frac{1}{\cot\alpha}$	$\tan\alpha = 0.333$
Irribarren numbers: (breaker parameter)	$\xi_i := \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s}}$	$\xi_i = 1.39$
Relative density:	$\Delta := \frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w}$	$\Delta = 1.65$

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

$$D_{n50H} := \frac{H_i}{8.2 \cdot P^{0.18} \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{N}}\right)^{0.2} \cdot \xi_i^{-0.5} \cdot \Delta} \qquad D_{n50H} = 0.153\,m$$

Minimum rock size for transversal stern wave:

Formula: $D_{n50z} := 0.84 \cdot \frac{z_{max}}{1.5 \cdot \cot\alpha^{\frac{1}{3}} \cdot \Delta}$ $D_{n50z} = 0.202\ m$

Convert rock diameter into rock weight:

$V_{nH} := D_{n50H}^{3} = 3.552 \times 10^{-3}\ m^{3}$ $W_{50H} := V_{nH} \cdot \rho_a = 9.41\ kg$

$V_{nz} := D_{n50z}^{3} = 8.289 \times 10^{-3}\ m^{3}$ $W_{50z} := V_{nz} \cdot \rho_a = 21.97\ kg$

OUTPUT:

Minimum rock size for secondary ship waves (= interference peaks): $D_{n50H} = 0.15\ m$

$W_{50H} = 9.41\ kg$

For design purpose $\frac{H_i}{\Delta \cdot D_{n50}}$ should be 2 to 3: $\frac{H_i}{\Delta \cdot D_{n50H}} = 1.709$

Minimum rock size for transversal stern wave: $D_{n50z} = 0.20\ m$

$W_{50z} = 21.97\ kg$

For design purpose $\frac{z_{max}}{\Delta \cdot D_{n50}}$ should be 2 to 3: $\frac{z_{max}}{D_{n50z} \cdot \Delta} = 2.575$

BIJLAGE E

Voorbeeld steengrootte t.b.v. windgolven Maas

STABILITY OF ROCK AGAINST WAVE ATTACK - DEEP WATER

INPUT:

Constants:	$g = 9.807\,m \cdot s^{-2}$	hour := 3600·sec	
Significant wave height:	$H_s := \frac{0.39}{1} m$	Damage figure:	$S := 5.0$
Mean wave period:	$T_m := 2.4 \cdot sec$	Notional permeability factor:	$P := 0.1$
Storm duration:	$S_d := 48.0 \cdot hour$	Slope gradient:	$\cot\alpha := 3$
Incoming wave direction:	$\beta := 0deg$	Fourier asperity roughness:	$P_R := 0.01$
$H_{2\%} / H_s$ (Rayleigh = 1.4)	$R_{2\%} := 1.4$	Density of rock:	$\rho_a := 2650 \cdot \frac{kg}{m^3}$
Density of water:	$\rho_w := 1000 \cdot \frac{kg}{m^3}$		

DERIVED PARAMETERS AND FORMULAE:

$$Hs_{eq} := \begin{cases} H_s & \text{if } \beta - 10deg < 20 \cdot deg \\ H_s\left[(1 - 0.42) \cdot (\cos(\beta - 10 \cdot deg))^2 + 0.42\right] & \text{if } 20 \cdot deg \le \beta - 10deg \end{cases} \qquad Hs_{eq} = 0.39\,m$$

Wave steepness: $s_m := \frac{2 \cdot \pi \cdot H_s}{g \cdot T_m^2}$ $\qquad s_m = 0.043$

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

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

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

Irribarren numbers: $\xi_m := \frac{\tan\alpha}{\sqrt{s_m}}$ $\qquad \xi_m = 1.60$

$\xi_{cr} := \left(\frac{C_{pl}}{C_s} \cdot P^{0.31} \cdot \sqrt{\tan\alpha}\right)^{\left[\frac{1}{(P+0.5)}\right]}$ $\qquad \xi_{cr} = 2.55$

Relative density: $\Delta := \frac{\rho_a - \rho_w}{\rho_w}$ $\qquad \Delta = 1.65$

Number of waves: $N_w := \frac{S_d}{T_m}$ $\qquad N_w = 72000$

Van der Meer formulae:

$$D_{nplunging} := \frac{Hs_{eq}}{C_{pl} \cdot P^{0.18} \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}}\right)^{0.2} \cdot \xi_m^{-0.5} \cdot \Delta} \cdot \frac{R_{2\%}}{1.4} = 0.162\,m$$ (plunging)

$$D_{nsurging} := \frac{Hs_{eq}}{C_s \cdot P^{-0.13} \cdot \left(\frac{S}{\sqrt{N_w}}\right)^{0.2} \cdot \sqrt{\cot\alpha} \cdot \xi_m^{P} \cdot \Delta} \cdot \frac{R_{2\%}}{1.4} = 0.214\,m$$ (surging)

$$D_{n50} := \begin{cases} D_{nplunging} & \text{if } \xi_m < \xi_{cr} \\ D_{nsurging} & \text{if } \xi_m \geq \xi_{cr} \\ D_{nplunging} & \text{if } \cot\alpha \geq 4 \end{cases} = 0.162$$

Convert rock diameter into rock weight:

$$V_n := D_{n50}^{\,3} = 4.244 \times 10^{-3}\,m^3 \qquad \frac{Hs_{eq}}{\Delta \cdot D_{n50}} = 1.46$$

$$W_{50} := V_n \cdot \rho_a = 11\,kg$$

OUTPUT:

Nominal median rock diameter $D_{n50} = 0.16\,m$

Median rock weight: $W_{50} = 11\,kg$

BIJLAGE F

Voorbeeld steengrootte t.b.v. stroming Burgemeester Deelenkanaal

SCOUR PROTECTION DESIGN AGAINST FLOW (DUTCH METHOD)

INPUT:

Constants: $g = 9.807\,m \cdot s^{-2}$

Flow parameters:

Flow velocity near bed/slope: $U_b := 1.2\,m \cdot s^{-1}$

Angle of flow attack: $\psi := 90\,deg$

Bed / slope gradient: $\cot\alpha := 3$

Design vessel parameters:

Vessel length: $L_s := 110\,m$

Vessel breadth: $B_s := 11.4\,m$

Number of propellers (1 or 2): $N_p := 1$

Propeller diameter: $D_p := 1.8\,m$

Distance propeller tip to: $C := 1.5\,m$

Distance between propellers: $y_p := 0\,m$

Thruster diameter: propeller/thruster): $D_t := 2.85\,m$

Izbash method parameter

Izbash: $\beta_{iz} := 1.5$

Pilarczyck method parameter

Stability parameter - $\phi_{sr} := 1$

Stability parameter - $\phi_{sb} := 1$

Stability parameter - $\phi_{sm} := 0.75$

Stability parameter - $\phi_{sg} := 0.75$

Turbulence: $k_t := 1.5$

Depth parameter: $k_h := 1$

Material parameters

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

Density of quarry rock: $\rho_r := 2650\,kg \cdot m^{-3}$

Density of concrete: $\rho_c := 2400\,kg \cdot m^{-3}$

Angle of repose for: $\phi_r := 40\,deg$

Angle of repose for concrete: $\phi_c := 40\,deg$

Angle of repose for: $\phi_s := 32\,deg$

Porosity of quarry: $n_p := 0.4$

Rock layer thickness coefficient: $K_t := 0.95$

Scour protection area parameters:

Quay wall embedment level: $h_{wall} := -34.5\,m$ CD

Bed level (without scour prot.) $h_{bed} := -18.0\,m$ CD

Expected scour: $h_{scour} := 2\,m$

Expected scour hole: $\cot\alpha_s := 2.5$

Distance ship to quay front: $b_{quay} := 3\,m$

Bernoulli's law / uplift parameter

Lift factor: $C_L := 0.75$

FORMULAE AND DERIVED PARAMETERS:

Relative density of rock: $\Delta_r := \frac{\rho_r}{\rho_w} - 1$ $\Delta_r = 1.65$

Relative density of concrete: $\Delta_c := \frac{\rho_c}{\rho_w} - 1$ $\Delta_c = 1.4$

Relative density of gabion: $\Delta_g := (1 - n_p) \cdot \left(\frac{\rho_r}{\rho_w} - 1\right)$ $\Delta_g = 0.99$

Slope angle: $\alpha := \operatorname{atan}\left(\frac{1}{\cot\alpha}\right)$ $\alpha = 18.4 \cdot deg$

Bed / slope factor - rock: $k_{slr} := \frac{\cos(\psi) \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{\cos(\alpha)^2 \cdot \tan(\phi_r)^2 - \sin(\psi)^2 \cdot \sin(\alpha)^2}}{\tan(\phi_r)}$ $k_{slr} = 0.871$

Bed / slope factor - mattres: $k_{slc} := \frac{\cos(\psi) \cdot \sin(\alpha) + \sqrt{\cos(\alpha)^2 \cdot \tan(\phi_c)^2 - \sin(\psi)^2 \cdot \sin(\alpha)^2}}{\tan(\phi_c)}$ $k_{slc} = 0.871$

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

Min. average median rock diameter: $D_{50} := \beta_{iz} \cdot \frac{1}{k_{slr}} \cdot \frac{U_b^2}{2 \cdot g \cdot \Delta_r}$ $D_{50} = 0.08\,m$

Average nominal median rock diame $D_{n50} := 0.843 \cdot D_{50}$ $D_{n50} = 0.06\,m$

Minimum average median rock mass: $M_{50} := D_{n50}^3 \cdot \rho_r$ $M_{50} = 0.7\,kg$

Minimum required rock grading:

$$Grading := \begin{cases} \text{"5-40kg"} & \text{if } M_{50} \le M_{50a} \\ \text{"10-60kg"} & \text{if } M_{50a} \le M_{50} < M_{50b} \\ \text{"40-200kg"} & \text{if } M_{50b} \le M_{50} < M_{50c} \\ \text{"60-300kg"} & \text{if } M_{50c} \le M_{50} < M_{50d} \end{cases}$$

$Grading = \text{"5-40kg"}$

Average rock layer thickness:

$$t_l := \begin{cases} 2 \cdot K_t \cdot D_{n50a} & \text{if } Grading = \text{"5-40kg"} \\ 2 \cdot K_t \cdot D_{n50b} & \text{if } Grading = \text{"10-60kg"} \\ 2 \cdot K_t \cdot D_{n50c} & \text{if } Grading = \text{"40-200kg"} \\ 2 \cdot K_t \cdot D_{n50d} & \text{if } Grading = \text{"60-300kg"} \end{cases}$$

$t_l = 0.38\,m$

2. Gabion mattresses (Pilarczyck):

Average nominal median rock diame $D_{n50_g} := \frac{0.035}{0.7} \cdot \phi_{sr} \cdot \frac{k_t^2 \cdot k_h}{k_{slr}} \cdot \frac{U_b^2}{2 \cdot g \cdot \Delta_r}$ $D_{n50_g} = 5.75 \times 10^{-}$

Average median rock mass: $M_{50_g} := D_{n50_g}^3 \cdot \rho_r$ $M_{50_g} = 0.001\,kg$

Gabion mattress thickness: $D_{gabion} := \frac{0.035}{0.07} \cdot \phi_{sg} \cdot \frac{k_t^2 \cdot k_h}{k_{slc}} \cdot \frac{U_b^2}{2 \cdot g \cdot \Delta_g}$ $D_{gabion} = 0.07\,m$

$D_{gabion_min} := 1.8 \cdot D_{n50_g}$ $D_{gabion_min} = 0.01\,m$

$$D_{gabion} := \begin{cases} D_{gabion_min} & \text{if } D_{gabion} < D_{gabion_min} \\ D_{gabion} & \text{if } D_{gabion} \ge D_{gabion_min} \end{cases}$$

$D_{gabion} = 0.07\,m$

3. Filter nets (e.g. Kyowa Filter Unit):

Follow Filter Unit guidance / brochure => Minimum size is 2 tonnes unit $H_{FU} := 0.4m$

FU's in 2 layers for adequate scour protectio $d_{FU} := 1.90m$

Filter Unit layer thickness: $D_{FU} := 2 \cdot H_{FU}$ $D_{FU} = 0.8\,m$

4. Loose placed blocks (Pilarczyck):

Concrete block thickness: $D_{block} := \frac{0.035}{0.05} \cdot \phi_{sb} \cdot \frac{k_t^2 \cdot k_h}{k_{slc}} \cdot \frac{U_b^2}{2 \cdot g \cdot \Delta_c}$ $D_{block} = 0.09\,m$

5. Cabled block mats (Pilarczyck):

Concrete mattress / slab thickness: $D_{blockmat} := \frac{0.035}{0.07} \cdot \phi_{sm} \cdot \frac{k_t^2 \cdot k_h}{k_{slc}} \cdot \frac{U_b^2}{2 \cdot g \cdot \Delta_c}$ $D_{blockmat} = 0.05\,m$

6. Concrete mattresses / concrete slabs:

Thickness (Pilarczyck): $D_{mattress1} := \frac{0.035}{0.07} \cdot \phi_{sm} \cdot \frac{k_t^2 \cdot k_h}{k_{slc}} \cdot \frac{U_b^2}{2 \cdot g \cdot \Delta_c}$ $D_{mattress1} = 0.05\,m$

Thickness (uplift / Bernoulli's law) $D_{mattress2} := C_L \cdot k_t^2 \cdot \frac{U_b^2}{2 \cdot g \cdot \Delta_c}$ $D_{mattress2} = 0.09\,m$

$$D_{mattress} := \begin{cases} D_{mattress1} & \text{if } D_{mattress1} \geq D_{mattress2} \\ D_{mattress2} & \text{if } D_{mattress2} > D_{mattress1} \end{cases}$$

$D_{mattress} = 0.09\,m$

Minimum area of scour protection to be applied:

Scour protection width - passive wedg $\delta_w := 45deg + \frac{\phi_s}{2}$ $\delta_w = 61 \cdot deg$

$d_{wall} := h_{bed} - h_{wall}$ $d_{wall} = 16.5\,m$

$B_{wedge} := d_{wall} \cdot \tan(\delta_w)$ $B_{wedge} = 29.8\,m$

$B_{edge} := h_{scour} \cdot \cot\alpha_s$ $B_{edge} = 5\,m$

$B_{prot1} := B_{wedge} + B_{edge}$ $B_{prot1} = 34.8\,m$

Scour protection width - Deltares: $B_{prot2} := b_{quay} + 0.5 \cdot B_s + 0.5 \cdot y_p + 0.5 \cdot D_p + B_{edge}$

$B_{prot2} = 14.6\,m$

Scour protection width - BAW (Germa $B_{prot3} := \begin{cases} 3.5 \cdot D_p + B_{edge} & \text{if } N_p = 1 \\ 2 \cdot 3.5 \cdot D_p + B_{edge} & \text{if } N_p = 2 \end{cases}$ $B_{prot3} = 11.3\,m$

Scour protection length - continuous: $L_{prot1} := 50m + L_s + 50m$ $L_{prot1} = 210\,m$

Scour protection length - same berth:
(can be split: at bow (b) & at stern (s))

$L_{prop_behind} := 7 \cdot D_p + 5m = 17.6\,m$

$L_{prop_infront} := 3 \cdot D_p + 5m = 10.4\,m$

$L_{prot_stern} := L_{prop_behind} + L_{prop_infront}$ $L_{prot_stern} = 28\,m$

$L_{thruster} := 3.5 \cdot D_t + 5m$

$L_{prot_bow} := 2 \cdot L_{thruster}$ $L_{prot_bow} = 29.95\,m$

OUTPUT:

Thickness of scour protection types / systems:

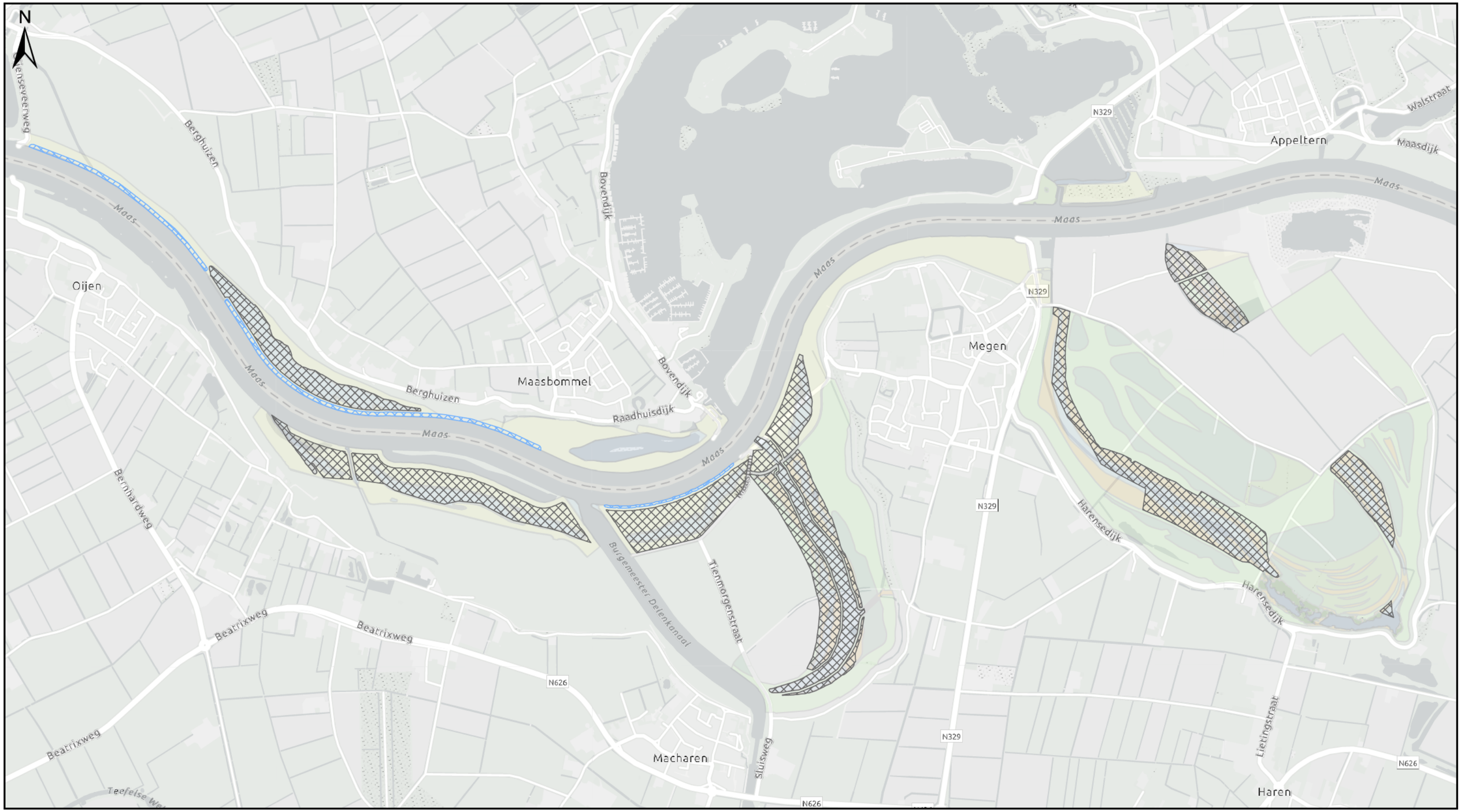
1. Loose quarry rock:	Grading = "5-40kg"	D_{n50} = 0.2 m	M_{50} = 21 kg
	t_l = 0.38 m		
2. Gabion mattresses:	D_{gabion} = 0.07 m	D_{n50_g} = 5.75 × 10⁻ M_{50_g} = 5 × 10^{-4} kg	
3. Filter nets (e.g. Kyowa Filter Unit):	D_{FU} = 0.8 m		
4. Loose placed blocks:	D_{block} = 0.09 m		
5. Cabled / connected block mats:	$D_{blockmat}$ = 0.05 m		
6. Concrete mattresses / concrete slab	$D_{mattress}$ = 0.09 m		

Minimum extension area of scour protection:

Scour protection width - passive wedg	B_{prot1} = 34.8 m
Scour protection width - Deltares:	B_{prot2} = 14.6 m
Scour protection width - BAW (Germa	B_{prot3} = 11.3 m
Scour protection length - continuous:	L_{prot1} = 210 m
Scour protection length - same berth: (can be split: at bow (b) & at stern (s))	L_{prot_stern} = 28 m L_{prot_bow} = 29.95 m

BIJLAGE G

Vlakken van vrije ruimte



Legenda

- Vlak van vrije ruimte - Voorstel Meanderende Maas
- Vlak van vrije ruimte - Natuurvriendelijke oever

Werk :	Planuitwerking Meanderende Maas, Ravenstein -Lith		
Onderdeel :	Waterschap Aa en Maas	Schaal :	1:17.000
Titel :	Vlakken van Vrije Ruimte (VVR)	Datum :	03-02-2023
Meanderende Maas Ravenstein - Lith / Boskalis / Royal HaskoningDHV Enhancing Society Together		Besteknr.	SOK MeMa 21-07-2021
		Projectnummer	P0032858
		Formaat: A3	Tekening nummer: 32858-TEK-00209