

INTEGRATIE BOUWEN MET NATUUR IN DO-ONTWERP HERINRICHTING MARKDAL



Foto van de Bovenmark in 1969 ten zuiden van stuw Galder (uit: Coenen, 2015).



INTEGRATIE BOUWEN MET NATUUR IN DO-ONTWERP HERINRICHTING MARKDAL

Opdrachtgever:	Waterschap Brabantse Delta
Auteurs	Bart Reeze (Bart Reeze Water & Ecologie) Gilbert Maas (Geo Inspiratie)
Datum:	28 mei 2021
Status:	Definitief
Citeren als:	Reeze, B. en G. Maas, 2021. Integratie Bouwen met Natuur (BmN) in DO-ontwerp herinrichting Markdal. Bart Reeze Water & Ecologie, Harderwijk.



INHOUD

1. Inleiding.....	3
1.1 Aanleiding.....	3
1.2 Vraagstelling.....	3
1.4 Afbakening	3
1.5 Leeswijzer	3
2. Bouwen met natuur	4
3. Uitgangspunten voorlopig ontwerp	7
4. Evaluatie voorlopig ontwerp (VO).....	9
4.1 Bouwen met natuur in het VO	9
4.2 Effecten	14
5. Conclusie en aanbevelingen.....	21
5.1 Conclusie	21
5.2 Aanbevelingen voor het definitieve ontwerp (DO).....	22
5.3 Overige aandachtspunten n.a.v. het VO	29
6. Literatuur	30
Bijlage: systeemkenmerken huidige situatie	32
Colofon	38

1. INLEIDING

1.1 AANLEIDING

Op dit moment wordt door een bouwteam toegewerkt naar een DO-ontwerp voor de herinrichting van de Mark (zuidelijk deel: grens België - stuw Galder). In het bouwteam zijn vertegenwoordigd waterschap Brabantse Delta, vereniging Markdal, RHDHV (adviseur waterschap) en Vissers Ploegmakers (aannemer).

In de DO-ontwerp wordt een optimale integratie van Bouwen met Natuur principes nagestreefd. Hierbij worden verschillende ambitieniveaus onderscheiden:

- Op het niveau van het ontwerp (ontwerp biedt zoveel mogelijk kansen voor natuurlijke processen: de beek houdt zichzelf in stand);
- Op het niveau van de maatregelen (in het ontwerp worden waar mogelijk en waar relevant kleinschalige maatregelen toegepast);
- Op het niveau van de uitvoering: het ontwerp wordt zoveel mogelijk met behulp van natuurlijke processen gerealiseerd.

In het DO dient zichtbaar te worden gemaakt welke natuurlijke processen worden nagestreefd en welke kleinschalige maatregelen daarvoor kunnen worden ingezet.

1.2 VRAAGSTELLING

Op dit moment heeft het bouwteam de volgende vragen m.b.t. de uitwerking van Bouwen met Natuur in het DO-ontwerp:

Evaluatie VO-ontwerp:

1. Kijkend op VO abstractie niveau: zijn de voorgenoemde 3 ontwerppijlers (ambitieniveaus) in het VO ontwerp goed toegepast?
2. Zo niet, wat zijn dan de consequenties (ongewenste effecten), bijvoorbeeld t.a.v. waterafvoer/aanzanding/ erosie, vegetatieontwikkeling (moeraszone), beheer en onderhoud en de stroomsnelheid?

Aanbevelingen voor DO-ontwerp:

3. Zijn er optimalisatie mogelijkheden binnen het huidige ontwerp o.a. dwarsprofiel (zonder aan de ontwerp uitgangspunten te tornen) en toepassing van BmN maatregelen? Waar kunnen eventueel aanvullend maatregelen worden toegepast?

1.4 AFBAKENING

Het project heeft betrekking op het zuidelijk deel van het projectgebied (grens België - stuw Galder). Het advies moet passen binnen de hoofdprincipes/kaders en het gekozen ambitieniveau uit VKA en VO.

1.5 LEESWIJZER

In dit rapport wordt eerst kort ingegaan op de verschillende vormen van Bouwen met Natuur bij herstelprojecten (hoofdstuk 2). In hoofdstuk 3 worden enkele belangrijke uitgangspunten bij het voorlopig ontwerp (VO) toegelicht, m.n. de uitgangspunten die relevant zijn voor Bouwen met Natuur. In hoofdstuk 4 wordt de inpassing van Bouwen met Natuur in het VO geëvalueerd. In hoofdstuk 5 worden aanbevelingen gedaan voor inpassing van Bouwen met Natuur in het definitief ontwerp (DO).

2. BOUWEN MET NATUUR

Bouwen met Natuur (Building with Nature) is een concept waarbij de natuur en natuurlijke processen worden ingezet om bepaalde doelen of resultaten te behalen. Het wordt ook wel 'eco-engineering' genoemd. De natuurlijke processen kunnen worden gebruikt als basis voor een ontwerp, maar ook als methode om een bepaalde eindsituatie te realiseren.

Daarnaast wordt de term Bouwen met Natuur gebruikt voor de toepassing van kleinschalige maatregelen, waarbij de natuur het werk doet. Hierbij worden deze kleinschalige maatregelen gepresenteerd als alternatief voor grootschalige en kostbare inrichtingsmaatregelen, zoals hermeandering, herprofilering en het creëren van waterbergingsgebieden (Verdonschot et al., 2017).

Ontwerp

Op het niveau van het ontwerp zorgt het Bouwen met Natuur principe voor zoveel mogelijk kansen voor natuurlijke processen. Het ontwerp is erop gericht dat de beek of rivier zich grotendeels zelf in stand houdt; dit betekent dat bijsturing in de vorm van onderhoud (maaïen), verstevigen van oevers en verwijderen van sediment (baggeren) niet of nauwelijks hoeft plaats te vinden. Het ontwerp is zoveel mogelijk in lijn met de natuurlijke processen. Hierbij kan het beek- of riviersysteem meebewegen met veranderingen die optreden in het stroomgebied.

Dit betekent dat het ontwerp moet aansluiten bij de drie basale natuurlijke processen in beken en rivieren:

- transport van water;
- transport van sediment;
- groei van (water)planten.

In de praktijk wordt het ontwerp grotendeels 'afgeregeld' op het transport van water (waterstanden, stroomsnelheden) en op grondwatereffecten; de andere twee processen worden slechts beperkt (vegetatieontwikkeling in de watergang, oevers en overstromingszones) of niet meegenomen in het ontwerpproces (transport van sediment: aanzanding en erosie).

De uitgangspunten voor een ontwerp waarin 'beek en beekdal terug in een nieuw dynamisch evenwicht worden gebracht' en de beek 'zichzelf duurzaam in stand kan houden' worden toegelicht in het handboek geomorfologisch beekherstel (Makaske et al., 2020a). Hierbij worden het rivierpatroon, de geulbreedte en de geuldiepte afgestemd op de afvoer, terreinhelling en samenstelling van de bodem en oevers (bodem materiaal). Het type bedding- en oevermateriaal is sterk bepalend voor de vorm en dynamiek van de beekbedding. Voor de instandhouding van de geul is het van belang dat de sedimentstromen in balans zijn, dat wil zeggen dat de aanvoer en afvoer van sediment jaarrond in dezelfde orde van grootte liggen. Daarbinnen krijgt de geul de mogelijkheid om de loop en het profiel via erosie en sedimentatie op een natuurlijke wijze aan te passen (dynamisch evenwicht).

Een belangrijk ontwerpprincipe voor beken en is dat de geulvormende afvoer ($T=1$ à $T=2$) nog net in de bedding afgevoerd kan worden (binnen het 'bakje', 'bankfull discharge'). Andere belangrijke ontwerpprincipes zijn dat er bij het ontwerp van de loop zoveel mogelijk gebruik wordt gemaakt van bestaande laagtes in het landschap en van oude meanders. Recent is daarbij het belang van een nauwkeurig inzicht in de opbouw van de ondergrond onderstreept.

Uitvoering

Ook in de uitvoering kan rekening worden gehouden met natuurlijke processen. Delen van het ontwerp kunnen zelfs met behulp van natuurlijke processen worden gerealiseerd. Een voorbeeld is het toepassen van sedimentsuppleties (zie ook onder het kopje 'toepassing van kleinschalige maatregelen') in plaats van

grootschalige graafwerkzaamheden. Een ander voorbeeld is het toestaan van de spontane ontwikkeling van vegetatie in plaats van aanplanten (of inzaaien). Een ander aspect van Bouwen met Natuur in de uitvoering is het gebruik van systeemeigen natuurlijke materialen zoals bomen (stammen, stronken en takken(bossen) en beekleem of -klei als natuurlijke oeververdediging.



Historische foto van de loop en het dwarsprofiel van de Bovenmark voor normalisatie ter hoogte van stuw Galder (richting noord) (uit: Coenen, 2015).

Toepassing van kleinschalige maatregelen

Ten slotte wordt de term Bouwen met Natuur gebruikt voor de toepassing van kleinschalige maatregelen, waarbij de natuur het werk doet. Hierbij gaat het meestal om de volgende maatregelen (Reeze et al., 2020):

- Zandsuppletie: inbrengen van zand in (actieve suppletie) of naast de beek (passieve suppletie), wat vervolgens door de beek zelf verdeeld wordt (in en om de beek);
- Beschaduwen: het verminderen van lichtinval in de beek door het aanplanten, laten staan of laten ontwikkelen van houtige begroeiing in de oeverzone direct langs de beek of bos buiten de oeverzone van de beek;
- Dood hout: het inbrengen of laten liggen van stukken / pakketten (dood) hout in de loop van de beek;
- Aangepast maaibeheer: betekent een extensiever maaibeheer dat is afgestemd op de ecologische potentie van een beek en op de randvoorwaarden vanuit de hydrologie, met name de afvoerfunctie.

Toepassing van kleinschalige maatregelen leidt niet per definitie tot positieve effecten. Het effect is afhankelijk van een aantal randvoorwaarden. De belangrijkste randvoorwaarden zijn (Reeze et al., 2020):

1. De aanwezigheid van enige stroming (m.n. in de zomersituatie) en een stabiele morfologie (geen netto erosie of sedimentatie). Onvoldoende stroming leidt tot een monotoon (slib)substraat, algen- of kroosontwikkeling en zuurstoftekort door een gebrek aan reaëratie;
2. De afwezigheid van licht. In de aanwezigheid van voldoende licht groeit de waterloop doorgaans dicht met waterplanten en/of oeverplanten. Voor de kenmerkende soorten in beken is dit ongewenst: kenmerkende substraten raken overgroeid en er ontstaan problemen met zuurstof, omdat planten 's nachts zuurstof gebruiken. Veel kenmerkende beekfauna heeft juist veel zuurstof nodig.

Voor de aanwezigheid van enige stroming en een stabiele morfologie is het volgende van belang (Reeze et al., 2020):

- Er is afvoer in de zomersituatie, de zogenaamde 'basisafvoer';
- Het waterpeil reageert (zakt of stijgt mee) met de afvoer en wordt dus niet beheerst door stuwen;
- Er is sprake van een natuurlijk dwarsprofiel met een 'talweg' waar het water zich kan concentreren bij lagere afvoeren. De 'talweg' ontstaat als gevolg van een flauw aflopende onderwaterbodem onder de gemiddelde waterlijn;
- Het lengte- en dwarsprofiel passen bij het afvoerregime (jaarlijkse piekafvoer), het verhang en de samenstelling van het beddingmateriaal (mediane korrelgrootte) (Makaske et al., 2020a);
- De aan- en afvoer van sediment (zand, slib, organisch materiaal) zijn met elkaar in evenwicht.

De laatste twee randvoorwaarden sluiten aan bij de basale natuurlijke processen van transport van water en sediment onder 'ontwerp'.

Naast stroming bepaalt de aanwezigheid van licht de effectiviteit van Bouwen met Natuur maatregelen (Reeze et al., 2020):

- Voor effectieve beperking van de groei van waterplanten (zoveel dat er niet meer gemaaid hoeft te worden) is een gesloten bladerdak boven de beek nodig van minimaal 70% (Verdonschot et al., 2016);
- In grotere (en diepere) benedenlopen (>1,20 m) wordt de hoeveelheid licht op de bodem vaak ook beperkt als gevolg van vertroebeling van de waterkolom. Bij een waterdiepte van 1,2 m is de inkomende licht intensiteit ca. 90% afgenomen en kunnen waterplanten bijna niet meer groeien. Als deze situatie zich voordoet in benedenlopen, is de randvoorwaarde voor beschaduwing minder van belang. Beschaduwing kan dan nog wel gebruikt worden om (lokaal) de ontwikkeling van de oevervegetatie te beperken.

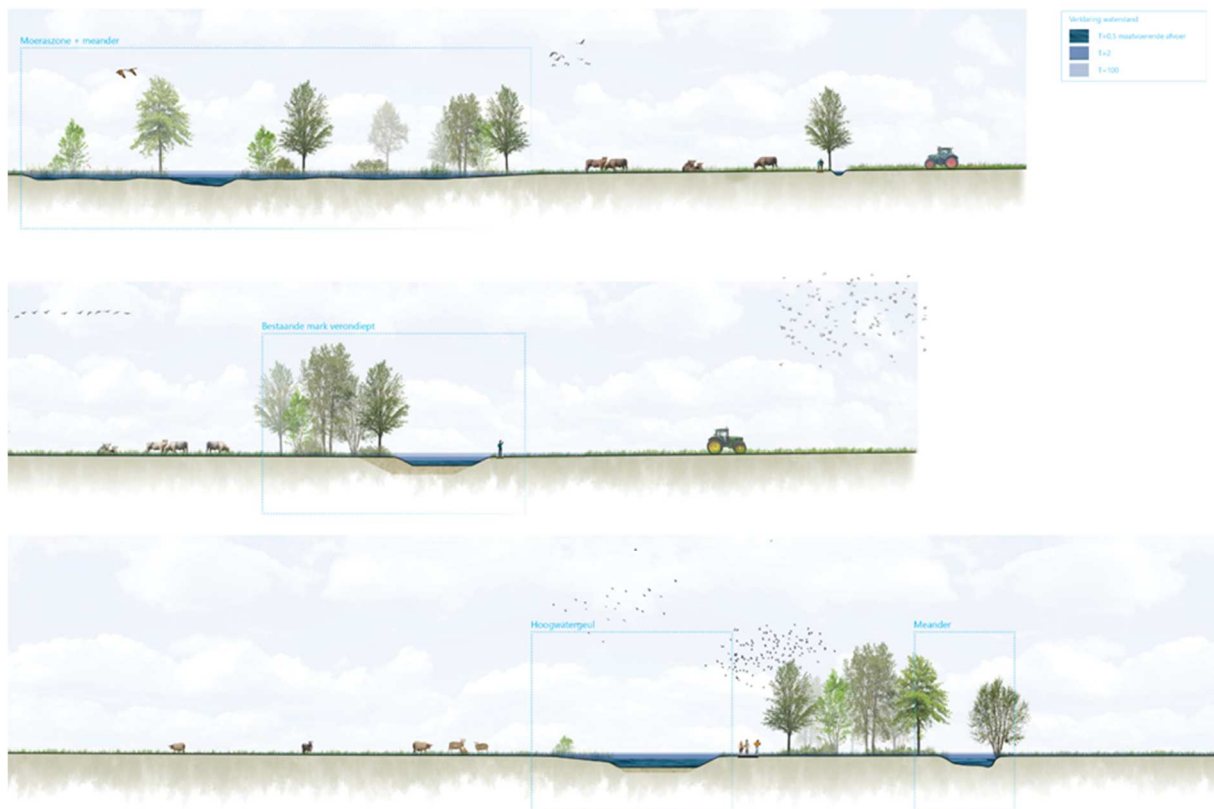


Natuurlijk dwarsprofiel met een 'talweg' waar het water zich kan concentreren bij lagere afvoeren in de Tongelreep (foto Bart Reeze).

3. UITGANGSPUNTEN VOORLOPIG ONTWERP

Inpassing hoogwatergeul

In het voorlopig ontwerp manifesteert de Mark zich grofweg in drie vormen in het beekdal. Een eerste vorm is dat de Mark volledig vrij meandert door een laagte / moeraszone ('moeraszone + meander'). In de tweede vorm blijft de Mark op de huidige locatie liggen en vindt er verondieping plaats en aanpassing (verflauwing) van de oevers ('bestaande Mark verondiept'). De derde is een nieuwe meanderende Mark waarbij de huidige Mark dienst doet als hoogwaterafvoer / hoogwatergeul ('meander+ hoogwatergeul') (Daris et al., 2021).



Figuur 3.1: Principeprofielen voorlopig ontwerp Markdal: moeraszone + meander (boven), bestaande Mark verondiept (midden) en meander + hoogwatergeul (onder).

Bouwen met natuur

In het voorlopig ontwerp zijn de volgende maatregelen en eisen geformuleerd met betrekking tot Bouwen met Natuur (Daris et al., 2021):

- Het VO voorziet locatie specifiek in het aanbrengen van hout in de beek waarmee sediment kan worden vastgehouden om natuurlijke aangroei van bodem en oever te stimuleren, zodat het profiel van de beek versmalt. Dit geldt met name bij Meander Oudhof en de tweede meander bij Notsel. Aansluitend op het aanbrengen van hout in de beek dient bij toekomstig beheer en onderhoud ook omgevallen hout in de beek te blijven liggen, omdat ingevallen bomen (naast het belang als habitat voor macrofauna en vis) de gewenste erosie en sedimentatie ook stimuleren. Dit sluit ook aan op de beheervisie (Possen, 2020);
- De nieuwe meanders dienen gemiddeld 20% kleiner gedimensioneerd te worden dan het hydrologisch berekende profiel. Binnen dit gemiddelde dient een afwijking plaats te vinden van 0 tot 40% kleiner, waarbij binnen het profiel onderscheid gemaakt dient te worden in een diepere buitenbocht en ondiepere binnenbocht (asymmetrisch profiel);
- Daar waar de (nieuwe) Mark door een moeraszone stroomt, geldt dit principe ook. Omdat hier geen hoogwatergeul is en het smaller uitvoeren van de beek direct een opstuwend effect heeft, is de afwijking

hier kleiner gehouden: de beek gemiddeld 10% kleiner dimensioneren, waarbij deze 10% gecompenseerd wordt in het naastgelegen talud / moeraszone. De totale ontgraving en daarmee de capaciteit blijft daarmee gelijk aan de hydrologisch berekende profielen;

- Het onderdimensioneren van de meanders brengt een forse toename van zandtransport teweeg. Een maatregel in het VO die aansluit op dit onderdimensioneren van de meander is het 'overdimensioneren' van de hoogwatergeul zodat er ruimte ontstaat om het in transport gekomen sediment in te vangen. In de praktijk betekent dit dat een deel van de voorziene verondieping van de hoogwatergeul niet uitgevoerd wordt. Daarnaast hoeft de verondieping van de hoogwatergeul ook niet in één keer gerealiseerd te worden, maar kan op een aantal locaties grond gestort worden. Deze grond kan vervolgens door de stroming van de beek / hoogwatergeul worden meegenomen;
- Opnemen van een zone waarbinnen de meander zich vrij kan ontwikkelen in de legger. In deze vorm vindt geen beheer meer plaats, tenzij de beek zich dreigt te begeven buiten de gedefinieerde zone. Dit geldt voor de nieuwe meanderende Mark waarbij de huidige Mark dienst doet als hoogwaterafvoer/ hoogwatergeul en de Mark volledig vrij meandert door een laagte/ moeraszone. Deze varianten zijn ook niet voorzien van een obstakelvrije (onderhouds) zone;
- Er komen dammen in de hoogwatergeul met de hoogte zoals gedimensioneerd in de hydrologische modellering en zoals aangegeven in de profielen van het VO. De breedte (basis) van de dammen dient daarbij zodanig te zijn dat ophoging van de dam in de toekomst eenvoudig te realiseren is. Mocht blijken dat eroderende en sedimenterende processen in de meander onvoldoende plaatsvinden of mocht ondanks gedegen modellering blijken dat er onvoldoende water via de meander stroomt, dan kunnen de dammen eenvoudig opgehoogd worden om deze processen alsnog te bespoedigen.

Beheer

Bij het voorlopig ontwerp zijn bovendien de volgende uitgangspunten voor het beheer geformuleerd (Possen, 2020):

- De Mark krijgt ruimte om zichzelf te ontwikkelen en te onderhouden;
- Dood hout in de beek is toegestaan, zolang dit geen knelpunten oplevert voor aangrenzend gebruik of hoogwaterveiligheid;
- De Mark wordt extensief beheerd. Dat wil zeggen dat niet het hele profiel wordt gemaaid, maar dat oevers en profiel zoveel mogelijk worden gespaard en het onderhoud richt zich op de stroombaan (bodem). Eigenlijk wordt alleen beheerd wanneer nodig, zónder hier vooraf een frequentie aan te hangen;
- Als beheerd moet worden, worden vegetatieblokken gespaard. Het sparen van delen van de vegetatie bij beheer en onderhoud werkt positief door op de ecologische doelen, omdat dit kan dienen als overwinteringshabitat, schuilplaats, bron van zaden, enzovoorts;
- Een goede balans tussen effectiviteit van onderhoud en ecologische doelen is het afmaaien van vegetatie op 10 cm boven de bodem. Wanneer het materieel (maaikorf, -balk, bodemmes) zo bediend wordt dat de vegetatie op 10 centimeter boven de bodem afgemaaid wordt, treedt weinig vertroebeling op door opwoelen van het sediment op, terwijl de vegetatie wel maximaal in groei teruggezet wordt.

4. EVALUATIE VOORLOPIG ONTWERP (VO)

4.1 BOUWEN MET NATUUR IN HET VO

Kijkend op VO abstractie niveau: zijn de voorgenoemde 3 ontwerppijlers (ambitieniveaus) in het VO ontwerp goed toegepast?

In deze paragraaf wordt het ontwerp geëvalueerd op het toepassen van Bouwen met Natuur op de drie niveaus die in hoofdstuk 2 zijn onderscheiden:

1. Ontwerp
2. Uitvoering
3. Toepassing van kleinschalige maatregelen

1. Ontwerp

In tabel 4.1 is de toepassing van Bouwen met Natuur op het niveau van het ontwerp samengevat. Dit wordt nader toegelicht in de tekst onder de tabel.

Tabel 4.1: Evaluatie ontwerp op geomorfologische ontwerpprincipes.

Kenmerk	Voldoet?	Opmerkingen
Natuurlijk patroon	Nee	Niet één meanderende geul met overstromingsvlakte. In plaats daarvan stelsel van geulen en obstakels. Verschillende principeprofielen door elkaar.
Beddingdimensies op basis van geulvullende afvoer (T=1 à T=2)	Nee	Beddingbreedte en -diepte van doorgaande loop variëren sterk, afvoeren vanaf T=0,5 worden afgevoerd via een hoogwatergeul.
Doorgaande bodem t.b.v. sedimenttransport	Nee	Sprong in bodemhoogte in doorgaande loop. Dammen met overlopen beïnvloeden sedimenttransport.
Vorm van het dwarsprofiel	Nee	Er is geen sprake van een natuurlijk dwarsprofiel met een 'talweg' waar het water zich kan concentreren bij lagere afvoeren. Het dwarsprofiel past niet bij het afvoerregime (jaarlijkse piekafvoer), het verhang en de samenstelling van het beddingmateriaal.
Meanders in laagtes of historische loop	Deels	De doorgaande geul volgt deels de historische loop. Nieuw gegraven meanders lijken niet (allemaal) in de laagste delen van het landschap te liggen.
Rekening houden met ondergrond	Enigszins	Er is rekening gehouden met de ligging van (gemakkelijk erodeerbare) donken. Er is geen gedetailleerde informatie over de ondergrond.
Peil volgt afvoer	Deels	Groot deel van het jaar vrij afstromend. Dammen zijn van invloed op peil. Peil in de meanders onnatuurlijk vanaf moment meestromen hoogwatergeul.

Het ontwerp voldoet niet aan de basale geomorfologische ontwerpprincipes zoals geformuleerd door Makaske et al. (2020a). Het ontwerp laat een stelsel van geulen zien en obstakels in de vorm van dammen. Daarbij worden verschillende principeprofielen afgewisseld. Het natuurlijke rivierpatroon van de Mark is echter één doorgaande loop met potentie voor meandering (zie de bijlage). Het principeprofiel dat hier het beste bij past is 'bestaande Mark verondiept' (zie figuur 3.1). Daarnaast worden in het projectgebied twee andere principeprofielen toegepast: 'meander + hoogwatergeul' en een variant van het principeprofiel 'meander + hoogwatergeul', waarbij de hoogwatergeul als moeras gaat functioneren, zie figuur 4.1. Deze principeprofielen

passen niet bij het natuurlijke rivierpatroon van de Bovenmark. In de variant met de hoogwatergeul wordt het overtollige water bovendien te vroeg afgeleid naar de hoogwatergeul (ongeveer vanaf een halve maatgevende afvoer ($T=0,5$), dit moet zijn vanaf $T=1$ à $T=2$).



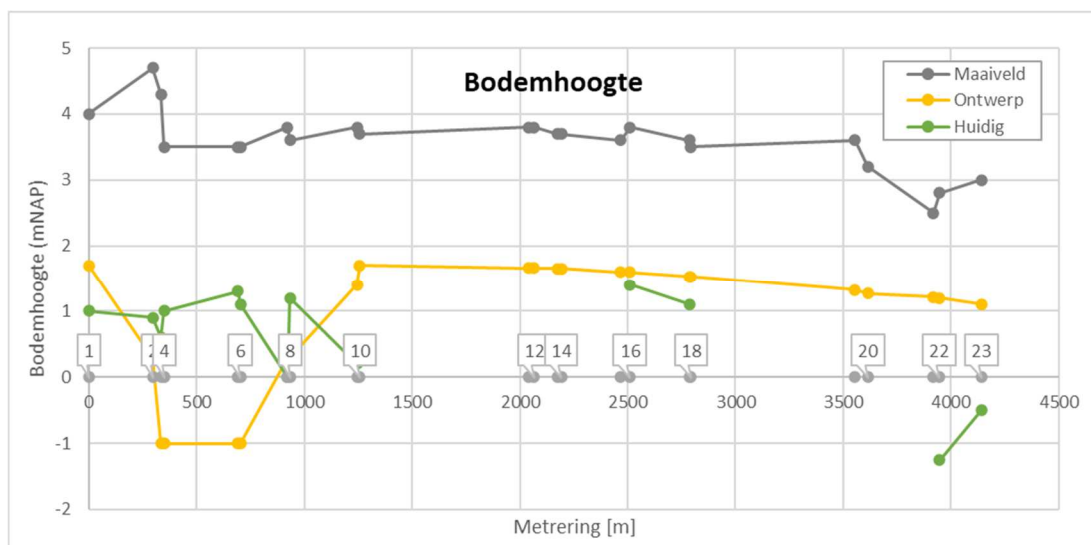
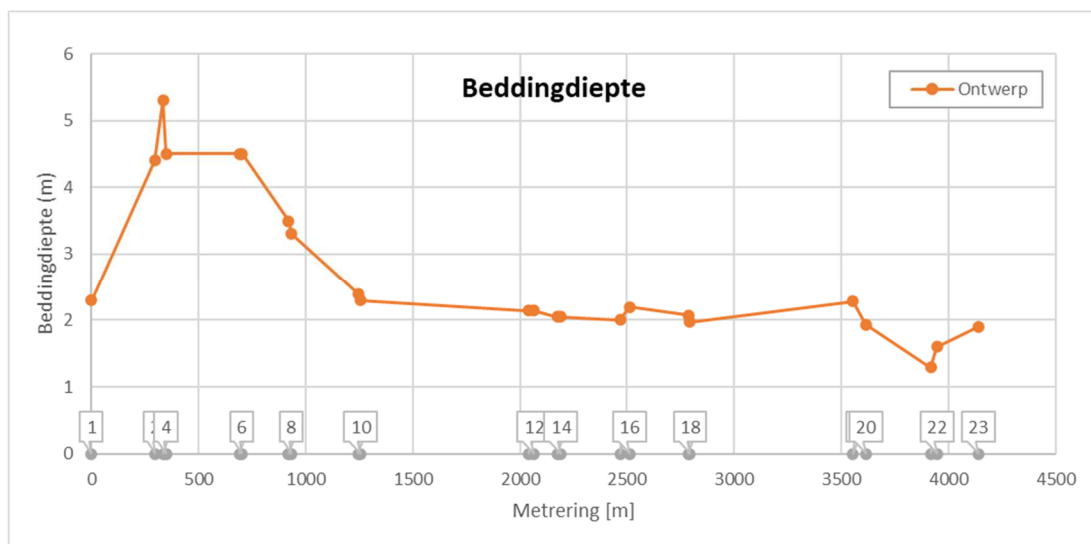
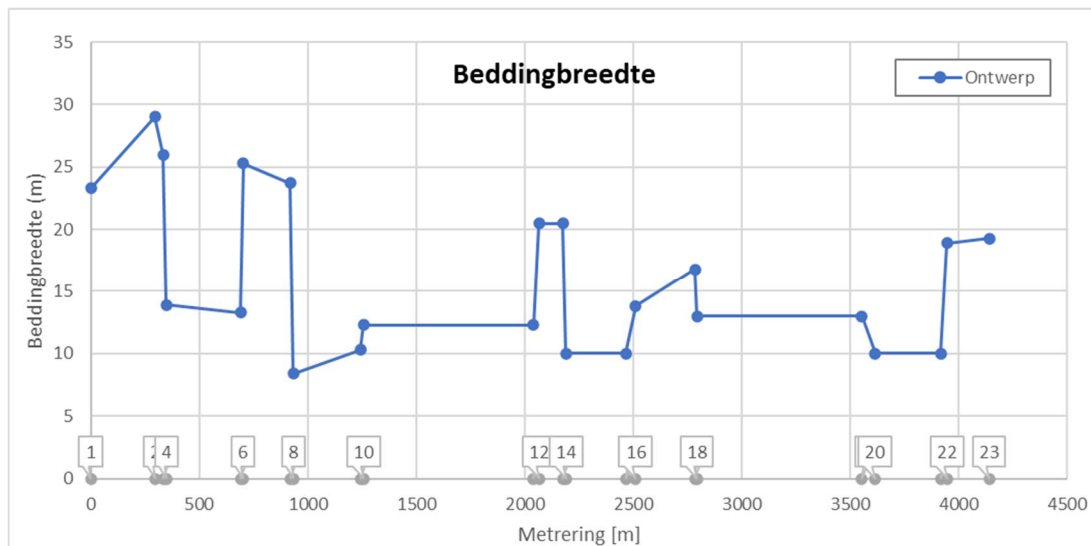
Figuur 4.1: Variant van het principeprofiel 'meander + hoogwatergeul' in het projectgebied, waarbij de hoogwatergeul als moeras gaat functioneren.

De beddingdimensies zijn niet gebaseerd op de geulvormende afvoer ($T=1$ à $T=2$). Op basis van de morfologische formules uit het handboek geomorfologisch beekherstel is de (gemiddelde) natuurlijke beddingbreedte (bovenbreedte) onder de heersende afvoeren berekend op ca. 20 meter (Makaske et al., 2020b). Deze breedte wijkt af van de historische breedte zoals o.a. te zien is op de foto op p. 5, maar geldt wel als een eerste richtpunt voor het ontwerp. De aangetakte meanders zijn (veel) smaller gedimensioneerd en bovendien niet allemaal even breed, zie figuur 4.2 (bovenste figuur). De (gemiddelde) natuurlijke beddingdiepte voor de Mark bedraagt 1,0-1,2 meter. De beddingdiepte van het ontwerp is over een groot deel van het traject een meter dieper, zie figuur 4.2 (middelste figuur). Bovendien loopt de bodemhoogte niet geleidelijk af, maar zijn er enkele sprongen in de bodemhoogte aanwezig, zie figuur 4.1 (onderste figuur).

In het ontwerp van de doorgaande loop zijn er verder enkele plekken opgenomen met flauwe oevers, zie figuur 4.3 (rode cirkels). De aanleg van flauwe oevers past niet bij de natuurlijke vorm van het dwarsprofiel voor beken en rivieren. Deze bestaat uit steile oevers boven de gemiddelde waterlijn met een flauw aflopend talud met een 'talweg' onder de gemiddelde waterlijn, zie ook figuur 5.1 en 5.4 bij de aanbevelingen. Wel komen flauwe oevers van nature voor in binnenbochten van meanders. Overigens zijn flauwe oevers wel een goede manier om de ecologische kwaliteit van de (in de zomer stagnante) hoogwatergeul te verbeteren: de verbrede land-waterovergangen dragen hier bij aan een gevarieerd oevermilieu en de ontwikkeling van de flora en fauna (van stagnant water).

Het tracé van de doorgaande loop (inclusief de meanders) ligt gedeeltelijk op de plaats van de historische loop. Nieuw gegraven meanders lijken bovendien niet (allemaal) in de laagste delen van het landschap te liggen. Bij de bepaling van de ligging van de nieuwe meanders is rekening gehouden met de ligging van (gemakkelijk erodeerbare) donken. Er is verder geen gedetailleerde informatie over de ondergrond beschikbaar.

De beekloop is vrij afstromend. Wel zijn de stuwen boven- en benedenstrooms van het projectgebied, de dammen en aangetakte delen van de hoogwatergeul sterk van invloed op het waterpeil in de verschillende trajecten van de beek. Het peil in de meanders is onnatuurlijk vanaf het meestromen van de hoogwatergeul (ongeveer vanaf de halve maatgevende afvoer; $T=0,5$). Vanaf dat moment wordt de peilstijging gedempt door het afstromen van water naar de hoogwatergeul. Op basis van de beschikbare informatie is overigens niet duidelijk welke dammen op welk moment gaan meestromen en hoe dat van invloed is op de water- (en sediment-)stromen.



Figuur 4.2: Beddingbreedte, beddingdiepte en bodemhoogte van het ontwerp in het projectgebied vanaf de grens (punt 1) tot en met stuw Galder (punt 20) en verder. NB: De ontwerp-bodemhoogtes tussen punt 1 en 9 wijken sterk af van de 'huidige' bodemhoogtes (metingen 2015), hier lijkt het ontwerp niet te kloppen. Hierdoor is ook de weergegeven beddingdiepte op dit traject waarschijnlijk niet juist weergegeven.



Figuur 4.3: Locaties in het projectgebied met glooiende oevers langs de doorgaande loop (rode cirkels).

2. Uitvoering

Bij de uitvoering wordt in het voorlopig ontwerp op drie manieren invulling gegeven aan Bouwen met Natuur. In de eerste plaats worden verondiepingen 'niet in één keer uitgevoerd, maar door op een aantal locaties grond te storten'. Daarbij is het de bedoeling dat het water het sediment verder verplaatst. Bovendien worden de meanders kleiner gedimensioneerd dan het hydrologisch berekende profiel (0-40% kleiner). Hierbij is het de bedoeling dat erosieprocessen zullen bijdragen aan het ontstaan van een natuurlijk profiel. Daarnaast kan de vegetatie langs de meanders en in de moeraszone zich spontaan ontwikkelen. Het vele benodigde graafwerk, het aanbrengen van diverse dammen en de tijdelijke oplossing bij de uitstroom achter stuw Galder vallen niet onder de noemer Bouwen met Natuur.

Tabel 4.2: Evaluatie ontwerp op gebruik natuurlijke processen in de uitvoering.

Kenmerk	Toepassing	Opmerkingen
Weinig graafwerk	Nee	Er is sprake van grootschalige inrichting
Werken met natuurlijke structuren of oplossingen	Nee	Veel puindammen in hoogwatergeul Tijdelijke oplossing uitstroom stuw Galder
Verondieping met zandsuppletie	(Ja)	Wel beschreven als principe, maar nauwelijks toepasbaar (zie onderstaande toelichting)
Meanders iets te krap aanleggen	(Ja)	Wel beschreven als principe, maar niet verstandig gezien de bodemopbouw (zie onderstaande toelichting)
Natuurlijke ontwikkeling vegetatie	Ja	

Bij de verondieping met zandsuppletie moet een belangrijke kanttekening worden gemaakt. Zandsuppletie werkt vooral goed bij een bodemverhoging van de doorgaande loop. Hierbij verdeelt het ingebrachte zand zich over de bodem op basis van de heersende afvoer (verdeling) en beddingvorm en ontstaat een nieuw evenwicht. Hierbij is het van belang dat het water bij hogere afvoeren ($T=1$ à $T=2$) de bedding kan verlaten waardoor de erosieve kracht in de bedding afneemt en het zand niet alsnog naar benedenstrooms wordt afgevoerd. In het ontwerp zijn de verondiepingen echter vooral geprojecteerd in de hoogwatergeul. Hier wordt alleen water afgevoerd bij hoge afvoeren (hoger dan $T=0,5$, ca. 23 dagen per jaar). Het is niet waarschijnlijk dat zandsuppletie hier tot de gewenste bodemhoogte zal leiden.

Ook het krappere aanleggen van de meanders is geen verstandige keuze gezien de onnatuurlijke peildynamiek en de bodemopbouw in de meanders. Door het krappere aanleggen van de meanders ontstaat een extra risico op verticale erosie van de meanders, zie verder paragraaf 4.2.

3. Toepassing van kleinschalige maatregelen

In het ontwerp zijn diverse kleinschalige maatregelen opgenomen zoals sedimentsuppletie, beschaduwing, het toepassen van dood hout en een aangepast maaibeheer. Sedimentsuppletie is in het projectgebied beperkt toepasbaar (niet in de hoogwatergeulen, zie hierboven); aangepast maaibeheer wordt toegepast in de hoogwatergeul. Overigens vindt er op dit moment geen maaibeheer plaats in de Mark (alleen de oevertaluds worden vanaf de kant gemaaid).

Tabel 4.3: Evaluatie ontwerp op toepassing kleinschalige maatregelen.

Kleinschalige maatregel	Toepassing	Opmerkingen
Zandsuppletie	Ja	Beperkt toepasbaar (niet in de hoogwatergeulen)
Beschaduwing	(Ja)	Er is bos geprojecteerd langs de loop, maar een beschaduwing van 70% (kroonsluiting) wordt niet overal gerealiseerd (zie onderstaande toelichting)
Dood hout	(Ja)	Alleen functioneel ingezet als oeververdediging of t.b.v. invangen van zand (zie onderstaande toelichting)
Aangepast maaibeheer	Ja	In de hoogwatergeul (oude loop)

Er zijn op het eerste gezicht voldoende (nieuwe) bossen, bomen en andere houtopstanden langs de doorgaande loop geprojecteerd die kunnen zorgen voor de nodige beschaduwing. Gemiddeld over het hele projectgebied komt de beschaduwing op circa 40% van de totale oeverlengte. Om voldoende beschaduwing te realiseren (kroonsluiting van 70%), is het in veel gevallen wel van belang dat beide zijden van de beekloop begroeid raken met houtige gewassen. Dat lijkt nog slechts op een aantal locaties het geval.

Dood hout wordt in het ontwerp vooral functioneel ingezet: als oeververdediging, ten behoeve van het verondiepen of versmallen van meanders of het stimuleren morfologische processen. Hierbij geldt de volgende kanttekening. Dood hout is ongeschikt om sediment 'tegen te houden' of 'vast te houden'. Erosie en sedimentatie spelen op een hoger ruimtelijk schaalniveau en worden vooral gestuurd door de beschikbaarheid van bodemmateriaal (erodeerbaarheid van bodem en oevers) en de veranderingen in de sedimenttransportcapaciteit als gevolg van veranderingen in de breedte en bodemhoogte van de waterloop, zie ook paragraaf 4.2. Dood hout is vooral geschikt om de variatie in de beddingmorfologie te stimuleren. Het effect van dood hout op de morfologie van de bedding loopt voornamelijk via een (plaatselijke) beïnvloeding van stromingspatroon. De inbreng van grof dood hout (stammen en stobben) veroorzaakt (lokaal) turbulentie en versnelling van de stroming, waardoor erosie wordt gestimuleerd, zie onderstaande foto. Overigens is levend hout wel effectief bij het beschermen van oevers tegen erosie.



Erosie achter ingebrachte stobben in een meander van de Buurser beek bij Haaksbergen (foto Bart Reeze).

4.2 EFFECTEN

Als de drie ontwerprijers niet goed zijn toegepast, wat zijn dan de consequenties (ongewenste effecten), bijvoorbeeld t.a.v. waterafvoer/ aanzanding/ erosie, vegetatieontwikkeling (moeraszone), beheer en onderhoud en de stroomsnelheid?

Erosie, sedimentatie en transportcapaciteit

Erosie en sedimentatie zijn afhankelijk van diverse factoren en zijn vaak lastig te voorspellen. Een belangrijke factor voor het sedimenttransport is de *stroomsnelheid*. De stroomsnelheid is in staat om deeltjes in beweging te brengen of juist te laten bezinken. De stroomsnelheid waarbij dit gebeurt is hierbij afhankelijk van de *korrelgrootte van de deeltjes*. Erosie en sedimentatie zijn het *netto resultaat* van het transport van sediment: bij erosie verdwijnt er meer sediment dan dat er bij komt, bij sedimentatie komt er meer sediment bij dan dat er wordt afgevoerd.

Een belangrijke overkoepelende term om erosie en sedimentatie te kunnen verklaren is de *sediment-transportcapaciteit*. Dit is de capaciteit van het water om sediment te transporteren. In de basis is deze transportcapaciteit afhankelijk van de *stroomsnelheid* (hoe hoger de stroomsnelheid, des te groter de transportcapaciteit) en de hoeveelheid water (hoe meer water, des te groter de transportcapaciteit). Als de capaciteit van de stroming om sediment te transporteren afneemt, dan kan er sprake zijn van sedimentatie. Erosie kan optreden in situaties waar de sedimenttransport-capaciteit toeneemt. De voorwaarde is dan wel dat er *sediment in beweging gebracht* is of kan worden (Reeze en Laseroms, 2018).

Rivierpatroon

Uit het feit dat de historisch Mark wel slingerde, maar niet of nauwelijks actief zijn bedding verlegde, dus niet meanderde, kun je opmaken dat bankvorming werd onderdrukt. Gegeven de onveranderde bodemopbouw zal een dergelijke toestand zich opnieuw instellen na een periode van morfologische aanpassing. Dat betekent dat de meanderbochten naar verwachting niet actief zullen migreren.

Erosie (zie figuur 4.4: oranje)

Naar verwachting zal er op de volgende plekken netto erosie optreden:

1. In de aangetakte meanders (erosie van de bodem, plaatselijk ook van zandige oevers en buitenbochten) (oranje, 1);
2. Op de overgangen tussen de meanders en de oude hoofdloop (terugschrijdende erosie) (oranje, 2);
3. Achter de dammen (spoelkuilen) (oranje, 3).

Toelichting

In aangetakte (neven)geulen wordt de aanvoer van sediment vaak belemmerd, bijvoorbeeld door de wijze van aantakking (loodrecht op de stroomrichting bij hoogwater) of omdat de bodemhoogte bij het instroompunt (veel) hoger is dan (net) ervoor. Omdat er geen (of weinig) sediment wordt aangevoerd, terwijl het stromende water wel sediment meeneemt, is er in deze geulen al snel sprake is van netto erosie van bodemmateriaal (oranje, 1).

Dit effect wordt versterkt door de afdamming in de (oude) hoofdloop. De dammen leiden bij hogere afvoeren (vanaf een halve maatgevende afvoer, ca. 23 dagen per jaar) water af naar de hoogwatergeul. Op dat moment is de waterstand in de meanders (nagenoeg) geulvullend en zal de waterstand en de afvoer in de meanders bij hogere afvoeren beperkt stijgen. Het gevolg is de meanders een relatief lange tijd blootgesteld worden aan de geulvullende afvoer. Bij deze afvoer is de sediment-transportcapaciteit in de meanders het grootste. Hierdoor wordt de kans op erosie in de meanders vergroot. Het sediment dat vanaf bovenstrooms aangevoerd wordt zal door de permanente hoge stroomsnelheden in de geul vooral worden doorgevoerd.

Waar en hoe deze erosie gaat optreden, is afhankelijk van de erodeerbaarheid van de oevers en de bodem. De oevers bestaan naar verwachting op de meeste plaatsen uit zavel, zavelhoudend zand, lemig zand of veen en zijn daarmee lastig erodeerbaar. Dit geldt ook voor de (meeste) oevers van de huidige loop. Dit geldt niet voor de ondergrond, die bestaat uit fijn zand. Aanpassingen van de geuldimensies treden daardoor vooral op in verticale richting. Dit betreft erosie van de geulbodembij onderdimensionering en aanzanding (bankvorming) of opslibbing bij overdimensionering. Alleen op plaatsen waar de nieuw gegraven meanders fijnzandige oevers aansnijden, kan ook (lokaal) erosie optreden van oevers en buitenbochten. Om dit goed te kunnen voorspellen, is een nauwkeurig beeld nodig van de ondergrond (Makaske et al., 2020b).



Meander Oudhof 2011. Links lemig gelaagde oever; rechts zandige oever (foto's Gilbert Maas).

Ook bij de uitstroompunten van de meanders is er kans op erosie, vooral op de plekken waar de bodem (en de waterstand) een 'sprong omlaag' maken (oranje, 2). Met name het uitstroompunt benedenstrooms van stuw Galder is hierbij een aandachtspunt (benedenstroomse grens van het DO, dit is een tijdelijke situatie). Hierbij zal de bodem stroomopwaarts eroderen, ook wel terugschrijdende erosie genoemd. Tegelijkertijd zal er bij de uitstroompunten ook zand sedimenteren (geel, 3). Beide processen stoppen pas op het moment dat er sprake is van een doorlopende onderwaterbodembij en de breedte/diepte verhouding van de geul in evenwicht is.

Een ander punt waar erosie verwacht kan worden, is direct achter de dammen in de (oude) hoofdloop, met name tijdens grote hoogwaters. Op deze momenten zal veel water over de dam de hoogwatergeul in stromen en daar spoelkuilen veroorzaken (oranje, 3). De kans op spoelkuilen is het grootste op de plekken waar het verschil in waterstand boven en beneden de dam het grootste is, vermoedelijk dam B (en D?). Deze erosie vormt vooral een probleem op de plekken waar juist een doorlopende bodembij (of aanzanding) gewenst is, zoals achter dam D en achter stuw Galder.

Sedimentatie (zie figuur 4.4: geel)

Naar verwachting zal er op de volgende plekken sedimentatie (aanzanding, opslibbing) gaan optreden:

0. In de zandvang (geel, 0)
1. In de hoofdgeul vanaf de grens met België (geel, 1);
2. Op de aantakking van de hoogwatergeul naar de tweede meander (geel, 2);
3. Bij de uitstroom van de nieuwe meanders (geel, 3);
4. In de moeraszone (geel, 4).

Toelichting

Volgens de aangeleverde informatie is de zandvang op de grens met België inmiddels nagenoeg opgevuld. Dit betekent dat er steeds meer zand de grens zal gaan passeren, aanvankelijk vooral met hoogwaters, maar later ook bij lagere afvoeren. Zolang de zandvang nog breder is dan het instroom- en uitstroompunt, zal er nog

steeds zand worden afgezet in de zandvang (geel, 0). Dit betreft vooral de grovere fractie, de fijnere fractie zal de zandvang gemakkelijker kunnen passeren (zie ook Besselink et al., 2017). Pas als er over de gehele lengte van de zandvang zandbanken zijn gevormd in de oever, zal al het aangevoerde sediment ongehinderd worden doorgevoerd.

Aangezien de hoofdloop na de grens niet wordt verondiept, is de kans groot dat de eerste afzettingen daar terecht komen (geel, 1). Ook in de huidige situatie wordt in dit traject al slib afgezet, deels afgedekt met laagjes zand. Het grootste risico op aanzanding is echter aanwezig bij de aantakking van de tweede meander (Kersel) op de hoofdwatergeul (geel, 2). Op dit overgangspunt neemt bij hoogwaters de sediment-transportcapaciteit van het water plotseling af omdat een groot deel van het water over de dam 'verdwijnt'. Het aangevoerde zand zal hier niet allemaal door de meander meegenomen kunnen worden en daar worden afgezet.

Even verderop zal zand dat door de meander wordt geërodeerd (zie onder het kopje 'erosie') en getransporteerd, worden afgezet bij de uitstroom van de meander in de oude hoofdgeul (geel, 3). De stukjes oude hoofdgeul zullen aanzanden tot een natuurlijk evenwicht is bereikt (diepte 1,0-1,2 meter). Het is onduidelijk of dat is toegestaan op deze locaties of dat dit tot een permanente baggerlast leidt!

Tenslotte zal de moeraszone in de oude hoofdloop zand en slib gaan invangen. In de moeraszone gaat de stroomsnelheid omlaag wat leidt tot afzettingen van zand bij de overloop van de hoofdgeul naar de moeraszone (geel, 4). In de hele moeraszone erachter zal meegevoerd fijner zand en slib tussen de moerasvegetatie tot bezinking komen. Dit versterkt de ontwikkeling van de moerasruigte (zie onder het kopje 'vegetatieontwikkeling in de overstromingszones').



Aanzanding en opslag van wilgen in de zandvang op de grens met België (foto Bart Reeze).

Vegetatieontwikkeling in de waterloop (zie figuur 4.4: blauw)

Factoren die de ontwikkeling van vegetatie in de waterloop bepalen zijn primair stroming (stroomsnelheid), substraat, licht en nutriënten. Vooral op ondiepe en onbeschaduwde plekken met geen tot weinig stroming en een fijnzandig of slibbig substraat zal zich een uitbundige vegetatie ontwikkelen. Dit kan zich gaan voordoen:

1. In de (verondiepte) hoogwatergeulen (blauw, 1);
- Op onbeschaduwde en stagnante plekken in de meanders (niet weergegeven in figuur 4.4).

De (verondiepte) hoogwatergeul is onbeschaduwd en het grootste deel van het jaar stagnant; in de ondiepe delen kan hier een rijke water- en oeverplantenvegetatie ontwikkelen (blauw, 1). Kenmerkende soorten van stromend water worden hier niet aangetroffen; vanwege de hoge voedselrijkdom van water en sediment

worden hier weinig tot geen bijzondere soorten verwacht. Om te voorkomen dat de verondiepte hoogwatergeul dichtgroeit, is beheer nodig; dit beheer is ook voorzien.



Met ruigtesoorten (o.a. liesgras, lisdodde, rietgras) dichtgegroeide oevers van Lage Raam als referentie voor een ondiepe, verlandende hoogwatergeul (foto Bart Reeze).

Daarnaast kan ook in de meanders vegetatieontwikkeling plaatsvinden. Enige vegetatieontwikkeling is geen probleem en zelfs gewenst, het wordt pas problematisch als zich over meerdere tientallen meters een 'prop' water- en oeverplanten ontwikkelt waardoor de doorstroming belemmerd wordt. De kans hierop is het grootste op onbeschaduwde en (zeer) ondiepe trajecten met weinig stroming in het groeiseizoen (<20 cm/s). Gezien het erosieve karakter van de meanders, de naar verwachting kleine breedte/diepte verhouding (bankvorming is onderdrukt) en het doorgaans troebele water is de kans hierop in de meanders niet zo groot. Het gebrek aan ontwikkeling van vegetatie in de bestaande meanders bevestigt deze verwachting. Mogelijk kunnen er (op termijn) wel problemen optreden op het traject benedenstrooms van dam D.

Vegetatieontwikkeling in de moeraszones (zie figuur 4.4: groen)

In de moeraszones zal zich naar verwachting een moerasvegetatie ontwikkelen van riet, lisdodde, liesgras e.d. en op termijn ook elzen en wilgen. Mede als gevolg van de hoge voedselrijkdom en het zand en slib dat de moeraszone in zal vangen (zie onder het kopje sedimentatie), zal deze zone naar verloop van tijd verder verruigen en verlanden (groen, 1). Dergelijke weelderige begroeiingen met ruigtesoorten herbergen weinig bijzondere soorten en zorgen voor een hoge weerstand bij de afvoer van hoogwaters. Samen met het naastgelegen bos ontstaat hier een belemmering bij de afvoer van het water bij hoogwaters en dus risico op wateroverlast.



Voorbeeld van zandafzetting op de overgang van geul naar moeras en de ontwikkeling van ruigte vegetatie en opslag van wilgenbos in de Slinge (foto Gilbert Maas).



Ruigte met riet en brandnetels in de meander Galder (huidige situatie, niet aangetakt) (foto Bart Reeze).



Figuur 4.4: Locaties met erosie (oranje), aanzanding (geel) en groei van vegetatie (groen en blauw).

Risico's

In onderstaande tabel is de impact van de (morfologische) effecten van het VO op de waterstanden, stroomsnelheden, maaionderhoud, baggeren en het plaatsen van bodem- en oeeververdediging ingeschat.

Tabel 4.4: Scoringstabel effecten en risico's (+=toename, -=afname, 0=geen effect).

	Waterstanden	Stroomsnelheid doorgaande loop	Maaionderhoud	Baggeren	Verdediging
Erosie (oranje)					
1. in de aangetakte meanders (verticaal)	-	-	0	0	+
2. op overgang meander naar hoofdloop	-	-	0	0	+
3. achter/naast de dammen	-	-	0	0	+
Aanzanding (geel)					
0. in de zandvang	+	+	0	0	0
1. in de hoofdgeul vanaf de grens met België	+	+	0	?	0
2. op de aantakking van hoogwatergeul naar eerste meander	+	-	0	+	0
3. bij de uitstroom van de meanders	+	+	0	?	0
4. in de moeraszone	+	+	0	0	0
Vegetatieontwikkeling in de waterloop (blauw)					
1. in de (verondiepte) hoogwatergeulen	+	-	+	+	0
- op onbeschaduwde, ondiepe en stagnante plekken in de meanders	0	(+)	0	0	0
Vegetatieontwikkeling in de moeraszones (groen)					
1. in de moeraszone	+	+	?	0	0

Erosie, verticaal en horizontaal, leidt doorgaans tot verlaging van de waterstanden en lagere stroomsnelheden (in de doorgaande loop). Als gevolg van erosie kunnen lokaal ongewenste effecten optreden, waardoor versterkingen aangebracht (zullen) moeten worden.

Sedimentatie leidt doorgaans tot hogere waterstanden en hogere stroomsnelheden. Indien de sedimentatie leidt tot verstopping (bijvoorbeeld bij de ingang van de meanders), kan sedimentatie ook leiden tot een afname van de stroomsnelheden. Baggeren zal dan noodzakelijk zijn om de doorstroming te herstellen. Verder kan baggeren noodzakelijk blijken op de locaties waar de sedimentatie in de hoogwatergeul strijdig is met het benodigde profiel voor de afvoer van hoogwaters (op dit moment onbekend).

Vegetatieontwikkeling in de waterloop leidt tot hogere waterstanden en lagere stroomsnelheden. Om risico op wateroverlast te voorkomen is maaionderhoud nodig, evenals reguliere baggerwerkzaamheden. Deze effecten treden voornamelijk op in de hoogwatergeul, hier is rekening mee gehouden in het ontwerp. Lokale vegetatieontwikkeling in de meanders (bijvoorbeeld in de binnenbocht) kan leiden tot een versmalling van het doorstroomprofiel en zal lokaal leiden tot hogere stroomsnelheden. Dit zorgt voor variatie en kan ecologische meerwaarde hebben. Maaionderhoud vindt nu al niet plaats en is bij lokale ontwikkeling van de vegetatie ook niet nodig.

De vegetatieontwikkeling in de moeraszone zal leiden tot een toename van de weerstand en daarmee tot oplopende waterstanden bij hogere afvoeren. Het effect op het beheer is afhankelijk van het risico op wateroverlast en de ontwikkeling die wordt nagestreefd: moerasruigte/wilgenbos (zoals voorzien) vergt geen beheer, een korte vegetatie wel.

5. CONCLUSIE EN AANBEVELINGEN

Zijn er optimalisatie mogelijkheden binnen het huidige ontwerp o.a. dwarsprofiel (zonder aan de ontwerp uitgangspunten te tornen) en toepassing van BmN maatregelen? Waar kunnen eventueel aanvullend maatregelen worden toegepast?

Het advies moet passen binnen de hoofdprincipes/kaders en het gekozen ambitieniveau uit VKA en VO.

5.1 CONCLUSIE

De conclusie van de analyse in hoofdstuk 4 is dat het voorlopig ontwerp veel elementen van Bouwen met Natuur bevat. Het betreft voornamelijk de vrije ontwikkeling van de meanders en de moeraszone en daarnaast het toepassen van diverse kleinschalige maatregelen zoals sedimentsuppletie voor het verondiepen van de oude loop, beschaduwning, het toepassen van dood hout en een aangepast maaibeheer.

Desondanks gaat het ontwerp voorbij aan het eerste basisprincipe van Bouwen met Natuur, namelijk het ontwerpen op basis van natuurlijke processen. In beken en rivieren gaat het hierbij om het transport van water, het transport van sediment en de groei van (water)planten. Het ontwerp is voornamelijk afgemeten op het eerste proces (transport van water). Met de overige twee processen is onvoldoende rekening gehouden in het ontwerp.

De processen die relevant zijn voor het transport van sediment en de beddingvorming zijn toegelicht in het handboek geomorfologisch beekherstel (Makaske et al., 2020a). Deze processen zijn vertaald naar enkele belangrijke geomorfologische ontwerpprincipes voor het patroon en de dimensies van beken en rivieren. Het voorliggende ontwerp is op een aantal belangrijke punten strijdig met deze ontwerpprincipes:

- Het ontwerp bevat een stelsel van geulen in plaats van één geul (patroon);
- De dimensies van de doorgaande geul wijken aanzienlijk af van de natuurlijke dimensies zoals berekend met de formules uit het handboek geomorfologie (beddingbreedte van 20 meter, beddingdiepte van 1,0-1,2 meter);
- Hogere afvoeren worden te vroeg afgeleid via de hoogwatergeul (bij $T=0,5$ in plaats van bij $T=1$ à $T=2$).

In plaats daarvan zijn er drie ontwerpprincipes (principeprofielen) door elkaar heen gebruikt. Hierdoor zijn er in het ontwerp op korte afstand discontinuïteiten (abrupte overgangen) aanwezig van de beddingbreedte, beddingdiepte en de verhanglijn. Daarbij wordt het water bij hogere afvoeren (waarbij het meeste sedimenttransport plaatsvindt) op verschillende momenten al dan niet afgeleid via de hoogwatergeul.

Hierdoor zal het systeem zich niet of maar moeilijk naar een natuurlijk evenwicht toe kunnen bewegen. Op het pad hier naartoe zijn daarbij de volgende belangrijke effecten te verwachten:

- Verticale erosie van de meanders;
- Aanzanding van de hoofdloop na de grens en bij de overgang naar de eerste meander;
- Aanzanding en aanslibbing van de moeraszones;
- Ontwikkeling van een voedselrijke moerasruigte in de moeraszones;
- Risico op het optreden van ongewenste effecten van erosie en sedimentatie rond de vele 'vaste punten' in het ontwerp (dammen, in- en uitlaten van meanders, etc.).

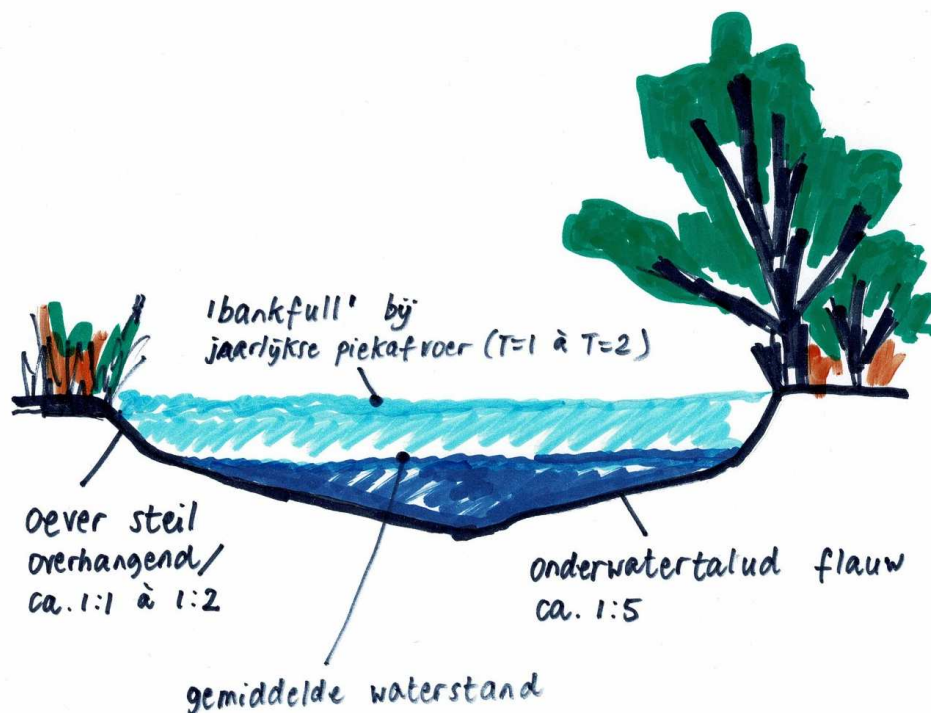
5.2 AANBEVELINGEN VOOR HET DEFINITIEVE ONTWERP (DO)

De beschreven effecten zitten 'ingebakken' in het ontwerp en zijn helaas niet te ondervangen met eenvoudige maatregelen. Het basale probleem is het gebruik van verschillende ontwerpprincipes (principeprofielen), de structurele problemen die gepaard gaan met twee van de drie principeprofielen (aangetakte meanders passen niet bij het patroon; het tweefasenprofiel met een moeraszone zandt aan, slibt op en verruigt) en de overgangen tussen deze principeprofielen (aansluitingen) leiden tot erosie of sedimentatie en vragen om constructies om dit te voorkomen.

1. Herontwerp

De meest voor de hand liggende aanbeveling is, hoe lastig ook, het uitvoeren van een herontwerp. Dit herontwerp moet rekening houden met alle drie natuurlijke basisprocessen in beken en rivieren: transport van water, transport van sediment en groei van (water)planten. Hierdoor wordt de kans op een systeem dat in hoge mate zelfregulerend is en minimaal bijgestuurd hoeft te worden aanzienlijk vergroot. Concreet betekent dit:

- Een rivierpatroon met één loop;
- Een dimensionering van de beddingdimensies op basis van de geulvormende afvoer ($T=1$ à $T=2$), i.c. een beddingbreedte van ca. 20 meter en beddingdiepte van 1,0-1,2 meter. Deze berekende dimensies vormen een *indicatie* voor het uiteindelijke ontwerp; in het ontwerpproces dienen ook andere aspecten meegewogen te worden, zoals de historische dimensies en lokale omstandigheden (zie o.a. Reeze en Laseroms, 2018);
- Een dwarsprofiel met steile oevers boven de gemiddelde waterlijn en flauwe taluds met een 'talweg' onder de gemiddelde waterlijn, zie figuur 5.1;
- Een waterpeil dat volledig met de afvoer mee stijgt en daalt;
- Het inpassen van inundatiezones grenzend aan de geul, die bij een afvoer net boven de geulvullende afvoer inunderen ($T=1$ à $T=2$);
- Het afleiden van piekafvoeren boven $T=1$ à $T=2$ via de huidige loop (hoogwatergeul; benedenstrooms aangetakt) of via een 'groene geul' of 'groene rivier' (zie tekstkader op de volgende bladzijde).



Figuur 5.1: Dwarsprofiel met steile oevers boven de gemiddelde waterlijn en flauwe onderwatertaluds.

Groene geul of groene rivier

In een groene geul staat bij een normale waterstand geen water. Het water kan alleen in de geul stromen als men besluit de geul open te zetten of wanneer het water over een vaste drempel loopt. In de tussentijd wordt het land gebruikt als (natuurlijk) grasland. Ten behoeve van de afstroming bij hoogwaters wordt het grasland vóór het winterseizoen kort gemaaid. Het beroemdste voorbeeld van een groene geul ligt langs de IJssel (Veessen-Wapenveld); deze geul stroomt alleen mee bij extreem hoge waterstanden. In de Groenlose Slinge en de Buurser Beek is de oude loop omgevormd tot een groene geul (zie foto's). Ook de uiterwaarden in de stroombaan van de grote rivieren die kort worden gemaaid ten behoeve van de afstroming bij hoogwaters, kunnen worden beschouwd als groene geul.



Groene geul (links) en ingang van de groene geul (rechts) langs de Groenlose Slinge (foto's Gilbert Maas).



Ingang (links) en uitgang van de groene geul (rechts) langs de Buurser beek (foto's Bart Reeze).

Dit betekent in feite een ontwerpvariant in het verlengde van de ONA-variant (inrichtingsvariant D in Boleij et al., 2017). Deze variant is eerder afgefallen. Belangrijkste redenen waren o.a. wateroverlast op de flanken en in Breda, een verminderde bergingscapaciteit in de T=100 situatie, te lage stroomsnelheden in de zomer en te hoge stroomsnelheden bij piekafvoeren. Deze variant lijkt echter onvoldoende uitgewerkt en geoptimaliseerd:

- De doorgerekende profielen voldoen niet aan de geomorfologische ontwerpprincipes (te smal, dal uitgraven in een V-vorm is morfologisch niet stabiel);
- De verwerking van hoogwaters via hoogwatergeulen of 'groene geulen' (zie hierboven) die pas meestromen vanaf T=1 à T=2 is (voor zover bekend) niet onderzocht;
- De afstroming via het maaiveld (stromende berging) is niet meegenomen in de modelberekeningen. Voor zover bekend is alleen gerekend met 1D-modellering van de inundaties;
- Het argument dat bij een T=100 afvoer de bergingsruimte al is opgebruikt, gaat alleen op bij retentiebekkens en niet bij een dal waarin sprake is van stromende berging;
- Voor de stroomsnelheidseisen is gerekend met 'vierkante' bakjes, terwijl het water zich in de praktijk bij lage afvoeren 'terugtrekt' in de 'talweg', waar het water blijft stromen. Bij hoge stroomsnelheden zijn er in een meanderend profiel altijd stromingsluwe delen waar soorten en levensstadia die gevoelig zijn voor uitspoelen kunnen overleven en van daaruit de beek weer kunnen herkoloniseren.

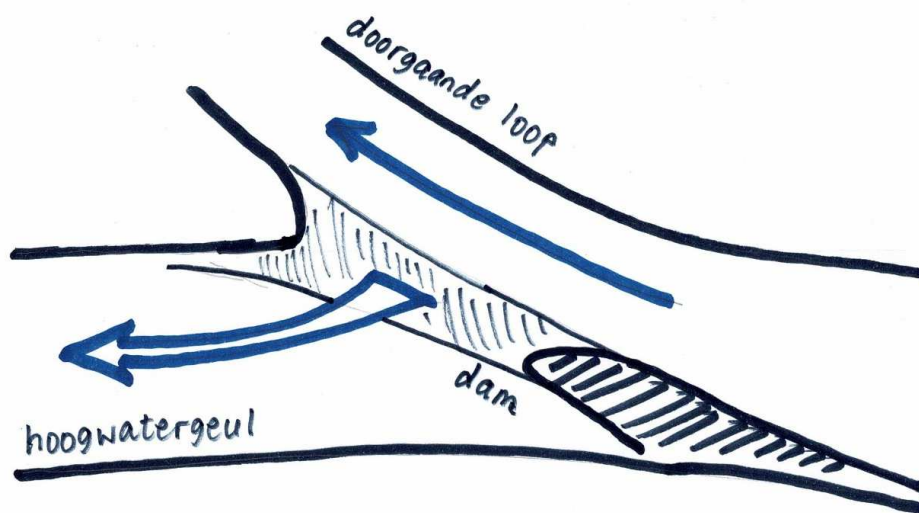
Hierdoor is de conclusie dat deze variant niet haalbaar is onvoldoende onderbouwd. Vanuit het perspectief van droogtebestrijding is inrichtingsvariant D bovendien een zeer kansrijk alternatief.

2. Optimalisaties binnen het huidige ontwerp

Uitgaande van het huidige ontwerp (als randvoorwaarde gesteld bij deze studie) ligt het voor de hand om optimalisaties door te voeren waarmee het ontwerp beter tegemoet komt aan de geomorfologische ontwerpprincipes. Hierbij moet gedacht worden aan de volgende aanpassingen:

- Het zoveel mogelijk creëren van één doorgaande loop met dezelfde beddingbreedte;
- Het zoveel mogelijk creëren van een doorgaande, geleidelijk aflopende waterbodembodem;
- Tijdens hoge afvoeren zo lang mogelijk het water door de doorgaande loop laten gaan waardoor geulvullende situaties optreden (zo dicht mogelijk in de buurt van $T=1$). Bij deze afvoer is de geul het effectiefst in het verplaatsen van sediment. Voor sterk beïnvloede beeksystemen zoals de Mark is dit een goede benadering van de geulvormende afvoer. De geulvormende afvoer is bepalend voor de natuurlijke dimensies van de beek in een evenwichtssituatie;
- Daarbij is het van belang dat de hoogwatergeulen (ongeveer) op hetzelfde moment gaan meestromen. Op dit moment verschillen de dimensies van de meanders en de hoogtes van de dammen in het ontwerp, waardoor de hoogwatergeulen op verschillende momenten gaan meestromen. Als gevolg hiervan kunnen lokaal ongewenste effecten op de waterstand en het sedimenttransport plaatsvinden. Deze effecten zijn (voor zover bekend) niet in beeld gebracht;
- De overgangen van de hoofdloop naar de meanders vormgeven door middel van een flauwe bocht, zie figuur 5.2. De overloop naar de hoogwatergeul ligt loodrecht op de 'doorgaande loop' en voorbij de helft van de dam. Op deze manier wordt het sediment beter de meanders in geleid. Figuur 5.2 laat goed zien onder welke hoek de meanders het beste aangetakt kunnen worden. De huidige inlaat van de meander Kerssel komt hier al aardig bij in de richting. Het extra ruimtebeslag van deze oplossing is over het algemeen beperkt;

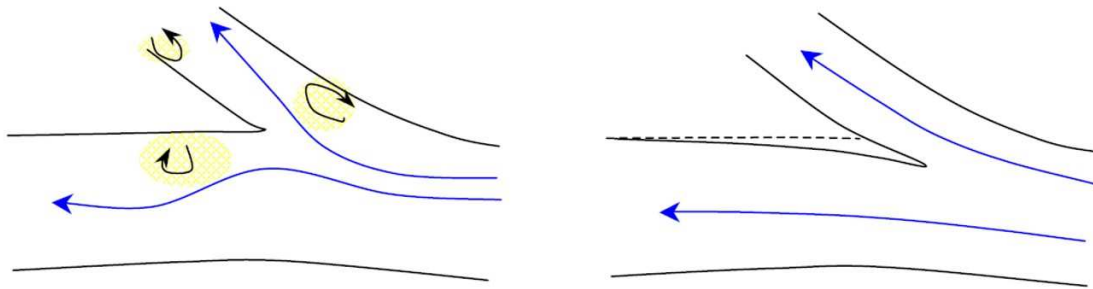
N.B. Hiermee los je het probleem van de aanzanding in de 'doorgaande loop' niet op: je laat immers water af waardoor de transportcapaciteit afneemt. Bij deze oplossing vergroot je wel de kans dat het sediment niet meteen een prop veroorzaakt bij de instroomopening.



Figuur 5.2: Principeschets van een aantakking van de meanders en de afwatering richting de hoogwatergeul.

- Een alternatieve aantakking is met een schephoofd, zie figuur 5.3 (rechter figuur). Een schephoofd is een puntvormige dam die in de hoofdgeul steekt (zonder dam). Een schephoofd splitst niet alleen water, maar ook sediment. Het beroemdste schephoofd van Nederland ligt op de Pannerdense kop (splitsing Waal en Pannerdens kanaal (IJssel/ Nederrijn)). Een nadeel van een schephoofd is dat er minder waterstandsverschil ontstaat tussen instroom en de uitstroom van de meander. Hierdoor is het water eerder geneigd om de hoogwatergeul in te stromen, zeker als de weerstand in de meander hoger is als gevolg van bijvoorbeeld hout in de waterloop. De linker schets in figuur 5.3 laat zien waar wervelingen in

de stroming (neren) tot aanzanding kunnen leiden bij een aantakking zonder schep hoofd. Bij een loodrechte aantakking zijn de wervelingen en de verwachte aanzanding nog een factor groter;



Figuur 5.3: Schets van ongewenste stromingsloslating (neren) en aanzanding (geel) rond een 'gewoon' splitingspunt (links). Door constructie van een schep hoofd (rechts) worden die stromingen voorkomen.

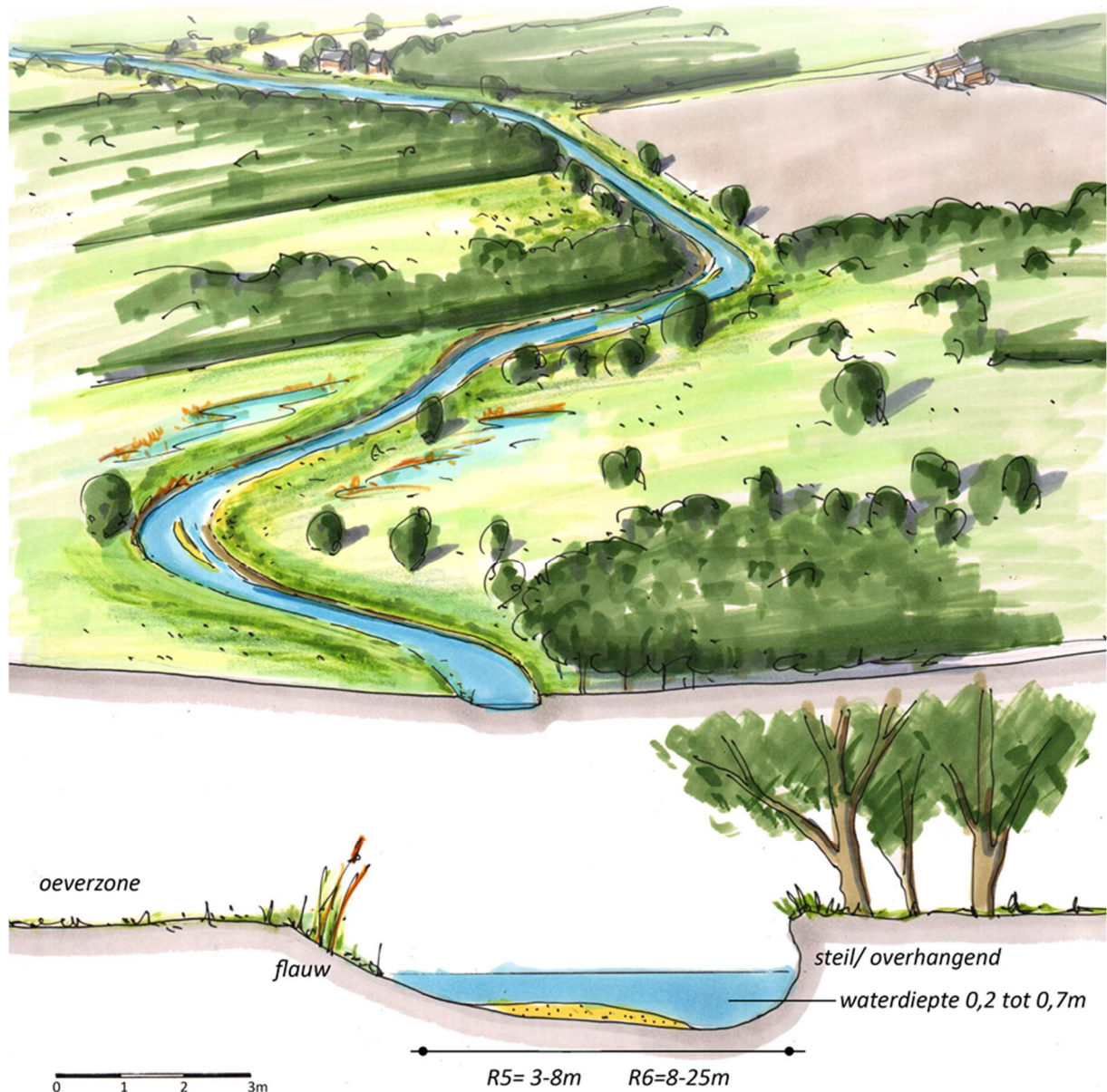


Aantakking van een meander (van onder naar rechts) en natte hoogwatergeul achter een dam (van onder naar links) in de Regge. Door een haakse aansluiting van de meander ontstaat bankvorming in de instroomopening (geel) en erosie op de 'kop' van de meanderbocht (oranje). Daardoor ontstaat de neiging tot 'achterloopsheid' van de afsluitende dam (foto Gilbert Maas).

- Indien nodig aanvullend structureel sediment toevoegen bij de instroom van de meanders (zandsuppletie) om netto erosie tegen te gaan. Na realisatie van het ontwerp hebben de meanders de neiging tot erosie omdat er geen sediment wordt aangevoerd, maar het stromende water wel sediment afvoert, zie paragraaf 4.2, oranje 1). Sedimentsuppletie is vooral van belang bij de meanders waar (aanvankelijk) onvoldoende sediment wordt aangevoerd, bijvoorbeeld omdat het aangevoerd sediment al elders sedimenteert;
- Meanders op de ontwerpbreedte realiseren (niet 0-40% te krap dimensioneren) met een lichte variatie in de aanlegbreedte, het landschap volgend, waardoor het water als vanzelf bij laagtes iets breder zal uitstromen dan bij doorsnijdingen van terreinhoogtes. Door de sterk lemige tot zavelige bodem is de geul weinig geneigd tot laterale erosie (verbreding); bij een te krappe dimensionering zal de bedding zich dus (versneld) insnijden;

Principeprofiel 'moeraszone + meander' uit het voorlopig ontwerp is niet houdbaar

Het principeprofiel 'moeraszone + meander' uit het voorlopig ontwerp is niet houdbaar als gevolg van de verwachte aanzanding, opslibbing en vegetatieontwikkeling in de moeraszone, zie ook paragraaf 4.2. Dit principeprofiel zou aangepast moeten worden naar een hoofdloop met de dimensies van 'bestaande Mark verondiept', incl. oevers of oeverwallen tot op de hoogte van de waterstand bij $T=1$ à $T=2$. In de oeverzone kan zich een moeraszone ontwikkelen (met wilgen, elzen, riet, lisdodde en brandnetels), maar ook nat grasland of bos. Deze ontwikkeling is afhankelijk van de bodemhoogte, de waterstandsdynamiek en het beheer van de oeverzone. Daarbij moet ervan worden uitgegaan dat een moeraszone wel kan bijdragen aan de berging van water bij hoogwaters, maar niet aan de afstroming (zeer hoge weerstand tegen afstroming).



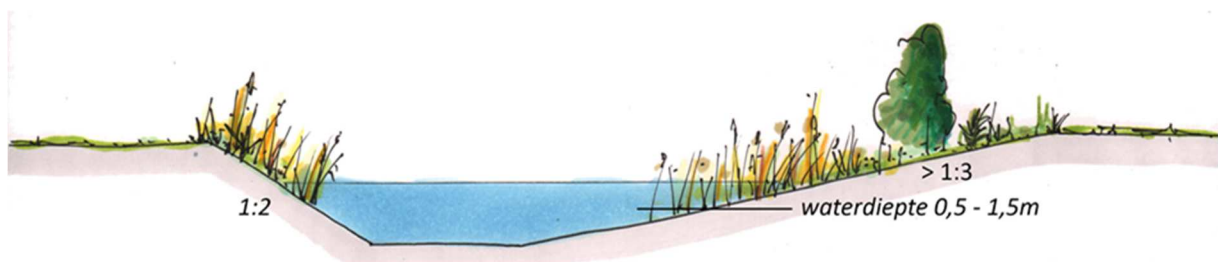
Figuur 5.4: Natuurstreefbeeld voor langzaam stromende midden- en benedenlopen (Reeze et al., 2016).

- Meanders vormgeven volgens de principes van een natuurlijk beekprofiel. Dit houdt in steile oevers boven de gemiddelde waterlijn en flauwe oevers met een 'talweg' onder de gemiddelde waterlijn, zie figuur 5.1. De vorm van het dwarsprofiel hangt erg af van de opbouw van de bodem (oever en waterbodembodem) in combinatie met de waterstand. Over het algemeen geldt dat fijn zand onder water snel uitzakt tot een flauw aflopende onderwaterbodembodem. Bij lemiger/ zaveliger/ veniger oevermateriaal ontstaan vaak steilere oevers, ook onder water. Daarbij kan ervoor gekozen worden om bij aanleg het verwachte natuurlijke profiel zo goed mogelijk te benaderen (flauwe oever in de binnenbocht, steil in de buitenbocht), zie figuur 5.4;
- Een aanpassing van het profiel ter hoogte van de moeraszone (net na dam D, zie ook figuur 4.2). Op deze locatie is een variant van het principeprofiel 'meander + hoogwatergeul' toegepast, waarbij de hoogwatergeul als moeras gaat functioneren, zie figuur 4.2. Voor het moeras is nu uitgegaan van een weerstand van Strickler (k_s) van $30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Dit is gelijk aan de weerstand die wordt gehanteerd voor de hoogwatergeul. Gezien de verwachte aanzanding, opslibbing en vegetatieontwikkeling in de moeraszone (zie paragraaf 4.2) is dit niet reëel. Op deze plek kan het principeprofiel 'meander + hoogwatergeul' worden toegepast of 'bestaande Mark verondiept'. Voor het laatste principeprofiel geldt dat deze het beste kan worden ontworpen op een 'bankfull' situatie bij $T=1$ à $T=2$ en een breedte-diepte-verhouding die is afgestemd op de terreinhelling en bodemopbouw (samenstelling oevers en waterbodembodem).

Overige algemene aanbevelingen binnen het ontwerp

Daarnaast kunnen de volgende algemene aanbevelingen worden gedaan:

- Verondiepingen hoogwatergeul (oude hoofdloop) niet via sedimentsuppletie, maar grootschalig uitvoeren (wel gefaseerd in verband met overleving van vis en herkolonisatie van planten en andere dieren);
- Sedimentsuppleties en verondiepingen dienen uitgevoerd te worden met systeemeigen voedselarm zand (geen organische-stofrijke bouwvoor maar materiaal uit de C-horizont (origineel moedermateriaal));
- Inbrengen van dood hout in doorlopende, lange meanders met als doel het aanbrengen van (lichte) stromingsvariatie. Dood hout kan het beste worden toegepast op beschaduwde locaties met een permanente stroming. Het dood hout wordt in een lage dichtheid toegepast, waardoor er niet tot nauwelijks opstuwing ontstaat. Het dode hout zorgt voor variatie in de stroomsnelheid en daardoor in kleinschalige variaties in substraat en waterdiepte. Dood hout fungeert daarmee als rust- en paaiplaats voor beekfauna en is (foerageer) habitat voor macrofaunasoorten;
- Beschaduwing bij voorkeur aan beide zijden van de loop uitvoeren, spontane ontwikkeling van houtige gewassen in de oeverzone toestaan;
- Uitstroom van de meander benedenstrooms van stuw Galder (projectgrens, tijdelijke situatie) voorzien van 'hellingbaan' met verstevigde ondergrond (grof grind en keien) om erosie tegen te gaan;
- De flauwe oever in de hoogwatergeul aanleggen met een talud van minimaal 1:3 vanaf een waterdiepte van ca. 1 meter tot minimaal ca. 20 cm boven de maximale waterlijn, zie figuur 5.5. Uiteraard kan de flauwe oever ook aan twee zijden worden aangelegd. De vegetatie op de flauwe oever dient minimaal 1 jaar te blijven staan; de waterbodembodem kan intensiever gemaaid worden ten behoeve van de afvoer van water. Flauwe oevers zijn het meest effectief bij een natuurlijk peilbeheer, een streefpeil met marge (natuurlijk toegepast) of vast streefpeil (winterpeil \geq zomerpeil).



Figuur 5.5: Schets van de inrichting van de hoogwatergeul met één flauwe oever (Reeze et al., 2016).

3. Kiezen voor één principeprofiel

Een tussenvorm tussen een volledig herontwerp en het doorvoeren van (enkele van) de genoemde optimalisaties kan zijn om één principeprofiel te kiezen, consequent door te voeren in het ontwerp en de negatieve effecten van deze variant zo goed mogelijk te ondervangen met (technische) maatregelen. Gezien de positieve ervaringen met het aantakken van enkele smallere meanders voor de ecologie (Beers, 2014; Verdonschot en Verdonschot, 2017; Kamman en Weijman, 2019) ligt het principeprofiel 'meander + hoogwatergeul' hierbij het meest voor de hand. Aandachtspunten voor het ontwerp:

- De hoogwatergeulen (oude loop) worden aan de bovenstroomse zijde afgedamd en aan de benedenzijde aangetakt, in open verbinding met de hoofdgeul;
- Indien/ waar mogelijk wordt de natte hoogwatergeul omgevormd tot een 'groene geul', zie de tekstbox bovenaan pagina 23. Hier kan een interessant milieu ontstaan met een kleine 'beekwelgeul' als gevolg van het peilverschil tussen de meander en de groene geul;
- Daarbij is het van belang dat de hoogwatergeulen (ongeveer) op hetzelfde moment gaan meestromen om ongewenste effecten op de waterstand en het sedimenttransport te voorkomen;
- De overgangen van de hoofdloop naar de meanders vormgeven door middel van een flauwe bocht, zie figuur 5.2. De overloop naar de hoogwatergeul ligt loodrecht op de 'doorgaande loop' en voorbij de helft van de dam.
- Indien nodig wordt aanvullend sediment toegevoegd bij de instroom van de meanders (zandsuppletie);
- Meanders op de ontwerpbreedte realiseren (niet 0-40% te krap dimensioneren) met een lichte variatie in de aanlegbreedte, het landschap volgend, waardoor het water als vanzelf bij laagtes iets breder zal uitstromen dan bij doorsnijdingen van terreinhoogtes.
- Meanders vormgeven volgens de principes van een natuurlijk beekprofiel. Dit houdt in steile oevers boven de gemiddelde waterlijn en flauwe oevers met een 'talweg' onder de gemiddelde waterlijn, zie figuur 5.1. Daarbij kan ervoor gekozen worden om bij aanleg het verwachte natuurlijke profiel zo goed mogelijk te benaderen (flauwe oever in de binnenbocht, steil in de buitenbocht), zie figuur 5.4;
- Waar nodig wordt het principeprofiel 'meander + hoogwatergeul' afgewisseld met het profiel 'bestaande Mark (verondiept)'. De naamgeving van de principeprofielen verwijst naar de principeprofielen uit het voorlopig ontwerp, zie figuur 3.1. Het profiel 'bestaande Mark (verondiept)' kan het beste worden ontworpen op een 'bankfull' situatie bij $T=1$ à $T=2$ en een breedte-diepteverhouding die is afgestemd op de terreinhelling en bodemopbouw (samenstelling oevers en waterbodem). De aanliggende oeverzones kunnen bestaan uit een (moeras)zone, overstromingsgrasland of bos. Deze oeverzones overstromen pas vanaf een $T=1$ à $T=2$. N.B.: Het principeprofiel 'moeraszone + meander' wordt niet houdbaar geacht, zie de tekstbox op pagina 26.

5.3 OVERIGE AANDACHTSPUNTEN N.A.V. HET VO

Ten slotte worden in deze paragraaf nog enkele aandachtspunten behandeld die betrekking hebben op het voorlopig ontwerp buiten het projectgebied:

- In het voorlopig ontwerp wordt het principeprofiel 'moeraszone + meander' over langere lengte toegepast, met name in het 'voorontwerp noord'. Dit principeprofiel wordt niet houdbaar geacht, zie de tekstbox op pagina 26. Dit principeprofiel zou aangepast moeten worden naar een hoofdloop met de dimensies van 'bestaande Mark verondiept', incl. oevers of oeverwallen tot op de hoogte van de waterstand bij T=1 à T=2;
- De gehanteerde weerstanden in de modelstudie(s) roepen vragen op. Voor de hoogwatergeul (oude loop) en de moeraszone is een weerstand van Strickler (ks) toegepast van $30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Het maaiveld is ook in de schematisatie meegenomen en heeft een weerstand van $20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Ook voor de meanders is een weerstand gehanteerd van $20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$. Met name de gehanteerde weerstand voor de moeraszone lijkt niet correct en te positief ingeschat: de gehanteerde waarde van 30 komt overeen met de weerstand van een geschoonde, genormaliseerde watergang in de winter; hier lijkt een lagere waarde beter passend (ks van 5-10 $\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$). Hierdoor is de bijdrage van de moeraszones aan de afstroming van het water veel te positief ingeschat in de modelstudies en zijn alternatieve varianten of oplossingen mogelijk onterecht afgefallen;
- De hoogwatergeulen worden soms aan de benedenstroomse zijde afgedamd. Reden is dat de peilen in de hoogwatergeul dan hoger zijn dan wanneer je alleen bovenstrooms zou aantakken. Dat draagt weer bij aan hogere grondwaterstanden in het gebied t.b.v. de landnatuur. Een dergelijke aantakking vormt echter een ernstige belemmering van het doorgaande sedimenttransport, aangezien het sediment niet in de meanders wordt (door)geleid. In plaats daarvan zal het sediment zich voor de (benedenstroomse) afdamming ophopen;
- De nut en noodzaak van een vistrap bij Notsel is niet duidelijk, gezien het geringe verhang van het maaiveld, de (beperkte) overstorthoogte bij de stuwen en de vele wegverlengingen (meanders) in het ontwerp die het hoogteverschil gemakkelijk op zouden moeten vangen. In dergelijke vispassages treden juist lokaal hoge stroomsnelheden op die ongewenste erosie veroorzaken. Dat is niet in lijn met de principes van Bouwen met Natuur.

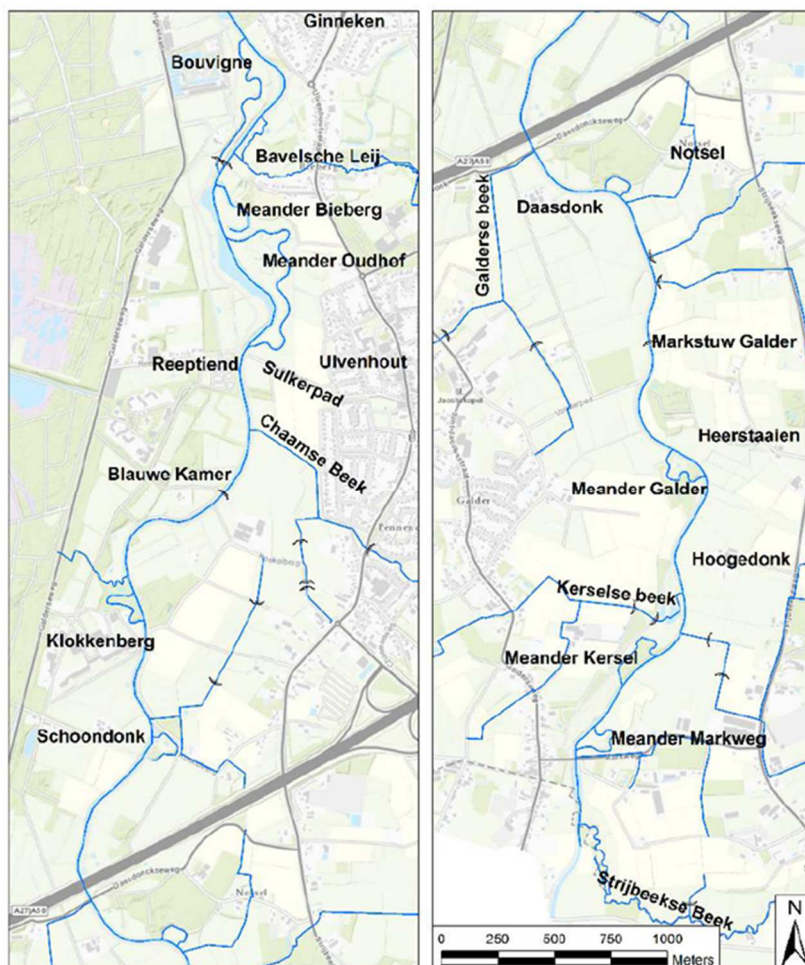
6. LITERATUUR

- Beers, 2014. Echte beken meanderen. In: Visionair nr. 34 (december 2014), p. 32-35.
- Beers, M., D. Coenen, H. Keizer en F. Lambregts-Van de Clundert, 2017. Watersysteemanalyse Boven Mark. Waterschap Brabantse Delta, Breda. Definitief 16IT046386. 30 november 2017.
- Besselink, D., J. Boleij en H. van der Werfhorst, 2017. Watersysteemanalyse Markdal. Arcadis, Arnhem. Projectnummer C03091.000091, 24 mei 2017.
- Boleij, J., H. van der Werfhorst en J. van Zanden, 2017. Herinrichting Markdal. Hydrologische modelstudie en vooronderzoeken. Arcadis, Arnhem. Projectnummer C03091.000091, 24 mei 2017.
- Coenen, 2014. Vegetatie en bochtweerstand bij beekherstel. Waterschap Brabantse Delta, Breda. Presentatie voor de CoP Hermeandering d.d. 8 april 2014.
- Coenen, 2015. Beekherstel: knutselen met zand en water. Presentatie bijeenkomst 'Geomorfologisch beekherstel: theorie en praktijk', 12 november 2015, De Dennen, Renswoude. CoP Hermeanderen en Platform Beek- en Rivierherstel.
- Daris, T.W., C. van Doveren, S.J. Crompvoets, H. Vermulst en B. Possen, 2021. Voorlopig Ontwerp Markdal. Toelichting bij het tot stand komen van het VO. RHDHV, Eindhoven. Projectnummer: BG9342. 11 januari 2021.
- Kamman, J.H. en R. Weijman, 2019. Visstandonderzoek Nevengeul Junne 2018 (resultatenrapport). Sportvisserij Nederland, Bilthoven in opdracht van Projectgroep Swimway Vecht.
- Makaske, B., G. Maas en J. Candel, 2020a. Handboek geomorfologisch beekherstel, herziene uitgave. STOWA, Amersfoort. Rapportnummer 2020-36.
- Makaske, B., G. Maas en J. Candel, 2020b. Handboek geomorfologisch beekherstel, herziene uitgave. STOWA, Amersfoort. Rapportnummer 2020-36A Bijlage Geulpatroonvoorspeller.
- Possen, B.J.H.M., 2020. Richtingwijzer beheer. Richtingwijzer beheer Markdal. RHDHV, Eindhoven. Projectnummer: BG9342. 26 november 2020.
- Reeze, B, A. van Winden en G. Kurstjens, 2016. Ecologische streefbeelden. Ecologische verbindingzones, beekherstel, natuurvriendelijke oevers en overige wateren. Waterschap Aa en Maas, 's-Hertogenbosch.
- Reeze, B. en R. Laseroms, 2018. Ecologische sleutelfactoren stromende wateren, tussenrapportage hydrologie en morfologie. STOWA, Amersfoort. Rapportnummer 2018-57.
- Reeze, B., S. Schep, M. Slob, E. Querner en E. van der Kooij, 2020. Bouwen met Natuur maatregelen in beken. Deltafact. STOWA, Amersfoort.
- Verdonschot P.F.M. en R.C.M Verdonschot, 2017. Meetprogramma Overijsselse Vecht. Nulsituatie 2017 en effecten maatregelen. Notitie Zoetwatersystemen, Wageningen Environmental Research, Wageningen. 51 p.

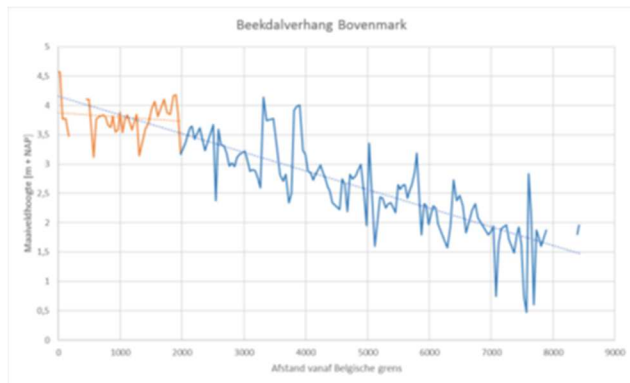
Verdonschot, P., R. Verdonschot, J. Bauwens, B. Brugmans, A. Dees, M. Kits, M. Moeleker, J. de Hoog, M. Scheepens, I. Barten, D. Coenen, A. van Vugt en S. Roovers, 2017. Kennisoverzicht kleinschalige maatregelen in Brabantse beken. STOWA, Amersfoort. Rapportnummer 2017-16.

BIJLAGE: SYSTEEMKENMERKEN HUIDIGE SITUATIE

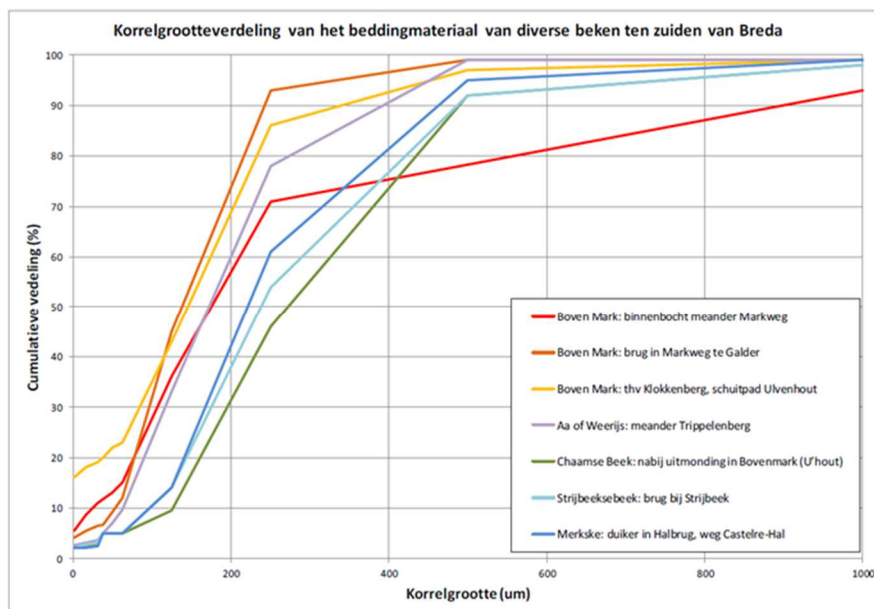
- Stuwen (van bovenstrooms naar benedenstrooms): Galder, Blauwe Kamer, Bieberg.
- Stuwpeilen (zomer/ winter) in m+NAP (Besselink et al., 2017):
 - Galder: 2,55/ 2,50
 - Blauwe Kamer: 1,60/ 1,55
 - Bieberg: 0,85/ 0,85
- Meanders:
 - Meander Markweg: oorspronkelijke meander, 2004, hoofdloop voorzien van dam (Beers, 2014: meander grens)
 - Meander Kersel: oorspronkelijke meander, 1998, hoofdloop voorzien van dam, smaller dan meander Oudhof, beekbegeleidend bos (Beers, 2014: meander Galder); gegraven (Besselink et al., 2017)
 - Meander Galder: gegraven (Besselink et al., 2017). Aangetakt d.m.v. twee duikers, geen dam in de hoofdloop
 - Meander Notsel
 - Meander Klokkenberg: hoofdloop voorzien van dam met duiker, schephoofd bij ingang
 - Meander Oudhof: gegraven, 2003, bovenstrooms stuw Bieberg, hoofdloop voorzien van dam, ontworpen met beperkte breedte en diepte, oevers geërodeerd, open grasland (Beers, 2014: meander Ulvenhout)
 - Meander Bieberg (benedenstrooms aangetakt) (Besselink et al., 2017)
 - Vistrap Bieberg



- Afvoerstatistieken (Besselink et al., 2017):
 - T=2: 28 m³/s (btbh interval 24-31)
 - T=1 (MA): 23 m³/s (btbh interval 19-26)
 - Halve MA: 11 m³/s (2-3 weken/ 23 dagen per jaar)
 - Mediane afvoer: 1,7 m³/s
 - Droogste maand afvoer: 0,7 m³/s
 - Droogste week afvoer: 0,4 m³/s
- Dalverhang gemiddeld 0,33 m/km, eerste twee km mogelijk vlakker (0,10 m/km) (Besselink et al., 2017).



- De mediane korrelgrootte (D50) van het beddingmateriaal van de Boven Mark bedraagt ca. 160 μm . Dit is vergelijkbaar met bijvoorbeeld de korrelgrootte in de Aa of Weerij, maar enigszins fijner dan de mediane korrelgrootte van de Chaamse Beek, Strijbeekse beek of 't Merkske. Deze verschillen worden waarschijnlijk veroorzaakt door het gekanaliseerde en gestuwde karakter van de Boven Mark en de Aa of Weerij versus het vrijwel ongestuwde karakter van de Chaamse Beek, Strijbeekse beek en 't Merkske.



- In het beekdal komen beekoordgronden, gooreerdgronden en lage eerdgronden voor. Op de lagere delen zijn de beekoordgronden ontstaan. Het materiaal waaruit deze bodem is opgebouwd bestaat voornamelijk uit lemig fijn zand (Besselink et al., 2017).

- In de huidige situatie is het Nederlandse deel van de beek 20 tot 25 meter breed (Beers, 2014).
- Plaatselijk kent de Boven Mark tegenwoordig nog bredere delen, zoals een zandvang ten zuiden van Breda met een breedte van circa 50 meter. De huidige diepte bedraagt in het midden 2 tot 2,5 meter (Beers, 2014).
- De breedte van de gekanaliseerde trajecten van de Boven Mark bedraagt circa 20 m en van de smalste meanders 5 m. De waterdiepte in de gekanaliseerde trajecten bedraagt overwegend 2 à 2,5 m. (Besselink et al., 2017).
- In onderstaande tabel 1 zijn de profielen per traject beschreven. Grotendeels zijn dit overgedimensioneerde trajecten die diep en breed zijn ten behoeve van voldoende waterafvoerende capaciteit bij piekafvoeren. Uitzonderingen daarop zijn de meanders en de vistrap Bieberg (Besselink et al., 2017).

Tabel 1: Modelresultaten voor de waterdiepte en -breedte per tracé (Bron: WBD).

Traject	Stuwpannd Galder meander	Markweg	Meander Galder	Stuwpannd Blauwe Kamer	Meander Klokkenberg	Stuwpannd Bieberg	Meander Oudhof	Stuw Bieberg tot Duivelsbrug	Vispassage Bieberg	Duivelsbrug tot singel
Gemiddelde waterdiepte (m)	2,3	3,7	1,0	2,2	1,6	2,5	2,2	2,0	0,5	2,5
Minimale waterdiepte	2,3	3,6	0,9	2,2	1,6	2,5	2,2	1,7	0,5	2,3
Gemiddelde breedte van de waterspiegel (m)	21	17	5	21	11	22	12	20*)	5	18

*) Waterspiegelbreedte excl. zandvang

- Metingen uit 1823 vermelden breedtes van 4,9 tot 6,6 meter (Beers, 2014).
- De richtwaarde voor de breedte van de benedenloop uit de Handreiking Ontwikkeling Waterlopen (HOW) is >8 m. Dit bevestigt de overdimensionering van de stuwpannen (> 20m). Ook mag hieruit herleid worden dat meander Galder en de vispassage Bieberg wat smal zijn (5 m) (Besselink et al., 2017).
- Voor de diepte spreekt de HOW van ideale waarden tussen 0,2 en 0,7 m (Besselink et al., 2017).



Meander Oudhof, net na aanleg.

- Met een Sobek-oppervlaktewatermodel is de stroomsnelheid berekend voor verschillende afvoersituaties, zie tabel 4 (Besselink et al., 2017).

Tabel 4: Modelresultaten van berekende stroomsnelheden per traject: groen = parameter voldoet aan ecologische wens; geel = parameter niet optimaal; rood = parameter voldoet niet aan ecologische wens (Bron: WBD).

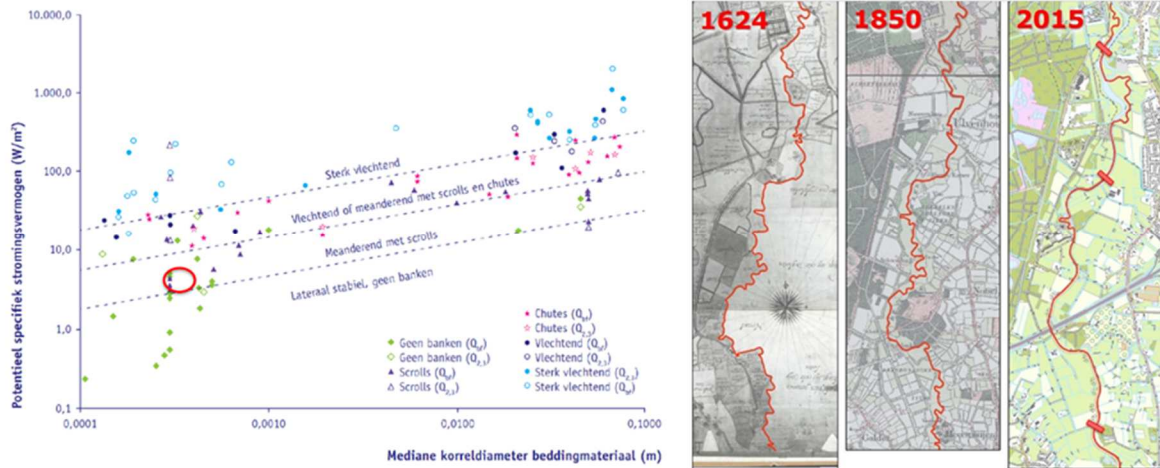
Traject	Stuwpannd Galder weanoer Markweg	Meander Galder	Stuwpannd Blauwe Kamer	Meander Klokkenberg	Stuwpannd Bieberg	Meander Oudhof Stuw Bieberg tot Duivelsbrug	Vispassage Bieberg	Duivelsbrug tot singel		
Stroomsnelheid bij hoogwater (T=1) (m/s)	0,58	0,40	0,75	0,57	0,51	0,58	0,46	0,37	0,2- 0,6	0,6
Gemiddelde winter stroomsnelheid (bij 30%MA) (m/s)	0,08	0,07	0,55	0,09	0,22	0,09	0,18	0,08	0,1- 0,6	0,11
Gemiddelde zomer stroomsnelheid (jun/jul/aug) (m/s)	0,02	0,02	0,19	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02	0,1- 0,6	0,03
Minimum stroomsnelheid (m/s)	0,01	0,01	0,11	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,1- 0,6	0,02

- Bij beekherstelprojecten wordt in de regel een stroomsnelheid van minimaal 0,2 m/s nagestreefd, waarbij deze stroomsnelheid bij voorkeur gedurende het gehele jaar gehaald wordt. Daarom wordt een stroomsnelheid tussen 0,2-0,5 m/s gezien als goed, een stroomsnelheid van 0,1-0,2 of >0,5 m/s als matig en een stroomsnelheid kleiner dan 0,1 m/s als slecht.
- Er treedt stagnant water op in de “hoogwatergeulen” ten westen van de meander Oudhof (t.h.v. de jeugdgevangenis) en bij de meanders Markweg, Galder en Notsel.
- De zandvang bij de Duivelsbrug is in 2013 voor het laatst gebaggerd. Daarvoor was het circa acht jaar geleden dat de zandvang gebaggerd was. Met behulp van deze zandvang wordt voorkomen dat zand wordt afgezet in de singels van Breda (Besselink et al., 2017) .
- In het verleden werd ook de zandvang op de landgrens (op traject 8) gebaggerd. In 2013 is deze zandvang met het oog op de naderende herinrichting van de Boven Mark bewust niet gebaggerd. Verder is sinds de kanalisatie in 1969, meermaals de Boven Mark zelf gebaggerd (Besselink et al., 2017).
- Het onderhoud aan de Boven Mark bestaat uit het maaien van de taluds. Mede doordat het natte profiel niet gemaaid wordt, treedt een geleidelijke verlanding op van met name de binnenbochten en bredere delen en delen direct bovenstrooms van stuwen. Jaar na jaar groeit de oeverbegroeiing verder de Boven Mark in. Tussen de oeverbegroeiing wordt bruin, fijn sediment (slib) afgezet (Besselink et al., 2017).

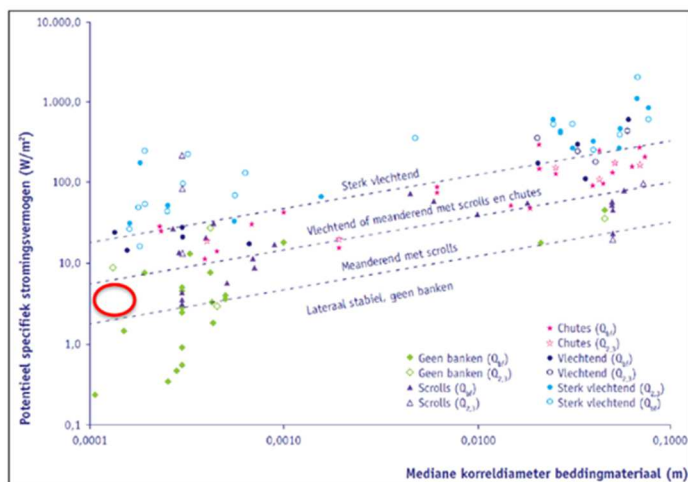


Moeras-/ kwelzone stroomopwaarts van stuw Bieberg.

- De Mark is gelegen in het meanderend bereik (Coenen, 2015):



- Qbf van 26 m³/s en dalhelling van 0,33 m/km levert potentieel specifiek stromingsvermogen van 3,5 W/m². Met D50=150µm levert dit beektype “meanderend met scrolls”. Dit beektype heeft voldoende stromingskracht om te meanderen, maar onvoldoende om meanderhals-afsnijdingen (“chutes”) of een vlechtend patroon te laten ontstaan (Besselink et al., 2017):



- De Boven Mark heeft tot aan de kanalisatie in de jaren '60 een meanderende loop gehad. Echter, uit de historische kaarten blijkt dat er van verplaatsing van meanders gedurende enkele honderden jaren nagenoeg geen sprake was. De belangrijkste reden daarvoor is zeer waarschijnlijk de sterk lemige (onder)grond. Leem heeft een sterk verkittende werking. Een beekloop heeft dan aanzienlijk meer verhang en daarmee energie nodig om actief meanderend te kunnen zijn. Vermoedelijk heeft de beek zijn meanderende ligging tot voor de kanalisatie gevormd door het smeltwater van de laatste ijstijd (eind Middeleeuwen) (Besselink et al., 2017).
- De meanders hebben een verschillende ‘geulvormende afvoer’ (Boleij et al., 2017).
- Afgaande op deze geulvormende afvoer komt de ontworpen geulbreedte aardig overeen met de ‘gewenste’ (berekende) geulbreedte (Boleij et al., 2017):

Tabel 10 Geulvormende afvoer en bodembreedte ontwerp en gewenste geulbreedte

Traject	Geulvormende afvoer [m ³ /s]	Ontwerp insteekbreedte	Geulbreedte* (a = 5,62 = zand)	Geulbreedte* (a = 4 = leem)
1. Meander Markweg	15.3	20m	22.0m	15.6m
2. Meander Kersel-Hoogedonk	4.5	10m	11.9m	8.5m
3. Meanders rond moeras	2.8125	10m	9.4m	6.7m
4. Meanders Markstuw Galder	3.75	8m	10.9m	7.7m
5. Gekanaliseerd Notsel	25.5	28m	28.4m	20.2m
6. Meander Notsel1	3.075	8m	9.9m	7.0m
7. Meander Notsel2	3.75	8m	10.9m	7.7m
8. Meander Notsel3	3.375	8m	10.3m	7.3m
9. Gekanaliseerd snelweg A58	25.875	25m	28.6m	20.3m
10. Meanders Schoondonk	2.625	10m	9.1m	6.5m
11. Meander Klokkenberg	9.15	14m	17.0m	12.1m
12. Meanders Blauwe Kamer	7.875	14m	15.8m	11.2m
13. Meander Sulkerpad	5.625	10m	13.3m	9.5m
14. Chaamse Beek	2.25	6m	8.4m	6.0m
15. Meander Oudhof en Bieberg	5.625	18m	13.3m	9.5m

- De ontworpen geuldiepte is over een groot deel van de trajecten een meter dieper dan de berekende geuldiepte conform het handboek (Boleij et al., 2017):

Traject	Ontwerp geul diepte	Geuldiepte* (c = 0,58 = leem)	Geuldiepte* (c = 0,54 = zand)
1. Meander Markweg	4.67m	1.7	1.6
2. Meander Kersel-Hoogedonk	2.00m	1.1	1.0
3. Meanders rond moeras	2.00m	0.9	0.8
4. Meanders Markstuw Galder	2.00m	1.0	0.9
5. Gekanaliseerd Notsel	3.00m	2.1	2.0
6. Meander Notsel1	2.00m	0.9	0.8
7. Meander Notsel2	2.00m	1.0	0.9
8. Meander Notsel3	2.00m	0.9	0.9
9. Gekanaliseerd snelweg A58	2.25m	2.1	2.0
10. Meanders Schoondonk	2.00m	0.9	0.8
11. Meander Klokkenberg	1.00m	1.4	1.3
12. Meanders Blauwe Kamer	1.00m	1.3	1.2
13. Meander Sulkerpad	2.00m	1.2	1.1
14. Chaamse Beek	1.00m	0.8	0.7
15. Meander Oudhof en Bieberg	3.33m	1.2	1.1

INTEGRATIE BOUWEN MET NATUUR IN DO-ONTWERP HERINRICHTING MARKDAL

Uitgave

Bart Reeze Water & Ecologie, Harderwijk

Inhoudelijke begeleiding namens de opdrachtgever

Joost Koenders (Waterschap Brabantse Delta)

Auteurs

Bart Reeze (Bart Reeze Water & Ecologie)

Gilbert Maas (Geo Inspiratie)

Begeleidingsgroep

Chris van Doveren (RHDHV)

Martin Stamhuis (Waterschap Brabantse Delta)

Marco Beers (Waterschap Brabantse Delta)

Met medewerking van

Marc Treffers (Waterschap Brabantse Delta)