

Kort door de bocht – Geulpatronen van beken en de implicaties voor beekherstel

JASPER CANDEL, MICHELLE BERG, PETER PAUL SCHOLLEMA, LINDA VAN DER TOORN EN ROB RUIJTENBERG

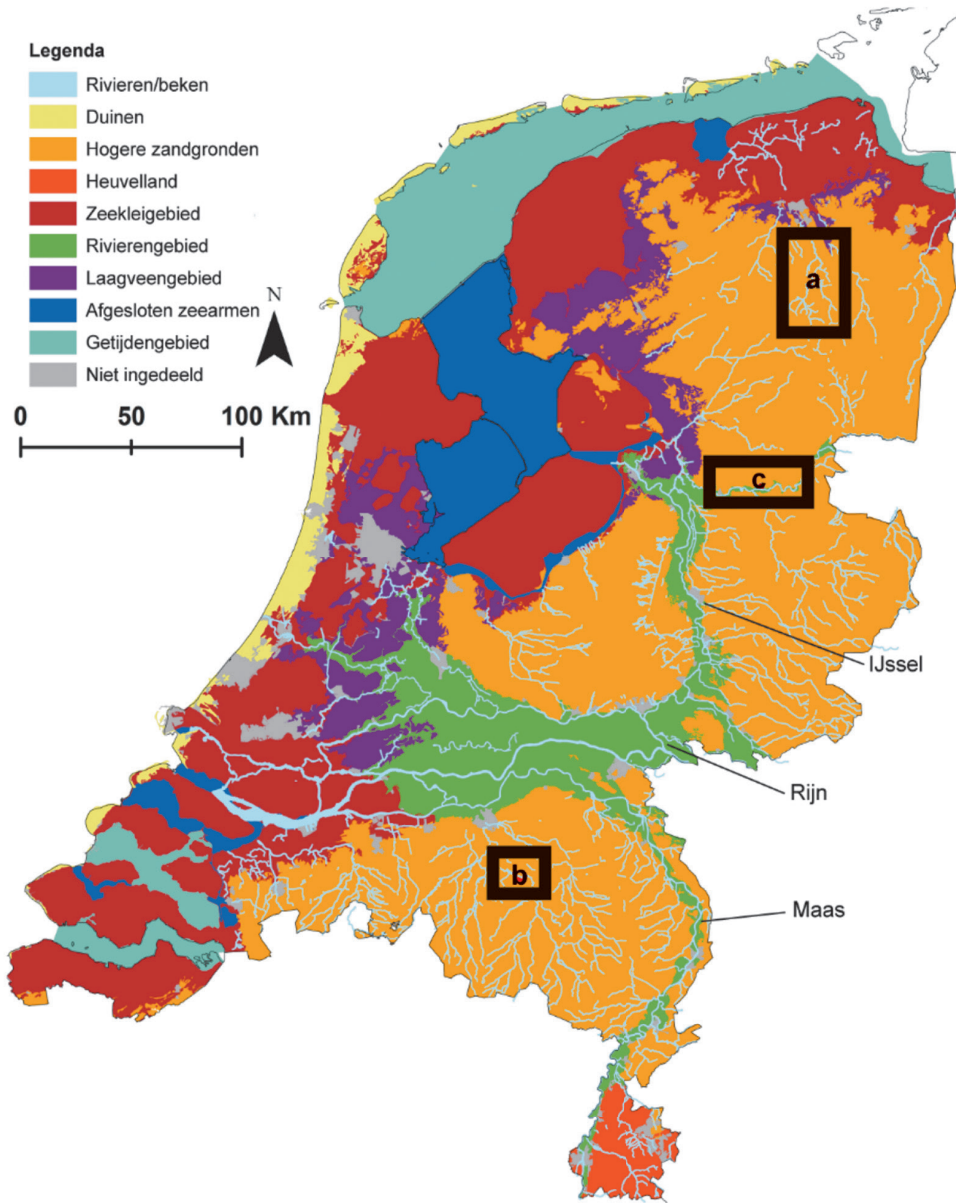
Herstel de processen in plaats van de vorm, dat is wat vaak te horen is rondom beekherstelprojecten. Maar over welke morfologische processen hebben we het dan? Hoe ontstaan die bochtige geulpatronen in beken eigenlijk, en meanderen beken eigenlijk wel? Er blijken nog andere soorten geulpatronen te bestaan dan alleen het meanderende patroon, en de ondergrond is cruciaal voor het ontstaan van die verschillende soorten geulpatronen. Het doel van dit artikel is om de bevindingen van het recent afgeronde promotie-onderzoek door Candel (2020) samen te vatten en te vertalen naar de implicaties voor beekherstel. Dit promotie-onderzoek richtte zich op de morfodynamiek van beeksystemen, en liep van 2015 tot 2020 als onderdeel van het project RiverCare (Hulscher e.a., 2014).

Artikel

Introductie

Op veel plaatsen in de wereld zijn beken en rivieren gekanaliseerd gedurende de laatste eeuwen. Deze maatregelen werden genomen om het land te draineren, om energie uit waterkracht te halen, om scheepvaart te verbeteren en om oevererosie tegen te gaan. Echter, gedurende de laatste decennia realiseert men zich steeds vaker dat kanalisatie grote negatieve consequenties heeft: het resulteert in verlies aan ecologische waarde, verlaging van de grondwaterspiegel en hoge piekafvoeren die kunnen leiden tot overstromingen. Daarom worden beken en rivieren tegenwoordig hersteld, vooral in Europa en Noord-Amerika. Eén van de meest gebruikte herstelmaatregelen in beken is het 'hermeanderen' van de geul. Deze maatregel houdt in dat de geul weer slingerend aangelegd wordt, zoals op historische kaarten nog zichtbaar is. Echter, de historische condities waarop het ontwerp van hermeandering vaak wordt gebaseerd zijn mogelijk niet meer van toepassing, of het kan onmogelijk zijn deze te herstellen.

We richten ons in dit artikel op beeksystemen waar de herstelmaatregel hermeandering op van toepassing is? Dit zijn de stromende wateren met een specifiek stromingsvermogen ($< 10W/m^2$) en een geulvullende afvoer ($< 200 m^3/s$). Meer in het bijzonder richten we ons op alluviale beeksystemen met één geul en één stroomdraad. Dat wil zeggen dat ze hun eigen overstromingsvlakte vormen en in een vallei liggen. Dergelijke beeksystemen zijn overvloedig aanwezig op de Noordwest-Europese laaglandvlakte. Bekken met een venige overstromingsvlakte worden in dit onderzoek ook beschouwd als alluviale beken.



Afbeelding 1 Fysisch-geografische kaart van Nederland, met de onderzochte beeksystemen a) de Drentsche Aa, b) de Dommel, c) de Overijsselse Vecht (bewerkt van Makaske en Maas, 2015).

Hoewel in herstelprojecten slingerende beekpatronen gecreëerd worden, is het grotendeels onduidelijk hoe ze zich van nature vormen en in de loop van de tijd ontwikkelen. Veel beken hebben onvoldoende energie om hun oevers te eroderen, en zijn vrij lateraal stabiel, wat wil zeggen dat de geul zich nauwelijks verplaatst door de tijd (Eekhout, 2014; Makaske e.a., 2016). Kortom, er is nauwelijks laterale verplaatsing. Desondanks wordt er vaak veel ruimte gereserveerd in beekherstelprojecten om beken vrij te laten meanderen. Onder meanderen wordt verstaan het verplaatsen van de geul, onder invloed van de stroming, door eroderende bui-

tenbochten en binnenbochten waarop sediment wordt afgezet. Bovendien is het aangetoond dat de ecologische staat van beken niet verbetert wanneer de geomorfologische condities (bijvoorbeeld de sedimentsamenstelling van de ondergrond en het stromingsvermogen) niet meegenomen worden in het herstel (Pedersen e.a., 2014). Waterbeheerders realiseren zich steeds meer dat geomorfologische studies nodig zijn om inzicht te geven in het toekomstige geulpatroon en dynamiek. Naar aanleiding van dit soort studies kan de gewenste ecologische staat afgestemd worden op de geomorfologische condities (Pasternack, 2013; Makaske en Maas, 2015).

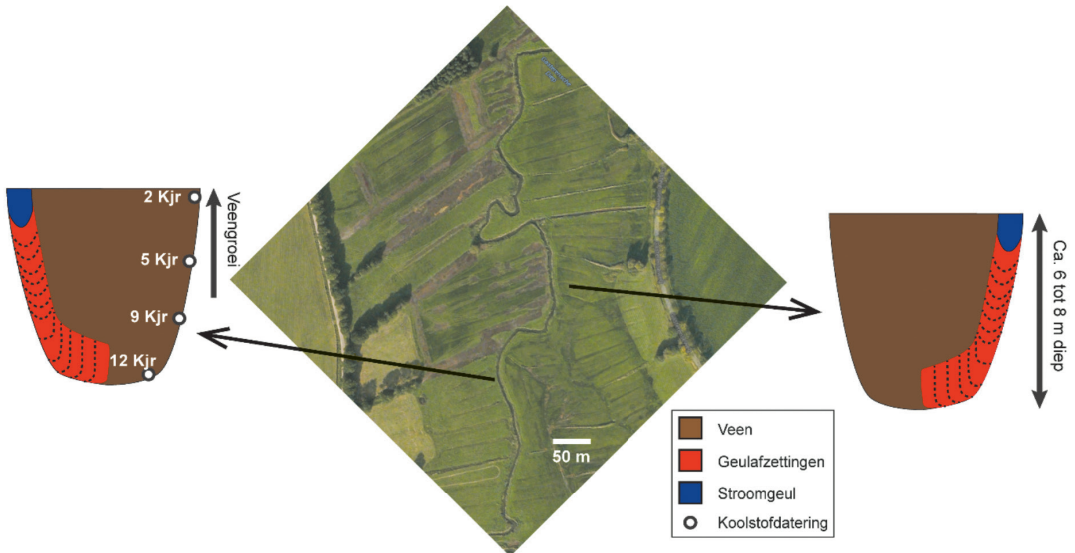
Het doel van dit artikel is om de vorming van verschillende geulpatronen te beschrijven op basis van het onderzoek door Candel (2020), en de sleutelfactoren voor de vorming van het geulpatroon te identificeren. Daarnaast beschrijven we de verschillende typologieën van beeksystemen en hoe vooraf voorspeld kan worden welke type zich zal vormen. Waar Eekhout (2014) gekeken heeft naar de morfologische ontwikkeling op korte termijn (enkele jaren), is hier de focus juist op de lange-termijnontwikkeling (honderden tot duizenden jaren), net wegens de erg lage dynamiek van beeksystemen. De vorming van het geulpatroon is van drie verschillende beken onderzocht (Afbeelding 1). Deze beken waren voornamelijk geselecteerd op basis van de valleivulling, omdat de sedimentsamenstelling van de overstromingsvlakte een groot effect zou kunnen hebben op de vorming van het geulpatroon. Deze beken variëren ook in grootte en in samenstelling van hun valleiranden. Hierbij noemen we de drie onderzochte systemen een beek, hoewel de Overijsselse Vecht vaak een kleine rivier genoemd wordt. De geselecteerde beken hebben een venige, heterogene en zandige valleivulling. Het natuurlijke geulpatroon van elk van deze beken was voldoende behouden om deze te reconstrueren voor de periode van vóór de kanalisatie. De inzichten uit de studies van deze beken zijn gebruikt om een algemeen toepasbare geulpatroonvoorspeller te ontwikkelen voor beeksystemen.

Valleien met een venige vulling

De eerste onderzochte beek is de Drentsche Aa die gelegen is in het noordelijk deel van Nederland (Afbeelding 1a). De Drentsche Aa heeft een sterk slingerend patroon en ligt in een met veen gevulde vallei met zandige valleiranden. Eerdere studies lieten zien dat de beek lateraal stabiel is en het onbekend is hoe het hevige slingerende patroon is ontstaan (Kuenen, 1944). Het veen reikt tot 8 m diep, en begon te groeien aan het einde van het Laatglaciaal (ca. 12.000 jaar geleden) als gevolg van zeespiegelstijging en stijgende grondwaterspiegels. Door de vernatting groeide het veen, maar steeg de beekbedding ook mee, waardoor de beddingsedimenten op elkaar gestapeld werden. Dit proces heet aggradatie.

Candel e.a. (2017) hebben data verzameld door boringen te zetten, grondradarprofielen te maken en koolstofdateringen te verzamelen in dwarsdoorsneden in de vallei. Deze data zijn gebruikt om een palaeogeografische reconstructie te maken. Uit deze reconstructie volgde een conceptueel model wat beschrijft hoe het geulpatroon zich vormde sinds het begin van de veengroei. Het conceptueel model beschrijft de vorming van het patroon als het resultaat van diagonale aggradatie, wat een combinatie is van verticale aggradatie en laterale verplaatsing (Afbeelding 2). Tijdens de veengroei heeft de geul de neiging om zich te hechten aan de valleiranden, omdat deze makkelijker erodeerbaar is dan de venige valleivulling. De

overstromingsvlakte van de beek wordt breder doordat de valleiranden eroderen, en omdat het veen groeit in een V-vormige vallei. De hechting van de geul aan de valleiranden in combinatie met het verbreden van de overstromingsvlakte resulteert in het langzaam uitrekken van de bochten van de beek, waardoor de beek steeds bochtiger wordt. Hierbij ontstaat een zeer karakteristiek patroon, met rechthoekige bochten en relatief rechte stukken die de valleiranden volgen of de vallei oversteken (Afbeelding 2). Dit geulpatroon is min of meer lateraal stabiel, omdat diagonale aggradatie een relatief langzaam proces is. Het typerende patroon is ook waargenomen op satellietbeelden voor andere venige beken en rivieren in de wereld (Candel e.a., 2017).



Afbeelding 2 Conceptueel model van diagonale aggradatie in een vallei gevuld met veen, wat leidt tot een typisch rechthoekig bochtenpatroon. De middelste afbeelding geeft een bovenaanzicht, de figuren aan beide zijdes geven een schematische weergave van de afzettingen in het dwarsprofiel. De dateringen zijn fictief, en indicatief voor de veengroei (Kjr = 1000 jaar) (bewerkt van Candel e.a., 2017).

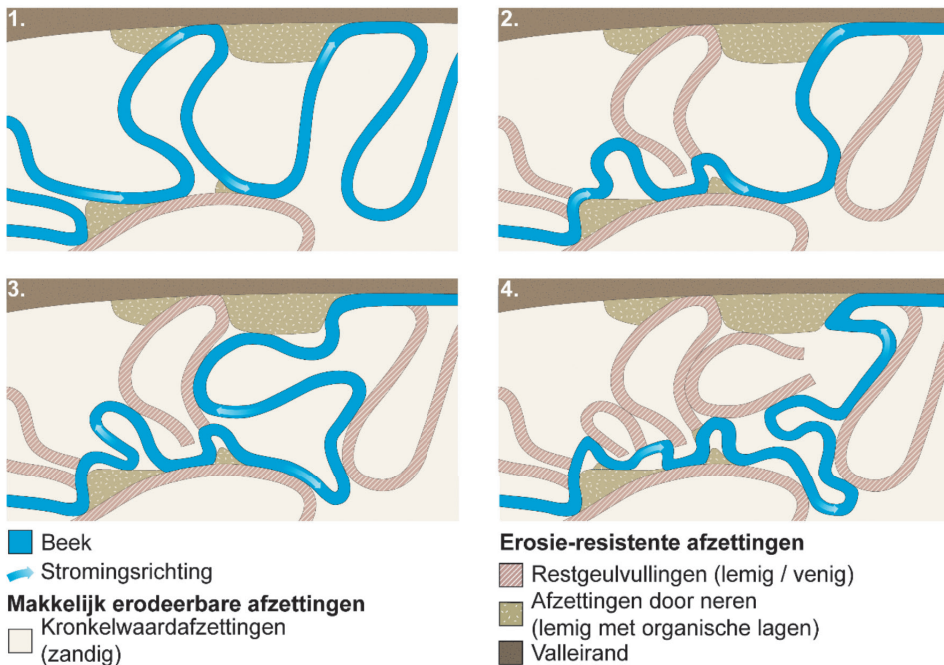
Implicaties voor beekherstel bij Waterschap Hunze en Aa's

Het stroomgebied van de Drentsche Aa is een uniek gebied en wordt binnen Nederland beschouwd als een van de hydrologisch meest intacte beeksystemen. Toch liggen ook hier nog de nodige opgaven om er voor te zorgen dat de Kaderrichtlijn Water (KRW) doelstellingen gerealiseerd kunnen worden. Zo zijn er in het verleden trajecten van enkele boven- en middenlopen genormaliseerd en liggen een aantal nog slingerende beektrajecten te diep ingesneden in het landschap waardoor deze lokaal een drainerend effect hebben op de omliggende oeverlanden. Om deze beektrajecten te herstellen zijn er diverse hermeandering- en beekbodempverhogingsprojecten gepland. Hierbij leveren de resultaten van dit onderzoek belangrijke handvatten voor de technische uitvoering in relatie tot optredende hydromorfologische processen. Ons onderzoek zet het tijdsverloop en de dimensionering van de beek in een interessant perspectief. De veenaangroei startte ongeveer 12.000

jaar geleden, aan het einde van het Laatglaciaal. De (kleinschalige) activiteiten van de mens in de laatste circa 1000 jaar en de meer grootschalige normalisaties na de oorlog, vertegenwoordigen hierin slechts een betrekkelijk korte tijdsperiode. De processen van diagonale aggradatie van de beeklopen hebben plaatsgevonden in de loop van duizenden jaren en zijn nog steeds duidelijk herkenbaar aanwezig in de bodem. De samenstelling van de oeverwanden zijn hierbij sterk sturend geweest; venige oevers hebben zich weinig horizontaal verplaatst terwijl dit bij meer zandige trajecten wel het geval is geweest. Bij beekbodemverhoging gebruiken we deze kennis om in te schatten waar zijwaartse verplaatsing door erosie wel of geen aandachtspunt zal vormen. Dit speelt met name een rol bij zandige oevertrajecten waar enige stimulering van de hydromorfologische activiteit, vanuit ecologie geredeneerd, een goede ontwikkeling kan zijn, maar waar vanuit de aanwezige archeologische waarden in deze zandkoppen dit ongewenst is. Met deze kennis in het achterhoofd kan een goede afweging gemaakt worden en is met de gekozen inrichtingsmaatregelen voldoende te sturen op de toe te laten intensiteit van hydromorfologische activiteit.

Valleien met een heterogene vulling

De tweede onderzochte beek is de Dommel die is gelegen in het zuidelijk deel van Nederland (Afbeelding 1b). Deze beek ligt in een vallei met een heterogene vulling en relatief lemige valleiranden. Vóór de kanalisatie had deze beek een zeer complex patroon bestaande uit ongebruikelijk scherpe bochten met variabele grootte en abrupte, onregelmatige veranderingen van de geulrichting (i.e. een kronkelig patroon). Klassieke regelmatige meanderbochten ontbraken. De data zijn op dezelfde manier verzameld als bij de Drentsche Aa, en gebruikt om een palaeogeografische reconstructie te maken. Uit deze reconstructie volgde een conceptueel model van hoe het kronkelige geulpatroon is ontstaan (Afbeelding 3). Het conceptuele model beschrijft de vorming van het patroon als volgt: de beek bouwt zijn eigen overstromingsvlakte met zandige en lemige afzettingen en veen. De beek heeft voldoende stromingsvermogen om de zandige oevers te eroderen, maar onvoldoende om de venige en lemige oevers te eroderen. Venige en lemige afzettingen worden dus beter bewaard in het dal dan zandige afzettingen, waardoor de laterale mobiliteit van de geul zeer laag is. Bochten migreren alleen maar lateraal waar de oever erodeerbaar is. De beek legt zich dus vast in deze door zichzelf gevormde heterogene overstromingsvlakte, en ontwikkelt zo een zeer onregelmatig, complex, kronkelig patroon. Dit proces is al zeer lang gaande in de Dommel, sinds de overgang van het Laatglaciaal naar het Holoceen (ca. 12.000 jaar geleden). Doordat de relatieve hoeveelheid van lemige en venige afzettingen toeneemt tijdens het vastleggen van de beek, neemt het stromingsvermogen dat nodig is om uit deze positieve feedback van vastleggen te ontsnappen steeds verder toe. Candel e.a. (2020b) lieten zien dat dit conceptuele model opgaat voor vele beken en rivieren over de wereld, waar een dusdanige sedimentbeschikbaarheid is om een heterogene dalvulling te vormen.



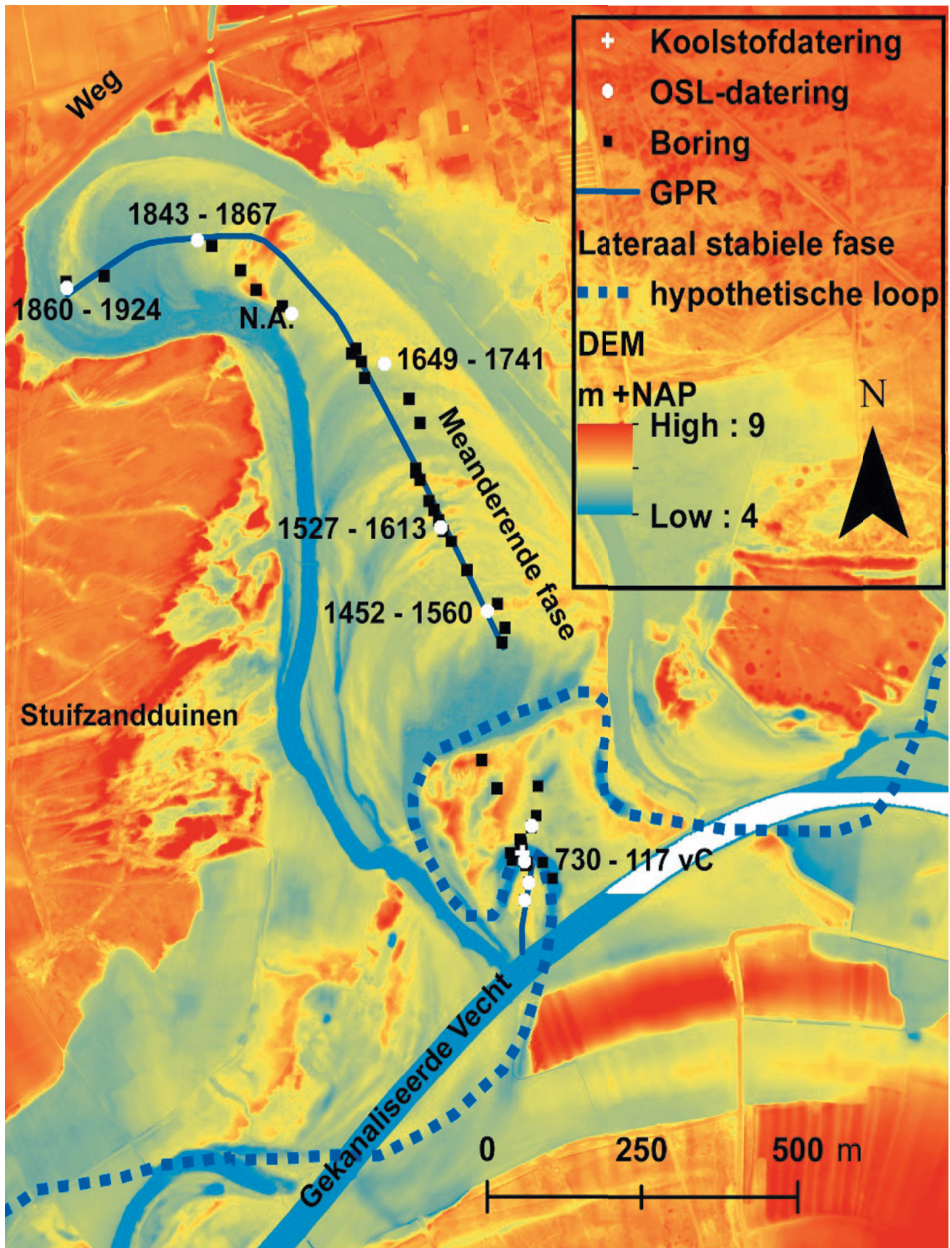
Afbeelding 3 Conceptueel model van een zelfvastleggende beek. Het model geeft een schematische weergave van hoe de overstromingsvlakte en het geulpatroon zich kunnen ontwikkelen over de tijd tot een beek die zichzelf vastgelegd heeft in z'n eigen afzettingen. Erosie-resistent wil zeggen: moeilijk te eroderen (bewerkt van Candel e.a., 2020b).

Implicaties voor beekherstel bij Waterschap De Dommel

Waterschap De Dommel heeft een grote opgave in het herstel van beken om deze te laten voldoen aan de KRW-doelstellingen. Over het algemeen gaat het hier om relatief kleine beken met een laag specifiek stromingsvermogen op de zandgronden in het zuiden van Nederland. Bij deze beekherstelprojecten wordt vaak gekeken naar de historische ligging en de mogelijkheid deze te herstellen. Vanwege de lokale omstandigheden, zoals de beschikbare ruimte en veranderde afvoeren, lukt dit niet altijd. Ook bestaat de vrees voor extreme erosie of is het algemene beeld dat erosie op zal treden terwijl dit in de praktijk dan "tegenvalt".

Ons onderzoek toont aan dat bochten in dergelijke laag-energetische systemen zeker aanwezig waren en ook dat in dergelijke beken nog actieve morfologische processen aan de orde kunnen zijn, maar dat hierbij de sedimentopbouw en externe factoren van groot belang zijn. Deze factoren zijn makkelijk in kaart te brengen en geven daarmee handvaten bij het ontwerp van de nieuwe beek. Vragen zoals "waar is actieve verplaatsing van bochten en daarmee gepaard gaand zandtransport te verwachten?" en "waar zal de beek zich na een korte periode al vastleggen?" worden hiermee beantwoord. Op basis van bodemonderzoek kan gekozen worden op welke plaats de beek het beste neergelegd kan worden, als de laatst gekende historische ligging niet mogelijk is. De afweging kan gemaakt worden of verplaatsing van bochten te verwachten is waarbij de beek een nieuw proces start om zichzelf vast te gaan leggen. Als dit een ongewenste ontwikkeling is kan gekozen worden om direct met natuurlijke materialen zoals wilgentenen de oevers vast te leggen. Dit geldt ook als

er geen mogelijkheid is om de beek direct al op een locatie te leggen met bijvoorbeeld meer lemig/siltig materiaal in de bodem. Daarmee geeft ons onderzoek ons bij het ontwerp van beken een aantal extra mogelijkheden, steeds in functie van het gewenste effect.



Afbeelding 4 Digitaal hoogtemodel (AHN2, 0.5x0.5 m) voor de onderzochte Junnerkoeland bocht in de Overijsselse Vecht. De datering- (OSL), grondradar- (GPR) en boorlocaties zijn weergegeven, cijfers geven de jaartallen in onzekerheidsmarges weer.

Valleien met een zandige vulling

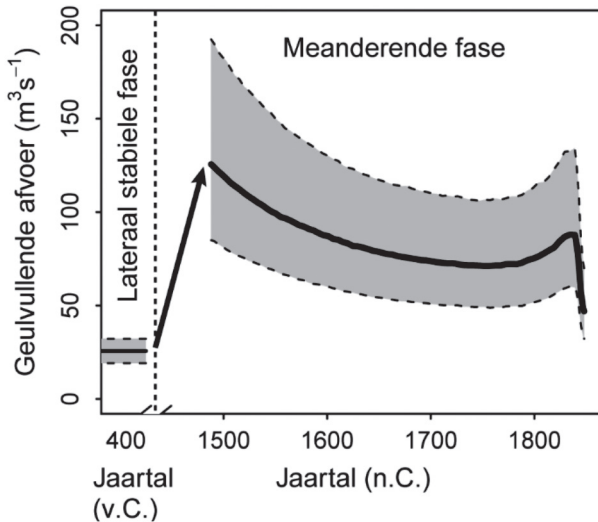
De Overijsselse Vecht is een (kleine) rivier, die is gelegen in het oostelijk deel van Nederland (Afbeelding 1c). Deze rivier ligt in een vallei met een zandige vulling en zandige valleiranden. De rivier is volledig gekanaliseerd sinds 1914, maar goed bewaarde restgeulen en kronkelwaarden zijn zichtbaar in de vallei. Candel e.a. (2018) verzamelde data met boringen, grondradarprofielen en monsters voor dateringen in dwarsdoorsnedes in de vallei. Dateringen zijn gedaan door middel van de optisch gestimuleerde luminescentie (OSL) techniek waarmee het moment van afzetting van rivierzand bepaald kan worden. Afbeelding 4 laat het digitale hoogtemodel zien voor één van de onderzochte locaties. De data zijn gebruikt om een palaeogeografische reconstructie te maken, zoals ook bij de Drentsche Aa en de Dommel heeft plaatsgevonden. Op basis van deze reconstructie concludeerden zij dat de rivier veranderde van een lateraal stabiele naar een meanderende rivier rond het jaar 1400 tot 1500. De rivier verplaatste zich vanaf deze periode lokaal met een maximale snelheid van 2 tot 3 meter per jaar. Candel e.a. (2018) reconstrueerden ook de geulvullende afvoer als functie van de tijd op basis van de kenmerken van de rivierafzettingen, en lieten zien dat een significante toename van deze afvoer de hoofdoorzaak was van de geulpatroonverandering (Afbeelding 5). De geulvullende afvoer is de afvoer die morfologisch het meest bepalend is, en waarbij de gehele geul gevuld is met water. Deze afvoer komt gemiddeld eens per één tot twee jaar voor, en is daarom representatief voor de piekafvoeren. De toename van de geulvullende afvoer werd zeer waarschijnlijk veroorzaakt door de gecombineerde invloed van een klimaatfluctuatie (sneeuwmeltwater tijdens de Kleine IJstijd, 14^e – 19^e eeuw), en grootschalige veenontginning en -afgraving in het stroomgebied. Met name het verdwijnen van het hoogveen in het stroomgebied heeft vermoedelijk geleid tot een flinke toename van de piekafvoeren.

Implicaties voor beekherstel bij Waterschap Vechtstromen

In 2009 hebben de gebiedspartners van de Overijsselse Vecht in de Vechtvisie afgesproken invulling te geven aan een half-natuurlijke laaglandrivier. Er zijn verschillende beelden hoe deze half-natuurlijke rivier er precies uit moet zien. Met name het woord "half" geeft veel ruimte voor interpretatieverschillen en is afhankelijk van de beschikbare ruimte in het Vechtdal, die gedeeld wordt (en in sommige gevallen conflicteert) met andere functies, zoals stedelijk gebied en landbouw. Daarnaast zit er veel spanning op de waterstand-verhogende effecten van een natuurlijkere inrichting die niet past bij de opgave voor waterveiligheid op de Vecht.

Een van de aspecten uit de Vechtvisie is het verwijderen van de oeverbeschoeiing (ontstenen) zodat de rivier zijn eigen loop weer kan bepalen. Aanvankelijk werd verwacht dat de rivier slechts beperkt energie voor oevererosie en verplaatsing van meanderbochten beschikbaar had (Wolfert e.a., 2009). Om de gewenste rivierdynamiek op gang te brengen, zouden meanders vooral kunstmatig aangelegd en aangetakt moeten worden. Echter, na circa 10 jaar ontstenen blijkt de praktijk anders: daar waar is ontsteend ontstaat lokaal forse erosie van de oevers, oplopend tot meerdere decimeters per jaar. Dit lijkt in overeenstemming met de verwachtingen van het recentere onderzoek van Candel e.a. (2018): de geulpatroonvoorspeller voorspelt een actief meanderende Vecht wanneer oeverbescherming verwijderd wordt. Het zandige oevermateriaal en begrazing en vertrapping van oevers speelt hierbij een

belangrijke rol (Quik e.a., 2020). Omdat de erosie in sommige gevallen particuliere eigendommen aantast, heroverweegt Waterschap Vechtstromen het beleid ten aanzien van ontstening. Omdat uit ons onderzoek blijkt dat meandering een blijvend proces is, zoekt Waterschap Vechtstromen naar oplossingen in de praktijk die daarbij passen. Verschillende opties zijn mogelijk: natuurlijke fixatie van kwetsbare locaties, compensatie van verloren grond en/of aankopen van bredere oeverstroken langs de Vecht. In dit laatste geval is combinatie mogelijk met een natuurlijkere inrichting waardoor ook invulling gegeven kan worden aan onder andere de KRW.

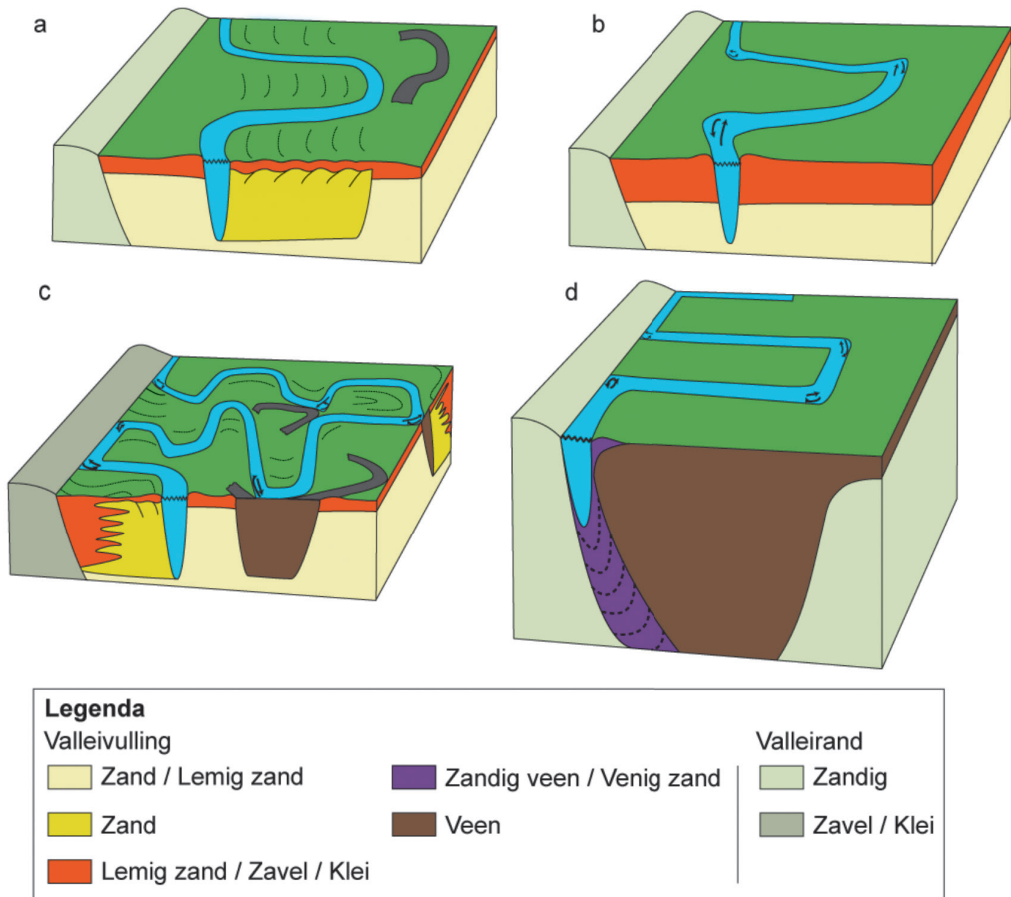


Afbeelding 5 Reconstructie van de geulvullende afvoer van de Overijsselse Vecht op basis van de rivierafzettingen (bewerkt van Candel e.a., 2018).

Typologie van beken

Naar aanleiding van de casestudies kunnen beken gekarakteriseerd worden in vier verschillende types, op basis van hun karakteristieke geulpatroon, morfologie en sedimentsamenstelling van de overstromingsvlakte (Afbeelding 6, Tabel 1): 1) Meanderende beken hebben relatief regelmatige bochten, migreren lateraal en ontwikkelen een kronkelwaard. Deze beken hebben voldoende stromingsvermogen om hun oevers te eroderen. Meanderen vindt vaak alleen plaats bij grotere systemen zoals de Overijsselse Vecht. 2) Lateraal stabiele beken hebben een onregelmatig slingerend patroon met rechte stukken en af en toe scherpe bochten. Deze beken zijn lateraal stabiel, omdat het stromingsvermogen onvoldoende is om de oevers te eroderen. Het geulpatroon resulteert uit overerving van het vroegere geulpatroon en lokale verstoringen (bijvoorbeeld het omvallen van bomen). Vaak is de ondergrond van deze beken lemig, maar wanneer beken heel weinig energie hebben kunnen ze ook lateraal stabiel in een zandige ondergrond liggen, zoals sommige beken in Nederland in een ondergrond van (verspoeld) dekzand. 3) Zelfvastleggende beken hebben een kronkelend geulpatroon en laten lokale laterale migratie zien met kronkelwaardvorming. Deze beken hebben voldoende stromingsvermogen om zandige afzettingen te eroderen, maar onvoldoende stromingsvermogen om lemige

of venige afzettingen te eroderen. 4) Diagonaal aggraderende beken hebben relatief rechthoekige bochten met rechte stukken ertussen. Deze beken hebben voldoende stromingsvermogen voor het eroderen van de zandige valleiranden, maar onvoldoende stromingsvermogen voor het eroderen van de venige valleivulling. De laatste twee beektypes zijn voor het eerst gedefinieerd door Candell (2020). Op basis van de beektypologie kan worden afgeleid dat de oeversterkte een sleutelfactor is in de ontwikkeling van het geulpatroon van beken. Omdat deze beken dicht bij de ondergrens zitten van voldoende stromingsvermogen voor oevererosie (Makaske e.a., 2016), wordt het geulpatroon en de dynamiek bepaald door relatief kleine verschillen in de balans tussen het stromingsvermogen en oeversterkte. Lokale condities van oeversterkte en stromingsvermogen bepalen de snelheid van oevererosie en richting van de geulverplaatsing voor elke bocht, onafhankelijk van de condities in bovenstroomse of benedenstroomse bochten.



Afbeelding 6 Schematisch diagram van de verschillende type geulpatronen van beken en geassocieerde afzettingen: a) Type 1: een meanderende beek met kronkelwaarden in een relatief zandige ondergrond, b) Type 2: een lateraal stabiele beek in een relatief lemige ondergrond, c) Type 3: een zelfvastleggende beek in een heterogene ondergrond, d) Type 4: een diagonaal aggraderende beek in een vallei gevuld met veen. Verticale schaal is overdreven. Zie Tabel 1 voor de vergelijking van enkele morfologische karakteristieken (bewerkt na Candell, 2020).

Tabel 1 Vergelijking van hydrologische en morfologische kenmerken tussen de onderzochte beken.

	Overijsselse Vecht: meanderende fase	Overijsselse Vecht: lateraal stabiele fase	Dommel	Drentsche Aa
Typologie	Meandering	Lateraal stabiel	Zelfvastlegend	Diagonaal aggraderend
Schematisch diagram	Afbeelding 7a	Afbeelding 7b	Afbeelding 7c	Afbeelding 7d
Vallei gradiënt (m/km ⁻¹)	0.14-0.17*		0.33*	0.29*
Potentieel specifiek stromingsvermogen (W/m ²)	2.3-4.8*	1.4-2.0*	2.8*	2.5*
Restgeulen	Veel	Weinig	Veel	Geen
Geulpatroon	Meandering met kronkelwaarden, flauwe bochten	Recht tot onregelmatig sinuous, scherpe bochten, buitenbocht verwijdingen	Tortueus, scherpe bochten met variable grootte, abrupte onregelmatige veranderingen in geulrichting	Rechthoekige bochten en rechte stukken
Dominant geulpatroon vormend proces	Meandering	Overerving / verstoringen	Zelfvastlegging	Overerving/diagonale aggradatie
Breedte-diepte verhouding geul	25*	8*	3-5*	3-5*
Scherpe bochten	Weinig	Af en toe	Veel	Veel
Oevers	Zandig, flauwe binnenkant, steile buitenkant	Zandig en lemig, steil	Heterogeen, steil	Venig, steil
Kronkelwaarden en natuurlijke oeverwallen	Ja, natuurlijke oeverwallen op de kronkelwaarden en de buitenoever	Geen kronkelwaarden, natuurlijke oeverwallen langs de geul	Ja, natuurlijke oeverwallen bovenop (kleine) kronkelwaarden en de buitenoever, en langs de stabiele geulen	Geen kronkelwaarden, kleine natuurlijke oeverwallen langs de geul
Beddingmateriaal, D ₅₀ (mm)	Zand, 0.28-0.33*	Zand, 0.11-0.35*	Zand, 0.15-0.25*	Zand met veel organisch materiaal, -*

*Data is gebaseerd op de casestudie beken, en kan afwijken voor beken die vallen binnen hetzelfde type.

Geulpatroonvoorspeller

Op basis van de inzichten van de casestudies en vroegere inspanningen door anderen, hebben Candel e.a. (2020a) de bestaande geulpatroonvoorspeller, zoals beschreven door Makaske en Maas (2015) en Makaske e.a. (2016), doorontwikkeld om deze geschikter te maken voor beeksystemen. Tot nu toe werden geulpatronen vaak voorspeld door gebruik te maken van parameters die afhankelijk zijn van het

actuele geulpatroon en morfologie, wat de voorspelling in feite ongeldig maakt. Daarnaast waren veel voorspellers weinig succesvol in het onderscheiden van geulpatronen van beken met een zandbedding, omdat de eigenschappen van de oevers niet meegenomen werden. De voorspeller die ontwikkeld is door Candel e.a. (2020a) maakt gebruik van parameters die onafhankelijk zijn van geulpatronen en neemt de eigenschappen van de bedding en oevers wel mee. De gebruikte parameters zijn de mediane korrelgrootte van de bedding, de effectieve geulvormende afvoer, de valleihelling en de gemiddelde silt-plus-klei-fractie van de oevers. Daarnaast is het type van zelfvastleggende beken toegevoegd aan de voorspeller, op basis van de casestudy van de Dommel. De toepassingsmogelijkheden en de betrouwbaarheid van de geulpatroonvoorspelling zijn een verbetering ten opzichte van bestaande methodes, vooral voor beken met een zandbedding (Candel e.a., 2020a). De geulpatroonvoorspeller kan gebruikt worden voor alluviale beken of om veranderingen van geulpatroon te voorspellen, die bijvoorbeeld worden veroorzaakt door landgebruiksveranderingen of klimaatveranderingen. Harkema (2019) heeft de geulpatroonvoorspeller getoetst voor 19 beken in Nederland, en liet zien dat de geulpatroonvoorspeller goed functioneert. De geulpatroonvoorspeller is te gebruiken en te vinden op (<http://www.stowa.nl/geulpatroonvoorspeller>)

Conclusies

Dit onderzoek liet zien hoe beken in Nederland morfologisch functioneren, en geeft daarmee een verklaring voor het ontstaan van verschillende geulpatronen. Procesgebaseerd beekherstel kan bereikt worden door te focussen op de sleutelfactoren van het geulpatroon. De typologie van beeksystemen en de nieuwe geulpatroonvoorspeller helpen om te bepalen of een stuk beek de potentie heeft om te meanderen, of hoogstwaarschijnlijk lateraal stabiel zal zijn. Het onderzoek liet zien dat de sedimentsamenstelling van de oevers essentieel is om het geulpatroon en de geuldynamiek te voorspellen. Kennis van de samenstelling van de oevers is nuttig om ongewilde erosie te voorkomen, of om erosie op te wekken waar het gewenst is. Beekherstel vereist ook kennis van het hele stroomgebied en de effecten van toekomstige veranderingen van het klimaat en landgebruik die het afvoerregime beïnvloeden, zodat mogelijke geulpatroonveranderingen voorspeld kunnen worden. De typologie van beeksystemen is bruikbaar om nauwgezet de potentie voor ecologisch herstel te bepalen, omdat de hier gedefinieerde beektypes verschillen in substraat, afvoerregime, geulgeometrie, oeversamenstelling, bochtscherpte, dynamiek en stromingspatronen.

Dankwoord

Dit onderzoek is onderdeel van het programma RiverCare, en financieel ondersteunt door de Nederlandse Organisatie voor Wetenschappelijk Onderzoek (NWO) en Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer (STOWA).

Literatuur

- Candel, J.H.J. (2020) Ahead of the curve - channel pattern formation of low-energy rivers. PhD, Wageningen University, Wageningen.
- Candel, J.H.J., M.G. Kleinhans, B. Makaske, W.Z. Hoek, C. Quik en J. Wallinga (2018) Late Holocene channel pattern change from laterally stable to meandering - a palaeohydrological reconstruction; in: *Earth Surf. Dynam.*, vol 6, pag 723-741.

- Candel, J.H.J., M.G. Kleinhans, B. Makaske en J. Wallinga** (2020a) Predicting river channel pattern based on stream power, bed material and bank strength; in: *Progress in Physical Geography*, vol, pag 1-26.
- Candel, J.H.J., B. Makaske, N. Kijm, M.G. Kleinhans, J.E.A. Storms en J. Wallinga** (2020b) Self-constraining of low-energy rivers explains low channel mobility and tortuous planforms; in: *The Depositional Record*, vol 6, no 3, pag 648-669.
- Candel, J.H.J., B. Makaske, J.E.A. Storms en J. Wallinga** (2017) Oblique aggradation: a novel explanation for sinuosity of low-energy streams in peat-filled valley systems; in: *Earth Surface Processes and Landforms*, vol 42, no 15, pag 2679-2696.
- Eekhout, J.P.C.** (2014) Morphological processes in lowland streams : implications for stream restoration, Wageningen University, Wageningen.
- Harkema, T.** (2019) Channel pattern prediction in Dutch streams, Wageningen University, Wageningen.
- Hulscher, S., R. Schielen, D. Augustijn, J. Warmink, M. Voort, H. Middelkoop, M. Kleinhans, R. Leuven, H. Lenders en A. Smits** (2014) RiverCare: towards self-sustaining multifunctional rivers *Netherlands Centre for River Studies Conference*, pag 13-14 Delft: Netherlands Centre for River Studies.
- Kuenen, P.H.** (1944) The Drentse riviertjes en het meander-vraagstuk; in: *Overdruk uit Gedenkboek P. Tesch.*, vol, pag.
- Makaske, B. en G. Maas** (2015) Handboek geomorfologisch beekherstel: leidraad voor een stapsgewijze en integrale ontwerp aanpak.; Stichting Toegepast Onderzoek Waterbeheer, Amersfoort.
- Makaske, B., E. van der Deijl en M. Kleinhans** (2016) Het natuurlijke patroon van beken; in: *Landschap*, vol 33, pag 185-193.
- Pasternack, G.** (2013) Geomorphologist's guide to participating in river rehabilitation; in: *Treatise on Geomorphology*, vol. 9, 843-860.
- Pedersen, M.L., K.K. Kristensen en N. Friberg** (2014) Re-meandering of lowland streams: will disobeying the laws of geomorphology have ecological consequences?; in: *PloS one*, vol 9, no 9, pag e108558.
- Quik, C., J.H.J. Candel, B. Makaske, R. van Beek, M. Paulissen, G.J. Maas, M. Verplak, T. Spek en J. Wallinga** (2020) Anthropogenic drivers for exceptionally large meander formation during the late holocene; in: *Anthropocene*, vol, pag 100263.
- Van der Linden, J.A.** (1973) Topographische en Militaire kaart van het Koninkrijk der Nederlanden; Fibula-Van Dischoeck, Bussum.
- Wolfert, H., A. Corporaal, G. Maas, K. Maas, B. Makaske en P. Termes** (2009) Toekomst van de Vecht als een halfnatuurlijke laaglandrivier: bouwstenen bij de grensoverschrijdende Vechtvisie 2009. Alterra, nr. 1897.

Summary Channel patterns of streams, and the implications for stream restoration

Many streams have been channelized in large parts of the world during the past centuries. However, in the last decades, the negative consequences of channelization are increasingly being recognized. This includes loss of ecological niches and high discharge peaks that may lead to flooding. Therefore, streams worldwide are currently being restored. One of the most used restoration measures in streams is to re-meander the channel pattern, often by mimicking the sinuous historical pattern. However, it remains largely unknown how sinuous patterns of streams naturally form and develop in time, because they do not have sufficient energy to erode their banks, and generally do not show lateral migration.

In this article, the aim is to understand and predict the channel pattern formation of streams. Distinctive channel patterns form in valleys with a peaty, heterogeneous and sandy floodplain. For each stream type, a palaeogeographic reconstruction was performed using coring, ground-penetrating radar and geochronological data from different valley cross-sectional research sites. Based on these reconstructions, conceptual models were developed on how these channel patterns develop. The bank strength was identified as a key forming factor of the channel pattern of streams, and incorporated in a newly developed channel pattern prediction tool, which has a high prediction success. Stream restoration can benefit from the insights of this research and focus on restoring natural processes of streams in a scientifically sound way.

Auteurs

JASPER CANDEL

Wageningen University & Research
jasper.candel@wur.nl

MICHELLE BERG

Waterschap De Dommel
mberg@dommel.nl

PETER PAUL SCHOLLEMA

Waterschap Hunze & Aa's
p.schollema@hunzeenaas.nl

LINDA VAN DER TOORN

Waterschap Vechtstromen / Tauw
Linda.vandertoorn@tauw.com

ROB RUIJTENBERG

STOWA
ruijtenberg@stowa.nl