



Universiteit Utrecht

Deltares

Wat wil de rivier zelf eigenlijk?

Maarten G. Kleinhans
Frans Klijn
Kim M. Cohen
Hans Middelkoop

1207829-000

Titel

Wat wil de rivier zelf eigenlijk?

Opdrachtgever

Deltaprogramma Rivieren (DP-R)

Project

1207829-000

Kenmerk

1207829-000-VEB-0024

Pagina's

38

Voorwoord

Dit rapport beoogt enig inzicht te verschaffen in het natuurlijke gedrag van rivieren in Nederland, zowel zonder menselijke invloed als in de door de mens beïnvloede situatie, in de huidige situatie en in de recente ontstaansgeschiedenis van de delta. Deze inzichten kunnen behulpzaam zijn bij het maken van keuzes over de toekomstige inrichting van het rivierengebied en het beheer van de rivier.

Door de vraag te stellen: 'Wat wil de rivier zelf eigenlijk?' wordt duidelijk in hoeverre de rivierbeheerder tegen de natuur inwerkt en waar met natuurlijke processen en ontwikkelingen kan worden meegelift. Dit biedt inspiratie bij het bepalen van beleidsstrategieën voor de toekomst die de kwaliteit van het geo-ecologisch functioneren van de rivier en van de delta als geheel ten goede komen; en die mogelijk duurzamer, makkelijker te handhaven en op den duur ook goedkoper zijn.

Het rapport is gestructureerd rond verschillende ruimte- en tijdschalen. Huidige vormen van ingrijpen en kunstwerken worden daar besproken waar ze natuurlijke processen beïnvloeden, tegenwerken of pogen te simuleren. Dit gebeurt dan in algemene rivierkundige termen zonder op details van dergelijk ingrijpen in te gaan. Op basis van eerder uitgevoerd onderzoek wordt aangegeven hoe het systeem zich in de komende decennia waarschijnlijk zal ontwikkelen, waar de kwaliteit van functioneren zou kunnen worden vergroot, en waar nog onvoldoende kennis over bestaat om ontwikkeling en mogelijkheden voor verbetering te kunnen voorzien.

Het rapport is geschreven in opdracht van Deltares (Nathalie Asselman) voor het Deltaprogramma Rivieren (DP-R) ter inspiratie van de strategische planvorming, opdrachtnummer PO193321292. Erik Mosselman (Deltares) heeft het rapport inhoudelijk gereviewed.

Samenvatting voor beleidmakers en bestuurders

Dit rapport beschrijft hoe de Nederlandse grote rivieren - met name de Rijnakken - zijn ontstaan en hoe ze zich van nature gedragen, zowel zonder menselijke invloed, als in reactie op menselijk ingrijpen. Door de vraag te stellen: 'Wat wil de rivier zelf eigenlijk?' wordt inzicht verkregen in wat de rivier wil, zowel onder natuurlijke omstandigheden, als in de huidige situatie met menselijke invloeden. Hiermee kunnen we begrijpen in hoeverre de mens met inrichting en beheer tegen de natuur inwerkt, maar ook waar meer van natuurlijke processen en ontwikkelingen gebruik kan worden gemaakt. Dit inzicht kan behulpzaam zijn bij het maken van keuzes over de toekomstige inrichting van het rivierengebied en het beheer van de rivier.

In deze samenvatting geven we eerst de meest relevante inzichten weer, waarna conclusies en aanbevelingen voor inrichting en beheer worden gegeven. Die laatste zijn specifiek gericht op het Deltaprogramma Rivieren; ze zijn niet in het hoofdrapport te vinden om dat voor een breder lezerspubliek en langduriger toepassing geschikt te houden. Maar ze zijn er wel op gebaseerd. Het rapport is gestructureerd rond drie thema's met verschillende ruimte- en tijdschalen: het netwerk van riviertakken met rivierverleggingen als belangrijkste proces, geulen en uiterwaarden met laterale erosie en aangroei als belangrijke processen en de rivierbedding met verticale uitschuring en sedimentatie als belangrijkste processen.

In natuurlijke delta's worden geregeld nieuwe riviertakken gevormd en oude lopen verlaten. De nieuwe riviertakken ontstaan omdat de rivier de kortste weg naar zee zoekt. Oude lopen verzanden en vallen dan droog. In de afgelopen 5000 jaar zijn in Nederland circa 40 rivierverleggingen opgetreden: dat is gemiddeld eens per 125 jaar een verlegging.

In de Romeinse tijd stroomde de Rijn nog bij Katwijk in zee, maar op een gegeven moment was de route langs Rotterdam korter. Toen nam de Lek in belang toe. Omdat in die tijd ook de Waal groeide en de IJssel ontstond, voerde de Nederrijn steeds minder water af. Juist in die periode damde de mens de Kromme en Oude Rijn af en bedijkte de Lek nog voor deze 'in de puberteit' kwam. Dat verklaart waarom deze rivier zo krap is. Ook de andere riviertakken werden in de periode 1000 - 1400 na Chr. bedijkt en de minder grote takken afgedamd. Verdere natuurlijke rivierverlegging werd hiermee vrijwel onmogelijk.

Via de Waal was de route naar zee korter dan via de Nederrijn-Lek. De Waal 'won' dan ook, maar niet zonder ingrijpen van de mens nabij het splitsingspunt Pannerdense Kop. Alleen door het graven van het Bijlands Kanaal en het fixeren van de Pannerdense Kop kon namelijk worden voorkomen dat de Rijn bij hoogwater een route verkoos door het huidige Rijnstrangengebied en verder via de IJssel die in de vroege Middeleeuwen was ontstaan. Die route naar zee was even lang als die via de Waal.

In het benedenrivierengebied trad veel aanzanding op, vooral bij de kop van de Beneden Merwede. Om de hoogwaterafvoer te bevorderen heeft de mens de Nieuwe Merwede gegraven. Ook de Maas werd een nieuwe uitgang geboden door het graven van de Bergsche Maas. Maaswater hoefde toen niet meer bij Woudrichem bij de Waal gevoegd, wat tot hoge waterstanden bij Gorinchem leidde. Tegelijkertijd werd met het sluiten van de overlaat bij Heerwaarden in 1904 de Waal beroofd van de ruimte die de voorheen meestromende Maas had geboden. Dat verklaart voor een deel de relatieve krapte van de Waal tussen St. Andries (Tiel) en Brakel (Vuren). De mens heeft dus nog verscheidene keren het proces van natuurlijke rivierverlegging nagebootst.

De volledige bedijking verhinderde de afzetting van sediment in de komgebieden tussen de rivieren. Daardoor daalde het land in de komgebieden. Intussen werd het sediment over een

veel kleiner oppervlak dichter langs de oevers afgezet, namelijk in de uiterwaarden. Dat werd nog sterker het geval door de normalisatie van de rivier. Die normalisatie moest verhinderen dat de geul zich steeds verplaatste en moest er voor zorgen dat water, ijs en sediment makkelijk werden afgevoerd en dat de vaargeul zichzelf op diepte hield. De uiterwaarden slibden er meer dan een meter door op, waardoor de hoogwater-afvoercapaciteit van het winterbed kleiner werd. Rond het lagere binnendijkse land kwamen er dus steeds hogere hoogwaterstanden.

Intussen 'groef de riviergeul zich in'. Dit kwam door de versmalling van het zomerbed en doordat laterale erosie (oeverafslag) onmogelijk was geworden en er ook geen sediment meer uit het achterland kwam: over de stuwen in de gekanaliseerde Oberrhein en uit de eveneens gekanaliseerde zijrivieren in Duitsland wordt haast geen sediment meer doorgevoerd. Excessief baggerwerk in de jaren 1970 beroofde de rivier nog eens extra van zijn sediment. Wat dan voor de rivier overblijft en versterkt is kannibaliseren van sediment dat zich al in haar bedding bevindt. Door de uitschuring kunnen vaste lagen hinderlijke drempels worden voor de scheepvaart, kunnen uiterwaarden verdrogen en kunnen riviersplitsingen sneller asymmetrischer worden en misschien instabiel. Daling van de bodem in de riviergeul verklaart ook waarom kribben in het bovenriviereengebied 'te hoog' zijn, en in het kader van Ruimte voor de Rivier worden verlaagd. De mens probeert verdere daling van de riviergeul tegen te gaan door in Duitsland grind (grof bedding sediment) in de rivier te storten, maar de rivierbodem daalt plaatselijk nog steeds.

Door de normalisatie ontstond dus een binair landschap met een diepe geul tussen hoge uiterwaarden, zonder gradiënten. Dit 'binaire' landschap kwam er vooral omwille van hoogwaterbescherming en ten behoeve van de scheepvaart.

Uitschuring en aanzanding in de geul zijn ook de cruciale processen die de afvoerverdeling op de splitsingspunten bepalen. De splitsingspunten Pannerdense Kop en IJsselkop zijn uitzonderingen in de wereld in de zin dat ze al lange tijd vrijwel stabiel zijn. Onderzoek heeft aangetoond dat dat fysisch eigenlijk niet kan, en dat ieder splitsingspunt uiteindelijk instabiel zal worden door verzanding van de ene riviertak en groei van de andere. Dat dat bij onze Rijntakken (nog) niet is gebeurd kan worden verklaard door de gelukkige omstandigheid dat de aanstroom van water en sediment in de bocht precies gunstig is en dat in het Pannerdens Kanaal en de IJssel stevige grindlagen de uitschuring (tot nu toe) voorkomen. Dit is dus werkelijk een dubbeltje op z'n kant; en misschien een sluimerend '*tipping point*'.

Welke lessen kunnen we trekken uit deze inzichten? Hieronder geven we puntsgewijs enkele adviezen voor inrichting en beheer:

- Wijziging van de afvoerverdeling bij hoogwater met extra afvoer via de Nederrijn-Lek is niet logisch: de weg naar zee is te lang.
- Extra hoogwaterafvoer via de IJssel past wel bij het natuurlijk gedrag: de afstand naar zee is gelijk aan die via de Waal, in het verleden heeft de Rijn al bijna zelf die route gekozen. Dat is blijvend door de mens voorkomen door werken op de splitsingspunten en het IJsselmeer.
- Het leiden van een deel van de afvoer van de Waal over (nieuwe) Heerewardense overlaten en dan via de (Bergsche) Maas past bij een vroegere situatie en is een verkorting van de afvoerroute naar zee. Dat is in theorie een 'natuurlijke keuze', waarbij de Maas echter veel meer water te verwerken krijgt dan op dit moment mogelijk is, mede omdat hoogwaters in de Rijn en de Maas meestal ongeveer gelijktijdig optreden. In het verleden, toen de Waal nog 'over kon lopen' heeft dit langs de Maas voor veel problemen gezorgd. In de praktijk zal dit alternatief dus weinig perspectief bieden.
- Wijziging van de afvoerverdeling op de bestaande splitsingspunten (Pannerdense Kop en IJsselkop) wordt afgeraden en vergt in ieder geval uiterste zorgvuldigheid.

Meer water door een breder winterbed is misschien toelaatbaar (dijkverlegging of bypass), maar hogere stroomsnelheden in het zomerbed kunnen het labiele evenwicht makkelijk verstoren. Dan zou een irreversibele reactie van erosie van de grindbodem kunnen optreden waardoor de tak nog meer water gaat afvoeren. Dan kan de afvoerverdeling alleen met zware steenbestortingen over vele kilometers rivierlengte alsnog worden gefixeerd.

- Ook wijziging van de aanstroom van water en sediment bij de splitsingspunten kan de afvoerverdeling en sedimentverdeling (verschillende korrelgroottes gaan verschillende riviertakken in) verstoren. Iedere vorm van 'rommelen in het zomerbed' kan tot instabiliteit leiden.
- In het algemeen geldt dat dijkverlegging – of beter: het verbreden van de overstromingsvlakte – de voorkeur verdient boven uiterwaardverlaging, omdat sediment over een groter areaal wordt verspreid (bijv. over de bredere uiterwaard, en/of via een *bypass*/groene rivier/ 'floodway'), sediment aldus een groter gebied ten goede komt, minder slib 'ongebruikt' naar het benedenrivierengebied wordt doorgevoerd, en het hoogteverschil tussen binnendijks en buitendijks minder snel toeneemt. Daarmee is dijkverlegging minder onderhoudsgevoelig en kan als duurzamer worden beschouwd. Uiterwaardverlaging betekent in de praktijk het creëren van een tijdelijke zandvang.
- Nevengeulen zijn in het algemeen niet stabiel: of ze groeien, of ze zanden aan, en dit komt door water- en sedimentverdelingsprocessen die spelen en doorwerken vanaf de aantakkingen op de hoofdgeul. Dit betekent dat geregeld onderhoud noodzakelijk is als ze blijvend nodig zijn voor afvoer.
- Natuurlijke cyclische 'verjonging' is onmogelijk als de zomergeul is vastgelegd. Van nature gebeurt dit in vrij bewegende rivieren door laterale erosie in buitenbochten en aangroei in binnenbochten, waardoor de riviergeul opschuift en ouder bos op eroderende oevers dynamisch wordt vervangen door jonger struweel op de aangroeiende binnenbocht. Verjonging kan in Nederland, waar rivieren de oevers niet mogen eroderen, alleen door uiterwaardverlaging, met bulldozers, en ingrijpend vegetatiebeheer, met kettingzagen, worden nagebootst. Uiterwaardverlaging kan daarmee een tijdelijk herstel betekenen van overgangsmilieus met tijdelijk bestaan van gewaardeerde successiestadia van natuurlijke vegetatie.

Inhoud

1 Inleiding	13
1.1 Onderwerp en doel	13
1.2 Opzet van het rapport	14
2 Achtergrond: ontstaan van de Nederlandse rivierdelta	15
2.1 Overwegend natuurlijke aanloop tot 1.000 jaar geleden	15
2.1.1 Ontstaan van kustlijn en riviermondingen	15
2.1.2 Ontwikkeling van de delta van 5.000 tot 1.000 jaar geleden	16
2.2 Ontwikkelingen in de jongste 1.000 jaar	18
2.2.1 Ontginning, ontwatering en bedijking	18
2.2.2 Bedijkte rivieren	19
2.3 Is Nederland door de Nederlanders gemaakt?	23
3 Equation Section (Next)	25
3.1 Het huidige rivierennetwerk als gevolg van rivierverleggingen in het verleden	25
3.2 Zijn riviersplitsingen stabiel?	28
3.3 Wil de rivier een andere koers naar zee?	31
3.4 Kunnen we de afvoerverdeling bij riviersplitsingen wijzigen?	32
4 Geulen en uiterwaarden	35
4.1 Natuurlijke verjonging van rivierbochten en overstromingsvlakte	35
4.2 Rivieren en overstromingsvlakten in een bedijkte, 'genormaliseerde' rivier	38
4.3 Uiterwaarden verlagen of dijken verleggen?	39
4.4 Duurzame nevengeulen?	39
4.5 Cyclisch verjongen, andere streefbeeldvorming of vegetatie in banen geleid?	40
5 De rivierbedding	43
5.1 Natuurlijke rivierbeddingen	43
5.2 Genormaliseerde rivierbeddingen	44
5.3 Wil de rivier zich nog verder verdiepen...?	47
5.4 ...of kan kribverlaging de trend keren?	47
6 Bronnen	49

1 Inleiding

1.1 Onderwerp en doel

Een groot deel van Nederland is gevormd door de Rijn en de Maas, en al sinds de prehistorie wonen er mensen langs die gebruik maken van de rivieren en het land ernaast. Om zich tegen overstromingen te beschermen, hebben de bewoners van het rivierengebied dijken aangelegd, toen ze de natuurlijke riviervlakte eeuwen geleden begonnen te ontginnen en in te richten. Maar ook de uiterwaarden kennen nog verscheidene gebruikers: er wordt zand en klei gewonnen, grote oppervlakten zijn als weidegrond in gebruik, en in de afgelopen decennia is ook natuur steeds belangrijker geworden. Verder wordt het water voor vele doeleinden gebruikt: voor scheepvaart, voor drink- en industriewaterproductie, als koelwater, voor de landbouw en voor de waterhuishouding van poldergebieden. Deze functies hebben belang bij een rivier die voldoende vaardiepte biedt, waaraan voldoende water van goede kwaliteit kan worden onttrokken, en die zelf kwaliteit heeft.

De grote rivieren in Nederland zijn al lang niet meer natuurlijk, maar in de loop van de tijd in vele opzichten door de mens beïnvloed. Soms was dat door directe ingrepen zoals het aanleggen van dijken en kribben, soms indirect en onbedoeld, bijvoorbeeld door de ontbossingen in het grotere stroomgebied (achterland en rivierdal). Maar dat wil niet zeggen dat alle natuurlijke processen zijn verdwenen: Rijn en Maas voeren nog steeds water af, en dat water voert nog steeds sediment mee. Soms kunnen de processen in de rivier ongunstig zijn voor menselijk gebruik, zoals aanzanding voor de scheepvaart. Voor sommige andere functies is het natuurlijke gedrag juist weer gunstig, zoals overstroming van de uiterwaarden voor natuurontwikkeling.

Omdat tegen de natuur in werken een grote inspanning vergt – en soms veel geld – is het zinvol om de vraag te stellen of inspanningen niet beter kunnen. We moeten dan eerst weten wat de natuurlijke ontwikkeling van de rivier is, en in hoeverre we daar met het huidige beheer tegenin gaan. Daarna kunnen we dan vaststellen waar en hoe rivierbeheer en inrichtingsmaatregelen in de toekomst –bijvoorbeeld in het Deltaprogramma Rivieren (DP-R)– meer zouden kunnen aansluiten bij de natuurlijke ontwikkeling en gebruik kunnen maken van die natuurlijke processen. Het kan daarbij om kleine beheersmaatregelen gaan, zoals bij het stroomlijnen van lokale wilgenopslag, maar ook om grotere kwesties, zoals de verdeling van de rivierafvoer over de Rijntakken. Het is de vraag of we geen mogelijkheden over het hoofd zien om het natuurlijke gedrag van de rivier beter te benutten: mogelijkheden van beheerverandering waarbij voortaan minder inspanning nodig is of met dezelfde inspanning meer wordt bereikt. Het is ook de vraag of we in onze plannen voor rivierbeheer en inrichtingsmaatregelen geen potentiële instabiliteit in het systeem over het hoofd zien die in het natuurlijk gedrag van de rivier besloten lag: een kantelpunt of *tipping point* dat overschreden zou kunnen worden en ons daarbij verrast, omdat de rivieren zich tot aan het overschrijden toch redelijk voorspelbaar leken te gedragen...

Dit rapport gaat daarom over natuurlijk riviergedrag: ‘wat de rivier zelf wil’, ofwel ‘wat zou er gebeuren als het aan de rivier zelf lag?’. We realiseren ons dat veel rivierveranderingen door menselijk ingrijpen niet kunnen worden teruggedraaid, omdat daarmee veiligheid en economische ontwikkeling en ons bestaan in de delta in het geding komen. Maar we kunnen ons wel afvragen in hoeverre we tegen de natuurlijke neiging van de rivier in werken, en waar we er juist meer gebruik van kunnen maken. Het doel van dit rapport is om op basis van de

meest recente kennis een toegankelijk overzicht te geven hoe een natuurlijk riviersysteem zich gedraagt en wat dat zou kunnen betekenen voor voorgenomen beleid, inrichting en beheer.

1.2 Opzet van het rapport

Het rapport is gestructureerd van grote naar kleine ruimte- en tijdschaal. De grootste schaal is die van de delta als geheel, die in het verleden werd opgebouwd door zich verleggende rivierlopen. Daarbij is één van de vragen of een aangepast rivierennetwerk logisch is, maar ook de verdeling van de afvoer over de bestaande takken komt aan bod. De middenschaal is die van de rivierbochten, uiterwaarden en nevengeulen. Daarbij is één van de vragen of de rivier stabiele nevengeulen en zich cyclisch verjongende vegetatie kan onderhouden, maar wordt ook ingegaan op verschillende wijzen van rivierverruiming. De kleine schaal is die van de riviergeul: het zomerbed en de kribvakken. Eén van de vragen hierbij is of de rivierbedding zich nog verder zal verdiepen.

In een eerste hoofdstuk wordt de ontwikkeling van de Nederlandse rivierdelta geschetst, om een referentie te verkrijgen om de huidige staat mee te vergelijken. Vanaf wanneer is Nederland door de Nederlanders gemaakt, en wat van de delta was daarvoor al klaar? Daarna wordt in hoofdstukken gefocust op het netwerk van splitsende riviertakken, op relaties tussen riviergeul en flankerende uiterwaard, op de eigenlijke rivierbedding. Het rapport richt zich op de Rijntakken. Het benedenrivierengebied, waar ook zeespiegelstijging, getijden en stormvloedde processen beïnvloeden, is een verhaal apart en is daarom buiten beschouwing gelaten.

2 Achtergrond: ontstaan van de Nederlandse rivierdelta

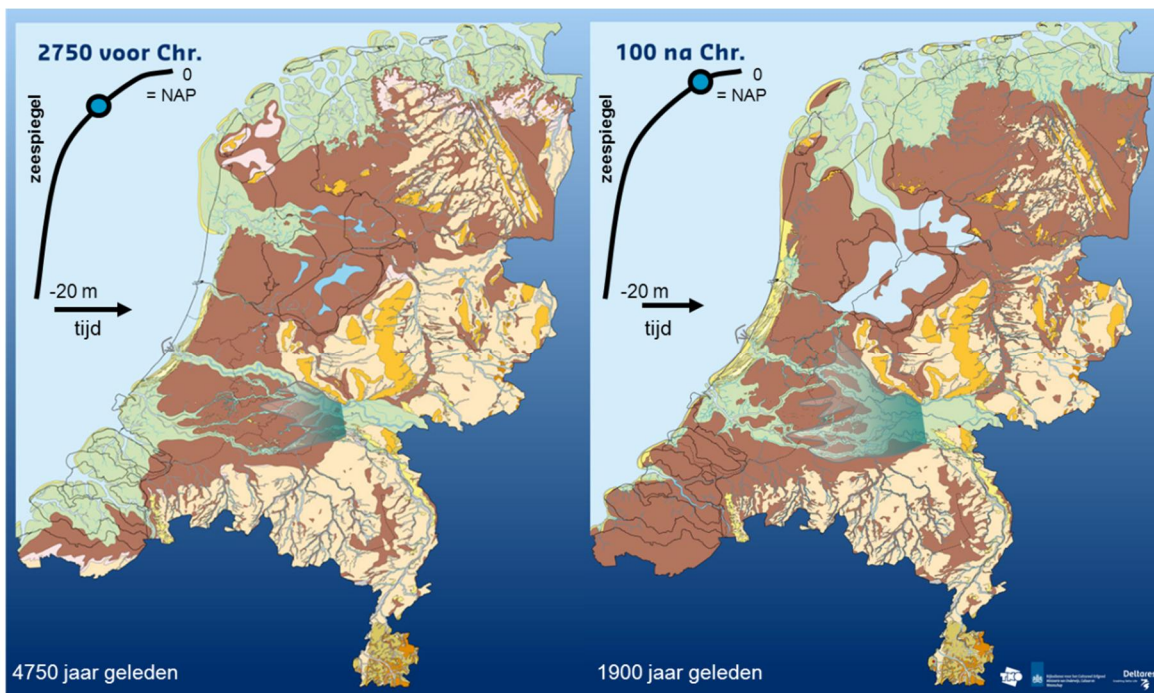
2.1 Overwegend natuurlijke aanloop tot 1.000 jaar geleden

Om het ontstaan en de opbouw van de huidige Rijn-Maasdelta te begrijpen, evenals de processen die hier een rol bij speelden en de toenemende rol van de mens hierop, moeten we circa 5000 jaar teruggaan in de tijd. We zitten dan in de tweede helft van het Holoceen. In de 15.000 jaar ervoor was er een eind gekomen aan de laatste ijstijd. Het klimaat was warmer geworden en leek al veel op het huidige. Het Rijnstroomgebied, delen van de Alpen maar vooral Zuid- en Midden-Duitsland en Noordoost-Frankrijk, waren na de ijstijd bebost geraakt en zo beschermd tegen bodemerosie. De jager-verzamelaars die het gebied al langer hadden bewoond mixten er met de eerste landbouwers (neolithicum) en langzaam nam de bevolkingsdichtheid toe. Aan de rand van het continent was de zeespiegel ruim 100 m gestegen tot nog maar een paar meter lager dan tegenwoordig. Daarmee was de omvang van de delta van Rijn en Maas bepaald.

2.1.1 Ontstaan van kustlijn en riviermondingen

Vorm en positie van de Rijn-Maasdelta zijn ontstaan door zeespiegelstijging vanaf het einde van de laatste ijstijd. Door de zeespiegelstijging verschoof de monding van de Rijn vanuit een positie in Het Kanaal ten noorden van Bretagne naar Nederland. Hierbij was het Noordzeegebied ondergelopen en de kustlijn opgeschoven tot min of meer de huidige positie. In de laatste millennia voor 5.000 jaar geleden stabiliseerde de kustlijn. Gelijktijdig ontstond ook de configuratie met twee afzonderlijke mondingen van de grote rivieren: die van de Oude Rijn bij Leiden en die van de Maas bij Rotterdam.

Waar Nederland daarvoor een sedimentdoorvoerend en -exporterend gebied was geweest, werd het door de zeespiegelstijging een sedimentatiegebied. Het rivierdal dat Rijn en Maas deelden, verdronk in kustwateren. Het daloppervlak uit de ijstijd werd in West-Nederland onder getijdeafzettingen begraven. Door golfwerking ontstonden vanaf ca. 8.000 jaar geleden, dicht bij de huidige kustlijn, kleine zandige Waddeneilanden met zeegaten daar tussen en getijdegebieden direct landinwaarts daarvan. Rond 8.000 jaar geleden mondden Rijn en Maas nog gezamenlijk uit in één groot estuarium nabij Rotterdam dat door verdrinking van hun gezamenlijke dal ontstaan was. Vanaf 7.500 jaar geleden nam een zeegat bij Leiden de functie van Rijnmonding over. De Maas bleef de monding in het estuarium bij Rotterdam houden. Pas millennia later, in de Romeinse tijd, zou de Rijn zich weer deels bij de Maas voegen, als gevolg van rivierverleggingen stroomopwaarts in de deltavlakte.



Figuur 2.1 Paleogeografische reconstructie van Nederland ca. 5000 en ca. 2000 jaar geleden, en relatie met zeespiegelstijging en toenemende sedimentatie van slib over veengebied in de jongste millennia. Bron: Atlas van Nederland in het Holoceen (Vos et al., 2011).

2.1.2 Ontwikkeling van de delta van 5.000 tot 1.000 jaar geleden

Het laaggelegen gebied tussen achterland en kust werd door strandwallen tegen de zee beschermd. Met het langzamere stijgen van de zeespiegel en onder invloed van het toenmalige golfklimaat en getijdestromingen in de Noordzee begonnen strandvlakte en duinen zich zeewaarts te verbreden. Veel zeegaten langs de Hollandse kust raakten hierbij opgevuld. Ook de zeegaten waardoor de Rijn en Maas uitstroomden raakten deels opgevuld: ze versmalden, maar bleven als monding functioneren. Zo ontstond de typische Hollandse barrièrekust die het achterland beschermde tegen zout water.

Achter de gesloten kustlijn en tussen de benedenrivieren ontwikkelde zich een uitgestrekt veengebied, gevoed door rivier- en regenwater. Begonnen als een verzoetend rietmoeras, ontwikkelde het veengebied zich tot een uitgestrekt moerasbos. In Midden-Nederland vertakten Rijn en Maas zich in dit kustveengebied. Slechts een enkele Rijn- en Maastak verbond het Midden-Nederlandse rivierengebied door het dichtbegroeide kustveengebied met open zee (Fig. 2.1). Rond 4000 jaar geleden was de veenuitbreiding maximaal en begon zelfs de ontwikkeling van hoogveen. Dit vormde zich op enige afstand van de rivieren, en groeide als kussens tot verscheidene meters boven gemiddeld zeeniveau uit. Het moerasbos en de veenbulten hielden de rivieren stevig op hun plek.

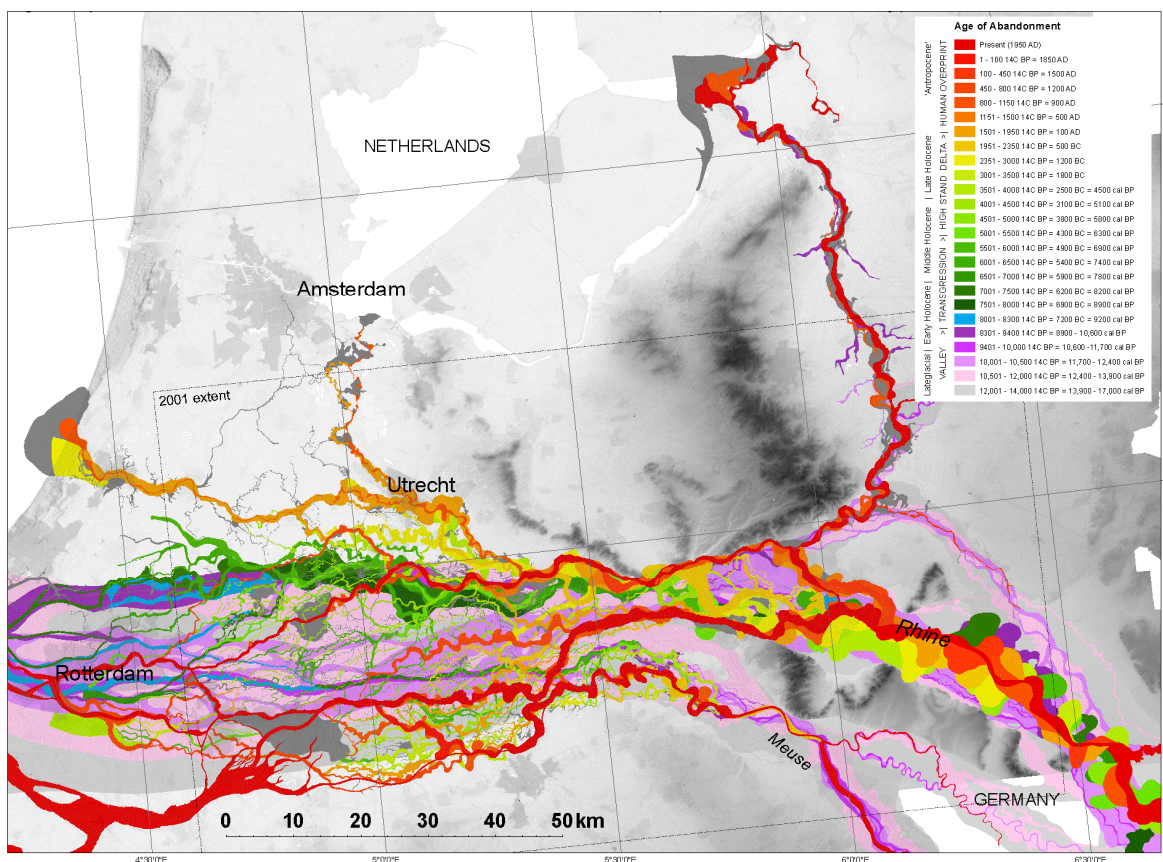
In het achterland werd de ontbossing, die was begonnen door neolithische bewoners, in de Bronstijd op grotere schaal voortgezet ten behoeve van de landbouw. Daardoor veranderde het afvoerregime van de kleinere zijrivieren, met effect op dat van de Rijn. Het landbouwgebied was gevoeliger voor erosie dan de oorspronkelijke bossen. In eerste instantie hoopte afspoelende löss zich nog op onderin kleine zijdalen. Gaandeweg kwam

echter steeds meer materiaal in de grotere zijrivieren terecht. Dit leidde vanaf 2.500 jaar geleden tot een aanzienlijk grotere sedimenttoevoer van Rijn en Maas. Deze is in de delta herkenbaar aan de toegenomen hoeveelheid afgezet fijn sediment (met name materiaal dat zwevend in het rivierwater wordt meegevoerd en in overstromingsgebied tot bezinking komt) en aan de ontwikkeling van de riviertakken sinds die tijd. Uit de hoeveelheden riviersediment is af te leiden dat de Rijn in de jongste twee millennia ruim tweemaal zoveel slib (silt en klei) naar de delta transporteerde als in de situatie voor de ontbossingen, rond 5.000 jaar geleden.

Tijdens overstromingen van de nog onbedijkte rivieren werd dit slib afgezet in de riviervlakte. Een aanzienlijk deel van de Duitse löss eindigde zo als kleidek in onze venige komgebieden. Oude rivierbeddingen raakten bedekt met klei en bleven er als zandbanen in de ondergrond bewaard. Hoe ouder de rivierloop, hoe dieper de zandbaan in de ondergrond begraven ligt (Fig. 2.2). Een nog groter deel van het Duitse löss eindigde in meer bovenstrooms gelegen delen van de overstromingsvlakte als bouw materiaal voor oeverwallen en algehele ophoging. De apex van de delta – ter hoogte van het meest bovenstroomse splitsingspunt – schoof hierdoor geleidelijke landinwaarts van een positie bij Nijmegen naar de huidige positie bij Lobith. Dankzij de prehistorische mens reikt de delta dus tientallen kilometers verder landinwaarts dan waar natuurlijke zeespiegelstijging deze zonder de mens had gebracht.

Door de toegenomen sedimentatie veranderde ook het zich vertakkende rivierennetwerk aanzienlijk. In de IJzertijd, Romeinse tijd en in de Middeleeuwen (2.500 tot 1.000 jaar geleden) volgen rivierverleggingen (avulsies) elkaar sneller op dan in de periode daarvoor. Nieuwe riviertakken die tijdens overstromingen waren ontstaan ontwikkelden zich verder en trokken daarbij een steeds groter deel van de afvoer naar zich toe. Dit ging ten koste van oudere rivierlopen, die verzandden en geleidelijk dichtslibden. Anders dan daarvoor het geval was geweest, doorsneed het netwerk van nieuwe Rijntakken – Hollandse IJssel, Lek, Linge en Waal – het Utrechts-Hollands veengebied en mondde de Rijn weer samen met de Maas uit bij Rotterdam. Langs deze takken was de afstand naar zee korter dan langs de oude loop, wat aan het succes van de nieuwe takken heeft bijgedragen.

Niet alleen in de benedenstroomse delta ontstonden nieuwe takken – ook nabij de apex vormden zich nieuwe takken en raakten oude in onbruik. De Nederrijn en Waal ontwikkelden zich tussen 2.500 en 2.200 jaar geleden. Het ontstaan van de Gelderse IJssel volgde tussen 1.800 en 1.400 jaar geleden. Tienduizenden jaren lang waterden via het huidige IJssedal slechts kleine beken en riviertjes af, en lag tussen Zutphen en Deventer een waterscheiding (Fig. 2.1). Ten noorden van die waterscheiding was de afwatering naar de kop van Overijssel. Ten zuiden van die waterscheiding stroomden beken en riviertjes naar de Rijn, waaronder de Berkel en de Oude IJssel. Langs de Veluwezoom was de afwatering toen dus tegen de stroomrichting van latere Gelderse IJssel in. Met het ontstaan van deze riviertak hervond de Rijn als het ware een oude route, het in de ijstijd in onbruik geraakte dal. Dit gebeurde nadat bij een zeer hoge waterstand het water over de waterscheiding was begonnen te stromen en zich geulen uitschuurde, die zich verdiepten tot een permanente rivier. Zo (her)annexeerde de IJssel een groot overstromingsgebied dat lang niet tot de Rijn had behoord.



Figuur 2.2 Ouderdom van voormalige rivierlopen (zandbanen) van Rijn en Maas in de Nederlandse delta. Bron: Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta (Cohen et al., 2012).

2.2 Ontwikkelingen in de jongste 1.000 jaar

2.2.1 Ontginning, ontwatering en bedijking

De ontstaansgeschiedenis van de Rijn-Maasdelta is tot ongeveer 1000 jaar geleden dus weliswaar beïnvloed door de mens, maar toch in hoofdzaak natuurlijk. Vanaf de Middeleeuwen begon de mens de delta zelf ingrijpend te veranderen.

De eerste ingrepen in het rivierengebied betroffen vooral de overstromingsvlakte. Zo'n 8 à 9 eeuwen geleden begon systematische ontginning, ontwatering en bedijking van de veengebieden in Utrecht en Holland. Hier waren de omstandigheden het gunstigst: niet alleen sediment verdeelde zich met het ontstaan van de nieuwe takken anders dan daarvoor, ook het water en de last van overstromingen deden dat. De ontwikkeling van de Waal en het ontstaan van de Gelderse IJssel leidden veel water weg van de bestaande Rijn, met als gevolg minder overstromingen en betere bewoonbaarheid van de gebieden langs Nederrijn, Lek, Hollandse IJssel en de Oude Rijn. Het ontstaan van de IJssel verkorte ook de handelsweg van het Rijndal naar het noorden, naar de Duitse Bocht en de Oostzee. Daardoor konden vroeg middeleeuwse handelssteden als Deventer en Zutphen ontstaan en tot grote bloei komen. Dit duurde tot het eind van de Middeleeuwen, toen de Waal veel extra afvoer begon te trekken en de IJssel minder goed bevaarbaar werd: economisch verval zette zich toen in.

De ontginning en bedijking werden geleidelijk uitgebreid over heel het Nederlandse rivierengebied. Door lokale dijken te verbinden werden de grote rivieren stapsgewijs geheel bedijkt. Rond 1350 was de bedijking van het land voltooid: de rivieren waren tot voorbij de huidige grens met Duitsland geheel met bandijken beteugeld. Tevens werden oude riviertakken die in hun bovenloop al goeddeels waren verzand, volledig afgedamd en aldus aan het afvoernetwerk onttrokken: de Kromme Rijn-Oude Rijn in 1122 na Chr., de Hollandse IJssel en de Linge rond 1350 na Chr.

Achteraf gezien heeft men de bedijking van de delta op een zeer gunstig moment ondernomen. Er is geprofiteerd van de op natuurlijke wijze ontstane verlegging van de Rijntakken naar de zuidelijke delta, en van de kleilaag die dankzij de aanzienlijk toegenomen sedimentlast vanuit het ontboste achterland het veen regionaal bedekt had (Fig. 2.1). Vooral in polders met een wat dikker kleidek op het veen werd de ontginning een succes. Onbedoeld en indirect hadden de boeren die bovenstrooms het bos gekapt hadden ook de ontginning en landbouw in de delta mogelijk gemaakt.

De ontginning in het kustgebied, waar de kleilaag dun was of ontbrak, verliep veel minder succesvol. In Zeeland, Holland en Friesland had het ontwateren en afgraven van veengebieden (voor zout en brandstof) bodemdaling veroorzaakt en de gebieden kwetsbaar gemaakt voor overstromingen en inbraken vanuit zee. Oorspronkelijk aaneengesloten veengebieden ten zuiden van de Maasmonding vielen in de Middeleeuwen ten prooi aan stormvloed. Hierdoor ontstonden de Zeeuwse en Zuid Hollandse eilanden en de wateren daartussen.

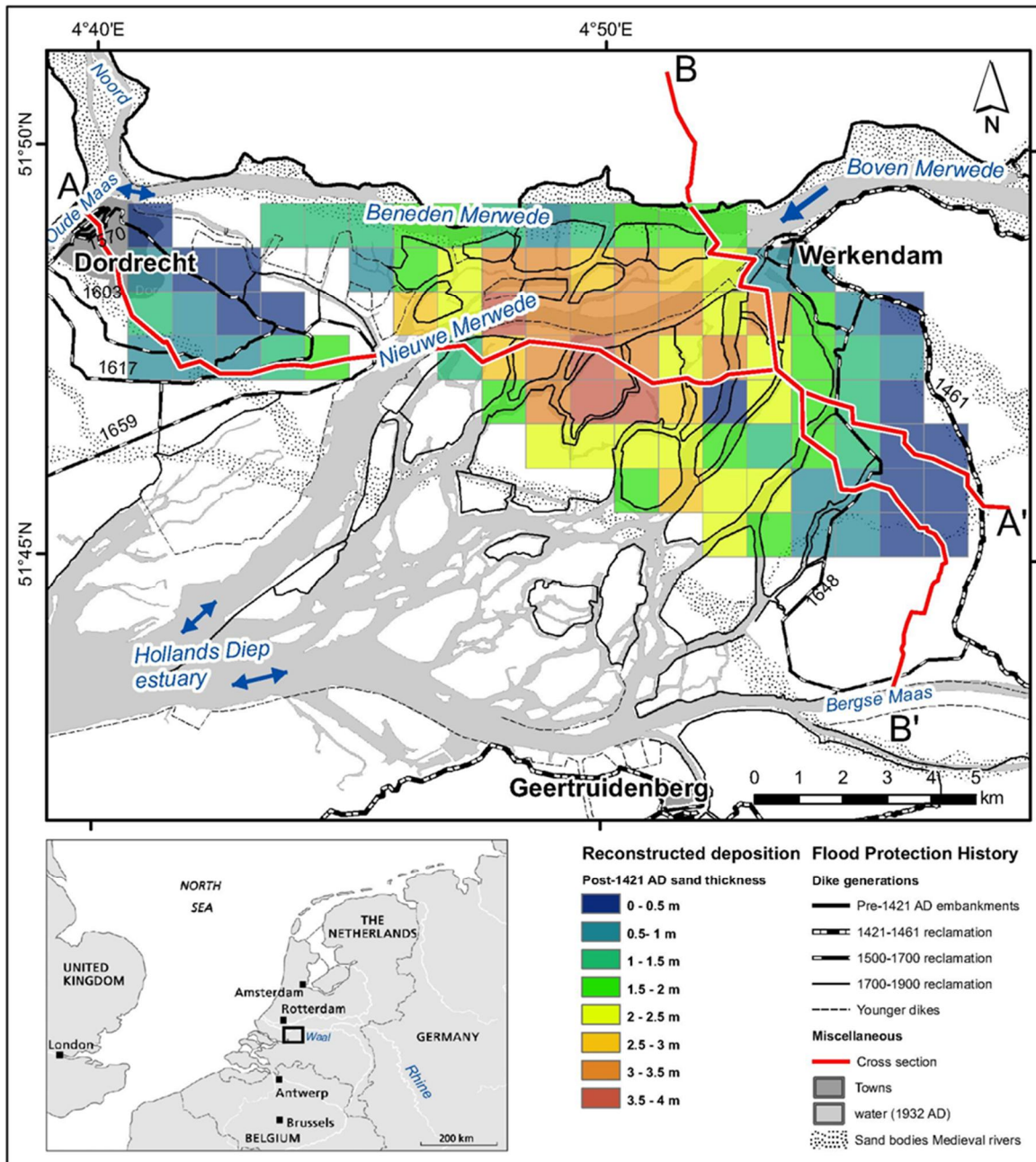
In de loop van de tijd begon de mens de landbouwgronden tussen de rivieren steeds dieper te ontwateren en te ontginnen en het veen plaatselijk als brandstof (turf) te exploiteren. Dit had aanzienlijke bodemdaling en het ontstaan van grote plassen tot gevolg, wat steeds meer overlast en gevaar met zich meebracht. Dit was de aanleiding om in de Middeleeuwen het polderbeheer te organiseren in waterschappen. Met ingenieuze boezemstelsels en door bemaling wist men de poldergebieden steeds droog te houden, ondanks de dalende bodem.

2.2.2 Bedijkte rivieren

De bedijking had uiteraard grote gevolgen voor de rivieren. De rivieren waren vastgelegd en konden geen nieuwe loop meer vormen of zich verleggen. Niet alleen kon het water niet meer in de komgebieden tussen de rivieren komen, ook kon de rivier er geen sediment meer afzetten. Tijdens hoge rivierafvoeren bleef het water weliswaar tussen de bandijken, maar daar traden nu veel hogere waterstanden op dan in de onbedijkte situatie, toen bij grote rivierafvoeren het water zich in een dunne laag over een groot gebied kon verspreiden. Het grote waterstandsverschil tussen de bedijkte rivieren en de ingedijkte dalende polders leidde herhaaldelijk tot dijkdoorbraken.

Veel doorbraken ontstonden als gevolg van ijssdammen in de rivier die het water opstuwden. Maar ook braken dijken door waar deze een zandbaan van een oude rivierloop kruisten: het zand in de ondergrond vormt een uitstekende geleider voor kwelwater. Ook nu nog zijn dit potentieel risicovolle plekken voor kwel en onderloopsheid ('*piping*'). Bij een doorbraak kwam het overstromingswater ook veel hoger dan onder natuurlijke omstandigheden, omdat het water niet makkelijk terug de rivier in kon lopen; daar lagen immers dijken in de weg. Bij doorbraken ontstond in de regel een diep kolkgat (wiel), en werd binnendijks een waaier van zand en grind afgezet. Bij reparatie werd de dijk zelden door het kolkgat gelegd, maar vrijwel

altijd er omheen. Zo ontstonden in de loop van de tijd kronkelige dijken met talloze wielen aan weerszijden.



Figuur 2.3 Dikte van het sedimentdek in de Biesbosch, ontstaan in de eeuwen na de Sint Elisabethsvloeden in 1421-1424 na Chr. in de Grootte Waard. Bron: Kleinhans et al. (2010).

De Sint-Elisabethvloed van 1421 na Chr. (en opnieuw in 1424) was één van de belangrijkste inbraken vanuit zee, en de meest landinwaarts reikende. Het venige westen van de polder 'Grootte Waard' ging er voorgoed bij verloren, het klei-op-venige oosten van de polder kon (maar pas in 1450 na Chr.) herbedijkt worden en vormt nu het Land van Heusden en Altena. Hollands Diep, Biesbosch en Amer werden sedimentatiegebied van de Rijn (Fig. 2.3).

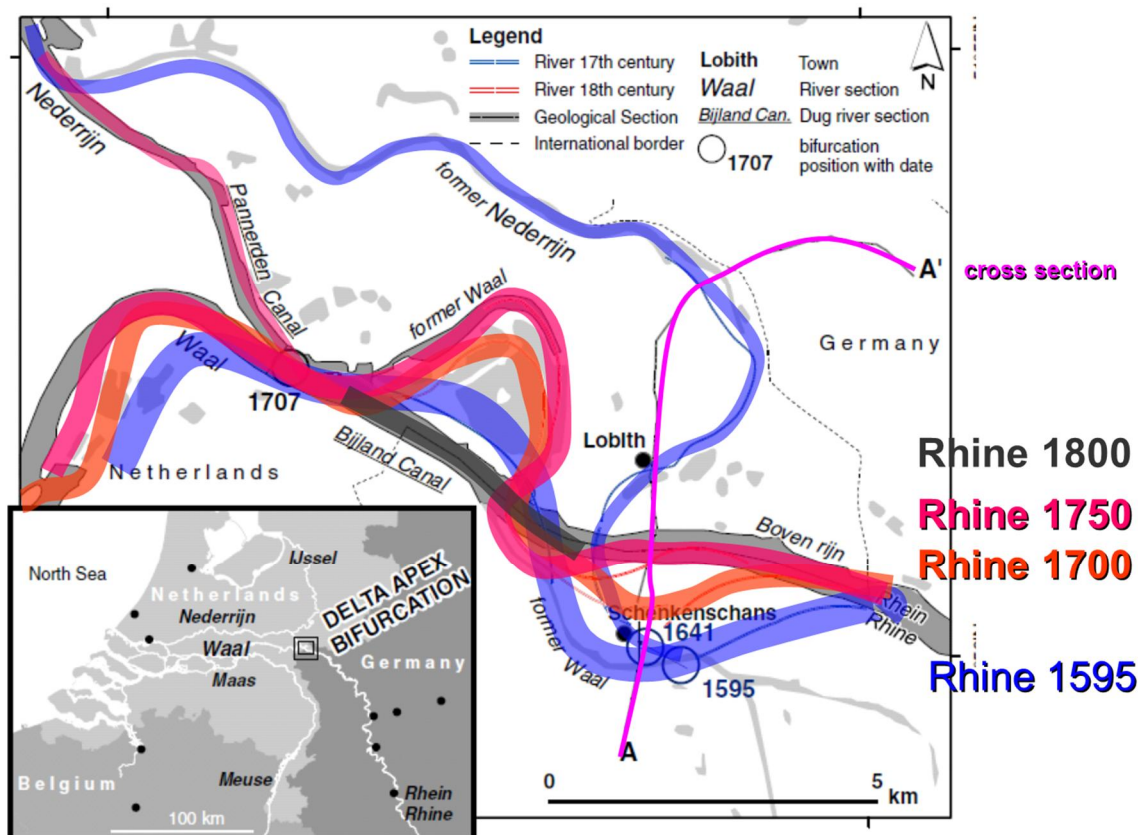
Middeleeuws Dordrecht was een eiland geworden, waar land omheen terug aanslibde dat geleidelijk weer ingepolderd kon worden. In de Gouden Eeuw zette de uitbouw van de Rijndelta in het Biesboschgebied door. Pas eind 17^e eeuw boette de Biesbosch als sedimentvang weer aan belangrikheid in.

De verdeling van water, sediment en overstromingslast in het benedenrivierengebied veranderde door de eeuwen heen met het opbouwen en eroderen van zandbanken in de splitsende geulen in de Biesbosch, met het hoger worden van de oevers en overstromingsvlakten ernaast, en met het indijken daarvan door de mens. Dat het water intussen steeds slechter weg kon stromen leidde ook meer stroomopwaarts tot een toenemende overstromingslast. In deze periode was er langs Waal, Nederrijn en IJssel toch al een grotere kans op dijkdoorbraak door de vorming van ijssdammen in het tijdelijk wat koudere klimaat – maar het ontstaan van de Biesbosch vergrootte dit probleem in de Boven Merwede en Beneden Waal.

Ook buitendijks begon de mens steeds meer in te grijpen in de natuurlijke ontwikkeling van de rivier. Met behulp van kribben werd getracht te voorkomen dat meanderbochten zich zouden verplaatsen en zo de bandijken zouden ondergraven. Maar ook versnelde men door kribben aan te leggen aanwas en opslibbing langs de oevers, als vorm van landaanwinning. De nieuwe aanwassen werden in gebruik genomen als rietland, griend, weiland, en op de hoogste delen zelfs als akker of boomgaard. Vooral de Waal werd daarbij geleidelijk steeds rechter. Zo werden ook de uiterwaarden steeds meer cultuurlandschap.

In de loop van de 17^e eeuw ontstonden steeds grotere problemen met de afvoerdeling en de vrije afvoer naar zee: steeds meer water stroomde via de Waal, ten koste van de Nederrijn en IJssel. Dit leidde tot meer overstromingen langs de Waal, tot economische nadelen voor de steden langs de Nederrijn en IJssel, en tot een militaire verzwakking van de functie van IJssel en Nederrijn als waterlinies. Verder benedenstrooms liep de Waal bij Heerewaarden bij hoogwater over in de Maas. De Maasbedding kan zo'n extra hoeveelheid water niet bergen, mede omdat hoogwaters in de Rijn en de Maas vaak gelijktijdig optreden. Benedenstrooms waren er afvoerproblemen: de Maas voegde zich bij Woudrichem bij de Waal, en de Merwede kon hun gezamenlijke afvoer noch richting Dordrecht, noch door aftakkingen naar de Biesbosch goed kwijt. In bovenstroomse richting trad in de Maas opstuwings op, met overtoppen van de overlaat bij Beers tot gevolg. De toegenomen Waalafvoer zorgde dus ook langs de Maas voor toenemende overstromingslast.

De scheefgetrokken afvoerdeling (Fig. 2.4) werd gecorrigeerd door het graven van het Pannerdens Kanaal (1707), door aanpassing van de IJsselkop (1777), en door bij Lobith met het Bijlandsch Kanaal (1776) een wijde meanderbocht af te snijden. De verbetering van de afvoer van de benedenrivieren gebeurde pas in de 19e eeuw: de Nieuwe Merwede (tussen 1850 en 1885) en Bergsche Maas (1904) werden gegraven om het water beter naar zee te voeren en de Waal en Maas werden bij Heerewaarden definitief van elkaar gescheiden door een hoge dijk. Zo werd het huidige netwerk van benedenrivieren grotendeels kunstmatig gevormd. De aanleg van stuwen in de Nederrijn in de jaren '50 van de 20^e eeuw maakte het mogelijk de afvoerdeling over Waal, Nederrijn en IJssel ook bij lage rivierafvoeren te regelen.



Figuur 2.4 Ontwikkeling van de riviersplitsing van de Rijn bij Lobith. Bron: Kleinhans et al. (2012).

Dijkdoorbraken waren een structureel probleem vanaf de Late Middeleeuwen. Ze waren mede gevolg van ijs dat zich in strenge winters op de rivieren vormde. Aan het eind van een strenge winter kon bovenstrooms opgebroken ijs bij eilanden en zandbanken en oevers benedenstrooms in uiterwaardbegroeiing en tegen dijken en dammen blijven steken en zo ijssdammen vormen. Zulke ijssdammen stuwden het water plaatselijk hoger op en zo konden relatief bescheiden afvoergolven toch al dijkdoorbraken veroorzaken.

Om dit gevaar te verkleinen besloot men in de 19^e eeuw tot normalisatie: door eilanden te verwijderen en de rivierbedding kunstmatig te vernauwen met kribben werd de stroomsnelheid van het water hoger en gelijkmatiger en kon de rivier zichzelf door uitschuring op diepte houden. Hierdoor was de kans op ijsvorming kleiner, en als er zich ijs vormde dan was de hoeveelheid ijs veel geringer dan voorheen in de bredere en ondiepe rivier. Deze ingrepen bleken effectief: de rivier bleef op diepte, dijkdoorbraken door ijssdammen kwamen niet meer voor, en slechts lokaal ontstonden nog ondieptes. Daar profiteerde ook de binnenvaart naar Duitsland van. In de loop van de 20^e eeuw, met name na de overstromingsrampen van 1926 (rivierengebied) en 1953 (Zuidwest-Nederland) werden de dijken verder verhoogd en verzwaald.

In de 80-er en 90-er jaren was er veel oppositie tegen de dijkverzwaringen en waren alternatieven voor verdere dijkverhoging aangedragen. De bijna-overstromingen van 1993 en 1995 waren vervolgens directe aanleiding tot een beleidsaanpassing waarbij aan rivierverruiming de voorkeur werd gegeven boven verdere dijkverhoging. Dat heeft uiteindelijk

geleid tot de Planologische Kernbeslissing Ruimte voor de Rivier, met meer dan dertig rivierverruimingsprojecten die nu in uitvoering zijn.

2.3 Is Nederland door de Nederlanders gemaakt?

Nederland staat bekend als een door de mens gemaakt landschap. Anderzijds wordt aan Napoleon de uitspraak toegeschreven dat Nederland slechts 'aanspoelsel van Franse en Duitse rivieren' zou zijn. Dit is niet in tegenspraak – beide zijn waar. Door het grootschalig ingrijpen heeft de mens niet alleen het landschap gemaakt, maar ook de natuurlijke processen structureel verstoord. Steeds hadden de ingrepen tot doel om het leven in de delta en langs de rivieren veiliger, economisch vruchtbaarder en aantrekkelijker te maken. Maar waar de ingrepen aanvankelijk vruchten afwierpen, leidden ze na enige tijd vaak tot onbedoelde en nadelige gevolgen.

Van nature had de delta door sedimentatie van rivierslib en veengroei de zeespiegelstijging gemakkelijk bij kunnen houden. De ontginning en ontwatering veroorzaakten echter een onomkeerbaar proces van veenoxidatie en inklinking van de ondergrond. Door de dijken was de natuurlijke ophoging door afzetting van slib gestopt. De uiterwaarden waren door hun beperkte breedte een veel minder effectieve sedimentvang dan de kommen in de onbedijkte situatie waren geweest. Waar voor de bedijking het meeste sediment aan het riviereengebied ten goede kwam en dit ophoogde, ging dit na de bedijking 'verloren' in de getijdenrivieren, estuaria en de Noordzee. Zo kwam het met moeite ontgonnen landoppervlak van de delta steeds lager te liggen. De landaanwinningen in het winterbed leidden ook tot problemen: begroeiing in de uiterwaarden vergrootte de weerstand en veroorzaakte ijssdammen. De normalisatie van de rivieren had weliswaar het gewenste effect voor hoogwaterbescherming en scheepvaart, maar op de lange termijn bleek ook deze grote, deels onvoorziene, effecten te hebben.

Zo kon de vastgelegde rivier geen oevers meer eroderen, en eerder ontstane stukken uiterwaard dus ook niet meer opruimen. Hierdoor konden de uiterwaarden in de loop van de tijd steeds hoger opslibben zonder dat de rivier het materiaal weer verwijderde. En met de steeds hoger wordende uiterwaarden stegen ook de hoogwaterstanden. Met een zich tegelijkertijd insnijdend zomerbed werd de interactie tussen hoofdgeul en uiterwaard ook steeds kleiner, wat ongunstig was voor de natuur: de uiterwaarden werden droger, gradiënten verdwenen. Voor slib waren de uiterwaarden als overstromingsvlakten van beperkte breedte een veel minder effectief sediment-vangend onderdeel van het deltasysteem dan de kommen van de onbedijkte situatie dat waren geweest. Waar voor de bedijking het merendeel van deze sedimentlast in het riviereengebied werd afgevangen, kwam dit na de bedijking benedenstrooms in de getijdenrivieren, estuaria en de Noordzee terecht.

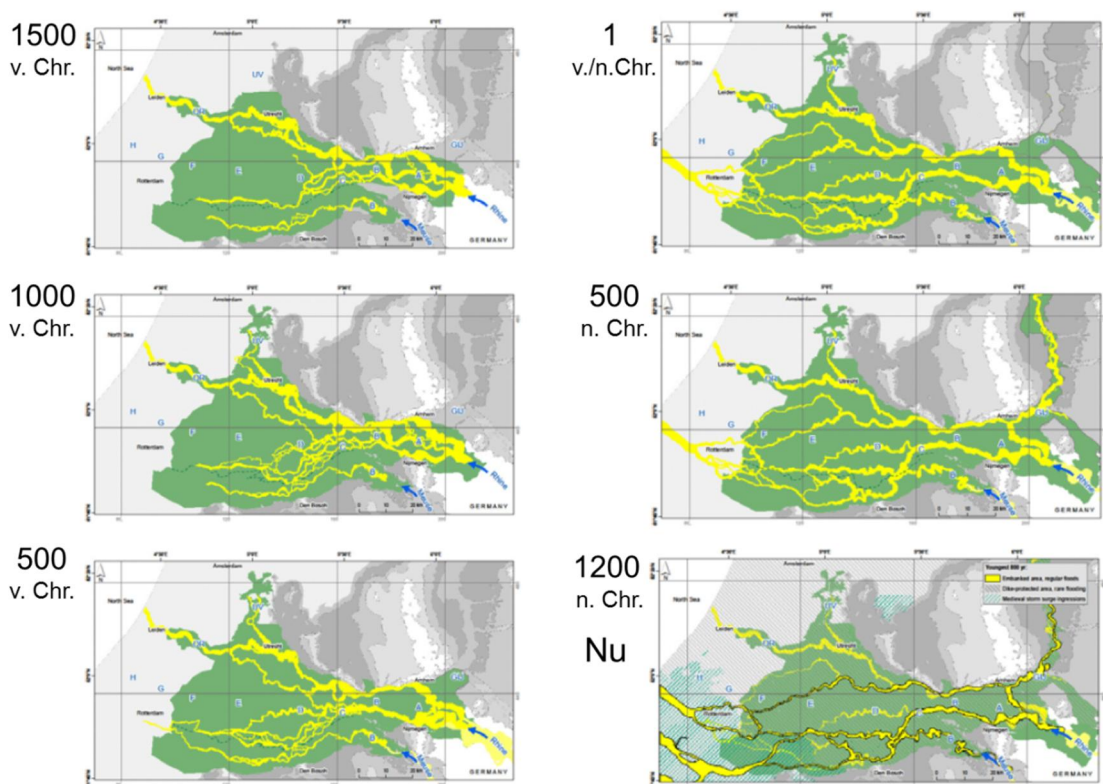
De natuurlijke reactie van de delta op al onze ingrepen in het verleden heeft ons steeds voor nieuwe, onvoorziene problemen geplaatst. Dat heeft ons geleerd dat we voor het doen van ingrepen goed moeten weten hoe het systeem waarin we ingrijpen werkt, en welke effecten de ingrepen hebben – ook op lange termijn. Door kennis van het natuurlijke systeemgedrag kunnen we die maatregelen nemen die niet tegen de natuurlijke ontwikkeling van de rivieren ingaan, maar er juist zoveel mogelijk gebruik van maken. In de hierna volgende hoofdstukken worden de belangrijkste natuurlijke processen toegelicht, en geven we aan op welke wijze hier rekening mee moet of kan worden gehouden, of er zelfs gebruik van kan worden gemaakt.

3 Equation Section (Next)

Equation Section (Next) Het netwerk van rivieren in de delta

3.1 Het huidige riviernetwerk als gevolg van rivierverleggingen in het verleden

Zonder menselijk ingrijpen verleggen rivieren in deltagebieden zich geregeld. Nieuwe lopen ontstaan en oude worden verlaten – een verschijnsel dat avulsie genoemd wordt. Dit gebeurt zowel aan de bovenrand van de delta (nabij de apex; Fig. 2.4) als verder benedenstrooms en in het door getijden beïnvloede gebied. Hierdoor ontstaat een zich vertakkend netwerk waarin sommige lopen ouder zijn dan andere. Is een nieuwe afsplitsing ontstaan dan kan zo'n nieuwe loop meer water gaan aantrekken en daarbij de geul verbreden en verdiepen. Maar lang niet alle nieuwe rivierlopen groeien uit tot een nieuwe hoofdloop: vele nieuwe takken worden snel weer verlaten. Of een nieuwe loop groeit, hangt vooral af van het verhang: een tak met een kortere weg naar zee voert het water effectiever af. Die 'weg van de minste weerstand' kan veranderen als de rivier hoger is komen te liggen, of doordat de bodem in het omliggende land is gedaald. Rivierverleggingen ontstaan vooral als er een hoogwater is waarbij de deltavlakte overstromt. Benedenstrooms in de delta kunnen ze ook ontstaan wanneer de zee tijdens een stormvloed de delta binnendringt.



Figuur 3.1 Het ontstaan van het netwerk van rivieren in de Nederlandse delta in de afgelopen 2500 jaar. Bron: Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta (Erkens en Cohen 2009; Cohen et al., 2012).

De Nederlandse delta heeft over de afgelopen 5000 jaar circa 40 verleggingen van de Rijn gekend – dat is er gemiddeld eens per 125 jaar een –, waarvan er drie bepalend waren voor de vorm van het huidige netwerk. De eerste en belangrijkste daarvan is de verlegging van de hoofdstroom van de Nederrijn - Oude Rijn, die bij Leiden in zee stroomde, naar de huidige Waal en Merwede. De verandering werd vooral veroorzaakt doordat de Nederrijn en de zijtakken een geringer verhang hadden dan de Waal. De grote herverdeling van afvoer vond plaats op het meest bovenstroomse splitsingspunt van de delta, nu de grens tussen Nederland en Duitsland. Een aantal minder belangrijke verleggingen, zoals het ontstaan van de Hollandse IJssel, Lek, Linge en Merwede (alle naar Rotterdam), hing samen met de geleidelijke herverdeling van de afvoer op het bovenstroomse splitsingspunt (Fig. 3.1).

Vanaf de 16^e eeuw veranderde de afvoerverdeling over de Nederrijn en de Waal bij het voormalige splitsingspunt bij Lobith snel. De bovenmond van de Nederrijn bij Schenkenschans zandde daardoor in de loop van de 17^e eeuw steeds meer aan, waardoor er minder water in de Nederrijn terecht kwam, en minder in de IJssel. Men heeft meermaals geprobeerd de waterverdeling te veranderen door kunstwerken te bouwen op de splitsing zelf, en door strekdammen te maken die het water meer de Nederrijn in moesten sturen. Deze hadden echter een averechts effect: de sterke stroming van de Rijn kwam door de strekdammen steeds dichterbij de noordelijke oever te liggen, wat daar snelle afkalving van de oever veroorzaakte. In een eeuw tijd verplaatste de splitsing zich over een grote afstand stroomafwaarts en naar het noorden. Het gevolg was dat de bovenmond van de Nederrijn bijna haaks op de hoofdstroom kwam te liggen, waardoor zand en grind nog beter in die bovenmond bleven liggen en een bank konden opbouwen. Men probeerde dus om het afgesloten raken van de Nederrijn te stoppen door er water heen te sturen, maar veroorzaakte echter versnelde sedimentafzetting die de Nederrijn juist sneller afsloot, met alle gevolgen van dien. Uiteindelijk groef men in 1707 het Pannerdens Kanaal als kortsluiting van de verlande bovenloop van de Nederrijn.

De tweede belangrijke verlegging is het ontstaan van de Gelderse IJssel. In de vroege Middeleeuwen – dus nog voor de bedijkingen – werd tijdens een overloopsituatie tussen Zutphen en Deventer de waterscheiding tussen zuidelijk en noordelijk deel van het dal door uitschuring doorbroken. Zo ontstond een nieuwe tak naar het noorden. De IJssel hernam de route die de rivier tienduizenden jaren daarvoor had verlaten. Verder benedenstrooms in de IJssel zijn lokale kleine rivieren opgeslorpt, in sommige trajecten zijn grote meanderbochten ontwikkeld, en in de Zuiderzee werd een IJsseldelta gevormd. In de loop van de Middeleeuwen nam de afvoer eerst toe, maar vanaf de 15^e eeuw nam deze weer af als gevolg van de ontwikkelingen op het splitsingspunt van Nederrijn en Waal.

Het graven van het Pannerdens Kanaal in 1707 herstelde niet alleen de aanvoer naar de Nederrijn, maar ook die naar de IJssel. Kort na aanleg was de afvoer door dit kanaal verre van stabiel. Brunings, de eerste directeur van Rijkswaterstaat, greep dan ook in toen het kanaal in rap tempo oevers afsloeg en breder werd, en men vreesde dat de Rijn zich terug zou gaan verleggen naar de Nederrijn via het nieuwe kanaal. Er is toen oeververdediging aangelegd, en het Pannerdens Kanaal werd na een aantal jaren enigszins stabiel. Achteraf gezien is een belangrijke oorzaak van die stabilisatie van het Pannerdens Kanaal dat de bodem snel grindrijker is geworden. Door erosie van het fijnere zand net na het ontstaan van beide lopen is de bedding verhoudingsgewijs steeds rijker aan grind geworden, wat verdere erosie sterk remt. Voor een deel komt het grind uit de bovenstroomse bocht, waar grind vooral door de buitenbocht wordt verplaatst, juist daar waar het Pannerdens Kanaal op aansluit, terwijl het meeste zand de Waal in gaat. Bij de IJsselkop is de situatie vergelijkbaar. Groei van de IJssel ten koste van de Nederrijn wordt er tegengehouden door grove

grindlagen in en onder de IJsselbedding. Had dit grove substraat er niet gelegen, dan waren de oeververdedigingswerken er onherroepelijk ondergraven en weggespoeld. Had de apex verder stroomafwaarts gelegen (denkbaar in een situatie zonder ontbossing in het achterland) dan was een kunstmatig splitsingspunt als bij Pannerden vermoedelijk niet of veel moeilijker te handhaven geweest.

De *derde* belangrijke verlegging vond plaats in de benedenstroomse delta. De teloorgang van de Grote Waard bij Dordrecht – nu grotendeels Biesbosch – was het gevolg van twee dijkdoorbraken bij hoogwaters in de rivier en twee dijkdoorbraken bij stormvloed in het Haringvliet. Toen de dijken eenmaal doorgebroken waren was het verhang groter door de Grote Waard dan door de Beneden Merwede. Het is wel de vraag of zich van nature een definitieve loop zou hebben ontwikkeld door wat nu de Nieuwe Merwede is. Want nadat de Merwede de Grote Waard in was gebroken, werd vrijwel al het aangevoerde zand afgezet in de vorm van een binnendelta. Tegelijkertijd liep de oorspronkelijke hoofdloop, de Beneden Merwede, in enkele decennia nagenoeg geheel dicht met zand. De doorstroming werd door de ondiepe rivierbeddingen en toegenomen plantengroei ernstig belemmerd, wat opstuwung van water veroorzaakte en de kans op ijssdammen vergrootte. Daarom heeft men uiteindelijk de Nieuwe Merwede door de nieuwe ‘Biesboschdelta’ gegraven van de Merwede naar de grootste kil vanuit het Hollands Diep. Bij het graven van de Nieuwe Merwede stuitte men op harde klei- en veenlagen in de ondergrond, die slechts met moeite weggebaggerd konden worden. Een natuurlijke rivier had dit graafwerk zelf niet voor elkaar gekregen.

Het huidige netwerk van rivieren is dus het resultaat van zowel natuurlijke processen als menselijk ingrijpen daarop. Rivierverlegging werd steeds meer tegengegaan door het aanleggen van dijken. Sommige riviertakken zijn geheel afgekoppeld van het netwerk, zoals de Kromme Rijn. Andere zijn in een fase van groei gefixeerd, zoals de Lek. Het gevolg is dat het zich van nature ontwikkelende netwerk nu geheel vastligt.

Toch is het nog denkbaar dat zich situaties kunnen voordoen waarin een nieuwe rivierloop ontstaat. Als gevolg van bodemdaling liggen de ingedijkte poldergebieden laag. Bij een dijkdoorbraak is het verhang de polder in groot, wat in een natuurlijke situatie een grote kans op avulsie zou betekenen. In het verleden zijn veelvuldig dijkdoorbraken voorgekomen die in sommige gevallen bijna tot rivierverlegging hebben geleid. De doorbraken van de Waaldijk bij Herwen (nabij Lobith) vonden plaats in de buitenbocht van de zich snel uitbouwende Bijlandmeanderbocht. Deze kon zich mede zo snel uitbreiden omdat de achter de dijk liggende Driedorpenpolder zo diep lag. Deze meander bereikte bijna de loop van de oude Rijnstrangen, die door het Pannerdens kanaal van het netwerk afgesneden waren; dat had er toe kunnen leiden dat de rivier alsnog voorkeur zou hebben gekregen voor de route naar Nederrijn en het IJsseldal in. Dit heeft de mens nipt voorkomen door afsnijding van de meanderbocht met het Bijlandsch Kanaal, en flinke oeververdediging.

Het huidige netwerk lijkt dus nu geheel vastgelegd en stabiel. Maar van nature zouden de Rijntakken hun loop misschien wel weer eens een keer willen verleggen, nu de uiterwaarden zo hoog zijn opgeslibd en de binnendijkse waarden juist zijn gedaald. Dit roept – in relatie tot in het Deltaprogramma te maken keuzen en te nemen beslissingen – de volgende drie vragen op:

1. Zijn onze riviersplitsingen stabiel?
2. Wil de rivier niet liever een andere koers naar zee?
3. Kunnen we de afvoerverdeling bij riviersplitsingen straffeloos veranderen?

3.2 Zijn riviersplitsingen stabiel?

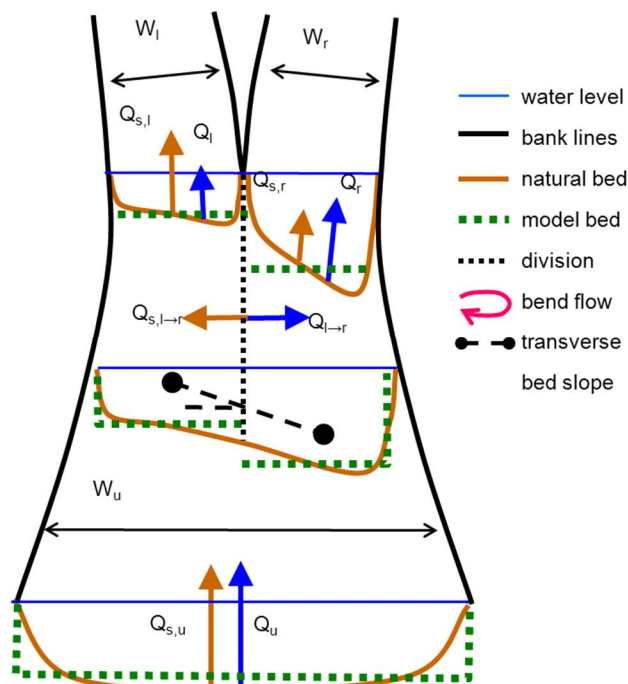
De ontwikkeling van de Rijndelta en van andere delta's leert ons dat natuurlijke riviersplitsingen uiteindelijk nooit stabiel zijn. In sommige gevallen zijn riviersplitsingen zeer instabiel, en raakt een van de takken binnen tientallen jaren afgesloten. Maar de splitsing tussen Nederrijn en Waal heeft twee millennia bestaan, alvorens de eerste tak uiteindelijk toch afgesloten dreigde te raken. Betekent dit dat die oude splitsing bij Lobith lange tijd stabiel was? En zijn de huidige splitsingen bij Pannerdense Kop, IJsselkop en Merwedekop wel stabiel?

De stabiliteit van een riviersplitsing hangt af van de verdeling van water en die van beddingsediment. Een riviergeul zandt aan of schuurt juist uit als de toegevoerde hoeveelheid sediment groter respectievelijk kleiner is dan wat de stroming mee kan slepen. Bij een splitsing werkt dat net zo, maar daar wordt de sedimenttoevoer bepaald door de processen en omstandigheden net bovenstrooms. De verdeling van water, en daarmee de capaciteit van de stroming om sediment door te voeren, wordt juist benedenstrooms van de splitsing bepaald, door verhangverschillen tussen de takken.



Figuur 3.2 Vier riviersplitsingen: de verlande bovenmond van de Nederrijn bij Lobith (linksboven, bron Universiteit Utrecht), Pannerdense Kop (rechtsboven, Kleinhans et al., 2010), Merwedekop (links onder, bron Kleinhans et al. 2010) en IJsselkop (rechts onder, Rijkswaterstaat).

Uitgaande van een beginsituatie waarbij de toegevoerde sedimenthoeveelheid gelijk is aan de hoeveelheid sedimenttransport in de twee benedenstroomse riviertakken samen, bepalen de verdeling van water en van sediment hoe beide benedenstroomse takken zich gaan ontwikkelen. Een gelijke waterafvoer maar een beetje meer sediment in één van beide takken betekent aanzanding in die rivierloop. De verondieping veroorzaakt stromingsweerstand, zodat er iets minder water zal gaan stromen en juist meer door de andere benedenstroomse loop. Sedimenttransport neemt veel meer dan evenredig toe met de stroomsnelheid van het water; omgekeerd resulteert een geringere stroming in een forse afname van sedimenttransport. Het gevolg is dat de rivierloop met aanzanding nog minder zand en grind kan transporteren. Dit geeft een positieve terugkoppeling: bij gelijkblijvende toevoer van sediment van bovenstrooms betekent dat nog sneller aanzanden. De andere benedenstroomse rivierloop zal juist versneld uitschuren omdat de afvoer daar toeneemt. Dit heeft als consequentie dat een symmetrische riviersplitsing niet stabiel *kan* zijn. Tegen de tijd dat één van de benedenstroomse lopen bijna is afgesloten, zoals in de Nederrijn bij Lobith het geval was (Fig. 3.2), moet het sediment tegen een steile helling op de verzande loop ingevoerd worden, wat de toevoer van sediment afremt. Door deze negatieve terugkoppeling wordt een splitsing uiteindelijk wel stabiel, maar is de verzande loop dan al zover afgesloten, dat de rivier zich in feite heeft verlegd. In de verlegde tak zal zich op banken vegetatie vestigen die slib invangt, waardoor de afvoercapaciteit nog verder afneemt en de verlegde bedding uiteindelijk dichtslibt en verlandt.



Figuur 3.3 Schematische weergave van de factoren die de verdeling van water en sediment bij een splitsingspunt beïnvloeden. Bron: Kleinhans et al. (2012).

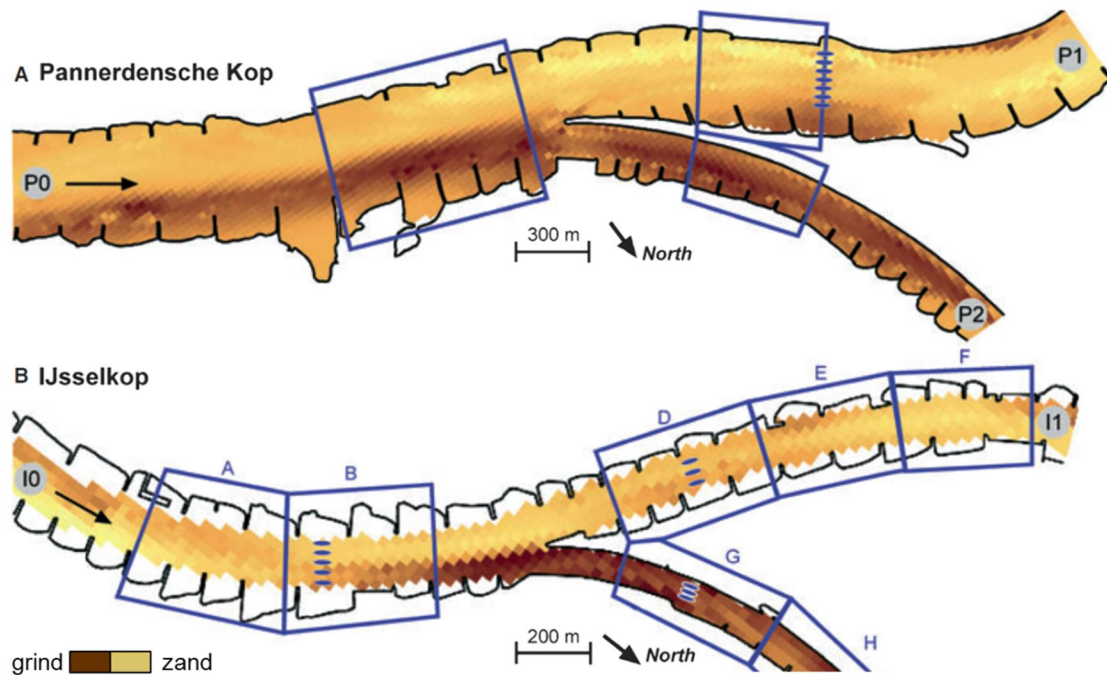
Over het algemeen groeit bij een splitsingspunt de tak met het grootste verhang, of de kortste afstand naar zee, ten koste van de andere tak. De precieze vorm van de splitsing is echter ook van belang (Fig. 3.3). Een bocht bovenstrooms van een splitsing verandert de verhoudingen van de hoeveelheid sediment die beide lopen ingestuurd worden. De

hoeveelheid sediment die de loop in de binnenbocht in wordt gestuurd kan groter zijn dan de hoeveelheid sediment die kan worden getransporteerd door de stroming in die benedenstroomse loop. Op de rivierbodem wordt bovendien sediment naar de binnenbocht gestuurd door de spiraalstroming, waardoor de rivierloop benedenstrooms van de binnenbocht relatief meer sediment ontvangt. Dit bochteffect kan net zo sterk zijn als typische verhangvoordelen. Een bocht bovenstrooms van een splitsing kan daardoor een verhangvoordeel versterken, waardoor een verlegging snel plaatsvindt, of juist nagenoeg opheffen, waardoor twee takken heel lang kunnen voortbestaan in een schijnbaar evenwicht. Daarbij komen nog effecten van sortering van beddingsediment, omdat vergroving van de bedding door erosie of bocht-sortering verdere erosie remt. In de 18^e eeuw, in de situatie met erodeerbare oevers en aftakkingen onder grote hoeken, had de lay-out van het splitsingspunt ook directe invloed op de afvoerverdeling. In de huidige situatie is de verdeling van water vooral door de takken benedenstrooms bepaald en beïnvloedt de lay-out van het splitsingspunt alléén de sedimentverdeling.

Een 'stabiele' riviersplitsing is dus theoretisch vrijwel onmogelijk en praktisch altijd een dubbeltje op zijn kant. Wegens de grote maatschappelijke belangen is de afvoerverdeling bij de splitsingen al ten tijde van de aanleg van het Pannerdens Kanaal bij afspraak vastgelegd. Desondanks verandert de jaargemiddelde afvoerverdeling (bij laagwater) langzaam door erosie en sedimentatie in de rivierlopen. Metingen laten zien dat deze processen plaatsvinden op de splitsingen Pannerdense Kop, IJsselkop en Merwedekop, en dat ze alle drie *uit evenwicht zijn*. De Waal, die water en sediment uit de binnenbocht aangevoerd krijgt, heeft de grootste sedimentlast; het Pannerdens Kanaal veel minder. De Nederrijn zandt aan, maar dat wordt grotendeels veroorzaakt door de stuwen; De IJssel schuurt uit. De Beneden Merwede kent zelfs zulke sterke sedimentatie dat daar jaarlijks ongeveer net zoveel moet worden weggebaggerd als er bij Lobith het land instroomt. Zonder doorlopend baggeren zou deze riviertak al lang verzand zijn geweest.

Deze ontwikkelingen beïnvloeden ook de afvoerverdeling bij hoogwater en vooral de sterkte van de stroming op de bodem. Het is allerm minst duidelijk hoe de splitsingen zullen reageren op een verandering van de afvoerverdeling door het zomerbed. Het risico bestaat dat ze instabiel worden als het grind in de bedding van de riviertak met groeipotentieel (het Pannerdens Kanaal, respectievelijk de IJssel – Fig. 3.4) erodeert, en dat kan niet makkelijk worden gestopt of teruggedraaid. Over de processen op de splitsingspunten is in ieder geval onvoldoende bekend om risico op doorslaan uit te kunnen uitsluiten.

Samengevat: riviersplitsingen zijn niet stabiel, maar de veranderingen bij de Pannerdense Kop en IJsselkop gaan wel langzaam, door grove lagen op de bodem van de rivier en doordat de oevers verdedigd zijn. Er is een onbekende onzekerheid of deze grove lagen kunnen doorbreken omdat de processen nog niet goed worden begrepen en omdat de ondergrond niet in voldoende detail is gekarteerd. Uit voorzorg zou er daarom voor gezorgd moeten worden dat de stroming door het zomerbed van Pannerdens Kanaal en IJssel niet groter, sneller en eroderender wordt. Dat maakt het een terechte vraag of de afvoerverdeling bij de riviersplitsingen wel straffeloos gewijzigd kan worden, en is in ieder geval aanleiding voor een oproep tot uiterste voorzichtigheid.



Figuur 3.4 Sorteringspatroon van sediment in de rivierbedding bij de Pannerdensch Kop en de IJsselkop. Donkere kleuren geven grover grind aan. Bron: TNO Geologische Dienst Nederland, in Frings en Kleinhans (2008).

3.3 Wil de rivier een andere koers naar zee?

De Rijn komt nu op drie plaatsen in 'zee' uit: via de IJssel in het IJsselmeer, via de Nederrijn-Lek en Waal- Merwedede in de Nieuwe Waterweg, en via de Nieuwe Merwede in het Hollands Diep en Haringvliet. De oude Rijnmond bij Leiden en die bij Muiden in de voormalige Zuiderzee zijn verlaten en voeren alleen nog grondwater en polderwater af. Het ontstaan van een nieuwe monding in de gesloten Hollandse kust is voornamelijk onwaarschijnlijk, zodat elke nieuwe koers naar zee toch weer door de drie nu bestaande mondingen zou gaan.

Of een rivier zich verlegt of vertakt hangt af van bovenstroomse en/of benedenstroomse omstandigheden. *Van boven* komen water en sediment die zich stroomafwaarts verplaatsen. Hierbij wordt zand en grind vooral in de beddingen getransporteerd, terwijl slib zich zwevend in het water bevindt. Het zand en grind kunnen leiden tot het verzanden van een rivierloop. Slib verhoogt de uiterwaarden, wat de doorstroom bij hoogwater bemoeilijkt, en vult uiteindelijk ook restgeulen op. In een netwerk met vastgelegde takken zal de toevoer van sediment ertoe leiden dat de geul hoger in het landschap komt te liggen wat de kans op avulsie vergroot. In de Rijn is de toevoer van sediment tegenwoordig echter zeer sterk gereduceerd door de aanleg van dammen in de Rijn in Duitsland en de Maas is vrijwel helemaal gekanaliseerd. Rivierverlegging als gevolg van 'verstikking' door sediment is daarom onwaarschijnlijk.

Van beneden ontstaat opstuwning van water. Deze wordt over een lengte van tientallen kilometers veroorzaakt door getij, door vernauwingen in het winterbed zoals bij Nijmegen, Zutphen, Deventer of Kampen, door vegetatie in de uiterwaarden die een hoge weerstand

biedt aan de stroming, en door een stijgende zeespiegel. Waar het water wordt verdeeld over twee takken in plaats van één, leidt dat tot opstuwning. In een netwerk met meerdere splitsingen zoekt het water in principe de weg van de minste weerstand - en dat is waar de opstuwning het minst sterk is. Rivieren verlegden zich van nature vaak door het opnieuw activeren van een oude loop. Dat was kansrijker naarmate zo'n oude loop minder verzand of dichtgegroeid was. Laaggelegen, onbedijkte komgebieden zouden ook routes voor succesvolle rivierverleggingen kunnen bieden als er geen opstuwning in plaatsvindt. Het water moet immers wel weg kunnen en daarbij niet worden belemmerd. Een diepe, maar aan de benedenstroomse zijde door een dijk ondergelopen polder zal daarom niet zomaar vanzelf een nieuwe rivierloop worden.

Een oude bedding of een langgerekte kom met een lage rand of zwakke dijk aan de benedenstroomse rand geven juist wel goede condities voor rivierverlegging of het realiseren van een bypass in de vorm van een groene (of blauwe) rivier. In dat laatste geval wordt er bij de inrichting van het dijkstelsel voor gekozen dat een geschiktere afvoerroute bij grote afvoer wel kan meestromen, maar dat geen rivierverlegging kan optreden. Bij het ontwerp voor de bypass van de IJssel om Kampen is er daarom voor gezorgd dat deze bij hoogwater niet spontaan de rol als hoofdgeul van de IJssel zou kunnen overnemen. Dat zou kunnen gebeuren als het verhang via de bypass groter is dan door de IJssel zelf, het water in de bypass minder weerstand ondervindt, en het water snel een diepe geul zou kunnen insnijden. Een goed ontwerp van de inlaat, en een relatief erosiebestendige bedding van de bypass kunnen dit voorkomen. Ook verlegging door oude rivierlopen is niet meer mogelijk: de mens sloot oude rivierlopen waar nog maar weinig water doorheen ging op zeker moment definitief af (§ 2.2.2), waardoor daar ook geen sediment meer kwam.

3.4 Kunnen we de afvoerverdeling bij riviersplitsingen wijzigen?

Gegeven de verandering van het klimaat en verwacht doorzetten daarvan, wordt in het rivierbeheer van de 21^{ste} eeuw geanticipeerd op hogere rivierafvoeren. Dit maakt dat rivierverruiming of dijkverhoging langs de Maas en langs een, twee of drie Rijntakken nodig is. Het is ook aanleiding te verkennen of de afvoerverdeling over de Rijntakken tijdens hoogwaters niet anders kan of moet. Er zijn al regelmechanismen aangelegd bij de IJsselkop en Pannerdense Kop waarmee de hoogwater afvoerverdeling enigszins kan worden beïnvloed, maar er wordt aan ingrijpendere wijzigingen gedacht. Maar kunnen we de afvoerverdeling wel ongestraft veranderen, of levert dat het gevaar op dat de splitsingen instabiel worden?

Tijdens hoogwater gaat een aanzienlijk deel van de afvoer niet alleen door het zomerbed maar door het winterbed (zomerbed + uiterwaarden). De splitsingen van de bovenrivieren kunnen wellicht stabiel blijven als de kracht van de stroming op het sediment niet te groot wordt op de plaatsen waar zich grindlagen in de rivierbedding bevinden. Dat kan door extra water door bredere uiterwaarden of een groene rivier te leiden. Ook zou tijdens extreem hoogwater juist wat meer water door de andere benedenstroomse rivierlopen gestuurd kunnen worden, waardoor de grindlagen in de rivierbeddingen (Fig. 3.4) bij de splitsingen worden ontzien.

De grindlagen in de bedding zijn niet helemaal statisch, want bij hoogwater ontstaan er duinen in. Bovendien daalt de bodem van het Pannerdens Kanaal en van de IJssel nog steeds – zij het langzaam – door erosie. Dat heeft nu al gevolgen voor de verdeling van afvoer bij laagwater en daarmee voor de scheepvaart. De vraag is of, en hoe de erosie kan worden tegengegaan. De stroming in het zomerbed van het Pannerdens Kanaal mag niet

toenemen. Aanpassing van de afvoerverdeling door de splitsing van vorm te veranderen kan tot grote instabiliteit leiden, zoals in het verleden is gebleken. Verandering van de afvoerverdeling door verkorting of verlaging van kribben in het Pannerdens Kanaal is nauwelijks mogelijk omdat de kribben heel kort zijn en versmalling van de Waal door kribverlenging juist meer erosie in het zomerbed zou veroorzaken.

Alleen een andere verdeling van sediment bij de splitsingen zou erosie kunnen tegenhouden. Dat kan op twee manieren, (i) door gericht baggeren en storten, en (ii) door het veranderen van de vorm van de splitsing om de bochtstroming te beïnvloeden. Dat eerste vergt doorlopend onderhoud, maar geeft ook de kans om wat grover sediment toe te voeren om de erosie af te remmen. Verandering van de vorm van de splitsing heeft een blijvend effect maar de precieze dimensionering is lastig van te voren vast te stellen. Voor beide geldt dat de onderliggende processen nog onvoldoende worden begrepen. De langzame uitschuring van de beddingen van het Pannerdens Kanaal en de IJssel vindt plaats door uitspoeling van fijner sediment uit de troggen van de duinen, en uitsortering van zand en grind in de bedding veroorzaakt door bodemdynamiek op grotere schaal tijdens hoogwaters. Deze processen worden nog niet voldoende begrepen en kunnen dan ook niet worden gemodelleerd. Ook is de ondergrond niet in voldoende detail tot voldoende diepte gekarteerd. Daardoor is het nu nog onbekend hoe groot precies de kans is dat de grove grindlagen (Fig. 3.4) bij een hoogwater doorbreken. Als de beschermende maar mobiele grindlagen meer in beweging zouden komen, kunnen de splitsingen instabiel worden. Dat zou tot gevolg hebben dat de Waal onbevaarbaar wordt en dat er om dat tegen te gaan doorlopend gebaggerd zou moeten worden, zoals dat nu al gebeurt in de Beneden Merwede. Bovendien zou om te voorkomen dat heel veel meer water naar de IJssel gaat, daar voortdurend grof materiaal moeten worden bijgestort in het Pannerdens Kanaal en de IJssel om insnijden tegen te gaan. Eenmalig beide takken over grote lengte afstorten met erosiebestendig materiaal kan ook; een alternatief waarbij de rivier zelfs aan de *onderzijde* zou worden vastgelegd.

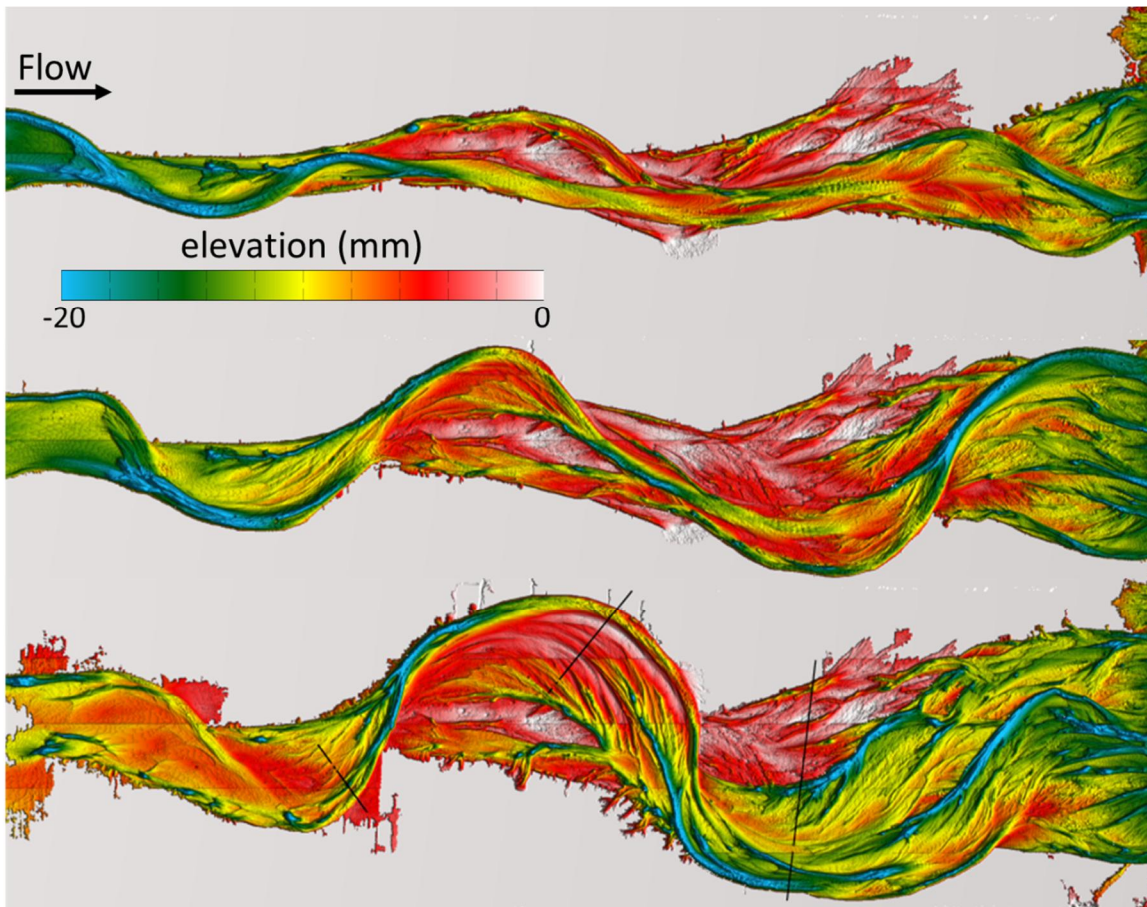
4 Geulen en uiterwaarden

4.1 Natuurlijke verjonging van rivierbochten en overstromingsvlakte

In natuurlijke rivieren is de ontwikkeling van de geulen gekoppeld aan de ontwikkeling van de overstromingsvlakte. In de geulen worden vooral zand en grind getransporteerd en dat wordt op banken en oevers afgezet. Op die banken en oevers ontwikkelt zich vegetatie. De rivierbedding kan zich geleidelijk verplaatsen, en daarbij toch een min of meer constante breedte houden. In buitenbochten van meanders kalven de oevers af, terwijl in de binnenbochten nieuwe zandbanken ontstaan ('*scroll bars*') die langzaam hoger worden en deel uit gaan maken van de riviervlakte. Er ontstaat zo een kronkelwaard, die langzaam aangroeit (Fig. 4.1). Typische voorbeelden hiervan vinden we nog langs de IJssel bij Doesburg en Brummen, waar in de binnenbochten van de ruime IJsselmeanders grote kronkelwaarden liggen met typische kromme geulen en ruggen die in de Middeleeuwen zijn ontstaan. Er is een balans tussen het verdwijnen van overstromingsvlakte en het opbouwen daarvan. De overstromingsvlakte kan wel net zo breed worden als het gehele dal, en de waterstanden werden dan ook niet veel hoger dan de oevers. De mate en wijze van verplaatsing van de bedding bepaalt dus het karakter van de riviervlakte.

In de Duitse Niederrhein net ten oosten van de grens ontwikkelde de Rijn de afgelopen 8000 jaar een lange trein van meanders. Hun stroomafwaartse migratie en incidentele afsnijding beïnvloedde ook de riviersplittingsen van de delta-apex in Nederland ('Lobith', 'Pannerdense Kop', en voorlopers daarvan iets verder stroomafwaarts). Verder stroomafwaarts ontstonden grote meanders vooral daar waar veel zand voorkomt in de ondiepe ondergrond, zoals bij Wijk bij Duurstede en Utrecht in de nabijheid van de Utrechtse Heuvelrug ('Kromme Rijn') en in het IJsseldal bij doorkruising van de voormalige waterscheiding (Doesburg-Zutphen-Deventer; zie § 2.1.2).

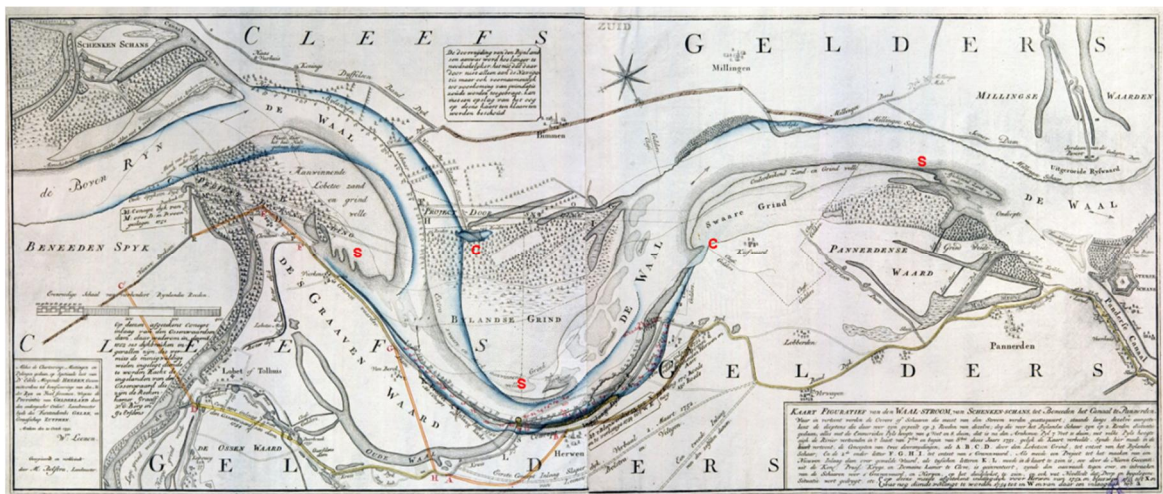
De Duitse Niederrhein en de Nederlandse Bovenrijn bouwden ook kronkelwaarden (Fig. 4.2), maar deze wijken op twee manieren af van het klassieke beeld. Ten eerste stroomden de brede kronkelwaarden bij hoogwater vaak geheel onder en werden zo snel bedekt met zand dat het in andere meanderbochten zo typische concentrische reliëf van ruggen en laagtes er nauwelijks wordt teruggevonden. Ten tweede werden bochten niet afgesneden doordat een bovenstroomse bocht de benedenstroomse bocht inhaalde, maar doordat tijdens hoogwater een bochtafsnijding ('*chute*') ontstond over de volle lengte van de kronkelwaard. Een deel van de afsnijdende nieuwe geul werd weer afgesloten doordat sediment werd afgezet in een bank bovenop de kronkelwaard. Als de ontwikkeling van de bochtafsnijding wel doorzette, werd de oude meanderbocht verlaten. Het proces van meanderen begon dan opnieuw, waarbij vanuit de nagenoeg rechte afsnijdingsgeul weer opnieuw een meander groeide. Uitbouw van nieuwe meanderbochten in dit riviertype wordt vooral geïnitieerd door de schuine aanstroming vanuit bovenstroomse bochten. Deze wijze van bochtafsnijding over de kronkelwaard hoort bij meanderende rivieren met relatief veel energie. In bochten van zulke rivieren bestaan dus geregeld tijdelijk meerdere natuurlijke en actieve nevengeulen, die in korte tijd ontstaan en ook weer kunnen worden afgesloten. De vorming en afsluiting van nevengeulen hoort dus bij energiek meanderen.



Figuur 4.1 Ontwikkeling van meanderbochten in een stroomgootexperiment. De kleuren geven hoogte aan. De lengte van deze experimentele rivier is 10 m. Bij aanvang van het experiment zijn 'uiterwaarden' en ondergrond geheel uniform van samenstelling en hoogte. In de binnenbocht en op de uiterwaarden is slib afgezet tijdens hoogwaters. Bron: Van Dijk et al. (2012).

Langs de Waal zien we nauwelijks klassieke kronkelwaardvorming maar wel veel geul- en bankvorming: door de bedijking kon de riviergeul geen ruime meanderbochten meer vormen, maar schoven flauwe bochten stroomafwaarts. Langs de flauwe binnenbocht ontstonden aanwassen, waarbij steeds een geul achter een nieuwe zandbank overbleef. De mens versterkte dit proces van aanwas nog door de aanleg van kribben. Dit resulteerde in een patroon van min of meer parallelle strangen die aan de benedenstroomse zijde nog aangetakt zijn.

De neiging tot meanderen verdwijnt meer benedenstrooms, waar de rivieren rechter worden en de beddingordels (zandbanen; Fig. 2.2) bijna net zo smal als de actief watervoerende rivierbeddingen, en ook de zone met oeverwallen zeer smal wordt. Dat komt doordat de rivieren in toenemende mate ingekapseld liggen in veen en klei, wat sterkere oevers oplevert. Ook wordt dicht bij zee het verhang geringer en door de vele vertakkingen de afvoer per rivier kleiner, waardoor de stroming minder sterk is. Dicht bij zee neemt de laterale mobiliteit van rivieren sterk af en wordt het water afgevoerd door meerdere parallelle riviertakken, die langere tijd tegelijkertijd actief kunnen blijven.



Figuur 4.2 Historische kaart (1750) van Schenken Schans (links) tot Sterreschans (rechts). Het zuiden is boven op deze kaart. Kleuren geven de verleggingen aan van de dijken die men heeft aangelegd in een poging om het dorp Herwen te beschermen tegen de afslag van de oever. 'S' geeft aan waar scroll bars de binnenbocht uitbouwen; 'C' geeft de aanzet aan van een chute of bochtafsnijding: natuurlijke vorming van nevengeulen. Bron: Kleinhans en Van den Berg (2011).

De dynamiek van beddingverplaatsing is de motor achter het proces van cyclische verjonging van uiterwaarden. Dat proces betreft niet alleen de geomorfologie, maar ook de vegetatie. Door het afkalven van oevers in buitenbochten worden bomen ontworteld en weggespoeld, terwijl op de nieuwe banken en oevers pionervegetatie zich opnieuw kan vestigen en ontwikkelen. Daardoor wordt vegetatie in natuurlijke rivieren net zo snel vervangen als dat de meanders zich verplaatsen, en daardoor worden steeds vele successiestadia vlak bij elkaar aangetroffen. Hierbij is de balans tussen de kracht van de rivierstroming en de weerstand die vegetatie biedt tegen erosie belangrijk.

Bij een hoge uitbouwsnelheid van meanderbochten kan de vegetatie zich niet volledig ontwikkelen en kan de rivier zich snel blijven verplaatsen. In (nagenoeg) onbegroeide rivieren, zoals delen van de Tagliamento (Italië), is de morfodynamiek dominant en belemmert zij de vestiging van vegetatie. Maar in extreem dicht begroeide rivieren met weinig kracht, zoals sommige kleine rivieren in het Amazonegebied, beperkt de vegetatie juist iedere morfologische ontwikkeling. In de Nederlandse bovenrivieren was waarschijnlijk sprake van een dynamische interactie tussen morfologie en vegetatie, waarbij beide elkaar beïnvloedden. Vegetatie vestigde zich in de stroomluwte van natuurlijk reliëf en oudere vegetatie. Zo ontstonden bijvoorbeeld vegetatiepatronen waarbij rivierbos de banen van het kronkelwaardreliëf volgen. Wellicht dat vegetatie op de bovenstroomse kant van de kronkelwaard al te frequente bochtafsnijding kon voorkómen en de dynamiek van de rivier op natuurlijke wijze temperde.

Samengevat ontwikkelde de meanderende bovenrivier zich doorlopend in een dynamische balans van afbraak van begroeide uiterwaarden in de buitenbochten en aangroei van uiterwaarden en vestiging van nieuwe vegetatie in de binnenbochten. Daarbij werden in sommige trajecten bochten vaak kortgesloten waarbij tijdelijke nevengeulen ontstonden die hetzij snel weer verstopt raakten hetzij zich ontwikkelden tot de hoofdloop. De rechte zich vertakkende benedenrivieren waren veel minder dynamisch in de zin dat de brede overstromingsvlakte doorlopend werd opgebouwd door afzetting van erosiebestendige klei en

de groei van veen, waarbij de parallelle geulen lange tijd tegelijk actief bleven en verlegging nagenoeg uitsluitend door avulsie plaatsvond en de parallelle geulen langere tijd tegelijk actief bleven tot ze door afsluiting bij de splitsingen worden verlaten.

4.2 Rivieren en overstromingsvlakten in een bedijkte, 'genormaliseerde' rivier

In de bedijkte situatie is de actieve overstromingsvlakte beperkt tot de uiterwaarden (zie ook § 2.2). Niet alleen is de ruimte voor overstroming en opslibbing beperkt: in de 19^e eeuw zijn de rivieren ook nog eens genormaliseerd en deels gekanaliseerd. 'Genormaliseerde' rivieren zijn nog abnormaler dan bedijkte rivieren in de zin dat de oevers geheel zijn vastgelegd met kribben. Daardoor is de balans tussen afbraak en nieuwworming van de overstromingsvlakte verstoord: er vindt nog wel opslibbing plaats maar geen afkalving van oevers meer. Daarmee is het dynamisch meanderen met de bijbehorende dynamiek van vorming en vernietiging van nevengeulen en vegetatie geheel verdwenen. Ook is de wederzijdse doorwerking van processen in de rivierbedding en de uiterwaarden verdwenen. Het systeem is daarmee *morfologisch* veel minder dynamisch geworden dan een natuurlijk systeem (het is verstard), terwijl de *hydrodynamiek* van lage en hoge waterstanden juist is toegenomen.

Met de normalisatie nam de opslibbing in de uiterwaarden sterk toe. Met het uitschakelen van laterale erosie was afbraak van oeverophogingen niet meer mogelijk. Sinds het midden van de negentiende eeuw zijn de meeste uiterwaarden dan ook ruim een meter hoger geworden. Het genormaliseerde versmalde en verdiepte zomerbed werd hierdoor nog eens extra diep. Waar er daarvoor nog geleidelijke overgangen bestonden van riviergeul naar uiterwaard, werd het landschap steeds meer binair met slechts twee verschillende milieus, zonder gradiënten op de overgang. De kribben zijn nu hard nodig om de vaargeul op de afgesproken vaardiepte te houden. Dit binaire landschap is dan ook vooral het resultaat van de maatregelen voor de hoogwaterafvoer en de keuze om de rivier als scheepvaartweg te gebruiken. Onbedoeld leidde de normalisatie een eeuw later uiteindelijk tot een situatie met hoog opgeslibde uiterwaarden die de hoogwaterstanden verhogen – en dus tot *onveiligere* rivieren. De eisen van de scheepvaart staan op gespannen voet met het nemen van maatregelen in de combinatie van hoogwaterafvoer en natuurontwikkeling: als de diepe vaargeul niet nodig was konden er lage dynamische uiterwaarden zijn die én grotere afvoercapaciteit én mooie natuur opleveren. Hier is sprake van een uitgestelde en verborgen rekening van de bedijking en riviernormalisaties.

Met het kunstmatig verjongen van de uiterwaarden kunnen we de natuurlijke dynamiek wellicht tijdelijk en deels weer herstellen. Dat wordt wel aangeduid met de term cyclische verjonging, de antropogene variant van de natuurlijke ontwikkeling. Uiterwaardverlaging en het uitgraven van nevengeulen levert in de eerste plaats lagere waterstanden op, maar moet bij voorkeur ook meerwaarde voor de natuur leveren. Het is de vraag of het mogelijk is om deze vorm van ingrijpen zo in te richten dat deze niet onmiddellijk door de natuurlijke processen teniet wordt gedaan.

Dit leidt tot de volgende vragen:

1. Moeten we voor een stabiele rivier uiterwaarden verlagen, of juist de dijken verder van de rivier vandaan leggen?
2. Kan de rivier stabiele nevengeulen in stand houden?
3. Past cyclische verjonging van natuur wel bij de genormaliseerde rivier?

4.3 Uiterwaarden verlagen of dijken verleggen?

Voor het verwerken van hogere rivierafvoeren wordt tegenwoordig rivierverruiming toegepast. Daar zijn verschillende maatregelen voor mogelijk, zoals het verleggen van de winterdijken of het maken van groene rivieren (bypasses) – waardoor het winterbed breder wordt –, het afgraven van de uiterwaarden – waardoor het winterbed dieper wordt –, of het verwijderen van obstakels zoals veerstoepen en bruggenhoofden, en van vegetatie – waardoor de opstuwung minder wordt. Natuurlijke rivieren hadden een zeer brede overstromingsvlakte waarin de waterstanden over het algemeen niet heel hoog werden, en het slib werd uitgespreid over een groot oppervlak. Op de hoge oeverwallen langs de rivier stond van nature dichte vegetatie, maar doordat de waterstanden niet hoog werden en het water vrijelijk de komgebieden in kon lopen had deze begroeiing weinig effect op de waterstanden.

Het verleggen van dijken leidt tot een bredere riviervlakte en lagere hoogwaterstanden: een natuurlijker situatie. Maar op veel plaatsen kunnen of willen we de binnendijkse ruimte niet meer prijsgeven. Een alternatief voor dijkverlegging is uiterwaardverlaging: als we het winterbed niet breder willen maken, dan leggen we de bodem dieper. Daarmee ontstaat echter niet direct een natuurlijker situatie: de beoogde waterstandsverlaging wordt verkregen door meer water door de uiterwaard te laten stromen. Bij hoogwater nemen de stroomsnelheden daar dan ook flink toe, maar ze nemen af in het zomerbed met aanzanding als gevolg. Dit is gunstig voor de uitwisseling van water en sediment tussen rivierbed en uiterwaarden, maar anderzijds is een 'riviervlakte' waar bij hoogwater een laag van enkele meters water snel overheen stroomt niet te vergelijken met de situatie zonder bedijking. Het is vooral een terugkeer naar de toestand van net na de bedijking, voordat de uiterwaarden hoog opgeslibd waren. De uiterwaarden lijken niet op natuurlijke oever- of komgebieden, maar krijgen bij verregaande uiterwaardverlaging meer het karakter van een bedding die het grootste deel van het jaar droog staat. De kunst wordt dan om een (voor de scheepvaart) stabiele, genormaliseerde hoofdgeul te handhaven naast een uiterwaard die zeer dynamisch wordt en bij hoogwater als zandvang gaat fungeren.

Samengevat kunnen we stellen dat het verder van de rivier af leggen van de dijken een natuurlijker en minder onderhoudsgevoelig systeem oplevert dan vergaande uiterwaardverlaging. Sediment wordt over een groter oppervlak verspreid waardoor de uiterwaarden minder snel hoger worden; ook wordt de hydrodynamiek enigszins gedempt. Dat komt doordat iets van de riviervlakte aan de rivier wordt teruggegeven. Bij uiterwaardverlaging daarentegen zal enerzijds meer sedimentatie in het zomerbed optreden maar zullen anderzijds de uiterwaarden als zandvang gaan werken, zodat de rivierbedding zich sneller zal gaan insnijden dan deze nu al doet. Uiterwaardverlaging zal dus veelvuldig opnieuw ingrijpen nodig maken.

4.4 Duurzame nevengeulen?

In het bovenrivierengebied kwamen in de natuurlijke situatie grote nevengeulen voor, vooral waar de rivier meanderde. Bij de benedenrivieren kwamen nevengeulen van nature nauwelijks voor, omdat de rivier daar niet meanderde. Grote oude meanderbochten werden door bochtafsnijding getransformeerd tot een tijdelijke nevengeul, die meestal na enkele hoogwaters verzandde en in een jaar of tien of sneller dichtslibde of dichtgroeide. Het is ook niet te verwachten dat er stabiele nevengeulen kunnen bestaan, want bochtafsnijding is per definitie een proces van verandering van de loop van de rivier, en de splitsing van de oude en de nieuwe geul is instabiel en dus tijdelijk. Zelfs een nevengeul ter grootte van de hoofdgeul

is daarom maar zelden een lang bestaan beschoren. Daar komt bij dat de natuurlijke vorming van nieuwe nevengeulen niet wordt toegestaan omdat het zomerbed is vastgelegd en ontkoppeld van het winterbed.

In een landschap met kronkelwaarden komen tussen de ruggen en de begroeiing langgerekte depressies voor (Fig. 4.1, 4.2 en 4.3), die mee stromen zodra de rivier buiten haar oevers treedt. Dit is ook een vorm van nevengeul. Ze komen per definitie voor in binnenbochten, waar aanzanding en opslibbing domineren. Ook deze nevengeulen blijven maar korte tijd actief. Ze verzanden binnen een paar hoogwaters tenzij bij de instroom een zandvang wordt aangebracht, die steeds moet worden 'geleegd'. Grotere nevengeulen worden als gevaarlijk beschouwd omdat de omleiding van afvoer aanzanding geeft in de vaargeul, en omdat ze zouden kunnen uitgroeien. Waar nu omwille van natuurontwikkeling nevengeulen worden aangelegd, wordt de afvoer door deze geulen beperkt tot maximaal enkele procenten van de rivierafvoer om aanzanding in de hoofdgeul te voorkomen. In theorie en in de praktijk is het onmogelijk om een nevengeul zo te ontwerpen dat de verdeling van water en sediment zo uitpakt dat de nevengeul noch aanzandt noch groeit. Een perfecte balans kan theoretisch wel worden ontworpen op basis van verhangverschil en met een vastgelegde opwaartse bodemhelling naar de nevengeul toe, en eventueel met een bocht in de aanstroming. Maar in de praktijk is een splitsing gevoelig voor al die variabelen en zeer geneigd om instabiel te worden, waardoor op den duur de geul toch zal verzanden of heel veel onderhoud vergt. Dit is wel wat de rivier 'wil', dus misschien moeten we maar accepteren dat nevengeulen niet duurzaam voortbestaan: we zullen elk decennium nieuwe moeten graven of de oude uitgraven.

4.5 Cyclisch verjongen, andere streefbeeldvorming of vegetatie in banen geleid?

Opkomende vegetatie heeft een opstuwend effect op het water, maar de mate waarin dit het geval is hangt sterk af van het vegetatiepatroon. De opstuwing ontstaat doordat bos of struweel de doorstroming deels blokkeert, en doordat de vegetatie veel turbulentie opwekt wat de stroming afremt. Het patroon waarin de verschillende vegetatietypen voorkomen is daarbij bepalend: een dicht stuk bos dwars op de stroming stuwt veel meer op dan wanneer er sprake is van een langgerekt en gestroomlijnd stuk bos evenwijdig aan de stroombanen. Bij vegetatiepatronen evenwijdig aan de stromingsrichting, zoals die zich van nature vormden op rivieroevers en in de kronkelwaarden, vertraagt de stroming door de vegetatie wel maar versnelt deze juist tussen de banen van vegetatie. Daarmee ontstaat effectief een patroon van hoogopgaande vegetatiebanen waarin het water haast stilstaat en banen met lage of ontbrekende vegetatie waarin het snel stroomt. Voorwaarde voor het ontstaan en voortbestaan van dergelijke banen is dat de bovenstroomse kant van de opgaande begroeiing sterk genoeg is om erosie te voorkomen. In de natuur is daar vaak veel dood hout te vinden dat is aangespoeld, waardoor een sterke barrière tegen afkalven wordt gevormd. Meestal versterkt een vegetatiepatroon zichzelf na initiële vorming, en legt daarmee het landschapspatroon voor lange tijd vast.

Bij herinrichting van uiterwaarden waarin nevengeulen worden gewenst zou daarom kunnen worden getracht te bevorderen dat zich dichte en opgaande vegetatie ontwikkelt in banen vlak langs de nevengeul, en in de stroomrichting. Daarmee zouden lokaal grote verschillen in stroomsnelheid ontstaan, en dit zou al te snel dichtslibben van de nevengeul kunnen tegengaan. Om het vegetatiepatroon te beïnvloeden is toegesneden beheer nodig. Daarom wordt onderzocht waar dichte pioniervegetatie zich vestigt, in welke mate dit patroon bepaald wordt door de morfologie, hoe en waar het zich uitbreidt, en wat het effect kan zijn van

begrazing. Beïnvloeding van het patroon van vegetatieontwikkeling door beheer kan een belangrijk middel kan zijn om opstuwing te beperken, het langer voortbestaan van nevengeulen te waarborgen en meerwaarde voor de natuur te bereiken.



Figuur 4.3 Vegetatie in banen op een natuurlijke zandbank in een stroomgootexperiment. De witte kleur is fijn sediment (steenmeel); de paarse kleur is drooggevallen beddingsediment (zand; tijdens het experiment is kleurstof aan het water toegevoegd); de vegetatie is alfalfa (ca. 2 cm hoog). Bron: van Dijk et al. (2013).

5 De rivierbedding

5.1 Natuurlijke rivierbeddingen

Een typische verhouding van diepte en breedte van een rivierbedding is één op vijftig. Hoe sterker de oevers zijn (door de aanwezigheid van dichte vegetatie, gerijpte klei en gecompacteerd veen), hoe smaller en dieper de geul ertussen blijft en wordt. Nederlandse rivieren, groot en klein, worden over het algemeen naar het westen toe smaller (Fig. 2.2; zie ook § 4.1). Pas in de estuaria wordt de bedding weer breder door de sterkere getijdewerking. Het patroon van zand- en grindbanken en van ondieptes in binnenbochten wordt vooral bepaald door de verhouding tussen breedte en diepte. Hoe breder en ondieper, hoe sterker de neiging tot het ontwikkelen van banken. Bij zeer smalle rivieren ontwikkelen banken zich nauwelijks en dan nog alleen in scherpe bochten. Bij zeer brede rivieren ontstaan meerdere banken over de breedte van de geul, en wordt gesproken van vlechtende rivieren. Bij rivieren met gematigde breedte kunnen relatief hoge binnenbochtbanken ontstaan. Dit is het geval in de Waal, vooral bovenstrooms van Nijmegen. In dergelijke rivieren treedt soms bochtverplaatsing en soms bochtuitdieping op, afhankelijk van de doorwerking van dwarshellingeffecten op het sedimenttransport door de bochten.

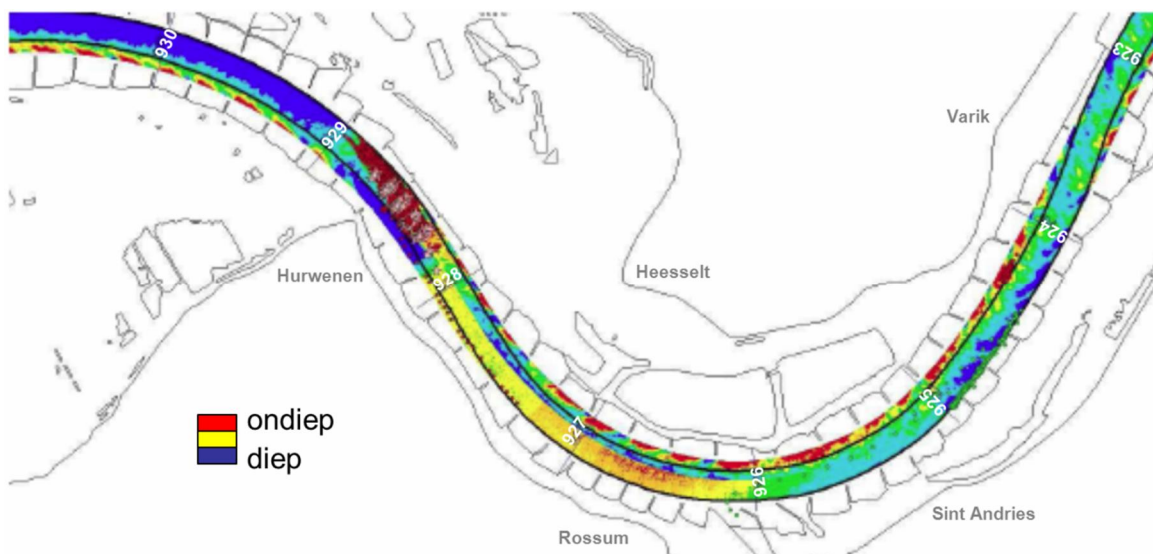
De Nederlandse bovenrivieren met zand-grindmengsels in de bedding zijn bijzonder. Rivieren met gelijke verhoudingen zand en grind in de bedding zijn schaars in de wereld; de meeste rivieren zijn of zandrivier of grindrivier. Gemengde typen komen bijvoorbeeld voor op de overgang van grindrivieren naar zandrivieren. De bijzonderheid uit zich in een mengsel van karakteristieke fenomenen in het zomerbed, zoals grote onderwaterduinen en sorteringspatronen van verschillende korrelgroottes. In de bedding van smalle en diepe zandrivieren ontstaan vaak duinen, terwijl brede en ondiepe zandrivieren worden gekenmerkt door zandbanken. In onze bovenrivieren groeien duinen sterk tijdens hoogwater en blijven na een hoogwater vaak nog langdurig aanwezig, waarbij ze de bodemruwheid en dus de waterstand beïnvloeden. In grindrivieren komen hoge duinen nauwelijks voor, zelfs niet in relatief smalle en diepe rivieren. Hier wordt de bedding gedomineerd door grindbanken. Ook is in grindrivieren vaak een grote variatie aan korrelgroottes te vinden, gesorteerd in ruimtelijke patronen.

Van groot naar klein zijn vier sorteringspatronen van belang. Van de apex naar de kust verfijnt het sediment in de bedding zich enigszins. Waar de Rijn over de grens in Duitsland (Ruhrgebied) en de Grensmaas in Limburg nog duidelijk grindige rivieren zijn, bevindt zich in de benedenloop van de rivieren overwegend zand. Dit komt deels omdat zand makkelijker wordt verplaatst en deels omdat het grind tot zand wordt vermalen. Het tweede sorteringspatroon is dat dwars op de bochten: in de buitenbocht verzamelt zich vooral grof sediment en in de binnenbocht verzamelt het fijnere sediment zich. In de Boven Merwede gaat het om zand met verschillende korrelgrootte, maar in de Bovenrijn om een smalle zone met grof grind snel overgaand in een bredere zone met grindig zand. De variatie van korrelgrootte dwars op de rivier in één enkele bocht kan bijna net zo groot zijn als die langs de gehele rivier van de apex naar de kust. Het derde sorteringspatroon is verticaal en hangt samen met de duinen op de rivierbodem. Duinen hebben een flauwe (bovenstroomse) loefzijde waarover het sediment wordt meegesleept, en een steile (benedenstroomse) lijzijde met een helling tot maximaal 40°. Duinen verplaatsen zich doordat sediment over de top schuift en zich aan de steile lijzijde als regelmatige lawines uitspreidt. Daarbij wordt zand en

grind gesorteerd van fijn boven naar grof beneden. Als na een hoogwater de duinen weer afvlakken blijft deze sortering bewaard, waardoor diepere lagen grover zijn dan ondiepere lagen. Het vierde sorteringspatroon is ook verticaal en betreft het oppervlak van de bedding zelf: de afpleisteringslaag. Deze grove laag van een tot twee korrels dik ontstaat door een combinatie van het wegspoelen van fijne delen en het 'borrelnootjeseffect': bij de beweging van sediment in transport zakken de fijnere delen weg terwijl de grotere aan het oppervlak blijven. Dit kan worden gesimuleerd door een schaal gemengde nootjes te schudden. In de Bovenrijn en de Grensmaas is de afpleisteringslaag zo sterk dat het sediment bij laagwater en in de aanloop naar hoogwater lange tijd niet in beweging komt.

5.2 Genormaliseerde rivierbeddingen

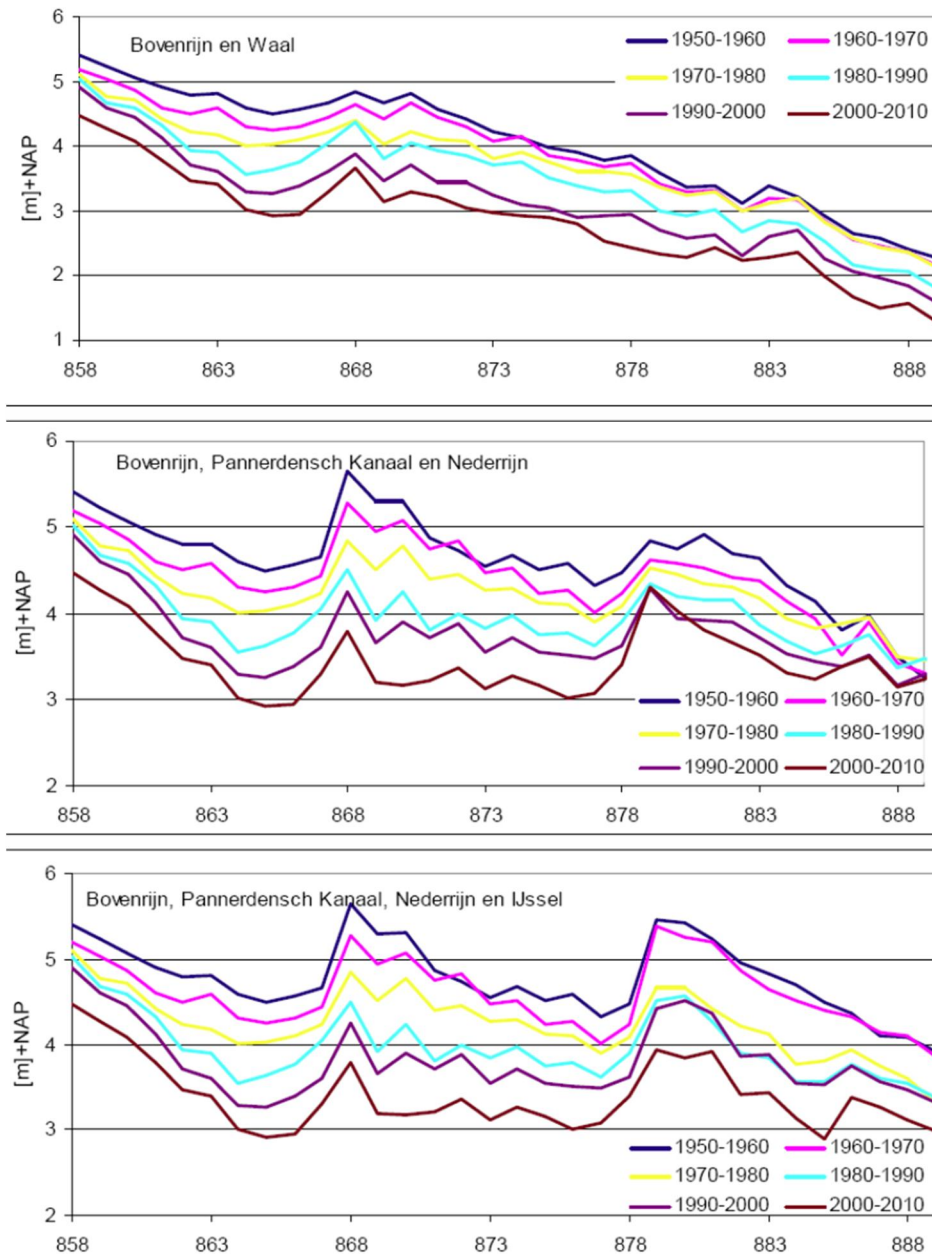
Door de normalisaties zijn de ondiepten in de grote rivieren goeddeels verdwenen. Alleen in de scherpere bochten zijn er nog relatief ondiepe binnenbochten. In sommige bochten ontstaan daardoor knelpunten voor de scheepvaart –zoals bij St. Andries (Fig. 5.1) – en daar wordt dan soms in de buitenbocht een vaste laag van stortstenen aangebracht op de bedding. Omdat het dan in de buitenbocht ondieper wordt, houdt de stroming de binnenbocht beter op diepte. Zand en grind migreert over de stortsteenlaag heen. Op andere plaatsen wordt de vaargeul onderhouden door steeds weer te baggeren in binnenbochten en te storten in de buitenbochten, waarbij *en passant* materiaal stroomopwaarts wordt gebracht.



Figuur 5.1 Hoogtekaart van de Waalbedding bij St. Andries, waarin de vaste laag in de buitenbocht te zien is als een relatief hoge baan in de buitenbocht. Rood is hoog (ondiep) en blauw laag (diep). Bij de kribben zijn tevens kribvlammen te zien. Bron: Rijkswaterstaat.

Kribben en langsdammen hebben grote effecten op de vorm van de rivierbedding. Door de effectieve versmalling en verdieping van de geul zijn banken in de binnenbochten minder hoog dan in de natuurlijke situatie. Maar daar komt op kleinere schaal ander reliëf voor in de plaats: net benedenstrooms van de kop van de krib ontstaat een ontgrondingskuil. Daar is bij het ontwerp rekening mee gehouden zodat de kribben niet worden ondergraven en beschadigd raken. Zand en grind dat uit die kuil komt zet zich af in de vorm van een

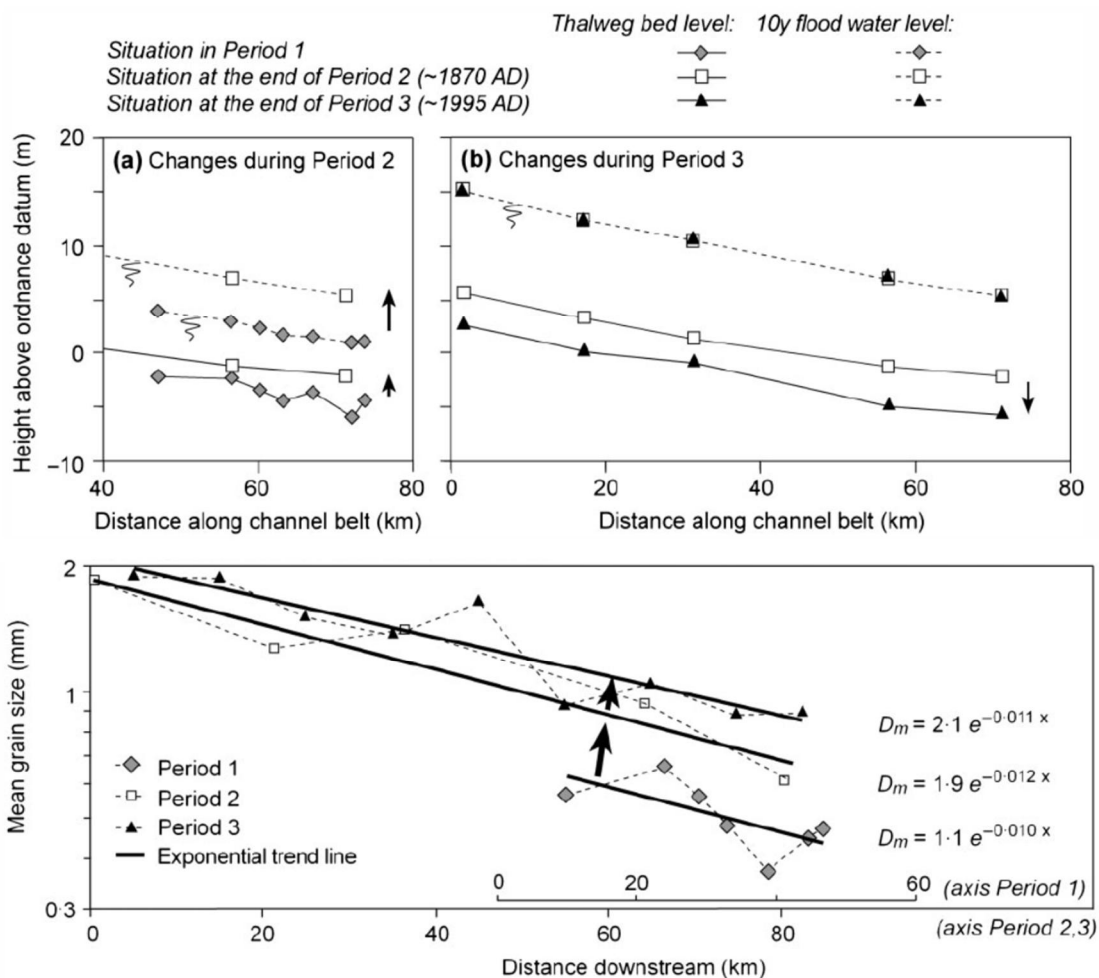
langgerekte lob, 'kribvlam' genoemd. De duinen die zich bij hoogwater vormen komen hier soms nog boven op, wat lokaal ondiepten kan geven die hinderlijk zijn voor de scheepvaart.



Figuur 5.2 Gemeten bodemhoogte in de Rijntakken uitgezet tegen rivierkilometer, welke de daling in de afgelopen decennia laat zien. De daling van de bodem in het Pannerdens Kanaal is groter dan die in de Waal, wat laat zien dat de splitsing niet stabiel is. Bron: Sieben (2011).

De versmalling en verdieping van het zomerbed (Fig. 5.2) had tot gevolg dat de stroomsnelheid van het water in de rivierbedding hoger werd. Ook was de rivier door de afsnijding van bochten in de laatste paar eeuwen steeds rechter en korter geworden, en daarmee is het verhang groter. Hierdoor kon de rivier veel meer sediment transporteren dan

voorheen. Bovendien is op veel plaatsen grind gewonnen uit de bedding. Terwijl er nog net zoveel water ons land binnenkomt, is de aanvoer van zand en grind uit het stroomgebied echter geleidelijk afgenomen door een combinatie van factoren. Ten eerste zijn bovenstrooms dammen aangelegd die het sediment invangen. Daarachter neemt de rivier sediment op uit de rivierbedding. Ook uit de gekanaliseerde zijrivieren Neckar en Moezel bereikt nog maar weinig zand en grind de Rijn. Dit alles had tot gevolg dat de bedding zich verder verlaagde. Omdat tegelijk de uiterwaarden opslibden zijn de rivieren schijnbaar dieper geworden, maar zijn de waterstanden bij hoogwater juist hoger geworden. Dit effect versterkte zichzelf, omdat in diepere rivieren hoogwatergolven zich sneller voortplanten en ze minder uitdempen op hun weg naar zee. Daardoor zijn de hoogwaterstanden voor vergelijkbare afvoerhoeveelheden toegenomen. Daarnaast ontwikkelen diepere smallere geulen grotere rivierduinen (onder water), die hydraulisch ruwer zijn en tijdens een hoogwater tijdelijk meer opstuwing veroorzaken. Daar tegenover staat dat door enigszins selectief transport van het sediment het zomerbed van de bovenrivieren veel grover geworden is dan dat zij in het verleden was (Fig. 5.3). Dat remt de verdere uitschuring enigszins, evenals de duinvorming.



Figuur 5.3 Verfijning van de Waalbedding in benedenstroomse richting en bodemdaling en vergroving van de Waalbedding sinds vroege middeleeuwen. Bron: Frings et al. (2009).

De toename van het sedimenttransport en de afname van de bovenstroomse aanvoer van zand en grind leidde tot sterke bodemdaling van ongeveer een centimeter per jaar. Omdat de precieze oorzaken voorheen niet goed bekend waren is dit lang de 'autonome bodemdaling' genoemd, maar daar is niets autonooms aan. Het is duidelijk dat de bodemdaling wordt veroorzaakt doordat er 1) minder zand en grind van bovenstrooms wordt aangevoerd, 2) de capaciteit van de stroming om sediment mee te voeren hoger is geworden, en 3) er gebaggerd werd zonder terug te storten.

De uitschuring van het zomerbed heeft niet het positieve effect gehad dat de rivier een hogere afvoer kan verwerken, omdat dat effect meer dan teniet werd gedaan door de afgenomen afvoercapaciteit van de winterbedding door de opgeslibde uiterwaarden. Kribben en andere oeververdedigingswerken kunnen door de uitschuring worden ondergraven. Vaste lagen in buitenbochten worden weliswaar niet ondergraven, maar dalen evenmin mee met de bedding en kunnen dan vervelende drempels gaan vormen voor de scheepvaart, met name bij laagwater dat bij veranderend klimaat vaker op kan gaan treden. Bij riviersplitsingen en bij bovenmonden van nevengeulen vindt de bodemdaling vooral plaats in de morfologisch actievare geul, terwijl de nevengeul of de riviertak met de grofste bedding niet zo hard daalt. Daardoor veranderen de afvoerverdelingen en worden de splitsingen asymmetrischer.

Dit leidt tot de volgende vragen:

1. Wil de rivier zich nog verder verdiepen?
2. Zorgt kribverlaging voor een omkering van het verdiegingsproces?

5.3 Wil de rivier zich nog verder verdiepen...?

De sedimenttoevoer is nog onvoldoende voor de transportcapaciteit van de rivier, en de bodemdaling zal daarom nog doorzetten. Dit zal in de bovenrivieren gepaard gaan met vergroving van de bedding. Deze vergroving is al sinds de Middeleeuwen aan de gang en daarmee verschuift de overgangszone van grof naar fijn sediment in de rivier stroomafwaarts. Het zand kan wel doorstromen naar de benedenrivieren en is deels opgeslagen in de kribvakken. Als de oevers niet verdedigd zouden zijn door kribben en langsdammen zou ook verbreding optreden omdat verdieping leidt tot ondergraving.

De daling van de bedding leidt ook tot asymmetrische splitsingen, wat de verdeling van water en sediment over de verschillende riviertakken beïnvloedt. Het is onzeker of de splitsingen instabiel zullen worden, omdat niet valt te voorzien hoe precies de relevante processen worden beïnvloed door de sorteringspatronen van zand en grind. Enerzijds spelen de processen een rol die de dwarshelling van de bedding in een bocht bepalen en de sortering van zand en grind dwars op de rivier. Anderzijds veroorzaken rivierduinen grove grindlagen in de bedding die bij hoogwater de duinontwikkeling tegengaan. De interactie van deze twee processen is allerm minst begrepen en wordt niet meegenomen in modelberekeningen die de ontwikkeling voor de komende tijd voorspellen.

5.4 ...of kan kribverlaging de trend keren?

Kribverlaging laat meer stroming toe door de kribvakken bij matig hoge hoogwaters, zodat de sterkte van de stroming in de rivierbedding af zal nemen. Daardoor neemt de sedimenttransportcapaciteit van de rivier af en zal deze beter in balans komen met de geringe sedimentaanvoer. Ook de vergroving en demobilisering van het sediment wordt

hiermee geremd. Tijdelijk zal ook sediment uit de kribvakken vrijkomen omdat de sterkte van de stroming daar juist toeneemt, maar zodra de kribvakken weer in evenwicht zijn stopt deze bron van sediment weer. Bij gelijkblijvende omstandigheden zal kribverlaging de balans verschuiven naar een iets minder erosieve situatie. Toch is de verwachting dat op langere termijn de trend van bodemdaling zal doorzetten.

Er zijn zo meerdere toekomstscenario's denkbaar. Het eerste is dat de beddingen van de bovenrivieren na verloop van tijd zo diep en grof worden dat er alleen nog bij uitzonderlijke hoogwaters veranderingen optreden, maar bij geringere rivierafvoeren de bedding vrijwel vast ligt. Alle fijnere sediment wordt dan over de grove en vastliggende bedding doorgevoerd naar de benedenrivieren. Daarmee liggen de water- en sedimentverdelingen op de splitsingen van de bovenrivieren ook vast, en zijn nevengeulen zo asymmetrisch dat ze snel dichtlopen. Vastliggende drempels kunnen problematisch worden voor de scheepvaart en lagere waterstanden kunnen tot extra verdroging van uiterwaarden leiden. De zandstranden in de kribvakken zullen geleidelijk verdwijnen. De uiterwaarden worden nog sterker losgekoppeld van de riviergeul. Deze effecten kunnen worden gezien als de verborgen kosten voor ons ingrijpen in de rivier: de rivier was overstromingsruimte afgenomen door haar te bedijken, en de bedding was versmald om de hoogwaterafvoer en de bevaarbaarheid.

Een tweede mogelijkheid is dat er een keuze wordt gemaakt welke riviertakken voor welke functies worden gebruikt. Er zou een hoofdtak voor de scheepvaart kunnen worden gekozen. Andere takken zouden dan kunnen worden aangewezen voor een natuurlijker ontwikkeling. Op die manier worden de conflicterende functies van scheepvaart en natuurontwikkeling gescheiden.

Belangrijk is om de rivieren niet alleen op de waterafvoerfunctie te beheren, maar ook op de sedimenthuishouding. Met het afgraven van uiterwaarden worden beide enigszins bediend. Niet alleen is meer ruimte voor de afvoer van hoogwater en kan het sommige natuurontwikkelingen bevorderen, maar ook wordt daarmee een soort zandvang gevormd die de hinderlijke sedimentatie in het benedenstroomse deltagebied vermindert. Tegelijkertijd zou meer suppleren van beddingsediment in Duitsland de bodemdaling van het zomerbed kunnen tegengaan en het instabiel worden van de splitsingen kunnen uitstellen. Met de korrelgrootte van het gesuppleerde sediment kan worden beïnvloed hoe snel het sediment zich door de rivieren beweegt en verspreidt.

Samengevat: voor de ontwikkeling van de rivierbedding is kribverlaging gunstig, maar het garanderen van sedimentaanvoer door suppletie in Duitsland en Nederland noodzakelijk. Behalve met kribverlaging kan ook met uiterwaardverlaging de sedimentuitwisseling – met name de interactie tussen rivierbed en uiterwaard – tijdelijk worden versterkt.

6 Bronnen

Asselman NEM. 1997. Suspended sediment in the river Rhine. The impact of climate change on erosion, transport and deposition. PhD thesis, Utrecht University. ISBN 90-6266-150-5

Berendsen HJA, Stouthamer E. 2001. Palaeogeographic development of the Rhine-Meuse Delta, the Netherlands. Van Gorcum: Assen. 268 pp + CD-ROM + Kaart en profiel bijlagen.

Cohen KM, Stouthamer E, Hoek WZ, Berendsen HJA, Kempen HFJ. 2009. Zand in banen: zanddiepte-kaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel. Derde geheel herziene druk. Arnhem: Provincie Gelderland. 130 pp + CD-ROM + Digitale Kaarten.

Cohen KM, Stouthamer E, Pierik HJ, Geurts AH. 2012. Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta / Rhine-Meuse Delta Studies' Digital Basemap for Delta Evolution and Palaeogeography. Dept. Fysische Geografie. Universiteit Utrecht. Digitale Dataset. Persistent identifier: urn:nbn:nl:ui:13-nqjn-zl. <https://easy.dans.knaw.nl/ui/datasets/id/easy-dataset:52125>

Erkens G, Cohen KM. 2009. Quantification of intra-Holocene sedimentation in the Rhine-Meuse delta: A record of variable sediment delivery. *Netherlands Geographical Studies* 388: 117–171.

Frings RM, Berbee BM, Erkens G, Kleinhans MG, Gouw MJP. 2009. Human-induced changes in bed shear-stress and bed grain-size in the river Waal (The Netherlands) during the past 900 years. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, 503-514.

Frings RM, Kleinhans MG. 2008. Complex variations in sediment transport at three large river bifurcations during discharge waves in the river Rhine. *Sedimentology* 55, 1145-1171.

Hesselink A, Kleinhans M, Boreel G. 2006. Historic discharge measurements in three Rhine branches. *Journal of Hydraulic Engineering* 132: 140–145.

Kleinhans MG, Ferguson RI, Lane SN, Hardy RJ. 2012. Splitting rivers at their seams: bifurcations and avulsion, *Earth Surf. Process. Landforms* , , doi:10.1002/esp.3268.

Kleinhans MG, Cohen KM, Hoekstra J, Ijmker JM. 2012. Evolution of a bifurcation in a meandering river with adjustable channel widths, Rhine delta apex, The Netherlands, *Earth Surf. Process. Landforms* , , doi:10.1002/esp.2222.

Kleinhans MG, van den Berg JH. 2011. River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and a physics-based method, *Earth Surf. Process. Landforms* 36, 721-738, doi:10.1002/esp.2090.

Kleinhans MG, Weerts HJT, Cohen KM. 2010. Avulsion in action: reconstruction and modelling sedimentation pace and upstream flood water levels following a Medieval tidal-river diversion catastrophe (Biesbosch, The Netherlands, 1421-1750 AD), *Geomorphology* 118, 65-79, doi:10.1016/j.geomorph.2009.12.009

Klijn F, Asselman N, Silva W & Stone K. 2002. Ruimteverlies van Rijn en Maas verkend. *Het WATERschap* 2002/13: 590-601

Maas GJ, Makaske B. 2005. Een verkenning van de erosiegevoeligheid van de bodem in de bypass van Kampen. Achtergrondrapport MER IJsseldelta-Zuid. Alterra, Wageningen.

Middelkoop H, Asselman NEM. 1998. Spatial variability of floodplain sedimentation at the event scale in the Rhine-Meuse Delta, the Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 23: 561–573.

Sieben J. 2009. Sediment management in the Dutch Rhine Branches. *Intl. J. River Basin Management* 7(1), 43–53.

Silva W, Klijn F & Dijkman JPM. 2001. Room for the Rhine Branches in the Netherlands. What the research has taught us. WL, Delft & RIZA, Arnhem.

Stouthamer E, Cohen KM, Gouw MJP. 2011. Avulsion and its implications for fluvial-deltaic architecture, insight from the Rhine-Meuse delta. *Society for Sedimentary Geology, Special Publication 97*, p. 215–231 In: Davidson S.K, Leleu S, North C.P (Eds.). 2011. *From River to Rock Record: The preservation of fluvial sediments and their subsequent interpretation. Society for Sedimentary Geology, Special Publication 97.*

Struiksma N, Olesen K, Flokstra C, De Vriend H. 1985. Bed deformation in curved alluvial channels. *Journal of Hydraulic Research* 23: 57–79.

Van de Ven G. 1976. *Aan de wieg van Rijkswaterstaat – wordingsgeschiedenis van het Pannerdens Kanaal.* Walburg Pers: Zutphen.

Van Dijk WM, Van de Lageweg WI, Kleinhans MG. 2012. Experimental meandering river with chute cutoffs, *J. Geophys. Res.*, 117, F03023, doi:10.1029/2011JF002314

Van Dijk, WM, Van de Lageweg WI, Van Breemen D, Kleinhans MG (submitted). Experimental river pattern with vegetation.

Vos PC, Bazelmans J, Weerts HT, Van der Meulen M, Hoogendoorn, B. 2011. *Atlas van Nederland in het Holoceen.* Bert Bakker, Amsterdam. 93 pp.

