



# Programma Integraal Riviermanagement

## Systeembeschouwing Rijn en Maas

ten behoeve van ontwerp en besluitvorming



**Opstellers/ aanspreekpunten:**

Frans Klijn (Deltares) (redactie)  
Hans Leushuis (RWS-ZN)  
Mardy Treurniet (RWS-ON)  
Wouter van Heusden (RVO)  
Saskia van Vuren (RWS-WVL) (projectleiding)

**Te refereren als:**

Klijn, F., H. Leushuis, M. Treurniet,  
W. van Heusden & S. van Vuren, 2022.  
Systeembeschuwing Rijn en Maas ten  
behoefte van ontwerp en besluitvorming.  
Programma Integraal RivierManagement,  
ministerie van Infrastructuur en Water, Den  
Haag.

**Copyright:**

Gebruik van illustraties of teksten  
toegestaan met bronvermelding.  
Gebruik van foto's niet toegestaan.

Foto's titelblad en inhoudsopgave: Siebe Swart.

# Inhoudsopgave

**Samenvatting: de hoofdboodschappen****05**

Majeure opgaven	05
Ontwikkeling van het riviersysteem en belangrijke terugkoppelingen	06
De relatie tussen rivierinrichting en het nationaal waterbeleid	09
Te maken hoofdkeuzen en dilemma's	09
Over de volgorde der beslissingen bij het opstellen van alternatieven	10

**1. Inleiding****12**

Aanleiding tot een systeembeschuwing	13
Doel van dit rapport	14
Positionering in het IRM-proces: waar draagt de systeembeschuwing aan bij?	14
Scope	15
Aard van het rapport	16
Opzet	17

**2. Klimaatverandering noopt tot aanpassingen****18**

Het afvoerregime van de grote rivieren verandert	19
Hoogwaters worden frequenter en hoger	20
Laagwaters worden frequenter en langduriger	22
De zeespiegelstijging bemoeilijkt een vrije afstroming naar zee	24

# Inhoudsopgave



<b>3. Het riviersysteem ontwikkelt zich ongunstig en bevordering van één geo-ecosysteemdienst gaat vaak ten koste van andere</b>	<b>26</b>
De bodem van het zomerbed is sterk gedaald en de (laag)waterstanden dalen mee	27
De uitschuring en lagere laagwaterstanden hebben ernstige gevolgen voor veel gebruiksfuncties en waarden	30
De afvoerverdeling over de Rijntakken trekt bij lage afvoeren steeds schever: er gaat te weinig water naar het noorden	32
Het zomerbed van de rivieren is te ruim voor de huidige en toekomstige laagwaterafvoeren	35
De sedimenthuishouding van de Maas is verstoord	39
De doelstellingen voor aquatische natuur van de Kaderrichtlijn Water (KRW) zijn onbereikbaar in voor scheepvaart geoptimaliseerde rivieren	40
Het winterbed is te krap voor toekomstige hoge rivierafvoeren: de hoogwaterstanden worden gevaarlijk hoog	42
Opslibbing van de uiterwaarden heeft de afvoercapaciteit verder verkleind	44
De opgelegde afvoerverdeling over de Rijntakken sluit in het extreem hoge afvoerbereik niet goed aan bij de dimensies van het winterbed	47
De beoogde afvoerverdeling over de Rijntakken is bij extreem hoogwater niet goed te realiseren	50
Ook op de Maas bepalen verschillende winterbedbreedtes de hoogwaterstanden	51
Zonder rivierverruiming reageren de hoogwaterstanden op Maas en Waal het sterkst op toenemende hoogwaterafvoeren, die op de IJssel het minst sterk	53
<b>4. Reflectie op de hoofdoelen van het rivierbeheer</b>	<b>54</b>
Een optimale verdeling van water over Nederland en het borgen van goede condities voor gebruiksfuncties en waarden	55
Een eerlijke en doelmatige verdeling van zoetwater over verschillende landsdelen en watervragers	58
Water vasthouden en laagwaterstanden omhoog brengen	58
Voldoende vaardiepte (ook bij drempels) en voldoende dekking van kabels en leidingen	59
Een natuurlijk overstromingsregime van de uiterwaarden (hydrodynamiek)	60
Een veilige afvoer van hoogwater en ijs, en lagere hoogwaterstanden	61
Voldoende ruimte voor natuurontwikkeling en ruimtegebruik	63





<b>5. Wat zijn evidente ontwikkelrichtingen om deze doelen te realiseren en welke dilemma's doen zich daarbij voor?</b>	<b>65</b>
De uitschuring van de Rijntakken moet gestopt en de rivierbodem bij voorkeur omhoog	66
En de scheefgetrokken afvoerverdeling op de Rijntakken (bij laagwater) moet worden rechtgetrokken	70
Het omhoog brengen van de rivierbodem vraagt compensatie voor verminderde afvoercapaciteit in het winterbed	71
Om hernieuwde uitschuring te voorkomen moet worden gesuppleerd met de juiste korrelgrootte(verdeling)	71
Op de Maas moet de sedimenthuishouding worden hersteld	72
De afvoercapaciteit van Maas en Rijntakken moet fors vergroot	73
Daarbij moet verdere opstuwing door de krappe Waal en door het noodgedwongen moeten afknippen van Pannerdens Kanaal en IJssel worden voorkomen	74
Voor de Rijntakken moet daarom eerst over de gewenste hoogwaterafvoerverdeling worden beslist	75
Om de afvoercapaciteit te vergroten en tegelijkertijd te voorkomen dat hoogwaterstanden hoger worden is rivierverruiming een bewezen effectieve maatregel	82
In de onbedijkte riviertrajecten (Maas) is vergroting van de afvoercapaciteit alleen mogelijk door de geomorfologie te veranderen	83
In bedijkte riviertrajecten moet worden gestreefd naar een geleidelijk aflopende verhanglijn (zonder opstuwing, zoals blijkt uit knikken) ...	84
... en is het verbreden van het winterbed het meest robuust en heeft dat de grootste toekomstwaarde	84
Rivierverruiming kan (ook) ruimte voor natuur(ontwikkeling) bieden	85
Een optimalisatie van de vaarwegfunctie is lastig te combineren met het ruimte bieden aan natuurlijke processen: scherpe keuzes zijn nodig	86
Seizoensberging van water gaat slecht samen met een natuurlijk afvoer- en overstromingsregime	88
<b>6. Over padafhankelijkheid en de volgorde van ingrijpen</b>	<b>89</b>
Voor de Maas	91
Voor de Rijntakken	93
<b>Referenties</b>	<b>95</b>





## Samenvatting: de hoofdboodschappen



### Majeure opgaven

Het programma Integraal Riviermanagement (IRM) bereidt het Nederlandse rivierengebied voor op de gevolgen van de klimaatverandering en beoogt een nieuwe balans te vinden tussen de functies en waarden van het rivierengebied voor toekomstige generaties. *De klimaatverandering en de voorzienbare gevolgen ervan vormen de aanleiding* om de inrichting en het beheer van het rivierengebied te herzien; naar verwachting zullen we te maken krijgen met frequentere en hogere hoogwaters, en met langduriger en lagere laagwaters. Hierop anticiperen is **de eerste grote opgave van IRM**.

Heel concreet kan dit worden begrepen als een **noodzaak** enerzijds de afvoercapaciteit van de rivieren te vergroten en anderzijds water zolang mogelijk vast te houden en de laagwaterstanden zo hoog mogelijk te houden. *Ofwel: de laagwaterstanden moeten omhoog en de hoogwaterstanden moeten omlaag*.

Deze opgave wordt bemoeilijkt door de gevolgen van ons handelen in het verleden, want in de afgelopen eeuwen hebben we 1) de topvervlakkingscapaciteit van de

Maasvallei en de afvoercapaciteit van alle rivieren verkleind door dijken steeds dichter bij de rivier te leggen en hebben we 2) bochten afgesneden en het zomerbed zodanig vastgelegd (genormaliseerd) dat de rivierbodem in de vrij afstromende rivieren (Waal en IJssel) plaatselijk meters is uitgeschuurd en de midden- en laagwaterstanden daardoor eveneens zijn gedaald. *Al met al hebben we het riviersysteem dusdanig beïnvloed, dat enkele zichzelf versterkende ontwikkelingen nu prangende problemen veroorzaken*. En deze ontwikkelingen gaan nog door.

De Maas en de Nederrijn-Lek hebben we grotendeels gekanaliseerd met stuwen en sluisen, zodat waterstandsvaling daar deels is voorkomen; maar met negatieve consequenties voor riviergebonden natuur. Later is het zomerbed van de Maas door delfstoffenwinning en zomerbedverdieping nog verder verruimd, ten koste van een natuurlijke overstromingsdynamiek.

Al deze door ons handelen in het verleden veroorzaakte problemen oplossen of de gevolgen ervan verkleinen is **de tweede grote opgave voor IRM**.

## Ontwikkeling van het riviersysteem en belangrijke terugkoppelingen

---

Door in de afgelopen eeuwen de dijken steeds dichters op de rivieren te leggen zijn deze afvoer- en topvervlakkingscapaciteit kwijtgeraakt. Ook is de sedimentatie geconcentreerd in de uiterwaarden. Die zijn daardoor hoger geworden, waardoor ten eerste de afvoercapaciteit verder is afgenomen en ten tweede op jaarbasis meer water door het zomerbed stroomt. Dat versterkt de uitschuring van dat zomerbed. En dat zomerbed was zich al aan het insnijden als reactie op normalisaties (vastlegging; in de 19e eeuw), bochtafsnijdingen (20e eeuw) en voortdurende zand- en grindwinning. Een lagere rivierbodem betekent in vrij afstromende riviertrajecten lagere waterstanden (ook grondwaterstanden) met gevolgen voor veel gebruiksfuncties en natuurwaarden. Dit proces van insnijding van het zomerbed en sedimentatie op de uiterwaarden is *een zichzelf versterkend proces*: hoe dieper de rivier zich insnijdt, hoe sneller de uitschuring gaat. Tot een nieuw evenwicht wordt bereikt doordat het verhang afneemt. Met name de laatste decennia worden de gevolgen van de uitschuring door een steeds groter aantal gebruiksfuncties ervaren en ernstiger; er lijkt een grens gepasseerd (of dicht genaderd) van waar de gevolgen onaanvaardbaar worden geacht: voor de scheepvaart, de zoetwatervoorziening, natuur, landbouw en vanwege risico's voor infrastructuur (bruggen, kabels en leidingen). Het is **essentieel** dit proces op de vrij afstromende Waal en IJssel te doorbreken, bijvoorbeeld door de bodem weer omhoog te brengen naar een niveau dat de grootste knelpunten opheft en door de verdeling van de afvoer door zomerbed en winterbed te veranderen om het uitschuringsproces zoveel mogelijk te remmen: minder door zomerbed, meer door winterbed. Dat kan neutraal voor de afvoercapaciteit, mits gecombineerd met rivierverruiming in het winterbed.

Een extra complicatie is dat de mate en snelheid van insnijding van de Rijntakken nabij de splitsingspunten verschilt: de rivierbodem van de Waal zakt sneller dan die van het Pannerdens Kanaal; en waar de bodem van de Boven-IJssel nog wel zakt, doet die van de gestuwde Nederrijn dat niet meer. Hierdoor wordt de verdeling van water over Noord- en West-Nederland *bij lage afvoeren* scheefgetrokken. De Waal trekt teveel water, waardoor de IJssel, en dus het oosten en noorden, verhoudingsgewijs te weinig krijgt, waardoor de doelstellingen van het nationaal watervoorzieningsbeleid in gedrang komen. En ook dit is *een zichzelf versterkend proces*: hoe schever, hoe sneller het verder scheeftrekt, want bij de huidige geringe sedimentaanvoer bepaalt de

watervedeling in hoge mate de uitschuringssnelheid. Het is **essentieel** om de afvoer- verdeling bij lage afvoeren te herstellen (bijvoorbeeld door de bodem van de Waal meer omhoog te brengen dan die van het Pannerdens Kanaal, en de bodem van de IJssel wel omhoog te brengen, maar die van de Nederrijn niet).

De Nederrijn-Lek en de Maas zijn geen vrij afstromende rivieren meer en hebben daardoor minder last van uitschuring van de rivierbodem en daling van de laagwaterstanden. Maar omdat van de Maas het zomerbed zeer sterk is verbreed en verdiept ten behoeve van de hoogwaterafvoer en is genormaliseerd en gekanaliseerd ten behoeve van de scheepvaart is het overstromingsregime van de weerden en uiterwaarden zeer onnatuurlijk geworden en de Maas grotendeels ongeschikt als aquatisch habitat voor stroomminnende soorten. Dit kan worden beschouwd als *een onbalans tussen functies*, waarbij de riviergebonden natuur kwalitatief sterk is achteruitgegaan en ruimtelijk is gemarginaliseerd tot oeverzones (met uitzondering van één traject: de Grensmaas). Het is vanuit natuuroogpunt **gewenst** de hydrodynamiek van de uiterwaarden van de Maas (en in mindere mate de Nederrijn) weer zoveel mogelijk te herstellen en morfodynamiek (erosie en sedimentatie) waar mogelijk toe te staan.

Waar de laagwaterstanden en het overstromingsregime van de uiterwaarden vooral worden bepaald door de dimensies van het zomerbed, en dan met name de **bodemligging**, zijn de topvervlakkings- en afvoercapaciteit voor hoogwater afhankelijk van *de dimensies en hydraulische ruwheid van het totale rivierbed*. Het zomerbed is daar onderdeel van, maar het winterbed is veel groter. Als we kijken naar de verhanglijnen van hoge tot extreem hoge hoogwaters dan zien we dat de afvoer van hoogwater soms nog wordt belemmerd door antropogene flessenhalzen en dat sommige riviertrajecten verhoudingsgewijs krap zijn. Waar de rivieren door maatregelen van de programma's Ruimte voor de Rivier en Maaswerken in principe genoeg **afvoercapaciteit** hebben gekregen voor de hoge rivierafvoeren waar we tot voor kort rekening mee hielden, is deze *onvoldoende voor de in de toekomst verwachte (nog grotere) extreme afvoeren*. Het is dan ook **cruciaal** de afvoercapaciteit fors te vergroten.



Modelberekeningen laten zien dat met name de Waal erg krap is voor de hoogwaterafvoer die deze te verwerken krijgt – met zeer hoge waterstanden tot gevolg – en bij zeer grote afvoeren zodanige opstuwing veroorzaakt bij de splitsingspunten dat alleen door de afvoer via het Pannerdens Kanaal en de IJssel *af te knippen* de afvoerverdeling over de **Rijntakken** kan worden gerealiseerd zoals beoogd. Dat betekent dat de huidige **afvoerverdeling** bij grote rivierafvoeren bij klimaatverandering niet volhoudbaar is zonder forse aanpassingen. Er kan hier op twee manieren worden geanticiperd: hetzij door *zeer forse verruiming van het winterbed van de Waal* (door grootschalige dijkverleggingen en bypasses), hetzij door *een andere afvoerverdeling bij hoogwater te aanvaarden* en de afvoercapaciteit van (ook) de andere Rijntakken daarop aan te passen. De rivierverruiming moet in beide gevallen door structurele aanpassingen in het winterbed, om de afvoerverdeling bij lage en middelhoge afvoeren niet te sterk te veranderen<sup>1</sup>

Waar voor de Rijntakken geldt dat er een afhankelijkheid is tussen de benodigde afvoercapaciteit per riviertak en de afvoerverdeling, geldt voor de **Maas** dat er een afhankelijkheid bestaat tussen de benodigde afvoercapaciteit van de bedijkte Maas en de **topvervlakkingscapaciteit** in de Maasvallei: een ruimtelijke afhankelijkheid. De topvervlakkingscapaciteit is afhankelijk van de breedte en inrichting van de overstromingsvlakte en bepaalt de vorm (hoogte) en verplaatsingsnelheid van afvoergolven door de rivier. Omdat in het verleden veel ruimte aan de overstromingsvlakte is onttrokken is de topvervlakkingscapaciteit afgenomen; en omdat kades recent de status primaire waterkering hebben gekregen staat deze verder onder druk. In het licht van toekomstige grotere hoogwaterafvoeren moeten daarom hierop toegesneden systeemmaatregelen worden overwogen.



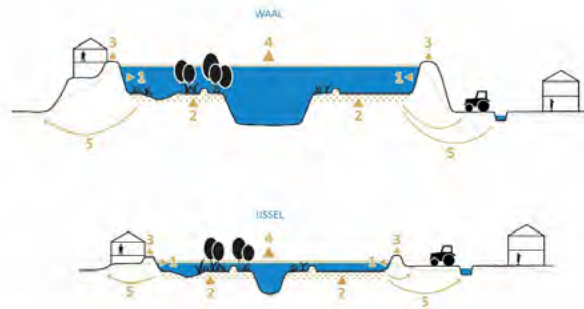
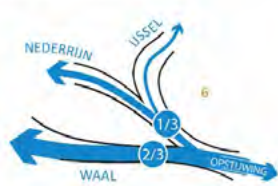
1 De afvoerverdeling bij hoge rivierafvoeren kan vrijwel onafhankelijk worden gestuurd van die bij lage afvoeren

Foto: Siebe Swart

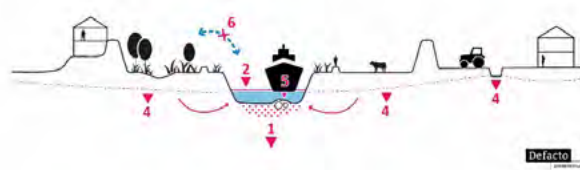


### BELANGRIJKSTE ONTWIKKELINGEN RIJNTAKKEN

SITUATIE TIJDENS HOOG WATER



SITUATIE TIJDENS LAAG WATER



DeFacto

Figuur 1 De belangrijkste ontwikkelingen van de Rijntakken die problemen veroorzaken bij hoge rivierafvoeren respectievelijk geringe rivierafvoeren.

Bij hoogwater (bovenste twee): 1. Dijken rivierwaarts verplaatst, 2. Uiterwaarden opgeslibd, 3. Dijken verhoogd, 4. hoogwaterstanden hoger geworden, 5. Toegenomen kans op instabiliteit en piping (kwel onder dijk door), 6. Opstuwing hoogwaters tot in Duitsland (en afknippen Pannerdens Kanaal en IJssel nodig).

Bij laagwater (onder): 1. Rivierbodem uitgeschuurd en verder zakkend, 2. Laagwaterstanden gezakt en verder dalend, 3. Afvoerdeling scheeftrekkend, 4. Grondwaterstanden gedaald en dalend, 5. Vaardiepten beperkt, 6. Rivierdynamiek afgenomen.

### BELANGRIJKSTE ONTWIKKELINGEN MAAS

SITUATIE TIJDENS HOOG WATER



SITUATIE TIJDENS LAAG WATER



DeFacto

Figuur 2 De belangrijkste ontwikkelingen van de Maas die problemen veroorzaken bij hoge rivierafvoeren respectievelijk geringe rivierafvoeren.

Bij hoogwater (boven):

**Bedijkte Maas:** 1. Ruimte verloren, 2. Uiterwaarden opgeslibd, 3. Dijken verhoogd, 4. Hoogwaterstanden hoger geworden, 5. Toegenomen kans op instabiliteit en piping (kwel onder dijk door)

**Maasvallei:** 1. Ruimte verloren, 2. Dijken verhoogd, 3. Topvervlakking teruglopend, 4. Snellere verplaatsing afvoergolf, 5. Hoogwaterstanden hoger, 6. Kans op piping vergroot (kwel door grindpakket), 7. Gevaar diepe erosiekuilen

Bij laagwater (onder):

**Gestuwde Maas:** 1. Zomerbed sterk verbreed (normalisatie), 2. Waterpeil gestuwd (kanalisatie), 3. Strooming stilgevallen, 4. Zomerbed verdiept, 5. Sedimenthuishouding verstoord, 6. Overstromingsdynamiek afwezig, 7. Vistrek belemmerd

**Grensmaas:** 1. Zomerbed verruimd, 2. Afvoer afgeknepen (naar kanalen geleid), 3. Onnatuurlijke dynamiek (plotselinge afvoerpieken), 4. Verslibbing grindbed, 5. Waterkwaliteit poelen slecht, 6. Paaihabitat ongeschikt

## De relatie tussen rivierinrichting en het nationaal waterbeleid

---

Alles overziend geldt dat wat 300 jaar geleden het belangrijkste werd gevonden bij de aanleg van het Pannerdens Kanaal, ook nu nog het belangrijkste is, namelijk een zoveel mogelijk vrij-afstromend en uitgebalanceerd riviersysteem en een maatschappelijk optimale verdeling van zowel weinig water als teveel aan water. Dat geldt voor de Maas en haar (lateraal)kanalen overigens net zo goed als voor de Rijntakken. Optimaal kan hier worden begrepen als:

1. het eerlijk en doelmatig **verdelen van het beschikbare rivierwater** over verschillende landsdelen, en het realiseren van voldoende **hoge rivierwaterstanden** (incl. grondwaterstanden) en voldoende **vaardiepte** bij lage rivierafvoer;
2. het zodanig **verdelen** van een overmaat aan aangevoerd water dat dit **veilig naar zee kan stromen** door de **hoogwaterstanden zo laag mogelijk** te houden, rekening houdend met de kwetsbaarheid van de gebieden waarlangs dit water moet afstromen of tijdelijk moet kunnen worden geborgen (IJsselmeer respectievelijk Rijn-Maasmondingsgebied); en
3. het bij het hiertoe (her)inrichten van het rivierengebied streven naar een zo groot mogelijke **bijdrage aan de ruimtelijke kwaliteit** van het rivierengebied (in het bijzonder een **robuuste riviernatuur** cf. de doelen van PAGW, Natura2000, NNN en KRW en de kwaliteit van de publieke ruimte).

## Te maken hoofdkeuzen en dilemma's

---

**Hoofdkeus 1:** Gerelateerd aan het eerste hierboven genoemde doel staat IRM voor de opgave de beoogde **afvoerverdeling bij laagwater** te herstellen, óf een ander beleid te beargumenteren. Het huidige beleid inzake de afvoerverdeling bij lage rivierafvoer is gegrond op een afweging van waar zoetwater de grootste maatschappelijk meerwaarde heeft, waarbij het aanvullen van de watervoorraad in het IJsselmeer (watervoorziening Noord-Nederland), het beperken van zoutindringing en verzilting van West-Nederland, en het bevaarbaar houden van de hoofdvaarwegen tot de belangrijkste argumenten

behoren. De huidige beoogde afvoerverdeling is aldus stevig onderbouwd. Maar deze ook duurzaam realiseren vraagt aanpassing van de **bodemligging** in het splitsingspuntgebied en geregelde herijking van het sluitprotocol voor stuw Driel.

**Hoofdkeus 2:** Omdat de uitschuring van het zomerbed en de daardoor sterk verlaagde rivierwaterstanden en grondwaterstanden inmiddels zeer veel gebruiksfuncties en waarden schaden over meer dan de helft van de lengte van de Waal en IJssel, is **het omhoog brengen van de rivierbodem** naar een 'probleemoplossend niveau' eveneens cruciaal. Zo snel mogelijk stoppen met commerciële zandwinning uit het zomerbed ligt dan natuurlijk voor de hand. En het omhoog brengen van de rivierbodem wordt des te belangrijker als de afvoerverdeling weer wordt hersteld, want anders worden de vaardiepteproblemen op de Boven-Waal nog prangender, omdat er dan weer meer afvoer door de IJssel gaat.

Om weer een enigszins duurzame bodemligging te verkrijgen moet over grote lengten de bodem worden verhoogd volgens een geleidelijk aflopende gradiënt en aansluitend bij de bodemligging van de Duitse Niederrhein. Dit moet met de juiste korrelgrootte om de balans tussen sedimentatie en erosie te herstellen en zo een 'stabiele' maar toch dynamische rivier te verkrijgen (KRW- en natuurdoelen en voorkomen van spijt). Openstaande onderzoeksvragen zijn: hoever precies omhoog om de problemen te lenigen? Welke korrelgroottes toe te passen? Is voldoende sediment beschikbaar, en zo ja: waar (bijv. stroomopwaarts in Duitsland)?

Voor de gekanaliseerde (gestuwde) Maas is **het stoppen van winning van sediment uit het zomerbed** en het niet langer onderhouden van lokale zomerbedverdiepingen een eerste stap richting een duurzamer sedimenthuishouding. Dat is weliswaar voor de waterstanden en bevaarbaarheid van de Maas niet relevant (want deze is gestuwd), maar het bepaalt wel het overstromingsregime van de uiterwaarden (hydrodynamiek en morfodynamiek) en dus de condities voor de (potentiële) natuurwaarden, en kan invloeden op de grondwaterhuishouding beperken.

Voor de langere termijn kan de aanvoer van water door de rivieren in droge perioden dusdanig teruglopen dat voor de vrij afstromende Waal en IJssel een keus moet worden gemaakt tussen diepte of breedte van de vaargeul. Met kribverlaging en -verlenging, bodemkribben, of langsdammen lijken er diverse maatregelen mogelijk binnen het brede zomerbed van de Waal; maar aanpassing van de vaarwegcategorie voor één van beide riviertakken valt op lange termijn niet uit te sluiten.

**Hoofdkeus 3:** Alhoewel de klimaatverandering de belangrijkste reden is om de afvoercapaciteit te vergroten (voor de Maas met zo'n 10-20% voor het eind van deze eeuw, en voor de Rijn met zo'n 10-15%), wordt voor de Rijntakken de precieze opgave mede bepaald door de **afvoerverdeling bij hoogwater**. Op dit moment wordt de afvoerverdeling niet zozeer bepaald door de winterbeddimensies van de respectieve Rijntakken over hun volle lengte, maar veeleer door de dimensies van het rivierbed en de regelwerken nabij de splitsingspunten. De Waal is erg krap voor het toebedeelde aandeel hoogwaterafvoer, vooral na St. Andries, en rijst bij hoogwater verscheidene meters boven de andere rivieren uit. De Boven-Waal stuwt bij zeer hoge afvoeren nu al water naar het Pannerdens Kanaal, waarheen de stroming wordt afgeknepen door een flessenhals in stand te houden om zo te voorkomen dat er teveel naar de IJssel en Nederrijn gaat. Met opstuwung van de hoogwaterstanden tot in Duitsland als gevolg. Iets vergelijkbaars zien we bij de IJsselkop. Dat betekent dat het huidig beleid op termijn (bij hogere afvoeren) niet volhoudbaar is en (zoals hierboven al aangegeven) moet worden gekozen tussen hetzij **forse verruiming van de Waal**<sup>2</sup> hetzij **een andere afvoerverdeling bij hoogwater**.

**Hoofdkeus 4:** De **dimensies van het winterbed** zijn bepalend voor de topvervlakings- en afvoercapaciteit van de rivieren. Topvervlakking is vooral belangrijk op de Maas, waar dit proces leidt tot significante afvlakking van de hoogwatergolf, die dan stroomafwaarts niet alleen lager wordt maar ook later aankomt. Topvervlakking is een functie van de breedte van het winterbed (en de inrichting daarvan, plus eventuele bergingsgebieden). Voor de Rijntakken is topvervlakking binnen Nederland veel minder belangrijk, omdat hoogwaters hier langer duren en sneller naar zee lopen (de rivieren zijn korter). Voor de Rijntakken en de Bedijkte Maas is afvoercapaciteit de crux, die wordt bepaald door zowel de breedte van het winterbed (en de hydraulische ruwheid)

als de waterdiepte/-hoogte. Hier kan meer afvoercapaciteit ook met hogere dijken worden gerealiseerd, alhoewel die belangrijke nadelen hebben. Want de argumenten die voor Ruimte voor de Rivier golden, zijn nog steeds valide: lagere hoogwaterstanden betekenen kleinere kansen op dijkfalen, een minder snelle ontwikkeling van eventuele bressen en geringere gevolgen van overstromingen door langzamer instroom. Lagere hoogwaterstanden impliceren dus een minder gevaarlijke rivier. En een breder winterbed betekent een geringere gevoeligheid voor afwijkingen (onzekerheid) of verandering van de verwachte afvoer (een robuustere rivier) en biedt kansen voor natuurontwikkeling of andere ruimtelijke kwaliteitsimpulsen. De te maken hoofdkeus betreft dus **een eventuele voorkeursvolgorde van maatregelen**, als nadere invulling van het mantra 'krachtig samenspel van rivierverruiming en dijkversterking', waarbij primair wordt gestreefd naar een geleidelijk aflopende verhanglijn bij hoogwater (zonder knikken) en een zo robuust mogelijke rivier. Denk bijvoorbeeld aan 1) eerst zoveel mogelijk extra breedte met het oog op de lange termijn en meerwaarde (dijkverlaging, bypasses), 2) uiterwaardverlaging (bijv. geulen) alleen in weinig waardevolle of morfologisch dynamische situaties (Waal), en 3) dijkverhoging als sluitstuk. Vanuit hoofdkeus 2 is het evident dat extra afvoercapaciteit nooit gezocht mag worden in verruiming van het zomerbed (verdieping of verbreding).

### Over de volgorde der beslissingen bij het opstellen van alternatieven

De volgorde van beslissen is belangrijk, want hoofdkeus 3 (afvoerverdeling bij hoogwater) is bepalend voor de precieze opgave waar men in hoofdkeus 4 (afvoercapaciteit) bij de Rijntakken voor gesteld staat. Voor de Rijntakken moet 3 dus voor 4. Voor de niet-vertakkende Maas speelt afvoerverdeling geen rol, maar moet wel de topvervlakingscapaciteit van de Maasvallei worden gekend om de afvoercapaciteit van de Bedijkte Maas op te kunnen afstemmen.

<sup>2</sup> NB: Hogere dijken langs de Boven-Waal werkt averechts, want dan wordt de opstuwung richting het Pannerdens Kanaal alleen maar groter.



En alhoewel de afvoercapaciteit door de winterbeddimensies bepaald wordt, moeten keuzes over de bodemligging van de rivier eerst worden gemaakt, want het zomerbed maakt deel uit van het winterbed, zodat de bodemligging een randvoorwaarde vormt voor de dimensionering van rivierverruimingsmaatregelen (voorbeeld 1: hoe laag kunnen de kribben?; voorbeeld 2: wanneer stromen nevengeulen nog mee?) en dijkhoogten. Maar als bij de, immers gekanaliseerde, Maas wordt gekozen voor het slechts verplaatsen van sediment van uiterwaarden/weerden naar zomerbed en plassen (dus verschuivingen binnen het winterbed) om een ecologisch gunstiger verdeling van afvoer over zomer- en winterbed met natuurlijker hydrodynamiek te verkrijgen, dan hoeft ook daar niet te worden gewacht.

Volgorde der keuzes dus: 1, 2, 3, 4 voor de Rijntakken<sup>3</sup>, meteen 2 en 4 voor de Maas, maar in 4 met ruimtelijke volgordelijkheid van Maasvallei naar Bedijkte Maas<sup>4</sup>. Alle uitwerkingsdetails kunnen daarna pas goed worden ingevuld.

- 
- 3 Overigens kan men intussen voorkomen dat spijt ontstaat over maatregelen die de afvoercapaciteit vergroten door toetsing aan ‘redelijkerwijs in beschouwing te nemen alternatieven’. Zo ligt het voor de hand dat de Waal en IJssel in alle gevallen meer afvoer zullen moeten kunnen verwerken, terwijl dat voor de Nedertijn-Lek nog valt te bezien.
- 4 Voor de Maas geldt ten aanzien van het voorkomen van spijt, dat de topvervlakkings-capaciteit maar beperkt kan worden vergroot en de afvoercapaciteit van de Bedijkte Maas dus in alle gevallen groter moet.



# 1



Foto: Frans Klijn





# Inleiding



## Aanleiding tot een systeembeschouwing

---

Het programma Integraal Riviermanagement (IRM) heeft tot doel het Nederlandse rivierengebied toekomstbestendiger te maken. Klimaatverandering en de respons van het riviersysteem op eerder menselijk ingrijpen (vanaf de bedijking van de rivier) zetten het functioneren van de rivieren en de functies en waarden die de rivieren voor de maatschappij hebben (hun geo-ecosysteemdiensten) steeds meer onder druk. IRM streeft naar een riviersysteem dat duurzaam goed functioneert en aldus de gevraagde diensten duurzaam kan leveren. Voor de (her)inrichting en het beheer van het rivierengebied betekent dit dat interventies onderdeel moeten uitmaken van een logisch geheel, passend bij het gedrag van de rivier en ondersteunend aan de diverse functies en waarden zoals gespecificeerd voor een na te streven toekomstbeeld.

Welk toekomstbeeld wordt nagestreefd volgt deels uit staand beleid voor de inrichting van Nederland en het rivierengebied in het bijzonder. Voor een ander deel wordt het in het kader van IRM, met betrokkenheid van alle belanghebbenden langs de

Maas en Rijn takken, tot stand gebracht. Bij het formuleren van zo'n toekomstbeeld worden gewoonlijk de huidige toestand en de huidige generatie gebruikers en belanghebbenden als startpunt genomen, met de daar logisch bij behorende (beperkte) tijd- en ruimteschaal van beschouwing.

De geschiedenis leert echter dat rivieren vaak vele decennia, zelfs vele eeuwen, later nog reageren op menselijk ingrijpen. In rivieren heeft ieder ingrijpen namelijk onvermijdelijk gevolgen, soms op grote afstand van de ingreep zelf en vaak voor het systeem als geheel. En dus voor de diensten die het systeem kan leveren en de waarden die het heeft; zo niet nu of binnenkort, dan toch voor latere generaties. Zo voelen we steeds sterker de gevolgen van de bedijkingen van eeuwen geleden en van de normalisatie in de 19e eeuw: de topvervlakkings- en afvoercapaciteit zijn afgenomen, de rivierbodem in het zomerbed past zich aan (erosie in bovenstroomse riviertrajecten en aanzanding benedenstrooms) en de uiterwaarden slibben op. Een zichzelf versterkend proces met steeds grotere consequenties voor veilige hoogwaterafvoer, zoetwatervoorziening, scheepvaart, natuur en vele andere van (grond)waterstanden afhankelijke gebruiksfuncties, tot in de wijde omgeving.



Deze notie, gecombineerd met de vaststelling dat klimaatverandering eveneens een ontwikkeling is die een beschouwing op lange tijdschaal en grote ruimteschaal vergt, was reden voor deze systeembeschouwing. Met in het bijzonder aandacht voor langzame, soms nauwelijks waarneembare, maar onontkoombare systemische ontwikkelingen.

## Doel van dit rapport

---

Deze systeembeschouwing wil inzicht geven in hoe de riviersystemen Rijn en Maas op dit moment functioneren en hoe dit functioneren zich in de voorzienbare toekomst ontwikkelt. Het gaat daarbij vooral om het functioneren van het riviersysteem als geheel, in z'n complexe samenhang en op de schaal van hele riviertakken op Nederlands grondgebied, maar tegelijkertijd enerzijds onderdeel uitmakend van internationale stroomgebieden en anderzijds functies vervullend voor bijvoorbeeld de zoetwatervoorziening van 2/3 van ons land en in Europese transportnetwerken en Europese ecologische habitatnetwerken.

Daarbij gaat het niet zozeer om een neutrale beschrijving van hoe de rivieren functioneren<sup>5</sup>, maar veeleer om een duiding ervan voor de verschillende publieke functies en waarden die de maatschappij van de rivieren vraagt. Of anders: vanuit de geo-ecosysteemdiensten die de rivieren aan de Nederlandse samenleving leveren. Door deze bril bezien ontstaat een beeld van grenzen aan de draagkracht van het riviersysteem waar we soms nu al, soms in de toekomst, tegen aan lopen (wat gaat goed en wat gaat mis?).

Op basis van deze beschrijving en duiding wordt aangekaart wat de gevolgen zijn van aanpassingen aan het systeem gericht op het optimaliseren van één bepaalde functie of waarde voor andere functies en waarden, later of elders. Zo wordt een beeld verkregen van mogelijke conflicten tussen functies en waarden en kunnen dilemma's voor de besluitvorming worden geïdentificeerd. Maar ook kunnen evidente ontwikkelrichtingen worden afgeleid.

wTot slot wordt gestreefd naar een aanduiding van mogelijke systeemmaatregelen die bijdragen aan een beter functionerend systeem (indicatief, nog geen kwantitatieve uitwerking).

De systeembeschouwing beoogt aldus een bijdrage te leveren aan twee belangrijke stappen in het proces van alternatiefontwikkeling en-toetsing in IRM, nl. door:

1. Richtinggevende uitspraken over wat een goed functionerend systeem is ten behoeve van het ontwerpen/samenstellen van alternatieven,
2. Voorstellen voor criteria waarmee het functioneren van het systeem kan worden beoordeeld ten behoeve van de toetsing en vergelijking van individuele maatregelen en samengestelde alternatieven.

## Positionering in het IRM-proces: waar draagt de systeembeschouwing aan bij?

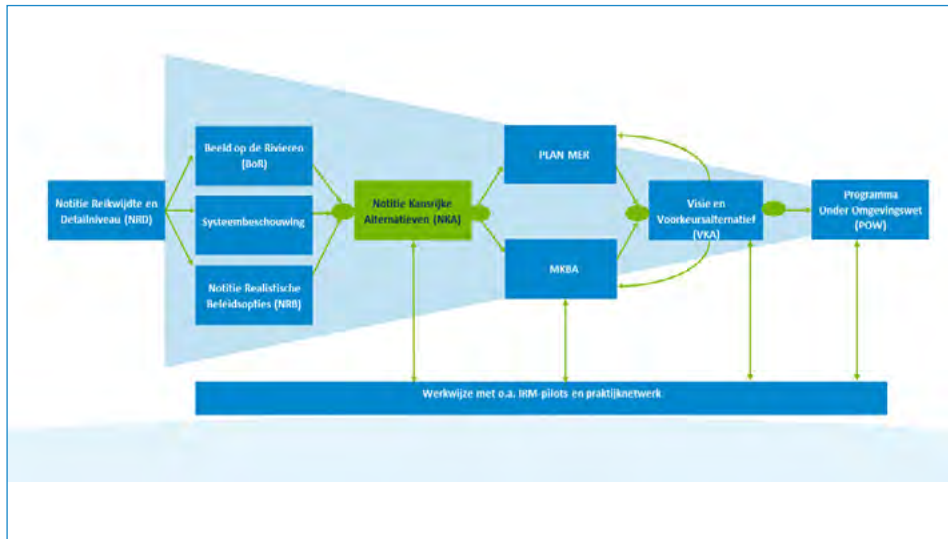
---

De systeembeschouwing vormt een bouwsteen voor IRM. Het levert primair inhoudelijke informatie die relevant is om tot een Notitie Kansrijke Alternatieven (NKA) te komen. Onderstaand schema toont de positie van de systeembeschouwing in het NKA-proces a.

De systeembeschouwing vormt aldus samen met de Nota Realistische Beleidsopties (NRB) en het beeld op de Rivier (BoR) een bouwsteen in het IRM-proces. Elk van deze bouwstenen levert een specifieke inbreng. Zo beschrijft de Nota Realistische Beleidsopties (NRB) de mogelijke beleidskeuzes ten aanzien van extra afvoercapaciteit en rivierbodempligging. De systeembeschouwing plaatst daar een lange-termijn- en grote-schaalperspectief naast en beschouwt de beleidsopgave vanuit de condities en het functioneren van het fysieke systeem en de voorzienbare toekomstige ontwikkeling, mede onder invloed van externe ontwikkelingen. Het BoR tenslotte beschrijft de behouds- en ontwikkelingswensen van gebruikers en belanghebbenden in rivieroevergemeenten, waterschappen en provincies.

---

<sup>5</sup> Daarvoor zijn Het Verhaal van de Rivier, ... van de Maas, ... van de Rijntakken en ... van het Sediment geschreven en bestaat het Platform Rivierkennis.



Figuur 3 Positionering systeembeschouwing in het NKA proces.

De systeembeschouwing levert voor de NKA de volgende relevante informatie:

- Een beschrijving van de toestand en de ontwikkeling van het systeem (klimaatverandering, rivierbodemonwikkeling, doorwerking op hydraulica (waterstanden, waterdiepte, afvoerverdeling)) en een duiding van de consequenties daarvan. Voor de korte en lange termijn.
- Een overzicht van systeemcondities die van belang zijn voor een goed functionerend riviersysteem. Dit is relevant voor het beoordelingskader dat wordt ontwikkeld om inrichtingsalternatieven aan te toetsen.
- Een beeld van de te behouden, te versterken of te ontwikkelen condities van het riviersysteem.
- Een overzicht van evidente ontwikkelrichtingen die bijdragen aan een goed functionerend systeem en van dilemma's waar doelstellingen onverenigbaar zijn, als hulpmiddel voor het maken van strategische beleidskeuzes.
- Een schets van mogelijke systeemmaatregelen die bijdragen aan een goed functionerend systeem vanuit één of meerdere systeemdiensten.
- Inzicht in welke maatregelen elkaar versterken of juist tegenwerken.
- Reflecties over een gewenste volgorde van beslissingen (in tijd en ruimte).

## Scope

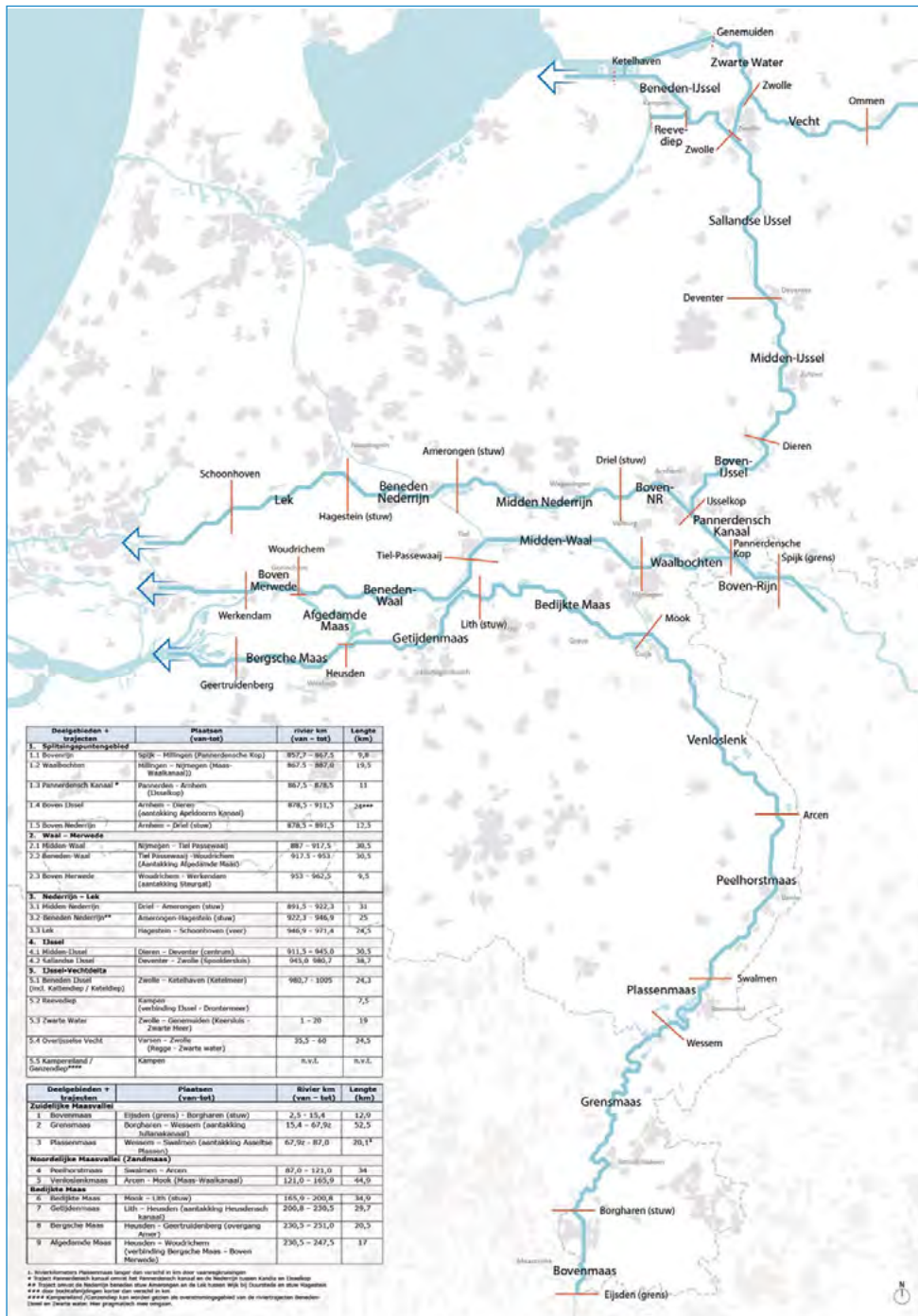
Het rijk is verantwoordelijk voor het duurzaam goed functioneren van het riviersysteem met het oog op een viertal publieke functies: hoogwaterafvoer, zoetwatervoorziening, vaarwegennetwerk en ecologische hoofdstructuur. Die publieke functies ondersteunen de duurzame maatschappelijke ontwikkeling van het rivierengebied en van Nederland in bredere zin (alle ruimtegebruiksfuncties en waarden).

Tegelijkertijd zijn de Nederlandse rivieren slechts onderdeel van internationale stroomgebieden. Een systeembeschouwing behoeft daarom een zekere afbakening: in geografische zin en in conceptuele. Maar zonder de grotere context uit het oog te verliezen.

- In geografische zin is de afbakening conform die van IRM als geheel, dat wil zeggen dat het *projectgebied* het rivierengebied van de Maas en Rijntakken is, van de grens met België en Duitsland tot de Biesbosch en met inbegrip van de IJssel-Vechtdelta, dus zonder de Rijn-Maasmonding (benedenrivierengebied) en het IJsselmeer. Vanzelfsprekend kan dit projectgebied alleen worden begrepen in de grotere context van 1) het hele stroomgebied van deze rivieren (*externe context* = scenario's, cf. Deltaprogramma) en 2) het voorzieningsgebied van zoetwater (delen van Limburg en Brabant, beide Hollanden, Friesland-Groningen), het gebied dat wordt beïnvloed via het grondwater (Hoge Zandgronden) (*raakvlak stroomaf* = 'watervragende regio's' (cf. DP-Zoetwater)) en het deel van Nederland dat vanuit de rivieren kan overstromen (*effectgebied*).
- In conceptuele zin is de afbakening die tot het fysieke systeem, dat wil zeggen het water en het land voor zover dat vanuit de rivieren kan onderlopen (Maasdal, IJsseldal, Centraal Rivierengebied incl. Krimpenerwaard, excl. Centraal Holland), met de water(kerende) infrastructuur en met inbegrip van de levensgemeenschappen van planten en dieren: kortweg het geo-ecosysteem. Vanzelfsprekend wordt de relatie tot het sociaal-economisch systeem erkend, maar dat wordt hier niet afzonderlijk beschouwd, noch de relatie met de 'droge' infrastructuur (met andere transportmodaliteiten dan scheepvaart).

Eenvoudig gesteld:

- **Wel:** veilige hoogwaterafvoer; **Niet:** 'meerlaagsveiligheid' (= Deltaprogramma Waterveiligheid + Ruimtelijke Adaptatie)
- **Wel:** zoetwatervoorziening; **Niet:** watervraag beïnvloeden door aanpassing landgebruik (= Deltaprogramma Zoetwater + Ruimtelijke Adaptatie).



## Aard van het rapport

Het rapport kijkt nadrukkelijk naar de lange-termijntoontwikkelingen, en wel om drie redenen:

1. Het deltaprogramma (DP) en het Nederlandse beleid inzake ruimtelijke ontwikkeling (Omgevingswet, NOVI), waar IRM deel van uitmaakt, beogen te anticiperen op voorzienbare ontwikkelingen en hebben duurzame ontwikkeling van ons land tot doel.
2. De klimaatveranderingen stoppen niet in 2050, maar zullen naar verwachting na die tijd eerder nog versnellen, hetgeen vraagt om vooruitkijken opdat wordt vermeden dat doodlopende wegen worden ingeslagen (*lock-in*, kans op spijt).
3. De ervaring heeft geleerd dat riviersystemen nog eeuwen na een ingreep kunnen reageren op die ingrepen en zich aldus sluipenderwijs in een ongewenste richting kunnen ontwikkelen. Met andere woorden: bezinning op uitgestelde effecten is vanuit duurzaamheidsperspectief vereist.

Het rapport beoogt ook nadrukkelijk naar het systeem als geheel te kijken. De reden daarvoor is al in de inleiding genoemd, namelijk dat gevolgen soms op grote afstand optreden of het systeem als geheel betreffen. En dan worden gevoeld door partijen die buiten beeld waren gebleven, ruimtelijk of in de tijd (volgende generaties). De systeem-beschouwing wil dus het bos in beeld brengen, in aanvulling op de vele bomen die al zijn geïdentificeerd in het BoR (door sectorale, lokale en regionale inbreng).

De voorliggende versie van de systeembeschouwing is het resultaat van fase 2, dat wil zeggen in hoofdzaak een uitwerking van wat al was geschetst in fase 1 (rapid prototyping), maar nu in de vorm van een volledig uitgeschreven tekst met meer kwantitatieve onderbouwing. Qua boodschappen zijn de afwijkingen ten opzichte van het prototype gering, maar wel zijn sommige getalswaarden geactualiseerd of is de duiding ervan iets aangepast.

Figuur 4 Het projectgebied van IRM en de trajectindeling





Voor de onderbouwing is gebruik gemaakt van kennis die in de afgelopen jaren is gegenereerd (met name memo's en rapporten voor DP-rivieren, de Lange-TermijnAmbitie Rivieren (LTAR), en andere relevante onderzoeken van Rijkswaterstaat, LNV, WEnR, en Deltares) en van de meest recente meetgegevens van Rijkswaterstaat. Er is voor deze systeembeschuwing niet op grote schaal nieuw onderzoek gedaan; hetgeen mede verklaart dat in het rapport enkele uiterst relevante onderzoeksvragen worden geïdentificeerd die in de komende jaren zouden moeten worden beantwoord. Deze worden opgenomen in de Kennisagenda Rivieren van IRM.

## Opzet

---

**Hoofdstuk 2** gaat over externe ontwikkelingen, dat wil zeggen ontwikkelingen waar in het kader van IRM niets aan te doen valt: een veranderend afvoerregime van de rivieren dat als gegevenheid moet worden beschouwd en de majeure opgave voor IRM vormt. Het gaat dus om de gevolgen van klimaatverandering en van ontwikkelingen in de stroomgebieden voor het afvoerregime van de rivieren en om de implicaties van de zeespiegelstijging.

**Hoofdstuk 3** gaat vervolgens in op de toestand en ontwikkelingen van de Rijn en Maas in het plangebied van IRM. Het gaat dus om de ontstane toestand en nog voortgaande veranderingen die het gevolg zijn van een respons van het riviersysteem op menselijk

ingrijpen in het verleden. In dit hoofdstuk worden deze toestand en ontwikkelingen niet alleen kort beschreven (want daarover zijn al veel – en veel gedetailleerdere – rapporten beschikbaar), maar worden ze vooral geduid, door aan te geven welke functies en waarden er nadeel van ondervinden.

**Hoofdstuk 4** reflecteert op de hoofddoelen van het rivierbeheer, zoals door de rijksoverheid vastgelegd vanuit nationaal perspectief. Die reflectie grijpt terug op de oorspronkelijke bedoelingen, in plaats van op de concrete uitwerking in getalsnormen, vanuit de gedachte dat voor de lange termijn de doelen (of grondslagen) belangrijker zijn dan de – tijdelijke – uitwerking voor operationeel rivierbeheer.

In **hoofdstuk 5** worden vanuit die hoofddoelen en met het oog op zowel de gegeven externe als zelf-veroorzaakte ontwikkelingen evidente ontwikkelrichtingen benoemd (ontwerpprincipes) evenals dilemma's, waar functies en waarden tegengestelde eisen/wensen hebben over hoe de rivier eruit zou moeten zien, c.q. zou moeten worden ingericht. Dat vraagt keuzes, die in dit rapport voor het voetlicht worden gebracht.

**Hoofdstuk 6** tenslotte gaat in op de afhankelijkheid van beslissingen zoals die voortkomt uit terugkoppelingen in het gedrag van het riviersysteem. Op grond daarvan worden suggesties gedaan over een logische volgorde van beslissen, opdat geleidelijk duidelijkheid ontstaat over het speelveld waarbinnen vrij kan worden gedacht, maar ook over de kaders waar niet buiten mag worden gespeeld.





Foto: Frans Klijn

# 2





# Klimaatverandering noopt tot aanpassingen



## Het afvoerregime van de grote rivieren verandert

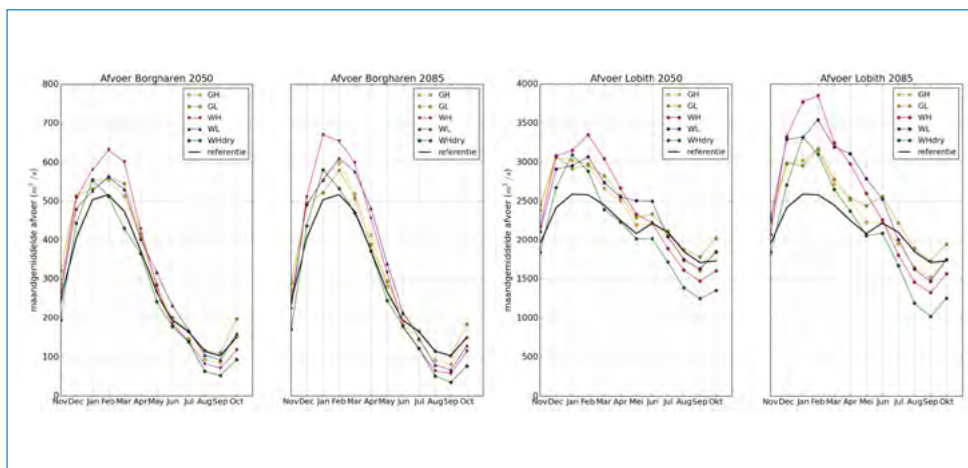
Het afvoerregime van de grote rivieren wordt grotendeels bepaald door het klimaat en land- en watergebruiksoontwikkelingen in het buitenland. Volgens alle klimaatscenario's (KNMI '14) leidt de klimaatverandering tot nattere winters en in 4 van de 5 scenario's wordt verwacht dat er in de toekomst ook sprake zal zijn van drogere zomers. Dat is het geval in heel Noordwest-Europa, en dus ook in de stroomgebieden van Maas en Rijn. En het beïnvloedt dus het afvoerregime van die rivieren.

Hoe dit afvoerregime verandert, is geïllustreerd in [Figuur 5](#), waarin de verwachte maandgemiddelde afvoeren van de Maas en de Rijn zijn getoond voor 2050 en tegen het eind van de eeuw. Ter vergelijking is in beide figuren ook het huidige afvoerregime getoond (in zwart). Er

is te zien dat in alle scenario's en in beide rivieren deze maandgemiddelde afvoeren 's winters naar verwachting hoger worden, en 's zomers juist lager (Sperna-Weiland et al., 2015; Klijn et al., 2015). In de prognoses voor de Rijn valt ook op dat de tweede piek in juni die deze rivier nu nog kent door sneeuwsmelt in de bergen minder kan worden of zelfs geheel verdwijnt: de Rijn wordt steeds meer regenrivier.

Voor de Rijn betekent dit dat zomerhoogwaters zeldzamer zullen worden en voor beide rivieren nemen de verschillen tussen (hoge) winterafvoer en (lage) zomerafvoer toe. Dit betekent gemiddeld grotere waterstandsverschillen in de rivier tussen de seizoenen en een verandering van de milieuomstandigheden voor natuur in de uiterwaarden en op de weerden (standplaatseigenschappen/ habitatkwaliteit). In ecologische termen: de hydrodynamiek van de rivieren over de jaargetijden neemt toe.





Figuur 5 Maandgemiddelde afvoeren van Maas en Rijn in 5 klimaatscenario's (naar KNMI '14) in 2050 en tegen het eind van de eeuw (2085) in vergelijking met de huidige waarden (zwarte lijnen) (Sperna-Weiland et al., 2015; figuren uit Klijn et al., 2015).

Tot zover over de maandgemiddelden. Maar wat betekent de klimaatverandering voor de extremen die tot problemen kunnen leiden: hoogwaters en laagwaterperioden? Vooral nog wijzen de prognoses erop dat de Maas en Rijn te maken krijgen met frequentere en grotere hoge rivierafvoeren. En met frequentere en langduriger lage rivierafvoeren (Sperna-Weiland et al., 2015). Het eerste is het geval in alle scenario's, het tweede treedt in sommige scenario's niet op. Op die zorgwekkende hoog- en laagwaters wordt hieronder nader teruggekomen.

Eerst stellen we echter vast dat het rivierbeleid in Nederland op deze **externe ontwikkelingen** geen invloed heeft. Alleen door internationaal klimaatbeleid kan de ontwikkeling van het afvoerregime nog substantieel worden beïnvloed. Maar de ontwikkelingen in het afvoerregime van de Maas en Rijn hebben wel grote consequenties voor het rivierengebied en – waar het gaat om de zoetwatervoorziening – voor heel Nederland. Want als we niets doen kan dat leiden tot forse economische schade, tot maatschappelijk ongerief en tot onherstelbare schade aan natuur en landschap (zie bijv. de ervaringen in de jaren 2018-2020). Deze ontwikkelingen vragen daarom om aanpassingen in het riviersysteem; **noodzakelijke aanpassingen**.

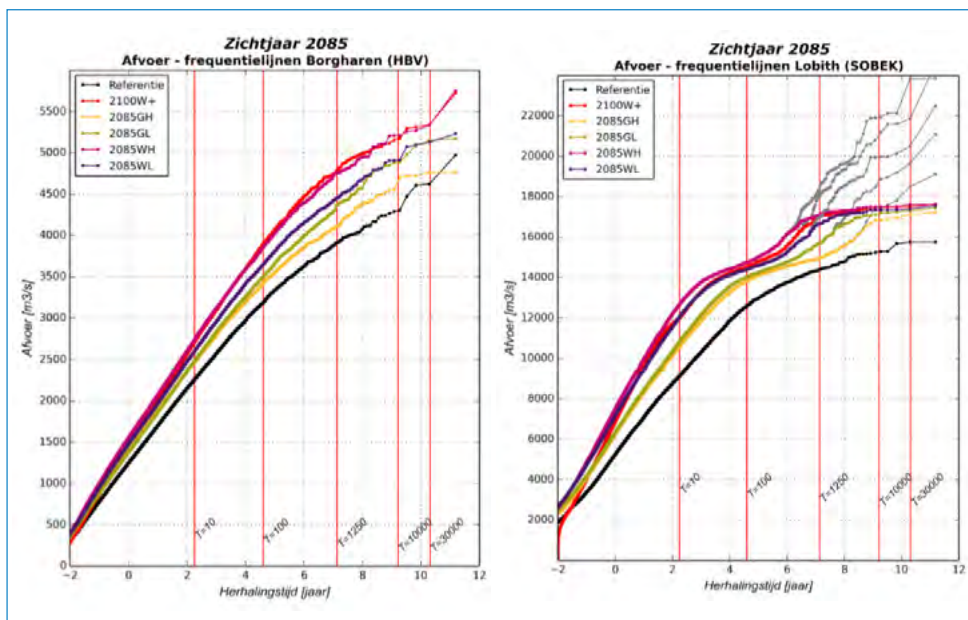
## Hoogwaters worden frequenter en hoger

Volgens de prognoses van het KNMI en Deltares (Sperna-Weiland et al., 2015) leidt de klimaatverandering tegen het einde van de eeuw tot frequentere en grotere hoogwaterafvoeren, zowel op de Maas als op de Rijn (Figuur 6).

Afhankelijk van het klimaatscenario en de kans van optreden worden voor de Maas in het relevante afvoerbereik circa 5-25% grotere hoogwaterafvoeren verwacht dan nu, bij een gegeven kans van optreden. Als uitgangspunt voor lange-termijnplanning is het verdedigbaar voornamelijk uit te gaan van een toename van 10-20% tegen het eind van de eeuw.

Voor de Rijn gaat het om een toename die in het extreme bereik 10-20% grotere afvoeren bedraagt, maar de procentuele toename is groter in het middelgrote afvoerbereik (eerder 20-40%). Voor het hogere afvoerbereik kan als verdedigbaar uitgangspunt voornamelijk worden uitgegaan van 10-15% meer tegen het eind van de eeuw (Figuur 6).

Het verschil tussen de Rijntakken en de Maas komt voort uit het feit dat de Rijn (voornamelijk) een soort maximumafvoer kent, doordat het in Duitsland al eerder overstroomt en een afvoergolf dus wordt afgetopt. Dat verklaart de afvlakking van de getoonde curves voor de Rijn (Figuur 6). Daarbij moet worden opgemerkt dat het overlopen of bezwijken van de dijken in Duitsland ons niet alleen ontlast, maar wel degelijk ook tot overstromingen in Nederland kan leiden, namelijk via de Düffelt en Ooijpolder (linkeroever van de Rijn) of via de Oude Rijn (Doetinchem) of het Rijnstrangengebied (rechteroever van de Rijn). Rijkswaterstaat en het Waterschap Rijn & IJssel hebben daar al vele jaren aandacht voor en zijn zich bewust van het feit dat voor Nederland cruciale 'systeemdijken' in Duitsland liggen (zie ook Vis et al., 2001 en Van der Most & Klijn, 2013).



Figuur 6 Prognoses voor de hoogwaterafvoeren van Maas (Borgharen) en Rijn (Lobith) (afgezet tegen kans van optreden) tegen het eind van deze eeuw in 5 klimaatscenario's (Klijn et al., 2015; naar Sperna-Weiland et al., 2015).

De Maas kent geen significante aftopping voor de Nederlandse grens, omdat de rivier daar door een steil dal tussen de heuvels van de Belgische Ardennen stroomt en er in Wallonië maar heel weinig bergingscapaciteit is; het water kan daar niet in grote hoeveelheden zijdelings wegstromen en zo tijdelijk worden opgehouden, waardoor de piek afvlakt. Langs de Grensmaas, in Vlaanderen, is wel bergingscapaciteit, maar daar rekenen we niet mee omdat Vlaanderen stelt dat ze zullen zorgen dat de dijken zullen keren, 'wat er ook gebeurt'. In Nederland zelf is er wel sprake van significante topvervlakking in de Maasvallei in Limburg (De Jong & Asselman, 2019), waardoor de piekafvoeren die de Bedijkte Maas bereiken beduidend lager zijn dan die bij Maastricht passeren. Dat kan enkele honderden m<sup>3</sup>/s schelen. Er is dus sprake van een **afhankelijkheid** in de vorm van een hoogwaterafvoer op de Bedijkte Maas die afhankelijk is van of en in hoeverre er **topvervlakking** kan optreden in de Maasvallei. Of in andere woorden: maatregelen in de Maasvallei hebben invloed op de hoogwaterafvoer die de Bedijkte Maas te verwerken krijgt. Dit vraagt om alertheid op mogelijke afwenteling (topvervlak-

king stroomopwaarts → benodigde afvoercapaciteit stroomafwaarts). Hierop wordt teruggekomen.

De door de klimaatverandering toenemende hoogwaterafvoer betekent dat het vergroten van de hoogwaterafvoercapaciteit van de grote rivieren **één van de grootste opgaven** is voor Nederland, want 10-20% meer rivierafvoer kunnen verwerken vraagt heel veel. Voor de Maas is de opgave betreffende hoogwaterafvoercapaciteit door de klimaatverandering grotendeels gegeven. Er is immers maar één riviertak. Voor de Rijntakken is de precieze opgave per riviertak echter afhankelijk van de vraag hoe de Bovenrijn-afvoer wordt verdeeld over de drie riviertakken. Met andere woorden: bij de Rijntakken is de klimaatopgave voor afvoercapaciteit per riviertak kleiner of fors groter dan de genoemde 10-15%, **afhankelijk** van de **hoogwaterafvoerverdeling** waar we voor kiezen. Momenteel geldt immers nog een beleid 'Lek ontzien', hetgeen betekent dat de extra afvoer moet worden verdeeld over de Waal en IJssel. Deze afhankelijkheid maakt het dus nodig eerst vast te stellen hoe een hoogwaterafvoer over de drie Rijntakken moet worden verdeeld; en te borgen dat dat ook werkelijk zo gaat. Op deze afhankelijkheid (afvoercapaciteit per Rijntak ← afvoerverdeling splitsingspunten bij hoogwater) wordt uitgebreid teruggekomen.



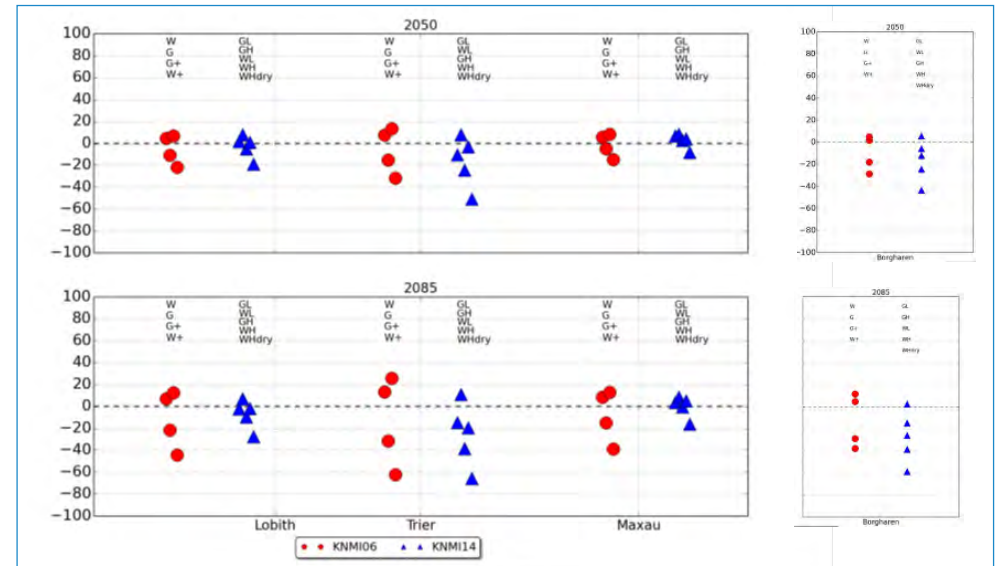


## Laagwaters worden frequenter en langduriger

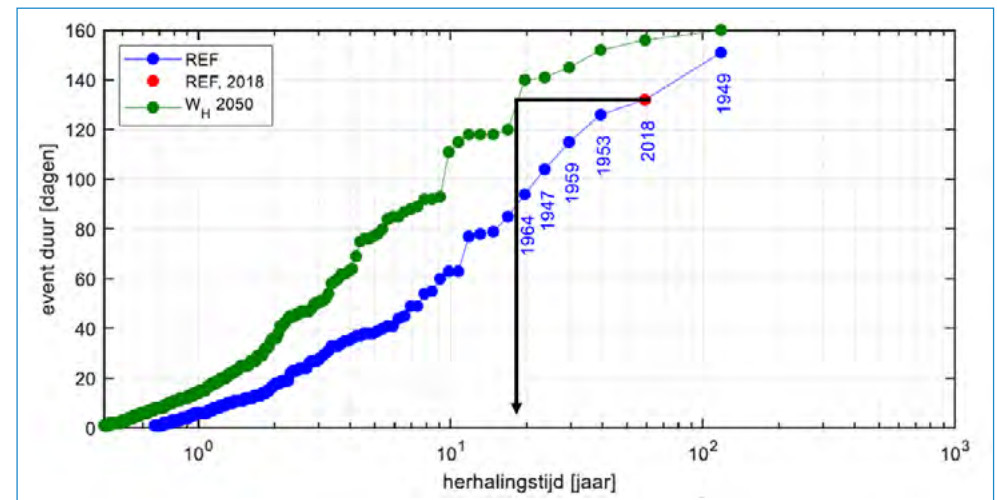
Volgens de al genoemde prognoses van het KNMI en Deltares (Sperna-Weiland et al., 2015) kan de klimaatverandering tegen het einde van de eeuw ook leiden tot veranderende laagwaterafvoeren. Maar het beeld is minder eenduidig dan dat voor de hoogwaterafvoer, wat anticiperen lastiger maakt. Dat komt doordat het in alle scenario's op jaarbasis weliswaar natter wordt (vandaar die frequentere en hogere hoogwaters) – hetgeen de grotere verdamping door hogere temperaturen compenseert –, maar er in sommige scenario's lange droge zomers kunnen voorkomen door stabiele hogedrukgebieden boven West-Europa die de aanvoer van vochtige lucht blokkeren of afbuigen naar buiten het stroomgebied van de Rijn en Maas. Een paar van die droge zomers op rij kan door het 'geheugen' in de stroomgebieden de lage rivierafvoeren sterk beïnvloeden; die worden steeds lager.

Het betekent dat, afhankelijk van het klimaatsscenario, de laagwaterafvoeren van de Rijn en Maas ongeveer gelijk kunnen blijven, maar ze in andere scenario's significant afnemen. De Maas kan, als regenrivier, tegen het eind van de eeuw met een tot 40 – 60% lagere afvoer worden geconfronteerd (en die is al zeer laag); de Rijn kan bij Lobith tegen het eind van de eeuw tot 30% lagere afvoeren kennen (Figuur 7). En lage afvoeren kunnen wel anderhalf keer zo lang gaan duren (Figuur 8).

Lagere laagwaterafvoeren hebben op de vrij-afstromende rivieren gevolgen voor de scheepvaart, voor landgebruik en natuur in de verdrogende uiterwaarden en voor de natuur en recreatiemogelijkheden in de rivieren zelf. In de gestuwde rivieren leiden geringe waterafvoeren tot o.a. een slechtere waterkwaliteit en beperktere vismigratiemogelijkheden omdat de stuwen nog langer dicht staan. Maar lagere laagwaterafvoeren hebben – en dat is in absolute zin mogelijk het belangrijkste – gevolgen voor de zoetwatervoorziening van ongeveer tweederde deel van ons land (en dus een groot aantal gebruiksfuncties en waarden: peilbeheer in laag-Nederland, verziltingsbestrijding en doorspoeling, landbouw, industrie, drinkwatervoorziening, koelwater, natuur, ...). In hoofdstuk 4 gaan we daar nader op in.



Figuur 7 Procentuele afname van de afvoer gedurende de 7 dagen met laagste afvoer in verschillende klimaatscenario's in 2050 (boven) en tegen het eind van de eeuw (onder). Links Rijn (3 locaties), rechts Maas (Borgharen). (uit Klijn et al., 2015, naar Sperna-Weiland et al., 2015).



Figuur 8 De kans van optreden van een geringe rivierafvoer (uitgedrukt als aantal aaneengesloten dagen met een Rijnaflow lager dan 1100 m<sup>3</sup>/s), zoals in 2018, kan in het droogste klimaatsscenario (WH-dry) toenemen van 1/60 per jaar naar 1/20 per jaar. Of ook: bij dezelfde kans van optreden zal een laagwaterperiode langer gaan duren (geen 130 dagen, maar bijna 160) (Kramer et al., 2019).



Enkele concrete voorbeelden van gevolgen van lagere waterafvoeren zijn:

- Op de gestuwde Maas kunnen lek- en schutverliezen leiden tot lagere peilen in stuwpannen of lateraalkanalen. Lagere stuwpeilen betekenen minder waterbeschikbaarheid en mogelijk geringere vaardiepte.
- De zoetwatervoorziening via de Midden-Limburgse en Brabantse en kanalen van grote delen van Noord-Brabant komt in het gedrang (peilhandhaving wordt lastig, sproeiverboden uit oppervlaktewater zullen vaker nodig zijn, grondwaterstanden dalen).
- De vaardiepte op de vrij afstromende Waal en IJssel zal vaker tekort schieten, en de IJssel zal daardoor ook vaak te smal zijn (De Jong & Van der Mark, 2021).
- Afvoertekorten zullen vaker leiden tot te lage peilen in het IJsselmeer en tot achterwaartse verzilting in het noordelijk deltabekken (en daaruit voortvloeiende innamestops en gerelateerde droogteproblemen in daarvan afhankelijke delen van het land; deze problematiek wordt onderzocht in het kader van het Deltaprogramma-Zoetwatervoorziening (zie Mens et al., 2020)). De zoetwatervoorziening vanuit de Rijntakken komt dus ook in het gedrang.
- Door lagere waterstanden op de rivieren worden ook de grondwaterstanden in de uiterwaarden en de wijdere omgeving beïnvloed (met mogelijk effecten voor natuur en landbouw).

Voor IRM is het belangrijk vast te stellen dat met aanpassingen aan het rivierbeleid **aan absolute watertekorten niets kan worden gedaan**. Als de rivieren 's zomers niet meer water aanvoeren, dan is dat een gegeven, net zoals wanneer het niet regent. Met rivierbeleid kan binnen ons land wel:

- door aanpassing van de inrichting worden **bijgedragen aan het bevaarbaar houden** van de vrij-afstromende rivieren;
- met de inrichting van het rivierengebied **de verdeling** van de nog beschikbare zoetwateraanvoer over het land via de rivieren worden beïnvloed (geleiden we meer naar het noorden van het land via het IJsselmeer, of naar het westen, waar het de zoutindringing tegengaat?);
- op de gestuwde rivieren meer water langer worden **vastgehouden**; en
- geprobeerd worden na een hoogwater water langer in de uiterwaarden vast te houden, bijv. met kades en klepduikers, en zo grondwaterstands daling te verminderen.

Op enkele van deze mogelijkheden wordt verderop in dit rapport uitgebreider ingegaan, omdat IRM ook als opgave heeft zo goed mogelijk te reageren en te anticiperen op externe ontwikkelingen die nopen tot aanpassing van de inrichting en het beheer van de rivieren. Op systeemniveau gaat het dan vooral om de bevaarbaarheid van het hoofdvaarwegennetwerk en de waterverdeling over Nederland.



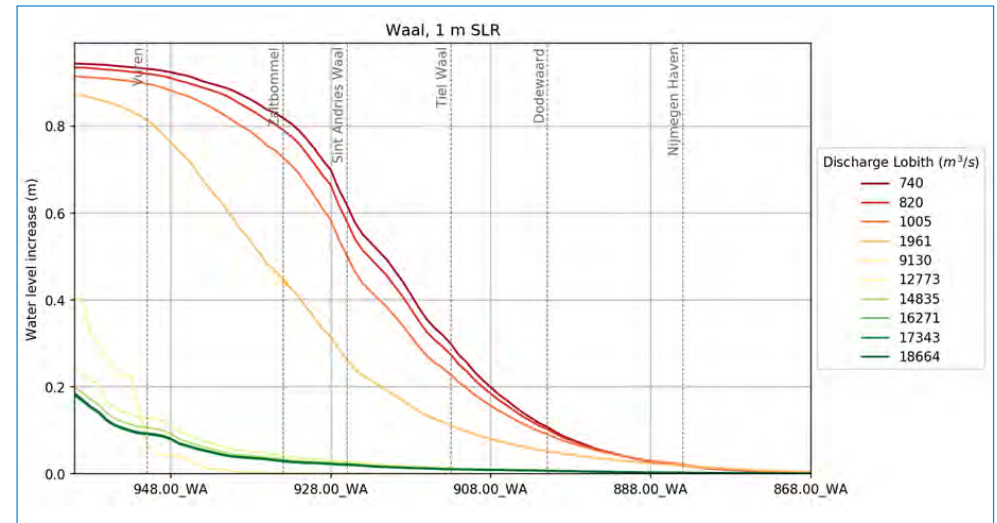
## De zeespiegelstijging bemoeilijkt een vrije afstroming naar zee

In het benedenrivierengebied stijgen de waterstanden mee met de zeespiegel, waardoor de stuwkrommes die gebruikt worden voor het vaststellen van waar de overgang bovenrivieren-benedenrivieren ligt, eveneens landinwaarts opschuiven (memo Deltares voor DP-Rijnmond-Drechtsteden). Er wordt in het Deltaprogramma uitgegaan van prognoses over de zeespiegelstijging die variëren van 25 tot 80 cm ten opzichte van 1995 tegen het eind van de eeuw (zichtjaar 2085; zie Mens et al., 2020). Deze prognoses zijn gebaseerd op de KNMI'14 scenario's en zijn sterk afhankelijk van het succes van het voorkómen van klimaatverandering door mitigatiebeleid (cf. het Parijs-akkoord). In recent onderzoek wordt de mogelijkheid van een veel grotere zeespiegelstijging niet uitgesloten (zie bijv. Haasnoot et al., 2016), maar over de kans daarop bestaat geen consensus. Er kan dus worden gesteld dat alles erop wijst dat de zeespiegel hoger zal worden en zeker niet lager; maar dat de snelheid van de stijging onzeker is. Dat is voor het Deltaprogramma reden vooralsnog te blijven uitgaan van de genoemde bandbreedte.

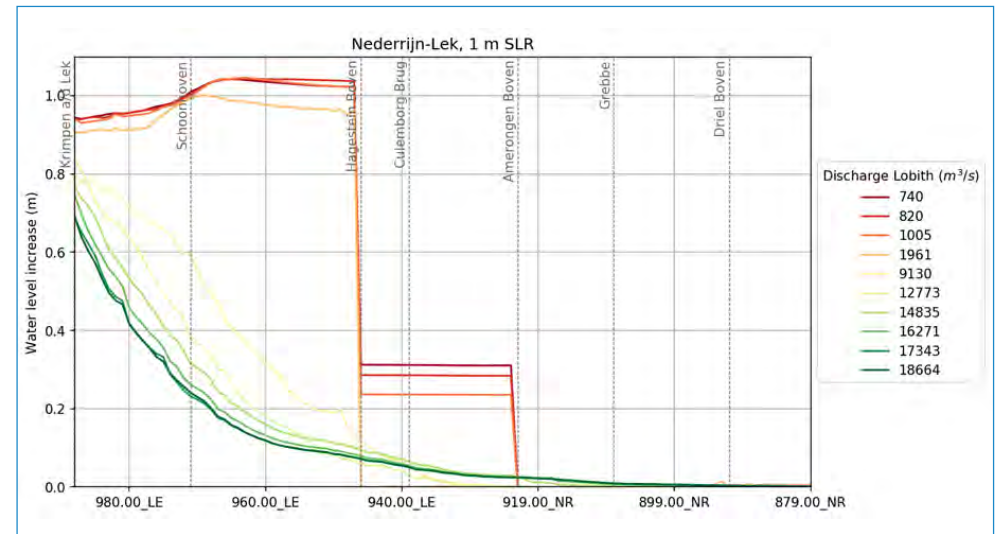
Door hogere waterstanden in het benedenrivierengebied:

- zal de bergingscapaciteit in het benedenrivierengebied afnemen doordat de gemiddelde waterstanden hoger zullen worden (relevant voor Deltaprogramma-Rijn-Maasmonding);
- zal de getijdewerking op de Waal en Maas verder landinwaarts merkbaar worden;
- zullen de hoogwaterstanden tot verder landinwaarts mede door de zeespiegel worden bepaald (Lek, Waal en Maas), waardoor het gebied waar rivierverruimingsmaatregelen nog effectief de voor dijkontwerp relevante hoogwaterstanden kunnen verlagen ook afneemt.

De invloed van de zeespiegel op de waterstanden op de rivieren verschilt sterk, afhankelijk van de rivierafvoer; de invloed is het grootst bij lage rivierafvoer en het geringst bij hoge (Figuur 9 en Figuur 10).



Figuur 9 Waterstandsverhoging op de Waal bij verschillende rivierafvoeren als gevolg van 1m zeespiegelstijging (memo J. de Jong, Deltares, 2020). Hiervoor is gekeken naar de maximale waterstand van de getijdencyclus.



Figuur 10 Waterstandsverhoging (t.o.v. de huidige) op de Lek en Nederrijn bij verschillende rivierafvoeren als gevolg van 1m zeespiegelstijging (memo J. de Jong, Deltares, 2020).

Dat wil zeggen dat de waterstandsverschillen het grootst zijn bij lage rivierafvoer en het verst landinwaarts reiken. Bij extreem hoge rivierafvoeren (boven 16.000 m<sup>3</sup>/s) leidt een 1 m hogere zeespiegel tot ong. 10 cm hogere waterstanden bij Vuren (op de Waal) en tot circa 30 cm hogere waterstanden bij Schoonhoven (op de Lek) (Figuur 9 en Figuur 10). Verder stroomopwaarts neemt de invloed op de hoogwaterstanden snel af tot verwaarloosbaar, maar de gemiddelde en lage rivierwaterstanden kunnen bij Zaltbommel 0,5 tot 0,8 m hoger worden, en bij Tiel 0,1 tot 0,3 m hoger. Let wel: bij 1 m hogere zeespiegel.

Op de gestuwde Lek reikt de invloed van de zee op de waterstanden zelden voorbij stuw Hagestein (stuwpeil 3,0 m), behalve natuurlijk bij grote rivierafvoeren als de stuwen open staan (Figuur 10). En voor de Maas geldt iets vergelijkbaars, want ook die rivier is gestuwd, waardoor de waterstanden bij lage rivierafvoeren niet sterk door de zeespiegel worden beïnvloed; behalve natuurlijk op het ongestuwde stroomafwaartse deel: de Bergsche Maas en de Bedijkte Maas tot stuw Lith (stuwpeil 4,9 m). Maar ook voor de Maas geldt dat het voor de langere termijn gewenst is de voor dijkontwerp relevante hoogwaterstanden bij een hogere zeespiegel te berekenen (zoals in het kader van het BOI (Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium) voorzien).

De zeespiegelstijging bemoeilijkt ook de lozing naar zee vanuit het IJsselmeer. Maar omdat is besloten vooralsnog (tot in ieder geval 2050) de waterstanden in het IJsselmeer met pompen op de Afsluitdijk zoveel mogelijk te handhaven, zal de IJssel de komende decennia nog weinig tot geen invloed van een verhoogde zeespiegel ondervinden. Tegen het eind van de eeuw zal het handhaven van het IJsselmeerpeil echter steeds lastiger worden en (veel) meer pompcapaciteit (en energie) vergen. Dan kunnen ook de waterstanden op de IJssel worden beïnvloed, zeker als zou worden besloten tot (partieel of volledig) meestijgen.

De hogere lage en gemiddelde rivierwaterstanden in de Rijn-Maasmonding zullen leiden tot het geleidelijk verdrinken van buitendijkse gebieden in het benedenrivierengebied, zoals Tiengemeten en delen van de Biesbosch, omdat de opslibbing langzamer gaat dan de zeespiegelstijging (zie Verschelling, 2018). Deze gebieden vallen buiten het plangebied van IRM.







Foto: Tom Buijse

Het riviersysteem ontwikkelt zich ongunstig en bevordering van één geo-ecosysteemdienst gaat vaak ten koste van andere





## Het riviersysteem ontwikkelt zich ongunstig en bevordering van één geo-ecosysteemdienst gaat vaak ten koste van andere



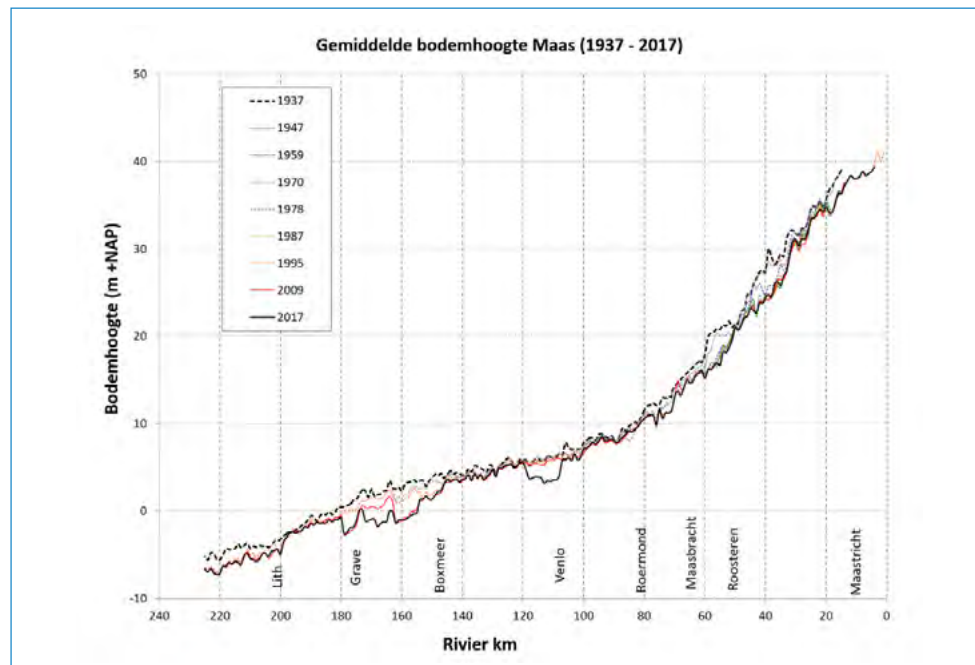
### De bodem van het zomerbed is sterk gedaald en de (laag)waterstanden dalen mee

Door de normalisaties (plaatselijk met bochtafsnijdingen) is de bodem van het zomerbed van de rivieren door erosie steeds dieper komen te liggen. Dat proces van insnijding is door de mens veroorzaakt, doordat werd voorkomen dat de riviergeul zich kon verplaatsen en de uiterwaarden lateraal kon eroderen. In zo'n geval neemt de rivier sediment uit de bodem op en gaat zich insnijden (Het Verhaal van de Rivier (Anonymus, 2017)). Intussen leverde de stroomgebieden van de Rijn en Maas ook vrijwel geen nieuw sediment meer, door de kanalisatie met stuwen van de Oberrhein in Duitsland en de kanalisatie van vrijwel de gehele de Maas. De insnijding van onze rivieren is nog versterkt door zand- en grindwinning uit het zomerbed.

Tegelijkertijd zijn de uiterwaarden en weerden opgeslibd. Die opslibbing van de uiterwaarden is nog versterkt door de bedijking, waardoor sediment niet meer over grotere oppervlakken kon worden afgezet, maar uitsluitend in de resterende uiterwaarden. Al met al is er zo sprake geweest van een zichzelf versterkend proces, want als er op jaarbasis verhoudingsgewijs meer water door het zomerbed gaat en minder door het winterbed (de uiterwaarden) resulteert dat in snellere uitschuring. Met het veel lager komen te liggen van de rivierbodem vertraagt dat proces nu, door tegenkoppelingen: de hellingshoek (gradiënt) neemt af en dus de stroomsnelheid. Maar het einde is nog niet in zicht en de consequenties zijn inmiddels zeer manifest. Die consequenties hangen deels samen met feit dat als de rivierbodem zakt, de waterstanden bij lage tot middelhoge rivierafvoer ook dalen. En wel proportioneel. Tenzij de rivier gestuwd is, zoals de Maas en Nederrijn-Lek.



De bodem van de Maas ligt op verscheidene plaatsen wel 3 m lager dan een eeuw geleden (Figuur 11). In deze rivier komt dit vooral door zand- en grindwinning en door verruiming van het zomerbed ten behoeve van scheepvaart en hoogwaterafvoer (Lelywerken, eerste helft 20e eeuw; Maaswerken, recent), want morfologisch is deze rivier niet erg actief meer. Ten eerste komt er ook hier geen/nauwelijks bodemsediment meer het land binnen (eigenlijk alleen nog zwevend slib), ten tweede is het zomerbed zo ruim bemeten dat de stroomsnelheden relatief gering blijven en er geen grootschalige sedimentverplaatsingen meer optreden (zie Ten Brinke, 2019 en Verhaal van het Sediment, website I&W). De zomerbedverdiepingen in het kader van Maaswerken hebben de sedimenthuishouding verder verstoord, omdat deze als zandvang werken en doorgaand transport verhinderen. Ook de vele diepe plassen die door de zand- en grindwinning zijn ontstaan werken als zandvang.

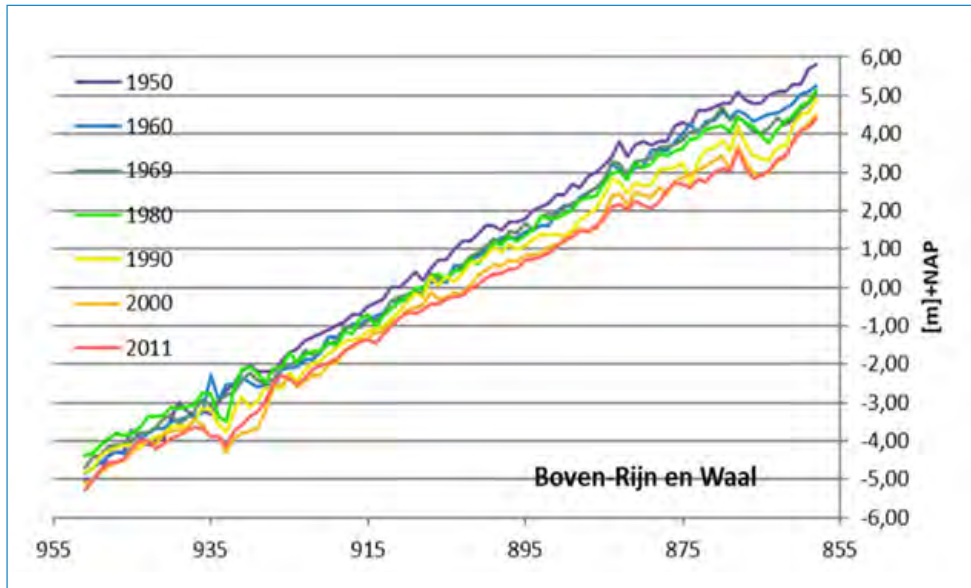


Figuur 11 Het rivierbed van de Maas ligt op sommige plaatsen meer dan 3 meter lager dan in 1937, voornamelijk door zand- en grindwinning en door zomerbedverdiepingen in het kader van Maaswerken (Uit: Verhaal van het sediment; Bron meetgegevens: Rijkswaterstaat).

Doordat de Maas is gestuwd zakken de waterstanden op deze rivier niet mee met de bodem en kunnen zelfs de laagwaterstanden nog wel vrijwel steeds worden gehandhaafd. Maar dat wil niet zeggen dat hier geen problemen zijn; we komen er op terug.

De Boven-Rijn en Waal (Figuur 12) en het Pannerdens Kanaal en de IJssel (Figuur 13) zijn in de afgelopen eeuw over een grote lengte ruim 1 tot plaatselijk 2 m lager komen te liggen, het sterkst aan de bovenstroomse zijde. Als we een langere periode beschouwen, ongeveer vanaf de eerste normalisatie van de Waal (tot een normaalbreedte van toen nog 360 m), is het nog meer: tussen 1870 en 1995 is de rivierbodem van de Boven-Waal zelfs 3 m lager komen te liggen (Frings et al., 2009). Maar in deze eerste periode is de rivier natuurlijk ook smaller gemaakt zodat de lagere rivierbodem zich niet direct in een lagere waterstand vertaalde. Het proces van uitschuring gaat op de vrij afstromende Waal nog steeds door, maar neemt in snelheid af door tegenkoppelingen, waaronder een flauwer wordend verhang, vergroving van het sediment en recentelijk de kribverlaging op de Midden-Waal. Het omslagpunt waar erosie overgaat in sedimentatie ligt tegenwoordig ongeveer bij Tiel (km 915).

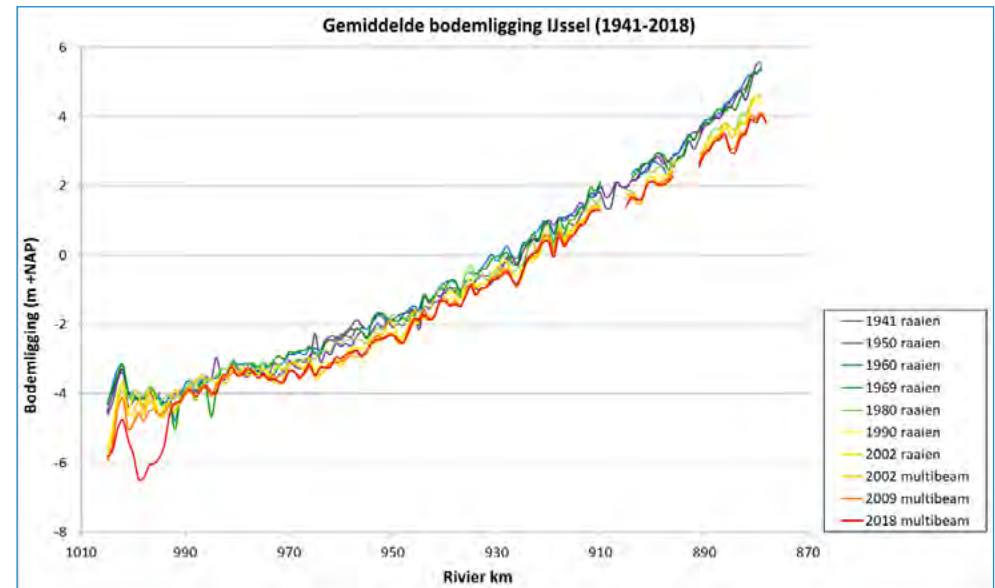
Voor de IJssel is het beeld vergelijkbaar met dat op de Waal, maar doordat de Boven-IJssel door bochtafsnijdingen (in 1954 en 1968) ongeveer 17 kilometer korter is gemaakt, is deze rivier ook nog eens veel steiler geworden (steiler dan in Figuur 13 voor de onderste 6 lijnen het geval lijkt). Dat verklaart de extra snelle verlaging van de rivierbodem tussen 1969 en 1980. Het verklaart ook de sterk verlaagde midden- en lage waterstanden rond Arnhem.



Figuur 12 De bodem van de Bovenrijn en Waal is sterk gedaald door uitschuring, met inmiddels meer dan 2 m sedert 1950 bij Pannerdense Kop, en neigt naar een steeds flauwer verhang. (figuur uit Klijn, 2019 op basis van meetgegevens Rijkswaterstaat (A. Sieben)).

Waar in de rivier (vooral de Waal) harde lagen zijn aangebracht om de uitschuring in de diepere buitenbochten tegen te gaan, is de bodem niet gedaald. Juist daar zijn recentelijk vaardiepte problemen ontstaan, deels omdat de bodem rond deze harde lagen wel daalt – waardoor ze boven de omgeving uitsteken – en deels omdat aan stroomafwaartse zijde van deze harde lagen sterke erosie optreedt met een sprong in de waterstand tot gevolg. Dit is het geval bij de bodemkribben ter hoogte van Gendt en Erlecom (Boven-Waal) en bij de vaste laag ter hoogte van Nijmegen, waar het vaakst vaardiepte problemen ontstaan.

De Nederrijn-Lek is na de normalisaties oorspronkelijk ook uitgeschuurd, maar daar is deze ontwikkeling gestopt na aanleg van de stuwen (in de periode 1961-1970). Op dit moment kent deze gestuwde rivier nog wel enige herverdeling van sediment tussen de



Figuur 13 De bodem van de IJssel is eveneens sterk gedaald door uitschuring, maar minder sterk dan de Waal. Merk op dat de Boven-IJssel door bochtafsnijdingen (in 1954 en 1968) ongeveer 17 kilometer korter is gemaakt, zodat de werkelijke versteiling hier nog pregnanter is dan in de figuur het geval lijkt (Figuur op basis van recente meetgegevens RWS). NB: de kuil bij Kampen (geheel links) betreft de zomerbedverdieping in het kader van Ruimte voor de Rivier.

stuwen, maar geen significante daling van de rivierbodem meer. Relatief ten opzichte van de andere twee Rijntakken komt de bodem van de Nederrijn bij Arnhem, waar in het stuwpand boven stuw Driel zelfs enige sedimentatie optreedt, dus steeds hoger te liggen.

De vrij-afstromende Waal en IJssel ontwikkelen zich tot er een nieuw dynamisch evenwicht ontstaat tussen de erosiviteit van het water en de erodibiliteit van het sediment. Daarbij is de recente vergroving van het sediment op de bodem van de Boven-Rijn, Waal en IJssel een **tegenkoppeling**, die de uitschuring langzaam vertraagt (zie Het Verhaal v/h Sediment; en Ten Brinke, 2019; Ylla Arbos et al., 2021). Daarbij is nog niet met zekerheid vastgesteld of dit het gevolg is van de aanvoer van grover sediment dat in Duitsland bij suppleties wordt gebruikt, of het resultaat is van de erosie van fijner materiaal met achterlating van grover sediment (een afpleisteringslaag).



Door de daling van de rivierbodem zijn de midden- en laagwaterstanden in de Waal en IJssel eveneens gedaald met gevolgen voor het overstromingsregime van de uiterwaarden (minder dynamisch), de grondwaterstanden in de uiterwaarden (lager) en soms de grondwaterstanden in het achterland (ook lager, omdat de drainagebasis is verlaagd). Voor de Nederrijn-Lek geldt dit niet, omdat hier de waterstanden in de stuwpannen worden gehandhaafd met behulp van de stuwen. Dit betekent dat deze rivier nauwelijks tot geen gevolgen van een dalende bodem en dalende laagwaterstanden ondervindt. Bovenstrooms van stuw Driel wordt de waterstand echter vooral bepaald door de IJssel; die wel uitschuurt en daar dus wel tot significante waterstands daling leidt.

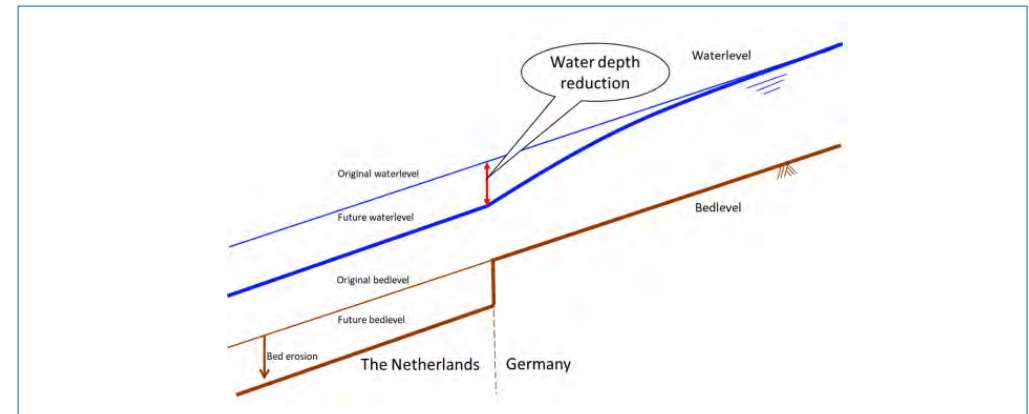
### De uitschuring en lagere laagwaterstanden hebben ernstige gevolgen voor veel gebruiksfuncties en waarden

De bodemerosie in de vrij afstromende rivieren – maar ook die in de gestuwde Maas – baart zorgen, omdat die consequenties heeft voor veel gebruiksfuncties en waarden, niet alleen die in de rivier en de uiterwaarden zelf, maar zelfs tot in de wijde omtrek. We geven hieronder voorbeelden van beide. De gevolgen van de lagere bodemligging zijn het meest prangend als ook de laagwaterstanden dalen, dus op de vrij afstromende Waal en IJssel. Maar ook in de gestuwde rivieren waar dat niet het geval is, zijn gevolgen soms ernstig, met name voor de natuurontwikkelingsmogelijkheden.

Gevolgen voor de rivier met z'n oevers, uiterwaarden en weerden zijn onder andere:

- Het ontstaan van obstakels op de rivierbodem die de vaardiepte beperken, met name bij 1) harde lagen (Nijmegen) en 2) bodemkribben (Erlecom, Gendt), of van dieptebeperkingen door ongelijkmatig zakken van de rivierbodem, zoals 3) rond de grensovergang Duitsland-Nederland (zie Figuur 14). We merken hierbij op dat al deze voorbeelden zijn gelegen binnen 30 km vanaf de Duits-Nederlandse grens, waar de uitschuring het sterkst is geweest. In mindere mate doet zich bij lage rivierafvoeren een probleem met beperkte vaardiepte voor bij St. Andries, waar het een gevolg is van sterke erosie aan het eind van een harde laag en sedimentatie juist daarnaast.
- Een te geringe vaardiepte op de Boven-IJssel (1,9 m bij OLR i.p.v. de vereiste 2,5 m) en een gebrek aan vaarbreedte, omdat lagere waterstanden op de smalle IJssel een sterke versmalling van de vaarweg veroorzaken (een 1 m lagere waterstand

- impliceert een 7 m smallere vaarweg): de rivier was in de afgelopen droge jaren (2018-2020) vaak minder dan 40 m breed, plaatselijk zelfs slechts 20 m, zodat een algemeen oploepverbod gold en zelfs eenrichtingsverkeer moest worden ingesteld. IJssel voldoet al niet aan eisen CEMT-klasse IV (terwijl Va wordt nagestreefd).
- Gebrek aan dekking van kabels en leidingen, of zelfs dagzoomen (bloot komen te liggen). Indien bij essentiële kabels of leidingen een baggerbeperking geldt, wordt het probleem verlegd naar een vaardieptebeperking voor de scheepvaart.
- Een sterk afgenomen hydrodynamiek in uiterwaarden, waardoor nevengeulen die in het kader van de KRW of Ruimte-voor-de-Rivier zijn aangelegd droogvallen en waardoor natte en vochtige ecosystemen verdrogen. Dit is vooral langs de Boven-Waal en een groot deel van de IJssel het geval, waar het leidt tot een verlies van biodiversiteit.
- Lagere grondwaterstanden in de uiterwaarden en soms de wijdere omtrek, leidend tot verdroging van uiterwaardennatuur en met gevolgen voor landbouw en soms zelfs bebouwing (Zevenaar). Voor de PAGW is vastgesteld dat natuur in uiterwaarden veel meer effect ondervindt van de gedaalde en nog dalende rivierbodem dan van lagere rivierafvoeren door klimaatverandering (Van Geest, 2020). Langs de gestuwde Nederrijn en de Maas (met uitzondering van het traject Grensmaas) ondervinden de grondwaterstanden weinig invloed, hoewel een verminderde uittreeweerstand van de rivierbodem in theorie tot enige daling zou kunnen leiden.

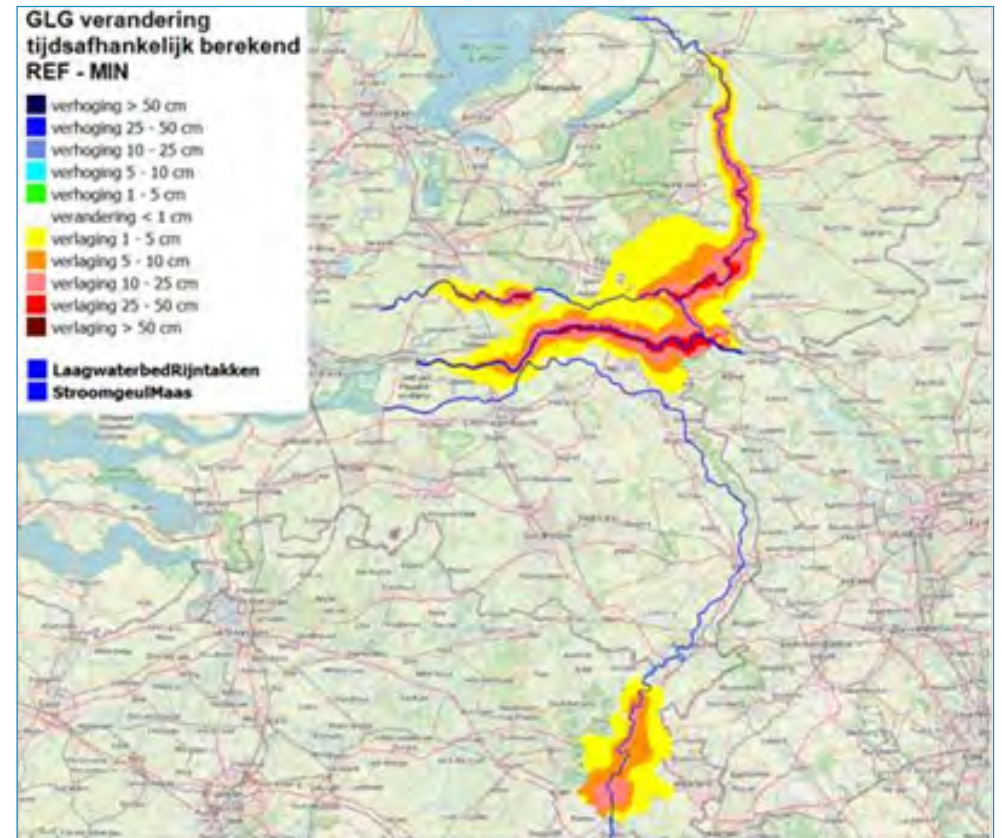


Figuur 14 Principe van dieptebeperking door verschillen in bodemligging op de grens als gevolg van uitschuring in Nederland bij een gegeven harde laag bij Ravenspolwelle en suppleties met grover materiaal in Duitsland (uit Havinga, 2020). NB: in werkelijkheid is sprake van een brede flauwe drempel.

Voor de wijdere omgeving zijn de gevolgen van een lagere rivierbodem en lagere rivierwaterstanden onder meer:

- Slechtere bereikbaarheid van havens en kanalen door (sluis)drempels met onvoldoende vaardiepte als de waterstanden lager worden (bijv. Maas-Waalkanaal (sluis Weurt), Twentekanaal (sluis Eefde), haven Deventer).
- Kans op schade aan constructies (sluizen, brugpijlers, kades, etc.) door waterstanden lager dan waarop is ontworpen (bijv. kapotte deur sluis Weurt door schutten bij te lage waterstanden).
- Moeilijke waterinlaat voor peilbeheer onder vrij verval (diverse polders in het rivierengebied), of hogere opvoerhoogte waar peilbeheer met pompen wordt geregeld (Twentekanaal).
- Daling van de grondwaterstanden in de wijde omgeving als *aquifers* (watervoerende lagen) direct met de rivier zijn verbonden of de grondwaterstroming slechts door dunne scheidende lagen (*aquitards*) wordt beperkt. Dit effect van een verlaagde drainagebasis kan vooral in de zandgronden van Oost-Nederland tot lagere grondwaterstanden leiden (zie Figuur 15 voor een principeberekening, uitgaande van een 0,5 m lagere rivierbodem op de Rijntakken en een 0,25 m lagere rivierbodem op de Maas). Langs de Maas is zo'n daling in werkelijkheid vooralsnog zeer beperkt doordat deze rivier grotendeels is gestuwd – behalve langs de Grensmaas.

Tenslotte – en misschien wel het belangrijkste gevolg – is dat er bij de Rijntakken ook nog sprake is van gevolgen voor hoe water kan worden verdeeld over het gehele nationale watervoorzieningssysteem, omdat de afvoerverdeling bij laagwater en middenhoogwater wordt beïnvloed (c.q. de stuurbaarheid ervan met behulp van stuw Driel wordt bedreigd). Dat is het gevolg van het feit dat de bodem van de Waal de laatste decennia meer is gezakt door uitschuring dan de bodem van het Pannerdens Kanaal; en doordat de bodem van de IJssel veel verder is gezakt dan die van de Nederrijn – die inmiddels helemaal niet meer zakt en dus relatief hoger komt te liggen. In de volgende paragraaf wordt daar uitvoeriger op ingegaan; hier bespreken we eerst nog kort enkele consequenties daarvan.



Figuur 15 Indicatie van de afstand waarover een grondwaterstandsdaling als gevolg van een lagere rivierwaterstand zich ruimtelijk uitstrekt (verkennde berekeningen met het Landelijk Hydrologisch Model door Vergroesen, Deltares; 0,5 m lagere rivierbodem op de Rijntakken en 0,25 m lagere rivierbodem op de Maas).

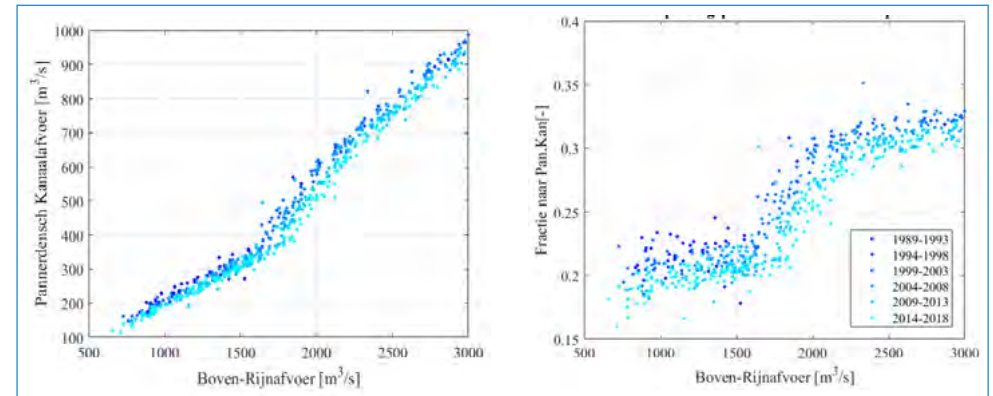


Door de lagere waterstanden in het splitsingspuntgebied kan de beoogde minimumafvoer over de Nederrijn-Lek ( $30 \text{ m}^3/\text{s}$ , 25 door de stuw en 5 door de vistrap) bij lage rivierafvoeren niet meer worden geleverd, omdat het verval over de stuw Driel daarvoor te klein wordt. Dat komt doordat de bodem van de IJssel zo ver is gedaald en het rivierpeil boven stuw Driel eveneens doet dalen: de waterstanden ter hoogte van Arnhem zijn al vanaf een Rijnafvoer van  $1200$  a  $1300 \text{ m}^3/\text{s}$  te laag om nog goed te kunnen sturen. Om Midden-Nederland dan toch van voldoende water te voorzien wordt dan water vanaf de Waal via het Betuwepand van het Amsterdam-Rijnkanaal naar de Nederrijn-Lek geleid (door de sluzen aan beide zijden van het Betuwepand te openen) en vandaar naar Midden-Nederland. Dit gebeurt op basis van de watervraag: hoe meer water onttrokken wordt, des te meer water stroomt er uit de Waal naar het noorden. Dit betekent ten eerste dat het rivierpeil in pand Amerongen-Hagestein meedaalt met de waterstand op de Waal (tot ong.  $1,5 \text{ m}$  NAP bij een streefpeil van  $1,9 \text{ m}$ ); en ten tweede dat er dan geen stroming en verversing meer is van de Nederrijn (stuwpannd Driel-Amerongen), met waterkwaliteitsproblemen tot gevolg.

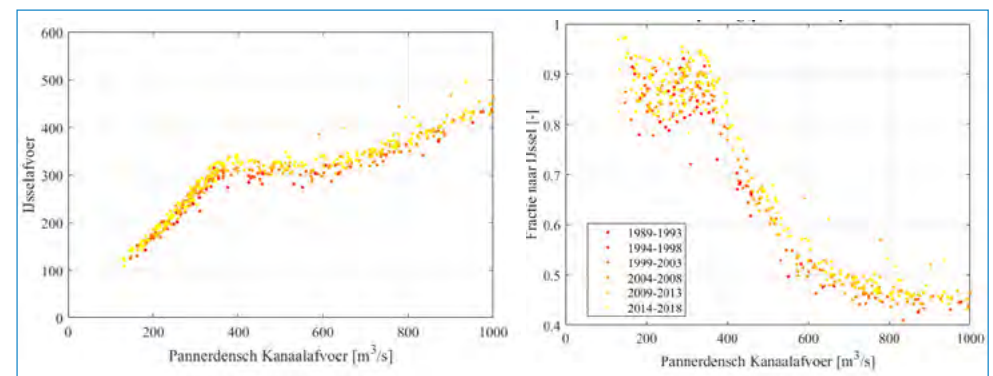
### De afvoerverdeling over de Rijntakken trekt bij lage afvoeren steeds schever: er gaat te weinig water naar het noorden

Vanaf circa 1950 is de uitschuring van het zomerbed gedurende enige decennia sterker geweest op het Pannerdens Kanaal en de Boven-IJssel dan op de Waal als gevolg van de bochtafsnijdingen op de IJssel en de kanalisatie van de Nederrijn (Hoefsloot, 1983). De afgelopen decennia is de Boven-Waal echter veel sneller gaan eroderen. De afgelopen 20 jaar bedroeg de uitschuring gemiddeld ong.  $2 \text{ cm/jaar}$  op de Boven-Waal,  $1 \text{ cm/jaar}$  op het Pannerdens Kanaal en  $< 1 \text{ cm/jaar}$  op de Boven-IJssel (Sloff, 2019). Een deel van de verklaring voor het verschil in erosiesnelheid zit mogelijk in de verdeling van sediment van verschillende korrelgrootte bij de splitsingspunten, waarbij grover materiaal uit de buitenbocht naar het Pannerdens Kanaal gaat (Kleinhans et al., 2013). Maar het is ook denkbaar dat juist daar grovere grindlagen aan het oppervlak komen die dan minder snel wegspoelen. Al met al is de bodem van de Boven-Waal de afgelopen decennia significant lager komen te liggen dan het Pannerdens Kanaal, en is de Boven-IJssel verder uitgeschuurd terwijl de bodem van de Nederrijn door de stuwen helemaal niet meer is gedaald.

Het gevolg van deze verschillende uitschuringssnelheden is dat de verdeling van de rivierafvoer over de verschillende Rijntakken aan het verschuiven is. Uit afvoermetingen van Rijkswaterstaat blijkt zonneklaar dat het Pannerdens Kanaal een steeds kleinere fractie van de Rijnafvoer krijgt, doordat de Waal een groter deel trekt (Figuur 16). En tevens blijkt dat de IJssel een steeds grotere fractie trekt van wat door het Pannerdens Kanaal stroomt, omdat de bodem van de IJssel wel daalt, maar die van de Nederrijn na de kanalisatie niet meer (Figuur 17).



Figuur 16 Veranderende afvoer door het Pannerdens Kanaal als functie van de Rijnafvoer bij Lobith, links in absolute waarden en rechts als fractie van de Rijnafvoer. We zien een geleidelijke maar significante afname van de afvoer door het Pannerdens Kanaal doordat de Waal een groter aandeel trekt (metingen RWS-ON; analyse M. Verbeek).

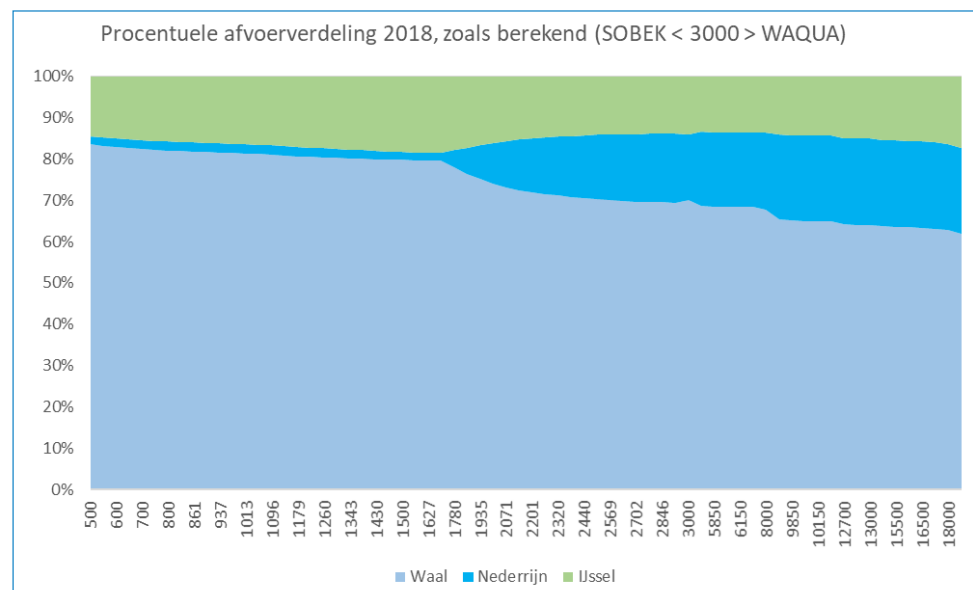


Figuur 17 Veranderende afvoer door de IJssel als functie van de afvoer door het Pannerdens Kanaal, links in absolute waarden en rechts als fractie. We zien een kleine verschuiving richting IJssel door de bodemosie op de bovenloop van deze rivier (metingen RWS-ON; analyse M. Verbeek).

Al bij al is het gevolg van de ongelijke bodemerrosie in het splitsingspuntengebied dat de Boven-Waal bij lage afvoeren (< 1000 m<sup>3</sup>/s) relatief (te) ruim is geworden met als gevolg dat deze bij lage rivierafvoeren – dus in droge perioden – momenteel al ruim 80- 83% van de afvoer trekt (bij een afvoer te Lobith van circa 1000 m<sup>3</sup>/s is dat ong. 40 m<sup>3</sup>/s meer dan zo'n 30 jaar geleden; Sloff, 2019). Die extra Waalafvoer is ten koste gegaan van het Pannerdens Kanaal en dus van de IJssel, terwijl het bij heel lage afvoeren zelfs niet meer lukt om de afgesproken 25-30 m<sup>3</sup>/s via stuw Driel naar de Nederrijn-Lek te geleiden. Het betekent dat de IJssel bij lage afvoeren slechts 15- 18 % van de Rijnaflower krijgt. En hoe geringer de afvoer, des te kleiner het procentuele aandeel (zie [Figuur 18](#), geheel links). Dat heeft consequenties voor de aanvulling van de watervoorraad in het IJsselmeer, van waaruit de zoetwatervoorziening van Noord-Nederland plaatsvindt (zie Klijn et al., 2012; Mens et al., 2020): die wordt minder, en vaker onvoldoende. Hydrologic (2020) schrijft hierover: “de buffer van het IJsselmeer is bedoeld voor zoetwatervoorziening, niet om de impact van erosie in het rivierensysteem op te vangen.”

Voor een goed begrip van [Figuur 18](#) is enig inzicht in het stuwprogramma van de stuwen op de Nederrijn behulpzaam. Conform het stuwprotocol van 2016 worden de stuwen geleidelijk geopend als de waterstand te Lobith 8,6 m overschrijdt, hetgeen in 2016 ongeveer overeen kwam met een Rijnaflower van 1590 m<sup>3</sup>/s (Rijkswaterstaat, 2016). Dan begint de Nederrijn dus ook aan het Pannerdens Kanaal te trekken, waardoor het aandeel afvoer door de Waal terugloopt. Bij 2600 m<sup>3</sup>/s (10,0 m Lobith) is stuw Driel geheel open<sup>6</sup> ([Figuur 19](#)). Bij grotere afvoeren (boven 4500-5000 m<sup>3</sup>/s) is niet alleen de morfologie van het zomerbed bepalend voor de afvoerverdeling, maar gaat er in toenemende mate meer water door het winterbed. Dat betekent dat daarboven de ruimte in het winterbed mede-bepalend wordt voor de afvoerverdeling.

Conform datzelfde protocol (Rijkswaterstaat, 2016) is de stuw bij Driel dus gesloten als de waterstand bij Lobith onder 8,6 m te Lobith komt, in 2016 volgens RWS (2016) overeen komend met een Rijnaflower van 1590 m<sup>3</sup>/s, maar inmiddels al bereikt bij een Rijnaflower van wel 1675 m<sup>3</sup>/s (mondellinge mededeling A. van Winden). Het betekent dat stuw Driel tegenwoordig veel eerder sluit dan oorspronkelijk beoogd of zelfs voorzien.



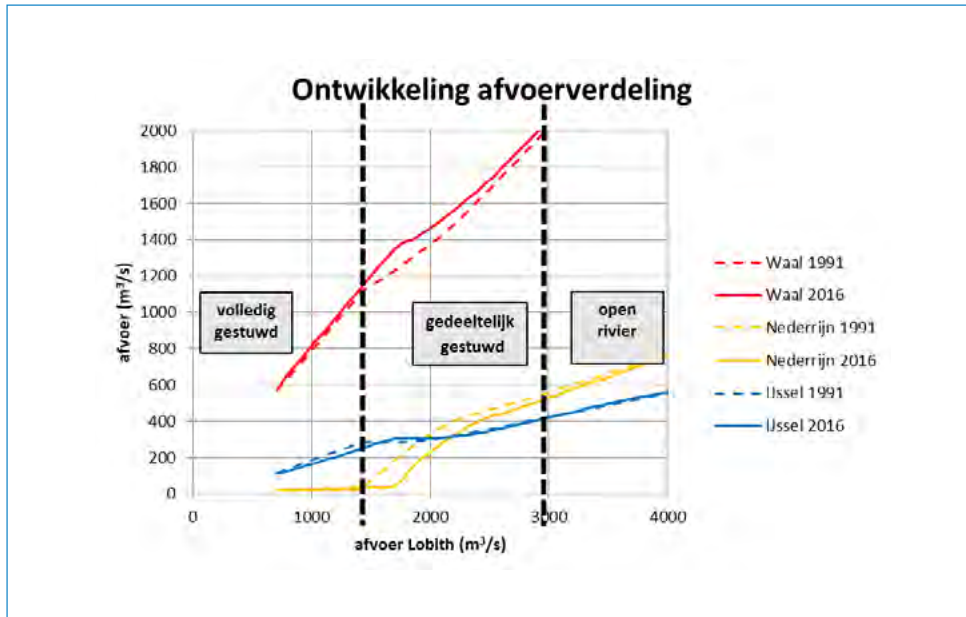
Figuur 18 Afvoerverdeling over de 3 Rijntakken in procenten (cumulatief, dus te lezen als fracties) bij Rijnafloweren te Lobith van 500 tot 20.000 m<sup>3</sup>/s, met bodemligging 2018 (brondata: De Jong, 2020, SOBEK-berekeningen met stuwprogramma voor DP-Zoetwater < 3000 m<sup>3</sup>/s; Asselman, WAQUA-resultaten vrij afstromend > 3000 m<sup>3</sup>/s).

Het stuwprogramma voor de Nederrijn-Lek beoogde zo lang mogelijk tenminste 285 m<sup>3</sup>/s door de IJssel en 25 m<sup>3</sup>/s door de Nederrijn te laten stromen en ging uit van pas volledig stuwen bij een Rijnaflower lager dan 1300 m<sup>3</sup>/s. Deze uitgangspunten – of beleidskeuzes – waren gebaseerd op de PAWN-studie (Pulles, 1985) en werden vastgelegd in de 2e Nota Waterhuishouding (1984). De ondergrens van 1300 m<sup>3</sup>/s werd echter al in de 3e Nota WHH (1989) opgehoogd naar 1400 m<sup>3</sup>/s, een oogmerk dat nog vrij kort geleden werd herbevestigd, namelijk in het Nationaal Waterplan 2010-2015 (Ministerie V&W, 2009). Er kan dus worden vastgesteld dat er een groeiende discrepantie bestaat tussen beleidsdoel en de werkelijkheid buiten, want door de uitschuring van het zomerbed en de daardoor lagere waterstanden op de Bovenrijn is de stuw bij Driel tegenwoordig dus veel eerder (want al bij hogere afvoer) én langduriger dicht dan beoogd<sup>7</sup> ([Figuur 19](#)).

<sup>6</sup> Omdat het stuwregime wordt bepaald door de gemeten waterstand bij Lobith (en niet door de afvoer), gaan de stuwen tegenwoordig eerder en dus ook langduriger dicht dan beoogd ten tijde van de bouw/aanleg. Zie verderop in de tekst.

<sup>7</sup> Het bedieningsprotocol is overigens niet hetzelfde als het stuwprogramma, maar een vertaling daarvan naar waterstanden. Het stuwprogramma is van oorsprong gebaseerd op een gewenste debietverdeling over de Rijntakken. De monitoring van debieten en waterstanden zou moeten (kunnen) leiden tot herijking van die vertaling.



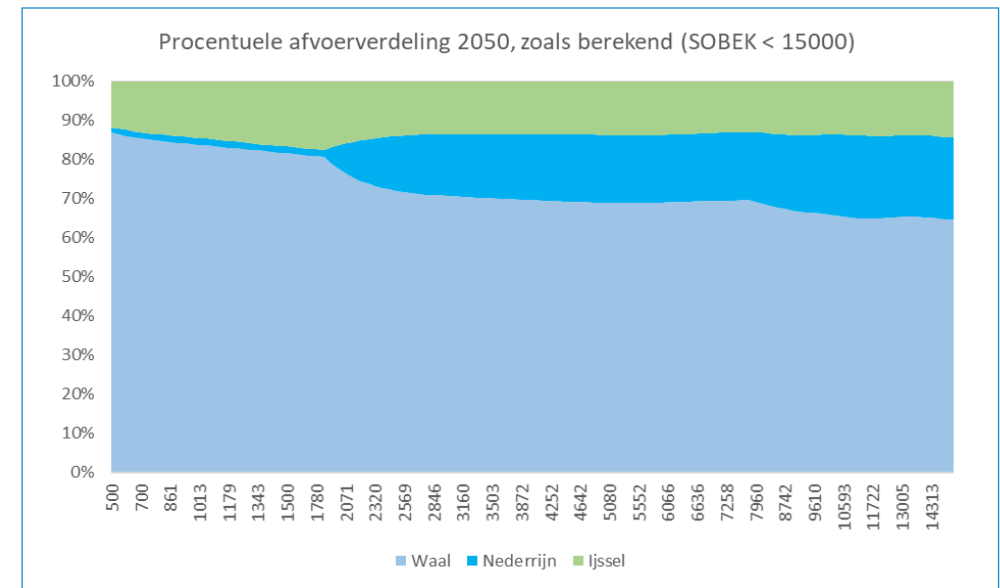


Figuur 19 Omdat het stuwbeheer is afgesteld op de waterstand bij Lobith, en niet op de afvoer, gaat de stuw bij Driel tegenwoordig al bij een grotere afvoer dicht dan vroeger. Daardoor gaat er verhoudingsgewijs langer/meer water door de Waal en de IJssel, waardoor de uitschuring wordt versterkt. (Figuur: Rijkswaterstaat).

Het feit dat de stuw te Driel vaker en langer (gedeeltelijk) is gesloten betekent dat er van de jaarlijkse totale hoeveelheid Rijnafvoer veel minder door de Nederrijn-Lek en veel meer door de Waal en IJssel gaat. Dit versterkt de uitschuring op de Waal en de IJssel, en het leidt tot toenemende aanzanding bovenstrooms van stuw Driel. We zien hier dus met elkaar samenhangende ontwikkelingen die kunnen worden gekenschetst als **zichzelf versterkende processen**<sup>8</sup>.

Zonder tegenmaatregelen zal de uitschuring van het zomerbed van de Waal en de IJssel naar verwachting nog enige tijd doorgaan; tot een nieuw dynamisch evenwicht is bereikt, waarvan de precieze ligging moeilijk valt te voorspellen. Prognoses van de

erosiesnelheid die zijn gemaakt op basis van de laatste twee decennia aan metingen (Sloff et al., 2019) zijn gebruikt om een verwachte bodemligging voor 2050 te genereren (De Jong, 2020). Met die bodemligging is vervolgens verkend hoe de afvoerverdeling zal reageren als niet wordt ingegrepen (*ceteris paribus* clausule; memo Thomas van Walsem, RWS-WVL). De resultaten van die verkenning zijn getoond in [Figuur 20](#), waarbij wordt opgemerkt dat die verkenning met het Landelijk SOBEK-model is gedaan, waardoor de resultaten voor Rijnafvoeren boven 3000 m<sup>3</sup>/s iets afwijkend zijn van die van [Figuur 18](#); ook is de range aan afvoeren waarvoor is gerekend kleiner (tot 15.000 m<sup>3</sup>/s). We zien dat de ‘zuigende werking’ van de Waal in de toekomst nog sterker wordt, en dat deze rivier bij lage afvoeren in 2050 tussen 82 en 87% van de afvoer gaat trekken, terwijl er voor de IJssel uiteindelijk nog krap 12% resteert.



Figuur 20 Afvoerverdeling over de 3 Rijntakken in procenten (cumulatief) bij Rijnafvoeren te Lobith van 500 tot 15.000 m<sup>3</sup>/s, uitgaande van bodemprognoses voor 2050 (brondata: De Jong, 2020, SOBEK-berekeningen met stuwprogramma voor DP-Zoetwater, gebaseerd op bodemprognoses Sloff, 2019; let op: het afvoerbereik wijkt af van dat van [Figuur 18](#)).

<sup>8</sup> Een voor de hand liggende geen-spijtnaatregel is stuw Driel gaan regelen op basis van gemeten debiet; kost weinig, remt de uitschuring. Maar dan zijn mogelijk wel eerder vaardieptebeperking op de Waal te verwachten. Om nader uit te zoeken.

## Het zomerbed van de rivieren is te ruim voor de huidige en toekomstige laagwaterafvoeren

De waterdiepte en de verticale respons van de waterhoogte op verschillen in de afvoer (hydrodynamiek als functie van het afvoerregime) worden niet alleen bepaald door de bodemhoogte, maar ook door de breedte van het zomerbed, het verhang en de hydraulische ruwheid van de bodem (korrelgrootte van het sediment en beddingvormen).

Zo kan van de Maas worden gesteld dat het zomerbed van deze rivier door de normalisatie en kanalisatie en latere zomerbedverdiepingen zowel veel breder als veel dieper is dan op grond van het afvoerregime zou mogen worden verwacht. Benedenstrooms van Grave is – bij voorbeeld – het normaalprofiel na het hoogwater van 1926 verbreed van 75 naar 110 m en de rivier is tussen Grave en Almen met 1/3 ingekort door bochten af te snijden (De Vries, 1949; Disco, 1998). Vergelijkbare ingrepen zijn gedaan in meer stroomopwaarts gelegen stuwpanden, voor de scheepvaart (Maaswerken), maar ook om de afvoercapaciteit te vergroten (Zandmaas-project) en tenslotte als onbedoeld bij-effect van commerciële zand- en grindwinning. Alleen dankzij de stuwen loopt de Maas niet leeg. Want het afvoerregime van de Maas zou in niet-gekanaliseerde staat een rivierbeeld opleveren dat doet denken aan de Allier (of dichterbij huis: de Grensmaas).

Het gevolg van de stuwen en deze overdimensionering van het zomerbed is dat de rivier eigenlijk altijd volledig vol staat, maar slechts zeer zelden kantje-boord (*bankfull stage*). Want ook relatief grote afvoeren passen makkelijk binnen de dimensies van het zomerbed. Het heeft ook tot gevolg dat het overstromingsregime van de weerden (Maasvallei) en uiterwaarden (Bedijkte Maas) zeer onnatuurlijk is ([zie tekstkader over hydrodynamiek](#)). Vanuit ecologisch oogpunt is sprake van te geringe (onnatuurlijke) hydrodynamiek om nog van riviernatuur te kunnen spreken (de Grensmaas en enkele oeverzones en kunstmatige geulen daargelaten). En bij gebrek aan hydrodynamiek ontbreekt het ook aan morfodynamiek (erosie- en sedimentatie) van of op de weerden en uiterwaarden.

Door het omvangrijke zomerbed en door de stuwen is er op de Maas ook geen sprake van doorgaand transport van grof bodemsediment (zand en grind), behalve dan in

de vorm van kleinschalige verplaatsingen in het zomerbed tijdens hoogwatergolven. Wederom vanuit ecologisch perspectief – in dit geval vooral aquatische ecologie – is er sprake van te weinig morfodynamiek om van riviernatuur te kunnen spreken, terwijl de bodem van de Maas het grootste deel van het jaar bedekt is met een sliblaag. Ook hier de opmerking: de Grensmaas en enkele ontstane oeverzones en kunstmatige geulen daargelaten.

Samengevat kan men zeggen: het zomerbed van de Maas is qua dimensies bijna overal gemaximaliseerd ten gunste van de scheepvaartfunctie en snelle hoogwaterafvoer en ten koste van (abiotische en biotische) natuurwaarden.

### Zomerbed, vaarwater en vaarweg

Met **zomerbed** wordt over het algemeen de rivier van oever tot oever aangeduid, zoals deze er in de zomer bijligt, dus inclusief de kribvakken die op de Waal tientallen meters breedte kunnen hebben. Voor ecologen of geografen, maar ook burgers, een evidente aanduiding. Het is namelijk wat op topografische kaarten en satellietfoto's (zomerbeeld) water is. De waterdiepte kan dus sterk variëren.

De **vaarweg** is een formeler begrip, dat o.a. is vastgelegd in nationale regelgeving. Het omvat zowel het zomerbed als het winterbed. De exacte begrenzing van elke vaarweg is vastgelegd in de zgn. leggers behorende bij de Waterwet.

Binnen de vaarweg ligt het **vaarwater**: dat gedeelte van de vaarweg dat - al naargelang de lokale omstandigheden - door de doorgaande scheepvaart wordt gebruikt.

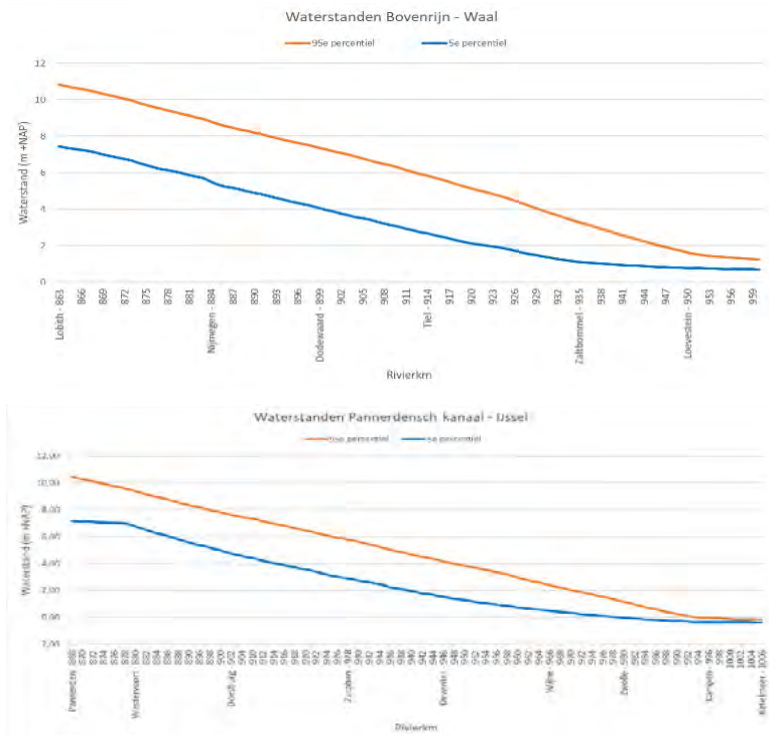
En binnen het vaarwater ligt de **vaargeul**: dat gedeelte van de vaarweg waar voor de doorgaande scheepvaart zoveel mogelijk een vastgestelde breedte en diepte in stand gehouden wordt.

Voor de dimensies van de vaargeul gelden nationale en internationale normen, gerelateerd aan scheepvaartcorridors en scheepsklassen. Voor de Waal gelden bijv. de minimummaten 150 m breed bij 2,80 m diep bij Overeengekomen Lage Rivierafvoer (OLA). De vaargeul begint – afhankelijk van de taludhelling van de oevers en kribben – enkele (tientallen) meters vanuit de kribkoppen; op de Waal standaard vanaf 30 m van die kribkoppen.

De vaarweg is gewoonlijk bebakend met kribbakens en de vaargeul met tonnen. De kribbakens staan meestal op de kribkop, maar langs de IJssel meestal op de kribschouder.



## Hydrodynamiek als randvoorwaarde voor riviernatuur

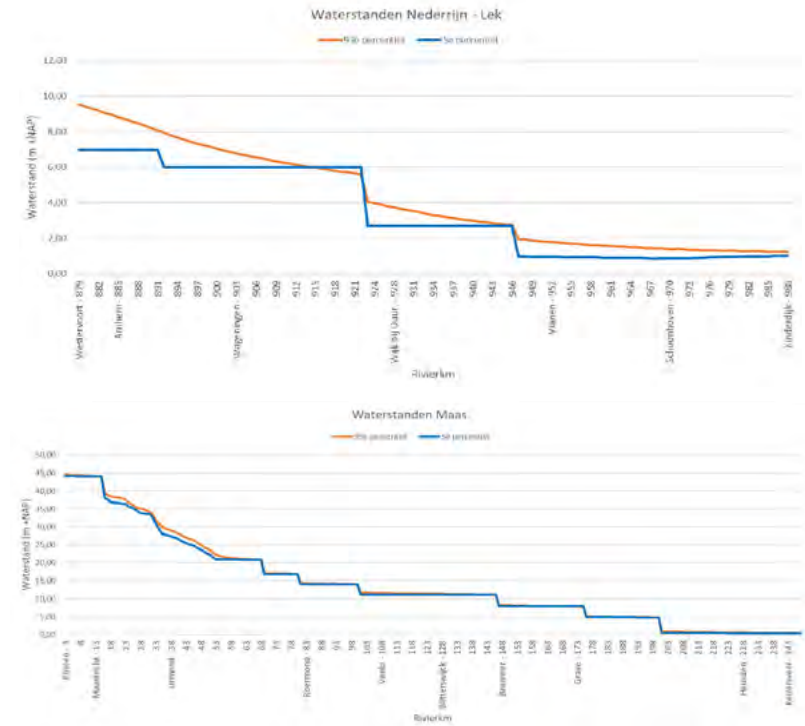


Figuur 21 Waterstandsregime van de Waal en IJssel gedurende het groeiseizoen (mei-oktober), weergegeven met de 5- en 95-percentielwaarde over de periode 1998-2017. Illustratie van het natuurlijk verloop richting zee (naar Van Geest, 2020).

Rivernatuur is natuur die is aangepast aan de dynamische milieus die rivieren vormen. Voorbeelden zijn stroomdalgraslanden en oobossen. Tot typische rivierdynamiek worden hydrodynamiek en morfodynamiek gerekend. Hydrodynamiek heeft betrekking op zowel de verschillen tussen hoog- en laagwater als op verschillen in stroomsnelheid. Die laatste bepalen deels de morfodynamiek en of er jaarrond vooral grind (Grensmaas), zand (Waalstranden) of slib (Biesbosch, IJsseldelta) op de bodem ligt.

Een indruk van de hydrodynamiek kunnen we afleiden uit typische waterstandsverschillen die samenhangen met het afvoerregime. Een grove indicatie bieden bijvoorbeeld de 95 en 5-percentielwaarden van de waterstanden, afgeleid uit de betrekkinglijnen. Zeg maar: de range tussen maximaal 20 dagen droogvallend en maximaal 20 dagen overspoeld.

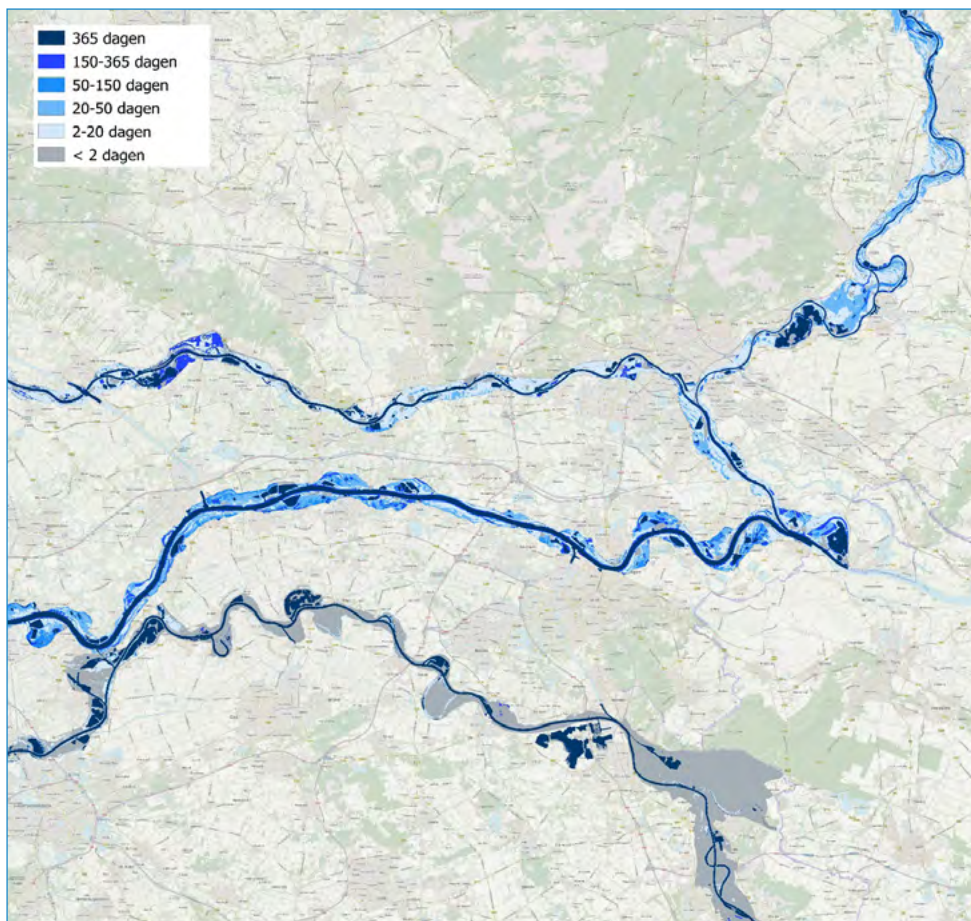
De verticale dynamiek verschilt voor rivieren in verschillende klimaatzones en met verschillende stroomgebieden; volledige regenrivieren (Maas) of deels door smeltwater en/of gletsjers gevoed. Maar deze wordt bij onze grote rivieren ook – eigenlijk vooral – door de omvang van het zomerbed en winterbed bepaald.



Figuur 22 Waterstandsregime van de Nederrijn-Lek en de Maas gedurende het groeiseizoen (mei-oktober), weergegeven met de 5- en 95-percentielwaarde over de periode 1998-2017. Illustratie van de invloed van stuwen bij een sterk verbreed zomerbed (naar Van Geest, 2020).

Als het winterbed erg krap is, is er veel verticale dynamiek en kunnen veel soorten geen refugium vinden: onnatuurlijk opgeslingerde dynamiek kan leiden tot verarming van de natuur, zoals we zien in sommige delen van de Waal met weinig reliëf. De Waal vertoont over bijna de hele lengte een verticale dynamiek van ruim 3 m. Bij de IJssel – met een breder winterbed – is dat 2,5 m.

Als het zomerbed daarentegen 'te ruim' is, is er nog maar zelden overstroming van de uiterwaarden; onnatuurlijk weinig dynamiek – zoals we die aantreffen op gekanaliseerde rivieren – leidt tot natuur die zich nauwelijks meer onderscheidt van binnendijkse natuur (gestuwde trajecten van de Maas). Op de Nederrijn-Lek zien we dynamiek van net 1 m, terwijl op de gestuwde delen van de Maas haast helemaal geen sprake meer is van ecologisch relevante hydrodynamiek.



Figuur 23 De diversiteit aan milieus langs de verschillende rivieren – gekarakteriseerd aan de hand van de hydrodynamiek (gemiddelde overstromingsduur in dagen per jaar) – verschilt sterk tussen de vrij-afstromende en dynamische Waal en IJssel, de gekanaliseerde Nederrijn (met moeras stroomopwaarts van stuwen in o.a. Meinerswijk en de Amerongse Bovenpolder) en Maas (met nog zelden overstromde uiterwaarden).

De situatie op de Rijntakken is volstrekt anders, maar ook daar geldt dat de riviertakken samen mogelijk te ruim zijn voor de toekomstige laagwaterafvoeren. Voor de Rijntakken geldt dat deze over een groot afvoerbereik nog volledig vrij-afstromend zijn: de Waal en IJssel over het volledige afvoerbereik, de Nederrijn-Lek tegenwoordig pas boven een Rijnafvoer van ong.  $3600 \text{ m}^3/\text{s}$  te Lobith. In ongestuwde toestand wordt de afvoer door de morfologie van het splitsingspuntengebied tweemaal verdeeld volgens een verdeelsleutel van ongeveer 1/3: 2/3. Dat geldt zowel voor de splitsing Pannerdens Kanaal-Waal (1:2) als voor de splitsing IJssel-Nederrijn (1:2). Dat leidt tot ongeveer de volgende afvoerverdeling: 6/9 Waal, 2/9 Nederrijn en 1/9 IJssel, dus 6: 2: 1.

Als we met die verhoudingen in het achterhoofd kijken naar de breedteverhoudingen van het zomerbed, zien we het volgende:

Het totale zomerbed van de Waal is circa 360-400m breed (Figuur 32), waarbinnen een vaarweg wordt gehandhaafd van 230-260 m (op de Waal begint de vaarweg op 30 m afstand vanaf de kribkoppen). Het Pannerdens Kanaal is in totaal circa 190 m breed (met een vaarweg van 140 m). Dat betekent dat het Pannerdens Kanaal dus ongeveer half zo breed is als de Waal (resp. iets meer als naar de vaarweg wordt gekeken). Dat levert dus inderdaad een verhouding van 2: 1, ofwel 2/3 versus 1/3; de dimensies kloppen met de beoogde afvoerverdeling.

- Het zomerbed van de Nederrijn is 200-240 m breed (met een vaarweg (hier tussen de kribkoppen gemeten) van 115- 130m) en het zomerbed van de IJssel is 100-120 m breed (met een vaarweg van 80- 90m). Ook dat levert weer ongeveer de verhouding van 2: 1 tot elkaar als de volle breedte wordt beschouwd; maar als naar de vaarweg-breedte wordt gekeken kloppen de verhoudingen niet meer.

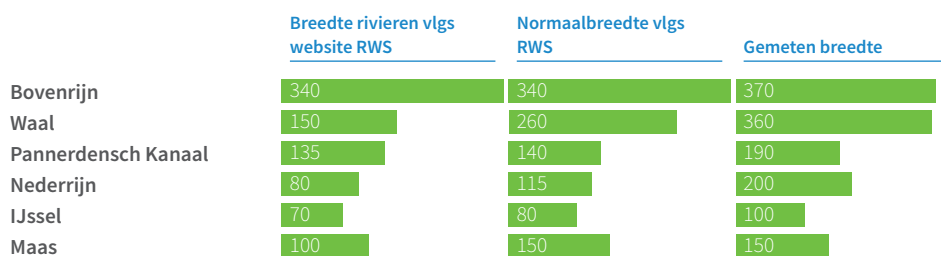


Als we vervolgens naar de optelsom van de individuele takken en hun stam kijken (Figuur 24, rechter kolom), dan zijn Waal + Pannerdens Kanaal samen ong. 550 m breed, terwijl de Bovenrijn nog geen 400 m breed is. Een fors verschil. Alhoewel bij een riviersplitsing de optelsom van de breedtes van de takken altijd groter is dan die van de stam (ter compensatie van de grotere ruwheid die het gevolg is van de 2x zo grote oeverlengte), zal het ook hetzij ondieper, hetzij flauwer hellend moeten worden. Uit de bodemhoogtemetingen blijkt vooral het eerste, want in [Figuur 12](#) is te zien dat de bodemhoogte in de Waal net benedenstrooms van Pannerden een stuk hoger ligt dan die in de Bovenrijn; en dat betreft een hoogteverschil dat al vele decennia (meer dan een eeuw) persisteert<sup>9</sup>. In Het Verhaal van het Sediment (zie ook Ten Brinke, 2019) is er ook op gewezen dat de breedte-diepteverhouding van de Waal – ondanks drie rondes van normalisatie – aanleiding geeft tot de vorming van alternerende zandbanken; een verschijnsel dat de uitspraak dat de rivieren voor ongehinderde scheepvaart eigenlijk aan de brede kant zijn voor het afvoerregime, verder ondersteunt.

Ook als we kijken naar de optelsom van Nederrijn + IJssel dan krijgen we opgeteld een breedte van tenminste 300 m, waar een Pannerdens Kanaal van slechts 190 m breed in stroomt. Ook hier geldt: het moet dus of ondieper, of flauwer hellend worden. Nu is de Nederrijn-Lek de langste van de drie Rijntakken, dus die kent per definitie een flauwer verhang. Maar om daar voldoende vaardiepte te realiseren is de Nederrijn gekanaliseerd in de periode 1954-1967. Dat zorgt voor voldoende vaardiepte gegeven de grote breedte voor de fractie van de rivierafvoer die door die tak gaat. De grote breedte en het geringe verhang verklaren mede de aanzanding in de Nederrijn boven stuw Driel; hoewel het gestuwd zijn zelf daar natuurlijk de belangrijkste oorzaak van is.

De IJssel is tegenwoordig juist steiler door de verkorting als gevolg van de bochtafsnijdingen; en die erodeert. Voor de bochtafsnijdingen van 1954-1969 – en bij minder dan *bankfull stage* – was de IJssel echter ook langer dan de Waal. Dus ook die had een flauwer verhang, althans over het zomerbed gemeten. En dat is voor een groot deel van de IJssel nog het geval, behalve in de bovenloop die door de bochtafsnijdingen tussen 1954 en 1969 zo'n 17 km is ingekort. Mede om ook op die rivier voldoende vaardiepte te realiseren wordt bij lage afvoeren het grootste deel van de afvoer die door het Pannerdens Kanaal gaat naar de IJssel geleid (met stuw Driel). Waardoor de uitschuring mogelijk nog wordt verergerd. Dankzij de stuwen is de 'te brede' Nederrijn dus bevaarbaar en krijgt de IJssel net genoeg afvoer toegemeten om ook daar meestentijds voldoende vaardiepte te bieden.

Samengevat: opgeteld zijn de drie Rijntakken te breed om bij de bestaande laagwaterafvoeren zonder stuwen voldoende vaardiepte op alle drie de takken te realiseren. Of in andere woorden: alleen door de Nederrijn te stuwen kunnen de Waal en IJssel bij de huidige breedtes nu nog het grootste deel van de tijd op voldoende (gewenste) diepte worden gehouden. Maar met het mogelijk veranderende afvoerregime (vaker lagere rivierafvoeren) zal dat in de toekomst steeds vaker niet meer lukken, tenzij de breedte van het zomerbed verder wordt beperkt. En dat kan conflicteren met de huidige eisen/wensen vanuit de scheepvaart (zie verder in de tekst).



Figuur 24 Minste gemiddelde breedte van het zomerbed volgens website RWS (= de vaargeul?), de normaalbreedten volgens Rivierkundig beoordelingskader (= de vaarweg) en de gemiddelde breedte van het zomerbed zoals opgemeten uit de topografische kaarten (van oever tot oever).

<sup>9</sup> Bij een boom zien we ook dat qua doorsnee de takken opgeteld de stam weliswaar overtreffen, maar dat ze qua dwarsdoorsnede na optelling eerder kleiner zijn (dwarsdoorsnee is immers doorsnee maal  $\pi$ ). Voor een rivier impliceert dat bij iedere vertakking een geringere diepte; en dus minder kielspeling.

## De sedimenthuishouding van de Maas is verstoord

---

In een natuurlijke rivier wordt voortdurend sediment verplaatst, waarbij erosie overheerst in de bovenloop en sedimentatie in de benedenloop. Die zogenaamde morfodynamiek is niet beperkt tot het – in natuurlijke rivieren voortdurend veranderende – zomerbed, want er is ook sprake van laterale erosie van oevers en van afzetting van sediment op de weerden en uiterwaarden. De sedimenthuishouding van de huidige Maas is door menselijk ingrijpen echter volledig ontregeld (zie Anonymus, 2017; 2018; Barneveld et al., 2021).

Ten eerste komt er haast geen grof sediment meer uit het grotendeels gekanaliseerde en van stuwdammen voorziene stroomgebied meer<sup>10</sup>. Binnen Nederland hebben de normalisatie en de kanalisatie met stuwen er vervolgens toe geleid dat er nauwelijks nog stroomafwaarts transport van langs de bodem stuitend sediment ('*bedload*') plaatsvindt. *En de met steen vastgelegde oevers voorkomen laterale erosie en hebben – samen met de riviervorking door bochtafsnijdingen – bijgedragen aan de snelle insnijding van het rivierbed en het juist hoger worden van de weerden en uiterwaarden*<sup>11</sup>. De daling van de bodem van het zomerbed is versterkt door commerciële grind- en zandwinning uit het zomerbed. Maar ook grootschalige grind- en zandwinning uit het winterbed van de Bovenmaas, Grensmaas en Plassenmaas verstoort het sedimenttransport, want de achtergebleven diepe plassen werken als zandvang. Recent is in het kader van Maaswerken nog veel sediment aan het systeem onttrokken, toen omwille van betere hoogwaterafvoer en scheepvaart het zomerbed in de Zandmaas over forse lengtes is verdiept. Aangezien deze zomerbedverdiepingen als zandvang werken, is regelmatig onderhoudsbaggerwerk nodig; om ze werkzaam te houden. Daarbij wordt het gebaggerde materiaal aan de rivier onttrokken, net zoals dat voor de gehele Maas geldt wanneer vaargeulonderhoud plaatsvindt.

Het gevolg van al deze ingrepen is dat de sedimenthuishouding is verstoord en de oorspronkelijke morfologische dynamiek grotendeels is verdwenen. Dat heeft de volgende concrete consequenties:

- Ten eerste is er sprake van een teloorgang van kenmerkende aquatische en terrestrische riviernatuur door het ontbreken van de essentiële morfodynamiek in de rivier en op de oevers en uiterwaarden (habitatkwaliteit). Zo verdwijnt mobiel grind als karakteristiek substraat van de Grensmaas; en zo kan riviereigen natuur, die afhankelijk is van een zekere mate van morfodynamiek – zoals stroomdalflora –, zich niet meer goed ontwikkelen doordat er bijna geen zand of grind meer wordt afgezet op de weerden en uiterwaarden.
- Ten tweede is de rivierbodem op een aantal trajecten onvoldoende stabiel door het verlies van grof sediment (grind), waardoor er tijdens het passeren van hoogwaterafvoergolven zeer diepe erosiekuilen kunnen ontstaan. Dat gevaar was al onderkend voor de Zandmaas en is na het hoogwater van juli 2021 ook vastgesteld op de Grensmaas, waar gedurende één kort hoogwater zo'n 20 erosiekuilen van soms meer dan 10 m diep zijn ontstaan. Zulke erosiekuilen bedreigen de stabiliteit van oevers en de standzekerheid van waterkeringen, de stabiliteit van bruggen, stuwen, sluisen, veerstoepen en andere civieltechnische kunstwerken, en er kunnen kabels en leidingen bloot komen te liggen, waaronder die waar gevaarlijke stoffen door worden getransporteerd (in 2021 bijvoorbeeld de PALL-leiding tussen Antwerpen en Chemelot).
- Tenslotte ontstaat scheepvaarthinder op plekken waar bovenstrooms geërodeerd zand zich ophoopt.

---

<sup>10</sup> De rivier vervoert alleen nog maar fijn slib, dat meestentijds in suspensie blijft ('*washload*') en pas in het benedenrivierengebied wordt afgezet.

<sup>11</sup> De daling van de bodem van het zomerbed is hiervoor al behandeld en de opslibbing van de uiterwaarden komt nog uitgebreid aan bod.



## De doelstellingen voor aquatische natuur van de Kaderrichtlijn Water (KRW) zijn onbereikbaar in voor scheepvaart geoptimaliseerde rivieren

Doordat de Maas en Nederrijn-Lek zijn gekanaliseerd en gestuwd kunnen trekvisseren een groot deel van het jaar niet ongehinderd stroomopwaarts trekken. Stroomafwaarts laten ze vaak het leven bij het passeren van een stuw, hetzij in de turbines van een waterkrachtcentrale, hetzij in de verticale neer onder de stuw. Om dit welbekende probleem te ondervangen zijn alle stuwen in de Maas en Nederrijn inmiddels voorzien van vistrappen of vergelijkbare voorzieningen; deze hebben een bewezen maar beperkte (mitigerende) werking (zie bijv. Winter, 2010). Alhoewel vistrappen individueel goed lijken te werken, zijn er zorgen over de invloed van grote aantallen op elkaar volgende stuwen, waar steeds weer een fractie van de trekkende populatie van een soort het niet redt. Alhoewel met de vistrappen dus wel mogelijkheden aan de vanuit KRW-kader gewenste trekvissoorten wordt geboden, zijn de resultaten op populatieniveau nog onvoldoende (Buijse et al., 2019; Vriese et al., 2021).

Onbelemmerde vistrek is alleen mogelijk als de stuwen deels of geheel open staan. Voor de Nederrijn hebben we hierboven al vastgesteld dat de stuwen veel eerder en langduriger dicht zijn dan indertijd bedoeld. Ook op de Maas zijn de stuwen tegenwoordig langer gesloten dan vroeger, om de scheepvaart zolang mogelijk van een (zeer) diepe vaargeul te garanderen en water zolang mogelijk in de stuwpannen vast te houden. Voor dat laatste zijn in de afgelopen droge jaren zelfs de vistrappen gesloten.

De streekdebieten van de stuwen op de Maas zijn momenteel zoals weergegeven in Tabel 1. Hieruit blijkt dat de stuwen op de Maas zelden helemaal open staan, namelijk pas bij afvoeren boven 1000 m<sup>3</sup>/s. Met een door klimaatverandering veranderend afvoerregime zullen deze stuwen – naar het zich laat aanzien – nog langduriger gesloten blijven, terwijl ook de stroming nog verder afneemt en de temperatuur van het water hoger wordt. Bij elkaar zijn dat voor trekvispopulaties ongunstige ontwikkelingen.

Voor de Maas is vastgesteld dat de biologische waterkwaliteit (cf. KRW) van de meeste stuwpannen onvoldoende is (Reeze et al., 2020), deels doordat de ecologische connectiviteit voor de aquatische natuurtypen tekort schiet (Vriese et al., 2021), maar ook omdat veel aquatisch en semi-aquatisch habitat ontbreekt (door de harde oevers)

of onvoldoende kwaliteit heeft (teveel golfslag, retourstroming rond schepen, te troebel water). Het ontbreekt dus aan de vereiste milieudiversiteit en aan de natuurlijke morfologische processen die de ontwikkeling daarvan borgen (lokale erosie en sedimentatie, in een samenhangend aquatisch natuurnetwerk).

Specifiek voor de Grensmaas kan nog worden gewezen op de geïsoleerde ligging van dit riviertraject. Omdat de verbinding tussen de Noordzee en de Grensmaas voor de stroomminnende vissoorten vol hindernissen is (stuwen, scheepschroeven, onleefbaar diep water), blijft de actuele biologische toestand van de Grensmaas onder de maat. Het gebied is voor veel doelsoorten onvoldoende bereikbaar. Daarbij wordt nog aangegevend dat ook de fysisch-chemische toestand van de Grensmaas (cf. KRW) te wensen overlaat door:

- plotselinge afvoerfluxen vanuit Wallonië door gebruik van waterkrachtcentrales en het ontbreken van tegensturing op de stuwen in de Waalse Maas, waardoor de kraamkamerfunctie van de Grensmaas niet tot z'n recht komt (wegspoelen visbroed);
- de afzetting van slib op de grindbodem bij deze gebeurtenissen, doordat de Maas (vrijwel) geen zand en grind transporteert, maar nog wel slib; en dit bij de afvoerfluxen wordt gemobiliseerd. Slib maakt de grindbodem ongeschikt voor ei-afzetting en als kraamkamer.

Stuw	Streekdebiet [m <sup>3</sup> /s] = volledig open
Borgharen	1700
Linne	1350-1400
Roermond	1000-1100
Belfeld	900-1000
Sambeek	>1300
Grave	1200 – 1500
Lith	1200

Tabel 1 Streekdebieten van de stuwen op de Maas (volledige opening; naar Niesten & Spruyt, 2019).

Voor de gehele Maas is het gebrek aan doorgaand sedimenttransport en de overdimensionering van het zomerbed in verhouding tot het afvoerregime een beperkende factor voor een goede ecologische ontwikkeling van de oevers als overgangsmilieus tussen diep water en hoge uiterwaarden; natuurvriendelijke oevers leiden snel tot oevererosie en afschuiving naar diep water en tijdens hoogwaters ontbreekt het aan sedimentatie op de oever omdat er onvoldoende sediment beschikbaar is (te weinig morfodynamiek).

Voor alle rivieren, dus ook de vrij afstromende Waal en IJssel, geldt dat de ruimtelijke variatie aan aquatische milieus (ondiep water naast diep, nauwelijks stromend naast snelstromend) tekort schiet om een voldoende samenhangend habitatnetwerk voor de trek en verspreiding van aquatische dier- en plantensoorten te bieden. Het intensieve gebruik van de vaarweg betekent voor het onderwatermilieu voortdurend sterke waterbewegingen (vooral op de Waal rond kribben en in kribvakken, maar ook in en uit nevengeulen), een sterke golfaanval met vertroebeling bij kleiige oevers, en een zware geluidsbelasting. Ook richten scheepsschroeven directe schade aan, gereflecteerd door het veelvuldige voorkomen van knak-aal (zie RAVON). Tevens belemmeren zomerkades, dijken, gemalen en stuwtjes de toegang tot kleine wateren in de uiterwaarden, binnendijks en in het achterland, en aldus de potentiële kraamkamergebieden aldaar.

Met specifieke zogenaamde KRW-maatregelen, zoals nevengeulen, natuurvriendelijke oevers (ontstenen) en innovatieve oeverbeschermingen, wordt weliswaar getracht de gewenste aquatische natuurtypen in voldoende kwantiteit (areaal) en met voldoende ruimtelijke samenhang (connectiviteit) terug te brengen, maar in veel gevallen met onvoldoende succes (Reeze et al., 2017). En de ingevolge KRW voorgestelde maatregelen stuiten in veel gevallen op juridische of praktische bezwaren. Eén van de belangrijkste bezwaren in dat verband is dat vanuit de scheepvaartfunctie welhaast iedere vorm van aanzanding in de vaargeul als onaanvaardbaar wordt aangemerkt. Dat leidt ertoe dat de meeste 2e en 3e tranche KRW-maatregelen langs de vrij afstromende Waal en IJssel amper uitvoerbaar zijn vanwege de verwachte aanzanding in de vaargeul.

Al met al kan worden vastgesteld dat de voor de scheepvaart geoptimaliseerde rivieren in hun huidige staat de gewenste (semi-)aquatische natuur (KRW) niet duurzaam kunnen ondersteunen.



## Het winterbed is te krap voor toekomstige hoge rivierafvoeren: de hoogwaterstanden worden gevaarlijk hoog

Als we onder het winterbed de hele dwarsdoorsnede van de rivier verstaan (dat wat bij hoogwater onder water komt), dan omvat dat winterbed ook het zomerbed. Dat betekent dat de bodemligging van het zomerbed mede bepalend is voor de afvoercapaciteit van de rivier, maar het zomerbed is dan maar een klein deel van het totale winterbed. Het totale winterbed is dus veel breder, zodat er ook meer vrijheidsgraden zijn om de afvoercapaciteit van de rivier te vergroten dan alleen de veel bepleite – en bij de Maas in de afgelopen eeuw op grote schaal toegepaste – zomerbedverruiming (soms -verbreding, meestal -verdieping). Deze inleidende bespiegeling is vooral bedoeld als brug tussen wat hierna volgt en wat in de vorige paragrafen is beschreven; en om de relatie daartussen nog eens te benadrukken. Want hiervoor is vastgesteld dat een erg ruim zomerbed – als resultaat van zomerbedverdieping of -verbreding – ook de laagwaterstanden en het overstromingsregime van de uiterwaarden beïnvloedt, met negatieve consequenties voor veel functies en vooral de (potentiële) natuurwaarden van het rivierengebied.

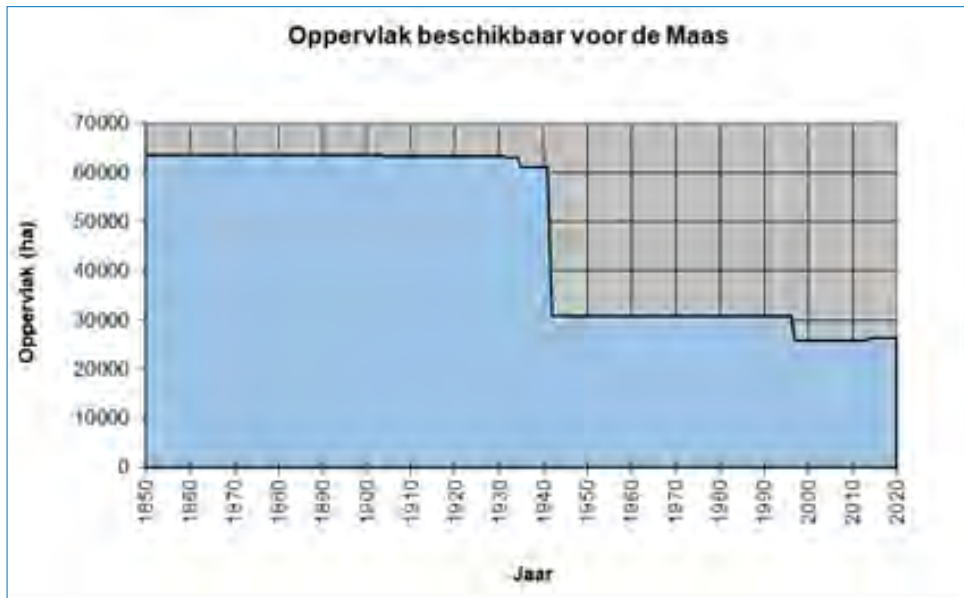
De dwarsdoorsnede – en dus afvoercapaciteit – van het winterbed wordt in de deels onbedijkte Limburgse Maasvallei in hoofdzaak bepaald door de geomorfologie: heuvelland en horsten en slenken waarin een dal is uitgesleten met plaatselijk terrassen (vooral prominent bij de doorsnijding van de Peelhorst; zie Het Verhaal van de Maas). In de bedijkte rivieren wordt de dwarsdoorsnede daarentegen hoofdzakelijk bepaald door de breedte van de uiterwaarden en dus de ligging van de dijken; deze zijn in de loop van 800 jaar bedijkingsgeschiedenis steeds dichterbij de rivier gelegd. Sedert 1850 is zo nog ruim 50% van de bergings- en afvoercapaciteit verloren gegaan door dijkverleggingen en het opheffen van overlaten (Klijn & Stone, 2000; Asselman & Klijn, 2001; Klijn et al., 2002; [Figuur 25](#)). Ook in de Maasvallei – die voorheen geen bedijking kende – is sprake geweest van een substantieel verlies aan bergings- en afvoercapaciteit, met name door de aanleg van het Julianakanaal en de aanleg van kades en dijken rond en voor bewoningskernen (zie [Figuur 26](#)).

Het verlies aan areaal beschikbaar oppervlak winterbed of bergingsgebied heeft op alle rivieren geleid tot hogere hoogwaterstanden bij gelijke grote rivierafvoer. Want waar het vooral *stromende* ruimte betrof, heeft dit direct de afvoercapaciteit van de rivieren verkleind en dus tot meer opstuwing en hogere waterstanden geleid; terwijl waar het vooral *bergende* ruimte betrof, het invloed heeft gehad op de mate van topvervlakking.

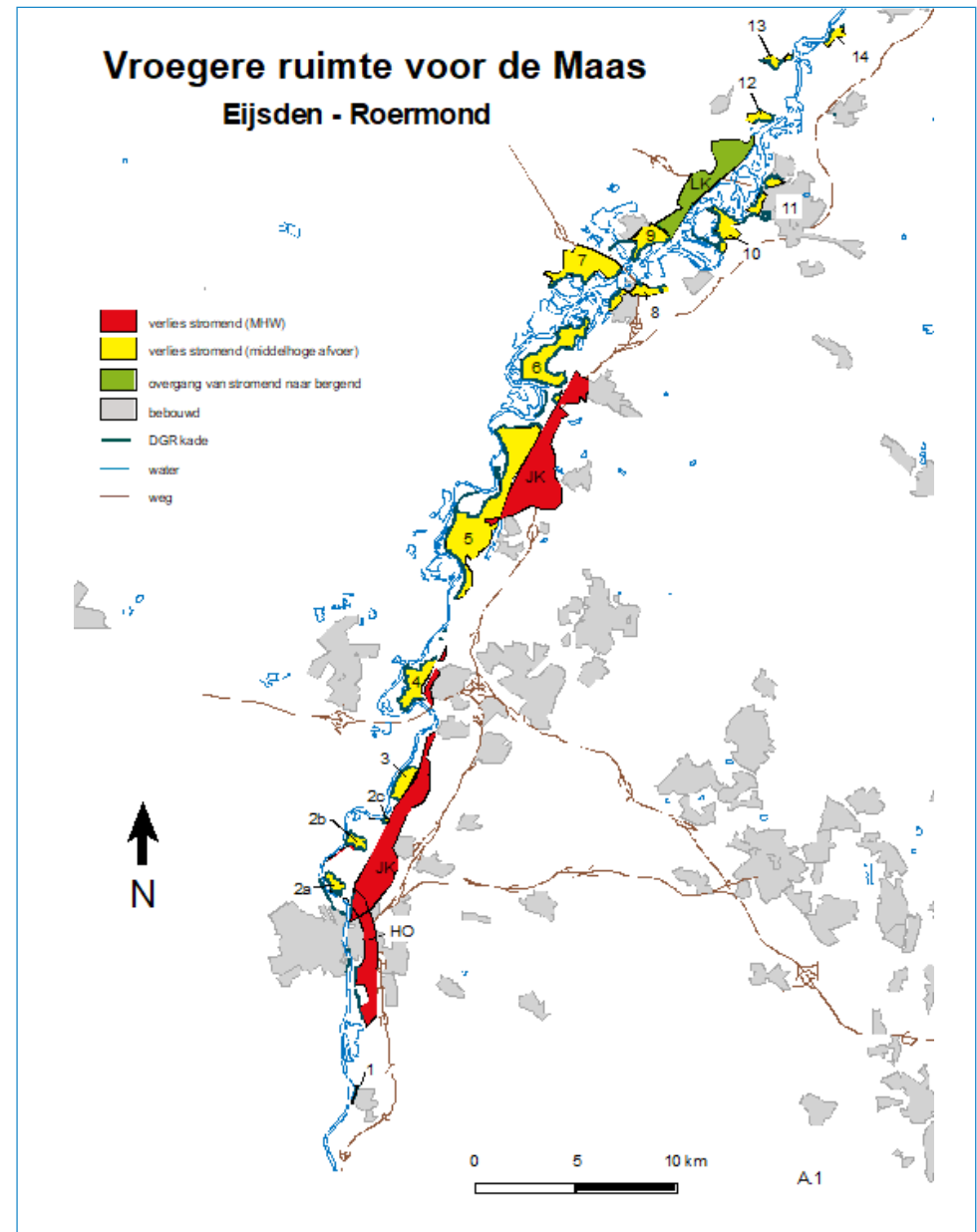
Voor de Maas is nog recentelijk vastgesteld dat verlies aan bergende ruimte leidt tot minder topvervlakking, waardoor afvoergolven minder inzakken en stroomafwaarts sneller arriveren en hogere waterstanden veroorzaken. En zulk verlies is voorzienbaar als gevolg van beoogde dijkverhogingen in de Maasvallei. De Jong & Asselman (2019) hebben de mate van topvervlakking in de Maasvallei gekwantificeerd voor een reeks afvoergolven – van verschillende hoogte en verschillende breedte. En dat hebben ze gedaan voor de vroegere, de huidige en de waarschijnlijk toekomstige situatie. Zij vonden dat – afhankelijk van de piekafvoer – de topvervlakking in de huidige situatie (met overstroombare kades) tussen 400 en 650 m<sup>3</sup>/s bedraagt (bij respectievelijk 3200 en 4400 m<sup>3</sup>/s Maasafvoer te Eijsden), leidend tot een 40 tot 60 cm lagere hoogwaterstand op de Bedijkte Maas bij gemiddelde golfvorm. Bij smallere c.q. bredere afvoergolven kan de topvervlakking bij 4400 m<sup>3</sup>/s te Eijsden variëren van wel 1200 tot slechts 250 m<sup>3</sup>/s minder afvoer op de Bedijkte Maas. Een belangrijke bevinding was dat juist *de verschillende hoogte* van de kades – en dus verschillende instroommomenten – bijdroegen aan een effectieve topvervlakking bij verschillende afvoergolven. Zij vonden ook dat als de Maaskades worden versterkt om aan de nieuwe normen te voldoen en tegelijkertijd de zogenaamde systeemmaatregelen worden geïmplementeerd, de topvervlakking (bij gemiddelde golfvorm) toch nog met 100 m<sup>3</sup>/s zal afnemen. Dat betekent dus een grotere afvoer en circa 10 cm hogere waterstanden op de Bedijkte Maas. Dit illustreert de afhankelijk van stroomafwaartse riviertrajecten van de inrichting van de rivier bovenstrooms (de zgn. hydraulische systeemwerking<sup>12</sup>).

12 In dat verband zijn ook de bijdragen aan de afvoer vanuit zijbeken en zijrivieren relevant, evenals de timing van die bijdragen, zoals uit o.a. de Geul, de Roer en de Niers.



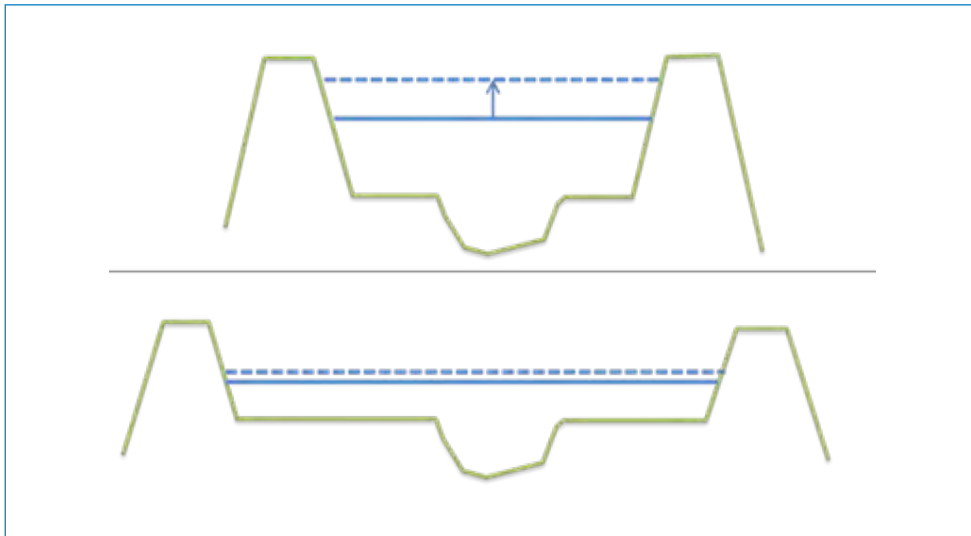


Figuur 25 Ruimteverlies Rijn en Maas sedert 1850 (naar Klijn et al., 2003, geactualiseerd tot 2020 (Klijn, 2019)).



Figuur 26 Ruimteverlies zuidelijke Maasvallei sedert 1850 (Asselman & Klijn, 2001).

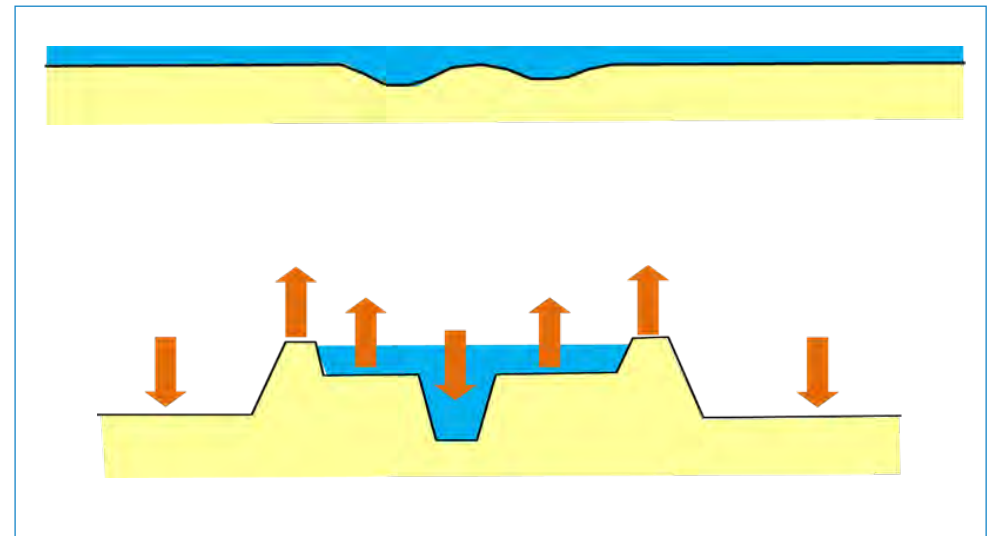
We kunnen dus vaststellen dat de waterstanden bij gelijke rivierafvoer hoger zijn geworden door een verkleining van de afvoercapaciteit op vrijwel alle bedijkte riviertrajecten, omdat water niet meer in de breedte weg kan maar de hoogte in moet (Figuur 27). Dat betekent dat de rivier gevaarlijker is geworden – als we bedenken dat hogere waterstanden tot grotere doorbraakkansen, snellere bresvorming, sneller vollopen en grotere overstromingsdiepten leiden (cf. Klijn et al., 2018). En we kunnen vaststellen dat hoogwatergolven die door het Maasdal naar het noorden lopen minder topvervlakking ondervinden en daardoor smaller en hoger ('gepiekter') blijven en zich sneller verplaatsen.



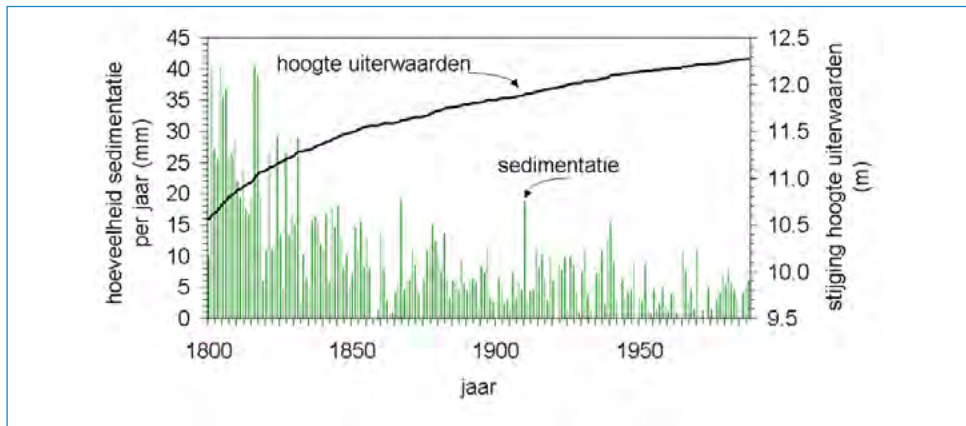
Figuur 27 Bij een smaller winterbed leidt extra rivierafvoer tot een grotere stijging van de waterstand dan in een breed winterbed (behalve als de waterdiepte zo gering wordt dat de vegetatieruwheid van de uiterwaard de stroomsnelheid en dus de afvoer sterk gaat beperken).

### Opslibbing van de uiterwaarden heeft de afvoercapaciteit verder verkleind

De bedijking heeft niet alleen direct de afvoercapaciteit en daarmee de hoogwaterstanden beïnvloed, maar ook is er een morfologisch effect van het verlies aan ruimte voor de rivieren door de bedijking. Dat morfologische effect hangt samen met de oppervlakte waarover sediment kan worden afgezet. In onbedijkte rivieren wordt sediment verspreid over de gehele overstromingsvlakte, bestaande uit oeverwallen en komgebieden; waarbij het grovere zand op de oeverwallen wordt afgezet en het fijnere slib in de kommen. Door bedijking kan sediment niet meer over grote oppervlakken worden verspreid, maar wordt het door de rivieren aangevoerde sediment over het veel kleinere oppervlak tussen de dijken afgezet (Figuur 28). Daardoor zijn de uiterwaarden over de hele linie hoger geworden en zijn hoogteverschillen binnen de uiterwaarden afgenomen. Er is als het ware een deken van gemengd sediment (klei en zand door elkaar) afgezet, dikker in de laagtes en dunner op de hoogtes. Dit heeft geleid tot een verlies aan milieudiversiteit en dus biodiversiteit (waarover later meer).



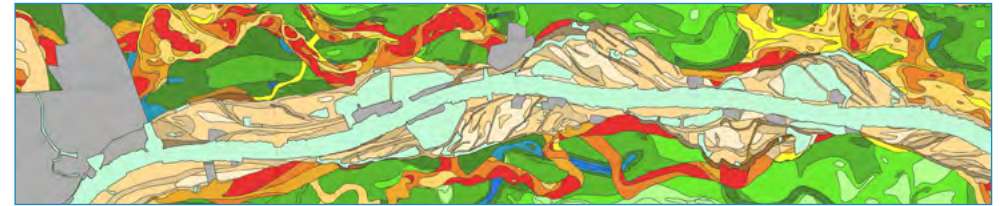
Figuur 28 Door de bedijking is de sedimentatie geconcentreerd op een kleiner oppervlak, waardoor de uiterwaarden hoger zijn geworden.



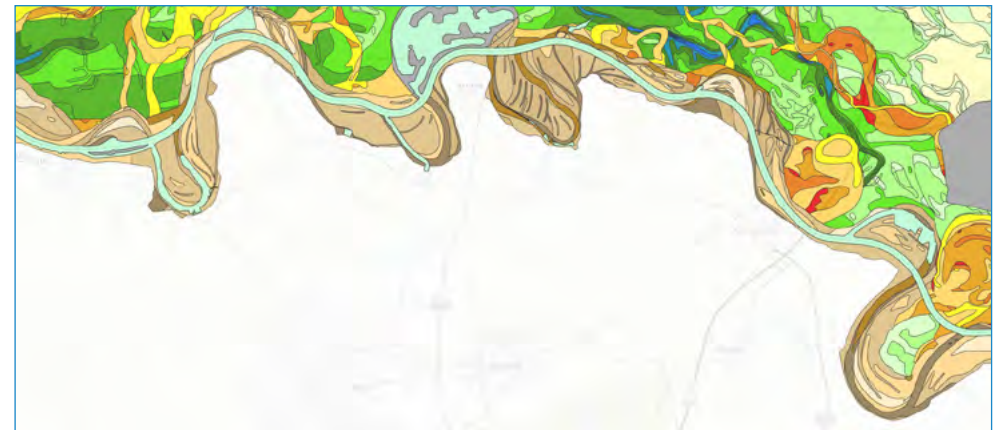
Figuur 29 De grootte van de jaarlijkse sedimentatie op de uiterwaarden en de hierdoor veroorzaakte stijging van de hoogte van de uiterwaarden (indicatief aangeduid met de zwarte lijn) is een langzaam vertragend proces als gevolg van het toenemende hoogteverschil tussen uiterwaard en rivierbodem (Middelkoop, 2001).

Deze deken van sediment in de uiterwaarden heeft – als we een geschiedenis van vele eeuwen beschouwen – langs de Waal geleid tot een toename van de hoogte van de uiterwaarden met ongeveer 1- 2 m. Langs de Nederrijn en IJssel is het minder. Langs de Bedijkte Maas is het meer: 2- 3 m (Figuur 30). Daarbij moeten we opmerken dat vooral langs de Nederrijn veel uiterwaarden ook weer zijn verlaagd door kleiwinning voor baksteenfabricage. Langs de Waal vinden we in een aantal uiterwaarden eveneens tichelgaten en langs de IJssel is dat op nog kleinere schaal het geval.

De uiterwaarden zijn dus hoger geworden door sedimentatie, zowel langs de Maas als langs de Rijntakken ((Middelkoop, 1997; Asselman; 1997; [Figuur 31](#)), en dat proces van vele eeuwen is door de normalisatie in de 19e eeuw nog versterkt doordat met het vastleggen van het zomerbed laterale erosie (door verlegging van de rivierbedding) juist werd voorkomen. Het gemiddeld hoogteverschil tussen de uiterwaard en de rivierbodem is door de sedimentatie op de uiterwaarden en de uitschuring van het zomerbed plaatselijk met meer dan 3 m toegenomen (zie ook het voorafgaande over de zomerbedinsnijding; [Figuur 28](#)). Ook is het hoogteverschil tussen de uiterwaarden en het bedijkte achterland daardoor groter geworden (zie ook [Figuur 31](#)).



Waal bovenstrooms van Tiel: uiterwaarddek op meeste plekken 1 à 2 m dik.

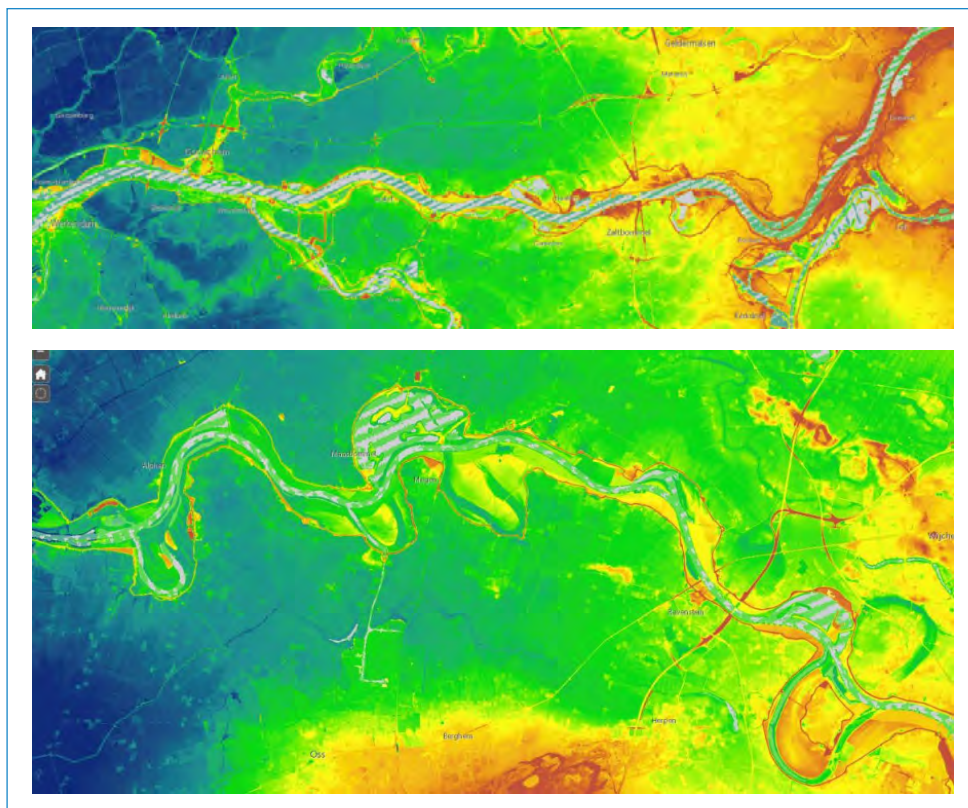


Maas tussen Ravenstein en Lith: uiterwaarddek op veel plaatsen 2 à 3 m dik.

- 1: Zand van bedijkte rivieren, binnen 1,0 m-mw
- 2: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 1,0 - 2,0 m-mw
- 3: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 2,0 - 3,0 m-mw
- 4: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 3,0 - 4,0 m-mw
- 5: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 4,0 - 5,0 m-mw
- 6: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 5,0 - 6,0 m-mw
- 7: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 6,0 - 7,0 m-mw
- 8: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 7,0 - 8,0 m-mw
- 9: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 8,0 - 9,0 m-mw
- 10: Zand van bedijkte rivieren, top tussen 9,0 - 10,0 m-mw

Figuur 30 Dikte van het uiterwaarddek als gevolg van sedimentatie na de bedijking (boven oorspronkelijke geulzandafzetting). De oorspronkelijke geomorfologie is weerspiegeld in de verschillende dikte van het dek en het reliëf genivelleerd (Cohen et al., 2009).





Figuur 31 De uiterwaarden zijn opgeslibd, waardoor deze vaak beduidend hoger liggen dan de oeverwallen waarop de eerste dorpen werden gevestigd en de dijken oorspronkelijk zijn aangelegd. Beneden-Waal (boven) en stuk bedijkte Maas (onder).

Omdat de uiterwaarden vrijwel overal meer dan twee keer breder zijn dan het zomerbed (Figuur 32) is de afvoercapaciteit van de rivieren door de sedimentatie in de uiterwaarden netto afgenomen. Dat is het geval ondanks dat langs de Nederrijn en Waal ook veel klei- en zandwinning heeft plaatsgevonden en langs de Maas zand- en grindwinning. Die delfstoffenwinning heeft namelijk vooral ‘gaten’ opgeleverd, maar geen doorgaande verruiming van het dwarsprofiel en dus nauwelijks afvoercapaciteit. Ook zijn recentelijk enkele uiterwaarden verlaagd in het kader van Ruimte voor de Rivier en zijn weerden verlaagd in het kader van Maaswerken; die beoogden wèl het verlies aan afvoercapaciteit weer enigszins te compenseren en zijn daar op ontworpen.

	Gemiddelde breedte zomerbed	Gemiddelde breedte winterbed	Factor verschil
<b>Bovenrijn</b>	372	2.244	6
<b>BovenWaal</b>	358	1.914	5
<b>Middenwaal 1</b>	360	1.496	4
<b>Middenwaal 2</b>	400	1.461	4
<b>Benedenwaal</b>	400	1.382	3
<b>Bovenmerwede</b>	400	1.203	3
<b>Pannerdensch Kanaal</b>	191	1.429	7
<b>Nederrijn-Lek 1</b>	200	1.188	6
<b>Nederrijn-Lek 2</b>	240	1.058	4
<b>Getijdelek</b>	240	673	3
<b>Bovenijssel</b>	100	1.851	19
<b>Middenijssel</b>	100	1.611	16
<b>Sallandse IJssel</b>	120	1.374	11
<b>Benedenijssel</b>	100	1.304	13
<b>Bovenmaas</b>	150	644	4
<b>Grensmaas</b>	150	906	6
<b>Plassenmaas</b>	150	2.120	14
<b>Zandmaas</b>	150	1.094	7
<b>Bedijkte Maas</b>	150	1.175	8
<b>Getijdenmaas</b>	160	872	5

Figuur 32 Gemiddelde zomerbed- en winterbedbreedtes (= totale breedte) van de Rijntakken en Maas (per traject) en de verhouding daartussen. De IJssel en Plassenmaas hebben een verhoudingsgewijs breed winterbed; de Getijdelek en Boven-Merwede kennen juist verhoudingsgewijs smalle uiterwaarden.

We kunnen concluderen dat de extra afvoercapaciteit die in de afgelopen twee eeuwen is ontstaan door de uitschuring van het zomerbed als gevolg van de normalisatie, in de bedijkte rivieren door de opslibbing van de uiterwaarden meer dan teniet is gedaan. De totale afvoercapaciteit is afgenomen. En daardoor zijn de hoogwaterstanden bij gelijke (hoge) rivierafvoer over een lange tijdsperiode (eeuwen) gemeten hoger geworden. Daar is vooraleer consequent met dijkverhoging op gereageerd, maar na 2001 ook met uiterwaardverlaging (programma Ruimte voor de Rivier) en met weerdverlaging (Maaswerken).

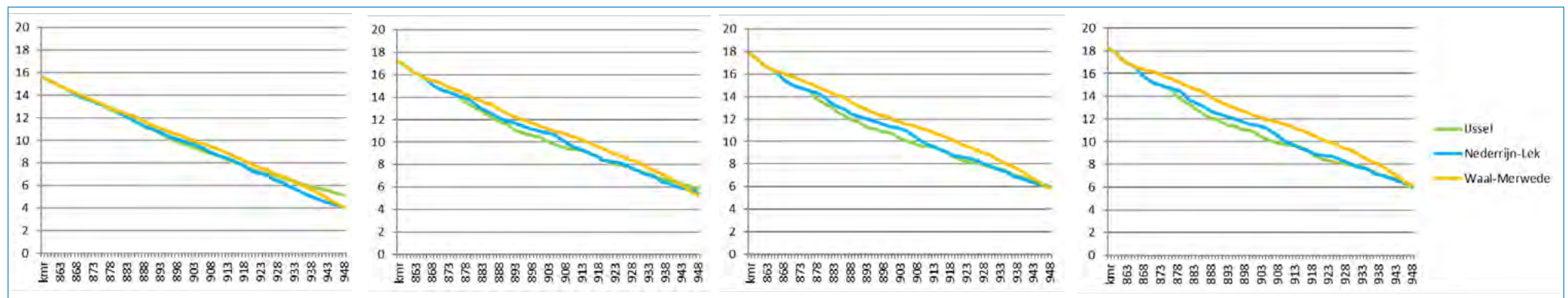
## De opgelegde afvoerverdeling over de Rijntakken sluit in het extreem hoge afvoerbereik niet goed aan bij de dimensies van het winterbed

De afvoerverdeling over de Rijntakken is bij hoogwater in principe bepaald door de dwarsdoorsnedes en hydraulische ruwheden van de trajecten tot ongeveer 25 km stroomafwaarts van de splitsingspunten (Silva et al., 2001). Sedert de aanleg van de regelwerken bij Pannerden en Hondsbroekse Pleij kan de afvoerverdeling op beide splitsingspunten enigszins worden bijgestuurd (op jaarbasis, niet op dag- of uurbasis; dus niet situationeel) (RWS, 2017; Schropp & Jansen, 2020). Het gaat om een fijnregeling met enkele 100-en m<sup>3</sup>/s naar weerszijden – althans, zo is beoogd.

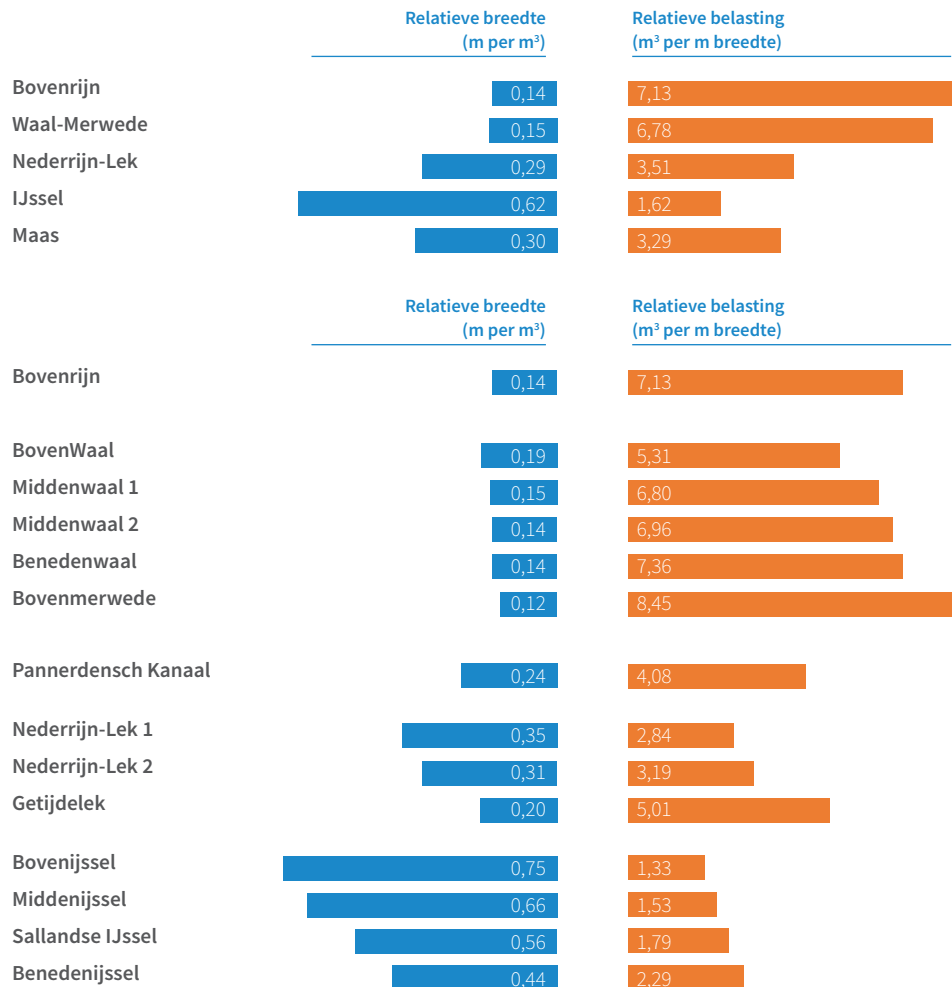
De gewenste – ‘beleidsmatige’ – afvoerverdeling was altijd goed te realiseren tot afvoeren zoals we die in de afgelopen 120 jaar hebben meegemaakt (tot ongeveer 12.000 m<sup>3</sup>/s). En volgens hydraulische simulaties gaat dat ook tot een afvoer van ongeveer 16.000 m<sup>3</sup>/s nog wel. Met de nieuwe hoogwaterbeschermingsnormen zijn echter ook grotere afvoeren relevant geworden. En die zullen naar verwachting door de klimaatverandering bovendien vaker voorkomen. Daarop anticiperend is in de PKB-Ruimte voor de Rivier gesteld dat het gewenst is bij een veranderend hoogwaterafvoerregime de Lek verder te ontzien, en het extra debiet geheel te verdelen over Waal en IJssel. Dat zou een aanpassing van de beleidsmatige afvoerverdeling opleveren, tegen 2050 en tegen 2100. Daarop wordt later teruggekomen.

Als we kijken naar de verhanglijnen bij hoge afvoeren die het resultaat zijn van de huidige morfologische configuratie rond de splitsingspunten (de dwarsdoorsnedes met de afgeregelde regelwerken), dan zien we dat de verhanglijnen van de drie Rijntakken bij een afvoer van ong. 9.000 m<sup>3</sup>/s (ong. 1:10 kans van optreden per jaar) ongeveer op elkaar liggen. Bij hogere afvoeren (van ong. 13.000, 15.000 en 16.250 m<sup>3</sup>/s) zien we echter dat de Waal steeds meer afwijkt en over bijna de gehele lengte tussen splitsingspunt en uitmonding in het Noordelijk Deltabekken, c.q. het IJsselmeer, significant hogere waterstanden vertoont dan de beide andere takken (Figuur 33).

Een deel van de verklaring voor dit verschil wordt gevonden door de beschikbare winterbedbreedtes per kubieke meter rivierafvoer van de drie Rijntakken te vergelijken (NB: lengte- en verhangverschillen even verwaarlozend; deze zijn kleiner dan 10%): dan blijkt het winterbed van de Waal per kubieke meter rivierafvoer slechts ‘half zo breed’ als dat van de Nederrijn (15 versus 30 cm) en slechts een kwart van dat van de IJssel (15 versus 60 cm; Figuur 34). Of met andere woorden: het winterbed van de IJssel is ongeveer net zo breed als dat van de Waal, maar krijgt slechts een kwart van diens hoogwaterafvoer te verwerken (zie behalve ook de gemiddelde breedtes van zomer- en winterbed in Figuur 32). Overigens valt dit geringe verschil in winterbedbreedte tussen Waal en IJssel ook al meteen te zien op een kaart van de Rijntakken (Figuur 35). Het verklaart dat de Waal bij hoogwater *gemiddeld* bijna 4x dieper is. En dat deze rivier hoger boven het binnendijkse land uitrijst (Figuur 36).



Figuur 33 De verhanglijnen van de drie Rijntakken bij een afvoer van respectievelijk 9000 m<sup>3</sup>/s (1: 10, links), 13.000 m<sup>3</sup>/s (1: 100, tweede van links), 15.000 m<sup>3</sup>/s (1: 1000) en 16.250 m<sup>3</sup>/s (1: 10.000, rechts) (geschatte kans van optreden in het huidige klimaat).



Figuur 34 De relatieve winterbedbreedte (= totale breedte), respectievelijk de door de opgelegde afvoerverdeling toebedeelde relatieve belasting van de Rijntakken en Maas (boven gemiddeld per tak, onder voor de Rijntakken gemiddeld per traject) bij een 'maatgevende' afvoer.

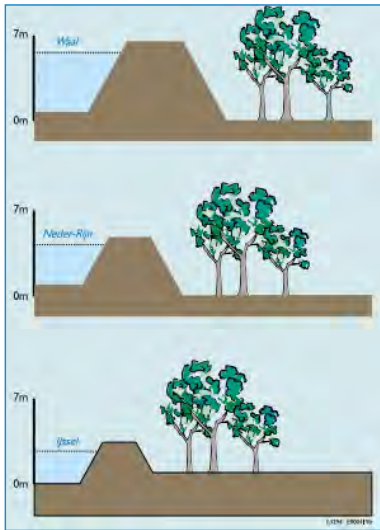
De breedteverschillen in relatie tot de opgelegde – 'beleidsmatige' – afvoerverdeling verklaren ook dat de Waal sterker reageert op toenemende hoogwaterafvoeren; de Waal is gevoeliger – of 'het minst robuust' – voor onzekerheden over de hoogwaterafvoeren bij Lobith bij de opgelegde afvoerverdeling (Klijn et al., 2019). Waarbij wel wordt

aangetekend dat een eventueel voorgenomen verschuiving van 100 of 500 m<sup>3</sup>/s naar de 'bescheiden' IJssel procentueel natuurlijk veel meer is dan diezelfde hoeveelheid procentueel scheelt op de 'enorme' Waal. Ook hierop wordt teruggekomen, namelijk bij de bespreking van beleidsopties in hoofdstuk 5. Hier wordt volstaan met de constatering dat de verschillen tussen de Rijntakken qua beschikbare breedte voor hoogwaterafvoer groot zijn; en men van verschillen in robuustheid zou kunnen spreken.



Figuur 35 De winterbedbreedte van de Rijntakken (en Maas) kan worden afgeleid uit een topografische kaart met aanduiding van het winterbed. (NB: Er zijn grote breedteverschillen per traject (zie de tekst).



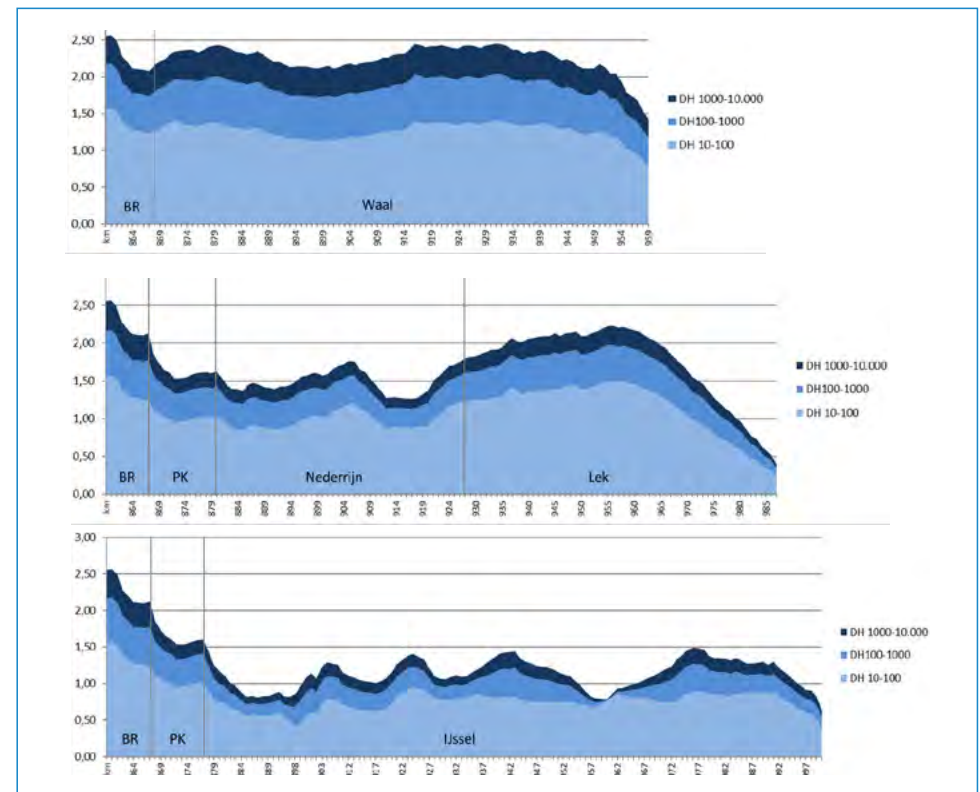


Figuur 36 De Waal rijst door de opgeslibde en smalle uiterwaarden en het grote aandeel in de afvoer van de Rijn hoog boven het achterland uit, de IJssel heeft zich over de grootste lengte echter veeleer ingesneden in een natuurlijk rivierdal en krijgt een kleine fractie van de hoogwaterafvoer te verwerken (uit Silva et al., 2001)

In dit verband is ook [Figuur 37](#) interessant, waarin voor de drie Rijntakken de verschillen tussen de 1/10, 1/100, 1/1000 en 1/10.000 per jaar<sup>13</sup> waterstand worden getoond (de zogenaamde cumulatieve decimeringshoogten (DH); een maat voor de robuustheid van de rivier als hoogwaterafvoersysteem; Klijn et al., 2019).

In deze figuren vallen de verschillen tussen de verschillende rivieren en trajecten op. Zo wordt de waterstand in de Waal fors hoger met toenemende afvoer van de Bovenrijn, namelijk met in totaal zo'n 2 tot 2,5 m. Dat wijst erop dat de Waal geen ruime rivier is ten opzichte van de hoeveelheid water die geacht wordt veilig te worden afgevoerd (namelijk circa 66 – 63 % van de Rijnafvoer; [Figuur 18](#)). Vooral het stuk bovenstreams van Nijmegen/Oosterhout met z'n vele meanders en het traject Tiel-Gorinchem zijn relatief krap. Voor dat laatste traject wordt wel gewezen op het verlies aan afvoercapaciteit door de scheiding Waal-Maas in 1904. Alvorens die beslissing werd genomen

was door Corstius Sissingh al berekend dat de hoogwaterstanden door deze scheiding zouden stijgen met 93 cm te St. Andries bij een Waal(!)afvoer van 5762 m<sup>3</sup>/s, maar dat effect werd deels gecompenseerd door het verleggen van de Maasmond naar de Amer en 'rivierverbetering', zodat volgens latere sommen de waterstanden bij een Waalafvoer van 7521 m<sup>3</sup>/s maar zo'n 51 en 55 cm hoger werden bij St. Andries respectievelijk Zaltbommel ("Commissie van deskundigen in zake de Verhooging van den Waterspiegel op de Waal door de afsluiting van de Heerewaardenschen Overlaten", 1894).



Figuur 37 Cumulatieve decimeringshoogten voor respectievelijk Bovenrijn-Waal (boven), Bovenrijn-Pannerdensch Kanaal-Nederrijn-Lek en Bovenrijn-Pannerdens Kanaal-IJssel (onder). NB: de 3 grafieken beginnen alle bij Lobith (links) maar de rivieren verschillen van (getoonde) lengte: Waal tot Vuren, IJssel tot monding (vandaar de verschillende breedte).

<sup>13</sup> Voor de Rijntakken is op basis van GRADE-resultaten gerekend met afvoeren van 9.000, 13.000, 15.000 en 16.250 m<sup>3</sup>/s, die achtereenvolgens een extra debiet van 4.000, 2.000 en 1.250 m<sup>3</sup>/s betekenen (respectievelijk + 44 %, + 15%, + 8% ten opzichte van de voorafgaande afvoer).

De Nederrijn – die 21% van de Bovenrijnafvoer veilig moet afvoeren – vertoont bij dezelfde range van afvoertoe name op de Bovenrijn te Lobith waterstandsverschillen van circa 1,5 m tot Wijk bij Duurstede (kvr 928). Meer stroomafwaarts, op de Lek (vanaf kvr 928), loopt het verschil op tot meer dan 2 m: de Lek zit krap in z'n jas. Kleinhans et al. (2013) geven als verklaring daarvoor dat de Lek een relatief jonge afsplitsing is van de oorspronkelijke – Oude – Rijn (die immers via Leiden naar Katwijk liep), door moeilijk te eroderen veengronden, en ontstaan is terwijl intussen de Waal al was begonnen een groot deel van het debiet van de Bovenrijn af te tappen.

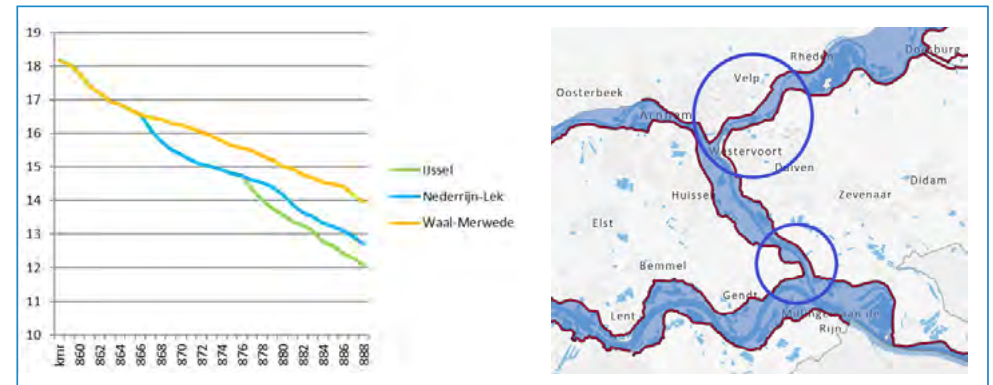
Op de IJssel, die bij hoogwater slechts zo'n 13- 16% van de Rijnafvoer veilig moet verwerken, blijft het totale waterstandsverschil voor deze range van afvoeren beperkt tot minder dan 1,5 m en plaatselijk is het zelfs minder dan 1,0 m. Dit wijst op een relatief ruime rivier, waarin de waterstandstijging bij toenemende afvoer door de relatief brede uiterwaarden beperkt blijft<sup>14</sup>; uiterwaarden die plaatselijk nog zijn verruimd in het kader van Ruimte voor de Rivier, bijvoorbeeld bij Cortenoever, Voorster Klei, Veessen-Wapenveld en de Vreugderijker Waard. Maar de kwalificatie relatief ruim is slechts in zoverre juist, dat deze geldt in verhouding tot een procentueel klein deel van de Bovenrijn-afvoer.

Alles overziend valt ook op dat de bovenste twee 'donkerst blauwe waterschijven' op de Nederrijn-Lek en IJssel veel dunner blijven dan die op de Waal; dat is dus deels het gevolg van het verschil in afvoercapaciteit (met name breedte van het winterbed) en deels het gevolg van het met de regelwerken naar de Waal forceren ('persen') van circa 2/3 deel van zeer grote/extreme Rijnafvoeren (zie de volgende paragraaf). Alvorens het beeld voor de Maas te behandelen, zal daarom eerst nog worden ingegaan op de consequenties van het hier behandelde voor de beheersbaarheid van de afvoerdeling over de Rijntakken.

## De beoogde afvoerdeling over de Rijntakken is bij extreem hoogwater niet goed te realiseren

Doordat met groter wordende rivierafvoeren het waterhoogteverschil tussen de drie Rijntakken toeneemt, dreigt de afvoerdeling te worden beïnvloed. Dat wordt zichtbaar als we inzoomen op de verhanglijnen in het splitsingspuntengebied (Figuur 38), want dan zien we – bij een afvoer van 16.250 m<sup>3</sup>/s te Lobith – een sterk verhang in de hoogwaterstanden op het Pannerdens Kanaal en de IJssel, terwijl de Waal daar juist een klein verhang kent.

Dit grote verhang op het Pannerdens Kanaal en de Boven-IJssel is het gevolg van de hier kunstmatig – en juist met het oog op de gewenste afvoerdeling – gerealiseerde en in stand gehouden flessenhalzen ter hoogte van de ingang van het Pannerdens Kanaal en ter hoogte van de aftakking van de IJssel bij Westervoort (beide goed te zien in de kaart van Figuur 35). Figuur 38 laat ook zien hoezeer de Boven-Waal juist opstuwt doordat het water niet goed weg kan door een – in verhouding tot het afvoerpercentage – beperkte afvoercapaciteit, terwijl het Pannerdens Kanaal – ondanks de flessenhals – als het ware water aanzuigt. En we zien datzelfde nogmaals waar de Nederrijn opstuwt door beperkte afvoercapaciteit ter hoogte van Arnhem terwijl de Boven-IJssel aanzuigt.



Figuur 38 De verhanglijnen bij de splitsingspunten Pannerdense Kop en IJsselpop (Hondsbroekse Pleij) bij een rivierafvoer van 16.250 m<sup>3</sup>/s (y-as: berekende waterstand t.o.v. NAP) en de verantwoordelijke flessenhalzen op kaart.

14 Zie voor een uitgebreidere interpretatie van de hobbels en bobbels in de verhanglijnen Asselman & Hendriks, 2016 of het memo van Deltares (Klijn, d.d. 1-3-2018) over de hier getoonde figuren.

## Ook op de Maas bepalen verschillende winterbedbreedtes de hoogwaterstanden

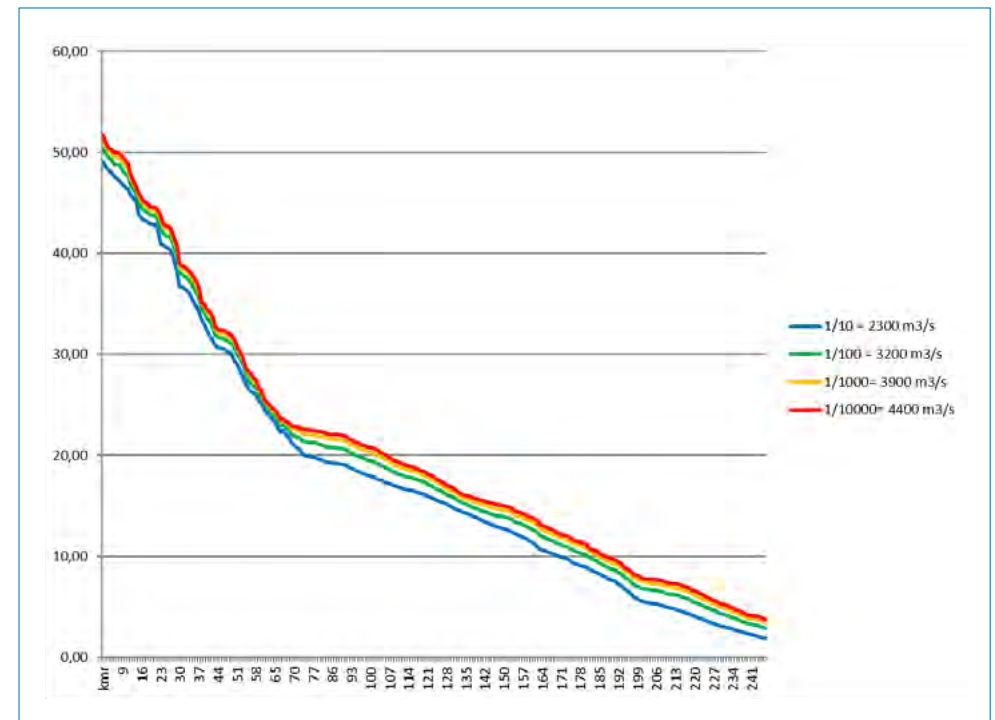
Vanuit het oogpunt van een veilige hoogwaterafvoer is de Maas niet te vergelijken met de Rijntakken, want deze rivier kent een aantal zeer verschillende trajecten met sterk verschillend verhang als gevolg van grote verschillen in karakter (geomorfologische context, deels bepaald door geologische breuksystemen; zie Het Verhaal van de Maas (Anonymus, 2018)). En ook kent de Maas een volstrekt ander afvoerregime, met zeer lage afvoeren in de (na)zomer (Anonymus, 2017).

Op de meeste trajecten van de Maas (met uitzondering van de Grensmaas waar het Julianakanaal naast ligt) is het zomerbed door kanalisatie zo ruim gedimensioneerd (niet alleen breed maar ook diep), dat het middelhoge hoogwaters kan afvoeren zonder dat het zomerbed overloopt. Dat betekent dat hoogwaters relatief zelden over de weerden of door de uiterwaarden stromen. Dit betekent dat de afvoercapaciteit van de Maas voor hoogwaters in grotere mate door de dimensies van het zomerbed wordt bepaald dan op de Rijntakken (die veel vaker vol zitten). Daar staat tegenover dat de verschillen tussen lage en hoge rivierafvoeren op de Maas veel groter zijn<sup>15</sup>, zodat de betekenis van het winterbed voor een veilige hoogwaterafvoer ook op de Maas zeer groot is. En dat de dimensies van het winterbed dus bepalend zijn voor de verwachte hoogwaterstanden.

De Bovenmaas en Grensmaas zijn relatief smal (Figuur 39, Figuur 41) doordat deze door heuvelland lopen, maar deze trajecten zijn ook steil, waardoor opstuwing door een lokaal beperkte afvoercapaciteit (een flessenhals bijvoorbeeld) niet zo ver stroomopwaarts doorwerkt; dat betekent dat bij grote rivierafvoeren lokaal wel sterke verhoging van de waterstanden optreedt, maar dat het effect ervan ruimtelijk niet zo ver reikt (Figuur 40). Maastricht vormt in de Bovenmaas een duidelijk herkenbare flessenhals, die oorspronkelijk al bestond in de vorm van een brug met beperkte overspanning, maar die in de 20e eeuw is versterkt door het ontnemen van ruimte aan de rivier op de oostoever (de voormalige Heugemer overlaat, inmiddels volgebouwd; Figuur 26).

	Gemiddelde breedte zomerbed	Gemiddelde breedte winterbed	Factor verschil
Bovenmaas	150	644	4
Grensmaas	150	906	6
Plassenmaas	150	2.120	14
Zandmaas	150	1.094	7
Bedijkte Maas	150	1.175	8
Getijdenmaas	160	872	5

Figuur 39 Gemiddelde zomerbed- en winterbedbreedtes (= totale breedte) van de Maas per traject en de verhouding daartussen. De Plassenmaas heeft een verhoudingsgewijs breed winterbed; de Bovenmaas en Getijdenmaas hebben een smal winterbed.



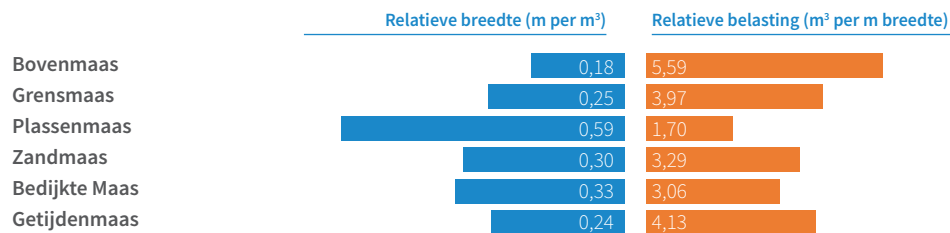
Figuur 40 Verhanglijnen van hoogwaters op de Maas. Door de verschillende geologische gesteldheid is er een groot verschil in het bodemverhang van de rivier en de samenstelling van het rivierbed (van vast gesteente via grind (Grindmaas) en zand (Zandmaas)).

15 Het verschil tussen de hoogst en laagst gemeten afvoer op de Maas is een factor 150, terwijl dit op de Rijn een factor 20 is (Het Verhaal van de Rivier; Anonymus, 2017).



Het traject van de Plassenmaas is juist zeer breed (Figuur 39, Figuur 41), omdat de rivier hier door een dalingsgebied met sedimentaire opvulling achter de Peelhorst (geologisch fenomeen) stroomt, met sterk meanderen als gevolg. In dit traject is veel bergingscapaciteit waardoor het belangrijk is voor de topvervlakking in dit deel van de Maasvallei; deze leidt tot een minder gepiekte (minder hoge, iets bredere) afvoerpiek stroomafwaarts van Roermond.

De Zandmaas en Bedijkte Maas hebben gemiddelde winterbedbreedtes, indien afgezet tegen een maatgevende hoogwaterafvoer (Figuur 41), maar het winterbed van de Bedijkte Maas heeft wel veel scherpe bochten – die de afvoercapaciteit beperken – en kleinschalige hydraulische knelpunten (verg. Asselman & Hendriks, 2016).

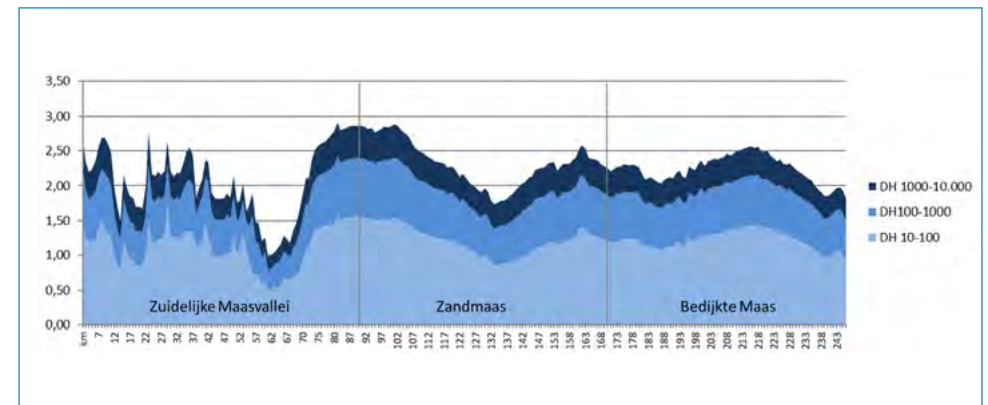


Figuur 41 De relatieve winterbedbreedte (= totale breedte) en haar inverse, de relatieve belasting, van de Maas per traject bij een hoogwaterafvoer van 3.600 m<sup>3</sup>/s (< 1: 1000 kans per jaar).

Voor de Maas zijn de cumulatieve decimeringshoogten<sup>16</sup> getoond in Figuur 42. Deze weerspiegelen de sterke karakterverandering van de Maas tussen Maastricht en de Biesbosch. In het linkerdeel van de figuur (op de Bovenmaas en de Grensmaas tot ongeveer Maaseik (kmr 53)) zien we sterke schommelingen, die samenhangen met lokale variaties in winterbedbreedte die tot opstuwing leiden.

In de Plassenmaas zien we eerst heel lage waarden voor de decimeringshoogten (vooral tussen Maaseik (kmr 53) en Linne (kmr 70)), samenhangend met de grote beschikbare ruimte. Maar die waarden lopen plotseling sterk op waar de Maas zich een weg heeft gebaan door het Peelhorst-Venloslenkmassief. Het effect van de opstuwing door deze vernauwing van geologische oorsprong is tussen Roermond (kmr 80) en Venlo (kmr 107) zichtbaar in sterk verhoogde decimeringshoogten. Omdat de Maas hier door een natuurlijk terrassenlandschap stroomt, waar de Maas relatief diep ingesneden in het landschap ligt, impliceert dit geen groot overstromingsgevaar.

Vanaf kmr 150 is de Maas, eerst eenzijdig, en vanaf kmr 165 aan beide zijden, bedijkt. Hier vormen hoge hoogwaterstanden wel een belangrijk overstromingsgevaar, omdat dijken bij hoogwater kunnen bezwijken en het land achter de dijken in dergelijke omstandigheden lager ligt dan de rivierwaterstand. Vanaf kmr 140 zien we de cumulatieve decimeringshoogten boven de 2,0 m blijven, tot kmr 235. Dat is vergelijkbaar met waarden die we ook zagen op de Waal, waarbij moet worden aangetekend dat het afvoerregime van de Maas veel dynamischer is dan dat van de Rijn. Waar de Rijn voor de grens met Nederland immers significante aftopping kent, is dat bij de Maas maar zeer beperkt het geval omdat deze rivier net uit de steile Ardennen komt<sup>17</sup>.



Figuur 42 Cumulatieve decimeringshoogten voor de Maas van Eijsden tot Keizersveer

16 Voor de Maas zijn de afvoeren die ongeveer overeenkomen met 1/10, 1/100, 1/1000 en 1/10.000 eveneens uit GRADE afgeleid. Het betreft respectievelijk 2300, 3200, 3900, en 4400 m<sup>3</sup>/s bij Borgharen.

17 Zie voor een uitgebreide interpretatie van de hobbels en bobbel Asselman & Hendriks, 2016.



### Zonder rivierverruiming reageren de hoogwaterstanden op Maas en Waal het sterkst op toenemende hoogwaterafvoeren, die op de IJssel het minst sterk

Als we de huidige afvoercapaciteit van de Maas en de Rijntakken – en hun verschillende robuustheid voor hoogwaterafvoer – confronteren met de verwachte grotere afvoeren door klimaatverandering (zie hoofdstuk 2), dan kunnen we vaststellen dat bij de huidige winterbeddimensies de hoogwaterstanden op de Maas sterker zullen reageren dan die op de Rijntakken. En tevens dat de Rijntakken onderling ook nog sterk verschillen door de vigerende afvoerverdeling.

Berekeningsresultaten die zijn gedaan door het Programmabureau Rivieren (2013) geven – door de oogbaren bezien – het volgende beeld bij de toename van de rivierafvoeren die met een kans van ongeveer 1:1000 per jaar worden verwacht:

- hoogwaterstand Maas in 2050 zo'n 0,5 m hoger dan nu, oplopend tot 0,9 m hoger in 2100;
- hoogwaterstand Waal in 2050 zo'n 0,3 m hoger; 0,6-0,7 m hoger in 2100;
- hoogwaterstand op Nederrijn-Lek – bij continuering beleid Lek ontzien – slechts 8 cm hoger in 2100 en uitsluitend in het westelijk deel als gevolg van de zeespiegelstijging;
- hoogwaterstand IJssel in 2050 ongeveer 0,2 m hoger dan nu; respectievelijk 0,5 m hoger in 2100.

Voor rivierafvoeren met een kleinere kans van optreden (bijv. 1: 10.000) is de verhoging iets minder groot dan deze getallen suggereren, maar verschillend tussen de verschillende Rijntakken en tussen Maas en Rijn. Op de Waal en de Maas is het te verwachten verschil in die extreme hoogwaterstand het grootst; het eerste omdat de Waal de minst robuuste Rijntak is (zie Figuur 37) en het tweede omdat de Maas een afwijkend afvoerregime heeft – met een grotere procentuele toename van de hoogwaterafvoeren.

Het verschil tussen de Maas enerzijds en de Rijntakken anderzijds komt dus deels door de verschillende respons van het stroomgebied op de hoogwaterafvoeren (eigenschappen stroomgebied en al dan niet hydraulische systeemwerking (aftopping) in het buitenland), en deels door verschillen tussen hoe de rivieren erbij liggen.

De verschillen tussen de Rijntakken onderling komen eveneens voort uit verschillen tussen hoe de verschillende Rijntakken erbij liggen (erg krap versus wat ruimer bemeten), maar ook uit hoe de afvoerverdeling is afgeregeld.





# 4

Foto: Siebe Swart



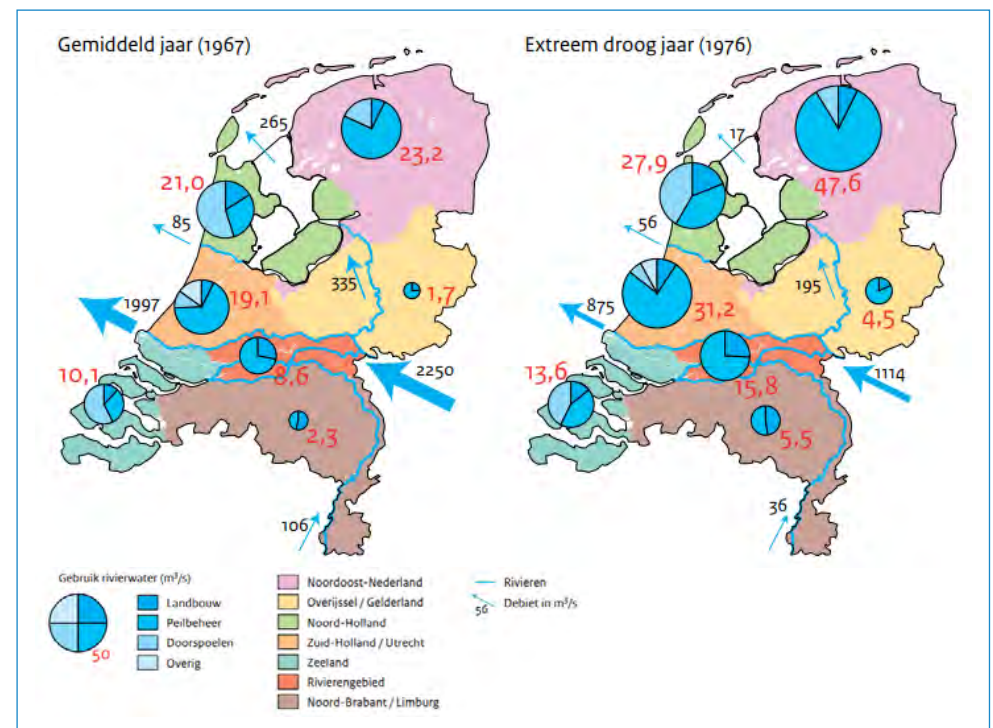


## Reflectie op de hoofddoelen van het rivierbeheer

### Een optimale verdeling van water over Nederland en het borgen van goede condities voor gebruiksfuncties en waarden

Eén van de hoofddoelen van het rivierbeheer betreft het bijdragen aan de zoetwatervoorziening van geheel Nederland, vooral in relatief droge jaargetijden. De ligging van ons land in de delta van de grote stroomgebieden van Rijn en Maas betekent dat er vrijwel voortdurend een substantiële aanvoer van zoetwater is. Op de totale waterbalans van Nederland (op jaarbasis) is de aanvoer via de rivieren qua volume veel belangrijker dan de neerslag (2- 2,5 maal zoveel); en dat is niet alleen het geval in een gemiddeld jaar, maar ook in meteorologisch droge jaren (zie NHV, 2004; Klijn et al., 2012). Zelfs in een extreem droog jaar (vergelijk 1976) stroomt op jaarbasis nog ongeveer 40 km<sup>3</sup> (kubieke kilometer) water naar zee; en is er 's zomers nog een significante flux van zoetwater door ons land (Figuur 43).

Figuur 43 Schets van de gemiddelde horizontale waterstromen door Nederland in een gemiddeld jaar en een extreem droog jaar en het watergebruik in verschillende landsdelen (uit: PBL, 2011 op basis van analyses Deltares).



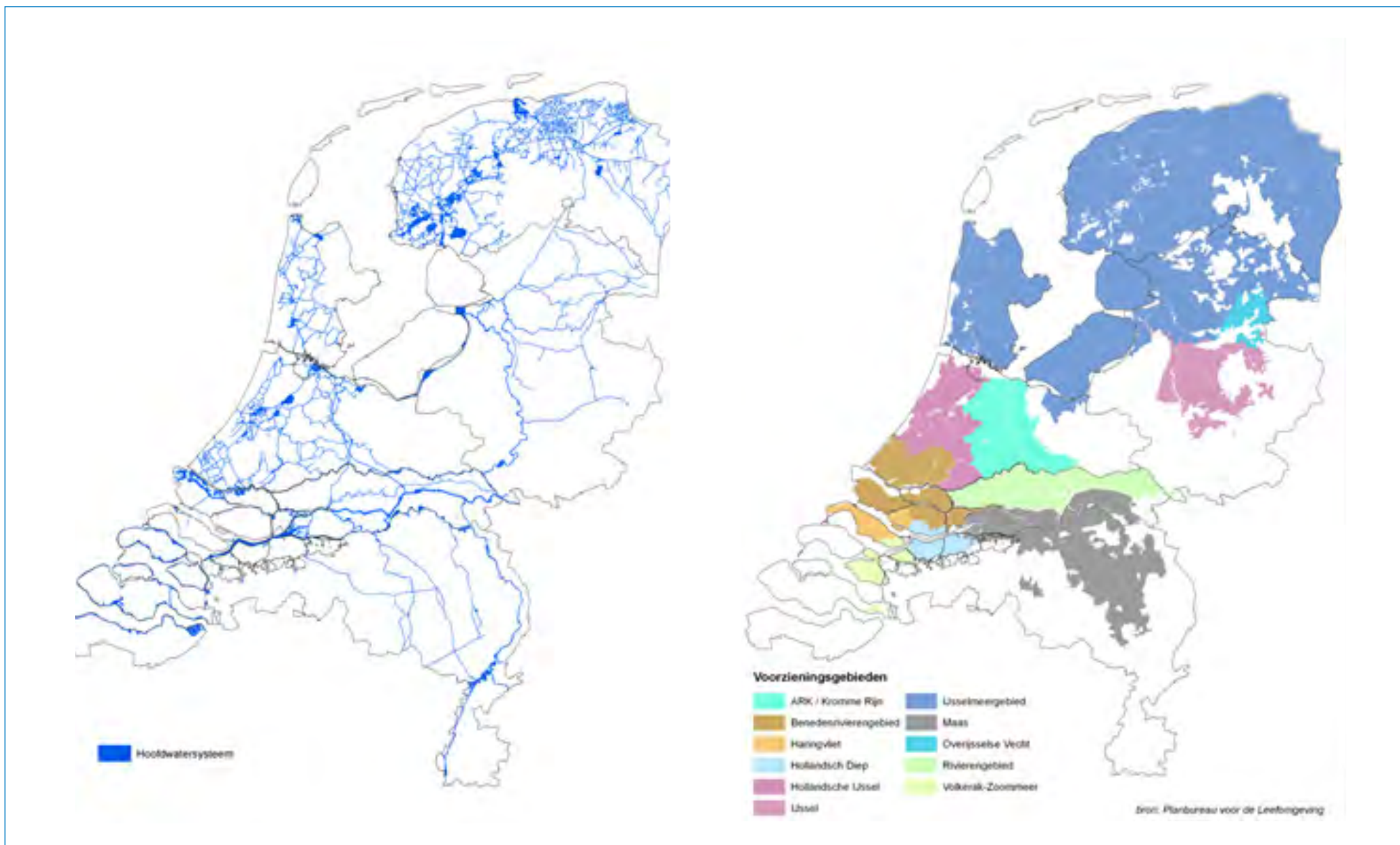
De zoetwateraanvoer door de Rijn en Maas vormt zo de basis voor 1) het nat houden van circa twee derde van ons land (peilbeheer), 2) het zoet houden van ongeveer een derde van ons land (doorspoelen) en 3) het op voldoende diepte houden van twee van onze drie Rijntakken (Anonymus, 2020). Meer algemeen geformuleerd: de zoetwaterverdeling via de grote rivieren is de basis van het van voldoende zoet water en de juiste condities voorzien van voor Nederland belangrijke economische sectoren – zoals landbouw en binnenvaart – en van de bijzondere natuurlijke en culturele landschapswaarden die aan ons land worden toegeschreven. IRM is – in die zin – een cruciale pijler onder de zoetwatervoorziening van Nederland, waar meer in het algemeen DP-Zoetwater voor aan de lat staat.

Tegen deze achtergrond kan één van de belangrijke hoofddoelen (ook wel: opgaven) voor IRM als volgt worden gespecificeerd: het eerlijk en doelmatig **verdelen van het beschikbare rivierwater** (= volumina) over verschillende landsdelen, en het bij lage rivierafvoeren realiseren van voldoende **hoge (rivier)waterstanden** en voldoende **vaardiepte** (= condities). Het gaat dus om 3 subdoelen:

- De verdeling van water (= volumina) in tijden van geringe aanvoer berust op een afweging op rijksniveau en – waar het de Maas en het Belgische Albertkanaal betreft – zelfs een internationale. Een eerste verkenning naar wat een optimale verdeling zou zijn is gedaan naar aanleiding van het droge jaar 1976 (PAWN-studie door RAND Corporation en Waterloopkundig Laboratorium; Pulles, 1985). Deze verkenning is uitgemond in een stuwprogramma voor de stuwen in de Nederrijn, in het bijzonder stuw Driel. Daarmee wordt de afvoer over de IJssel naar het noorden van het land (IJsselmeer) vergroot, terwijl er tevens genoeg naar het westen van het land wordt gestuurd via de Waal en de Nederrijn-Lek. Voor de Maas is sedertdien het Maasverdrag opgesteld, waarin is vastgelegd hoe bij lage rivierafvoer het water tussen Nederland (Maas en Zuid-Willemsvaart) en België (Albertkanaal) wordt verdeeld. De meest recente verkenning van mogelijke alternatieve waterverdelingen over het land heeft plaatsgevonden in het kader van het Deltaprogramma-Zoetwater (Mens et al., 2020); deze heeft niet geleid tot een ander inzicht over wat een optimale verdeling over de verschillende landsdelen is.

- De rivierwaterstanden zelf (condities) zijn bepalend voor veel functies en waarden langs de rivieren, omdat ze mede de grondwaterstanden en het overstromingsregime van de weerden en uiterwaarden bepalen. En ze beïnvloeden de grondwaterstanden zelfs tot ver in de omtrek, ook in de hogere zandgronden (Veluwe, Nijmeegse heuvelrug, Maasterrassen), omdat grond- en oppervlaktewater uiteindelijk één systeem vormen (zie bijv. Figuur 15) waarbij de rivier als drainagebasis fungeert.
- Een bijzondere conditie die IRM beoogt te borgen betreft de vaarwegdimensies, meer in het bijzonder de vaardiepten en de daarmee gecorreleerde vaarwegbreedte, over de volle lengte van vervoerscorridors. Deze vaarwegdimensies volgen o.a. uit internationale verdragen, die deels weer berusten op verdragen over de vrije (lees: onbelemmerde) vaart op de Rijn, maar deels ook op wensen vanuit de transport- en verladerssector.

Deze nationale en zelfs internationale afwegingen – inzake de verdeling van zoetwater over Nederland en België en de bevaarbaarheid van het hoofdvaarwegennet – betekenen dat kan worden gesteld dat hier praktisch sprake is van *uitgangspunten voor de verdeling* van het aangevoerde water over de Rijntakken en de Maas en haar kanalen bij lage en gemiddelde rivierafvoeren. Tegelijkertijd ligt echter de wens voor om de Waal en IJssel vrij-afstromend te houden en het waterstandsregime zo natuurlijk mogelijk. Dat volgt namelijk uit internationale afspraken over natuurbehoud en -ontwikkeling en het opheffen van belemmeringen voor vismigratie (KRW, Zalm2020); waarbij ook de Maas meeprofiteert van het openen van de Haringvlietsluizen (kierbesluit). Ook op dit punt is sprake van condities die door de inrichting en het beheer van de rivier moeten worden gewaarborgd. En dus van een opgave voor IRM.



Figuur 44 Links het netwerk van hoofdwatersysteem en boezemwateren waarlangs de distributie van het water plaatsvindt. En rechts gebieden waar wateraanvoer uit het hoofdsysteem plaatsvindt met aanduiding van de bron; uiteindelijk betreft het allemaal Rijn- en Maaswater, met uitzondering van een gebiedje langs de Overijsselse Vecht.



## Een eerlijke en doelmatige verdeling van zoetwater over verschillende landsdelen en watervragers

---

In het licht van het bovenstaande is de kern van het vraagstuk van de verdeling van door de rivieren aangevoerd zoetwater, hierboven aangeduid als het eerste subdoel, als volgt te begrijpen:

- Zorgen dat de strategische zoetwatervoorraad in het IJsselmeer op peil wordt gehouden ten behoeve van de zoetwatervoorziening van Noord-Nederland (incl. spoeldebiet tegen zoutindringing via de schutsluizen, de spuisluizen en door de vismigratierivier; en de Twentekanalen); kortweg: genoeg afvoer door de IJssel naar het noorden.
- Het van zoetwater voorzien van midden-west Nederland (voor peilbeheer, doorspoelen (interne verzilting) en landbouwwatervoorziening), en
- het voorkomen c.q. zoveel mogelijk beperken van externe verzilting door zoutindringing via de Nieuwe Waterweg met het oog op waterinnames bij Bernisse, Gouda en op de Lek; ofwel: genoeg door de Waal en Nederrijn-Lek naar het westen.
- Het van water voorzien van grote delen van Limburg en Noord-Brabant via de kanalen die aftakken van de Maas.

Deze waterverdeling wordt tot op zekere hoogte geregeld met het stuwprogramma voor stuw Driel (en de overige stuwen in de Nederrijn-Lek), en voor Limburg-Brabant door vastgelegde inlaathoeveelheden naar de kanalen vanuit de Maas bij Maastricht. Deze beide beogen een bepaalde verdeling van debieten (waterhoeveelheden per tijdseenheid), maar de aansturing van stuw Driel berust in de praktijk op gemeten waterstanden te Lobith; de implicaties daarvan zijn beschreven in het vorige hoofdstuk.

## Water vasthouden en laagwaterstanden omhoog brengen

---

Het tweede subdoel heeft betrekking op het borgen van de juiste condities voor gebruiksfuncties en natuur- en cultuurwaarden. In landelijk gebied wordt die publieke taak vervuld door de waterschappen, voor de grote wateren is deze taak aan Rijkswaterstaat toegekend.

Zoals in hoofdstuk 2 is uiteengezet, bepalen de rivierwaterstanden ten eerste de waterstanden in uiterwaardwateren (plassen, strangen/hanken en nevengeulen), en de grondwaterstanden in de uiterwaarden en weerden, en daarmee de natuurwaarden van de daar aanwezige aquatische en terrestrische natuur, maar ook de mogelijkheden voor landbouw in de uiterwaarden.

Omdat de rivieren in verbinding staan met kleinere rivieren en beken – waaruit water afvloeit – en met kanalen en vaarten – waardoor water wordt verspreid – bepalen de rivierwaterstanden ten tweede de drainagebasis voor deze regionale wateren alsmede de mogelijkheden tot waterdistributie. Dit betreft zowel waterinnamepunten die onder vrij verval werken (bijv. Zuid-Willemsvaart) als innamepunten waar water met behulp van pompen eerst naar grotere hoogte wordt opgevoerd (bijv. Twentekanaal).

Ten derde zijn de rivierwaterstanden voor sommige delen van het land, met name de hogere zandgronden, relevant voor de grondwaterstroming en -standen. Lagere rivierwaterstanden leiden tot lagere grondwaterstanden, omdat in zandgronden grondwaterstroming naar de rivier plaatsvindt; en omgekeerd: hogere laagwaterstanden op de rivier kunnen bijdragen aan het verhogen van de grondwaterstanden in tijden van droogte.

Samengevat kan worden gesteld dat voor het borgen van de juiste condities het zo lang mogelijk vasthouden van water en het zo hoog mogelijk houden van de rivierwaterstanden cruciaal is, vooral in perioden met geringe wateraanvoer door de rivieren. Heel plat gesteld: de laagwaterstanden moeten (weer) omhoog.

## Voldoende vaardiepte (ook bij drempels) en voldoende dekking van kabels en leidingen

---

In vervolg op de vorige paragraaf vraagt één gebruiksfunctie bijzondere aandacht, omdat die zeer specifieke eisen aan de condities stelt en van groot maatschappelijk belang wordt geacht. En dat is de scheepvaart. En wel omdat de grote rivieren de kern van het hoofdvaarwegennet vormen, waarvoor Rijkswaterstaat een specifieke beheertaak heeft. De inrichting van de verschillende rivieren bepaalt daarbij de moeilijkheidsgraad van deze taak: de Maas en Nederrijn zijn immers gekanaliseerd en weinig veranderlijk, maar de Waal en IJssel zijn vrij-afstromend en kennen sterke morfologische ontwikkelingen (uitschuring en aanzanding). Dat bemoeilijkt deze taak.

De gekanaliseerde Maas en Nederrijn-Lek worden bevaarbaar gehouden met behulp van stuwen, waarmee het water kan worden vastgehouden en het waterpeil kan worden opgezet. Deze rivieren 'lopen niet leeg' en dat impliceert dat de vaardiepte in de praktijk 'nooit' (behalve als er een stuw wordt stukgevoerd) beperkend is. Het betekent ook dat de totale transportcapaciteit over deze rivieren wordt bepaald door de capaciteit van de schutsluizen.

De waterdiepte op de vrij afstromende Waal en IJssel wordt daarentegen bepaald door de hoeveelheid water die door de rivier stroomt en de dimensies en hydraulische ruwheid van het zomerbed. Gegeven het verhang stromen deze rivieren door die dimensies en ruwheid sneller of langzamer (leeg). Deze rivieren bevaarbaar houden is een opgave, die meer specifiek kan worden aangeduid als: voldoende vaardiepte garanderen bij (eveneens) voldoende vaarwegbreedte.

Voldoende **vaardiepte** over de gehele scheepvaartcorridor (of relevante trajecten) vergt het voorkomen van diepteverschillen (hobbels en bobbel), want het ondiepste punt bepaalt de transportcapaciteit van de hele corridor. **Het gaat** daarbij nadrukkelijk **om waterdiepte** (= de dikte van de waterlaag boven de bodem) **en niet om wat vaak wordt verstaan onder de diepte van de rivier** (namelijk de bodemligging t.o.v. NAP). Bij het uitdiepen van de rivier zakt het water op de vrij afstromende rivieren immers mee; rivieren kennen een hellend wateroppervlak dat zich voegt naar variaties in de bodemhelling.

Het wegbaggeren van hobbels en bobbel heeft in het verleden bijgedragen aan de in hoofdstuk 2 beschreven daling van de rivierbodem en wreekt zich momenteel in het relatief steeds hoger komen te liggen van de zogenaamde 'harde lagen', die daardoor boven de omgeving uit gaan steken en de beperkende factor voor de vaardiepte worden. Bovendien wordt voldoende dekking van kabels en leidingen door een laag sediment gevraagd, opdat deze geen schade ondervinden door scheepsbewegingen, ankeren of de erosie van de rivier zelf. Dit wordt soms gerealiseerd door het instellen van lokale baggerverboden, die – als ervoor en erna wel wordt gebaggerd – op hun beurt weer leiden tot ondieptes in de rivier, zoals blijkt uit de frequentieverdeling van locaties van zgn. Minst Gepeilde Dieptes.

In plaats van door het wegbaggeren van hobbels en bobbel kan vaardiepte ook worden bereikt door de bodem eromheen juist omhoog te brengen om zo een zo gelijkmatig mogelijk en geleidelijk aflopend lengteprofiel tot stand te brengen (= de hobbels en bobbel uitvlakken). Dat vraagt juist om aanvulling en dus aanvoer van sediment, in plaats van het weghalen en afvoeren ervan. Daarmee kan de algehele daling van de rivierbodem worden afgeremd of gestopt. Een andere mogelijkheid is het (verder) beperken van de breedte van het zomerbed, waardoor dezelfde hoeveelheid water meer diepte over een geringere breedte oplevert. Op de IJssel lijkt een versmalling van het zomerbed volstrekt onmogelijk, maar op de Waal is de huidige vaarweg nog breder dan volgens internationale afspraken gewenst (voor de internationaal overeengekomen vaargeulbreedte van 150 m bij OLR moeten de kribkoppen in verband met retourstromen tenminste 210 m uit elkaar liggen; maar de normaalbreedte is nog zo'n 260 m ([Figuur 24](#)).

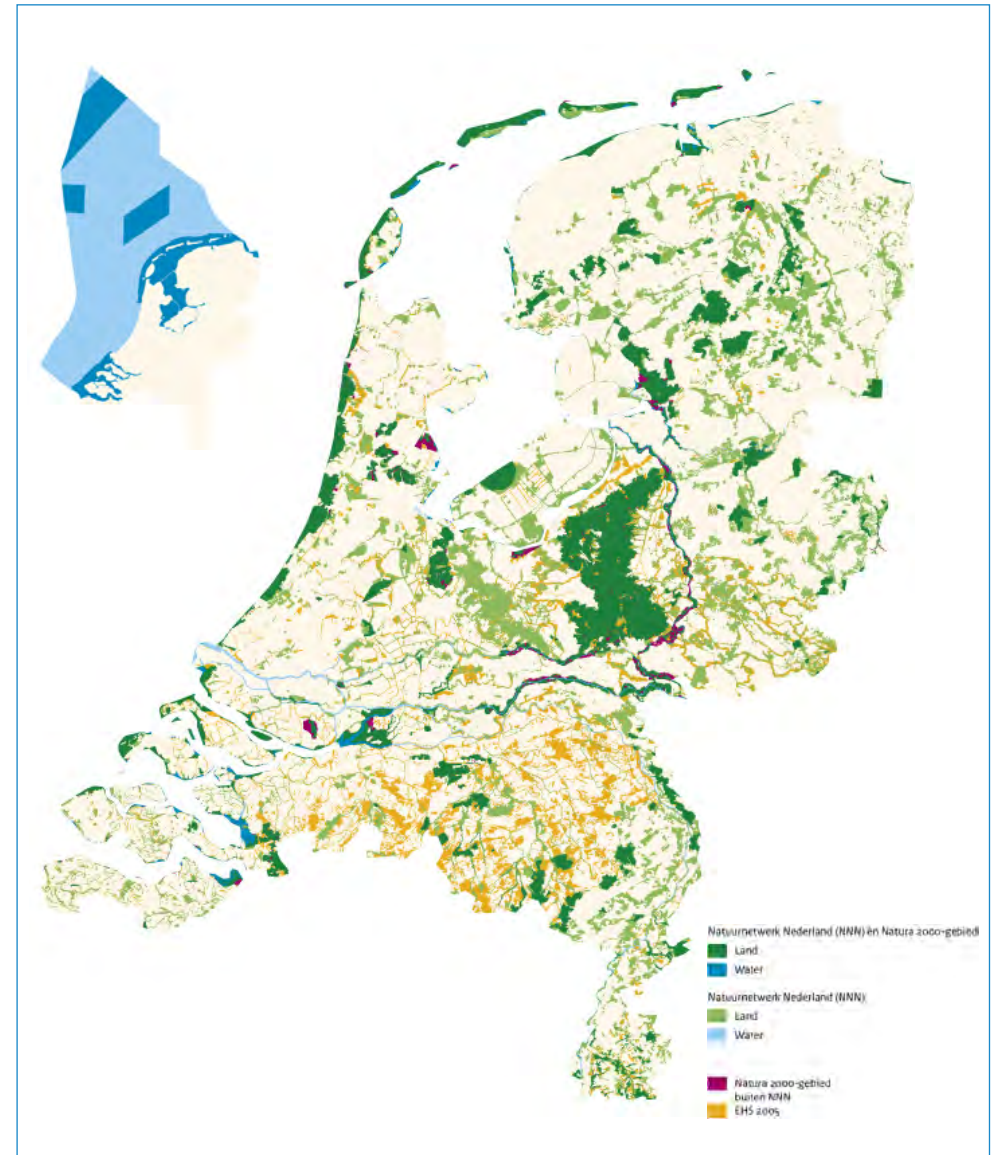
## Een natuurlijk overstromingsregime van de uiterwaarden (hydrodynamiek)

Waar de condities in de vaarweg van belang zijn voor de scheepvaartfunctie, zijn de condities in de uiterwaarden en op de weerden bepalend voor het kunnen behouden of ontwikkelen van terrestrische en (semi-)aquatische natuurwaarden. Verderop in dit hoofdstuk wordt dieper op natuur ingegaan; in relatie tot het hoofddoel van borging van goede condities gaat het *op deze plaats* even alleen om het overstromingsregime. En wel in het bijzonder als conditie die samenhangt met het waterstandsregime, dat op zijn beurt weer samenhangt met de dimensies (breedte en bodemligging) van het zomerbed en het winterbed (in alle rivieren) en het stuwbeheer (alleen in de gestuwde rivieren).

Het buitendijks rivierengebied maakt voor een belangrijk deel onderdeel uit van wat vroeger de Ecologische Hoofdstructuur (EHS) heette, later Natuurnetwerk Nederland (NNN; Figuur 45)<sup>18</sup>. Van de Rijntakken is een groot deel tevens aangewezen als Natura2000-gebied, waarvoor een strenger – Europees – beschermingsregime geldt ingevolge de Vogelrichtlijn of Habitatrichtlijn. De Maas is overwegend alleen NNN, met uitsluitend een nationaal beschermingsregime. Het doel van alle drie beleidsregimes was/is een samenhangend netwerk van natuurgebieden te behouden en te versterken, in het geval van de Rijntakken en Maas met riviereigen natuur; waarvoor de juiste condities nodig zijn.

In het kader van de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) is specifiek voor het rivierengebied de ambitie voor 2050 geformuleerd (Van Heusden et al., 2021). Deze ambitie maakt deel uit van de ambities van IRM. Eén van de voorwaarden om deze ambitie waar te kunnen maken heeft betrekking op een natuurlijker overstromingsregime van de uiterwaarden en weerden (zie voor de overige voorwaarden verderop in dit hoofdstuk, bij voldoende ruimte voor natuurontwikkeling). Want alleen een ‘natuurlijk’ overstromingsregime kan als de gewenste conditie voor riviereigen natuur worden gekwalificeerd.

Wat is dan natuurlijk? Niet te weinig frequent en ook niet te vaak; niet te kort maar evenmin te lang; precies van pas dus. En voor ieder riviereigen ecotooptype (type natuur) verschillend. Maar dat laatste vergt vanzelfsprekend voldoende variatie aan milieus in de uiterwaarden en wateren (= diversiteit). Daarover later.



Figuur 45 Natuurgebieden met bijbehorende nationale en Europese beschermingsregimes (Natuurnetwerk Nederland en Natura2000-gebieden, 2015; naar WUR, 2016)

18 Na de herijking is het Natuurnetwerk Nederland in omvang teruggebracht. Daarbij is een deel van de Natura 2000-gebieden (ruim 27.000 hectare) buiten het Natuurnetwerk komen te liggen.



De wens tot een **natuurlijker overstromingsregime** (ook wel aangeduid als hydrodynamiek) vanuit natuurdoelstellingen is relevant voor de vraag welke dimensies (breedte en diepte/hoogte) van zomer- en winterbed gunstig dan wel ongunstig uitpakken voor natuurontwikkeling. Er wordt immers gevraagd om voldoende frequente en langdurige overstroming van delen van de uiterwaard en dus **voldoende waterstandsfluctuaties in respons op en over het hele bereik van het afvoerregime van de rivieren**. Aangezien alle rivieren hun eigen natuurlijke afvoerregime kennen, en de geologische context het oorspronkelijk reliëf bepaalt, moet het overstromingsregime daar bij aansluiten. Dat impliceert dat de verticale dynamiek per rivier en per traject al van nature sterk verschilt: van zeer sterk in de meest bovenstrooms gelegen trajecten via gedempt in de benedenstroomse trajecten, tot getij-gedomineerd op de Lek; op de Maas tevens in relatie tot het verhang van de rivier en beïnvloed door de geologische verbreding in de Centrale Slenk (Maasplassen) en de daarop volgende vernauwing ter hoogte van de Peelhorst. Aansluiten bij die verschillen tussen riviertrajecten levert de grootste diversiteit aan kenmerkende riviernatuur op landelijk schaalniveau. Want het levert traject-eigen riviernatuur, door Smart Rivers ook wel aangeduid als het ‘dna van de rivier’.

Bovenop die natuurlijke verschillen tussen rivieren en trajecten heeft de inrichting van de rivier door de mens het waterstandsregime beïnvloed. Een (te) ruim *zomerbed* kan meer afvoer verwerken zonder overstroming van de uiterwaarden (te weinig frequent). Een (te) smal *winterbed* daarentegen kan leiden tot hogere waterstanden bij hoge afvoeren (te langdurig overstroomd en geen hoogwatervluchtplaatsen voor dieren meer). En stuwen kunnen het uitzakken van de waterstand bij lage afvoer voorkomen (te weinig gradiënt in de oeverzones).

Dat betekent dat streven naar een natuurlijk overstromingsregime er om vraagt dat:

- de rivier bij voorkeur niet is gestuwd, of zo kort mogelijk in de tijd (dus bij lage afvoer kan uitzakken);
- de dimensies van het zomerbed niet zodanig groot zijn dat overstroming te zelden optreedt (de rivier dus buiten z'n oevers kan treden), bijvoorbeeld doordat de bodem te diep is uitgeschuurd of is verdiept of verbreed<sup>19</sup>;

- de uiterwaarden niet te hoog zijn of te weinig reliëfrijk;
- er geen hoge zomerkades zijn die overstroming belemmeren.

Met die wensen zijn er voor IRM op veel plaatsen kansen voor synergie, maar dreigt elders een conflict met andere functies van de rivier (in het bijzonder de scheepvaartfunctie).

### Een veilige afvoer van hoogwater en ijs, en lagere hoogwaterstanden

De tegenwoordige bescherming tegen overstromingen is 1) gebaseerd op een risico-benadering, is 2) uitgewerkt in hoogwaterbeschermingsnormen die gelden voor dijktrajecten en betrekking hebben op de kans op zodanig falen van de waterkering dat van ‘overstroming’ sprake is, maar berust 3) tevens op de idee van ‘meerlaagsveiligheid’. Dat laatste wil zeggen dat ook ruimtelijk beleid en evacuatie onderdeel van het beleid (kunnen) zijn. In deze beleidscontext vormen hoogwaters op de rivieren een *overstromingsgevaar*<sup>20</sup>, dat wordt uitgedrukt in termen van hydraulische belasting: hoe hoger de waterstanden en hoe hoger de golven op de rivier, des te groter de hydraulische belasting die de dijken moeten kunnen keren. En des te gevaarlijker de rivier.

Voor de rivieren geldt een algemenere (of beter: vagere) opgave, namelijk zorgen voor **een veilige afvoer van hoogwater en ijs**. Daarbij geldt dat hoogwaters grotendeels afkomstig zijn uit het buitenlandse stroomgebied en slechts voor een klein deel uit zijdelingse toestroming uit Nederlandse zijrivieren en beken. Wat precies moet worden verstaan onder een veilige afvoer van hoogwaters is voornamelijk nog niet nader gespecificeerd, maar het ligt voor de hand dat er een relatie is met de hydraulische belasting, ofwel de waterstanden. In de tijd van Ruimte voor de Rivier (1996-2015) werd onder ‘veilig’ verstaan dat de waterstanden door toenemende rivierafvoer (als gevolg van klimaatverandering of veranderingen in het stroomgebied) **niet hoger** mochten worden dan de toen nog vigerende **maatgevende waterstanden** met een herhalingscyclus van 1: 1250 per jaar. Kortweg: de voor de dijkenbouwers maatgevende waterstanden mochten niet hoger worden dan ze waren.

19 NB: De Maaswerken en andere recente projecten die er op gericht waren om de Maas te optimaliseren voor de scheepvaart streefden naar het geschikt maken van de Maas voor klasse Vb met een afluaddiepte van maar liefst 3,70 m. Dat staat dus haaks op de wens van meer hydrodynamiek.

20 Gevaar is het Nederlandse woord voor hazard en betekent ‘de potentie hebbend schade aan te richten’ (Samuels et al., 2008). Er bestaat pas een overstromingsrisico als er ook iets gekwetst kan worden (harm can be done als gevolg van vulnerability), bijvoorbeeld mensen of hun eigendommen.

Daar diende de rivier op te worden ingericht – door het programma Ruimte voor de Rivier – en daar moesten de morfologie en vegetatie in de uiterwaarden op worden onderhouden. De idee van een vegetatielegger en een BasisRivierbodemplugging, zoals die door Rijkswaterstaat zijn – respectievelijk worden – uitgewerkt, sluiten (nog) bij die idee aan. Want daarmee worden strikte grenzen gesteld waarbinnen de hydraulische ruwheid (vegetatielegger) en de dimensies (hoogteligging) van het winterbed en zomerbed (BRL) mogen variëren.

Met de invoering van de **nieuwe hoogwaterbeschermingsnormen**, die 1) betrekking hebben op de faalkans van de waterkering door allerlei faalmechanismen en 2) verschillen per dijktraject al naar gelang de mogelijke gevolgen van een doorbraak ter plaatse, is het begrip *maatgevende waterstand niet langer maatgevend*. Alle hoogwaters die de waterkering belasten zijn nu relevant, ook matig hoge of gewoon hoge, en niet alleen de extreme. De hele afvoerrange die leidt tot water tegen de dijk dus. Denk aan 1: 10, 1: 100, 1: 1000 en 1: 10.000 kans per jaar, afhankelijk van de rivier en de betreffende dijktrajectnormen. Dat betekent dat voor zowel de huidige toestand als voor eventuele rivierverruiming of dijkverzwaring niet alleen moet worden gekeken naar de extremen, maar de hele afvoerrange moet worden beschouwd (of een praktische doorsnede daaruit). Men zou dit een **maatgevend hoogwaterstandsregime** kunnen noemen.

In het licht van de risicobenadering kan men het begrip veilige hoogwaterafvoer ook breder beschouwen, namelijk vanuit het riviersysteem als geheel en in relatie tot de ontvangende wateren. De rivier wordt dan in z'n betekenis van 'gevaar' beschouwd (= de potentie hebbend schade aan te richten) en mede beoordeeld in relatie tot de kwetsbaarheid van de gebieden langs de rivier. Vanuit zo'n perspectief zijn onder meer de volgende overwegingen relevant:

- Stroomt het water gemakkelijk en gelijkmatig weg, of zitten er flessenhalzen of obstakels in de rivier die leiden tot opstuwning en dus lokaal de kans op sterk toenemend gevaar? (praktisch: **is de verhanglijn gelijkmatig en zonder knikken** over het hele afvoerbereik)? [Zie de behandeling in het vorige hoofdstuk.](#)
- Is de waterstand op de rivier erg **gevoelig voor onzekerheden** over de afvoer, de afvoerverdeling (bijv. door het scheeftrekken door erosie tijdens een hoogwater of een instelling van de regelwerken die bij de betreffende afvoergolf ongunstig uitpakt),

de ontwikkeling in de uiterwaarden (morfologisch en qua vegetatieruwheid) of de ontwikkeling van de rivierbodemplugging (oefening)? Kortweg: **hoe robuust is de rivier?** [Zie ook hier de behandeling in het vorige hoofdstuk.](#)

- **Hoe hoog** rijst een hoogwater **boven het beschermde achterland** uit? Dit in verband met de groeisnelheid van een eventuele bres, de snelheid van het overstromen van dat achterland, en de mogelijkheden voor evacuatie, vluchten of het kunnen 'uitzitten' (bijv. in de Maasvallei en IJsselvallei blijven de overstromingsdiepten beperkt in vergelijking met die langs de Waal, en is door het reliëf en het dichte wegennetwerk snelle evacuatie of vluchten naar nabijgelegen hogere gronden mogelijk). [Zie wederom het vorige hoofdstuk.](#)
- Wordt een (extra) hoogwaterafvoer zodanig over de riviertakken verdeeld dat de grootste hoeveelheden **langs de minst kwetsbare gebieden** stromen (bijv. liever door de IJsselvallei dan langs de badkuipen Alblasserwaard en Krimpenerwaard of juist langs de grootste en moeilijkst te evacueren Betuwe)?
- En hoe zit het met **de bergingscapaciteit van het ontvangende gebied** en de kwetsbaarheid van de dijkkringen daaromheen? (zo is het buitendijks oppervlak van het Rijn-Maasmondgebied veel kleiner dan het IJsselmeer, zodat snellere waterstandsstijging te verwachten is; en zijn de dijkkringen er veel dichter bevolkt en bebouwd).

Op de laatste drie punten wordt in [het volgende hoofdstuk](#) nader ingegaan bij het dilemma hoogwaterafvoerverdeling. De eerste twee zijn gerelateerd aan de afvoercapaciteit van de rivieren en dus de dimensies van het winterbed, ofwel de inrichting van de rivieren en uiterwaarden. Dit laatste is nadrukkelijk onderwerp voor IRM, zeker met het oog op de gevolgen van de klimaatverandering.

## Voldoende ruimte voor natuurontwikkeling en ruimtegebruik

Het rivierengebied is één van de meest aansprekende landschappen van Nederland (“*Denkend aan Holland ... etc.*”), mede door de schijnbare harmonie tussen menselijke activiteiten – landbouw en scheepvaart – en de zichtbare werking van natuurkrachten en de daaruit resulterende natuur. Het rivierengebied heeft daarmee enerzijds een grote maatschappelijke **betekenis voor gebruiksfuncties** die (mede) afhankelijk zijn van een grote ruimtelijke kwaliteit (cultuur- en natuurlandschap), zoals recreatie, toerisme, wonen en werken, en anderzijds **een grote eigen waarde** door de bijzondere natuur, zowel abiotische als biotische. Grote delen van het rivierengebied zijn vanwege dat laatste onderdeel gemaakt van het Natuurnetwerk Nederland (NNN). Het borgen van die ruimtelijke kwaliteit (een publiek belang) is weliswaar geen hoofddoel van het rivierbeheer in strikte zin, maar wel een hoofddoel van overheidsbeleid in ruimere zin, en aldus een concreet doel van de **inrichting van het rivierengebied**. En dus van IRM. Maar een specifieke ontwikkelingsambitie heeft IRM in dit verband alleen voor natuur als opdracht meegekregen en wel in de vorm van de Ecologische systeemopgave PAGW-rivieren en de KRW-doelen. Daarover dus wat meer.

Zowel het NatuurNetwerk Nederland (NNN) als Natura2000<sup>21</sup> beogen het behoud en de verdere ontwikkeling van een **samenhangend netwerk** van natuurgebieden, bestaande uit kerngebieden, verbindende corridors en stapstenen (*stepping stones*), dat door z’n omvang en samenhang het duurzaam voortbestaan van levensvatbare (meta) populaties van de gewenste doelsoorten (en ambassadeurs van gehele ecosystemen) mogelijk maakt. Voor het rivierengebied zijn de natuurdoelstellingen nader uitgewerkt in de *Uitwerking PAGW natuuropgave* (Van der Sluis et al., 2020) en die zijn vervolgens weer omgezet in een handelingsperspectief in de *Ecologische systeemopgave PAGW-rivieren* (Van Heusden et al., 2021). Deze PAGW-rivieren heeft bij uitstek betrekking op de (semi-)terrestrische ecosystemen.

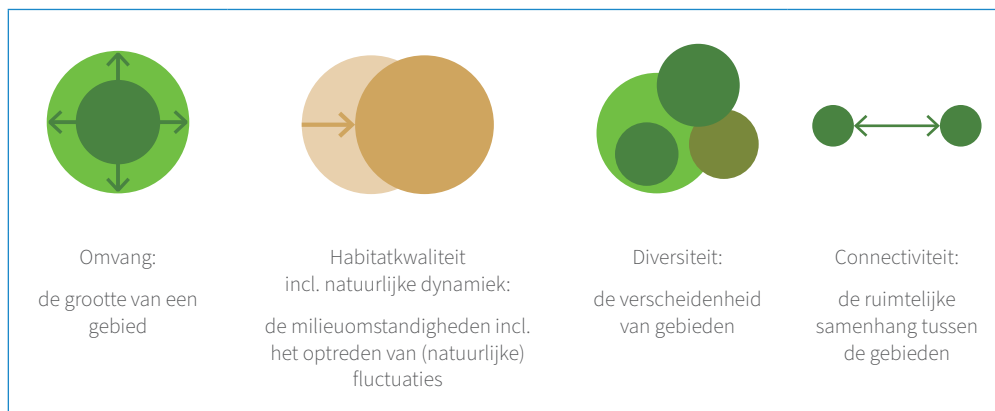
Voor de aquatische ecosystemen is tevens de Kaderrichtlijn Water (KRW) relevant, die net als Natura2000 op Europees niveau is overeengekomen. Die KRW beoogt een goede ecologische kwaliteit van de oppervlaktewateren en eveneens een samenhangend netwerk van, in dit geval, aquatische habitats en functiegebieden (met name relevant voor vis: opgroei-, fourageer- en paaigebieden) met de bijbehorende trekmogelijkheden. Ook dat doel is omgezet in handelingsperspectieven en interventies: onder meer in de vorm van de aanleg van nevengeulen die permanent met de rivier zijn verbonden en het hele jaar door water bevatten (zodat er altijd ondiep stromend water beschikbaar is voor stroomminnende soorten), maar ook in de vorm van de realisatie van natuurlijke(r) rivieroeveren over zeer grote lengten.

Tegen deze achtergrond kan, op een abstracter niveau – het systeemniveau –, worden gesteld dat aan een viertal voorwaarden moet worden voldaan om de gewenste natuur((doel)typen) te kunnen realiseren (naar Van Heusden et al., 2021; Van der Sluis et al., 2020; Klijn et al., 2004; Van Rooij et al., 2000):

1. Zo groot mogelijke natuurgebieden (leefgebieden van formaat);
2. Natuurlijker rivierdynamiek (hydrodynamiek en morfodynamiek) en goede (d.w.z. voor de beoogde natuur geschikte) milieukwaliteit;
3. Diversiteit aan milieus als basis voor biotische diversiteit, en als voorwaarde voor grotere overlevingskansen voor soorten door nabije vluchtplaatsen en bereikbaarheid van functiegebieden (**life cycle support**);
4. Connectiviteit tussen de natuur- en functiegebieden (dus zowel vanwege hun betekenis als volledig habitat voor deelpopulaties, als vanwege hun betekenis als functiegebieden voor het dagritme (fourageren, rusten, etc.) en de levenscyclus van een individu (paai- en opgroeigebied, volwassenheid)).

21. De uiterwaarden van de Rijn takken (met uitzondering van het traject Zaltbommel-Brakel en de Lek ten westen van Wijk-bij-Duurstede) vallen ook grotendeels onder het Europa-brede Natura2000-netwerk ([www.natura2000.nl/gebieden](http://www.natura2000.nl/gebieden)), hetgeen bescherming vanuit de Habitatrictlijn of de Vogelrichtlijn betekent. De Maas valt daar niet onder, behalve een deel van het zomerbed van de Grensmaas.





Figuur 46 De sleutelfactoren die in PAGW zijn onderscheiden (naar Van Heusden et al., 2021), maar met natuurlijke dynamiek geïnterpreteerd als één van de kwaliteiten van de habitat (en iets aangepaste terminologie).

Over de natuurlijke verticale hydrodynamiek (vanuit ecologisch perspectief aansluitend op het *Flood Pulse Concept*) is al geschreven onder de kop [Een natuurlijk overstromingsregime van de uiterwaarden](#). En daar werd al gewezen op een mogelijk conflict (met wensen vanuit scheepvaart), maar ook op synergiemogelijkheden. Aanvullend kunnen de hier genoemde vier voorwaarden voor voldoende ruimte voor de ontwikkeling van riviereigen natuur dus worden begrepen als:

1. Hoe meer buitendijks gebied, des te beter (dit biedt de mogelijkheid tot synergie met het vergroten van de afvoercapaciteit); hoe omvangrijker de natuurbestemming van bestaand buitendijks gebied, des te beter (mogelijk conflict om ruimte met landbouw, bij hydraulische verruwing mogelijk conflict met veilige hoogwaterafvoer);
2. Toestaan meer (oever)erosie en sedimentatie (= natuurlijker morfodynamiek; potentieel conflict met eisen aan de vaargeul vanuit de scheepvaart), maar ook meer hydro- en morfodynamiek in het zomerbed van gestuwde rivieren die door slib worden afgedekt (met name de Maas);
3. Meer reliëf en gradiënten dwars op de rivier en in de lengte van de rivier (aansluitend op *River Continuum Concept*; bij voorkeur door natuurlijke morfodynamiek; haaks op landbouwwens en potentieel conflict scheepvaart);
4. Verbreding natuurcorridors (synergie met vergroten afvoercapaciteit door verwijderen flessenhalzen; mogelijk conflict met bestaande landbouw door aankoop; synergie met landbouw hoofdstructuur mogelijk bij grondruil).

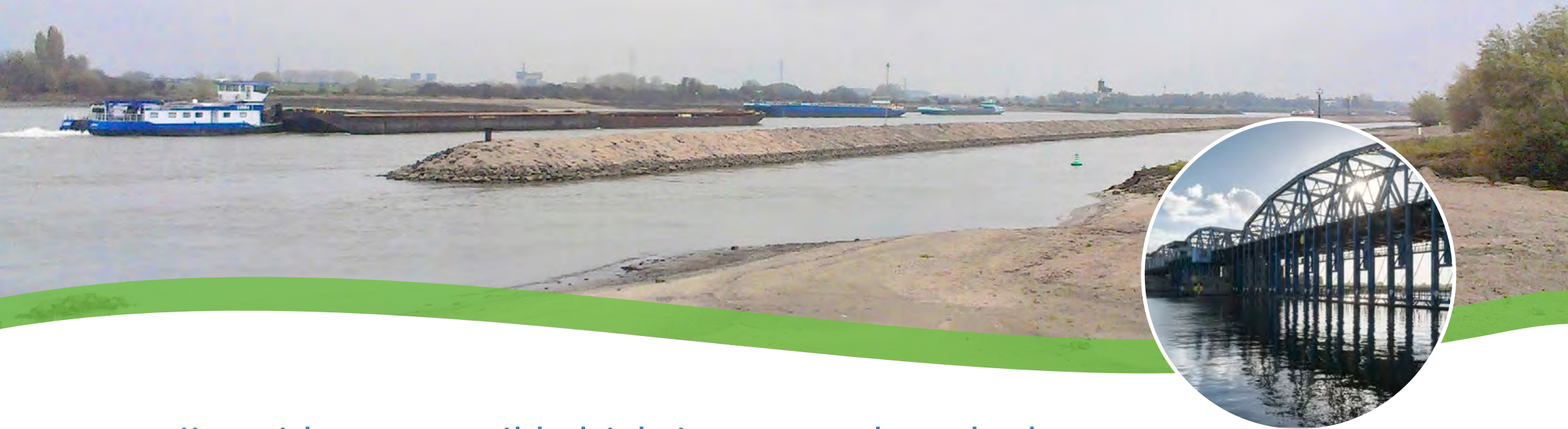




Foto: Siebe Swart

Wat zijn evidente ontwikkelrichtingen om deze doelen te realiseren en welke dilemma's doen zich daarbij voor?





## Wat zijn evidente ontwikkelrichtingen om deze doelen te realiseren en welke dilemma's doen zich daarbij voor?



### De uitschuring van de Rijnakken moet gestopt en de rivierbodem bij voorkeur omhoog

Voor een beheersbaar en toekomstbestendig riviersysteem is het noodzakelijk een doel te formuleren over **de gewenste bodemligging** (lengteprofiel zomerbed), want de huidige bodemligging veroorzaakt al enorme problemen die door de klimaatverandering (lagere en langduriger lage afvoeren) en de nog voortgaande uitschuring alleen maar erger worden. Bij het formuleren van zo'n doelstelling moet rekening worden gehouden met voorzienbare en belangrijke *trade-offs*: want de rivierbodem omhoog brengen betekent een geringere afvoercapaciteit tijdens hoogwater. En de klimaatverandering vraagt juist om een grotere afvoercapaciteit bij hoogwater.

Welke bodemligging dan – alles overziend – het meest gewenst is, is lastig te beantwoorden: die van ongeveer het jaar 2000? Of nog veel eerder? Daarover kan pas uitsluitsel komen na een kwantitatieve analyse van de implicaties van alternatieven. Die vindt plaats in de milieu-effectrapportage en kosten-batenanalyse die in IRM zijn voorgenomen.



Hier kunnen wel enkele overwegingen worden genoemd die richtinggevend kunnen zijn voor het definiëren van alternatieven – maar die niet allemaal dezelfde kant uit wijzen:

- Rond het jaar 2000 waren de problemen als gevolg van de uitschuring nog wel te overzien (inmiddels worden ze prangend), maar in 1950 ging het (nog) veel beter met de natuur in de uiterwaarden. Inmiddels zijn de uiterwaarden sterk verdroogd en is het overstromingsregime zeer onnatuurlijk geworden (sommige KRW- en rivierverruimingsmaatregelen daargelaten).
- Terug naar een situatie van voor de kanalisatie van de Nederrijn is echter lastig te beargumenteren, want pas later is immers het stuwprogramma voor stuw Driel afgeleid (op basis van een nationale waterverdelingsoptimalisatie in de PAWN-studie; Pulles, 1985).
- De kribben in de Waal zijn – in het kader van Ruimte voor de Rivier – tussen Ewijk en Brakel verlaagd op waterstanden (en dus de bodemligging) van 1995-2000; ook alle andere maatregelen in het kader van Ruimte voor de Rivier (nevengeulen, uiterwaardverlagingen, drempels bij dijkverleggingen) zijn ontworpen voor de waterstanden van circa 1995-2000.
- Evident is dat een geleidelijk verlopend bodemverhang op alle drie Rijntakken de voorkeur verdient, waarbij die tevens netjes aan elkaar aansluiten *en* aansluiten bij de hoogte en het verhang op de Duitse Niederrhein<sup>22</sup>. Dat betekent dat voor een bovenste ‘ophangpunt’ in tijd (vóór de grootste knelpunten optraden) en plaats (grens met de bovenburen) Lobith voor de hand ligt.
- Als we zouden uitgaan van het indertijd (begin 80-er jaren) goed onderbouwde stuwprogramma voor Driel (285/25) bij eerst 1300 en later 1400 m<sup>3</sup>/s Rijnafoer, en als we vaststellen dat we nu pas in de buurt komen van de gewenste afvoerverdeling bij een afvoer van 1590 m<sup>3</sup>/s, dan kunnen we het waterstandsverschil tussen die afvoeren bij Lobith als indicatie aanhouden voor hoeveel de bodem door suppletie verhoogd zou moeten worden. Tussen 1400 en 1590 m<sup>3</sup>/s zit 35 cm waterhoogteverschil, tussen 1300 en 1590 zit zelfs 55 cm waterhoogteverschil. Dat betekent dat de bodem op de Boven-Waal en het Pannerdens Kanaal dus zoveel omhoog zou moeten dat de waterstand bij Lobith (voor de relevante range aan midden- en laagwaterafvoeren) tussen de 35 en 55 cm omhoog komt. We merken op dat de bodem op de Boven-Waal sedert 2000 bijna een halve meter is gedaald; en sedert 1980 wel met een meter (Figuur 12).

- Het ligt voor de hand in ieder geval aan te sluiten bij de huidige bodemhoogte op de grens, zoals die door het Duitse suppletiebeleid is gedicteerd (ofwel: het ophangpunt is gegeven). We willen tenslotte ook geen hobbel creëren. Dan zitten we op de Bovenrijn eerder aan de ondergrens van deze *range*, dus op ong. 35 cm.
- Omdat de ‘flauwe drempel’ op de Duits-Nederlandse grens zich over een aantal kilometers uitstrekt, tot ongeveer Pannerdense Kop, zou dat pleiten voor verhoging van de bodem van de Boven-Waal met *ten minste* 35 cm (dus niet beginnen met verhoging op de Boven-Rijn, die immers de drempel vormt en enige sedimentaanvoer uit Duitsland kent) en ten hoogste 50 cm; en om het sedert 1995-2000 ontstane verschil tussen Waal en Pannerdens Kanaal op te vangen kan waarschijnlijk met iets minder (ong. 30-40 cm) bodemverhoging van de Boven-IJssel worden volstaan.
- De gewenste bodemverhoging in het hele splitsingspuntengebied (Boven-Waal, Pannerdens Kanaal, Boven-IJssel) moet zowel op de Waal als de IJssel geleidelijk uitwiggen naar nog nader te bepalen locaties; en moet nader gedimensioneerd met behulp van hydraulische modelsimulaties. Op dit moment bevindt de overgang van erosie naar sedimentatie zich ter hoogte van Tiel, maar de huidige ligging daarvan is beïnvloed door de kribverlagingen van Ruimte voor de Rivier en de *pilot* langsdammen. Voorheen lag deze overgang (veel) westelijker, maar deze recente ingrepen hebben de erosie afgeremd.

Met de laatste opmerking raken we weer aan de rol van processen en de beïnvloeding daarvan door menselijk ingrijpen op de snelheid van uitschuring; in dit geval door kribverlaging en langsdammen. Dat is iets om rekening mee te houden. In het algemeen geldt voor alluviale rivieren die direct in zee uitmonden (zoals de Rijntakken en bedijkte Maas): een smallere rivier heeft een sterker eroderend vermogen en dat impliceert een ontwikkeling naar een flauwer verhang; een bredere rivier daarentegen veroorzaakt sedimentatie en de vorming van zandbanken bij een steiler verhang. Maar ook geldt: grover sediment staat een steiler verhang toe bij dezelfde breedte. En volgens recent onderzoek (Ylla Arbos et al., 2019) lijkt er de laatste decennia sprake te zijn van enige vergroving van de bovenlaag van de rivierbodem van de Rijntakken.

22. Duitsland suppleert al vele decennia met als doel de bodemligging te handhaven, maar toch was ook op de Duitse Niederrhein de uitschuring van het zomerbed tussen 1991 en 2010 nog ong. 3 mm/jr, dus weliswaar sterk gereduceerd, maar nog niet gestopt (Frings et al., 2014).

Hiermee raken we aan de vraag **hoe** de gewenste rivierbodempligging te bereiken, door 1) het uitschuringsproces te beïnvloeden: de **erosiviteit** van het water te verkleinen, bijvoorbeeld door de stroomsnelheden te verkleinen; en/of door 2) de weerstand van de rivierbodem tegen erosie te beïnvloeden: de **erodibiliteit** van het sediment, bijvoorbeeld door bij suppleties grover materiaal te gebruiken. Bij deze vraag is de speelruimte beperkt, doordat het sedimenttransport door de Rijn ernstig tekort schiet. In de Duitse Niederrhein stamt een derde van het getransporteerde sediment uit suppleties door de mens (Frings et al., 2014), de zogeheten ‘*Geschiebezugabe*’, die nodig is om te voorkomen dat bij de aansluitingen aan de rotsondergrond in het Eiffelmassief (de Mittelrhein) stroomversnellingen ontstaan en de rivier onbevaarbaar wordt. Ondanks deze suppleties komt onvoldoende sediment onze grens over om de uitschuring van de rivierbodem op onze Rijntakken te voorkomen. Dat betekent dat maatregelen om de erosiviteit van het water te verkleinen het proces wel kunnen afremmen, maar zeer waarschijnlijk niet kunnen stoppen en zeker niet keren. Althans niet als we een bevaarbare en genormaliseerde rivier willen behouden.

Om de erosiesnelheid te vertragen moet worden geprobeerd bij alle bovengemiddelde afvoeren zo min mogelijk water door het zomerbed te laten stromen en dus zoveel mogelijk door het winterbed. Dat kan door kribverlaging, zomerkadeverwijdering, uiterwaardverlaging en dergelijke. En het is evident dat iedere onttrekking van sediment uit het zomerbed van de eroderende trajecten, zoals nu nog door commerciële zandwinning, ontoelaatbaar is.

Om de rivierbodem weer omhoog te krijgen zullen sedimentsuppleties echter noodzakelijk zijn. En dan bij voorkeur met materiaal dat minder erosiegevoelig is, dus grover van korrel. Maar of het mogelijk zal zijn een stabiele bodempligging te realiseren met een eenmalige grote suppletie zonder geregeld periodiek onderhoud kan vermoedelijk alleen proefondervindelijk worden vastgesteld.

Complicerend voor zowel de keuze van welke bodemhoogte na te streven als de keuze van suppletiemateriaal is dat in de Rijn de grind-zandovergang, die veel alluviale rivieren kenmerkt, oorspronkelijk net rond de splitsingspunten zat, maar de laatste decennia stroomafwaarts lijkt te verschuiven (Ylla Arbos et al., 2021). De keus van de voor suppletie te gebruiken korrelgrootte(verdeling) is daarmee niet eenvoudig. Er

moet daarbij ook nog worden geanticipeerd op eventuele aanpassingen aan de breedte van de rivieren met het oog op de klimaatverandering, en voorkomen moet worden dat de rivierbodem immobiel wordt (de harde lagen die in het verleden zijn toegepast blijken nu immers teveel nadelen te hebben).

Over het anticiperen op de klimaatverandering door aanpassing van de breedte van de vaarweg kan het volgende worden opgemerkt: als we vaststellen dat het huidige zomerbed van de twee vrij afstromende Rijntakken (opgeteld) voor scheepvaart eigenlijk (iets) te breed is voor de **toekomstige** lage afvoeren, zal bij het aanpakken van de rivierbodempligging dus mogelijk voor **iets grover sediment** moeten worden gekozen. Met het oog op de langere termijn (minder erosiegevoelig zonder harde laag te zijn: semi-mobiel); maar ook om op een eventueel uit nautische overwegingen noodzakelijke versmalling van de vaarweg te anticiperen. Dat laatste lijkt overigens alleen voor de Waal relevant, want die heeft nog een breedte/diepteverhouding die leidt tot bankvorming (zie Ten Brinke, 2019; of Het Verhaal van het Sediment). De IJssel is feitelijk al smaller dan uit nautisch oogpunt gewenst.



## Hoeveel suppletie is nodig voor herstel van de rivierbodempligging van de Rijntakken, en is dat maakbaar?

Hoeveel sediment nodig is om de huidige bodempligging vast te houden of de bodempligging van ongeveer 20 jaar geleden (2000) of 40 jaar geleden (1980) te herstellen, is uitgerekend op basis van de breedte en hoogteligging van de riviertrajecten in verschillende jaren (Van Deijl, 2021). De resultaten zijn getoond in de figuren.

Benodigd volume voor vasthouden van de huidige bodempligging



Benodigd volume voor hersel naar de bodem van 20 jaar terug



Benodigd volume voor hersel naar de bodem van 40 jaar terug



### Samengevat kan het volgende worden geconcludeerd:

1. Om de jaarlijkse rivierbodemerodie op de bovenstroomse trajecten van de Rijntakken teniet te doen (bodempligging vasthouden), is zo'n 150.000- 170.000 m³/jr nodig. Ter oriëntatie: dat is iets minder dan wat de Duitsers op dit moment jaarlijks bij Iffezheim suppleren (nl. 330.000 ton, overeen komend met ong. 200.000m³/jr). Waarbij wordt aangetekend dat van het actuele jaarlijkse sedimenttekort 100.000 m³/s is toe te schrijven aan commerciële zandwinning op de Waal (bevinding RWS-ON).
2. Om de bodempligging van ong. de eeuwwisseling te herstellen, is in totaal circa 8-10 Mm³ nodig. Weer ter oriëntatie: dat is bijna net zoveel als nu per jaar voor de kust wordt gesuppleerd. Zoveel suppletie kun je in een rivier nooit realiseren (want het grofzand-grindmengsel ligt niet voor het opscheppen), maar als er 10 jaar de tijd voor wordt genomen, betekent het dat per jaar ong. 4-5 x zoveel moet worden gestort als de Duitsers doen.
3. Om terug te gaan naar de bodempligging van het moment dat de zoetwaterverdeling optimaal was (volgens de PAWN-studie; 1980) is in totaal 24 Mm³ nodig. Dat is een hele hoop en zoveel aanvoeren en suppleren lukt waarschijnlijk niet binnen 10 jaar.

Een strategie zou kunnen zijn: eerst in 10 jaar de bodempligging van 2000 herstellen en op basis van het dan geleerde – en eventuele nieuwe inzichten – beslissen over het vervolg. Dat past in een adaptieve aanpak.



**Nader uit te zoeken vragen betreffen dus: hoever precies moet de bodem omhoog om de problemen te lenigen? Welke korrelgroottes toe te passen? Is voldoende sediment beschikbaar, en zo ja: waar het vandaan te halen<sup>23</sup>?**

Een extra complicatie voor de keuze van een gewenste bodemhoogte en korrelgrootte voor eventuele suppleties is dat de bovenloop van de IJssel door de bochtafsnijdingen 17 km korter is geworden en daardoor zo steil dat een gelijkmatig verhang daar moeilijk te realiseren valt. Dit betekent tevens dat de bodemhoogte van bijv. het jaar 2000 of 1980 geen oorspronkelijke toestand representeert, maar veeleer een situatie in overgang. Want de bochtafsnijdingen dateren van net daarvoor. De keuze van een gewenste rivierbodempligging wordt daardoor lastiger. Of hier kan worden volstaan met een suppletiebeleid gericht op een ander bodemverhang (levert grover sediment voldoende waterdiepte?) of dat de rivier moet worden verlengd door de bochten terug te brengen, behoeft nader onderzoek. Want een steilere rivier betekent ook al snel minder vaardiepte, en dat impliceert een dilemma betreffende de vaarwegdimensies van de Boven-IJssel (keuze tussen steil en ondiep of flauwer en dieper maar ook een weer langere rivier).

**En de scheefgetrokken afvoerverdeling op de Rijntakken (bij laagwater) moet worden rechtgetrokken**

Als we ervan uitgaan dat 1) de argumenten voor de zoetwaterverdeling over Nederland en de Rijntakken nog valide zijn (cf. de PAWN-studie; Pulles, 1985), en als we tevens vaststellen dat 2) de analyses voor DP-Zoetwater er op wijzen dat ze inderdaad nog valide zijn, dan moet met de rivierbodempligging tevens worden geprobeerd de afvoerverdeling bij lage afvoeren te herstellen. Dat wil zeggen:

- a. zolang mogelijk 285 m<sup>3</sup>/s over de IJssel (aanvoer IJsselmeer en een bevaarbare IJssel), 25 a 30 m<sup>3</sup>/s over de Nederrijn-Lek (25 m<sup>3</sup>/s voor wateraanvoer/vaardiepte en bijdrage aan voorkomen zoutindringing + evt. 5 m<sup>3</sup>/s extra voor de vistrappen; dat laatste sedert 2001), en het restant over de Waal (bevaarbaarheid, zoetwatervoorziening West-Nederland); en
- b. pas volledige sluiting van de stuwen (met behoud van minimum flow op de Nederrijn van 25 m<sup>3</sup>/s) vanaf een onderschrijding van de Rijnafoer van 1300 of 1400 m<sup>3</sup>/s. Dat laatste impliceert dat het sluitprotocol van stuw Driel weer beter moet aansluiten op de debieten van de Boven-Rijn in plaats van op slechts de waterstand te Lobith.

Samengevat betekent dit: de rivierbodempligging niet alleen weer zo ver verhogen dat dit de problemen op de vrij afstromende Rijntakken afdoende oplost – en in praktische zin aansluitend op de bodempligging in de Duitse Niederrhein en uitwiggend naar het omslagpunt (waar de erosie vrijwel nihil is, c.q. sedimentatie begint; op de Waal ongeveer bij Tiel) –, maar tevens zo dat de afvoerverdeling over Waal en Pannerdens Kanaal respectievelijk IJssel en Nederrijn bij lage en middelhoge afvoeren weer overeen stemt met de bedoelde afvoerverdeling ('klopt').

Doordenkend zou dit kunnen betekenen: op de Rijntakken rond de splitsingspunten eerst maar eens ongeveer de bodempligging van 1990-2000 nastreven. Maar wat werkelijk de maatschappelijk meest gewenste bodempligging is, zou moeten blijken uit een verkenning van verschillende alternatieven (met milieu-effectrapportage en maatschappelijke kosten-batenanalyse), zoals die door IRM is voorgenomen (NKA-proces).

23 NB: de Duitse Oberrhein kent een opvulling met sediment van een grote verscheidenheid aan korrelgroottes; daar wordt tegenwoordig ook het grootste deel van het Duitse suppletiemateriaal gewonnen: *Im Rahmen des Integrierten Rheinprogramms ist am südlichen Oberrhein zwischen Weil und Breisach die Errichtung eines Rückhalterumes geplant. Während einer Bauzeit von 20 Jahren sollen auf einer Länge von 43,5 Kilometern etwa 55 Millionen Tonnen Kies ausgebaggert werden. Bereits in den 1990er Jahren ist zum ersten Mal die Idee entstanden, den anfallenden Kies auch als Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Iffezheim zu nutzen. Im Jahr 2003 begannen eingehendere Untersuchungen der Kiesressourcen. Im Mai 2010 haben Bund und Land eine Vereinbarung unterzeichnet, nach der die Hälfte des am südlichen Oberrhein anfallenden Kieses für einen Zeitraum von 80 Jahren als Geschiebezugabe unterhalb der Staustufe Iffezheim genutzt werden soll.* <https://naturfreunde-rastatt.de/rheinauen/rhein/wasserkraftwerke/geschiebezugabe/index.php>

## Het omhoog brengen van de rivierbodem vraagt compensatie voor verminderde afvoercapaciteit in het winterbed

---

Een hogere rivierbodem die de *laag*waterstanden doelbewust omhoog brengt, betekent ook (iets) hogere *hoog*waterstanden. Dat onbedoelde neveneffect vraagt compensatie in de vorm van een grotere afvoercapaciteit. Gezien de moeite die het kost om bij hoogwater de gewenste afvoerverdeling te realiseren, moet die afvoercapaciteit bij voorkeur door rivierverruiming worden vergroot, omdat anders de Waal nog meer naar het Pannerdens Kanaal gaat stuwen en de hoogwaterstanden tot in Duitsland worden opgestuwd. De voor deze compensatie noodzakelijke vergroting van de afvoercapaciteit gaat natuurlijk enigszins ten koste van de mogelijkheden om de door klimaatverandering toenemende rivierafvoeren veilig af te voeren.

Over wat voor orde van grootte gaat het hier en wat valt er aan te doen? Naar schatting leidt een bodemverhoging van +50 cm op de Waal tot een verhoging van de *hoog*waterstanden van ong. 15-20 cm (conform omreken tabel Rijkswaterstaat is de doorwerking 20-40% met het zwaartepunt op 35%). Ter compensatie hiervan kunnen op de Boven-Waal de kribben verlaagd (op het Pannerdens Kanaal is kribverlaging deels al in uitvoering), want deze maatregel was in het programma Ruimte voor de Rivier doorgeschoven omdat de dijkverlegging Lent zoveel waterstandsverlaging opleverde. Intussen liggen de kribben in traject Waalbochten nog op een hoogte die past bij het zomerbed van ong. 1880 (dus sowieso 1,5 a 2,5 m te hoog).

Volgens de 'Blokkenoos Ruimte voor de Rivier' levert kribverlaging op traject Waalbochten ong. 8 cm waterstandsverlaging en levert verlaging van de Suikerdam met bijbehorende inrichting van de Gendtse Waard ook bijna 20 cm waterstandsverlaging. Die laatste maatregel is eveneens uit het Ruimte-voor-de-Rivierprogramma geschrapt (zelfs nog na uitgebreide planvorming). Het lijkt er dus op dat met deze beide maatregelen het effect van een eventuele rivierbodemverhoging op de hoogwaterstanden vrijwel geheel kan worden gecompenseerd. Een gunstig neveneffect van beide maatregelen is dat deze naar verwachting ook de uitschuringssnelheid afremmen; de verklaring daarvoor is dat meer water door de uiterwaarden en kribvakken – op jaarbasis – minder door de vaarweg (het zomerbed) betekent, en dus minder snelle

uitschuring. Dit effect lijkt na de kribverlaging op de Midden-Waal ook werkelijk te zijn opgetreden – zo zou men kunnen afleiden uit de multibeam-peilingen van 2018 in vergelijking met die van 2009 en 1999 (zie Figuur 16 in Het Verhaal van het Sediment; Barneveld et al., 2021) –, maar helemaal zeker weten we dat niet want het ontbreekt aan een systematische monitoring of analyse van die laatste bodemhoogtepeilingen.

Om op het Pannerdens Kanaal en de IJssel een vergelijkbaar effect te bewerkstelligen kunnen zomerkades worden verwijderd of verlaagd of uiterwaarden worden verlaagd en heringericht. Op de IJssel ligt het verwijderen van de aanbruggen bij Westervoort en enkele hoogwatervrije terreinen zeer voor de hand, maar door hun ligging hebben die grote invloed op de afvoerverdeling bij hoogwater; dit vraagt grote zorgvuldigheid. Zie voor deze maatregelen de verkenning IJsselpoort (een IRM-Pilot) en de hydraulische simulaties van onderdelen daarvan.

## Om hernieuwde uitschuring te voorkomen moet worden gesuppleerd met de juiste korrelgrootte(verdeling)

---

De ervaring leert dat het toepassen van harde lagen later tot problemen leidt: hetzij omdat de harde laag boven de omringende wegspoelende omgeving uit gaat steken (Nijmegen), hetzij omdat stroomafwaarts van de harde laag steeds weer een erosiekuil ontstaat (St. Andries). Daarom moet suppletie plaatsvinden met 'de juiste' korrelgrootte, omdat te fijn materiaal wegspoelt en te grof materiaal of harde lagen nieuwe problemen kunnen veroorzaken<sup>24</sup>. Dit zou men toepassing van het *building-with-nature* principe kunnen noemen. Er kan nog worden gekozen voor volledig mobiel materiaal (maar dan moet continu of herhaaldelijk gesuppleerd worden), of voor semi-mobiel materiaal (grover, zodat het langer blijft liggen, maar zonder dat het een vaste laag wordt en daardoor makkelijk aanpasbaar). Ook met semi-mobiel materiaal kan de bodemmorfolgie met onderhoudsbaggeren worden aangepast en zullen sterke stromingen onder diepgeladen schepen en schroefstralen eveneens tot afvlakking van eventuele lokale bodemvormen leiden.

---

24 Citaat SW Kies GmbH & Co.: *Bei der Staustufe Iffezheim wurde im Jahr 1978 mit der Geschiebezugabe begonnen. Seitdem werden jährlich ca. 200.000 m<sup>3</sup> Geschiebematerial mit einem speziell festgelegten Kornband eingebaut, welches dem natürlichen Material entspricht.* NB: Recente bronnen reppen van 330.000 ton/jr, wat bij een gemiddeld gewicht van grind (1500 kg/m) ongeveer overeen komt met de genoemde 200.000 m<sup>3</sup>.

Wat nu precies 'de juiste' (= voldoende stabiele) korrelgrootte is, is mede afhankelijk van de gewenste breedte van het zomerbed en van de vaarweg als geheel, omdat die de stroomsnelheden bepalen. Omdat deze per rivier(tak) kunnen verschillen, kan het ook gewenst zijn met verschillend materiaal te suppleren. En het kan gewenst zijn met de korrelgrootte aan te sluiten bij de geleidelijke overgang van grind- naar zandrivier en het stroomafwaarts fijner worden van het sediment naar west (op de Waal) en noord (op de IJssel). Een mogelijk goedkoper alternatief is mengsels storten en rekenen op sortering door de rivier zelf. Dit vraagt nader onderzoekwerk<sup>25</sup>, net als waar dit materiaal voorhanden zou zijn en vandaan zou kunnen worden gehaald.

De gewenste vaarwegbreedte waar in de vorige alinea op werd gewezen is weer afhankelijk van de ontwikkeling van het afvoerregime van de rivieren en van de scheepvaart(klasse) die op langere termijn wordt beoogd en de acceptabele *down-time* voor het transport. Daarbij wordt opgemerkt dat in hoofdstuk 3 is vastgesteld dat – bij de huidige dimensies van de vaarwegen – op IJssel en/of Waal niet langer de gevraagde condities voor de huidige scheepvaartklassen zijn te garanderen, want (zo herhalen we):

- de IJssel kan feitelijk niet smaller en voldoet nu al niet aan de gevraagde dimensies voor CEMT-klasse Va (zelfs niet aan die van IV); maar
- de Waal is veel breder dan de voor klasse VIc vereiste vaargeul; dus daar is nog een keuze mogelijk tussen kribverlenging of langsdammen (twee alternatieven van wat men een 4e normalisatie zou kunnen noemen).

Een dilemma bij die keuze is dat langere kribben de afvoercapaciteit bij hoogwater verkleinen (opstuwend werken); daarop scoren langsdammen beter.

Terugkomend op de vraag waarmee te suppleren: als de zomerbeddimensies zijn vastgesteld, kan het eroderend vermogen van de rivier worden berekend en de korrelgrootte voor suppleties daarop worden aangepast: zo dat er wel bodemtransport mogelijk is, maar de hellingshoek (gradiënt) van de rivierbodembodem niet zal veranderen. En bij voorkeur zo dat de aanvoer van sediment uit Duitsland precies de erosie in Nederland compenseert (een nieuw evenwicht tussen aanvoer en afvoer van sediment).

## Op de Maas moet de sedimenthuishouding worden hersteld

De sedimenthuishouding van de Maas is zodanig verstoord dat de rivierbodembodem zich voortdurend aanpast, waarbij zomerbedverdiepingen die beoogden de afvoercapaciteit te vergroten dichtlopen (lokaal afname afvoercapaciteit) en tijdens hoogwaters plotseling erosiekuilen ontstaan waar fijn zand zich dicht onder de rivierbodembodem bevindt (gevaar voor instabiliteit constructies). Ook is er nauwelijks doorgaand sedimenttransport en ontbreekt het aan de geëigende morfodynamiek om de nagestreefde aquatische en terrestrische riviernatuur zich te laten ontwikkelen. Dit vraagt herstel van de sedimenthuishouding. Ook voor de Maas geldt echter dat de speelruimte daarvoor beperkt is, vooral omdat de Maas vrijwel geen grof bodemsediment ('*bedload*') meer aanvoert en alle morfologische veranderingen dus verplaatsingen binnen het Nederlandse riviersysteem zijn. Met één uitzondering: de onttrekking van sediment door de mens, in de vorm van commerciële winning van zand en grind en bij rivieronderhoud.

Het eerste oogmerk van herstel van de sedimenthuishouding is het toewerken naar een situatie, waarbij de rivierbodembodem **geen grootschalige langjarige trends meer vertoont**, en waarbij er tegelijkertijd voldoende morfodynamiek is op korte tijdschaal; een dynamische rivier dus, geen gefixeerde. En het tweede: **niet meer sediment aan de rivier onttrekken dan deze aanvoert** (duurzame exploitatie op basis van circulariteit).

Voor het eerste is het nodig sterke gradiënten in sedimenttransportvermogen zo veel mogelijk te voorkomen, omdat die grote onderhoudsinspanningen vergen: dus streven naar een gelijkmatig bodemverhang en gelijkmatige winterbedbreedtes, zodat geen stroomversnellingen ontstaan. Dit betreft vooral de Grensmaas. En omgekeerd: geen zomerbedverruiming meer toestaan, want deze verkleinen het sedimenttransporterend vermogen van de rivier, waardoor sediment tot afzetting komt en het transport naar benedenstroomse rivierdelen afneemt. Dit betreft vooral de gestuwde Maastrajecten.

<sup>25</sup> Citaat van de Justus-Liebig Universität Giessen, Physische Geographie: *Die Optimierung der Geschiebezugabe hinsichtlich Kornspektrum, mineralogischer Charakteristik und Gesamtmenge ist Gegenstand laufender Forschungsarbeiten an der Bundesanstalt für Wasserbau in Karlsruhe*. Jaartal van dit citaat helaas niet vast te stellen.



Voor het tweede is het nodig te stoppen met het permanent onttrekken van zand en grind uit het zomerbed. Dat betekent het terugstorten van opgebaggerd zand en grind. En tevens is het nodig te streven naar een doorgaand sedimenttransport, dat zo min mogelijk gehinderd wordt door de aanwezigheid van de stuwen. Dat kan door het stuwbeheer (en/of de stuwontwerpen) zo aan te passen dat deze zo lang mogelijk het transport van grof sediment over de rivierbodem mogelijk maken (langer open).

Waar volledig herstel van de sedimenthuishouding mogelijk niet binnen bereik is omdat oorzaken in het buitenland en in keuzes uit het verleden liggen, is het wel essentieel een aantal maatregelen te nemen die de huidige problemen kunnen verkleinen. Die zijn geschetst in een sedimentperspectief voor de Maas en omvatten achtereenvolgens:

1. Het niet meer toestaan van permanente onttrekking van sediment uit het zomerbed (stroomopwaarts terugstorten) noch van ingrepen in het rivierbed die de bodemontwikkeling of sedimenthuishouding negatief beïnvloeden.
2. Het stimuleren van doorgaand sedimenttransport met het oog op een gelijkmatige en stabiele bodemligging over lange afstanden en tegelijk voldoende morfodynamiek voor nagestreefde aquatische en terrestrische natuur. Dit vraagt – in aanvulling op 1 – aangepast (stuw)beheer gericht op doorgaand sedimenttransport alsmede sedimentsuppleties.
3. Het ongedaan maken van de zomerbedverdiepingen die zijn gedaan in het kader van Maaswerken en die doorgaand sedimenttransport verhinderen door als zandvang te werken.

Welke combinatie van deze maatregelen volstaat, moet nader worden vastgesteld; maar het stoppen met winning uit het zomerbed lijkt in ieder geval noodzakelijk en voor een goed functionerende rivier een geen-spijtmateel. Wel is het een dilemma dat Nederland ook een grote behoefte heeft aan bouwstoffen, waaronder zand en grind; en de beschikbaarheid daarvan is beperkt.

## De afvoercapaciteit van Maas en Rijntakken moet fors vergroot

De afvoercapaciteit van de Maas moet wegens de gevolgen van de klimaatverandering voor de hoogwaterafvoeren vooralsnog met zo'n 10-20 % en die van de Rijntakken met circa 10-15% worden vergroot. Voor het eind van de eeuw, naar het zich laat aanzien. Voor de Rijntakken is de precieze opgave per tak afhankelijk van keuzes over de **afvoerverdeling** over de Rijntakken (bijv. Lek ontzien betekent meer over Waal plus IJssel). Het kan per Rijntak dus wat meer of wat minder zijn. Op die afhankelijkheid van de afvoerverdeling wordt verderop ingegaan. Ook voor de Maas is er sprake van een zekere afhankelijkheid, namelijk dat de afvoer die de bedijkte Maas veilig moet kunnen verwerken mede wordt bepaald door de mate van **topvervlakking** in de Maasvallei. Ook daarop wordt verderop in deze tekst ingegaan.

Behalve om de grotere rivierafvoeren door klimaatverandering veilig af te voeren, kunnen er andere redenen zijn om de afvoercapaciteit te willen vergroten. Die zijn in de *Quickscan Afvoercapaciteit* (Huthoff et al., 2020) benoemd. Het gaat onder meer om ruimte voor natuurontwikkeling, gebiedsontwikkeling en beheerruimte voor de rivierbeheerder; en om compensatie voor de gevolgen van een reeds genoemde eventuele rivierbodempverhoging en een andere instelling van de regelwerken bij de splitsingspunten.

De afvoercapaciteit kan in principe worden vergroot door:

1. Een breder winterbed (= rivierverruiming type 1: dijkteruglegging of *bypasses*/ groene rivieren; eventueel terrasvergraving in sommige delen van de Maasvallei (Zandmaastraject));
2. Een lager winterbed (= rivierverruiming type 2: door uiterwaarden of weerden te verlagen, eventueel in de vorm van nevengeulen; NB: *niet* door zomerbedverdieping of verbreding of grote waterpartijen, omdat die de morfologische ontwikkeling verstoren).
3. Een grotere waterhoogte accepteren (door dijken te verhogen; in de onbedijkte delen van de Maasvallei bepaald door het reliëf en dus leidend tot een breder rivierbed).

Een soepele afvoer is tevens gebaat bij een gelijkmatig dwarsprofiel, zonder obstakels (hoogwatervrije terreinen, aanbruggen) en zonder versmallingen (flessenhalzen); en bij een rechtdoorgaande stroming zonder scherpe bochten of dwarsstromingen uiterwaarden in en later er weer uit (zoals op de bedijkte Maas of de Boven- of Beneden-Waal).

Voor het programma Ruimte voor de Rivier zijn indertijd argumenten voor rivierverruiming genoemd, die nog steeds valide zijn:

- lagere hoogwaterstanden betekenen kleinere *kansen* op dijkfalen,
- een minder snelle ontwikkeling van eventuele bressen, en
- geringere *gevolgen* van overstromingen door langzamer instroom.

Lagere waterstanden impliceren dus een minder gevaarlijke rivier, zelfs als de *kans* op dijkfalen door een uitstekend stelsel van waterkeringen zeer klein is, want ook de gevolgen van zulk falen zijn dan kleiner (cf. Klijn et al. 2018). Het HoogWaterBeschermsProgramma (HWBP) beoogt de kans op dijkfalen te verkleinen, maar heeft geen invloed op de potentiële gevolgen van zulk falen; terwijl ook die potentiële gevolgen bepalen of een rivier meer of minder gevaarlijk is.

Aan deze overwegingen kan nog worden toegevoegd dat ten aanzien van het soort rivierverruiming geldt dat een breder winterbed (type 1) een geringere gevoeligheid betekent voor afwijkingen (temporele onzekerheid of ruimtelijke variabiliteit) of verandering van de verwachte afvoer. Door verbreding van het winterbed ontstaat een robuustere rivier, waar verlaging van het winterbed die gevoeligheid voor onzekerheden niet verkleint. Dit fenomeen was in hoofdstuk 3 al geïllustreerd in [Figuur 37](#) voor de Rijntakken en [Figuur 42](#) voor de Maas.

Aanvullende voordelen van een breder winterbed boven verlaging van het bestaande winterbed zijn:

- Een breder winterbed is langer effectief, aangezien een verlaagde uiterwaard sneller weer zal opslibben dan een bredere;
- een breder winterbed biedt de grootste kansen voor natuurontwikkeling of andere ruimtelijke kwaliteitimpulsen;
- bestaande culturele en natuurlijke (abiotische en biotische) landschapswaarden in de uiterwaarden kunnen worden behouden.

Een evident nadeel ten opzichte van uiterwaardverlaging is natuurlijk de grotere ruimtevrage – in oppervlak uitgedrukt – in nu nog beschermd gebied, waarin vaak landbouw of bebouwing aanwezig is. Dat is een conflicterende ruimteclaim, die overigens slechts betrekking heeft op korte perioden in het jaar en medegebruik van het buiten-te-dijken gebied niet in de weg staat (zie voor verschillende voorbeelden de projecten van Ruimte voor de Rivier).

### **Daarbij moet verdere opstuwing door de krappe Waal en door het noodgedwongen moeten afknijpen van Pannerdens Kanaal en IJssel worden voorkomen**

In hoofdstuk 3 is vastgesteld dat de Waal de hoogste waterstanden kent van alle rivieren en hoog boven het land uittorent. Als verklaring hiervoor is gesteld dat deze Rijntak relatief krap is voor de hoeveelheid water die deze af moet voeren; dat geldt in het bijzonder voor de Beneden-Waal (vanaf St. Andries) en voor de Boven-Waal (Waalbochten) tussen Pannerdense Kop en Nijmegen. Ook is vastgesteld dat deze krapte en de resulterende hoogwaterstanden op de Boven-Waal zorgen voor opstuwing, waarbij water naar het Pannerdens Kanaal wordt geperst. Om de afvoer toch naar de Waal te dwingen wordt in het Pannerdens Kanaal een flessenhals in stand gehouden en het regelwerk steeds verder gesloten. Dat leidt bij veranderend klimaat tot ongewenste opstuwing tot over de Duitse grens.

Om verdere opstuwing bij hogere rivierafvoeren te voorkomen staan twee opties open:

1. Verruiming van in ieder geval de Boven-Waal, om de hoogwaterstanden te verlagen en zo de opstuwende werking te voorkomen zonder de afvoerverdeling te (laten) veranderen (implicatie: ook verder langs de Waal is dan flink verruimen nodig).
2. Meer water naar het noorden leiden door de afvoerverdeling over de Rijntakken te herzien, zo dat het flessenhalseffect van het Pannerdens Kanaal ([Figuur 38](#)) wordt verminderd.

## Voor de Rijntakken moet daarom eerst over de gewenste hoogwaterafvoerverdeling worden beslist

In het kader van Ruimte voor Rivier is de beleidskeuze gemaakt om – na uitvoering van het rivierverruimingsprogramma – de Lek in de toekomst bij verdere klimaatverandering te ontzien. De argumenten daarvoor waren onder meer:

- De afvoer via Nederrijn-Lek is de langste weg naar zee (memo Klijn, 1999), dus onlogisch.
- De Lek is, als relatief jonge zijrivier van de oorspronkelijke (Oude) Rijn, relatief smal en kent vrijwel geen uiterwaarden, waardoor buitendijkse rivierverruiming lastig is.
- De Lek loopt door veenweidegebieden, waar de ontsluiting over de oeverwallen, later dijken, is geregeld en lintbebouwing kenmerkend is. Door de lintbebouwing en de zeer slappe grond (tot plaatselijk 8 m dik laagveen) is zowel dijkverlegging (binnendijkse rivierverruiming) als dijkverzwaring technisch lastig, maatschappelijk zeer ingrijpend en verhoudingsgewijs duur.

Deze argumenten zijn nog grotendeels valide, hoewel met de nieuwe normen (sedert 2017) – die berusten op een risicobenadering – een maatgevende waterstand als maat der dingen is vervallen. Het ENW heeft de validiteit van deze argumenten onlangs nog bevestigd en er tevens op gewezen dat de maatgevende waterstand *de facto* is vervangen door een maatgevend waterstandsregime; waarin matig hoge, hoge en zeer hoge waterstanden alle relevant zijn. Maar dat betekent ook dat waterstand – als hydraulische randvoorwaarde voor dijkenbouwers – nog steeds een zeer relevante parameter is.

Als we de breed ondersteunde risicobenadering van het waterveiligheidsbeleid als grondslag accepteren, zijn de volgende (al in hoofdstuk 4 genoemd) additionele overwegingen relevant bij de vraag welke eventuele verandering van de afvoerverdeling maatschappelijk het meest gewenst is:

- Hoe verhouden de Rijntakken zich qua **gevaarlijkheid**? Ofwel: hoe hoog rijst een rivier bij hoogwater boven het beschermde achterland uit? En hoeveel water wordt langs die tak aangevoerd?

- Een *eerste indruk* is dan dat de Waal het gevaarlijkst is, gevolgd door de Nederrijn-Lek en tenslotte de IJssel (zie Figuur 36).
- Hoe zit het met de **kwetsbaarheid** van de beschermde gebieden langs de Rijntakken? Ofwel: hoe is de morfologische situatie van de aangrenzende dijkkringgebieden (diepe polder of glooiend)? Hoeveel mensen wonen er? Is evacuatie moeilijk of makkelijk (te verwachten stijgsnelheid van het water, nabijheid hoge gronden)? Hoe groot is het directe schadepotentieel? Is bij overstroming maatschappelijke ontwrichting van het gehele land te verwachten?

Hier is de *eerste indruk* dat:

- de gebieden langs de Nederrijn-Lek het kwetsbaarst zijn (Betuwe + Gelderse Vallei + delen Randstad; schadepotentieel en potentieel aantal getroffen en bij de huidige rivierwaterstanden ca 140 miljard euro resp. 1,75 miljoen<sup>26</sup>),
  - dan die langs de Waal (ca 110 miljard euro schadepotentieel resp. 690.000 potentieel getroffen en),
  - en tenslotte die langs de IJssel (34 miljard euro schadepotentieel resp. 365.000 potentieel getroffen en).
- Hoe zit het met **de bergingscapaciteit van het ontvangende gebied** en de kwetsbaarheid van de dijkkringen daaromheen (Rijn-Maasmondgebied versus IJsselmeer)?
  - Enkele grove kentallen: het Noordelijk Deltabekken (zonder de Zeeuwse wateren) heeft een buitendijks niet-hoogwatervrij oppervlak van ong. 36.000 ha, het (noordelijk) IJsselmeer is met meer dan 110.000 ha zeker drie maal zo groot.
  - Hoe verhoudt zich de **robuustheid** van de Rijntakken? Ofwel: Is de waterstand op de rivier erg gevoelig voor afwijkingen in de afvoer, zowel relatief (in procenten toename) als in absolute zin? *Eerste indruk*: zoals in hoofdstuk 3 is betoogd reageert de Waal het sterkst op een toename van de Rijnafvoer, maar daar staat tegenover dat 100 m<sup>3</sup>/s extra op de wijde en – bij hoogwater – diepe Waal veel minder betekent dan 100 m<sup>3</sup>/s extra op de smalle en ondiepere IJssel. Op de Waal levert 100 m<sup>3</sup>/s extra een bijna 5 cm hogere waterstand, maar op de IJssel is dat 10 cm (Silva et al., 2001).
  - Wat is de **kortste** en geologisch dus meest logische weg naar zee? (zuiverder: welke rivier heeft het steilste verhang?).

<sup>26</sup> Afgeronde getalswaarden op basis van simulaties voor het Deltaprogramma Waterveiligheid (Slootjes & Wagenaar, 2016). Deze zijn slechts indicatief, want 1) het is onmogelijk alle gebieden langs een riviertak tegelijk onder te laten lopen (daarvoor is er niet genoeg water), 2) de getalswaarden hebben betrekking op de breslocatie met de grootste gevolgen (het kan ook elders fout gaan) en 3) de berekende getalswaarden zijn mede bepaald door de waterhoogte in de verschillende rivieren (de Waal staat het hoogst ten opzichte van het land, de IJssel het laagst). Hoewel de absolute getallen dus slechts indicatief zijn, lijkt het zeer onwaarschijnlijk dat de rangorde van de drie Rijntakken hierdoor zou veranderen.



Alles in beschouwing nemend, de oorspronkelijke argumenten en de hier nieuw aangedragen argumenten, is er nog steeds veel voor te zeggen om de Lek te willen ontzien bij afvoeren boven de 16.000 m<sup>3</sup>/s die – na Ruimte voor de Rivier – in theorie door de Rijntakken past. Maar er is ook aanleiding om de Waal te willen ontzien, want die kent immers de hoogste hoogwaterstanden, is dus relatief gevaarlijk, stroomt langs kwetsbare gebieden naar kwetsbare gebieden, en is het minst robuust. De IJssel is – ondanks de inkorting met 17 km – weliswaar bij lage afvoer langer, maar bij hoge afvoer – als de bochten door het water worden afgesneden – is deze Rijntak even lang als de Waal- Merwede (Klijn, 1999). Kleinhans et al. (2010) stellen dat – als de mens er geen stokje voor zou hebben gestoken – de Rijn bij hoogwater van nature veel meer water door het IJsseldal zou afvoeren, met als waarschijnlijk gevolg een geleidelijke verruiming van het dwarsprofiel aldaar, mogelijk resulterend in een avulsie (riviervlegging).

### **Wat zegt het bestaande beleid hierover?**

Over de verdeling van hoogwaterafvoeren op de Rijn die boven 16.000 m<sup>3</sup>/s uitgaan is geen formele beleidskeuze geformuleerd, alleen dat deze over de Waal en IJssel zou moeten worden verdeeld. De PKB Ruimte voor de Rivier, deel 4, stelde daarover:

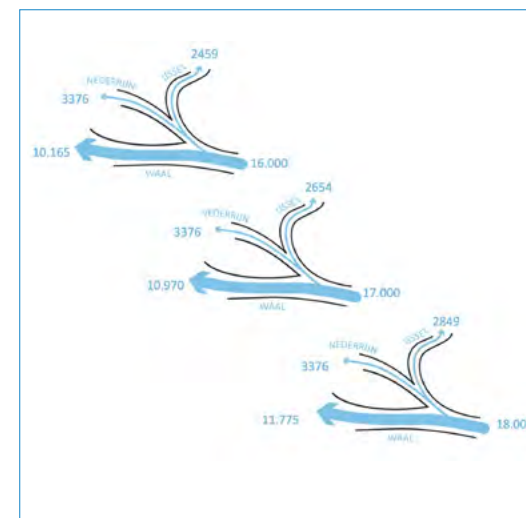
*‘De procentuele afvoerverdeling over de verschillende Rijntakken bij de maatgevende rivierafvoer, geldend voor 15.000 m<sup>3</sup>/s, wordt ook bij de in 2001 vastgestelde maatgevende afvoer van 16.000 m<sup>3</sup>/s gehandhaafd. Bij een verdere toename van de maatgevende rivierafvoer boven 16.000 m<sup>3</sup>/s wordt de extra afvoer verdeeld over de Waal en de IJssel.’*

Maar in de memorie van Toelichting (PKB, deel 5) staat: *Dit zal gebeuren volgens de huidige verhouding waarin de afvoeren over Waal en IJssel worden verdeeld.* Daarom wordt bij de meeste studies tot nu toe aangenomen dat de afvoer die anders extra over de Nederrijn zou gaan verdeeld wordt over Waal en IJssel cf. hun huidige onderlinge verhouding van 64% : 15% (dat is dus in een verhouding van ongeveer 4: 1 ofwel 80-20). Tevens wordt aangenomen dat sowieso 63% van de extra Rijnafvoer naar de Waal zou gaan en 15% naar de IJssel. Dit werd (en wordt) als de meest voor de hand liggende interpretatie van de PKB-uitspraak gezien.

In recente verkenningen wordt tevens meestal uitgegaan van ongewijzigde morfologie en ongewijzigde dwarsprofielen rond de splitsingspunten en wordt alleen gerekend met verschillende instellingen van de regelwerken op de splitsingspunten (o.a. Asselman et al., 2019; Asselman et al, 2020). De noodzaak de afvoer naar de Waal te stuwen door regelwerk Pannerden dichter te zetten verklaart de opstuwing tot over de Duitse grens, die we in hoofdstuk 3 hebben besproken. Omdat de genoemde afvoerverdeling (80-20) alleen kan worden gerealiseerd door de regelwerken bijna helemaal dicht, respectievelijk bijna helemaal open te zetten, gaat regelbereik verloren. Daarom is ook verkend met welke rivierverruimingen net stroomafwaarts van de regelwerken deze ong. in hun middenstand kunnen worden gemanoeuvreed (Schropp, 2020; zie ook RWS 2020). Daarbij is vooral de technische haalbaarheid onderzocht: er bleek van alles mogelijk, mits de ingrepen in de juiste volgorde worden geïmplementeerd.

Een verdeling van de te verwachten extra Nederrijnafvoer als gevolg van klimaatverandering volgens 80-20 levert al met al een forse extra belasting van de Waal, die daar hetzij (nog) hogere waterstanden impliceert, hetzij een ingrijpende verruiming van de Waal vraagt. Tabel 2 en Figuur 47 tonen de afvoer (hydraulische belasting) op iedere Rijntak bij verschillende instellingen van de regelwerken (vaste instelling van de regelwerken bij een Bovenrijnafvoer van resp. 16.000, 17.000 en 18.000 m<sup>3</sup>/s (groen gemaakt) als voor die specifieke Rijnafvoer de Nederrijn-Lek wordt afgeregeld op precies 3376 m<sup>3</sup>/s).

			Afvoer per tak bij 16.000 Lobith			Afvoer per tak bij 17.000 Lobith			Afvoer per tak bij 18.000 Lobith		
Bovenrijn	Waal	Waal	16.000	10.165	10.165	17.000	10.800	10.800	18.000	11.436	11.436
	Pannerdens Kanaal	Nederrijn		5.835	3.376		6.200	3.587		6.564	3.798
		IJssel			2.459			2.613			2.766
Bovenrijn	Waal	Waal	16000	10.325	10325	17.000	10.970	10.970	18.000	11.616	11.616
	Pannerdens Kanaal	Nederrijn		5.675	3.177		6.030	3.376		6.384	3.575
		IJssel			2.498			2.654			2.810
Bovenrijn	Waal	Waal	16000	10.467	10467	17.000	11.121	11121	18.000	11.775	11.775
	Pannerdens Kanaal	Nederrijn		5.533	3.001		5.879	3.188		6.225	3.376
		IJssel			2.532			2.690			2.849



Tabel 2 en Figuur 47

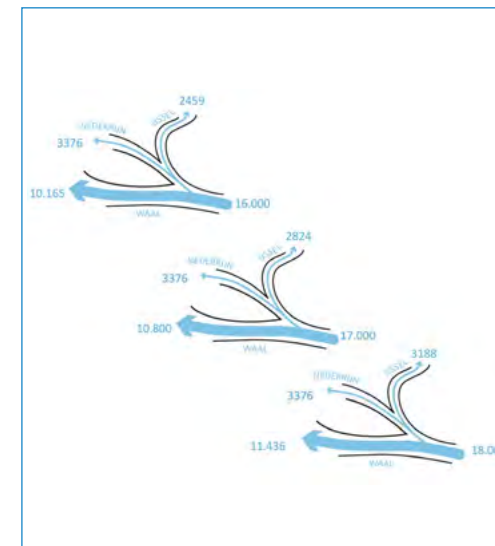
Afvoer over iedere Rijntak bij huidige afvoerverdeling (afgeregeld bij 16.000 (links groen) met gevolg in de volgende witte kolommen), en bij Lek ontzien en 80-20-verdeling over Waal en IJssel (staande beleidsbeslissing) als wordt afgeregeld bij 17.000 (midden groen) of 18.000 (rechts groen).

## Denkbare alternatieven

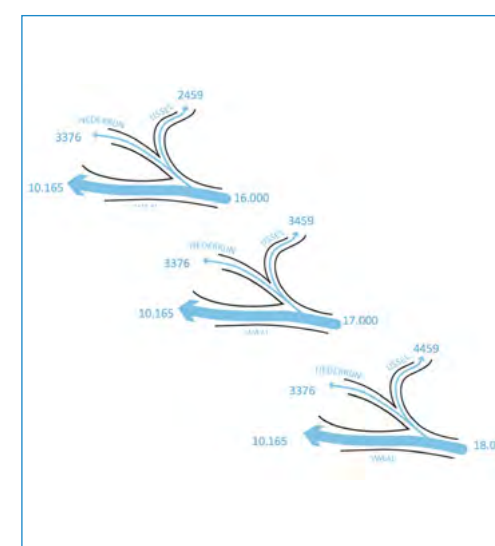
Als we ook (of: juist) de Waal zouden willen ontzien, mede om de opstuwning nabij Pannerdense Kop en bij Hondsbroekse Pleij door de flessenhalzen aldaar te verkleinen en dus meer naar het noorden te laten stromen, dan zijn ook de volgende opties (Tabel 3, Figuur 48) denkbaar voor een ‘maatgevende afvoer’, zeker met het oog op de langere termijn:

1. Alle extra **Nederrijn**-Lekafvoer boven 16.000m<sup>3</sup>/s te Lobith via de IJssel in plaats van verdeeld over Waal en IJssel (betekent voor de IJssel totaal + 365, resp. + 729 m<sup>3</sup>/s; bij ‘maatgevende’ afvoeren van 17.000 resp. 18.000 m<sup>3</sup>/s);
2. Alle extra **Rijn**afvoer boven 16.000m<sup>3</sup>/s te Lobith via de IJssel (betekent voor de IJssel totaal + 1000, resp. + 2000 m<sup>3</sup>/s; bij ‘maatgevende’ afvoeren van 17.000 resp. 18.000 m<sup>3</sup>/s).

			Alle extra Nederrijn-Lek naar IJssel								Procentueel	
Bovenrijn	Waal	Waal	16.000	10.165	10.165	17.000	10.800	10.800	18.000	11.436	11.436	63,5
	Pannerdens Kanaal	Nederrijn		5.835	3.376		6.200	3.587		6.564	3.798	21,1
		IJssel			2.459			2.613			2.766	15,4
Bovenrijn	Waal	Waal	16.000	10.165	10.165	17.000	10.800	10.800	18.000	11.436	11.436	63,5
	Pannerdens Kanaal	Nederrijn		5.835	3.177		6.200	3.376		6.564	3.575	19,9
		IJssel			2.658			2.824			2.990	16,6
Bovenrijn	Waal	Waal	16.000	10.165	10.165	17.000	10.800	10.800	18.000	11.436	11.436	63,5
	Pannerdens Kanaal	Nederrijn		5.835	3.001		6.200	3.188		6.564	3.376	18,8
		IJssel			2.834			3.011			3.188	17,7



			Alle extra Nederrijn-Lek naar IJssel								Procentueel	
Bovenrijn	Waal	Waal	16.000	10.165	10.165	17.000	10.800	10.800	18.000	11.436	11.436	63,5
	Pannerdens Kanaal	Nederrijn		5.835	3.376		6.200	3.587		6.564	3.798	21,1
		IJssel			2.459			2.613			2.766	15,4
Bovenrijn	Waal	Waal	16.000	9.567	9.567	17.000	10.165	10.165	18.000	10.763	10.763	59,8
	Pannerdens Kanaal	Nederrijn		6.433	3.177		6.835	3.376		7.237	3.575	19,9
		IJssel			3.256			3.459			3.662	20,3
Bovenrijn	Waal	Waal	16.000	9.036	9.036	17.000	9.600	9.600	18.000	10.165	10.165	56,5
	Pannerdens Kanaal	Nederrijn		6.964	3.001		7.400	3.188		7.835	3.376	18,8
		IJssel			3.964			4.211			4.459	24,8



Tabel 3 en Figuur 48

Afvoer over iedere Rijntak bij huidige afvoerverdeling (afgeregeld bij 16.000 (links groen) boven) en bij 2 alternatieve verdelingen (alle extra Nederrijn naar IJssel (= Lek ontzien) resp. alle extra Bovenrijn naar IJssel (= Lek en Waal ontzien)) als wordt afgeregeld bij 17.000 (midden-groen) respectievelijk 18.000 (rechts groen).



Deze uitersten betekenen dus substantieel zwaardere belastingen op de IJssel. Alternatief 1 lijkt doenlijk, want het betreft slechts 5% resp. 12% *meer extra* over de IJssel dan bij de al in het beleid veronderstelde verdeling 80-20. Alternatief 2, daarentegen, lijkt in eerste instantie teveel gevraagd, zeker bij 18.000, want dat is wel 30% resp. 57% *meer extra* over de IJssel dan het geval zou zijn bij een verdeling 80-20). Daar staat tegenover dat uit historisch-geografisch onderzoek blijkt dat de IJssel in het verleden zeer waarschijnlijk ook ongeveer 25% van de totale Rijnafvoer voor z'n rekening heeft genomen (Van Til, 1979; Dierx et al., 2021) – en daar zitten we zo op – en de rivier van nature ook die kant op tendeeert (Kleinhans et al., 2013). Tenslotte kan worden opgemerkt dat natuurlijk diverse tussenvarianten of stadia van aanpassing ('*tijd kopen*') denkbaar zijn.

Vertaald in *procentuele toename* van de rivierafvoer *per Rijntak* leveren de verschillende afvoerverdelingen een vraag naar extra afvoercapaciteit bij 17.000 resp. 18.000 m<sup>3</sup>/s afvoer (zeg de klimaatopgave in ong. 2035-2050 en 2075-2100) zoals gespecificeerd in Tabel 4. Ook hieruit komt het beeld naar voren dat alternatief 1 zeker doenlijk lijkt – bijv. met grootschalige dijkverleggingen –, maar het verder ontzien van de Waal cf. alternatief 2 wel zeer ingrijpend is (ruim 40 - 80% meer afvoercapaciteit op de IJssel te realiseren in de loop van deze eeuw)<sup>27</sup>.

Uit de verkennende berekeningen van Asselman et al. (2019; 2020) en Schropp (2020) blijkt dat als nu beide regelwerken zouden worden open gezet (om ten eerste opstuwing naar de Bovenrijn (en Duitsland) te voorkomen en ten tweede toch de Nederrijn-Lek zoveel mogelijk te ontlasten) er bij een afvoer van 17.000 m<sup>3</sup>/s te Lobith ongeveer 400 m<sup>3</sup>/s extra naar de IJssel zou stromen; dat komt dus vrijwel overeen met wat hierboven alternatief 1 is genoemd.

<u>Lek ontzien, verdeeld 80-20</u>		
	17000 vast	18000 vast
Waal	8	16
Nederrijn-Lek	-	-
IJssel	8	16

<u>Lek ontzien, NR naar IJssel</u>		
	17000 vast	18000 vast
Waal	6	13
Nederrijn-Lek	0	0
IJssel	15	30

<u>Extra Rijnafvoer over IJssel</u>		
	17000 vast	18000 vast
Waal	0	0
Nederrijn-Lek	0	0
IJssel	41	81

Tabel 4 Vraag naar extra afvoercapaciteit als percentage van de huidige afvoer voor iedere Rijntak als gevolg van klimaatverandering bij verschillende afvoerverdelingen: Lek ontzien en verdeeld over Waal en IJssel, Lek ontzien en dat via IJssel, respectievelijk tevens Waal ontzien en alle extra Rijnafvoer via de IJssel.

De crux van dit deel van deze beschouwing is om aan te geven dat de precieze procentuele vraag naar extra afvoercapaciteit per Rijntak – zoals die in eerste aanleg voortkomt uit de klimaatverandering – afhankelijk is van de door het beleid gekozen afvoerverdeling<sup>28</sup>. Bij *Nederrijn-Lek ontzien* en 80-20 is die vraag bij 18.000 m<sup>3</sup>/s voor Waal en IJssel elk + 16% (en 0% voor de Nederrijn-Lek). Bij *ook Waal enigszins ontzien* wordt het Waal + 13 % en IJssel + 30 % (een beetje minder Waalafvoer is veel extra IJsselafvoer). En bij een keuze voor alle extra afvoer over de IJssel moet die uiteindelijk ruim 80% meer kunnen verwerken dan nu.

<sup>27</sup> Overigens heeft WL|delft hydraulics in 'De Rijn op Termijn' zo'n perspectief al eens geschetst, met zelfs 5000 m<sup>3</sup>/s extra afvoer door het IJsseldal (en met een bypass vanaf Spijk-Lobith tussen Duiven en Zevenaar door).

<sup>28</sup> En natuurlijk het klimaatscenario; om deze getalswaarden moeten nadrukkelijk weer bandbreedtes worden verondersteld.

Deze afhankelijkheid heeft consequenties voor beslissingen over vergroting van de afvoercapaciteit op de verschillende Rijntakken (hoeveel is waar precies nodig?)<sup>29</sup>. Daarom wordt daar op teruggekomen in het volgende hoofdstuk over de volgorde van beslissen.

*Intussen moet men, de zaak uit het oogpunt van algemeen belang beschouwend, erkennen dat geen enkele van onze riviertakken langs zulke gunstig gelegen landerijen stroomt als de IJssel in Gelderland en Overijssel. Al deze landerijen, hoezeer zij ook met water belast mogen worden, kunnen zonder kunstmatige en kostbare bemaling opdrogen. Bij eventuele inundatie zullen de beneden liggende landerijen dus veel sneller van het water verlost worden dan de lage polders lang de Lek en de Waal, zoals de jongste overstroming als gevolg van de doorbraken bij Rees (onder Emmerich, aan de Rijn) nog overtuigend heeft laten zien. Want ondanks de grote massa water die uit de ongesplitste Rijn naar de IJssel stroomde en de hoogte van de inundatie, was toch voor eind maart het water uit Gelderland en Overijssel alweer afgevoerd, en dus vroeg genoeg om de landerijen te kunnen bebouwen. De schade die op enkele punten aan bruggen, gebouwen enz. is geleden, staat niet in verhouding tot de schade die de landerijen bij dergelijke rampen langs de Waal en de Lek ondergaan. Op grond van deze gesteldheid langs de IJssel en de korte afstand tot de zee, heeft men dan ook bij de meeste ontwerpen een afleiding van de bovenrivieren langs deze weg gezocht.*

Duco Johannes Storm Buysing, 1845

Figuur 49 De idee meer water door het relatief veilige IJsseldal te leiden is eerder geopperd



<sup>29</sup> Overigens kunnen de hier genoemde alternatieve afvoerverdelingen ook worden gebruikt om bij de beoordeling van individuele maatregelen of een 'mate van afvoercapaciteitsvergroting' in het kader van de planuitwerking vast te stellen of deze **kans op spijt** opleveren, aangezien deze de bandbreedte wel zo'n beetje opspannen (uitersten zijn). Een concreet voorbeeld: Lek ontzien is zeer waarschijnlijk; IJssel op termijn verhoudingsgewijs meer belasten is logisch. Waal helemaal ontzien is daarentegen vrijwel onmogelijk. Dat betekent: verruimen IJssel is nauwelijks kans op spijt en verruimen Waal ook niet.

## Voor de Maas moet eerst de topvervlakkingscapaciteit in de Maasvallei worden geborgd

Voor de Maas is relevant dat zowel de piekhoogte als de loopsnelheid van de afvoergolf voor de bedijkte Maas en Getijdenmaas sterk worden beïnvloed door de topvervlakking in de Maasvallei (in het bijzonder in de Plassenmaas en de Zandmaas). Met name korte gepiekte afvoergolven zakken door topvervlakking in, waardoor de piekafvoer stroomafwaarts lager wordt.

De mate van topvervlakking in de Maasvallei is onlangs gekwantificeerd door De Jong & Asselman (2019) ten opzichte van een situatie met oneindig hoog veronderstelde dijken, en bedraagt in de huidige situatie ongeveer 600 m<sup>3</sup>/s bij een afvoer te Eijsden van 4400 m<sup>3</sup>/s en gemiddelde vorm van de afvoergolf; zoveel minder water komt er in die situatie dus aan bij de bedijkte Maas. De mate van topvervlakking is afhankelijk van de initiële golfvorm (te Eijsden) en van wat daar nog bijkomt vanuit de Nederlandse zijrivieren.

Bij hoogwatersituaties met kansen van 1/100 tot 1/10.000 per jaar en met een afvoergolf van gemiddelde breedte (= niet heel kort en gepiekt, noch heel langdurig), correspondeert dat met circa 40-60 cm lagere hoogwaterstanden voor de Bedijkte Maas. Bij een korte steile afvoergolf, zoals die in juli 2021 op de Maas optrad, is de topvervlakking nog groter (zie Task Force Fact Finding hoogwater 2021, 2021, blz. 40); waar de zuidelijke Maasvallei met recordhoogwaterstanden werd geconfronteerd, was langs de bedijkte Maas bij lange na geen sprake van een kritieke situatie. De zeer korte en steile afvoergolf zakte namelijk in van een  $\ll 1/200$  per jaar waterstand op de Grensmaas via een  $1/50$  waterstand op de Zandmaas naar een  $1/10$  per jaar waterstand op de Bedijkte Maas.

Omdat dijkversterking cf. de nieuwe normen (sedert 2017 ook van toepassing op de kleine dijkeringen in de Maasvallei) zou kunnen leiden tot verlies aan bergingscapaciteit en dus verminderde topvervlakking, zijn een twaalftal systeemmaatregelen voorgesteld die beogen een deel van dit verlies te compenseren (RWS, 2016a). Volgens berekeningen door RWS-WVL en HKV kunnen deze de 1: 100 tot 1: 10.000 hoogwaterstanden op de Bedijkte Maas met ong. 5-10 cm verlagen. Het ENW (ExpertiseNetwerk Waterveiligheid) heeft herhaaldelijk over de topvervlakking op de Maas geadviseerd (zie adviezen

Veiligheidsysteem Maas; Veiligheidsfilosofie Maas; Systemwerking en Waterveiligheid Limburg), met als constante het advies er naar te streven deze zo veel mogelijk in stand te houden.

Deze paragraaf kan dus op vergelijkbare wijze worden besloten als de vorige, en wel als volgt: de crux van dit deel van deze beschouwing is om aan te geven dat de precieze procentuele vraag naar extra afvoercapaciteit op de Bedijkte Maas – zoals die in eerste aanleg voortkomt uit de klimaatverandering – afhankelijk is van het succes van borging van de topvervlakkingscapaciteit in de Maasvallei. Waar we in [hoofdstuk 2](#) vaststelden dat de hoogwaterafvoer waarmee in de *bedijkte* Maas moet worden gerekend door klimaatverandering al kan toenemen met 10-20%, kunnen we hier vaststellen dat daar mogelijk nog maximaal zo'n 600 m<sup>3</sup>/s (= 15 %) bij komt als door dijkverhoging in Limburg (als beleidsrespons op de klimaatverandering) de topvervlakking vrijwel geheel zou verdwijnen (zie De Jong & Asselman, 2019).





## Om de afvoercapaciteit te vergroten en tegelijkertijd te voorkomen dat hoogwaterstanden hoger worden is rivierverruiming een bewezen effectieve maatregel

Rivierverruiming in strikte zin is het vergroten van de afvoercapaciteit, waardoor de waterstanden ter plaatse en stroomopwaarts van de verruiming lager worden. Dat impliceert dat retentie strikt genomen niet onder de definitie van rivierverruiming valt, want deze beïnvloedt de rivierafvoer; retentie leidt daardoor juist stroomafwaarts tot lagere waterstanden.

Retentie, in de vorm van tijdelijke berging van een hoeveelheid water, is natuurlijk wel een vorm van ruimte bieden aan water; maar het betreft bergingscapaciteit en geen afvoercapaciteit. Aan retentie kleven voordelen, maar ook enkele belangrijke nadelen, die uitgebreid zijn beschreven door Silva et al. (2000). Een bekend nadeel heeft betrekking op de maximale capaciteit van retentiegebieden en wat dat betekent voor de dimensionering van retentiegebieden: ze moeten heel groot, anders zijn ze te vroeg vol – als de afvoergolf breed is bijvoorbeeld – of nog vol – als er een tweede afvoergolf komt. Dat maakt ze weinig robuust<sup>30</sup>. Een tweede nadeel heeft betrekking op de noodzaak de retentiegebieden droog te houden tot het kritiek wordt, terwijl reeds alom de negatieve gevolgen van een hoogwater worden gevoeld: dat is moeilijk uit te leggen. En een derde nadeel betreft de locatie waar retentiegebieden effectief kunnen zijn: retentie moet zo ver mogelijk stroomopwaarts plaatsvinden, maar Nederland ligt ‘onderaan’ in de stroomgebieden van Maas en Rijn. Vanwege deze nadelen pleiten sommigen voor ‘stromende berging’, zoals die in feite tot uitdrukking komt in de topvervlakking die in de Maasvallei optreedt. Die vorm van ‘ongestuurde retentie’ is robuuster doordat het systeem complex en meervoudig is, en aldus niet de nadelen kent die kleven aan de gelimiteerde capaciteit van een enkelvoudig retentiegebied.

Hier gaan we verder nog alleen in op rivierverruiming in strikte zin. Het vergroten van de afvoercapaciteit van een rivier betekent dus lagere waterstanden ter plaatse en stroomopwaarts van de verruiming. Daarom moet een rivierverruimingsalternatief voor een lang traject of een hele rivier dus bij voorkeur van benedenstrooms naar stroomop-

waarts worden samengesteld (zo is dat ook gedaan voor de PKB-Ruimte voor de Rivier). Rivierverruiming kan de vorm hebben van:

1. verbreding van het winterbed (door dijkeruglegging of een bypass/groene rivier),
2. verlaging van de weerden of uiterwaarden (eventueel met nevengeulen), of
3. verdieping of verbreding van het zomerbed.

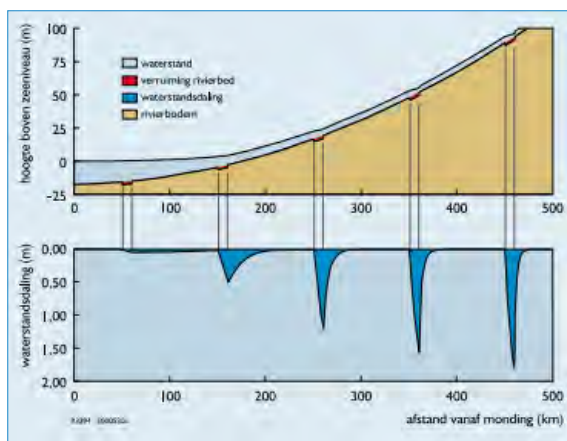
Omdat verruiming van het zomerbed ook leidt tot lagere midden- en laagwaterstanden, en tot morfologische veranderingen in dat zomerbed, wordt dat vanuit andere doelen (laagwaterstanden omhoog brengen) en functies en waarden (scheepvaart en natuur) als zeer ongewenst beschouwd<sup>31</sup>. Met een uitzondering: kribverlaging en langsdammen zijn ingrepen in het zomerbed die zowel de hoogwaterstanden kunnen verlagen als de uitschuring afremmen – en zo laagwaterstanden soms zelfs omhoog kunnen brengen.

Hoe goed een maatregel de hoogwaterstanden verlaagt, wordt de effectiviteit genoemd. De effectiviteit is afhankelijk van de omvang van de ingreep, maar ook van de situatie ter plaatse (incl. de omgeving). De effectiviteit van een rivierverruiming wordt vaak uitgedrukt in termen van cm waterstandsverlaging (in de verticaal gemeten ter plaatse van het maximale effect). Een betere maat is echter m<sup>2</sup>, waarbij wiskundig wordt geïntegreerd over de verticale verlaging en over de lengte waarover verlaging optreedt (Silva et al., 2000; zie [Figuur 50](#)).

In het algemeen geldt dat hoe verder stroomafwaarts een rivierverruiming, des te minder effectief deze is in cm waterstandsverlaging over de verticaal. Deze ‘effectiviteit’ is immers gerelateerd aan de hellingshoek van de stuwkromme (de verhanglijn); en die wordt stroomafwaarts flauwer. Nabij zee staat het water immers (bijna) horizontaal. Daar staat tegenover dat een rivierverruiming in een steil riviertraject (bijv. de Grensmaas) de waterstanden over een kortere lengte verlaagt. En dat is dus minder effectief in termen van m<sup>2</sup>.

30 Studies naar de effectiviteit van retentie laten zien dat het gewogen effect van retentiegebieden zo'n 30-60% kleiner is als met een reeks afvoergolven met verschillende vorm wordt gerekend, dan het bij een standaard afvoergolf is waarvoor was geoptimaliseerd (Pol et al., 2020).

31 De zomerbedverlaging in de IJssel bij Kampen moet als tijdelijke maatregel worden beschouwd, in afwachting van de eindoplevering van de bypass aldaar. Rijkswaterstaat heeft vanuit diverse overwegingen, niet het minst onderhoudsgevoeligheid, spijt van deze maatregel.



Figuur 50 De effectiviteit van rivierverruiming is afhankelijk van het verhang, met sterk verticaal effect op steile stukken, maar meer horizontale doorwerking op flauwe (Silva et al., 2001)

In het kader van Ruimte voor de Rivier zijn drie rivierverruimingsprojecten die in het overgangsgebied liggen (tussen 0 en 1 m NAP) toch als zeer effectief beoordeeld en uitgevoerd. Het betreft de Noordwaard (beginnend bij kmr 961 op de Merwede; 60 cm verlaging hoogwaterstand bij Werkendam), de Overdiepse Polder (langs de Bergse Maas; 27 cm verlaging hoogwaterstand) en de bypass Kampen in de IJsseldelta (Reevediep; 41 cm verlaging hoogwaterstand). Daarvoor zijn drie redenen:

- Ten eerste is het overgangsgebied tussen volledig afvoergedomineerde en uitsluitend stormvloedgedomineerde hoogwaterstanden enkele tientallen kilometers lang, en per rivier verschillend afhankelijk van de morfologie (breedte, breedte-diepte-verhouding).
- Ten tweede hebben rivierverruiming die de afvoercapaciteit van de rivier vergroten<sup>32</sup> effect op de waterstanden tot vele (soms tientallen) kilometers stroomopwaarts van de locatie van de maatregel, waar deze wel bijna volledig door de rivierafvoer worden bepaald.
- Ten derde betrof het omvangrijke ingrepen (ruim 2000 ha, bijna 500 ha en ruim 400 ha), zeker in vergelijking met de grootte van de betreffende rivier.

Dat betekent dat rivierverruiming gericht op het vergroten van de afvoercapaciteit nog doelmatig bijdraagt aan waterstandsverlaging als deze begint op een locatie die circa 1 m hoger is dan de gemiddelde zeespiegel en voldoende omvangrijk is. Tegen de achtergrond van de verwachte zeespiegelstijging en door de oogharen gezien betekent dit voor bijv. de Waal dat:

- maatregelen tussen Werkendam en Haften nog effectief zijn tot 1 m zeespiegelstijging;
- maatregelen tussen Haften en St. Andries nog effectief zijn tot 2 m zeespiegelstijging;
- en maatregelen tussen St. Andries en Tiel nog effectief zijn tot 3 m zeespiegelstijging.

### In de onbedijkte riviertrajecten (Maas) is vergroting van de afvoercapaciteit alleen mogelijk door de geomorfologie te veranderen

In onbedijkte rivieren neemt de rivier bij grotere rivierafvoer vanzelf meer ruimte in, door de breedte van het glooiende rivierdal op te zoeken. Alleen waar een rivier door een kloof stroomt, kan deze uitsluitend de hoogte in, omdat de breedte is gelimiteerd. Dat is in Nederland dus nergens het geval, maar geldt wel voor de Maas in de Waalse Ardennen (tussen Charleville-Mézières en Luik; De Wit, 2008) en voor de Rijn waar de Mittelrhein tussen Bingen en Keulen door de Duitse middengebergten snijdt (Silva et al., 2000).

In Nederland is het Maasdal in Limburg voor een groot deel onbedijkt en stroomt daar door een landschap met rivierterrassen (zie Het Verhaal van de Maas; Anonymus, 2018). Daar zal een hoogwater dus vanzelf meer ruimte innemen als het water hoger komt. En dat is te verwachten als gevolg van de klimaatverandering. Vergroting van de afvoercapaciteit zonder dat de rivier een steeds groter areaal overstroomt kan dan alleen door het winterbed te verruimen en dus door aanpassing van de dwarsdoorsneden, c.q. het reliëf. Dat kan alleen door afgraving en dus aantasting van dat natuurlijk reliëf (bijv. afgraving van Maasterrassen, weerden, kronkelwaarden). Dat gaat altijd ten koste van abiotische natuurwaarden (aardkundige landschapswaarden).

32 We rekenen maatregelen die zijn gericht op vergroting van de komberging, zoals Volkerak-Zoommeer, niet tot de rivierverruiming in strikte zin. Dergelijke maatregelen dienen op een andere wijze te worden beschouwd.

Daarom is grootschalige rivierverruiming in trajecten waar de afvoercapaciteit door de natuurlijke geologische en geomorfologische context wordt beperkt (terrassen Zandmaas) omstreden. Waarbij ook nog kan worden opgemerkt dat in onbedijkte – of pas recent bedijkte – riviertrajecten het reliëf meestal zodanig is dat de overstromingsdiepten bij extreme hoogwaters beperkt blijven (ondiep) en hogere grond altijd nabij is. Verplaatsing van bepaalde – kwetsbare – vormen van landgebruik (naar elders) of aanpassing aan af en toe overstroming (anders bouwen) zijn voor de lange termijn de meest robuuste oplossing.

### **In bedijkte riviertrajecten moet worden gestreefd naar een geleidelijk aflopende verhanglijn (zonder opstuwing, zoals blijkend uit knikken) ....**

---

In hoofdstuk 4 is gereflecteerd op hoe de doelstelling veilige hoogwaterafvoer door de grote rivieren zou kunnen worden geïnterpreteerd. Daarbij is geopperd te streven naar een rivier met een *geleidelijke verhanglijn* en met een *gelijkmatige stroming* qua snelheid (ter voorkoming van erosie en sedimentatie) en richting (weinig dwarsstromingen). Dat pleit voor een winterbed zonder vernauwingen, zonder scherpe bochten en zonder teveel schaarlijken. Zo'n interpretatie gaat uit van de premisse dat een voor veilige hoogwaterafvoer goed functionerende rivier voorop moet staan en de waterkerende dijken pas in tweede instantie komen; in plaats van dat de afvoercapaciteit wordt aangepast aan 'toevallige' dijkhoogtetekorten (zoals in de Quick-scan Afvoercapaciteit; Huthoff et al., 2020). De rivier was er immers eerder (10.000-en jaren versus 100-en jaren; *primariteit*) en is groter en minder maakbaar en daarom alleen al veel belangrijker (*prioriteit*) dan de dijken. De rivier vormt als deel van de natuurlijke basislaag (cf. lagenbenadering VROM) ook mede het fundament waarop infrastructuur en occupatie moeten reageren in plaats van deze aan te passen aan de infrastructuur- en occupatielaag (zie Deltares et al., 2021; Coalitieakkoord Rutte IV, 2021-2025).

Een dilemma is dat een te ver doorgevoerde 'normalisatie van het winterbed' kan leiden tot een zeer onnatuurlijk aandoend rivierenlandschap, zoals we dat zien langs de Bedijkte Maas (in de vorm van de zogenaamde Lelyzone) als gevolg van de werken van de eerste helft van de 20e eeuw: een breed en diep gekanaliseerd zomerbed met een genivelleerd winterbed met een brede verlaagde zone ten behoeve van de hoogwaterafvoer. Vanuit andere functionaliteiten en waarden (ruimtelijke kwaliteit) is dat onwenselijk.

Een geleidelijke verhanglijn en een gelijkmatige stroming kunnen worden gerealiseerd door rivierverruiming ter plaatse van obstakels, vernauwingen (flessenhalzen), krappe riviertrajecten en scherpe bochten met sterke dwarsstroming. Waar deze zitten kan worden afgeleid uit een analyse van de verhanglijnen (zoals gedaan voor Deltaprogramma-Rivieren door Asselman & Hendriks, 2016), soms aangevuld met een analyse van het energieverhang (indicator van het verloop van de stroomsnelheid; zoals gedaan voor Ruimte voor Rijntakken). Waar een knik in de verhanglijn zit, is immers sprake van een lokale beperking in de afvoercapaciteit. [Voorbeelden hiervan zijn getoond in hoofdstuk 3.](#)

Als op deze locatie het winterbed ook duidelijk smaller is – of op andere wijze afgeknepen –, is sprake van een flessenhals. Rivierverruiming ter hoogte van flessenhalzen (vernauwingen in het winterbed), of in relatief smalle riviertrajecten, is in het algemeen het meest effectief en vaak van alle vormen van rivierverruiming ook het meest *kosteneffectief* (zie ook Silva et al., 2001 en de hydraulische onderzoeken van WL| delft hydraulics voor de dijkverlegging Lent (Nijmegen)). Hetgeen overigens niet wil zeggen dat het goedkope of gemakkelijke ingrepen betreft, want vaak zijn de vernauwingen het gevolg van kruisende weg- of spoorinfrastructuur of betreft het stedelijke knelpunten (bijv. Maastricht, Venlo, Zutphen, Deventer).

### **... en is het verbreden van het winterbed het meest robuust en heeft dat de grootste toekomstwaarde**

---

Waar uit de verhanglijnen lokale knelpunten en flessenhalzen kunnen worden geïdentificeerd, kunnen langere trajecten met een te geringe afvoercapaciteit worden afgeleid uit een analyse van de robuustheid van de rivier vanuit z'n hoogwaterafvoerfunctie, zoals besproken in hoofdstuk 3. Daarbij is gebruik gemaakt van de Q-h-relaties die zijn gerepresenteerd door decimeringshoogten. Waar deze decimeringshoogten over langere trajecten groot zijn, is de afvoercapaciteit relatief beperkt en is rivierverruiming met het oog op klimaatverandering het meest gewenst. Want daar reageert de hoogwaterstand sterk op verschillen in de rivierafvoer, en is de rivier vanuit z'n hoogwaterafvoerfunctie het minst robuust. In hoofdstuk 3 zijn de Boven-Waal, de gehele Beneden-Waal, en de Lek als krappe trajecten geïdentificeerd.



Waar lokale knelpunten (obstakels in de vorm van bijv. hoogwatervrije terreinen, kades, veerwegen, aanbruggen) soms met lokale maatregelen zijn op te lossen, vragen langere trajecten met een te geringe afvoercapaciteit grootschaliger ingrijpen. Over grotere lengtes, hetzij aaneengesloten of achter elkaar als een kralenketting of wisselend van oever.

Voor te krappe trajecten als gevolg van een relatief geringe winterbedbreedte zijn dijkverleggingen en bypasses (groene rivieren) over het algemeen de meest effectieve vormen van rivierverruiming (vergelijk Silva et al., 2000). Dat is vooral zo als er bij hoogwater voldoende waterdiepte in het toegevoegde areaal is, zodat de invloed van de hydraulische ruwheid van de vegetatie beperkt blijft. Dijkverleggingen en bypasses zijn het meest zuiver een ‘verruiming van de rivier’, namelijk in termen van toegevoegd oppervlak buitendijks gebied. Maar dijkverleggingen en bypasses vragen ook de meeste ruimte, die immers eerst binnendijks was. Daar staat tegenover dat ze ampele mogelijkheden bieden om later ook nog het maaiveld te verlagen; ze bieden flexibiliteit en aldus toekomstwaarde.

Uiterwaardverlaging kan effectief zijn in rivieren die brede uiterwaarden kennen. Uiterwaardverlaging kan vlakdekkend zijn, reliëfvolgend, of in de vorm van nevengeulen worden uitgevoerd. Qua ruimteschaal is dit type maatregel te beschouwen als gemiddeld. Door land in water te veranderen (geulen) wordt de hydraulische ruwheid verkleind, hetgeen deels verklaart waarom daar in Ruimte voor de Rivier vaak voor is gekozen (Scheller- en Oldeneler buitenwaarden, Deventer), soms in aanvulling op een dijkverlegging (Nijmegen, Brakel/Munnikenland, Vreugderijkerwaard).

Het verwijderen van obstakels, zoals hoogwatervrije terreinen, aanbruggen, zomerkades of kribben, is ruimtelijk het meest kleinschalig. Dat wil zeggen dat de ingrepen weinig areaal betreffen, maar ook weinig kansen bieden voor ruimtelijke herinrichting (natuur, recreatie, e.d.). Het hydraulisch effect varieert van fors ((aan)bruggen wegen en spoorlijnen) tot soms zeer beperkt (verlagen zomerkades, kribverlaging); de kosten variëren van heel duur (aanbruggen in snelwegen, spoorlijnen) tot relatief goedkoop (zomerkades, kribben).

## Rivierverruiming kan (ook) ruimte voor natuur(ontwikkeling) bieden

---

Niet alleen een robuuste, dus veilige, hoogwaterafvoer, maar ook een robuuste ecologische hoofdstructuur is gebaat bij:

- zoveel mogelijk extra hectares buitendijks gebied (dempt hoogwaters en biedt ‘natuurgebieden van formaat’);
- het wegnemen van flessenhalzen en nauwe riviertrajecten (zorgt voor een gemakkelijker en gelijkmatiger afstroming en vergroot de ecologische connectiviteit tussen terrestrische en aquatische habitats van rivieren in de vorm van een brede natuurcorridor);
- een breed winterbed (resulteert in een minder sterke hoogwaterstandsrespons op verschillende rivierafvoeren en levert een natuurlijker hydrodynamiek waar die door gebrek aan ruimte te sterk is opgeslingerd).

Een veilige hoogwaterafvoer en natuurontwikkeling gaan overigens niet in alle opzichten probleemloos samen. Want natuurontwikkeling in uiterwaarden vraagt ook ruimte c.q. enige vrijheid voor natuurlijke successie waardoor de ‘hydraulische ruwheid’ kan toenemen; en dat conflicteert met een vanuit een veilige hoogwaterafvoer juist gewenste ‘hydraulische gladheid’. Ontwikkelruimte voor natuurlijke successie en ruimte voor verrassing vergt niet te strikte regels ten aanzien van plaats en structuur van vegetatie (zie ook Smits et al., 2000); maar dat botst dus met een strakke ‘vegetatielegger’ en daarbinnen nauw gedefinieerde toelaatbare hydraulische ruwheden. Want natuurontwikkeling vraagt juist om enige speelruimte. En om ruimte voor cyclische verjonging door een beoordeling van de hydraulische situatie over grotere ruimtelijke eenheden, bijvoorbeeld op de schaal van een deel van een riviertraject i.p.v. op de schaal van een individuele uiterwaard (zie bijv. Baptist et al., 2004; Baptist ) of zelfs een (deel van een) perceel, zoals uit de ‘legger’ voortkomt.

Het potentiële conflict tussen natuurlijke successie en een veilige hoogwaterafvoer vraagt om zorgvuldig balanceren, of enige overmaat. Voor wat betreft maatregelen die de afvoercapaciteit vergroten betekent het dat óók voor natuurontwikkeling dijkverleggingen en bypasses de voorkeur verdienen. Want die betekenen uitbreiding van het areaal met een natuurlijker hydrodynamiek. De natuur wint natuurlijk pas werkelijk als dat grotere areaal ook een natuurbestemming krijgt (zie de Ruimte-voor-Rivierprojecten Noordwaard, Munnikenland, Vreugderijkerwaard of bypass Kampen).

Waar rivierverruiming niet door dijkverlegging/een bypass wordt gerealiseerd, kan uiterwaardherinrichting (geulen, verlagingen) bijdragen aan het herstel van milieugradiënten en aldus een grotere milieudiversiteit: een belangrijke conditie voor natuurontwikkeling. Het is dan wel zaak de uiterwaardverlaging nadrukkelijk mede met het oog op natuurontwikkeling te ontwerpen, en te voorkomen dat de hele uiterwaard niet alleen wordt verlaagd, maar *en passant* ook wordt geëgaliseerd (want dat is ecologisch oninteressant).

Alhoewel uiterwaardverlaging door herinrichting vaak dus verrijkend kan werken – bijvoorbeeld in uiterwaarden die in het verleden ecologisch zijn genivelleerd door een sedimentdek of vergraving (bijv. de Lelyzones op de bedijkte Maas, egalisaties Nederrijn) of waar de morfodynamiek nog heel groot is (Waal, Grensmaas) –, kan vergraving ook een verlies aan abiotische natuurwaarden ('aardkundige waarden') betekenen – namelijk indien toegepast in gefossiliseerde landschappelijk waardevolle uiterwaarden (zoals we die vooral aantreffen langs de IJssel; zie De Soet, 1976; Asselman & Klijn, 2003). In zulke situaties zou vergraving moeten worden vermeden.

## Een optimalisatie van de vaarwegfunctie is lastig te combineren met het ruimte bieden aan natuurlijke processen: scherpe keuzes zijn nodig

---

Het gebruik van een natuurlijke rivier als vaarweg levert vaak problemen op. Want rivieren veranderen steeds – ze zijn dynamisch – en kennen zowel diepe geulen als ondiepten en zandbanken.

Om onze grote rivieren bevaarbaar te krijgen en te houden voor steeds grotere schepen zijn deze fors aangepakt: met drie achtereenvolgende normalisaties is gestreefd naar een rivier waarin de erosieve krachten zo zijn geconcentreerd dat een voldoende diepe vaarweg zonder zandbanken resulteert. Over de gehele lengte. En rivieren waar gedurende lange perioden niet genoeg water doorheen stroomt zijn gekanaliseerd (Maas en Nederrijn).

Enigszins scherp gesteld zijn de wensen ten aanzien van hoe een rivier er bij zou moeten liggen *sec* vanuit de scheepvaart gezien exact tegengesteld aan die vanuit natuurontwikkeling gezien, namelijk:

- **Constant in de ruimte** (gelijke diepte over hele breedte en lengte) versus **divers** in lengte, breedte en diepte met vooral veel geleidelijke overgangen (gradiënten; *River Continuum Concept* (Vannote et al., 1980));
- **Constant in de tijd** qua diepte en doorvaarthoogte versus **dynamisch** over het jaar (hydrodynamiek; *Flood Pulse Concept* (Junk et al., 1989) en veranderend over langere tijd (morfologisch evoluerend).

Dit valt het kortst samen te vatten als: liever een kanaal versus liever een dynamische rivier<sup>33</sup>. En het verklaart dat monofunctionele optimalisatie van de vaarweg ecologisch nivellerend uitpakt (Figuur 23), terwijl natuurontwikkeling frequenter onderhoud van de vaarweg (baggeren) nodig maakt. Waar IRM integratie en meervoudig gebruik voorstaat, lijkt hier sprake van een *zero-sum game*: waar de één wint, verliest de ander. Vrijwel onontkoombaar, behalve misschien waar beide een rivier zonder stuwen en sluizen prefereren (wat bij een bepaald afvoerregime echter domweg niet altijd kan: Maas).

---

33 Overigens geldt vrijwel hetzelfde voor de vergelijking van wensen van de landbouw (monocultuur op homogene en geëgaliseerde grond) vs. die van natuur

Dit kan ook worden opgevat als het **dilemma tussen verweven (meervoudig ruim-tegebruik) of scheiden**. Concreet leidt het immers tot de vraag hoeveel ruimte kan worden geboden aan natuurlijke processen en in hoeverre een divers rivierenlandschap mogelijk is *als tegelijkertijd* de huidige vaarwegfunctionaliteit moet worden geborgd. Men kan dan bijvoorbeeld denken aan het toestaan van natuur(lijke processen) alleen *buiten* de vaarweg en onder de voorwaarde dat ze geen invloed hebben op de vaarweg door tot lokale sedimentatie te leiden (bijv. nevengeulen ingevolge KRW-doelen, natuurvriendelijke oevers, kribvakken); en aan het voorkomen van de afdekking van zand- en grindbodems door slib in het zomerbed door voldoende hydro- en morfodynamiek toe te laten (gestuwde Maas).

Dit dilemma tussen verweven of scheiden speelt vooral als er te weinig fysieke ruimte is voor beide functies, of het afvoerregime van een rivier zodanig is dat de scheepvaartfunctie niet zonder stuwen kan worden ondersteund. Zo is het zomerbed van de IJssel te smal om en te varen en natuurvriendelijke oevers zich vrij te laten ontwikkelen; en is het afvoerregime van de Maas te grillig om zonder stuwen een betrouwbare vaarweg te bieden.

Als we door deze bril de huidige toestand van onze rivieren analyseren en evalueren (en het enigszins karikaturaal neerzetten), dan:

- biedt de dynamische Waal op dit moment nog ruimte aan beide functies, hoewel de vaardiepte van de nog brede vaarweg steeds vaker enigszins tekort schiet (**natuur voldoende, scheepvaart knelpunten**);
- is de IJssel verhard en morfologisch verstard (hetgeen de roep tot ontstening verklaart) en geregeld te smal (**natuur zeer matig (vooral (semi-)aquatisch), scheepvaart beperkt**);
- is de Nederrijn een aaneenschakeling van lage uiterwaarden en moerassige milieus langs een weinig dynamische – volledig gekanaliseerde – rivier (**natuur onnatuurlijk; scheepvaart okay**); en
- is de Maas welhaast een kanaal, met uitzondering van de Grensmaas waar een strikte scheiding tussen natuur en scheepvaart (via het Julianakanaal) is gerealiseerd (**natuur onvoldoende ('geen riviernatuur'; met uitzonderingen!); scheepvaart optimaal**).

Dit levert het beeld op dat over het geheel genomen (met uitzonderingen!) de natuur, vooral de (semi-)aquatische, slechter af is dan de scheepvaart, behalve misschien op de Waal. Een beeld dat wordt ondersteund door de watersysteemrapportages Rijntakken (Reeze et al., 2017) en Maas (Reeze et al., 2020). Een beeld dat ook de zorg verklaart of de KRW-doelen voor de rivieren wel tijdig kunnen worden gehaald.

Voor de rivieren waar de natuur duidelijk te weinig kwaliteit heeft zou moeten worden gestreefd naar het versterken daarvan door natuurlijke processen weer meer toe te staan. Enkele natuurlijke processen die vanuit dat oogpunt gewenst zouden zijn – maar mogelijk conflicteren met een constante vaarweg –, en waar vanuit KRW en NNN naar wordt gestreefd, zijn (niet-limitatief):

- Erosie van oevers en nevengeulen door stroming (morfodynamiek);
- Erosie van oevers door golven, mits op steeds verschillende hoogten zodat geleidelijke overgangen (gradiënten) ontstaan en geen steile afslagoevers (dus *niet* in een stuwband met constant peil);
- Het ontstaan van ondiepten (oevers en zandbanken), door lokale sedimentatie, bijv. voor of na nevengeulen (morfodynamiek);
- Een natuurlijk overstromingsregime van de uiterwaarden (hydrodynamiek), hetgeen waterstandsfluctuaties vraagt, ook in het lage afvoerbereik (dus geen stuwen of zo min mogelijk gebruik ervan);
- Zoveel mogelijk stroming in de gekanaliseerde Maas, om deze geschikt te houden voor aquatische fauna van zand- en grindrivieren, door de stuwen vaker en langer open te houden;
- (flink) meestromende nevengeulen die tot dwarsstroming en aanzanding kunnen leiden;
- ...



Specifiek voor de Waal, waar de vaarweg knelpunten kent, kan nog worden opgemerkt dat misschien met langere maar lage kribben een voldoende diepe vaarweg kan worden gecombineerd met dynamische kribvakken. Zo'n '4e normalisatie' is 'nature-based' en een vorm van **verweving** die alleen voor de brede Waal nog een (tijdelijk?) begaanbaar pad lijkt. In hoeverre dit kan werken en welke neveneffecten het heeft (toch weer sterkere uitschuring?) vraagt nog onderzoek.

Als alternatief kan worden gedacht aan (meer) langsdammen, waarmee juist een **scheiding** tussen vaarweg en natuurgeul wordt aangebracht (vergelijk een doorgaande weg met naastgelegen ventweg/fietspad). Een nadeel van langsdammen is dat ze landschappelijk zeer ingrijpend zijn doordat het toch weer een *harde civieltechnische* oplossing is waarvoor veel hard materiaal nodig is (schade deels afgewenteld op het buitenland (steengroeves) en weinig flexibel).

### Seizoensberging van water gaat slecht samen met een natuurlijk afvoer- en overstromingsregime

---

In stuwpannen en achter (zomer)kades in het winterbed kan water worden vastgehouden om dit later in het jaar beschikbaar te hebben en droge perioden te overbruggen.

Langs de Rijntakken wordt dit geopperd om bijvoorbeeld natte overstromingsvlakten te herstellen (Kurstjens et al., 2020), maar ook om het grondwaterpeil langer hoog te kunnen houden. Dat vraagt het vasthouden van water na hoogwaterperioden achter bestaande of daartoe aan te leggen kades met inlaatsluisjes of klepduikers (duikers met een klep die eenzijdig kan openen, zoals in het verleden veel gebruikt in de Biesbosch)<sup>34</sup>.

Bij de Maas kan water worden vastgehouden in stuwpannen, zoals in de afgelopen droge jaren met behulp van tijdelijke opzetbalken al is gedaan. In het kader van de vervanging van stuwen en sluisen in de Maas wordt een meer structurele peilopzetmogelijkheid overwogen, evenals maatregelen tegen lek- en schutverliezen (waterbesparend schutten, terugpompen). Ook is voor het Maasdal een eerste – zeer globale – pre-verkenning naar mogelijkheden voor seizoensberging in waterreservoirs met 1-3 m waterdiepte in het winterbed gedaan, in het bijzonder gericht op watervragers zoals drink- en industriewaterwinning en andere gebruikers (Ouwkerk et al., concept).

Al deze vormen van seizoensberging vragen om technische ingrepen en betekenen een onnatuurlijker afvoerregime of overstromingsregime. Het water kan na een hoogwaterperiode immers niet zakken door natuurlijke drainage, want het wordt tegengehouden; door kades of zelfs in reservoirs. Waar sprake is van kades in weerden of uiterwaarden met een natuurbestemming betekent dit dat een natuurtype kan ontstaan dat afhankelijk is van waterpeilbeheer; mogelijk wel een zeldzaam type, dat ook tot de natuurdoelen behoort, maar dat alleen met gericht beheer in stand te houden is en daarom als onnatuurlijk kan worden gekarakteriseerd. Waar sprake is van reservoirs met grote diepte is het ruimtebeslag een belangrijke consequentie. Want dergelijke waterbassins kunnen niet als riviernatuur worden beschouwd; hun functie is immers waterconservering voor watergebruikers en niet het borgen van de juiste condities voor natuur (zie Ouwkerk et al., 2021).

Het meer vasthouden van water in stuwpannen op de Maas, tenslotte, betekent dat de natuurlijke stroming van de rivier nog meer wordt onderbroken en het afvoerregime nog onnatuurlijker wordt. Want dan is er minder afvoer als het wel heeft geregend en juist meer als het niet heeft geregend. Hier conflicteren de wens vanuit natuurontwikkeling tot een zo natuurlijk mogelijk afvoer- en overstromingsregime (met ook laagwaterperioden en lage waterstanden) met de wens water vast te houden om watergebruikers van water te voorzien. Wederom een dilemma.

34 Deze optie wordt verkend bij de dijkverlegging Paddenpol langs de IJssel.



Foto: Tineke Dijkstra





## Over padafhankelijkheid en de volgorde van ingrijpen

De volgorde van ingrijpen in zomerbed en winterbed (en van beslissingen daarover) is belangrijk, want sommige ingrepen hebben gevolgen voor de taakstelling voor en dimensionering van andere ingrepen. Ter illustratie van deze padafhankelijkheid is in de inleiding al genoemd dat de vraag hoeveel extra afvoer elke Rijntak veilig zou moeten kunnen afvoeren, niet alleen afhangt van de klimaatontwikkeling, maar *ook van de afvoerverdeling* bij hoogwater. En waar de klimaatontwikkeling een gegeven is, waar het rivierbeleid geen invloed op heeft, is de afvoerverdeling door de mens opgelegd en kan deze door een beleidskeuze worden veranderd. Op vergelijkbare wijze is een beslissing over het eventueel weer verhogen van de rivierbodem in het sterk uitgeschuurde splitsingspuntengebied op zijn beurt afhankelijk van welke afvoerverdeling bij laagwater wordt nagestreefd, terwijl zo'n bodemverhoging de afvoercapaciteit tijdens hoogwater vermindert. Als derde voorbeeld kan worden gewezen op de wens meer riviernatuur in de uiterwaarden te realiseren, waarvoor extra ruimte nodig is om de hydraulische ruwheid daarvan (met name van oobos of rietland, bijv.) te compenseren.

Bij de behandeling van de opgaven waar IRM voor gesteld staat (hoofdstukken 2 en 3) en bij het benoemen van welke keuzes zouden moeten worden gemaakt c.q. over welke dilemma's dan moet worden beslist (hoofdstuk 5), is al enigszins op een logische volgorde gepreludeerd. Die wordt in dit hoofdstuk nader gespecificeerd. Maar daaraan voorafgaand wordt opgemerkt dat de volgordekwestie voor de Maas stukken eenvoudiger is, omdat dat een rivier is zonder splitsingspunten, waardoor er minder afhankelijkheden zijn. Voor de Rijntakken maakt met name de afvoerverdeling het aantal mogelijkheden en de beslisvolgorde (de beslisboom) complex. Daarom wordt hieronder *per rivier* een en ander over een logische volgorde van beslissen geopperd. Daarbij wordt **alleen ingegaan op een aantal hoofdkeuzes voor het systeem als geheel**; nadere invullingen per traject en op nog lokaler schaalniveau dienen later te worden afgeleid; waarbij de hoofdkeuzes randvoorwaardelijk zijn en inrichtingsprincipes richtinggevend. Wel worden wat **voorbeelden** gegeven, maar die dienen uitsluitend **ter illustratie**.



Overigens kan het probleem van afhankelijkheden ook nog wel tijdelijk worden omzeild door gebruik van het **geen-spijtcriterium** bij de beoordeling van individuele maatregelen of combinaties daarvan. Zo kan van de Rijntakken worden verondersteld dat de Lek in de toekomst zeer waarschijnlijk enigszins zal worden ontzien, maar dat de Waal en IJssel beide – in alle plausibele alternatieven voor afvoerverdeling – een fors grotere afvoercapaciteit zullen moeten krijgen; dat betekent dat verruiming van die rivieren niet snel tot spijt zal leiden. Iets vergelijkbaars geldt voor de Bedijkte Maas, omdat het volledig voorkomen van een toename van de ‘maatgevende’ hoogwaterafvoer door vergroting van de topvervlakking onmogelijk is; ook voor de bedijkte Maas zal rivierverruiming dus altijd lonen (geen spijt).

### Voor de Maas

---

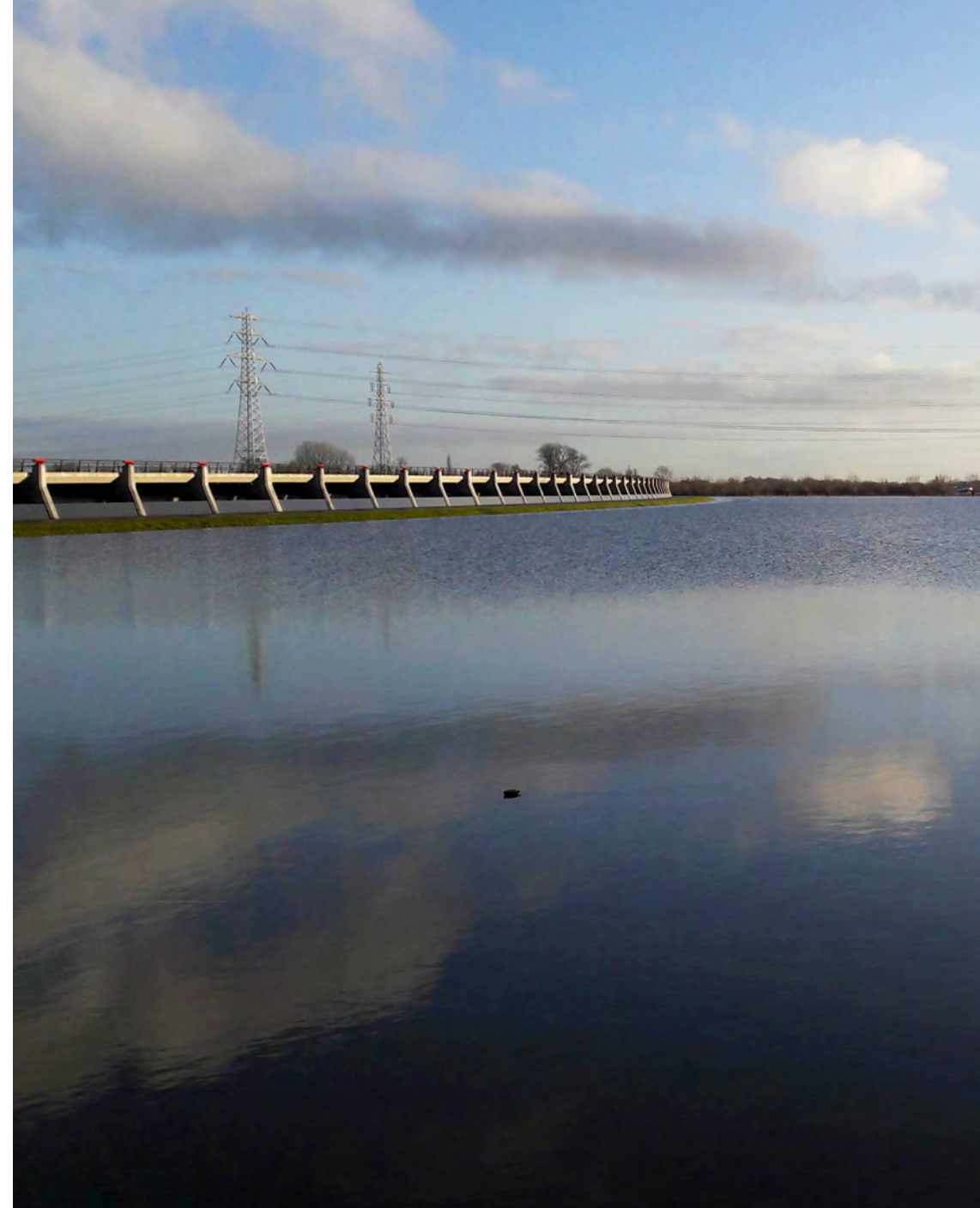
Voor de Maas is de grootste opgave de veilige afvoer van 10-20% grotere hoogwaterafvoeren (t.o.v. huidig), waarvoor de **afvoercapaciteit** moet worden vergroot. Een principiële vraag daarbij is of wordt beoogd te voorkomen dat de hoogwaterstanden hoger worden (in welke trajecten wel, en in welke niet?) en of de *bedijkte riviertrajecten robuuster moeten worden* met het oog op onzekerheden. Voor de bedijkte Maas komt daar nog **één belangrijke afhankelijkheid** bij, nl. die tussen bovenstrooms en benedenstrooms; of specifieker: dat de precieze opgave voor de afvoercapaciteit op de bedijkte Maas mede afhankelijk is van de **topverlakkingscapaciteit** in de Maasvallei (in het bijzonder Plassenmaas en Zandmaas).

De tweede grote opgave voor de Maas is de uitgesproken ambitie om de **natuurwaarden** te vergroten, hetgeen een aantal aanpassingen vraagt die (soms) goed samengaan met vergroting van de afvoercapaciteit, maar meestal haaks staan op de gewenste condities vanuit de **scheepvaart** (kanaalfunctie) en waarschijnlijk ook lastig te combineren zijn met het **vasthouden van zoetwater** door te stuwen in tijden van watertekorten. Ook hier is sprake van **een relevante afhankelijkheid**, namelijk als eerdere zomerbedverdiepingen (ingevolge Maaswerken) teniet worden gedaan (om de hydrodynamiek en sedimenthuishouding enigszins te herstellen) en de afvoercapaciteit daardoor zou afnemen. Dan is compensatie nodig: en dat moet dan eerst. Een **logische volgorde** van beslissen is dan verder:

1. Over behoud topvervlakking in de Maasvallei, dus:
  - a. wel **of** niet toestaan dijkverhogingen (hele Maasvallei) en rivierverruiming van de Zandmaas door terrasverlaging en -verbreding waardoor de topverlakkingscapaciteit afneemt (*als niet*, dan is een duurzaam alternatief het geleidelijk aanpassen van het landgebruik en de bebouwing aan frequentere hoogwaters en een in de toekomst steeds groter wordend rivierbed);
  - b. met wel **of** niet eis tot compensatie van dat verlies aan topverlakkingscapaciteit (met zgn. ‘systeemmaatregelen’).
2. Over vergroting van de **afvoercapaciteit en het hoe**, dus:
  - a. rivierverruiming **of** niet (accepteren breder rivierbed Maasvallei), c.q. rivierverruiming **of** dijkverhoging (bedijkte Maas) (*als dijkverhoging*, dan gevaar van *lock-out*: dijkverlegging wordt in de toekomst door intensivering ruimtegebruik waarschijnlijk steeds moeilijker);
  - b. als rivierverruiming: in de breedte, d.w.z. met dijkverleggingen en bypasses (veel ruimtebeslag, grote toekomstwaarde: uitbreidbaar) **of** in de diepte, d.w.z. met vergraving van het winterbed (minder ruimtebeslag, geringere toekomstwaarde, wel (beperkte) natuurontwikkeling mogelijk);
  - c. als met hogere dijken: aantasting bestaande landschapskwaliteit (dijkenlandschap) mogelijk, geen synergie met natuurontwikkeling (tenzij overruimte biedend).
3. Over de balans tussen **scheepvaart** en **natuur** (ruimtelijke kwaliteit) en of (en waar) die door **verweving** of nadrukkelijker **scheiding** van functies moet worden gerealiseerd. Bijv. door:
  - a. de scheepvaartklasse voor een aantal trajecten of de gehele Maas te heroverwegen (lees: verlagen);
  - b. of vaker voor nieuwe lateraalkanalen te kiezen,
  - c. of door het verminderen van het aantal stuwen waar zulke kanalen al bestaan (Maasplasseengebied).

In enigszins **willekeurige volgorde** kan daarna worden gestreefd naar allerlei verbeteringen van de natuurkwaliteit door maatregelen op **kleine schaal met repercussies op systeemniveau (grote schaal)**:

- Over areaalvergroting:
  - Rivierverruiming kan extra hectares buitendijks gebied opleveren (dijkverlegging, bypasses) **of** natuurlijker inrichting van nu nog landbouwkundig gebruikt gebied (uiterwaardmaatregelen, synergie KRW). Daarbij streven naar vergroting kerngebieden en/of vergroten connectiviteit door verbindingzones/ stapstenen.
- Over herstel hydrodynamiek:
  - Verkleining van de natte doorsnede van het zomerbed (diepe delen opvullen, aangetakte zandgaten en oude meanderbochten los koppelen (of alleen aan stroomafwaartse zijde verbonden); **compensatie nodig van verlies afvoercapaciteit**
  - Stuwregime flexibiliseren indien mogelijk (stuwen eerder/vaker/langer open als afvoer niet op korte termijn lijkt af te nemen);
  - Tijdelijk bergen/ langer vasthouden van water in diepere delen van het winterbed (natte overstromingsvlakten Bedijkte Maas);
  - ...
- Over herstel morfodynamiek:
  - Gebruik eventuele overruimte in de Grensmaas om niet te star te hoeven opereren;
  - Overweeg het verder ontsteden van oevers (natuurvriendelijke oevers);
  - Stuwbeheer mede gericht op doorgaand sedimenttransport;
  - ...
- Over herstel connectiviteit:
  - Overweeg de mogelijkheid van stuwpasserende nevengeulen i.p.v. korte vistrappen;
  - Stuwen langere perioden open (mits afvoer niet op korte termijn lijkt af te nemen);
  - ...



## Voor de Rijntakken

Voor de **Rijntakken** is er, zoals al gesteld, sprake van complexe afhankelijkheden die relevant zijn voor de volgorde van beslissen. Ook voor deze rivier geldt dat de grootste opgave de veilige afvoer van grotere hoogwaterafvoeren dan de huidige is (in dit geval 10-15% groter), waarvoor de **afvoercapaciteit** moet worden vergroot. En ook hier is de principiële vraag *of men wil voorkomen dat de hoogwaterstanden hoger worden en men de rivier als hoogwaterafvoersysteem robuuster wil maken* met het oog op onzekerheden. Het antwoord daarop kan verschillen per Rijntak (Waal nu het gevaarlijkst, IJssel het minst, maar wel ook *piping*-gevoelige dijken) of zelfs per traject (stroomafwaartse trajecten Waal en Lek staan onder invloed van de zeespiegelstijging, waardoor de rivierafvoer (en dus de afvoercapaciteit) niet alleen maatgevend is voor de hoogwaterstanden).

Complicerend is dat de precieze opgave *per Rijntak* afhankelijk is van de **afvoerverdeling bij hoogwater**. Dat betekent dat daarover eerst moet worden beslist. Relevant zijn daarbij overwegingen over:

- mate van Lek ontzien,
- de relatieve gevaarlijkheid en het gebrek aan robuustheid van de Waal (ook enigszins ontzien?), en
- het al dan niet willen voorkomen van grensoverschrijdende opstuwing op de krappe Bovenwaal en het noodgedwongen moeten afknijpen van de afvoer naar het noorden door flessenhalzen in stand te houden bij de Pannerdense Kop en IJsselkop.

Voor de afvoercapaciteit en de afvoerverdeling bij hoogwater is de **bodemligging in het zomerbed** echter medebepalend. Dat betekent dat daarover nog eerder moet worden beslist (evenals over hoe de eventuele afname van de afvoercapaciteit te compenseren). En aangezien verschillen in de bodemligging tussen Waal en Pannerdens Kanaal, resp. IJssel en Nederrijn weer bepalend zijn voor de **afvoerverdeling bij laagwater**, moet daarover nog weer eerder worden besloten. Alsmede over het stuwregime van stuw Driel.

Een **logische volgorde** van beslissen voor de Rijntakken is dan:

- Over de gewenste **afvoerverdeling bij laagwater**: cf. optimum PAWN-studie (2e en 3e nota WHH = 285/25-30 bij overschrijding van een Rijnafvoer van 1300 **of** 1400 m<sup>3</sup>/s) **of** een onderbouwde afwijking daarvan op basis van een brede heroverweging; stuwregime Driel aansluitend bij actuele Rijnafvoer en bijbehorende waterstand te Lobith;
- Over een daarop toegesneden **verhoging** van de uitgeschuurde **rivierbodem** van de Waal, het Pannerdens Kanaal en de IJssel, met name van die op de bovenstroomse trajecten om de belangrijkste resulterende problemen op te lossen, waarbij tegelijkertijd de verschillen die leiden tot scheef trekken van de afvoerverdeling worden opgeheven en goed aansluitend op de bodem van de Duitse Niederrhein (dat vergt compensatie van verlies aan afvoercapaciteit (zie hoofdstuk 5));
- Over de **afvoerverdeling bij hoogwater** van de in de toekomst te verwachten extra Rijnafvoer: gaan we de Lek blijven ontzien (= uiteindelijk Waal- Nederrijn- IJssel +16- +0- +16%) en/of gaan we ook de Waal (enigszins) ontzien, omdat die het krapst is en het moeilijkst te verruimen (bijv. uiteindelijk Waal- Nederrijn- IJssel +13- +0- +30% of zelfs +0- +0- +81%; zie Tabel 4)?
- Over vergroting van de **afvoercapaciteit en het hoe** per Rijntak:
  - Door rivierverruiming **of** door dijkverhoging? (*als dijkverhoging*, dan gevaar van *lock-out*: dijkverlegging in de toekomst waarschijnlijk steeds moeilijker);
  - Als rivierverruiming*: in de breedte, dus met dijkverleggingen en bypasses (veel ruimtebeslag, weinig morfologische neveneffecten, grote toekomstwaarde want uitbreidbaar) **of** in de diepte, dus met vergraving van het winterbed (minder ruimtebeslag, weinig toekomstwaarde)? Daarbij rekening houden met karakterverschillen per Rijntak (zie SMART-rivers). IJssel: onvervangbare abiotische natuurwaarden; Waal: sterke natuurlijke morfodynamiek (=herstelvermogen); Nederrijn: morfologisch 'dood' dus '*what you make is what you get*'.
  - Als met hogere dijken*: aantasting bestaande landschapskwaliteit, geen synergie met natuurontwikkeling, opstuwingseffecten naar stroomopwaarts gelegen trajecten (tot in Duitsland).



1. Over de balans tussen **scheepvaart** en **natuur** (ruimtelijke kwaliteit) en of (en waar) die door **verweving** of nadrukkelijker **scheiding** van functies moet worden gerealiseerd. Bijv. door:
  - a. Voor de Boven-IJssel de scheepvaartklasse te heroverwegen **of** de IJssel op termijn te kanaliseren (stuwen)<sup>35</sup> (als voldoende diepte en breedte bij veranderend afvoerregime onvoldoende zijn te garanderen) **of** een lateraalkanaal aan te leggen;
  - b. Voor de Waal versmalling van de vaarweg door kribverlenging **of** door langsdammen (waarbij de vaarweg en de rest van de rivier nadrukkelijker van elkaar worden gescheiden (kanaal in de Waal)).
  
2. In enigszins **willekeurige volgorde** kan daarna worden gestreefd naar allerlei **klein-schalige** verbeteringen van de natuurkwaliteit, die bijdragen aan een **grootschalig samenhangend natuurnetwerk** met kerngebieden conform PAGW.
  - Over areaalvergroting:
    - Rivierverruiming kan extra hectares buitendijks gebied opleveren (dijkverlegging, bypasses) **of** natuurlijker inrichting van nu nog landbouwkundig gebruikt gebied (uiterwaardmaatregelen, synergie KRW). Daarbij streven naar vergroting kerngebieden en/of vergroten connectiviteit door verbindingzones/ stapstenen.
  
  - Over herstel hydrodynamiek:
    - Resulteert voor een belangrijk deel uit hogere rivierbodempligging,
    - maar kan extra worden bevorderd door het verwijderen van zomerkades, hetgeen op de IJssel en Waal ook nog eens bijdraagt aan het voorkomen van hernieuwde uitschuring;
    - ook nog: aangetakte zandgaten loskoppelen (of alleen aan stroomafwaartse zijde verbinden)?;
    - ...
  
  - Over herstel morfodynamiek:
    - Met kribverlaging op de Boven-Waal (en delen Pannerdens Kanaal) worden de oevers weer dynamischer omdat meer water door de kribvakken gaat stromen;
    - Overweeg het verder ontsteden van de oevers van de IJssel;
    - ...
  
  - Over herstel connectiviteit:
    - stuwen eerder/vaker/langer open, hetgeen al kan voortvloeien uit een ander (multi-functioneel) sluitprotocol voor stuw Driel;
    - ...

<sup>35</sup> Gegeven de onzekerheid over de te verwachten veranderingen in laagwaterafvoer (zie hoofdstuk 2) is deze optie vooralsnog volstrekt niet kosteneffectief (mondelinge mededeling Jurjen de Jong, Deltares). Over enkele decennia zal waarschijnlijk beter kunnen worden beoordeeld hoe de lage rivierafvoeren zich ontwikkelen.

# 7



Foto: Frans Klijn



## Referenties

- Anonymus (red. F. Klijn, W. ten Brinke, N. Asselman & E. Mosselman), 2017. *Het Verhaal van de Rivier. Een eerste versie*. Deltares, Delft.
- Anonymus (red. R. Postma), 2018. *Het Verhaal van de Maas*. Het Verhaal van de Maas - Helpdesk water.
- Anonymus, 2019. *Het Verhaal van de Rijn-Maasmonding*. Platform Rivierkennis, Rijkswaterstaat. Het verhaal van de Rijn-Maasmonding - Helpdesk water
- Anonymus (red. R. van Zetten & W. ten Brinke), 2020. *Het Verhaal van de Rijntakken*. Het verhaal van de Rijntakken - Helpdesk water
- Anonymus, 2021. *Advies denktank over ecologische analyse voor het Natuurwinstplan Grote Wateren*. LIFE-IP/ Deltanatuur.
- Asselman, N.E.M., 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
- Asselman, N. & F. Klijn, 2001. *Vroegere ruimte voor de Maas*. WL-rapport Q2975.21, Delft.
- Asselman, N. & F. Klijn, 2003. *Geschiedenis van uiterwaarden voor aanleg van nevengeulen*. WL-rapport Q3244.50, Delft.
- Asselman, N.E.M. & A. Hendriks, 2016. *Hydraulische knelpunten Rijntakken en Maas. Een analyse op basis van verhanglijnen*. Deltares-rapport 1230044-000, Delft.
- Asselman, N., P. de Grave, O. Weiler & A. Spruyt, 2019. *Verkenning varianten afvoerverdeling Rijntakken in de context van de overstromingsrisicobenadering*. Deltares-rapport 11202191-000, Delft.
- Asselman, N., A. Becker & S. Giri, 2020. *Aanvullende simulaties afvoerverdeling Rijn*. Deltares-rapport 11203684-001, Delft.
- Baptist, M.J., H. Duel, G.E.M. van der Lee, W.E. Penning, A.J.M. Smits, G.W. Geerling & J.S.L. van Alphen, 2004. Cyclische verjonging van uiterwaarden. Een hoogwater- en natuurbeheerstrategie gemodelleerd. *Landschap* 21/1: 15-26
- Barneveld, H., M. Boersema, F. Schuurman & H. de Vriend, 2021. *Het Verhaal van het Sediment*. Platform Rivierkennis Rijkswaterstaat. Het verhaal van het Sediment - Helpdesk water
- Berkhof, A. J. Kabout, R. Loeve, M. van de Paverd & D. Verhoeven, 2018. *MIRT Onderzoek Duurzame Bodemligging Rijntakken; Eindrapportage*. Ministerie I&W, Den Haag.
- Buijse, T., R. Verdonschot, P. van Puijenbroek & P. Verdonschot, 2019. De haarvaten van het ecologisch Rivierennetwerk. *Landschap* 2019/2: 68-77.
- Cohen, K.M., E. Stouthamer, W.Z. Hoek, H.J.A. Berendsen & H.F.J. Kempen, 2009. *Zand in Banen; Zanddiepte kaarten van het Rivierengebied en het IJsseldal in de provincies Gelderland en Overijssel*. Provincie Gelderland, Arnhem.
- De Jong, J. en N. Asselman, 2019. *Topvervlakking Maas: het effect van golfvormen, bergingsgebieden en rivierverruiming*. Deltares-rapport 11203684-003-ZWS-0002, DelftDe Jong, J., 2020. *Effect van een nieuwe bodemhoogte 2050 op de waterstanden en afvoeren op de Rijntakken*. Memo Deltares, 11203738-005-BGS-0011
- De Jong, J & R. van der Mark, 2021. *Toestand van het Systeem en Kwetsbaarheid gebruiksfunctie KBN-HVWN - Stresstest droogte Rijntakken*. Deltares-rapport 11205274-004, Delft.
- De Soet, F., 1976. *De waarden van de uiterwaarden: een milieukartering en -waardering van de uiterwaarden van IJssel, Rijn, Waal en Maas*. Pudoc.
- De Vries, J.W., 1949. De Maasverbetering voltooid. *De Ingenieur*, jaargang 53, no. 32. pp 75-80.
- Dierx, J.R., A. Bomers, B. van der Meulen, et al., 2021. Modelling early medieval flood-induced breaching of a coversand ridge in the IJssel valley, Rhine delta, the Netherlands. *Geomorphology*, <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107913>
- Disco, C., 1998. Maaskanaliseren en Maasverbetering 1900-1940. Hfdst 4 in J.W. Schot, H.W. Lintsen, Arie Rip en A.A.A. de la Bruhèze, 1998. *Techniek in Nederland in de twintigste eeuw. Deel 1. Techniek in ontwikkeling, waterstaat, kantoor en informatietechnologie*. Stichting Historie der Techniek, Walburg Pers, Zutphen.
- Frings, R.M., B.M. Berbee, G. Erkens, M. G. Kleinhans & M.J.P. Gouw, 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*.
- Frings, R.M., R. Döring, C. Beckhausen, H. Schüttrumpf & S. Vollmer, 2014. Fluvial sediment budget of a modern, restrained river: The lower reach of the Rhine in Germany. *Catena* 122 (2014): 91-102. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2014.06.007>
- Frings, R., K. Banhold & I. Evers, 2015. *Sedimentbilanz des Oberen Rheindeltas für den Zeitraum 1991-2010*. RWTH Aachen University, Bericht 2015.019, Aachen.
- Haasnoot, M., L.M. Bouwer, F. Diermanse, J.C.J. Kwadijk, A. van der Spek, G. Oude Essink, J. Delsman, O. Weiler, M. Mens, J. ter Maat, Y. Huismans, K. Sloff & E. Mosselman, 2018. *Mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Een verkenning*. Deltares rapport 11202230-005-0002.
- Havinga, H., 2020. Towards Sustainable River Management of the Dutch Rhine River. *Water* 2020, 12, 1827; doi:10.3390/w12061827
- Hegnauer M., J.J. Beersma, H.F.P. van den Boogaard, T.A. Buisshand & R.H. Passchier, 2014. *Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins. Final report of GRADE 2.0*. Deltares-rapport 1209424-004, Delft.
- Hillebrand, G. en R.M. Frings, 2017. *Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010*. Bericht Nr. II-22 der KHR, © 2017, KHR/CHR, ISBN: 978-90-70980-39-9, doi: 10.5675/KHR\_22.2017.
- Hoefsloot, F.J.M., 1983. *IJssel; strijd voor een vaar- en waterweg. en: Morfologische studie van de IJssel*. Afstudeerverslag Technische Hogeschool, Delft/ Rijkswaterstaat- Directie Waterhuishouding en Waterbeweging.
- Huthoff, F., S. Ouwkerker, R. Daggenvoorde, Y. Snoek & B. Voortman, 2020. *IRM QuickScan Afvoercapaciteit*. HKV-rapport PR4162.10, Rijkswaterstaat-WVL.
- Junk, J. W., P.B. Bayley & R.E. Sparks, 1989. The flood pulse concept in river floodplain systems. Blz. 110-127 in Dodge, D.P. (ed.): *Proceedings of the International Large River symposium, Can. Spec. Publ. Fish. Aquat. Sci.* 106.
- Kater, E., B. Makaske & G. Maas, 2012. *Morfodynamiek langs de grote rivieren*. OBN-rapport nr. 2012/OBN154-RI
- Kleinhans, M. G., F. Klijn, K.M. Cohen, H. Middelkoop, 2013. *Wat wil de rivier zelf eigenlijk?* Deltares-rapport 1207829-000-VEB-0024, Delft.
- Klijn, F. 1999. *Afvoerverdeling Rijntakken: een vast gegeven?* Rapport R3294.85, WL|delft hydraulics, Delft



## Referenties

- Klijn, F. & K. Stone, 2000. *Ruimte voor Rijntakken, vroeger en nu*. WL rapport R2394.67, Delft.
- Klijn, F., N. Asselman, W. Silva & K. Stone, 2002. Ruimteverlies van Rijn en Maas verkend. *Het WATERschap* 13: 590-601
- Klijn, F., J.D. Karssemeijer & S.A.M. van Rooij, 2004. Welke ruimte biedt ruimte voor de rivier aan de natuur? *Landschap* 21(2004)/1: 29-45
- Klijn, F., E. van Velzen, J. ter Maat & J. Hunink, 2012. *Zoetwatervoorziening in Nederland: aangescherpte landelijke knelpuntenanalyse 21e eeuw*. Deltares-rapport 1205970, Delft.
- Klijn, F., M. Hegnauer, J. Beersma & F. Sperna Weiland, 2015. *Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas? Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van nieuwe klimaatprojecties voor rivierafvoeren*. KNMI & Deltares-rapport 1220042, Delft. DOI: 10.13140/RG.2.1.4399.5601
- Klijn, F., N.E.M. Asselman & D. Wagenaar, 2018. Room for Rivers: risk reduction by enhancing the flood conveyance capacity of the Netherlands' large rivers. *Geosciences* 2018, 8, 224 (20 pp.); doi:10.3390/geosciences8060224
- Klijn, F., N.E.M. Asselman & E. Mosselman, 2019. Robust river systems: on assessing the sensitivity of embanked rivers to discharge uncertainties, exemplified for the Netherlands' main rivers. *Journal of Flood Risk Management* 2019; 12 (Suppl. 2): e12511; doi 10.1111/jfr3.12511
- Kramer, N., M. Mens, J. Beersma, N. Kielen, 2019. Hoe extreem was de droogte van 2018? *H2O online*, 26 augustus 2019.
- Kurstjens, G., M. Nijssen, A. van Winden, M. Dorenbosch, H. Moller Pillot, C. van Turnhout & P. Veldt, 2020. *Natte overstromingsvlakten in het rivierengebied. Ecologisch functioneren en ontwikkelkansen*. Rapport 2020/OBN237-RI, VBNE, Driebergen.
- Makaske, B., G.J. Maas en D.G. Smeerdijk, 2008. The age and origin of the Gelderse IJssel. *Geologie en Mijnbouw* 87(4), 10.1017/S0016774600023386.
- Marchand, M., F. Klijn & J. Kind, 2011. *Handreiking toepassing vergelijkingssystematiek Deltaprogramma*. Deltares-rapport 1205040-000, Delft
- Mens, M., J. Hunink, J. Delsman, J. Pouwels & F. Schasfoort, 2020. *Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II*. Deltares-rapport 11203734-003, Delft.
- Middelkoop, H., 1997. *Embanked floodplains in the Netherlands*. Proefschrift Universiteit Utrecht.
- Ministeries V&W, VROM en LNV, 2009. *Nationaal Waterplan 2009 – 2015*. Den Haag.
- NHV (red. P. Huisman), 2004. *Water in the Netherlands; managing checks and balances*. NHV-special 6, Netherlands Hydrological Society, Utrecht..
- Niesten, I. & A. Spruyt, 2019. *Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakkenmodel. Modelbouw, kalibratie en validatie*. Deltares-rapport 11200569, Delft.
- Ouwerkerk, S. F. Versteegen, J. Vieira da Silva, B. Visser, M. Rudolph, 2021: *Pre-verkenning waterberging Maas. Voor vermindering van watertekorten in droge periodes*. HKV-rapport PR4422.10, Lelystad.
- PBL (Planbureau voor de Leefomgeving), 2011. *Een delta in beweging. Bouwstenen voor een klimaatbestendige ontwikkeling van Nederland*. PBL-publicatie 50019301, ISBN 978-90-78645-72-6
- Pol, J., H. Barneveld, R. Schielen, G. Rongen & J. Stenfort, 2020. Effectiveness of flood retention basins under hydrologic uncertainty. *Proceedings of the FLOODrisk2020 conference*, DOI 10.3311/FLOODrisk2020.12.8
- Pulles, J.W., 1985. *Beleidsanalyse van de waterhuishouding van Nederland*. Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Reeze, B., A. van Winden, J. Postma, R. Pot, J. Hop en W. Liefveld, 2017. *Watersysteemrapportage Rijntakken 1990-2015. Ontwikkelingen waterkwaliteit en ecologie*. Bart Reeze Water & Ecologie, Harderwijk.
- Reeze, B., W. Liefveld, R. Postma, H. Barneveld, N. van Kessel, H. van der Jagt, T. Smit, H. Coops & D. Tjabbes - Van der Gaag, 2020. *Watersysteemrapportage Maas*. project 0434242.100, Rijkswaterstaat, Den Haag.
- Reneerkens, M.J.J., 2020. *De bodemsamenstelling van de Rijntakken in de jaren 1995 en 2020*. RWS-ON rapport.
- Royal Haskoning & Deltares, 2012. *Vergelijkingssystematiek Deltaprogramma. Structuur, inrichting en gebruik*. Versie 1.0
- Rijkswaterstaat (René Bol), 2016. *Stuwprogramma Nederrijn/Lek; Achtergronden bij een nieuw stuwprogramma*. Rijkswaterstaat, Lelystad.
- Rijkswaterstaat (Silvia van 't Laar), 2016a. *Verbeteren Systeemwerking Maas*. RWS, ongeclassificeerd.
- Rijkswaterstaat (Voortman, B. & R. Schielen), 2017. *Rivierkundige studie Splitsingspuntengebied. Effecten en consequenties van rivierverruimende maatregelen uit de Voorkeursstrategie voor het Deltaprogramma*. RWS Bedrijfsinformatie, concept september 2017.
- Schropp, M. & T. Jansen, 2020. *Opties afvoerverdeling hoogwater Rijntakken*. Memo voor DGWB.
- Silva, W., F. Klijn & J.P.M. Dijkman, 2000. *Ruimte voor Rijntakken; wat het onderzoek ons heeft geleerd*. RIZA nota 2000.026, Arnhem/ WL-rapport R3294, Delft. 162 blz.
- Sloff, K., 2019. *Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050. Trends voor scheepvaart en waterbeschikbaarheid*. Deltares rapport.
- Sloodtjes, N. & D. Wagenaar, 2016. *Factsheets normering primaire waterkeringen. Getalsinformatie per normtraject*. Ministerie van Infrastructuur en Milieu, DG Ruimte en Water, Den Haag.
- Smits, A.J.M., H. Havinga & E.C.L. Marteiijn, 2000. New concepts in river and water management in the Rhine River basin: how to live with the unexpected? In: A. J. M. Smits, P. H. Nienhuis and R. S. E. W. Leuven (Eds.), 2000. *New Approaches to River Management*. Leiden, Backhuys Publishers: 267-286.
- Sperna Weiland, F., J. Beersma, M. Hegnauer & L. Bouaziz, 2015. *Implications of the KNMI'14 climate scenarios on the future discharge of the Rhine and the Meuse; comparison with earlier scenarios*. Deltares report 1220042
- Task Force Fact Finding hoogwater 2021, 2021. *Hoogwater 2021, Feiten en Duiding*. (versie 2, 20 september 2021). Expertise Netwerk Waterveiligheid, Utrecht
- Ten Brinke, W., 2019. *Effecten morfologische ontwikkelingen op functies Rijn en Maas*. Blueland Consultancy, rapport B 19-01, Utrecht.

## Referenties

---

- Van der Most, H. & F. Klijn, 2013. *De werking van het waterkeringsstelsel: de dijkkring voorbij? Naar een doelmatiger inrichting op basis van risicobenadering en systeemanalyse*. Deltares-rapport 1206262-015, Delft. 56 pp.
- Van der Sluis, T., B. Pedroli, I. Woltjer, E. van Elburg & G. Maas, 2020. *Uitwerking PAGW natuuropgave hotspots Grote Rivieren*. WenR-rapport 3031, Wageningen.
- Van der Sluis, T., G. Maas, E. van Elburg, I. Woltjer & B. Pedroli, 2021. Robuuste en klimaatbestendige riviernetwerken. Hotspots voor natuurontwikkeling langs de grote rivieren. *Landschap* 2021/1: 59-67
- Van Geest, G., 2020. *Rivieren en klimaat – PAGW. Effecten van lage rivierpeilen op de vochttoestand van uiterwaarden langs de Rijn en Maas - Tweede herziene versie*. Deltares-rapport 11203733-005, Utrecht.
- Van Heusden, W., M. Tijnagel, H. Sluiter, W. Vercruisse & A. Zuidhof, 2021. *Ecologische systeemopgave PAGW-rivieren: Naar klimaatbestendige robuuste riviernatuur in 2050*. Concept eindversie, 14 januari 2021
- Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell & C.E. Cushing, 1980. The river continuum concept. *Can. J. Fish. Aqua. Sci.* 37: 130-137.
- Van Rooij, S.A.M., F. Klijn & L.W.G. Higler, 2000. *Ruimte voor de rivier, ruimte voor de natuur? Fase 1: Verkenning*. Alterra-rapport 190, Wageningen.
- Van Til, K., 1979. *De Rijntakken van de bovenrivieren sedert 1600*. Rijkswaterstaat, Directie Bovenrivieren, Arnhem.
- Verschelling, E., 2018. *Drowning or emerging: the effect of climate change on the morphology of tidal freshwater wetlands*. Utrecht Studies in Earth Sciences, volume 166 (PhD thesis, Utrecht University).
- Vis, M., F. Klijn, S.A.M. van Rooij & M. van Buuren (eds.), 2001. *Living with floods. Resilience strategies for flood risk management and multiple land use in the lower Rhine River basin. Final report*. WL-report R3470, Delft.
- Vriese, F.T., J. Hop, B. Reeze, M. de la Haye, N. van Kessel, M. Claus & A. van Winden, 2021. *Stromend habitat en connectiviteit in de Maas*. ATKB-rapport 20200920/rap01.
- Winter, H.V., 2010. *Evaluatie van de vistrappen in de Nederrijn-Lek*. IMARES-rapport C064/10, Wageningen UR.
- Ylla Arbós, C., A. Blom, S. van Vuren & R. M. J. Schielen, 2019. *Bed level change in the Upper Rhine delta since 1926 and rough extrapolation to 2050. Technical report, Delft University of Technology, Delft*.
- Ylla Arbos, C., A. Blom, E. Viparelli, M. Reneerkens, R. Frings & R. Schielen, 2021. *River Response to Anthropogenic Modification: Channel Steepening and Gravel Front Fading in an Incising River*. *Geoph. Res. Letters* 48, e2020GL091338. doi.org/10.1029/2020GL091338
- Zuiderwijk, M., M. Schippers, C. Wegman & A. Paarlberg, 2020 (ongepubliceerd). *QuickScan rivierbodembeleid. Ten behoeve van Integraal Riviermanagement*. (Groeidocument fase 3). Witteveen + Bos Raadgevende Ingenieurs & HKV lijn in water, Deventer.