

## Strategische Verkenning Rivieren

Huidige en toekomstige knelpunten voor scheepvaart, zoetwatervoorziening, natuur en hoogwaterveiligheid



## **Strategische Verkenning Rivieren**

Huidige en toekomstige knelpunten voor scheepvaart, zoetwatervoorziening, natuur en hoogwaterveiligheid

### **Auteur(s)**

Anna Kosters  
Nathalie Asselman  
Bart Maas  
Marjolein Mens  
Jurjen de Jong

## Strategische Verkenning Rivieren

Huidige en toekomstige knelpunten voor scheepvaart, zoetwatervoorziening, natuur en hoogwaterveiligheid

|                |  |
|----------------|--|
| Opdrachtgever  | Strategisch Onderzoek Deltares, programma Langetermijndelta-ontwikkeling   |
| Contactpersoon | -  |
| Referenties    | -  |
| Trefwoorden    | Rijntakken, Maas, klimaatverandering, rivierbodemerosie, waterveiligheid, natuur, bevaarbaarheid, zoetwaterbeschikbaarheid, knelpunten, verkenning |

### Documentgegevens

|               |                       |
|---------------|-----------------------|
| Versie        | 1.0                   |
| Datum         | 22-07-2024            |
| Projectnummer | 11209198-019          |
| Document ID   | 11209198-019-ZWS-0003 |
| Pagina's      | 103                   |
| Classificatie |                       |
| Status        | definitief            |

### Auteur(s)

### Reviewer(s)

|  |  |                                    |
|--|--|------------------------------------|
|  | Anna Kosters<br>Nathalie Asselman<br>Bart Maas<br>Marjolein Mens<br>Jurjen de Jong | Erik Mosselman<br>Gertjan Geerling |
|  |  |                                    |

# Samenvatting

Dit rapport is het resultaat van de eerste fase van een verkenning naar langetermijnstrategieën voor het Nederlandse rivierengebied. In deze eerste fase brengen we de te verwachten knelpunten in kaart. Dat doen we door aan de ene kant de gebruikswensen (vraag) vanuit verschillende rivierfuncties (of ecosysteemdiensten) te inventariseren, en aan de andere kant de ontwikkeling van het riviersysteem (aanbod) te schetsen. Wanneer de vraag het aanbod overschrijdt is sprake van een knelpunt.

We focussen op de Rijn en de Maas als belangrijkste rivieren in het Nederlandse hoofdwatersysteem. Voor deze rivieren beschouwen we de twee belangrijkste systeemontwikkelingen, te weten:

1. veranderend afvoerregime als gevolg van klimaatverandering,
2. bodemerosie als gevolg van eerder menselijk ingrijpen.

Voor het in kaart brengen van de gebruikswensen bekijken we de functies scheepvaart, zoetwatervoorziening, natuur en hoogwaterveiligheid. Naast de bepaling van knelpunten maken we per functie een overzicht van de kennishanden die opgevuld moeten worden om onzekerheden in de uitkomsten te verkleinen.

Door klimaatverandering worden langere en meer extreme laagwaterperioden verwacht op de Rijn en Maas. Tegelijkertijd worden de piekafvoeren naar verwachting hoger. Als gevolg van ingrepen in het verleden erodeert de bodem van zowel de Rijn als de Maas. Door rivierbodemerosie op de Waal en Boven-IJssel verschuift de afvoerverdeling op de Rijntakken. Deze veranderingen in de afvoerverdeling versterken het proces van ongelijke erosie verder. Daarnaast zorgt rivierbodemerosie ervoor dat vaste bodemlagen steeds grotere drempels vormen.

In deze studie wordt gesteld dat een knelpunt voor **scheepvaart** optreedt wanneer niet meer kan worden voldaan aan de internationale afspraak dat de waterdiepte op de Waal maximaal 20 dagen per jaar kleiner is dan 2,8 meter. Op dit moment wordt deze waterdiepte al gedurende ongeveer 50 dagen per jaar onderschreden (het knelpunt is dus al bereikt). Door klimaatverandering (scenario  $W_{H,dry}$ ) en rivierbodemerosie zal dit verder toenemen tot ongeveer 80 dagen per jaar.

Om een knelpunt voor **zoetwatervoorziening** te bepalen richten we ons op de regio Noord-Nederland, omdat in dit gebied de waterbeschikbaarheid (vanuit het IJsselmeer) het meest direct afhankelijk is van de aanvoer via het hoofdwatersysteem (de IJssel). In de analyse is het historische droge jaar 1934 gekozen als representatief voor een situatie die eens in de 20 jaar optreedt. Als knelpuntdefinitie nemen we het moment dat voor deze  $T=20$ -situatie een watertekort  $> 0 \text{ m}^3$  ontstaat (opgeteld over het zomerhalfjaar). Door klimaatverandering alleen (scenario  $W_H$ ) gebeurt dit al rond 2035. Ontwikkelingen als een toename van de watervraag voor het behouden van veenweidegebieden, rivierbodemerosie (die leidt tot een afname van de IJsselaafvoer) en een toename van het watergebruik in Duitsland zijn hierin nog niet meegenomen. Deze ontwikkelingen kunnen het knelpunt dichterbij brengen.

Een knelpunt voor **natuur** is in deze studie gedefinieerd als het moment waarop niet meer wordt voldaan aan Natura2000-doelen in de uiterwaarden. Uit het onderzoek is gebleken dat het op dit moment nog niet mogelijk is om vast te stellen wanneer dit optreedt.

Er is met name onvoldoende kennis over de effecten van veranderingen in overstromingsduren en grondwaterstanden op verschillende ecotooptypen. Bestaande effectrelaties zijn te generiek (i.e. te weinig onderscheid tussen verschillende ecotooptypen), onvoldoende onderbouwd en soms tegenstrijdig.

Voor **hoogwaterveiligheid** wordt als gevolg van veranderingen in afvoerregime en rivierbodemerosie geen concreet knelpunt verwacht in de komende decennia, als huidig beleid wordt voortgezet. Wel wordt voorzien dat op veel plekken, met name in het benedenrivierengebied, te weinig ruimte beschikbaar is om noodzakelijke dijkversterkingen uit te voeren. Dit betekent dat in de toekomst ruimte vrijgemaakt moet worden, o.a. door het amoveren van bebouwing, of dat gebruik moet worden gemaakt van constructieve maatregelen voor dijkversterking. Wanneer onvoldoende ruimte wordt gereserveerd kan dit ook tot problemen leiden bij volgende dijkversterkingen (ook in het bovenrivierengebied) en blijven er steeds minder opties over om in de toekomst de ruimte voor de rivier met binnendijkse maatregelen te vergroten.

Reflecterend blijkt uit de uitgevoerde verkenning dat nu al sprake is van een knelpunt voor scheepvaart en dat in de komende 10 à 20 jaar ook een knelpunt voor zoetwatervoorziening op kan treden. Hiermee lijkt het urgenter dan eerder gedacht om te starten met een langetermijnverkenning van oplossingsrichtingen in het rivierengebied, zodat meer zicht is op de opties die we hebben op de lange termijn en hoe de maatregelen die we op de korte en middellange termijn willen treffen daarin passen. Zo wordt een lock-in-situatie voorkomen en de kans op spijt verkleind. Daarnaast wordt aanbevolen om aan de slag te gaan met het opvullen van de kennishiaten die aan het eind van elk hoofdstuk worden genoemd. Zo zorgen we ervoor dat we over voldoende kennis beschikken om te komen tot goed onderbouwde besluiten.

# Inhoud

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Samenvatting</b>  | <b>4</b>  |
| <b>1 Inleiding</b>   | <b>9</b>  |
| 1.1 Achtergrond  | 9         |
| 1.2 Doel en aanpak   | 9         |
| 1.2.1 Doel van de Strategische Verkenning Rivieren   | 9         |
| 1.2.2 Aanpak   | 10        |
| 1.2.3 Doel van dit rapport   | 10        |
| 1.3 Methode en afbakening  | 11        |
| 1.4 Leeswijzer   | 11        |
| <b>2 Scenario's voor rivieraafvoer en bodemerosie</b>  | <b>12</b> |
| 2.1 Rivieraafvoer  | 12        |
| 2.1.1 KNMI-klimaatscenario's   | 12        |
| 2.1.2 De laagste afvoeren worden naar verwachting lager  | 13        |
| 2.1.3 Piekaafvoeren worden naar verwachting hoger  | 15        |
| 2.1.4 Afvoerveranderingen na 2100  | 16        |
| 2.1.5 Mogelijke toename van het watergebruik   | 17        |
| 2.1.6 Kennisvragen   | 18        |
| 2.2 Bodemerosie  | 19        |
| 2.2.1 Rijn   | 19        |
| 2.2.1.1 Prognose 2020 – 2050   | 19        |
| 2.2.1.2 Bodemveranderingen na 2050   | 22        |
| 2.2.1.3 Consequenties voor de afvoerverdeling over de Rijntakken                               | 22        |
| 2.2.2 Maas   | 24        |
| 2.2.2.1 Prognose 2020 – 2050   | 24        |
| 2.2.2.2 Bodemveranderingen na 2050   | 27        |
| 2.2.3 Kennisvragen   | 27        |
| <b>3 Knelpunten voor scheepvaart</b>   | <b>28</b> |
| 3.1 Achtergrond  | 28        |
| 3.2 Probleemdefinitie en uitgangspunten  | 28        |
| 3.2.1 Discussie over gewenste waterdiepte op de rivier   | 28        |
| 3.2.2 Discussie over acceptatie van ondiepten  | 30        |
| 3.3 Methode  | 31        |
| 3.4 Resultaten   | 31        |
| 3.4.1 Rivier als vaarweg voldoet niet aan internationale afspraken in de Akte van Mannheim     | 31        |
| 3.4.2 Betrouwbaarheid van de rivier als vaarweg niet langer acceptabel door klimaatverandering | 32        |
| 3.4.3 Bereikbaarheid van de rivier neemt af door bodemerosie                                   | 33        |
| 3.4.4 Effectiviteit maatregelen  | 34        |
| 3.5 Conclusies   | 37        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 3.6      | Discussie   | 38        |
| 3.7      | Kennisvragen  | 38        |
| <b>4</b> | <b>Knelpunten voor zoetwatervoorziening</b>   | <b>41</b> |
| 4.1      | Achtergrond   | 41        |
| 4.2      | Probleemdefinitie   | 41        |
| 4.3      | Vragen en uitgangspunten  | 43        |
| 4.4      | Methode   | 43        |
| 4.5      | Watervraag en wateraanbod in de toekomst  | 44        |
| 4.6      | Knelpunten  | 47        |
| 4.7      | Handelingsperspectief   | 48        |
| 4.7.1    | Aanbod vergroten  | 48        |
| 4.7.2    | Vraag reduceren   | 49        |
| 4.8      | Kennisvragen  | 50        |
| <b>5</b> | <b>Knelpunten voor natuur</b>   | <b>52</b> |
| 5.1      | Achtergrond   | 52        |
| 5.2      | Probleemdefinitie en onderzoeks vragen  | 52        |
| 5.3      | Hoe definiëren we een knelpunt voor natuur?   | 53        |
| 5.4      | Focusgebied: Gelderse Poort   | 54        |
| 5.5      | Bestaande analyses: effectbepaling BRL en nulalternatief IRM                                  | 54        |
| 5.5.1    | Methode   | 55        |
| 5.5.2    | Resultaten  | 57        |
| 5.6      | Nieuwe analyse op basis van overstromingsduur   | 58        |
| 5.6.1    | Methode   | 58        |
| 5.6.2    | Resultaten  | 59        |
| 5.6.2.1  | Glanshaver en vossenstaarthooilanden: afname van gunstig habitatareaal door vernatting        | 59        |
| 5.6.2.2  | Droge hardhoutooibossen: Toename van gunstig habitatareaal door vernatting                    | 61        |
| 5.6.2.3  | Stroomgraslanden: afname van ideaal areaal door toename van overstromingsduur                 | 62        |
| 5.6.2.4  | Vochtige alluviale bossen; Zachthoutooibossen: Positief effect door toename overstromingsduur | 63        |
| 5.6.2.5  | Overige habitattypen  | 64        |
| 5.6.3    | Andere gevolgen van veranderende rivierdynamiek   | 64        |
| 5.7      | Wanneer wordt een knelpunt bereikt?   | 64        |
| 5.8      | Maatregelen   | 65        |
| 5.9      | Conclusies  | 65        |
| 5.10     | Kennisvragen  | 66        |
| <b>6</b> | <b>Knelpunten voor hoogwaterveiligheid</b>  | <b>67</b> |
| 6.1      | Achtergrond   | 67        |
| 6.2      | Probleemdefinitie en onderzoeks vragen  | 67        |
| 6.2.1    | Vergrote belasting op de waterkeringen  | 67        |
| 6.2.2    | Bepaling van overstromingskansen  | 69        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 6.2.3    | Water afvoeren naar zee bij extreme zeespiegelstijging  | 69        |
| 6.2.4    | Problemen voor infrastructuur   | 72        |
| 6.2.5    | Onderzoeks vragen   | 72        |
| 6.3      | Uitkomsten lopende onderzoeken  | 72        |
| 6.3.1    | Integraal Rivier Management   | 72        |
| 6.3.2    | Protecting the Rhine-Meuse delta against sea level rise: What to do with the river's discharge? | 73        |
| 6.3.3    | Negatieve systeem werking   | 73        |
| 6.4      | Uitgangspunten  | 74        |
| 6.5      | Naar een knelpunt voor waterveiligheid  | 74        |
| 6.5.1    | Knelpunten in infrastructuur  | 74        |
| 6.5.1.1  | Beweegbare keringen: te vaak dicht bij meer dan 1 m zeespiegelstijging                          | 75        |
| 6.5.1.2  | Vaste keringen: geen hard knelpunt, maar versterkingen worden wel steeds complexer en duurder   | 75        |
| 6.5.2    | Knelpunt in het ruimtegebruik   | 76        |
| 6.5.2.1  | Keringen  | 76        |
| 6.5.2.2  | Ruimte voor de Rivier   | 78        |
| 6.5.3    | Knelpunten en aandachtspunten   | 79        |
| 6.5.4    | Grenzen aan huidige beoordelings- en ontwerp methodiek  | 80        |
| 6.6      | Conclusies  | 81        |
| 6.7      | Kennisvragen  | 82        |
| <b>7</b> | <b>Conclusies en aanbevelingen</b>  | <b>83</b> |
| 7.1      | Conclusies  | 83        |
| 7.1.1    | Scheepvaart   | 83        |
| 7.1.2    | Zoetwatervoorziening  | 84        |
| 7.1.3    | Natuur  | 84        |
| 7.1.4    | Hoogwaterveiligheid   | 85        |
| 7.2      | Reflectie   | 85        |
| 7.3      | Aanbevelingen   | 86        |
| <b>8</b> | <b>Referenties</b>  | <b>87</b> |
| <b>A</b> | <b>Geraadpleegde experts</b>  | <b>92</b> |
| A.1      | Rivieraafvoer en bodemerosie  | 92        |
| A.2      | Scheepvaart   | 92        |
| A.3      | Zoetwatervoorziening  | 92        |
| A.4      | Natuur  | 92        |
| A.5      | Hoogwaterveiligheid   | 93        |
| <b>B</b> | <b>Bijlage bodemerosie</b>  | <b>94</b> |
| <b>C</b> | <b>Bijlage scheepvaart</b>  | <b>95</b> |
| <b>D</b> | <b>Bijlage natuur</b>   | <b>96</b> |

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

We gebruiken onze rivieren in Nederland voor uiteenlopende doeleinden. Daartoe hebben we onze rivieren zo ingericht dat ze ons maximaal profijt bieden. Het riviersysteem verandert echter voortdurend, enerzijds als gevolg van klimaatverandering, anderzijds als reactie op onze ingrepen. Zo heeft het zomerbed van de Rijntakken en de Maas zich meters ingesneden als gevolg van de riviernormalisaties, bochtafsnijdingen en de winning van zand en grind. Het land achter de dijken daalt als gevolg van klink en doordat er geen sediment meer wordt afgezet.

Daarnaast veranderen onze gebruikswensen ook. Door schaalvergroting in de binnenvaart zijn we steeds strengere en ingrijpendere eisen aan de afmetingen van vaarwegen gaan stellen. En als gevolg van klimaatverandering hebben we vaker te maken met warme en droge perioden, waardoor we meer (rivier)water nodig hebben voor bijvoorbeeld het beregenen van akkers.

Door onze rivieren steeds maximaal te willen benutten lopen we tegen de grenzen van het riviersysteem aan. Door klimaatverandering krijgen we te maken met extremere hoog- en laagwaters en zeespiegelstijging, waardoor die grenzen nog sneller in zicht komen en overschreden kunnen worden. Een voorbeeld hiervan is de lange periode van droogte in 2018: door aanhoudend lage waterstanden ondervond de binnenvaartsector grote hinder en ontstond schade aan de natuur. Ook de overstromingen in Limburg en over de grens als gevolg van hevige regenval in juli 2021 laten zien dat de grenzen van het systeem soms al dichterbij zijn dan we dachten.

In reactie daarop hebben we de neiging te focussen op de meest urgente problemen en het systeem daarop aan te passen, krampachtig vasthoudend aan huidige eisen en beleid. Wat op korte termijn logisch lijkt pakt op de lange termijn echter niet altijd goed uit. Zonder een goed doordachte strategie valt te voorzien dat we ons over pakweg 100 jaar in een verre van optimale situatie bevinden, waaruit we steeds moeilijker kunnen ontsnappen. Hoe kijken we dan terug op de weg daarnaar toe; met spijt? Wij zijn er niet meer, dus beter: zullen de volgende generaties ons verwijten alleen vanuit eigenbelang te hebben gehandeld?

## 1.2 Doel en aanpak

### 1.2.1

#### **Doel van de Strategische Verkenning Rivieren**

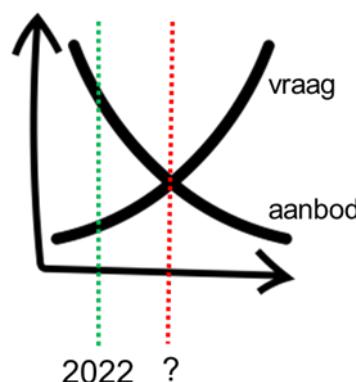
Het doel van de Strategische Verkenning Rivieren is om, samen met experts en gebruikers van de rivieren, langetermijnstrategieën te verkennen voor het Nederlandse rivierengebied. Door te kijken tot welk moment de rivieren aan de vanuit de functies gestelde eisen voldoen, wordt een beeld verkregen van het moment waarop maatregelen of aanpassingen in het beleid nodig zijn. Door langetermijnstrategieën te verkennen wordt een beeld verkregen van mogelijke maatregelen en oplossingsrichtingen. Wanneer rekening wordt gehouden met de tijd die nodig is voor besluitvorming en de implementatie van maatregelen wordt een eerste beeld verkregen van het moment waarop de discussie gestart moet worden om deze keuzes voor te bereiden. Binnen deze verkenning willen we ook nagaan welke kennis nog mist om in de (nabije) toekomst keuzes te kunnen maken over de inrichting en het gebruik van het riviersysteem. Deze kennisvragen kunnen als input voor een nog vorm te geven kennisagenda dienen.

Het doel van de Strategische Verkenning Rivieren is dus tweeledig. We willen in beeld brengen op welk moment aanpassingen nodig zijn in het riviersysteem of in de eisen die we vanuit de functies aan de rivier stellen om ook op de lange termijn te kunnen voorzien in o.a. de transportbehoeften en waterbeschikbaarheid. En we willen komen tot een overzicht van kennisvragen die voor die tijd beantwoord moeten worden, zodat de discussie over de problemen en mogelijke oplossingsrichtingen optimaal gevoerd kan worden.

### 1.2.2

#### Aanpak

Als eerste stap in de verkenning brengen we de te verwachten knelpunten in kaart. Dat doen we door aan de ene kant de gebruikswensen (vraag) vanuit verschillende rivierfuncties (of ecosysteemdiensten) te inventariseren, en aan de andere kant de ontwikkeling van het riviersysteem (aanbod) te schetsen. Wanneer de vraag het aanbod overschrijdt is sprake van een knelpunt (Figuur 1.1). Sommige knelpunten zullen pas in de verre toekomst optreden, van andere zijn we misschien nog slechts enkele jaren verwijderd. Weer andere knelpunten zijn we mogelijk al gepasseerd.



Figuur 1.1 Illustratie van een knelpunt wanneer de vraag het aanbod overschrijdt.

Ook bekijken we, in eerste instantie per gebruiksfunctie, de mogelijkheden om knelpunten op te lossen of uit te stellen. Vervolgens brengen we de verschillende functies bij elkaar en bekijken we wat het oplossen van het ene knelpunt betekent voor knelpunten bij andere functies. Sommige functies zullen met elkaar conflicteren, andere kunnen mogelijk juist worden gecombineerd omdat ze om vergelijkbare oplossingen vragen.

Op basis van deze verkenning van mogelijkheden kunnen in de volgende fase van de verkenning integrale strategieën en toekomstvisies worden vormgegeven. Hierbij verleggen we de aandacht van de gebruikswensen naar de draagkracht van het systeem en kiezen we verschillende (ideologische) perspectieven van waaruit we het Nederlandse rivierengebied in de toekomst vormgeven.

### 1.2.3

#### Doel van dit rapport

Dit rapport beschrijft de knelpuntenanalyse en de eerste verkenning van mogelijke oplossingen per gebruiksfunctie. Dit is het eindproduct van de eerste stap van de Strategische Verkenning Rivieren en vormt de basis voor het vervolg. Daarnaast komen in dit rapport kennisvragen aan bod die beantwoord moeten worden om meer inzicht in de knelpunten en mogelijke oplossingen te krijgen. Deze vragen kunnen landen in bestaande kennisprogramma's, of worden opgenomen in een nieuwe kennisagenda.

## 1.3 Methode en afbakening

We focussen op de Rijn en de Maas als belangrijkste rivieren in het Nederlandse hoofdwatersysteem.

Op basis van discussie met experts hebben we voor deze rivieren best case en worst case scenario's opgesteld voor de twee belangrijkste systeemontwikkelingen, tot na 2100:

- 1 veranderend afvoerregime als gevolg van klimaatverandering
- 2 bodemerosie als gevolg van eerder menselijk ingrijpen

Vervolgens hebben we voor vier gebruiksfuncties (scheepvaart, zoetwatervoorziening, hoogwaterveiligheid en ruimte voor natuur) één of enkele experts binnen Deltares gevraagd om:

- 1 de gebruikseisen in kaart te brengen;
- 2 te bepalen wanneer we een knelpunt verwachten, door deze eisen af te zetten tegen de systeemontwikkeling;
- 3 uiteen te zetten welke maatregelen kunnen worden genomen om knelpunten op te lossen of uit te stellen.

Om de uitkomsten van deze analyses te toetsen en aan te scherpen zijn bijeenkomsten met deskundigen binnen en buiten Deltares georganiseerd. In Bijlage A is een overzicht van geraadpleegde experts opgenomen. Tijdens deze bijeenkomsten is ook aandacht besteed aan kennishiaten, die ingevuld moeten worden om onzekerheden in de uitkomsten te verkleinen.

## 1.4 Leeswijzer

Hoofdstuk 2 gaat in op de ontwikkeling van het afvoerregime en de bodemerosie in de Rijn en de Maas. In de hoofdstukken 3 t/m 6 wordt per gebruiksfunctie de knelpuntanalyse beknopt weergegeven. In hoofdstuk 7 volgt een overzicht van de conclusies, een overkoepelende discussie en een aantal aanbevelingen.

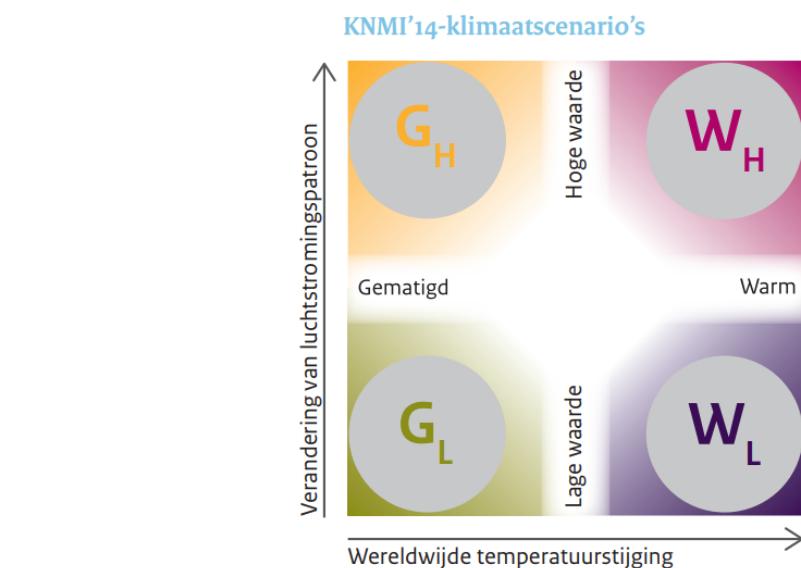
## 2 Scenario's voor rivieraafvoer en bodemerosie

### 2.1 Rivieraafvoer

De scenario's voor de ontwikkeling van het afvoerregime van de Rijn en de Maas tot 2150 zijn gebaseerd op discussies met Mark Hegnauer en Judith ter Maat (Deltares) en de rapporten van het KNMI (2015), Sperna Weiland et al. (2015) en Ruijgh (2019).

#### 2.1.1 KNMI-klimaatscenario's

In studies naar de effecten van klimaatverandering op rivieren in Nederland worden normaalgesproken de KNMI'14-klimaatscenario's gebruikt, of de iets oudere KNMI'06-scenario's. De KNMI'14-scenario's bestaan uit vier basisscenario's die verschillen qua mate van wereldwijde opwarming (Gematigd of Warm) en mogelijke veranderingen in luchtstromingspatronen (Laag of Hoog). Dit is schematisch weergegeven in Figuur 2.1. De KNMI'14-klimaatscenario's geven als het ware de hoekpunten aan waarbinnen het Nederlandse klimaat in de toekomst waarschijnlijk zal veranderen. Een aantal kerncijfers van de KNMI'14-scenario's is te zien in Tabel 2.1. Opgemerkt wordt dat in alle scenario's sprake is van een toename van de gemiddelde jaarlijkse neerslag, maar dat bij de  $G_H$  en  $W_H$  scenario's in de zomer sprake is van een afname. Een uitgebreidere beschrijving van deze scenario's is gegeven in KNMI (2015).



Figuur 2.1 Kenmerken KNMI'14 scenario's

Tabel 2.1 Kerncijfers KNMI'14-scenario's

| Variabele                             | Indicator                 | Klimaat<br>1981-2010   | Scenario veranderingen voor het klimaat rond<br><b>2050</b> |                       |                         |                         | Scenario veranderingen voor het klimaat rond<br><b>2085</b> |                       |                        |                        | Natuurlijke<br>variaties<br>gemiddeld<br>over 30 jaar |
|---------------------------------------|---------------------------|------------------------|---|-----------------------|-------------------------|-------------------------|---|-----------------------|------------------------|------------------------|---|
|                                       |                           |                        | G <sub>L</sub>  | G <sub>H</sub>        | W <sub>L</sub>          | W <sub>H</sub>          | G <sub>L</sub>  | G <sub>H</sub>        | W <sub>L</sub>         | W <sub>H</sub>         |   |
| Wereldwijde temperatuurstijging:      |                           |                        | +1 °C   | +1 °C                 | +2 °C                   | +2 °C                   | +1,5 °C   | +1,5 °C               | +3,5 °C                | +3,5 °C                |   |
| Verandering in luchtstromingspatroon: |                           |                        | lage<br>waarde  | hoge<br>waarde        | lage<br>waarde          | hoge<br>waarde          | lage<br>waarde  | hoge<br>waarde        | lage<br>waarde         | hoge<br>waarde         |   |
| Zeespiegel bij<br>Noordzeekust        | absolute<br>niveau        | 3 cm boven<br>NAP      | +15 tot<br>+30 cm   | +15 tot<br>+30 cm     | +20 tot<br>+40 cm       | +20 tot<br>+40 cm       | +25 tot<br>+60 cm   | +25 tot<br>+60 cm     | +45 tot<br>+80 cm      | +45 tot<br>+80 cm      | ±1,4 cm   |
|                                       | tempo van<br>verandering  | 2,0 mm/jr.             | +1 tot +5,5<br>mm/jr.                                       | +1 tot +5,5<br>mm/jr. | +3,5 tot<br>+7,5 mm/jr. | +3,5 tot<br>+7,5 mm/jr. | +1 tot +7,5<br>mm/jr.                                       | +1 tot +7,5<br>mm/jr. | +4 tot +10,5<br>mm/jr. | +4 tot +10,5<br>mm/jr. | ±1,4<br>mm/jr.  |
| Temperatuur                           | gemiddelde                | 10,1 °C                | +1,0 °C   | +1,4 °C               | +2,0 °C                 | +2,3 °C                 | +1,3 °C   | +1,7 °C               | +3,3 °C                | +3,7 °C                | ±0,16 °C  |
| Neerslag                              | gemiddelde<br>hoeveelheid | 851 mm                 | +4 %  | +2,5 %                | +5,5 %                  | +5 %                    | +5 %  | +5 %                  | +7 %                   | +7 %                   | ±4,2 %  |
| Zonnestraling                         | zonne-<br>straling        | 354 kJ/cm <sup>2</sup> | +0,6 %  | +1,6 %                | -0,8 %                  | +1,2 %                  | -0,5 %  | +1,1 %                | -0,9 %                 | +1,4 %                 | ±1,6 %  |

Met behulp van het GRADE-instrumentarium (Generator of Rainfall and Discharge Extremes) zijn voor de KNMI-scenario's veranderingen in temperatuur en neerslag zoals berekend met mondiale klimaatmodellen gebruikt om historische neerslag- en temperatuurreeksen aan te passen. Deze reeksen zijn vervolgens gebruikt als invoer in stochastische weergenerators voor de stroomgebieden van de Rijn en de Maas. Hiermee zijn lange synthetische neerslag- en temperatuurreeksen geproduceerd waarin de statistische eigenschappen van de originele (veel kortere) reeksen zijn behouden. Deze lange reeksen zijn vervolgens gebruikt in hydrologische modellen om de effecten op de afvoer van Rijn en Maas te bepalen. Een samenvatting van dit onderzoek is te vinden in Klijn et al. (2015).

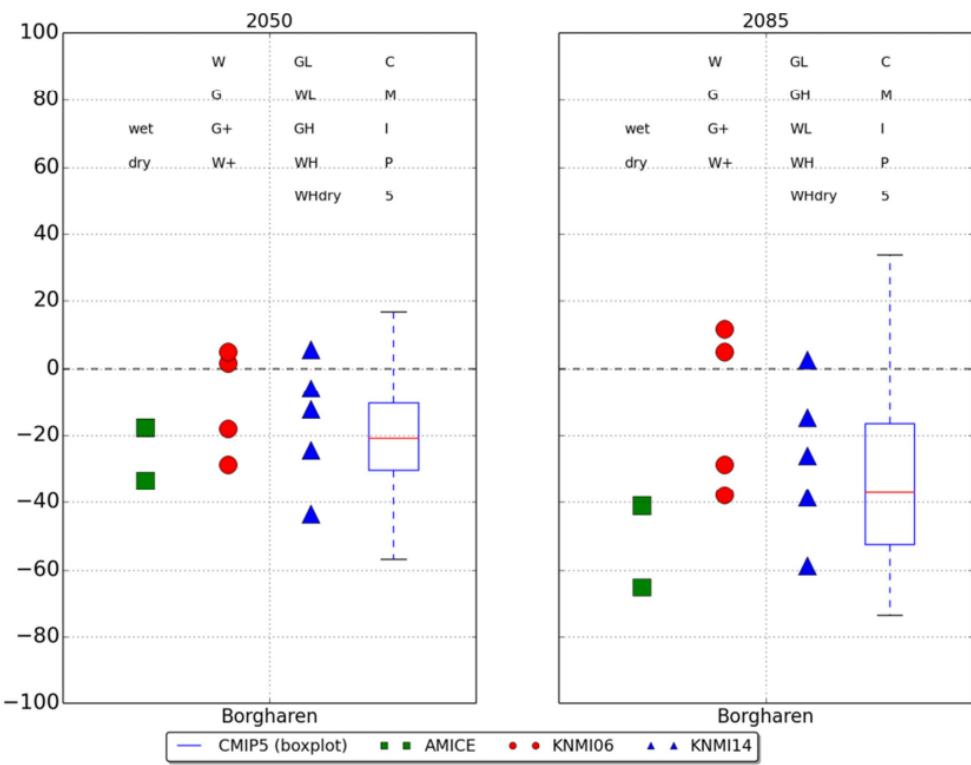
De resulterende afvoerreeks voor de Rijn bij Lobith is gecorrigeerd voor overstromingen verder bovenstrooms in het stroomgebied, die tot een afname van de piekafvoeren bij Lobith leiden. Sperna Weiland et al. (2015) beschrijven de stappen om tot de afvoerscenario's te komen in meer detail. Op dit moment zijn voor de Maas bij Borgharen en de Rijn bij Lobith afvoerscenario's voor 2050 en 2085 of 2100 beschikbaar. Voor veranderingen in de afvoerregimes na 2100 is geen informatie beschikbaar.

De analyses met GRADE zijn vooral gericht op hoogwatersituaties. Om het effect van klimaatverandering op laagwatersituaties te kwantificeren wordt binnen het Deltaprogramma Zoetwater gewerkt met zogenaamde 100-jarige afvoerreeksen. Deze reeksen zijn als volgt gegenereerd. Voor de Rijn bij Lobith en de Maas bij Monsin zijn tijdreeksen van dagafvoeren gesimuleerd met hydrologische modellen (HBV). Dit is gedaan voor het huidige klimaat en voor de klimaatscenario's van KNMI'14. De verschillen tussen de huidige en toekomstige tijdreeksen zijn vervolgens opgeteld bij gemeten 100-jarige afvoerreeksen. Meer informatie over deze reeksen en de daaruit afgeleide statistieken is te vinden in o.a. Wesselius et al. (2017).

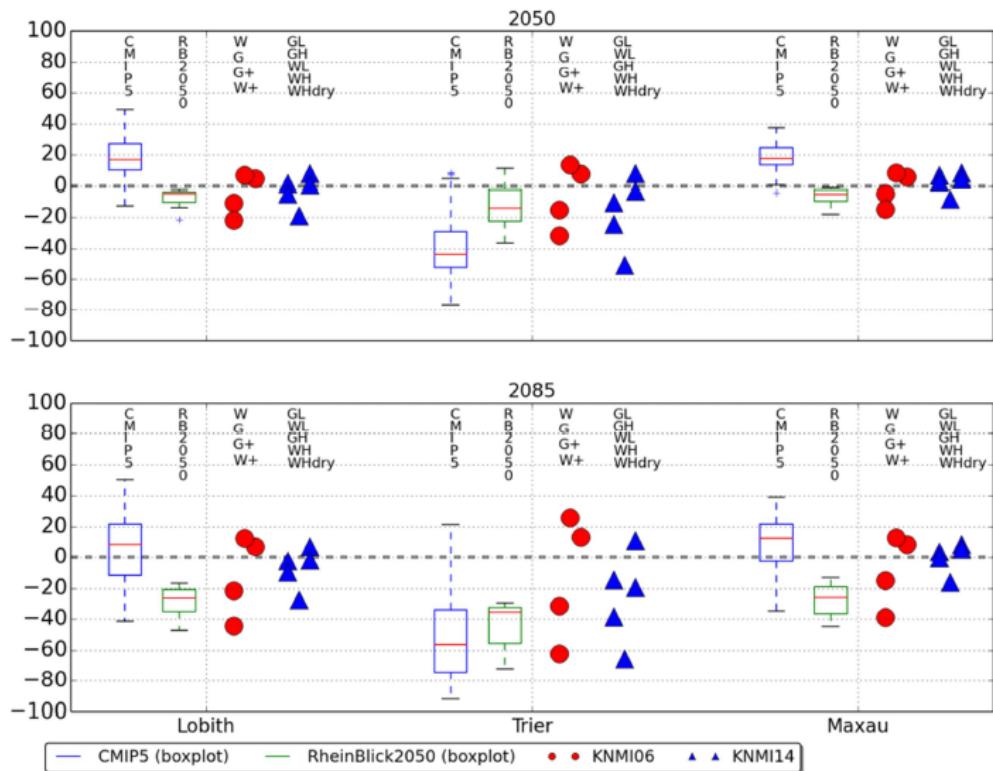
## 2.1.2

### De laagste afvoeren worden naar verwachting lager

Figuur 2.2 geeft de verwachte veranderingen in 7-daagse minimumafvoeren voor de Maas bij Borgharen in 2050 (links) en 2085 (rechts). In Figuur 2.3 is dezelfde informatie voor de Rijn bij onder andere Lobith gegeven. Sommige scenario's laten een kleine toename van de zeer lage afvoeren zien. Volgens de meeste scenario's zullen de zeer lage afvoeren echter nog lager worden. Dit blijkt ook uit de 100-jarige afvoerreeksen die zijn ontwikkeld voor het Deltaprogramma Zoetwater (Tabel 2.2 en Tabel 2.3).



Figuur 2.2 Procentuele verandering in 7-daagse minimumafvoer (NM7Q) bij Borgharen, volgens verschillende klimaatscenario's waaronder de KNMI'06- en KNMI'14-scenario's. De kleur/symboolcodering en boxplots geven de scenario sets aan. De volgorde van de scenario's is bovenaan de figuren aangegeven. Bron: Sperna Weiland et al. (2015).



Figuur 2.3 Procentuele verandering in 7-daagse minimumafvoer (NM7Q) bij Lobith, Trier en Maxau, volgens verschillende klimaatscenario's waaronder de KNMI'06- en KNMI'14-scenario's. De kleur/symboolcodering en boxplots geven de scenario sets aan. De volgorde van de scenario's is bovenaan de figuren aangegeven. Bron: Sperna Weiland et al. (2015).

Tabel 2.2 Verwachte verandering in lage rivieraafvoer op de Rijn te Lobith die gemiddeld 5, 10, 15 of 50% van de tijd wordt onderschreden. Waarden zijn afgeleid uit de 100-jarige afvoerrekenen die worden gebruikt voor het Deltaprogramma Zoetwater.

| % van de tijd | dagen per jaar | Ref2015 (m³/s) | 2050GL (m³/s) | 2050Whdry (m³/s) | 2085GL (m³/s) | 2085Whdry (m³/s) |
|---------------|----------------|----------------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| 5%            | 18             | 1015           | 1102          | 824              | 1094          | 743              |
| 10%           | 37             | 1163           | 1272          | 955              | 1264          | 862              |
| 25%           | 91             | 1481           | 1625          | 1277             | 1633          | 1188             |
| 50%           | 183            | 1960           | 2154          | 1783             | 2193          | 1756             |

Tabel 2.3 Verwachte verandering in lage rivieraafvoer op de Maas te Monsin die gemiddeld 5, 10, 15 of 50% van de tijd wordt onderschreden. Waarden zijn afgeleid uit de 100-jarige afvoerrekenen die worden gebruikt voor het Deltaprogramma Zoetwater.

| % van de tijd | dagen per jaar | Ref2015 (m³/s) | 2050GL (m³/s) | 2050Whdry (m³/s) | 2085GL (m³/s) | 2085Whdry (m³/s) |
|---------------|----------------|----------------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| 5%            | 18             | 51             | 54            | 29               | 53            | 22               |
| 10%           | 37             | 64             | 67            | 38               | 66            | 29               |
| 25%           | 91             | 101            | 107           | 68               | 106           | 56               |
| 50%           | 183            | 182            | 204           | 152              | 200           | 143              |

### 2.1.3

#### Piekafvoeren worden naar verwachting hoger

Door een toename in neerslag en een afname van berging in de vorm van sneeuw zullen piekafvoeren toenemen. In Tabel 2.4 en Tabel 2.5 zijn verwachte veranderingen in piekafvoeren gegeven, gebaseerd op Sperna Weiland et al. (2015).

Tabel 2.4 Overzicht van afvoeren [m³/s] (HBV) voor verschillende terugkeertijden voor alle scenario's, inclusief de referentiesituatie voor de Maas bij Borgharen. Bron: Sperna Weiland et al. (2015).

| Terugkeertijd [jaar] | Ref. | 2050GL | 2050GH | 2050WL | 2050WH | 2050W+ | 2085GL | 2085GH | 2085WL | 2085WH | 2085W+ |
|----------------------|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10                   | 2250 | 2550   | 2500   | 2450   | 2550   | 2400   | 2500   | 2450   | 2600   | 2750   | 2600   |
| 30                   | 2750 | 3100   | 3000   | 3000   | 3100   | 2950   | 3000   | 2950   | 3150   | 3300   | 3200   |
| 100                  | 3200 | 3600   | 3450   | 3500   | 3550   | 3450   | 3500   | 3400   | 3650   | 3850   | 3750   |
| 300                  | 3550 | 4000   | 3850   | 3900   | 3900   | 3850   | 3900   | 3750   | 4050   | 4300   | 4200   |
| 1000                 | 3850 | 4350   | 4200   | 4200   | 4200   | 4200   | 4250   | 4050   | 4400   | 4700   | 4550   |
| 1250                 | 3900 | 4450   | 4250   | 4250   | 4250   | 4250   | 4350   | 4100   | 4450   | 4750   | 4650   |
| 3000                 | 4100 | 4750   | 4500   | 4500   | 4550   | 4450   | 4600   | 4400   | 4700   | 4950   | 4850   |
| 10000                | 4350 | 5000   | 4700   | 4750   | 4750   | 4650   | 4900   | 4600   | 4900   | 5200   | 5050   |
| 30000                | 4600 | 5200   | 4850   | 4950   | 4900   | 4850   | 5050   | 4750   | 5100   | 5350   | 5200   |

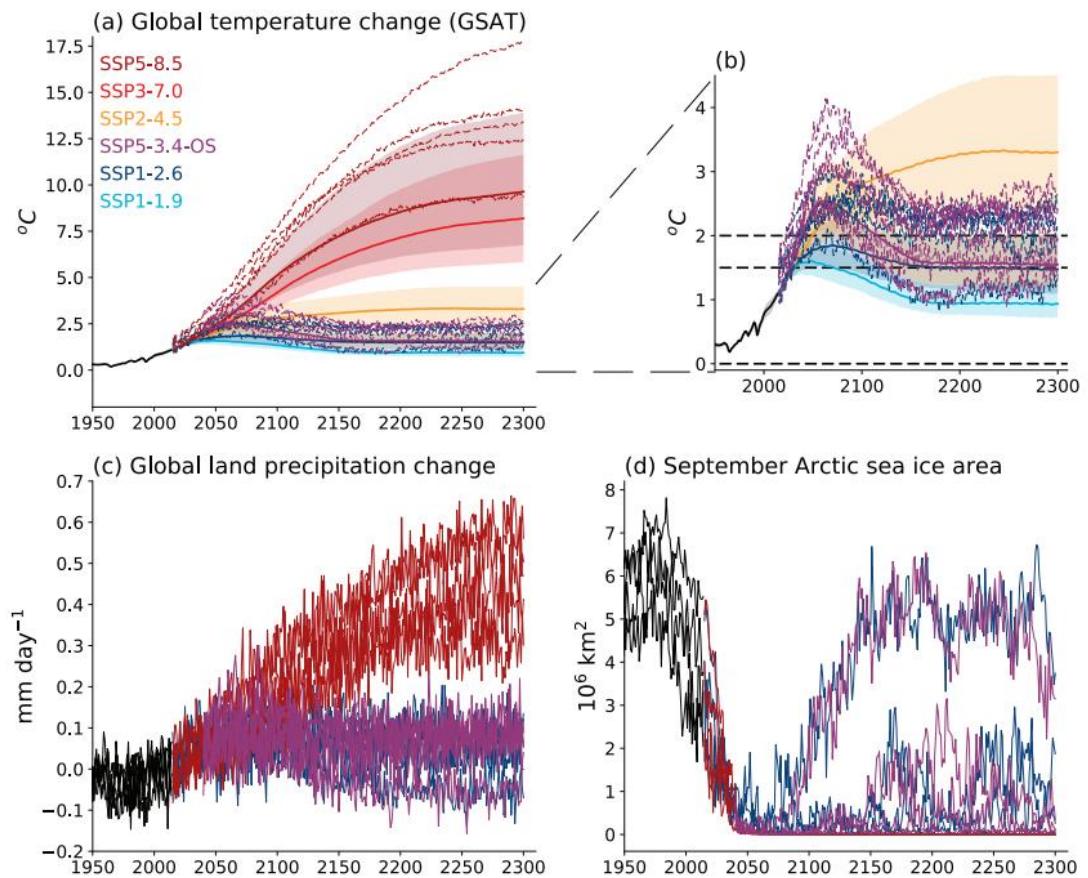
*Tabel 2.5 Overzicht van afvoeren [m<sup>3</sup>/s] (HBV in combinatie met SOBEK) voor verschillende terugkeertijden voor alle scenario's, inclusief de referentiesituatie voor de Rijn bij Lobith. In de getallen is het effect van overstromingen bovenstrooms en de correctie voor overstromingsgebieden langs het traject Wesel-Lobith meegenomen. Bron: Sperna Weiland et al. (2015).*

| Terugkeertijd<br>[jaar] | Ref.  | 2050GL | 2050GH | 2050WL | 2050WH | 2050W+ | 2085GL | 2085GH | 2085WL | 2085WH | 2085W+ |
|-------------------------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 10                      | 9100  | 10900  | 10600  | 10800  | 11100  | 11000  | 10800  | 10600  | 12000  | 12700  | 11700  |
| 30                      | 10900 | 12900  | 12500  | 12700  | 13000  | 12400  | 12800  | 12400  | 13700  | 14100  | 13400  |
| 100                     | 12600 | 14100  | 13900  | 14000  | 14100  | 13900  | 14000  | 13800  | 14400  | 14800  | 14300  |
| 300                     | 13600 | 14700  | 14500  | 14500  | 14600  | 14500  | 14600  | 14400  | 15000  | 15600  | 15000  |
| 1000                    | 14300 | 15700  | 15200  | 15400  | 15100  | 15100  | 15500  | 14900  | 16400  | 17000  | 16300  |
| 1250                    | 14400 | 15900  | 15300  | 15500  | 15200  | 15300  | 15700  | 14900  | 16700  | 17100  | 16500  |
| 3000                    | 14800 | 16700  | 16200  | 16400  | 16300  | 16400  | 16600  | 15600  | 17100  | 17300  | 17000  |
| 10000                   | 15300 | 17200  | 17000  | 17000  | 17000  | 16900  | 17200  | 16800  | 17300  | 17500  | 17500  |
| 30000                   | 15700 | 17300  | 17200  | 17200  | 17300  | 17200  | 17300  | 17000  | 17400  | 17500  | 17600  |

#### 2.1.4 Afvoerveranderingen na 2100

In het kader van CMIP6 en IPCC zijn klimaatscenario's ontwikkeld die doorlopen tot 2300. Deze scenario's zijn echter niet bepaald met gedetailleerde klimaatmodellen, maar met zogenaamde emulators, waarin een statistische benadering van de complexe General Circulation Models (GCM's) wordt gebruikt. Menselijk gedrag en de daaruit voortkomende emissies na 2100 zijn moeilijk te voorspellen. Daarom wordt in de IPCC-studies aangenomen dat de uitstoot van CO<sub>2</sub> na 2100 geleidelijk tot nul wordt gereduceerd. De verwachte effecten op de gemiddelde temperatuur en de gemiddelde neerslag die op land valt zijn te zien in Figuur 2.4. Bij meerdere scenario's is ook na 2100 sprake van een verdere stijging van de temperatuur en een toename van de neerslag op land.

De effecten van de stijgende temperatuur en neerslagtoename op de afvoerregimes van Rijn en Maas zijn echter niet onderzocht. Hierdoor was geen gedetailleerde informatie beschikbaar over de te verwachten rivierafvoeren op de Rijn en de Maas na 2085. Ten tijde van schrijven wordt er door Deltares gewerkt aan de vertaling van de KNMI'23-klimaatscenario's naar het effect op de afvoeren van de Rijn en Maas tot het jaar 2150. De uitkomsten zijn recentelijk gepubliceerd in Buitink et al. (2023). In de loop van 2024 wordt een tweede rapport verwacht met betrekking op de afvoerextremen en daaraan gekoppelde terugkeertijden. Deze informatie is niet alleen nodig voor toekomstverkenningen zoals deze Strategische Verkenning Rivieren, maar ook voor uitvoeringsprojecten die op korte termijn gaan lopen. Denk bijvoorbeeld aan de vervanging van de stuwen op de Maas. Bij het ontwerp wordt rekening gehouden met een levensduur van 100 jaar, wat betekent dat informatie nodig is over de te verwachten afvoeren tot minimaal 2130.



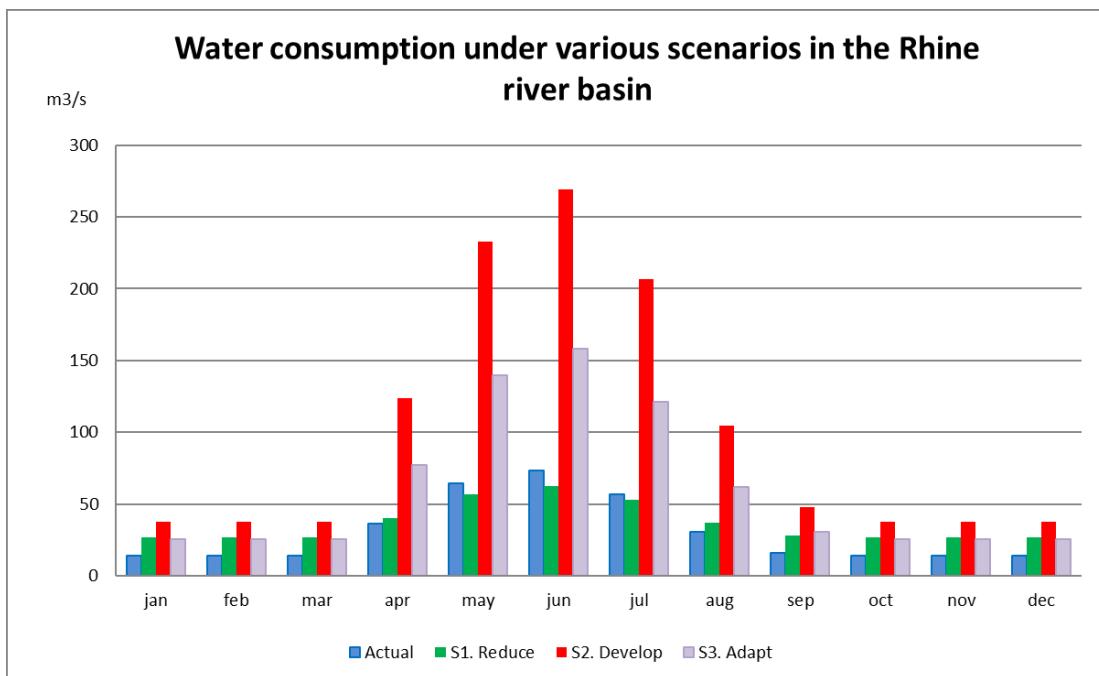
*Figuur 2.4 Door IPCC berekende veranderingen in temperatuur, neerslag en ijsbedekking in de poolgebieden tot 2300. IPCC maakt gebruik van Shared Socio-Economic Pathways (SSP's). Deze SSP's geven mogelijke ontwikkelingen van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen, gebaseerd op verschillende mogelijke sociaaleconomische, technologische en demografische ontwikkelingen in de toekomst. SSP1-1.9 is het scenario met de laagste uitstoot van broeikasgassen, SSP5-8.5 is het hoogste scenario. De in (a) en (b) weergegeven projecties zijn afkomstig van twee verschillende modellen: CMIP6 (stippellijnen) en MAGICC7 (gekleurde pluimen) (bron: Lee et al., 2021).*

## 2.1.5 Mogelijke toename van het watergebruik

De KNMI-scenario's houden alleen rekening met veranderingen in fysische processen. Veranderingen in watergebruik worden niet beschouwd. Ruijgh (2019) heeft ruwe schattingen gedaan van veranderingen in watergebruik in het stroomgebied van de Rijn. Daarvoor bekeek hij de huidige situatie en drie scenario's:

- Huidige situatie: watergebruik in het Rijnstroomgebied, gebaseerd op data uit 2017 of andere recente jaren.
- S1 – verminderen: schatting van watergebruik in geval van krimp van de economie in het Rijnstroomgebied.
- S2 – ontwikkelen: schatting van watergebruik in geval van economische groei en een toename van de watervraag voor irrigatie.
- S3 – aanpassen: schatting van watergebruik voor S2 in combinatie met technische maatregelen om water te besparen.

Het geschatte watergebruik in deze scenario's is gegeven in Figuur 2.5. De toename van het watergebruik in de lente en zomer is vooral toe te schrijven aan irrigatie en in mindere mate aan een toename van het gebruik door huishoudens in juli en augustus.



Figuur 2.5 Watergebruik in het Rijnstroomgebied volgens verschillende scenario's. Bron: Ruijgh (2019).

Voor de Strategische Verkenning wordt aangenomen dat de invloed van watergebruik bij overstromingen verwaarloosbaar is. Bij lage afvoeren kunnen we als volgt rekening houden met veranderingen in watergebruik:

- De laagste afvoeren komen nu meestal aan het eind van de zomer en het begin van de herfst voor (rond september).
- Door een afname van de bijdrage van sneeuw- en gletsjersmelt aan de Rijnafvoer zullen de laagste afvoeren in de toekomst naar verwachting eerder in het jaar voorkomen.
- Voor zichtjaar 2100 houden we rekening met het watergebruik gemiddeld over de maanden augustus en september om de minimumafvoer te bepalen (bijvoorbeeld 35 m<sup>3</sup>/s voor S1 en 75 m<sup>3</sup>/s voor S2).

Volgens Ruijgh (2019) zijn de schattingen zeer onzeker en kunnen ze niet aan een specifiek jaar worden gerelateerd. We beschouwen scenario's voor watergebruik daarom als kennisleemte. Onderzoek samen met instituten uit andere landen in het stroomgebied van de Rijn en de Maas is nodig om te komen tot een betere schatting van het watergebruik en de gevolgen daarvan op met name de lage rivieraafvoeren.

## 2.1.6

### Kennisvragen

- Scenario's voor veranderingen in klimaat en afvoerregimes na 2100: De huidige klimaatscenario's en bijbehorende afvoerscenario's hebben 2050 en 2085 als zichtjaren. Bij lange-termijnverkenningen is grote behoefte aan scenario's waarbij verder wordt gekeken dan 2085. Dit is nodig voor verkenningen zoals deze Strategische Verkenning Rivieren, maar ook voor beleidsstudies (o.a. doorkijk IRM) en voor vervangings- en renovatieopgaven, o.a. van de stuwen op de Maas.
- Watergebruik bovenstroms van Nederland: Ook is het nog onduidelijk hoe het watergebruik in landen bovenstroms van Nederland zal veranderen als gevolg van klimaatverandering en sociaaleconomische ontwikkelingen. Dit kan grote gevolgen hebben voor de waterbeschikbaarheid in Nederland.

## 2.2

### Bodemerosie

Als gevolg van ingrepen in het verleden erodeert de bodem van zowel de Rijn als de Maas. Omdat we niet precies weten welke ingrepen hebben plaatsgevonden en met hoeveel vertraging het systeem op deze ingrepen reageert (met andere woorden: hoe ver we verwijderd zijn van een evenwichtssituatie), kunnen we prognoses voor bodemerosie niet goed maken op basis van morfologische modellen. Wel zijn veel gegevens beschikbaar over de bodemligging van de Rijn en de Maas in de afgelopen decennia. Daarom maken we voor bodemerosiescenario's gebruik van data-analyse in combinatie met expert judgement.

De hier gepresenteerde scenario's zijn gebaseerd op discussie met Kees Sloff (Deltares) en de rapporten van Sloff (2019 en 2020). Inmiddels is voor de Maas ook een scenario opgesteld binnen Integraal Rivier Management (IRM), zie Sloff (2021).

#### 2.2.1

##### Rijn

###### 2.2.1.1

###### Prognose 2020 – 2050

Voor de Rijn geeft Sloff (2019) een prognose van bodemverandering van de Rijntakken voor de periode 2020 – 2050, zie Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Prognose van bodemerosie op de Rijntakken voor de periode 2020 – 2050 (Sloff, 2019).

| Traject                                   | Rkm        | Prognose (cm/y) |
|---|------------|-----------------|
| <b>Boven-Rijn</b>                         | 858 - 857  | 0,0             |
| <b>Boven-Waal</b>                         | 868 - 885  | -1,6            |
| <b>Midden-Waal</b>                        | 886 - 933  | -0,6            |
| <b>Beneden-Waal</b>                       | 934 - 951  | +0,1            |
| <b>Pann. Kanaal</b>                       | 868 - 876  | -1,0            |
| <b>Neder-Rijn (IJsselkop-Driel)</b>       | 877 - 890  | -0,1            |
| <b>Neder-Rijn - Lek (Driel-Hagestein)</b> | 891 - 947  | +0,3            |
| <b>Lek (vanaf Hagestein)</b>              | 947 - 970  | +0,3            |
| <b>Boven-IJssel</b>                       | 879 - 888  | -0,3            |
| <b>Midden-IJssel</b>                      | 889 - 970  | -0,1            |
| <b>Beneden-IJssel</b>                     | 971 - 1005 | +0,1            |

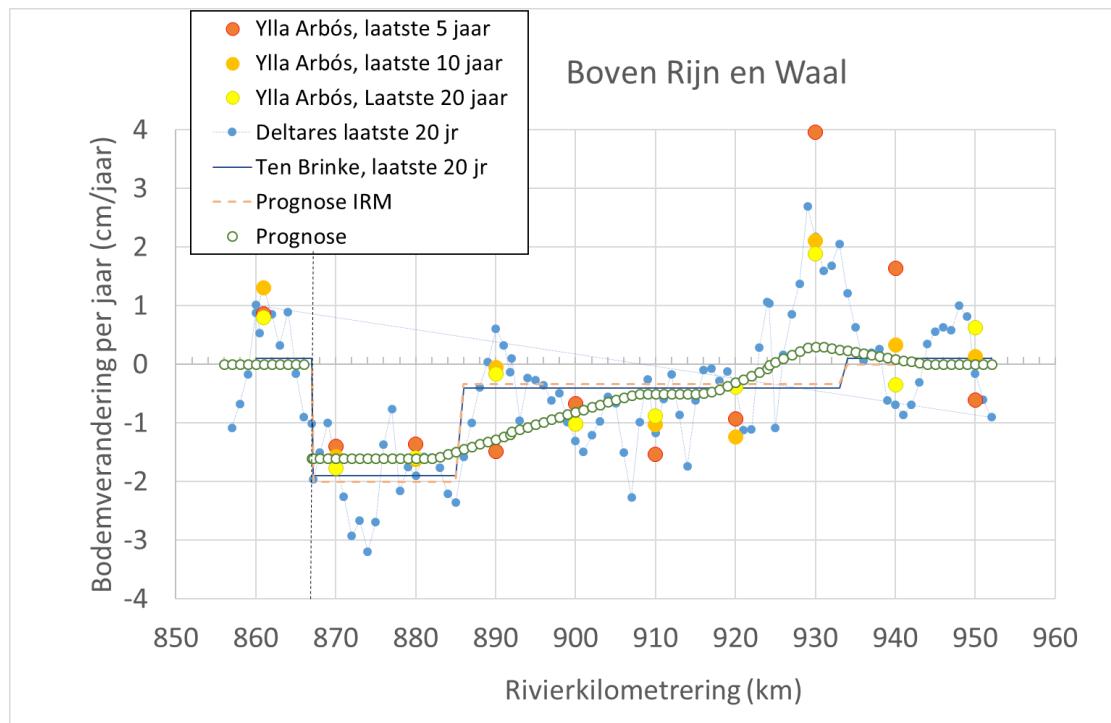
Deze prognose is ontwikkeld met het oog op toepassing in hydrodynamische modellen. Deze modellen kunnen worden gebruikt om de effecten van bodemerosie op scheepvaart en waterbeschikbaarheid te onderzoeken.

De prognose is voornamelijk gebaseerd op recente studies naar morfologische trends in de Rijntakken. Deze studies maken allemaal gebruik van de jaarlijkse multibeammetingen die in de Rijntakken sinds 2000 worden uitgevoerd. Afhankelijk van de nabewerking van de data (middeling, invulling van hiaten, trendanalyse) zijn de resulterende sedimentatie- en erosietrends uit deze studies echter verschillend. Dit wordt geïllustreerd in Figuur 2.6 t/m Figuur 2.8, waarin de uitkomsten van de verschillende studies (van Ten Brinke, Ylla Arbós en Deltares) zijn weergegeven.

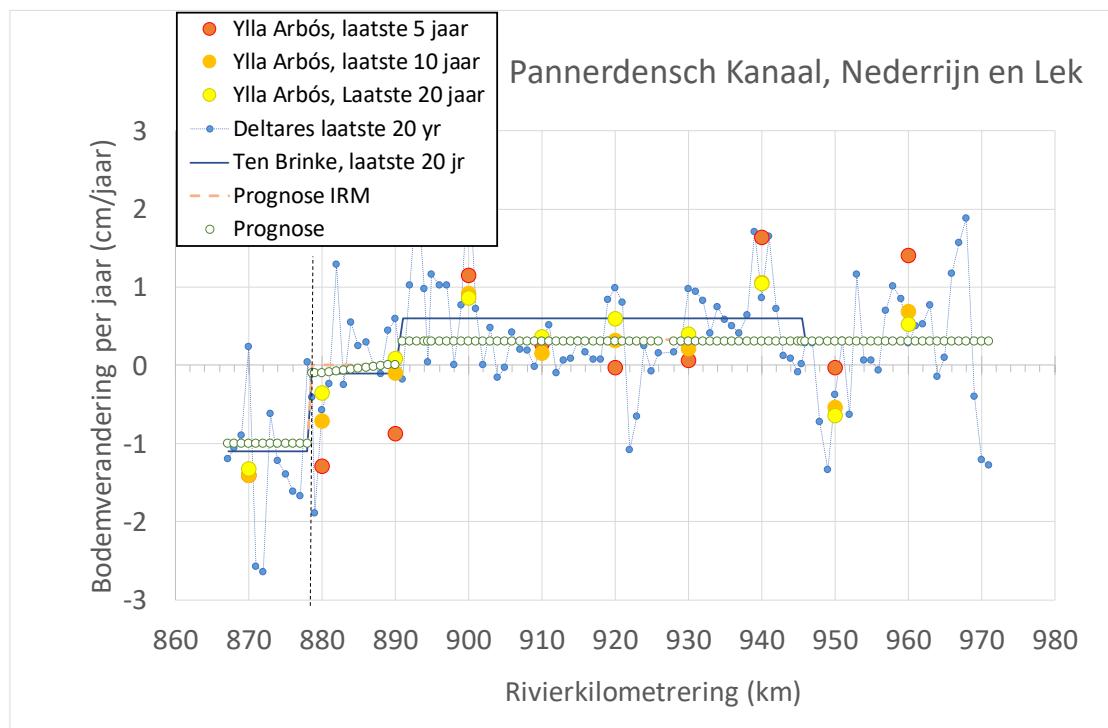
Omdat de prognose van Sloff is bedoeld als invoer voor hydrodynamische modellen gaan de trends voor de verschillende trajecten geleidelijk in elkaar over (stapsgewijze veranderingen zouden onrealistische modelresultaten opleveren).

Andere verschillen met de trendanalyses die in de figuren zijn weergegeven zijn het resultaat van verschillen in databewerking en expert judgement met betrekking tot effecten van maatregelen en de mate waarin erosie voortschrijdt in benedenstroomse richting.

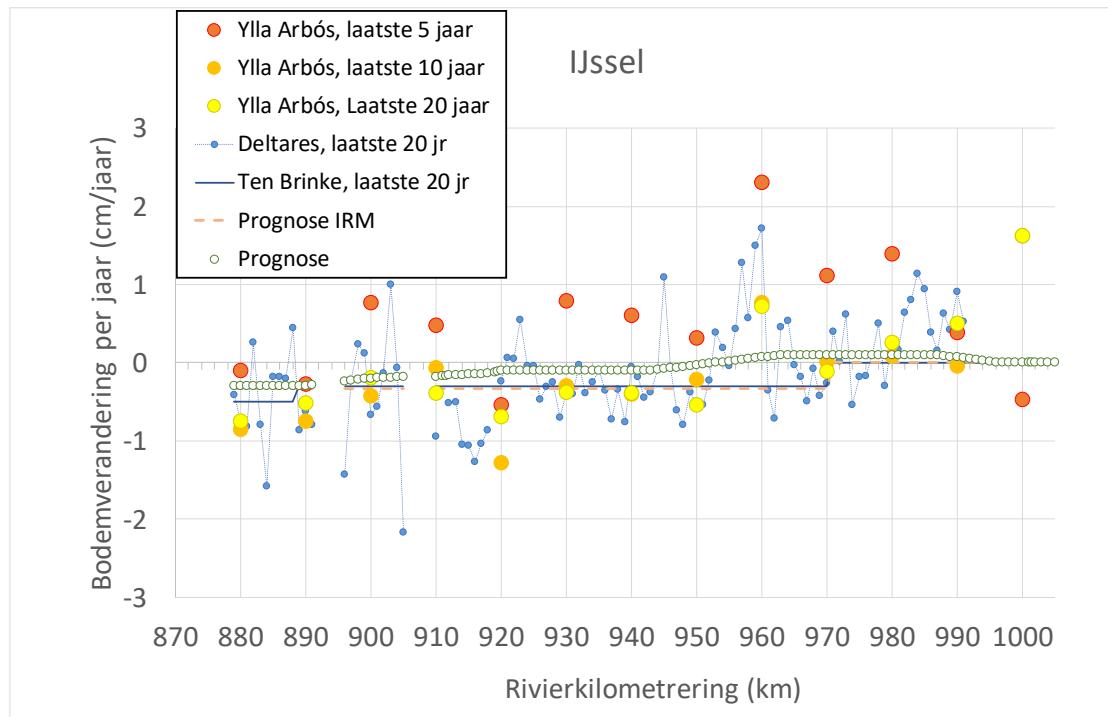
Omdat Sloff gebruik maakt van de resultaten van verschillende recente studies, gecombineerd met expert judgement, wordt zijn prognose beschouwd als ‘best guess’ voor de bodemontwikkeling van de Rijntakken in de komende 30 jaar.



Figuur 2.6 Trends in bodemverandering Boven-Rijn en Waal: prognose van Sloff en waargenomen trends uit recente studies (stroming is van links naar rechts). Bron: Sloff (2019).



Figuur 2.7 Trends in bodemverandering Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en Lek: prognose van Sloff en waargenomen trends uit recente studies (stippellijn markeert de locatie van de IJsselkop). Bron: Sloff (2019).



Figuur 2.8 Trends in bodemverandering IJssel: prognose van Sloff en waargenomen trends uit recente studies (de locaties van voormalige bocht afsnijdingen zijn zichtbaar als 'gaten' in de lijnen door verspringen van de rivierkilometrering). Bron: Sloff (2019).

## 2.2.1.2

### Bodemveranderingen na 2050

Na 2050 zijn bodemveranderingen in de Rijn zeer onzeker. We hebben te maken met verschillende ontwikkelingen die de bodemverandering beïnvloeden, maar het is vaak niet bekend in welke mate:

- De huidige bodemerosie is het gevolg van in het verleden uitgevoerde riviernormalisaties en de grootschalige winning van zand en grind. In reactie op deze ingrepen beweegt de rivierbodem zich naar een nieuw evenwicht. Het is echter niet bekend hoever we nog verwijderd zijn van die evenwichtssituatie. Hoe dichter we bij dat evenwicht zijn, hoe kleiner de bodemveranderingen worden.
- Metingen wijzen erop dat er mogelijk sprake is van een vergroving van het sediment op de bodem van de Boven-Rijn en Waal (Ylla Arbós et al., 2021). Vergroving van de bodem kan een stabiliserend effect op de bodemligging hebben.
- De bodemontwikkeling wordt met name bepaald door hoogwaters. Als gevolg van klimaatverandering worden deze waarschijnlijk extremer, waardoor erosie kan toenemen.
- Zeespiegelstijging leidt tot sedimentatie in bovenstroomse richting.
- Het programma Ruimte voor de Rivier, dat is uitgevoerd in de periode 2006 – 2019, heeft onder meer als doel om bodemerosie tegen te gaan. Net als in geval van de normalisaties in het verleden is de reactie van de rivierbodem op deze ingrepen vertraagd. De tijdsschaal waarop een nieuw evenwicht wordt bereikt na een ingreep is in de orde van decennia tot eeuwen. Het uiteindelijke effect van Ruimte voor de Rivier op de bodemontwikkeling is dus niet bekend.

Sloff veronderstelt dat de erosietrend na 2050 zal afnemen, met name doordat de invloed van normalisaties in het verleden afneemt en de effecten van rivierverruimingsmaatregelen zichtbaar worden. Recente trends duiden ook op een voorzichtige afname van de erosie (of zelfs sedimentatie) op bepaalde trajecten, bijvoorbeeld op de IJssel.

## 2.2.1.3

### Consequenties voor de afvoerverdeling over de Rijntakken

Omdat de bodem van de Boven-Waal sneller erodeert dan het Pannerdensch Kanaal (zie Tabel 2.6) stroomt een steeds groter percentage van de Rijnafvoer naar de Waal. De Boven-IJssel komt op zijn beurt steeds lager te liggen ten opzichte van de Neder-Rijn, waardoor een groter deel van de afvoer van het Pannerdensch Kanaal naar de IJssel stroomt.



Figuur 2.9 Splitsingspunten van de Rijntakken. De Boven-Rijn splitst in de Waal en het Pannerdensch Kanaal bij de Pannerdense Kop. Het Pannerdensch Kanaal gaat over in de Neder-Rijn waarvan de IJssel afsplitst bij de IJsselkop. Stuw Driel is aangegeven met een rode lijn. Bron: <https://www.waterpeilen.nl/berichten/zondag-9-september-2018-1548>.

Bij lage en middelhoge afvoer speelt naast de riviergeometrie bij de splitsingspunten ook de stuwen bij Driel (zie Figuur 2.9) een belangrijke rol in de afvoerverdeling. Bij lage afvoeren staat de stuwe dicht, met name om de toevoer van water via de IJssel naar het IJsselmeer te waarborgen. Wanneer de afvoer stijgt gaat de stuwe steeds verder open, zodat de afvoer naar de IJssel relatief constant blijft en de afvoer naar de Neder-Rijn steeds verder stijgt. Bij hoge afvoeren gaat de stuwe helemaal open, waardoor deze geen invloed meer heeft op de afvoerverdeling.

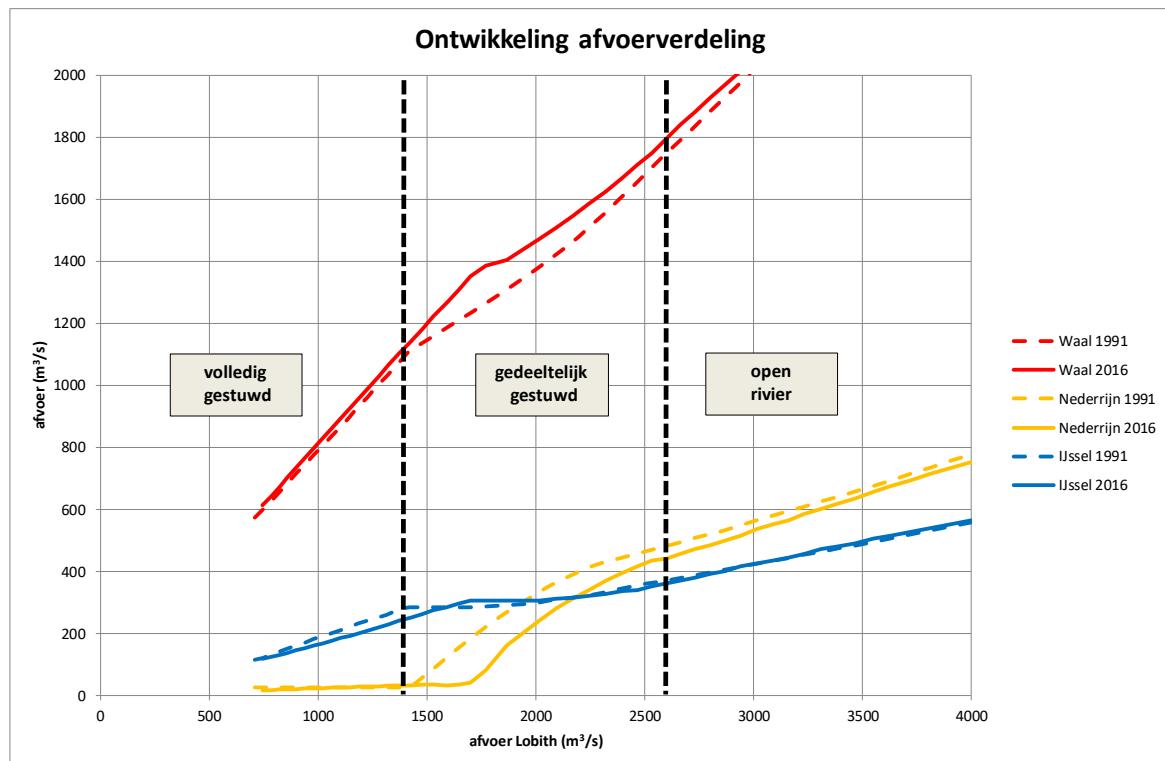
Figuur 2.10 geeft een overzicht van gemeten veranderingen in de afvoerverdeling over de drie takken in de periode 1991 – 2016. Hierin is de invloed van de bodemveranderingen en de werking van de stuwe bij Driel terug te zien. De afvoer naar de Waal neemt in alle situaties toe als gevolg van de relatief grote erosie van de Boven-Waal. Bij lage afvoeren gaat dit vrijwel geheel ten koste van de IJssel, omdat de afvoer naar de Neder-Rijn door stuwe Driel zoveel mogelijk wordt gehandhaafd op het minimum van ongeveer 25 m<sup>3</sup>/s.

Het moment dat de stuwe gedeeltelijk opengaat is afhankelijk van de waterstand bij Lobith. Door de bodemerosie op de Boven-Rijn wordt de desbetreffende waterstand bij Lobith bereikt bij een steeds grotere afvoer. Dit is terug te zien in Figuur 2.10 in de knik van de afvoer naar de Neder-Rijn. In 1991 ging de stuwe al bij een afvoer van 1400 m<sup>3</sup>/s bij Lobith gedeeltelijk open, in 2016 gebeurt dit pas bij een afvoer van ongeveer 1600 m<sup>3</sup>/s (Bol, 2016).

Omdat in het gedeeltelijk gestuwde bereik de afvoer naar de IJssel zoveel mogelijk wordt gehandhaafd (door te sturen op de waterstand bij de IJsselkop) gaat de toename van afvoer naar de Waal hier ten koste van de afvoer naar de Neder-Rijn.

Bij nog hogere afvoeren gaat stuwdienst Driel (net als de andere twee stuwen verder benedenstroms op de Neder-Rijn) open. Ook dit moment is afhankelijk van de waterstand bij Lobith. Werd in 1991 deze waterstand al bij een afvoer van 2300 m<sup>3</sup>/s bij Lobith bereikt, in 2016 werd de stuwdienst pas bij een afvoer van ongeveer 2600 m<sup>3</sup>/s getrokken (Bol, 2016).

Alleen in het bereik waarin de stuwen volledig zijn geopend, zijn de veranderingen in afvoerverdeling geheel toe te schrijven aan veranderingen in de riviergeometrie. Door ongelijke bodemerosie bij de Pannerdense Kop is de afvoer naar de Waal toegenomen ten opzichte van het Pannerdensch Kanaal. Ook bij de IJsselkop is sprake van ongelijke bodemerosie, waardoor het aandeel van de IJssel steeds groter is geworden. Hoewel de aanvoer via het Pannerdensch Kanaal is afgenomen is de afvoer naar de IJssel daarom ongeveer gelijk gebleven en komt de afname geheel voor rekening van de Neder-Rijn.



Figuur 2.10 Gemeten trends in afvoeren Rijntakken (bron: RWS-ON, Rico Tönis)

De veranderingen in de afvoerverdeling versterken het proces van ongelijke erosie verder. De toename van de afvoer naar de Waal en de IJssel vergroot de erosie van het zomerbed daar, terwijl de sedimentatie op het traject IJsselkop – Driel verder toeneemt doordat stuwdienst Driel steeds vaker dichtstaat.

## 2.2.2 Maas

### 2.2.2.1 Prognose 2020 – 2050

Voor de Maas is een prognose van bodemverandering in de periode 2020 – 2050 al zeer onzeker. De metingen van bodemhoogte die hiervoor gebruikt kunnen worden (verwerkt voor de jaren 1995, 2004 en jaarlijks in de periode 2007 – 2017) laten een grote variatie aan bodemveranderingen zien.

Deze veranderingen worden door verschillende processen veroorzaakt, die elk door een andere tijdschaal worden gekenmerkt. Het gaat hierbij bijvoorbeeld om de effecten van:

- Historische ingrepen (o.a. normalisatie en aanleg van stuwen in de 19<sup>e</sup> en 20<sup>ste</sup> eeuw), waarop de rivier vertraagd reageert
- Recente rivierverruimingsmaatregelen in het kader van de Maaswerken (1997 – 2027)
- Doorgaande zand- en grindwinning, met name sinds de 20<sup>ste</sup> eeuw
- De aanleg van grinddempels in de Grensmaas (2007 – 2010, met recente aanpassingen in 2017 en 2018 (De Jong, 2021))
- De aanleg van natuurvriendelijke oevers (2008 – 2017, Buijse et al. (2019))

Vanwege de grote variatie aan bodemveranderingen en de veelheid aan onderliggende processen is het niet eenvoudig om langetermijntrends uit de bodemmetingen te destilleren. De analyse wordt verder bemoeilijkt door non-uniformiteit van de meetmethoden en twijfels over de juistheid van bepaalde metingen.

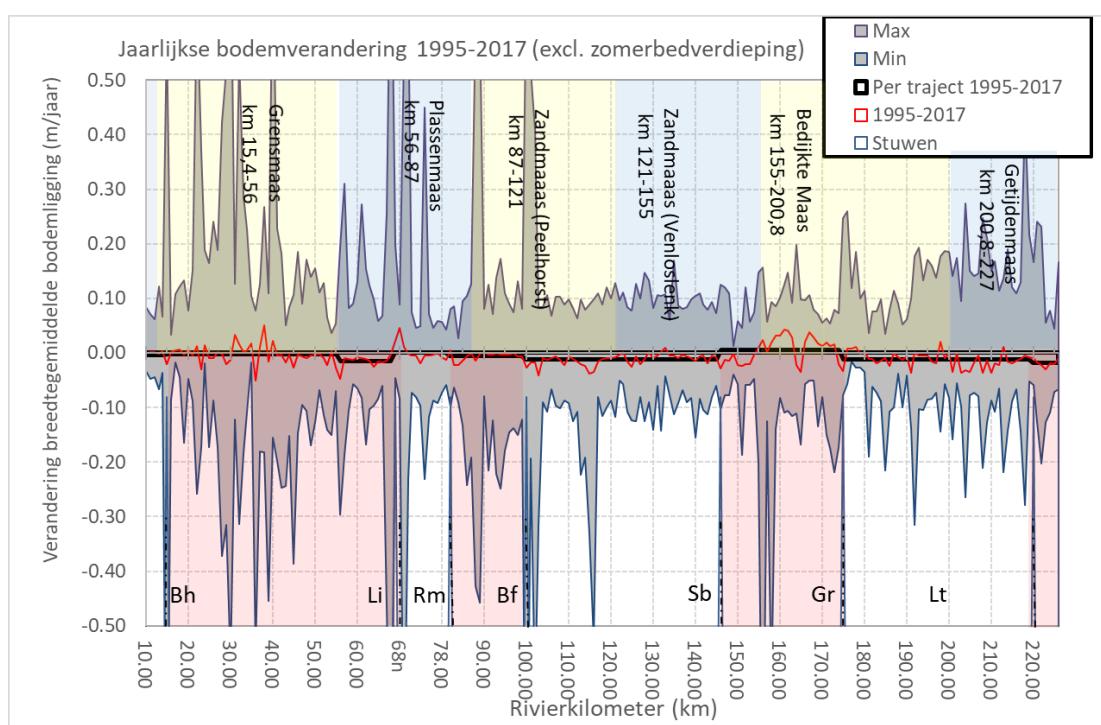
Sloff (2020) geeft een overzicht van verschillende analyses die op basis van bovengenoemde gegevens zijn uitgevoerd. Naast de resultaten van Ten Brinke (2019) en Zuijderwijk et al. (2020) presenteert hij uitkomsten van een nieuwe, door hemzelf uitgevoerde analyse.

De prognose van Zuijderwijk et al. is gebaseerd op de analyse van Ten Brinke voor de periode 1995 – 2007. De analyse van Sloff verschilt op twee belangrijke punten van de analyse van Ten Brinke. Ten eerste gebruikt Sloff een andere dataset dan Ten Brinke, waarin recente metingen uit de periode 2011-2017 zijn opgenomen, maar de meting uit 2007 juist is weggelaten. Deze is waarschijnlijk niet correct uitgevoerd (en daarom ook afgekeurd door Rijkswaterstaat). Daarnaast heeft Sloff bodemveranderingen uit de metingen verwijderd die het directe resultaat van zomerbedverdieping waren. Op deze manier kan meer inzicht worden verkregen in de autonome processen die in de geanalyseerde periode een rol speelden.

Tabel 2.7 geeft een overzicht van de resultaten uit de drie bovengenoemde studies. De trends in de analyse van Sloff voor de periode 1995-2017 blijken aanzienlijk kleiner dan de trends volgens Ten Brinke (1995-2007). Naast het resultaat voor de hele periode zijn in de rechterkolom ook de door Sloff bepaalde trens voor 2011-2017 gegeven. Hieruit blijkt dat een aantal trajecten die in het verleden erodeerden in deze recente periode gemiddeld genomen stabiel waren of zelfs sedimentatie vertoonden. Belangrijk om hierbij te beseffen is dat de meeste trajecten van jaar tot jaar geen consistente daling of stijging van de bodem vertonen, maar afwisselend eroderen en sedimenteren. De trajectgemiddelde, langjarige trends worden vaak sterk beïnvloed door enkele grote veranderingen op een schaal in tijd en ruimte die een ordegraad kleiner is (één jaar, enkele kilometers). Dit wordt geïllustreerd door Figuur 2.11, waarin de bandbreedte van de jaarlijks waargenomen bodemveranderingen per kilometervak is weergegeven, samen met het langjarig gemiddelde per kilometer en per traject. Deze observatie verklaart ook de grote verschillen tussen de uitkomsten van Ten Brinke en Sloff.

Tabel 2.7 Gemiddelde bodemverandering per traject volgens Ten Brinke (2019), volgens de prognose 2020-2050 voor de Quickscan IRM (Zuijderwijk et al., 2020) en volgens de resultaten van aanvullende trendanalyse van de data van Kragten (2018) voor de periode 1995-2017 en 2011-2017. Bron: Sloff (2020).

|                                       | Ten Brinke (2019) | Zuijderwijk et al. (2020) | Sloff (2020) |           |
|---------------------------------------|-------------------|---------------------------|--------------|-----------|
| Traject                               | 1995-2007         | 2020-2050 (prognose)      | 1995-2017    | 2011-2017 |
| Bovenmaas (km 2-15,4)                 | 0                 | 0                         | -0,4         | -0,2      |
| Grensmaas (km 15,4-56)                | -3,3              | -2,0                      | -0,3         | +0,2      |
| Plassenmaas (km 56-87)                | -2,8              | -1,0                      | -0,8         | +0,9      |
| Zandmaas deel Peelhorst (km 87-121)   | -2,5              | -0,7                      | -1,2         | -0,9      |
| Zandmaas deel Venloslenk (km 121-155) | -2,5              | -0,6                      | -1,0         | -0,3      |
| Bedijkte Maas (km 155-200,8)          | -6,2              | -0,4                      | +0,3         | +0,3      |
| Getijdenmaas (km 200,8-227)           | -4,5              | +0,5                      | -1,8         | +1,0      |



Figuur 2.11 Bodemveranderingen in de periode 1995-2017 in de Maas volgens Kragten (2018). In grijs de bandbreedte van de jaarlijks waargenomen bodemveranderingen per kilometersvak. De rode lijn geeft het gemiddelde van deze veranderingen over de periode 1995-2017. Vervolgens zijn deze resultaten nog per traject gemiddeld (zwarte lijn).

De door Zuijderwijk et al. voorgestelde trends in de IRM Quickscan voor de periode tot 2050 zijn over het algemeen vergelijkbaar met de resultaten van Sloff. Gelet op de grote variatie in bodemveranderingen en de diversiteit van oorzaken is het echter zeer onzeker of deze trends zich voort zullen zetten.

Om de prognose te verbeteren moet eerst meer inzicht worden verkregen in de sedimentbalans van de Maas, ofwel het aanbod en het transport van de verschillende sedimentfracties (grind, zand en slab). Dit vormt een belangrijke leemte in onze kennis van de Maas.

## 2.2.2.2

### Bodemveranderingen na 2050

Voor de verwachte bodemveranderingen na 2050 in de Maas geldt gedeeltelijk hetzelfde als voor de Rijn. De trends zijn hoogst onzeker, maar we kunnen wel enkele algemene uitspraken doen: de invloed van grootschalige ingrepen in het verleden zal steeds verder afnemen terwijl de effecten van rivierverruiming juist zichtbaar zullen worden. Ook zeespiegelstijging en veranderingen in het afvoerregime beïnvloeden de morfologie.

Toch zijn er ook belangrijke verschillen in morfologische ontwikkeling tussen de Maas en de Rijn. Zo is de morfologische activiteit in de Maas klein ten opzichte van die in de Rijn. Het grove bodemmateriaal van de Maas wordt vrijwel alleen bij hoge afvoeren getransporteerd. Asselman et al. (2018) stellen dat zo'n 80% van het sedimenttransport in de Maas plaatsvindt in ongeveer 10% van de tijd. De toename van extreme afvoeren door klimaatverandering kan voor de Maas dus grotere implicaties hebben dan voor de Rijn, waar sedimenttransport ook bij lagere afvoeren plaatsvindt.

Daarnaast is de opbouw van de bodem van de Maas belangrijk voor toekomstige bodemveranderingen. Een schematisch langsprofiel van deze opbouw, gemaakt door Meijer et al. (2011), is gegeven in Bijlage B. Onder een toplaag die voornamelijk uit grof zand en grind bestaat zijn op veel plaatsen lagen van fijner sediment aanwezig. Op plekken waar de grove toplaag dun is kan het onderliggende fijne sediment bij hoogwater bloot komen te liggen. Dit kan leiden tot lokaal versterkte erosie, terwijl verder benedenstroms het aanbod van sediment toeneemt. Tijdens het hoogwater van juli 2021 zijn met name in de Grensmaas op deze manier enkele diepe erosiekuilen ontstaan (Barneveld et al., 2022).

Ten slotte heeft doorgaande zand- en grindwinning in het zomerbed en de uiterwaarden een grote invloed op de morfologie van de Maas, waar het sedimentaanbod toch al zeer gering is. Wanneer delfstoffenwinning en sedimentonttrekkingen bij baggeronderhoud niet aan banden worden gelegd zullen deze leiden tot verdere bodemerosie.

## 2.2.3

### Kennisvragen

- Wat is de sedimentbalans van de Maas? Waar komt het aanbod van slijf, zand en grind vandaan, en welke ontrekkingen vinden plaats? Wat is het effect van de stuwen en hun beheer?
- Wat zijn de effecten van een mogelijke vergroting van de bodem van de Boven-Rijn en Waal?
- Hoe kunnen de splitsingspunten van de Rijn zich morfologisch ontwikkelen? Kunnen zich plotseling grote morfologische veranderingen voltrekken?
- Hoe zal het aanbod van sediment uit landen bovenstroms van Nederland in de toekomst veranderen?
- Wanneer zullen dieper gelegen pakketten van fijn sediment onder de Rijn en de Maas bloot komen te liggen?

### 3 Knelpunten voor scheepvaart

#### 3.1 Achtergrond

De binnenvaart vormt een groot aandeel van het totale goederenvervoer naar Duitsland. De beladingsgraad van de schepen over deze hoofdtransportas is afhankelijk van de diepte waarop afgeladen kan worden en de capaciteit (en vlotheid) van de vaarweg is afhankelijk van de breedte die benut kan worden door de scheepvaart. Variaties in de bodemhoogte en rivieraafvoer beïnvloeden zowel de diepte als de breedte. Door rivieronderhoud en rivierkundige maatregelen kan de kwaliteit van de vaarweg tijdelijk worden verbeterd, maar slechts met beperkte effectiviteit.

#### 3.2 Probleemdefinitie en uitgangspunten

De bevaarbaarheid van de rivieren wordt bedreigd door klimaatverandering en doorzettende bodemerosie. Door klimaatverandering komen lagere afvoeren vaker voor en wordt de afvoer nog lager, waardoor de beschikbare diepgang afneemt. Als gevolg van bodemerosie daalt de waterstand en vormen vaste bodemlagen een grotere drempel. Daarnaast zorgt ongelijke bodemerosie ervoor dat de afvoerverdeling tijdens laagwater kan verschuiven waardoor op sommige Rijntakken de waterdiepte nog verder afneemt.

In het programma Klimaatbestendige Netwerken is uitgebreid onderzoek gedaan naar de status van het Hoofdvaarwegennet onder klimaatverandering en bodemerosie. De horizon waarnaar gekeken wordt en het type maatregelen hebben echter maar een beperkt toepassingsbereik. In deze strategische verkenning wordt aan de hand van de studies onderzocht wanneer knelpunten worden bereikt.

De volgende onderzoeks vragen worden in deze verkenning behandeld:

- 1 Wanneer voldoet de vaarweg niet meer met betrekking tot de afgesproken waterdiepte volgens de Akte van Mannheim?
- 2 Wanneer (bij welke mate van klimaatverandering) wordt de vlotheid van de rivier als vaarweg onacceptabel?
- 3 Wat is het effect van bodemerosie op de bereikbaarheid van aansluitende kanalen?
- 4 Wat is de maximaal haalbare toename in waterdiepte door rivierkundige maatregelen?

Opgemerkt wordt dat deze studie geen analyse van ruimtelijke knelpunten bevat. Hiervoor wordt verwezen naar bestaande evaluaties in Klimaatbestendige Netwerken (De Jong & Van der Mark, 2021) en naar lopende evaluaties in Integraal Riviermanagement (Asselman et al., 2022a). In beide studies wordt het effect van klimaatverandering en bodemerosie op de ondiepten in de rivier en de aansluitingen op de kanalen uitgebreid beschouwd.

Om de onderzoeks vragen goed te kunnen beantwoorden volgt hieronder eerst een discussie over gewenste waterdiepte en de acceptatie van perioden van lage rivieraafvoer.

##### 3.2.1 Discussie over gewenste waterdiepte op de rivier

In het beoordelen van de waterdiepte van een rivier als vaarweg kan rekening gehouden worden met verschillende aspecten. De diepgang van de beladen scheepvaart op de Rijn varieert tussen de 1,5 en 4 m, met een mediaan op een diepgang van ongeveer 2,5 m (De Jong, 2020a).

Vanuit internationale afspraken in de Akte van Mannheim wordt voor Nederland aangehouden dat bij de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA, de afvoer die 20 dagen per jaar wordt onderschreden) een waterdiepte van 2,8 m beschikbaar moet zijn voor de scheepvaart.

Een diepte van 2,8 m betekent nog niet dat ook met een diepgang van 2,8 m kan worden gevaren. Door de inzinking van een varend schip<sup>1</sup> en de gewenste kielspeling<sup>2</sup> ten opzichte van de bodem dient een geringere diepgang aangehouden te worden (zie ook de discussie in De Jong & Ottevanger, 2021). De keuze voor de mogelijke diepgang is daarnaast afhankelijk van het meest beperkende punt op deze reis. De ondiepten zijn daarbij te onderscheiden in drie groepen:

1. Alluviale ondieptes door de vorming van rivierduinen of rivierbanken in het zomerbed van de rivier. De morfodynamiek is het sterkst bij hogere afvoeren en leidt tot duinen met hoogtes tot meer dan 1 m (van top tot teen) (Stuparu en Ottevanger, 2017). Op momenten dat deze ondiepten beperkend zijn voor de scheepvaart, worden ze door baggeronderhoud verdiept tot wordt voldaan aan de diepte van 2,8 m bij OLA. Boven kabels en leidingen dient een minimale dekkingsgraad gehanteerd te worden en zijn daarom niet-baggerlocaties gedefinieerd. In de praktijk blijken deze locaties de grootste ondiepten te vormen in de door Rijkswaterstaat gepubliceerde Minst Gepeilde Diepte (MGD). De MGD is afhankelijk van de bodemdynamiek en verschilt daardoor van jaar tot jaar. Opgemerkt wordt dat de MGD vaak aan de rand van de vaarweg ligt waardoor ervaren schippers ook om de ondiepte heen kunnen varen. De MGD vormt dus niet altijd het grootste knelpunt voor de scheepvaart.
2. Ondiepte bij vaste lagen worden veroorzaakt doordat de rivierbodem gedurende de afgelopen decennia meerdere decimeters is gedaald, met uitzondering van locaties waar de rivierbodem in het verleden is vastgelegd (bijvoorbeeld door steenbestorting). Deze "vaste lagen" zijn in het verleden bedoeld ter verbetering van de vaarweg: een constante diepte over de hele riviergebreedte. Omdat de vaste lagen over vrijwel de hele breedte van de vaargeul zijn aangelegd kan er niet omheen gevaren worden. Daarnaast zorgt de verondieping van het doorstroomoppervlak voor een grotere inzinking waardoor een grote kielspeling gewenst is (De Jong & Ottevanger, 2021).
3. Ondiepte bij sluisdempels langs de rivier worden veroorzaakt doordat de rivierwaterstand daalt door lage rivieraafvoer of bodemerosie. Bij de sluizen dient rekening gehouden te worden met voldoende kielspeling boven de drempel. Volgens de richtlijnen vaarwegen (Koedijk, 2020) is deze benodigde kielspeling minimaal 0,7 m (klasse V) of 1,0 m (klasse VI, langs de rivieren enkel bij Tiel).

In de studie voor Klimaatbestendige Netwerken (De Jong & Van der Mark, 2021) is onderzoek gedaan naar de ondiepten binnen de vaargeul. Een locatie die vaak de grootste ondiepte vormt is de alluviale ondiepte benedenstroms van de vaste laag bij Nijmegen (rkm 887). Deze locatie wordt ook regelmatig aangemerkt als MGD zoals aangegeven in Figuur 3.1. De waterdiepte boven de vaste laag zelf is veel groter. Toch wordt deze vaste laag desondanks door de scheepvaart regelmatig aangemerkt als beperkende locatie in de Rijn. In Figuur 3.2 is te zien dat bij OLA de waterdiepte bij de alluviale ondiepte Nijmegen slechts 2,4 m is, ten opzichte van 3,2 m boven de vaste laag. De vaste laag wordt echter als knelpunt ervaren omdat hier niet omheen gevaren kan worden.

---

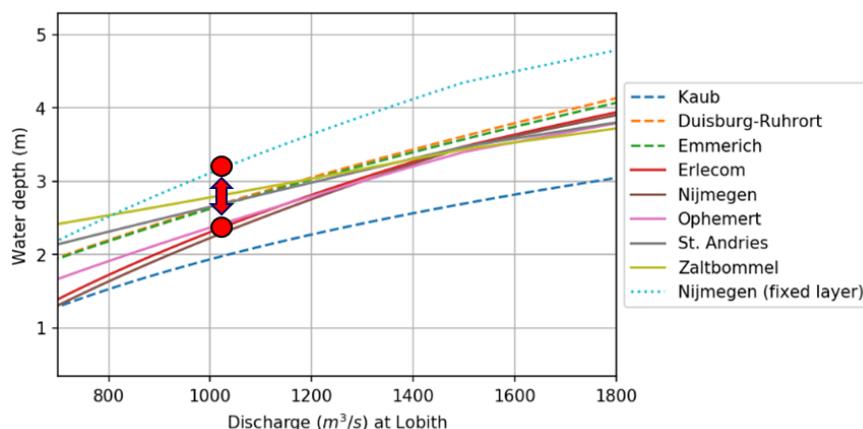
<sup>1</sup> Door de retourstroming rondom een schip daalt lokaal de waterspiegel enkele decimeters. Het schip volgt deze daling.

<sup>2</sup> Met de kielspeling wordt rekening gehouden met bijvoorbeeld wind en golven. Onderscheid wordt gemaakt tussen de netto (of dynamische) kielspeling (de resterende kielspeling van een varend schip) en de bruto (of statische) kielspeling (de kielspeling van een stilliggend schip).

Mogelijk wordt dit nog versterkt door de extra inzinking die bij vaste lagen ontstaat door het kleine doorstroomprofiel.



Figuur 3.1 Bodemhoogte en MGD-registraties te Nijmegen. (De Jong & Van der Mark, 2021)



Figuur 3.2 Afvoer-waterdiepte relatie voor meerdere locaties langs de Rijn. De lijnstijl geeft het type ondiepte weer: Duitse pegels (gestreept), Nederlandse MGD (doorgetrokken), en vaste lagen (gestippeld). (De Jong, 2020b). De stippen geven de waterdiepte bij de huidige OLA bij de MGD-locatie Nijmegen en de vaste laag Nijmegen, de pijl geeft hier het verschil tussen.

### 3.2.2

#### Discussie over acceptatie van ondiepten

Naast de gewenste waterdiepte moet bij het beoordelen van het effect van droogte (lage rivieraafvoer) op de scheepvaart ook rekening gehouden worden met de duur van droogte en de regelmaat waarbij deze optreedt. Vrijwel ieder jaar is er wel een periode met lage rivieraafvoer, en de transportsector is gewend om hiermee om te gaan. Ook de gemiddelde situatie waarbij de diepte van 2,8 m zo'n 20 dagen per jaar niet beschikbaar is, is wel problematisch (Van Dorsser & Buitendijk, 2018), maar niet ontwrichtend.

Laagwater wordt pas echt problematisch als een droge periode gedurende langere tijd aan blijft houden, en wanneer de diepte nog kleiner wordt dan 2,8 m. Er wordt dan ingeteerd op voorraden totdat ook productieketens beïnvloed worden en de economische schade nog groter wordt. De droogte van 2018 was zo'n periode waarin grote economische schade ontstond (Erasmus-UTP, 2020). Deze gebeurtenis had echter in het huidige klimaat slechts een terugkeertijd van eens in de 60 jaar (De Jong, 2019).

In de bedrijfsvoering van het transport spelen dergelijke extreme gebeurtenissen vermoedelijk maar weinig mee. Dit wordt mogelijk anders wanneer de terugkeertijd 10 jaar of minder zou beslaan.

In deze studie wordt daarom gekeken op welk moment (bij hoeveel klimaatverandering en bodemerosie) de beperking in de waterdiepte zoals is opgetreden in 2018 een terugkeertijd heeft van ongeveer 10 jaar. Op dat moment zou de rivier niet meer kunnen voldoen aan de vraag of eis die er nu vanuit de scheepvaart aan wordt gesteld.

### 3.3 Methode

#### *Probleemanalyse*

Op basis van een literatuurstudie (KBN-HVWN, De Jong & Van der Mark, 2021) is de trend in rivieraanvoeren en bodemligging afgeleid tot 2050. Deze trend wordt doorgetrokken richting de verdere toekomst om het bereiken van knelpunten te beoordelen. Zo wordt bepaald op welk moment de rivier niet meer kan voldoen aan de eisen die er nu vanuit de scheepvaart aan worden gesteld.

#### *Verkenning mogelijke maatregelen*

Wanneer de waterdiepte in de rivier te vaak te klein is, dan kan deze worden vergroot door de rivier te versmallen. Een analytisch model is opgezet met de dimensies van de Waal. Dit model wordt gebruikt om in te schatten hoeveel opstuwing er verkregen kan worden door versmalling van de rivier. Zie ook Bijlage C.

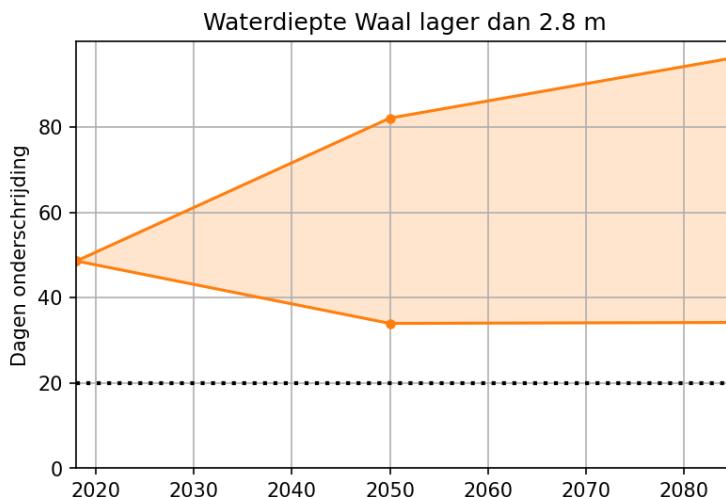
### 3.4 Resultaten

#### 3.4.1 Rivier als vaarweg voldoet niet aan internationale afspraken in de Akte van Mannheim

Volgens de Akte van Mannheim mag de diepte op de Waal maximaal 20 dagen per jaar minder zijn dan 2,8 m. Door de ondiepte bij MGD's wordt deze waterdiepte bij de huidige OLA al niet bereikt (zie Figuur 3.2, bij Nijmegen is dit nu 2,4 m). Uit dezezelfde figuur kan geconcludeerd worden dat nu bij een afvoer van 1200 m<sup>3</sup>/s de diepte ongeveer 2,8 m is. De huidige OLA bedraagt echter 1020 m<sup>3</sup>/s.

In Figuur 3.3 is weergegeven hoe veel vaker een afvoer van 1200 m<sup>3</sup>/s wordt onderschreden, en daardoor de waterdiepte kleiner wordt dan 2,8 m volgens de klimaatscenario's G<sub>L</sub> en W<sub>Hdry</sub>. Uit de resultaten blijkt dat nu bijna 50 dagen per jaar de diepte niet gehaald wordt, en dat dit toe kan nemen tot 80 dagen in 2050 en ruim 90 dagen in 2085 volgens scenario W<sub>Hdry</sub>.

Bovenstaande berekening gaat uit van een gelijk blijvende afvoerverdeling. Door bodemerosie wordt de afvoerverdeling beïnvloed en worden daarnaast ook vaste lagen een grotere drempel. Beide risico's worden onderzocht in IRM (Asselman et al., 2022a).



Figuur 3.3 Aantal dagen dat de waterdiepte kleiner is dan 2,8 m. De ondergrens wordt gegeven door scenario  $G_L$  en de bovengrens door scenario  $W_{\text{dry}}$ . Op basis van interpolatie tussen de data uit De Jong (2019). Volgens de Akte van Mannheim zou dit maximaal 20 dagen mogen zijn.

### 3.4.2

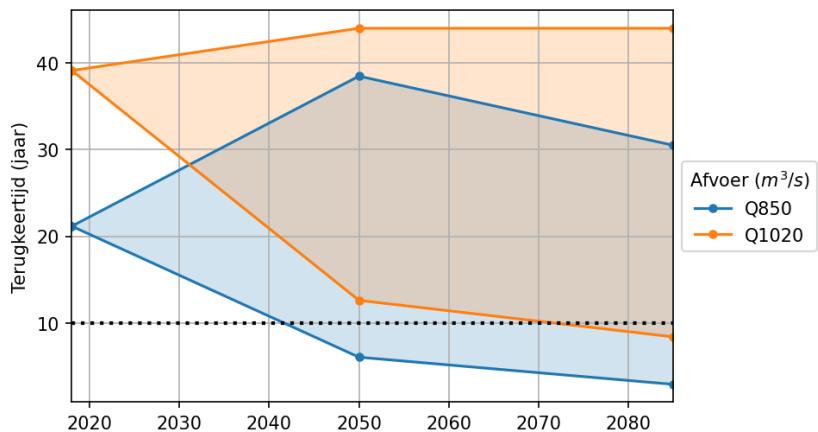
#### Betrouwbaarheid van de rivier als vaarweg niet langer acceptabel door klimaatverandering

Zoals beschreven in paragraaf 3.2.2 is de betrouwbaarheid van de rivier als vaarweg niet langer acceptabel als een lage-afvoerperiode zoals 2018 een kans van voorkomen heeft van 1/10 per jaar (een terugkeertijd van 10 jaar). In Figuur 3.4 is berekend hoe groot de kans van voorkomen was in 2018 en hoe deze kans zich ontwikkelt voor klimaatscenario's met zichtjaar 2050 en 2085 ( $G_L$  en  $W_{\text{dry}}$ ). Er wordt gekeken naar de combinatie van een afvoerniveau voor een gegeven duur. De studie is uitgevoerd voor een afvoer van  $1020 \text{ m}^3/\text{s}$  (124 dagen onderschreden in 2018) en voor  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  (45 dagen onderschreden in 2018).<sup>3</sup>

Figuur 3.4 toont de resultaten. Een afvoer van  $1020 \text{ m}^3/\text{s}$  voor een duur van 124 dagen heeft in het huidige klimaat (scenario 2018) een terugkeertijd van 39 jaar. In het klimaatscenario  $G_L$  neemt de terugkeertijd toe naar 43 jaar in zowel 2050 en 2085. In het klimaatscenario  $W_{\text{dry}}$  neemt de kans toe en neemt de terugkeertijd af naar 12 jaar in 2050 en 8 jaar in 2085. De resultaten van  $850 \text{ m}^3/\text{s}$  voor een duur van 45 dagen heeft in 2018 al een grotere kans van voorkomen (terugkeertijd van 21 jaar) en neemt af tot 7 jaar (2050) of 4 jaar (2085).

Uit de resultaten wordt geconcludeerd dat in het scenario  $W_{\text{dry}}$  tussen 2040 en 2070 de kans van voorkomen groter wordt dan 1/10 jaar. De bandbreedte in resultaten geeft wel aan dat de uitkomsten gevoelig zijn voor keuzes in afvoerniveau en klimaatscenario.

<sup>3</sup> Opgemerkt wordt dat de resultaten hier verschillen van de studie van bijvoorbeeld Kramer (2018). Door Kramer wordt uitgegaan van de kans van een droogte-gebeurtenis ( $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ ), terwijl in de data uit deze studie (De Jong, 2019) wordt gekeken naar een droog jaar. Kramer concludeert bijvoorbeeld 4 kortere droogte-periodes in 1921, terwijl De Jong de droogte niet als onafhankelijk beschouwt en de som van deze periodes beschouwt. Daarnaast gebruikt De Jong enkel de 100-jarige reeks (1911-2011) zonder deze te verlengen tot 2018.



Figuur 3.4 Terugkeertijd van een afvoer van "45 dagen minder dan  $850 \text{ m}^3/\text{s}$ " en "124 dagen minder dan  $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ ", overeenkomend met de droogte van 2018. De bovengrens wordt gegeven door scenario GL en de ondergrens door scenario WH<sub>dry</sub>. Op basis van data uit De Jong (2019). De betrouwbaarheid is verondersteld als acceptabel zolang de terugkeertijd groter is dan 10 jaar.

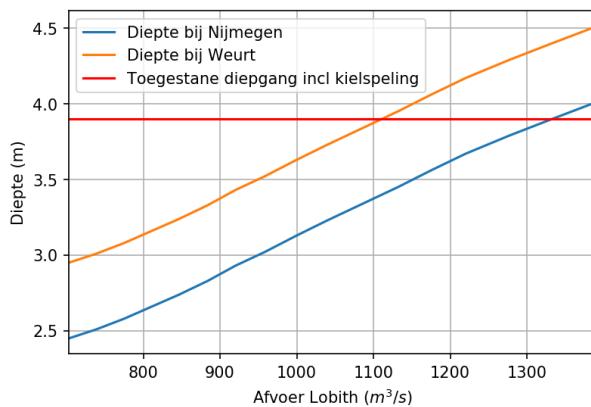
### 3.4.3

#### Bereikbaarheid van de rivier neemt af door bodemerosie

Door rivierkundige maatregelen uit het verleden en door beïnvloeding van de sedimenthuishouding, daalt ieder jaar de bodem in het zomerbed van de Rijntakken. Op de Boven-Waal is de gemeten bodemerosie het grootst: ongeveer 1,6 cm per jaar (Slhoff, 2019). Door de bodemerosie daalt de waterstand en wordt de afvoerverdeling beïnvloed. Om het effect op de waterstand te bepalen zijn modelberekeningen nodig. In dit project waren deze berekeningen niet vorhanden en is daarom uitgegaan van een waterstandsaling die gelijk is aan de bodemerosie: 1,6 cm per jaar. Dit is een overschatting van het werkelijke effect.

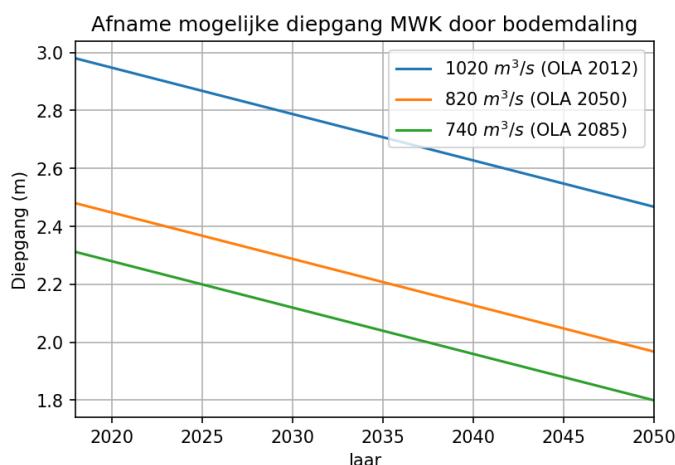
Na afronding van de werkzaamheden zijn in het project IRM wel hydraulische berekeningen uitgevoerd. Die geven verder meer gedetailleerd inzicht in de kwantitatieve effecten van bodemerosie op afvoerverdeling en waterstand (zie Asselman et al., 2022a).

Diverse grote problemen door bodemerosie ontstaan nabij Nijmegen: de vaste laag in het zomerbed vormt een drempel op de Waal, en de drempel en voorhaven van sluis Weurt vormen een beperking voor de bereikbaarheid van het Maas-Waalkanaal (De Jong & Van der Mark, 2021). De waterdiepte volgens de betreklijnen (2018) en de hoogte van de vaste bodemlagen is gegeven in Figuur 3.5. We zien hierin dat de 2,8 m bij Nijmegen wordt onderschreden bij  $900 \text{ m}^3/\text{s}$ . De toegestane diepgang naar het Maas-Waalkanaal van 3,2 m (bij 0,7 m kielspeling) is niet meer mogelijk bij afvoeren lager dan  $1100 \text{ m}^3/\text{s}$  door onvoldoende diepte boven de drempel bij Weurt. De beschikbare diepte naar het Maas-Waalkanaal (MWK) bij de huidige OLA ( $1020 \text{ m}^3/\text{s}$ ) is 3,7 m, overeenkomend met een diepgang van 3,0 m (bij een kielspeling van 0,7 m).



Figuur 3.5 Waterdiepte bij vaste laag Nijmegen en westkolk Weurt. Berekend door vergelijking van betreklijnen 2018 met de bodemhoogte van de benedenstroomse vaste laag (2,0 m+NAP) en de sluisdrempel westkolk Weurt (1,5 m+NAP) (N.B. de drempel van de oostkolk ligt nu nog hoger: 3,0 m+NAP). De rode lijn geeft aan welke waterdiepte noodzakelijk is voor passage van sluis Weurt (3,2 m diepgang + 0,7 m kielspeling).

Bij uitblijven van verdere maatregelen is de prognose dat de bodemerosietrends doorzetten (Slooff, 2019). Figuur 3.6 toont de afname van de beschikbare diepgang naar het MWK, uitgaande van de vereenvoudiging dat de waterstandsdaling op de Waal gelijk is aan de bodemerosie. De figuur laat zien dat de bij de huidige OLA beschikbare diepgang over sluis Weurt af kan nemen tot 2,5 m in 2050. Dit komt dus enkel door de doorgaande bodemerosie op de Waal. Als we daarnaast ook nog meenemen dat door klimaatverandering de OLA daalt, dan neemt de diepgang af tot minder dan 2,0 m.



Figuur 3.6 Afname in beschikbare diepgang bij dalende waterstanden op de Bovenwaal van 1,6 cm per jaar (uitgaande van de vereenvoudiging dat de waterstandsdaling gelijk is aan de bodemerosie). Voor de huidige OLA en de mogelijke OLA in klimaatscenario W<sub>Hdry</sub> bij zichtjaren 2050 en 2085.

#### 3.4.4 Effectiviteit maatregelen

##### Mogelijke rivierkundige maatregelen

Internationale afspraken omtrent de Akte van Mannheim vragen om een waterdiepte van 2,8 m in de vaargeul bij de OLA.

Als de OLA lager wordt als gevolg van klimaatverandering, zijn er een aantal mogelijkheden om de vaarweg ook in deze nieuwe situatie voldoende diep te maken:

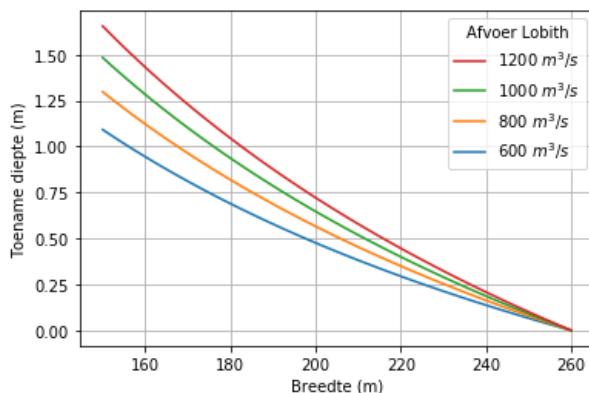
- 1 Het verhelpen van alle MGD-locaties. De huidige MGD's zijn relatief grote ondiepten omdat hier niet gebaggerd kan worden. Door onderzoek naar de diepte van kabels en leidingen kan mogelijk een deel van de niet-baggerlocaties komen te vervallen en kunnen de betreffende MGD's worden opgelost. Indien de kabels en leidingen een onvoldoende dikke dekkingslaag hebben, kan de ondiepte verholpen worden door de kabels en leidingen dieper te leggen. Op deze manier kan de vaardiepte vergroot worden.
- 2 Grootschalige suppletie. Erosie die in het verleden is opgetreden kan teruggedraaid worden door verhogen van de rivierbodem. Lokale ondieptes kunnen hierdoor weer verdwijnen. In essentie is de effectiviteit hierdoor gelijk aan het voorgaande punt.
- 3 Het verder uitdiepen van de vaargeul. Door de verlaging van de OLR, verlaagt de OLR en wordt het baggerreferentievak bijgesteld. Een te grote verdieping van de vaarweg zal uiteindelijk resulteren in het dalen van de waterstand. Als deze daling te groot is dan dient de bodem weer verder verlaagd te worden, enzovoort. Het is niet bekend hoeveel de vaarweg kan worden verdiept voordat de waterstand (significant) verandert. Omdat deze berekeningen complex zijn is dit hier buiten beschouwing gelaten.
- 4 Het versmallen van het zomerbed. Door het verlengen van kribben of de aanleg van langsdammen wordt de stromende breedte van de rivier verkleind, waardoor de diepte toeneemt. Onderdeel van deze maatregel is ook het (gedeeltelijke) vastleggen van de rivierbodem om te voorkomen dat de erosie wordt versterkt.

In dit onderzoek wordt de laatstgenoemde maatregel (het versmallen van het zomerbed) nader verkend.

#### Opstuwing door versmalling

Momenteel is de normaalbreedte van de Waal (de afstand tussen de kribben) ongeveer 260 m. Door de aanleg van langsdammen of het verlengen van kribben kan het stromende deel van de Waal worden versmald, waardoor extra opstuwing kan worden verkregen.

Met het analytische model is berekend hoeveel de diepte toe zou nemen bij een versmalling van het (stromende) zomerbed. De resultaten in Figuur 3.7 laten zien dat een versmalling tot 200 m, een opstuwing tussen 0,5 en 0,7 m geeft. Bij nog verdere versmalling kan nog meer opstuwing worden behaald. De opstuwing is afhankelijk van de afvoer: hoe lager de rivieraafvoer, des te geringer de opstuwing is als gevolg van het versmullen van het stromende zomerbed.



Figuur 3.7 Toename in de waterdiepte bij versmalling van het (stroomvoerende) zomerbed

Voor klimaatscenario WH<sub>dry</sub> geeft Tabel 3.1 aan hoeveel versmalling uitgevoerd moet worden om te blijven voldoen aan de huidige eisen. Hierbij is uitgegaan van twee beginsituaties. In de eerste is aangenomen dat de huidige diepte bij OLA 2,4 m is (werkelijke MGD). In dat geval zou de nu benodigde versmalling ongeveer 36 m bedragen. In de tweede situatie is aangenomen dat de vaarweg ter plaatse van de MGD's wordt verdiept, waardoor de huidige diepte uitkomt op 2,8 m. Er is dan geen versmalling nodig.

In 2050 zal de OLA bij klimaatscenario W<sub>Hdry</sub> nog maar 840 m<sup>3</sup>/s bedragen. De benodigde versmalling bedraagt dan 40 tot bijna 70 m. Wanneer ook in 2085 een vaardiepte van 2,8 m bij de dan verwachte OLA moet worden gerealiseerd is nog meer versmalling nodig (50 tot bijna 80 m).

*Tabel 3.1 Benodigde afname in zomerbedbreedte om bij OLA een waterdiepte van 2,8 m te krijgen.  
Uitgaande van de afname in OLA in klimaatscenario WH<sub>dry</sub>.*

|      | OLA<br>(m <sup>3</sup> /s) | Huidige ondiepten         |                              | Na oplossen huidige ondiepten<br>(+0,4 m) |                              |
|------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|---|------------------------------|
|      |                            | Beschikbare<br>diepte (m) | Benodigde<br>versmalling (m) | Beschikbare<br>diepte (m)                 | Benodigde<br>versmalling (m) |
| 2018 | 1020                       | 2,4                       | 36                           | 2,8                                       | 0                            |
| 2050 | 840                        | 2,0                       | 68                           | 2,4                                       | 40                           |
| 2085 | 720                        | 1,8                       | 77                           | 2,2                                       | 51                           |

Het realiseren van een dergelijke versmalling zal een gunstigere diepte voor de scheepvaart geven, maar de afname in breedte vormt juist weer een belemmering. Ter hoogte van de langsdammen tussen Wamel en Ophemert is het zomerbed versmald tot 230 m. Hoewel dit nog veel breder is dan de minimaal benodigde vaargeul van 150 m, wordt deze versmalling als significant en hinderlijk ervaren door schippers (Van der Mark & Van der Wijk, 2021). De AIS-gegevens geven echter op dit moment nog geen aanwijzing voor een verminderde scheepvaartcapaciteit op deze locatie (Indah-Everts & Hermans, 2021). De verwachting is echter dat een nog verdere versmalling van de vaarweg wel degelijk een afname in de scheepvaartcapaciteit geeft (Verschuren, 2020). Als de scheepvaartintensiteit deze capaciteit benadert, zal dit vermoedelijk grote effecten hebben op de vaarsnelheid (vlotheid) en nautische veiligheid.

Geconcludeerd wordt dat de extra waterdiepte die verkregen kan worden met een beperkte versmalling van de vaargeul beperkt is tot enkele decimeters. Als verregaande versmalling wordt doorgevoerd om te blijven voldoen aan de internationale afspraken, wordt vermoedelijk de breedte van de vaarweg beperkend voor de scheepvaartcapaciteit.

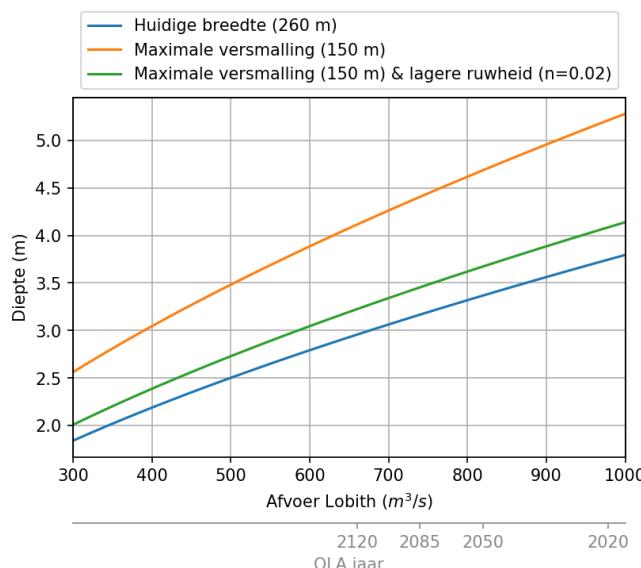
#### Fixeren van de rivierbodem van de Waal

Als onderdeel van rivierkundige maatregelen voor het versmallen van het stromende deel van het zomerbed van de rivier, is een grovere rivierbodem nodig om erosie te voorkomen. Hier worden de uitdagingen geschat bij de realisatie van een 'kanaal in de Waal'.

De waterdiepte in een waterweg wordt voor een deel bepaald door de weerstand van de bodem. In het schematiseren van deze weerstand wordt een ruwheidscoëfficiënt (bijvoorbeeld Manning) bepaald door de combinatie van de ruwheid van sedimentkorrels en de ruwheid van ribbels en onderwaterduinen. Beide ruwheden worden beïnvloed bij het fixeren van de bodem: de ruwheid kan afnemen door de lagere bodemdynamiek (minder ribbels, dus een kleinere vormruwheid), maar neemt toe door de grovere 'korrels' (grind of stenen in plaats van zand, dus een grotere korrelruwheid). Het is onbekend of dit gecombineerde effect de bodem gladder of ruwer zal maken.

Met het analytische model zijn enkele eenvoudige berekeningen uitgevoerd voor drie scenario's, waarvan de resultaten zijn weergegeven in Figuur 3.8. De blauwe lijn toont de gemiddelde waterdiepte als functie van de afvoer uitgaande van de huidige stromende breedte van het zomerbed van 260 m. Wanneer de stromende breedte afneemt tot 150 m en de ruwheid niet verandert, kan de gemiddelde waterdiepte met 0,75 tot ruim 1,5 m toenemen (vergelijk de blauwe en de oranje lijn in Figuur 3.8). Echter, wanneer de ruwheid afneemt zal dit effect kleiner zijn. Bij een ruwheid van  $n = 0,02 \text{ s/m}^{1/3}$  zal versmalling tot 150 m nog maar een extra diepte opleveren van ongeveer 0,2 m. Om de effectiviteit van een 'kanaal in de Waal' nauwkeuriger te bepalen is meer onderzoek nodig naar het effect van afdekking met grover materiaal op de ruwheid van het zomerbed.

Bij realisatie van een 'kanaal in de Waal' is het twijfelachtig of een diepte van 2,8 m voldoende is. Vanwege de veel constante diepte van de vaarweg, zal de retourstroming van schepen toenemen, waardoor ook de inzinking toeneemt. Daarnaast is de schade aan de romp van een schip significant groter bij aanvaring van een gefixeerde bodem dan bij een rivierduin. Geredeneerd kan worden dat dezelfde richtlijnen aangehouden moeten worden als voor kanalen: een minimale kielspeling van 40% van de diepgang. Voor een diepgang van 2,8 m, geeft dit een benodigde waterdiepte van 3,9 m. Bij dit uitgangspunt zijn de baten van het fixeren van de rivierbodem van de Waal een stuk kleiner, zo niet nihil.



*Figuur 3.8 Relatie tussen afvoer en diepte voor drie schematisaties. Merk op dat dit de gemiddelde waterdiepte betreft waardoor de diepte bij 'huidige breedte' veel groter lijkt dan de diepte die werkelijk beschikbaar is. Deze wordt immers vaak gelimiteerd door lokaal aanwezige banken en duinen. Bij toepassing van fixering van de bodem wordt aangenomen dat de rivier als een kanaal werkt en er geen lokale ondiepten meer zijn.*

### 3.5 Conclusies

Op basis van vereenvoudigde berekeningen en gekozen uitgangspunten is berekend wanneer knelpunten in de bereikbaarheid en betrouwbaarheid van de rivier worden bereikt. Hieruit worden de volgende conclusies getrokken:

- Bij de OLA is de MGD momenteel slechts 2,4 m. Dit is minder dan de vereiste diepte van 2,8 m. De bij OLA vereiste diepte wordt nu bijna 50 dagen per jaar onderschreden (in plaats van 20). Door klimaatverandering volgens het scenario  $W_{H,dry}$  kan de periode met minder dan 2,8 m waterdiepte toenemen naar 80 dagen in 2050.

- Volgens klimaatscenario W<sub>H,dry</sub> komt een droogte zoals 2018 vanaf 2040 à 2070 gemiddeld eens in de 10 jaar voor. Voor de scheepvaart zorgt dit voor een lage betrouwbaarheid van de rivier als vaarweg die als onacceptabel wordt gezien.
- Door bodemerosie dalen de waterstanden op de Boven-Waal. Bij vaste lagen zoals sluisdrempels neemt de waterdiepte af. Uitgaande van een afname in waterdiepte gelijk aan de bodemerosie, neemt bij 1020 m<sup>3</sup>/s de beschikbare diepgang bij sluis Weurt af van iets meer dan 2,9 m nu naar 2,5 m in 2050. Bij toepassing van een lagere OLA (als gevolg van klimaatverandering) kan dit zelfs verder afnemen tot minder dan 2,0 m.
- Extra diepte kan verkregen worden met langsdammen of kribverlenging. Echter, deze versmalling van de rivier is maar beperkt effectief voor het verkrijgen van extra waterdiepte. Bij het compenseren van de lagere waterdiepte door klimaatverandering met versmalling, zou de rivier te smal worden voor vlot (en veilig) transport.
- Het fixeren van de rivierbodem is geen garantie voor een grotere waterdiepte voor de scheepvaart. Door het verdwijnen van rivierduinen kan de waterdiepte nadelig beïnvloed worden. Bovendien neemt de inzinking toe, waardoor meer kielspeling nodig is (vergelijkbaar met een kanaal).

### 3.6

### Discussie

De internationale eisen vanuit de Akte van Mannheim zijn sturend in het baggeronderhoud van de rivier als vaarweg. Door lokale beperkingen is het nu al niet mogelijk overal aan de gewenste vaargeuldiepte van 2,8 m bij een OLA van 1020 m<sup>3</sup>/s te voldoen. Doorgaande bodemerosie en klimaatverandering maken dit in de toekomst nog lastiger. Hoewel de OLA bij Lobith nog tot eind 2031 gelijk blijft (CCR, 2022), is de verwachting uit klimaatscenario's dat de OLA in de toekomst (ver) af kan nemen. De verwachting is dat de beperkingen in de waterdiepte dan niet met baggeronderhoud gecompenseerd kunnen worden. Uit de studie blijkt dat de mogelijkheden met rivierkundige maatregelen mogelijk ook beperkt zijn. Het lijkt daarom noodzakelijk om de toekomstbestendigheid van de OLA-methodiek nader te beschouwen. Een eerste studie hiernaar is uitgevoerd binnen het programma Klimaatbestendige Netwerken (Van der Mark, 2022).

Ondanks de afname van de betrouwbaarheid van de rivier als vaarweg, blijft de binnenvaart een duurzame transportmethode waar in nationaal en Europees verband een grote groei in wordt geambieerd (Ministerie van Infra, 2022a). Dit vraagt wel om een andere inrichting van de logistieke keten. De opbouw van de vloot, het gebruik van opslag en de logistiek van de distributie zouden robuuster opgezet moeten worden om de consequenties van droogteperioden te verkleinen.

### 3.7

### Kennisvragen

Vanuit het onderzoek en de discussiesessie zijn de volgende onderzoeks vragen geformuleerd:

1. **Hoe verandert de ruwheid bij suppletie met grover materiaal?** Wat is het effect op de ruwheid van zeer grof materiaal om erosie tegen te gaan? Hoe ontwikkelen duinen zich? Hoe verandert de ruwheid als hier zich geen duinen meer vormen? Dit is belangrijk om te weten gezien het grote effect op laagwaterstanden.
2. **Hoe is opstuwing te realiseren?** Een versmalling met bijvoorbeeld langsdammen of anders? Wat is de lekkage naar oevergeulen (achter langsdammen) bij een optimaal ontwerp?
3. **Hoe is ophoging van de bodem het beste te realiseren?** Indien ophoging wordt gerealiseerd met grove stenen, wordt erosie tegengegaan op de suppletielocaties.

Deze strategie heeft echter meerdere (potentiële) nadelen. Het is duur en moeilijk omkeerbaar. Daarnaast is er kans op een netto lagere bodemruwheid, en daardoor minder opstuwing van waterstanden (zie onderzoeksraag 1). Wanneer de ophoging met fijner materiaal wordt uitgevoerd, kan hernieuwde erosie optreden en wordt de morfodynamiek mogelijk versterkt, waardoor meer gebaggerd moet worden. Dit leidt weer tot een toename van hinder voor de scheepvaart.

4. **Welke kielspeling is minimaal nodig op rivieren en bij vaste lagen?** Bij criteria voor de vaarwegdiepte op rivieren wordt enkel gekeken naar de waterdiepte zonder rekening te houden met kielspeling. Welke kielspeling moet worden gehanteerd bij alluviale ondiepten (MGD's), boven vaste lagen en bij een 'kanaal in de Waal' (versmalling zomerbed in combinatie met afdekking met grof materiaal)?
5. **Wat is de minimale benodigde breedte van de vaargeul op de Waal?** Onderzoek dient uitgevoerd te worden naar de werkelijke capaciteit van de huidige rivier en bij versmallingen. Kennis hierover ontbreekt nu, maar bevindingen van Verschuren (2020) en tijdens de droogte van 2018 kunnen een startpunt vormen voor dit onderzoek.
6. **Zijn stuwen op de Waal of een parallel kanaal op termijn een kansrijke oplossing?** Bij doorgaande klimaatverandering kan OLA zo ver afnemen dat ook bij een opgehoogde bodem (geen MGD's gerelateerd aan vaste lagen en sluisdrempels) niet meer kan worden voldaan aan een diepte van 2,8 m. Stuwen kunnen dan een oplossing vormen. Vragen:
  - Bij welke OLA en minimaal benodigde breedte is het niet meer mogelijk om 2,8 m diepte te garanderen en zouden stuwen in beeld komen?
  - Hoeveel stuwen zijn nodig en wat is de optimale locatie?
  - Hoeveel sluiskolken zijn nodig met welke afmetingen?
  - Wat is de opstuwendende werking van de stuwen en de sluiskolken tijdens hoogwater?
  - Wat is het effect op de afvoerverdeling bij laag- en hoogwater?Dit sluit aan bij het onderzoek van Ligtenberg (2022). Naast aanpassing van de Waal zelf kan ook de aanleg van een parallel kanaal (zoals het Julianakanaal parallel aan de Maas) als optie worden overwogen.
7. **Hoe kan gewerkt worden aan oplossingen van de huidige MGD's (ten gevolge van niet-baggerlocaties bij kabels en leidingen)?** Veel van de huidige MGD's ontstaan door overmatige aanzanding in combinatie met baggerbeperkingen. Deze niet-baggerlocaties worden ingesteld omdat er kabels en leidingen onder de rivier doorlopen en hierboven een minimale dekking benodigd is. Meer inzicht in de diepteliggings van de kabels en leidingen is nodig om scherpere baggerafspraken te kunnen onderbouwen. Resterende probleemlocaties kunnen verholpen worden door suppleties of door verplaatsing van de leidingen. Bij RWS loopt momenteel al een inventarisatie van de ligging van huidige kabels en leidingen.
8. **Hoe verandert de toekomstige vraag naar transport over water?** Voor een goede probleemanalyse is naast zicht op klimaatverandering en morfologische ontwikkelingen ook informatie nodig over de verandering van de vraag naar transport over water in de toekomst. Dit is mede afhankelijk van het type vracht dat in de toekomst vervoerd moet worden (bijvoorbeeld containers, droge en natte bulk).

- 9. Hoe kansrijk is “multi-modaliteit”?** Om na te gaan of transport over water (deels) vervangen kan worden door transport over weg of spoor zijn (indicatieve) berekeningen nodig. Daarbij moet worden gekeken naar o.a. eventueel benodigde uitbreiding van weg- en spoorcapaciteit, kosten (waaronder extra slijtage van infrastructuur) en effecten op milieu.

## 4 Knelpunten voor zoetwatervoorziening

### 4.1 Achtergrond

De grote rivieren vormen tijdens het zomerhalfjaar een belangrijke bron van zoet water voor een groot deel van Nederland. In Noord-Nederland worden de zoetwaterbuffers Markermeer en IJsselmeer aangevuld door de IJssel. Van daaruit wordt water aangevoerd naar de peilbeheerde gebieden van Noord-Holland, Friesland, Groningen, Drenthe en Flevoland. Dit water is daar vooral nodig voor peilbeheer, doorspoeling en beregeling. Ook is een minimum spuidebiet nodig om zoutindringing via de sluizen in de Afsluitdijk tegen te gaan.

In West-Nederland zorgt de aanvoer vanuit de rivieren voor een tegendruk om zoutindringing vanuit de Noordzee te beperken. Tijdens langdurig lage afvoer zullen inlaten langs de Nieuwe Maas, Hollandsche IJssel en de Lek gesloten moeten worden. Voor de aanvoer naar West-NL is dan een alternatieve voorziening ingericht: de Klimaatbestendige Zoetwateraanvoer West-NL (KWA). Voor het zoet houden van de Lek is recent een maatregel opgenomen in het Deltaplan, zodat de stuwdam Hagestein een groter debiet kan doorlaten. De verwachting is dat het bovenstroomse deel van de Lek hiermee geen beperkingen meer ondervindt van zoutindringing. Bodemerosie op de Waal zorgt voor een veranderde afvoerverdeling over de Rijntakken, waardoor de Waalafvoer tijdens lage-afvoerperioden toeneemt. Dit heeft mogelijk een klein positief effect op de zoutindringing. Tegelijkertijd neemt de afvoer over de Neder-Rijn - Lek af, waardoor er meer water voor West-NL moet worden aangevoerd vanuit de Waal via het ARK-Betuwe pand.

Tot slot zijn er talloze inlaatpunten vanuit de grote rivieren, voor regionale watervoorziening maar ook voor drinkwater en industrie. De waterstanden op de grote rivieren zijn daarin bepalend voor de inlaatcapaciteit, hoewel sommige grotere inlaten voorzien zijn van pompen en gemalen. Desondanks kunnen te lage rivierwaterstanden ervoor zorgen dat de opvoerhoogte beperkt wordt voor de inlaatcapaciteit, zoals het geval is bij de Twentekanalen (inlaat Eefde).

### 4.2 Probleemdefinitie

Door klimaatverandering verwachten we:

- frequentere en langduriger perioden met lage Rijnafvoer (zie Paragraaf 2.1);
- een toename van de watervraag doordat verdamping toeneemt. Open-waterverdamping zorgt voor een grotere watervraag voor peilbeheer; frequenter neerslagtekort zal tot meer beregeling leiden, én we gaan meer water gebruiken in reactie op klimaatverandering (bijv. omdat meer beregeningsinstallaties worden aangelegd); interne verzilting vraagt om meer doorspoeling van het oppervlaktewater als kwaliteitseisen hetzelfde blijven.

Door andere (maatschappelijke) ontwikkelingen verwachten we:

- een verdere toename van de watervraag in veenweidegebieden: de regionale watervraag voor peilbeheer in veenweidegebieden zal toenemen door vernattingsmaatregelen uit het Klimaatakkoord die de komende jaren gestalte krijgen in de regionale veenweidestrategieën met als doel de bodemdaling te vertragen.
- een verdere afname van de Rijnafvoer en Maasafvoer tijdens het zomerhalfjaar door bovenstroomse ontwikkelingen in land- en watergebruik;
- een verdere afname van de IJsselafvoer door rivierbodemdaliging, waardoor de afvoerverdeling rondom de splitsingspunten verandert (zie Paragraaf 2.2).



Figuur 4.1 Schematisch overzicht van de belangrijkste zoetwaterknelpunten als gevolg van afnemende rivieraafvoeren

#### Bovenrivierengebied:

- Voor de Deltascenario's Warm en Stoom (zie Wolters et al., 2018) wordt een grote toename van de watervraag voor peilbeheer en beregeling verwacht door de grotere verdamping en geringere neerslag in het zomerhalfjaar. De watervraag voor beregeling neemt daarnaast "autonom" toe doordat de landbouwsector zich aanpast aan een warmer klimaat door meer beregeningsinstallaties aan te leggen.
- Watertekort tijdens droogte wordt deels veroorzaakt door lage afvoeren in het hoofdwatersysteem (en hiermee gepaard gaande zoutindringing), en deels door beperkte aanvoercapaciteit van regionale inlaten. Lage rivierwaterstanden kunnen deze capaciteitsbeperkingen verder doen toenemen.

#### West-Nederland:

- In de toekomst moet de KWA steeds vaker en langer worden ingezet. Door de toename van de watervraag wordt de capaciteit van deze alternatieve aanvoerroute beperkt in extreme jaren.
- Voor West-Nederland verwachten we dus een knelpunt in het regionale watersysteem, niet zozeer in de aanvoer vanuit het hoofdwatersysteem. Wel kunnen grote onttrekkingen de waterstandsbeperkingen voor scheepvaart verder vergroten.

#### Noord-Nederland (zie Pouwels et al., 2021):

- In het huidige klimaat en met huidig landgebruik is de direct beschikbare bufferschijf van de grote meren niet altijd voldoende om te voorzien in de watervraag. Het peil zakt eens in de 20 jaar verder uit dan -0,30 m NAP, met economische en ecologische schade tot gevolg. De kans op extreme tekortsituaties waarbij het peil onder de -0,40 m NAP dreigt te zakken met onomkeerbare schade tot gevolg wordt ingeschat op eens in de 50 jaar;
- Onder invloed van sterke klimaatverandering (scenario Stoom2050) én rekening houdend met nieuwe ontwikkelingen (bodemerosie en watervraag veenweidegebieden) wordt de buffer in zichtjaar 2050 gemiddeld eens in de 5 jaar uitgeput met economische en ecologische schade tot gevolg door tekorten in de regionale watervoorziening;
- Situaties waarbij het peil verder uitzakt dan -0,40 m NAP, met risico's op tekorten voor peilbeheer in het voorzieningengebied met onomkeerbare schade tot gevolg, treden in dit toekomstscenario eens in de 15-20 jaar op.

Het mogelijke effect van bovenstroomse ontwikkelingen op verdere verlaging van lage Rijnaafvoeren en daarmee watertekorten is nog niet met modellen doorgerekend en daarom niet in bovenstaande schattingen meegenomen.

### 4.3 Vragen en uitgangspunten

De volgende vragen worden in deze verkenning behandeld:

- Onder welke omstandigheden ontstaat een knelpunt in de zoetwatervoorziening in de gebieden die afhankelijk zijn van aanvoer via de Rijn?
- Welke ontwikkelingen spelen verhoudingsgewijs een grote rol?
- Wat zijn bouwstenen om het zoetwatertekort te verkleinen?
- Welke kennisvragen kunnen worden geïdentificeerd om beter te kunnen anticiperen op de toekomst?

De focus van de analyse ligt op Noord-Nederland, omdat in dit gebied de waterbeschikbaarheid het meest direct afhankelijk is van de aanvoer via het hoofdwatersysteem.

### 4.4 Methode

We bekijken in deze analyse een situatie van watertekort die op dit moment in het voorzieningsgebied van het IJsselmeer/Markermeer gemiddeld eens in de twintig jaar optreedt. We bekijken drie toekomstscenario's voor 2050 en 2100 waarin aannames zijn gedaan over ontwikkelingen in watervraag en waternaamboed. De gebruikte getallen zijn afkomstig uit modelberekeningen en analyses die met het Nationaal Water Model (NWM) zijn uitgevoerd voor het Deltaprogramma Zoetwater (Mens et al., 2020ab) en aangevuld met recente inzichten.

De watervraag is uitgedrukt in miljoen m<sup>3</sup> per zomerhalfjaar voor een droge situatie. Het historische droge jaar 1934 is gekozen als representatief voor een situatie die in het huidige klimaat eens in de 20 jaar optreedt. De watertekorten die optreden worden dus gemiddeld eens in de 20 jaar overschreden. Voor de zichtjaren 2050 en 2100 is gebruik gemaakt van het Deltascenario Stoom. Hierin wordt aangenomen dat het klimaat verandert volgens KNMI'14-scenario Wh/Whdry, dat de bevolking toeneemt, dat de economie groeit en dat de landbouw zich aanpast aan klimaatverandering door te investeren in beregeningsinstallaties. Omdat voor het zichtjaar 2100 geen berekeningen zijn gedaan voor het jaar 1934, is voor dit zichtjaar gebruik gemaakt van rekenresultaten van het rekenjaar 2003.

Ten opzichte van de NWM-berekeningen is in alle scenario's rekening gehouden met een grotere doorspoelvraag om zoutindringing door de sluizen in de Afsluitdijk tegen te gaan. De doorspoelvraag van de Afsluitdijk is vergroot naar 40 m<sup>3</sup>/s (voor toelichting zie Pouwels et al., 2021).

De plus-scenario's (2050+ en 2100+) bevatten daarbij nog een aantal aanpassingen ten opzichte van de modelberekeningen met het NWM om de effecten van onzekere ontwikkelingen in beeld te brengen:

- de aanvoer over de IJssel is naar beneden bijgesteld (met 10%) om rekening te houden met de effecten van rivierbodemerosie, waardoor de afvoerverdeling verandert als geen maatregelen worden getroffen;

- de regionale watervraag voor peilbeheer in veenweidegebieden is vergroot met 30% om rekening te houden met de vernattingsmaatregelen uit het Klimaatakkoord die de komende jaren gestalte krijgen in de regionale veenweidestrategieën. Uit recente modelanalyses blijkt dat de watervraag hoe dan ook gaat toenemen, maar dat de mate waarin afhankelijk is van het areaal, het type maatregelen (onderwaterdrainage, greppelinfiltratie), en de gewaskeuze (grasland of natte teelten) (Hunink et al., 2022);
- ontwikkelingen in Duitsland waardoor er bovenstrooms meer water onttrokken wordt en lage rivieraafvoeren verder afnemen. Hierover is nog weinig kennis beschikbaar en dit is daarom nog niet eerder in analyses meegenomen. De bovenschatting uit een zeer grote eerste verkenning (Ruijgh, 2019) is extra bovenstroomse waterconsumptie van 100-200 m<sup>3</sup>/s (zie paragraaf 2.1.5). In de analyse in dit rapport is dit vertaald in een daling van de IJsselafvoer met 10%.

Met deze uitgangspunten richten we ons nadrukkelijk op de bovenkant van de bandbreedte van scenario's. De geselecteerde scenario's zijn niet per se de scenario's die we het meest realistisch achten. Het is bijvoorbeeld aannemelijk dat maatregelen worden getroffen om bodemerosie tegen te gaan, waardoor de afvoerverdeling niet verder verandert. Hiervoor is gekozen met het idee dat we ons bewust moeten zijn van en moeten kunnen voorbereiden op situaties die een kleine kans van voorkomen, maar grote gevolgen hebben. We gaan uit van 'voortzetting huidig beleid', waarbij maatregelen niet worden meegenomen zolang er geen besluit is genomen en financiering geregeld is.

Daarnaast wordt, naarmate de tijd verstrijkt en het inzicht in de effecten van klimaatverandering toeneemt, duidelijk dat in het verleden realistisch geachte scenario's (bijvoorbeeld ten tijde van publicatie van de KNMI'14-scenario's) veelal te rooskleurig blijken te zijn. De hier gebruikte scenario's zijn geselecteerd met deze meest recente inzichten in het achterhoofd.

## 4.5 Watervraag en waternaanbod in de toekomst

De watervraag (miljoen m<sup>3</sup>) en het waternaanbod in Noord-Nederland over een droog zomerhalfjaar met een herhalingstijd van 20 jaar is in Tabel 4.1 en Figuur 4.1 uitgesplitst naar gebruiker en naar oorsprong. In de huidige situatie vormt het tegengaan van zoutindringing via de sluizen in de Afsluiddijk (doorspoelen Afsluiddijk) een grote watervrager. Dit is meer dan het totale buffervolume dat in de grote meren voor zoetwatervoorziening beschikbaar is. De grootste toename in watervraag komt door de polderdoorspoeling om zoutgehaltes in het oppervlaktewater (voor landbouw en natuur) laag te houden. Bij versnelde zeespiegelstijging neemt die watervraag na 2050 mogelijk verder toe. Ook de watervraag voor peilbeheer neemt flink toe als gevolg van het nathouden van veenweidegebieden in combinatie met toename van verdamping bij sterke klimaatverandering. De beregning neemt deels toe door meer verdamping en minder neerslag in het zomerhalfjaar (klimaatverandering) en deels doordat er meer beregeningsinstallaties worden aangelegd.

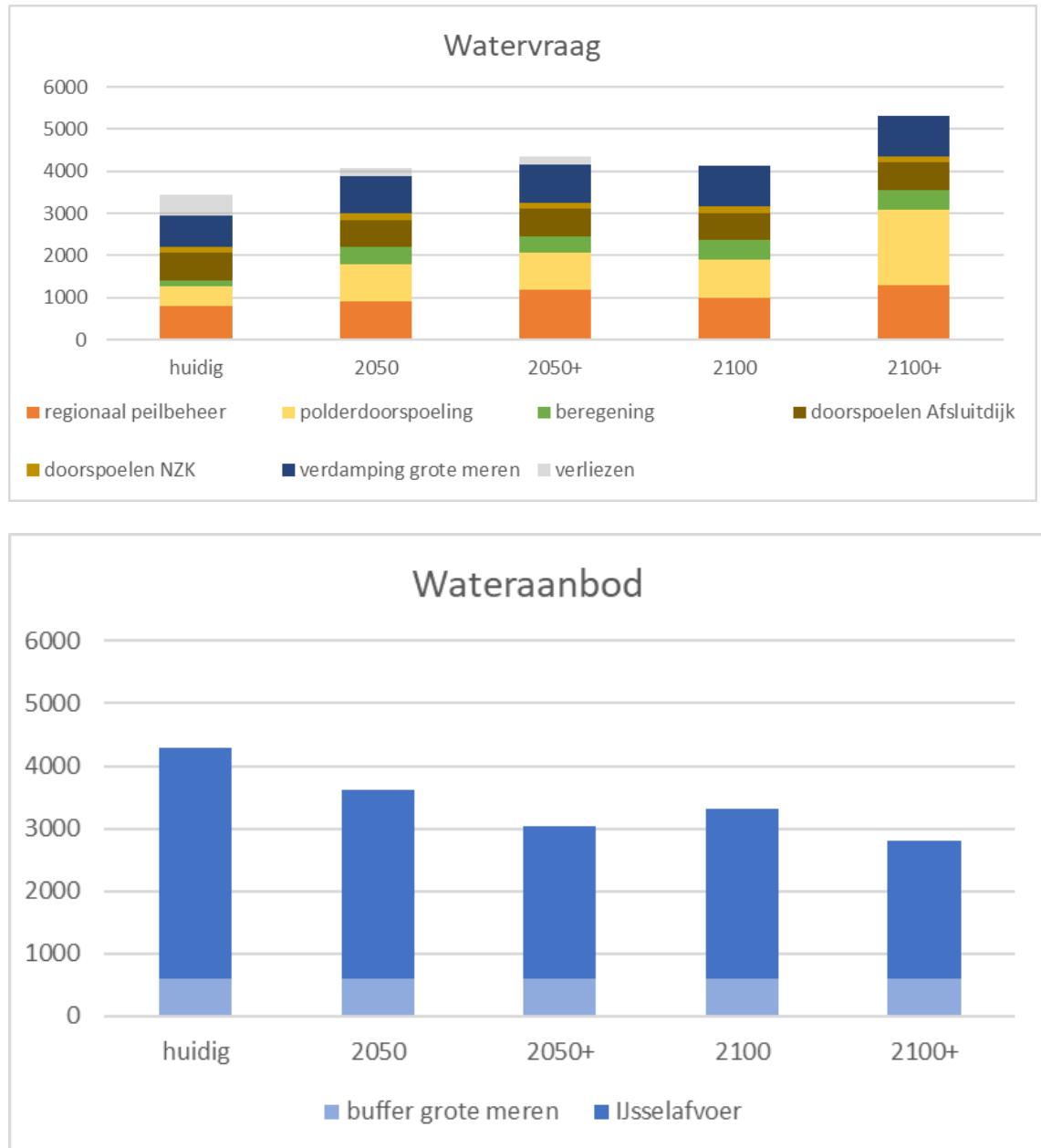
Tot slot gaat er in het huidige klimaat en in het scenario voor 2050 nog water verloren via het spuien in de Afsluiddijk (balanspost 'verliezen'). De gegeven volumes zijn totalen over het zomerhalfjaar, maar de balans verandert door het jaar heen. Het kan zo zijn dat er in het voorjaar nog water over is (als het meerpeil is opgezet en de vraag kleiner is dan de aanvoer via de IJssel). Dan wordt het overschot gespuid op de Noordzee, terwijl later in het seizoen een tekort ontstaat. Dit geeft aan dat er te weinig ruimte is om het beschikbare water op te slaan. In de scenario's voor 2050 en 2100 worden de verliezen kleiner, omdat de vraag groter wordt.

Het waternaanbod bestaat uit het volume dat opgeslagen kan worden in de grote meren én het volume dat over de IJssel wordt aangevoerd.

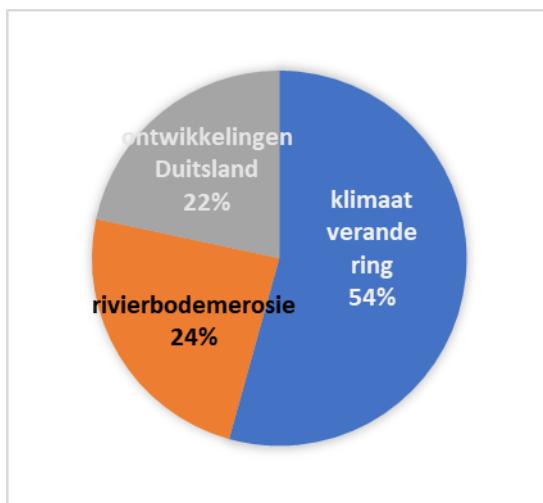
Uitgedrukt in volumes valt op dat de IJssel een veel groter aandeel heeft in het aanbod. De buffer is natuurlijk essentieel om tijd te overbruggen als de afvoer lager wordt dan het aanbod, maar zonder IJsselaafvoer zou de buffer in twee weken leeg zijn. De huidige prognose van de afname van de IJsselaafvoer richting de toekomst wordt voor 54% veroorzaakt door klimaatverandering, voor 22% door ontwikkelingen in Duitsland en voor 24% door rivierbodemerosie (Figuur 4.3).

| Waterbalans T=20 situatie (Mm³)                                 | huidig      | 2050        | 2050+       | 2100        | 2100+       |
|---|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>watervraag</b>   |             |             |             |             |             |
| verdamping grote meren  | 732         | 884         | 884         | 967         | 967         |
| regionaal peilbeheer  | 799         | 905         | 1177        | 996         | 1294        |
| polderdoorspoeling  | 460         | 892         | 892         | 892         | 1784        |
| beregening  | 150         | 394         | 394         | 473         | 473         |
| doorspoelen Afsluitdijk   | 650         | 650         | 650         | 650         | 650         |
| doorspoelen NZK   | 150         | 150         | 150         | 150         | 150         |
| verliezen (door niet-optimale verdeling in de tijd) [sluitpost] | 500         | 200         | 200         | 0           | 0           |
| <i>totaal watervraag</i>  | <b>3441</b> | <b>4075</b> | <b>4347</b> | <b>4127</b> | <b>5318</b> |
| <b>wateraanbod</b>  |             |             |             |             |             |
| buffer grote meren  | 600         | 600         | 600         | 600         | 600         |
| ijsselaafvoer   | 3690        | 3010        | 2438        | 2709        | 2194        |
| <i>totaal wateraanbod</i>                                       | <b>4290</b> | <b>3610</b> | <b>3038</b> | <b>3309</b> | <b>2794</b> |
| <i>tekort</i>   | <b>-849</b> | <b>465</b>  | <b>1309</b> | <b>818</b>  | <b>2523</b> |

Tabel 4.1 Uitsplitsing van de volumes watervraag in miljoen m<sup>3</sup> en wateraanbod in een T=20 droog jaar voor de verschillende scenario's



Figuur 4.2 Uitsplitsing van de volumes watervraag (boven) en wateraanbod (onder) in een T=20 droog jaar voor de verschillende scenario's



Figuur 4.3 Relatieve bijdrage aan de afname van de IJsselafvoer in een T=20 droog jaar (scenario 2050+)

## 4.6 Knelpunten

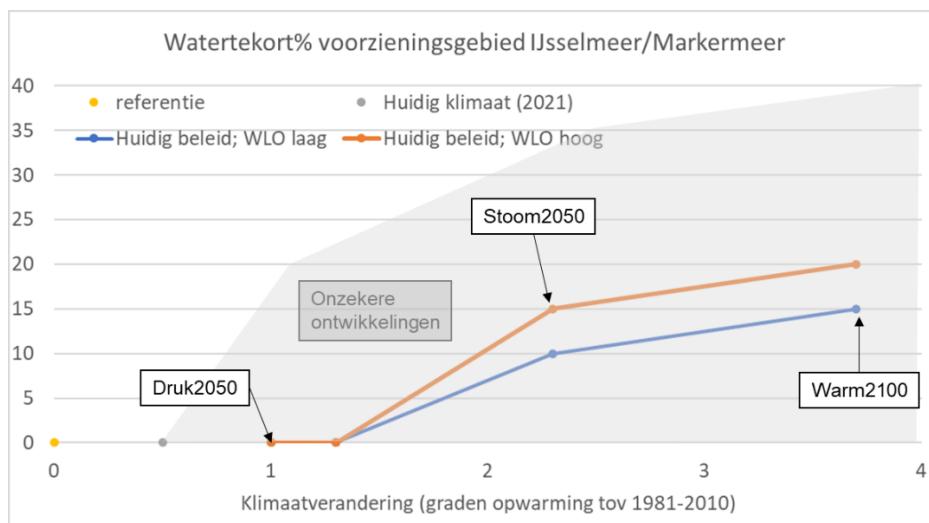
Binnen het Deltaprogramma Zoetwater is nog geen kwantificeerbaar doel gesteld ten aanzien van de weerbaarheid tegen watertekort. In het huidige klimaat en bij huidig landgebruik is de kans op watertekort in het voorzieningsgebied van IJsselmeer/Markermeer klein (orde eens in de 50 jaar). In de toekomst kan de kans echter toenemen. De achterliggende vraag is hoeveel watertekort met welke kans van voorkomen we als maatschappij willen accepteren. Dit is een complex vraagstuk dat om een maatschappelijk debat vraagt. Bij gebrek aan een kwantificeerbaar doel nemen we in deze analyse als theoretisch doel aan dat het watertekort bij een herhalingsperiode van 20 jaar ( $T=20$ ) nihil moet zijn. Gemiddeld zou droogte dus eens in de 20 jaar niet tot watertekorten moeten leiden, en wordt bij extremer droogtes schade aan bijvoorbeeld landbouw en natuur geaccepteerd. Bij zo'n extreme droogte kan de totale maatschappelijke impact nog wel zoveel mogelijk worden beperkt door prioritering tussen watergebruikers in lijn met de verdrijgingsreeks.

Het knelpunt ontstaat dan zodra ontwikkelingen in klimaat en land- en watergebruik leiden tot een watertekort  $> 0 \text{ m}^3$  voor de beschouwde condities in het  $T=20$  jaar 1934. Watertekort is berekend over het hele zomerhalfjaar en uitgedrukt in percentages van de watervraag. De rekenresultaten van het Nationaal Water Model zijn in deze paragraaf uitgezet tegen de mate van klimaatopwarming in graden ten opzichte van de klimaatperiode 1981-2010. De scenario's Stoom en Warm gaan uit van een temperatuurtoename van 2,3 graden in 2050 en 3,7 graden in 2100 (KNMI'14-scenario  $W_H$ ). De watertekorten kunnen bij dezelfde temperatuurtoename nog wel variëren door aannames over land- en waterbeheer die de watervraag mede bepalen. Ook de wateraanvoer over de rivieren varieert bij dezelfde mate van opwarming, door onzekerheid in de opeenvolging van hoge en lage drukgebieden (blijven deze lang hangen dan neemt de kans op droogte toe). Deze onzekerheid is gevatt in de toevoeging laag en hoog ( $W_H$  = warm, hoog).

Uit Figuur 4.4 volgt dat het knelpunt bij ongeveer 1,3 graden opwarming (ten opzichte van 1981-2010) zal worden bereikt. Het huidige klimaat is inmiddels al 0,5 graden opgewarmd. De oude KNMI'14-scenario's gaven aan dat 1,3 graden opwarming (en dus het knelpunt) in 2050 wordt bereikt volgens het gematigde  $G_L$ -scenario. Volgens het warme scenario  $W_H$  zou het knelpunt al rond 2035 worden bereikt.

In de figuur zijn nieuwe inzichten en ontwikkelingen (zoals het Nathouden van veenweidegebieden en rivierbodemdalings) nog niet meegenomen. In de vorige paragraaf is gekwantificeerd dat die ontwikkelingen een significant effect kunnen hebben op de watertekorten. Ze kunnen ertoe leiden dat het knelpunt eerder wordt bereikt.

Die notie is in de figuur aangeduid met het grijze vlak. In de eerder aangehaalde stressstest voor het IJsselmeer (Pouwels et al., 2021), waarin een aantal nieuwe ontwikkelingen wel is meegenomen, is bijvoorbeeld voor de referentiesituatie een watertekort van 5% van de watervraag berekend. Dat zou betekenen dat we het knelpunt al bereikt hebben.



Figuur 4.4 Voorbeeld van een knelpuntenanalyse voor zoetwatervoorziening, uitgedrukt in %watertekort in regio Noord-Nederland (voorzieningsgebied van het IJsselmeer/Markermeer) voor een T=20 situatie, als functie van het aantal graden klimaatopwarming. De bandbreedte wordt gevormd door een lage prognose (blauwe lijn) en een hoge prognose (oranje lijn) voor economische ontwikkeling en bevolkingsgroei. Het grijze vlak visualiseert het potentiële effect van de ontwikkelingen die in paragraaf 4.4 zijn beschreven.

## 4.7 Handelingsperspectief

Deze paragraaf geeft bouwstenen voor het vergroten van het aanbod en reduceren van de watervraag, ingeschat op basis van vereenvoudigde balansberekeningen (Figuur 4.5 en Figuur 4.6).

### 4.7.1 Aanbod vergroten

Het aanbod vergroten kan door het **zomerpeil van IJsselmeer/Markermeer verder op te zetten of verder te laten uitzakken**. Het vergroten van de buffer met 20 cm staat ook genoemd als optie in het adaptatiepad van het Deltaprogramma Zoetwater. Een hoger zomerpeil heeft consequenties voor de waterveiligheid en kan betekenen dat de meerdijken versterkt moeten worden; het peil verder laten uitzakken kan nadelig zijn voor de stabiliteit van waterkeringen en toegankelijkheid van havens (zie BPIJ, 2020). In deze analyse is uitgegaan van 10 cm extra opzet en 10 cm verder uitzakken, dus 20 cm extra buffer totaal. Omgerekend is dit 400 miljoen m<sup>3</sup>.

Een andere optie is om **extra water aan te voeren vanuit de Waal**, via het Amsterdam-Rijnkanaal (Betuwepand → Irenesluizen → Markermeer). Deze maatregel maakt onderdeel uit van de Klimaatbestendige Zoetwaterstrategie voor het Hoofdwatersysteem, die voorgesteld is voor de komende uitvoeringsfase van het Deltaprogramma Zoetwater (2022-2027) (Rijksoverheid, 2021). Uit verkennende berekeningen (Hydrologic, 2019) is al gebleken dat de hoeveelheid water die dit potentieel oplevert overeenkomt met het vergroten van de buffer IJsselmeer met circa 20 cm. Omgerekend is dit 400 miljoen m<sup>3</sup>. Deze maatregel vraagt waarschijnlijk investeringen in de waternaanvoerinfrastructuur (bijv. capaciteit van sluizen) en heeft mogelijk negatieve effecten op de scheepvaart.

Het **tegengaan van bodemerosie** in het splitsingspuntengebied kan eraan bijdragen dat de IJsselaafvoeren minder snel afnemen, doordat bij lage afvoeren meer water richting de IJssel gestuurd kan worden. Recente berekeningen voor het programma Integraal Rivier Management (Asselman et al., 2022a en 2022b) geven aan dat dit in een droog jaar (zoals 1934) 350 miljoen m<sup>3</sup> kan opleveren, wanneer verdere bodemerosie wordt tegengegaan. Wanneer de bodem wordt opgehoogd, bijv. zoals de situatie in 2000, dan is het effect groter.

Tot slot kunnen **maatregelen in Duitsland** bijdragen aan de Rijnafvoer, bijvoorbeeld door naaldbomen te vervangen door loofbomen, aangepast stuwebeheer, waterberging en waterbesparende maatregelen. Hoeveel water dit tijdens droge zomers kan opleveren is onbekend.

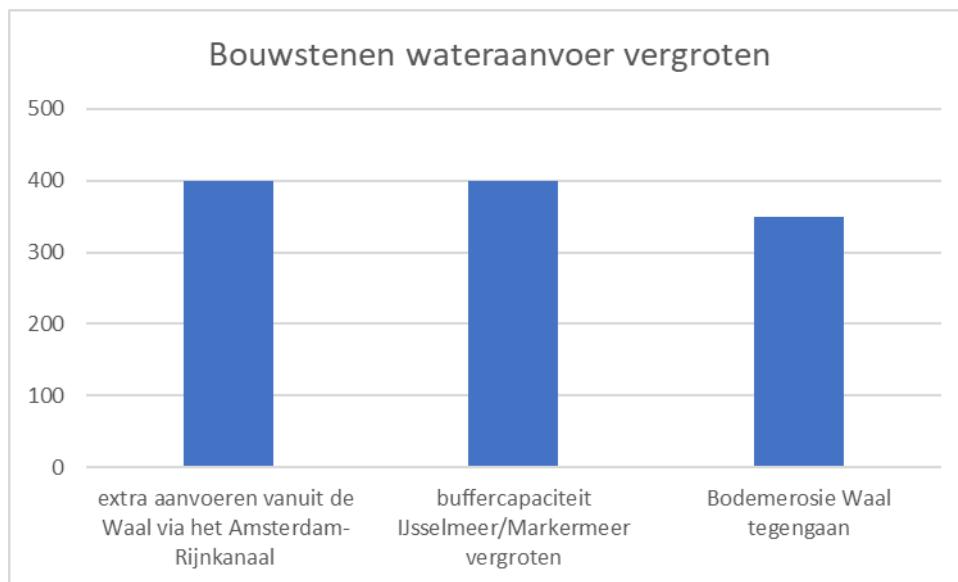
#### 4.7.2 Vraag reduceren

De bouwstenen voor het reduceren van de vraag zijn uitgesplitst naar type vrager.

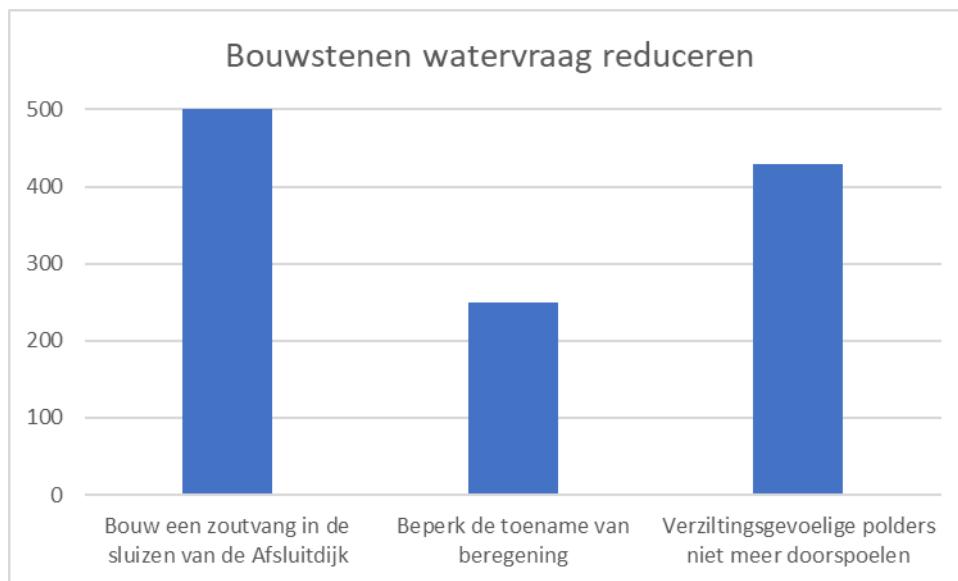
Een zoutvang in de schut- en spuisluizen van de Afsluitdijk kan de **doorspoelvraag** significant reduceren. Hier is aangenomen dat er na plaatsing van zoutbeperkende maatregelen (zoals een zoutvang) nog 10 m<sup>3</sup>/s nodig blijft voor visvriendelijk spuien. Dat is een reductie van 30 m<sup>3</sup>/s, wat overeenkomt met circa 500 miljoen m<sup>3</sup>.

De **doorspoelvraag van polders** reduceren kan door hogere zoutconcentraties van het oppervlaktewater te accepteren en bijvoorbeeld over te stappen op zouttolerante teelten of de zelfvoorzienendheid van verziltingsgevoelige gebieden te vergroten. Het accepteren van verzilting in kustgebieden is een maatregel die op termijn in beeld kan komen als gevolg van autonome toename van zoute kwel of versnelde zeespiegelstijging, waardoor grondwater binnen circa 15 km vanaf de kust steeds meer aan de oppervlakte komt. Doorspoelwater is echter niet alleen nodig om interne verzilting in polders weg te spoelen, maar ook om in de grotere kanalen en vaarten de waterkwaliteit goed te houden en zoutindringing via sluizen tegen te gaan (bijv. in het Eemskanaal). Daarom kan slechts een deel van de totale doorspoelvraag door deze maatregel gereduceerd worden. We nemen aan dat de doorspoelvraag niet verder toeneemt naar de toekomst. Dit levert naar schatting 450 miljoen m<sup>3</sup>.

De **beregenvraag** uit oppervlaktewater kan worden gereduceerd door zuiniger om te gaan met water (bv. druppelirrigatie), de aanleg van nieuwe beregeningsinstallaties aan banden te leggen, en meer water lokaal op te slaan (boven dan wel onder de grond). In de modelberekeningen komt een deel van de toename van de beregeningsvraag door meer verdamping (voor de gebieden die nu al beregend worden) en het andere deel door toename van het beregend areaal. Dit leidt samen tot een verdubbeling van de beregeningsvraag in 2050. Als een verdere toename van de beregeningsvraag kan worden voorkomen, levert dit 250 miljoen m<sup>3</sup> in 2050 en 320 miljoen m<sup>3</sup> in 2100.



Figuur 4.5 Bouwstenen om het wateraanbod te vergroten met effectiviteit in miljoen m<sup>3</sup> in een T=20 droog jaar in 2050



Figuur 4.6 Bouwstenen om de watervraag te reduceren met effectiviteit in miljoen m<sup>3</sup> in een T=20 droog jaar in 2050

## 4.8 Kennisvragen

- Bij welk watertekort treedt een knelpunt op?** In verschillende documenten worden verschillende ambities genoemd. Het is in elk geval belangrijk om de droogtegebeurtenis waartegen je weerbaar wilt zijn te relateren aan de schade of de gevolgen van deze gebeurtenis. Is een T = 20 lage afvoer voor het hoofdwatersysteem een realistische opgave? Dit lijkt nu al een gigantische inspanning te vergen.
- Welke onttrekkingen kunnen we verwachten in de bovenstromen van Nederland gelegen landen en hoe beïnvloedt dit de lage afvoeren van Rijn en Maas?** Dit is een belangrijke kennisleemte. Bovendien is dit geen knop waar wij zelf aan kunnen draaien.

Zowel hoeveelheden als timing zijn belangrijk. De afvoer in de periode april - juni is bijvoorbeeld belangrijk voor het opzetten van de meerpeilen en het behouden van de vullingsgraad van het IJsselmeer, terwijl de laagste afvoeren (< OLA, belangrijk voor de scheepvaart) meestal pas in augustus worden bereikt.

3. **Wat zouden de gevolgen van het afsluiten van de Nieuwe Waterweg voor zoutindringing en zoetwaterbeschikbaarheid zijn?** Vaak wordt gezegd dat het afsluiten van de Nieuwe Waterweg ook helpt om zoutindringing tegen te gaan, maar dit is nog maar zeer de vraag. Bij schutten zou toch veel zoutindringing op kunnen treden. Hier moet je dan weer maatregelen tegen nemen (bijvoorbeeld selectieve onttrekking), waar vaak veel (schaarse) ruimte voor nodig is. Recent is dit grofweg verkend, zie: [Sluizen in Rotterdam: geen rechtdoorzee oplossing voor droogteprobleem - Deltares](#).
4. **Hoe kunnen we water efficiënt bergen, zowel in binnen- als buitenland?** Over een heel jaar gezien neemt de hoeveelheid water die ons land binnenstroomt niet per se af. Het lijkt op jaarrbasis zelfs natter te worden. Dit schept mogelijkheden: als we het voor elkaar krijgen om water efficiënt te bergen kunnen we een buffer opbouwen voor droge perioden. Bergen of vasthouden moet niet alleen binnen Nederland plaatsvinden, maar ook verder bovenstroms, bijvoorbeeld door op natuur gebaseerde oplossingen (denk aan het planten van loofbomen, aanleg van nevengeulen en hermeandering van zijrivieren).
5. **Wat levert het stuwen van de Waal op voor zoetwatervoorziening?** Stuwen bouwen in de Waal is één van de mogelijkheden om binnenvaart in de toekomst de kunnen blijven accommoderen. Met deze maatregel kan de afvoerverdeling in een veel grotere mate gecontroleerd worden. Dit kan voordelig zijn voor de zoetwatervoorziening. De gevolgen van deze maatregel voor de verschillende rivierfuncties zijn verkend door Kosters, van der Wijk en Spruyt (2023), maar moeten verder uitgewerkt worden.
6. **In hoeverre kan de landbouwtransitie bijdragen aan de reductie van watervraag?** Een transitie in de landbouw is niet alleen nodig met het oog op klimaatverandering, maar ook voor het behalen van waterkwaliteits- en biodiversiteitsdoelen en het voorkomen van uitputting van de bodem. Voor het reduceren van de watervraag kunnen met name de ontwikkeling van innovatieve waterbesparende technieken en droogteresistente gewassen een rol spelen. Het zou goed kunnen dat in de toekomst steeds meer vraag komt naar waterbesparende technieken (zoals verticale landbouw) en gewassen die weinig water nodig hebben, als droogte wereldwijd een steeds groter probleem wordt.
7. **Hoe kunnen we voor Noord-Nederland de afhankelijkheid van de grote meren verkleinen?** De grootste watervragers aan het hoofdwatersysteem zijn doorspoelen, peilbeheer en beregeling. Bij voortzetting van het huidige beleid zal deze vraag gaan toenemen. De watervraag voor peilbeheer zal toenemen door de vernattingsmaatregelen in het veenweidegebied. Als we blijven sturen op lage zoutgehaltes in het oppervlaktewater zal er steeds meer doorspoelwater nodig zijn. Zonder aanpassingen in de landbouw zal er steeds meer beregend worden. Bij strategieën voor watervraagreductie moet naar het hele systeem worden gekeken en naar de combinatie van landgebruik en watersysteem in de regio's. Kunnen natuurgebieden bijdragen aan het vasthouden van water? Wat is het effect van flexibeler peilbeheer en het aanpassen van de peilvakken?

## 5 Knelpunten voor natuur

### 5.1 Achtergrond

In het rivierengebied bevindt zich karakteristieke natuur die geënt is op de grondwater- en overstromingsdynamiek van de Rijn en de Maas. Grote delen van het zomerbed en de uiterwaarden zijn aangewezen als beschermd natuurgebied, bijvoorbeeld in het kader van Natura 2000 (N2000) of Natuurnetwerk Nederland (NNN). Ook vanuit de Kaderrichtlijn Water (KRW), die geldt voor alle wateren in de EU, worden doelen gesteld aan de aquatische natuur- en waterkwaliteit. Daarnaast is in 2018 de Programmatische Aanpak Grote Wateren (PAGW) gestart, waarin aanvullende maatregelen worden genomen om nu en in de toekomst aan natuurdoelstellingen te kunnen voldoen.

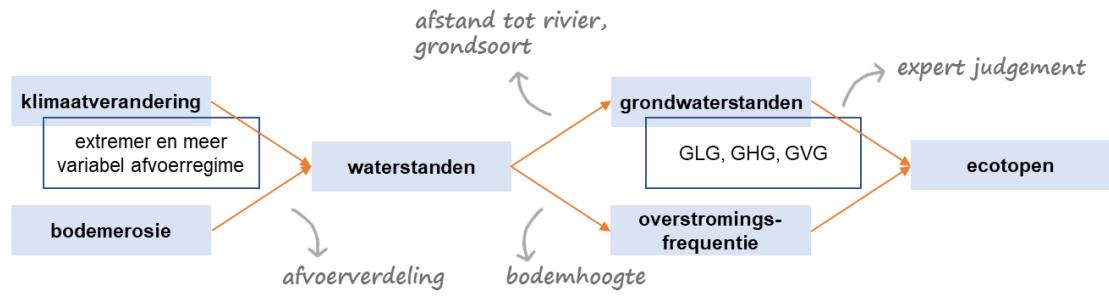
### 5.2 Probleemdefinitie en onderzoeks vragen

Door de vergaande regulering van de Rijn en de Maas is de van nature aanwezige hydro- en morfodynamiek steeds verder verstoord. Klimaatverandering en de doorgaande bodemerosie beïnvloeden de grondwaterstanden en de overstromingsfrequentie van uiterwaarden en kunnen de bestaande natuur in het rivierengebied verder onder druk zetten. Met name N2000-doelen, die vaak gericht zijn op het behoud van bestaande natuur, kunnen in het gedrang komen als geen maatregelen worden getroffen.

De natuur die we in dit onderzoek beschouwen is de terrestrische of droge natuur in de uiterwaarden, uitgedrukt in ecotopen. Effecten op het functioneren van aquatische natuur – zoals plassen, strangen en stromende geulen – zijn niet onderzocht. Verlaging van waterstanden heeft zeker invloed op de aquatische natuur en het wordt aanbevolen deze effecten in een latere studie te onderzoeken en te kwantificeren.

Figuur 5.1 geeft de relatie tussen bovengenoemde ontwikkelingen en de geschiktheid van gebieden voor verschillende ecotopen in het rivierengebied schematisch weer. Als gevolg van klimaatverandering verwachten we vaker hoogwater en langere perioden met extreem lage waterstanden. Rivierbodemerosie leidt over het algemeen tot lagere waterstanden. Op de Rijn verandert de afvoerverdeling echter als gevolg van ongelijke erosie in het splitsingspuntengebied, waardoor op bepaalde trajecten waterstanden kunnen toenemen ten koste van andere gebieden. De rivierwaterstanden beïnvloeden de grondwaterstanden in het omliggende gebied (binnendijks en buitendijks) en de overstromingsfrequentie van uiterwaarden. Welke gebieden bij een bepaalde waterstand overstroomen hangt af van de bodemhoogte en regulering door middel van bijvoorbeeld zomerdijken en inlaatsluizen. De samenhang tussen rivierwaterstand en grondwaterstand hangt onder andere af van de afstand tot de rivier (hoe verder weg, hoe kleiner) en de grondsoort (hoe doorlatender, hoe groter). De dynamiek van grondwaterstanden wordt vaak uitgedrukt in 1) de gemiddeld hoogste grondwaterstand (GHG), 2) de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) en 3) de gemiddelde voorjaarsgrondwaterstand (GVG).

Ecotopen in het rivierengebied stellen bepaalde eisen aan de grondwater- en overstromingsdynamiek. Simpel gezegd mag het niet te nat, maar ook niet te droog zijn. Voor veel ecotopen zijn deze eisen echter niet in detail bekend. De relaties tussen ecotopen en grondwaterstand of overstromingsfrequentie zijn daarom vaak grotendeels afgeleid op basis van expert judgement. Daarnaast kunnen ook andere factoren een rol spelen, zoals aanwezigheid van nutriënten en het beheer.



Figuur 5.1 Schematische weergave van de relatie tussen klimaatverandering/rivierbodemerosie en ecotopen.

In dit hoofdstuk behandelen we de volgende onderzoeks vragen:

1. Hoe definiëren we een knelpunt voor natuur?
2. Wat zijn de effecten van klimaatverandering en bodemerosie op grondwaterstanden en overstromingsfrequenties in het rivierengebied?
3. Wat is het effect van veranderingen in grondwaterstand en overstromingsfrequentie op de gewenste ecotopen?
4. Onder welke omstandigheden wordt een knelpunt voor natuur bereikt?
5. Welke maatregelen kunnen worden genomen om het ‘knelpunt’ op te lossen of uit te stellen?

### 5.3

### Hoe definiëren we een knelpunt voor natuur?

Op de vraag wanneer sprake is van een knelpunt voor natuur zijn veel verschillende antwoorden mogelijk. De meest concrete natuurdoelen voor het rivierengebied zijn vastgesteld binnen N2000, KRW en PAGW (zie paragraaf 5.1). Elk van deze programma's stelt een ander soort ecologische doelen. N2000 is gericht op het in stand houden en uitbreiden of verbeteren van bestaande natuurgebieden en bijbehorende dier- en plantensoorten. Binnen de Kaderrichtlijn Water is vooral aandacht voor de chemische en ecologische waterkwaliteit en aquatische natuur. In de PAGW wordt gestreefd naar veerkrachtige en toekomstbestendige natuur in de Nederlandse grote wateren. Binnen dit programma worden in de periode 2021 – 2023 streefbeelden opgesteld, waarin zowel kwantitatieve (in termen van arealen leefgebied) als kwalitatieve doelen worden gesteld. Op dit moment zijn binnen de PAGW alleen eerste verkenningen voor mogelijke toekomstbeelden beschikbaar voor een aantal hotspots binnen het rivierengebied, namelijk voor de Gelderse Poort, de Grensmaas, de IJssel-Vechtdelta en de Biesbosch (Van der Sluis et al., 2020). Deze locaties zijn geselecteerd omdat de potentie voor verdere versterking van het rivierecosysteem hier relatief groot is. Voor deze vier gebieden zijn ecotopenkaarten gemaakt voor de huidige situatie en de gewenste situatie in 2050.

Binnen de genoemde programma's wordt dus op verschillende manieren getracht de natuur in het rivierengebied te verbeteren. De komende jaren zijn we in elk geval wettelijk gebonden aan de KRW- en N2000-doelen. Daarom gebruiken we deze doelen om antwoord te geven op de vraag of en wanneer een knelpunt voor natuur optreedt onder huidig beleid. De N2000-doelen zijn binnen onze analyse dan het meest relevant, omdat de haalbaarheid van deze doelen direct afhangt van rivierbodemerosie en klimaatverandering. Binnen de KRW ligt de focus meer op ecologische waterkwaliteit, die ook door veel andere factoren wordt beïnvloed.

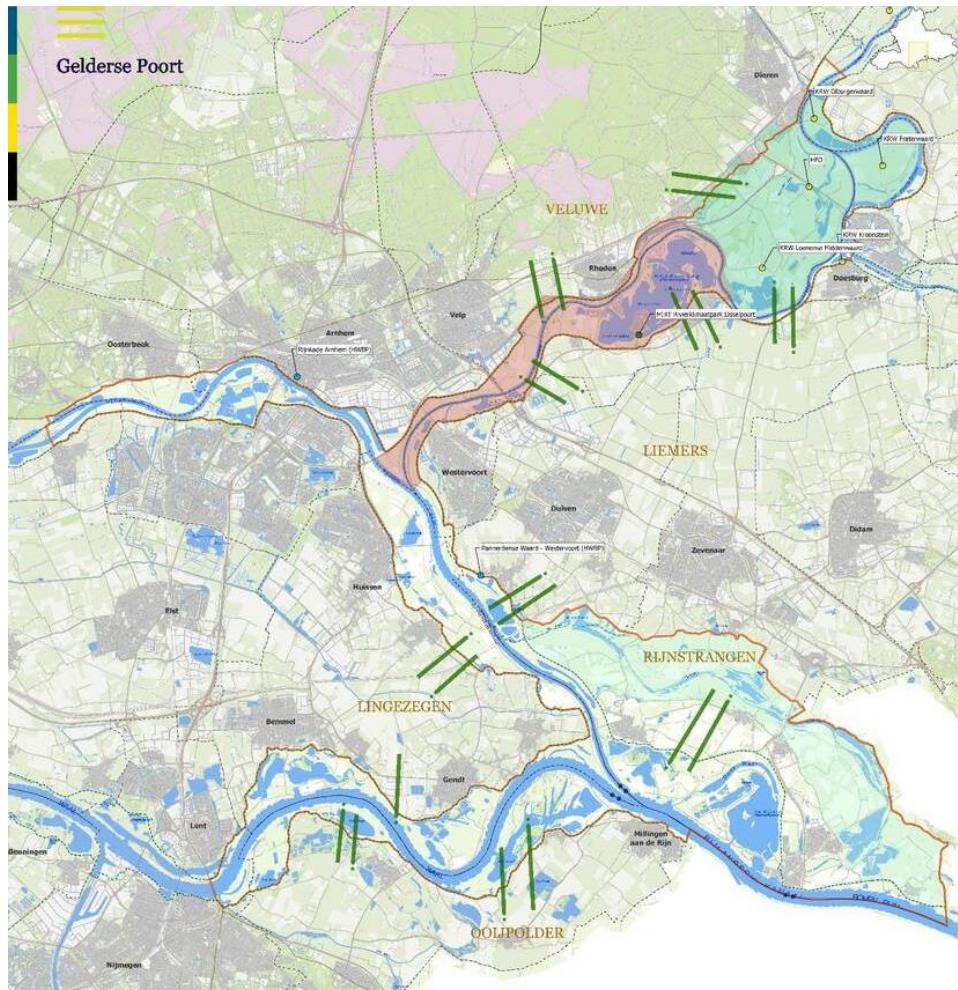
Het knelpunt voor natuur kan dan worden gedefinieerd als het moment waarop (naar verwachting) niet meer wordt voldaan aan N2000-doelen (in dit geval voor de Gelderse Poort). In de hierop volgende paragrafen proberen we dit moment vast te stellen.

## 5.4

### Focusgebied: Gelderse Poort

In de analyse voor natuur focussen we op de Gelderse Poort, het gebied rondom de bovenloop van Waal, Neder-Rijn en IJssel (Figuur 5.2). Hier zijn de grootste veranderingen in (grond)waterstanden te verwachten als gevolg van bodemerosie en klimaatverandering. Daarnaast is dit gebied een hotspot vanuit de PAGW en aan aangewezen N2000-gebied. Ook zijn voor dit gebied eerder al analyses uitgevoerd in het kader van de Basisrivierbodemligging (BRL) en Integraal Riviermanagement (IRM), waar we hier zoveel mogelijk gebruik van maken.

We kijken alleen naar de buitendijkse terrestrische natuur in dit gebied. De binnendijkse natuur wordt minder direct beïnvloed door veranderingen in de rivier, waardoor de relatie hiertussen minder makkelijk in beeld te brengen is.



Figuur 5.2 Gebiedskaart Gelderse Poort als in deze studie beschouwd (bron: Bouman et al., 2023).

## 5.5

### Bestaande analyses: effectbepaling BRL en nulalternatief IRM

Recent zijn twee studies uitgevoerd naar het effect van bodemerosie en klimaatverandering op natuur in het riviergebied.

De eerste studie, die is uitgevoerd door Levelt et al. (2022) in het kader van het project Basisrivierbodemligging (BRL), probeert antwoord te geven op de vraag welke eisen de natuur stelt aan de bodemligging van het zomerbed.

Deze studie bekijkt de effecten van bodemerosie en de potentie van integrale ophoging van de rivierbodem als maatregel ten behoeve van natuur, op basis van de volgende scenario's voor de rivierbodemligging:

- Referentie: huidige rivierbodemligging (2018)
- Trend: verwachte rivierbodemligging in 2050 volgens Sloff (2019; 2021)
- Plus: Een rivierbodemligging die integraal is verhoogd (+50 cm op de Rijntakken en +25 cm op de Maas)
- Min: Een rivierbodemligging die integraal is verlaagd (-50 cm op de Rijntakken en -25 cm op de Maas).

De effecten van klimaatverandering worden in deze studie niet beschouwd.

Voor de effectbepaling van het nulalternatief IRM (Asselman et al., 2022a) zijn de effecten van zowel klimaatverandering als bodemerosie bekeken. In deze studie zijn de volgende scenario's beschouwd:

- Ref\_2018: huidig klimaat en rivierbodemligging (huidige situatie)
- Ref\_2050: huidig klimaat, maar met veranderde rivierbodemligging in zichtjaar 2050
- WHdry\_2018: klimaatverandering conform het klimaatscenario WHdry, in combinatie met bodemligging 2018
- WHdry\_2050: dit is het nulalternatief van IRM. Klimaat en rivierbodemligging zijn beide aangepast naar de verwachte situatie in 2050.
- Ref\_2018\_LB: huidige situatie, maar onder de aanname dat landbouwgrond beschikbaar komt voor natuurontwikkeling (bij de vier bovenstaande analyses is aangenomen dat landbouwgebieden niet beschikbaar zijn voor natuur).

Voor de rivierbodemligging in 2050 wordt dezelfde prognose gebruikt als in het scenario Trend van de BRL-studie.

### 5.5.1 Methode

De twee studies maken grotendeels gebruik van dezelfde methodiek, die schematisch is weergegeven in Figuur 5.3. Hierin worden de volgende stappen doorlopen:

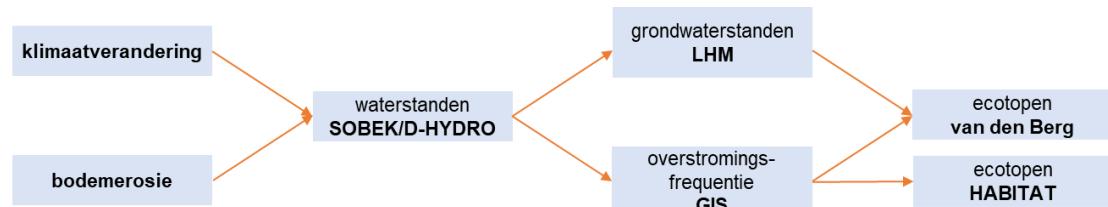
1. bepaling rivierwaterstanden voor bovengenoemde scenario's. Voor de BRL is hiervoor een 1D-model in SOBEK gebruikt, terwijl binnen IRM een 2D-model in D-HYDRO is toegepast.
2. vertaling van waterstanden naar grondwaterstanden met het Landelijk Hydrologisch Model (LHM). Hierin wordt zowel naar buitendijkse als binnendijkse grondwaterstanden gekeken. Bij het gebruik van LHM voor deze toepassing worden echter enkele belangrijke kanttekeningen gemaakt:
  - a. Met cellen van  $250 \times 250 \text{ m}^2$  is de resolutie van dit model relatief grof. Met name buitendijks, waar de variatie in bodemhoogte en grondwaterstanden groot is, is deze resolutie niet toereikend voor de beoogde toepassing. Er zijn echter geen landelijke modellen met fijnere resolutie beschikbaar.
  - b. Daarnaast is voor buitendijkse gebieden geen rekening gehouden met het type ondergrond (bodemtextuur), terwijl dit de grondwaterstanden in de praktijk sterk beïnvloedt. Ook met kwel is geen rekening gehouden.
  - c. In binnendijkse gebieden neemt de invloed van de rivierwaterstand op het grondwater af naarmate de afstand tot de rivier toeneemt. Hier zijn de inrichting van het oppervlaktewatersysteem en het peilbeheer belangrijker.
3. vertaling van waterstanden naar overstromingsfrequentie op basis van bodemhoogtedata uit Baseline, de GIS-database van Rijkswaterstaat.

- vertaling van overstromingsduur naar **potentiële ecotooptypen** in het **buitendijkse** gebied. Hiervoor is HABITAT gebruikt, een tool waarin effectrelaties tussen overstromingsduur en potentiële ecotooptypen worden gecombineerd met overstromingsduurkaarten en landgebruikkaarten. Alleen in de gebieden met functie natuur worden potentiële ecotooptypen bepaald (behalve in het scenario Ref\_2018\_LB van IRM). De effectrelaties zijn gegeven in Tabel 5.1. Een belangrijke kanttekening bij deze relaties is dat geen rekening wordt gehouden met het beheer van natuurgebieden, terwijl dit uiteindelijk in grote mate bepaalt wat voor natuur op een bepaalde plek ontstaat. Bij de overstromingsduurkaarten is geen rekening gehouden met de aanwezige zomerkaden en het beheer daarvan. Zomerkaden kunnen ervoor zorgen dat gebieden minder vaak overstroomen (kortere overstromingsduur), maar ook dat water wordt vastgehouden (langere overstromingsduur).

Binnen IRM is naast naar overstromingsduur ook naar grondwaterstanden gekeken voor de bepaling van potentiële ecotooptypen. De hieruit resulterende kaart met potentiële ecotooptypen is vergeleken met het streefbeeld van de PAGW voor 2050. Omdat de PAGW ervan uitgaat dat landbouwgebieden beschikbaar zullen worden gesteld voor natuur wordt voor de vergelijking het resultaat van het scenario Ref\_2018\_LB gebruikt. Dit scenario gaat echter uit van de huidige bodemligging en het huidige klimaat en is dus eigenlijk niet representatief voor de situatie in 2050.

- vertaling van grondwaterstanden en overstromingsfrequentie naar de geschiktheid van de omstandigheden voor **bestaande ecotopen** in het **buitendijkse** gebied. Deze stap is alleen uitgevoerd in de BRL. Hierin wordt dus niet gekeken naar de potentie van uiterwaarden voor bepaalde typen natuur, maar naar de ecotooptypen die daar nu te vinden zijn. Om te bepalen of de omstandigheden voor de bestaande ecotopen (te) droog, goed of juist (te) nat zijn worden de effectrelaties ontwikkeld door Van den Berg (2021) gebruikt. Deze zijn gegeven in Tabel 5.2. Hierin zijn een groot aantal verschillende ecotooptypen ingedeeld in 5 klassen. Voor deze klassen zijn relaties ontwikkeld op basis van literatuur en expert judgement.

Met name de relaties met grondwaterstand kennen echter een grote onzekerheid en conflicteren soms onderling (de GHG moet dan bijvoorbeeld lager blijven dan de GVG). De relaties op basis van overstromingsduur zijn beter onderbouwd en onderzocht (zie bijv. Rademakers en Wolfert, 1994), hoewel ook deze relaties sterk worden gegeneraliseerd als gevolg van de indeling in een beperkt aantal klassen. Aan de criteria voor GHG, GLG en GVG is geen hiërarchie toegekend op basis van de sterkte van de correlatie met het desbetreffende ecotootype. In de BRL is ervoor gekozen alleen gebruik te maken van de relaties met overstromingsfrequentie en GVG, en daarbij meer gewicht toe te kennen aan de staat die volgt uit de overstromingsrelatie.



Figuur 5.3 Schematische weergave van de gebruikte methodiek in de studies van Asselman et al. (2022a) en Leeveld et al. (2022).

Tabel 5.1 Relatie inundatieduur en geschiktheid ecotooptypen zoals gebruikt in HABITAT

| Inundatiefrequentie<br>(dagen per jaar) | Diepteklasse           | Landgebruik | Ecotoop                                |
|---|------------------------|-------------|--|
| 0                                       | > -30 cm (boven water) | alle        | Niet beschikbaar                       |
| 365                                     | > 20 cm (onder water)  | natuur      | Drijfplanten- en waterplantenzone/zoet |
| 365                                     | 0–20 cm (onder water)  | natuur      | Helofytenzone/zoet                     |
| 150 – 365                               |                        | natuur      | Droogvallende zone/zoet                |
| 50 – 150                                |                        | natuur      | Zachthoutzone/zoet                     |
| 2 – 50                                  |                        | natuur      | Hardhoutzone/zoet                      |
| 0 – 2                                   |                        | natuur      | Hoogwatervrije zone/zoet               |

Tabel 5.2 Relatie grondwaterstand en geschiktheid ecotooptypen zoals afgeleid door Van den Berg (2021)

|                       |  | Productiegrasland/bouwland |     |      |     |      |      |
|-----------------------|--|----------------------------|-----|------|-----|------|------|
|                       |  | Kale oever                 |     |      |     |      |      |
|                       |  | Bebouwd/verhard            |     |      |     |      |      |
|                       |  | Zadithoutooibos/struweel   |     |      |     |      |      |
|                       |  | Hardhoutooibos/struweel    |     |      |     |      |      |
|                       |  | Nat grasland               |     |      |     |      |      |
|                       |  | Droog grasland             |     |      |     |      |      |
|                       |  | Riet/noerasruigte          |     |      |     |      |      |
| <b>GVG</b>            |  | Sub                        | 250 | 999  | 70  | 999  | 25   |
|                       |  | Min                        | 35  | 999  | 50  | 999  | 5    |
|                       |  | Max                        | -10 | 40   | -5  | 70   | -50  |
|                       |  | Sub                        | -20 | 20   | -20 | 50   | -75  |
| <b>GLG</b>            |  | Sub                        | 80  | 140  | 120 | 200  | 60   |
|                       |  | Min                        | 50  | 120  | 80  | 120  | 50   |
|                       |  | Max                        | 0   | 80   | 30  | 100  | 5    |
|                       |  | Sub                        | -10 | 70   | -20 | 80   | -5   |
| <b>GHG</b>            |  | Sub                        | 40  | 120  | 40  | 999  | 20   |
|                       |  | Min                        | 20  | 80   | 20  | 999  | 10   |
|                       |  | Max                        | -20 | 40   | -20 | 50   | -50  |
|                       |  | Sub                        | -50 | 30   | -50 | -20  | -200 |
| <b>Inundatie-duur</b> |  | Sub                        | 10  | -999 | 10  | -999 | 50   |
|                       |  | Min                        | 50  | 0    | 50  | 0    | 160  |
|                       |  | Max                        | 135 | 35   | 100 | 10   | 220  |
|                       |  | Sub                        | 200 | 50   | 160 | 35   | 300  |

### 5.5.2 Resultaten

Samengevat leveren de analyses uit de BRL en IRM de volgende typen resultaten op:

1. kaarten met potentiële ecotooptypen voor verschillende rivierbodemligging- en klimaatscenario's.
2. vergelijking van deze kaarten met natuurdoelstellingen (zoals het streefbeeld van de PAGW).
3. kaarten met standplaatsgeschiktheid voor bestaande ecotopen. In theorie zouden we dit soort kaarten ook voor gewenste ecotopen kunnen maken.

Uit de IRM- en BRL-analyses blijkt dat de effecten van bodemerosie en klimaatverandering op de verdeling van potentiële ecotopen klein zijn: de kaarten voor de beschouwde scenario's verschillen weinig van elkaar.

Dit geldt voor zowel de Rijn als de Maas. In algemene zin kan worden gesteld dat de uiterwaarden nu te droog zijn voor de meeste typen riviernatuur. Een verdere afname van de GVG en GLG verergert de situatie, maar dit resulteert niet in een andere geschiktheid (de uiterwaarden blijven vooral geschikt voor de drogere ecotooptypen). Door klimaatverandering zal de overstromingsduur op de Rijn iets toenemen, maar ook dit resulteert niet in grote veranderingen in potentiële ecotoopverdeling.

Wanneer we kijken naar de geschiktheid van de buitendijkse gebieden voor de huidige (nu voorkomende) ecotooptypen, blijkt dat de situatie voor natte ecotoopgroepen veelal te droog is, terwijl de omstandigheden voor droge ecotoopgroepen meestal redelijk goed zijn (met name langs de Rijntakken). Dit zou betekenen dat voor natte ecotooptypen al een knelpunt is bereikt, als tenminste het doel is om deze te behouden.

## 5.6 Nieuwe analyse op basis van overstromingsduur

Als aanvulling op de resultaten uit de BRL en IRM is binnen deze studie een extra analyse gedaan van de standplaatsgeschiktheid voor bestaande N2000-habitattypen (buitendijks) op basis van overstromingsduur. Het focusgebied is ook hier de Gelderse Poort.

### 5.6.1 Methode

Dit aanvullende onderzoek maakt grotendeels gebruik van dezelfde methodiek als gebruikt in de BRL en IRM. De methode is op de volgende drie punten aangepast:

1. Ten eerste wordt de standplaatsgeschiktheid alleen bepaald op basis van overstromingsduur, niet op basis van grondwaterstanden. De relaties met overstromingsduur kunnen beter worden onderbouwd, en de analyse wordt op deze manier een stuk eenvoudiger.
2. Daarnaast is er uitgegaan van de N2000-habitattypen die momenteel voorkomen in de Gelderse Poort, op basis van de habitatprofielen uit N2000<sup>4</sup>. In deze studie zijn 11 unieke habitattypen beschouwd. Voor elk type is een bandbreedte bepaald voor de meest gunstige overstromingsduur, zie Tabel 5.3. Deze bandbreedte is gebaseerd op de beschikbare data in de habitatprofielen en expert judgement.
3. Tot slot zijn de gebruikte overstromingsduurdata in HABITAT opgedeeld in 22 klassen in plaats van 7, zie Tabel 5.4. Bij de indeling van de overstromingsduren is meer detail aangebracht in de lagere overstromingsduren (<150 dagen). Met name de habitattypen voorkomend in een droger milieu zijn immers gevoelig voor verschuivingen in de (korte) overstromingsduur. Een kleine verschuiving kan hier bijvoorbeeld al snel tot een verdubbeling van de gewenste overstromingsduur leiden. Bij habitattypen die in een natter milieu gedijen zal eenzelfde absolute verandering minder effect hebben.

Overstromingsduur is één van de criteria die bepaalt welk type habitat ontstaat. Substraat en nutriënten kunnen ook een rol spelen. Deze zijn hier echter niet beschouwd. Concreet is voor 11 verschillende habitattypen gekeken of de overstromingsduur op verschillende N2000-locaties optimaal is of niet. In dit hoofdstuk worden de resultaten voor vier veel voorkomende habitattypen besproken. De resultaten voor de overige zeven zijn opgenomen in Bijlage D. Voor deze analyse is gebruik gemaakt van dezelfde klimaat- en bodemverandering-scenario's als in IRM.

---

<sup>4</sup> <https://www.natura2000.nl/beschermde-natuur/habitattypen>

Tabel 5.3 N2000-habitattypen voorkomend in de Gelderse Poort gekoppeld aan optimale overstromingsduur als beschreven in de voor N2000 opgestelde habitatprofielen. De dikgedrukte N2000-habitattypen worden in het vervolg van dit hoofdstuk besproken (bron: <https://www.natura2000.nl/beschermd-natuur/habitattypen>)

| N2000-habitattype                                    | N2000 CODE | Overstromingsduur profiel  | min dagen | max dagen |
|--|------------|--|-----------|-----------|
| <b>Glanshaver en vossenstaarthooilanden</b>          | H6510 A    | <b>regelmatig/incidenteel/niet</b>                                     | 0         | 10        |
| <b>Droge hardhoutooibossen</b>                       | H91F0      | regelmatig/ <b>incidenteel/niet</b>                                    | 1         | 10        |
| <b>Stroomdalgraslanden</b>                           | H6120      | regelmatig/ <b>incidenteel/niet</b>                                    | 0         | 1         |
| <b>Vochtige alluviale bossen; Zachthoutooibossen</b> | H91E0 A    | <b>dagelijks lang / dagelijks kort / regelmatig / incidenteel/niet</b> | 10        | >60       |
| Vochtige alluviale bossen; Beekbegeleidende bossen   | H91E0 C    | <b>regelmatig/incidenteel/niet</b>                                     | geen data | geen data |
| Vochtige alluviale bossen; Essen-iepenbossen         | H91E0 B    | <b>regelmatig/incidenteel/niet</b>                                     | 1         | 10        |
| Ruitingen en zomen droge bosranden                   | H6430 C    | <b>Incidenteel/niet</b>  | 0         | 1         |
| Ruitingen en zomen moerasspirea                      | H6430 A    | <b>regelmatig/incidenteel/niet</b>                                     | geen data | geen data |

Tabel 5.4 Het verschil in detail voor de gebruikte overstromingsduurklassen in IRM (links) en in de huidige analyse (rechts).

| Overstromingsduur IRM<br>(max. dagen per jaar) | Maximale overstromingsduur<br>deze analyse<br>(max. dagen per jaar) |
|--|---|
| 0  | 0   |
| 2  | 2   |
| 50   | 10  |
| 150  | 20  |
| 364  | 30  |
| <b>365 (&lt; 20 cm onder water)</b>            | ...   |
| <b>365 (&gt; 20 cm onder water)</b>            | 130   |
|  | 140   |
|  | 150   |
|  | 200   |
|  | 250   |
|  | 300   |
|  | 355   |
|  | 365   |

## 5.6.2 Resultaten

### 5.6.2.1

#### Glanshaver en vossenstaarthooilanden: afname van gunstig habitatareaal door vernatting

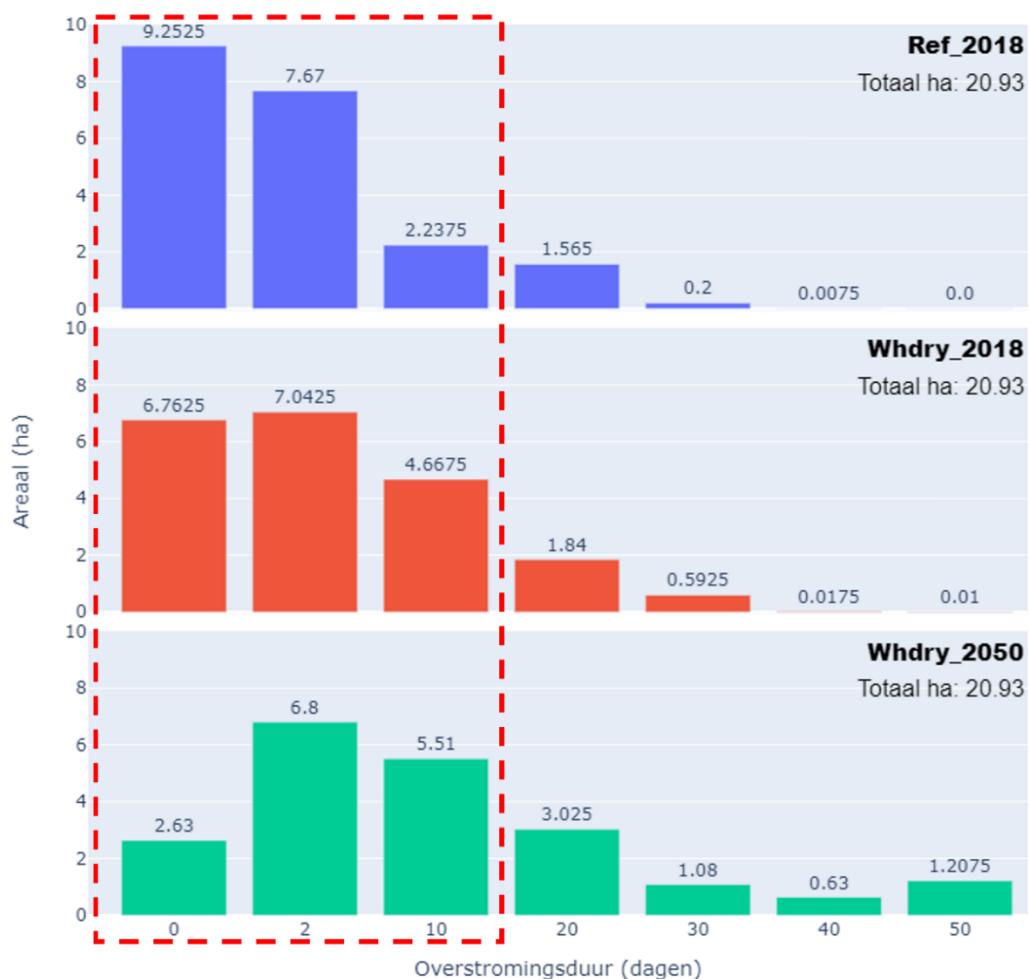
In de huidige situatie (Ref 2018) is te zien dat in een deel van de gebieden waar Glanshaver en vossenstaarthooilanden (verder Glanshaver) voorkomt de omstandigheden niet ideaal zijn (deze gebieden overstroomen te vaak). Dit betreft zo'n 8 procent van het totale areaal. Het effect van klimaatverandering is terug te zien in het scenario WHdry 2018. Ten opzichte van de huidige situatie (Ref 2018) is er een toename van areaal dat te vaak overstroomt.

Dit wijst op een vernatting van het gebied waar nu Glanshaver staat. Als wordt aangenomen dat Glanshaver alleen behouden kan blijven in gebieden waar de overstromingsduur optimaal is, neemt het areaal Glanshaver af van 19,2 naar 18,5 ha (Tabel 5.5).

In het scenario waar klimaatverandering, bodemerosie en de reeds geplande uiterwaardvergravingen worden meegenomen (WHdry 2050), is er een nog sterkere afname van het areaal te zien. Het areaal Glanshaver neemt dan af tot 14,9 ha. De toename van overstromingsduur in dat scenario ten opzichte van het scenario met huidige bodemligging en klimaatverandering (WHdry 2018) is met name toe te schrijven aan de uiterwaardvergravingen.

*Tabel 5.5 Verandering areaal binnen bandbreedte ideale overstromingsduur Glanshaver en vossenstaarthooilanden*

| Scenario   | Areaal ideaal (ha) | Verschil t.o.v. referentie (ha) |
|------------|--------------------|---------------------------------|
| Ref 2018   | 19,16              | 0                               |
| WHdry 2018 | 18,47              | -0,69 (-4%)                     |
| WHdry 2050 | 14,94              | -4,22 (-22%)                    |



*Figuur 5.4 Verdeling areaalen per overstromingsduur (per jaar) voor glanshaver en vossenstaarthooilanden. De overstromingsduren binnen het rode venster worden aangemerkt als ideaal voor het desbetreffende habitattype. De overstromingsduur is weergegeven als de bovengrens van voorkomen. Onder overstromingsduur 2 valt [>0 – 2 dagen], onder 10 valt [3 – 10 dagen], etc.*

#### 5.6.2.2

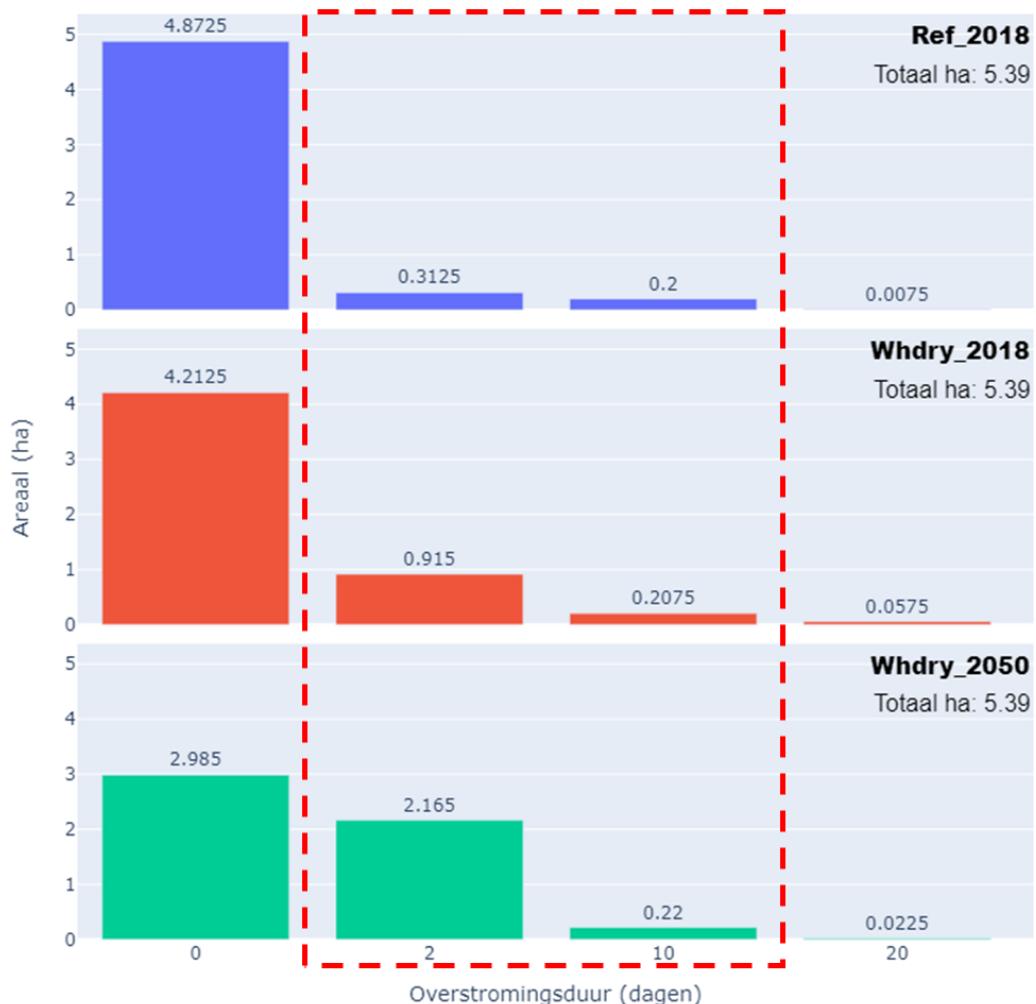
#### Droge hardhoutooibossen: Toename van gunstig habitatareaal door vernatting

Voor het habitattype droge hardhoutooibossen valt op dat dit nu veel voorkomt in uiterwaarden die nagenoeg niet overstroomen. Dit is een suboptimale situatie, kijkend naar alleen de overstromingsduur. Slechts 0,5 ha van de 5,4 ha (~10%) staat in uiterwaarden waar de overstromingsduur optimaal is.

Door klimaatverandering is eenzelfde vernattingstrend zichtbaar als bij de gebieden met Glanshaver. Dit lijkt voor dit habitattype gunstig te zijn, omdat hierdoor een groter areaal binnen de ideale bandbreedte valt (1,1 ha). Wanneer naast klimaatverandering ook de bodemligging wordt aangepast (vergravingen in uiterwaarden en bodemerosie), dan wordt de situatie nog beter met bijna een vervijfoudiging van het areaal dat binnen de bandbreedte valt (Tabel 5.6).

Tabel 5.6 Verandering areaal binnen bandbreedte ideale overstromingsduur droge hardhoutooibossen

| Scenario   | Areal ideaal (ha) | Verschil referentie (ha) |
|------------|-------------------|--------------------------|
| Ref 2018   | 0,51              | 0                        |
| WHDry 2018 | 1,12              | +0,61 (+119%)            |
| WHDry 2050 | 2,39              | +1,88 (+369%)            |



Figuur 5.5 Verdeling arealen per overstromingsduur (per jaar) voor droge hardhoutooibossen. De overstromingsduren binnen het rode venster worden aangemerkt als ideaal voor het desbetreffende habitattype. De overstromingsduur is weergegeven als de bovengrens van voorkomen.

### 5.6.2.3

#### Stroomgraslanden: afname van ideaal areaal door toename van overstromingsduur

In de gebieden waar momenteel stroomgraslanden voorkomen zien we een vernoeding, wat resulteert in te vaak overstromend areaal en daarom ongunstig is. Dit effect is vergelijkbaar met wat bij Glanshaver wordt verwacht. In het scenario WHdry 2050 wordt nog maar in driekwart van het huidige areaal de ideale overstromingsduur verwacht voor te komen.

Tabel 5.7 Verandering areaal binnen bandbreedte ideale overstromingsduur stroomgraslanden

| Scenario   | Areal ideaal (ha) | Verschil t.o.v. referentie (ha) |
|------------|-------------------|---------------------------------|
| Ref 2018   | 11,77             | 0                               |
| WHdry 2018 | 9,88              | -1,89 (-16%)                    |
| WHdry 2050 | 9,11              | -2,66 (-23%)                    |



Figuur 5.6 Verdeling arealen per overstromingsduur (per jaar) voor stroomgraslanden. De overstromingsduren binnen het rode venster worden aangemerkt als ideaal voor het desbetreffende habitattype. De overstromingsduur is weergegeven als de bovengrens van voorkomen.

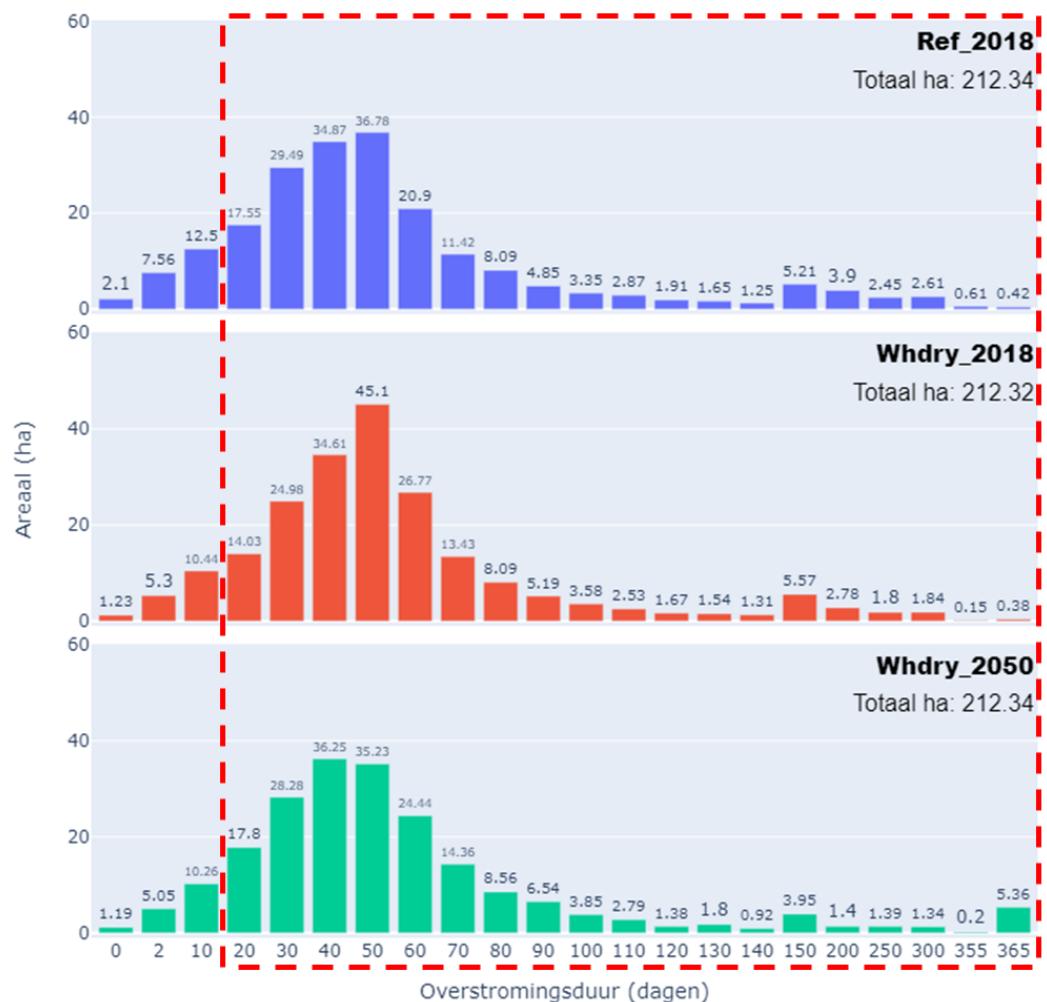
#### 5.6.2.4

#### Vochtige alluviale bossen; Zachthoutooibossen: Positief effect door toename overstromingsduur

Door de algehele vernattingstrend onder beide klimaatscenario's zal een groter areaal langer onder water staan, wat voor dit natte habitattype positief uitpakt. Zachthoutooibossen komen idealiter voor in gebieden met een overstromingsduur van minimaal 10 dagen per jaar. Absoluut gezien is deze toename groter dan bij de hierboven beschouwde habitattypen (Tabel 5.8), maar procentueel gezien is de toename van areaal klein (3%) onder beide scenario's.

Tabel 5.8 Verandering areaal binnen bandbreedte ideale overstromingsduur zachthoutooibossen

| Scenario   | Areaal ideaal (ha) | Verschil t.o.v. referentie (ha) |
|------------|--------------------|---------------------------------|
| Ref 2018   | 190,18             | 0                               |
| WHDry 2018 | 195,37             | +5,19 (+3%)                     |
| WHDry 2050 | 195,84             | +5,66 (+3%)                     |



Figuur 5.7 Verdeling arealen per overstromingsduur (per jaar) voor zachthoutooibossen. De overstromingsduren binnen het rode venster worden aangemerkt als ideaal voor het desbetreffende habitattype. De overstromingsduur is weergegeven als de bovengrens van voorkomen.

#### 5.6.2.5 Overige habitattypen

Het algehele beeld in de Gelderse Poort is dat er onder de doorgerekende klimaatscenario's en met of zonder bodemerosie of uiterwaardvergraving vernatting optreedt bij alle habitattypen, omdat de uiterwaarden vaker zullen overstroomen. Voor de vochtige habitattypen is dit een positieve trend (o.a. zachthoutooibossen). Voor relatief droge typen zou dit nadelig kunnen uitpakken. Echter bij de habitattypen die in optimale condities niet mogen overstroomen is er ook nauwelijks toename van de overstromingsduur (o.a. Beuken/Eikenbossen). Dit komt doordat deze typen vaak al op hoger gelegen gebieden staan die ook bij klimaatverandering niet of nauwelijks overstroomen.

#### 5.6.3 Andere gevolgen van veranderende rivierdynamiek

Naast de verandering in overstromingsduur zijn er ook andere aspecten die het voorkomen van een habitattype bepalen. Binnen de gebiedsanalyse Rijntakken (Dorland et al., 2017), die is opgesteld in het kader van het voormalige Programma Aanpak Stikstof (PAS), is voor verschillende habitattypen een probleemanalyse gedaan, waaronder de hierboven genoemde typen. In de gebiedsanalyse zijn meerdere aspecten verkend die er voor kunnen zorgen dat de N2000-habitattypen onder druk komen te staan. Ingeperkte rivierdynamiek, uitgedrukt in onder andere de overstromingsduur, is een van deze knelpunten. Overstromingsduren hebben namelijk ook invloed op de zuurgraad, voedselrijkheid en bufferfunctie van de ondergrond.

De afgelopen decennia is er in het algemeen een afnemende trend in de rivierdynamiek waardoor de gemiddelde overstromingsduur per jaar korter geworden is (Dorland et al., 2017). Hierdoor wordt de bufferwerking van de ondergrond minder groot en is er meer kans op verzuring van de bodem (Huiskes et al., 2012). Dit geldt voor alle habitattypen, maar met name voor de habitattypen die gebaat zijn bij een vochtigere ondergrond. Onder het WHdry-klimaatscenario wordt verwacht dat de overstromingsduren weer toenemen. Dit zou een positief effect hebben op de bufferfunctie en daardoor de standplaatsgeschiktheid.

Overstroming is van belang voor de instandhouding en successie van een habitat, maar deze mag niet te lang duren. Voor glanshaver en stroomgraslanden ligt deze grens bijvoorbeeld op maximaal 10 dagen per jaar, en niet voorkomend tijdens het groeiseizoen (Adams et al., 2012). Dit groeiseizoen loopt doorgaans van medio maart tot en met eind juli. In het WHdry-klimaatscenario wordt juist aan het begin van de lente (tot medio april) een toename in hoogwaters verwacht. Dit verhoogt de kans op overstromingen gedurende de meest kwetsbare periode van het groeiseizoen.

### 5.7 Wanneer wordt een knelpunt bereikt?

Uit de eerdere resultaten van BRL en IRM, op basis van veranderingen in overstromingsduur en grondwaterstand, blijkt dat in de huidige situatie de omstandigheden voor 'natte' ecotoopgroepen veelal te droog zijn, terwijl de omstandigheden voor 'droge' typen meestal redelijk goed zijn. Voor natte ecotoopgroepen is dus nu al sprake van een knelpunt.

Uit de nieuwe analyse van overstromingsduren in de Gelderse Poort (paragraaf 5.6) blijkt dat klimaatverandering en uiterwaardvergraving beide tot een toename van overstromingsduren leiden. Welke ontwikkeling het grootste effect heeft wordt grotendeels bepaald door de ligging van het habitattype ten opzichte van de geplande uiterwaardvergraving.

Kijkend naar de overstromingsduur blijkt dat met name de habitattypen die gedijen in een droger milieu naar verwachting areaal zullen verliezen, waardoor mogelijk niet aan de N2000-doelstellingen kan worden voldaan. Uitgaande van de overstromingsduur kan in de toekomst dus een knelpunt optreden voor droge ecotootypen, terwijl de situatie voor natte ecotootypen juist verbeterd.

Als gevolg van bodemerosie kunnen de grondwaterstanden echter sterk dalen (tot max. 20 cm in 2050, zo blijkt uit de BRL- en IRM-analyse). Door klimaatverandering kan met name de gemiddeld laagste grondwaterstand (GLG) dalen. Het effect hiervan (verdroging) is tegengesteld aan het effect van de toenemende overstromingsduren. Onbekend is wat zwaarder weegt voor de verschillende habitattypen. Op basis van de huidige resultaten is dus niet vast te stellen wanneer knelpunten precies op zullen treden en of de nu al waargenomen knelpunten kleiner of juist groter zullen worden.

## 5.8 Maatregelen

Het is duidelijk dat met ingrepen de omstandigheden voor natuur sterk beïnvloed kunnen worden:

- Uit de aanvullende analyse beschreven in paragraaf 5.6 blijkt bijvoorbeeld dat het effect van het uitvoeren van geplande **uiterwaardvergravingen** in sommige gevallen groter is dan het effect van klimaatverandering. Deze maatregel kan gunstig zijn voor natuur op plekken waar de omstandigheden nu te droog zijn.
- Om PAGW-doelstellingen te halen lijkt het daarnaast noodzakelijk om een groter percentage van het **uiterwaardoppervlak beschikbaar te stellen aan natuur** (Asselman et al., 2022a). Dit gaat ten koste van het beschikbare oppervlak voor landbouw.
- Uit de BRL- en IRM-resultaten blijkt dat het tegengaan van bodemerosie in het zomerbed juist weinig effect sorteert. Het effect van deze ingreep op de overstromingsduur en de grondwaterstanden is, wanneer de ophoging beperkt is tot enkele decimeters, onvoldoende om uiterwaarden geschikt te maken voor nattere ecotooptypen.

In deze studie kijken we alleen naar de effecten van rivierkundige ontwikkelingen op natuur in de uiterwaarden. In het algemeen heeft de natuur in Nederland echter te maken met nog een aantal andere schadelijke invloeden. Denk bijvoorbeeld aan stikstofdepositie, invasieve exoten en slechte waterkwaliteit. Maatregelen om deze invloeden te verminderen kunnen ook bijdragen aan het halen van natuurdoelstellingen.

## 5.9 Conclusies

Door klimaatverandering en rivierbodemerosie kunnen natuurdoelen, met name doelen gericht op behoud van bestaande natuur, in het gedrang komen. Een knelpunt voor natuur is in deze studie gedefinieerd als het moment waarop (naar verwachting) niet meer wordt voldaan aan N2000-doelen.

Uit eerdere analyses (Leveld et al., 2022 en Asselman et al., 2022a) blijkt dat het nu al vaak te droog is voor natte ecotooptypen, terwijl de situatie voor droge ecotooptypen over het algemeen redelijk goed is. Deze conclusie is gebaseerd op de effecten van veranderingen in zowel grondwaterstanden als overstromingsduur.

In deze studie is in meer detail gekeken naar het effect van veranderingen in overstromingsduur op N2000-habitattypen in de Gelderse Poort. Hieruit blijkt dat de omstandigheden voor droge habitattypen veelal iets verslechteren als gevolg van klimaatverandering en (in nog grotere mate) geplande uiterwaardvergravingen. Voor deze habitattypen zou in de toekomst een knelpunt op kunnen treden als we kijken naar overstromingsduur. Echter, omdat de (dalende) grondwaterstanden (GVG en GLG) niet beschouwd zijn in deze analyse en omdat er veel meer factoren zijn die standplaatsgeschiktheid bepalen, kan niet worden geconcludeerd wanneer een knelpunt precies optreedt.

Voor habitattypen die gebaat zijn bij een natter milieu zullen de omstandigheden qua overstromingsduur over het algemeen juist iets verbeteren als gevolg van de beschouwde ontwikkelingen.

Wel is duidelijk dat ingrijpende maatregelen nodig zijn om in de toekomst aan natuurdoelstellingen te voldoen. Mogelijkheden zijn uiterwaardvergravingen op plekken waar het nu te droog is, en meer ruimte voor natuur vrijmaken in de uiterwaarden.

## 5.10 Kennisvragen

Op dit moment is te weinig bekend over de effecten van klimaatverandering en rivierbodemerosie op buitendijkse natuur om te kunnen vaststellen wanneer een knelpunt optreedt. Effecten van rivierkundige maatregelen op natuur in uiterwaarden kunnen niet goed in beeld worden gebracht. Er is met name onvoldoende kennis over de effecten van veranderingen in overstromingsduren en grondwaterstanden op verschillende ecotooptypen. Bestaande effectrelaties zijn onvoldoende onderbouwd en zijn soms tegenstrijdig. De belangrijkste kennisvragen hangen daarom samen met het verbeteren en consistent maken van deze relaties. Ook is onbekend welke factor dominant is bij de effecten van klimaatverandering en veranderingen in het riviersysteem: overstromingsduur of grondwaterstand. Bijvoorbeeld, wanneer een uiterwaard door klimaatverandering in de winter vaker overstromt, maar in de zomer lagere grondwaterstanden kent, is dat dan gunstig of ongunstig voor natte rivierenatuur?

Daarnaast kunnen de modellen om overstromingsduren en grondwaterstanden te berekenen worden verbeterd. Het gaat dan bijvoorbeeld om:

- Het vergroten van de roosterresolutie van grondwatermodellen, waardoor ruimtelijke variaties beter kunnen worden gemodelleerd;
- Het opnemen van zomerkaden inclusief het beheer van aanwezige in- en uitlaatkunstwerken, zodat de overstromingsduur beter kan worden bepaald;
- Het toevoegen van informatie over het type ondergrond en bijbehorende eigenschappen.

## 6 Knelpunten voor hoogwaterveiligheid

### 6.1 Achtergrond

In het Nederlandse rivierengebied ligt ruim 1100 km aan primaire waterkeringen langs de Rijntakken en de Maas. Al generaties lang zijn miljoenen mensen voor hun veiligheid afhankelijk van een goed functionerend waterkeringensysteem langs de grote rivieren. Door klimaatverandering wordt verwacht dat de extremen in de rivieraafvoeren zullen toenemen. Meer extreme (en onverwachte) afvoergolven zullen door Nederland richting de Noordzee stromen, resulterend in grotere belastingen op het waterkeringensysteem. Daarnaast zal de invloed van de stijgende zeespiegel op de benedenloop van het rivierengebied toenemen, waardoor rivierwater moeilijker naar zee kan stromen. Om de kans op overstromingen te verkleinen zijn de afgelopen jaren al tal van projecten uitgevoerd in het kader van onder andere Ruimte voor de Rivier en Maaswerken. Met deze projecten wordt meer ruimte gegeven aan de rivieren, waardoor een robuuster systeem wordt gecreëerd.

Lopende onderzoekprogramma's die tot doel hebben om de waterveiligheid te vergroten zijn onder andere het Hoogwaterbeschermingsprogramma (HWBP), Beleidstafel wateroverlast en hoogwater, en Integraal riviermanagement (IRM). Het gemeenschappelijke doel van deze programma's is inzicht krijgen in de huidige en toekomstige staat van het riviersysteem, de keringen en mogelijke maatregelen om in 2050 te kunnen voldoen aan de gestelde waterveiligheidseisen.

### 6.2 Probleemdefinitie en onderzoeks vragen

Een sprekend voorbeeld van de mogelijke problemen waar we voor staan zijn de overstromingen van juli 2021. Extreme neerslag in het stroomgebied van de Maas leidde tot regionale overstromingen en grote wateroverlast in Limburg en delen van België en Duitsland. Als gevolg van klimaatverandering verwachten we dat de rivieraafvoer grilliger wordt en soortgelijke gebeurtenissen vaker voor zullen komen (zie hoofdstuk 2). In combinatie met zeespiegelstijging ontstaat zo een groeiende opgave om de hoogwaterveiligheid in Nederland te garanderen.

In het Nationaal Water Programma 2022-2027 (ministerie van IenW, 2022b) zijn door Rijkswaterstaat (de beheerder van het hoofdwatersysteem) enkele belangrijke beheeldoelen vastgesteld om de waterveiligheid in Nederland te kunnen blijven garanderen:

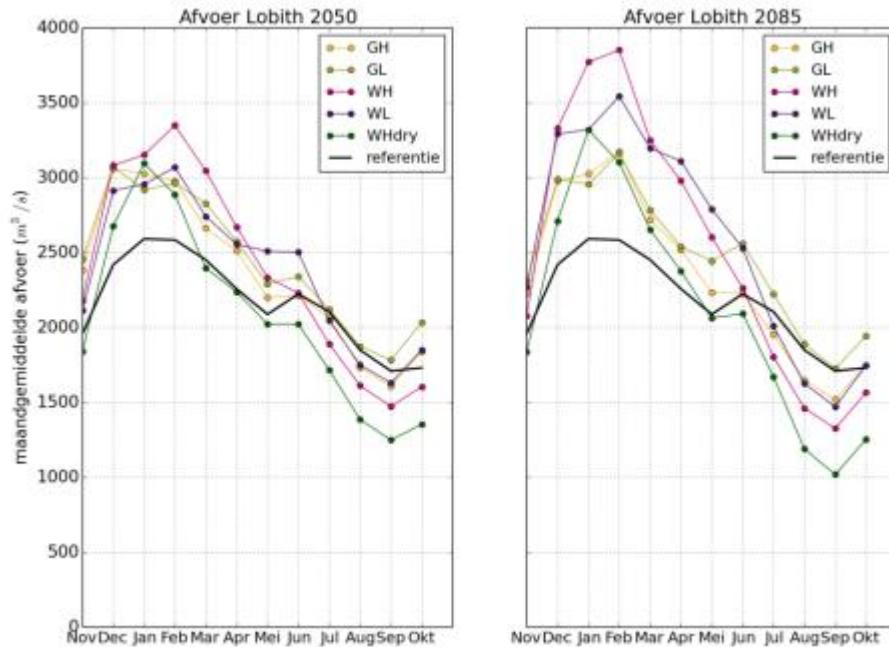
- Rijkswaterstaat wil de afvoercapaciteit behouden en vergroten voor de veilige afvoer van hoogwater (Rijn en Maas).
- Rijkswaterstaat wil de bergingscapaciteit in het benedenrivierengebied behouden (Rijn en Maas).
- Rijkswaterstaat wil bij hoogwater voldoende stuurmogelijkheden hebben om te voldoen aan de afgesproken afvoerverdeling op de Rijn.

#### 6.2.1 Vergrote belasting op de waterkeringen

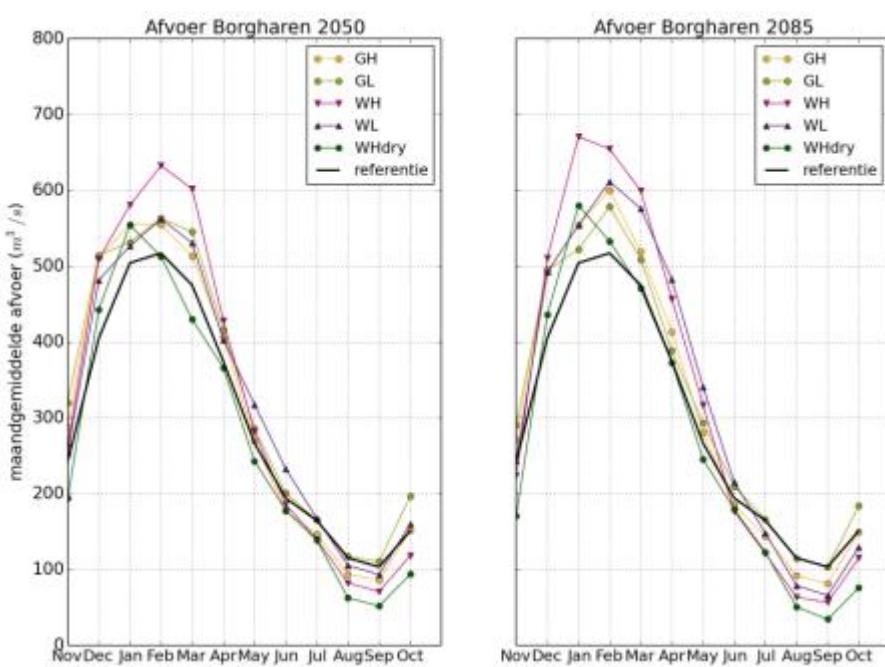
Hogere afvoeren en opstuwing door zeewater zullen resulteren in een hogere belasting op de waterkeringen. De keringen zullen hierop moeten worden aangepast. Binnen IRM is gekeken naar de impact van de veranderende afvoer onder het klimaatscenario W+ met een verder eroderende rivierbodem voor zichtjaar 2050. Hieruit komt naar voren dat klimaatverandering (in de vorm van toenemende afvoerextremen) zal leiden tot een toename van de belasting op de keringen.

De invloed van de eroderende rivierbodem is veel kleiner en bovendien tegengesteld: doordat het zomerbed van de rivier lager komt te liggen gaan de hoogwaterstanden met enkele centimeters omlaag.

In de KNMI'14-klimaatscenario's wordt uitgegaan van een toename in afvoerextremen. Voor zowel de Rijn als Maas nemen de maandgemiddelde afvoerextremen in de winter in alle scenario's toe (Figuur 6.1 & Figuur 6.2). Voor het meest extreme scenario, WH, is dit in 2050 al een toename van 30% en in 2085 zo'n 40%.



Figuur 6.1 Afvoerregime van de Rijn (Lobith) voor verschillende KNMI'14-klimaatscenario's. In zwart is de huidige maandgemiddelde afvoer weergegeven (Klijn et al., 2015).



Figuur 6.2 Afvoerregime van de Maas (Borgharen) voor verschillende KNMI'14-klimaatscenario's. In zwart is de huidige maandgemiddelde afvoer weergegeven (Klijn et al., 2015).

### 6.2.2

#### Bepaling van overstromingskansen

Momenteel is niet duidelijk hoe goed we overstromingskansen kunnen inschatten. Het gebruik van de nu beschikbare rekenregels en tools leidt tot zeer grote faalkansen voor waterkeringen. Dit is problematisch voor het berekenen van realistische overstromingsrisico's (voor de huidige situatie, maar ook in verschillende scenario's voor klimaatverandering).

Het hoogwater van juli 2021 heeft duidelijk gemaakt dat onzekerheden in berekende overstromingsrisico's niet alleen het gevolg zijn van onzekerheden in de berekende faalkans van waterkeringen. De overschrijdingskansen die we aanhouden voor de verschillende afvoerniveaus kunnen ook erg onzeker zijn. Zo wordt bij het bepalen van de belastingen alleen rekening gehouden met hoge rivieraafvoeren in het winterhalfjaar. De kans op een hoogwater op de Rijn of de Maas in het zomerhalfjaar werd tot de zomer van 2021 verwaarloosd.

### 6.2.3

#### Water afvoeren naar zee bij extreme zeespiegelstijging

De grote opgave is om het Nederlandse riviersysteem zo in te richten dat we de rivieraafvoer naar zee krijgen en het riviergebied leefbaar houden, ongeacht de mate van klimaatverandering. De stijging van de zeespiegel zal steeds verder doorwerken in het gebied dat beschermd wordt door de afsluitbare en vaste keringen. In een open systeem zal dit resulteren in verhoogde waterstanden op de rivieren. In Figuur 6.3 wordt dit opstuwingseffect weergegeven op de Waal, met verschillende zeespiegelstanden en in combinatie met een lage, mediane en hoge Rijnafvoer. Hoe hoger de zeewaterstand, hoe groter het effect op de rivierwaterstand en hoe verder het opstuwingseffect zich bovenstrooms uitstrekkt. Met het oog op 2100 wordt er in het meest extreme klimaatscenario (SSP5-8.5) een zeespiegelstijging van 0,5 tot 1,2 m verwacht (KNMI, 2021). Bij een stijging van 1 m zal het opstuwend effect op de Waal merkbaar zijn tot Tiel (Figuur 6.3). Een doorkijk tot 2300 leert dat onder datzelfde klimaatscenario de zeespiegelstijging kan toenemen tot 6 m.

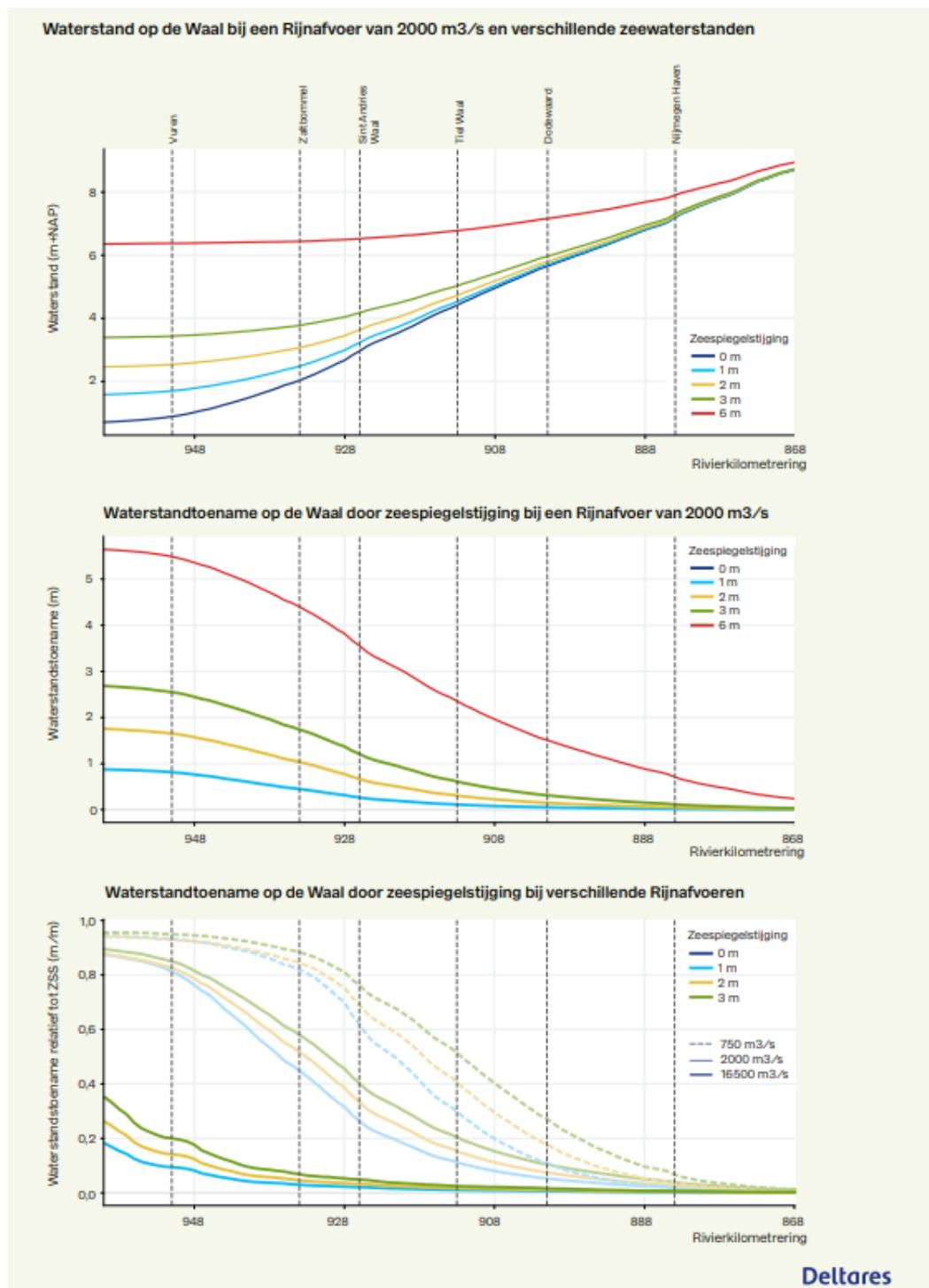
Onder dit scenario zal het opstuwend effect tot voorbij het splitsingspunt reiken, waardoor de afvoerverdeling zal worden beïnvloed (uitgaande van een mediane afvoer van 2000 m³/s).

De mate van invloed op de rivierwaterstand is afhankelijk van de rivieraafvoer. Gedurende lage rivieraafvoeren kan het opstuwend effect zich tientallen kilometers verder bovenstrooms verplaatsen. Bij hoge afvoeren is dit effect substantieel lager, zoals te zien is in Figuur 6.3.

Het steeds vaker gelijktijdig optreden van hoge zeewaterstanden aan de kust en hoge rivieraafvoeren zal problematisch worden. Tijdens deze situaties kan het rivierwater niet onder vrij verval geloosd worden, waardoor de afvoer wordt gelimiteerd door de beschikbare pompcapaciteit aanwezig bij de beweegbare kering. De huidige pompcapaciteit bij IJmuiden is momenteel bijvoorbeeld 260 m<sup>3</sup>/s en dat is zo'n acht keer kleiner dan de huidige mediane Rijnaafvoer (2000 m<sup>3</sup>/s).

Tegelijkertijd zorgt de benedenstroomse waterstandsstijging voor een afname in het verhang, wat weer doorwerkt op de stroomsnelheid. Deze zal afnemen, waardoor in bovenstroomse richting meer sedimentatie (of minder erosie) zal plaatsvinden. Een hoge afvoergolf kan dan moeilijker veilig richting zee worden afgevoerd, wat de kans op overstroming zal doen toenemen. Tevens kan een verandering in de rivierbodemligging doorwerken tot een verschuiving in de afvoerverdeling van de Rijn.

Een ander effect van de afname van het verhang is dat bestaande of nieuwe rivierverruimende maatregelen in het benedenrivierengebied steeds minder effect sorteren. Dit geldt onder meer voor de Overdiepse Polder, maar ook voor verschillende uiterwaardaafgravingen langs de benedenloop van de Rijntakken en de Maas. Om het effect van de bergingsgebieden gelijk te houden dient er in de toekomst meer bergingscapaciteit beschikbaar te zijn.



Figuur 6.3 Boven: Langsdoorsnede van de waterstanden op de Waal bij de huidige mediane Rijnafvoer (2.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith) en vijf zeewaterstanden bij Hoek van Holland. Midden: waterstandsverhoging in vergelijking met de situatie zonder zeespiegelstijging. Onder: Invloed van de zeespiegelstijging op rivierwaterstanden op de Waal (toename als fractie van de zeespiegelstijging) tijdens een hoogwatergebeurtenis met een (piek-)afvoer van 16.500 m<sup>3</sup>/s bij Lobith, een mediane afvoer van 2.000 m<sup>3</sup>/s bij Lobith en een laagwatergebeurtenis met een afvoer van 750 m<sup>3</sup>/s bij Lobith (Bron: data uit De Bruijn et al., 2022). Maeslantkering is open bij alle simulaties. Uit Haasnoot, Diermanse (ed.) (2022).

**6.2.4 Problemen voor infrastructuur**

Ook de stormvloedkeringen zullen met een stijgende zeespiegel op den duur niet meer aan de veiligheidsnorm kunnen voldoen, zonder grootschalige versterking of aanpassingen in het sluitingsregime. Keringen zullen niet alleen vaker dicht moeten, maar uiteindelijk ook te laag zijn en vervangen moeten worden. Met vaker gesloten keringen neemt ook de kans op een tekort aan afvoercapaciteit (spui, pompen) of bergingscapaciteit in het benedenrivierengebied toe.

**6.2.5 Onderzoeks vragen**

Hierboven zijn meerdere uitdagingen aangestipt waar in het waterveiligheidsbeleid rekening mee dient te worden gehouden. Om meer inzicht te krijgen in de grootte van deze uitdagingen op de lange termijn (>2050) wordt er in deze studie gefocust op de volgende vier onderzoeks vragen:

- Is er momenteel zicht op aankomende knelpunten binnen het waterveiligheidsbeleid?
- Welke factoren bepalen deze mogelijke knelpunten?
- Hoe gaan we om met de grote onzekerheden van klimaatverandering in het waterveiligheidsbeleid?
- Hoe gaan we om met de grote onzekerheden in de voorspelling en beoordeling van kansen en risico's bij het maken van langetermijnbeslissingen?

## 6.3 Uitkomsten lopende onderzoeken

Op het onderwerp waterveiligheid wordt de laatste jaren veel onderzoek gedaan. Denk aan de grote programma's als het Kennisprogramma Zeespiegelstijging, het Deltaprogramma Waterveiligheid, Integraal Rivier Management en de beleidstafel waterveiligheid. In deze studies ligt de focus op zichtjaar 2050 en wordt vaak alleen een door kijk gegeven naar de lange termijn (voorbij 2050). Deze studies kunnen wel als startpunt gebruikt worden om een beeld te vormen over mogelijke langetermijnknelpunten. Hieronder worden de belangrijkste uitkomsten van recent afgeronde onderzoeken op een rij gezet.

### 6.3.1 Integraal Rivier Management

Binnen het IRM-nulalternatief (dat is de situatie die zich naar verwachting in 2050 voordoet wanneer het huidige beleid wordt voortgezet) is er voor de periode 2018-2050 gekeken naar de dijkversterkingen die nodig zijn om in 2050 aan de beschermingsnormen te voldoen (Asselman et al., 2022a). Hierin is uitgegaan van een veranderende overschrijdingskans van afvoeren op basis van het klimaatscenario KNMI'06 W+ in combinatie met de verwachte verandering in rivierbodemligging.

De belangrijkste conclusies zijn als volgt:

- De dijkversterkingsopgave voor het nulalternatief IRM wordt grotendeels bepaald door de eisen die volgen uit de nieuwe normering in combinatie met klimaatverandering. De verandering in rivierbodemligging speelt slechts een kleine rol.
- De verandering in rivierbodemligging leidt tot iets lagere kosten voor dijkversterking, omdat de dijken door de verlaagde waterstanden iets minder hoog hoeven te worden. Het effect op de macrostabiliteit- en pipingopgave is minimaal omdat deze twee opgaven niet of nauwelijks afhankelijk zijn van de waterstand. De kostenbesparing als gevolg van de doorgaande rivierbodemerosie is minder dan 1% van de totale kosten voor hoogwaterbescherming in het bovenrivierengebied.

- Met de verwachte rivierbodemerosie zal de vastgestelde afvoerverdeling bij 17.000 m<sup>3</sup>/s (maatgevende afvoer voorzien vanaf 2050) volgens het principe “Lek Ontzien” haalbaar blijven. De regelwerken Pannerden en Hondsbroeksche Pleij zullen in deze situatie meer in een middenpositie staan dan nu het geval is. Hierdoor neemt het regelbereik toe. Wanneer de maatgevende afvoer echter wordt verhoogd tot 18.000 m<sup>3</sup>/s ('maatgevende' afvoer voorzien vanaf 2100) kan de gewenste afvoerverdeling mogelijk niet meer worden gerealiseerd (Kosters, 2022). In dit scenario gaat ongeveer 250 m<sup>3</sup>/s te weinig naar de Waal terwijl het regelwerk Pannerden helemaal dichtstaat (maximale stand), en ontvangen Neder-Rijn en IJssel respectievelijk zo'n 100 en 150 m<sup>3</sup>/s teveel (met het regelwerk Hondsbroeksche Pleij helemaal open).

Tot 2050 zal de doorgaande bodemerosie voor zowel de dijkversterkingsopgave als de verandering in afvoerverdeling dus niet tot grote problemen leiden wanneer enkel naar waterveiligheid gekeken wordt. Voor de periode daarna kan het niet handhaven van de gewenste afvoerverdeling wel implicaties hebben voor de Neder-Rijn en IJssel bij extreme afvoeren, wanneer hier niet tijdig op wordt gereageerd.

### **6.3.2 Protecting the Rhine-Meuse delta against sea level rise: What to do with the river's discharge?**

De Bruijn et al. (2022) beschouwen de aankomende problemen en kijken naar mogelijke adaptieve strategieën om hier in de toekomst mee om te kunnen gaan. De focus van deze studie ligt op het benedenrivierengebied. Er wordt gesteld dat de huidige strategie voor het beheer van overstromingsrisico's aangehouden kan worden tot een zeespiegelstijging van zo'n 1 meter. Daarna zouden buitendijkse gebieden in de benedenloop van de grote rivieren steeds vaker overstroomen, stormvloedkeringen te vaak moeten sluiten en zou de dijkversterkingsopgave in het benedenrivierengebied sterk toenemen. Aanvullende maatregelen op het huidige beleid zullen dan nodig zijn.

### **6.3.3 Negatieve systeemwerking**

In twee recente studies (Kosters & de Bruijn, 2020 en Maas & de Bruijn, 2022) is onderzoek gedaan naar het effect van negatieve systeemwerking op respectievelijk de Maas en de IJssel. Negatieve systeemwerking is het effect dat kan optreden wanneer door een dijkdoorbraak water van de ene rivier of riviertak in een andere riviertak stroomt en de afvoer op de ontvangende riviertak vergroot. Op basis van de inzichten wordt bediscussieerd of het relevant kan zijn om negatieve systeemwerking mee te nemen bij de beoordeling en het ontwerp van de dijken.

In Kosters & de Bruijn (2020) bleek dat er onder verschillende combinaties van variabelen (afvoergolf, timing, dijkeigenschappen) sprake was van negatieve systeemwerking bij een doorbraak van de zuidelijke Waaldijk ter hoogte van dijkring 41. De instroom vanuit het Land van Maas en Waal naar de Maas leidde in sommige gevallen tot een significante extra afvoer in de Maas.

In Maas & de Bruijn (2022) bleek dat ook sprake kan zijn van negatieve systeemwerking op de IJssel, bij een dijkdoorbraak langs de Boven-Rijn of Niederrhein. Echter kwam ook naar voren dat door de doorbraak de resterende afvoer op de Rijn zo sterk afneemt dat de dijkdoorbraak ondanks de negatieve systeemwerking toch leidt tot lagere afvoeren op de IJssel.

Door te variëren met een grote range van afvoergolven in beide studies kan rekening worden gehouden met klimaatverandering. Op basis hiervan lijkt het onwaarschijnlijk dat een knelpunt zal ontstaan door toedoen van negatieve systeemwerking.

## 6.4

### Uitgangspunten

Om mogelijke knelpunten voor de waterveiligheid in het Nederlandse rivierengebied te verkennen dient het gehele stroomgebied beschouwd te worden. Aan de bovenstroomse landsgrens wordt voor waterveiligheid met name gekeken naar de afvoeren die via de Maas en de Rijn Nederland binnenkomen en de afvoerverdeling over de Rijntakken. In het benedenstroomse deel wordt het effect van een stijgende zeespiegel steeds groter. De veranderende dynamiek tussen de rivieraafvoeren en stijgende zeespiegel is daarom interessant om te beschouwen.

Om inzicht te krijgen in mogelijke toekomstige knelpunten binnen het hierboven geschetste domein wordt gebruik gemaakt van resultaten uit recente onderzoeken en expertkennis binnen Deltares en Rijkswaterstaat.

## 6.5

### Naar een knelpunt voor waterveiligheid

Van de in paragraaf 6.3 besproken studies komt er in de Bruijn et al. (2022) een knelpunt naar voren als gevolg van zeespiegelstijging. De effecten beschouwd in de andere studies resulteren echter niet in concrete toekomstige knelpunten betreffende de waterveiligheidsopgave. In een bijeenkomst met experts van Deltares en Rijkswaterstaat (zie Bijlage 0) is hier nader op ingegaan. Hierbij werd gefocust op systeemeigenschappen, de versterkingsopgave en ruimtegebruik op de lange termijn (>2050). Door met elkaar in discussie te gaan werden richtingen geïdentificeerd waar mogelijke knelpunten voor het waterveiligheidsbeleid kunnen ontstaan.

Voor het waterveiligheidsbeleid in Nederland zijn er vandaag de dag nog geen knelpunten bereikt zoals deze er voor de andere drie rivierfuncties al wel zijn. Uit reeds uitgevoerde studies lijken er nog geen onoverkomelijke uitdagingen te zijn. Ook vanuit geotechnisch perspectief zijn er voorlopig nog geen grenzen in zicht aan de benodigde dijkversterkingen. Wel is men het er over eens dat de uitdagingen steeds groter zullen worden, met name in het benedenrivierengebied, en dat oplossingen complexer en daarmee duurder zullen worden. Zo is op meerdere locaties in het rivierengebied tot vlak achter de dijk gebouwd, waardoor het niet mogelijk is om ruimte voor de rivier te maken door middel van dijkverleggingen. Ook staan de ruimtelijke reserveringen in het rivierengebied, om op de lange termijn opties voor rivierverruiming open te houden, onder druk en ligt er een mogelijk knelpunt op de loer.

Of we deze knelpunten voor kunnen blijven hangt af van welke langetermijnbesluiten er over de indeling van het rivierengebied worden gemaakt. Mogelijk zal de huidige aanpak van het streven naar de optimale oplossing in één scenario uiteindelijk tot een knelpunt leiden. De huidige aanpak zal aangepast moeten worden en het paradigma verschoven moeten worden naar: met welke maatregelen is de kans op spijt het kleinst?

Deze paragraaf schenkt aandacht aan mogelijke knelpunten gerelateerd aan de indeling van het rivierengebied, toegespitst op aanpassingen aan infrastructuur en beschikbaarheid van ruimte.

#### 6.5.1

##### Knelpunten in infrastructuur

Het systeem van beweegbare en vaste waterkeringen moet ervoor zorgen dat de waterveiligheid in Nederland gewaarborgd is en blijft. Met de voorspelde klimaatverandering dienen alle keringen versterkt of vernieuwd te worden om aan de veiligheidssnorm te blijven voldoen. Dit gebeurt door de versterkingsopgave periodiek te herijken. Deze methodiek redeneert echter alleen vanuit het huidige systeem en houdt geen rekening met mogelijke grote aanpassingen in het riviersysteem.

**6.5.1.1 Beweegbare keringen: te vaak dicht bij meer dan 1 m zeespiegelstijging**

De grote stormvloedkeringen zullen door stijgende zeespiegel steeds vaker moeten sluiten. Vooral voor de Maeslantkering zijn de gevolgen hiervan groot omdat hier ook een groot deel van de rivieraafvoer uitmondt in zee. Een gesloten Maeslantkering houdt niet alleen het zeewater buiten maar ook het rivierwater binnen, met als gevolg een stijgende rivierwaterstand. In Haasnoot et al. (2020) is de sluitingsfrequentie bij verschillende maten van zeespiegelstijging bepaald. Hieruit kwam naar voren dat bij een zeespiegelstijging van 1 m de Maeslantkering 3 tot 5 keer per jaar moet sluiten, wat gelijk is aan de maximaal aanvaardbare hoeveelheid waar de Maeslantkering op ontworpen is. Bij een verdere stijging naar 1,5 m zal de sluitingsfrequentie al toenemen naar 30(!) keer per jaar en bij een stijging van 2 m zal de kering permanent dicht zijn. Dit is geen houdbare situatie en daarom dienen er aanpassingen gedaan te worden. Om binnen de geaccepteerde sluitingsfrequenties te blijven (3 keer per jaar) kan bij een hogere zeewaterstand de drempelwaarde voor sluiting opgehoogd worden van 3 (huidig) naar 3,8 (+2 m zeespiegelstijging) naar 4,6 m +NAP (+3 m zeespiegelstijging). Wel heeft zowel het vaker sluiten als het langer openhouden van de kering nadelige gevolgen voor het (dichtbevolkte) mondingsgebied. De waterstanden zullen hoe dan ook gaan stijgen en de waterkeringen in dit gebied zullen flink versterkt moeten worden.

Waar de keringen het water buitenhouden zorgen pompen ervoor dat het rivierwater juist weg kan. Als gevolg van de stijgende zeespiegel zal de tijdsperiode waarover gespuid kan worden afnemen. Om ervoor te zorgen dat de rivierwaterstand niet te veel zal stijgen in een situatie met gesloten keringen dient de pompcapaciteit uitgebreid te worden. Om de huidige mediane Rijnafvoer in de Rijnmond weg te kunnen pompen dienen deze pompen een gezamenlijke capaciteit te hebben van minstens 2200 m<sup>3</sup>/s (de Bruijn et al., 2022). Ter vergelijking, dit is bijna een tienvoud van de huidige capaciteit bij Zeesluis IJmuiden. Ook bij de andere zeemondingen zal de pompcapaciteit flink uitgebreid moeten worden.

**6.5.1.2 Vaste keringen: geen hard knelpunt, maar versterkingen worden wel steeds complexer en duurder**

Langs het Nederlandse hoofdwatersysteem ligt zo'n 1100 km aan vaste keringen. Deze worden allen periodiek getoetst aan de nieuwste veiligheidsnormen. Wanneer de kering niet aan de norm voldoet dient deze versterkt te worden. De kosten voor het versterken van een kilometer dijk worden geschat op 5 tot 10 miljoen euro afhankelijk van de opgave (HWBP, 2019). De conventionele versterkingsmethode met zand en klei is nog heel lang vol te houden tegen acceptabele kosten. Echter wordt er de laatste jaren steeds vaker gekozen voor constructieve maatregelen. Bij deze constructieve maatregelen zullen de dimensies van de kering minder sterk toenemen en heeft de versterking dus minder impact op de omgeving (Figuur 6.4). Dit is vooral aantrekkelijk in gebieden waar veel bebouwing rondom de kering staat. Vaak zijn deze constructieve maatregelen wel een stuk duurder dan de conventionele versterkingsmethode. Bovendien zijn ze in de toekomst moeilijker uit te breiden, wanneer opnieuw versterking nodig is. De versterkingskosten kunnen dan oplopen tot tientallen miljoenen euro's per kilometer.

Met de klimaatverandering in acht genomen blijft de huidige overtuiging dat er van alles mogelijk is op het gebied van de versterking van de waterkeringen. Zolang het technisch mogelijk is en de kosten te dragen blijven kunnen we nog tijden vooruit met de huidige aanpak. Wel blijft dan de vraag of de huidige aanpak het veranderende systeem zal kunnen bijhouden. Met een versnelde zeespiegelstijging moet de periodiek bepaalde versterkingsopgave steeds sneller uitgevoerd worden en zal de levensduur van versterkingen afnemen. Maatregelen worden ontworpen op een bepaalde waterstand of overstromingskans, maar met een versnelling van de zeespiegelstijging zal dit punt eerder bereikt worden, waarna er eerder dan gepland weer maatregelen moeten worden genomen.

Dit vraagt om veel extra geld en capaciteit. Of dit mogelijk blijft is afhankelijk van hoeveel we hierover over hebben.

| Current measure | Possible measures in next dike reinforcement round |  |
|-----------------|--|--|
|                 |  |  |
|                 |  |  |
|                 |  |  |
|                 |  |  |
|                 |  |  |
|                 |  |  |
|                 |  |  |
|                 |  |  |

Table 2.1 Dike reinforcement of existing structural measures

Figuur 6.4 Overzicht van constructieve dijkversterkingsmaatregelen (de Grave, 2019)

## 6.5.2

### Knelpunt in het ruimtegebruik

Zoals hierboven besproken, blijft het versterken van de keringen vanuit geotechnisch oogpunt nog voor een lange periode haalbaar en zal dit dus niet snel tot een knelpunt leiden. Een belangrijke voorwaarde voor het uitvoeren van de versterkingsopgave is echter wel dat er voldoende ruimte beschikbaar is. Zeker wanneer er in de toekomst meer rivierverruimingsprojecten uitgevoerd dienen te worden, lopen we hier in Nederland tegen de grenzen aan.

## 6.5.2.1

### Keringen

De meest complexe versterkingsopgave voor de komende decennia worden verwacht in het benedenrivierengebied. Tegelijkertijd is er in deze regio een groot ruimtegebrek. Bebouwing staat op veel plekken letterlijk al tegen de dijk aan. Op deze locaties is praktisch geen ruimte om de keringen op een toekomstbestendige manier te versterken.

Een voorbeeld hiervan is gegeven voor Sliedrecht in Figuur 6.5. Hier staat op en aan weerszijden van de dijk bebouwing en ligt het binnendijkse deel van het dorp gemiddeld 5 m lager dan de kruin van de dijk. De huidige opgave (tot 2050) is vastgesteld op ongeveer 1 m dijkverhoging voor dit traject (Informatiehuis Water, 2022). Zonder grootschalig te slopen lijkt het versterken van de kering in binnendijkse richting niet haalbaar, nog afgezien van het draagvlak hiervoor bij de omwonenden. Het versterken in buitendijkse richting gaat op zijn beurt weer ten koste van de afvoercapaciteit van de rivier, die dan op een andere locatie weer gecompenseerd dient te worden, waarmee het probleem enkel wordt verplaatst. Het in stand houden van de afvoercapaciteit is van cruciaal belang voor het garanderen van de waterveiligheid.

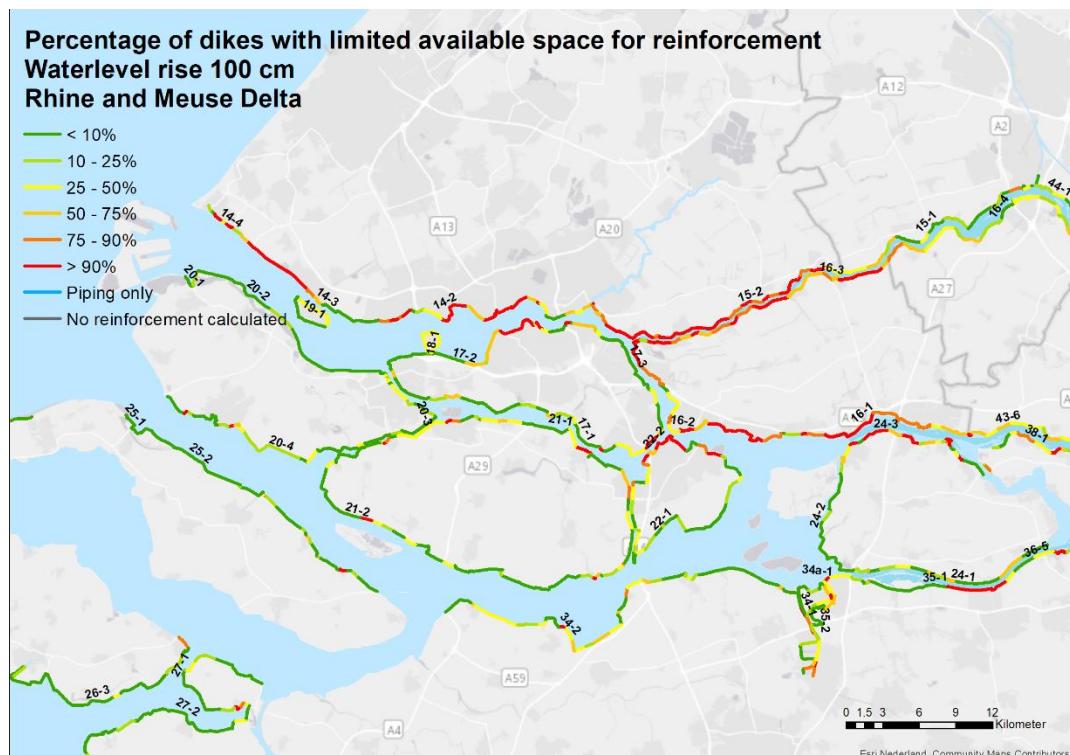


Figuur 6.5 Situatie Sliedrecht als voorbeeld van bebouwing op en om de primaire kering (rood). De huidige versterkingsopgave (tot 2050) voor de primaire kering (traject 16-2) is ongeveer 1 m.

In het memo *Limits to raising embankments in The Netherlands* (De Grave, 2019), beaamt De Grave dat dijkversterking niet direct beperkt wordt door de technische haalbaarheid of de kosten. Het zit in ons beleid, onze regels en voorschriften en in onze mentaliteit om te willen behouden wat we hebben. Het draait allemaal om het vinden van de juiste balans tussen ruimte, kosten en impact op de omgeving. Een dijk die is opgebouwd uit zand en klei kan eeuwenlang verder worden versterkt. De versterkingsmaatregelen voor de volgende versterkingsronde zullen relatief goedkoop zijn en de procedures kort, mits de benodigde ruimte al gereserveerd is voor de dijk. Het gebruik van constructieve versterkingsmaatregelen kan gezien worden als een tijdelijke maatregel om zo tijd te kopen om ervoor te zorgen dat de benodigde ruimte beschikbaar komt.

Voornamelijk de mentaliteit om te willen behouden wat we hebben kan zorgen voor een knelpunt. Wanneer hieraan wordt vastgehouden zal de beschikbare ruimte voor dijkversterkingen limiterend worden. In De Grave (2019) is voor het westelijke deel van het rivierengebied gekeken of er voldoende ruimte is om dijkversterking uit te voeren bij een zeespiegelstijging van 1 m (Figuur 6.6). Hieruit kwam naar voren dat bij 209 km van de in totaal beschouwde 576 km (36%) aan keringen gebrek aan ruimte is om te voldoen aan de gevraagde versterkingsopgave. Dit komt meestal door gebouwen die (te) dicht langs de dijk gebouwd zijn.

In het bovenrivierengebied speelt dit nippende ruimtegebrek voor keringen minder. Ook hier geldt echter dat bij de planning van de ruimtelijke indeling rekening gehouden dient te worden met verdere uitbreiding van de waterkeringen en rivierverruiming.



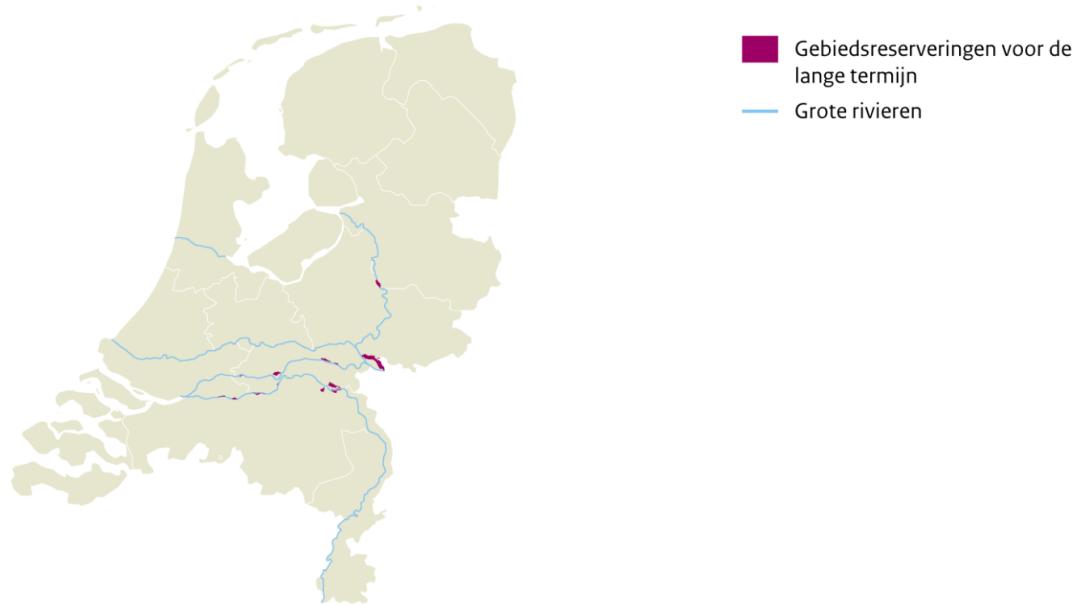
Figuur 6.6 Percentage van dijktrajecten met beperkte ruimte om versterkt te worden bij een zeespiegelstijging van 1 m (de Grave, 2019).

#### 6.5.2.2 Ruimte voor de Rivier

In de jaren '90 is besloten dat naast het verhogen van de keringen het verlagen van de waterstand door middel van rivierverruiming een belangrijke maatregel kan zijn. Dit vraagt om veel meer beschikbare ruimte dan de versterking van de keringen. Door middel van een aantal Barro-reserveringsgebieden (Besluit algemene regels ruimtelijke ordening) wordt er momenteel al ruimte behouden voor mogelijke binnendijkse riviermaatregelen (Figuur 6.7). Op veel plekken zonder Barro-reservering zijn mogelijkheden tot dijkverlegging of bypasses inmiddels al beperkt omdat de ruimte is ingenomen door bebouwing. Doordat veel mensen dicht langs de rivier wonen is de weerstand tegen binnendijkse riviermaatregelen groot omdat het vraagt om een andere gebiedsinrichting. Het is daarom belangrijk om te voorkomen dat het rivierengebied zo ver wordt volgebouwd dat er in de verre toekomst geen mogelijkheden meer over zijn om de rivier verder ruimte te geven en waterstanden te verlagen.

Dit kan gedaan worden door nu al ruimte te reserveren voor toekomstige maatregelen en mogelijke andere (adaptieve) indelingen van het gebied. Een concreet voorbeeld hiervan is het NOVEX-gebied Arnhem-Nijmegen in het splitsingspuntengebied. Hier ligt voor de komende jaren een grote verstedelijgingsopgave, waarbij in 2040 zo'n 100.000 extra woningen gerealiseerd moeten zijn. Dit geeft extra druk op de ruimte tussen de grote riviertakken (Waal, Pannerdensch Kanaal, Neder-Rijn en IJssel). Bij de realisatie van deze woningbouwopgave dient dus ook goed rekening gehouden te worden met de mogelijke versterkings- en verruimingsopgave op de lange termijn (>2075) als gevolg van klimaatverandering, en een mogelijk andere inrichting van het splitsingspuntengebied.

## Gebiedsreserveringen Ruimte voor de Rivier, 2018



Bron: Barro (Min. I&W, 2018)

PBL/aug18  
www.clo.nl/nl204107

Figuur 6.7 Barro gebiedsreserveringen voor toekomstige binnendijkse riviermaatregelen. Bron: CBS, PBL, RIVM, WUR (2024).

### 6.5.3 Knelpunten en aandachtspunten

Met betrekking tot de keringen bereiken we (nu) nog geen concreet knelpunt omdat we met de huidige technieken de gestelde opgave het hoofd kunnen bieden. Wel dient de vraag op welke manier we dat in de toekomst gaan doen zich steeds meer aan. Het staat vast dat het vasthouden aan de huidige versterkingsstrategie steeds uitdagender gaat worden door de combinatie van klimaatverandering en de ruimtelijke inrichting van Nederland. Op basis hiervan stellen we de volgende aandachtspunten vast:

- **Houdbaarheid van huidige dijkversterkingsstrategie:** Hoe lang willen we doorgaan met de huidige strategie door periodiek en deels met constructieve maatregelen de dijken op orde te houden? Het is niet de vraag of dit houdbaar is, maar tot wanneer. Wanneer wordt het punt bereikt dat de baten niet meer opwegen tegen de kosten? Hoe lang kunnen we nog doorgaan met versterking op locaties waar het nu al een grote uitdaging is?
- **Adaptiviteit en uitbreidbaarheid:** De exacte impact van klimaatverandering op ons riviersysteem zal nog lange tijd onzeker blijven. Het plannen voor 100 jaar in de toekomst is daarom simpelweg niet met zekerheid te doen. Om op kortere termijn in te spelen op veranderingen dienen de uit te voeren maatregelen adaptief te zijn zodat de kans op een lock-in wordt geminimaliseerd. Dat betekent in de praktijk vaak dat ruimte vrij moet worden gehouden.
- **Relatie met aangrenzende gebieden:** de hoogwaterveiligheidsopgave in het rivierengebied wordt ook sterk bepaald door maatregelen die getroffen worden in aangrenzende gebieden. Afhankelijk van besluiten over het afsluiten of open houden van de Rijn-Maasmonding zou een wijziging in de afvoerverdeling bij hoogwater gunstig kunnen zijn. Wanneer besloten wordt om meer water af te voeren naar het IJsselmeer, kan dit leiden tot een grotere ruimtevraag langs die tak.

De vraag is of het mogelijk is om voor alle functies ruimte te reserveren ‘voor het geval dat’, of dat een langetermijnverkenning nodig is waarin toe wordt gewerkt naar een principebesluit waarin wordt vastgelegd welke oplossingsrichting de voorkeur heeft indien de zeespiegel met een bepaald aantal cm stijgt. Door voor te sorteren op een langetermijnoplossing kan de ruimtereservering in het bovenrivierengebied worden beperkt en kan spijt worden voorkomen.

- **Snelheid en capaciteit:** Een praktisch aandachtspunt is de beschikbaarheid van liquide middelen en menskracht. Met een (versnelde) zeespiegelstijging moet de periodieke versterkingsopgave steeds sneller uitgevoerd worden. Dit vraagt om veel extra geld en capaciteit. Hier zit echter een fysiek maximum aan. Waar dit maximum ligt is echter nog niet bekend en zal afhangen van de toekomstige urgentie.
- **Conflict met de overige ruimtelijke functies:** Het versterken en aanpassen van onze keringen en uitvoeren van rivierverruimingsmaatregelen vergroten op hun beurt ook de druk op de overige ruimtelijke functies als natuur, wonen, ruimtelijke kwaliteit, etc. Bij de ruimtelijke ordening dienen alle functies beschouwd te worden en dienen deze elkaar idealiter te versterken.
- **Wanneer onderhoud:** Momenteel wordt het groot onderhoud aan de waterkeringen uitgevoerd in de zomermaanden wanneer de gemiddelde afvoer laag is. Het hoogwater van juli 2021 heeft geleerd dat deze veronderstelling risico's kent. Met de huidige klimaatscenario's is de verwachting dat de kans op een weersituatie zoals in juli 2021 toe gaat nemen. Dit maakt het plannen van groot onderhoud steeds lastiger en men dient zich te realiseren dat er altijd rekening gehouden moet worden met mogelijke calamiteiten.

#### 6.5.4

#### Grenzen aan huidige beoordelings- en ontwerpmethodiek

Voor beslissingen die gemaakt worden betreffende waterveiligheid wordt sterk uitgegaan van het bestaande modelinstrumentarium (WBI en BOI). Dit instrumentarium geeft een goed beeld voor de middellange termijn (tot 2050). Echter moeten er nu al keuzes gemaakt gaan worden voor de periode daarna. Hieraan ten grondslag liggen onder andere de huidige afvoerstatistieken en bepalingen voor overstromingsrisico's. In beide onderdelen neemt de onzekerheid toe naarmate er verder in de toekomst gekeken wordt, terwijl het waterveiligheidsbeleid hier wel grotendeels door bepaald wordt.

De huidige afvoerstatistiek die is opgenomen in WBI en BOI is grotendeels gebaseerd op de historische winterstatistiek. De zomerstatistiek ligt namelijk veel lager. Na het zomerhoogwater in 2021 is de zomerstatistiek voor de Maas iets omhoog gegaan (de Jong et al., 2022). Voor de Rijntakken is er geen significante verandering waargenomen. Door het voorkomen van deze gebeurtenis kan gesteld worden dat in de toekomst binnen WBI en BOI rekening gehouden dient te worden met soortgelijke gebeurtenissen.

Bij het bepalen van overstromingskansen en risico's is de onzekerheidsmarge zeer groot. Er is een gebrek aan data waardoor er momenteel niet goed antwoord gegeven kan worden op de vraag hoe goed we overstromingskansen kunnen inschatten. Dit geldt ook voor de geotechnische inschatting voor sterkte van de kering. Ondanks dat er veel onzekerheid is, wordt op basis van deze voorspellingen het huidige en toekomstige waterveiligheidsbeleid bepaald. Daarnaast wordt ervan uitgegaan dat de huidige normen voor waterveiligheid en wateroverlast gelijk blijven tot 2100 en dat de inrichting van het riviersysteem hetzelfde blijft.

Daarnaast wordt er voor het bepalen van zowel de afvoerstatistiek als de overstromingskansen gebruik gemaakt van resampling-technieken. De onzekerheid in de uitkomsten van deze technieken wordt steeds groter omdat hierin geen rekening gehouden wordt met nieuwe en veranderende klimaatsystemen, die bijvoorbeeld kunnen leiden tot het vaker voorkomen van zomerhoogwaters of lokale extreme neerslag.

Een inzicht dat hieruit gehaald wordt is dat wij ons huidige en toekomstige weersysteem niet goed genoeg kennen. Nieuwe inzichten wat betreft extreem weer worden in de KNMI'23-klimaatscenario's verwacht. Deze kunnen bijdragen aan een beter begrip van het systeem en de doorvertaling hiervan naar de bepaling van de kansen.

## 6.6

### Conclusies

Het waterveiligheidsbeleid dat nu in Nederland gevoerd wordt met betrekking tot de rivieren lijkt in de huidige situatie naar behoren te werken. De primaire functies als veilige afvoer van hoogwater, het hebben van voldoende bergingscapaciteit, het houden van voldoende regelbereik en het behouden van topvervlakking op de Maas, worden nu gerealiseerd. De fysische situatie en de randvoorwaarden waar het beleid op geënt is zullen de komende decennia echter gaan veranderen. Hier dient het systeem dan op aangepast te worden. Over de omvang en het tijdsbestek van deze veranderingen bestaat nog veel onzekerheid, maar dat het systeem gaat veranderen staat vast. Om zo goed mogelijk om te gaan met deze onzekerheden is het belangrijk om opties open te houden en waar mogelijk te sturen vanuit de redenatie "Wanneer krijgen we het minste spijt?".

In tegenstelling tot de andere drie beschouwde functies in deze studie, zijn er bij de functie hoogwaterveiligheid geen harde knelpunten gevonden als gevolg van rivierbodemerosie of veranderingen in rivieraafvoer. Wanneer echter op de lange termijn gekeken wordt, zien we wel degelijk aandachtspunten wat betreft de houdbaarheid van het beleid:

- **Vaker sluiten stormvloedkeringen:** De huidige randvoorwaarden in het systeem zullen veranderen met de stijging van de zeespiegel en grotere variaties in het afvoerregime. Stormvloedkeringen zullen vaker en langer moeten sluiten dan nu is voorgeschreven. Er zullen keuzes gemaakt moeten worden over bijvoorbeeld het sluitingsregime van de Maeslantkering en hoe de dijken verder versterkt dienen te worden.
- **Bergingscapaciteit benedenrivierengebied:** Met een verhoogde zeewaterstand zal het water op de rivieren steeds moeilijker afgevoerd kunnen worden en benedenstroomse bergingsgebieden zullen vaker gebruikt worden. Belangrijk is om voldoende waterberging te behouden voor het geval een hoge zeewaterstand en hoge rivieraafvoer gelijktijdig voorkomen.
- **Ruimtegebruik:** Een belangrijke voorwaarde voor het uitvoeren van de versterkings- en verruimingsopgave is dat er voldoende ruimte beschikbaar is. Hier lopen we momenteel in Nederland echter tegen de grenzen aan. Het gebruik maken van ruimte-efficiënte geotechnische oplossingen bij dijkversterking lijkt voor een lange periode nog haalbaar. Voor het uitvoeren van toekomstige rivierverruimingsmaatregelen is de beschikbare ruimte al een groter probleem. Beslissingen in aangrenzende gebieden kunnen ook leiding tot aanpassingen in het bovenrivierengebied waarvoor meer ruimte nodig is. Wanneer bijvoorbeeld besloten wordt om, afhankelijk van het wel of niet afsluiten van de Rijn-Maasmonding, meer water over de IJssel af te voeren, kan dit leiden tot een extra ruimtevraag langs die tak. Om een mogelijke lock-in-situatie, door ruimtegebrek, te voorkomen komt ook hier de vraag op hoe lang het gewenst is om de huidige strategie aan te houden. Om adaptief te blijven of kunnen worden is het belangrijk om veel ruimte vrij te houden. Gezien de enorme druk op de ruimte (o.a. vanuit de woningbouwopgave) is dat lastig. Alternatief is om tijdig 'principekeuzes' te gaan maken (d.w.z. voor te sorteren op een bepaalde oplossingsrichting). Daardoor kunnen de ruimtelijke reserveringen voor de lange termijn enigszins worden beperkt. Het reserveren van ruimte is sowieso nodig wanneer men op de lange termijn opties voor binnendijkse rivierverruiming open wil houden.

- **Bepaling van kansen en risico's:** Door het hoogwater van juli 2021 zijn we ons er meer van bewust geworden dat er grenzen zijn aan hoe goed (nauwkeurig) we de kans op een hoogwater en overstromingskansen in kunnen schatten. Dat geldt voor de huidige situatie, maar mogelijk nog sterker voor toekomstige situaties, waarbij sprake zou kunnen zijn van veranderende weersystemen die nu niet goed mee kunnen worden genomen in de bestaande technieken zoals GRADE. De onzekerheden die gepaard gaan met de gebruikte methodes dienen in acht genomen te worden bij het nemen van besluiten voor de toekomst.

## 6.7 Kennisvragen

- 1. Wat is de houdbaarheid van het huidige waterveiligheidssysteem?** In deze studie zijn hiervoor geen concrete knelpunten gevonden. Lopend onderzoek bij Kennisprogramma Zeespiegelstijging kijkt naar de toename van belastingen op het huidige waterkeringensysteem en geeft zicht op de omvang van de mogelijke maatregelen.
- 2. Hoe komen we tot goede voorspellingen van overstromingskansen?** Momenteel is niet duidelijk hoe goed we overstromingskansen kunnen inschatten (Kosters en Asselman, 2022). Dit komt door onzekerheden in de kans op hoogwater en door onzekerheden in de sterkte van waterkeringen. Hoe verder in de toekomst gekeken dient te worden hoe groter de onzekerheid in overstromingskansen en -risico's wordt. Om zinnige maatregelen te bepalen is het daarom belangrijk om te weten hoe goed we nu de overstromingskansen kunnen inschatten.
- 3. Wat is het effect van verwachte klimaatverandering op de lange termijn op de afvoer van de Rijn, Maas en Vecht?** Er is nog veel onzekerheid in de afvoerstatistiek voor de lange termijn. Voor de zeer lange termijn (na 2085) is überhaupt nog geen informatie over mogelijke veranderingen in afvoerstatistiek beschikbaar. De aankomende KNMI'23-klimaatscenario's kunnen hiervoor al een eerste stap zijn in de goede richting. Voor de Rijntakken is een bijbehorende vraag wat het effect is van veranderingen in het riviersysteem op de afvoerverdeling en welke verdeling de voorkeur verdient (op de lange termijn).
- 4. Op welk moment gaan we beslissen welke adaptierichting we inslaan?** Deze vraag gaat spelen wanneer is overgegaan op adaptief waterveiligheidsbeleid. Idealiter zouden we zolang mogelijk zoveel mogelijk opties open willen houden, maar deze strategie kan leiden tot nietsdoen, waardoor de keuze uiteindelijk niet door maar voor ons gemaakt wordt.

# 7 Conclusies en aanbevelingen

## 7.1 Conclusies

In deze eerste fase van de Strategische Verkenning Rivieren hebben we geprobeerd te bepalen wanneer men knelpunten kan verwachten voor de rivierfuncties scheepvaart, zoetwatervoorziening, natuur en hoogwaterveiligheid, als gevolg van klimaatverandering en rivierbodemerosie. Hierbij gaan we uit van de voortzetting van huidig beleid. Gedurende dit onderzoek is gebleken dat niet altijd voldoende kennis of informatie beschikbaar is om de knelpunten te kunnen bepalen, bijvoorbeeld omdat informatie over veranderingen in rivieraafvoer op de zeer lange termijn (na 2085) ontbreekt. Ook bleek in een aantal gevallen geen sprake te zijn van een *knelpunt* in het huidige beleid, maar meer van een *traject* waarbij in de loop van de tijd steeds duurdere of ingrijpendere maatregelen nodig zijn om aan het beleid te kunnen blijven voldoen. In dit hoofdstuk geven we per beschouwde rivierfunctie een (voorlopige) conclusie over het verwachte knelpunt, maar besteden we daarnaast ook aandacht aan de kennishanden die opgevuld moeten worden om tot een betere bepaling van het knelpunt te komen.

### 7.1.1 Scheepvaart

Door klimaatverandering worden langere en meer extreme laagwaterperioden verwacht op de Rijn en Maas. Dit leidt tot frequenter en langduriger beperkingen in de beschikbare waterdiepte. Rivierbodemerosie zorgt ervoor dat vaste bodemlagen steeds grotere drempels vormen. De waterdiepte neemt boven deze drempels nog verder af. In deze studie wordt gesteld dat een knelpunt voor scheepvaart optreedt wanneer, als gevolg van deze ontwikkelingen, niet meer wordt voldaan aan de internationale afspraak dat een waterdiepte van 2,8 m op de Waal gedurende maximaal 20 dagen per jaar mag worden onderschreden. Uit de analyses blijkt dat het knelpunt voor scheepvaart nu al bereikt is. De vereiste waterdiepte van 2,8 m wordt nu namelijk al 50 dagen per jaar onderschreden. Door klimaatverandering (scenario W<sub>Hdry</sub>) zal dit toenemen tot 80 dagen per jaar in 2050.

Door rivierbodemerosie wordt het knelpunt nog groter. Uitgaande van een afname in waterdiepte gelijk aan de bodemerosie, neemt bij een afvoer van 1020 m<sup>3</sup>/s de beschikbare diepgang bij sluis Weurt bijvoorbeeld af van iets meer dan 2,9 m nu naar 2,5 m in 2050. Een lage-afvoerperiode als in 2018 levert in de toekomst dus een veel grotere dieptebeperking op als gevolg van bodemerosie, waardoor de beschikbare waterdiepte in de Waal afneemt, maar ook de toegang tot sluizen en havens een probleem wordt.

De kennisvragen concentreren zich met name rondom de effectiviteit van maatregelen om de condities voor scheepvaart te verbeteren, zoals:

- Hoeveel kan de waterdiepte toenemen door de rivier te versmallen met langsdammen of kribverlenging?
- Hoe smal kan de vaargeul worden tussen de langsdammen zonder dat dit tot problemen leidt voor vlot en veilig transport over water?
- Hoe wordt verdere erosie bij versmalling van de geul voorkomen?
- Wanneer dit gebeurt door de bodem te fixeren, wat is dan het effect daarvan op de hydraulische ruwheid en daarmee op de waterdiepte? En welke kielspeling is vereist bij een gefixeerde bodem?

### 7.1.2

#### Zoetwatervoorziening

Om een knelpunt voor zoetwatervoorziening te bepalen hebben we ons gericht op de regio Noord-Nederland, omdat in dit gebied de waterbeschikbaarheid (vanuit het IJsselmeer) het meest direct afhankelijk is van de aanvoer via het hoofdwatersysteem (de IJssel).

In de analyse is het historische droge jaar 1934 gekozen als representatief voor een droogtesituatie die eens in de 20 jaar optreedt. Nu treedt in deze situatie nog geen watertekort op, maar zonder maatregelen zal dit in de toekomst wel gebeuren. Als gevolg van klimaatverandering is namelijk steeds meer water nodig voor met name polderdoorspoeling, peilbeheer en beregening. Tegelijkertijd neemt de aanvoer over de IJssel af als gevolg van klimaatverandering, bodemerosie (verschuiving van de afvoerverdeling waarbij bij laagwater meer water wordt afgevoerd via de Waal) en een mogelijke toename van het watergebruik in Duitsland. Als knelpuntdefinitie nemen we het moment dat voor deze T=20-situatie een watertekort  $> 0 \text{ m}^3$  ontstaat (opgeteld over het zomerhalfjaar).

Door klimaatverandering alleen wordt dit knelpunt verwacht bij  $1,3^\circ\text{C}$  opwarming ten opzichte van de periode 1981-2010. Volgens KNMI'14-klimaatscenario W<sub>H</sub> gebeurt dit al rond 2035, bij het G<sub>L</sub> scenario rond 2050. Ontwikkelingen als een toename van de watervraag voor het Nathouden van veenweidegebieden, rivierbodemerosie (die leidt tot een afname van de IJsselaafvoer) en een toename van het watergebruik in Duitsland zijn hierin nog niet meegenomen. Deze ontwikkelingen kunnen het knelpunt dichterbij brengen.

Om beter te kunnen bepalen wanneer een grens wordt overschreden (of, met andere woorden, een knelpunt is bereikt) is een maatschappelijk gedragen definitie van een knelpunt voor zoetwatervoorziening nodig. Een ander belangrijk kennishuur is de ontwikkeling van het watergebruik in stroomopwaarts gelegen landen (met name Duitsland). Hier moeten we meer over weten om een betere schatting te krijgen van de hoeveelheid water die Nederland via de rivieren bereikt in toekomstige droge perioden. Daarnaast is het effect van veel mogelijke maatregelen nog onzeker. Het gaat daarbij om maatregelen in het systeem, zoals het vergroten van de waternaamvoer vanuit de Waal via het Amsterdam-Rijnkanaal naar het Markermeer, maar ook om maatregelen die gericht zijn op het beperken van de watervraag voor bijvoorbeeld beregening of het doorspoelen van polders.

### 7.1.3

#### Natuur

Door klimaatverandering en rivierbodemerosie kunnen natuurdoelen, met name doelen gericht op behoud van bestaande natuur, in het gedrang komen. Een knelpunt voor natuur is in deze studie gedefinieerd als het moment waarop (naar verwachting) niet meer wordt voldaan aan N2000-doelen.

Uit eerdere analyses (Leveld et al., 2022 en Asselman et al., 2022a) blijkt dat de omstandigheden nu al vaak te droog zijn voor natte ecotooptypen (te lage grondwaterstanden of te korte overstromingsduur van de uiterwaarden). Voor droge ecotooptypen is de situatie over het algemeen redelijk goed.

In deze studie is in meer detail gekeken naar het effect van veranderingen in overstromingsduur op N2000-habitattypen in de Gelderse Poort. Grondwaterstanden zijn hierbij niet beschouwd. Uit de analyse blijkt dat de omstandigheden voor droge habitattypen veelal iets verslechteren als gevolg van klimaatverandering en (in nog grotere mate) geplande uiterwaardvergravingen. Voor deze habitattypen zou in de toekomst een knelpunt op kunnen treden als we kijken naar overstromingsduur. Echter, omdat de (dalende) grondwaterstanden (GVG en GLG) niet beschouwd zijn in deze analyse en omdat er veel meer factoren zijn die standplaatsgeschiktheid bepalen, kan niet worden geconcludeerd wanneer een knelpunt precies optreedt.

Voor habitattypen die gebaat zijn bij een natter milieu zullen de omstandigheden qua overstromingsduur over het algemeen juist iets verbeteren als gevolg van de beschouwde ontwikkelingen.

Uit het onderzoek is gebleken dat het op dit moment nog niet mogelijk is een knelpunt voor natuur vast te stellen. Er is met name onvoldoende kennis over de effecten van veranderingen in overstromingsduren en grondwaterstanden op verschillende ecotooptypen. Bestaande effectrelaties zijn te generiek, onvoldoende onderbouwd en soms (met name bij de effectrelaties gerelateerd aan grondwaterstanden) tegenstrijdig.

#### 7.1.4

#### Hoogwaterveiligheid

Voor hoogwaterveiligheid is er in het huidige riviersysteem nog geen sprake van een knelpunt. Uitdagingen zullen echter wel steeds groter en complexer worden. Zo komt de hoogwaterveiligheid in het benedenrivierengebied verder onder druk te staan door de stijgende zeespiegel. Het voornaamste probleem is dan dat de sluitfrequentie van stormvloedkeringen zoals de Maeslantkering hoger wordt dan volgens het ontwerp toelaatbaar is. Daarnaast neemt de kans op een hoge waterstand op zee in combinatie met een hoge rivieraafvoer toe. Om overstromingen bij dit soort gebeurtenissen te voorkomen zullen de dijken in het benedenrivierengebied fors moeten worden versterkt, of moet voor een compleet andere inrichting van het hoofdwatersysteem worden gekozen.

Als gevolg van veranderingen in afvoerregime en rivierbodemerosie wordt echter geen concreet knelpunt verwacht in de komende decennia, als huidig beleid wordt voortgezet. Wel wordt voorzien dat op veel plekken, met name in het benedenrivierengebied, te weinig ruimte beschikbaar is om noodzakelijke dijkversterkingen uit te voeren. Dit betekent dat in de toekomst ruimte vrijgemaakt moet worden, onder andere door het amoveren van bebouwing, of dat gebruik moet worden gemaakt van constructieve maatregelen voor dijkversterking. Een nadeel van deze laatste optie is dat een volgende versterking moeilijk uitvoerbaar is, waardoor het adaptieve karakter van het huidige beleid rondom dijkversterking verloren gaat. Met het oog op verdere toekomstige dijkversterkingen moet voldoende ruimte achter de waterkeringen worden vrijgehouden. Voldoende ruimte reserveren is ook belangrijk om mogelijkheden voor rivierverruiming open te houden. Gezien de druk op de ruimte is dit een grote uitdaging.

Om knelpunten voor het hoogwaterveiligheidsbeleid vast te kunnen stellen is het belangrijk om onze schattingen van overstromingsrisico's op de lange termijn te verbeteren. In de huidige methodiek is vooral het bepalen van de overstromingskans erg onzeker. Dit komt doordat we de kans op een hoogwater niet goed in kunnen schatten en doordat de kennisregels over dijksterkte leiden tot zeer grote faalkansen. Andere kennisvragen hebben te maken met mogelijke langetermijnbeslissingen in bijvoorbeeld de Rijn-Maasmonding en wat dit betekent voor de waterveiligheid in het bovenrivierengebied. Voor het bovenrivierengebied is überhaupt nog weinig bekend over de mogelijke implicaties van ingrijpende beslissingen met betrekking tot de inrichting van het systeem. Denk hierbij aan de vraag of een ingrijpende wijziging van de afvoerverdeling op de lange termijn nodig is.

## 7.2

### Reflectie

Uit de uitgevoerde verkenning blijkt dat nu al sprake is van een knelpunt voor de scheepvaart. Voor zoetwatervoorziening zal al in de komende 10 à 20 jaar sprake kunnen zijn van een knelpunt. Met de huidige status van de Nederlandse rivierenatuur wordt er op grote schaal niet voldaan aan de N2000-doelstellingen. Ook hier lijkt een knelpunt niet ver weg. Hoewel de focus van de studie in eerste instantie op de lange termijn lag, blijken voor deze functies in de nabije toekomst al ernstige problemen op te kunnen treden.

Hiermee lijkt het urgenter dan eerder gedacht om beslissingen te nemen over de functies waarvoor we onze rivieren geschikt willen houden, en de daarbij behorende inrichting van het rivierengebied. Hoewel voor hoogwaterveiligheid op dit moment geen concrete knelpunten kunnen worden vastgesteld zijn harde keuzes ook voor deze functie noodzakelijk. Dit komt met name omdat de beoogde inrichting van het hoofdwatersysteem op de lange termijn (orde 100 jaar) bepaalt welke maatregelen we nu moeten nemen ten behoeve van hoogwaterveiligheid. Een langetermijnverkenning van oplossingsrichtingen in het rivierengebied is nodig om de kans op spijt van maatregelen die op de korte en middellange termijn worden genomen, te verkleinen en lock-in-situaties te voorkomen.

### 7.3 Aanbevelingen

Het is noodzakelijk om snel te starten met een langetermijnverkenning van oplossingsrichtingen in het rivierengebied, zodat meer zicht is op de opties die we hebben en op wat er nu nodig is om die opties open te houden (denk daarbij aan ruimtelijke reserveringen). Een dergelijke langetermijnverkenning verkleint ook de kans op spijt, omdat het bijdraagt aan een betere onderbouwing van maatregelen op de korte of middellange termijn.

Een andere belangrijke aanbeveling die volgt uit dit onderzoek is om aan de slag te gaan met het opvullen van de kennishiaten die aan het eind van elk hoofdstuk worden genoemd. Met name over de geschiktheid van de condities voor natuur in uiterwaarden weten we op dit moment te weinig om te kunnen vaststellen of we aan natuurdoelen kunnen voldoen.

## 8 Referenties

- Adams, A.S., K.V. Sykora & N.A.C. Smits (2012). Herstelstrategie H6510A: Glanshaver- en vossenstaarthooilanden (glanshaver), versie november 2012. Herstelstrategieën stikstofgevoelige habitats. Ecologische onderbouwing van de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS). Alterra Wageningen UR en Programmadirectie Natura 2000 van het Ministerie van Economische Zaken, 2014.
- Asselman, A., Barneveld H.J., Klijn, F., van Winden, A. en Postma, R. (2018). Het verhaal van de Maas. Publicatie Platform Rivierkunde van Rijkswaterstaat.
- Asselman, N., J. de Jong, M. Mens, M. Maarse, B. Maas en P. de Grave (2022a). Effectbepaling nulalternatief IRM. Deltares rapport 11208036-004-ZWS-0002.
- Asselman, N., Maas, B., Mens, M., De Grave, P., Van der Wijk, R. (2022b). Effectbepaling IRM - Gevoeligheidsanalyse voor verandering in rivierbodemligging Rijntakken. Doorgaande erosie tot 2050, huidige bodemligging vasthouden of ophoging naar de ligging van rond het jaar 2000. Deltares rapport 11208036-004-ZWS-0005.
- Barneveld, H., Hoitink, A.J.F. en Frings, R.M. (2022). Massive morphological changes during the 2021 summer flood in the River Meuse. Anthropogenic Rivers: NCR DAYS 2022 Proceedings. Netherlands Centre for River Studies publication 49-2022.
- Bol, R. (2016). Stuwprogramma Nederrijn/Lek. Achtergronden bij een nieuw stuwwprogramma. Rijkswaterstaat Bedrijfsinformatie, 31 maart 2016.
- Bouman, J., Leseman, B., van Winden, A., de Jong, B. & Litjens, G. (2023). Eindrapport preverkenning PAGW Gelderse Poort. Rijkswaterstaat, Staatsbosbeheer, RVO, 23 mei 2023.
- BPIJ (2020). Joint Fact-finding Studie Robuustheid IJsselmeergebied bij droogte. In opdracht van het bestuurlijk platform IJsselmeergebied. Maart, 2020. Download via:  
<https://www.deltaprogramma.nl/documenten/publicaties/2020/09/15/eindrapport-joint-fact-finding-robuustheid-ijsselmeergebied-bij-droogte-incl.-bijlagen>
- Buijse, T., Geerling, G., Chrzanowski, C., Dorenbosch M. en Peters, B. (2019). Natuurvriendelijke oevers langs de Maas: toestand en trend na 10 jaar ontwikkeling. Deltares rapport 11201679-000-ZWS-0006.
- Buitink, J., Athanasios, T., Geertsema, T., ten Velden, C., Bouaziz, L., Sperna Weiland, F. (2023), Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse 11209265-002-ZWS-0003, 7 December 2023
- CBS, PBL, RIVM, WUR (2024). Ruimtelijke ontwikkelingen in reserveringsgebieden 'Ruimte voor de Rivier', 2000 - 2019 (indicator 2041, versie 08, 6 oktober 2020 ) [www.clo.nl](http://www.clo.nl). Centraal Bureau voor de Statistiek (CBS), Den Haag; PBL Planbureau voor de Leefomgeving, Den Haag; RIVM Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu, Bilthoven; en Wageningen University and Research, Wageningen.
- CCR, Centrale Commissie voor de Rijnvaart (2022). Najaarszitting 2022. Aangenomen besluiten (2022-II).
- De Bruijn, K. M., Diermanse, F. L. M., Weiler, O. M., De Jong, J. S., & Haasnoot, M. (2022). Protecting the Rhine-Meuse delta against sea level rise: What to do with the river's discharge? Journal of Flood Risk Management, 15( 3), e12782. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12782>

- De Grave, P. (2019). Limits to raising embankments in The Netherlands. Memo 11203773-009-ZKS-0001. Deltares, December 2019.
- De Jong, J.S. (2019). KBN: Bedreiging klimaatverandering - Beschrijving karakteristieke droge jaren met stationaire afvoerniveaus. Deltares memo 11203738-005-BGS-0002 versie 1.1, d.d. 14 december 2019
- De Jong, J.S. (2020a). KBN: Potentiele blootstelling. Deltares memo 11203738-005-BGS-0005 versie 1.2 d.d. 19 februari 2020
- De Jong, J.S. (2020b) Digital Twin Waterways: Water levels and water depths on the river Rhine. Deltares memo 11205224-000-ZWS-0011 d.d. 12 augustus 2020
- De Jong, J.S. (2021). Ontwikkeling zesde-generatie Maas-model. Modelbouw, kalibratie en validatie. Deltares rapport 11200569-003-ZWS-0014.
- De Jong, J.S. & van der Mark, R. (2021). KBN-HVWN Stresstest droogte Rijntakken: Toestand van het Systeem en Kwetsbaarheid gebruiksfunctie. Deltares rapport 11205274-004-BGS-0022 versie 1.1.
- De Jong, J.S. & Ottevanger, W. (2021). Waterdiepteknelpunten door toenemende inzinking en drempelvorming bij kabels en leidingen Verdiepend onderzoek in Klimaatbestendige Netwerken Stresstest droogte Rijntakken. Deltares rapport 11206832-020-GEO-0001 v1.0
- De Jong, J.S., Diermanse, F., Agtersloot, R. en Geertsema, T. (2022). Systeemwerking Maas en waterveiligheid. Onderzoek voor beleidstafel wateroverlast en hoogwater. Deltares rapport 11208036-012-ZWS-0003.
- Dorland, E., Pingen, J., Kusters, J., Ex, J. (2017). PAS-gebiedsanalyse 038 Rijntakken. KWR Watercycle Research Institute & Provincie Gelderland. 15 december 2017.
- Erasmus-UTP (2020). Economische impact laagwater. Een analyse van de effecten van laagwater op de binnenvaartsector en de Nederlandse en Duitse economie
- Haasnoot, M., Kwadijk, J., van Alphen, J., le Bars, D., van den Hurk, B., Diermanse, F., van der Spek, A., Essink, G. O., Delsman, J., & Mens, M. (2020). Adaptation to uncertain sealevel rise; how uncertainty in antarctic mass-loss impacts the coastal adaptation strategy of The Netherlands. Environmental Research Letters, 15(3), 2020
- Haasnoot, M, F. Diermanse (ed.) (2022). Analyse van bouwstenen en adaptatiepaden voor aanpassen aan zeespiegelstijging in Nederland. Deltares 11208062-005-BGS-0001
- HWBP, Hoogwaterbeschermingsprogramma (2019). Feitenanalyse veranderende kostenraming HWBP. 14 augustus 2019.
- Huiskes, H.P.J., N.A.C. Smits & H.F. van Dobben (2012). Herstelstrategie H91F0: Droge hardhoutooibossen, versie November 2012. Herstelstrategieën stikstofgevoelige habitats. Ecologische onderbouwing van de Programmatische Aanpak Stikstof (PAS). Alterra Wageningen UR en Programmadirectie Natura 2000 van het Ministerie van Economische Zaken, 2014.
- Hunink, J., Mens, M. and Melman, R. (2022). Verkenning toename watervraag door vernattingsmaatregelen in veenweidegebieden. Deltares rapport 11208074-008-ZWS-0001
- Hydrologic (2019). Nadere verkenning Stuurbaar Buffernetwerk. Rapport P1100, Hydrologic, Amersfoort.

Indah-Everts, S.N. & M.I. Hermans (2021). Evaluatie pilot Langsdammen Waal; Interpretatie AIS-data.  
MARIN, report 32127-1-MO-rev.1.0, Wageningen, the Netherlands

Informatiehuis Water (2022). Waterveiligheidsportaal. Geraadpleegd op 23 november 2022 via  
<https://waterveiligheidsportaal.nl/>

Klijn, F., M. Hegnauer, J. Beersma, F. Sperna Weiland (2015). Samenvatting van onderzoek met GRADE naar implicaties van nieuwe klimaatprojecties voor rivieraafvoeren. Rapport van Deltares en KNMI.

KNMI (2015). KNMI'14-klimaatscenario's voor Nederland; Leidraad voor professionals in klimaatadaptatie. KNMI, De Bilt, 34 pp.

Koedijk, O. C. (2020). Richtlijnen vaarwegen 2020, Tech. rep., Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving.

Kosters, A & de Bruijn, K.M. (2020). Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de Maas. Deltares, rapport 11203684-003-ZWS-0008, 22 september 2020

Kosters, A. (2022). Regelbereik bij 17.000 en 18.000 als maatgevende afvoer in het OI-instrumentarium. Deltares memo 11208053-003-ZWS-0013, v0.7 d.d. 6 december 2022.

Kosters, A. en N. Asselman (2022). Kennisontwikkeling voor het Nederlandse rivierengebied - Inventarisatie lopend onderzoek. Deltares rapport 11206796-001-ZWS-0027

Kosters, A., van der Wijk, R. en Spruyt, A. (2023). Scheepvaart op de Waal: zijn stuwen de oplossing? Infographic i.h.k.v. Redesign the Delta, i.s.m. Dirma Janse.

Kragten (2018). Analyse Bodempeilingen Maas. Handleiding. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Zuid-Nederland. GDV083-0001

Kramer, N. (2018). Afvoerstatistiek Rijn te Lobith. Deltares memo d.d. 18 september 2018

Lee, J.-Y., J. Marotzke, G. Bala, L. Cao, S. Corti, J.P. Dunne, F. Engelbrecht, E. Fischer, J.C. Fyfe, C. Jones, A. Maycock, J. Mutemi, O. Ndiaye, S. Panickal, and T. Zhou (2021). Future Global Climate: Scenario-Based Projections and NearTerm Information. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 553–672, doi:10.1017/9781009157896.006.

Levert, O., Maarse, M.J., Vergroesen, A.J.J. en de Jong, J.S. (2022). Van rivierbodemhoogte naar potentie voor natuur. Deltares rapport 11206795-012-ZWS-0005.

Ligtenberg, J. (2022). Establishing the required lock capacity and configuration in case of canalisation of the river Waal. An exploratory study. MSc thesis, TU Delft Civil Engineering and Geosciences.

Maas, B. F & de Bruijn, K. M. (2022). Het effect van negatieve systeemwerking op afvoeren en waterstanden op de IJssel. Deltares rapport 11208036-007-ZWS-0001.

Meijer, D.G., Lambeek, J. en van der Werff ten Bosch, J.D. (2011). Inventarisatie en interpretatie ondergrondgegevens Maas. Opdrachtgever: Rijkswaterstaat Limburg, 23 december 2011, C03021.910426.0100, ARCADIS Nederland BV, in samenwerking met Rijkswaterstaat, TNO en Deltares.

Mens, M., Hunink, J.C., Delsman, J.R., Pouwels, J., Schasfoort, F. (2020a). Geactualiseerde knelpuntenanalyse voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II, Deltares rapport 112003734-003, Delft.

Mens, M., Schasfoort, F., Hunink, J. C., Pouwels, J., Delsman, J. R., & Jong, J. de (2020b). Hydrologische en economische effecten van twee maatregelpakketten voor Deltaprogramma Zoetwater fase II. Delft.

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2022a). Kamerbrief toekomst binnenvaart. IENW/BSK-2022/271554.

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (2022b). Nationaal Water Programma 2022-2027. Maart 2022.

Pouwels, J., America, I., Delsman, J. R. en Mens, M. J. P. (2021). Stresstest voor het Deltaprogramma Zoetwater fase II, Deltares Rapport 11206829-002, Delft.

Rademakers, J.G.M. & Wolfert, H.P. (1994). Het Rivier-Ecotopen-Stelsel. RIZA Rijksinstituut voor integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling, Lelystad.

Rijksoverheid (2021). Nationaal Deltaprogramma 2021: Koersvast werken aan een klimaatbestendig Nederland. Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat, ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en ministerie van Binnenlandse Zaken en Koninkrijksrelaties. (online: <https://dp2021.deltaprogramma.nl/>)

Ruijgh, E. (2019). Integrated Overview of the effects of socio-economic scenarios on the discharge of the Rhine. Deltares rapport 1201722-000-ZWS-0005

Sloff, K. (2019). Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050. Trends voor scheepvaart en waterbeschikbaarheid. Deltares rapport 11203738-005-BGS-0008.

Sloff, K. (2020). KBN – Stresstest droogte Maas. Bedreiging van bodemhoogteverandering voor de scheepvaart. Deltares memo 11205274-004-BGS-0007

Sloff, K. (2021). Prognose bodemligging Maas 2050 voor IRM. Memo, d.d. 3 november 2021.

Sperna Weiland, F., M. Hegnauer, L. Bouaziz en J. Beersma (2015). Implications of the KNMI'14 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse: comparison with earlier scenario studies. 1220042-000-ZWS-0004

Stuparu, D. en W. Ottenvanger (2017). Richtlijnen rivieren, analyse van duinafmetingen uit CoVadem data. Deltares rapport 11201113-000-ZWS-0008.

Ten Brinke, W. (2019). Effecten morfologische ontwikkelingen op functies Rijn en Maas. Blueland Consultancy BV. Rapport B19.01, Okt. 2019.

Van den Berg, K. (2021). Hydrologische en hydraulische randvoorwaarden voor natuurontwikkeling en - behoud in uiterwaarden, Methodiek ontwikkeling en toepassing op Gelderse Poort

Van der Mark, R. & R. van der Wijk (2021). Eindevaluatie pilot Langsdammen in de Waal; Functie Vaarweg. Deltares, report 11204644, Delft, the Netherlands.

Van der Mark, R. (2022). Methode, effecten en houdbaarheid van de OLA/OLR. KBN-HVWN Klimaatbestendige Netwerken – Hoofdvaarwegennetwerk. Deltares rapport 11208077-005-GEO-0003.

Van der Sluis, T., Pedroli, B., Woltjer, I., Van Elburg, E. en Maas, G. (2020). Uitwerking PAGW Natuuropgave Hotspots Grote Rivieren. Eindrapport. Wageningen Environmental Research. Wageningen, oktober 2020.

Van Dorsser & Buitendijk (2018). Technische analyse waterstanden op de Waal. Bijlage bij de brief "Diepgang Waal" aan de Minister van Infrastructuur en Waterstaat d.d. 24 september 2018

Verschuren, D. (2020). Effects of drought on the traffic capacity of the river Waal and the occurrence of congestion. MSc thesis, TU Delft Civil Engineering and Geosciences.

Wesselius, C., P. Boderie en N. Kramer (2017). Deltascenario's; randvoorwaarden voor 100-jarige reeks. Deltares rapport 11200554-000-ZWS-0011.

Wolters, H.A., G.J. van den Born, E. Dammers en S. Reinhard (2018). Deltascenario's voor de 21e eeuw, actualisering 2017. Deltares, Utrecht.

Ylla Arbós, C., Blom, A., Viparelli, E., Reneerkens, M., Frings, R. M., & Schielen, R. M. J. (2021). River response to anthropogenic modification: Channel steepening and gravel front fading in an incising river. *Geophysical Research Letters*, 48, e2020GL091338. <https://doi.org/10.1029/2020GL091338>

Zuidewijk, W.M., H. Barneveld, M.M.A. Schippers, C. Wegman, A. Paarlberg (2020). QuickScan rivierbodemligging; Ten behoeve van Integraal Riviermanagement. Versie Definitief 01, 2/03/2020. Rapport 116217/20-003.323. Witteveen+Bos Raadgevende ingenieurs B.V./HKV Lijn in Water.

# A Geraadpleegde experts

## A.1 Rivieraafvoer en bodemerosie

| Naam            | Organisatie |
|-----------------|-------------|
| Mark Hegnauer   | Deltas      |
| Judith ter Maat | Deltas      |
| Kees Sloff      | Deltas      |

## A.2 Scheepvaart

| Naam                | Organisatie                                    |
|---------------------|--|
| Jurjen de Jong      | Deltas   |
| Rolien van der Mark | Deltas   |
| Neeltje Kielen      | Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving |
| Otto Koedijk        | Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving |
| Milou Wolters       | Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving |
| Roelof Weekhout     | Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving |

## A.3 Zoetwatervoorziening

| Naam                | Organisatie                                    |
|---------------------|--|
| Marjolein Mens      | Deltas   |
| Bert Piekstra       | Wetterskip Fryslân                             |
| Dolf Kern           | Staf Deltacommissaris                          |
| Egon Ariëns         | DGWB   |
| Mark Kramer         | Hoogheemraadschap van Rijnland                 |
| Neeltje Kielen      | Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving |
| René van den Heuvel | Rijkswaterstaat Oost-Nederland                 |

## A.4 Natuur

| Naam             | Organisatie          |
|------------------|----------------------|
| Gertjan Geerling | Deltas               |
| Frans Klijn      | Deltas               |
| Maaike Maarse    | Deltas               |
| John Rocks       | Provincie Gelderland |
| Kees Buddingh    | Provincie Gelderland |

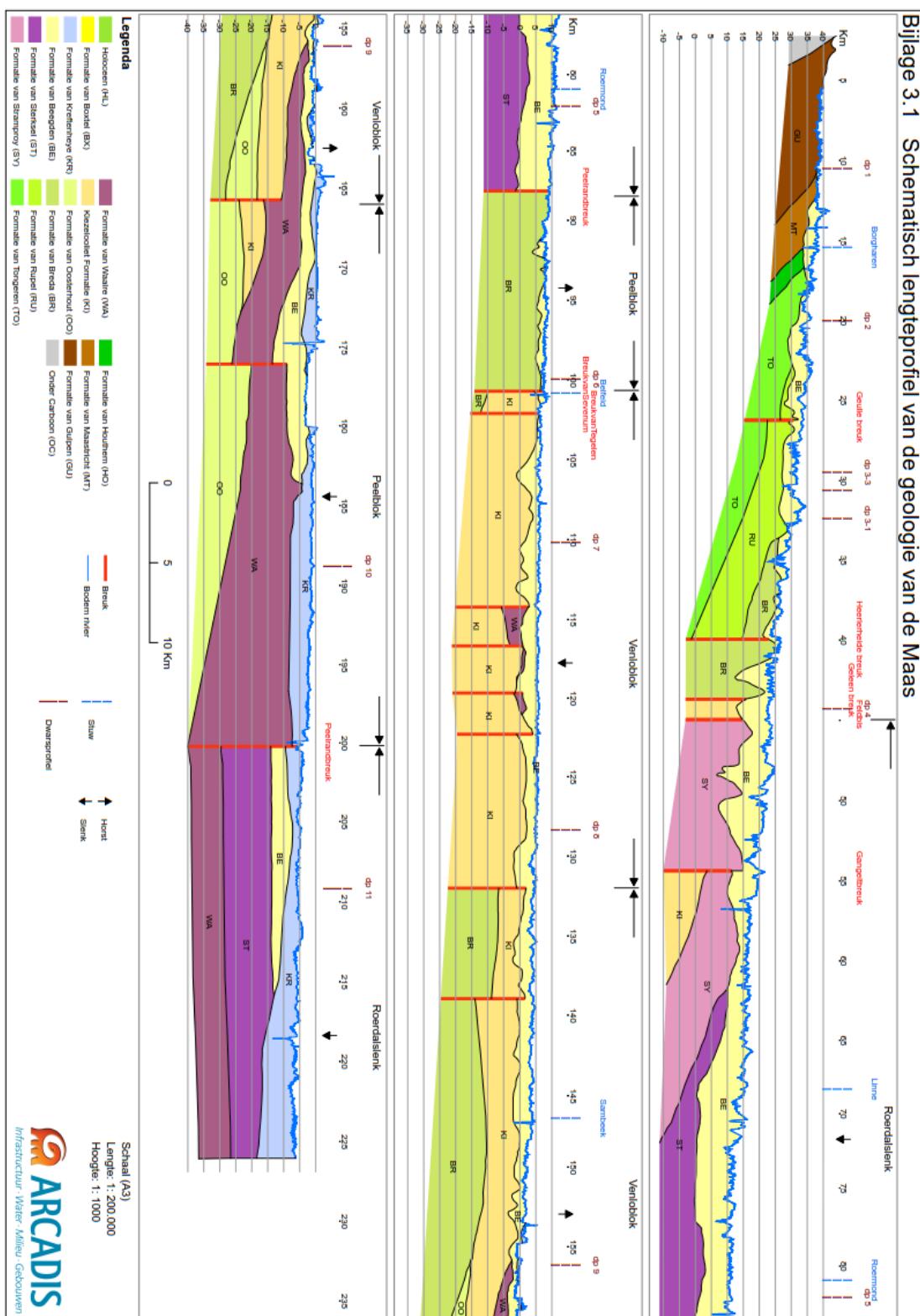
A.5

## Hoogwaterveiligheid

| Naam  | Organisatie                                    |
|---|--|
| Peter de Grave  | Deltares                                       |
| Karin de Bruijn   | Deltares                                       |
| David Kroekenstoe <ol style="list-style-type: none"></ol> | Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving |
| Jeroen Doornekamp   | Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving |
| Wouter Rozier   | Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving |

## B Bijlage bodemerosie

**Bijlage 3.1 Schematisch lengteprofiel van de geologie van de Maas**



Figuur 8.1 Schematisch lengteprofiel van de geologie van de Maas. De gele toplaag (Formatie van Beegden) bestaat uit relatief grof materiaal. Hieronder bevinden zich verschillende lagen met fijner materiaal. Bron: Bijlage 3.1 uit Meijer et al. (2011).

## C Bijlage scheepvaart

### Opzet van het analytische model

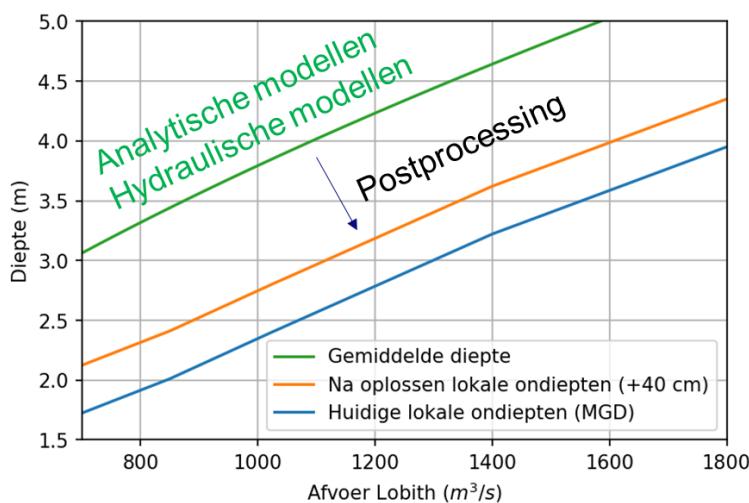
Voor de vereenvoudigde berekeningen is gebruik gemaakt van de berekening van de evenwichtsdiepte ( $h_e$ ) van een gegeven rivierprofiel. Omdat we enkel kijken naar laagwatersituaties, kan de geometrie van de rivier vereenvoudigd worden tot een rechthoekig dwarsprofiel van enkel het zomerbed. Hiervoor zijn de volgende dimensies aangehouden:

- Breedte,  $W = 260$  m
- Ruwheid,  $n = 0,025 \text{ s/m}^{1/3}$
- Bodemverhang,  $i=10^{-4}$
- Relatieve afvoer naar de Waal (t.o.v. Lobith), 80%

$$h_e = \left( \frac{Q \cdot n}{W \cdot \sqrt{i}} \right)^{3/5}$$

Dit model wordt gebruikt om te berekenen wat de toename in waterdiepte is, bij afname van de (stroomvoerende) breedte van de rivier.

Opgemerkt wordt dat de diepte uit het model veel groter is dan de huidige gemeten ondiepten in de rivier (de MGD's). Een van de redenen is dat scheepvaartondiepten vaak zeer lokaal zijn: een rivierbank na een bocht, of een niet-erodeerbare locatie in verband met aanwezigheid kabel of leiding. Op deze locaties is de bodem lokaal veel hoger. De doorstroming wordt hierdoor niet zozeer beïnvloed, maar de diepte voor de scheepvaart dus wel. In toepassingen als DPZW waarin de diepte uit een 1D model wordt verkregen is het nodig door post-processing correcties uit te voeren. In deze studie wordt die correctie niet uitgevoerd omdat we enkel kijken naar de *relatieve verandering in waterdiepte bij verandering van de modelinvoer*.

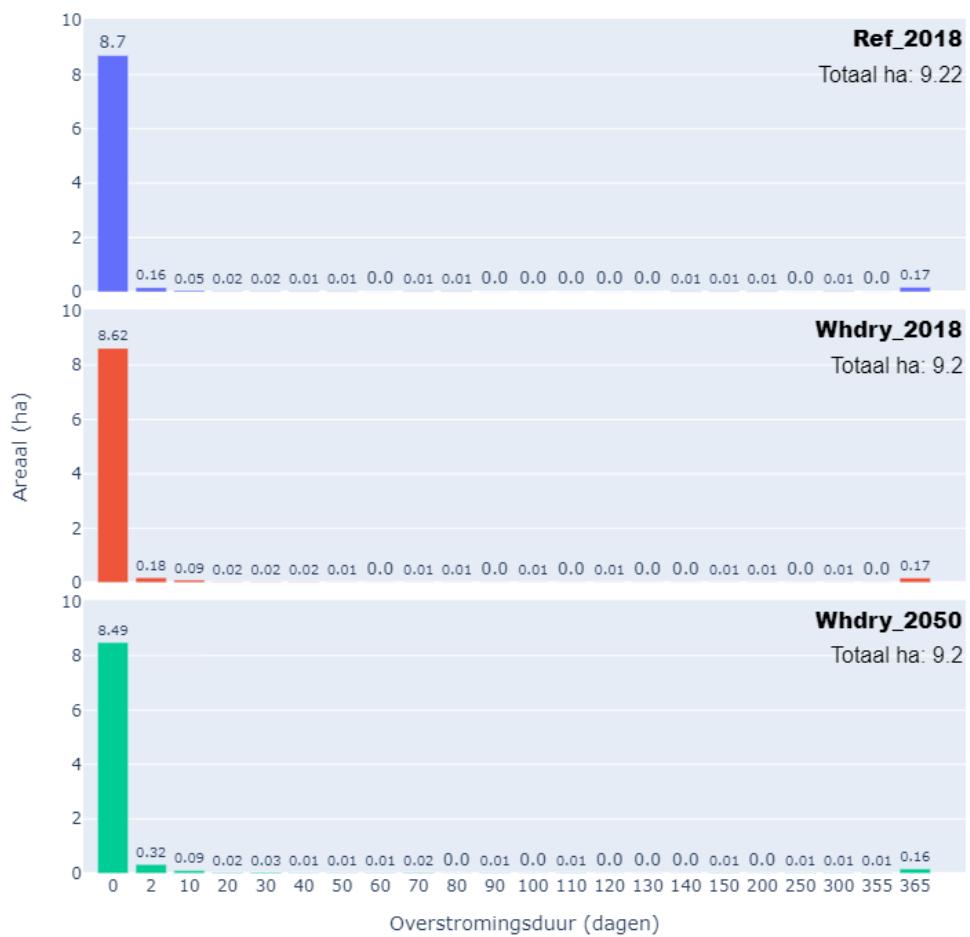


Figuur: Vergelijking van waterdiepte in hydraulische en analytische modellen (groen) met de gemeten beperkende diepte door de scheepvaart (MGD; blauw). Als zeer lokale ondiepten worden opgelost is de schatting dat de diepte met 40 cm toe zou nemen (oranje lijn).

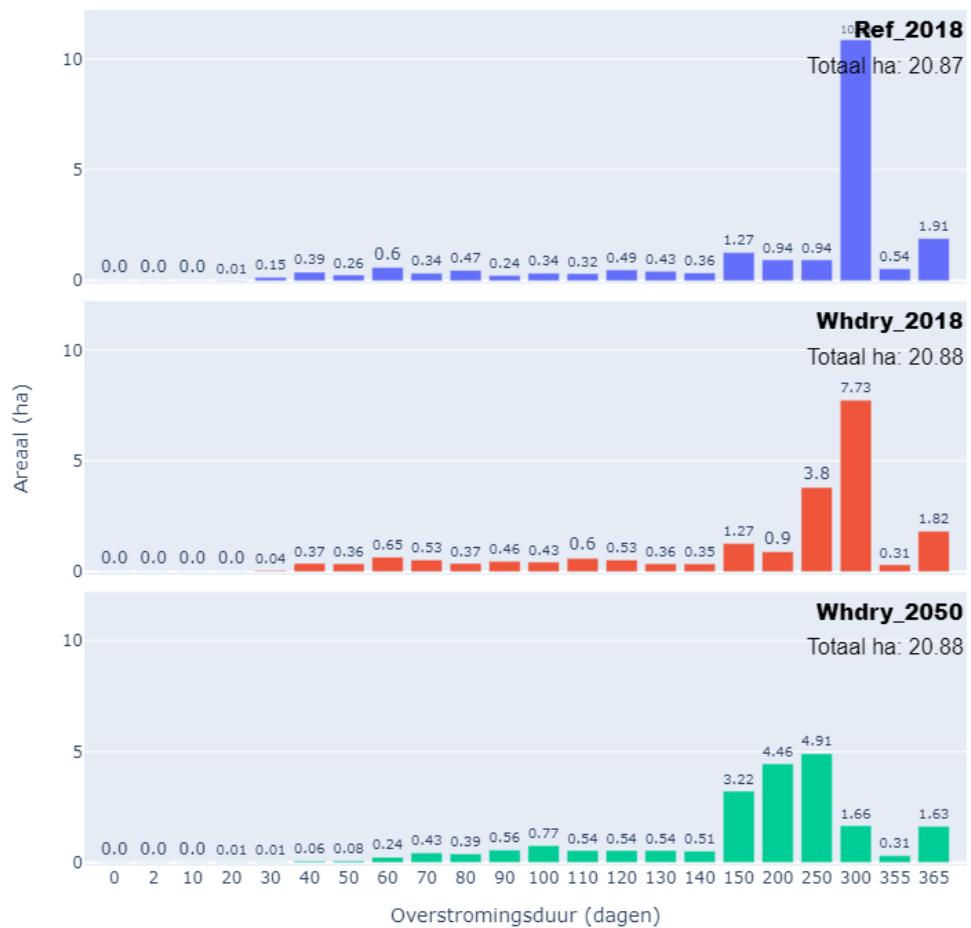
## D Bijlage natuur

Figuren van alle habitattypen op alfabetische volgorde.

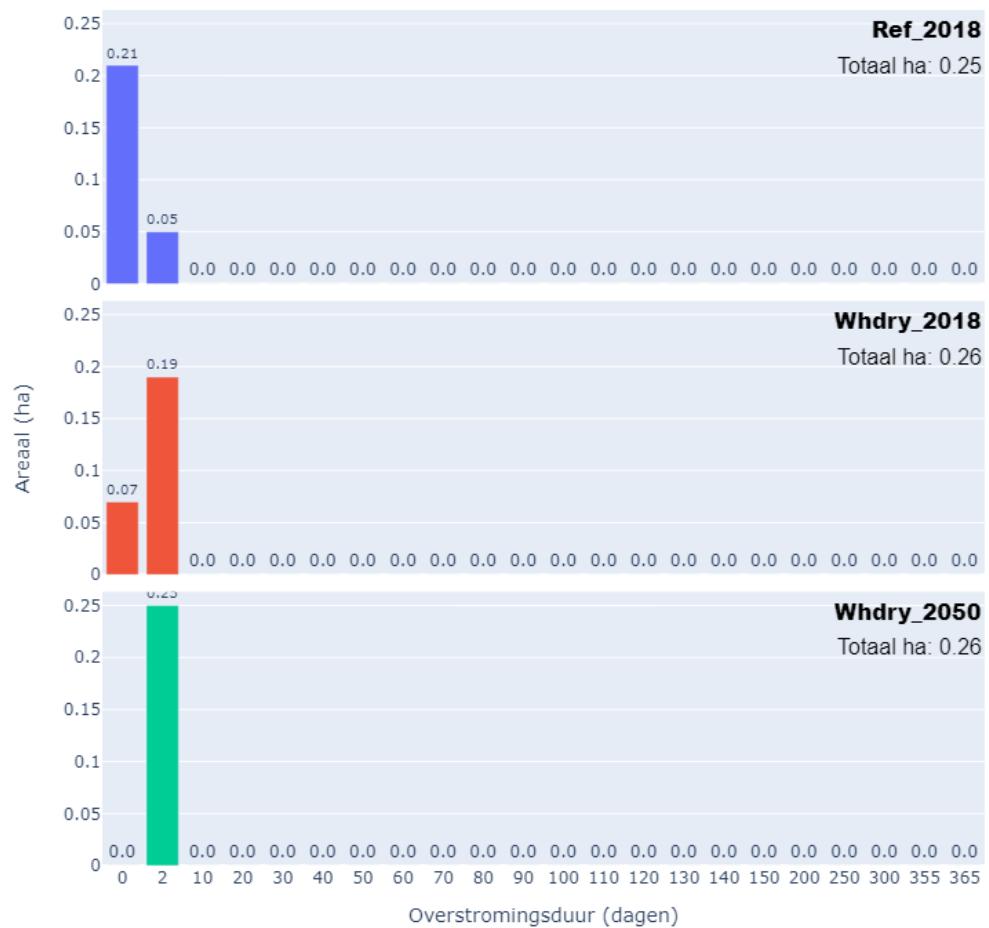
Beuken\_eikenbossen\_met\_hulst



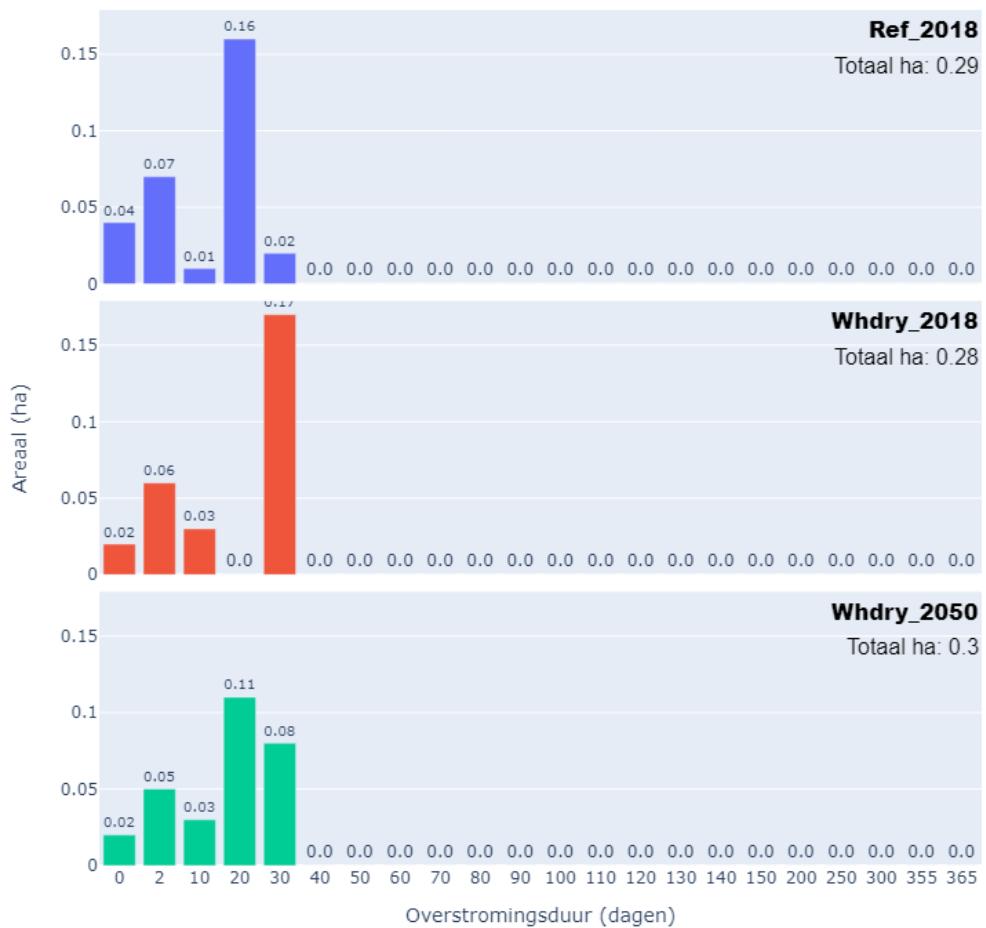
## Meren met krabbenscheer en fonteinkruiden



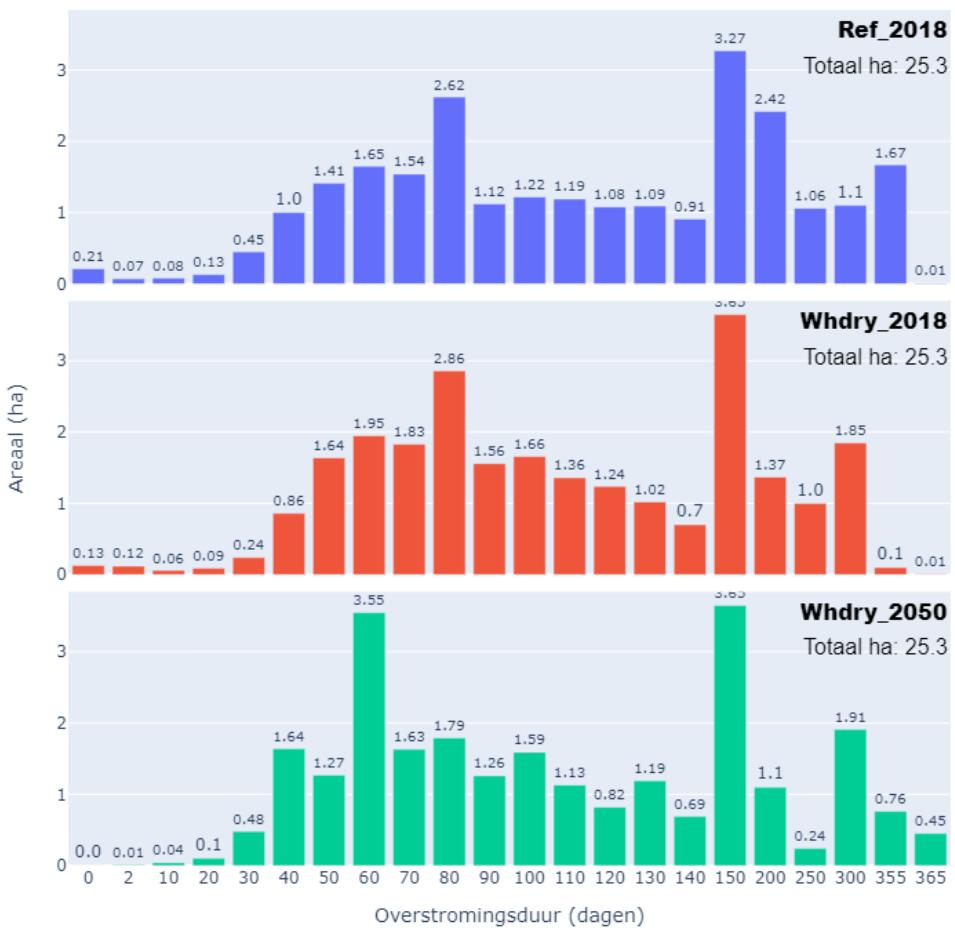
## Ruigten\_en\_zomen\_\_droge\_bosranden\_



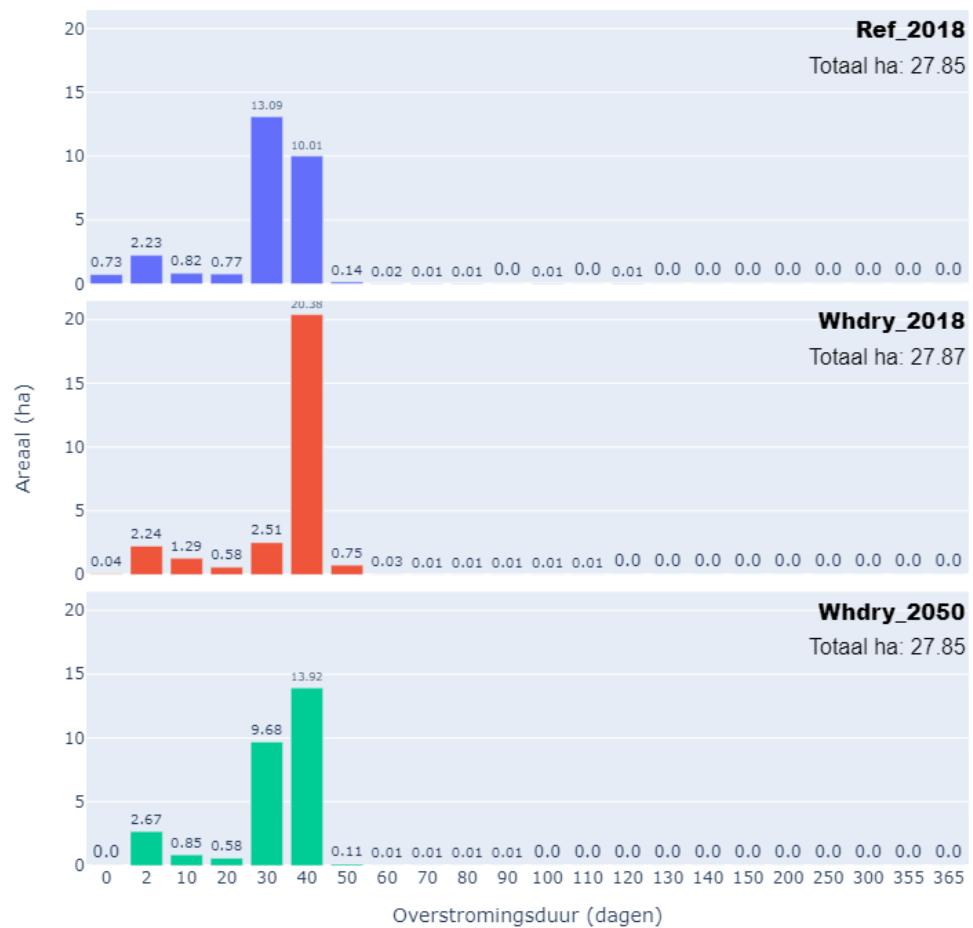
## Ruigten\_en\_zomen\_\_moerasspirea\_



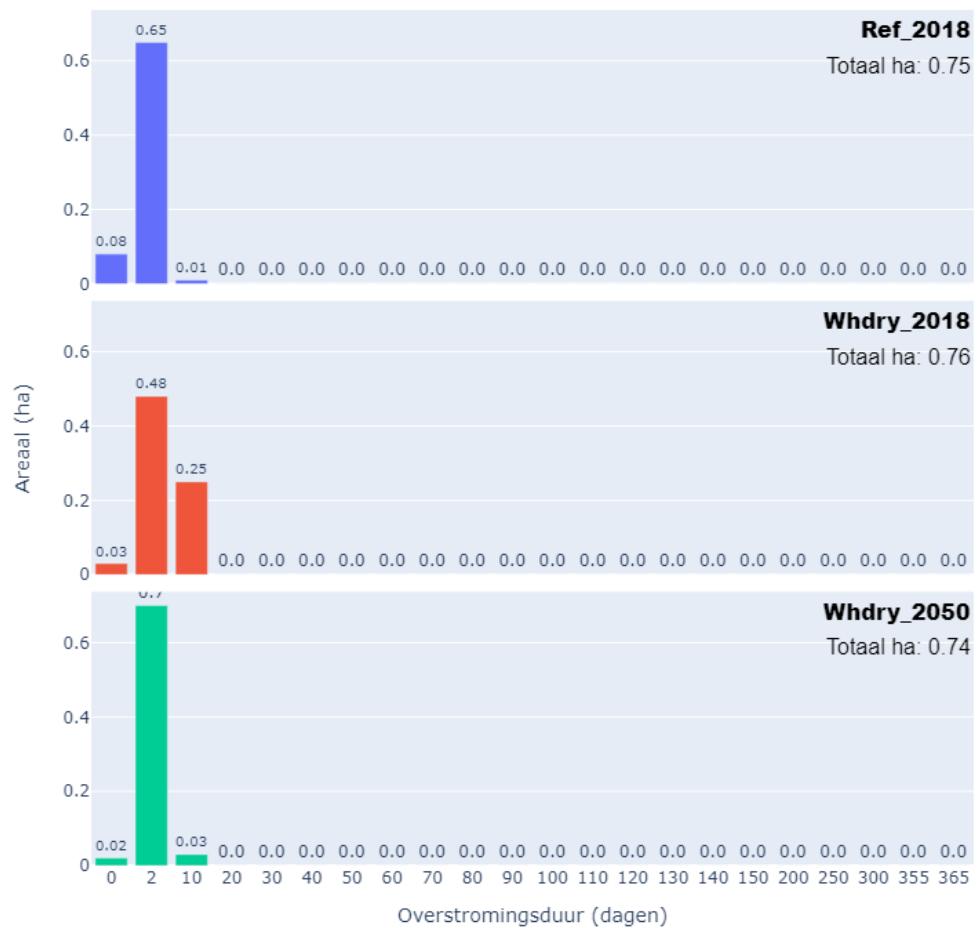
## Slikkige\_rivieroever



## Vochtige\_alluviale\_bossen\_\_beekbegeleidende\_bossen\_



## Vochtige\_alluviale\_bossen\_\_essen\_iepenbossen\_



Deltares is een onafhankelijk  
kennisinstituut voor toegepast  
onderzoek op het gebied van water  
en ondergrond. Wereldwijd werken  
we aan slimme oplossingen voor  
mens, milieu en maatschappij.

# Deltares