

Naar eenduidige uitgangspunten t.b.v. ontwerpwaarden voor natte kunstwerken

Pilotstudie: Lage waterstanden bij Sluis Weurt



Naar eenduidige uitgangspunten t.b.v. ontwerpwaarden voor natte kunstwerken
Pilotstudie: Lage waterstanden bij Sluis Weurt

Auteur(s)

Caroline Gautier

Menno van Dam

Naar eenduidige uitgangspunten t.b.v. ontwerpwaarden voor natte kunstwerken

Pilotstudie: Lage waterstanden bij Sluis Weurt

Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving
Contactpersoon	de heer dr. ir. H.E.J. Berger
Referenties	-
Trefwoorden	Sluis Weurt, vernieuwingsopgave, drempelniveau, klimaatscenario, bodemliggingsscenario

Documentgegevens

Versie	1.0
Datum	20-09-2024
Projectnummer	11210311-000
Document ID	11210311-000-HYE-0003
Pagina's	59
Classificatie	
Status	definitief

Auteur(s)

	Caroline Gautier	

Samenvatting

De monumentale Oostsluis in Weurt, daar waar het Maas-Waalkanaal de Waal ontmoet, is aan vernieuwing toe. Momenteel is bij laagwater op de Waal de waterstand in de voorhaven Waalzijde zo laag dat de sluis met een relatief hoge drempelliging van NAP+3,00 m, niet gebruikt kan worden. Omdat door verandering van het klimaat in de toekomst lage waterstanden op de Waal vaker zullen voorkomen dient de nieuwe drempel dieper aangelegd te worden, maar men weet nog niet hoeveel dieper.

Doel van deze studie is om inzichten te genereren over de toekomstig voorkomende waterstanden. Daarbij gaat het om gegenereerde tijdreeksen en om frequenties. Deze waterstanden zijn onder andere afhankelijk van het toekomstige klimaat en de bodemligging van de Waal. Bij het genereren van de inzichten wordt bij voorkeur gebruik gemaakt van de reeds beschikbare modellen.

Er bleken al modelberekeningen te bestaan met het Rijntakkenmodel waarmee de Q-H relatie (tussen afvoer Lobith en waterstand Sluis Weurt) te bepalen was voor drie verschillende bodemliggingsscenario's van het project Integraal Riviermanagement (IRM). Ook waren lange afvoertijdreeksen bij Lobith beschikbaar voor diverse KNMI2023 klimaatscenario's en zichtjaren. Op basis van die bestaande gegevens zijn nieuwe 240-jarige waterstandsreeksen voor Sluis Weurt afgeleid. In totaal zijn 45 scenario's beschouwd (3 bodems en 15 combinaties van klimaatscenario en zichtjaar), die dus elk een waterstandsreeks van 240 jaar opleveren.

Ten opzichte van de referentie situatie vertonen alle klimaatscenario's een duidelijk toename van het voorkomen van lage waterstanden, zelfs de natte klimaatscenario's. Als kental beschouwen we de waterstand die gemiddeld 20 dagen per jaar bij Sluis Weurt aan de Waalzijde wordt onderschreden. Bij de bodemligging van 2018 is die waterstand nu circa NAP+5,13 m. Die waterstand zou - bij gelijke bodemligging - bij het midden-klimaatscenario in 2150 dalen naar NAP+4,69 m en bij het klimaatscenario met hoge uitstoot van broeikasgassen zelfs naar NAP+4,36 m. Omgekeerd is ook te zien dat een waterstand die nu 20 dagen per jaar wordt onderschreden, in de verre toekomst mogelijk meer dan 75 dagen per jaar wordt onderschreden (in de droge scenario's bij hoge uitstoot 2100Hd en 2150Hd).

Deze studie doet vervolgens een voorstel om uit die synthetische waterstandsreeksen voor het gewenste scenario een representatief jaar, dat eens in de tien jaar voorkomt (T10-jaar) te selecteren: Neem van de 240 jaren het 24e jaar (=10%), nadat ze op volgorde zijn gezet (van hoog naar laag) van het aantal dagen dat de Rijnafvoer 1020 m³/s of minder is. De waterstanden van dat jaar kunnen gebruikt worden om SIVAK (simulatie model voor verkeersafwikkeling bij kunstwerken) wachttijdanalyses uit te voeren. Op vergelijkbare manier kunnen ook reeksen met een andere terugkeertijd worden afgeleid..

De uitkomsten van deze studie zijn niet vrij van onzekerheden, zoals bijvoorbeeld in klimaatscenario, ontwikkeling van de bodemligging en modelonzekerheid. De gepresenteerde getallen en waterstandsreeksen zijn hiervoor niet gecorrigeerd. Het is aan de ontwerper om daar in het ontwerpproces op een verantwoorde manier mee om te gaan.

De verkregen inzichten en waterstandsreeksen gaan helpen bij besluitvorming rond het drempelniveau. Echter, er zijn eerst nog een aantal beleidsbeslissingen nodig waarvan nog niet duidelijk is wie die neemt en hoe. Het gaat concreet om de te hanteren uitgangspunten ten aanzien van:

- IRM bodemscenario

- KNMI-klimaatscenario
- zichtjaar
- afvoerverdeling over de Rijntakken
- toekomstige scheepvaartintensiteit en vlootsamenstelling
- criterium hoe vaak sluis niet gebruikt kan worden

Een integrale afweging ten aanzien van het drempelniveau is gewenst.

Deze pilotstudie voor Sluis Weurt is als concreet voorbeeld uitgewerkt om een opzet te kunnen maken voor een algemene methodiek om eenduidige uitgangspunten voor ontwerpwaarden voor natte kunstwerken op te stellen.

Inhoud

	Samenvatting	4
1	Inleiding	8
1.1	Aanleiding	8
1.2	Probleembeschrijving	8
1.3	Doelstelling	9
1.4	Leeswijzer	9
2	Plan van aanpak	10
3	Bestaande gegevens en relevante projecten	11
3.1	Inleiding	11
3.2	Sluis Weurt	11
3.3	Maas-Waalkanaal	12
3.4	Scheepvaartafspraken Waal	13
3.5	KNMI 2023 scenario's	13
3.5.1	Samenvatting	13
3.5.2	Nadere uitleg klimaatscenario's	14
3.5.3	Resulterende reeksen voor gebruik in de pilot Sluis Weurt	16
3.6	Afvoerscenario's Rijn	16
3.7	Integraal Rivier Management	18
3.8	Modellschematisatie D-HYDRO Rijntakken	20
3.9	Nationaal Water Model	21
3.10	Deltaprogramma Zoetwater	21
3.11	Beschikbare meetgegevens waterstand en afvoer	22
3.11.1	Inleiding	22
3.11.2	Waterstand	22
3.11.3	Afvoer	22
4	Waterstandsstatistieken voor Weurt voor diverse klimaat- en bodemscenario's	24
4.1	Methode	24
4.2	Waterstandsreeksen	25
4.3	Onderschrijdingspercentages waterstanden	26
4.4	Invloed van klimaatscenario, bodemligging en zichtjaar op waterstand	28
4.4.1	Invloed van klimaatscenario op waterstanden	28
4.4.2	Invloed van zichtjaar op waterstanden	29
4.4.3	Invloed van bodemligging op waterstanden en waterdiepte	30
4.5	Aaneengesloten duur van lage waterstanden	32
4.6	Vergelijking met metingen	33

4.7	Onzekerheden	34
4.8	Reproduceerbaarheid	35
5	Representatieve waterstandsreeks voor Sluis Weurt	36
5.1	Inleiding	36
5.2	Voorstel voor methode representatief jaar	36
5.3	Representatieve jaren voor droge scenario's met midden en hoge uitstoot (Md en Hd)	37
5.4	Afwegingen	38
6	Doorkijk naar overige vernieuwingsprojecten	39
6.1	Inleiding	39
6.2	Stroomschema	39
6.3	Hoe te komen tot algemene Eenduidige Uitgangspunten voor Ontwerp	40
7	Conclusies en aanbevelingen	41
7.1	Conclusies	41
7.2	Aanbevelingen	41
8	Referenties	43
A	Tabellen	45
B	Figuren	48
C	Achtergrondinformatie IRM (Integraal Rivier Management)	52
C.1	Bodemligging	52
C.2	Bodemprognose na 2050	53
C.3	Samenvatting IRM m.b.t. bevaarbaarheid (bron: Deltares, 2022b)	53
C.4	Specificatie D-HYDRO simulaties van IRM	54
D	Validatiefiguren D-HYDRO modelschematisatie Rijntakkenmodel	56
E	Representatief jaar	57

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

Veel van onze sluisen, stuwen, gemalen en stormvloedkeringen bereiken de komende decennia het einde van hun levensduur. Nederland staat voor de grote opgave om deze kunstwerken te vernieuwen. Voor ieder ontwerp zijn hydraulische ontwerprandvoorwaarden van bijvoorbeeld de waterstand, de rivierafvoer en golfhoogte nodig die representatief zijn voor toekomstige situaties. Veranderingen in het klimaat kunnen daarbij niet genegeerd worden.

Om te voorkomen dat voor elk kunstwerk het wiel opnieuw moet worden uitgevonden, zet het project EUO-Kunst een algemene methodiek op voor Eenduidige Uitgangspunten voor Ontwerpwaarden voor natte kunstwerken, met de nadruk op hydraulische randvoorwaarden. Met EUO-Kunst versnellen we het proces van de vernieuwingsopgave en maken we het transparanter en efficiënter. Bovendien zorgt het voor consistentie en voorkomt het dat individuele projecten inconsistente - niet op andere projecten afgestemde - keuzes maken.

De Oostsluis in Weurt geldt als pilotproject voor EUO-Kunst. Dit Rijksmonument is aan vernieuwing toe en de lage waterstanden op de Waal tijdens toekomstige droge zomers zijn bepalend voor het drempelniveau van de sluis. De huidige rapportage richt zich volledig op deze pilot.

Dit project is voor Rijkswaterstaat uitgevoerd door Deltares, als SITO-PS project binnen de thematafel Infrastructuur.



Figuur 1.1: Sluis Weurt met links de Westsluis en rechts de Oostsluis en op de achtergrond de Waal (© Rijkswaterstaat; via website omroep Gelderland)

1.2 Probleembeschrijving

De monumentale Oostsluis in Weurt, daar waar het Maas-Waalkanaal de Waal ontmoet, is aan vernieuwing toe. Momenteel is bij laagwater op de Waal de waterstand in de voorhaven Waalzijde zo laag dat de sluis met een relatief hoge drempellinging van NAP+3,00 m, niet gebruikt kan worden. Omdat door verandering van het klimaat lage waterstanden in de toekomst vaker zullen voorkomen dient de nieuwe drempel dieper aangelegd te worden, maar men weet nog niet hoeveel dieper. Niet alleen het effect van de KNMI2023 klimaatscenario's

op de waterstand bij Sluis Weurt is onbekend, maar ook welk scenario te hanteren voor het ontwerp. Daarnaast is nog onzeker hoe invulling wordt gegeven aan de bodemontwikkeling van de Waal, de verwachte scheepvaarintensiteit, de afvoerdeling over de Rijntakken en het zichtjaar.

1.3 Doelstelling

Het doel van deze pilot studie is om inzichten te genereren over de toekomstig voorkomende lage waterstanden aan de Waalzijde bij Sluis Weurt. Daarbij gaat het om het genereren van tijdreeksen en herhalingsfrequenties ten behoeve van het vaststellen van het ontwerpdrempelniveau van de te vernieuwen Oostsluis bij Weurt. Bij voorkeur wordt gebruik gemaakt van reeds beschikbare modellen.

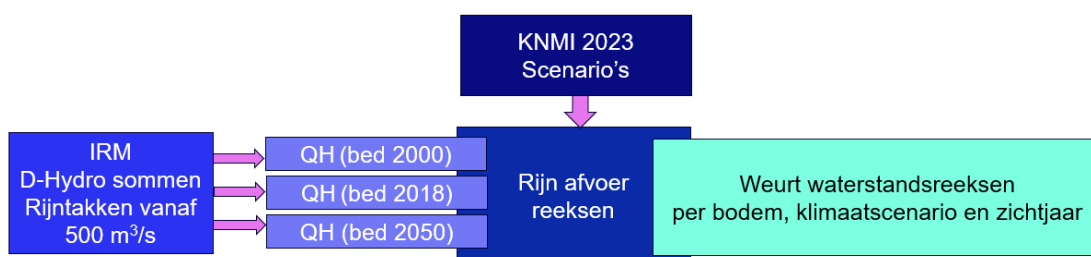
1.4 Leeswijzer

Na de inleiding (Hoofdstuk 1) wordt in Hoofdstuk 2 het plan van aanpak globaal beschreven. Voordat op details van de aanpak wordt ingegaan legt Hoofdstuk 3 uit welke bestaande gegevens en projecten mogelijk relevant zijn voor de huidige pilotstudie voor Sluis Weurt. In Hoofdstuk 3 wordt ook beknopt uitgelegd hoe de KNMI-2023 klimaatscenario's tot stand zijn gekomen. In Hoofdstuk 4 wordt de methode in meer detail uitgelegd en worden de resultaten gepresenteerd in verschillende figuren en tabellen. Ook gaat Hoofdstuk 4 in op onzekerheden. Hoofdstuk 5 geeft een beschrijving hoe de representatieve waterstandsjaarreeks voor Sluis Weurt wordt gekozen. Hoofdstuk 6 stipt aan hoe deze pilot helpt bij het opzetten van een algemene methodiek voor eenduidige uitgangspunten en ontwerpwaarden voor natte kunstwerken. Ten slotte geeft Hoofdstuk 7 conclusies en aanbevelingen.

2 Plan van aanpak

De gevolgde aanpak kenmerkt zich door handig gebruik te maken van bestaande gegevens zodat geen uitgebreide rekenexercities nodig zijn voor deze studie.

Ten eerste waren er al de KNMI2023 klimaatscenario's (KNMI, 2023). Ook waren daar reeds afvoerscenario's voor de Rijn van afgeleid. Op basis van bestaande D-HYDRO resultaten is de relatie tussen de afvoer (Q) en de lokale Waal waterstand (H) ter hoogte van Sluis Weurt (km 887.0) bepaald, voor drie verschillende scenario's voor de bodemligging (bed 2000, bed 2018, bed 2050). Aan de hand van die QH-relaties wordt vervolgens de hele afvoerreeks vertaald naar waterstanden bij Sluis Weurt (zie Figuur 2.1). Dit gebeurt voor diverse klimaatscenario's, zichtjaren en bodemliggingsscenario's.



Figuur 2.1: Schematische weergave van het plan van aanpak om uit de KNMI 2023 scenario's, de Rijn afvoerreeksen en de D-HYDRO resultaten de waterstanden bij Sluis Weurt te verkrijgen voor diverse bodem- en klimaatscenario's (combinatie van zichtjaar en scenario)

In deze aanpak worden vooralsnog geen beslissingen genomen over scenario, zichtjaar, bodemligging, afvoerverdeling Pannerdensche Kop, etc. maar worden die keuzes bewust open gelaten. Op deze manier wordt de spreiding in de uiteindelijke resultaten (de waterstanden bij Sluis Weurt) juist duidelijk en ook het effect van de keuzes op die resultaten.

De analyse van wachttijden kan met het programma SIVAK uitgevoerd worden, maar dat valt buiten de scope van het huidige project. Wij doen wel een voorstel voor het selecteren van een representatief jaar per scenario dat als invoer voor SIVAK kan dienen.

Bovenstaande is een beknopte beschrijving van het plan van aanpak. Het volgende hoofdstuk met meer uitleg over de bestaande gegevens zal de aanpak verduidelijken.

3 Bestaande gegevens en relevante projecten

3.1 Inleiding

Dit hoofdstuk geeft een overzicht van gegevens en projecten die relevant (kunnen) zijn voor het bepalen van de waterstanden voor het ontwerpdrempelniveau van Sluis Weurt. Na een beknopte introductie van Sluis Weurt (Par 3.2), het Maas-Waalkanaal (Par 3.3) en de scheepvaartafspraken voor de Waal (Par 3.4) wordt in Paragraaf 3.5 uitleg gegeven over de KNMI2023 klimaatscenario's. De paragrafen daarna behandelen de afvoerscenario's van de Rijn (Par 3.6), de projecten Integraal Riviermanagent (IRM; Par 3.7), het Nationaal Watermodel (NWM; Par 3.9) en het Deltaprogramma Zoetwater (Par 3.10), het D-Hydro model van de Rijntakken (Par 3.8) en metingen (Par 3.11).

3.2 Sluis Weurt

Sluis Weurt vormt de aansluiting van het Maas-Waalkanaal op de Waal, ter hoogte van rivierkilometer WL887 net benedenstrooms van Nijmegen (zie Figuur 3.1). Het complex bestaat uit de nieuwere Westsluis (1977) en de monumentale Oostsluis (1927). De wanden van de oostelijke sluis kolk zijn van gewapend beton en de kolkvloer is opgebouwd uit betonnen tegels. De sluis bevat drie roldeuren zodat getrapt schutten mogelijk is bij grotere vervallen over de sluis en om risico's op aanvaren van de deuren te verkleinen. Aan de Waalzijde kan de roldeur voorzien worden van opzetschotten waardoor de kerende hoogte van de schutsluis wordt verhoogd van NAP +12,94 m tot NAP +15,10 m. De waterstand aan de Waalzijde varieert, de waterstand op het Maas-Waalkanaal wordt op circa NAP+7,90 m gehouden. Stuw Grave wordt zodanig ingesteld dat de waterstand ter plaatse van stuurpunt Mook (Sluis Heumen) bij lage afvoeren op NAP+7,93m wordt gehandhaafd. De kolk lengte bedraagt 260 m en de kolk breedte is 16,0 m. De toegestane doorvaartbreedte is 15,5 m volgens 'Regeling communicatie en afmetingen rijksbinnenwateren'. Het drempelniveau van de Oostsluis is NAP +3,00 m, die van de Westsluis NAP +1,50 m. Beide sluisen worden geacht beroepsvaart t/m CEMT-klasse Vb (duwstellen tot 225 m lang) te faciliteren, maar de Oostsluis kan nu al vaak niet gebruikt worden vanwege te lage waterstanden op de Waal. Bij lokale Waalwaterstanden lager dan NAP+7,20 m kunnen de grotere schepen niet volledig beladen door deze sluis varen. Bij waterstanden lager dan NAP+6,00 m kan de Oostsluis geheel niet gebruikt worden (Witteveen+Bos, 2021). Jaarlijks passeren ongeveer 29.000 binnenvaartschepen het sluiscomplex Weurt (<https://www.rijkswaterstaat.nl/nieuws/archief/2024/06/sluis-weurt-sluitingen-westkolk-juli-augustus-2024>) maar dit aantal is de laatste jaren gedaald tot onder de 20.000 (o.b.v. passageregistraties IVS-data).



Figuur 3.1: Bovenaanzicht Sluis Weurt (bron: Google Earth). 1=Westsluis; 2=Oostsluis; MWK=Maas-Waalkanaal

3.3 Maas-Waalkanaal

Het Maas-Waalkanaal (MWK) is de 13 km lange verbinding tussen de Maas en de Waal, twee belangrijke internationale scheepvaartroutes, zie Figuur 3.2. De Maas is de verbinding van Rotterdam, via Maastricht naar Luik en Noord Frankrijk en vice versa. De Maas is een gestuwde rivier waar de scheepvaart diverse sluisen tegenkomt. De Waal is de verbinding tussen Rotterdam en Duitsland en heeft geen sluisen of stuwen. Scheepvaart vanuit Limburg richting Duitsland maakt gebruik van het MWK en het is tevens de gangbare route voor scheepvaart vanuit Limburg richting Rotterdam (en omgekeerd). Net als Sluis Weurt is het MWK in principe geschikt voor schepen t/m CEMT-scheepvaartklasse Vb.

Enkele kilometers nadat de Rijn Nederland binnenstroomt (Boven-Rijn) wordt het water bij het splitsingspunt van de Pannerdensche Kop gesplitst. Ongeveer 1/3 deel gaat via het Pannerdensch Kanaal de IJssel of de Neder-Rijn op en ongeveer 2/3 deel volgt rechtdoor de Waal. Het regelwerk Pannerden is zodanig ingesteld dat die verhouding behouden blijft bij hoog water, als de uiterwaarden ook mee stromen. Bij lage afvoeren gaat er relatief veel meer naar de Waal volgens het Stuwprogramma 2016 (circa 80% van de totale Rijnafvoer).

De bodem van de Waal vertoont al jaren een eroderende trend die tot verstoring van de afvoerverdeling leidt. Hierdoor stroomt er namelijk meer afvoer door de Waal ten koste van de IJssel en de Nederrijn-Lek. De Waal kent een aantal stukken met vaste lagen waar de waterdiepte relatief gering is. Het gaat om de vaste laag bij Nijmegen op kilometer 883-889 en die bij Sint Andries (kilometer 925-930). Bij Erlecom (kilometer 877-883) is de binnenbocht bij laagwater ondiep door de aanleg van bodemkribben (Deltares, 2024a).



Figuur 3.2: Maas Waal kanaal (rood). Bron: <https://www.rijkswaterstaat.nl/water/vaarwegenoverzicht/maas-waalkanaal#kenmerken-maas-waalkanaal>

3.4 Scheepvaartafspraken Waal

Onderstaande tekst is deels overgenomen uit Deltares, 2024a.

Binnen het Trans-Europese transportnetwerk (TEN-T) is afgesproken dat lidstaten er voor zorgen dat de infrastructuur voldoet aan de vereisten voor waterwegen klasse IV. Dit betekent een minimum diepgang van 2,50 m als vereiste gedurende 365 dagen per jaar. Deze verordening wordt momenteel herzien in een vaardiepte van ten minste 2,50 m ten opzichte van vastgestelde referentiewaterstanden (nu nog onbekend) die op een bepaald aantal dagen per jaar wordt overschreden ten opzichte van een statisch gemiddelde.

De nieuwe definitie heeft gelijkenis met de afspraak zoals die is vastgelegd door de Centrale Commissie voor de Rijnvaart (CCR), in die zin dat die eis ook een diepte bij een zekere referentiewaterstand is. De afspraak in CCR-verband is dat de waterdiepte in de Waal minimaal 2,80 m dient te bedragen ten opzichte van de Overeengekomen Lage Rivierstand OLR (CCR, 2014). De OLR is de waterstand die optreedt bij de Overeengekomen Lage Afvoer (OLA). De OLA is gedefinieerd als de afvoer die over een honderdjarige periode gemiddeld 20 dagen per jaar wordt overschreden, en is sinds 2002 gelijkgesteld aan 1020 m³/s bij Lobith. De meest recente bepaling van de OLA (ongewijzigd) is van 2022 (Rijkswaterstaat Oost Nederland, 2022).

De waterstand bij deze 'Overeengekomen Lage Afvoer' van 1020 m³/s bedraagt volgens D-HYDRO-berekeningen (Deltares, 2022b) NAP+5,03 m op de Waal ter hoogte van Sluis Weurt (kilometer WL887), met de huidige bodemschematisatie van IRM2018 (zie Par 3.7 en Tabel A.1 in bijlage A).

3.5 KNMI 2023 scenario's

3.5.1 Samenvatting

De KNMI-klimaatscenario's zijn een vertaling van de wereldwijde klimaatprojecties van het IPCC - het klimaatpanel van de Verenigde Naties - naar Nederland (KNMI, 2023b). Er zijn zes scenario's (zowel 'nat' als 'droog' en met lage, middel en hoge CO₂ uitstoot) waarvoor het KNMI in 2023 lange synthetische tijdreeksen heeft gemaakt van diverse meteorologische parameters zoals luchttemperatuur, neerslag, potentiële verdamping, etc. De tijdreeksen beslaan 30 jaar (rondom de jaren 2033 (corresponderend met 1,5°C verhoging ('Parijs'), 2050,

2100, 2150 en ook de referentieperiode 1991-2020). Om rekening te houden met natuurlijke variabiliteit is er voor elke periode van dertig jaar een ensemble van acht tijdseries beschikbaar. De KNMI-2023 scenario's zijn de meest recente klimaatscenario's. De vorige versie was KNMI-2014.

3.5.2 Nadere uitleg klimaatscenario's

Definitie klimaatscenario (KNMI 2023a):

Een klimaatscenario is een aannemelijk en samenhangend beeld van het toekomstige klimaat, opgesteld om de mogelijke gevolgen van door de mens veroorzaakte klimaatverandering te onderzoeken (IPCC, 2013). Zo'n scenario is geen voorspelling van het toekomstige klimaat en er kan evenmin een waarschijnlijkheid aan worden toegekend.

Concreet bestaan de klimaatscenario's uit 30-jarige dagreeksen van neerslag, wind, zonnestraling, mist, luchtvochtigheid, etc. Deze reeksen zijn ontwikkeld voor 1) diverse zichtjaren, voor 2) diverse combinaties van socio-economische ontwikkelingen en voor 3) een nat en droog scenario.

1) Zichtjaren

De 30-jarige reeksen zijn ontwikkeld voor de zichtjaren 2033, 2050, 2100 en 2150. Ook is er een reeks voor de huidige situatie (referentie), om de verschillen met de huidige situatie te kunnen aanduiden.

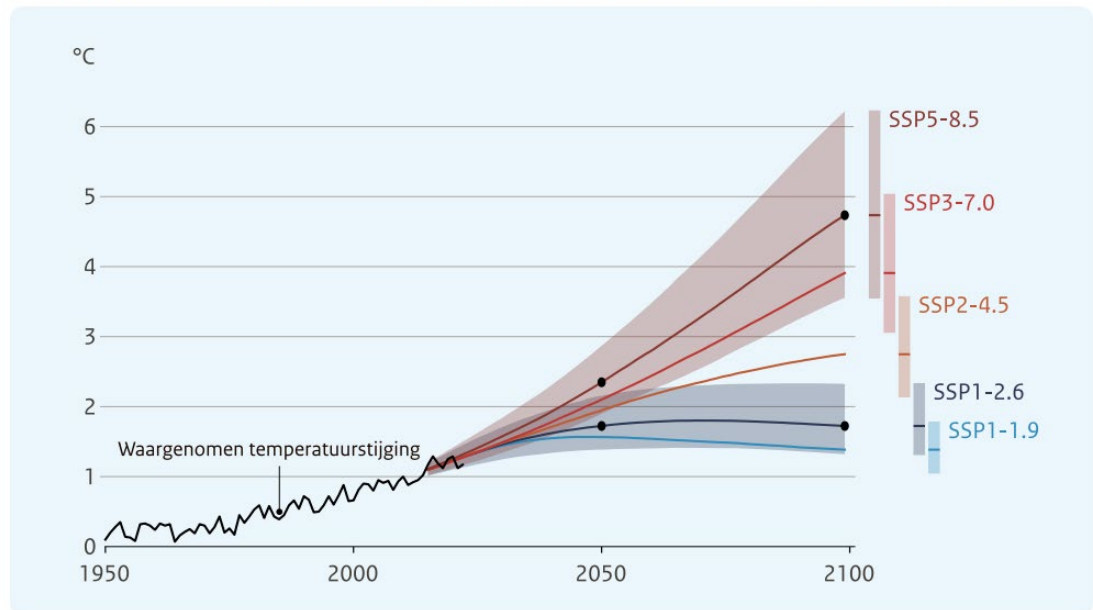
2) Socio-economische ontwikkelingen

De verandering van het klimaat hangt onder andere af van de hoeveelheid uitstoot van broeikasgassen maar ook van andere factoren, zoals het landgebruik. Omdat niet met zekerheid is te zeggen hoe die zich in de toekomst ontwikkelen, zijn er een aantal sociaal-economische scenario's opgesteld. Deze zogenaamde SSP's (shared socio-economic pathways) beschrijven de demografische, sociaal-economische en technologische ontwikkelingen in de toekomst. Er zijn vijf SSP's die door IPCC beschreven zijn en daarvan beschouwt KNMI de volgende drie, zie ook Figuur 3.3:

- L (SSP1-2.6): Lage uitstoot. De uitstoot zal snel verminderen en broeikasgassen zullen actief verwijderd worden uit de atmosfeer. Dit is in lijn met het klimaatakkoord van Parijs. Rond 2100 is de opwarming dan 1,7°C ten opzichte van 1850-1900. Voor 2050, 2100 en 2150 is de opwarming nagenoeg gelijk.
- M (SSP2-4.5): Moderate uitstoot. De uitstoot zal na een stijging geleidelijk verminderen.
- H (SSP5-8.5): Hoge uitstoot. De uitstoot zal sterk toenemen tot 2080 en daarna afvlakken. Rond 2100 is de mondiale opwarming dan bijna 5°C ten opzichte van 1850-1900.

Wereldwijde temperatuurstijging ten opzichte van 1850-1900

Zwarte punten: temperatuurstijging gebruikt in de KNMI'23-klimaatscenario's



Figuur 3.3: Wereldwijde temperatuurstijging zoals waargenomen (zwarte lijn) en voor de SSP's (mediaan (gekleurde lijnen) en 90%-bandbreedte). Verticale balken: wereldwijde opwarming voor vijf SSP's rond 2100. Bron: IPCC, via KNMI, 2023a)

De klimaatverandering in Nederland zal zich zeer waarschijnlijk voltrekken ergens tussen de L- en H-scenario's in (KNMI, 2023a). Met het hoge scenario wordt volgens het KNMI een 'worst case scenario' in beeld gebracht. In de praktijk moeten we met alle mogelijke toekomst binnen die uitersten rekening houden, zeker bij grote beslissingen op het gebied van bijvoorbeeld infrastructuur (KNMI, 2023b). Ten behoeve van onder meer ontwerpvragestukken zijn ook M-scenario's ontwikkeld.

3) Nat en droog scenario

De klimaatmodellen geven bij hetzelfde SSP verschillende uitkomsten voor de regionale klimaatveranderingen. Deze regionale verschillen zijn onder andere het gevolg van hoe de ligging van hoge- en lagedrukgebieden verandert. Dit heeft met name een grote impact op de neerslag. Daarom zijn twee varianten doorgerekend: één met veel verdroging in de zomer (d) en één met een sterke neerslagtoename in de winter (n).

Om tot tijdreeksen te komen zijn 33 verschillende klimaatmodellen beschouwd (die dus deels natte en deels droge scenario's opleverden). Met het Regional Atmospheric Climate model (RACMO) v2.3 model is – voor elk van de drie SSP's en voor elk zichtjaar - een 30-jaars vertaling gemaakt van wereldschaal naar 12 km x 12 km resolutie, op basis van EC-Earth, één van de 33 globale klimaatmodellen. Echter, door dit zestien keer te doen, met elke keer een verschillende beginconditie, wordt dezelfde variabiliteit verkregen die ook in de droge en natte groepen van klimaatmodellen aanwezig was. Dit noemt men de zestien ensemble-leden.

Vervolgens heeft het KNMI hun 'resampling tool' gebruikt om uit de zestien ensemble-leden losse jaren te kiezen die samen weer acht tijdreeksen van elk 30 jaar vormen die zo goed mogelijk de 33 klimaatmodellen representeren. Om deze reeksen samen te stellen zijn 18 randvoorwaarden beschouwd zoals bijvoorbeeld jaargemiddelde temperatuur, 10-daags maximale neerslag, etc. De acht tijdreeksen bieden informatie ten aanzien van klimaatvariatie

voor de 30-jaars periode. Binnen elke 30 jaar (van 15 jaar voor tot 15 jaar na het zichtjaar) zit nog wel een klimaatsignaal van temperatuur.

Merk ten slotte op dat de RACMO uitkomsten (temperatuur, neerslag, en verdamping) van zowel het huidige als toekomstige klimaat, zijn gecorrigeerd om beter aan te sluiten bij metingen. Hiertoe is gebruik gemaakt van de zogenaamde ‘quantile mapping’ methode, met zowel aandacht voor de gemiddelde als voor de extreme waarden. Bovenstaande tekst is gebaseerd op KNMI, 2024 en Deltares, 2023a.



Figuur 3.4: Vier scenario's voor klimaatverandering in Nederland. Het aantal blokjes staat voor de mate van klimaatverandering rond 2100 ten opzichte van 1991-2020 (bron: KNMI, 2023a)

3.5.3 Resulterende reeksen voor gebruik in de pilot Sluis Weurt

Voor diverse mogelijke scenario's van hoe het klimaat zich ontwikkelt en voor diverse zichtjaren (o.a. 2100Ln, 2100Ld, 2050Mn, 2050Hd, 2100Hn, 2150Mn, 2150Hd, etc met 'n' voor nat, 'd' voor droog, 'L' voor lage uitstoot, 'M' en 'H' voor midden en hoge uitstoot) zijn acht series van 30 jarige dagtijdreeksen beschikbaar van diverse parameters zoals luchttemperatuur, neerslag, wind en verdamping.

Op basis van die klimaatscenario's zijn afvoerscenario's voor de Rijn en Maas afgeleid, zie Paragraaf 3.6.

3.6 Afvoerscenario's Rijn

Deltares heeft de KNMI-2023-scenario's met het wflow model doorvertaald naar afvoerscenario's, dat wil zeggen: berekend hoe de rivierafvoeren veranderen door de mogelijke veranderingen in neerslag, temperatuur en zonnestraling rond 2033, 2050, 2100 en 2150 (Deltares, 2023a). Het resultaat zijn dag-tijdreeksen van gesimuleerde afvoeren in m³/s bij Lobith van alle scenario's (inclusief het huidige klimaat). Er is daarbij vooral gelet op twee dingen: het jaarlijkse 7-daagse minimum¹ (dat zegt iets over periodes van droogte) en het jaarlijkse maximum van de afvoer (belangrijk voor de hoogte van de rivierdijken). Voor meer

¹ Voor het 7-daagse minimum is het lopende gemiddelde over 7 dagen bepaald en daar het minimum van genomen (persoonlijke communicatie Joost Buitink).

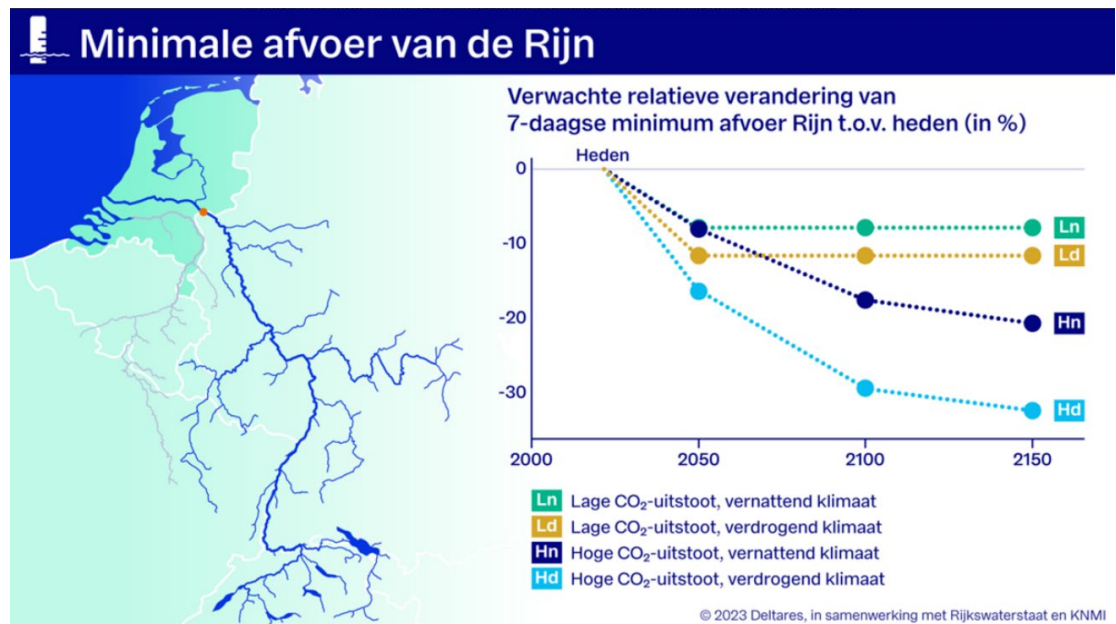
uitleg, zie <https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/wat-betekenen-de-knmi-klimaatscenario-s-voor-de-rivierafvoeren>.

Tabel 3.1: Overzicht van de klimaatscenario's waarvoor afvoerscenario's en afvoerreeksen zijn ontwikkeld (Bron: Tabel 3-1 uit Deltares, 2023a)

Time horizon	Low (SSP1-2.6)	Moderate (SSP2-4.5)	High (SSP5-8.5)
2033 (Paris)	2033L (Paris)		
2050	2100Ln / 2100Ld	2050Mn / 2050Md	2050Hn / 2050Hd
2100		2100Mn / 2100Md	2100Hn / 2100Hd
2150		2150Mn / 2150Md	2150Hn / 2150Hd

Tabel 3.1 geeft de ontwikkelde afvoerscenario's weer. Daarnaast is ook de referentie beschouwd voor het zichtjaar 2005 (1991-2020). Voor lage uitstoot is alleen zichtjaar 2100 beschouwd omdat het klimaat maar weinig verandert vanaf 2050 als de uitstoot beperkt is. Voor de overige uitstootscenario's zijn de jaren 2050, 2100 en 2150 beschouwd en zowel voor een nat als voor een droog scenario. Voor 2033 (naar verwachting het jaar waarin de opwarming 1,5°C bedraagt) is er te weinig verschil tussen nat en droog om het onderscheid te maken. De referentieperiode is 1991-2020. Ook voor dit referentieklimaat zijn acht 30-jarige tijdreeksen beschikbaar.

De belangrijkste boodschap m.b.t. de afvoerscenario's is weergegeven in Figuur 3.5: Lage afvoeren zullen vaker voorkomen.



Figuur 3.5: Infographic met minimale afvoer van de Rijn voor diverse klimaatscenarios. Bron: Deltares, 2023b

Via <https://waterinfo-extra.rws.nl/projecten/@287051/knmi-23-afvoerscenario-rijn-maas> zijn eenvoudig de tijdreeksen van dagelijkse gesimuleerde afvoeren in m³/s bij Lobith van alle scenario's (inclusief het huidige klimaat) te downloaden in Excel format. Voor de Rijn worden twee verschillende reeksen geleverd: een gecorrigeerde reeks en een niet-gecorrigeerde reeks. In Deltares (2023) wordt uitgelegd dat de wflow-modelresultaten voor de Rijn weliswaar goed overeenkomen met de gemeten jaarmaxima maar dat er gedurende het jaar wel wat

verschillen bestaan. Volgens de metingen treedt de minimale afvoer wat later in het jaar op dan het model aangeeft, de waarde zelf verschilt echter niet veel. Twee belangrijke hypothesen voor de afwijking tussen model en meting zijn de onderschatting van de neerslag in de Alpen door het klimaatmodel en de onderschatting van de potentiële verdamping in de winter. De correctie betreft een zogenaamde 'quantile mapping' benadering waarbij de hele tijdreeks wordt gecorrigeerd door correctiefactoren toe te passen. Die correctiefactoren zijn afgeleid door de kansdichtheidfunctie van gesimuleerde historische afvoerseries als het ware op te schuiven naar de kansdichtheidfunctie van gemeten afvoerreksen. De gevonden factoren worden ook toegepast om de afvoerreksen voor toekomstige klimaten te corrigeren. De gecorrigeerde reeks bevat dus de resultaten na het uitvoeren van de afvoer-biascorrectie, en de niet-gecorrigeerde reeks bevat de directe wflow-resultaten. Voor analyses gerelateerd aan waterbeheer en klimaatadaptatie in Nederland wordt aangeraden om de gecorrigeerde reksen te gebruiken, zoals we doen in de huidige studie. Voor gebruikers die interesse hebben in het hele Rijn-stroomgebied wordt aangeraden om de ongecorrigeerde reksen te gebruiken. Voor de Maas bleken de wflow-modelresultaten goed overeen te komen met metingen en daarom is er geen gecorrigeerde reeks gemaakt. Hoewel de Maas net wat anders reageert, zijn de veranderingen in grote lijnen wel hetzelfde tussen de stroomgebieden (<https://www.knmi.nl/over-het-knmi/nieuws/wat-betekenen-de-knmi-klimaatscenario-s-voor-de-rivierafvoeren>).

3.7 Integraal Rivier Management

Vanaf de zomer 2019 werken rijk, provincies, waterschappen en gemeenten samen aan het programma Integraal RivierManagement (IRM) voor een veilige en bevaarbare rivier en een vitaal en aantrekkelijk riviereengebied. De resultaten van deze samenwerking zullen leiden tot een visie op hoe het toekomstbestendig riviereengebied eruit ziet in 2050, o.a. met betrekking tot de rivierbodempligging. Zie ook Deltares 2022a,b.

Voor een range aan afvoeren, variërend van 500 m³/s tot 24.000 m³/s te Lobith, is met het hydraulische D-HYDRO-model van de Rijntakken de waterstand op het hele domein bepaald. Dit is voor drie bodempliggingvarianten gedaan. Deze simulaties zijn onafhankelijk van een klimaatscenario.

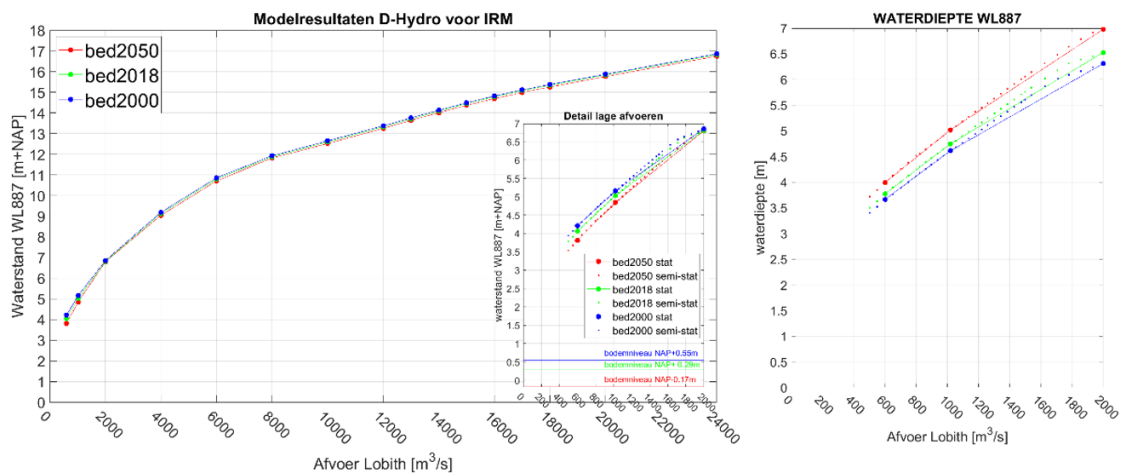
Hiertoe is gebruik gemaakt van het Rijntakkenmodel (dflowfm2d-rijn-beno19_6-v1) dat ook de basis vormt voor het Beoordelings- en OntwerpInstrumentarium (BOI). Aan de modelschematisatie is de rivierverruimingsmaatregel rivierklimaatpark IJsselpoort toegevoegd. Er zijn een drietal varianten voor de bodempligging doorgerekend:

- 1) IRM2000
Ophogen van de rivierbodempligging naar de ligging van rond het jaar 2000.
Wanneer de rivierbodempligging wordt teruggebracht naar de ligging van rond het jaar 2000, dan moet de Boven-Waal met ongeveer 0,3 m worden opgehoogd. De ophoging op de Waal neemt geleidelijk af naar 0 m op de Beneden-Waal.
- 2) IRM2018
Vasthouden van de huidige bodempligging (2018)
- 3) IRM2050
Nulalternatief (2050 referentiesituatie bij ongewijzigd beleid en beheer). Als gevolg van doorgaande erosie op de bovenloop van de Rijntakken is aangenomen dat de bodempligging op de Boven-Waal in 2050 ongeveer 0,5 m lager ligt dan nu. De effecten van het nulalternatief zijn het gevolg van autonome ontwikkelingen, zoals klimaatverandering, rivierbodempligging en sociaal-economische ontwikkelingen, waarbij wordt uitgegaan van ongewijzigd beleid en beheer.

Als randvoorwaarden zijn naast bovenstroomse afvoer ook tientallen zijdelingse instromingen en onttrekkingen (ook wel lateralen) opgelegd. Deze zijn echter niet afhankelijk gemaakt van klimaatverandering of andere ontwikkelingen. De benedenstroomse randvoorwaarden nabij de Biesbosch zijn gebaseerd op een QH-relatie bij gemiddeld getij zoals ontwikkeld met het rmm-j19-model (Van der Wijk, 2022). Conform uitgangspunten BOI is 0,05 m zeespiegelstijging aangehouden. De invloed van de benedenstroomse randvoorwaarden op de waterstand bij Sluis Weurt is naar verwachting heel klein.

Er zijn voor de D-HYDRO simulaties van IRM twaalf dynamische afvoeren boven de 6000 m³/s beschouwd, en vier stationaire, te weten 600, 1020, 2000 en 4000 m³/s. Daarnaast is er een aanvullende reeks met deels overlappende semistationaire berekeningen van 500 m³/s met stappen van 50 m³/s (in 48 uur) tot 3000 m³/s maar zonder lateralen. Voor sommige afvoeren zijn er dus zowel stationaire simulaties met als semistationaire zonder lateralen beschikbaar en daaruit blijkt dat bij lage afvoeren het effect verwaarloosbaar is, zie ook Figuur 3.6 en Appendix A.

Het resultaat van de D-HYDRO berekeningen is voor elke rivierkilometer van het Rijntakkenmodel de relatie tussen de afvoer bij Lobith en de lokale waterstand, zie Figuur 3.6. Let wel dat een hogere waterstand niet per se een grotere waterdiepte betekent omdat de bodemligging daar natuurlijk ook een rol in speelt. Een tabel met de waterstand voor diverse afvoeren is te vinden in Appendix B. De modeluitkomsten van de stationaire en de semi-stationaire berekeningen verschillen maar heel weinig van elkaar.



Figuur 3.6: (links) Q-H relaties voor Sluis Weurt (km WL887) op basis van D-HYDRO berekeningen voor drie bodemvarianten en (rechts) afvoer-waterdiepte relaties. Dikke markers geven de stationaire en non-stationaire berekeningen weer, de stippels de semistationaire berekeningen

De Q-H relaties kunnen gebruikt worden om de diverse afvoerreksen (gebaseerd op KNMI-2023 scenario's) in hun geheel te vertalen naar een tijdreeks van waterstand bij Sluis Weurt.

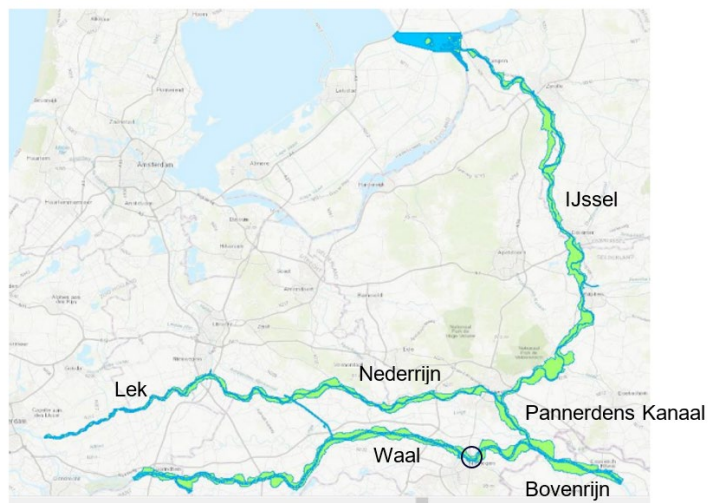
De bodemligging van locatie WL887, in de as van de rivier ter hoogte van Sluis Weurt bedraagt voor de drie bodemscenario's respectievelijk NAP+0,55, NAP+0,29 m, NAP-0,17 m.

De beleidsambitie van IRM is om de huidige bodemerosie af te remmen en te stoppen en misschien op lange termijn zelfs de bodem op te hogen. We richten ons daarom in deze studie vooral op de IRM2018 bodemligging. Zonder ingrijpen is de verwachting dat erosie ook na 2050 door zal blijven gaan. Stoppen vraagt dus om actief ingrijpen en het is nog niet duidelijk

hoe. Na 2050 zijn de bodemveranderingen zeer onzeker (Deltares, 2024b). Meer informatie over IRM is opgenomen in Appendix C.

3.8 Modelschematisatie D-HYDRO Rijntakken

Voor de D-HYDRO berekeningen die in het kader van IRM zijn uitgevoerd is gebruik gemaakt van het Rijntakkenmodel (Deltares, 2022c). De ligging van het gebied is weergegeven in Figuur 3.7. De modelschematisatie sluit zoveel mogelijk aan bij BOI2023. De basisgegevens waar het model op gebaseerd is, zijn baseline-rijn-beno19_6-v1_irm, dat is inclusief de maatregel Rivierklimaatpark IJsselpoort. Nadere informatie over het model is te vinden in Deltares, 2022a.



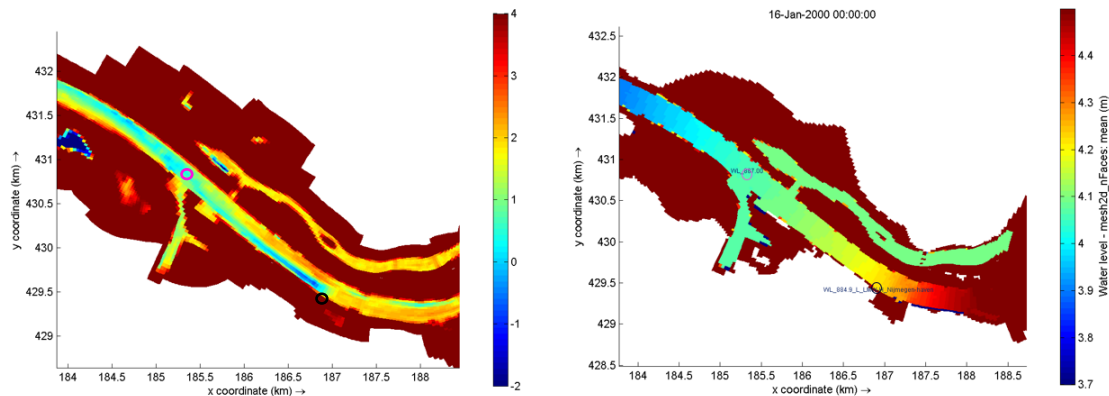
Figuur 3.7: Modelgebied 'zesde generatie' Rijntakkenmodel. De zwarte cirkel geeft het interessegebied aan.

Twee uitvoerlocaties die relevant zijn voor de huidige studie zijn (zie Figuur 3.8):

- WL887: Waalkilometer 887 in de rivieras nabij Sluis Weurt (WL_887.00)
(X=185333.2343; Y=430861.7187)
- Nijmegenhaven: Meetlocatie nabij linkeroever (WL884.9_L_LMW_Nijmegen-haven)
(X=186932.0001; Y=429420.0001)

De afstand tussen beide locaties is ongeveer 2 km. Het verval over die afstand blijkt volgens het model bij lagere waterstanden meestal 0,16 m te zijn. Indien men metingen ter plaatse van Nijmegen Haven vergelijkt met modeluitkomsten ter plaatse van WL887 dan dient men daarvoor te compenseren. Figuur 3.8 geeft aan dat de waterstand dwars op de rivier weinig varieert. Locatie WL887 in de as van de rivier is daarmee ook representatief voor de waterstand voor de sluis van Weurt.

In Appendix D zijn validatiefiguren opgenomen. De algemene modelkwaliteit is goed met lokaal maximale verschillen in de orde van 0,1 m. Het is onbekend hoe goed de uitkomsten precies zijn van de modelberekeningen die we gebruiken in de huidige studie maar waarschijnlijk van vergelijkbare orde.



Figuur 3.8: (links) bodemligging [m+NAP] interessegebied en (rechts) voorbeeld van waterstandsuitvoer [m+NAP] Rijntakkenmodel en de twee relevante uitvoerlocaties

3.9 Nationaal Water Model

Het Nationaal Water Model (NWM) is een verzameling van bestaande aan elkaar gekoppelde watermodellen waarmee basisprognoses worden bepaald. De basisprognoses geven inzicht in de gevolgen van klimaatverandering en sociaal-economische ontwikkelingen op onze waterhuishouding. Zeer recent zijn met het 1D Landelijk SOBEK Model (LSM3) de nieuwe KNMI-2023 scenario's voor lage en hoge uitstoot van broeikasgassen doorgerekend. Er zijn daarbij steeds drie van de acht ensembles van 30 jaar beschouwd. Wij hebben echter geen gebruik gemaakt van de NWM berekeningen omdat ze geen toegevoegde waarde hadden voor de casus Weurt (en bovendien te laat beschikbaar kwamen) voor de huidige studie. Voor toekomstige studies op andere locaties zou het mogelijk handig kunnen zijn om (ook) het NWM te beschouwen.

Opvallende verschillen tussen de NWM aanpak en onze aanpak zijn o.a.:

- Het in NWM gebruikte LSM3 is een SOBEK 1D model terwijl D-HYDRO de waterbeweging 2D berekent.
- LSM3 bevat alle hoofdwaters in Nederland terwijl het Rijntakkenmodel een beperkt gebied dekt.
- NWM beschouwt minder scenario's, minder zichtjaren en slechts één bodemscenario.
- NWM beschouwt drie van de acht ensembles, wij gebruiken alle acht ensembles.
- NWM rekent de volledige tijdreeksen door terwijl wij via een QH-relatie de waterstandsreeks bepalen.
- De bodemschematisatie in NWM's LSM3 is sobek-rijn-j19_5-v1, dus op basis van gegevens van het jaar 2019 (en eerder) en Baseline 5. De D-HYDRO berekeningen gebruiken baseline-rijn-beno19_6-v1_irm, dus weliswaar over hetzelfde jaar maar op basis van Baseline 6 en inclusief (toekomstige) vergunningen en beleidsmaatregelen. Het grootste verschil qua bodemligging is echter de 1D en 2D aanpak.

3.10 Deltaprogramma Zoetwater

Onder dit programma vallen o.a. de strategie Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem (KZH) en het programma Slim Watermanagement. Binnen beide programma's worden verschillende maatregelen uitgewerkt die invloed gaan hebben op de afvoerverdeling in periodes van lage afvoeren bij Lobith. Net als bij IRM zijn er nog geen beslissingen gevallen over voorkeursvarianten. In het programma KZH worden onder andere een nieuwe route naar het IJsselmeer via het Amsterdam-Rijn-Kanaal (ARK), een flexibeler inzet van stuw Driel en een groter debiet bij Hagestein verkend. Waarschijnlijk zorgt elk van deze maatregelen voor een waterstandsval bij Weurt. Het is lastig om concreet te zeggen hoeveel dit gaat doen, maar op basis van de huidige plannen voor een aanvoerroute via het

ARK zou dat bij Weurt centimeters waterstands­daling kunnen opleveren als die maatregel wordt ingezet.

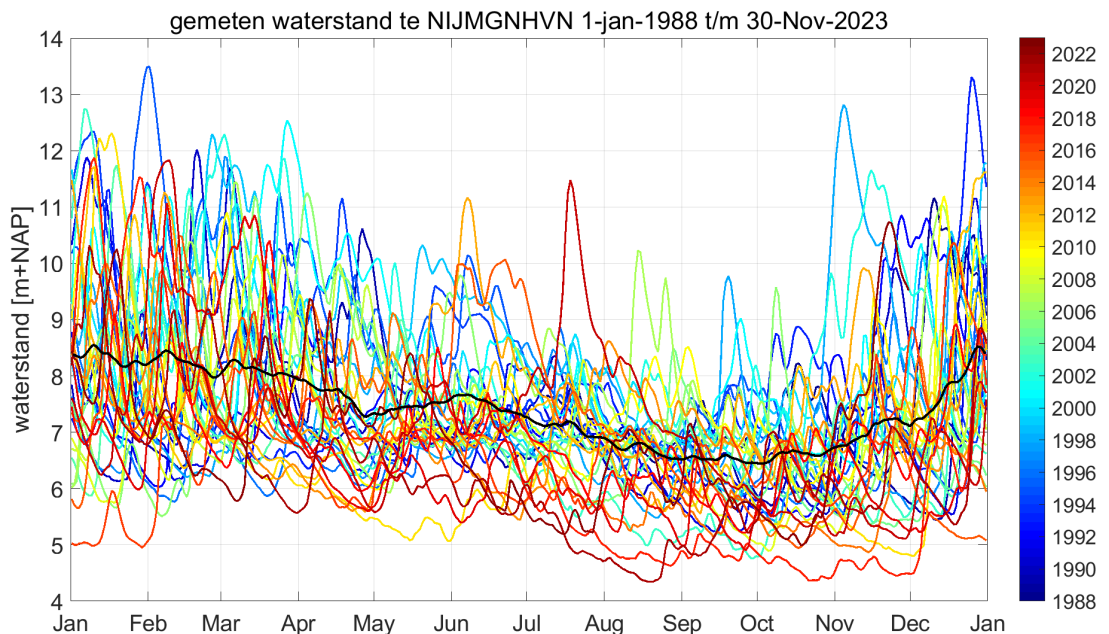
3.11 Beschikbare meetgegevens waterstand en afvoer

3.11.1 Inleiding

Omdat metingen kunnen helpen bij het duiden van modelresultaten en een referentie bieden voor de scenario's, hebben we waterstands- en debietmetingen opgevraagd via waterinfo.rws.nl. In dit hoofdstuk wordt slechts getoond wat beschikbaar is, pas in Hoofdstuk 4 (Paragraaf 4.6) worden de metingen gebruikt om modelresultaten mee te vergelijken.

3.11.2 Waterstand

Er zijn lange reeksen van waterstandsmetingen bij Nijmegen-Haven beschikbaar via waterinfo.rws.nl. Wij hebben vanaf 1980 dagwaarden, vanaf 1981 uurswaarden en halverwege 2010 tot nu zelfs 10-minuutswaarden. Voor de toepassing zijn dagwaarden voldoende. Vanwege grote gaten rond 1987 beschouwen we de daggemiddelden vanaf 1 oktober 1988 tot 1 jan 2024, dat is 35,2 jaar. Figuur 3.9 laat van alle jaren de tijdreeks zien, en in zwart de gemiddelde waterstand over de 35 jaren. Het is opvallend dat de meeste jaren met lage waterstanden roodachtig van kleur zijn, ofwel recent. De twee jaren met laagste waterstanden zijn 2018 en 2022. Dit heeft voor een deel te maken met klimaatverandering maar een ander belangrijker aspect is de bodemdaling die ook is opgetreden tussen 1988 en 2023. Een globale schatting van de bodemdaling gedurende 35 jaar is 0,35-0,70 m (zie Appendix C.1). De gemiddelde lijn is dus niet representatief voor de huidige situatie. Vanwege bodemdaling zijn waterstand en waterdiepte dus niet direct aan elkaar gekoppeld. Een dalende trend in waterstand betekent niet automatisch ook een dalende trend in waterdiepte.

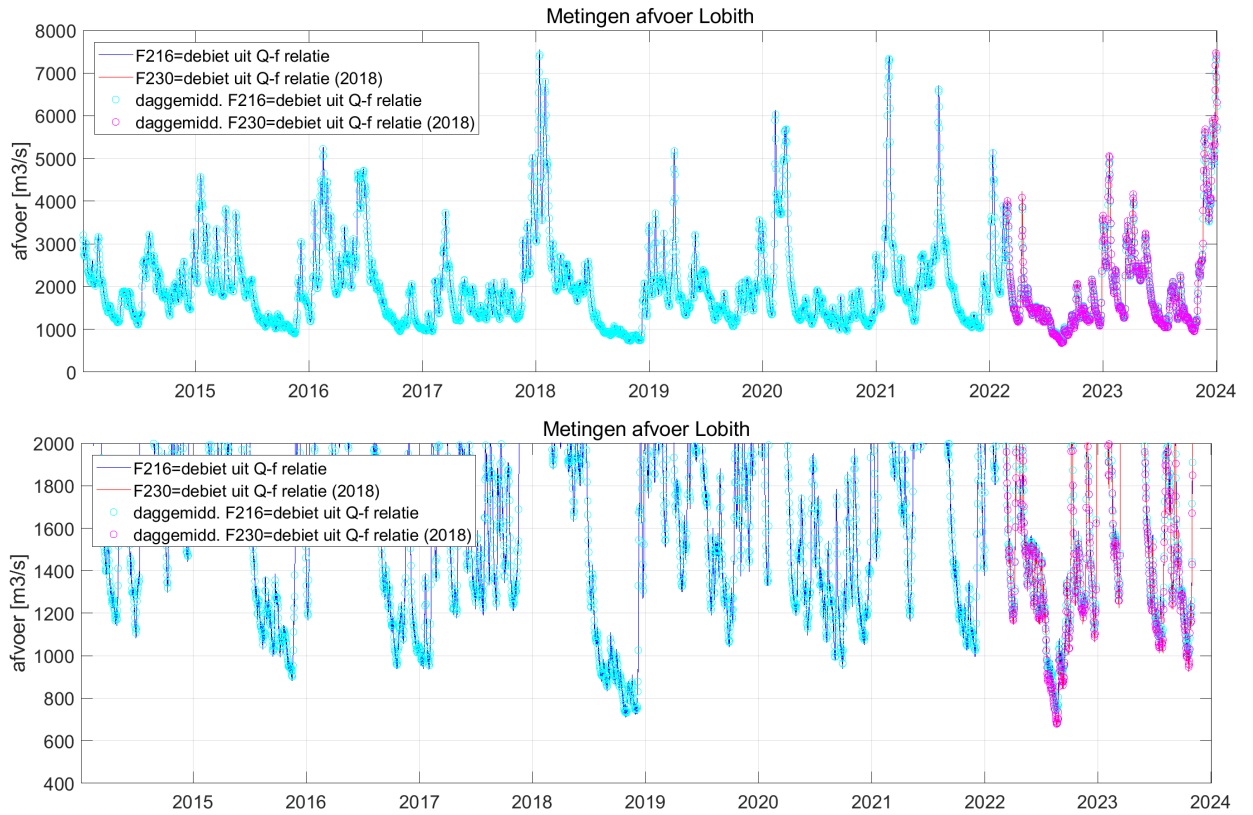


Figuur 3.9: Daggemiddelden van gemeten waterstanden Nijmegen-Haven 1988 t/m 2023; zwarte lijn geeft de gemiddelde waterstand weer

3.11.3 Afvoer

Ook afvoergegevens ter plaatse van Lobith zijn via waterinfo.rws.nl ontvangen, voor de periode 2014 - 2024. Het debiet wordt niet continu gemeten maar via de waterstand bepaald. Er zijn verschillende functies (omrekeningen) daarvoor in gebruik en daarom bevat het ontvangen

databestand voor elk moment (vanaf 21 februari 2022) twee debietwaarden met als omschrijving 'F216, debiet uit Q-f relatie' en F230, debiet uit Q-f relatie (2018)'. Wij gebruiken laatstgenoemde omdat we verwachten dat de relatie uit 2018 – vanwege het droge jaar - voor lage afvoeren geschikter is. Onderlinge verschillen zijn orde 50-100 m³/s, waarbij de relatie uit 2018 de hogere debieten geeft. Uit de 10-minuuts reeksen hebben we daggemiddelden afgeleid. De laagste afvoer (679 m³/s) trad op, op 21 augustus 2022.



Figuur 3.10: Debietmetingen (afgeleid uit Q-f relaties) Lobith 2014 – 2024. Boven het gehele bereik, onder ingezoomd op de lage afvoeren

4 Waterstandsstatistieken voor Weurt voor diverse klimaat- en bodemscenario's

4.1 Methode

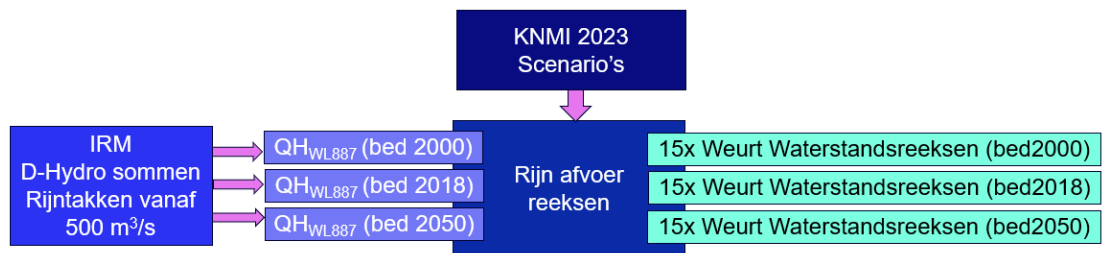
De afvoerreeksen die voor diverse klimaatscenario's en zichtjaren beschikbaar zijn (Paragraaf 3.6), kunnen met de drie bodemscenario-afhankelijke Q-H relaties verkregen uit de IRM studies (Paragraaf 3.7), vertaald worden naar waterstanden op de Waal ter hoogte van Sluis Weurt. Hierbij wordt geïnterpoleerd en enkele keren geëxtrapoleerd voor afvoeren waar geen D-HYDRO-berekeningen voor beschikbaar waren. Klimaatscenario 2100Hd bevat de laagste afvoer bij Lobith, namelijk 405 m³/s. De laagste 25 waarden (verspreid over alle scenario's en zichtjaren) liggen allemaal onder 500 m³/s.

Dit levert 8x30 jaar aan dagwaarden van waterstanden voor veertien scenario's plus de huidige situatie (lage uitstoot nat 2100, laag droog 2100, midden nat 2050, midden droog 2050, hoog nat 2050, hoog droog 2050, midden nat 2100, midden droog 2100, hoog nat 2100, hoog droog 2100, midden nat 2150, midden droog 2150, hoog nat 2150, hoog droog 2150).

Bovendien bepalen we die waterstandsreeksen niet alleen met huidige bodem (2018) maar ook met twee bodemvarianten zoals gedefinieerd bij het IRM project (verdere erosie tot 2050 (=‘nulalternatief’) en ophoging naar de bodem van 2000).

Het resultaat is voor elk van de 45 scenario's (3 bodem x 15 klimaat) een lange waterstandsreeks bij Sluis Weurt (8x30 jaar aan dagwaarden). Met die waterstandsreeksen is aan te geven wat het effect is van de scenario's op de waterstand. Bovendien is bijvoorbeeld te bepalen wat de kansen zijn dat waterstanden worden onderschreden en wat de aaneengesloten duur van onderschrijdingen is.

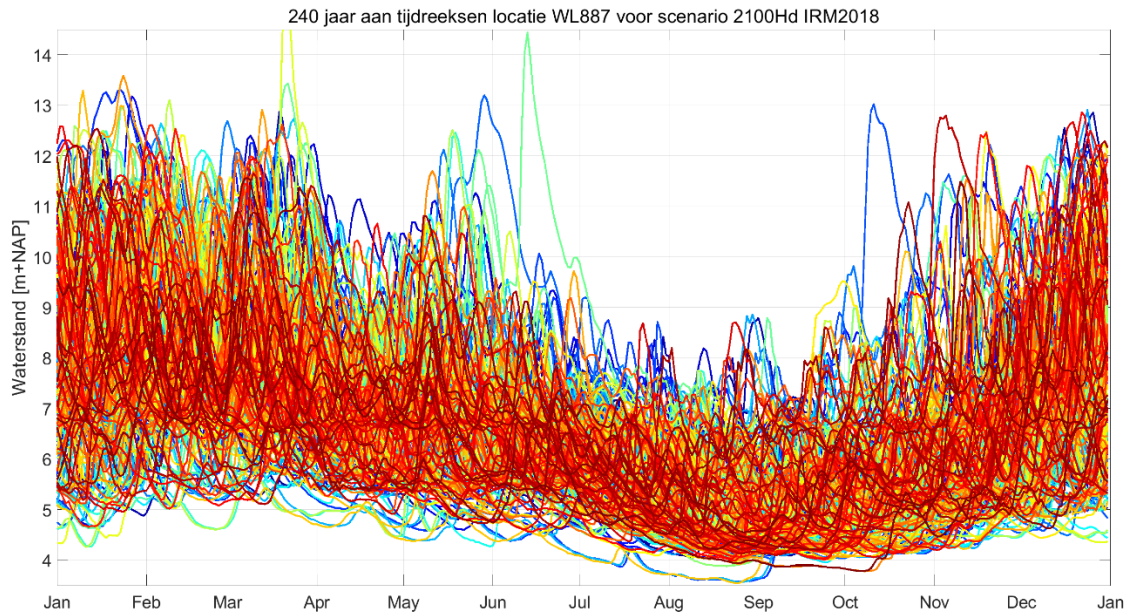
Op basis van al die jaren en scenario's selecteren we representatieve jaarreeksen van de waterstand (Hoofdstuk 5).



Figuur 4.1: Schematische weergave van het plan van aanpak om uit de KNMI 2023 scenario's, de Rijn afvoerreeksen en de D-HYDRO resultaten de waterstanden bij Sluis Weurt te verkrijgen voor 15 klimaatscenario's (combinatie van zichtjaar en scenario), per bodemscenario

4.2 Waterstandsreeksen

Figuur 4.2 toont als concreet voorbeeld voor één specifiek scenario (combinatie van klimaatscenario inclusief zichtjaar en bodemscenario) 240 fictieve jaarreeksen van waterstanden bij Sluis Weurt. De variatie - van circa NAP+3,5 tot NAP+14,5 - is groot. Seizoensvariatie is meer zichtbaar in de hoge dan in de lage waterstanden. Lage waterstanden (<NAP+5 m) blijken in elke maand op te kunnen treden, de hoogste waterstanden komen niet in de zomermaanden voor.



Figuur 4.2: 240 jaar aan fictieve waterstandstijdreeksen op de Waal ter plaatse van Sluis Weurt voor het KNMI2023 scenario '2100 Hd' en bodemligging IRM2018, op basis van de QH-relatie die afgeleid is van D-HYDRO berekeningen (kleuren hebben geen betekenis behalve dat elke lijn een eigen kleur heeft)

Dergelijke figuren zijn voor alle scenario's beschikbaar, zie Appendix B voor nog enkele voorbeelden.

4.3 Onderschrijdingspercentages waterstanden

Nu voor elk scenario 240 fictieve jaarreeksen aan dagwaterstanden beschikbaar zijn voor locatie WL887 op de Waal nabij Sluis Weurt, is daaruit af te leiden hoe vaak bepaalde waterstanden worden onder- of overschreden. Ook is aan te geven hoe lang de onderschrijdingen gemiddeld duren, wat de langste duur van onderschrijding op basis van die 240 jaren is en wat het gemiddelde is van de maximale duren van elk jaar ('gemiddeld jaarmax duur', zie onderstaande tabel). Als voorbeeld toont Tabel 4.1 die resultaten voor één scenario. Voor andere scenario's zijn dergelijke tabellen opgenomen in Appendix A.

Tabel 4.1: Statistiek van waterstandsonderschrijdingen locatie WL887 bij scenario '2100Hd met bed 2018'

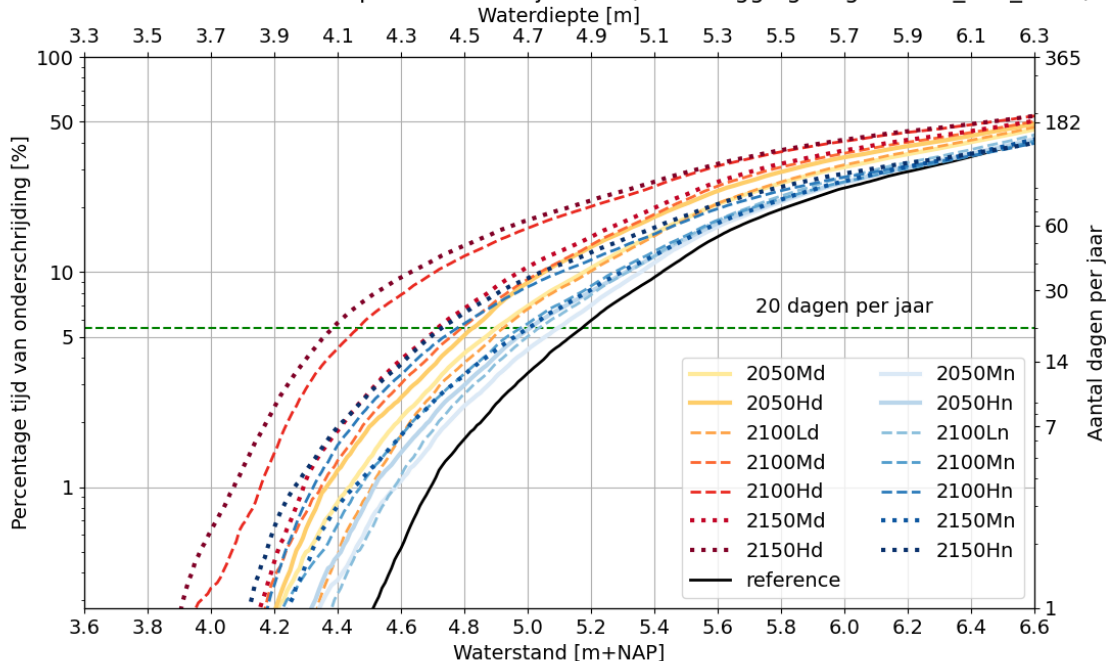
water-stand [NAP+m]	totale tijd in 240 jaar [dag]	perc van de tijd [%]	aantal keer in 240 jaar [-]	aantal keer per jr [-]	gemiddel-de duur [dag]	gemiddeld jaarmax duur [dag]	max duur [dag]
4,0	304	0,4	13	0,05	23	1.2	55
4,5	5576	6,4	298	1,2	19	17	87
5,0	14204	16,2	623	2,6	23	40	133
5,5	24888	28,4	937	3,9	27	63	192
6,0	35728	40,8	1150	4,8	31	85	257

Het percentage van de tijd dat waterstanden op de Waal bij Sluis Weurt worden overschreden is grafisch weergegeven in

Figuur 4.3. In deze figuur zijn alle beschouwde klimaatscenario's (met één bodemliggingsscenario namelijk 2018) opgenomen zodat ze onderling goed te vergelijken zijn. De rechter y-as (aantal dagen per jaar) is direct gekoppeld aan de linker y-as (percentage van de tijd). De boven-x-as geeft de waterdiepte aan, die direct gekoppeld is aan de onderste x-as (de waterstand) via de bodemligging van locatie WL887 (NAP+0,29 m bij scenario bed 2018). De horizontale groen stippellijn ligt op 20 dagen per jaar (~5%) om de waterstand te kunnen zien die 20 dagen per jaar zou worden overschreden, ofwel het OLA criterium, zie Paragraaf 3.4. De volgende paragraaf gaat inhoudelijk in op dit figuur.

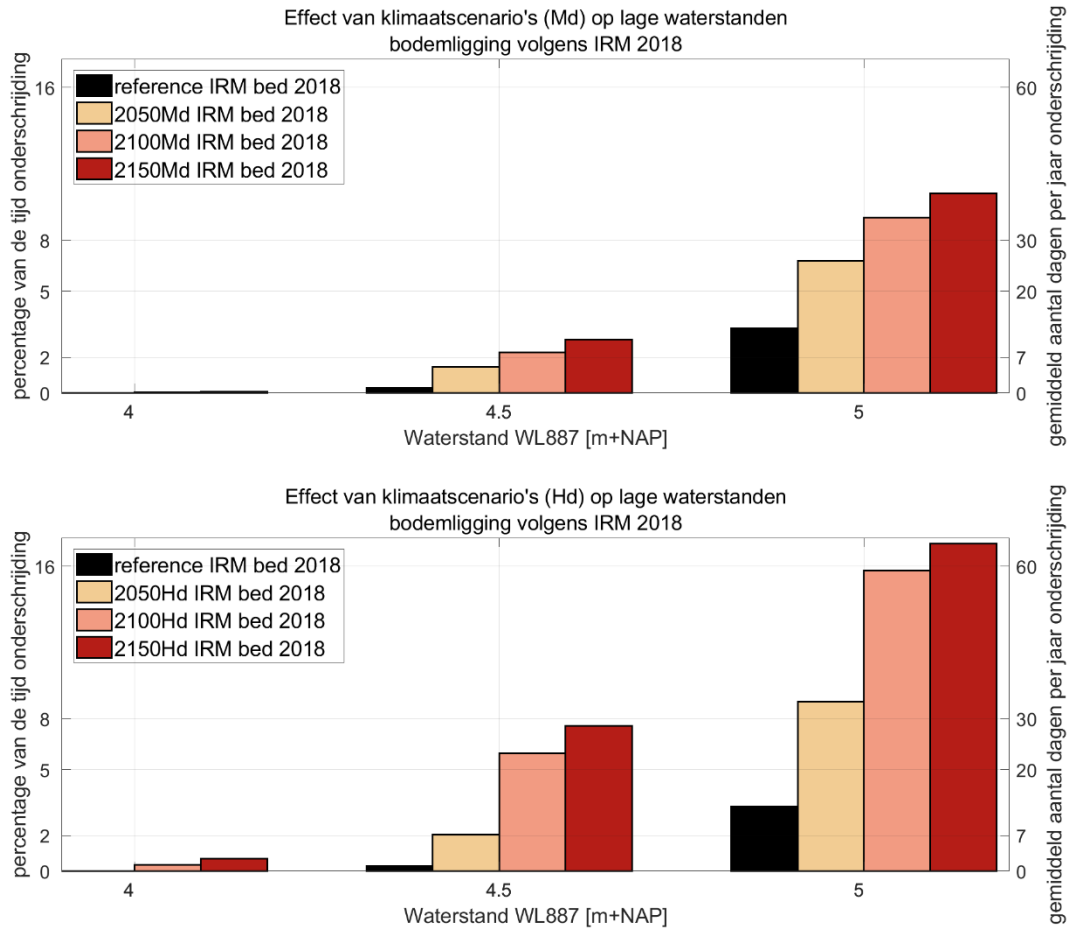
Ter informatie is - in lijn met Figuur 4.3 - in Appendix B een soortgelijk figuur opgenomen met de afvoeren bij Lobith (Figuur B.6).

Locatie rivieras WL887.00 op de Waal nabij Weurt (bodempligging volgens IRM_bed_2018)



Figuur 4.3: Onderschrijdingspercentages waterstanden voor diverse klimaatscenario's bij bodempligging 2018

Een groot deel van de informatie uit
 Figuur 4.3 – alleen de lage waterstanden - is voor de Md en Hd scenario's in de vorm van een staafdiagram weergegeven in Figuur 4.4. Per plot gaat het om drie groepen staven, te weten voor NAP+4,0 m, NAP+4,5 m en NAP+5,0 m.



Figuur 4.4: Onderschrijdingspercentages van alleen NAP+4,0 +4,5 en +5,0 m voor Md (boven) en Hd (onder) klimaatscenario's voor diverse zichtjaren bij bodemligging 2018

4.4 Invloed van klimaatscenario, bodemligging en zichtjaar op waterstand

4.4.1 Invloed van klimaatscenario op waterstanden

Het in de vorige paragraaf geïntroduceerde

Figuur 4.3 toont ten opzichte van de referentie situatie een duidelijk toename van het voorkomen van lage waterstanden voor alle klimaatscenario's, zelfs voor de natte. Waar bij de referentieberekening ('nu') een waterstand van NAP+5,13 m 20 dagen per jaar wordt onderschreden, zou dat niveau bij sterke klimaatverandering in de verre toekomst (2150Hd) wel bijna een meter lager komen te liggen (NAP+4,36 m). Omgekeerd is ook te zien dat een waterstand die nu 20 dagen per jaar wordt onderschreden, in de verre toekomst mogelijk meer dan 75 dagen per jaar wordt onderschreden.

In onderstaande tabel is voor drie verschillende zichtjaren - bij bodemligging IRM2018 - het effect van de klimaatscenario's op de waterstand die 20 dagen per jaar wordt onderschreden weergegeven. Voor zichtjaar 2100 zou die waterstand volgens de droge scenario's bij lage uitstoot NAP+4,89 m zijn, bij midden uitstoot NAP+4,76 m en bij hoge uitstoot NAP+4,44 m. Het verschil tussen hoog en midden is groter dan het verschil tussen midden en laag. Het scenario met lage uitstoot is alleen voor 2100 beschikbaar. Een vergelijkbare tabel maar dan voor bodemscenario 2050 is te vinden in bijlage A als Tabel A.6.

Tabel 4.2: Effect van klimaatscenario op de waterstand die 20 dagen per jaar wordt onderschreden bij locatie WL887, voor verschillende zichtjaren bij bodemscenario 2018

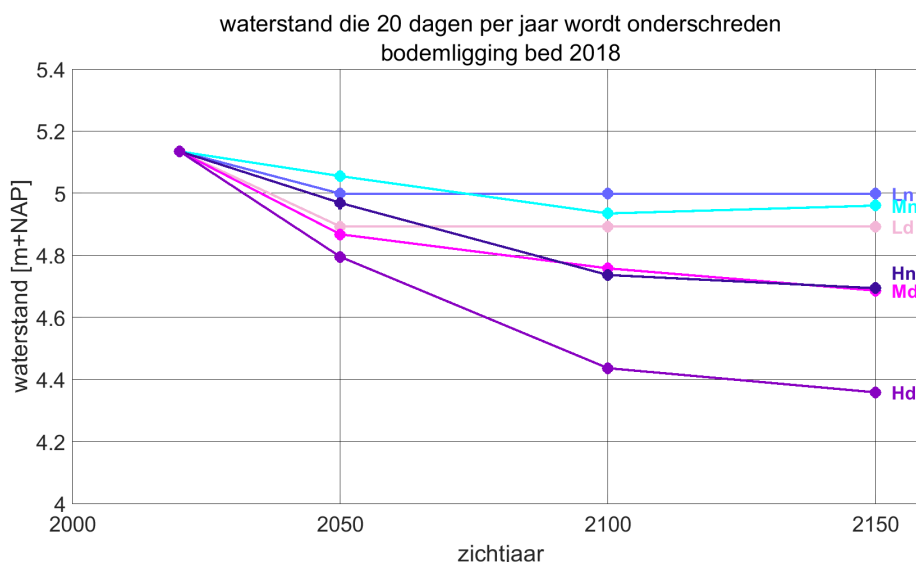
klimaat	zichtjaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	
				Nat scenario	Droog scenario
Midden	2050	2018	20 dag/jr \approx 5%	5,06	4,87
Hoog	2050	2018	20 dag/jr \approx 5%	4,97	4,80

klimaat	zichtjaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	
				Nat scenario	Droog scenario
Laag	2100	2018	20 dag/jr \approx 5%	5,00	4,89
Midden	2100	2018	20 dag/jr \approx 5%	4,93	4,76
Hoog	2100	2018	20 dag/jr \approx 5%	4,74	4,44

klimaat	zichtjaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	
				Nat scenario	Droog scenario
Midden	2150	2018	20 dag/jr \approx 5%	4,96	4,69
Hoog	2150	2018	20 dag/jr \approx 5%	4,69	4,36

4.4.2 Invloed van zichtjaar op waterstanden

Bij de droge varianten van het midden scenario en hoge scenario zien we weliswaar een afvlakking in de trend dat de zomers droger worden en de waterstanden dalen, maar de trend stopt niet, zie Figuur 4.5. De afname van de waterstand die 20 dagen per jaar wordt onderschreden is tussen 2050 en 2100 naar verwachting dus groter dan tussen 2100 en 2150. Van de natte scenario's valt op dat bij de midden scenario's (Mn) de afvlakking zelfs omhoog naar een lichte stijging van de waterstand. Bij het hoge scenario (Hn) is dat niet het geval.



Figuur 4.5: Effect van zichtjaar op de waterstand die 20 dagen per jaar wordt onderschreden bij locatie WL887, voor verschillende klimaatscenario's (Ln, Ld, Mn, Md, Hn, Hd) bij bodemscenario 2018

Als het scenario van lage uitstoot gevolgd zou worden dan komt de klimaatverandering na 2050 naar verwachting tot stilstand. In dat geval zal het klimaat van 2050, 2100 en 2150

hetzelfde zijn en maakt het zichtjaar dus niet uit, behalve dat het anders is dan de referentiesituatie. Zie ook de licht gekleurde lijnen in Figuur 4.5.

Ter verduidelijking zijn de waterstanden ook opgenomen in Tabel 4.3. Een vergelijkbare figuur en tabel bij een bodemscenario volgens 2050 is te vinden in de bijlage, Figuur B.7 en Tabel A.7.

Tabel 4.3: Effect van zichtjaar op de waterstand die 20 dagen per jaar wordt onderschreden bij locatie WL887, voor verschillende klimaatscenario's bij bodemscenario 2018

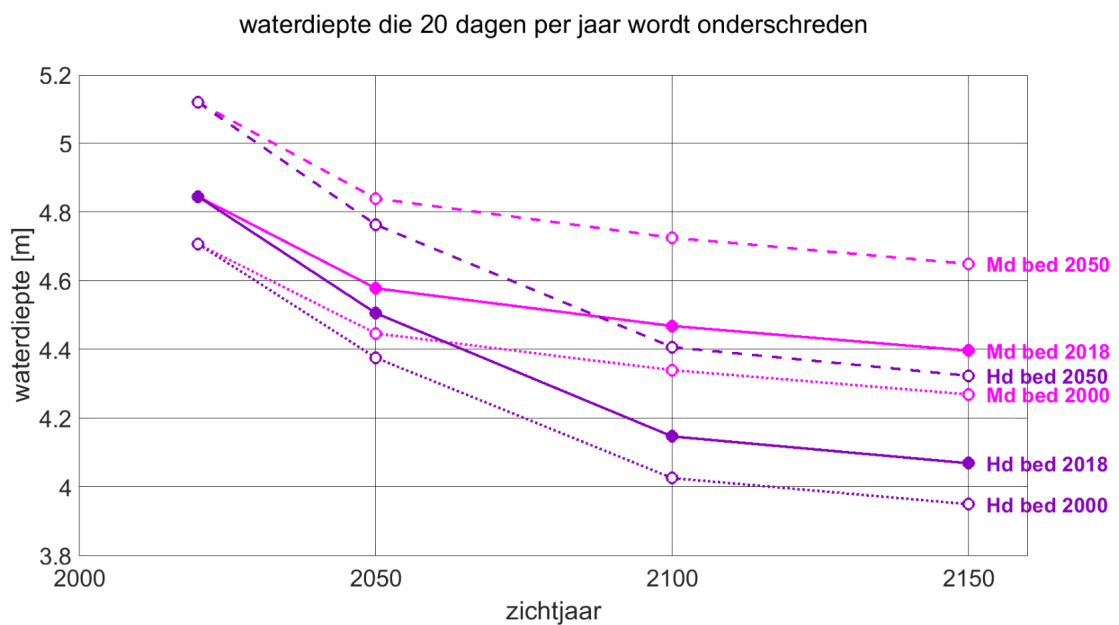
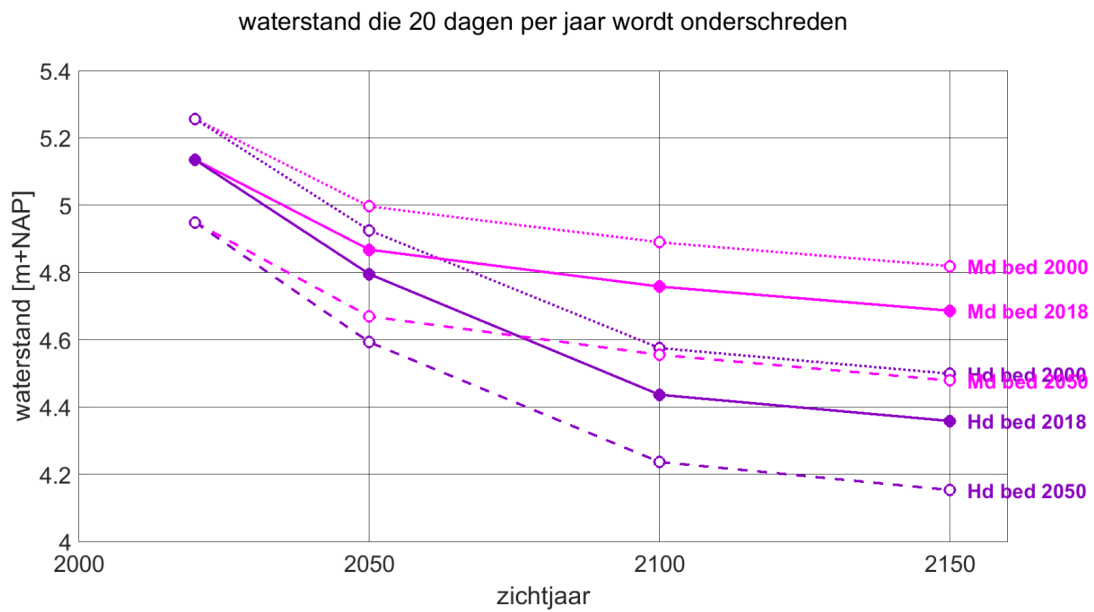
klimaat	zichtjaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	
				Nat scenario	Droog scenario
Midden	2050	2018	20 dag/jr ≈ 5%	5,06	4,87
Midden	2100	2018	20 dag/jr ≈ 5%	4,93	4,76
Midden	2150	2018	20 dag/jr ≈ 5%	4,96	4,69

klimaat	zichtjaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	
				Nat scenario	Droog scenario
Hoog	2050	2018	20 dag/jr ≈ 5%	4,97	4,80
Hoog	2100	2018	20 dag/jr ≈ 5%	4,74	4,44
Hoog	2150	2018	20 dag/jr ≈ 5%	4,69	4,36

4.4.3 Invloed van bodemligging op waterstanden en waterdiepte

Zoals uitgelegd in Paragraaf 3.7 zijn er drie scenario's voor de toekomstige bodemligging op de Waal beschouwd. Figuur 4.6a geeft het effect van de bodemligging op de waterstand voor diverse zichtjaren en klimaatscenario's. Als de bodem verder erodeert (prognose 2050), dan komt de waterstand ook lager uit. Echter, omdat een lagere Waalbodem ook meer water aantrekt ten koste van de IJssel, is de daling van de waterstand minder dan de daling van de bodem.

Een lage waterstand betekent niet noodzakelijkerwijs ook een kleinere waterdiepte omdat de bodemligging en -vorm daarin ook een rol speelt. Daarom toont Figuur 4.6b het effect van de bodemliggingscenario's op de waterdiepte in de rivieras bij WL887 op de Waal. De diepte is bepaald door het verschil te nemen van de berekende waterstand en de lokale bodemligging zoals die gedefinieerd is volgens de IRM bodemscenario's, beide in de rivieras van de Waal bij WL887. Men dient zich te realiseren dat dit niet per se gelijk is aan de lokale waterdiepte nabij de sluis omdat die sterk afhangt van de lokale bodemligging en -dynamiek. De waterdiepte geldt daarom slechts als benadering. Voor de overzichtelijkheid beperken we ons tot de droge varianten van het midden en hoge klimaatscenario. We zien dat de bed2050 scenario's weliswaar de lagere waterstanden maar grotere waterdiepte geven.



Figuur 4.6: het effect van bodemligging op de waterstand (boven) en waterdiepte (onder) op de Waal (WL887.0) die 20 dagen per jaar wordt onderschreden voor diverse zichtjaren en klimaatscenario's (Md, Hd)

Ter verduidelijking zijn de waterstanden en waterdieptes ook opgenomen in Tabel 4.4.

Tabel 4.4: Effect van bodemligging op de diepte en waterstand die 20 dagen per jaar wordt onderschreden bij locatie WL887 (rivieras), voor verschillende droge klimaatscenario's en zichtjaar 2100. NB: de gepresenteerde waterdiepte is bij benadering en geldt voor de rivieras, niet per se ter plaatse van Sluis Weurt

klimaat	Zicht jaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	Waterdiepte [m]
Midden, droog	2100	2000	20 dag/jr \approx 5%	4,89	4,34
Midden, droog	2100	2018	20 dag/jr \approx 5%	4,76	4,47
Midden, droog	2100	2050	20 dag/jr \approx 5%	4,58	4,75

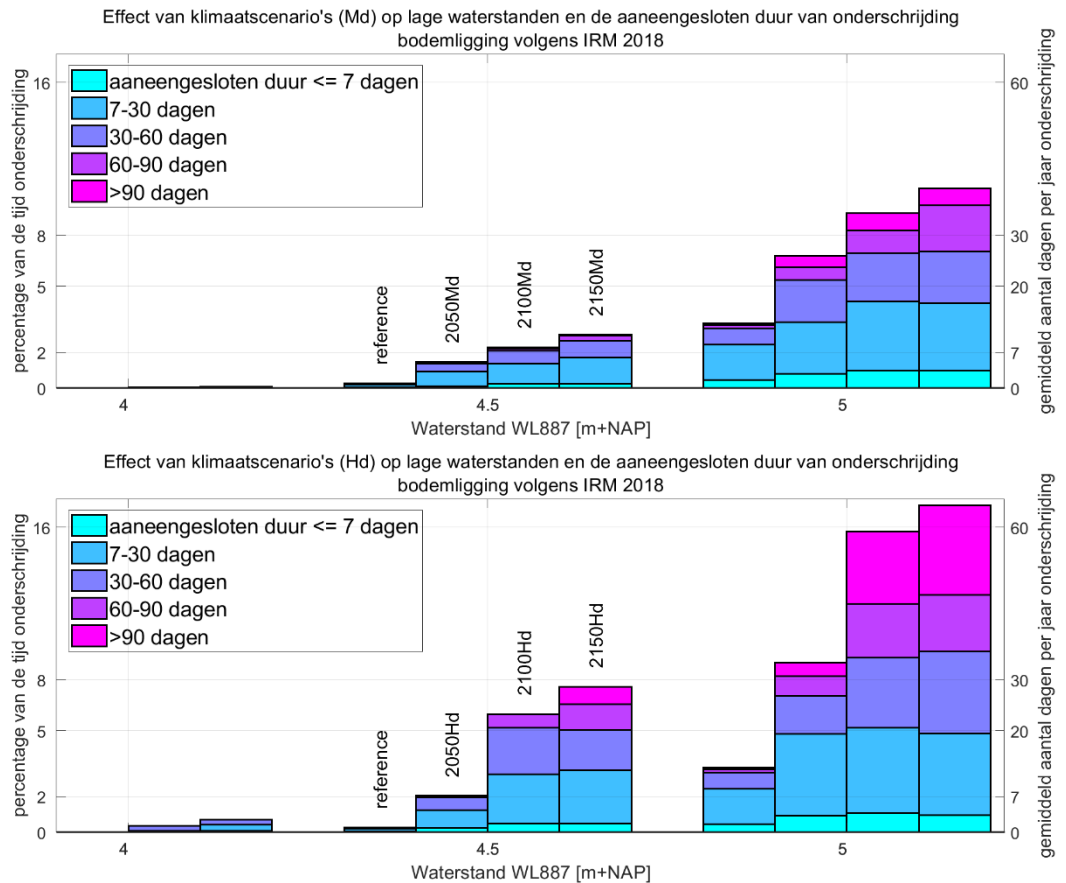
Klimaat	Zicht jaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	Waterdiepte [m]
Hoog, droog	2100	2000	20 dag/jr \approx 5%	4,58	4,03
Hoog, droog	2100	2018	20 dag/jr \approx 5%	4,44	4,15
Hoog, droog	2100	2050	20 dag/jr \approx 5%	4,24	4,41

4.5 Aaneengesloten duur van lage waterstanden

De term 'persistentie' slaat op het aanhouden van een lage waterstand gedurende een aaneengesloten periode. Als een extreem lage waterstand af en toe enkele dagen in het jaar voorkomt is dat minder erg dan één keer enkele weken aaneengesloten.

Op basis van de 240 jaar aan waterstandsreeksen is niet alleen te bepalen hoe vaak, maar ook hoe lang bepaalde waterstanden worden onderschreden. Figuur 4.7 geeft een idee welke dueren zoal voorkomen. De verdeling van de kleuren is niet af te lezen maar geeft procentueel aan in welke 'duurklasse' de events vallen.

Zo zien we bijvoorbeeld dat een waterstand van NAP+4,5 m bij het midden scenario niet langer dan 90 dagen onderschreden wordt, maar bij een scenario met hoge uitstoot kan dat wel het geval zijn voor zichtjaar 2150. Het felroze vak in de meest rechter staaf van het onderste paneel geeft aan dat van de totale tijd dat NAP+5,0 m wordt onderschreden bij het 2150Hd scenario, ongeveer 25% optreedt tijdens events die langer dan 90 dagen duren. De meest rechterstaaf van het bovenste paneel vertelt dat de totale tijd dat een waterstand van NAP+5,0 m minder dan een week wordt onderschreden ongeveer net zo lang is als de tijd dat die waterstand meer dan 90 dagen wordt onderschreden. Het aantal keren dat die lage waterstand zo lang aanhoudt is dus veel minder dan het aantal keer dat het minder dan een week duurt.

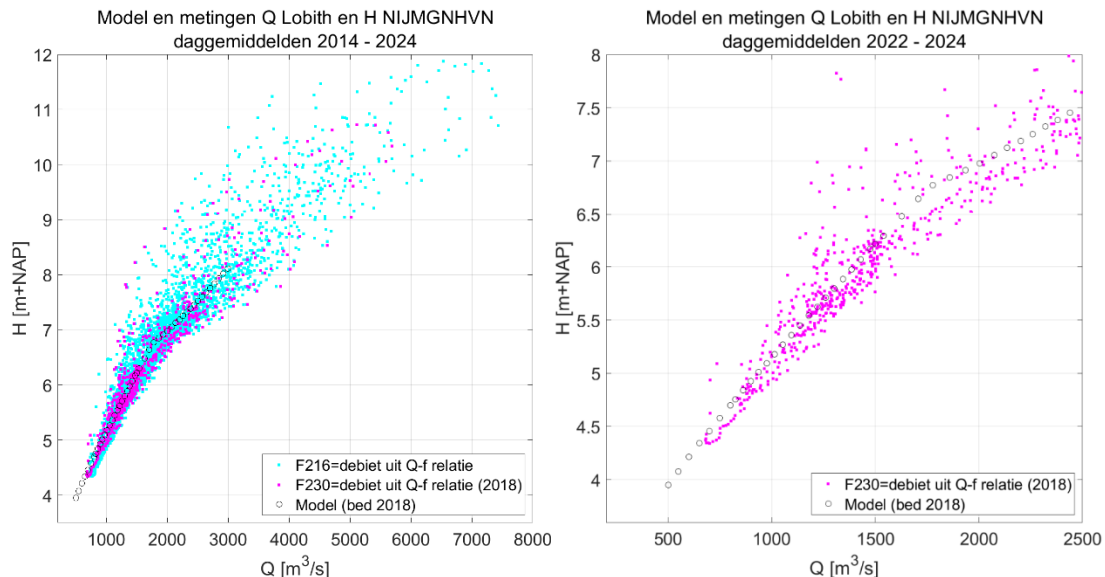


Figuur 4.7: Verdeling van persistentie van overschrijdingen van alleen NAP+4,0 m, NAP+4,5 m en NAP+5,0 m voor Md (boven) en Hd (onder) klimaatscenario's voor diverse zichtjaren bij bodemligging 2018

4.6 Vergelijking met metingen

De Q-H relatie die is afgeleid op basis van IRM's D-HYDRO berekeningen (zie Paragraaf 3.7) beschrijft een rechte lijn met een knikpunt nabij 1800 m³/s (dan is het zomerbed volledig gevuld). In werkelijkheid is de relatie tussen afvoer en waterstand non-lineair en minder eenduidig en levert een plot van beide een wolk aan datapunten. Eén van de redenen hiervoor is het hysteresis effect (bij toenemende waterstand is de afvoer groter dan bij diezelfde afnemende waterstand). Ook bodemverandering (inclusief toegekende vergunningen en planmaatregelen) speelt een rol, weerseffecten en mogelijk meeton nauwkeurigheden.

Figuur 4.8 toont zowel de metingen als de modeluitkomsten. Bij de lage afvoer is de spreiding minder maar dat komt vooral omdat een heel lage afvoer zelden voorkomt. De ligging van de modeluitkomsten ten opzichte van de metingen geeft vertrouwen in de methodiek.



Figuur 4.8: De waterstand bij Nijmegen Haven als functie van het debiet bij Lobith, zowel op basis van metingen als van semistationaire modeluitkomsten bij een bodemligging volgens bed 2018. Rechter figuur is een uitsnede van links, met alleen de roze punten (2022 - 2024; debiet o.b.v. Q-f relatie uit 2018)

De waterstandsmetingen helpen ook mee om de waterstanden die bij de klimaatscenario's horen te kunnen duiden. Appendix E bevat figuren met mogelijke toekomstige waterstandstijdreeksen voor diverse scenario's en zichtjaren met daarin ook de twee droge jaren 2018 en 2022. Hun ligging in het geheel ziet er realistisch uit.

4.7 Onzekerheden

De gevolgde methodiek maakt het mogelijk om op een reproduceerbare manier waterstandsreeksen op te stellen voor de Waal ter hoogte van Sluis Weurt, behorende bij diverse combinaties van bodemliggingsscenario's en klimaatscenario's. De uitkomsten zijn echter niet 100% zeker.

Ten eerste zijn de klimaatscenario's zelf onzeker. Hoewel geavanceerd bepaald, zijn het 'slechts' mogelijke toekomstbeelden.

De drie IRM-bodemliggingsscenario's die in de D-HYDRO berekeningen zijn gebruikt zijn gebaseerd op uitgebreide studies, maar niet vrij van onzekerheden (zie ook Appendix C.2). Lokale veranderingen van de bodem kunnen lokaal ook grote waterstandseffecten veroorzaken. Zo is voor Weurt de ontwikkeling van de vaste laag bij Nijmegen van groot belang.

De modelberekeningen met D-HYDRO geven over het algemeen goede resultaten met een onzekerheid in de orde van 0,1 m (zie Appendix D). De Q-H relatie die is afgeleid van de D-HYDRO berekeningen bevat niet de spreiding die in metingen wel zichtbaar is en geeft dus niet per se de juiste waterstand bij een gegeven afvoer. Afwijkingen in de orde van 1-2 decimeters kunnen optreden.

Wanneer zeer uitzonderlijke condities zouden optreden, kunnen zeer uitzonderlijke maatregelen genomen worden, bijvoorbeeld als de drinkwatervoorziening in het gedrang komt. De gebruikte Q-H relatie is dan mogelijk niet meer geldig.

Voorts is nog de afvoerverdeling over de Rijntakken onzeker. De gewenste afvoerverdeling tijdens lage afvoeren wordt nu beleidsmatig onderzocht in een aantal projecten vanuit de verschillende perspectieven. Daarbij gaat het om Klimaatbestendige Zoetwatervoorziening Hoofdwatersysteem, Deltaprogramma IJsselmeergebied, Deltaprogramma Zoet Water en Integraal Riviermanagement. Teruggaan naar de afvoerverdeling zoals opgenomen in de Tweede Nota op de Waterhuishouding is daarbij nadrukkelijk een optie. Een besluit hierover zal in samenhang genomen moeten worden. Een voorstel daartoe komt op zijn vroegst in het derde kwartaal van 2025 tot stand.

4.8 Reproduceerbaarheid

Voor het projectteam zijn de volgende bestanden beschikbaar:

- Waterstanden_WL_887.00_compleet.xlsx
Excel bestand met dagwaterstanden ter plaatse van WL887 bestaande uit 87.658 regels (8 ensembles van 30 jaar) en 45 kolommen (combinaties van 3 bodemliggingsscenario's en 15 combinaties van zichtjaar en klimaatscenario), afgeleid door afvoerscenario's via Q-H relatie te vertalen naar waterstanden.
- onderschrijdingsfrequenties_Waterstanden_WL_887.00_compleet.xlsx
Excelbestand met 45 tabbladen (combinaties van 3 bodemliggingsscenario's en 15 combinaties van zichtjaar en klimaatscenario), met voor waterstanden van NAP+3,0m t/m NAP+6,5 m in stappen van 0,5 m de duur van onderschrijding, het percentage van de tijd van onderschrijding, het aantal keren, het gemiddeld aantal keren per jaar, de minimale, gemiddelde en maximale duur van onderschrijding, het gemiddelde van de maximale duren per jaar, de duur van elk onderschrijdingsevent en het gemiddeld aantal keer per jaar dat dat specifieke onderschrijdingsevent minimaal zolang duurt.
- onderschrijdingsfrequenties_percentimeter_Waterstanden_WL_887.00_compleet.xlsx
Als hierboven, maar dan voor waterstanden van NAP+3,0 m t/m NAP+6,99 m in stappen van 0,01 m.
- Afvoerbestanden voor diverse scenario's zijn beschikbaar via <https://waterinfo-extra.rws.nl/projecten/@287051/knmi-23-afvoerscenario-rijn-maas/> (KNMI'23 afvoerscenario's Rijn en Maas - Waterinfo Extra (rws.nl)) in excel format.

5 Representatieve waterstandsreeks voor Sluis Weurt

5.1 Inleiding

In de voorgaande hoofdstukken is beschreven hoe voor 45 scenario's de lange waterstandsreeksen op de Waal nabij Sluis Weurt bepaald zijn maar daarmee is nog niet aangegeven welk scenario of welke waterstand gebruikt moet worden bij het ontwerp van het bodemniveau van de sluis. Op die vraag zal dit rapport geen antwoord op geven. Dat vergt beleidsbeslissingen die nog niet genomen zijn.

Zelfs als een beslissing genomen zou zijn over het toe te passen zichtjaar, klimaat- en bodemliggingsscenario, dan nog is niet gezegd welke waterstand te gebruiken. Kiest men de laagste waterstand die bij dat scenario hoort, of een waterstand met een bepaalde kans van voorkomen, en ook de duur van een lage waterstand zou de keuze kunnen beïnvloeden. Uiteindelijk zal een kosten/baten analyse moeten helpen om een gerichte keuze te maken voor de te hanteren waterstand. Daarvoor is ook een analyse van wachttijden nodig met SIVAK: 'Simulatiepakket voor de Verkeersafwikkeling bij Kunstwerken'.

Als invoer heeft SIVAK een representatieve waterstandsreeks nodig. In dit hoofdstuk doen wij een voorstel om uit 240 jaren een representatief jaar te kiezen.

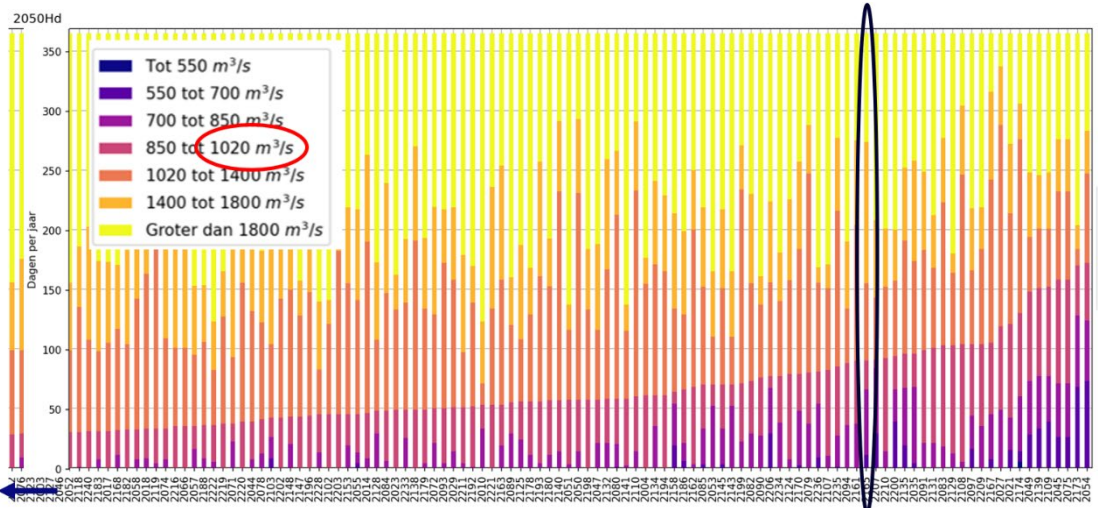
Afhankelijk van de uitkomsten van de SIVAK berekeningen zou men een ander representatief jaar kunnen kiezen door andere parameters te beschouwen. Dat zal een iteratief proces zijn.

5.2 Voorstel voor methode representatief jaar

Voor elk scenario, dus voor elk van de 45 verzamelingen van 240 synthetische jaren is een representatief jaar te kiezen volgens de hieronder beschreven methode.

De 240 jaren zetten we in oplopende volgorde naar het aantal dagen dat de Rijnafvoer 1020 m³/s of minder is (dus van nat (links) naar droog (rechts)). Tellend vanaf de droge jaren dus vanaf rechts, selecteren we het 24^e van de 240 jaren (10%) als een "T10" ofwel een "1 op 10 jaar" jaar, zie Figuur 5.1. Twee belangrijke keuzes hierin zijn dus de afvoer van 1020 m³/s en de 10%. Voor beide parameters zouden ook andere waarden gehanteerd kunnen worden. Deze waarden zouden vanuit de scheepvaart gemotiveerd moeten worden, maar uiteindelijk gaat het om de optimale balans tussen bruikbaarheid voor de scheepvaart en aanleg- en onderhoudskosten. Een afvoer van 1020 m³/s komt overeen met een waterstand van orde NAP+5,0 m ter hoogte van Sluis Weurt bij bodemligging 2018, zie ook Appendix A.

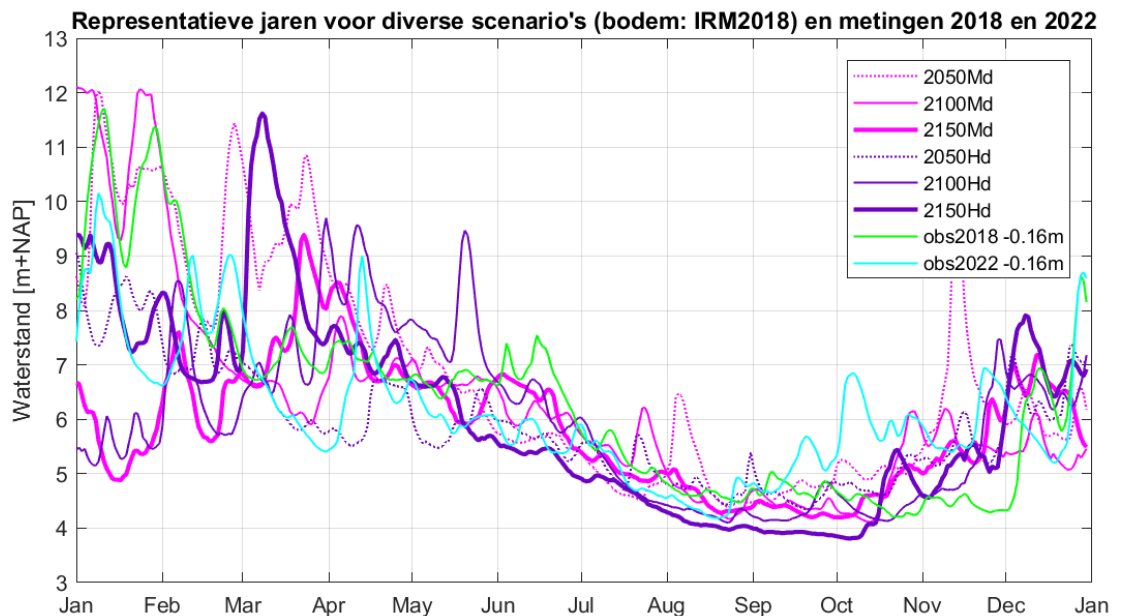
Deze methodiek is enigszins afgeleid van Deltares, 2019a. Een belangrijk verschil is dat in die studie karakteristieke jaren worden 'gemaakt' en dat het daardoor fictieve jaren zijn die voldoen aan bepaalde kansverdelingen, maar niet een daadwerkelijke waterstandsreeks beschrijven. Voor SIVAK hebben we juist wel een waterstandsreeks nodig. In ons voorbeeld veranderen we niets aan de waterstandsreeksen van de jaren zelf maar gebruiken we de methode alleen om ze op volgorde te zetten en een selectie criterium te hebben (het 10% droogste jaar).



Figuur 5.1: Afleiding representatief jaar (voorbeeld 2050Hd). De kleuren geven de afvoer bij Lobith; elke staaf staat voor één jaar. Het representatieve jaar is weergegeven met de zwarte ovaal.

5.3 Representatieve jaren voor droge scenario's met midden en hoge uitstoot (Md en Hd)

Op de hierboven beschreven manier zijn voor drie zichtjaren (2050, 2100 en 2150) voor de droge scenario's met midden en hoge uitstoot van broeikasgassen (Md en Hd), de representatieve jaren bepaald, zie Figuur 5.2. In alle gevallen is de bodem volgens IRM2018 aangehouden. In de figuur zijn ook van twee droge jaren (2018 en 2022) de gemeten waterstanden ter plaatse van Nijmegen Haven opgenomen, verlaagd met 0,16 m om rekening te houden met het gemiddelde verval tussen de meetlocatie en locatie WL887 ter hoogte van Sluis Weurt. Zowel in 2018 als in 2022 was de gemeten waterstand bij Nijmegen Haven lager dan NAP+4,50 m. Bij het 2150Hd scenario zal in een representatief jaar de waterstand zelfs tot onder NAP+4,0 m kunnen dalen.



Figuur 5.2: Waterstand Waal (WL887) ter hoogte van Sluis Weurt tijdens representatieve jaren voor scenario's Md2050, Md2100, Md2150, Hd2050, Hd2100, Hd2150 (met bodemligging IRM 2018), en metingen (observaties, afgekort tot obs in de legenda) van zeer droge jaren 2018 en 2022 o.b.v. Nijmegen Haven min 0,16 m verval.

5.4 Afwegingen

In deze studie zijn waterstandsreeksen afgeleid voor de Waal ter hoogte van Sluis Weurt voor diverse klimaatscenario's en bodemliggingsscenario's. Deze reeksen zijn nodig om een onderbouwde beslissing te nemen voor de aanleg van het drempelniveau voor de nieuwe Oostsluis van Weurt. Daar spelen – naast keuze voor klimaat en bodemscenario - diverse afwegingen een rol bij zoals de additionele aanleg- en onderhoudskosten, de lasten indien de sluis niet (volledig) gebruikt kan worden, de toekomstprognoses voor de scheepvaart, etc. Daarnaast dient aandacht te zijn voor het systeem als geheel. Als elders op het vaartraject blijvende ondieptes voorkomen dan zou de drempel van het sluishoofd aan de Waalzijde en de vloer van de sluiskolk niet dieper dan dat hoeven te liggen. De beschouwde vaarroute is hierbij natuurlijk van belang, en ook het feit of een ondiepte tijdelijk is of mogelijk verwijderd kan worden dan wel zelf erodeert.

Concreet gaat het om de volgende beleidsbeslissingen die genomen moeten worden:

- IRM bodemscenario
- KNMI-klimaatscenario
- zichtjaar
- afvoerverdeling over de Rijntakken
- toekomstige scheepvaartintensiteit en vlootsamenstelling
- criterium hoe vaak sluis niet gebruikt kan worden

Misschien niet voor beleid maar wel een beslissing die genomen moet worden:

- representatief jaar, hoe te bepalen.

Wij raden aan om gevoeligheidsberekeningen met SIVAK uit te voeren om te zien in hoeverre de duur van lage waterstanden van belang is. Bij het afleiden van het representatieve jaar is daar nu geen rekening mee gehouden. Afhankelijk van die uitkomsten zouden wellicht andere keuzes gemaakt kunnen worden om het representatieve jaar af te leiden.

Al deze aspecten moeten in samenhang beschouwd worden om tot een doordachte afweging te komen voor het drempelniveau van de Oostsluis bij Weurt.

6 Doorkijk naar overige vernieuwingsprojecten

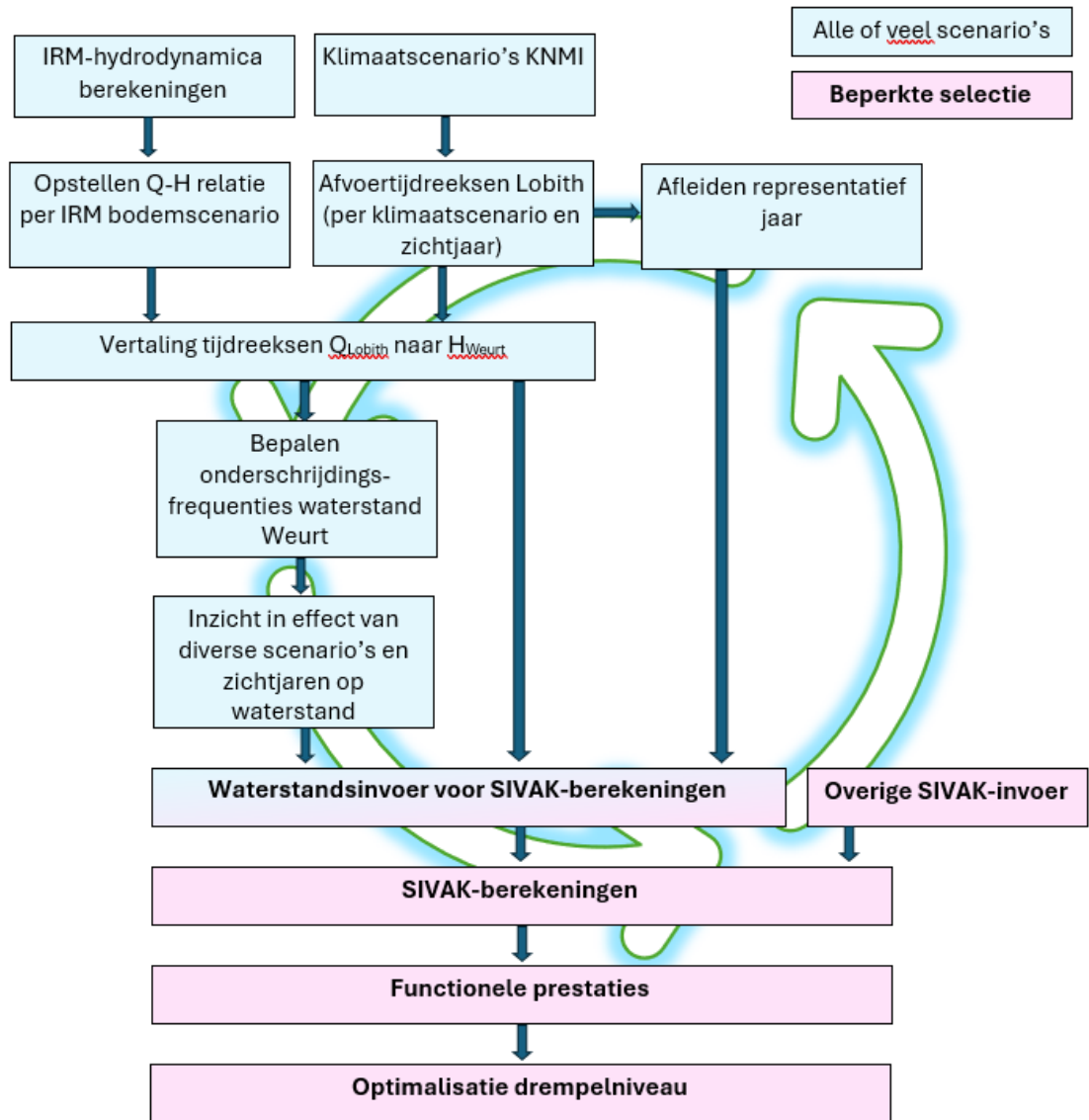
6.1 Inleiding

Deze pilotstudie voor Sluis Weurt is als concreet voorbeeld uitgewerkt om een opzet te maken voor een algemene methodiek om eenduidige uitgangspunten voor ontwerpwaarden voor natte kunstwerken op te stellen. Die algemene methodiek is nog niet vastgelegd maar het stroomschema dat voor Sluis Weurt is gebruikt is een handig begin. Het maakt ook duidelijk welke beslissingen genomen moeten worden, en wat nog uitgezocht moet worden door wie en hoe.

6.2 Stroomschema

In het stroomschema van Figuur 6.1 dat t/m het vak 'Waterstandsinvoer voor SIVAK-berekeningen' gevolgd is, hebben de blauwe vakken betrekking op veel – zo niet alle - scenario's voor bodemligging, zichtjaar en klimaat en de roze vakken op een geschikte selectie daarvan. De groene ronde pijlen geven aan dat het deels een iteratief proces is met verfijningsslagen om tot een geschikte selectie te komen. Men zou met alle scenario's kunnen beginnen en uiteindelijk voor alle scenario's SIVAK berekeningen doen, maar men zou ook al direct kunnen beslissen om bijvoorbeeld geen natte scenario's te beschouwen en daar dan ook geen waterstandsreeksen voor Sluis Weurt voor te genereren. Dus de plaats van de keuzemomenten in het schema staat niet vast. De keuzes en beslissingen die genomen moeten worden zijn:

- | | |
|--|--------------------------|
| • welke klimaatscenario('s) te beschouwen. | Wie en op basis waarvan? |
| • welke zichtja(a)r(en) te beschouwen. | Wie en op basis waarvan? |
| • welke bodemligging(en) te beschouwen. | Wie en op basis waarvan? |
| • welke afvoerverdeling(en) te beschouwen. | Wie en op basis waarvan? |
| • welke scheepvaartscenario('s) te beschouwen. | Wie en op basis waarvan? |
| • welke ja(a)r(en) als representatief te beschouwen. | Wie en op basis waarvan? |
| • welke scheepvaartcriteria te beschouwen. | Wie en op basis waarvan? |
| • uiteindelijke goedkeuring drempelniveau. | Wie en op basis waarvan? |



Figuur 6.1: Stroomschema voor het afleiden van waterstanden voor ontwerpdrempelniveau Sluis Weurt

6.3 Hoe te komen tot algemene Eenduidige Uitgangspunten voor Ontwerp

In deze pilot is gericht gewerkt aan Sluis Weurt maar er zijn stappen, activiteiten en beslissingen te definiëren die ook voor andere vernieuwingsprojecten gelden. Voordat hiertoe een algemene methode opgesteld kan worden voorzien wij eerst nog de uitvoering van een tweede pilot voor een ander project om een breder bereik aan voorbeelden te hebben. Verder zijn intussen voor het zoet-water onderdeel van het Nationaal Water Model berekeningen uitgevoerd die mogelijk tot nut kunnen zijn voor de algemene methodiek.

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Op basis van bestaande gegevens zijn nieuwe 240 synthetische jaarreeksen van de waterstand voor Sluis Weurt afgeleid, voor de KNMI2023 klimaatscenario's in combinatie met IRM bodemliggingscenario's. In totaal zijn 45 scenario's beschouwd (3 bodems en 15 combinaties van klimaatscenario en zichtjaar). De waterstandsreeksen kunnen gebruikt worden om SIVAK wachttijdanalyses uit te voeren om zo een geschikte waarde voor het drempelniveau voor de Oostsluis van Weurt af te leiden.

In de toekomst zullen vaker lage Rijnafvoeren voorkomen en daarmee ook lage waterstanden op de Waal nabij Sluis Weurt.

De verkregen inzichten en waterstandsreeksen gaan helpen bij besluitvorming rond het gewenste drempelniveau. Echter, er zijn eerst nog een aantal beleidsbeslissingen nodig waarvan nog niet duidelijk is wie die neemt en hoe. Het gaat concreet om de te hanteren uitgangspunten ten aanzien van:

- IRM bodemscenario
- KNMI-klimaatscenario
- zichtjaar
- afvoerverdeling over de Rijntakken
- toekomstige scheepvaartintensiteit en vlootsamenstelling
- criterium hoe vaak sluis niet gebruikt kan worden

Ten opzichte van de referentie situatie vertonen alle klimaatscenario's een duidelijk toename van het voorkomen van lage waterstanden, zelfs de natte klimaatscenario's (zie Figuur 4.3). Als kental beschouwen we de waterstand die gemiddeld 20 dagen per jaar wordt onderschreden. Bij de bodemligging van 2018 is die waterstand nu circa NAP+5,13 m. Bij gelijke bodemligging daalt die waterstand bij het midden scenario in 2150 naar NAP+4,69 m en bij het klimaatscenario met hoge uitstoot van broeikasgassen zelfs naar NAP+4,36 m. Omgekeerd is ook te zien dat een waterstand die nu 20 dagen per jaar wordt onderschreden, in de verre toekomst mogelijk meer dan 75 dagen per jaar wordt onderschreden.

Als het scenario van lage uitstoot gevolgd zou worden dan komt de klimaatverandering na 2050 naar verwachting tot stilstand. In dat geval zal het klimaat van 2050, 2100 en 2150 hetzelfde zijn en maakt het zichtjaar dus niet uit, behalve dat het anders is dan de referentiesituatie. Bij de droge varianten van het midden scenario en hoge scenario stopt de trend dat de zomers droger worden en de waterstanden dalen niet, maar vlakt wel af.

7.2 Aanbevelingen

Deze studie heeft voor Sluis Weurt waardevolle informatie opgeleverd ten aanzien van de invloed van klimaatverandering op de lokale waterstand. Ook is veel inzicht verkregen in het proces om hydraulische randvoorwaarden voor het ontwerp van een constructie af te leiden. Dit ene voorbeeld van Sluis Weurt is echter nog niet genoeg om een algemene methodiek op te stellen voor het gebruik van eenduidige uitgangspunten voor het ontwerp van natte kunstwerken. Het is de bedoeling dat zo'n methodiek volgend jaar wel gereed komt want er is grote behoefte aan voor de vele vernieuwingsprojecten die gepland staan.

Het wordt aanbevolen om te achterhalen waar en door wie de beleidsbeslissingen genomen moeten worden ten aanzien van:

- IRM bodemscenario
- KNMI-klimaatscenario
- zichtjaar
- afvoerverdeling over de Rijntakken
- criterium hoe vaak sluis niet gebruikt kan worden

Bij het nemen van dergelijke beslissingen zal behoefte zijn aan een overzicht van kosten, prestatie en risico's voor verschillende toekomstscenario's waarin bovengenoemde aspecten zijn opgenomen. Het wordt aangeraden om zo'n overzicht al op te stellen voor een aantal relevante scenario's.

Deze studie heeft een voorstel geboden voor het afleiden van de waterstanden van een representatief jaar die gebruikt kunnen worden als invoer in SIVAK wachttijdberekeningen voor Sluis Weurt. Het wordt aanbevolen om die SIVAK berekeningen uit te voeren. Het is uiteindelijk een iteratief proces met verfijningsslagen om tot een geschikte keuze van een waterstandsreeks en daarmee het ontwerp bodemniveau van de sluis te komen. Een integrale afweging ten aanzien van het drempelniveau is gewenst.

Wij raden aan om gevoeligheidsberekeningen met SIVAK uit te voeren om te zien in hoeverre de duur van lage waterstanden van belang is. Bij het afleiden van het representatieve jaar is daar nu geen rekening mee gehouden. Afhankelijk van die uitkomsten zouden wellicht andere keuzes gemaakt kunnen worden om het representatieve jaar af te leiden.

De uitkomsten van deze studie zijn niet vrij van onzekerheden, zoals bijvoorbeeld in klimaatscenario, ontwikkeling van de bodemligging en modelonzekerheid. De gepresenteerde getallen en waterstandsreeksen zijn hiervoor niet gecorrigeerd. Het is aan de ontwerper om daar in het ontwerpproces op een verantwoorde manier mee om te gaan.

8 Referenties

- CCR, 2014 Overeengekomen Lage Rivierstand (OLR) op de Rijn 2012. Aangenomen besluit 2014-II-17, dec 2014
- Deltares, 2019a KBN: Bedreiging klimaatverandering – Beschrijving karakteristieke droge jaren met stationaire afvoerniveaus dd 14 december 2019. Ref 11203738-005-BGS-0002. Auteur: Jurjen de Jong.
- Deltares, 2019b Prognose bodemligging Rijntakken 2020-2050 dd 20 december 2019. Ref 1120378-005-BGS-0008. auteur: Kees Sloff
- Deltares, 2022a Effectbepaling nulalternatief IRM dd 10 november 2022, Ref 11208036-004-ZWS-0002
- Deltares, 2022b Effectbepaling IRM - Gevoeligheidsanalyse voor verandering in rivierbodemligging Rijntakken dd 20 december 2022, Ref 11208036-004-ZWS-0005
- Deltares, 2022c Ontwikkeling zesde-generatie Rijntakken model (modelbouw, kalibratie en validatie) dd 21 september 2022. Ref 11206813-003-ZWS-0012. https://publications.deltares.nl/11206813_003_0012.pdf
- Deltares, 2023a Implications of the KNMI'23 climate scenarios for the discharge of the Rhine and Meuse dd 7 December 2023. Ref 11209265-002-ZWS-0003. (Joost Buitink, Athanasios Tsiokanos, Tjitske Geertsema, Corine ten Velden, Laurene Bouaziz, Frederiek Sperna Weiland
- Deltares, 2023b <https://www.deltares.nl/nieuws/toekomstige-rivierafvoeren-rijn-maas-lager-zomer-hoger-winter>
- Deltares, 2024a Beschikbare vaarwegafmetingen Waal bij lage afvoeren dd 2 januari 2024. Ref 11209214-005-ZWS-0002. Auteurs Van der Mark en Van der Hoek.
- Deltares, 2024b Strategische Verkenning Rivieren, Huidige en toekomstige knelpunten voor scheepvaart, zoetwatervoorziening, natuur en hoogwaterveiligheid dd 1 juli 2024 (concept). Ref 11208003-015-HYE-0001-v0.17.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA
- KNMI, 2023a KNMI'23-klimaatsscenario's voor Nederland, KNMI, De Bilt, KNMI-Publicatie 23-03. ('gebruikersrapport KNMI'23-klimaatsscenario's', via <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/knmi-23-klimaatsscenario-s>)

- KNMI, 2023b KNMI website <https://www.knmi.nl/kennis-en-datacentrum/achtergrond/knmi-23-klimaatscenario>
- KNMI, 2024 KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands dd 8 March 2024. Scientific report; WR-23-02, version 2. (R. van Dorland, J. Beersma, J. Bessembinder, N. Bloemendaal, H. van den Brink M. Brotons Blanes, S. Drijfhout, R. Groenland, R. Haarsma, C. Homan, I. Keizer, F. Krikken, D. Le Bars, G. Lenderink, E. van Meijgaard, J. F. Meirink, B. Overbeek, T. Reerink, F. Selten, C. Severijns, P. Siegmund, A. Sterl, C. de Valk, P. van Velthoven, H. de Vries, M. van Weele, B. Wichers Schreur, K. van der Wiel)
- Ministerie IenW, 2023 Ontwerp Programma IRM: Naar een toekomstbestendig rivierengebied dd December 2023.
https://programmairm.ireporting.nl/FbContent.ashx/pub_1000/downloads/v240122143807/Ontwerp-Programma-Integraal-Riviermanagement.pdf
- Witteveen+Bos, 2021 Deelcorridoranalyse en -prognose Maaswaalkanaal Rapport ten behoeve van V&R scope sluiscomplexen Weurt en Heumen dd 21 mei 2021
- 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>
- Rijkswaterstaat Oost Nederland, 2022 Bepaling Overeengekomen Lage Rivierwaterstand 2022 voor de Nederlandse Rijntakken dd 7 oktober 2022. Auteurs Van Putten en Vrijaldenhoven.

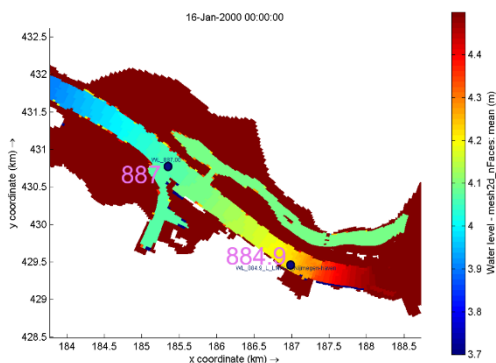
A Tabellen

Tabel A.1: Resultaten D-HYDRO berekeningen voor IRM met bodem 2018; stationair

Afvoer Lobith BR863.9 [m³/s]	Afvoer Waal WL868.9 [m³/s]	Waterstand NIJMGNHVN WL884.9 [m+NAP]	Waterstand Sluis Weurt WL887.0 [m+NAP]
600	500	4.22	4.06
1020	825	5.20	5.03
2000	1488	6.99	6.81

Tabel A.2: Resultaten D-HYDRO berekeningen voor IRM met bodem 2018; semistationair, zonder lateralen

Afvoer Lobith BR863.9 [m³/s]	Afvoer Waal WL868.9 [m³/s]	Waterstand NIJMGNHVN WL884.9 [m+NAP]	Waterstand Sluis Weurt WL887.0 [m+NAP]
500	427	3.95	3.79
550	465	4.08	3.92
600	506	4.22	4.05
650	543	4.34	4.18
700	578	4.46	4.29
750	618	4.58	4.41
800	657	4.70	4.53
900	734	4.93	4.76
1000	810	5.15	4.98
1200	963	5.58	5.41
1400	1114	6.01	5.83
1600	1268	6.43	6.25
1800	1409	6.79	6.62
2000	1488	6.98	6.80
2200	1582	7.19	7.01
2400	1689	7.41	7.23
2600	1801	7.64	7.45
2800	1920	7.87	7.69
2900	1983	8.00	7.81



Tabel A.3: Statistiek van waterstandsonderschrijdingen locatie WL887 bij scenario 'ref met bed 2018'

water-stand [NAP+m]	totale tijd in 240 jr [dag]	perc van de tijd [%]	# in 240 jr [-]	# per jaar [-]	gemiddel-de duur [dag]	gemiddeld jaarmax duur [dag]	max duur [dag]
4	0	0	0	0	0	0	0
4.5	241	0.27	22	0.09	10.95	0.96	47
5	3061	3.49	241	1	12.7	8.25	98
5.5	10653	12.15	679	2.83	15.69	26.22	141
6	21739	24.8	1100	4.58	19.76	47.4	195

Tabel A.4: Statistiek van waterstandsonderschrijdingen locatie WL887 bij scenario '2100Md met bed 2018'

water-stand [NAP+m]	totale tijd in 240 jr [dag]	perc van de tijd [%]	# in 240 jr [-]	# per jaar [-]	gemiddel-de duur [dag]	gemiddeld jaarmax duur [dag]	max duur [dag]
4	43	0.05	4	0.02	10.75	0.16	31
4.5	1916	2.19	125	0.52	15.33	6.07	107
5	8259	9.42	501	2.09	16.49	24.09	140
5.5	19278	21.99	948	3.95	20.34	46.48	166
6	31478	35.91	1191	4.96	26.43	72.55	265

Tabel A.5: Statistiek van waterstandsonderschrijdingen locatie WL887 bij scenario '2150Hd met bed 2018'

water-stand [NAP+m]	totale tijd in 240 jr [dag]	perc van de tijd [%]	# in 240 jr [-]	# per jaar [-]	gemiddel-de duur [dag]	gemiddeld jaarmax duur [dag]	max duur [dag]
4	588	0.67	46	0.19	12.78	1.89	54
4.5	6871	7.84	318	1.33	21.61	20.78	121
5	15451	17.63	619	2.58	24.96	45.31	162
5.5	25710	29.33	923	3.85	27.85	66.39	228
6	36302	41.41	1205	5.02	30.13	86.45	233

Tabel A.6: Effect van klimaatscenario op de waterstand die 20 dagen per jaar wordt onderschreden bij locatie WL887, voor verschillende zichtjaren bij bodemscenario 2050

klimaat	zichtjaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	
				Nat scenario	Droog scenario
Midden	2050	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,87	4,67
Hoog	2050	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,78	4,59

klimaat	zichtjaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	
				Nat scenario	Droog scenario
Laag	2100	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,81	4,70
Midden	2100	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,74	4,56
Hoog	2100	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,53	4,24

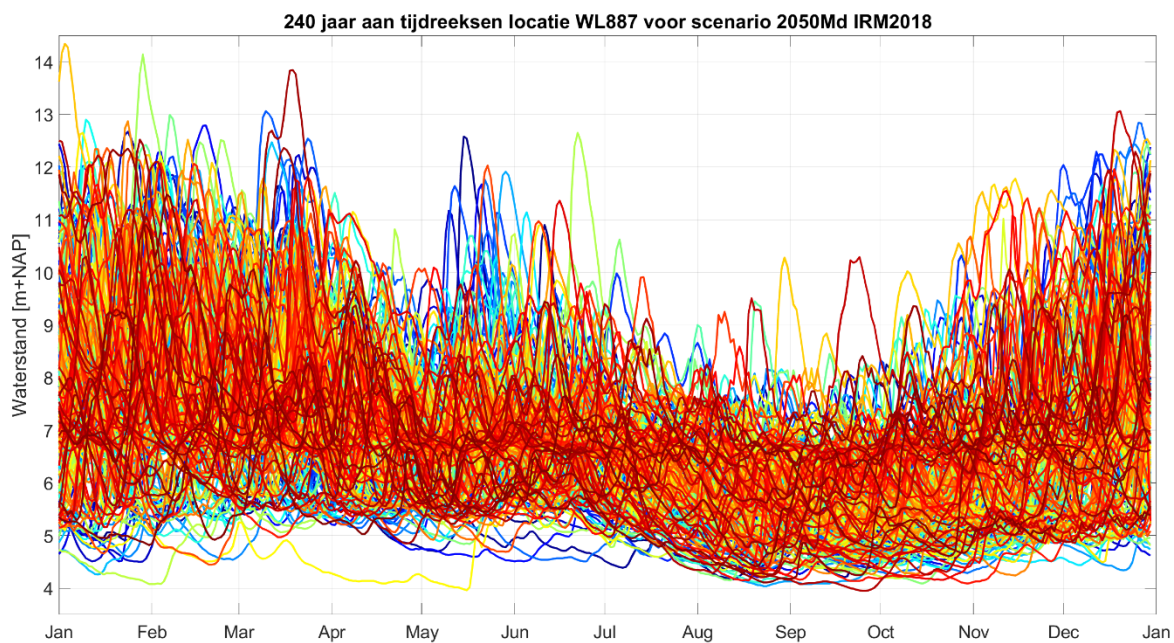
klimaat	zichtjaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	
				Nat scenario	Droog scenario
Midden	2150	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,77	4,48
Hoog	2150	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,49	4,15

Tabel A.7: Effect van zichtjaar op de waterstand die 20 dagen per jaar wordt onderschreden bij locatie WL887, voor verschillende klimaatscenario's bij bodemscenario 2050

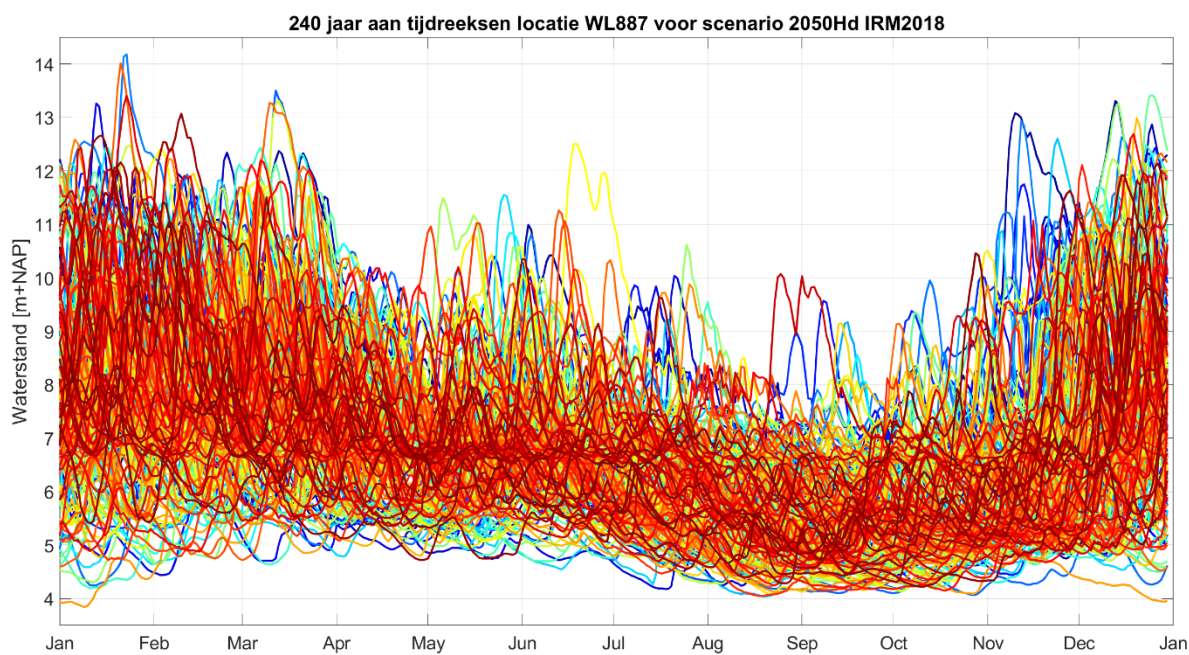
klimaat	zichtjaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	
				Nat scenario	Droog scenario
Midden	2050	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,87	4,67
Midden	2100	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,74	4,56
Midden	2150	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,77	4,48

klimaat	zichtjaar	bodemscenario	criterium	Waterstand [m+NAP]	
				Nat scenario	Droog scenario
Hoog	2050	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,78	4,59
Hoog	2100	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,53	4,24
Hoog	2150	2050	20 dag/jr ≈ 5%	4,49	4,15

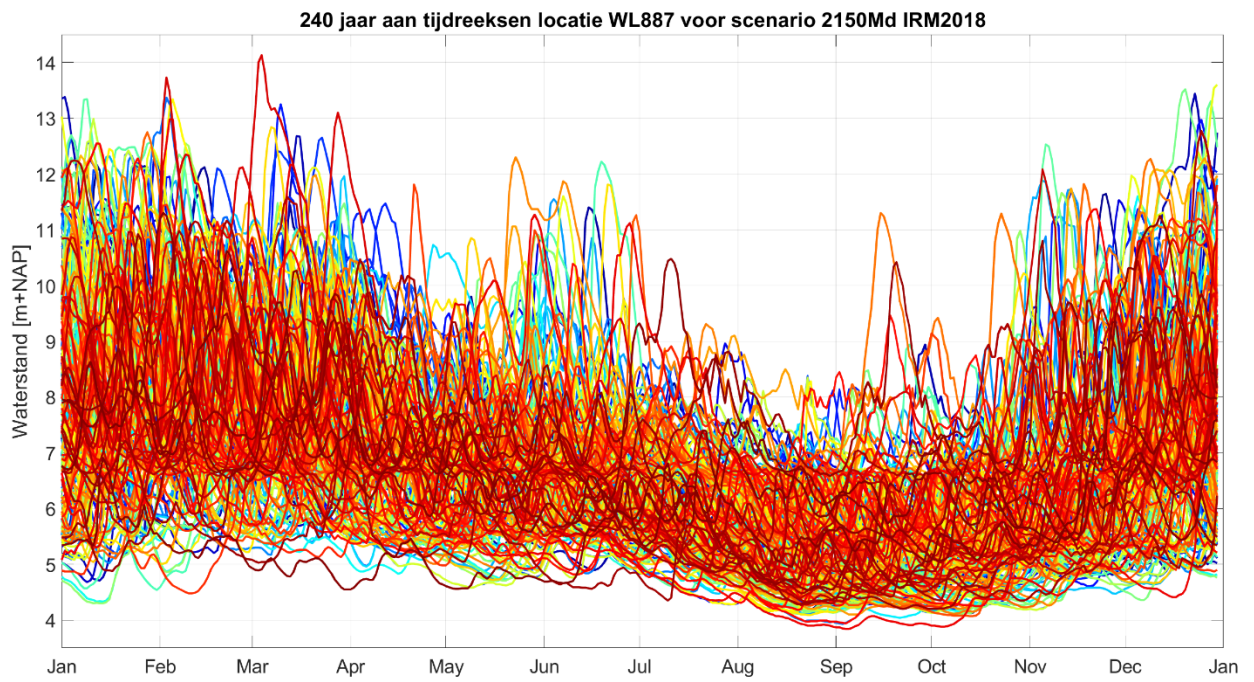
B Figuren



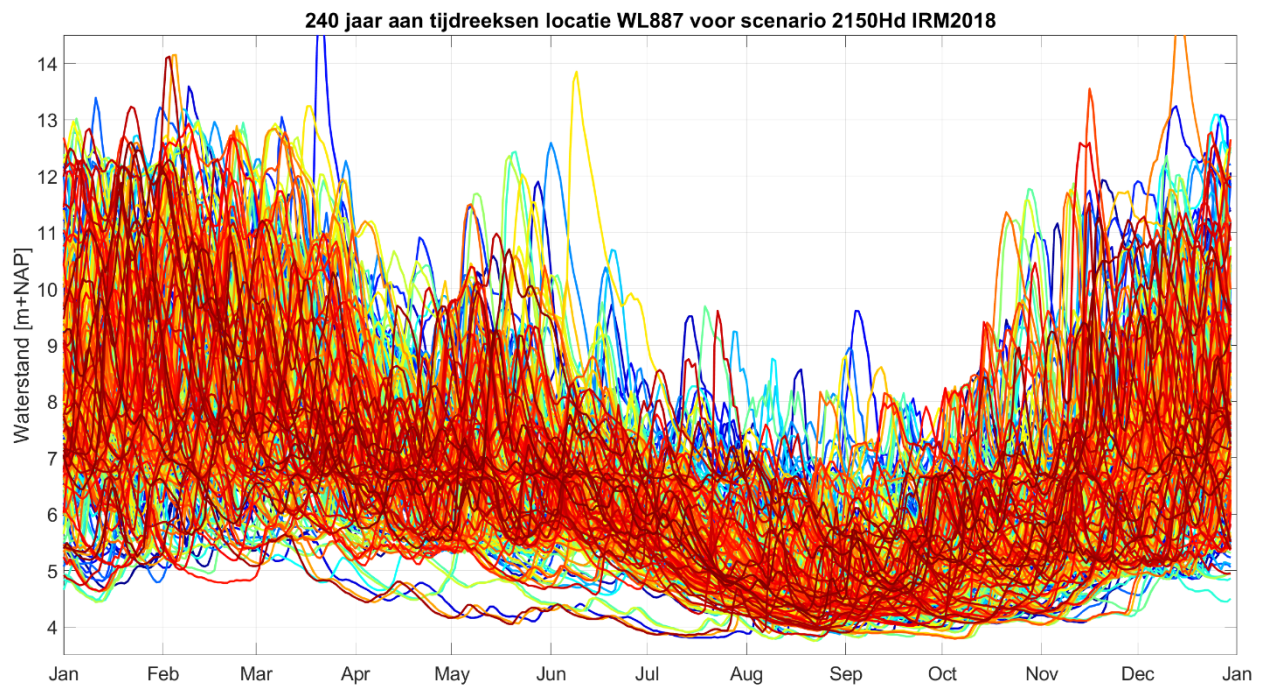
Figuur B.1: 240 jaarreeksen waterstand Sluis Weurt locatie WL887 voor scenario 2050Md (IRM2018)



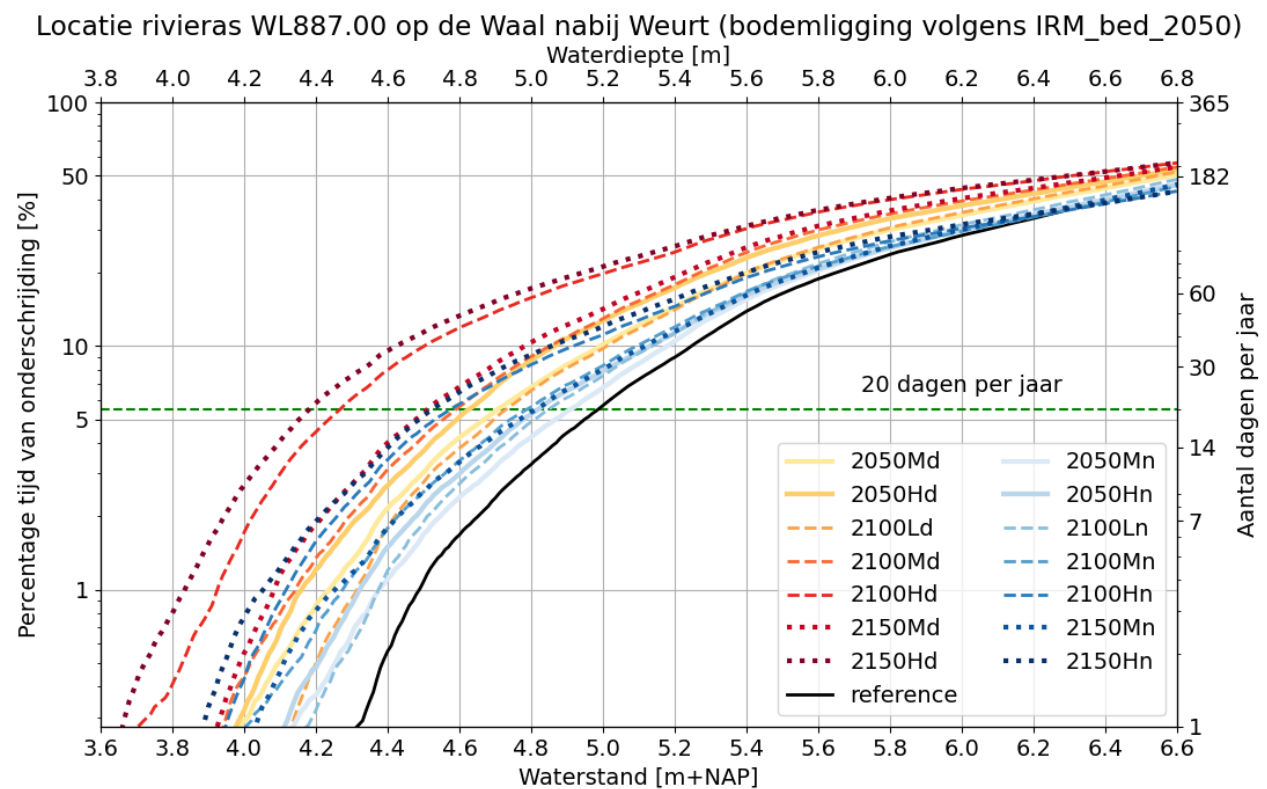
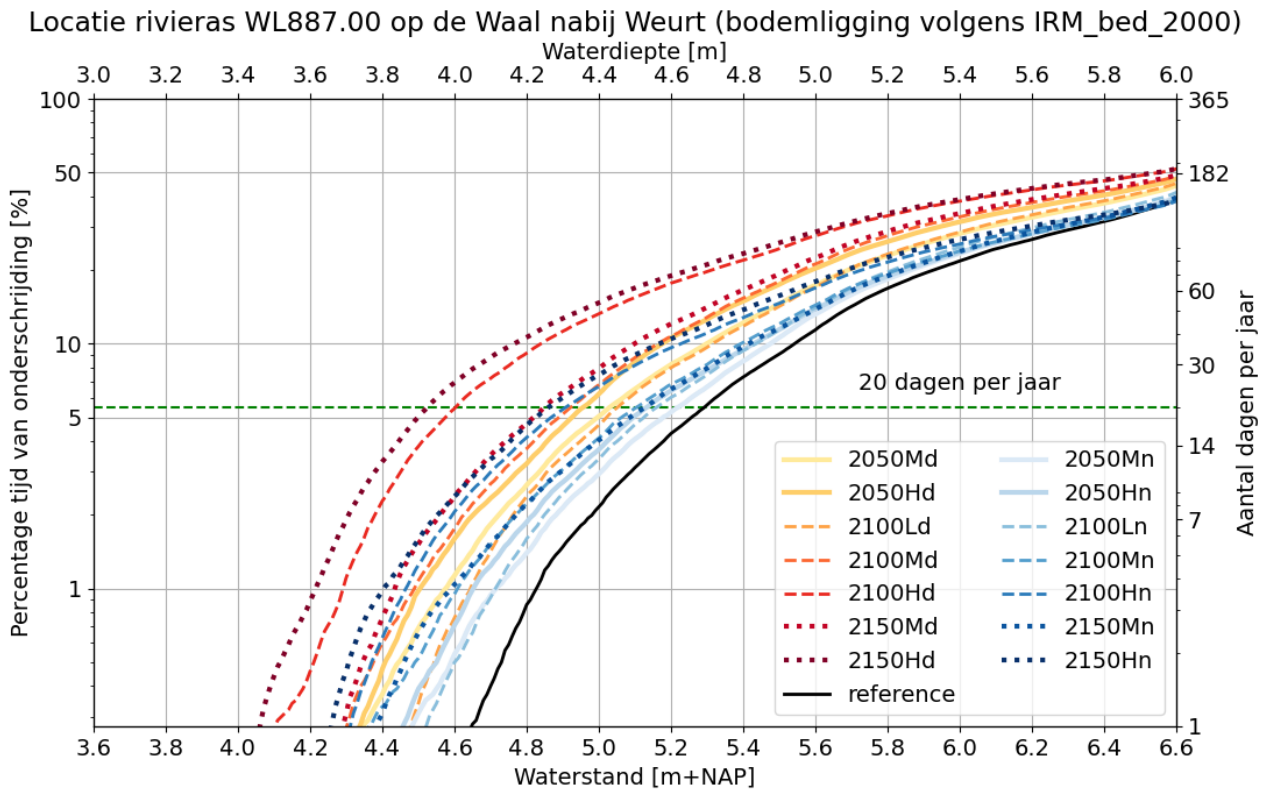
Figuur B.2: 240 jaarreeksen waterstand Sluis Weurt locatie WL887 voor scenario 2050Hd (IRM2018)



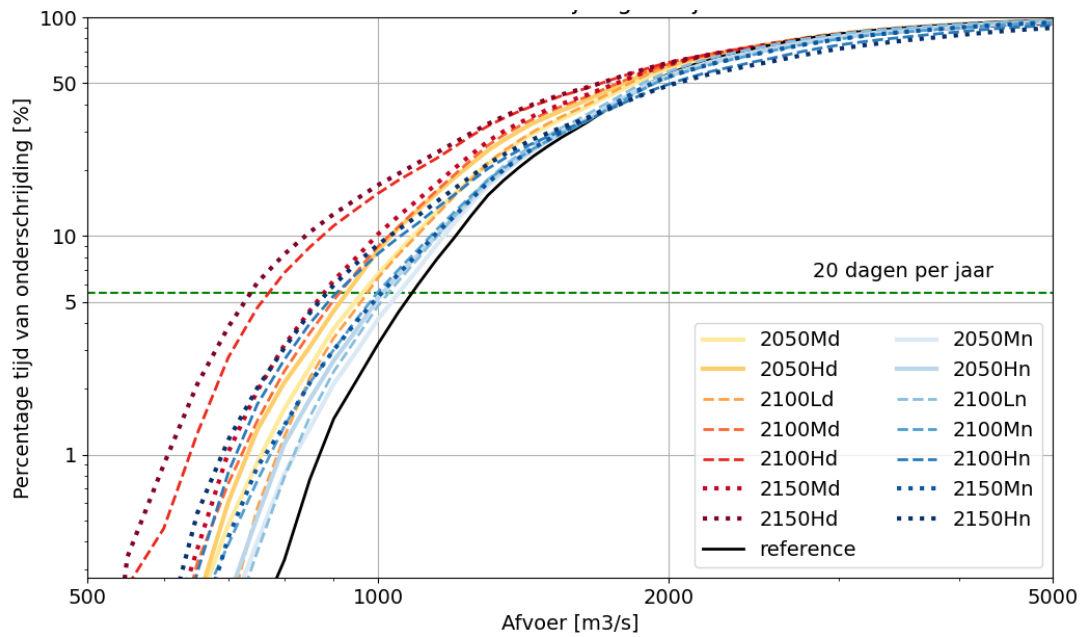
Figuur B.3: 240 jaarreeksen waterstand Sluis Weurt locatie WL887 voor scenario 2150Md (IRM2018)



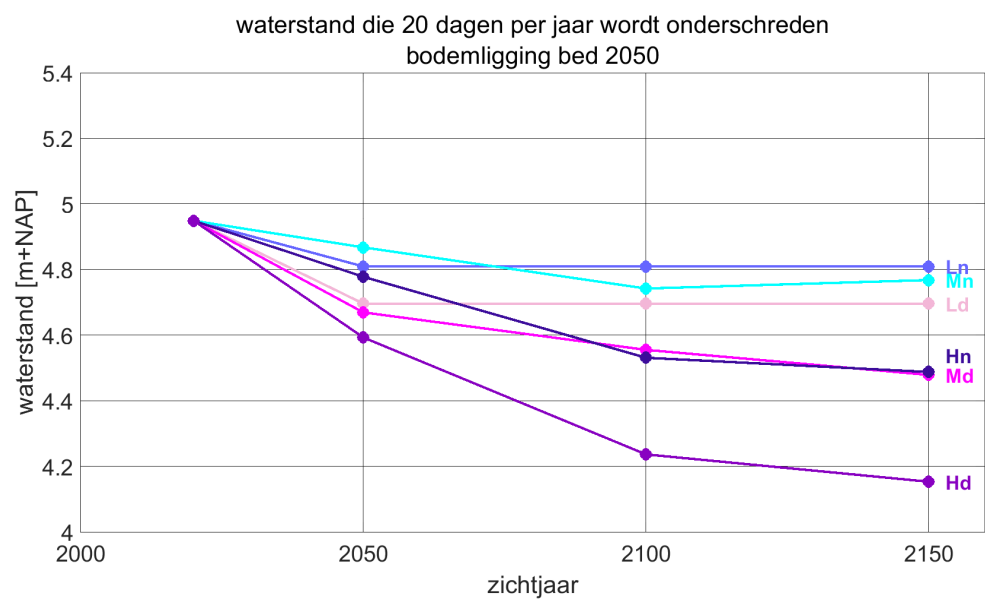
Figuur B.4: 240 jaarreeksen waterstand Sluis Weurt locatie WL887 voor scenario 2150Hd (IRM2018)



Figuur B.5: Overschrijdingspercentages waterstanden voor diverse klimaatscenario's bij bodempligging IRM2000 (boven) en IRM2050 (onder)



Figuur B.6: Overschrijdingspercentages afvoeren bij Lobith voor diverse klimaatscenario's op basis van de afvoerscenario's van de Rijn (zie Paragraaf 3.6)



Figuur B.7: Effect van zichtjaar op de waterstand die 20 dagen per jaar wordt overschreden bij locatie WL887, voor verschillende klimaatscenario's (Ln, Ld, Mn, Md, Hn, Hd) bij bodemsituatie 2050

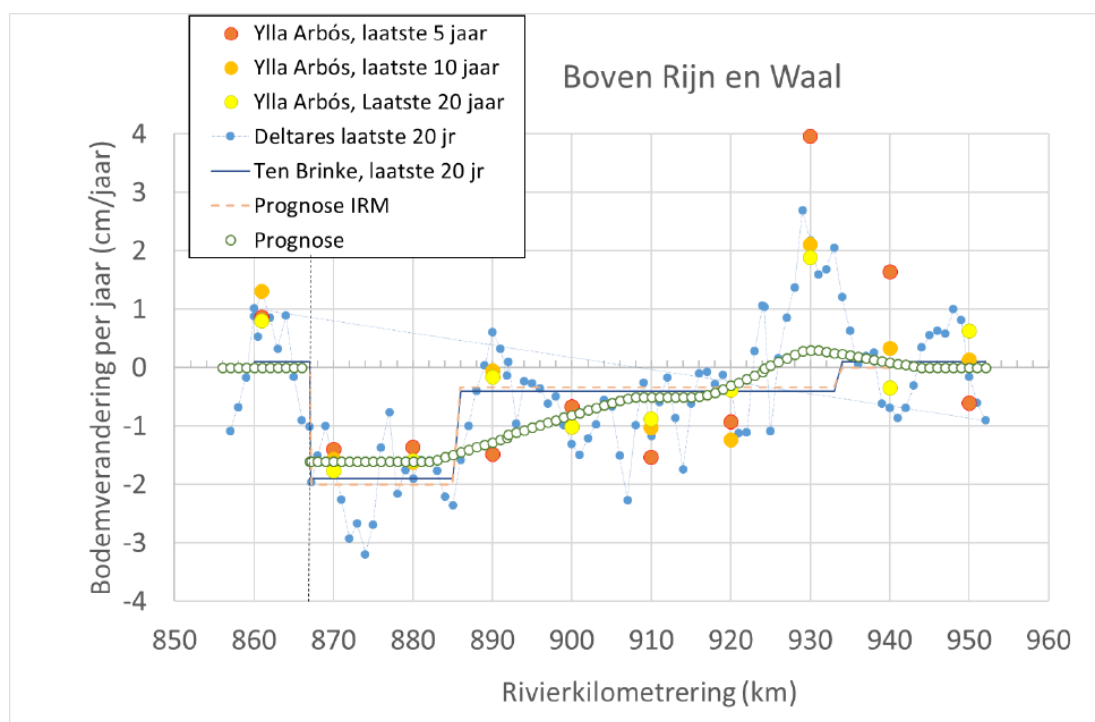
C Achtergrondinformatie IRM (Integraal Rivier Management)

C.1 Bodemligging

In het Ontwerp Programma IRM (Ministerie van IenW, 2023) staat dat de beleidskeuze om het doel voor de rivierbodempligging te realiseren als volgt is: “De meest urgente opgave is het stoppen van de erosie van de rivierbodempligging van de Maas en de Rijntakken. Aanvullend daarop, daar waar nodig en haalbaar voor de Rijntakken het weer omhoog brengen van de eroderende delen. Voor Maas en Rijntakken wordt daarbij ingezet op beëindigen van ontgroningen in het zomerbed, tenzij een (zwaarwegend) algemeen belang zoals vaargeulverdieping zich daartegen verzet.”

De beleidsambitie van IRM is dus om de huidige bodemerosie af te remmen en te stoppen en misschien op lange termijn zelfs de bodem op te hogen. Zonder ingrijpen is de verwachting dat erosie ook na 2050 door zal blijven gaan. Stoppen vraagt dus om actief ingrijpen en het is nog niet duidelijk hoe.

De huidige bodemerosie is in de orde van 0,6-1,6 cm/jaar (respectievelijk op MiddenWaal km 886 – 933 en BovenWaal km 868-885; Deltares, 2019), zie ook onderstaande figuur.



Figuur C.1: Trends in bodemverandering Boven Rijn en Waal: prognose en waargenomen trends uit recente studies voor R2M en IRM (stroming is van links naar rechts). Bron: Deltares (2019b)

C.2 Bodemprognose na 2050

Na 2050 zijn bodemveranderingen in de Rijn zeer onzeker (Deltares, 2024b). Die studie noemt de volgende 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 tijdschaal 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.

Deltares (2019b) 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.

C.3 Samenvatting IRM m.b.t. bevaarbaarheid (bron: Deltares, 2022b)

Voor de bevaarbaarheid van de rivieren zijn de waterdieptes bij verschillende rivierafvoeren berekend en is gekeken in hoeverre deze voldoen aan de vanuit scheepvaart gewenste waterdieptes. De gewenste waterdieptes zijn overgenomen uit nationale en internationale vaarwegeisen. Voor de Boven-Rijn, de Waal, het Pannerdensch Kanaal en de Nederrijn-Lek betekent dit dat de waterdiepte bij OLA (de Overeengekomen Lage Afvoer, gedefinieerd als de afvoer die gedurende 20 dagen per jaar wordt onderschreden) minimaal 2,8 m moet zijn. Voor de IJssel is dit 2,5 m. Met behulp van QINCoM is vervolgens berekend wat te geringe waterdieptes betekenen voor de vaarkosten.

Nulalternatief (doorgaande rivierbodemosie)

Bij het nulalternatief wordt de vanuit de scheepvaart vereiste 2,8 m waterdiepte op de Waal gedurende 73 dagen onderschreden. Ongeveer 40% van de lengte van de Boven-Waal voldoet niet aan de vereiste waterdiepte bij OLA. Het grootste knelpunt op de Waal verschuift van de alluviale ondiepte in de binnenbocht net benedenstrooms van de vaste laag bij Nijmegen naar de vaste laag zelf.

En of dit dan gunstig of ongunstig uitpakt voor de bevaarbaarheid is afhankelijk van hoe omgegaan wordt met de minimaal benodigde kielspeling: indien bij een vaste laag rekening moet worden gehouden met een grotere kielspeling dan bij alluviale ondieptes (vanwege een grotere kans op schade-varen), dan neemt de beschikbare vaardiepte toch iets af. De verschuiving in de afvoerverdeling leidt tot een sterke afname van de waterdiepte op de IJssel en in stuwpand Driel op de Neder-Rijn. De bevaarbaarheid van deze beide trajecten neemt hierdoor sterk af.

Door het gecombineerde effect van klimaatverandering en rivierbodemerrosie neemt het aantal benodigde vaarbewegingen (om dezelfde hoeveelheid goederen te transporteren met dezelfde vlootsamenstelling) toe. Dit leidt tot een toename van de vaarkosten van 2,42 miljard euro bij de huidige bodemligging en het huidige klimaat tot 2,56 miljard euro bij het nulalternatief IRM. Hierbij is uitgegaan van een grotere benodigde kielspeling boven de vaste laag. Door sociaal-economische ontwikkelingen zullen de aantallen vaarbewegingen en de vaarkosten naar verwachting nog veel sterker toenemen.

Huidige bodemligging handhaven (2018)

Klimaatverandering (uitgaande van het scenario WHdry) heeft een zeer groot effect op de bevaarbaarheid van de Rijntakken, want de rivierafvoer is in dit scenario in 2050 vaker en langduriger gering. De gewenste 2,8 m waterdiepte op de Waal bij OLA wordt nu gedurende zo'n 49 dagen per jaar niet gehaald, maar dit zal door de klimaatverandering bij handhaving van de huidige bodemligging toch kunnen toenemen tot 84 dagen per jaar. Ook het aantal locaties waar niet aan deze eis kan worden voldaan neemt fors toe. Op de Boven-Waal wordt met de huidige bodemligging en het huidige klimaat over zo'n 5% van de totale trajectlengte niet voldaan aan de minimaal vereiste waterdiepte; in klimaatscenario WHdry neemt dit in 2050 (bij handhaving van de huidige bodemligging) toe tot bijna 50%. De vaarkosten zouden in dat geval ongeveer 2,54 miljard euro bedragen.

2000-bodemligging

Bij de 2000-bodemligging stroomt bij lage rivierafvoeren juist minder water naar de Waal. Hierdoor neemt de vaardiepte op deze tak, in vergelijking met de huidige bodemligging, met ongeveer 15 cm af. Het percentage van de lengte van de Boven-Waal dat niet aan de vereiste waterdiepte voldoet neemt toe tot meer dan 60%. Dit leidt tot een groter aantal vaarbewegingen op de Waal. Op landelijk niveau nemen de vaarkosten toe tot 2,56 miljard euro. Dit is vergelijkbaar met de kosten in het nulalternatief, maar hoger dan wanneer de huidige bodemligging zou worden vast gehouden.

C.4 Specificatie D-HYDRO simulaties van IRM

Er zijn voor de D-HYDRO simulaties van IRM twaalf dynamische afvoeren boven de 6000 m³/s beschouwd, en vier stationaire, te weten 600, 1020, 2000 en 4000 m³/s. Daarnaast is er een aanvullende reeks met deels overlappende semistationaire berekeningen van 500 m³/s met stappen van 50 m³/s (in 48 uur) tot 3000 m³/s maar zonder lateralen. Voor elk van de drie bodemliggingsvarianten zijn al deze afvoeren beschouwd.

Deze simulaties zijn op zich onafhankelijk van een klimaatscenario. In IRM worden de klimaatscenario's pas toegepast om effecten te bepalen op bijvoorbeeld veiligheid, bevaarbaarheid, natuur, etc. De scenario's die beschouwd zijn in IRM betreffen KNMI-2014 scenario's, niet de nieuwere KNMI-2023 scenario's, maar zoals gezegd heeft dat geen effect op de D-HYDRO berekeningen.

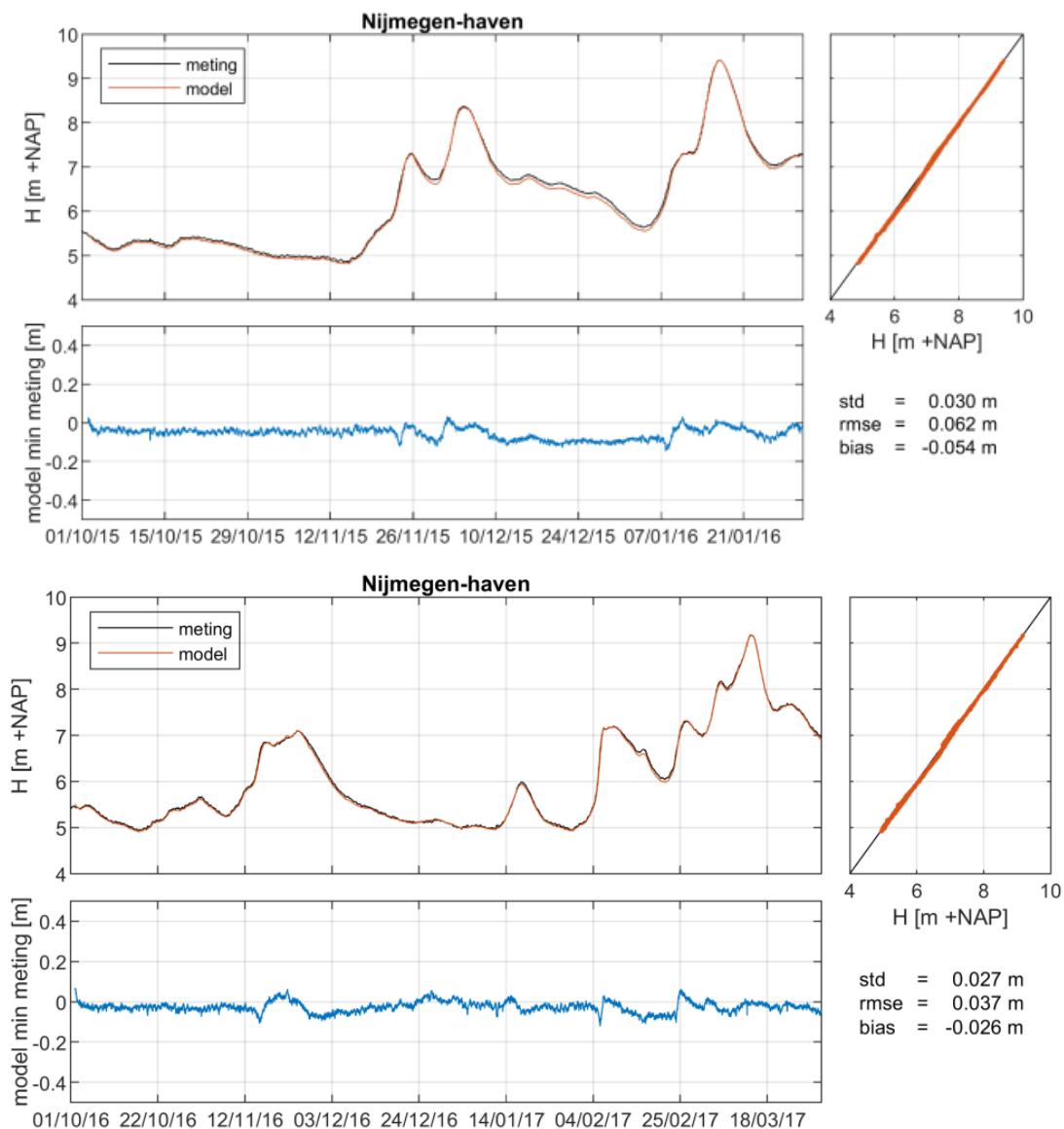
Tabel C.1: Overzicht randvoorwaarden in hydraulische berekeningen IRM (bron: Deltares, 2022a)

Rijntakken

Piekafvoer afvoergolven (m ³ /s) "JAMR/BOI" (De Jong et al., 2021)	Stationaire afvoeren (m ³ /s) "JAMR/BOI" (De Jong et al., 2021)
D6000	S600
D8000	S1020
D10000	S2000
D12000	S4000
D13000	
D14000	
D15000	
D16000	
D17000	
D18000	
D20000	
D24000	

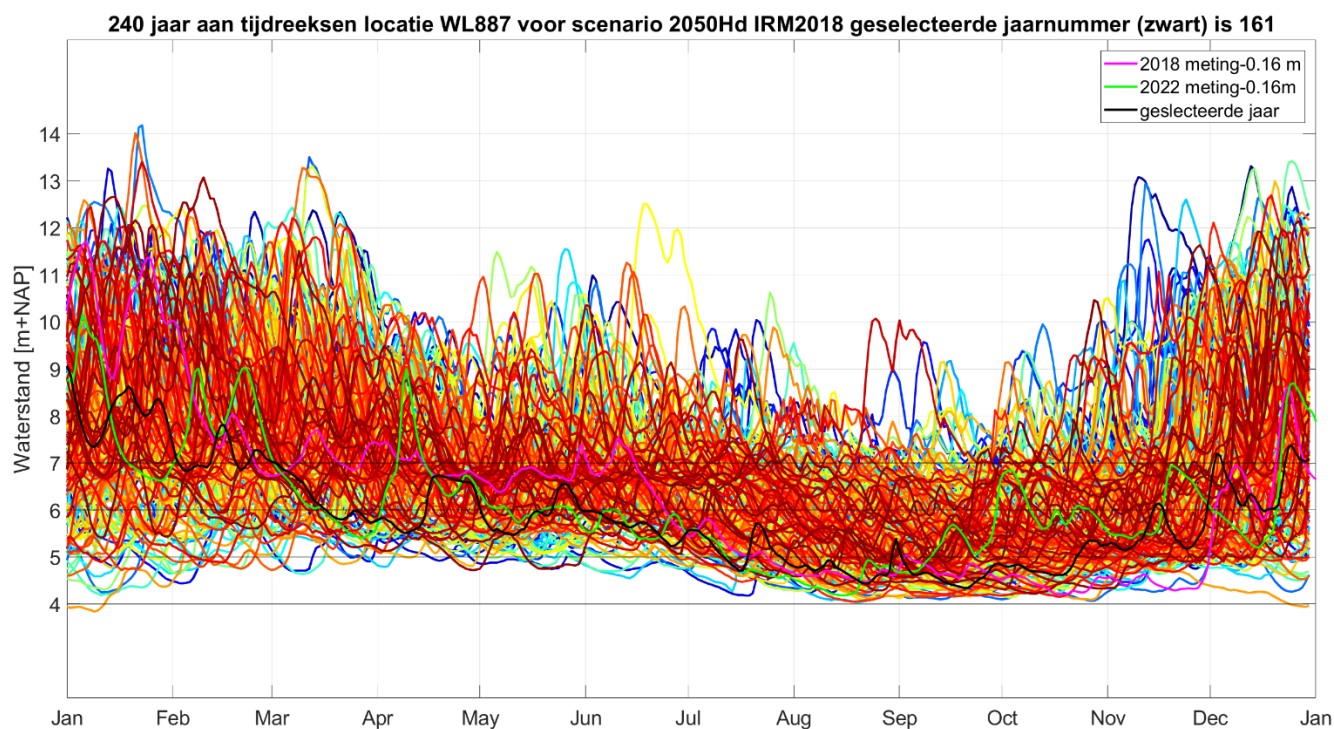
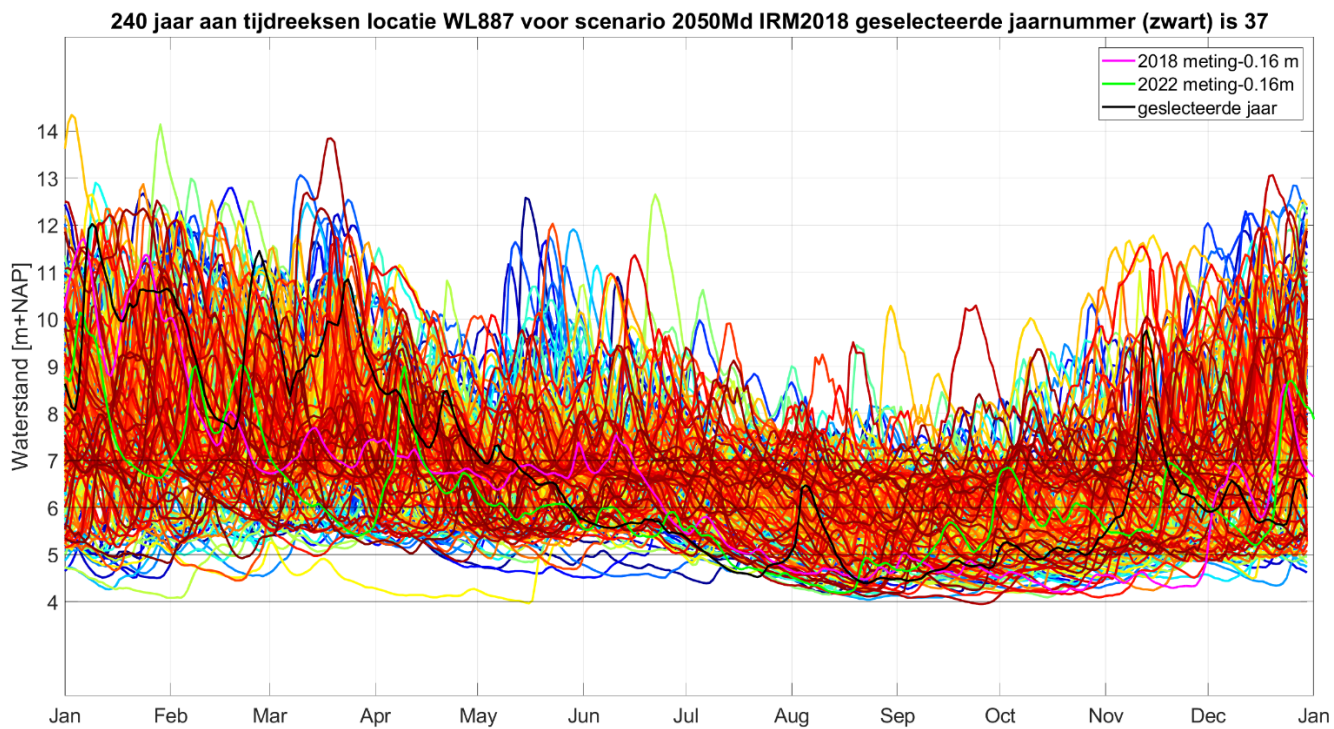
D Validatiefiguren D-HYDRO modelschematisatie Rijntakkenmodel

Onderstaande figuren, overgenomen uit Deltares, 2022c, geven een idee van de modelkwaliteit van het Rijntakkenmodel. Figuur D1 toont dat de overeenkomst tussen modelresultaat en meting heel goed is, maximale verschillen zijn niet meer dan 0,1 m.

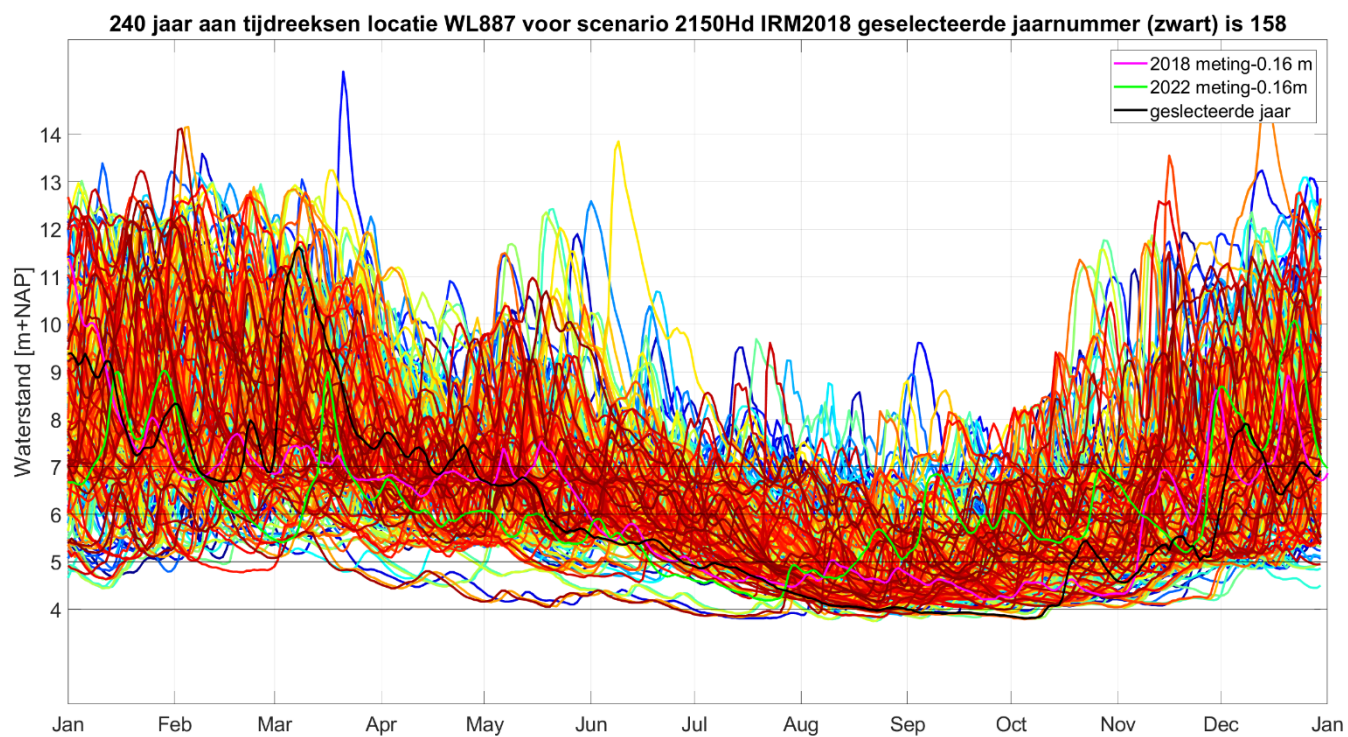
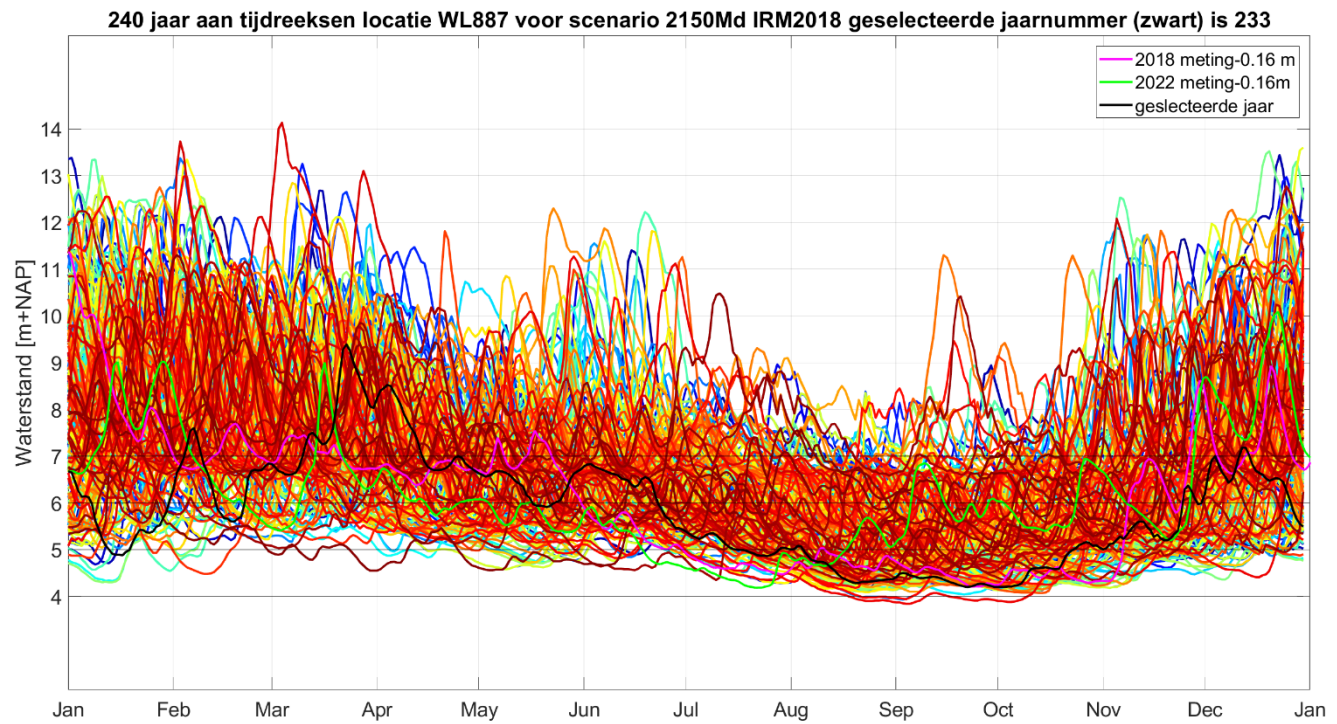


Figuur D.1: Validatie Rijntakkenmodel voor Nijmegen Haven (bron Deltares, 2022c)

E Representatief jaar



Figuur E.1: Waterstanden WL887 (rivieras Waal ter hoogte van Sluis Weurt) voor scenario's 2050Md (boven) en 2050Hd (onder). In zwart het representatieve jaar, de meting is vertaald vanaf Nijmegen-Haven



Figuur E.2: Waterstanden WL887 (rivieras Waal ter hoogte van Sluis Weurt) voor scenario's 2150Md (boven) en 2150Hd (onder). In zwart het representatieve jaar, de meting is vertaald vanaf Nijmegen-Haven

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

www.deltares.nl