

# Impact van klimaatverandering op de scheepvaart op de Rijn



Bachelor Eind Project CTB3000

Gelt Steiger  
4653173

TU-Delft

Begeleiders: Dr.Ir. R. Hut & Ir. V. Hooglander

# **Impact van klimaatverandering op de scheepvaart op de Rijn**

Hoe beïnvloedt klimaatverandering de waterhoogte in het stroomgebied van de Rijn en wat zijn de consequenties hiervan voor de scheepvaart?

Begeleiders:  
Dr.ir. Hut & ir. Hooglander

Bachelor Eind Project CTB3000

Gelt Steiger  
4653173  
Juni 2024

Figuur voorblad – (WegenWiki, 2021)

## **Voorwoord**

De Rijn, een van Europa's meest belangrijke rivieren, heeft door de eeuwen heen een cruciale rol gespeeld in zowel de natuurlijke omgeving als de menselijke samenleving. Echter, met de voortdurende veranderingen in het klimaat, staan we voor nieuwe uitdagingen met betrekking tot het beheer en behoud van deze belangrijke waterweg.

Dit Bachelor Eind Project is voortgekomen uit interesse wat voor invloed klimaatverandering heeft op hydrologische systemen. Gezien het uitgestrekte stroomgebied van de Rijn in Europa en de vitale rol die het speelt voor de verschillende landen, biedt dit stroomgebied een fascinerend studieobject om te onderzoeken wat voor invloed klimaatverandering heeft.

In dit onderzoek richt ik mij op de specifieke veranderingen in watermanagement die plaatsvinden in het stroomgebied van de Rijn als gevolg van klimaatverandering, met een bijzondere focus op de impact op scheepvaart. Ik heb onderzocht hoe veranderingen in de waterafvoer van het stroomgebied impact hebben op de waterhoogte van de rivier, op basis van verschillende klimaatscenario's, en wat de gevolgen hiervan zijn voor de scheepvaart.

Met dit onderzoek hoop ik een bijdrage te leveren aan de puzzel die klimaatverandering heet en de impact hiervan op mens en natuur. Maar ook belanghebbenden in staat te stellen om effectievere strategieën te ontwikkelen voor het beheer en behoud van deze waardevolle rivier.

Tot slot wil ik mijn oprechte dank uitspreken aan mijn twee begeleiders dr.ir. Hut en ir. Hooglander, de TU-Delft en Bart van het Netherlands eSciencecenter. Zonder hun steun en medewerking zou dit onderzoek niet mogelijk zijn geweest.

Den-Haag, juni 2024

Gelt Steiger

## **Samenvatting**

Deze studie onderzoekt de impact van klimaatverandering op de scheepvaart op de Rijn, een van Europa's meest belangrijke waterwegen. Klimaatverandering veroorzaakt significante veranderingen in de waterstanden van de Rijn, wat zowel economische als ecologische uitdagingen met zich meebrengt. De centrale vraag van dit onderzoek is: "Hoe beïnvloedt klimaatverandering de waterhoogte in het stroomgebied van de Rijn en wat zijn de consequenties hiervan voor de scheepvaart?"

Met behulp van het eWaterCycle platform, zijn hydrologische modellen zoals PCR-GlobWB en Wflow toegepast, om de toekomstige waterhoogtes van de Rijn te simuleren met verschillende klimaatscenario's (SSP1-2.6, SSP2-4.5 en SSP5-8.5). De resultaten tonen aan dat klimaatverandering leidt tot variaties in waterstanden, met hogere afvoeren in de winter en langer durende lagere afvoeren in de zomer. Onder het meest extreme SSP5-8.5 scenario wordt verwacht dat er minder water door de Rijn zal stromen vanwege verhoogde verdamping en het mogelijke verdwijnen van gletsjers. In het SSP2-4.5 scenario worden nattere winters en meer afvoer door smeltwater voorspeld. Het SSP1-2.6 scenario toont dat bij beperking van klimaatopwarming, een langzame daling in waterstanden kan optreden, met het behoud van smeltwater in de zomer.

Deze fluctuaties hebben grote gevolgen voor de scheepvaart. Laagwaterstanden in de zomer kunnen de navigatie bemoeilijken en economische verliezen veroorzaken, terwijl hoogwaterstanden in de winter de doorvaarthoogtes onder bruggen kunnen verminderen. De droogteperiodes kunnen de navigatie bij Kaub bemoeilijken, terwijl verhoogde waterstanden in de winter de doorvaarthoogte onder bruggen, zoals bij Maxau, kunnen verminderen.

De bevindingen wijzen op de noodzaak van aanpassingen zoals het verdiepen en versmallen van de rivier bij kritieke punten, evenals het ontwikkelen van schepen die met lagere waterstanden kunnen varen. Innovatieve technologieën en aanpassingen zullen ervoor zorgen dat de scheepvaart in de toekomst veilig en efficiënt blijft onder de veranderende klimaatomstandigheden.

Toekomstig onderzoek moet zicht richten op het verfijnen van de modellen en het gebruik van grotere klimaatdatasets om nauwkeurigere resultaten te verkrijgen. Dit onderzoek levert een belangrijke bijdrage aan het in kaart brengen van de uitdagingen die klimaatverandering met zich meebrengt op het stroomgebied van de Rijn. Door proactief op zoek te gaan naar oplossingen en het beperken van klimaatopwarming, kan de scheepvaart op de Rijn worden veiliggesteld, wat ten goede zal komen aan de regionale economie en samenleving.

# Inhoudsopgave

<i>Voorwoord</i> .....	<i>iii</i>
<i>Samenvatting</i> .....	<i>iv</i>
1. <i>Inleiding</i> .....	1
2. <i>Theoretisch kader</i> .....	2
2.1. De effecten van klimaatverandering op grote rivieren en hun waterhoogtes..	2
2.2. Beschikbare modellen en methoden om de impact van klimaatverandering op de waterhoogte van rivieren te voorspellen. ....	4
2.3. Randvoorwaarden voor de scheepvaart op de Rijn. ....	6
3. <i>Methodologie</i> .....	7
3.1. Geschikte hydrologische modellen.....	7
3.2. Benodigde gegevens .....	9
4. <i>Resultaten</i> .....	11
4.1. Gesimuleerde afvoer voor de klimaatscenario's .....	11
4.2. Wat voor invloed heeft de gesimuleerde afvoer op de waterhoogtes? .....	14
4.3. De invloed van de veranderde waterhoogte op de scheepvaart .....	16
4.4. Patronen die zichtbaar worden uit de gesimuleerde data.....	16
5. <i>Discussie</i> .....	17
5.1. Verhouding van de resultaten tot eerdere studies .....	17
5.2. Mogelijke lange termijn gevolgen.....	17
5.3. Reflectie op beperkingen .....	17
6. <i>Conclusies en aanbevelingen</i> .....	19
7. <i>Referenties</i> .....	20
<i>Bijlage A: Hydrologische modellen op het eWaterCycle platform</i> .....	23
<i>Bijlage B: Basisgrafieken uit het eWaterCycle model</i> .....	25
<i>Bijlage C: Afvoerplots Wflow</i> .....	27
<i>Bijlage D: Afvoer waterdiepte grafiek Maxau</i> .....	30

## 1. Inleiding

De Rijn is al eeuwenlang een belangrijke waterweg: essentieel voor zowel economische activiteiten als de ecologische gezondheid van Europa. Door klimaatverandering staat deze rivier onder druk, en wordt het stroomgebied geconfronteerd met nieuwe uitdagingen. Dit onderzoek focust op het analyseren van het veranderende klimaat en de specifieke gevolgen voor de waterhoogte in de Rijn, met een bijzondere nadruk op de scheepvaart.

De centrale vraag van dit onderzoek luidt: "Hoe beïnvloedt klimaatverandering de waterhoogte in het stroomgebied van de Rijn en wat zijn de consequenties hiervan voor de scheepvaart?" Door deze vraag te beantwoorden, wordt met dit onderzoek inzicht gegeven hoe waterstanden in de toekomst invloed hebben op de scheepvaart onder verschillende klimaatscenario's.

Gebruikmakend van geavanceerde hydrologische modellen zoals PCR-GLOBWB (Sutanudjaja et al., 2018) en Wflow (van Verseveld et al., 2024) op het eWaterCycle platform (Hut et al., 2022), onderzoekt dit project de voorspelde veranderingen in de waterhoogte van de Rijn onder verschillende klimaatscenario's. Deze modellen helpen met het weergeven van de invloed van klimaatverandering op de hydrologische eigenschappen van het stroomgebied, en helpen hiermee indirect met het in kaart brengen van bredere gevolgen zoals waterhoogte.

De informatie in dit rapport is ingedeeld in vijf hoofdstukken. Ten eerste is er een literatuuronderzoek gedaan naar de effecten van klimaatverandering op Europese stroomgebieden, met name de Rijn, en welke hydrologische modellen er beschikbaar zijn om de impact hiervan te voorspellen. Daarna volgt de uitleg van de methodologie. Hier is een keuze gemaakt in de modellen en is bekeken welke parameters er benodigd zijn om dit model effectief te laten lopen en over welke tijdsspan. Dit wordt gevuld door de resultaten van de modellen, de impact van de waterhoogte op de scheepvaart en welke patronen er zichtbaar zijn in de toekomst. Hierna zijn de resultaten vergeleken met eerdere studies over waterhoogte en worden de lange termijn gevolgen ervan besproken. Ten slotte is in het laatste hoofdstuk een conclusie geformuleerd welke aanpassingen er eventueel gemaakt moeten worden en hoe er op de impact van klimaatverandering geanticipeerd kan worden.

Verdere diepgang op de onderzoeken en cijfers kunnen worden gevonden in de bijlagen. In bijlage A zijn de gebruikte modellen beknopt uitgelegd, Bijlage B bevat de gesimuleerde grafieken die rechtstreeks vanaf het eWaterCycle platform zijn gehaald. In bijlage C zijn de gesimuleerde resultaten ter verduidelijking in het groot weergegeven en in bijlage D is de berekende afvoer – waterhoogte relatie weergegeven.

## **2. Theoretisch kader**

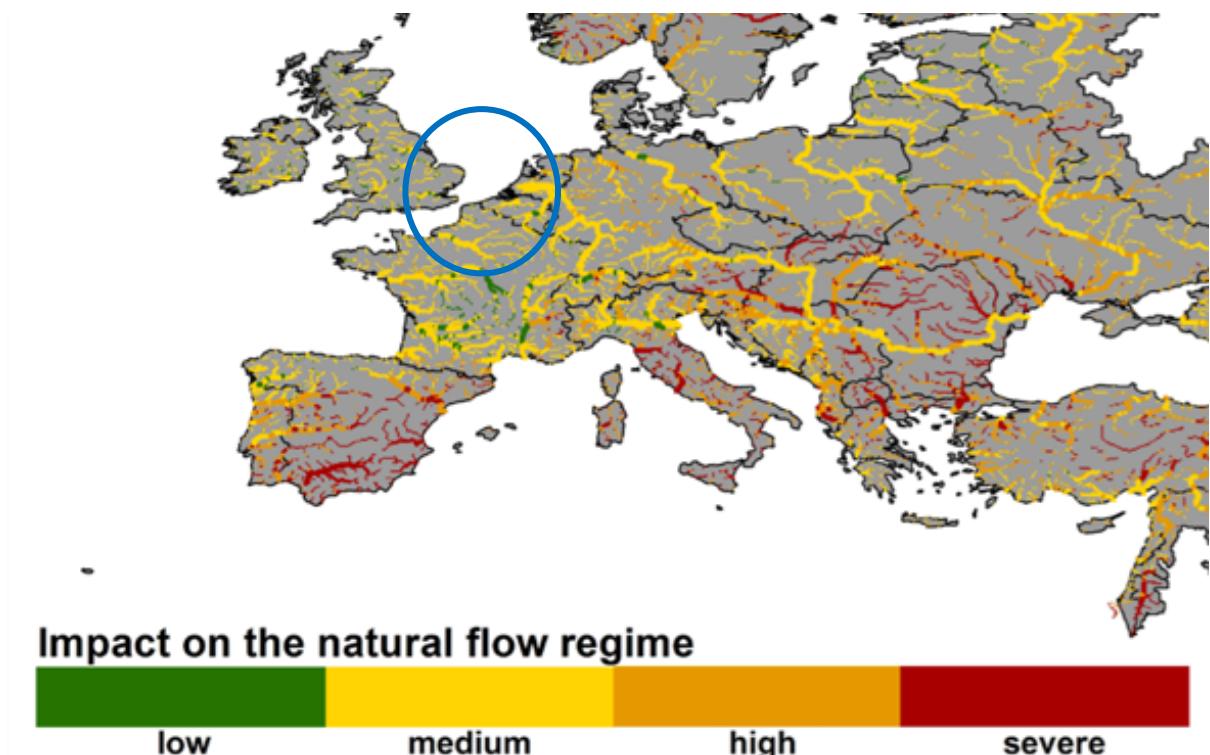
In het theoretische kader wordt ingegaan op de beschikbare relevante literatuur over de effecten van klimaatverandering op rivierwaterstanden en de modellen die gebruikt worden om deze veranderingen te voorspellen. Daarnaast is er gekeken naar de eisen om scheepvaart te kunnen laten varen op de Rijn. Er wordt specifiek ingegaan wat de toepassing is van geavanceerde hydrologische modellen, zoals PCR-GLOBW en Wflow, die essentieel zijn voor het begrijpen van de fysieke processen die waterhoogtes beïnvloeden. Dit onderdeel biedt belangrijke inzichten in de manieren waarop klimaatverandering impact heeft op rivierhydrologie en biedt daarnaast ondersteuning voor de ontwikkeling van effectieve beheerstrategieën voor de Rijn.

### **2.1. De effecten van klimaatverandering op grote rivieren en hun waterhoogtes.**

Klimaatverandering brengt significante veranderingen in de waterstanden van de Rijn met zich mee, die grote uitdagingen gaan vormen voor de scheepvaart. Klimaatverandering zorgt, met name in West-Europa, voor zowel droogte als extreme regenval (Schneider et al., 2013). Uit onderzoeken blijkt dat klimaatverandering met name impact heeft op de waterstanden in de zomer en in de winter (Parmet et al., 1995; Jonkeren et al., 2007). Parmet et al. (1995) heeft onderzocht wat de impact van klimaatverandering is op de afvoer van de Rijn. Hieruit blijkt dat in de winter de afvoer vooral gaat stijgen, wat zorgt voor hoge waterstanden, en in de zomer de afvoer juist zal dalen, wat zorgt voor lage waterstanden. Door lage waterstanden bestaat de kans dat schepen niet onder bruggen door kunnen varen. Droogte zal daarentegen zorgen voor een te lage waterstand in de Rijn, wat betekent dat er minder scheepvaart mogelijk zal zijn. Vooral de lage waterstanden hebben veel economische impact op de scheepvaart, zo blijkt uit een studie van Jonkeren et al. (2007). Hier is onderzocht wat de impact is van lage waterstanden rond het dorpje Kaub, en hieruit blijkt dat er jaarlijks een verlies van €28 miljoen wordt geleden door lage waterstanden. Want door deze lage waterstanden is scheepvaart niet mogelijk en ligt de economie op en rondom het getroffen vaargebied stil.

Een tegengesteld beeld volgt uit het onderzoek van Scheepers et al. (2018), daarin wordt juist een afvoer daling in de winter geconstateerd als gevolg van een vermindering aan sneeuwval, en juist in het voorjaar zal een stijging door eerdere warme temperaturen optreden. Dit volgt uit een onderzoek rond de Mackenzie rivier (Scheepers et al., 2018) op basis van de RCP-klimaatscenario's (Representative Concentration Pathway). Dit zijn verschillende scenario's die zijn beschreven in het vijfde assessment rapport van het IPCC (Core Writing Team et al., 2014) en het effect van broeikasgas uitstoot op temperatuurstijging weergeven. In dit IPCC-rapport zijn vier scenario's beschreven met elk hun eigen temperatuurstijging tot 2100. RCP2.6, RCP4.5, RCP6, RPC8.5. Door de stijging in temperatuur zal in de zomer grotere droogte ontstaan waardoor de afvoer een stuk lager zal zijn.

Afwisselende extreme afvoer gevolgd door droogte zal voor een fluctuerende waterstand zorgen in rivieren. Zowel de verhoging in extreme afvoer als de verhoging in droogte zal toenemen volgens SRES A2 en B2 emissie scenario's (van Vliet et al., 2013; Nakicenovic & Swart, 2000). Deze scenario's zijn van toepassing op de meest extreme gevallen van opwarming, waarin SRES A2 regionaal voor 2,0°C – 5,4°C opwarming zorgt en SRES B2 lokaal voor 1,4°C– 3,8°C opwarming zorgt. Dit betekent dat er in het stroomgebied van de Rijn in de zomer langere periodes van droogte zullen zijn en in de winter extreemere afvoeren zullen volgen.



**Figuur 2.1:** Effect van klimaatverandering op rivieraafvoer in Europa

Overgenomen uit "How will climate change modify river flow regimes in Europe?", door C. Schneider, 2013, *Hydrology and Earth System Sciences*, Volume 17, p. 332  
<https://doi.org/10.5194/hess-17-325-2013>

Gebaseerd op een onderzoek van Schneider et al. (2013) zal de impact van klimaatverandering op de afvoer van de Rijn minder gevoelig zijn voor extreme afvoeren (zie figuur 2.1). In deze figuur is zichtbaar gemaakt wat het effect van klimaatverandering is op de afvoer in verschillende rivieren in Europa. Deze medium impact op de Rijn komt doordat de temperatuurstijging in Midden-Europa minder groot zal zijn dan in bijvoorbeeld Zuid- of Oost-Europa (Schneider et al., 2013). Droogte zal in Midden- en West-Europa echter wel een groter probleem worden, dit wordt benadrukt in de studie van Arnell (2019). Hierin wordt een beeld beschreven dat er in de toekomst meer droogte zal zijn en dus lagere waterstanden zullen worden gecreëerd. Een ander onderzoek versterkt de resultaten die voortkomen uit een gekalibreerd model op de Rijn, waaruit volgt dat er een toename van droge dagen zal volgen voor de Rijn (Lobanova et al., 2018).

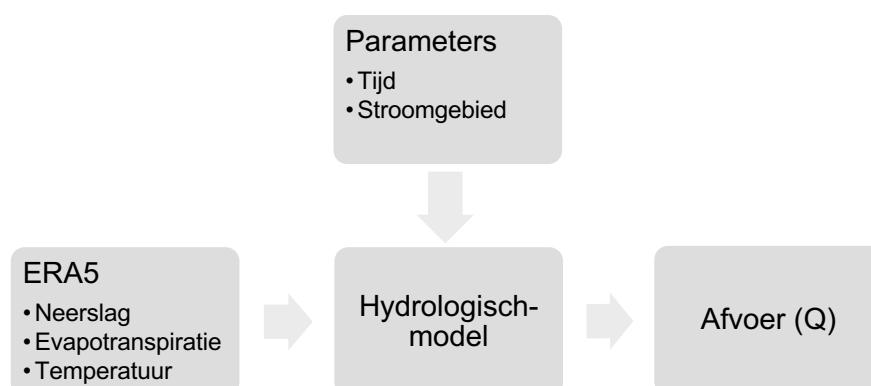
Ook al laten de onderzoeken verschillende uitkomsten zien, wat ze gemeen hebben is dat ze de noodzaak onderstrepen om adaptieve strategieën te ontwikkelen om de beschikbaarheid van de scheepvaart op de Rijn te versterken in het licht van fluctuerende waterstanden.

## 2.2. Beschikbare modellen en methoden om de impact van klimaatverandering op de waterhoogte van rivieren te voorspellen.

Om de impact van klimaatverandering op de waterhoogte van rivieren te voorspellen kan er gebruik gemaakt worden van verscheidene hydrologische modellen. De meeste modellen hebben een aantal parameters nodig als input en geven een afvoer (discharge) als output. Gezien dat dit onderzoek zich richt op de waterhoogte in de Rijn, wordt er alleen naar het stroomgebied van de Rijn gekeken en de afvoer die in de rivier belandt om de waterhoogte mee te schatten. Hierbij wordt gebruik gemaakt van de hydrologische modellen die beschikbaar zijn op het eWaterCycle platform (Hut et al., 2022). Dit platform biedt de mogelijkheid om gebruik te maken van de hydrologische modellen zonder daarvoor iets te hoeven installeren, downloaden of voor te bewerken. Dit maakt het mogelijk om hydrologische experimenten uit te voeren zonder al te diep in te gaan op geschreven code voor deze experimenten. De modellen volgen het FAIR principe (Findable, Accessible, Interoperable and Reproducible) (Wilkinson et al., 2016), waardoor ze op eenzelfde manier gebruikt kunnen worden.

Er is in dit onderzoek gebruik gemaakt van meerdere modellen, gezien dit een betrouwbaarder beeld zal geven dan wanneer er maar een enkel model gebruikt wordt.

Op het eWaterCycle platform worden op dit moment (juni 2024), meerdere modellen beschikbaar gesteld: Wflow, PCR-GlobWB, MARRMoT, Hype (Lindström et al., 2010), LISFLOOD (Van Der Knijff et al., 2010), en WALRUS (Brauer et al., 2014). In dit onderzoek is gewerkt met Wflow en PCR-GlobWB; deze modellen worden namelijk gekalibreerd aangeboden op het eWaterCycle voor het stroomgebied van de Rijn. Hierna wordt een korte uitleg gegeven over de gekozen modellen en wat de nuttige output is voor dit onderzoek. In bijlage A staan enkele figuren die de werking van de modellen illustratief verduidelijken. In bijlage B staan een aantal grafieken die rechtstreeks uit de eWaterCycle data zijn gehaald. Dit geeft weer wat de verschillende modellen inzichtelijk maken.



**Figuur 2.2:** Schematische weergave van de werking van een hydrologisch model

De werking van hydrologische modellen is schematisch weergegeven in figuur 2.2, zowel Wflow als PCR-GlobWB vereisen als input klimaatdata, zoals: neerslag, interceptie, sneeuwval en het smelten van sneeuw, evapotranspiratie, grondwater, oppervlaktewater en ondergrondse opslag van water. Daarnaast vereisen de modellen parameters zoals tijd, het stroomgebied en de locatie waarop de simulatie gedaan moet worden. Een van de outputs die de hydrologische modellen simuleren is de afvoer van het gespecificeerde stroomgebied. Dit is voor dit onderzoek de output die nodig is om de hoofdvraag te beantwoorden.

**Wflow (van Verseveld et al., 2024):**

Wflow maakt gebruik van 43 verschillende hydrologische modellen om hydrologische processen te simuleren voor oppervlakte- en rivieraafstroming. Dit model is ontwikkeld door Deltares en berekent de hydrologische processen per gridcell in het gespecificeerde stroomgebied. Op het eWaterCycle programma is hiervoor een gekalibreerd model beschikbaar voor het stroomgebied van de Rijn. De relevante output voor dit onderzoek, die dit model genereert, zijn met name de waterafvoer naar rivieren, de totale afvoer uit bepaalde sub-stroomgebieden en maximale afvoerpieken. De verschillende processen die Wflow gebruikt zijn weergegeven in figuur 2.2 in bijlage A.

**PCR-GlobWB (Sutanudjaja et al. 2018):**

PCRaster Global Water Balance is een hydrologisch model dat is ontworpen om de waterbalans wereldwijd te simuleren. Dit model is ontwikkeld aan de Universiteit Utrecht en berekent ook alle hydrologische processen per gridcell in het gespecificeerde stroomgebied. Dit model simuleert voor elke tijdsstap de vochtigheidsopslag, wateruitwisseling en atmosferische interactie. Het PCR-GlobWB geeft als nuttige output voor dit onderzoek data over rivieraafvoer.

In figuur 2.3 in bijlage A worden de verschillende cellen van PCR-GlobWB globaal weergegeven, waarin voor elke sector geldt: *onttrekking – terugvoer = consumptie*. Deze waterconsumptie komt bovenop de totale verdamping.

## 2.3. Randvoorwaarden voor de scheepvaart op de Rijn.



**Figuur 2.3:** Maatgevende brug in Maxau: Karlsruhe Rijn Brug

Noot. Overgenomen van (<https://kontent-structures.com/wp-content/uploads/2021/02/rijnbrug.jpg>)

Het rapport “*Regulations And Prescriptions For The Navigation On The Rhine*” (1994) van de CCNR (Central Commission for the Navigation of the Rhine) stelt een aantal randvoorwaarden voor de scheepvaart. Het CCNR-rapport is gebaseerd op een gemiddelde waterdiepte dat minstens 21 dagen per jaar voorkomt van 210 cm. Daarnaast wordt er gesteld dat de minimale doorvaarthoogte van bruggen 910 cm bedraagt bovenstroms de plaats Straatsburg. In een ander rapport van de CCNR uit 2020, wordt duidelijk dat de minimale waterdiepte in de Rijn 190 cm mag bedragen.

Uit verschillende onderzoeken (Christodoulou et al., 2020), (Jonkeren et al., 2007) en (Beuthe et al., 2014) komt naar voren dat de plaats Kaub wordt verkozen als ‘bottleneck’, gezien deze locatie van de rivier het meest gevoelig is voor waterstanden onder de 190 cm. De plaats Maxau wordt door een lagere brug (figuur 2.1) gezien als locatie waar scheepvaart door hoogwater niet mogelijk is. De Rijn wordt hier bij een waterstand van 750 cm afgesloten voor scheepvaart (*High Water in CW 50 | Contargo*, z.d.-a).

Kaub is dus maatgevend voor de laagwaterstanden en Maxau voor de hoogwaterstanden.

### 3. Methodologie

In hoofdstuk 3 staat de methodologie centraal. Beschreven is welke combinaties van modellen er gebruikt zijn om een goed beeld te krijgen van de impact van klimaatverandering op de waterhoogte van de Rijn en de invloed op de scheepvaart. Er is een selectie en voorbereiding van de dataset beschreven, inclusief gegevensbronnen en verwerkingstechnieken. Vervolgens wordt er ingegaan op de analytische en modelleringsmethoden die zijn toegepast, met aandacht voor modelvalidatie en statistische technieken om de betrouwbaarheid van de resultaten te bepalen.

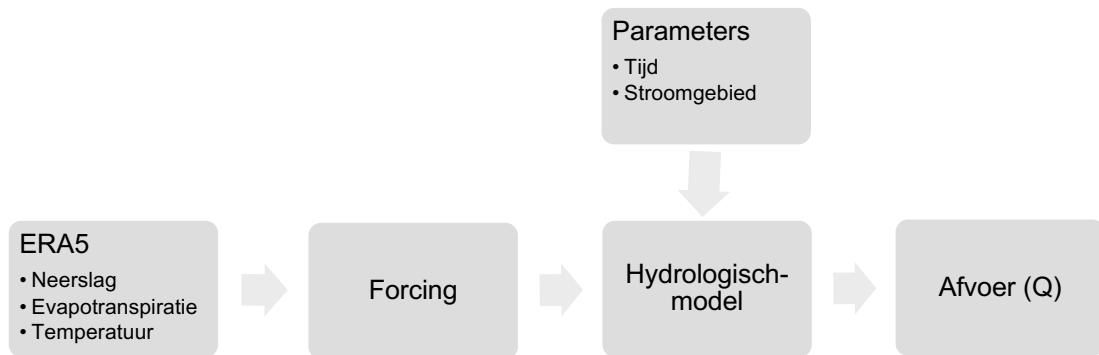
#### 3.1. Geschikte hydrologische modellen

Zoals in hoofdstuk 2.2 genoemd is, is er een combinatie van Wflow en PCR-GlobWB gebruikt. Door de resultaten van de twee verschillende modellen naast elkaar te leggen ter vergelijking, kan een betrouwbaarder beeld gevormd worden van de resultaten. PCR-GlobWB maakt het mogelijk om dagelijkse locatie specifieke grondwater, oppervlaktewater onttrekking, water consumptie en afvoeren uit te rekenen. Wflow is daarentegen een sneller model, het bevat namelijk SBM (Simple Bucket Model), wat nuttig kan zijn voor inzichten in waterafvoer en opslag in de Rijn.

SSPs	Impact	Temperatuurstijging
SSP1-2.6	Laag	Onder 2°C
SSP2-4.5	Middel	Rond 3°C
SSP5-8.5	Hoog	Rond 5°C

Tabel 3.1: Gebruikte SSP-pathways voor dit onderzoek.

In dit onderzoek zullen alle modellen een simulatie maken voor SSPs (Shared Socioeconomic Pathways) binnen een klimaatmodel. SSPs zijn de vernieuwde versies van de RCP-scenario's. Ze zijn gesorteerd van laag naar hoog en geven elk een klimaatscenario weer op basis van een sociaaleconomisch traject, waarop een CO2-concentratie (RCP) is gelinkt. De gekozen SSP-Pathways staan weergegeven in tabel 3.1, er is gekozen voor een lage-, middelhoge-, en hoge CO2 impact om een gespreid beeld te krijgen wat dit met de afvoer van de Rijn zal gaan doen.



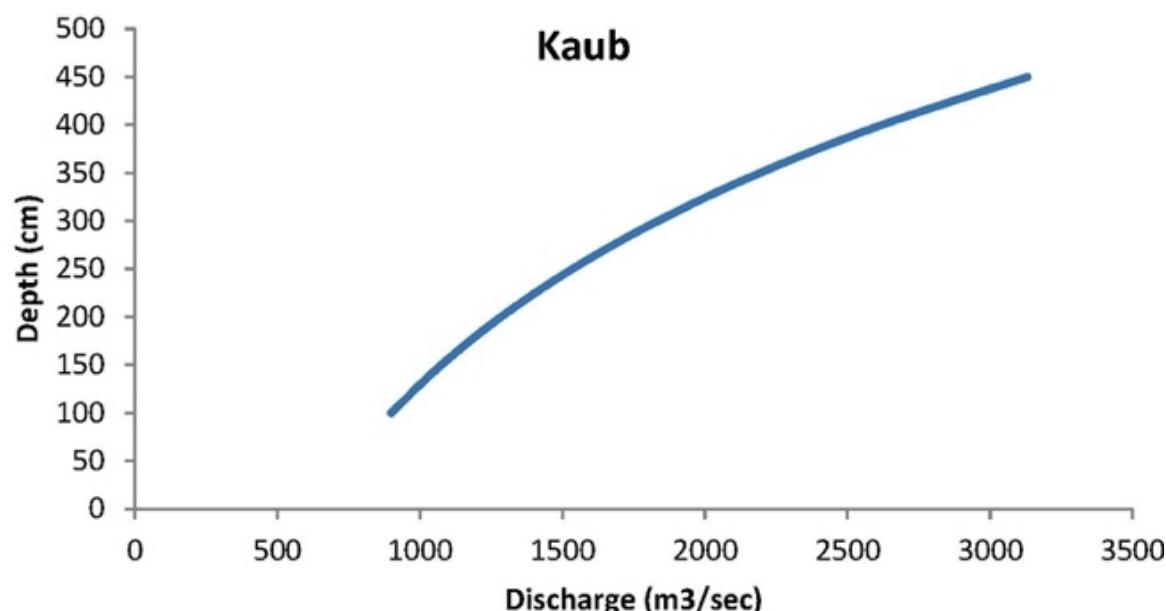
**Figuur 3.1:** Schematische weergave van de werking van een hydrologisch model met forcing op basis van de ERA5 klimaatdata

Voor het simuleren van de klimaatmodellen is forcing-data benodigd, dit is modelinvoer wat niet wordt beïnvloed door het hydrologische model. Forcing data wordt gebruikt om randvoorwaarden te definiëren gedurende de tijdsevolutie van het model, zoals luchttemperatuur en neerslag. Gezien deze data tot op de dag van vandaag bekend is en niet voor de toekomst, zal een stukje code bijgevoegd moeten worden om de forcing te genereren voor de tijdsperiode van het klimaatmodel. Daarnaast zal er voor de gesimuleerde afvoeren de minimale en maximale stand worden ingedeeld in (te) laag, normaal, en (te) hoog water. Tevens zal het model uit de gesimuleerde data het aantal dagen per jaar halen dat de scheepvaart niet kan varen door de waterstanden.

De gebruikte modellen zijn om te beginnen gekalibreerd op de twee locaties op basis van historische data. De data die op de eWaterCycle beschikbaar is, bestaat uit ERA5 data tussen 2000 en 2010. ERA5-5 data is een gedetailleerde, historische reconstructie van het weer en klimaat van de aarde vanaf 1940 tot heden, verkregen door het combineren van waarnemingen en modelberekeningen.

### 3.2. Benodigde gegevens

De data uit de eWaterCycle (ERA5 klimaatdata) bevat forcing data van de jaren waarop het model is gebaseerd, er zal dus voor elk model een apart forcing bestand gegenereerd moeten worden om deze data voor in de toekomst te kunnen verkrijgen. Hiervoor zijn de klimaatmodellen nodig waar deze forcing op gebaseerd wordt. Voor dit onderzoek wordt naar de klimaatscenario's uit tabel 3.1 gekeken.

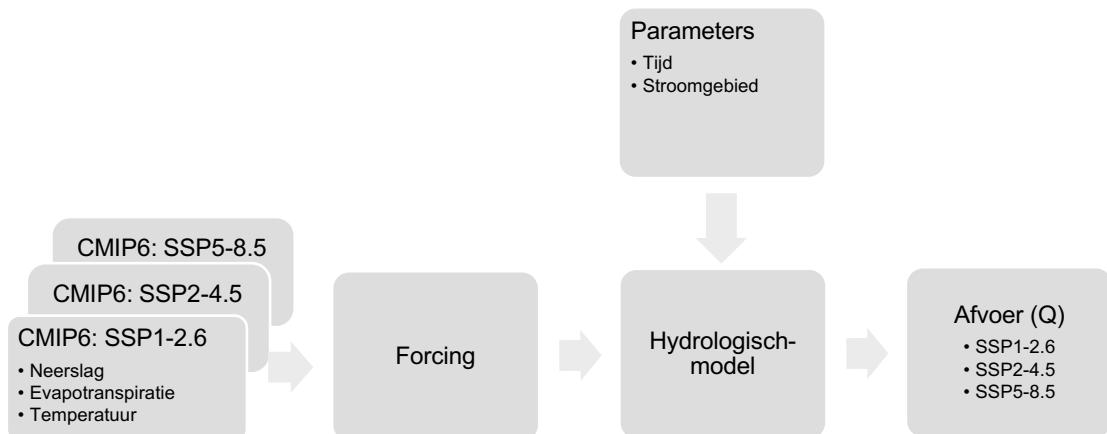


**Figuur 3.2:** Relatie tussen de afvoer van de Rijn en waterhoogte bij Kaub.

Noot. Gedeeltelijk overgenomen uit "Forecasting the impacts of climate change on inland waterways", door A. Christodoulou, 2019, *Transportation Research Part D: Transport & Environment*, Volume 82, p. 3 (<https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.012>)

Christodoulou et al. (2020) heeft de relatie tussen waterstand en afvoer onderzocht en weergegeven in een grafiek (figuur 3.1) voor de plaats Kaub. In paragraaf 2.3 is vastgesteld dat er een minimale waterdiepte van 190 cm benodigd (CCNR 2020) is bij Kaub. Uit de grafiek in figuur 3.1 valt af te lezen dat de waterdiepte onder de 190 cm valt als de afvoer lager is dan 1200 m<sup>3</sup>/s bij Kaub. Op deze locatie zal het model gemodelleerd worden zodat er een beeld ontstaat van het aantal momenten dat de waterstand onder dit niveau zal dalen.

Naast de minimale waterdiepte, is er een maximale waterdiepte voor scheepvaart om bruggen te kunnen passeren. Gezien Kaub en Maxau beiden benedenstroms Straatsburg liggen, zijn de bruggen op 910 cm boven het equivalente waterpeil gebouwd. Gezien Maxau de maatgevende locatie is voor hoogwaterstanden, zal hiervoor een maximale afvoer bij gelden. Met historische data van de waterstand en de afvoer in Maxau, is in Python een relatie geplot met behulp van spline-interpolatie en een lineair regressie model. Hieruit komt voort dat bij een waterstand van 750 cm, de afvoer in de rivier ongeveer 2800 m<sup>3</sup>/s bedraagt (Bijlage D). Deze afvoer zal worden gebruikt als maximale waarde die de afvoer mag bedragen voor de plaats Maxau.



**Figuur 3.3:** Schematische weergave van de werking van een hydrologisch model met forcing op basis van de ERA5 klimaatdata.

Om de modellen werkend te krijgen is eerst gebruik gemaakt van beschikbare ERA5 data op het eWaterCycle platform. Hiermee is de basis gelegd om vervolgens verder te gaan met het genereren van forcing data. De opgeslagen ERA5 data is beschikbaar van 2000 – 2010, in bijlage B zijn deze basismodellen terug te vinden zoals rechtstreeks vanaf het eWaterCycle platform zijn gegenereerd. Niet elk klimaatmodel werkt met elk hydrologisch model, de variabelen die nodig zijn moeten namelijk overeenkomen. Met een aparte notebook is gezocht, met als input de benodigde variabelen, naar een geschikt klimaatmodel. Dit notebook gaat de ESGF-database bij langs en slaat vervolgens alle mogelijke klimaatmodellen op in een aparte .JSON bestand, om vervolgens zelf een klimaatmodel te kiezen uit dit bestand. Hieruit kwamen al snel een aantal klimaatmodellen naar voren die gebruikt kunnen worden. Er is in dit geval gekozen voor een klimaatmodel uit Hamburg DE (MPI-ESM1-2-LR: Max Planck Institute Earth System Model), gezien de oorsprong van de klimaatwetenschappers altijd een kleine rol speelt in het maken van een klimaatmodel. Met een klimaatmodel kan vervolgens de CMIP6-forcing gegenereerd worden. Figuur 3.3 geeft een schematische weergave van de aanpassing aan de inputs van het hydrologische model. De ERA5-data wordt vervangen door de CMIP6-data van het klimaatmodel voor de drie SSPs.

## 4. Resultaten

In dit hoofdstuk zal blijken wat de effecten zijn van verschillende klimaatscenario's op de afvoer van de Rijn. Er wordt ingegaan op de modellen (PCR-GlobWB en Wflow) en de resultaten zelf, daarnaast zal er gekeken worden naar de invloed hiervan op de waterhoogte. Vervolgens wordt de impact van de simulaties op de scheepvaart onderzocht en is gekeken of er voor de toekomst trends af te lezen zijn uit de simulaties.

### 4.1. Gesimuleerde afvoer voor de klimaatscenario's

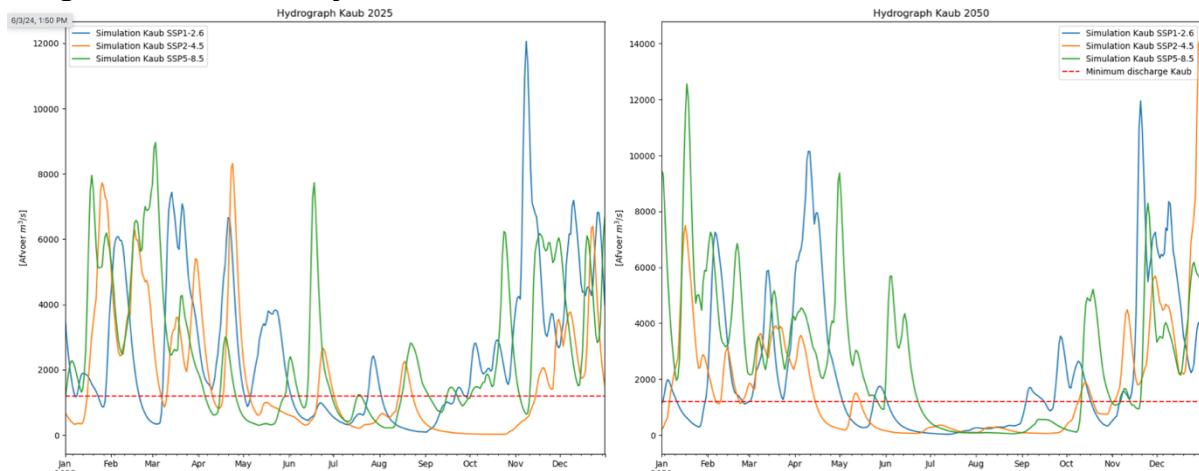
Voor het genereren van de CMIP6 forcing data is een aparte notebook geschreven (<https://doi.org/10.5281/zenodo.11657741>), hierin dient de te onderzoeken tijdspan in gevuld te worden en de variabelen van een klimaatmodel. Waarna vervolgens voor SSP1-2.6, SSP2-4.5 en SSP5-8.5 CMIP6 forcing data gegenereerd wordt. De drie forcings worden opgeslagen samen met een .txt bestand waar de directories van deze bestanden in staan en de gebruikte tijdspan. Voor dit onderzoek is er gekeken tot wat er in 2100 gebeurt met de Rijn, dit is echter tijdrovend en vereist veel opslag. Er is in dit geval gekozen om de tijdspan op te delen in drie delen van 25 jaar, 2025 – 2050, 2050 – 2075 en 2075 – 2100 om opslag te besparen. Daarnaast hebben de modellen wat tijd nodig om 'op te starten', bij de startdatum worden er twee maanden vanaf gehaald om te voorkomen dat dit zichtbaar is in het model.

Vervolgens kan, in het notebook van het hydrologische model zelf (<https://doi.org/10.5281/zenodo.11657741>), de naam van dit .txt bestand, worden ingevuld. De benodigde tijdspan en de directories worden hieruit gehaald en gebruikt om het model te laten simuleren voor de twee locaties Kaub en Maxau. Hieruit komen een tweetal grafieken van de afvoer voor elke locatie. De eerste rij grafieken bevatten een jaaroverzicht van het laatste jaar van de tijdspan, de tweede rij grafieken bevatten de gehele tijdspan van, in dit geval, 25 jaar. Naast de gesimuleerde afvoer toont het model ook het aantal dagen per jaar dat de afvoer de kritieke waarden overschrijdt.

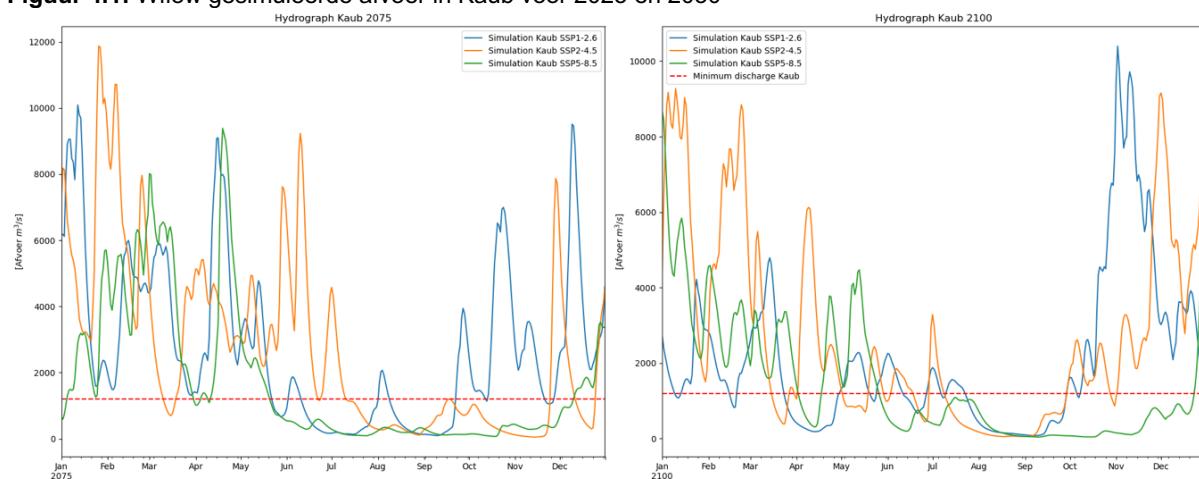
Voor de betrouwbaarheid van dit onderzoek en dus de simulaties zijn er twee modellen gemaakt om naast elkaar te leggen, Wflow en PCRGlob-WB. Het PCRGlob-WB model geeft echter tot op het schrijven van dit rapport een error op toekomsts simulatie. De grid-grootte van de ERA5-data komt niet overeen met de grid-grootte van de gegenereerde CMIP6-data. Gezien dit iets is wat op de achtergrond van het eWaterCycle platform opgelost zou moeten worden, is ervoor gekozen om alleen Wflow te gebruiken. Beide modellen zijn werkend (bijlage B), alleen is het nu nog niet mogelijk om met de CMIP6-data voor de toekomst te simuleren in PCRGlob-WB. Om de resultaten van dit onderzoek toch zo betrouwbaar mogelijk te houden, zijn de modellen met de historische data die beschikbaar zijn naast elkaar gehouden en vergeleken. Zodra het verschil in grid-grootte probleem opgelost is, kunnen in de toekomst simulaties met elkaar vergeleken worden om een beter en betrouwbaarder beeld te krijgen van de afvoer van de Rijn.

De gesimuleerde resultaten worden onderstaand per locatie toegelicht, in bijlage C staan de gesimuleerde resultaten van beide locaties over de drie tijdspannen groter weergegeven ter verduidelijking.

## Laagwater resultaten bij Kaub



**Figuur 4.1:** Wflow gesimuleerde afvoer in Kaub voor 2025 en 2050



**Figuur 4.2:** Wflow gesimuleerde afvoer in Kaub voor 2075 en 2100

De simulatie van de afvoerdata geeft een gedetailleerd beeld van het toekomstige gedrag van de Rijn onder de verschillende klimaatscenario's. Figuren 4.1 en 4.2 geven de gesimuleerde resultaten van Kaub in de jaren 2025, 2050, 2075 en 2100 weer. De blauwe lijnen geeft het SSP1-2.6 scenario weer, oranje SSP2-4.5 en groen SSP5-8.5. De rode stippellijn geeft de kritische afvoer van  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  weer.

Er valt duidelijk af te lezen dat de in de zomer langere periodes van droogte zullen zijn en in de winter meer hogere afvoerpieken. Deze fluctuaties zullen een aanzienlijke invloed hebben op de scheepvaart door de ondiepe waterstanden.

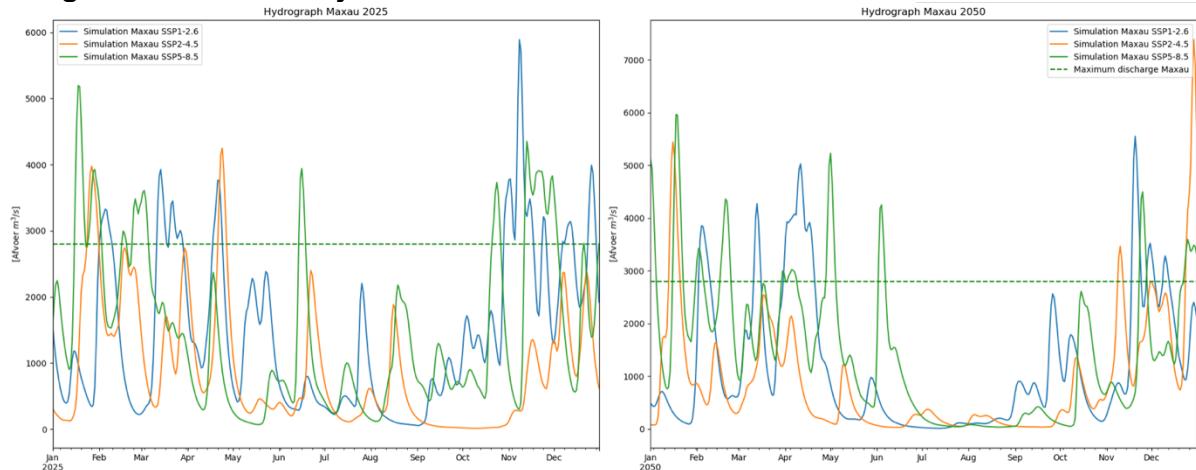
Gemiddeld aantal dagen per jaar onder het minimum in Kaub

SSPs	2025 - 2050	2050 - 2075	2075 - 2100
SSP1-2.6	145	150	153
SSP2-4.5	162	174	158
SSP5-8.5	161	181	198

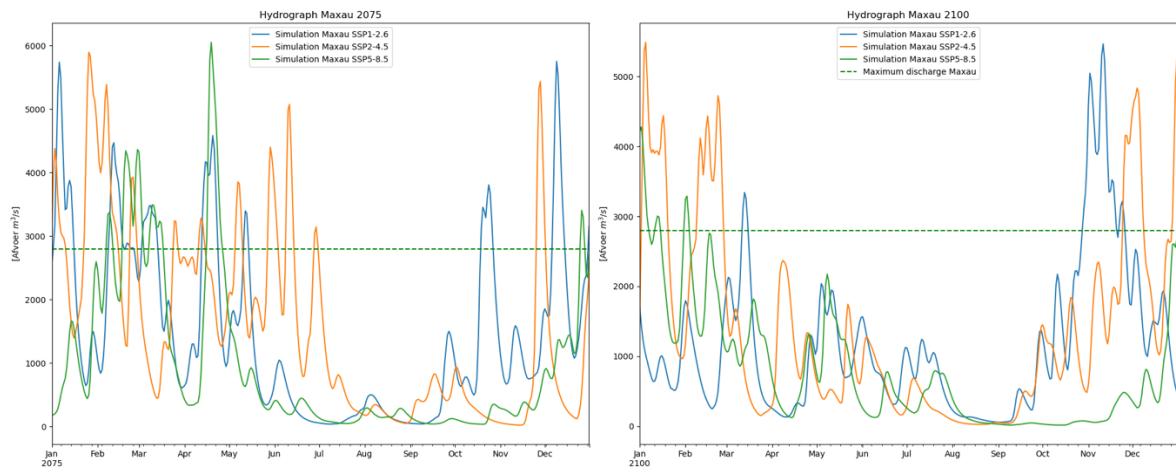
**Tabel 4.1:** Aantal keren dat de afvoer onder de kritieke waarde van  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  komt in Kaub

Tabel 4.1 toont het aantal dagen per jaar dat de afvoer zich bij Kaub onder  $1200 \text{ m}^3/\text{s}$  valt voor de drie tijdspannen. Voor zowel scenario SSP1-2.6 als SSP5-8.5 geldt dat er een stijging te zien is in dit aantal dagen. Wat opvalt, is dat scenario SSP2-4.5 eerst een stijging laat zien, maar in de laatste 25 jaar een daling.

## Hoogwater resultaten bij Maxau



**Figuur 4.3:** Wflow gesimuleerde afvoer in Maxau voor 2025 en 2050



**Figuur 4.4:** Wflow gesimuleerde afvoer in Maxau voor 2075 en 2100

Figuren 4.3 en 4.4 geven de gesimuleerde resultaten van Maxau in de jaren 2025, 2050, 2075 en 2100 weer. Wederom geeft de blauwe lijn het SSP1-2.6 scenario weer, oranje SSP2-4.5 en groen SSP5-8.5. De groene stippellijn geeft de kritische afvoer van  $2800 \text{ m}^3/\text{s}$  weer. Ook bij Maxau valt uit de grafieken af te lezen dat er langere perioden van droogte gaan ontstaan en in de winter hogere afvoerpieken. Daarnaast valt op te merken dat voor Maxau steeds minder vaak de kritische waarde wordt overschreden.

Gemiddeld aantal dagen per jaar boven het maximum in Maxau

SSPs	2025 - 2050	2050 - 2075	2075 - 2100
SSP1-2.6	50	53	44
SSP2-4.5	47	50	56
SSP5-8.5	54	46	47

**Tabel 4.2:** Aantal keren dat de afvoer boven de kritieke waarde van  $2800 \text{ m}^3/\text{s}$  komt in Maxau

Tabel 4.1 toont het aantal dagen per jaar dat de afvoer zich bij Maxau boven  $2800 \text{ m}^3/\text{s}$  valt voor de drie tijdspannen. Scenario SSP1-2.6 laat een duidelijke daling in het aantal dagen per jaar zien, bij SSP5-8.5 is eerst een daling waar te nemen, waarna het stabiliseert. Wat wederom opvalt, is dat scenario SSP2-4.5 een stijging laat zien in het aantal dagen dat de afvoer hoger is dan de kritische waarde.

Voor beide locaties is dus zichtbaar dat de afvoer van de Rijn anders reageert op het SSP2-4.5 scenario in de toekomst dan op de andere twee scenario's. Het SSP2-4.5 scenario zorgt voor beide locaties in een afname van het aantal dagen dat de kritieke waarde wordt overschreden. De gesimuleerde resultaten bieden een uitgebreid overzicht van de afvoer van de Rijn en benadrukken het probleem van klimaatverandering in de toekomst. Om een beter beeld te geven wat de invloed is op de waterhoogte van de Rijn worden de resultaten in paragraaf 4.2 met elkaar vergeleken.

#### **4.2. Wat voor invloed heeft de gesimuleerde afvoer op de waterhoogtes?**

De verschillende klimaatscenario's hebben elk een andere invloed op de waterhoogte en dus ook voor de scheepvaart op de Rijn. In tabel 4.3 zijn de gemiddelde 25-jaars waarden van de twee locaties samengevoegd om een overzichtelijk beeld te vormen.

	Keren boven maximum Maxau			Keren onder minimum Kaub		
SSPs	2025-2050	2050-2075	2075-2100	2025-2050	2050-2075	2075-2100
SSP1-2.6	50	53	44	145	150	153
SSP2-4.5	47	50	56	162	174	158
SSP5-8.5	54	46	47	161	181	198

**Tabel 4.3:** Aantal keren dat de afvoer de kritieke waarden overschrijdt voor 2025 - 2100

Bij het vergelijken van het aantal dagen dat er geen scheepvaart mogelijk is, valt direct op dat de scenario's een wisselend beeld geven op basis van de gemiddelden. Voor Maxau is er een kleine reductie in het aantal dagen met hoogwater richting het einde van de eeuw voor SSP1-2.6 en SSP5-8.5, terwijl er voor SSP2-5.5 een toename is. Voor Kaub is zichtbaar dat het aantal dagen met laagwater zal toenemen in SSP1-2.6 en SSP5-8.5. Klimaatscenario SSP2-4.5 lijkt daarentegen voor nattere periodes te zorgen. Het algemene beeld wordt hierbij geschatst dat er in de toekomst voor scenario SSP1-2.6 en SSP5-8.5 een toename zal zijn in het aantal dagen dat scheepvaart niet mogelijk zal zijn, terwijl het SSP2-4.5 scenario juist een afname van dat aantal dagen laat zien.

Om deze aannames te bevestigen is er een stuk code toegevoegd aan het hydrologische model, die het aantal dagen per jaar voor elke tijdspan in een .csv-bestand opslaat. In een aparte notebook kan vervolgens een plot worden gemaakt van die aantal dagen over de gehele tijdspan van 2025 tot 2100 (figuur 4.5) voor elk klimaatscenario. Om een zichtbaar beeld te geven wat er gebeurt met het aantal dagen per jaar dat de waterhoogte per locatie de kritische waarde overschrijdt in de toekomst, zijn er aan de grafieken trendlijnen toegevoegd.



**Figuur 4.5:** Het aantal dagen dat de waterstanden de kritische waarden overschrijden

De trends die weergegeven worden in de grafieken bevestigen de aannames die op basis van de tabelgegevens zijn gemaakt. Voor SSP1-2.6 en SSP5-8.5 neemt het aantal dagen met hoogwater bij Maxau toe, terwijl het aantal dagen met laagwater bij Kaub afneemt. Voor SSP2-4.5 neemt echter het aantal dagen met hoogwater bij Maxau toe en het aantal dagen met laagwater bij Kaub af. Dit geeft het beeld dat er door het SSP2-4.5 scenario meer water door de Rijn zal stromen in de toekomst, waardoor ook de waterstand hoger zal zijn.

### 4.3. De invloed van de veranderde waterhoogte op de scheepvaart



**Figuur 4.6:** Het aantal dagen dat scheepvaart niet mogelijk is op de Rijn

De veranderde waterhoogte heeft een grote impact op de scheepvaart. Door het aantal overschrijdingen van de twee locaties te combineren, kan een plot worden gemaakt van het aantal dagen waarop scheepvaart tussen Kaub en Maxau niet mogelijk is (figuur 4.6). Uit deze grafiek blijkt dat alleen voor scenario SSP5-8.5 het aantal dagen waarop scheepvaart niet mogelijk is zal toenemen. De scenario's SSP1-2.6 en SSP2-4.5 laten beide een geleidelijke afname zien, hoewel SSP2-4.5 begint met een hoger aantal dagen dat scheepvaart niet mogelijk is. Desondanks is duidelijk zichtbaar dat dit een probleem vormt, aangezien het aantal niet bevaarbare dagen meer dan de helft van een jaar beslaat voor elk scenario.

### 4.4. Patronen die zichtbaar worden uit de gesimuleerde data

Uit de gesimuleerde data kunnen verschillende patronen worden afgeleid die nodig zijn voor de toekomstige scheepvaart en waterbeheer van de Rijn. Er is een duidelijke toename zichtbaar van droogteperiodes in de zomer, vooral onder scenario's SSP1-2.6 en SSP5-8.5. Dit zal leiden op tot een verhoogd risico op lage waterstanden die de scheepvaart kunnen belemmeren.

Daarnaast is er in scenario SSP2-4.5 een significante toename van hoogwater dagen in de winter. Dit scenario voorspelt nattere winters die vaker kunnen leiden tot overstromingen en hoge waterstanden, wat een uitdaging vormt voor zowel scheepvaart als infrastructuur zoals bruggen.

Ook laat de data zien dat de jaarlijkse variabiliteit in waterstanden toeneemt richting het jaar 2100. Dit zal betekenen dat het stroomgebied van de Rijn zich moet voorbereiden op zowel langere perioden van droogte als extreemere pieken in de waterafvoer.

Kortom, de gesimuleerde data benadrukt de noodzaak om strategieën te ontwikkelen om zowel de uitdagingen van droogte als overstromingen aan te pakken. Dit is van essentieel belang om de scheepvaart op de Rijn duurzaam te kunnen blijven ondersteunen.

## **5. Discussie**

### **5.1. Verhouding van de resultaten tot eerdere studies**

De resultaten uit dit onderzoek bevestigen grotendeels de bevindingen van eerdere studies, zoals die van Parmet et al. (1995) en Jonkeren et al. (2007), die wijzen op significante veranderingen in de waterstanden van de Rijn als gevolg van klimaatverandering. Net als in deze eerdere studies, tonen de modellen in dit onderzoek aan dat de waterstanden in de winter zullen stijgen en in de zomer zullen dalen, wat leidt tot uitdagingen voor de scheepvaart. Ook komt de toename van droogteperiodes en extreme regenval overeen met de bevindingen van Arnell (2019) en Schneider et al. (2013).

### **5.2. Mogelijke lange termijn gevolgen**

De gesimuleerde resultaten geven voor elk klimaatscenario een ander beeld. Voor het meest extreme SSP5-8.5 scenario, is duidelijk te zien dat er minder water door de Rijn gaat stromen. Dit zal met name komen door meer verdamping door hogere temperaturen. Daarnaast is het een mogelijkheid dat bij dit extreme scenario de gletsjers compleet weg zijn gesmolten, waardoor er geen smeltwater meer door de Rijn heen zal stromen. Scenario SSP2-4.5 geeft een ander beeld, namelijk een matige stijging in temperatuur. Bij dit matige scenario is de mogelijkheid dat er nog wel ijs terug groeit, maar door temperatuurstijging steeds verder zal smelten, en dus voor meer afvoer zal zorgen in de Rijn. Het betere SSP1-2.6 scenario laat vooral zien dat, als men klimaatopwarming beperkt, er een langzame daling in zicht komt. Wat betekent dat er ijs terug kan groeien, en voor smeltwater zal zorgen. Het is dan ook een geschikt voor een vervolgonderzoek om de impact van klimaatverandering op gletsjers en de invloed op rivieren te onderzoeken.

Op lange termijn zullen de veranderingen in waterstanden waarschijnlijk leiden tot aanzienlijke verstoringen van de scheepvaart op de Rijn. Voor de verschillende klimaatscenario's, die elk van een stijging in temperatuur uitgaan, zal het aantal dagen dat scheepvaart tussen Kaub en Maxau niet mogelijk is meer dan een half jaar bedragen. De droogteperiodes kunnen de navigatie bemoeilijken bij Kaub, wat een knelpunt vormt door laagwater. Aan de andere kant kunnen verhoogde waterstanden in de winter de doorvaarthoogte onder bruggen verminderen, wat eveneens de scheepvaart zal belemmeren. Dit speelt met name een rol bij de doorvaarthoogte van de brug bij Maxau. Deze fluctuaties in waterstanden vereisen adaptieve maatregelen, zoals de verdieping van de vaargeulen, maar ook de mogelijkheid om het hoogwater op te kunnen vangen. Waterbeheer strategieën zullen dan ook verbeterd moeten worden, om de scheepvaart veilig en efficiënt te houden.

### **5.3. Reflectie op beperkingen**

De klimaatscenario's SSP1-2.6, SSP2-4.5 en SSP5-8.5 zijn toegepast op een enkel klimaatmodel, terwijl er veel meer scenario's en modellen beschikbaar en toepasbaar zijn op de Rijn. Dit zal een aanzienlijke impact hebben op de betrouwbaarheid van de voorspellingen.

Daarnaast is dit onderzoek volledig afhankelijk van de kalibratie die op het eWaterCycle programma beschikbaar is. De parameters die in het gebruikte model ingevoerd zijn kunnen aanzienlijk veel impact hebben op de afvoersimulatie van de Rijn. Daarnaast zijn gebruikte modellen voor deze studie werkend gemaakt op basis van beschikbare ERA5-klimaatdata van 2000-2010. Ondanks dat deze data waardevol is, kan het minder nauwkeurige resultaten leveren, dan wanneer de modellen werkend zijn gemaakt voor een grotere klimaatdataset.

Zoals eerder al genoemd is voor de betrouwbaarheid van de resultaten gebruik gemaakt van twee hydrologische modellen, hiervan bleek echter een op de achtergrond geen resultaten te simuleren. Hierdoor zijn de resultaten van dit onderzoek op een enkel hydrologisch model gebaseerd en is het niet mogelijk om mogelijke foutieve resultaten te filteren.

Ondanks het gebruik van drie klimaatscenario's, reeds gekalibreerde hydrologische modellen voor de Rijn en een enkel hydrologisch model, bieden de resultaten waardevolle inzichten. Voor betrouwbaardere resultaten zullen meerdere modellen in de toekomst naast elkaar gelegd moeten worden om de resultaten met elkaar te vergelijken, gebruikmakend van verschillende klimaatmodellen en -scenario's. Daarnaast zou het gebruik van een grotere ERA5-dataset de basismodellen nog nauwkeuriger kunnen maken.

Door in een vervolgonderzoek deze aanpassingen toe te passen, wordt een nog duidelijker beeld geschetst van de afvoeren. Voor eventuele onderzoeken in de toekomst zijn de geschreven modellen online beschikbaar en kunnen ze worden aangepast aan een locatie op de Rijn. Met als tweede aanpassing de randvoorwaarden.

## **6. Conclusies en aanbevelingen**

Om de toekomstige scheepvaart op de Rijn duurzaam te kunnen onderhouden, zijn diverse aanpassingen noodzakelijk. De veranderende waterstanden, veroorzaakt door klimaatverandering, zullen de scheepvaart op de Rijn aanzienlijk beïnvloeden. De gesimuleerde data laat zien dat er in de toekomst langere periodes van droogte en extremer hoogwaterstanden zullen optreden, wat resulteert in frequente problemen met te ondiepe of te hoge waterstanden voor veilige scheepvaart.

Een mogelijke oplossing voor het probleem van te lage waterstanden bij Kaub is het versmallen en verdiepen van de rivier op dat punt. Dit zou de waterdiepte vergroten en de rivier in staat stellen haar afvoercapaciteit te behouden. Deze aanpassing kan enige tijd in beslag nemen en zal regelmatige baggerwerkzaamheden vereisen om de waterdiepte te behouden. Voor deze aanpassingen ligt al een plan (Muller & King 2023) om de rivier bij Kaub tegen 2030 met 20 cm te verdiepen. Dit plan stuit echter op kritiek vanwege de mogelijke impact op de leefbaarheid in de rivier.

Naast infrastructurele aanpassingen is het belangrijk om scheepvaart strategieën te herzien en aan te passen aan de veranderende omstandigheden. Men zou kunnen denken aan het ontwikkelen van schepen die met lagere waterstanden zouden kunnen varen. Daarmee kan de afhankelijkheid van de huidige vereiste waterdiepte van 190 cm verminderd worden. Deze aanpak biedt een duurzame oplossing door de scheepvaart minder gevoelig te maken voor fluctuaties in waterstanden.

Gezien de toenemende variabiliteit van waterstanden en de langere periodes van droogte, is doorlopend onderzoek naar en ontwikkeling van innovatieve oplossingen noodzakelijk. Het is essentieel om de mogelijkheden voor het behouden van de scheepvaart op de Rijn continu te onderzoeken. Aangezien de rivier een belangrijke economische inkomstenbron is voor de omliggende regio's. Innovatieve technologieën en aanpassingen zullen ervoor zorgen dat de scheepvaart efficiënt en veilig blijft onder veranderende klimaatomstandigheden.

In antwoord op de hoofdvraag: klimaatverandering zal de scheepvaart van de Rijn significant beïnvloeden door een toename in de variabiliteit van waterstanden, met langere periodes van droogte en extremer hoogwaterstanden. Om de scheepvaart duurzaam te behouden, zijn aanpassingen zoals het verdiepen en versmallen van de rivier bij kritieke punten, evenals het aanpassen van de scheepvaart zelf, noodzakelijk. Door proactief te investeren in deze maatregelen en het beperken van klimaatopwarming, kan de scheepvaart op de Rijn veiliggesteld worden, wat ten goede zal komen aan de regionale economische stabiliteit, ondanks de uitdagingen die klimaatverandering met zich meebrengt.

## 7. Referenties

- Ahmadi-Nedushan, B., St-Hilaire, A., Ouarda, T. B. M. J., Bilodeau, L., Robichaud, É., Thiémonge, N., & Bobée, B. (2006). Predicting river water temperatures using stochastic models: case study of the Moisie River (Québec, Canada). *Hydrological Processes*, 21(1), 21–34. <https://doi.org/10.1002/hyp.6353>
- Arnell, N. W. (1999). The effect of climate change on hydrological regimes in Europe: a continental perspective. *Global Environmental Change*, 9(1), 5–23. [https://doi.org/10.1016/s0959-3780\(98\)00015-6](https://doi.org/10.1016/s0959-3780(98)00015-6)
- Bestand: Rijn map.jpg - Wegenwiki. (z.d.). [https://www.wegenwiki.nl/Bestand:Rijn\\_map.jpg](https://www.wegenwiki.nl/Bestand:Rijn_map.jpg)
- Beuthe, M., Jourquin, B., Urbain, N., Bruinsma, Lingemann, I., Ubbels, B., & Van Heumen, E. (2012). Estimating the Impacts of Water Depth and New Infrastructures on Transport by Inland Navigation: A Multimodal Approach for the Rhine Corridor. *Procedia: Social & Behavioral Sciences*, 54, 387–401. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.758>
- Brauer, C. C., Teuling, A. J., Torfs, P. J. J. F., and Uijlenhoet, R.: The Wageningen Lowland Runoff Simulator (WALRUS): a lumped rainfall-runoff model for catchments with shallow groundwater, *Geosci. Model Dev.*, 7, 2313–2332, <https://doi.org/10.5194/gmd-7-2313-2014>, 2014.
- CCNR. (2020). INLAND NAVIGATION IN EUROPE. In CCNR MARKET INSIGHT. [https://www.ccr-zkr.org/files/documents/om/om20\\_III\\_en.pdf](https://www.ccr-zkr.org/files/documents/om/om20_III_en.pdf)
- Centrale Commissie. (2011). PROTOCOL 9. In *Klimaatverandering en Rijnvaart*. [https://www.ccr-zkr.org/files/infovoiedeau/Resolution2011-II-9\\_nl.pdf](https://www.ccr-zkr.org/files/infovoiedeau/Resolution2011-II-9_nl.pdf)
- Christodoulou, A., Christidis, P., & Bisselink, B. (2020). Forecasting the impacts of climate change on inland waterways. *Transportation Research. Part D, Transport And Environment*, 82, 102159. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.10.012>
- Core Writing Team, Pachauri, R. K., Meyer, L., & Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. IPCC. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR\\_AR5\\_FINAL\\_full\\_wcover.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf)
- Dooge, J. C. I. (1992). Hydrologic models and climate change. *Journal Of Geophysical Research*, 97(D3), 2677–2686. <https://doi.org/10.1029/91jd02156>
- High water in CW 50 | Contargo. (z.d.-a). <https://www.contargo.net/en/business/business-news/detail-business/high-water-forecast-for-cw-50/>
- Harrisson, T. (2021, 11 oktober). Explainer: How ‘Shared Socioeconomic Pathways’ explore future climate change. Carbon Brief. <https://www.carbonbrief.org/explainer-how-shared-socioeconomic-pathways-explore-future-climate-change/>
- Hut, R., Drost, N., Van de Giesen, N., Van Werkhoven, B., Abdollahi, B., Aerts, J., Albers, T., Alidoost, F., Andela, B., Camphuijsen, J., Dzigan, Y., Van Haren, R., Hutton, E., Kalverla, P., Van Meersbergen, M., Van Den Oord, G., Pelupessy, I., Smeets, S., Verhoeven, S., . . . Weel, B. (2022). The eWaterCycle platform for open and FAIR hydrological collaboration. *Geoscientific Model Development*, 15(13), 5371–5390. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5371-2022>
- Jonkeren, O., PhD, Rietveld, P., Van Ommeren, J., Vrije Universiteit, RIZA, & Dutch national research programme “Climate changes spatial planning”. (2007). Climate Change and Inland Waterway Transport: Welfare Effects of Low Water Levels on the river Rhine. In *Journal of Transport Economics and Policy*, Vrije Universiteit, West-European inland waterway transport market, & RIZA, *Journal Of Transport Economics And Policy* (Vol. 41, pp. 387–411). <https://docserver.ingentaconnect.com/deliver/connect/lse/00225258/v41n3/s6.pdf?Expires=1715254089&id=0000&titleid=1311&checksum=98A14636432464F28DFF1EF1FE077CE4&host=https://www.ingentaconnect.com>
- Journal of Transport Economics and Policy. (z.d.). *Climate change and inland waterway transport: welfare effects of . . . Ingenta*

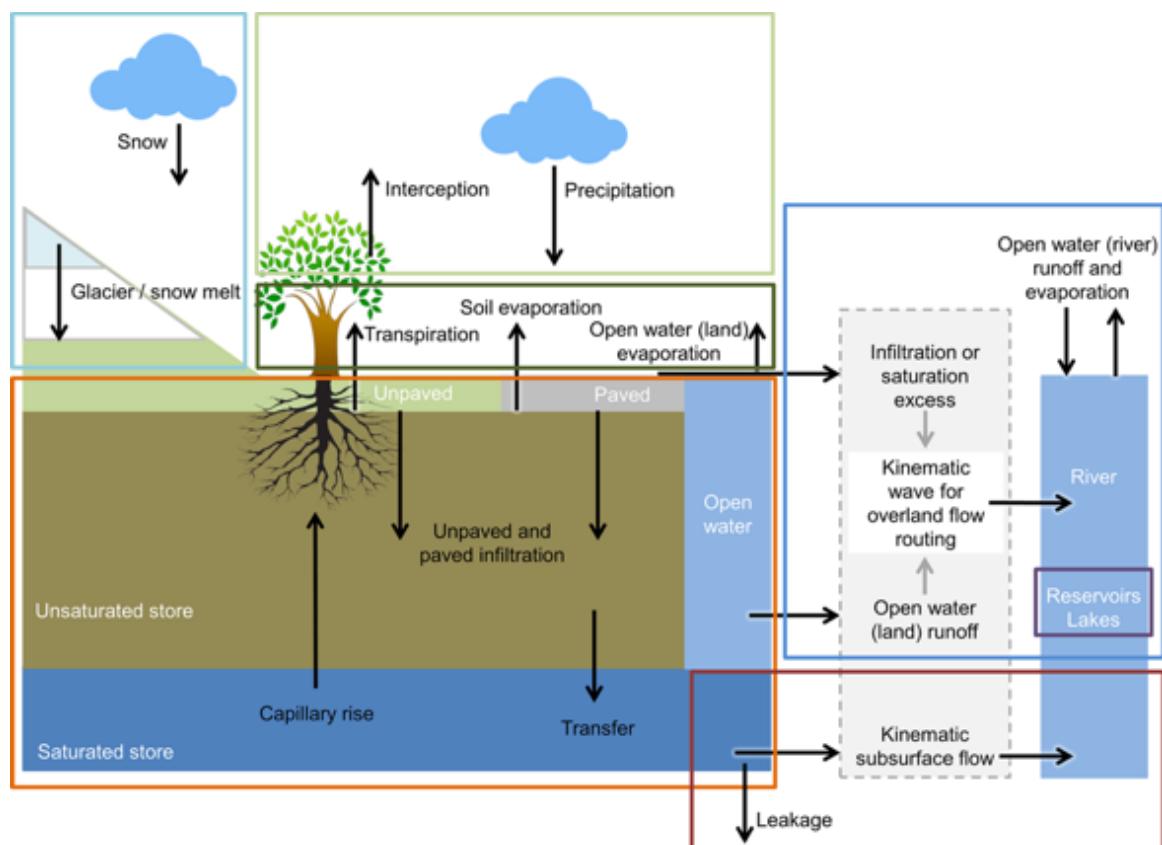
- Connect. <https://www.ingentaconnect.com/content/lse/jtep/2007/00000041/00000003/art00006>
- Knoben, W., Freer, J., Fowler, K., Peel, M. C., & Woods, R. (2019). Modular Assessment of Rainfall–Runoff Models Toolbox (MARRMoT) v1.2: an open-source, extendable framework providing implementations of 46 conceptual hydrologic models as continuous state-space formulations. *Geoscientific Model Development*, 12(6), 2463–2480. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-2463-2019>
- Kour, R., Patel, N., & Krishna, A. P. (2016). Climate and hydrological models to assess the impact of climate change on hydrological regime: a review. *Arabian Journal Of Geosciences*, 9(9). <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2561-0>
- Kwadijk, J., & Rotmans, J. (1995). The impact of climate change on the river rhine: A scenario study. *Climatic Change*, 30(4), 397–425. <https://doi.org/10.1007/bf01093854>
- Lindström, G., Pers, C., Rosberg, J., Strömqvist, J., and Arheimer, B.: Development and testing of the HYPE (Hydrological Predictions for the Environment) water quality model for different spatial scales, *Hydrol. Res.*, 41, 295–319, <https://doi.org/10.2166/nh.2010.007>, 2010. a
- Lobanova, A., Liersch, S., Nunes, J. P., Didovets, I., Stagl, J., Huang, S., Koch, H., Del Rocío Rivas López, M., Maule, C. F., Hattermann, F. F., & Krysanova, V. (2018). Hydrological impacts of moderate and high-end climate change across European river basins. *Journal Of Hydrology. Regional Studies*, 18, 15–30. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.05.003>
- Muller, N., & King, N. (2023, 20 september). Plans to “deepen” Rhine river hit resistance. *dw.com*. <https://www.dw.com/en/drought-ships-cargo-vessels-shipping-fossil-fuels-energy-shortage-crisis/a-63255851>
- Nakicenovic, N., & Swart, R. (2000, 1 juli). *Emissions scenarios - special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/20134132>
- Orlovius, V. (1994). *Regulations and prescriptions for the navigation on the Rhine*. Central Rhine Commission. <https://www.ccr-zkr.org/files/bibliographie/VOrlovius-Regulations-and-prescr-for-the-nav-on-the-rhine.pdf>
- Parmet, B., Kwadijk, J., & Raak, M. (1995). Impact of climate change on the discharge of the river rhine. In *Studies in environmental science* (pp. 911–918). [https://doi.org/10.1016/s0166-1116\(06\)80115-9](https://doi.org/10.1016/s0166-1116(06)80115-9)
- Ruijsch, J., Verstegen, J. A., Sutanudjaja, E. H., & Karssenberg, D. (2021). Systemic change in the Rhine-Meuse basin: Quantifying and explaining parameters trends in the PCR-GLOBWB global hydrological model. *Advances in Water Resources*, 155, 104013. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2021.104013>
- Scheepers, H. M., Wang, J., Gan, T. Y., & Kuo, C. (2018). The impact of climate change on inland waterway transport: Effects of low water levels on the Mackenzie River. *Journal Of Hydrology*, 566, 285–298. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.059>
- Schneider, C., Laizé, C., Acreman, M., & Flörke, M. (2013). How will climate change modify river flow regimes in Europe? *Hydrology And Earth System Sciences*, 17(1), 325–339. <https://doi.org/10.5194/hess-17-325-2013>
- Sutanudjaja, E. H., Van Beek, R., Wanders, N., Wada, Y., Bosmans, J., Drost, N., Van Der Ent, R., De Graaf, I., Hoch, J., De Jong, K., Karssenberg, D., López, P. L., Peßenteiner, S., Schmitz, O., Straatsma, M., Vannametee, E., Wisser, D., & Bierkens, M. F. P. (2018). PCR-GLOBWB 2: a 5 arcmin global hydrological and water resources model. *Geoscientific Model Development*, 11(6), 2429–2453. <https://doi.org/10.5194/gmd-11-2429-2018>
- Steiger, G.J., (2024), GJsteiger/BEP\_thesis\_Rhine\_catchment: BEP thesis: Climate change impact on shipping on the river Rhine (WflowRhineV1.0), Zenodo, <https://doi.org/10.5281/zenodo.11657741>
- Tama, D. R., Limantara, L. M., Suhartanto, E., & Devia, Y. P. (2023). The Reliability of W-flow Run-off-Rainfall Model in Predicting Rainfall to the Discharge. *Civil Engineering Journal*, 9(7), 1768–1778. <https://doi.org/10.28991/cej-2023-09-07-015>

- Trotter, L., Knoben, W., Fowler, K., Saft, M., & Peel, M. C. (2022). Modular Assessment of Rainfall–Runoff Models Toolbox (MARRMoT) v2.1: an object-oriented implementation of 47 established hydrological models for improved speed and readability. *Geoscientific Model Development*, 15(16), 6359–6369. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-6359-2022>
- Van Der Knijff, J. M., Younis, J., and De Roo, A. P. J.: LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation, *Int. J. Geogr. Inf. Sci.*, 24, 189–212, <https://doi.org/10.1080/13658810802549154>, 2010. a
- Van Verseveld, W., Weerts, A., Visser, M., Buitink, J., Imhoff, R., Boisgontier, H., Bouaziz, L., Eilander, D., Hegnauer, M., Velden, C. T., & Russell, B. (2024). Wflow\_sbm v0.7.3, a spatially distributed hydrological model: from global data to local applications. *Geoscientific Model Development*, 17(8), 3199–3234. <https://doi.org/10.5194/gmd-17-3199-2024>
- Van Vliet, M. T. H., Franssen, W., Yearsley, J. R., Ludwig, F., Haddeland, I., Lettenmaier, D. P., & Kabat, P. (2013). Global river discharge and water temperature under climate change. *Global Environmental Change*, 23(2), 450–464. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2012.11.002>
- Van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A. M., Hibbard, K., Hurtt, G., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakićenović, N., Smith, S. J., & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1–2), 5–31. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Wilkinson, M. D., Dumontier, M., Aalbersberg, I. J., Appleton, G., Axton, M., Baak, A., Blomberg, N., Boiten, J., Da Silva Santos, L. B., Bourne, P. E., Bouwman, J., Brookes, A. J., Clark, T., Crosas, M., Dillo, I., Dumon, O., Edmunds, S., Evelo, C. T., Finkers, R., . . . Mons, B. (2016). The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. *Scientific Data*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/sdata.2016.18>
- Zwolsman, J., & Van Bokhoven, A. (2007). Impact of summer droughts on water quality of the Rhine River - a preview of climate change? *Water Science & Technology*, 56(4), 45–55. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.535>

## Bijlage A: Hydrologische modellen op het eWaterCycle platform.

Wflow:

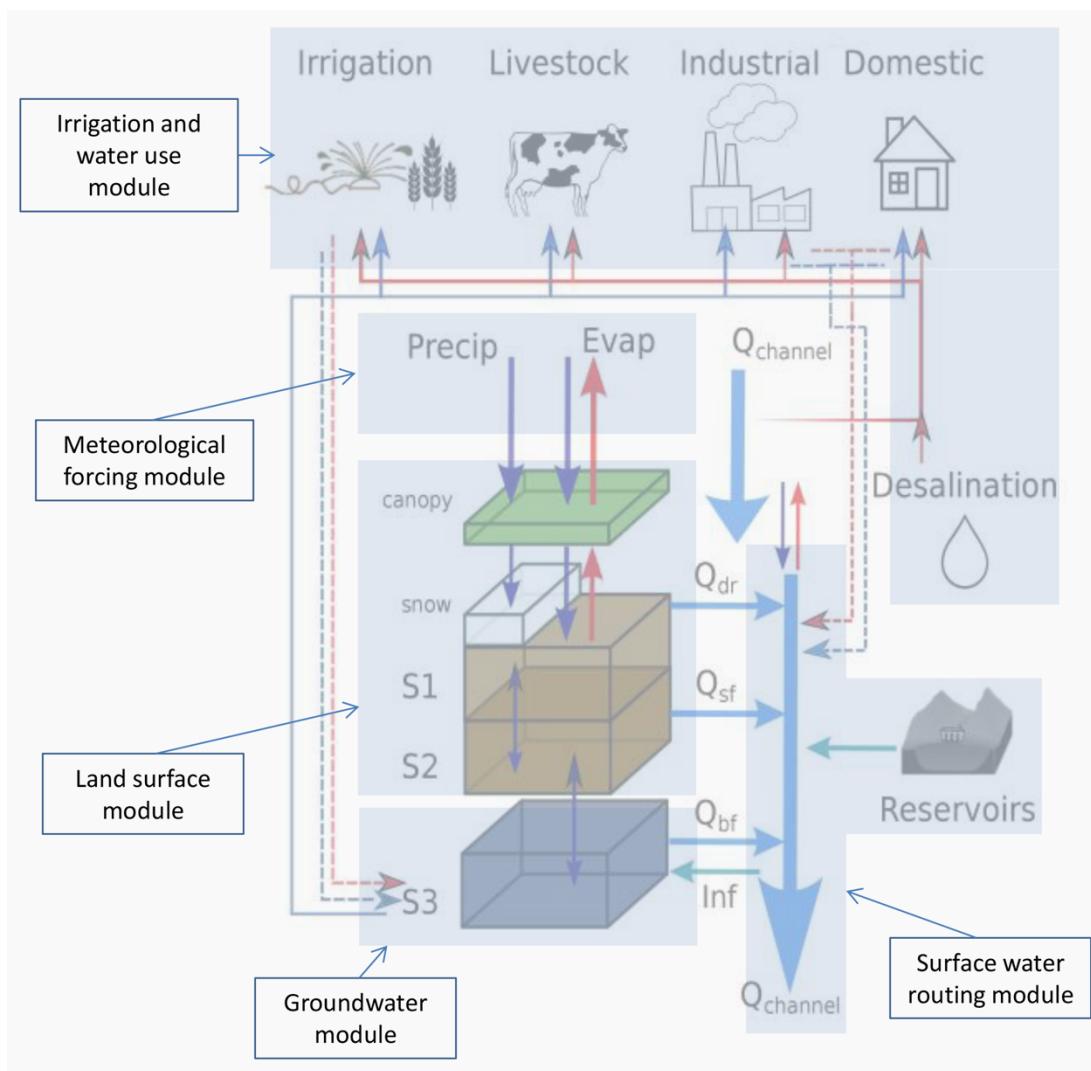
Figuur A1



Figuur A1. An overview of the different processes and fluxes in the wflow\_sbm model (adopted from van Verseveld et al., 2024). The model includes the following routines: interception (green, Sect. 2.2), snow and glaciers (light blue, Sect. 2.3), soil module and evapotranspiration (orange, Sect. 2.4), lateral subsurface flow (brown, Sect. 2.5), surface routing (dark blue, Sect. 2.6), and reservoirs and lakes (black, Sect. 2.7).

Noot. Overgenomen uit "Wflow\_sbm v0.7.3, a spatially distributed hydrological model: from global data to local applications", W.J. van Verseveld, 2024, Geoscientific Model Development, Volume 17, p. 3203 (<https://doi.org/10.5194/gmd-17-3199-2024>)

## PCR-GlobWB:



Noot. Overgenomen uit "PCR-GLOBWB 2: a 5 arcmin global hydrological and water resources model", E.H. Sutandjaja, 2018, Geoscientific Model Development, Volume 11, p. 2429 (<https://doi.org/10.5194/gmd-11-2429-2018>)

**Figuur A2:**

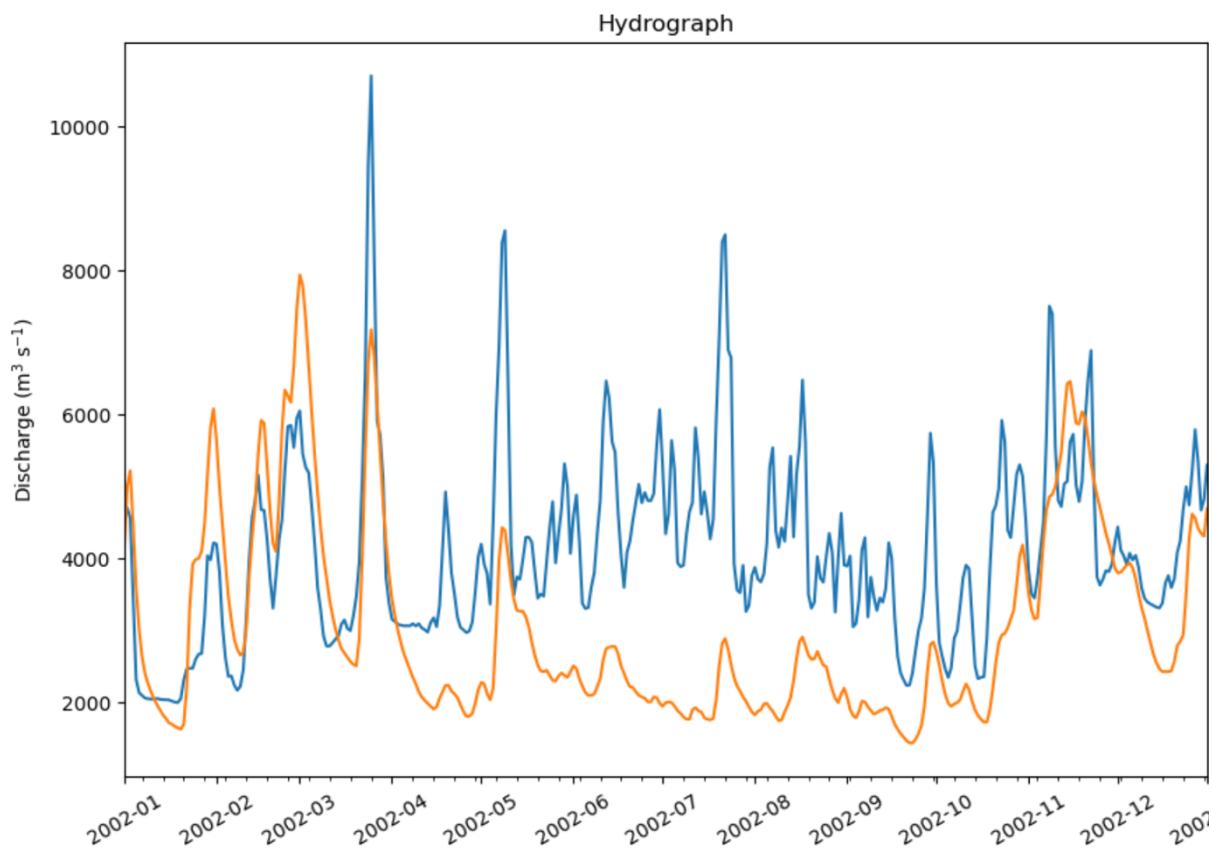
Overzicht van een PCR-GlobWB cel model.

"Figure A2: Schematic overview of a PCR-GLOBWB 2 cell and its modelled states and fluxes. S1, S2 (soil moisture storage), S3(groundwater storage), Qdr (surface run-off – from rainfall and snowmelt), Qsf (interflow or stormflow), Qbf (baseflow or groundwater discharge), and Inf (riverbed infiltration from to groundwater). The thin red lines indicate surface water withdrawal, the thin blue lines groundwater abstraction, the thin red dashed lines return flows from surface water use, and the thin dashed blue lines return flows from groundwater use surface. For each sector, withdrawal – return flow = consumption. Water consumption adds to total evaporation. In the figure, the five modules that make up PCR-GLOBWB 2 are portrayed on the model components."

## Bijlage B: Basisgrafieken uit het eWaterCycle model

### PCR-GlobWB:

Het PCR-GlobWB model in de figuur hier onder (figuur 9.1.) is een weergave van data direct uit de eWaterCycle gehaald. Zonder het model aan te passen kan er over de geobserveerde tijdspan (in dit geval 01-01-2002 tot 31-01-2002) een grafiek over de afvoer van de Rijn rond het plaatsje Kaub worden gegenereerd.



	nse	kge_2009	sa	me
simulation	-0.61	0.35	0.39	1053.68

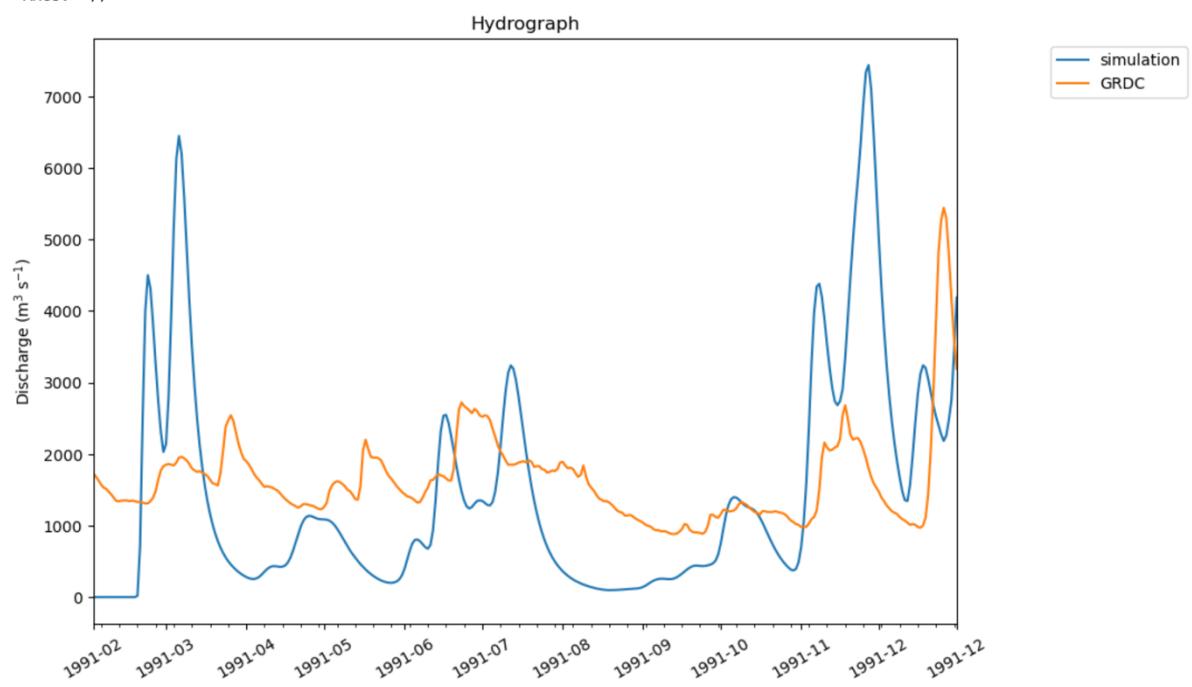
**Figuur B1.**

Afvoer versus tijd grafiek in de plaats Kaub volgens het PCR-GlobWB model.

In de figuur staan twee lijnen weergegeven, de blauwe lijn staat voor de gesimuleerde data van het PCR-GlobWB model en de oranje data is de daadwerkelijke data volgens de GRDC.

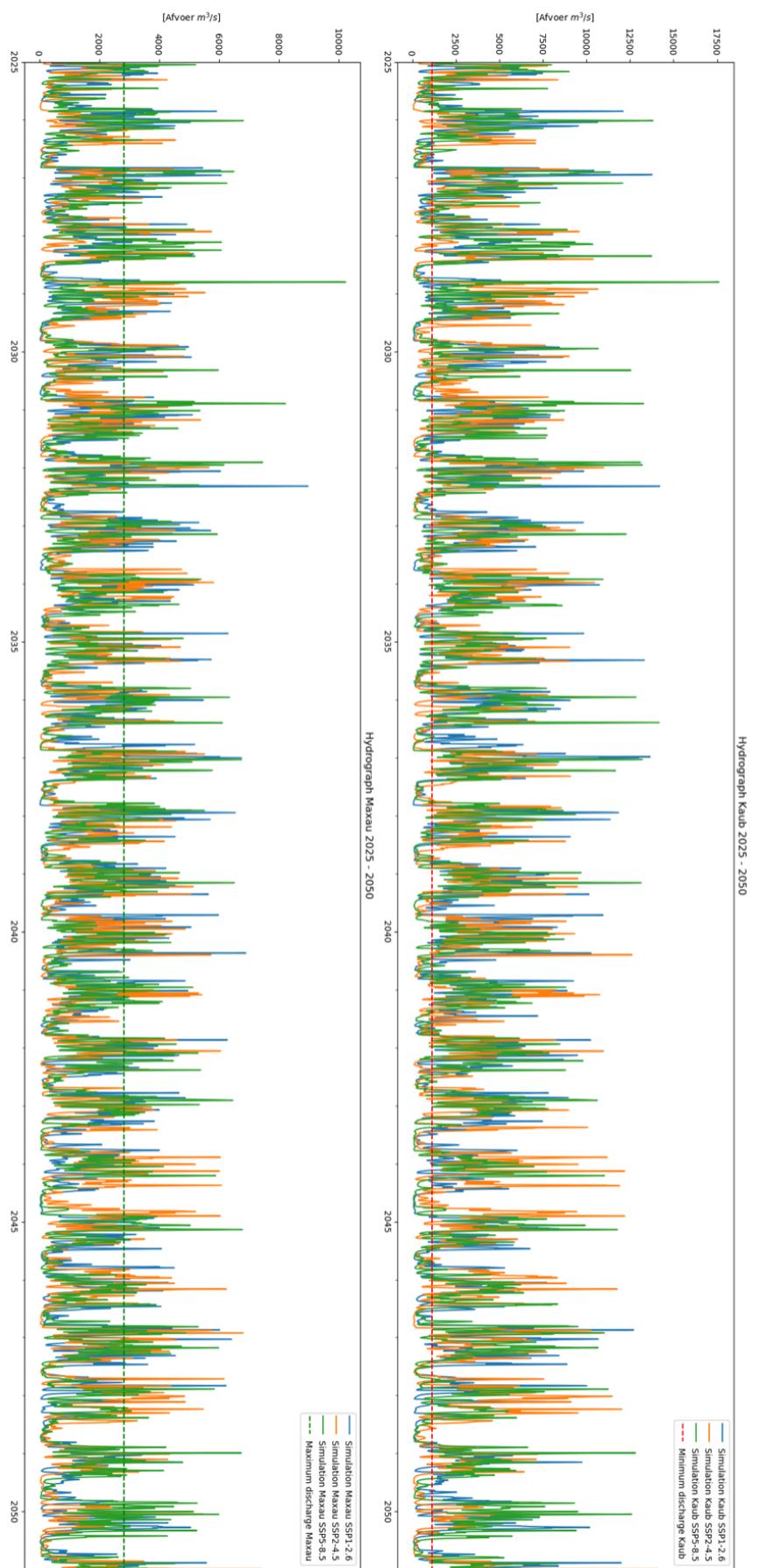
### Wflow:

Het Wflow model kan eveneens zonder iets aan te passen uit het eWaterCycle model worden gehaald. In dit geval wordt de geobserveerde data weergegeven over een tijdsspan van 01-01-1991 tot 31-12-1991 bij het plaatsje Kaub.

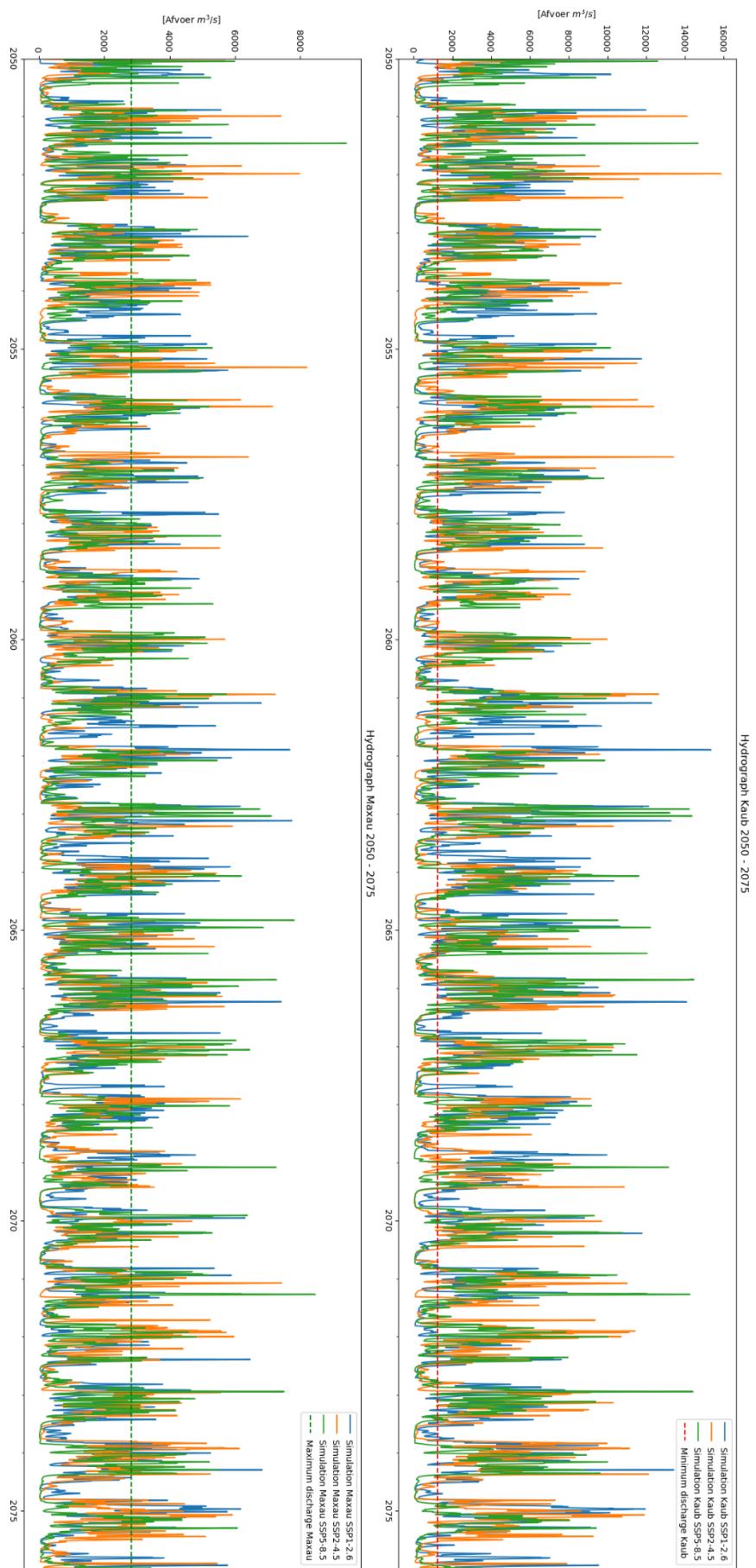


**Figuur B2:** Afvoer versus tijd grafiek in de plaats Kaub volgens het Wflow model.

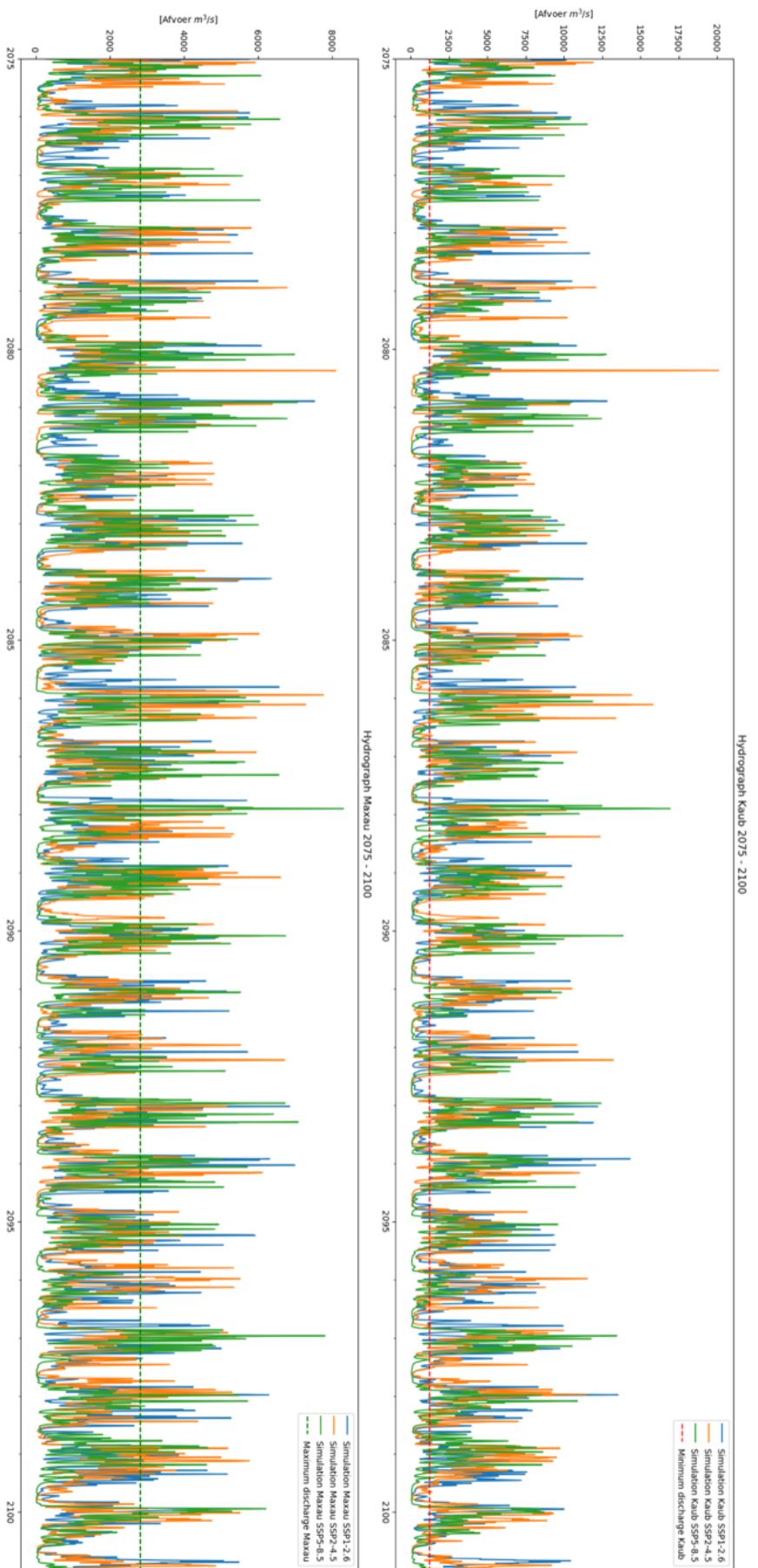
## Bijlage C: Afvoerplots Wflow



**Figuur C1:** Vergrote weergave van Wflow simulatie 2025 – 2050

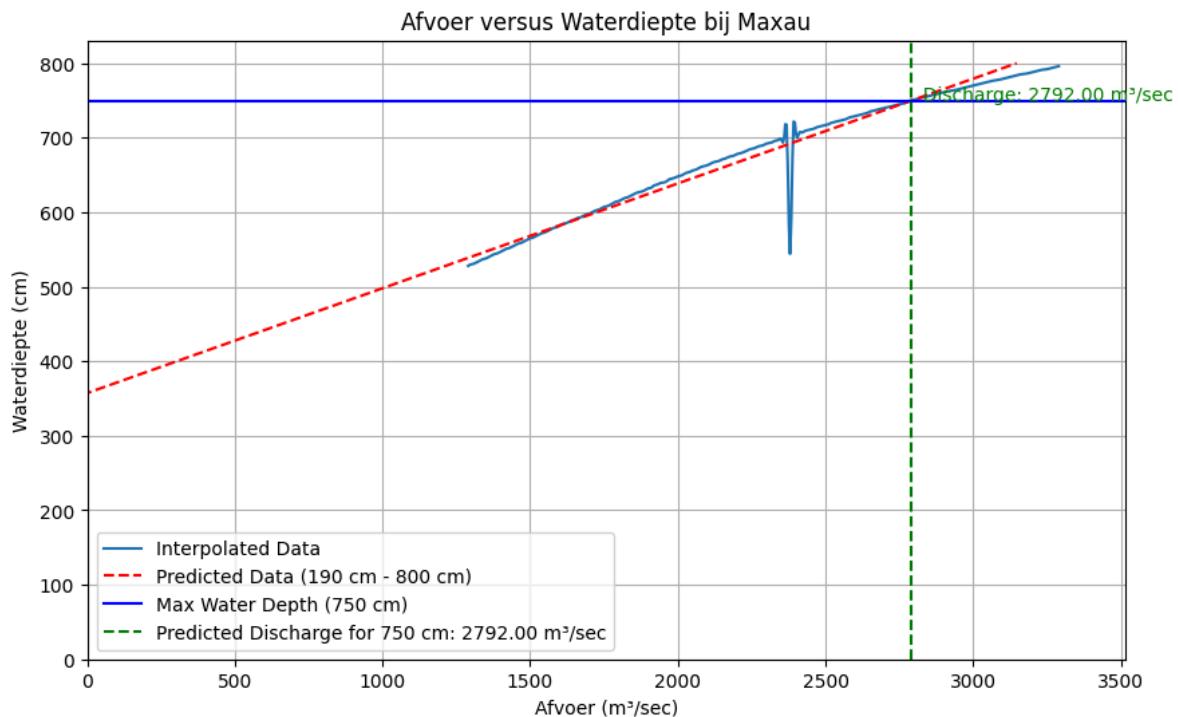


**Figuur C2:** Vergrote weergave van Wflow simulatie 2050 – 2075



**Figuur C3:** Vergrote weergave van Wflow simulatie 2075 – 2100

## Bijlage D: Afvoer waterdiepte grafiek Maxau



**Figuur D1:** In python geplot afvoer versus waterdiepte grafiek op basis van historische waterdiepte en afvoer. Met behulp van spline-interpolatie en een lineair regressiemodel is er een afvoer berekend bij een waterhoogte van 750cm, waarbij de Rijn wordt afgesloten voor scheepvaart bij Maxau