



Afvoerscenario's klimaatverandering voor het Rijnstroomgebied

***Actualisatie afvoerscenario's Rijnstroomgebied
op basis van nieuwste inzichten in klimaatverandering***

Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn

Rapport Nr. 297

Disclaimer: uitsluiting van aansprakelijkheid in verband met toegankelijkheid

De ICBR streeft ernaar haar documenten zo toegankelijk mogelijk te maken. Om redenen van efficiëntie is het niet altijd mogelijk om alle documenten in de verschillende talenversies volledig toegankelijk beschikbaar te stellen (bijvoorbeeld met alternatieve teksten voor alle afbeeldingen of in begrijpelijke taal). Het onderhavige rapport bevat mogelijk figuren en tabellen. Voor nadere toelichtingen kunt u contact opnemen met het secretariaat van de ICBR via het telefoonnummer 0049261-94252-0 of per e-mail via sekretariat@iksr.de.

Colofon

Uitgegeven door de:

Internationale Commissie ter Bescherming van de Rijn (ICBR)
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15, 56068 Koblenz, Duitsland
Postbus: 20 02 53, 56002 Koblenz, Duitsland
Telefoon: +49-(0)261-94252-0
Fax: +49-(0)261-94252-52
E-mail: sekretariat@iksr.de
www.iksr.org

Hoofdredacteur van het rapport: Enno Nilson (Bundesanstalt für Gewässerkunde - Duitsland; EG HCLIM)

Technische begeleiding in verband met gegevensbeheer en -evaluatie: Carsten Viergutz (Bundesanstalt für Gewässerkunde, DAS-basisdienst - Duitsland)

Verdere leden van de ICBR-expertgroep HCLIM die aan de totstandbrenging van dit rapport hebben meegewerkt:

Naam	Functie/instelling/land
Jan Kruijshoop	Voorzitter van de EG HCLIM, Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WVL) (Nederland)
Manuela Nied	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (Duitsland)
Astryd Handwerk	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement "Grand Est" (DREAL Grand Est) (Frankrijk)
Petra Schmocker-Fackel	Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Zwitserland)
Sylvia van Doorn	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WVL) (Nederland)
Ralph Schielen	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (RWS WVL) (Nederland)
Marlene Willkomm	Hochwassernotgemeinschaft Rhein (HWNG Rijn) (waarnemer/ngo)
<i>Informatieverstrekking:</i>	
Claude Meisch	Administration de la Gestion de l'Eau (AGE) (Luxemburg)
Clemens Neuhold	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML) (Oostenrijk)
Ernst Überreiter	Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft (BML) (Oostenrijk)
Dieter Vondrak	Amt der Vorarlberger Landesregierung (AVL) (Oostenrijk)

Opmerking in verband met het gebruiken en doorgeven van gegevens en informatie (zie belangrijke details in hoofdstuk 5.3):

1. *Als gegevens of informatie wordt gebruikt, moeten het nummer en het publicatiejaar van het ICBR-rapport (ICBR-rapport 297, 2024) en, indien van toepassing, de naam van de nationale klimaatdienst (zie details onder 3) worden vermeld.*
2. *Bij het rapport horende gegevens (ruwe gegevens, zogenaamde dna/spaghetti-plots, verdere figuren) zijn te vinden op de website/het informatiesysteem van de Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied.*
3. *Verdere detailgegevens (bijv. voor andere meetpunten en hydrologische indicatoren) die niet zijn gebruikt in het rapport kunnen worden aangevraagd bij het ICBR-secretariaat (sekretariat@iksr.de). In dit geval leidt het secretariaat de aanvraag door naar de bevoegde leden van de EG HCLIM en/of verwijst naar de in het rapport genoemde onderzoeksgroepen en nationale klimaatdiensten.*

Afvoerscenario's klimaatverandering voor het Rijnstroomgebied

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Uitgebreide samenvatting	4
1 Context van de huidige studie	8
2 Gegevens en methoden	8
2.1 Onderzoeksinstellingen en onderzoeksteams die toegang bieden tot gegevens	9
2.2 Schema voor gegevensintegratie en -analyse	11
2.2.1 <i>Tijdsperioden</i>	12
2.2.2 <i>Scenario</i>	12
2.2.3 <i>Meetstations/deelstroomgebieden</i>	12
2.2.4 <i>Hydrologische statistieken en indicatoren</i>	13
2.2.5 <i>Aggregatie en integratie</i>	15
2.2.6 <i>Indicatoren voor hoogwaterextremen</i>	17
2.2.7 <i>Aanvullende indicatoren</i>	18
2.3 Opmerkingen over de heterogeniteit van de gegevenssets	19
3 Resultaten	20
3.1 Verandering van hydrometeorologische omstandigheden	21
3.2 Verandering van afvoerregimes	23
3.3 Verandering van hydrologische indicatoren	24
3.3.1 <i>Veranderingen tot heden (hier: 1991-2020)</i>	24
3.3.2 <i>Veranderingen tot het midden van de 21^e eeuw (hier: 2031-2060)</i>	25
3.3.3 <i>Veranderingen tot het einde van de 21^e eeuw (hier: 2071-2100)</i>	26
4 Verdere effecten van klimaatverandering	32
4.1 Invloed van gletsjers en sneeuw	32
4.2 Waterstanden van grote meren bovenstrooms in het Rijnstroomgebied	33
4.3 Samengestelde effecten van afvoerandering en zeespiegelstijging (Rijndelta en IJsselmeergebied)	34
4.4 Zware neerslag en stortvloeden	36
4.5 Interferentie en impact van niet-klimatologische aspecten	36
5 Discussie en conclusies	37
5.1 Veranderingen in het afvoerregime en het hydrologische systeem tot 2100	37
5.2 Vergelijking met de ICBR-studie van 2011	38
5.3 Suggesties voor verder gebruik van gegevens en resultaten	39
6 Vooruitblik	40
6.1 Nieuwe trends op basis van AR6	40
6.2 Benodigd onderzoek	42
6.3 Volgende actualisering van het ICBR-rapport	43
7 Bibliografie	44
Bijlage A: Technical and methodological background	49
1. Coverage and scenarios	49
1.1 <i>Spatial coverage</i>	49
1.2 <i>Temporal coverage</i>	49
1.3 <i>Underlying IPCC report</i>	49
1.4 <i>Selected scenario</i>	49
2. Model chains	49
2.1 <i>Climate models</i>	50
2.2 <i>Climate data processing schemes</i>	51
2.3 <i>Ensembles (number of members)</i>	51
2.4 <i>Hydrological models</i>	51
2.5 <i>Time periods</i>	52
Bijlage B – Comparison of old and new discharge scenarios	53

Samenvatting

1. Het onderliggende document is een **actualisering van ICBR-rapport 188 over afvoerscenario's uit 2011**. Het rapport is in overeenstemming met het 5^e evaluatierapport van het IPCC (de vorige versie sloot aan bij het 4^e IPCC-rapport). Op het moment van schrijven waren er nog niet genoeg regionale klimaatgegevens in de vereiste mate van detail beschikbaar die waren gebaseerd op het meest recente 6^e IPCC-rapport. Inzichten en gegevens van het 6^e IPCC-rapport zullen eventueel het uitgangspunt vormen voor toekomstige actualiseringen van de afvoerscenario's.
2. In het onderhavige ICBR-rapport wordt voor de risicobeoordeling en voor de evaluatie van de benodigde klimaatadaptatie en veerkracht in het Rijnstroomgebied uitgegaan van een **hoog emissiescenario (RCP8.5)**.
3. Samenvattend kan worden gesteld dat de vastgestelde langetermijnveranderingen in het verleden (op basis van waarnemingen) en in de toekomst (op basis van projecties uitgaand van het hoge-emissiescenario RCP8.5) het reeds bestaande beeld ondersteunen van een verandering in de richting van **meer door regen gevoede afvoerregimes**, ten nadele van door sneeuw en gletsjers gevoede afvoerregimes in het Rijnstroomgebied. Dit leidt tot **afnemende zomerafvoeren, toenemende winterafvoeren en vrijwel ongewijzigde, gemiddelde jaarafvoeren**.
4. De opeenvolging van jaren met extreem lage rivierafvoeren van het afgelopen decennium past slechts ten dele in het bovengenoemde beeld, omdat er bij de recente laagwatergebeurtenissen niet alleen in de zomer, maar ook in de andere seizoenen sprake was van lage afvoeren. De **recente opeenvolging van droge jaren is buitengewoon** ten opzichte van de langetermijnveranderingen die in het verleden zijn waargenomen en die in de nabije toekomst worden verwacht.
5. De hier voorgestelde scenario's zijn gebaseerd op verder ontwikkelde **klimaat- en hydrologische modellen** en hebben deels nieuwe veranderingsinformatie opgeleverd. Deze nieuwe inzichten maken duidelijk dat de **klimaatadaptatiestrategie van de ICBR** en de bijbehorende rapporten (bv. ICBR-werk- en expertgroepen B, S, H, STEMP, LW) moeten worden **geactualiseerd**.
6. De ICBR-expertgroep HCLIM heeft specifieke onderwerpen voor **toekomstige onderzoeksprojecten** vastgesteld: a) de ontwikkeling van een uniforme methode waarmee afvoerprojecties van de betrokken landen en instellingen kunnen worden geïntegreerd, b) de inventarisatie van methodes met als doel de verbetering van statistieken van extreme waarden op basis van projecties en eventueel de ontwikkeling van uniforme statistieken van extreme waarden, c) projecties van subdagelijkse neerslag- en stortvloedgebeurtenissen en d) diepgaander onderzoek naar samengestelde effecten van klimaatverandering (droogte/zeespiegelstijging, klimaatverandering en sociohydrologische verandering).

Uitgebreide samenvatting

In het kader van het **programma Rijn 2040**, getiteld "De Rijn en zijn stroomgebied: duurzaam beheerd en klimaatbestendig" (ICBR, 2020), heeft de ICBR haar klimaatexpertgroep (voorheen EG KLIMA, nu EG HCLIM) opdracht gegeven om **de vroegere studie naar afvoerscenario's vóór 2024 te actualiseren**. Terwijl de vorige ICBR-scenario's, gepubliceerd in 2011, waren gebaseerd op informatie uit het 4^e evaluatierapport van de Intergouvernementele Werkgroep inzake klimaatverandering (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC) uit 2007 (IPCC, 2007), is deze actualisering in grote lijnen gebaseerd op de 5^e IPCC-evaluatie (IPCC, 2014). Op het moment van schrijven waren er nog niet genoeg regionale klimaatgegevens in de vereiste mate van detail beschikbaar die waren gebaseerd op het meest recente 6^e IPCC-rapport (IPCC, 2021).

Evenals in de vorige versie zijn de nieuwe afvoerscenario's van de ICBR gebaseerd op de huidige kennis en gegevens van de oeverstaten over de gevolgen van de klimaatverandering voor de hydrologie van de Rijn. De huidige actualisering is gebaseerd op gegevens uit Zwitserland, Duitsland, Frankrijk, Nederland en het onderzoeksnetwerk van de Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR). In tegenstelling tot de vorige versie werden de gegevens niet verzameld en geïntegreerd binnen het onderzoeksnetwerk, maar door de expertgroep HCLIM. Dit was mogelijk dankzij de technische ondersteuning van een klimaatdienst van een van de deelnemende instellingen.

In overeenstemming met een groot aantal nationale klimaateffectbeoordelingen heeft ook de EG HCLIM gekozen voor het hoge-emissiescenario (Representative Concentration Pathways - RCP8.5). Dit scenario wordt relevanter geacht voor ICBR-vraagstukken die verband houden met beheer en preventieve actie dan meer gematigde of optimistische scenario's. Veel waterbeheervraagstukken hebben betrekking op de klimaatgerelateerde risico's in het Rijnstroomgebied en de ontwikkeling van een veerkrachtig riviersysteem. Deze aspecten zullen in 2025 aan bod komen in een **overkoepelende klimaatadaptatiestrategie van de ICBR**.

Dit rapport is gebaseerd op gegevens van waarnemingen en vijf hydrologische simulatiedatasets, die in het kader van **verschillende nationale en regionale studies** zijn opgesteld. Deze verschillen qua toegepaste modellen en evaluatiemethode. Om deze datasets vergelijkend te kunnen analyseren, zijn er afspraken gemaakt met betrekking tot de te evalueren **tijdspannen (referentie 1981-2010; heden 1991-2020; nabije toekomst 2031-2060; verre toekomst 2071-2100)**, **indicatoren (parameters voor gemiddelde, lage en hoge afvoer) en meetstations** of deelstroomgebieden. Grondregels voor deze afspraken waren a) de vergelijkbaarheid met het vorige rapport, getiteld "Studie naar scenario's voor het afvoerregime van de Rijn" (ICBR, 2011) en b) de zo goed mogelijke, onderlinge vergelijkbaarheid van de verschillende simulatiedatasets. Ondanks deze inspanningen blijft er een zekere mate van heterogeniteit bestaan tussen de gegevens uit de verschillende bronnen. Dit leidt tot een grotere spreiding van de resultaten ten opzichte van het vorige rapport, en een enigszins beperkte vergelijkbaarheid tussen afzonderlijke meetstations.

De mondiale klimaatverandering beïnvloedt het hydrologische systeem van de Rijn door veranderingen in neerslag, luchttemperatuur en andere variabelen die veranderingen in verdamping en sneeuwregimes bepalen. De belangrijkste **hydrometeorologische veranderingen in het Rijnstroomgebied** als geheel zijn:

- a) De **luchttemperatuur** in het Rijnstroomgebied als geheel is sinds het midden van de 20^e eeuw **al duidelijk gestegen** (0,7 °C tot 1 °C, afhankelijk van het seizoen) en zal in alle meteorologische seizoenen met 1 °C tot 2,5 °C **blijven stijgen** tot het midden van de 21^e eeuw (2031-2060) en met 3 °C tot 5 °C tot het einde van de 21^e eeuw (2071-2100), waarbij de stijging het sterkst zal zijn in de zomer en de herfst (tussen juni en november). In overeenstemming hiermee zal het **aantal warme dagen** (>30 °C) toenemen, terwijl het aantal vorst- en ijsdagen zal afnemen.
- b) Waarnemingen en projecties laten zien dat als gevolg van klimaatverandering de **neerslaghoeveelheden zullen verschuiven** tussen de meteorologische seizoenen, met **toenames in de winter en lente, en afnames in de zomer**. Een en ander leidt tot een **gematigde stijging van de jaarlijkse neerslagsom**. De veranderingen zetten door in de loop van de 21^e eeuw en bereiken aan het einde van de 21^e eeuw toenames dan wel afnames van meer dan 20%.

- c) De **projecties vertonen een algemene tendens naar extremere neerslagsituaties**. In de **waarnemingen** is dit nog niet duidelijk te zien. Het **aantal dagen met zware neerslag zal naar verwachting toenemen, evenals het aantal droge dagen**. Ook zal de **duur van de droge perioden naar verwachting toenemen**, hoewel dit signaal niet zo duidelijk is als de bovengenoemde signalen.

Deze hydrometeorologische veranderingen beïnvloeden onder meer de seizoensgebonden verdeling van de afvoeren in de verschillende delen (trajecten) van de Rijn. De verandering in de **afvoerregimes** kan als volgt worden samengevat:

- d) Wanneer de periode 1981-2010 vergeleken wordt met de periode 1991-2020, dan is te zien dat in alle **huidige** afvoerregimes (door sneeuw gevoed, door regen gevoed, gecombineerd) de **winterafvoeren toenemen en de zomerafvoeren afnemen**. Er is sprake van een algemene tendens naar **meer door regen gevoede regimes**.
- e) Het algemene **toekomstbeeld** is dat de reeds **waargenomen veranderingen dan wel trends verder toenemen** in de toekomstige scenario's, met name aan het einde van de 21^e eeuw (2071-2100 ten opzichte van 1981-2010) vergeleken met het midden van de eeuw (2031-2060 ten opzichte van 1981-2010).
- f) De verschillende datasets vertonen **verschillende projecties**, ondanks dat de veranderingsrichting overwegend gelijk is, wat betreft sommige maanden, seizoenen, halfjaren en riviertrajecten. Dit heeft in het bijzonder betrekking op de geprojecteerde afname van de zomerafvoer aan het einde van de 21^e eeuw in de Duits-Franse Bovenrijn.

De veranderingen in de afvoerregimes zijn verbonden met veranderingen in de statistische parameters van **hoge, gemiddelde en lage afvoer**.

- g) Het **recente verleden (1991-2020)** en met name de periode na 2010 wordt, vergeleken met de **referentieperiode (1981-2010)**, gekenmerkt door een **groot aantal jaren van droogte**. Op deeltrajecten van de Rijn was er weliswaar sprake van zware overstromingen (bv. op het meetpunt Bazel hebben zich in mei 1999 en in augustus 2007 hoogwatergebeurtenissen met een herhalingstijd van meer dan 100 jaar voorgedaan), maar voor de Rijn als geheel was dit niet het geval.
- h) Als gevolg hiervan vertonen alle **afvoerindicatoren** (laag en hoog, seizoensgebonden en jaarlijks) op de meeste meetpunten een **daling** van enkele procenten. Deze afname van de afvoer in de zomer en de winter wijkt af van de ontwikkelingen in de 20^e eeuw, die bv. een toename van de winterafvoer (MQ) laten zien. Deze recente veranderingen, die zich in een tijdsbestek van 10 jaar voordeden, worden ook zichtbaar in de meerjarige paramters (30 jaar).
- i) De bovengenoemde veranderingen worden **duidelijker naarmate de afstand tot de Alpen toeneemt**. Dit heeft te maken met de grotere invloed van de zijrivieren uit het middelgebergte (Main, Moezel), die de grootste relatieve veranderingen laten zien.
- j) Het **midden van de 21^e eeuw (2031-2060)** laat een vergelijkbaar totaalbeeld zien met eerdere klimaat-effectanalyses voor het Rijnstroomgebied. Gemiddeld staat tegenover een afname van de zomerafvoer (MQ zomer, NM7Q zomer) een toename van de winterafvoer (MQ winter), wat betekent dat er sprake is van slechts **een lichte verandering van de jaaraafvoeren (MQ)**.
- k) Deze veranderingen gaan gepaard met een **toename van afvoeren** in zowel het bovenste (MHQ, HQT) als het onderste afvoerbereik (MNQ).
- l) Het is opvallend dat de **toename van de winterafvoeren (MQ) die zichtbaar is in de projecties verschilt van de ontwikkelingen die op dit moment worden waargenomen**. De actuele waarnemingen wijzen op een afname in de wintermaanden.
- m) Aan het **einde van de 21^e eeuw (2071-2100)** blijven de hierboven genoemde veranderingen in wezen doorgaan, met een **versnelde toename** in de tweede helft van de 21^e eeuw.
- n) Gemiddeld is er ook aan het einde van de 21^e eeuw sprake van **afnamen van de zomerafvoer (MQ zomer, NM7Q zomer) en toenamen van de winterafvoer (MQ winter)**. Omdat deze tegenstrijdige signalen elkaar grotendeels in evenwicht houden, **verandert de jaargemiddelde afvoer (MQ) maar weinig**.

- o) Een **toename van extreme afvoersituaties** is zichtbaar in zowel de indicatoren voor hoogwaterafvoer (MHQ, HQT) als in de indicatoren voor laagwaterafvoer (MNQ). Ook voor afvoeren in de winter (NM7Q winter) zijn er op meerdere meetpunten aanwijzingen voor een afname.

Samenvattend kan worden gesteld dat de analyses van de langetermijnveranderingen in het verleden (waarnemingen) en de inschattingen voor de toekomst (projecties van het scenario RCP8.5) op hoofdlijnen het reeds bestaande beeld ondersteunen van een verandering in de richting van **meer pluviale afvoerregimes** in plaats van glaciaal-nivale afvoerregimes in het Rijnstroomgebied. **Dit leidt tot afnemende zomerafvoeren, toenemende winterafvoeren en vrijwel ongewijzigde totaalafvoeren over het jaar** en – in veel riviertrajecten en zijrivieren – een toename van extreme laag- en hoogwaterafvoeren ten opzichte van de referentieperiode. De opeenvolging van extreem droge jaren na 2010 leidde echter in alle seizoenen (inclusief de winter) tot waargenomen afnamen van hoog- en laagwater, hetgeen enigszins in tegenstrijd is met de projecties.

Vanwege de geactualiseerde scenario's, de steeds betere mogelijkheden van klimaat- en hydrologische modellen en de deels nieuwe veranderingssignalen voor de geanalyseerde parameters, **beveelt de EG HCLIM aan om de klimaatadaptatiestrategie van de ICBR en de bijbehorende rapporten** (bv. watertemperatuur) te **actualiseren** op basis van de nieuwe afvoerscenario's.

Gletsjers zijn nog steeds belangrijke waterbronnen tijdens situaties van langdurig droog weer. Onderzoekswerkzaamheden die gericht zijn op glaciaal-nivale rivierafvoercharacteristieken laten zien dat de ondersteuning van de laagwaterafvoer door gletsjers in de Rijn bij Basel al over zijn piek heen is (bekend als "gletsjerpiekwater") en afneemt tot bijna nul aan het eind van deze eeuw in een hoge-emissiescenario (RCP8.5).

De **grote meren** in de bovenloop van het Rijnstroomgebied volgen over het algemeen de bovengenoemde invloeden van de klimaatverandering (hogere waterstanden dan tot dusver in de winter, lagere waterstanden dan tot dusver in de zomer en herfst) als gevolg van de veranderingen in de watertoevoer. Het huidige, door de energiemarkt gedicteerde, reservoirbeheer in de bovenloop van het stroomgebied versterkt deze effecten, doordat water in de zomer wordt vastgehouden en in de winter wordt afgegeven.

In het **deltagebied** moet rekening worden gehouden met de samenkomende effecten van veranderende rivierafvoeren en **zeespiegelspijging**. Beide aspecten zullen van invloed zijn op de afwateringsmogelijkheden, het overstromingsrisicobeheer, de zoetwatervoorziening en de verzilting. Ook hier kunnen de grenzen van de huidige beheerpraktijken en -doelen worden bereikt binnen de context van de klimaatverandering.

De richting van de met het scenario RCP8.5 geprojecteerde veranderingen blijft in wezen dezelfde ten opzichte van **vorige scenario's** (Special Report on Emissions Scenarios - SRES A1B). De spreiding van de resultaten is echter groter, omdat er meer – en deels heterogene – datasets zijn gebruikt. Dit rapport is een eerste aanzet tot **vergelijking van nationale studies gebaseerd op het 5^e IPCC-rapport**. Binnen het kader van de HCLIM-werkzaamheden was het niet mogelijk om de verschillen tussen de toegepaste modellen en databehandlungsprocedures van de bijdragende onderzoeksteams te onderzoeken en mogelijk te elimineren. Dit moet deel gaan uitmaken van toekomstige projecten in het onderzoeksnetwerk. Er is ook meer **onderzoek nodig** met betrekking tot a) een inventarisatie naar beschikbare methodes voor extremewaardestatistieken met inbegrip van geprojecteerde afvoerreeksen, b) subdagelijkse extreme verschijnselen zoals convectieve neerslag en daaruit voortkomende stortvloeden, en c) complexe effecten van klimaatverandering, bijvoorbeeld als gevolg van gecombineerde effecten van hydrologische verandering en zeespiegelstijging, en toekomstig watergebruik en waterbeheer in het gehele stroomgebied.

De **volgende generatie** klimaatscenario's, zoals gepubliceerd in het 6^e IPCC-evaluatierapport vanaf 2021 (AR 6) (IPCC, 2021 en 2023), is vooralsnog niet gedetailleerd genoeg om de regionale gevolgen voor de Rijn en zijn deelstroomgebieden te kunnen beoordelen. Een mondiale vergelijking op basis van het nieuwe hoge-emissiescenario (Shared Socioeconomic Pathways – SSP5-8.5) wijst in de richting van hogere wereldwijde temperatuurveranderingen (met een grote bandbreedte) dan in het 5^e IPCC-rapport dat aan dit rapport ten grondslag ligt. De KNMI'23-klimaatscenario's zijn al gebaseerd op een geselecteerde set mondiale klimaatmodellen (Coupled Model Intercomparison Projects - CMIP6). Over het algemeen zullen de lente en de zomer gemiddeld droger worden.

De volgende **actualisering van dit scenariorapport** is gepland in samenhang met of vooruitlopend op de actualisering van de klimaatadaptatiestrategie van de ICBR, die elke tien jaar zijn gepland (volgende actualisering 2035).

1 Context van de huidige studie

De Rijnministersconferentie in 2007 stelde dat de gevolgen van de klimaatverandering in de watersector duidelijk zichtbaar zijn en droeg de ICBR op om klimaatadaptatiemaatregelen te nemen.

Daarom heeft de ICBR in 2011 de "Studie naar scenario's voor het afvoerregime van de Rijn" (ICBR-rapport 188; ICBR, 2011) gepubliceerd, waarin informatie is opgenomen van de Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR-rapport over het project "Rheinblick2050"; CHR, 2010). Als gevolg hiervan werd in 2015 de eerste klimaatadaptatiestrategie van de ICBR voor het Rijnstroomgebied gepubliceerd (ICBR 2015a).

Tijdens de 16^e Rijnministersconferentie (2020) is de volgende belangrijke stap gezet in de aanpak van de klimaatverandering in het Rijnstroomgebied, namelijk de start van het programma Rijn 2040 met als titel "De Rijn en zijn stroomgebied: duurzaam beheerd en klimaatbestendig" (ICBR 2020). Een van de hoofddoelstellingen van "Rijn 2040" is het actualiseren van de klimaatadaptatiestrategie van de ICBR voor 2025.

De werkgroep "Hoog- en Laagwater" (WG H) heeft de ICBR-expertgroep HCLIM (EG HCLIM) opgedragen ICBR-rapport 188 te actualiseren, met inbegrip van nieuwe afvoerscenario's. Dit rapport zal de basis vormen voor een geactualiseerde ICBR-klimaatadaptatiestrategie (2025) en zal worden meegenomen in de activiteiten van andere ICBR-groepen en in het tussentijdse rapport over het programma Rijn 2040, dat in 2027 zal worden gepubliceerd. Het onderhavige rapport en de resultaten kunnen worden gebruikt – bijvoorbeeld in het kader van de relevante EU-richtlijnen – voor onderzoek naar de gevolgen van klimaatverandering door organisaties binnen en buiten het Rijnstroomgebied (bv. overheden, onderzoeksinstituten, universiteiten en adviesbureaus).

2 Gegevens en methoden

Klimaatverandering is een van de centrale maatschappelijke uitdagingen voor mens én milieu. Sinds de publicatie van ICBR-rapport 188 (ICBR, 2011) hebben zich in het Rijnstroomgebied en andere stroomgebieden verschillende extreme gebeurtenissen voorgedaan. Dit heeft geleid tot veel aandacht voor klimaateffectstudies en klimaatadaptatiestrategieën. Ook de relevante gegevens en literatuur zijn aanzienlijk gegroeid. In dit rapport worden slechts enkele essentiële werken vermeld die rechtstreeks verband houden met de activiteiten van de EG HCLIM.

De Coupled Model Intercomparison Projects (CMIP) van het World Climate Research Programme (WCRP) bieden projecties van het toekomstige klimaat op wereldschaal en inzichten in klimaatverandering in de vorm van een multimodelensemble van mondiale klimaatmodellen. Deze modeluitkomsten zijn een belangrijke natuurwetenschappelijke basis van de rapporten van de Intergouvernementele Werkgroep inzake klimaatverandering (IPCC) (Meehl et al., 2011; Eyring et al., 2016). Om regionale analyses voor bv. het Rijnstroomgebied mogelijk te maken, worden de mondiale klimaatmodellen (bv. EC-Earth) in het kader van door de EU gefinancierde en nationale programma's (bv. EURO-CORDEX) teruggeschaald naar een regionaal niveau (bv. Jacob. et al., 2014). Deze regionale modellen vormen de basis voor klimaateffectmodellering en voor hydrologische effectanalyses, die leiden tot afvoerprojecties. In dit rapport gebruiken we regionale hydrologische effectanalyses die specifiek gericht zijn op het Rijnstroomgebied als geheel of op de deelstroomgebieden.

De afgelopen 10 jaar zijn er verschillende klimaatdiensten tot ontwikkeling gekomen. Informatie over de hydrologische effecten van klimaatverandering wordt aangeboden via zowel nationale portalen als de EU-klimaatdienst Copernicus Climate Change Service (Berg et al., 2021; EU-Copernicus, 2024).

In deze context betekent "informatie" toegang tot gegevens en, in sommige gevallen, advies over specifieke kwesties, waaronder gebruikersspecifieke evaluaties. Bovendien geven verschillende richtsnoeren die de afgelopen jaren zijn ontwikkeld of geactualiseerd manieren en voorstellen voor hoe om te gaan met het onderwerp klimaatverandering in de waterbeheersector. Dit geldt ook voor het Europese niveau, bijvoorbeeld in de vorm van EU-richtsnoer nummer 24 (EU-CIS 2009, 2024).

2.1 **Onderzoeksinstellingen en onderzoeksteams die toegang bieden tot gegevens**

Het doel van dit rapport is om de bestaande rivierafvoerscenario's van de ICBR (ICBR, 2011) te evalueren en actualiseren. Het evaluatieschema van de scenariostudie uit 2011 wordt omwille van de consistentie en vergelijkbaarheid in principe behouden. Er worden echter vernieuwde en extra aanvullende gegevensbronnen gebruikt, die momenteel de basis vormen voor adaptatiestrategieën in de Rijnsoeverstaten.

Er zijn in de landen van het Rijnstroomgebied recente studies naar de effecten van de klimaatverandering op het afvoerregime in het Rijnstroomgebied, of er lopen dergelijke studies. Hieronder volgt een korte beschrijving van de studies, die de basis vormen van dit rapport, en de onderzoeksteams die gegevens hebben verstrekt aan de EG HCLIM. Beknopte informatie over de gegevensbronnen en het technisch-methodische kader (gebruikte scenario's, klimaatsimulaties en hydrologische modellen) is te vinden in hoofdstuk 2.3 en bijlage A.

De **Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijnstroomgebied (CHR)** heeft het project "The snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries considering the influence of climate change" (De componenten sneeuw- en gletsjersmelt van de afvoer van de Rijn en de zijrivieren van de Rijn rekening houdend met de invloed van de klimaatverandering) (CHR, 2016 en 2022) opgestart. Hierin is onderzocht hoe de afvoercomponenten van de Rijn zijn veranderd en hoe ze in de toekomst zullen veranderen als gevolg van klimaatverandering, terugtrekkende gletsjers en afnemende sneeuwvoorraden in de bergen. Dit project kwantificeerde de dagelijkse fracties van de regen-, sneeuwsmeelt- en gletsjerijsmeltcomponenten voor een geselecteerd klimaatscenario (RCP8.5) voor de belangrijkste zijrivieren en langs de hoofdstroom van de Rijn op basis van een ensemble van 7 projecties tot 2100 (label "**ASGII**").

In **Zwitserland** gaf de Bondsraad de Zwitserse Milieudienst (BAFU: Bundesamt für Umwelt) de opdracht om betrouwbare hydrologische grondslagen voor de adaptatiemaatregelen voor te bereiden. In het kader van het prioritaire thema "Hydrologische principes van klimaatverandering" van het National Centre for Climate Services (NCCS) – afgekort Hydro-CH2018 (label "**Hydro-CH2018**") – zijn de effecten van klimaatverandering op de waterhuishouding, de wateren en het waterbeheer geanalyseerd. Het werk is gebaseerd op de klimaatscenario's van CH 2018, waarbij – onder andere – RCP8.5 voor Zwitserland werd geprojecteerd (NCCS, 2018). Voor het project Hydro-CH2018 zijn verschillende hydrologische modellen, toegespitst op de specifieke onderzoeksvragen (modellen voor grondwater, watertemperatuur, vegetatie en landbouw), gebruikt (Zwitserse Milieudienst – BAFU, 2021). Dit resulteerde in hydrologische scenario's, die de toekomstige ontwikkelingen in de Zwitserse wateren aangeven. De resultaten zijn vrij toegankelijk in verschillende publicaties en op de website van het NCCS ([Hydro-CH2018 hydrological scenarios](#)) en de Hydrologische Atlas van Zwitserland ([HADES](#), [HYDROMapsCC](#)).

In **Duitsland** worden voortdurend expertise, modellen en methoden ontwikkeld binnen de institutionele netwerken van de deelstaten (bv. Klimaatverandering en gevolgen voor het waterbeheer – KLIWA) en binnen onderzoeksprojecten en -programma's van de Bond (bv. [BMDV-netwerk van experts](#); Nilson et al., 2020). De gegevens worden aangeleverd door permanente klimaatdiensten (bv. de "DAS Basisdienst Klima und Wasser") of door adviesdiensten van de deelstaten die nationale en regionale strategieën voor klimaatadaptatie ondersteunen (bv. de Duitse adaptatiestrategie DAS: Deutsche Anpassungsstrategie). In totaal heeft Duitsland twee datasets aangeleverd over de dagelijkse afvoer die in dit rapport worden gebruikt; deze zijn allebei gebaseerd op het hoge-emissiescenario RCP8.5 en een ruimtelijk verdeeld, procesgeoriënteerd waterhuishoudingsmodel (Bremicker, 2000; Nilson et al., 2020) en bestrijken de periode tot 2100. Het door de Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) via de DAS-basisdienst "Klima und Wasser" beschikbaar gestelde projectie-ensemble omvat zestien projecties voor het internationale stroomgebied van de Rijn. Het ensemble is geproduceerd met het waterhuishoudingsmodel LARSIM-ME (horizontale resolutie van 5 km, label "**DAS**"). Een ander ensemble van negen projecties is aangeleverd door het KLIWA-samenwerkingsverband. Het modelgebied omvat het stroomgebied van het meetpunt Keulen. De simulaties zijn uitgevoerd met het waterhuishoudingsmodel LARSIM (horizontale resolutie van 1 km) en een synoptisch model voor de hoofdstroom van de Rijn (label "**KLIWA**").

Frankrijk heeft gegevens aangeleverd die zijn geproduceerd in het **MOSARH21-project** (Moselle-Sarre-Rhin au 21ème siècle – MOSARH21, Thirel et al., 2018). Het project werd in 2017 afgerond en werd gefinancierd door het Wateragentschap Rijn-Maas (Agence de l'eau Rhin-Meuse) en IRSTEA (nu INRAE). Het werd uitgevoerd door IRSTEA in samenwerking met

het laboratorium LOTERR (Universiteit van Lotharingen), HYDRON en DREAL Grand Est. Het doel was om voor de 21^e eeuw de toekomstige effecten van klimaatverandering op de rivierafvoer te evalueren voor de **Franse zijrivieren**, zoals de Moezel en de Saar. Het onderzoek werd uitgevoerd volgens een multimodelaanpak (met behulp van twee hydrologische modellen – GRSD en LARSIM – en verschillende parametersets) in combinatie met een ensemble van afgeschaalde klimaatprojecties (gebaseerd op de AR5-emissiescenario's van IPCC) (label "**MOSARH21**").

In **Nederland** produceert het Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut (KNMI) regelmatig klimaatscenario's en -gegevens. De momenteel meest actuele klimaatscenario's zijn de **KNMI'23**-klimaatscenario's, die reeds gebaseerd zijn op het AR6-rapport van het IPCC. De klimaatscenario's worden ingevoerd in de afvoermodellen die door Deltares zijn ontwikkeld in samenwerking met het KNMI en Rijkswaterstaat, de rivierbeheerder van Rijkswateren. Omdat de afvoerprojecties op basis van KNMI'23-klimaatscenario's op het moment van schrijven nog in ontwikkeling waren, moesten hier projecties worden gebruikt die gebaseerd zijn op het 5^e evaluatierapport (label "**KNMI'14**"). De eerste resultaten van KNMI'23 met betrekking tot de meteorologische veranderingen worden vermeld in hoofdstuk 6.1. De afvoerprojecties die in deze studie zijn gekozen (label "KNMI'14") maken gebruik van het hydrologische model HBV en zijn onder meer gebaseerd op het hoge-emissiescenario RCP8.5. De Nederlandse dataset verschilt van de andere datasets met betrekking tot de gegevensverwerking en de aanpak. Meer informatie hierover is te vinden in de technische bijlage A en de daar geciteerde projectrapporten.

Sommige oeverstaten hebben weliswaar deels algemene klimaateffectstudies voor het Rijnstroomgebied uitgevoerd, maar de detailgraad van de informatie voldeed niet om als gegevensbasis te kunnen dienen voor de hier voorgestelde analyses. Aangezien sommige van de bovengenoemde datasets grote delen van het Rijnstroomgebied omvatten, is echter ook hier informatie beschikbaar. **Liechtenstein** wordt bijvoorbeeld gedekt door de gegevens van Zwitserland en de CHR. Ook **Oostenrijk** wordt door de CHR-gegevens gedekt. **Luxemburg en België (Wallonië)** worden gedekt door de gegevens van de CHR, KLIWA en DAS.

Samenvattend kan worden gesteld dat voor het hele Rijnstroomgebied gegevens beschikbaar zijn, maar dat de gegevensbronnen en verwerkingsprocedures verschillen tussen de deelstroomgebieden en meetpunten.

2.2 Schema voor gegevensintegratie en -analyse

Er bestaat momenteel geen eenduidige en algemeen aanvaarde "beste praktijk" voor de beoordeling van hydrologische klimaateffecten. Het tot stand brengen van afvoerprojecties vormt nog steeds een uitdaging met verschillende onzekerheden. De bijdragende onderzoeksteams die gegevens aan deze studie hebben geleverd (zie hoofdstuk 2.1) hebben onafhankelijk van elkaar hun eigen aanpak en modellen gekozen en toegepast. Een overzicht van overeenkomsten (groen) en verschillen (oranje) tussen de studies die hebben bijgedragen aan de EG HCLIM wordt weergegeven in tabel 1.

Tabel 1: Overzicht van de overeenkomsten (groen) en verschillen (oranje) van de aangeleverde datasets in dit onderzoek

Land, groep	CHR	NL	CH	DE	DE (deelstaten)	FR
Bijgedragen activiteit	CHR-ASG II	KNMI'14	Hydro-CH2018	DAS (2021)	KLIWA	MOSARH21
Vorige activiteit	CHR-Rheinblick (2010)	KNMI'06	Hydro-CH2011	KLIWAS, DAS (2015)	KLIWA	EXPLORE 2070
Ruimtelijke dekking	Rijn (volledig)	Rijn (volledig)	Rijn (CH)	Rijn (volledig)	Rijn (Keulen)	Rijn (FR)
Temporele dekking	1973-2100	1951-2100 (Zichtjaren ¹)	1981-2100	1971-2100	1971-2100	1971-2100 (Zichtjaren ³)
IPCC-rapport	AR5	AR5	AR5	AR5	AR5	AR5
Scenario	RCP8.5	RCP8.5, ...	RCP8.5, ...	RCP8.5, ...	RCP8.5	RCP8.5, ...
Klimaat-modellen	CORDEX	CMIP5, RACMO	CORDEX	CORDEX	CORDEX	CMIP5, CORDEX
Verwerking klimaat-gegevens	Biascorrectie	Delta Change	Biascorrectie	Biascorrectie	Biascorrectie	Delta Change
Ensemble-grootte	7	3 ²	20	16	9	4 ³
Hydrologisch model	HBV-light, LARSIM	HBV	HBV-light, PREVAH	LARSIM	LARSIM	GRSD, LARSIM
Referentie-periode	1981-2010	1951-2006	1981-2010	1971-2000	1971-2000	1971-2000 (2005)
"Nabije" toekomst (toekomst 2)	2031-2060		2020-2049 (2045-2074)	2031-2060	2021-2050 (2041-2070)	2021-2050
"Verre" toekomst	2071-2100	2071-2100	2071-2100	2071-2100	2071-2100	2071-2100
Opvolgings-activiteit	CHR-Rheinblick (2027)	KNMI'23	Hydro-CH2025	DAS (2027)	KLIWA ...	Explore2

¹ Toelichting op "zichtjaren": De datasets KNMI'14 en MOSARH21 bevatten geen doorlopende perioden (dagelijkse tijdreeksen die zich uitstrekken van 1971 tot 2100) zoals andere datasets, maar perioden van slechts enkele decennia (in dit rapport aangeduid als "zichtjaren").

² Hier alleen W_L , W_H , W_{Hdry} ; de eveneens tot KNMI'14 behorende scenario's G_L en G_H zijn niet in aanmerking genomen, omdat deze niet zijn gebaseerd op RCP8.5. Zie de bijbehorende toelichtingen en definities in hoofdstuk 2.1 en bijlage A.

³ 2 x LARSIM, 2 x GRSD

De expertgroep zorgde voor een technische integratie binnen de mogelijkheden van de ruwe data (dagelijkse tijdreeksen) van de verschillende bijdragen dan wel databronnen volgens de afspraken die in de volgende alinea's beknopt zijn weergegeven.

De gegevensverwerking en -analyse voor dit rapport werd verricht door de Duitse hydrologische dienst (Bundesanstalt für Gewässerkunde – BfG) in het kader van de DAS-Basisdienst "Klima und Wasser" (DAS-kerndienst "Klimaat en water"). De resultaten van de analyses zijn besproken in het kader van de EG HCLIM. Beslissingen over de integratie van data en de stappen in de analyse zijn gezamenlijk genomen in de EG HCLIM. Hieronder volgt een korte weergave van het analyseschema dat op alle gegevens is toegepast en dat heeft geleid tot de resultaten die in hoofdstuk 3 worden gepresenteerd. Aanvullende achtergrondinformatie wordt gegeven in de technische bijlage (bijlage A).

2.2.1 Tijdsperiodes

De basisgegevens (waarnemingen, projecties) werden aangeleverd als dagelijkse tijdreeksen, die zich uitstrekten vanaf 1971 tot 2100⁴ (of vergelijkbaar, zie tabel 1). Er is besloten om de tijdsperiodes voor de evaluatie te baseren op de beschikbare gegevens en de gedeeltelijke consistentie met onderliggende onderzoeken. In het rapport worden veranderingen in de perioden **2031-2060** ("nabije toekomst", "midden van de 21^e eeuw") en **2071-2100** ("verre toekomst", "einde van de 21^e eeuw") geëvalueerd, met de periode **1981-2010** als referentieperiode. Daarnaast werd de periode **1991-2020** ("heden") toegevoegd om de waargenomen hydrologische veranderingen in het recente verleden vast te leggen.

2.2.2 Scenario

Hoewel verschillende groepen meer dan één scenario gebruikten, werd besloten om de evaluatie te beperken tot het hoge-emissiescenario **RCP8.5**. Daarnaast werd besloten om alleen klimaatmodelruns uit te voeren die passen bij het **5^e IPCC-evaluatierapport**.

Deze beslissing werd in de eerste plaats om pragmatische redenen genomen, omdat RCP8.5 het enige scenario is dat in *alle* onderliggende onderzoeken is gebruikt. De tweede reden is dat de EG HCLIM besloot om een *voorzorgsaanpak* te hanteren. Er werd vanuit gegaan dat voor risicobeheer de ICBR-groepen zich zullen richten op en bezig zijn met de voorbereiding van ongunstige omstandigheden (hoge-emissiescenario's) en niet gematigde omstandigheden. Het is belangrijk op te merken dat alle scenario's (inclusief RCP8.5) moeten worden beschouwd als *mogelijke* paden naar de toekomst, waarvan de kans van optreden zal worden bepaald door mitigatiebeslissingen en -maatregelen en het succes daarvan in de komende jaren. Als er rekening wordt gehouden met andere RCP-scenario's (2.6 of 4.5) levert dit heel andere resultaten op.

Dat alleen de scenario's en mondiale gegevensbasis van het 5^e IPCC-evaluatierapport zijn meegenomen, heeft te maken met het feit dat actuelere scenario's en gegevens, die overeenkomen met het meest recente, 6^e evaluatierapport, nog niet beschikbaar waren in de vorm van afvoerprojecties.

2.2.3 Meetstations/deelstroomgebieden

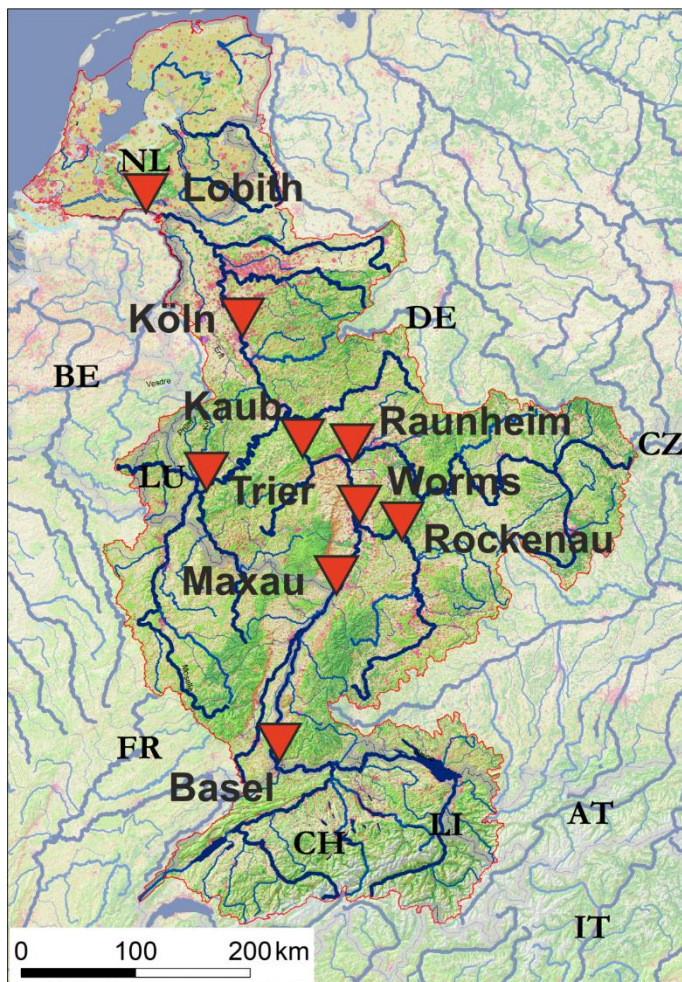
Volgens de beschikbare klimaatprojecties zal klimaatverandering effect hebben op verschillende componenten van de hydrologische cyclus (neerslag zoals sneeuw en regen, grondwater, verdamping, enz.). Aangezien deze componenten in de verschillende regio's van het Rijnstroomgebied van verschillend belang zijn (bv. sneeuw in de Alpengebieden, regen in het middelgebergte), zullen ook de veranderingen in de rivierafvoer per deel van het Rijnstroomgebied verschillen.

Om deze heterogeniteit beknopt weer te geven in dit rapport en de vergelijkbaarheid met het vorige rapport over scenario's (ICBR, 2011) te waarborgen, werden er negen representatieve meetstations geselecteerd. Deze locaties geven inzicht in de belangrijke regionale bijzonderheden in de waterhuishouding en het afvoerregime (figuur 1). Bazel en Maxau vertegenwoordigen het alpiene deel van de Rijn (momenteel sterk beïnvloed door sneeuw). Trier, Raunheim en Rockenau vertegenwoordigen het middelgebergte (gedomineerd door regen). Worms, Kaub, Keulen en Lobith vertegenwoordigen gecombineerde kenmerken van

⁴ Dit geldt voor alle gebruikte modellen met uitzondering van KNMI'14 en MOSARH21, die zichtjaren hebben, zoals gedefinieerd in tabel 1/hoofdstuk 2.2.

beide regio's (door sneeuw en regen beïnvloede regimes). Acht van de genoemde stations zijn gebruikt in ICBR-rapport 188 (ICBR, 2011). Het meetstation Rockenau is als aanvullende locatie opgenomen.

Opmerking: De dataset die in dit rapport wordt gebruikt, omvat meer meetstations dan in figuur 1 aangegeven. Meer informatie en evaluatieresultaten zijn op aanvraag beschikbaar bij het ICBR-secretariaat (sekretariat@iksr.de). Desgewenst leidt het secretariaat de aanvraag door naar de bevoegde leden van de EG HCLIM en/of verwijst naar de desbetreffende onderzoeksgroepen en nationale klimaatdiensten.



Figuur 1: Overzichtskartaal met de meetstations in het Rijnstroomgebied die zijn geselecteerd voor dit rapport

2.2.4 Hydrologische statistieken en indicatoren

Net als in het vorige ICBR-rapport 188 (ICBR, 2011) werd een selectie van hydrologische statistieken gekozen om de effecten van klimaatverandering weer te geven (tabel 2). De indicatoren zijn gekozen met het oog op de vergelijkbaarheid met het voorgaande rapport (ICBR, 2011) en het adresseren van verschillende aspecten van het waterbeheer; hiertoe behoren de jaarlijkse beschikbaarheid van waterbronnen, scheepvaart, ecologische aspecten en overstromingsrisicobeheer. Omwille van de beknoptheid van het rapport konden niet alle denkbare indicatoren en aspecten van het waterbeheer in aanmerking worden genomen. Aanvullende indicatoren kunnen op verzoek worden gegenereerd. Neem hiervoor contact op met het secretariaat van de ICBR.

Tabel 2: Overzicht van hydrologische indicatoren in het rapport

(Opmerking: Informatie over andere indicatoren en hydrologische parameters kan op verzoek bij het secretariaat van de ICBR worden verkregen. Desgewenst leidt het secretariaat de aanvraag door naar de bevoegde leden van de EG HCLIM en/of verwijst naar de desbetreffende onderzoeksgroepen en nationale klimaatdiensten.)

Jaarlijkse indicatoren (hydrologische jaren: november-oktober)		Mogelijke relevantie
Gemiddelde jaarafvoer	MQ	Indicator van algemene beschikbaarheid van waterbronnen
Gemiddelde laagste jaarafvoer	MNQ	Indicator van jaarlijkse laagwaterafvoeren, bijvoorbeeld relevant voor scheepvaart, waterkwaliteit en ecologie
Gemiddelde hoogste jaarafvoer	MHQ	Indicator van jaarlijkse hoogwaterafvoeren (exclusief extreme hoogwaterafvoeren), bijvoorbeeld relevant voor de ecologie in uiterwaarden en het milieu
Seizoensindicatoren (hydrologische seizoenen zomer (mei-oktober) en winter (november-april))		Mogelijke relevantie
Gemiddelde zomer- en winterafvoer	MQS en MQW	Indicatoren van seizoensgebonden veranderingen in de afvoer (afvoerregime) en de beschikbaarheid van waterbronnen
Gemiddelde laagste zomerafvoer (7-daags gemiddelde)	NM7QS	Indicator van stress door laagwater in het warme seizoen (ecologie, bijvoorbeeld voor de vispopulatie in verband met te hoge watertemperaturen)
Gemiddelde laagste winterafvoer (7-daags gemiddelde)	NM7QW	Indicator van stress door laagwater in het koude seizoen (ecologie, bijvoorbeeld voor de vispopulatie in verband met te lage watertemperaturen)
Hoogwater gekoppeld aan plannen voor overstromingsrisicobeheer		Mogelijke relevantie
Frequente hoogwatersituatie	HQ10	Gekoppeld aan het scenario met de grootste kans op overstromingen conform de EU-Richtlijn over overstromingsrisico's (kaarten en plannen) ⁵
Gemiddelde hoogwatersituatie	HQ100	Gekoppeld aan het scenario met de middelgrote kans op overstromingen conform de EU-Richtlijn over overstromingsrisico's (kaarten en plannen) ⁵
Extreme hoogwatersituatie	HQ1000	Gekoppeld aan het extreme scenario conform de EU-Richtlijn over overstromingsrisico's (kaarten en plannen) ⁵

⁵ De absolute referentiewaarden voor de afvoer die zijn gebruikt om de veranderingsinformatie te berekenen, zijn gebaseerd op de gegevens in het onderhavige rapport. Ze komen niet noodzakelijkerwijs overeen met de officiële vastgelegde waarden (bv. in het kader van de nationale implementatie van de EU-ROR). Om verwarring te voorkomen, worden er geen absolute waarden gegeven.

Alle indicatoren zijn berekend voor de hierboven vermelde meetpunten, met behulp van de beschikbare waarnemings- en projectiegegevens. Bij de afvoerderelateerde indicatoren verwijzen de jaarindicatoren naar hydrologische jaren (november-oktober), seizoensindicatoren verwijzen naar de hydrologische seizoenen zomer (mei-oktober) en winter (november-april). De jaarlijkse HQ-reeksen die ten grondslag liggen aan de statistieken voor extreme waarden hebben betrekking op hydrologische jaren. Meer informatie over de statistische hoogwateranalyse op basis van extreme waarden is te vinden in bijlage A.

Opmerking: De hydrometeorologische indicatoren zijn gebaseerd op meteorologische praktijken en hebben afwijkende jaar- en seizoenreferenties (zie hoofdstuk 3.1 en tabel 6).

Alle veranderingssignalen worden afgerond op volledige percentagewaarden.

2.2.5 Aggregatie en integratie

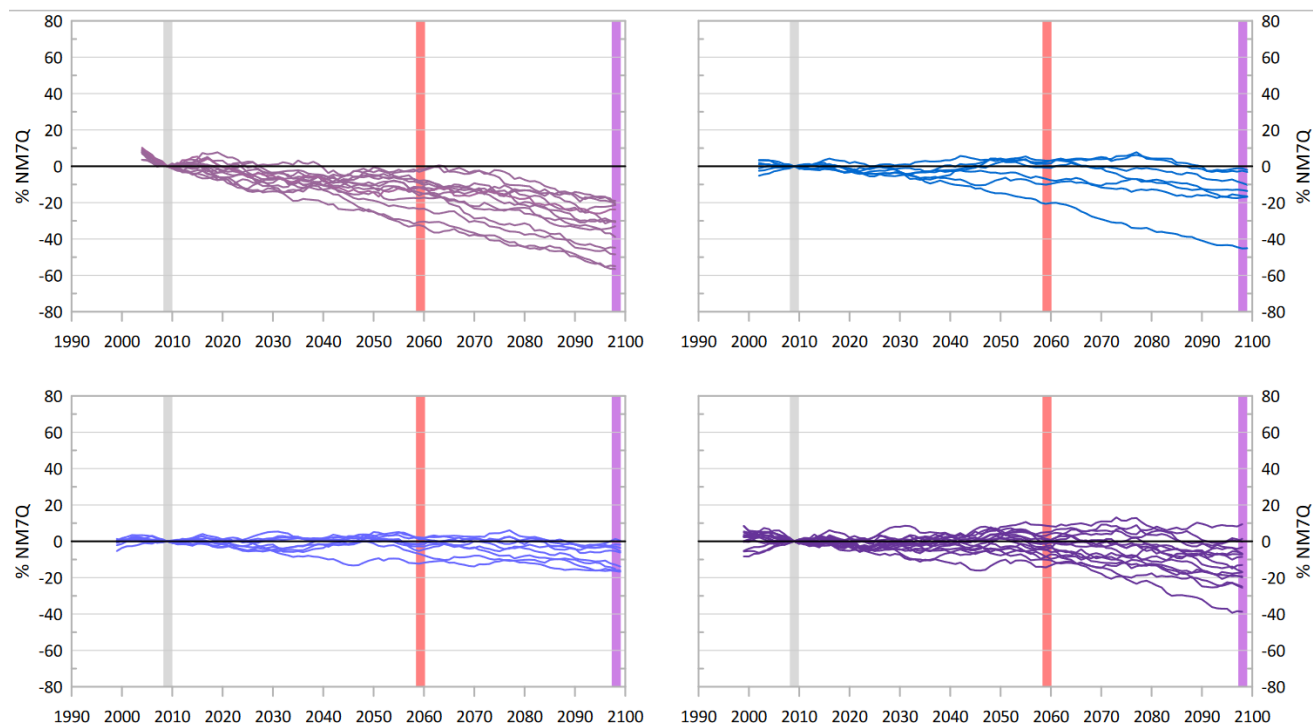
Uit de jaarlijkse en seizoensgebonden tijdreeksen van waarnemings- en projectiegegevens werden in een eerste stap meerjarige procentuele veranderingssignalen tussen de toekomst en de referentieperiode (1981-2010) berekend als voortschrijdende gemiddelden over 30 jaar (figuur 2).

In een tweede stap is voor elk van de datasets (afvoerprojecties uit CHR, Hydro-CH2018, KLIWA, DAS, KNMI'14) de bandbreedte van de veranderingssignalen tussen de referentieperiode (1981-2010) en de afgesproken toekomstperiodes (2031-2060, 2071-2100) bepaald (verticale staven in figuur 2, linkerdeel van figuur 3). De bandbreedte is het resultaat van de spreiding van de verschillende toekomstprojecties en geeft een idee van de bandbreedte van de mogelijke ontwikkelingen.

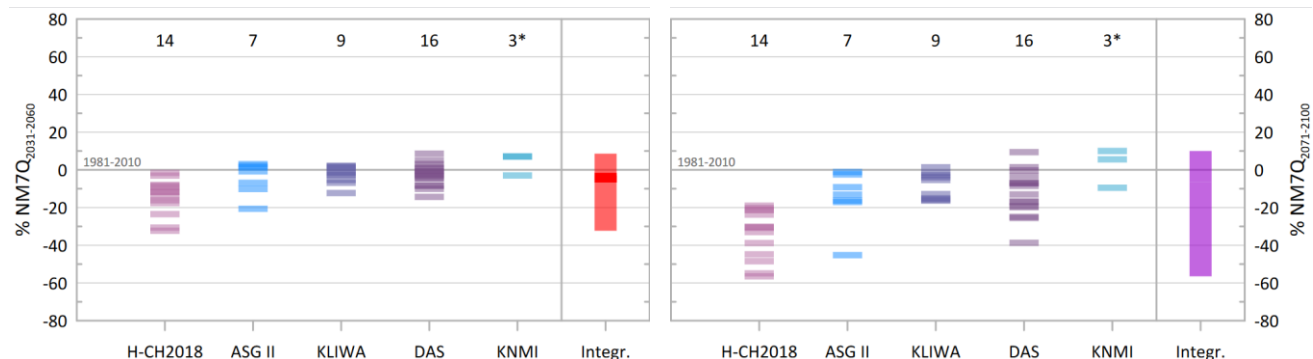
Om tot een totaalbeeld van alle gegevens te komen, werd tot slot de totale spreiding (van minimum tot maximum) en - voor zover beschikbaar - de overlapping tussen de datasets afgeleid (rechterdeel in figuur 3). Deze informatie wordt ook gepresenteerd in de tabellen in hoofdstuk 3.3.

De beschreven procedure werd toegepast op alle hydrologische indicatoren (tabel 2) en geselecteerde meetpunten (figuur 1), met uitzondering van de parameters HQ10, HQ100 en HQ1000, die in het kader van een statistiek voor extreme waarden worden behandeld (zie aparte tekst hieronder).

Er zij opgemerkt dat dit een zeer vereenvoudigde manier van gegevensintegratie is, maar gelet op de beschikbare middelen en het mandaat evenals de gegevensbasis moest er pragmatisch te werk worden gegaan. In verband met de grote verschillen en het onevenwicht tussen de verschillende gegevensbestanden (zie tabel 1 en bijlage A, onderdeel 2) is er geen volledige statistische integratie uitgevoerd (bv. bepaling van de percentielen van het totale ensemble). Ook zijn de voor- en nadelen van de toegepaste modellen en methoden niet beoordeeld. Gelet op het voorgaande is er voorzichtigheid geboden bij de interpretatie van het "integrale" overzicht in hoofdstuk 3.3 en de grafieken in de bijlage.



Figuur 2: Voorbeeld van een werkgrafiek die de spreiding van de verschillende ensembles illustreert (van linksboven naar rechtsonder: Hydro-CH2018, ASGII, KLIWA, DAS). Exemplarische weergave van de jaarlijkse laagwaterafvoer (NM7Q) op het meetpunt Basel, verandering van voortschrijdende gemiddelden over 30 jaar ten opzichte van de referentieperiode. De verticale balken markeren de referentieperiode (1981-2010) en de toekomstige periodes die in dit rapport zijn gekozen (2031-2060 en 2071-2100; zie figuur 3). De volledige reeks grafieken is in te zien via de [CHR-website](#). Het gegevensbestand van KNMI'14 kan hier niet worden weergegeven, omdat het geen doorlopende tijdreeksen omvat (zie hoofdstuk 4.2.2).



Figuur 3: Voorbeeld van een werkgrafiek die de ensemblespreiding op basis van afzonderlijke datasets illustreert voor de twee toekomstige intervallen die in dit rapport zijn geselecteerd. Het "geïntegreerde beeld" toont het bereik tussen de laagste en hoogste geprojecteerde waarden van alle ensembles (sommige lijnen in de grafiek overlappen elkaar, wat het dikteverschil veroorzaakt).

2.2.6 Indicatoren voor hoogwaterextremen (dan wel overstromingsscenario's conform het overstromingsrisicobeheerplan: HQ10, HQ100, HQ1000)

De hierboven beschreven werkwijze kon niet worden toegepast op hoogwaterparameters die relevant zijn in het kader van het overstromingsrisicobeheer conform de EU-Richtlijn over overstromingsrisico's. Dit komt doordat er voor betrouwbare statistieken van extreme waarden zeer lange tijdreeksen nodig zijn. Behalve voor Nederland, die hiervoor een methode hebben ontwikkeld⁶ (zie toelichting in de voetnoot) is het op basis van een periode van slechts dertig jaar waarnemingen vrijwel onmogelijk om een hoogwatergebeurtenis te benaderen met een statistische herhalingstijd van 1000 jaar (HQ1000) en ook voor een herhalingstijd van 100 jaar (HQ100) is dit zeer onzeker. De onderzoeksgroepen die hebben bijgedragen aan dit rapport zijn op verschillende manieren omgegaan met deze (te) korte tijdreeksen.

Aansluitend bij Rauthe et al. (2020) zijn de projecties van de ensembles "Hydro-CH2018", "ASGII" en "DAS" behandeld als zogenaamde "grand samples" dan wel "verenigde series". Deze aanpak gaat uit van de aanname dat alle projecties van een ensemble zijn gebaseerd op dezelfde populatie. Dit veronderstelt a) dat alle klimaatsimulaties door hetzelfde emissiescenario zijn gegenereerd, b) dat er een biascorrectie is uitgevoerd met waarnemingen in een soortgelijke klimaatperiode (1971-2000 of 1981-2010) en c) dat alle hydrologische simulaties met hetzelfde hydrologische model zijn uitgevoerd. Aan deze voorwaarden is bij elk van de drie genoemde gegevenssets voldaan. Het voorgaande betekent dat de beschikbare hoeveelheid gegevens voor de statistiek van extreme waarden wordt uitgebreid (tabel 3). De herhalingstijden (HQ10, HQ100, HQ1000) uit het ASGII-ensemble worden bijvoorbeeld op basis van 7x30 jaar (210 jaar) in plaats van 1x30 jaar berekend⁷. Met deze aanpak is het enerzijds mogelijk een robuustere statistiek op te bouwen en de bovengenoemde evaluatieperiodes te behouden, maar anderzijds kunnen er geen bandbreedtes van mogelijke ontwikkelingen meer worden aangegeven (d.w.z. alleen één wijzigingswaarde per ensemble, periode en parameter).

Ook voor het "KLIWA"-ensemble is de gegevensbasis uitgebreid voor de statistiek van extreme waarden. Hierbij werd de overweging gevolgd dat vooral extreme hoogwatergebeurtenissen nagenoeg toevallige fenomenen in de tijd zijn. Daarom is er voor de statistiek van extreme waarden "één" toekomstperiode bekeken, die alle jaren van 2031-2100 omvat. Elk van de negen KLIWA-projecties is apart geëvalueerd op basis van deze zeventig jaar. Hierdoor is het mogelijk om zowel de bandbreedte van geprojecteerde ontwikkelingen af te beelden, als om de statistiek van extreme waarden te baseren op een langere evaluatieperiode (70 projectiejaren in plaats van 30 projectiejaren). Hiertegenover staat dat er geen tijdspecifieke veranderingsinformatie voor het midden en het einde van de eeuw kan worden aangegeven (d.w.z. dezelfde bandbreedte voor beide toekomstige periodes per parameter).

Voor het genereren van lange synthetische tijdreeksen, waaruit extreme hoogwaters/herhalingstijden bepaald kunnen worden, heeft "KNMI'14" een neerslaggenerator gebruikt om 50.000 jaar te simuleren voor het huidige klimaat. De neerslaggenerator maakt gebruik van een resampling methode, waarbij er nieuwe synthetische neerslagreeksen worden gegenereerd voor het huidige klimaat met dezelfde kenmerken als de waarnemingen voor de dagelijkse hoeveelheid neerslag met verschillende tijdspatronen (Deltares, 2014). Op de synthetische tijdreeksen voor het huidige klimaat, hierna genoemd referentie, wordt een tijdreekstransformatie toegepast, waarbij een transformatie toegepast wordt die o.a. afhangt van het klimaatscenario en de gewenste tijdshorizon. De tijdreekstransformatie genereert hiermee gelokaliseerde tijdreeksen van temperatuur en neerslag (en potentiële evapotranspiratie, PET). Uit deze synthetische reeksen worden met behulp van het hydrologisch en hydraulisch instrumentarium uiteindelijk de hoge herhalingstijden gehaald. De synthetische reeksen kunnen nieuwe, hogere meerdaagse neerslagsommen geven, maar zijn beperkt in het meenemen van de verandering in persistentie (opeenvolgende natte of droge dagen). In verband met de Nederlandse gegevensset "KNMI'14" zijn er in het bijzonder voor de statistieken van extreme waarden op het meetpunt Lobith veel inspanningen gedaan om betrouwbare veranderingsinformatie voor hoogwaterextremen te verkrijgen. De methode is ontwikkeld voor herhalingstijden tot 50.000 jaar en omvat naast verschillende klimaatscenario's

⁶ In Nederland worden gegevensreeksen kunstmatig verlengd via een neerslaggenerator en hydrologische en hydraulische modellen, bv. om extreme herhalingstijden te generen. Het nadeel is echter dat je geen verandering in persistentie kan waarnemen en dat er rekening moet worden gehouden met onzekerheden.

⁷ Hydro-CH2018 14x30 = 420 jaar; DAS 13x30 = 390 jaar

ook verschillende aannames in verband met overstromingen bovenstrooms van de Nederlandse grens.

Met de gegevensset "MOSARH21" (Frankrijk) is opnieuw geen rekening gehouden in de analyse, omdat de set geen van de hier gekozen rapportagemetpunten bevat.

In tabel 3 worden de belangrijkste kenmerken van de hierboven genoemde methodes samengevat.

Tabel 3: Kenmerken van de verschillende datasets en methodes die zijn gebruikt voor de bepaling van de hoogwaterparameters HQ10, HQ100 en HQ1000

Bron	Aantal jaren voor de HQT-bepaling	Methode	Differentiatie in tabel 9		
			Bandbreedte	Tijdsperioden	Parameters
ASGII	210	Grand sample	nee	ja	ja
Hydro-CH2018	420	Grand sample	nee	ja	ja
KLIWA	70	Individual projections	ja	nee	ja
DAS	390	Grand sample	nee	ja	ja
KNMI	56	Individual projections	ja	ja	ja

Het wordt duidelijk dat het een uitdaging is om door klimaatverandering veroorzaakte veranderingen in het optreden en de intensiteit van zeldzame extreme gebeurtenissen af te leiden en dat er een grote bandbreedte van mogelijke ontwikkelingen ontstaat. Naast de grote bandbreedte van geprojecteerde neerslagontwikkelingen in het extreme bereik, nemen de onzekerheden in de hydrologische modellering en ook in de statistische evaluatie toe naarmate de herhalingstijden langer worden. Er moet worden bedacht dat bij de hydrologische modelleringen die in de meeste studies (behalve KNMI'14) zijn uitgevoerd het hydraulische vermogen van de rivier niet beperkt is en er in de modelleringen geen rekening is gehouden met retentiemaatregelen, zoals polders. De (hypothetische) extreme hoogwatergebeurtenissen die zodoende worden bepaald, zouden in de realiteit deels al in de bovenloop leiden tot dijkoverstromingen en dijkdoorbraken. Dit betekent dat in de voorliggende modelleringen de extreme hoogwaterafvoeren veelal worden overschat.

Het "integrale beeld" dat in tabel 9 is weergegeven voor de hoogwaterparameters HQ10, HQ100 en HQ1000 (dan wel HQ "frequent", HQ "gemiddeld" en HQ "extreem") wordt, zoals bij de andere hydrologische indicatoren, bepaald door de hoogste en de laagste ontwikkeling in de actuele totale dataset. Resultaten voor de afzonderlijke gegevensbestanden zijn te vinden in de bijgevoegde onlinegrafieken ([website van de CHR](#)).

Anders dan bij de andere hydrologische indicatoren is er bij de evaluaties voor HQ10, H100 en HQ1000 afgezien van een weergave van waargenomen waarden ("referentie" en "heden"). Dit heeft ook hier weer te maken met onder meer de homogeniteit van de gegevens. Desbetreffende officiële afvoerwaarden zijn te vinden in bv het ICBR-rapport voor de tweede cyclus van de EU-Richtlijn over overstromingsrisico's (ROR), getiteld "Actualisering van de overstromingsgevaar- en overstromingsrisicokaarten in het internationaal Rijndistrict" (daar: bijlage 3) (ICBR, 2019).

2.2.7 Aanvullende indicatoren

Naast de hydrologische indicatoren werd een geselecteerde set van hydrometeorologische indicatoren berekend die uitsluitend geeft over veranderingen in de luchttemperatuur en de neerslag in het Rijnstroomgebied (stroomgebied als geheel tot het meetpunt Lobith; hoofdstuk 3.1). Daarnaast is een indicator van de verandering in het rivierafvoerregime (meerjarige gemiddelde maandafvoer) berekend voor geselecteerde meetstations (hoofdstuk 3.2), wat helpt om de hydrologische veranderingen beter te begrijpen (tabel 2).

2.3 Opmerkingen over de heterogeniteit van de gegevenssets

Anders dan in het vorige rapport nr. 188 (ICBR, 2011) kon de EG HCLIM zijn werk niet baseren op één vooraf geconsolideerde dataset, maar moest de groep werken met verschillende, deels heterogene, datasets (zie hoofdstuk 2.2 en details in bijlage A). Doordat de verschillende datasets met elkaar zijn gecombineerd, is de hier weergegeven bandbreedte van de resultaten groter dan de bandbreedte die door elke individuele onderzoeksgroep in zijn eigen studies is vastgelegd. De spreiding is als gevolg van het grote aantal toekomstprojecties waarmee rekening wordt gehouden bovendien groter dan in het vorige rapport (ICBR, 2011).

Voorts leidt deze heterogeniteit ook tot verschillen tussen de datasets voor de afzonderlijke meetstations, die verschillende riviertrajecten en zijrivieren vertegenwoordigen. Dit komt doordat enkele datasets alleen delen van het Rijnstroomgebied bestrijken. Tabel 4 geeft een overzicht van de onderzoeksgroepen die gegevens hebben aangeleverd voor de afzonderlijke meetstations.

Voor de indicatoren voor hoogwaterextremen (HQ10, HQ100 en HQ1000) gelden bijzondere aspecten; zie aparte tekst in hoofdstuk 2 onder "aggregatie".

Tabel 4: Overzicht van bijdragende onderzoeksteams per meetstation ⁸

Station	Rivier	Landen (in het stroomgebied)	Hydro-CH2018 (CH)	ASGII (CHR)	KLIWA (DE)	DAS-BfG (DE)	KNMI'14 (NL)	Totaal
Bazel	Rijn	CH	x	x	x	x	x	5
Maxau	Rijn	CH-FR-DE		x	x	x	x	4
Worms	Rijn	CH-FR-DE		x	x	x	x	4
Kaub	Rijn	CH-FR-DE		x	x	x	x	4
Keulen	Rijn	CH-FR-BE-LU-DE		x	x	x	x	4
Lobith	Rijn	CH-FR-BE-LU-DE-NL		x		x	x	3
Rockenau	Neckar	DE		x	x	x		3
Raunheim	Main	DE		x	x	x	x	4
Trier	Moezel	FR-LU-DE-BE		x	x	x	x	4

⁸ MOSARH21-gegevens worden hier niet vermeld omdat ze geen van de meetpunten in dit rapport bestrijken. Opmerking: De volledige dataset bevat nog meer meetstations. Deze gegevens kunnen worden aangevraagd via de [CHR-website](#).

3 Resultaten

In dit hoofdstuk worden de resultaten weergegeven van de hydrometeorologische veranderingen (Rijnstroomgebied als geheel, hoofdstuk 3.1), de verandering in het afvoerregime (drie meetpunten, hoofdstuk 3.2) en - als centraal resultaat van dit rapport - de veranderingen in geselecteerde indicatoren voor hoge, gemiddelde en lage afvoeren (negen meetpunten, hoofdstuk 3.3). De tabellen geven veranderingen weer tussen het heden (1991-2020), de nabije toekomst (2031-2060) en de verre toekomst (2071-2100) ten opzichte van de referentieperiode (hier: 1981-2010).

De bereiken die in de tabellen 7 en 8 zijn weergegeven vertegenwoordigen voor elk van de afvoerindicatoren telkens het totale bereik van alle aangeleverde datasets ("geïntegreerd beeld", zie hoofdstuk 2.2) en (tussen haakjes) de overlap tussen alle datasets. De tabellen lijken op de resultaat-tabellen van het vorige rapport 188 (ICBR, 2011). In tabel 5 wordt het kleurenschema uitgelegd dat in het onderhavige rapport is gekozen (voor tabel 6 t/m 9 en bijlage B).

Tabel 9 volgt een andere methodiek (zie hoofdstuk 2.2 "Indicatoren voor hoogwaterextremen"), maar hanteert ook het hieronder beschreven kleurenschema.

Tabel 5: Kleurenschema voor tabel 6 t/m 9

Kleurencode	Betekenis	Toelichting
Oranje	Verandering naar hete/droge omstandigheden	Meer dan 2/3 van het totale bereik vertoont de betreffende verandering
Blauw	Verandering naar koude/natte omstandigheden	Meer dan 2/3 van het totale bereik vertoont de betreffende verandering
Grijs	Indifferent signaal	Anders

Raadpleeg de hoofdstukken 2.2 e.v. en de technische bijlage A voor aanwijzingen over de analyse en interpretatie van de gegevens.

In bijlage B worden de resultaten van dit rapport in een tabel vergeleken met de resultaten van ICBR-rapport 188 (ICBR, 2011)

Grafieken zoals figuur 2 en figuur 3 zijn voor alle parameters en meetstations in te zien via de [CHR-website](#).

3.1 **Verandering van hydrometeorologische omstandigheden**

Hydrometeorologische veranderingen liggen in meerdere opzichten ten grondslag aan hydrologische veranderingen. De neerslagverandering is direct van invloed op de ruimtelijke en seizoensgebonden verdeling van water. Temperatuurverandering leidt tot veranderingen in verdamping (bv. smelten van sneeuw en ijs) en het neerslagtype (bv. sneeuw, regen).

Tabel 6 beschrijft de algemene veranderingen van de hydrometeorologische omstandigheden in het internationale Rijnstroomgebied bovenstrooms van het meetpunt Lobith op basis van verschillende temperatuur- en neerslagindicatoren. Weergegeven zijn langjarige gemiddelden voor het verleden (1951-1980) en de referentieperiode (1981-2010), afgeleid op basis van waarnemingen. De geprojecteerde veranderingssignalen hebben betrekking op een 19 leden tellend ensemble van regionale klimaatmodellen⁹ dat wordt geforceerd door het hoge-emissiescenario RCP8.5. Hoewel de afvoerprojecties op verschillende ensembles van klimaatprojecties zijn gebaseerd (zie tabel 1 en bijlage A), is de algemene richting en grootte van de hydrometeorologische verandering vergelijkbaar voor alle ensembles.

Een samenvatting van de resultaten (tabel 6) toont de volgende hydrometeorologische veranderingen in het internationale Rijnstroomgebied bovenstrooms van Lobith:

- a) De luchttemperatuur is sinds het midden van de 20^e eeuw al duidelijk gestegen (0,7 °C tot 1 °C, afhankelijk van het seizoen) en zal in alle meteorologische seizoenen met 1 °C tot 2,5 °C blijven stijgen tot het midden van de 21^e eeuw (2031-2060) en met 3 °C tot 5 °C tot het einde van de 21^e eeuw (2071-2100), met de sterkste stijging in de zomer en de herfst (tussen juni en november). In overeenstemming hiermee zal het aantal warme dagen (>30 °C¹⁰) verder toenemen, terwijl het aantal vorst- en ijsdagen (temperaturen onder nul) zal afnemen.
- b) Waarnemingen en projecties laten zien dat als gevolg van klimaatverandering de neerslaghoeveelheden zullen verschuiven tussen de meteorologische seizoenen, met toenames in de winter en lente (december t/m mei), en afnames in de zomer (juni t/m augustus). Een en ander leidt tot een gematigde stijging van de jaarlijkse neerslagsom. De veranderingen zetten door in de loop van de 21^e eeuw en bereiken aan het einde van de 21^e eeuw toenames dan wel afnames van meer dan 20%.
- c) De projecties vertonen een algemene tendens naar extremere neerslagsituaties. In de waarnemingen is dit nog niet duidelijk te zien. Het aantal dagen met zware neerslag zal naar verwachting toenemen, evenals het aantal droge dagen. Ook zal de duur van de droge perioden naar verwachting toenemen, hoewel dit signaal niet zo duidelijk is als de bovengenoemde signalen.

⁹ Dezelfde leden als de "DAS"-dataset, maar met drie extra runs (zie tabel 11 in *bijlage A*).

¹⁰ Opmerking: In Nederland (KNMI'14) geldt dat de grens voor warme dagen bij > 25 °C wordt gelegd. Dit is geen bestanddeel van tabel 6.

Tabel 6: Overzicht van de hydrometeorologische veranderingen in het hele internationale Rijnstroomgebied tot het meetpunt Lobith in de nabije en verre toekomst ten opzichte van de periode 1981-2010. *Opmerking: De kalenderverwijzingen in de tabel zijn gebaseerd op meteorologische praktijken: "winter" van december t/m februari, "lente" van maart t/m mei, "zomer" van juni t/m augustus en "herfst" van september t/m november. Een "jaar" komt hier overeen met het kalenderjaar van januari t/m december.*

Gegevensbron: DWD als onderdeel van de DAS-basisdienst¹¹

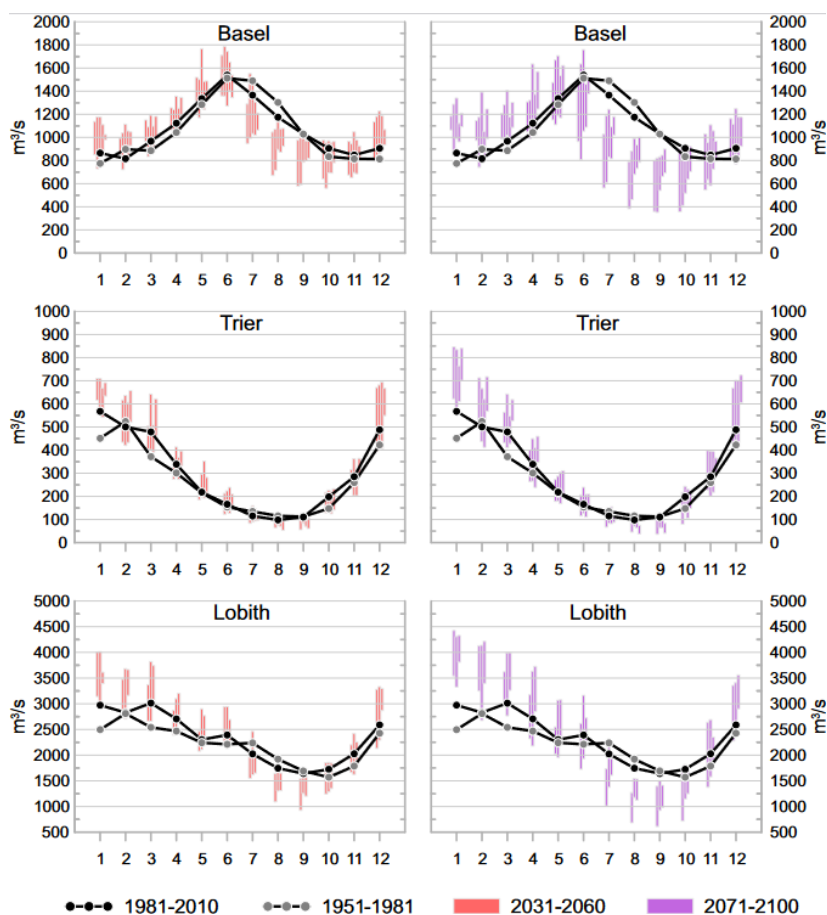
Rijnstroomgebied tot meetpunt Lobith	Waargenomen waarden		Geprojecteerde verandering	
	Verleden 1951-1980	Referentie 1981-2010	Nabije toekomst 2031-2060	Verre toekomst 2071-2100
Gemiddelde luchttemperatuur (jaar)	7,9 °C	8,6 °C	1,5 tot 2,3 °C	3,1 tot 4,9 °C
Gemiddelde luchttemperatuur (winter)	0,1 °C	0,8 °C	1,2 tot 2,6 °C	3,4 tot 4,6 °C
Gemiddelde luchttemperatuur (lente)	7,4 °C	8,2 °C	1,1 tot 1,9 °C	2,3 tot 3,6 °C
Gemiddelde luchttemperatuur (zomer)	15,7 °C	16,7 °C	1,6 tot 2,4 °C	3,5 tot 5,4 °C
Gemiddelde luchttemperatuur (herfst)	8,3 °C	8,8 °C	1,5 tot 2,7 °C	3,3 tot 5,7 °C
Neerslagsom (jaar)	940 mm	994 mm	-1,9 tot 8,6%	-3,8 tot 13%
Neerslagsom (winter)	219 mm	238 mm	-0,1 tot 22,9%	7,0 tot 30,1 %
Neerslagsom (lente)	210 mm	235 mm	1,5 tot 16,6 %	1,2 tot 24,4 %
Neerslagsom (zomer)	291 mm	274 mm	-12,5 tot 5,8%	-24,5 tot 0,7%
Neerslagsom (herfst)	217 mm	245 mm	-7,7 tot 9,4%	-13,7 tot 15,4%
Aantal warme dagen (jaar, Tmax > 30 graden)	4 dagen	6 dagen	+6 tot +12 dagen	+16 tot +33 dagen
Aantal ijsdagen (jaar, Tmax < 0 graden)	27 dagen	24 dagen	-15 tot -7 dagen	-21 tot -15 dagen
Aantal vorstdagen (jaar, Tmin < 0 graden)	103 dagen	93 dagen	-38 tot -22 dagen	-67 tot -45 dagen
Aantal dagen met zware neerslag (jaar, som > 20 mm)	7 dagen	8 dagen	0 tot +2 dagen	+1 tot +3 dagen
Aantal droge dagen (jaar)	230 dagen	228 dagen	-2 tot +14 dagen	+1 tot +23 dagen
Maximale duur van droge periode (jaar)	42 dagen	37 dagen	-7 tot +14 dagen	-6 tot +16 dagen

¹¹ De indicatoren zijn verstrekt door de Duitse meteorologische dienst (Deutsche Wetterdienst, DWD) als bijdrage aan de DAS-basisdienst "Klima und Wasser". De waargenomen omstandigheden zijn gebaseerd op het internationale HYRAS-product (5 km dagelijkse rasters van hydrometeorologische variabelen sinds 1951; Rauthe et al., 2013), de geprojecteerde veranderingen zijn gebaseerd op een 19 leden tellend GCM-RCM-ensemble (Global Climate Model-Regional Climate Model, CMIP5-CORDEX/ReKliEs; Sperna-Weiland et al., 2021; HLNUG, 2024) dat wordt geforceerd door RCP8.5.

3.2 Verandering van afvoerregimes

De verdeling in de ruimte en de tijd en wisselwerking van regen en sneeuw (ijs) leiden tot verschillende afvoerregimes, die kunnen worden gekoppeld aan verschillende delen van het Rijnstroomgebied. Tegenwoordig, en in het recente verleden, domineren ijs- en sneeuwprocessen het gebied in de buurt van de Alpen, wat gemiddeld leidt tot laagwatersituaties in de winter en door smeltwater beïnvloede hoogwatersituaties in de zomer. In figuur 4 wordt dit door ijs en sneeuw gevoede (glaciaal-nivale) regime vertegenwoordigd door het meetpunt Bazel/Rijn. De zijrivieren uit het middelgebergte hebben een door regen gevoed regime, dat doorgaans gepaard gaat met relatief hoge afvoeren in de winter en laagwatersituaties in de nazomer. Dit door regen gevoede ("pluviale") regime wordt in figuur 4 vertegenwoordigd door het meetpunt Trier/Moezel. Waar de door gletsjers, sneeuw en regen gevoede regimes samenkomen (d.w.z. in de midden- en de benedenloop van de Rijn) ontstaat een gecombineerd regime (complex), dat bv. op het meetpunt Lobith/Rijn te vinden is.

Figuur 4 toont de waargenomen verandering in de afvoerregimes in het verleden door vergelijking van de perioden 1951-1980 en 1981-2010 (grijze en zwarte lijnen, waarnemingen). De toekomstprojecties, voor de perioden 2031-2060 en 2071-2100, zijn gebaseerd op verschillende studies naar scenario's. De verdeling van de verschillende datasets is aangegeven als zwevende balken. Zoals al in hoofdstuk 2.2 en figuur 2 is uitgelegd, illustreren de balken de spreiding van de verschillende afvoerprojecties¹². Weergegeven zijn meerjarig gemiddelde maandafvoeren¹³.



Figuur 4: Meerjarige gemiddelde maandafvoer voor de drie meetpunten die de belangrijkste afvoerregimes in de Rijn vertegenwoordigen (zwarte lijnen, periode 1981-2010): door gletsjers/sneeuw gevoed regime (Bazel), door regen gevoed regime (Trier), gecombineerd regime (Lobith). Bovendien wordt de situatie in het verleden (grijze lijn, 1951-1980) en de toekomst (2031-2060, rood/links; 2071-2100, paars/rechts) weergegeven. Toekomstprojecties zijn gebaseerd op verschillende scenariostudies (zie tekst).

¹² Bazel (ASGII, Hydro-CH2018, DAS, KLIWA, KNMI'14); Trier (ASGII, DAS, KLIWA, KNMI'14); Lobith (ASGII, DAS, KNMI'14)

¹³ De maandwaarden zijn berekend door voor elke maand en elke projectie de procentuele verandering in de toekomstperiode (2031-2060 dan wel 2071-2100) ten opzichte van de gesimuleerde referentieperiode (1981-2010) te berekenen en de waargenomen waarde in de referentieperiode (1981-2010) te verhogen dan wel te verlagen met het aldus berekende percentage.

Nu al kan worden waargenomen (vergelijking tussen 1951-1980 en 1981-2010) dat alle drie de regimes vooral toenemende afvoeren in de winter en het vroege voorjaar (december, januari, maart) vertonen en afnemende afvoeren in de zomer (juli, augustus). Dit duidt op een algemene tendens naar meer door regen gevoede regimes, wat een gevolg is van de voortschrijdende opwarming van de aarde en bijgevolg het terugtrekken van de sneeuwgrens en het krimpen van de gletsjers.

Over het algemeen wordt verwacht dat de reeds waargenomen veranderingen in de toekomst, met name aan het einde van de 21^e eeuw (2071-2100), nog groter zullen zijn.

Duidelijke veranderingen (zie figuur 4) zijn in het bijzonder de sterke afname van de maandaafvoeren in de zomer in de bovenloop (Bazel) en de sterke toename van de winterafvoeren in de Nederrijn (Lobith) en de zijrivieren (Trier). Hoewel de verschillende ensembles over het algemeen dezelfde richting van verandering laten zien, verschillen ze deels sterk, vooral met betrekking tot de geprojecteerde zomerdaling in de bovenloop (Bazel) aan het eind van de 21^e eeuw. Bovendien lijkt de absolute verandering tijdens de zomermaanden klein voor de zijrivieren in het middelgebergte (hier: Trier/Moezel), echter zijn de relatieve veranderingen groot, aangezien alle waarden op een laag niveau liggen (gemiddelde maandaafvoer deels slechts 100 m³/s).

De veranderingen in de afvoerregimes geven een eerste indicatie van de veranderingen in de hoog- en laagwaterparameters, zoals beschreven in de volgende hoofdstukken.

3.3 Verandering van hydrologische indicatoren

In de volgende tabellen en hoofdstukken wordt alle beschikbare informatie over veranderingen in hoge, gemiddelde en lage afvoer samengevat. De analyse heeft betrekking op geselecteerde meetpunten, indicatoren en perioden (zie hoofdstuk 2.2). De tabellen 7 t/m 9 bevatten informatie over waargenomen veranderingen (heden 1991-2020, hoofdstuk 3.3.1) en geprojecteerde toekomstige veranderingen (2031-2060, hoofdstuk 3.3.2 en 2071-2100, hoofdstuk 3.3.3), telkens ten opzichte van de referentieperiode (1981-2010). Bij de interpretatie van de gegevens is het belangrijk rekening te houden met de opmerkingen over de heterogeniteit en de behandeling van de gegevensbases (zie hoofdstuk 2.2 en bijlage A).

Alle gepresenteerde veranderingssignalen geven het in hoofdstuk 2.2 toegelichte geïntegreerde beeld weer. De bandbreedte wordt dus bepaald door de individuele, extreemste projecties van alle gegevensbestanden, en gaat van de "ongunstigste" tot de "gunstigste" geprojecteerde situatie. Indien aanwezig wordt tussen haakjes het waardebereik aangegeven dat in alle studies is geprojecteerd.

Deze presentatie verschilt van andere effectbeoordelingen en IPCC-praktijken (bv. IPCC, 2021: p. 62) die niet de gehele bandbreedte van alle resultaten, maar wel zogenaamde percentielen weergeven (bv. 15e en 85e) en bijgevolg individuele extreme projecties weglaten. In het huidige rapport was het niet mogelijk om de interne structuur van het ensemble te analyseren, vanwege de heterogeniteit van de gegevensbasis en de onevenwichtigheid van het bijeengebrachte totale ensemble. Meer informatie hierover is te vinden in bijlage A (tabel 11) en de grafische bijlage die online is gepubliceerd ([zie CHR-website](#)).

3.3.1 Veranderingen tot heden (hier: 1991-2020)

Het recente verleden (1991-2020; "heden" genoemd) werd gekenmerkt door een groot aantal jaren van droogte. Dit geldt met name voor het laatste decennium (2011-2020), toen er vaak sprake was van extreem lage waterafvoer (bv. 2011, 2015, 2018). Op deeltrajecten van de Rijn was er weliswaar sprake van zware overstromingen (bv. op het meetpunt Bazel hebben zich in mei 1999 en in augustus 2007 hoogwatergebeurtenissen met een herhalingstijd van meer dan 100 jaar voorgedaan), maar voor de Rijn als geheel was dit niet het geval. De hoogwatergebeurtenis van 2013 had aan de Rijn een herhalingstijd van < 20 jaar (BfG, 2014).

De vergelijking van het "heden" (1991-2020) met de referentieperiode (1981-2010, tabellen 7 en 8) laat voor alle hydrologische indicatoren een afname zien, d.w.z. niet alleen de laagwaterafvoeren in de zomer dalen, ook de hoogwaterparameters in de wintermaanden en de gemiddelde jaarafvoer nemen af.

Naarmate de afstand tot de Alpen toeneemt, worden de afnames duidelijker door de grotere invloed van de door regen gevoede zijrivieren uit het middelgebergte (bv. Neckar, Main, Moezel), die de grootste relatieve veranderingen laten zien. Op het eerste gezicht lijken de veranderingen niet groot: een paar procent op de meeste meetpunten. Daarbij moet men echter

bedenken dat deze veranderingen in een relatief korte periode – ongeveer 10 jaar – zichtbaar werden en zelfs tot uiting komen in de gemiddelde waarden over 30 jaar.

Deze recente afname van de gemiddelde winterafvoer verschilt van de tendens in de verandering die in de decennia daarvoor werd geconstateerd (zie hoofdstuk 3.2) en die een toename van de winterafvoer liet zien (vergelijking tussen de periodes 1951-1980 en 1981-2010). Ook in ICBR-rapport 188 (ICBR, 2011) was er sprake van een sterke toename van de gemiddelde winterafvoer in de 20^e eeuw (vergelijking tussen de periodes 1901-1930 en 1971-2000), hetgeen resulteerde in een toename van de gemiddelde jaarafvoer in de loop van de 20^e eeuw (ICBR, 2011).

3.3.2 Veranderingen tot het midden van de 21^e eeuw (hier: 2031-2060)

Alles samengenomen bevestigen de resultaten eerdere klimaateffectanalyses voor de Rijn: gemiddeld neemt de zomerafvoer af (MQ zomer, NM7Q zomer) terwijl de winterafvoer toeneemt (MQ winter). Bijgevolg veranderen de jaarafvoeren (MQ) slechts weinig. Hoog- en laagwatergebeurtenissen worden intensiever (toename van MHQ, afname van MNQ). Afwijkend van het bovengenoemde seizoenspatroon wordt voor sommige meetpunten een afname van de laagwaterafvoer in de winter (NM7Q winter) geprojecteerd voor het midden van de 21^e eeuw.

De bandbreedte van de geprojecteerde afvoerveranderingen voor het midden van de 21^e eeuw (tabellen 7 en 8) in de hoofdstroom van de Rijn kan als volgt worden geschetst:

- De belangrijkste tendens wijst op een **afname** van de gemiddelde zomerafvoeren (**MQ zomer**), de laagwaterafvoer in de zomer (**NM7Q zomer**) en de jaarlijkse laagwaterafvoer (**MNQ**). Het totale bereik geeft waarden van -25% à -36% tot +5% à +8%.
- De belangrijkste tendens wijst op een **toename** van de gemiddelde winterafvoer (**MQ winter**) en de jaarlijkse hoogwaterafvoer (**MHQ**). Het totale bereik geeft waarden tot respectievelijk +23% en +44% en tot -7% tot -10%. De geprojecteerde toename van de gemiddelde winterafvoer (MQ winter) verschilt van de actueel waarneembare veranderingen (heden 1991-2020, hoofdstuk 3.3.1), die wijzen op een afname van de gemiddelde winterafvoer.
- De laagwaterafvoer in de winter (**NM7Q winter**) vertoont **geen duidelijke richting van verandering** op de meetpunten aan de bovenloop en de middenloop van de Rijn en een **afname** op de meetpunten aan de benedenloop van de Rijn.
- De jaarlijkse gemiddelde afvoeren (**MQ**) laten **geen duidelijke richting van verandering** zien (-15% tot + 13%).
- Met uitzondering van het meetpunt Bazel vertonen de **hoogwaterafvoeren met een herhalingstijd van 10, 100 en 1000 jaar** (HQ10, HQ100 en HQ1000) toenames. De bandbreedte van de resultaten en de onzekerheden voor deze parameters zijn bijzonder groot.

Voor de meetpunten aan de zijrivieren (Neckar, Main, Moezel) is de bandbreedte van de procentuele veranderingen over het algemeen groter dan voor de hoofdstroom van de Rijn, voornamelijk vanwege de lagere absolute afvoerwaarden, die leiden tot grote relatieve veranderingen. Sommige veranderingssignalen zijn aan de bovengenoemde zijrivieren minder duidelijk; de gemiddelde zomerafvoer (MQ zomer) laat hier bijvoorbeeld geen betrouwbare verandering zien.

Over het algemeen wijst de overlapping van alle ensembles (tussen haakjes) in dezelfde richting als de hele bandbreedte van de resultaten, hetgeen als eenvoudige indicatie voor de overeenstemming van de essentiële veranderingsinformatie kan gelden. Er zijn echter parameters waarbij de verschillen tussen de ensembles zo groot zijn dat er geen overlapping is (""). Dit is vooral het geval voor de laagwaterindicatoren MNQ jaar en NM7Q zomer op het meetpunt Bazel. Bij toekomstig onderzoek zou moeten worden onderzocht wat de redenen zijn voor deze verschillen (zie impulsen in hoofdstuk 6.2).

Met betrekking tot de enorme bandbreedtes van de resultaten moet worden opgemerkt dat extreme veranderingssignalen in sommige gevallen door één enkele projectie worden tweegebracht. Zo wordt de toename van de jaarlijkse hoogwaterafvoer (MHQ) van meer dan 60% bij Rockenau en meer dan 40% bij Kaub slechts door één enkel lid in één ensemble ondersteund, terwijl de meerderheid van de projecties een toename van minder dan 30%

(Rockenau) of 20% (Kaub) laat zien. Raadpleeg de grafieken voor diepgaande analyses van de structuur van de gegevens (zie [CHR-website](#)).

3.3.3 Veranderingen tot het einde van de 21^e eeuw (hier: 2071-2100)

De veranderingen die voor het midden van de 21^e eeuw worden geprojecteerd, nemen in de tweede helft van de 21^e eeuw toe. Het seizoensveranderingspatroon blijft behouden: gemiddeld neemt de zomerafvoer af (MQ zomer, NM7Q zomer), terwijl de winterafvoer toeneemt (MQ winter). Deze veranderingen heffen elkaar over het jaar bekeken op, wat resulteert in kleine veranderingen in de gemiddelde jaarafvoer (MQ). Een intensivering is zowel zichtbaar in de indicatoren voor hoogwaterafvoer (MHQ, HQT) als in de indicatoren voor laagwaterafvoer (MNQ). Ook voor laagwaterafvoeren in de winter (NM7Q winter) zijn er enige aanwijzingen voor een afname.

De bandbreedte van de geprojecteerde veranderingen aan het einde van de 21^e eeuw (tabellen 7 en 8, laatste kolom) voor de hoofdstroom van de Rijn kan als volgt worden geschetst:

- De belangrijkste tendens wijst op een **afname** van de gemiddelde zomerafvoeren (**MQ zomer**), de laagwaterafvoer in de zomer (**NM7Q zomer**) en de jaarlijkse laagwaterafvoer (**MNQ**). Het totale bereik geeft waarden van respectievelijk -48%, -67% en -57% aan de onderkant en +4% tot +9% aan de bovenkant van de bandbreedte.
- De belangrijkste tendens wijst op een **toename** van de gemiddelde winterafvoer (**MQ winter**) en de jaarlijkse hoogwaterafvoer (**MHQ**). Het totale bereik geeft waarden tot respectievelijk +36% en +38% aan de bovenkant en van -17% tot -2% aan de onderkant van de bandbreedte.
- De laagwaterafvoer in de winter (**NM7Q winter**) vertoont **geen duidelijke richting van verandering** op de meetpunten aan de bovenloop van de Rijn (-38% tot +22%) en een **afname** op de meetpunten aan de midden- en de benedenloop van de Rijn.
- De gemiddelde jaarafvoeren vertonen op geen van de meetpunten een **duidelijke richting van verandering** (-23% tot + 19%). Alleen in Bazel is enige indicatie van een afname (-26% tot +10%).
- Met uitzondering van het meetpunt Bazel vertonen de **hoogwaterafvoeren met een herhalingsijd van 10, 100 en 1000 jaar** (HQ10, HQ100 en HQ1000) toenames. De bandbreedte van de resultaten en de onzekerheden voor deze parameters zijn bijzonder groot.

Zoals reeds vermeld in hoofdstuk 3.3.2 is de bandbreedte van de veranderingen groter voor de zijrivieren (Neckar, Main, Moezel) dan voor de hoofdstroom van de Rijn. In tegenstelling tot de hoofdstroom van de Rijn vertonen de meetpunten aan de Neckar en de Moezel (Rockenau, Trier) aanwijzingen voor toenemende gemiddelde jaarafvoeren.

Opnieuw wijst de overlapping van alle ensembles (tussen haakjes) in dezelfde richting als de hele bandbreedte van de resultaten (zie hoofdstuk 3.3.2). Op de meetpunten Bazel en Maxau aan de bovenloop van de Rijn verschillen de gegevensbestanden voor de laagwaterafvoer in de zomer echter zo sterk dat er geen overlapping bestaat.

De opmerkingen in verband met de structuur van het ensemble die in hoofdstuk 3.3.2 zijn gemaakt, gelden hier eveneens. Ook voor de verre toekomst (2071-2100) moet worden bedacht dat de kwantitatieve veranderingsinformatie met voorzichtigheid moet worden geïnterpreteerd, omdat deze informatie deels tot stand komt door individuele extreme projecties. Om een voorbeeld te geven, afnames van de laagwaterafvoer (NM7Q zomer, MNQ) van -50% en meer worden op enkele meetpunten slechts vertegenwoordigd door één lid van één ensemble. Alle andere leden vertonen afnames van -30% en minder. Daarom wordt ten eerste aanbevolen om de gegevensstructuur gedetailleerd te evalueren op basis van de grafische bijlage (zie [CHR-website](#)).

Tabel 7: Jaarlijkse indicatoren van gemiddelde, lage en hoge afvoer (MQ, MNQ, MHQ). Alle veranderingen ten opzichte van de periode 1981-2010 (%). Integratie van verschillende gegevensbronnen (hoofdstuk 2 en bijlage A).

Opmerkingen in verband met de kolom "Geprojecteerde verandering": Zie tabel 5 en hoofdstuk 2 voor een toelichting van de kleurencode en nadere informatie over de weergegeven waarden. Waarden zonder haakjes geven de volledige bandbreedte van resultaten i.v.m. mogelijke veranderingen in de afvoer in het stroomgebied van de Rijn weer (minimale tot maximale veranderingen van alle projecties); waarden tussen haakjes geven de bandbreedte van resultaten weer die in alle onderliggende gegevensbestanden is vastgesteld. (Overlappend van de verschillende projectie-ensembles. Als er geen overlapping is, wordt dit met "-" aangegeven.)

Indicator	Meetpunt	Waargenomen waarden (m ³ /s)	Waargenomen verandering (%)	Geprojecteerde verandering (%)	
		Referentie 1981-2010	Heden 1991-2020	Nabije toekomst 2031-2060	Verre toekomst 2071-2100
MQ	Bazel	1073	-3	-15 tot +11 (-6 tot +5)	-26 tot +10 (-8 tot -2)
	Maxau	1272	-4	-14 tot +12 (-7 tot +4)	-23 tot +12 (-8 tot -1)
	Worms	1457	-4	-12 tot +13 (-7 tot +4)	-19 tot +14 (-7 tot +2)
	Kaub	1745	-5	-13 tot +13 (-5 tot +6)	-16 tot +17 (-4 tot +4)
	Keulen	2203	-6	-12 tot +11 (-4 tot +7)	-13 tot +19 (-3 tot +8)
	Lobith	2324	-6	-11 tot +11 (-4 tot +10)	-12 tot +19 (-3 tot +13)
	Rockenau (Neckar)	146,2	-8	-13 tot +24 (-11 tot +16)	-13 tot +28 (-2 tot +15)
	Raunheim (Main)	223,3	-7	-22 tot +23 (+5 tot +15)	-44 tot +33 (+11 tot +15)
	Trier (Moezel)	295,5	-8	-12 tot +19 (0 tot +10)	-12 tot +27 (+7 tot +23)
MNQ	Bazel	504,0	-1	-32 tot +8 (-)	-57 tot +9 (-)
	Maxau	618,6	-4	-26 tot +7 (-8 tot 0)	-48 tot +6 (-15 tot -6)
	Worms	700,0	-5	-27 tot +7 (-11 tot 0)	-48 tot +3 (-19 tot -6)
	Kaub	836,1	-4	-27 tot +6 (-15 tot -1)	-46 tot +1 (-23 tot -5)
	Keulen	1001	-6	-29 tot +4 (-18 tot -2)	-47 tot -1 (-27 tot -6)
	Lobith	1074	-5	-29 tot +4 (-19 tot -3)	-48 tot -1 (-27 tot -6)
	Rockenau (Neckar)	41,53	-6	-28 tot +18 (-21 tot +7)	-35 tot +15 (-22 tot +4)
	Raunheim (Main)	70,72	-4	-33 tot +16 (-19 tot +8)	-42 tot +21 (-25 tot -3)
	Trier (Moezel)	49,40	-11	-51 tot +8 (-26 tot -4)	-66 tot +16 (-30 tot -21)

Tabel 7 (vervolg)

MHQ	Bazel	2844	-3	-14 tot +17 (0 tot +10)	-17 tot +24 (+5 tot +8)
	Maxau	3223	-4	-7 tot +30 (+2 tot +14)	-3 tot +28 (+9 tot +14)
	Worms	3599	-5	-3 tot +43 (+3 tot +16)	-3 tot +31 (+12 tot +17)
	Kaub	4547	-6	-3 tot +44 (+4 tot +19)	-8 tot +37 (+15 tot +21)
	Keulen	6751	-7	-4 tot +39 (+5 tot +21)	-12 tot +38 (+17 tot +22)
	Lobith	7043	-8	-7 tot +36 (+5 tot +21)	-12 tot +37 (+16 tot +30)
	Rockenau (Neckar)	1108	-7	-9 tot + 69 (-3 tot +46)	-16 tot +46 (+5 tot +35)
	Raunheim (Main)	1036	-12	-20 tot +42 (+8 tot +28)	-27 tot +60 (+24 tot +33)
	Trier (Moezel)	2081	-11	-1 tot +35 (+6 tot +21)	-12 tot +49 (+23 tot +31)

Tabel 8: Seizoensindicatoren van gemiddelde en lage afvoer (MQ, NM7Q; hydrologische seizoenen). Verandering ten opzichte van 1981-2010 (%). Integratie van verschillende gegevensbronnen (hoofdstuk 2 en bijlage A).

Opmerkingen in verband met de kolom "Geprojecteerde verandering": Zie tabel 5 en hoofdstuk 2 voor een toelichting van de kleurencode en nadere informatie over de weergegeven waarden. Waarden zonder haakjes geven de volledige bandbreedte van resultaten i.v.m. mogelijke veranderingen in de afvoer in het stroomgebied van de Rijn weer (minimale tot maximale veranderingen van alle projecties); waarden tussen haakjes geven de bandbreedte van resultaten weer die in alle onderliggende gegevensbestanden is vastgesteld. (Overlappend van de verschillende projectie-ensembles. Als er geen overlapping is, wordt dit met "-" aangegeven.)

Indicator	Meetpunt	Waargenomen waarden (m ³ /s)	Waargenomen verandering (%)	Geprojecteerde verandering (%)	
		Referentie 1981-2010	Heden 1991-2020	Nabije toekomst 2031-2060	Verre toekomst 2071-2100
MQ zomer	Bazel	1225	-4	-25 tot +4 (-16 tot -2)	-48 tot -4 (-21 tot -15)
	Maxau	1352	-5	-24 tot +5 (-16 tot -1)	-47 tot -3 (-21 tot -14)
	Worms	1482	-6	-23 tot +6 (-16 tot 0)	-46 tot -1 (-21 tot -12)
	Kaub	1671	-6	-21 tot +7 (-16 tot +1)	-43 tot +2 (-20 tot -10)
	Keulen	1913	-7	-21 tot +6 (-17 tot 0)	-42 tot +3 (-21 tot -8)
	Lobith	1971	-7	-20 tot +6 (-17 tot +4)	-42 tot +4 (-21 tot -6)
	Rockenau (Neckar)	103,4	-10	-16 tot +24 (-16 tot +19)	-37 tot +22 (-20 tot +6)
	Raunheim (Main)	144,1	-6	-30 tot +27 (-10 tot +8)	-56 tot +27 (-13 tot +3)
	Trier (Moezel)	151,1	-14	-26 tot +15 (-21 tot +6)	-41 tot +19 (-25 tot +10)
MQ winter	Bazel	919,2	0	-10 tot +22 (+6 tot +14)	0 - +32 (+10 tot +20)
	Maxau	1191	-2	-2 tot +21 (+5 tot +14)	+4 tot +31 (+9 tot +19)
	Worms	1431	-3	-4 tot +21 (+4 tot +14)	(+3 tot +32) (+10 tot +20)
	Kaub	1820	-4	-7 tot +22 (+6 tot +14)	0 tot +35 (+12 tot +20)
	Keulen	2498	-5	-7 tot +23 (+6 tot +14)	-2 tot +36 (+13 tot +23)
	Lobith	2683	-5	-6 tot +23 (+6 tot +16)	0 tot +35 (+12 tot +28)
	Rockenau (Neckar)	189,6	-7	-11 tot +24 (-8 tot +16)	-12 tot +34 (+5 tot +20)
	Raunheim (Main)	303,7	-7	-21 tot +30 (+14 tot +16)	-43 tot +46 (-)
	Trier (Moezel)	442,3	-6	-8 tot +28 (+7 tot +13)	-7 tot +38 (+18 tot +27)

Tabel 8 (vervolg)

NM7Q zomer	Bazel	648,4	-2	-35 tot +5 (-7 tot -5)	-62 tot +7 (-)
	Maxau	750,8	-5	-36 tot +2 (-12 tot -5)	-57 tot +2 (-)
	Worms	824,8	-5	-36 tot +1 (-15 tot -4)	-56 tot -1 (-24 tot -21)
	Kaub	956,3	-5	-35 tot +1 (-19 tot -3)	-54 tot -5 (-28 tot -18)
	Keulen	1105	-6	-34 tot +1 (-22 tot -3)	-53 tot -6 (-32 tot -17)
	Lobith	1173	-5	-33 tot 0 (-22 tot -2)	-53 tot -6 (-32 tot -17)
	Rockenau (Neckar)	47,21	-7	-24 tot +16 (-20 tot +8)	-38 tot +7 (-23 tot -2)
	Raunheim (Main)	81,35	-3	-33 tot +22 (-21 tot +4)	-46 tot +15 (-23 tot -6)
	Trier (Moezel)	58,07	-11	-51 tot +9 (-28 tot -7)	-68 tot +9 (-32 tot -26)
NM7Q winter	Bazel	544,0	0	-17 tot +15 (-2 tot +7)	-32 tot +26 (-8 tot +8)
	Maxau	687,2	-2	-12 tot +11 (-7 tot +5)	-38 tot +22 (-14 tot +7)
	Worms	785,4	-3	-15 tot +10 (-10 tot +4)	-41 tot +20 (-18 tot +5)
	Kaub	952,4	-2	-17 tot +10 (-15 tot +2)	-42 tot +21 (-21 tot +1)
	Keulen	1177	-4	-20 tot +9 (-18 tot +3)	-46 tot +21 (-23 tot -1)
	Lobith	1264	-4	-20 tot +9 (-19 tot +3)	-45 tot +20 (-27 tot -1)
	Rockenau (Neckar)	62,67	-4	-28 tot +23 (-24 tot +6)	-40 tot +30 (-28 tot +20)
	Raunheim (Main)	109,4	-4	-33 tot +17 (-19 tot +8)	-41 tot +23 (-25 tot -3)
	Trier (Moezel)	111,8	-11	-43 tot +14 (-21 tot +1)	-54 tot +23 (-29 tot -9)

Tabel 9: Indicatoren van verandering in "frequent", "gemiddeld" en "extreem" hoogwater (definitie aansluitend bij de scenario's van de overstromingsgevaarkaarten) ten opzichte van 1981-2010 (% , HQ10, HQ100, HQ1000)

*Opmerkingen in verband met de kolom "Geprojecteerde verandering": Zie tabel 5 en hoofdstuk 2 voor een toelichting van de kleurencode en nadere informatie over de weergegeven waarden. De methode voor de afleiding van de parameters verschilt van de vorige tabellen. Zie hiervoor "Indicatoren voor hoogwaterextremen" in hoofdstuk 2.2. *zeer onzeker*

Indicator	Meetpunt	Geprojecteerde verandering (%)	
		Nabije toekomst 2031-2060	Verre toekomst 2071-2100
HQ10 "frequent"	Bazel	-8 tot +11	-8 tot +20
	Maxau	-1 tot +20	-1 tot +30
	Worms	+2 tot +26	+2 tot +36
	Kaub	-1 tot +24	-1 tot +40
	Keulen	-7 tot +27	-7 tot +38
	Lobith	+8 tot +21	+12 tot +37
	Rockenau (Neckar)	0 tot +44	0 tot +44
	Raunheim (Main)	-18 tot +48	-18 tot +48
	Trier (Moezel)	0 tot +31	0 tot +36
HQ100 "gemiddeld"	Bazel	-12 tot +21	-18 tot +21
	Maxau	-5 tot +42	-5 tot +43
	Worms	-3 tot +45	-3 tot +47
	Kaub	-8 tot +56	-8 tot +56
	Keulen	-26 tot +61	-26 tot +61
	Lobith	+5 tot +18	+7 tot +42
	Rockenau (Neckar)	-17 tot +67	-17 tot +67
	Raunheim (Main)	-24 tot +94	-24 tot +94
	Trier (Moezel)	-20 tot +49	-20 tot +52
HQ1000 "extreem"*	Bazel	-25 tot +32	-28 tot +32
	Maxau	-12 tot +59	-12 tot +59
	Worms	-13 tot +81	-13 tot +81
	Kaub	-18 tot +89	-18 tot +89
	Keulen	-39 tot +97	-39 tot +97
	Lobith	+3 tot +20	+5 tot +51
	Rockenau (Neckar)	-31 tot +155	-31 tot +155
	Raunheim (Main)	-27 tot +151	-27 tot +151
	Trier (Moezel)	-38 tot +94	-38 tot +94

4 Verdere effecten van klimaatverandering

Veranderingen in de afvoer in het Rijnstroomgebied hebben een invloed op tal van waterbeheerstrategieën. In de voorgaande hoofdstukken is de huidige stand van de kennis over de afvoerverandering geschetst, maar er zijn nog andere specifieke en regionale aspecten die relevant zijn om de dynamiek van het hydrologische systeem van de Rijn te begrijpen. Dit hoofdstuk geeft **extra inzicht in hoe het systeem in het Rijnstroomgebied zich in de toekomst zal ontwikkelen als gevolg van klimaatverandering**. Daarbij wordt er aandacht gegeven aan krimpende gletsjers en sneeuwvoorraden, effecten op de dynamiek van meren, zware neerslaggebeurtenissen en effecten van zeespiegelstijging.

4.1 Invloed van gletsjers en sneeuw

Het smelten van sneeuw en gletsjers levert historisch en in het heden een belangrijke bijdrage aan de afvoer van de Rijn, vooral in de bovenloop van het Rijnstroomgebied, en heeft een invloed op de hoofdstroom van de Rijn tot in Nederland. Een afname van de sneeuwopslag en het gletsjervolume in de winter als gevolg van stijgende luchttemperaturen verandert het (glaciaal-nivale) afvoerregime in het Alpengebied die door sneeuw en gletsjers wordt gevoed en beïnvloedt daarmee ook het gecombineerde afvoerregime in de midden- en benedenloop van de Rijn (zie hoofdstuk 3.2).

Smeltwater levert een belangrijke bijdrage aan de ondersteuning van de afvoer tijdens langdurige droge periodes in het zomerhalfjaar. Inzicht in de ontwikkeling van de gletsjer- en sneeuwdynamiek onder invloed van de klimaatverandering is daarom belangrijk met betrekking tot **laagwaterafvoeren** in de hoofdstroom van de Rijn. Onderzoek door Zwitserland (BAFU, 2021) en de Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR, 2016 en 2022) werpt licht op dit aspect.

Sneeuwsmelt: Welk deel van de neerslag als sneeuw valt, wordt bepaald door de luchttemperatuur. Dit deel is in Zwitserland als gevolg van opwarming al aanzienlijk afgenomen (BAFU, 2021). Het belangrijkste aspect is de hoogte van de nul-graden isotherm, die de grens vormt tussen regenval en sneeuwval. Deze denkbeeldige lijn verschuift ongeveer 150 meter in hoogte per graad Celsius temperatuurverandering (Hydro-CH2018). Dit betekent dat in een opwarmend klimaat minder neerslag zal worden opgeslagen als sneeuw. Bovendien wordt de periode waarin neerslag als sneeuw valt of wordt opgeslagen korter. Tot nu toe zijn vooral lager en middelhoog gelegen gebieden getroffen. De Hydro-CH2018-scenario's wijzen op een afname van de gemiddelde jaarlijkse hoeveelheid water die wordt opgeslagen als sneeuwvoorraad tegen het einde van de eeuw: 42% met mitigatie van klimaatverandering (RCP2.6) en 78% zonder mitigatie van klimaatverandering (RCP8.5). Tegelijkertijd verschuift het maximale sneeuwvolume van maart naar februari. Bij een verder stijgende temperatuur zal de verwachte toename in winterneerslag alleen op zeer grote hoogte een positief effect hebben op de sneeuwvoorraad en bijgevolg de algemene afname van sneeuwvolumes niet kunnen compenseren.

Gletsjersmelt: De Zwitserse gletsjers hebben sinds 1850 al 60% van hun volume verloren (GLAMOS, 2022)¹⁴. Tegen het einde van de 21^e eeuw zullen overblijfselen van de grote gletsjers alleen nog op zeer grote hoogten te vinden zijn. In de Alpen zal met mitigatie van klimaatverandering (RCP2.6) ongeveer 37% van het gletsjervolume van 2017 blijven bestaan, maar zonder mitigatie van klimaatverandering slechts ongeveer 5% (RCP8.5). Als we kijken naar het stroomgebied van de Alpenrijn, rekening houdend met het RCP8.5-scenario, zullen tegen het einde van de eeuw alle gletsjers verdwenen zijn. Aangezien gletsjers vaak tientallen jaren nodig hebben om zich aan te passen aan een nieuw klimaat, kan een verdere terugtrekking van gletsjers niet meer worden voorkomen, zelfs niet als er onmiddellijk stevige maatregelen worden genomen om het klimaat te beschermen (Zekollari et al., 2019).

Met het terugtrekken van de gletsjers zal de zomerafvoer afkomstig van gletsjers sterk afnemen. Dit zal ook verder stroomafwaarts merkbaar zijn. Tegelijkertijd is de permafrost in het vergletsjerde gebied aan het ontdooien, waardoor de kans op natuurrampen toeneemt (BAFU, 2021).

Gevolgen benedenstrooms: De veranderingen in sneeuw- en gletsjeropslag en de effecten daarvan worden conceptueel weergegeven in de hydrologische modellen die aan dit rapport ten grondslag liggen. In de modellen kan bijvoorbeeld de toename van de directe winterafvoer worden gesimuleerd, omdat als gevolg van stijgende temperaturen de neerslag niet meer in de

¹⁴ Zwitserse Alpen: Gletsjervolume ongeveer 130 km³ (in 1850), 77 km³ (in 2001), 49 km³ (in 2022) (GLAMOS, 2022)

vorm van sneeuw wordt opgeslagen in het stroomgebied. In sommige modellen (bv. LARSIM-ME) zijn ook basismodules voor gletsjers geïmplementeerd. Deze effecten verklaren deels de seizoensgebonden veranderingen die bijvoorbeeld te zien zijn in figuur 4.

In het kader van een CHR-studie is speciale aandacht besteed aan de "effecten van klimaatverandering op de componenten van regen, sneeuw- en gletsjersmelt van de afvoer van de Rijn en zijn zijrivieren" (ASG; CHR, 2016 en 2022). In deze studie werd het sneeuw- en ijssmeltwater met behulp van modellen "getraceerd" vanaf de oorsprong tot aan de Duits-Nederlandse grens. De analyse werd verricht voor het verleden (fase 1 van ASG – "ASGI"; CHR, 2016) en de toekomst met behulp van waargenomen klimaatgegevens en een selectie van klimaatprojecties (fase 2 van ASG, zie label "ASGII" in hoofdstuk 2 en de technische bijlage A; CHR, 2022), zodat er voor verschillende meetstations dagelijks schattingen kunnen worden gegeven van het absolute en relatieve aandeel van smeltwater van sneeuw en ijs aan de totale afvoer.

In het langetermijngemiddelde bedraagt de fractie sneeuwsmelt 39% van de totale jaarlijkse afvoer bij Basel (bovenloop van de Rijn), afnemend tot 34% bij Lobith (benedenloop van de Rijn). Bijgevolg is, zoals hierboven vermeld (hoofdstuk 3.2), de afvoer uit sneeuw in de meetstations langs de hoofdstroom van de Rijn een belangrijke bepalende factor voor het afvoerregime. De gemiddelde jaarlijkse fractie van gletsjersmelt is daarentegen slechts ongeveer 2% bij Basel en 1% bij Lobith. In extreem droge situaties bedraagt de fractie echter 25% en 17% bij respectievelijk Basel en Lobith. Gletsjers zijn dus belangrijke waterbronnen tijdens droogtes en laagwatersituaties. Bovendien blijkt uit de resultaten dat het aandeel smeltwater van gletsjers tijdens laagwater in Basel al over zijn hoogtepunt heen is (bekend als "gletsjerpiekwater"). Dit betekent dat de opwarming van het klimaat in het verleden al een dermate sterke afsmelting van de gletsjers heeft veroorzaakt dat het afgenomen gletsjervolume leidt tot een verminderde toevoer van smeltwater naar de rivieren. Deze afname in smeltwatertoevoer zal zich in de toekomst voortzetten.

4.2 Waterstanden van grote meren bovenstrooms in het Rijnstroomgebied

Meren zijn belangrijke subsystemen voor de regionale ecologie en economie. In de hydrologische modellen wordt er ook rekening gehouden met de waterretentie en verdamping door de grote meren in het Rijnstroomgebied. Omdat dit rapport vooral gericht is op rivieren en riviermetingen, wordt hier aan enkele van die meren in het Rijnstroomgebied speciale aandacht besteed.

Het is bekend dat het peil van de meren op verschillende tijdschalen varieert als gevolg van de natuurlijke beschikbaarheid van water en als gevolg van het waterbeheer door de mens.

Bodenmeer: In verband met het overwegend alpiene stroomgebied wordt het waterpeil van het Bodenmeer gekenmerkt door een uitgesproken seizoensgebonden verloop, met gemiddelde maximumwaarden in de zomermaanden en minimumwaarden in de wintermaanden. Het toont een door sneeuw gevoed regime (zie 3.2) als gevolg van neerslag die in de winter als sneeuw wordt opgeslagen en dus geen afvoer genereert, en sneeuwsmelt en regen in het voorjaar en de zomer.

Meer dan 100 jaar aan waterstandsmetingen in het meetstation Konstanz laten een algemene stijging van het peil in de winter en een daling van het peil in de zomer zien (KLIWA, 2016). Klimaatverandering zou een van de belangrijkste oorzaken kunnen zijn. Een kleinere hoeveelheid opgeslagen sneeuw in de winter, een vroeger smelten in de lente en een hogere verdampingssnelheid leiden tot een algemene daling van het waterpeil van het meer in de zomer. In de winter leidt neerslag in de vorm van regen in plaats van sneeuw tot een stijging van het peil. Door het huidige, door de energiemarkt gedicteerde, beheer van de stuwdammen en opslagsystemen in de Alpen worden de effecten van klimaatverandering versterkt. Het water wordt opgeslagen in de zomer en afgevoerd in de wintermaanden tijdens de natuurlijke laagwaterperiode van het Bodenmeer. Als gevolg daarvan zijn de voorheen uitgesproken seizoensgerelateerde waterstandsverschillen (op basis van seizoensgemiddelden) in het Bodenmeer inmiddels kleiner geworden tussen de winter- en de zomermaanden. Aangenomen wordt echter dat de effecten van het beheer van waterreservoirs op het laagwaterpeil van het Bodenmeer over het algemeen veel kleiner zijn dan de effecten van het afvoergedrag van de Alpenrijn.

Klimaatverandering zal van invloed blijven op de ontwikkeling van het waterpeil van het meer en de seizoensgebonden dynamiek. Voor de toekomst kan worden uitgegaan van een verdere afname als gevolg van de klimaatverandering in de zomermaanden en een toename in de

wintermaanden. Hierdoor zal de amplitude van de jaarlijkse gang (seizoenscyclus) van de waterstanden in het Bodensee afnemen. Naast de verandering in het waterregime zijn ook andere belangrijke parameters van het meer, zoals watertemperatuur, vermenging van het meerwater en flora en fauna, onderhevig aan verandering als gevolg van de klimaatverandering (zie bv. IGKB 2015).

Gereguleerde meren in Zwitserland:¹⁵ Klimaatverandering zal een grote invloed hebben op de zijrivieren van de natuurlijke meren. Voor de ongereguleerde meren zal dit een directe impact hebben op het waterpeil en vooral in de zomer en herfst tot lagere niveaus leiden. In de gereguleerde meren kunnen de effecten gedeeltelijk worden gecompenseerd, maar de voorschriften ten aanzien van de sturing van stuwen zijn niet met dit doel opgesteld (BAFU, 2021). De Zwitserse milieudienst (BAFU) onderzoekt daarom momenteel welke invloed de veranderingen in de instroom zullen hebben op het waterpeil in de gereguleerde meren.

Er zijn eerste resultaten beschikbaar voor het gereguleerde Meer van Zürich (Wechsler, T. en Zappa, M., niet gepubliceerd). Door de regulering van het Meer van Zürich volgt dit meer een jaarlijks regime met lagere waterpeilen in de winter en hogere waterpeilen in de zomer. De toekomstige hoogwater- en laagwaterstanden van het meer zullen in de wintermaanden licht stijgen en in de zomermaanden licht dalen. In het RCP8.5-emissiescenario zouden de laagste afvoeren van het Meer van Zürich kunnen verschuiven van de winter naar de zomer. Het is denkbaar dat de vraag naar waterwinning uit de meren zal toenemen, vooral in de zomer, hetgeen in tegenspraak zou zijn met de verminderde beschikbaarheid van water.

4.3 Samengestelde effecten van afvoerverandering en zeespiegelstijging (Rijndelta en IJsselmeergebied)

Dit rapport is voornamelijk gericht op de effecten van klimaatverandering op de afvoer in het binnenland. Het hoofdonderzoekgebied eindigt dus bij het meetpunt Lobith, net over de Duits-Nederlandse grens. In het **deltagebied en het IJsselmeergebied** zijn er echter extra uitdagingen voor het regionale waterbeheer als gevolg van klimaatverandering. Hier spelen de samengestelde effecten van de veranderende hydrologie in het stroomopwaarts gelegen stroomgebied, lokale hydrologische processen (neerslag, verdamping) en zeespiegelstijging een rol.

Scenario's van zeespiegelstijging: Als gevolg van de klimaatverandering zal de zeespiegel de komende honderden jaren blijven stijgen. Tussen 1901 en 2018 was de mondiale gemiddelde zeespiegelstijging ongeveer 20 cm, met een gemiddelde zeespiegelstijging van 1,7 mm/jaar. In de afgelopen jaren (2006-2018) is een versnelling van de mondiale zeespiegelstijging waargenomen met een toename tot 3,7 mm per jaar (KNMI Klimaatsignaal '21, 2021 & KNMI'23 Gebruikersrapport, 2023). Aan de Nederlandse kust was de zeespiegelstijging $1,8 \pm 0,1$ mm per jaar tot ongeveer 1990. De afgelopen 30 jaar is de snelheid toegenomen tot een gemiddelde jaarlijkse stijging van $2,9 \pm 0,4$ mm (Zeespiegelmonitor, 2022). Afhankelijk van de wereldwijde uitstoot van broeikasgassen kan de snelheid waarmee de zeespiegel blijft stijgen, verschillen. In tabel 10 worden de zeespiegelscenario's voor de Nederlandse kust getoond. In Duitsland wordt het hoge-emissiescenario SSP5-8.5 als uitgangspunt genomen, in het kader waarvan een stijging van +29 cm (2050, 83^e percentiel) dan wel +100 cm (2100, 83^e percentiel) wordt aangenomen (bv. GDWS, 2023).

Er moet rekening mee worden gehouden dat de zeespiegelstijging kan oplopen tot ongeveer 2,5 m in 2100 als zich onzekere processen voordoen, zoals instabiliteit van de Antarctische ijskap (niet weergegeven in tabel 10).

¹⁵ Dit voorbeeld kan ook worden uitgebreid naar de andere reservoirs en gereguleerde meren in het stroomgebied.

Tabel 10: Indicatieve getallen voor zeespiegelstijging aan de Nederlandse kust onder verschillende emissiescenario's¹⁶ voor 2050 (2046-2055) en voor 2100 (2096-2105) ten opzichte van 1995-2014, met een onzekerheidsbandbreedte van 90%. In de getallen is rekening gehouden met bodemdaling als gevolg van tektonische en andere processen. (KNMI'23 Gebruikersrapport & KNMI'23 database).

Jaar	2050 (2046-2055)		2100 (2096-2105)	
Emissiescenario	SSP1-2.6	SSP5-8.5	SSP1-2.6	SSP5-8.5
Zeespiegelstijging	+24 (16-34) cm	+27 (19-38) cm	+44 (26-73) cm	+82 (59-124) cm
Stijging in mm/jaar	+3 (1-6) mm/jaar	+5 (4-8) mm/jaar	-1 (-4-4) mm/jaar	+11 (6-23) mm/jaar

Effecten op afwatering: Zoals vermeld in hoofdstuk 3.3 zullen de winterafvoeren van de Rijn naar verwachting toenemen, wat in de winter zal leiden tot grotere wateroverschotten uit het stroomgebied in de delta en het IJsselmeergebied. Tegelijkertijd stijgt het zeeniveau, wat leidt tot beperkingen met betrekking tot de afwatering. Als de zeespiegel bijvoorbeeld meer dan 0,65 m stijgt, komt het waterpeil van de Waddenzee zelfs bij eb hoger te liggen dan het waterpeil van het IJsselmeer. Onder deze omstandigheden wordt de afwatering van het IJsselmeer naar de Waddenzee onder vrij verval onmogelijk (Deltares, 2018). Als gevolg daarvan moet het water ofwel worden opgeslagen in het IJsselmeer (waardoor het waterpeil stijgt) ofwel worden weggepompt (Deltares, 2022).

Effecten op overstromingsrisicobeheer: Het overstromingsrisicobeheer in de Rijn-Maasdelta wordt rechtstreeks beïnvloed door de stijging van de zeespiegel en de omvang en verdeling van de afvoer in de delta (Rijn, Maas, Waal, IJssel en Nederrijn). Menselijke ingrepen zoals de Europoortkering reduceren het effect van zeespiegelstijging op de hoogwaterstanden in het riviersysteem. Als gevolg van de zeespiegelstijging zal de Europoortkering vaker worden gesloten bij storm. Tijdens een tijdelijke sluiting van de kering wordt rivierwater opgeslagen in het gebied aan de landzijde van de kering. Zeespiegelstijging zal dus leiden tot een hogere frequentie van rivierwateropslag, omdat de kering vaker wordt gesloten (KP ZSS, 2023).

Naast de directe gevolgen van het stijgende waterpeil spelen ook morfologische processen van de rivierbedding een rol (KP ZSS, 2023). Zeespiegelstijging zal leiden tot een "aanzandingsgolf" die van beneden- naar bovenstrooms migreert in de delta (Ylla Arbós et al., 2023). De rivier zal in de delta naar een nieuw morfologisch evenwicht bewegen als gevolg van de verandering van enerzijds de zeespiegel en anderzijds het afvoerregime. Uitgaande van een zeespiegelstijging van 1 m zou de rivierbedding van de hoofdstroom uiteindelijk ook met 1 m kunnen stijgen, zolang er voldoende riviersediment beschikbaar is (KP ZSS, 2023), zij het dat de tijdschaal van deze verandering honderden jaren beslaat.

Effecten op zoetwatervoorziening en verzilting: Het zoet-zoutwaterevenwicht in de Rijn-Maasmonding wordt bepaald door de zeespiegel, de neerslag en verdamping, en de rivierafvoer van Rijn en Maas. Door de zeespiegelstijging en de lage zomerafvoer dringt het zoute water via het riviersysteem naar binnen en zal het verder landinwaarts komen, met als gevolg een hoge zoutconcentratie bij zoetwaterinnamepunten voor landbouw en inlaatpunten voor de drinkwatervoorziening. Zoutindringing leidt daarnaast ook tot verzilting van grondwater- en openwatersystemen (Deltares, 2018).

De Nederlandse zoetwaterstrategie is gericht op het behoud van bepaalde strategische zoetwaterzones, waaronder bepaalde bufferzones. Het IJsselmeergebied is een belangrijke zoetwaterbuffer, die door klimaatverandering steeds kwetsbaarder wordt wat betreft waterkwantiteit en -kwaliteit (KP ZSS B, 2023). De verwachte lagere rivierafvoer in de zomer, de toegenomen verdamping en de zeespiegelstijging zullen leiden tot een toename van het zoutgehalte in het IJsselmeer. Ook omdat er door zeespiegelstijging vanuit regionale wateren en via de zeesluizen meer zout het IJsselmeer binnenstroomt. Bovendien is het moeilijk om eventueel in het IJsselmeergebied doordringend zout eruit te verwijderen.

In de Lek en het Haringvliet-Hollands Diep - takken van de Rijn-Maasmonding - wordt de zoutindringing tegengegaan door toevoer van extra water uit andere riviertakken (bv. Waal). Als

¹⁶ De getallen zijn gebaseerd op "SSP-scenario's", volgens het 6^e IPCC-evaluatierapport. SSP5-8.5 is een hoge-emissiescenario, SSP1-2.6 een mitigatiescenario. Ten opzichte van de "RCP-scenario's" die ten grondslag liggen aan de rest van dit rapport, zijn de indicatieve getallen voor zeespiegelstijging met de nieuwe scenario's hoger.

er sprake is van een zeespiegelstijging van meer dan 1 m in combinatie met extreem lage zomerafvoeren, is het mogelijk dat dit extra rivierwater niet langer beschikbaar is of onvoldoende is om de verzilting tegen te gaan. Dit zal leiden tot hogere chlorideconcentraties in de zoetwaterzones. Als gevolg daarvan zal het nadelig worden om sommige van deze zoetwaterbuffers te handhaven. Daarnaast zal de zeespiegelstijging met name het Haringvliet-Hollands Diep-systeem kwetsbaarder maken voor zoutindringing als gevolg van windopzet. Door zoutindringing als gevolg van de wind kunnen daarom langdurige (minstens enkele weken) beperkingen voor de zoetwaterinnamepunten ontstaan.

4.4 Zware neerslag en stortvloeden

De klimaat- en hydrologische modellen die aan dit rapport ten grondslag liggen, produceren gegevens in een dagelijkse tijdstap en in rastercellen of stroomgebieden die meerdere vierkante kilometers beslaan. Deze modellen kunnen veel meteorologische en hydrologische verschijnselen op deze ruimtelijke en temporele schalen simuleren, maar volstaan niet voor een volledige beschrijving van verschijnselen die voorkomen op subdagelijkse of subrasterschalen. Tot die laatste groep verschijnselen hoort zware convectieve neerslag, die wordt gekenmerkt door een grote hoeveelheid neerslag in korte tijd over een klein gebied, wat kan leiden tot stortvloeden en gepaard kan gaan met bodemerosie.

Tot nu toe leidden hoofdzakelijk theoretische overwegingen tot de conclusie dat zware convectieve neerslaggebeurtenissen met de opwarming van het klimaat in intensiteit en aantal zullen toenemen (Trenberth, 1999; Pfahl et al., 2017). Pas sinds kort kan met een nieuwe generatie klimaatmodellen, de zogenaamde convectietoelastende klimaatmodellen, de toekomstige ontwikkeling van convectieve neerslaggebeurtenissen worden weergegeven. De ruimtelijke en temporele resolutie van de modellen is dusdanig hoog dat ze regen- en onweersbuien kunnen simuleren (Poncet et al., 2023).

Grote convectietoelastende ensembles ontbraken vooralsnog. Een eerste ensemble met 5 modelruns is onlangs samengesteld en als voorbeeld geanalyseerd door het Duitse KLIWA-samenwerkingsverband. Op basis van het hoge-emissiescenario RCP8.5 laten de modellen zien dat in de zomer zware neerslag zowel in intensiteit als in frequentie toeneemt. Hoewel het signaal duidelijk is, is de bandbreedte van de verandering groot. De intensiteit van een gebeurtenis van één uur met een terugkeerperiode van tien jaar zal bijvoorbeeld met 10% tot 30% toenemen, afhankelijk van de projectie. Daarnaast zal in de toekomst waarschijnlijk een groter deel van de zomerneerslag als zware neerslag vallen (KLIWA 2023, 2024).

4.5 Interferentie en impact van niet-klimatologische aspecten

Het is algemeen bekend dat een inschatting van toekomstige klimaatgevolgen niet alle aspecten van de echte "toekomst" kan omvatten. Dit heeft niet alleen te maken met het feit dat we niet weten hoe de toekomstige ontwikkeling van broeikasgasemissies of -concentraties en het niveau van mitigatie zal zijn. Niet alleen het klimaat zal immers veranderen, maar ook veel factoren die hydrologische veranderingen tot stand brengen. Door **demografische** veranderingen zal er bijvoorbeeld een verschuiving plaatsvinden in het aantal en de leeftijd van de mensen die in verschillende delen van het Rijnstroomgebied wonen. Door **economische** en **technologische** veranderingen zal er een verschuiving plaatsvinden in de hoeveelheid water en de manier waarop mensen, landbouw en industrie water gebruiken. Duurzame beheerparadigma's die zich richten op het systeem "Rijn", ook met het oog op zijn ecologische functies en **ecosysteemdiensten**, sorteren eveneens effect.

Op het eerste gezicht lijken deze sociaaleconomische aspecten "niet-klimatologische" factoren. Nader beschouwd blijkt echter dat ook deze factoren invloed hebben op klimaatverandering. Door klimaatverandering veroorzaakte migratie draagt bij aan demografische veranderingen; de hoeveelheid water die nodig is voor drinkwater, irrigatie, koeling en ecosystemen zal door de stijgende temperaturen naar verwachting toenemen. Bovendien zal de mitigatie van de klimaatverandering tot op zekere hoogte leiden tot een herverdeling van water tussen de verschillende gebruiksfuncties, sectoren en regio's.

Deze effecten kunnen een positieve of negatieve invloed hebben op de hydrologische veranderingen die in het rapport worden geschetst. Ze zijn echter, vooral voor toekomstige tijdshorizonten, op dit moment nog nauwelijks kwantificeerbaar.

5 Discussie en conclusies

In overeenstemming met het mandaat van de expertgroep HCLIM zijn in dit rapport de huidige kennis en gegevens over vroegere en toekomstige veranderingen in de afvoer in het Rijnstroomgebied en enkele aspecten van meteorologische veranderingen op een rij gezet. Met alle oeverlanden is contact opgenomen, door vijf onderzoeksteams zijn gegevens bijgedragen. Alle datasets zijn gebaseerd op een hoog emissiescenario en mondiale klimaatgegevens die in overeenstemming zijn met het 5^e IPCC-evaluatierapport. Daarmee zijn de scenario's van de eerdere ICBR-expertgroep KLIMA, die aansloten bij het 4^e IPCC-rapport, geactualiseerd. De datasets verschillen echter op een aantal methodische aspecten, zoals regionale klimaat- en hydrologische modellen.

Enerzijds kunnen de afvoerprojecties die aan dit rapport ten grondslag liggen, beschouwd worden als een van de grootste projectiedatabases die ooit beschikbaar waren voor het bestudeerde gebied. De projecties kunnen mogelijk een completer beeld geven van de klimaatgerelateerde afvoerandering voor de Rijn dan in eerdere studies. Maar anderzijds is de interpretatie van de gegevens beperkt door methodische verschillen in het genereren van de afzonderlijke datasets en door verschillende nog onopgeloste onderzoeksvragen. Het evalueren van de oorzaken van de verschillen en het beantwoorden van de daarmee verbonden onderzoeksvragen viel buiten het bestek van het mandaat en de middelen van de EG HCLIM.

De hier gekozen integratiemethode toont de dominante veranderingen in de afvoer die voor de Rijn te verwachten zijn, waarbij uit voorzorg wordt uitgegaan van een hoog emissiescenario. In de integrale benadering laten de resultaten een grotere bandbreedte zien dan de afzonderlijke resultaten van de vijf bijdragende onderzoeksteams.

Dit hoofdstuk omvat een samenvatting van de belangrijkste resultaten met betrekking tot de geprojecteerde veranderingen in de afvoer (hoofdstuk 5.1), een vergelijking van deze resultaten met die van het eerdere rapport (hoofdstuk 5.2) en conclusies over het gebruik van de resultaten in het ICBR-proces en in het onderzoeksnetwerk (hoofdstuk 5.3).

5.1 Veranderingen in het afvoerregime en het hydrologische systeem tot 2100

Samenvattend kan worden gesteld dat het onderzoek naar de langetermijnveranderingen in het verleden (waarnemingen) en in de toekomst (projecties van RCP8.5) een verandering laat zien in de richting van **meer pluviale** afvoerregimes ten nadele van het glaciaal-nivale afvoerregime in het Rijnstroomgebied. De zomerafvoeren nemen af, de winterafvoeren nemen toe, en de jaarafvoeren blijven vrijwel onveranderd. Daarbij komt dat de hoog- en laagwaterparameters in veel riviervluchten en zijrivieren een toe- dan wel afname laten zien en bijgevolg een tendens naar meer uitgesproken extremen. Andere indicatoren die niet zijn weergegeven in dit rapport wijzen op aanhoudende droogte en dus ook op meer aanhoudende perioden van laagwaterafvoer. Een oorzaak hiervoor is onder meer de afname van door gesmolten ijs en sneeuw gevoede afvoeren.

Hoewel het algemene beeld coherent lijkt en overeenstemt met theoretische opvattingen over het Rijnstroomgebied in een opwarmend klimaat, zijn de bandbreedtes groot. Sommige projecties laten zelfs tegengestelde veranderingssignalen zien. Dit is het gevolg van de complexiteit en dynamiek van het hydrologische systeem van de Rijn en de verschillende toegepaste procedures voor modellering en evaluatie. De afgelopen tien jaar van opeenvolgende extreme laagwaterafvoeren laten zien dat de werkelijke/waargenomen ontwikkeling van rivierafvoeren (in ieder geval enige tijd) kan afwijken van de algemene ontwikkeling die naar voren komt op basis van langetermijngegevens uit waarnemingen en projecties. Er konden de afgelopen jaren bijvoorbeeld afnames van de gemiddelde winterafvoer worden waargenomen, wat in tegenspraak is met de langetermijnwaarnemingen uit de 20^e eeuw en de projecties voor de 21^e eeuw.

Naast de gevolgen van klimaatverandering die kunnen worden beoordeeld door regionale klimaatmodellen toe te passen in hydrologische modellen, worden in dit rapport enkele specifieke kenmerken van het hydrologische systeem van de Rijn uitgelicht. **Gletsjers** zijn tot nu toe belangrijke waterbronnen geweest tijdens aanhoudende droogtes. Onderzoeksprojecten die gericht zijn op glaciaal-nivale rivierafvoercharacteristieken laten zien dat de ondersteuning van de laagwaterafvoer door gletsjers in de Rijn bij Basel al over zijn piek heen is (bekend als "gletsjerpiekwater") en afneemt tot bijna nul aan het eind van de eeuw in een hoge-emissiescenario (RCP8.5). De **grote meren** in de bovenloop van het Rijnstroomgebied volgen over het algemeen de bovengenoemde seizoensinvloeden van de klimaatverandering (hogere

waterstanden in de winter, lagere waterstanden in de zomer en herfst) als gevolg van de veranderingen in de watertoevoer. In het deltagebied moet rekening worden gehouden met de samenkomende effecten van veranderende rivierafvoeren en **zeespiegelspijging**. Beide aspecten zullen van invloed zijn op de afwateringsmogelijkheden, het overstromingsrisicobeheer, de zoetwatervoorziening en de verzilting. Ook hier kunnen de grenzen van de huidige beheerpraktijken en -doelen worden bereikt binnen de context van de klimaatverandering.

5.2 Vergelijking met de ICBR-studie van 2011

Bij de totstandbrenging van de vorige studie (ICBR, 2011) kon de toenmalige ICBR-expertgroep KLIMA (EG KLIMA) gebruik maken van de omvangrijke voorbereidende werkzaamheden van de Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR). In het kader van het project Rheinblick (CHR, 2010) hadden de CHR-partners beschikbare projecties van meteorologische variabelen (temperatuur, neerslag) en hydrologische variabelen (afvoer) samengevoegd, geëvalueerd, inhoudelijk besproken en vooraf afgestemd. De projecties waren destijds gebaseerd op de klimaatmodelgegevens die ten grondslag lagen aan het 4^e IPCC-evaluatierapport (CMIP3, scenario SRES A1B), het EU-project ENSEMBLES en nationale onderzoeksactiviteiten.

Afgestemde resultaten zoals die van het Rheinblick-project waren niet beschikbaar voor de huidige scenariostudie. De EG HCLIM moest zelf afvoerprojecties uit verschillende bronnen verzamelen en integreren. Dit was alleen mogelijk doordat verschillende HCLIM-partners gegevens aanleverden en er gebruik werd gemaakt van een klimaatdienst, die bij een van de betrokken partnerinstellingen is gevestigd. Desalniettemin konden er vanwege de beperkte middelen en het ontbrekende mandaat echter geen uitgebreide wetenschappelijke analyse en een volledige technische integratie van de geleverde gegevens worden uitgevoerd door de EG HCLIM. In plaats daarvan zijn er op basis van de ruwe projectiegegevens (tijdreeksen) evaluaties volgens een uniforme aanpak (scenario, indicatoren, tijdsperioden) uitgevoerd.

De referentieperiode werd met 20 jaar verschoven (1981-2010 vs. 1961-1990 voorheen) omdat er sinds de vorige studie tijd was verstreken en omdat de klimaatmodelgegevens voor de huidige studie niet beschikbaar waren voor de referentieperiode van rapport 188 (ICBR, 2011). De "nabije toekomst" moest met 10 jaar worden verschoven (2031-2060 vs. 2021-2050 voorheen) omdat de "nabije toekomst" van de eerdere scenariostudie op het moment van schrijven (2023) al was begonnen. Bovendien werden enkele extra indicatoren en één extra meetstation aan het evaluatieschema toegevoegd en werden de resultaten niet langer afgerond op de volgende 5% zoals in het eerdere rapport.

Als gevolg van deze randvoorwaarden en methodische verschillen is de **vergelijkbaarheid tussen de ICBR-studies van 2011 en 2023 beperkt**. Toch is de algemene presentatie van de resultaten in de vorm van gekleurde tabellen voor beide onderzoeken vergelijkbaar. In bijlage B worden de scenarioresultaten van de studies van 2011 en 2023 getoond en vergeleken.

Beide scenariostudies laten over het algemeen **een vergelijkbare richting** van geprojecteerde verandering zien. Ze wijzen op meer uitgesproken laag- en hoogwaterextremen. Ook laten beide generaties scenario's een seizoensgebonden herverdeling van de rivierafvoer van zomerhalfjaar naar winterhalfjaar zien. Er zijn verschillen met betrekking tot de **bandbreedte van de resultaten**, die voor de meeste indicatoren en locaties nu **groter** is. Dit komt deels door de veelheid en heterogeniteit van de toegepaste klimaatmodellen, gegevensbewerkingsschema's (regionalisering, biascorrectiemethode, Delta Change enz.) en verschillende hydrologische modellen.

In verband met de geactualiseerde scenario's, die nu overeenstemmen met het 5^e IPCC-rapport, de verder ontwikkelde klimaat- en hydrologische modellen en het nieuwe bereik van veranderingssignalen, **beveelt de expertgroep HCLIM aan om de adaptatiestrategie van de ICBR en de bijbehorende rapporten** (bv. watertemperatuur) **te actualiseren** op basis van de nieuwe informatie.

5.3 **Suggesties voor verder gebruik van gegevens en resultaten**

In dit rapport is informatie samengesteld en geproduceerd die openbaar toegankelijk is en gebruikt kan worden door verschillende actoren op het gebied van klimaateffectbeoordeling en klimaatadaptatie.

Actoren op strategisch niveau kunnen de geaggregeerde informatie in dit rapport gebruiken om te beslissen of hun bestaande adaptatiestrategieën moeten worden herzien. Hoewel de veranderingssignalen niet fundamenteel verschillen van vroeger onderzoek, zijn er in dit rapport nieuwe gegevenssets verwerkt en enkele aanvullende verbanden gelegd (bv. naar de droge periode in de jaren 2010, het verdere smelten van gletsjers of de interferentie van het beheer van reservoirs). Dit kan reden zijn om eerdere beslissingen te heroverwegen.

Wetenschappelijke actoren of gedelegeerden in de ICBR-groepen, bijvoorbeeld voor hoogwater en laagwater (WG H, EG LW), ecologie (WG B) en waterkwaliteit (WG S) alsmede watertemperaturen (EG STEMP), vinden waardevolle samenvattende informatie in het voorliggende rapport. Zo nodig bevat de grafische bijlage (online gepubliceerd: [CHR-website](#)) verdere aanwijzingen voor de bepaling van hun eigen "aanjagende" scenario's (respectievelijk hoog- en laagwaterafvoer). Hier zijn de resultaten van de bijdragende hydrologische onderzoeksteams van Zwitserland, Frankrijk, Duitsland, Nederland en de CHR zichtbaar in de vorm van afzonderlijke "klimaatveranderingsfactoren" op ensemble- en projectieniveau. Afzonderlijke modelruns kunnen worden geselecteerd voor afzonderlijke meetpunten om indicatoren te berekenen die niet in dit rapport zijn opgenomen. Evenzo kunnen **wetenschappelijke actoren van buiten de ICBR** de afvoerprojecties in detail beoordelen, tot aan afzonderlijke tijdreeksen in afzonderlijke meetstations.

Ook bestaat de mogelijkheid om de omvangrijke gegevensset verder te ontwikkelen om **klimaatveranderingsfactoren verder te consolideren**. De Duitse deelstaten aan de Rijn behouden zich bijvoorbeeld de mogelijkheid voor om binnen de hier getoonde bandbreedte eventueel concrete hoogwaterveranderingsfactoren vast te stellen aan de hand van verdere informatie en expertise. Verdere informatie kan bijvoorbeeld bestaan uit historische tijdreeksen van meetstations en hydraulische informatie.

De grafieken en afvoerprojecties zijn in te zien via de **webpagina van de Internationale Commissie voor de Hydrologie van het Rijngebied (CHR)** (zie [hier](#)). De selectie is beperkt tot de indicatoren en meetpunten die in dit rapport worden vermeld. Aanvullende gegevens voor veel andere meetpunten kunnen worden opgevraagd bij het **ICBR-secretariaat** (sekretariat@iksr.de). Zo nodig leidt het secretariaat de aanvraag door naar de bevoegde **leden van de EG HCLIM** en/of verwijst naar de in het voorwoord dan wel het rapport genoemde **onderzoeksgroepen en nationale klimaatdiensten**.

6 Vooruitblik

Aangezien de klimaatverandering doorgaat en de kennis over de mogelijke gevolgen ervan toeneemt, is te verwachten dat deze huidige actualisering van de ICBR-afvoerscenario's niet de laatste zal zijn. Op het moment dat dit rapport werd gepubliceerd was al het volgende, 6^e IPCC-evaluatierapport, en bijgevolg een nieuwe generatie klimaatscenario's en resultaten van mondiale klimaatmodellen verschenen (hoofdstuk 6.1). Verder heeft de EG HCLIM een aantal onderzoeksvragen geformuleerd waarmee het onderzoeksnetwerk zich de komende jaren bezig dient te houden (hoofdstuk 6.2). De resultaten van deze en andere activiteiten zouden moeten worden geëvalueerd en opgenomen in de volgende ICBR-update (hoofdstuk 6.3).

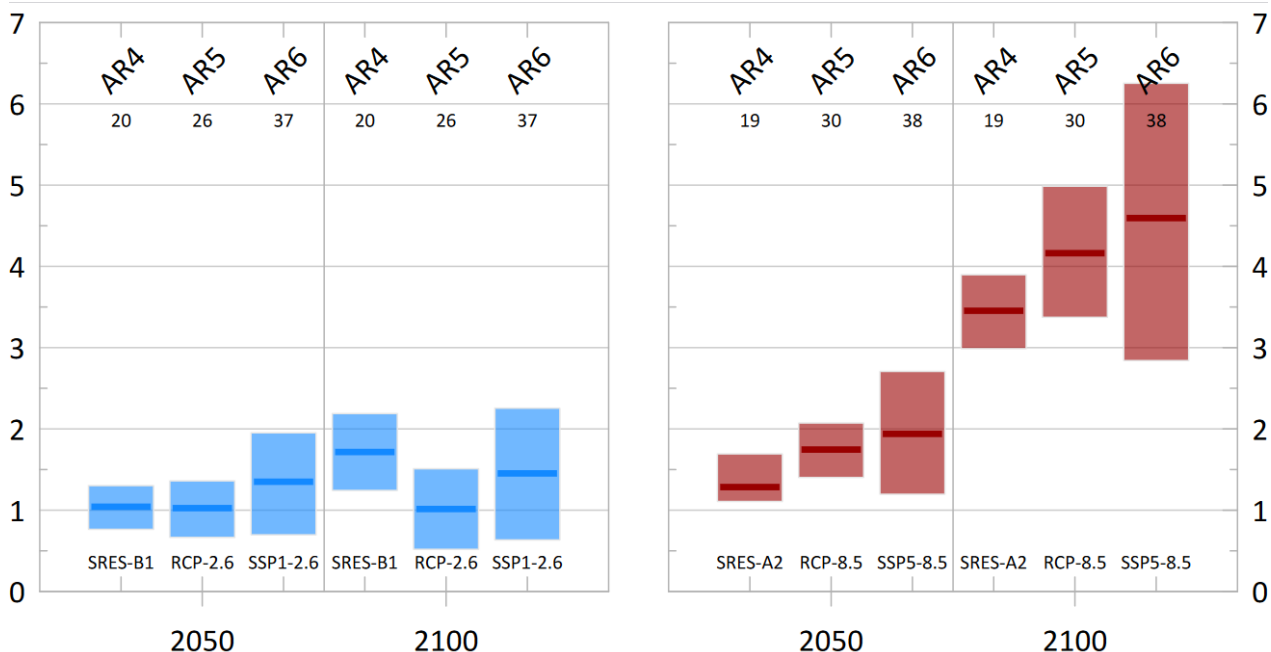
6.1 Nieuwe trends op basis van AR6

ICBR-rapport 188 (ICBR, 2011), opgesteld door de expertgroep "KLIMA" (EG KLIMA), was hoofdzakelijk gebaseerd op het **4^e IPCC-evaluatierapport** (IPCC, 2007), dat op het moment van opstellen (2010) het meest recente rapport was. Er werd met name gebruikgemaakt van de centrale beweringen en scenario's (voornamelijk het gebalanceerd scenario SRES A1B) en de klimaatmodelgegevens die op basis hiervan zijn gegenereerd (CMIP3, EU-ENSEMBLES). Resultaten van hydrologische modellen zijn volgens een gestandaardiseerde procedure samengesteld door het onderzoeksteam Rheinblick (CHR, 2010).

In het huidige rapport van de EG HCLIM is gebruikgemaakt van de afvoerprojecties voor nationale en federale adaptatiestrategieën in de oeverstaten die bestonden op het moment van voorbereiding (2023). Deze zijn gebaseerd op de zogenaamde RCP-scenario's (Representative Concentration Pathways, voornamelijk het hoge-emissiescenario RCP8.5) zoals gepubliceerd in het **5^e IPCC-evaluatierapport** (IPCC, 2014), nieuwe klimaatsimulaties (CMIP5, EURO-CORDEX) en uiteenlopende hydrologische modellen (zoals gebruikt in de nationale studies, vergelijk tabel 1 en bijlage A).

Op het moment van schrijven is een nieuwe reeks scenario's (Shared Socioeconomic Pathways, SSP) en mondiale klimaatmodellen (CMIP6) gepubliceerd in het **6^e IPCC-evaluatierapport** (IPCC, 2021), met een synthese gepubliceerd in 2023 (IPCC, 2023). Regionale informatie over klimaatverandering (d.w.z. afschaling van de CMIP6-modelresultaten) voor het Rijnstroomgebied en hydrologische effectbeoordelingen waren echter nog niet in alle oeverstaten beschikbaar. Ook was er nog geen duidelijke beslissing genomen over het scenario dat het meest geschikt zou zijn voor adaptatiedoeleinden.

Figuur 5 geeft een vergelijking van de mondiale temperatuurveranderingen volgens de bovengenoemde IPCC-rapporten, uitgaande van hoge- en lage-emissiescenario's. Vooral de hoge-emissiescenario's resulteren in veel gevallen in opeenvolgende hogere mondiale temperatuurstijgingen. Dit kan worden gezien als een eerste aanwijzing dat de volgende generatie afvoerprojecties voor de Rijn ook tot grotere veranderingen zal leiden.



Figuur 5: Hypothetische vergelijking van de verandering van de mondiale oppervlaktetemperatuur op basis van mondiale klimaatmodellen die ten grondslag liggen aan het 4^e, 5^e en 6^e IPCC-rapport, uitgaande van lage-emissie- of mitigatiescenario's (links: SRES-B1, RCP2.5, SSP1-2.6) en hoge-emissiescenario's (rechts: SRES-A2, RCP8.5, SSP5-8.5). Alle veranderingen zijn gemiddeld voor 20 jaar ten opzichte van de periode 1986-2005. De omvang van de respectievelijke ensembles wordt als getallen in de grafieken weergegeven. Gegevens afkomstig van Knutti, R. en Sedláček, J. (2012) en Tebaldi et al. (2021); samenstelling en visualisatie door de BfG.

In het AR5-rapport zijn de klimaatscenario's emissiescenario's (RCP's) die zijn gebaseerd op de verandering van de concentratie van broeikasgasemissies. In het nieuwe AR6-rapport van IPCC (IPCC, 2021) wordt in plaats daarvan gebruikgemaakt van zogenaamde SSP's. Bij de SSP's wordt gekeken naar verschillende maatschappelijke en economische ontwikkelingen, die een aanvulling vormen op de emissiescenario's. SSP5-8.5 bestaat bijvoorbeeld uit sociaaleconomisch narratief 5 (door fossiele brandstoffen aangejaagde ontwikkeling) en emissiescenario RCP8.5. Een wereldwijde vergelijking op basis van het nieuwe hoge-emissiescenario (SSP5-8.5) wijst op een hogere mondiale temperatuurstijging met een groter wordende bandbreedte dan in het 5^e IPCC-rapport dat aan dit rapport ten grondslag ligt (KNMI'23, 2023).

Nederland gebruikt de informatie uit het nieuwe AR6-rapport al voor nationale en regionale effectbeoordelingen: de zogenaamde **KNMI'23-scenario's**. In alle scenario's van KNMI'23 stijgt de temperatuur (KNMI'23 Gebruikersrapport, 2023). Net als de temperatuur neemt de winterneerslag in alle scenario's toe. In vergelijking met de winterneerslag in 1991-2020 zal de winterneerslag tussen de 4% en 24% toenemen voor respectievelijk scenario Ld (variant lage emissie, droog) en Hn (variant hoge emissie, nat). Dit wordt veroorzaakt door een toename van westenwinden, die vochtige lucht aanvoeren vanaf de Noord-Atlantische Oceaan. In tegenstelling tot de toename van zomerneerslag in de afgelopen tien jaar in Nederland, vertonen de vier klimaatscenario's een afname in de zomerneerslag. De grootste afname is tot 29% in het Hd-scenario (variant hoge emissie, droog) in 2100. De zomerneerslag zal naar verwachting afnemen door droge, continentale winden uit het oosten. Deze winden zullen vaker voorkomen als gevolg van veranderingen in de zeewatertemperatuur ten westen van Ierland en een sterke opwarming in Zuid-Europa (KNMI'23 Gebruikersrapport, 2023).

Daarnaast zal de frequentie van extreme gebeurtenissen – extreme buien en droogte – toenemen. Dit betekent dat een extreem droge zomer in het heden een gemiddelde zomer zal zijn in 2100. Omdat de afvoerprojecties van KNMI'23 nog in ontwikkeling zijn, is het onduidelijk wat het effect op de toekomstige afvoer zal zijn.

De nieuwe AR6 IPCC-scenario's zullen ook worden toegepast door andere onderzoeksteams en worden doorvertaald naar hydrologische projecties voor onder meer het Rijnstroomgebied (bv. BfG). Aangezien deze teams voortbouwen op een geconsolideerd ensemble van regionale klimaatmodellen (gekoppeld aan de mondiale modellen), dat naar verwachting in 2025 zal worden gepubliceerd, zal een nieuwe verzameling van afvoerprojecties pas later mogelijk zijn.

6.2 Benodigd onderzoek

Anders dan in 2011 kon de ingeschakelde ICBR-expertgroep HCLIM niet putten uit afgerond werk van het onderzoeksnetwerk (zoals het geval was voor Rheinblick 2050). De EG HCLIM moest ertoe overgaan om verschillende onderzoeksresultaten voor het Rijnstroomgebied te integreren. Dit is gedaan door a) het verzamelen van de afzonderlijke datasets van de bijdragende onderzoeksteams of hun contactpersonen in de EG HCLIM en b) consolidatie en evaluatie door de BfG in het kader van de DAS-basisdienst "Klimaat en Water". Binnen het mandaat en het beschikbare tijdsbudget kon de expertgroep alleen technische integratie bieden. Een diepgaande wetenschappelijke analyse van de vastgestelde verschillen was niet mogelijk.

Tijdens de werkzaamheden in verband met dit rapport kwamen verschillende onderzoeksvragen naar voren:

1. Is er een weg naar een **uniformere aanpak van regionale of nationale klimaateffectbeoordelingen**? Hoewel het duidelijk is dat elke nationale klimaateffectbeoordeling ook specifieke regionale vragen moet beantwoorden, lijkt de heterogeniteit van de benaderingen in het internationale Rijnstroomgebied op dit moment zeer groot. Denkbaar integratieniveaus zijn bijvoorbeeld het samenvoegen van alle technische kennis in de partnerlanden met als doel de verbetering van de verschillende hydrologische modellen of zelfs de ontwikkeling van een gezamenlijk model. Ook het vaststellen van een gemeenschappelijk simulatieprotocol of het gebruiken van een geïntegreerd evaluatieschema voor modeluitkomsten zouden wenselijk zijn.
2. Hoe kunnen **verschillen tussen simulatie-ensembles voor afzonderlijke meetpunten** worden verklaard of verkleind? Hoewel de in dit rapport geïntegreerde resultaten veel overeenkomsten en een algemeen consistent beeld vertonen voor grotere deelstroomgebieden van de Rijn, bleek dat de resultaten van de bijdragende onderzoeksteams zeer verschilden voor afzonderlijke meetpunten in de zijrivieren, zelfs als dezelfde forceringsgegevens werden gebruikt. Uit deze verschillen blijkt dat hydrologische processen verschillend worden weergegeven door de afzonderlijke hydrologische modellen. Ze bieden dus de mogelijkheid om van elkaar te leren en het model te verbeteren, waardoor de volgende ICBR-scenario's meer ruimte zouden kunnen bieden voor regionale details.
3. Hoe kunnen **stortvloeden** beter worden meegenomen in klimaateffectbeoordelingen? Kortstondige en lokale zware neerslag blijkt zeer relevant te zijn voor waterbeheer. In de huidige klimaatmodellen kunnen dit soort gebeurtenissen echter niet volledig worden meegenomen, omdat ze alleen dagelijkse – in plaats van uurlijkse of subuurlijkse – gegevens produceren op rastercellen van enkele vierkante kilometers, en meestal de atmosferische convectieprocessen niet volledig reproduceren. De nieuwe convectietoelastende modellen zouden moeten worden gebruikt in toekomstige hydrologische klimaateffectbeoordelingen.
4. Hebben we betere methoden voor veranderingen in **extreme waarden**? Veranderingen in hoge en lage extremen hangen samen met hoge risico's en zijn dus bijzonder relevant voor besluitvormers. Ook al zijn er in de landen eerste benaderingen voor, tot nu toe is het erg lastig, zo niet onmogelijk, om veranderingen van gebeurtenissen die eens in de 100 of zelfs 1000 jaar voorkomen te beoordelen op basis van zowel waarnemingen als projecties (omdat de lengte van die reeksen relatief kort is, maximaal 100-200 jaar, vaak korter). De huidige resultaten moeten als zeer onzeker worden beschouwd. Er is behoefte aan betere methoden en meer overeenstemming over welke beoordelingen mogelijk en toegestaan zijn. Mogelijk moet er een inventaris worden opgemaakt van de methoden voor de identificatie van veranderingen in (statistiek voor) extreme waarden en eventueel dienen er uniforme statistieken voor extreme waarden te worden ontwikkeld (om extreme waarden over het gehele Rijnstroomgebied te bepalen). Op dit moment wordt er in Nederland al gebruik gemaakt van een neerslaggenerator en hydrologische en hydraulische modellering om afvoeren voor extreme herhalingstijden te genereren, een methode waarbij er kunstmatig lange toekomstige reeksen geproduceerd worden op basis van waarnemingen.
5. Hoe kunnen de **samengestelde effecten van klimaatverandering** worden aangepakt? Het klimaat beïnvloedt de veranderingen in het internationale Rijnstroomgebied op verschillende manieren. In dit rapport is veel aandacht besteed aan de effecten van klimaatverandering op de hydrologie van de Rijn. Andere effecten van klimaatverandering, zoals de effecten van zeespiegelstijging op de Rijndelta of de effecten van klimaatverandering in combinatie met toekomstig watergebruik en waterbeheer in het

stroomgebied, zijn slechts kort aangestipt. Er is meer inzicht nodig in deze samengestelde effecten.

6. Hoe kunnen effecten van sociaaleconomische veranderingen worden meegenomen in de volgende versie van scenario's? Zoals vermeld in hoofdstuk 4.5 kan de toekomstige sociaaleconomische verandering de directe hydrologische effecten van de klimaatverandering beïnvloeden en zowel positieve als negatieve terugkoppelingen veroorzaken (die de directe effecten van de klimaatverandering versterken of verzwakken). Omdat het echter nog ontbreekt aan kwantitatieve informatie, kunnen deze terugkoppelingen niet worden meegenomen in dit rapport. Er is behoefte aan meer gegevens en onderzoek op het gebied van **sociohydrologie** (de impact van sociaaleconomische activiteiten op de hydrologie).

De ICBR heeft geen middelen en geen mandaat voor eigen onderzoek op dit gebied. De commissie en haar expertgroepen treden op als waarnemers en begeleiden onderzoeksprogramma's die het Rijnstroomgebied geheel of deels betreffen en betrekking hebben op bovengenoemde en aanverwante vraagstukken.

Daarom geeft de EG HCLIM de vragen door aan het onderzoeksnetwerk als onderzoeksimpulsen, in de hoop de komende jaren antwoorden op sommige van deze kwesties te krijgen.

6.3 Volgende actualisering van het ICBR-rapport

De volgende actualisering van dit scenariorapport is gepland door het programma Rijn 2040 in samenhang met of vooruitlopend op de actualisering van de klimaatadaptatiestrategie van de ICBR, die elke 10 jaar zijn gepland (volgende actualisering 2035). Op grond hiervan zouden de afvoerscenario's rond 2032 moeten worden geactualiseerd.

Uiteraard moet de ICBR rekening houden met nieuwe technische en wetenschappelijke ontwikkelingen op dit gebied. In de toekomst zal het hiermee misschien mogelijk worden om afvoerscenario's regelmatig of zelfs sneller aan te passen op basis van actuele en regionale ontwikkelingen nadat een IPCC-evaluatierapport gepubliceerd is.

7 Bibliografie

BAFU (ed.) (2021): Effects of climate change on Swiss water bodies. Hydrology, water ecology and water management. Federal Office for the Environment FOEN, Bern. Environmental Studies No. 2101: 125 p.

Berg, P., Bozhinova, D., Photiadou, C. (2021): Climate explorer for the Water Sector. https://datastore.copernicus-climate.eu/documents/sis-hydrology-derived/C3S_424_ClimateExplorerApplication_v1_corr_pb.pdf

BfG (2014): Das Hochwasserextrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse. BfG-Mitteilung 31. 232 p.

Bremicker, M. (2000): Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM - Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele. Freiburger Schriften zur Hydrologie, Band 11. Institut für Hydrologie der Universität Freiburg. <https://www.hydrology.uni-freiburg.de/publika/band11.html>

CHR (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. CHR report No. I-23. Görgen et al. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad. https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/rapport_i_-_23.pdf

CHR (2016): *EN*: The snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries considering the influence of climate change – Synthesis report (*ASGI*). *DE*: Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels – Synthesebericht (*ASGI*).

CHR report no. I 25. Stahl et al. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad. *EN*: https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/asg-rhein_synthesis_en.pdf; *DE*: https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/ASG-Rhein_Synthese_dt.pdf.

CHR (2022): *EN*: Impact of climate change on the rain, snow and glacier melt components of streamflow of the river Rhine and its tributaries – Synthesis report (*ASGII*). *DE*: Auswirkungen des Klimawandels auf die Abflussanteile aus Regen, Schnee und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen – Synthesebericht (*ASGII*).

CHR report no. I 28. Stahl et al. International Commission for the Hydrology of the Rhine basin (CHR), Lelystad.

EN: https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/ASG-II_Synthese_EN_mit-Links_korr-Tab-2.pdf;

DE: https://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/ASG-II_Synthese_DE_mit-Links.pdf

Deltares (2014): Generator of Rainfall and Discharge Extremes (GRADE) for the Rhine and Meuse basins - Final report of GRADE 2.0. https://publications.deltares.nl/1209424_004_0018.pdf

Deltares & KNMI (2015): Wat betekenen de nieuwe klimaatscenario's voor de rivierafvoeren van Rijn en Maas?

https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/069/858/original/samenvatting_grade_knmi14_definitief2.pdf

Deltares & KNMI (2017):

https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/069/858/original/samenvatting_grade_knmi14_definitief2.pdf

Deltares / Haasnoot et al (2018): Een verkenning van mogelijke gevolgen van versnelde zeespiegelstijging voor het Deltaprogramma. Rapport Deltares in opdracht van de staf Deltacommissaris en Rijkswaterstaat WVL.

EU-CIS (2009, updated in 2024): River basin management in a changing climate. Guidance document 24. https://environment.ec.europa.eu/publications/river-basin-management-changing-climate_en

EU-Copernicus (2024) : <https://www.copernicus.eu/en/copernicus-services/climate-change>

Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., Taylor, K.E., (2016): Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.*, 9(5): 1937-1958. DOI:10.5194/gmd-9-1937-2016.

GDWS (2023): Fortschreibung der aktuellen Verfügungslage zur Aktualisierung der Daten- und Erkenntnislage zum Meeresspiegelanstieg. <https://izw.baw.de/wsv/umwelt/anpassung-klimawandel>

GLAMOS (2022): Schweizerisches Gletschermessnetz (GLAMOS – Glacier Monitoring in Switzerland). <https://glamos.ch>

HLNUG (2024): Informationen zu ReKliEs. <https://reklies.hlnug.de/home>

Hydrological Atlas of Switzerland - HADES (2024): <https://hydrologicalatlas.ch/?language=switch>

HYDROmapsCC - Hydro-CH2018 in HADES (2024): https://hydromapscc.ch/#en/8/46.832/8.190/bl_hds/NULL

ICBR (2011): Studie naar scenario's voor het afvoerregime van de Rijn. ICBR-rapport 188. https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Fachberichte/NL/rp_NI_0188.pdf

ICBR (2019): Rapportage voor de tweede cyclus van de ROR: "Actualisering van de overstromingsgevaar- en overstromingsrisicokaarten in het internationaal Rijndistrict". https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/BWP-HWRMP/NL/bwp_NI_TweedeROR-rapportage_actu2019.pdf

ICBR (2020): Rhine 2040: The Rhine and its Catchment: Sustainably Managed and Climate-resilient, 16th Rhine Ministerial Conference, February 13, 2020, Amsterdam, https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Broschueren/EN/bro_En_2040_long.pdf (long), https://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/DKDM/Dokumente/Broschueren/EN/bro_En_2040_short.pdf (short, brochure)

IGKB (2015): KlimBo - Klimawandel am Bodensee, Bericht Nr. 60. https://www.igkb.org/fileadmin/user_upload/Downloads/Forschungsprojekte/Klimbo/KlimBo_Blauer_Bericht_60_I.pdf IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>

IPCC (2007): Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K & Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar4/syr/>

IPCC (2014): *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, R.K. Pachauri & L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis, the Working Group I contribution to the Sixth Assessment Report on 6 August 2021 during the 14th Session of Working Group I and 54th Session of the IPCC. <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/>

IPCC (2023): *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee & J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647

Jacob, D. et al. (2014): EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change*, 14(2): 563-578. DOI:10.1007/s10113-013-0499-2

KLIWA (2016): Monitoringbericht 2016: Klimawandel in Süddeutschland, Veränderungen von meteorologischen und hydrologischen Kenngrößen – Klimamonitoring im Rahmen des Kooperationsvorhabens KLIWA,
https://www.kliwa.de/_download/KLIWA_Monitoringbericht_2016.pdf

KLIWA (2023): Heft 24, 7. KLIWA-Symposium am 14. und 15. September 2022 in Ingelheim am Rhein, Fachvorträge und Diskussionen, ZU WENIG | ZU VIEL – Wasserwirtschaft zwischen Trockenheit und Starkregen.

KLIWA (2024): Zukünftige Entwicklung von Starkregen – Auswertung eines konvektionserlaubenden Ensembles.
https://www.kliwa.de/_download/KLIWA_Kurzbericht_zukuenftige_Entwicklung_Starkregen.pdf

KNMI'14 (2014):
https://cdn.knmi.nl/knmi/pdf/bibliotheek/klimaatbrochures/Brochure_KNMI14_NL.pdf

KNMI (2021): KNMI Klimaatsignaal'21: hoe het klimaat in Nederland snel verandert, KNMI, De Bilt

KNMI'23 database (2023): For the SSP2-4.5 the KNMI'23 database was used. This is published on the database website but not yet in a report: <https://klimaatscenarios-data.knmi.nl/>

KNMI'23 scientific report / KNMI National Climate Scenarios 2023 for the Netherlands (2023)
https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/902/original/KNMI23_climate_scenarios_scientific_report_WR23-02.pdf

KNMI23 Klimaatscenarios Gebruikersrapport (2023):
https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/901/original/KNMI23_klimaatscenarios_gebruikersrapport_23-03.pdf OR
[KNMI23_klimaatscenarios_gebruikersrapport_23-03.pdf](https://cdn.knmi.nl/system/data_center_publications/files/000/071/901/original/KNMI23_klimaatscenarios_gebruikersrapport_23-03.pdf)

Knutti, R., Sedláček, J. (2013). Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature Clim Change* 3, 369–373. <https://www.nature.com/articles/nclimate1716>.
<https://doi.org/10.1038/nclimate1716>

KP ZSS (*Kennisprogramma Zeespiegelstijging - Research program Sea level rise which is part of the Dutch Delta Program*) (2022): Grondwaterverzilting en watervraag bij een stijgende zeespiegel
<https://www.deltaprogramma.nl/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyse-kpzss-grondwaterverzilting-watervraag-bij-een-stijgende-zeespiegel>

KP ZSS A (2023): Systeemanalyse KP ZSS zoetwater regio Rijn-Maasmonding 2023

KP ZSS (2023):
<https://www.deltaprogramma.nl/deltaprogramma/kennisontwikkeling-en-signalering/zeespiegelstijging/onderzoeksresultaten-2023>
<https://www.deltaprogramma.nl/binaries/deltacommissaris/documenten/publicaties/2023/06/05/systeemanalyse-waterveiligheid-rijnmonddrechtsteden-en-rivierengebied---kp-zss/Systeemanalyse+waterveiligheid+RijnmondDrechtsteden+en+Rivierengebied+-+KP+ZSS.pdf>

LAWA (2023): Anpassung an den Klimawandel. <https://www.lawa.de/Publikationen-363-Anpassung-an-den-Klimawandel.html>

Meehl, G.A., Bony, S. (2011): Introduction to CMIP5. *CLIVAR Exchanges*, 16(56).
https://web.lmd.jussieu.fr/~bony/TMP/Meehl_Bony_Clivar2011.pdf

NCCS (National Centre for Climate Services) (ed.) (2018): CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Zurich: 24. ISBN: 978-3-9525031-3-3.

Nilson, E. et al. (2014). Auswirkungen des Klimawandels auf das Abflussgeschehen und die Binnenschifffahrt in Deutschland. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 4.01, Federal Institute of Hydrology (BfG), Koblenz, Germany. DOI:10.5675/Kliwas_43/2014_4.01

Nilson, E. et al. (2020): Beiträge zu einer verkehrsträgerübergreifenden Klimawirkungsanalyse: Wasserstraßenspezifische Wirkungszusammenhänge. Schlussbericht des Schwerpunktthemas Schifffahrt und Wasserbeschaffenheit (SP-106) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetzwerks.

Pfahl, S., O’Gorman, P. A.; Fischer, E. M. (2017): Understanding the regional pattern of projected future changes in extreme precipitation. In: *Nature Clim Change* 7 (6), S. 423–427. DOI:10.1038/nclimate3287

Poncet, N., Lucas-Picher, P., Trambly, Y., Thirel, G., Vergara, H., Gourley, J., and Alias, A. (2024): Does a convection-permitting regional climate model bring new perspectives on the projection of Mediterranean floods?, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.* (final revised paper). <https://doi.org/10.5194/nhess-24-1163-2024>.
<https://nhess.copernicus.org/articles/24/1163/2024/nhess-24-1163-2024.pdf>

Rauthe, M., Steiner, H., Riediger, U., Mazurkiewicz, A., Gratzki, A. (2013): A Central European precipitation climatology - Part I: Generation and validation of a high-resolution gridded daily data set (HYRAS). *Meteorologische Zeitschrift*, 22(3): 235-256. DOI:10.1127/0941-2948/2013/0436

Rauthe, M.; Brendel, C.; Helms, M.; Lohrengel, A.-F.; Meine, L.; Nilson, E.; Norpoth, M.; Rasquin, C.; Rudolph, E.; Schade, N. H.; Deutschländer, T.; Forbriger, M.; Fleischer, C.; Ganske, A.; Herrmann, C.; Kirsten, J.; Möller, J.; Seiffert, R. (2020): Klimawirkungsanalyse des Bundesverkehrsnetzes im Kontext Hochwasser: Schlussbericht des Schwerpunktthemas Hochwassergefahren (SP-103) im Themenfeld 1 des BMVI-Expertennetz-werks. 136 p. DOI: 10.5675/ExpNRM2020.2020.04

Sperna-Weiland, F.C, et al. (2021): Estimating Regionalized Hydrological Impacts of Climate Change Over Europe by Performance-Based Weighting of CORDEX Projections. *Front. Water*, 3 – 2021. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.713537>

Tebaldi, C. et al. (2021). Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6, *Earth Syst. Dynam.*, 12, 253–293.
<https://esd.copernicus.org/articles/12/253/2021/>. <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>, 2021.

Thirel, G. et al. (2018) (*summary on MOSARH21*): Quels futurs possibles pour les débits des affluents français du Rhin (Moselle, Sarre, Ill) ? (Future streamflows for the French tributaries of the River Rhine (Moselle, Sarre and Ill))
<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1051/lhb/2019039>

Thirel, G. et al. (2018) (*final report on MOSARH21 in French*): Rapport final du projet MOSARH21: Évolutions des débits futurs sur le bassin du Rhin en contexte de changement climatique. Une évaluation actualisée avec les simulations climatiques du 5e rapport du GIEC https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2018/04/Rapport_final_MOSARH21_v2_1.pdf

Trenberth, K. E. (1999): Conceptual Framework for Changes of Extremes of the Hydrological Cycle with Climate Change. In: *Climatic Change* 42 (1), S. 327–339. DOI: 10.1023/A:1005488920935

Wechsler, T., Zappa, M. (niet gepubliceerd): Auswirkungen Klimaszenarien CH2018 auf Alpenrandseen, Walensee und Zürichsee. Studie im Auftrag des BAFU.

Ylla Arbós, C., Blom, A., Sloff, C. J., & Schielen, R. M. J. (2023). Centennial channel response to climate change in an engineered river. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL103000. <https://doi.org/10.1029/2023GL103000>

Zeespiegelmonitor (2022): Stolte W. et al.; Delatres and KNMI
<https://pub.kennisbank.deltares.nl/Details/fullCatalogue/1000021208>

Zekollari, H., Huss, M., & Farinotti, D.: Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble, *The Cryosphere*, 13, 1125–1146, <https://doi.org/10.5194/tc-13-1125-2019>, 2019

BIJLAGEN
(in het Engels)

Bijlage A: Technical and methodological background

The national institutes and services that supplied data for this study (cf. section 2.1 of the report), have independently chosen different approaches, methods and models. Table 1 in section 2.2 of the report shows some similarities and many differences between the respective studies.

The following subsections give some background to the decisions lined out in section 2.2 of the report (Data integration and analysis scheme). They summarise the main similarities and differences between the different data packages and discuss potential implications on the results of this report. More detailed information can be found in the references and project reports of the underlying climate impact projects and teams mentioned in section 2.1 of the report.

1. Coverage and scenarios

1.1 Spatial coverage

The studies contributed to EG HCLIM cover various gauging stations of the Rhine catchment. However, not all studies cover the complete international Rhine catchment i.e. the non-tidal part of the Rhine up to and including the Lobith gauging station at the DE/NL border. Some studies are confined to specific parts of the catchment.

As a consequence, the data base differs between Rhine stretches and gauges evaluated in this study (see table 1).

1.2 Temporal coverage

Except for two contributing research teams, all data packages delivered for this report cover climate changes through the 21st century up to 31st December 2100 based on daily values. They differ however in the starting year (see table 1). This is due to different spin up strategies of the hydro modelling teams at the simulation start. All contributing research teams except two provided continuous simulation from the first to the last year. Two contributing research teams provided data for selected time slices only (see project documentation).

Overall, the differences in the starting years interfere with the selection of the reference period (see table 1). The time slice-based studies show a few differences to the other studies (see table 1 and text below).

1.3 Underlying IPCC report

At the time of writing, all contributing research teams still referred to the 5th IPCC assessment report (IPCC, 2013) thus updating their respective previous activities that referred to the 4th assessment report (IPCC, 2007). One contributing research team (NL) has already started working on the information underlying the 6th IPCC report (IPCC, 2021, IPCC, 2023), but results were not available at the time of writing this report.

Thus, with respect to the underlying IPCC report version, all studies used to update the discharge scenarios are comparable.

1.4 Selected scenario

The 5th IPCC report offered various Representative Concentration Pathways (RCP) suggesting stronger (RCP8.5) through weaker (RCP2.6) modifications of the climate system by human activity. While some contributing research teams investigated more than one scenario, all contributors investigated the high emission pathway RCP8.5 for reasons of precaution. This scenario is thus adopted for this study.

Thus, with respect to the climate scenario, all studies are comparable.

2. Model chains

The following sections describe the similarities and dissimilarities of the modelling approach of the studies that are integrated in this report: the model and processing chain consists of climate models, data selection and processing schemes and hydrological models.

The choices were made by the individual contributing research teams in advance of the EG HCLIM activity. Adjusting the choices was not possible in EG HCLIM.

2.1 Climate models

All contributing research teams except for one rely on outputs of coordinated regional climate modelling activities (CORDEX). Two contributing research teams included climate model runs from an additional source (ReKliEs). One contributing research team chose another approach relying on outputs of selected global climate models (CMIP), another contributor chose two alternative approaches. Differences exist between the groups relying on the CORDEX output because different model runs and sub ensembles were selected (cf. section 2.3 of appendix A). For the hydro-meteorological analysis (section 3.1 of the report) the DAS-ensemble was used including three additional runs that were not intended to be used for hydrological analyses of DAS.

This heterogeneity limits the compatibility between the results of the different research teams to some extent.

Table 11 gives an overview of the different choices made.

Table 11: Overview of the GCM-RCM runs used in the studies underlying this report. * indicates alternative climate data processing schemes (cf. section 2.2 of appendix A).

RCP	GCM	RUN	RCM	ASG2	H-CH2018	KLIWA	DAS/XPN	KNMI14	MOSARH21	Number
RCP85	CanESM	1	CCLM4	x						1
RCP85	CanESM	1	RCA4		x					1
RCP85	CanESM	1	REMO2015				x			1
RCP85	CNRM	7	AdvDC						x*	1
RCP85	CNRM	7	ALADIN						x	1
RCP85	ECEARTH	12	CCLM4	x		x	x			3
RCP85	ECEARTH	12	CCLM5		x					1
RCP85	ECEARTH	3	HIRHAM5		x					1
RCP85	ECEARTH	1	RACMO		x	x	x	x*		4
RCP85	ECEARTH	12	RACMO			x	x	x*		3
RCP85	ECEARTH	12	RCA4	x	x	x	x			4
RCP85	ECEARTH	12	REMO2015				x			1
RCP85	GFDL	7	AdvDC						x*	1
RCP85	HADGEM2	1	CCLM4		x					1
RCP85	HADGEM2	1	CCLM5		x					1
RCP85	HADGEM2	1	RACMO		x		x			2
RCP85	HADGEM2	1	RCA4		x		x			2
RCP85	HADGEM2	1	REMO2015				x			1
RCP85	HADGEM2	1	WRF			x				1
RCP85	IPSL	1	AdvDC						x*	1
RCP85	IPSL	1	RCA4	x			x			2
RCP85	IPSL	1	WRF						x	1
RCP85	MIROC	1	CCLM4	x		x	x			3
RCP85	MIROC	1	CCLM5		x					1
RCP85	MIROC	1	REMO2015				x			1
RCP85	MIROC	1	RCA4		x					1
RCP85	MPIESM	1	CCLM4	x		x	x			3
RCP85	MPIESM	1	CCLM5		x					1
RCP85	MPIESM	1	RCA4	x	x	x	x			4
RCP85	MPIESM	1	REMO2009				x			1
RCP85	MPIESM	2	REMO2009				x			1
RCP85	MPIESM	1	WRF			x				1
RCP85	MRI	7	AdvDC						x*	1
RCP85	NORESM	1	RCA4		x					1
			Number		7	14	9	16	3	

Specific explanations on KNMI'14 scenarios (in het Nederlands, het Duits en het Frans):

De afvoerprojecties die in deze studie zijn gekozen (label "KNMI'14") maken gebruik van het hydrologische model HBV en zijn onder meer gebaseerd op het hoge-emissiescenario RCP8.5. De Nederlandse dataset verschilt van de andere datasets met betrekking tot de gegevensverwerking en de aanpak.

In de KNMI'14-klimaatscenario's wordt de regionale klimaatvariabiliteit geforceerd met de wereldgemiddelde temperatuur die wordt afgeleid uit de temperatuurrepons van het wereldwijde CMIP5-modelensemble voor de periode 1951-2100. Daarnaast worden regionale klimaatveranderingen gebruikt als een tweede factor om het gehele scenario bereik te omvatten. De resulterende modelprojecties zijn onderverdeeld in vier verschillende scenario's. De scenario's sluiten aan bij (maar vallen niet samen met) de hogere-emissiescenario's uit IPCC AR5, namelijk RCP4.5, RCP6.0 en RCP8.5 (Deltares en KNMI, 2017): "lage" veranderingen (G_L en W_L) en "hoge" veranderingen (G_H en W_H) van de winterneerslag – waarbij G staat voor "gematigde" en W voor "warme" mondiale temperatuur – veranderen met de "W"-scenario's op basis van RCP8.5. Daarnaast werd een W_{Hdry} gegenereerd, om specifieke droge omstandigheden vast te leggen. Deze scenario's worden ingevoerd in het hydrologische model (HBV) om afvoeren en afvoerstatistieken te genereren die worden gebruikt voor zowel overstromingsrisicobeheer (voor gebruik in de beoordelings- en ontwikkeltools) als zoetwaterbeheer.

2.2 Climate data processing schemes

The way climate data is processed for hydrological modelling includes several steps: for example, spatial aggregation or disaggregation of the original climate model data (depending on the spatial resolution of the hydrological model). Among others, there are several ways to handle climate model biases (deviations of observed and simulated climate). In general, two different approaches have been used by the contributing research teams.

The approach labelled "bias correction" uses observations¹⁷ to correct the climate model outputs by factors determined by comparison of simulated and observed meteorological fields¹⁸. This approach maintains for example the temporal structure of the climate models; i.e. continuous timeseries of daily values. The approach labelled "delta change" shifts observations by change signals determined by comparing the simulated future and the past climate system states¹⁹. This approach generally maintains more properties of the observed meteorological fields and allows time slice assessments instead of continuous assessments. Both approaches have advantages and drawbacks. Differences in climate data processing schemes limits compatibility of the results between the different research teams but a "best approach" cannot be selected and therefore both approaches have been integrated in this analysis.

2.3 Ensembles (number of members)

The uncertainty inherent to the climate system and the climate models is usually captured by using an ensemble of climate simulations (projections) instead of a single simulation (projection). However, the number of ensemble members varies in a wide range between the data packages contributed by the research teams for this study. The reasons include computational resources, criteria of quality checks and model selection.

As not only the number of ensemble members but also the selected models and model runs (cf. section 2.1 of appendix A) were different between the delivered data packages, the selection of ensemble members is given. Changing this was not possible within the mandate of EG HCLIM.

The ensemble size and thus the sample size has a clear impact on the comparability of the results between the different research teams and the statistics (extreme values) that can be applied to the data.

2.4 Hydrological models

Table 1 in section 2.2 shows the different hydrological models used to calculate the regional water balances and the river discharge that are the core data used in this study. Hydrological models differ in the representation and discretisation of hydrological processes such as evaporation, groundwater recharge, snow storage, water management routing etc. in catchments or grid cells and in the data used for model setup (soil, landcover, topography etc.). Even models labelled identically in the table show differences, e.g. LARSIM with spatial resolutions of 1 km and 5 km.

It is beyond the scope of this study to assess and explain the differences between the hydrological models used in detail, but this could be part of future research (see section 5.4). In principle, the application of different hydrological models contributes to a holistic uncertainty assessment and allows mutual learning and model improvement. In other words, model uncertainties are somehow reduced by showing a bigger range of possible evolutions.

¹⁷ different observation products in different contributing studies

¹⁸ e.g. monthly correction factors for different quantiles of air temperature or precipitation

¹⁹ e.g. by comparing the simulated future and the past climate system states as presented by multi-annual time slices (usually 30 years) of air temperature or precipitation

2.5 Time periods

Changes signals are obtained by comparing river flow statistics of future time periods with a reference period. In the original studies of the research groups, different reference periods were selected (table 1). In EG HCLIM, the common reference period **1981-2010** was chosen. Setting the reference period to 1961-1990 as in the earlier report (ICPR, 2011), was not possible due to lack of model output (see section 1.2 of appendix A). The period 1991-2020 was not selected as reference because starting with the year 2006, the CO₂ concentrations underlying the climate and hydrological simulations are based on the scenarios of the 5th IPCC assessment report (thus: assumed/projected values, not observed).

As more than 10 years have passed between the end of the selected "reference period" (2010) and "today", EG HCLIM decided to calculate the "present" - defined as the period **1991-2020** - change signals based on observations to evaluate the recent changes.

With respect to future periods, there was an approximate match of the "distant future" ("far future", "end of the century") between the original studies of the contributing research teams, defined as the period **2071-2100** (2069-2098) (table 1). For the definition of the "near future" ("mid of the century") the original studies differed. For EG HCLIM, the period **2031-2060** was selected.

Bijlage B – Comparison of old and new discharge scenarios

Please find detailed explanation on this comparison between the old ICPR report no. 188 (ICPR, 2011) and the current report in section 5.2.

Table 12: Comparison of previous (ICPR report no. 188; ICPR, 2011) and current report on discharge scenarios. Annual indicators of mean, low and high flow change (% , MQ, MNQ, MHQ) vs. 1961-1990 (report 188) vs. 1981-2010 (current report).

For explanation of the colour code and further information on the illustrated values, see report 188 and section 3 of this report.

Indicator	Gauge	Projected change (%) (<i>ICPR report no. 188</i>)		Projected change (%) (<i>Current report</i>)	
		Near Future 2021-2050	Distant Future 2071-2100	Near Future 2031-2060	Distant Future 2071-2100
MQ	Basel	n.d.	n.d.	-15 to +11 (-6 to +5)	-26 to +10 (-8 to -2)
	Maxau	n.d.	n.d.	-14 to +12 (-7 to +4)	-23 to +12 (-8 to -1)
	Worms	n.d.	n.d.	-12 to +13 (-7 to +4)	-19 to +14 (-7 to +2)
	Kaub	n.d.	n.d.	-13 to +13 (-5 to +6)	-16 to +17 (-4 to +4)
	Cologne	n.d.	n.d.	-12 to +11 (-4 to +7)	-13 to +19 (-3 to +8)
	Lobith	n.d.	n.d.	-11 to +11 (-4 to +10)	-12 to +19 (-3 to +13)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-13 to +24 (-11 to +16)	-13 to +28 (-2 to +15)
	Raunheim (Main)	n.d.	n.d.	-22 to +23 (+5 to +15)	-44 to +33 (+11 to +15)
	Trier (Moselle)	n.d.	n.d.	-12 to +19 (0 to +10)	-12 to +27 (+7 to +23)
MNQ	Basel	n.d.	n.d.	-32 to +8 (-)	-57 to +9 (-)
	Maxau	n.d.	n.d.	-26 to +7 (-8 to 0)	-48 to +6 (-15 to -6)
	Worms	n.d.	n.d.	-27 to +7 (-11 to 0)	-48 to +3 (-19 to -6)
	Kaub	n.d.	n.d.	-27 to +6 (-15 to -1)	-46 to +1 (-23 to -5)
	Cologne	n.d.	n.d.	-29 to +4 (-18 to -2)	-47 to -1 (-27 to -6)
	Lobith	n.d.	n.d.	-29 to +4 (-19 to -3)	-48 to -1 (-27 to -6)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-28 to +18 (-21 to +7)	-35 to +15 (-22 to +4)
	Raunheim (Main)	n.d.	n.d.	-33 to +16 (-19 to +8)	-42 to +21 (-25 to -3)
	Trier (Moselle)	n.d.	n.d.	-51 to +8 (-26 to -4)	-66 to +16 (-30 to -21)

MHQ	Basel	-5 to +10	-25 to +15	-14 to +17 (0 to +10)	-17 to +24 (+5 to +8)
	Maxau	-5 to +15	-20 to +15	-7 to +30 (+2 to +14)	-3 to +28 (+9 to +14)
	Worms	-10 to +20	-15 to +15	-3 to +43 (+3 to +16)	-3 to +31 (+12 to +17)
	Kaub	-5 to +25	-10 to +20	-3 to +44 (+4 to +19)	-8 to +37 (+15 to +21)
	Cologne	0 to +20	-5 to +20	-4 to +39 (+5 to +21)	-12 to +38 (+17 to +22)
	Lobith	0 to +20	-5 to +20	-7 to +36 (+5 to +21)	-12 to +37 (+16 to +30)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-9 to + 69 (-3 to +46)	-16 to + 46 (+5 to +35)
	Raunheim (Main)	0 to +35	0 to +35	-20 to +42 (+8 to +28)	-27 to +60 (+24 to +33)
	Trier (Moselle)	-10 to +15	-10 to +20	-1 to +35 (+6 to +21)	-12 to +49 (+23 to +31)

Table 13: Comparison of previous (ICPR report no. 188; ICPR, 2011) and current report on discharge scenarios. Seasonal indicators of mean, low and high flow change (% , MQ, NM7Q) vs. 1961-1990 (report 188) vs. 1981-2010 (current report); hydrological seasons.

For explanation of the colour code and further information on the illustrated values, see report 188 and section 3 of this report.

Indicator	Gauge	Projected change (%) (<i>ICPR report no. 188</i>)		Projected change (%) (<i>Current report</i>)	
		Near Future 2021-2050	Distant Future 2071-2100	Near Future 2031-2060	Distant Future 2071-2100
MQ Summer	Basel	-10 to +5	-25 to -10	-25 to +4 (-16 to -2)	-48 to -4 (-21 to -15)
	Maxau	-10 to +5	-25 to -10	-24 to +5 (-16 to -1)	-47 to -3 (-21 to -14)
	Worms	-10 to +5	-25 to -10	-23 to +6 (-16 to 0)	-46 to -1 (-21 to -12)
	Kaub	-10 to +10	-25 to -10	-21 to +7 (-16 to +1)	-43 to +2 (-20 to -10)
	Cologne	-10 to +10	-25 to -10	-21 to +6 (-17 to 0)	-42 to +3 (-21 to -8)
	Lobith	-10 to +10	-25 to -10	-20 to +6 (-17 to +4)	-42 to +4 (-21 to -6)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-16 to +24 (-16 to +19)	-37 to +22 (-20 to +6)
	Raunheim (Main)	0 to +25	-20 to +10	-30 to +27 (-10 to +8)	-56 to +27 (-13 to +3)
	Trier (Moselle)	-5 to +10	-25 to -5	-26 to +15 (-21 to +6)	-41 to +19 (-25 to +10)
MQ Winter	Basel	0 to +20	+5 to +25	-10 to +22 (+6 to +14)	0 to +32 (+10 to +20)
	Maxau	0 to +20	+5 to +25	-2 to +21 (+5 to +14)	+4 to +31 (+9 to +19)
	Worms	0 to +20	+5 to +25	-4 to +21 (+4 to +14)	+3 to +32 (+10 to +20)
	Kaub	0 to +20	+5 to +25	-7 to +22 (+6 to +14)	0 to +35 (+12 to +20)
	Cologne	0 to +15	+5 to +25	-7 to +23 (+6 to +14)	-2 to +36 (+13 to +23)
	Lobith	0 to +15	+5 to +25	-6 to +23 (+6 to +16)	0 to +35 (+12 to +28)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-11 to +24 (-8 to +16)	-12 to +34 (+5 to +20)
	Raunheim (Main)	0 to +25	+15 to +40	-21 to +30 (+14 to +16)	-43 to +46 (-)
	Trier (Moselle)	0 to +20	+10 to +30	-8 to +28 (+7 to +13)	-7 to +38 (+18 to +27)

NM7Q Summer	Basel	-10 to +10	-20 to -10	-35 to +5 (-7 to -5)	-62 to +7 (-)
	Maxau	-10 to +10	-20 to -10	-36 to +2 (-12 to -5)	-57 to +2 (-)
	Worms	-10 to +10	-25 to -10	-36 to +1 (-15 to -4)	-56 to -1 (-24 to -21)
	Kaub	-10 to +10	-25 to -10	-35 to +1 (-19 to -3)	-54 to -5 (-28 to -18)
	Cologne	-10 to +10	-30 to -10	-34 to +1 (-22 to -3)	-53 to -6 (-32 to -17)
	Lobith	-10 to +10	-30 to -10	-33 to 0 (-22 to -2)	-53 to -6 (-32 to -17)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-24 to +16 (-20 to +8)	-38 to +7 (-23 to -2)
	Raunheim (Main)	0 to +20	-20 to 0	-33 to +22 (-21 to +4)	-46 to +15 (-23 to -6)
	Trier (Moselle)	-20 to +20	-50 to -20	-51 to +9 (-28 to -7)	-68 to +9 (-32 to -26)
NM7Q Winter	Basel	+5 to +15	0 to +15	-17 to +15 (-2 to +7)	-32 to +26 (-8 to +8)
	Maxau	0 to +10	-5 to +15	-12 to +11 (-7 to +5)	-38 to +22 (-14 to +7)
	Worms	+5 to +15	-5 to +15	-15 to +10 (-10 to +4)	-41 to +20 (-18 to +5)
	Kaub	0 to +15	-5 to +15	-17 to +10 (-15 to +2)	-42 to +21 (-21 to +1)
	Cologne	0 to +15	0 to +20	-20 to +9 (-18 to +3)	-46 to +21 (-23 to -1)
	Lobith	0 to +15	-5 to +15	-20 to +9 (-19 to +3)	-45 to +20 (-27 to -1)
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-28 to +23 (-24 to +6)	-40 to +30 (-28 to +20)
	Raunheim (Main)	+5 to +15	0 to +20	-33 to +17 (-19 to +8)	-41 to +23 (-25 to -3)
	Trier (Moselle)	-15 to +15	0 to +20	-43 to +14 (-21 to +1)	-54 to +23 (-29 to -9)

Table 14: Comparison of previous (ICPR report no. 188; ICPR, 2011) and current report on discharge scenarios. Indicators of 'frequent', 'medium', and 'extreme' flood change (%; HQ10, HQ100, HQ1000) vs. 1961-1990 (report 188) vs. 1981-2010 (current report); see text for particular uncertainties associated with these values.

For explanation of the colour code and further information on the illustrated values, see report 188 and section 3 of this report. *very uncertain

Indicator	Gauge	Projected change (%) <i>(ICPR report no. 188)</i>		Projected change (%) <i>(Current report)</i>	
		Near Future 2021-2050	Distant Future 2071-2100	Near Future 2031-2060	Distant Future 2071-2100
HQ10 'frequent'	Basel	-10 to +10	-20 to +20	-8 to +11	-8 to +20
	Maxau	-15 to +20	-15 to +25	-1 to +20	-1 to +30
	Worms	-15 to +15	-10 to +35	+20 to +26	+2 to +36
	Kaub	-15 to +15	-5 to +40	-1 to +24	-1 to +40
	Cologne	-5 to +15	0 to +40	-7 to +27	-7 to +38
	Lobith	-5 to +15	0 to +35	+8 to +21	+12 to +37
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	0 to +44	0 to +44
	Raunheim (Main)	0 to +30	5 to +40	-18 to +48	-18 to +48
	Trier (Moselle)	-5 to +15	0 to +25	0 to +31	0 to +36
HQ100 'medium' *	Basel	-20 to +10	-30 to +25	-12 to +21	-18 to +21
	Maxau	-10 to +15	-25 to +30	-5 to +42	-5 to +43
	Worms	-5 to +20	-25 to +35	-3 to +45	-3 to +47
	Kaub	-5 to +20	-10 to +25	-8 to +56	-8 to +56
	Cologne	0 to +20	0 to +25	-26 to +61	-26 to +61
	Lobith	0 to +20	0 to +25	+5 to +18	+7 to +42
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-17 to +67	-17 to +67
	Raunheim (Main)	0 to +20	0 to +35	-24 to +94	-24 to +94
	Trier (Moselle)	-5 to +30	-5 to +25	-20 to +49	-20 to +52
HQ1000 'extreme' *	Basel	-20 to +35	-10 to +50	-25 to +32	-28 to +32
	Maxau	-20 to +35	-20 to +65	-12 to +59	-12 to +59
	Worms	-15 to +30	-20 to +45	-13 to +81	-13 to +81
	Kaub	-5 to +25	-10 to +30	-18 to +89	-18 to +89
	Cologne	-5 to +25	0 to +30	-39 to +97	-39 to +97
	Lobith	-5 to +20	-5 to +30	+3 to +20	+5 to +51
	Rockenau (Neckar)	n.d.	n.d.	-31 to +155	-31 to +155
	Raunheim (Main)	-5 to +40	0 to +45	-27 to +151	-27 to +151
	Trier (Moselle)	-35 to +20	-20 to +45	-38 to +94	-38 to +94