

## 2.3 Klimamodellszenario

Das Projekt-Ensemble von Klimamodellläufen wurde aus dem EURO-CORDEX-Klimaszenario-Modellierungsexperiment ausgewählt (www.cordex.org). Im Rahmen dieses Experiments werden globale Klimamodelle (GCMs) mit regionalen Klimamodellen (RCMs) skaliert, um Felder meteorologischer Variablen in höherer Auflösung, bis zu  $0.11^\circ$  ( $\sim 12.5$  km horizontal), zu erhalten. Diese internationale Initiative stellt den Klimamodell-Output für Zukunftsszenarien (bis 2100) und Kontrollläufe (bis 2005) aus vielen verschiedenen GCM-RCM-Kombinationen bereit.

Im Projekt wurden transiente Klimamodellläufe nur eines "Repräsentativen Konzentrationspfads" (RCP) betrachtet: RCP8.5 bildet eine Worst-Case-Veränderung bei späten Maßnahmen zur  $\text{CO}_2$ -Reduktion ab (z. B. Van Vuuren et al., 2011). Sieben GCM-RCM-Kombinationen für das RCP8.5-Szenario wurden zur Zusammenstellung eines Ensembles als Antrieb für die hydrologischen Simulationen verwendet (Tabelle 1).

**Tabelle 1:** Ausgewählte GCM-RCM Kombinationen.

| Globales Klimamodell | Regionales Klimamodell |
|----------------------|------------------------|
| CCCma-CanESM2        | CLMcom-CCLM4-8-17      |
| ICHEC-EC-EARTH       | CLMcom-CCLM4-8-17      |
| ICHEC-EC-EARTH       | SMHI-RCA4              |
| IPSL-IPSL-CM5A-MR    | SMHI-RCA4              |
| MIROC-MIROC5         | CLMcom-CCLM4-8-17      |
| MPI-M-MPI-ESM-LR     | CLMcom-CCLM4-8-17      |
| MPI-M-MPI-ESM-LR     | SMHI-RCA4              |

Die Auswahl dieser sieben Kombinationen (fünf GCMs, zwei RCMs) nutzte nur verfügbare hochaufgelöste RCM-Modellläufe. Die Auswahl deckt einen Großteil des Spektrums der heute existierenden Klimasimulationen des RCP8.5 ab (Abb. 4). Vergleichbare

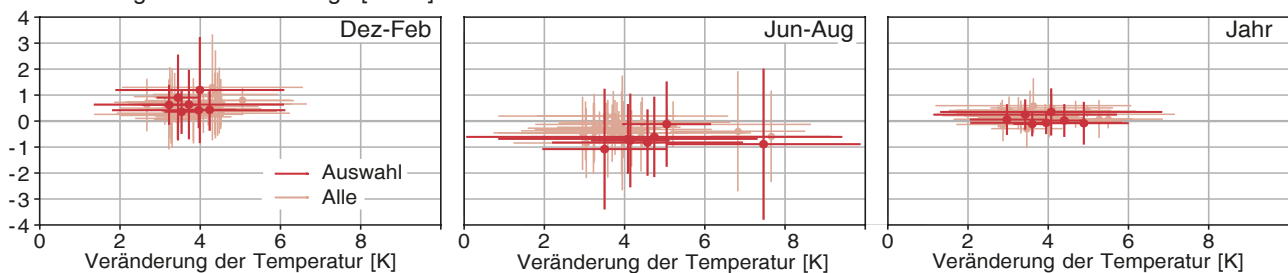
Studien und Initiativen der Anrainerstaaten trafen eine Auswahl mit Überschneidungen zum Projekt. Dies gilt für die Schweiz im Hydro-CH2018 Programm (siehe BAFU, 2021), die KLIWA-Kooperation für Süddeutschland (z.B. Zier et al., 2021) oder eine Studie von Nilson et al. (2021), die 16 Kombinationen für eine Klimafolgenabschätzung für alle großen deutschen Flüsse auswählten.

### Biaskorrektur

Die Verwendung von Klimamodelldaten für hydrologische Modelle erfordert eine so genannte "Biaskorrektur". Diese beseitigt Abweichungen zu Beobachtungen, die sich daraus ergeben, dass sich Klimamodelle auf den Energie- und nicht auf den Wasserhaushalt konzentrieren und die Landoberfläche weniger detailliert berücksichtigen können, als es für die Verwendung als Input für hydrologische Simulationen oder andere Folgenabschätzungen erforderlich ist.

Im Rahmen des ASG-Projekts wurden mehrere univariate und multivariate Biaskorrektur-Methoden getestet. Zur Auswahl einer Methode wurden 24 abgeleitete Klimaindizes hinsichtlich der verbleibenden Abweichungen und der Konsistenz des Klimawandelsignals in den korrigierten Variablen bewertet. Die gewählte Bias-Korrekturmethode korrigierte die Eingangsvariablen für die Modelle gleichzeitig als multivariate Transformation basierend auf einem Quantil-Mapping nach Cannon (2018). Der Ansatz garantierte die bestmögliche Darstellung von Niederschlag, der als Schnee fällt, und ist daher für den Aufbau der Schneedecke und die anschließende Modellierung der Beiträge von Schnee- und Eisschmelze zum Abfluss von Bedeutung (Meyer et al., 2019).

Veränderung des Niederschlags [mm/d]



**Abbildung 4:** Klimänderung über 100 Jahre im ausgewählten ASG-Ensemble und allen verfügbaren EURO-CORDEX-Daten zur Zeit der Analyse: Mittel und Bandbreite der Kombinationen für das Rheingebiet (2070–2099 vs 1970–1999).

### 3 Zukunftsklima im Rheingebiet

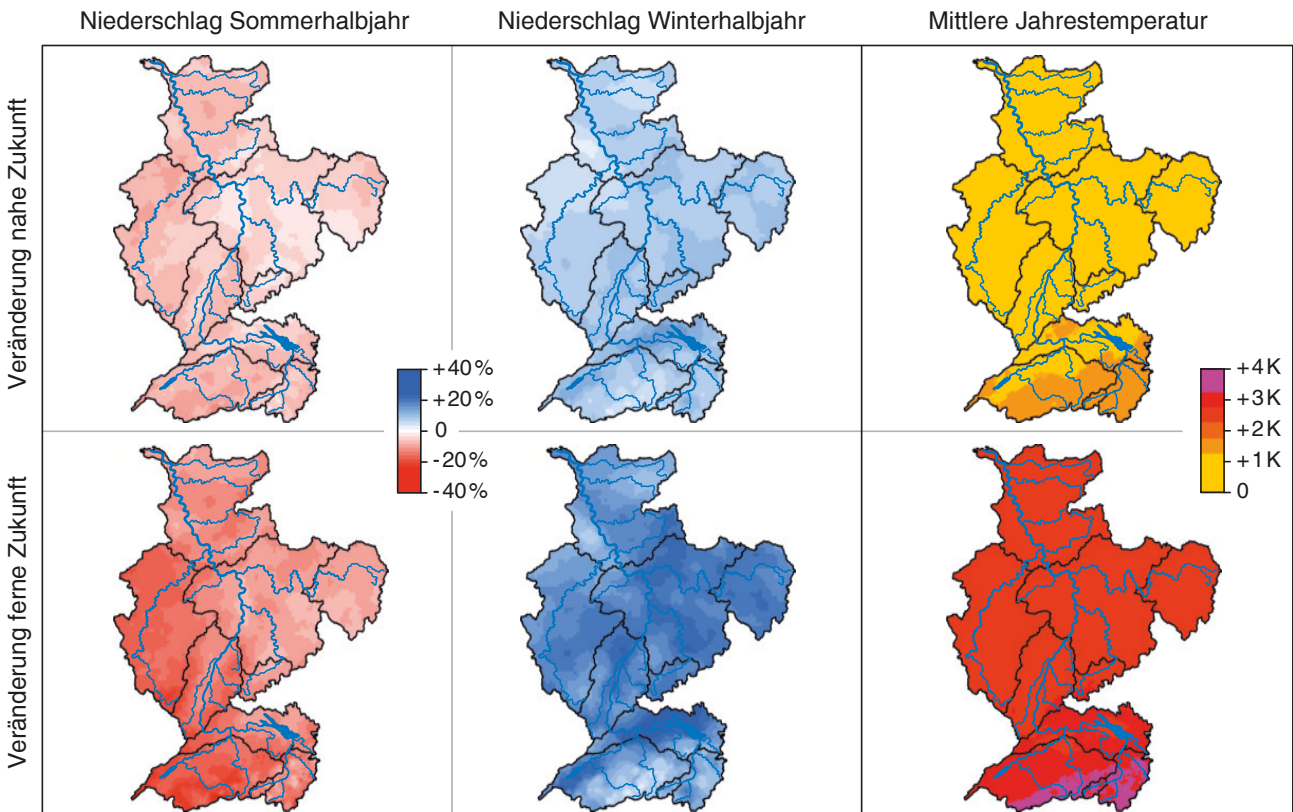
Die biaskorrigierten Klimasimulationen des ASG-Projekt-Ensembles zeigen ein zukünftiges Klima mit wärmeren Temperaturen im gesamten Rheingebiet (Abb. 5). Die Erwärmung fällt im Winterhalbjahr stärker aus als im Sommerhalbjahr. Auch werden sich die alpinen Gebiete im Süden des Rheingebiets relativ stärker erwärmen als die flussabwärts gelegenen Regionen im nördlichen Teil des Einzugsgebiets.

Das Szenario zeigt ein zukünftiges Klima mit trockeneren Sommern und feuchteren Wintern. Das Trockenheitssignal ist im westlichen Teil etwas stärker und die Winternässe in den Alpen geringer ausgeprägt als in den nördlich anschließenden Regionen. Die räumlichen Muster sind jedoch insgesamt schwach. Alle Änderungen werden in der fernen Zukunft stärker.

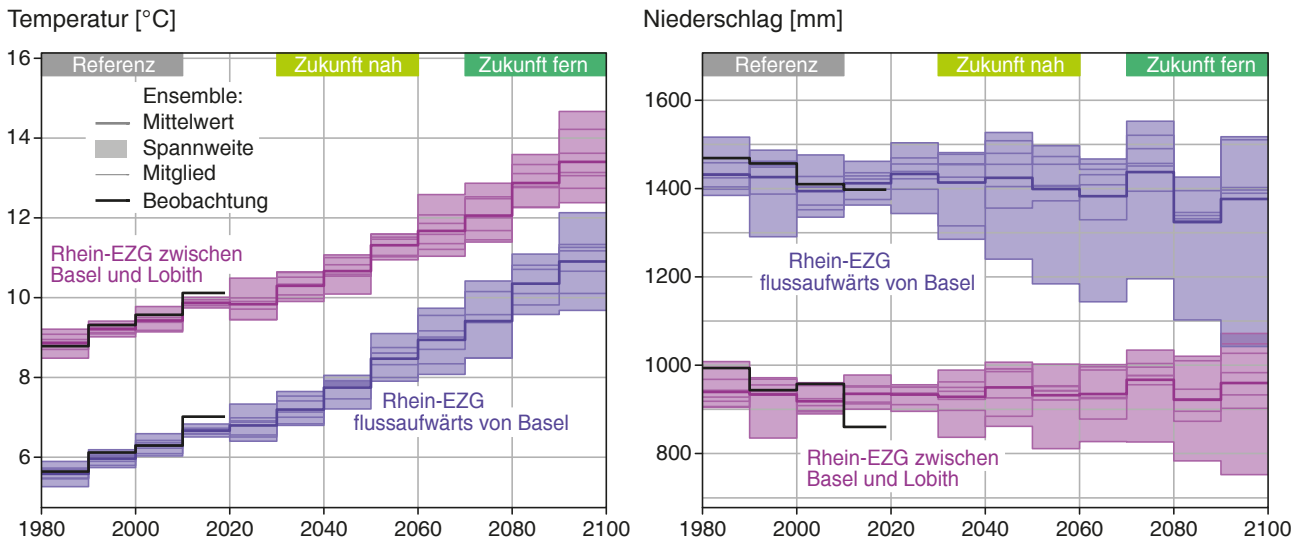
Die transienten Zeitreihen der Klimavariablen sind in Abb. 6 und 7 dargestellt. In der Richtung der Veränderung stimmen die sieben Ensemblemitglieder überein, zeigen aber Unterschiede in der Geschwindigkeit der

Erwärmung. In der zweiten Hälfte des 21. Jh. werden Unterschiede und Ensemble-Spannweite größer. Die Spannweite, die aus unterschiedlichen Zukunftstrajektorien der Ensemblemitglieder resultiert, gilt als wichtiger Aspekt der Unsicherheit von Klimafolgensimulationen. Für die Referenzperiode geben die Klimamodellläufe die beobachteten Änderungen gut wieder. Die in der Dekade 2010–2020 beobachteten höheren Temperaturen und trockeneren Frühjahrsmonate im Gebiet stromabwärts von Basel lagen aber bereits außerhalb des RCP8.5-Forcings.

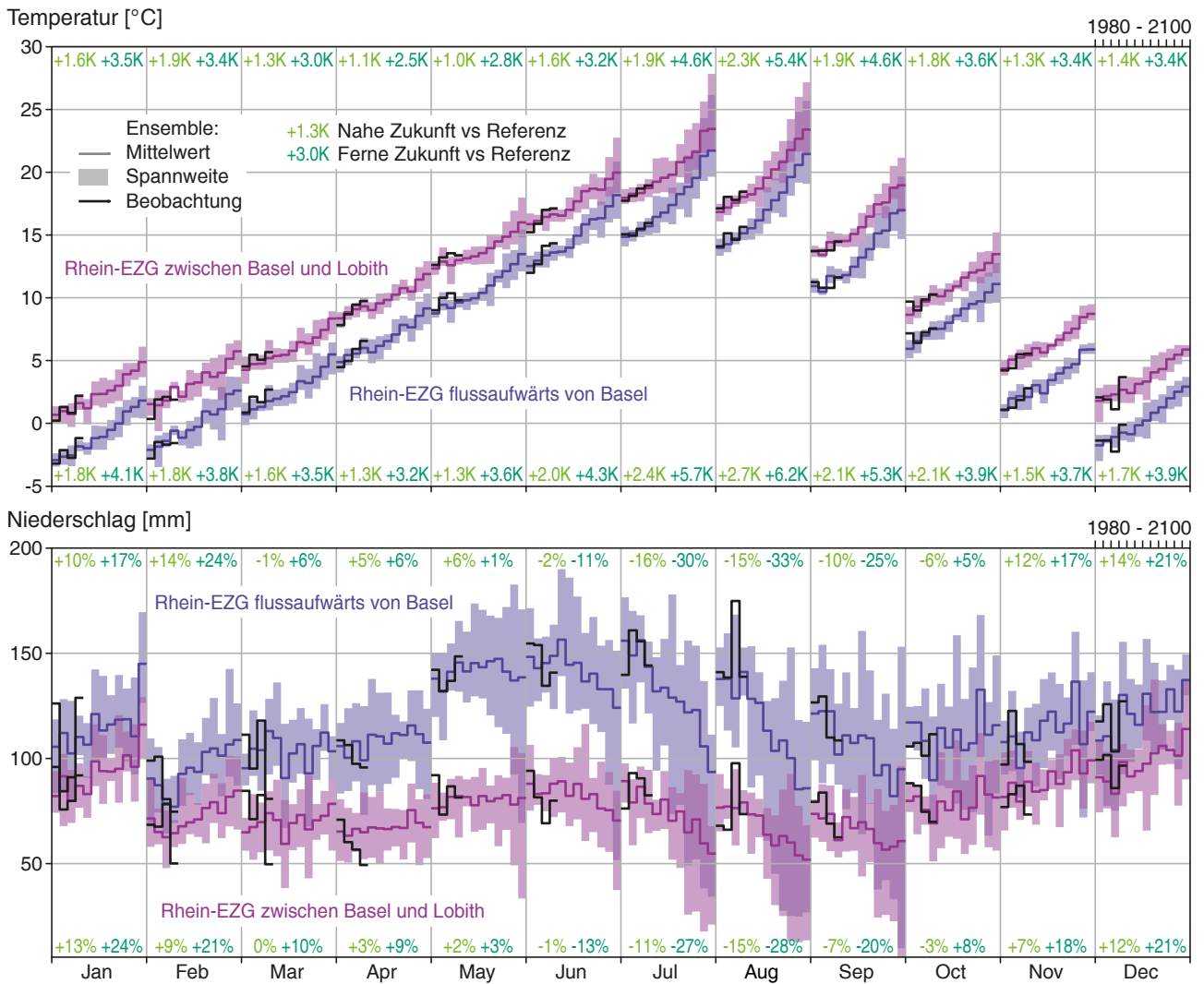
Monatliche Werte liefern detailliertere saisonale Informationen. Bemerkenswert ist, dass die projizierten Temperaturen von Februar bis Juni im späten 21. Jh. oft ähnlich sind wie die Temperaturen je einen Monat später im Jahr 1981 zu Simulationsbeginn (Abb. 7). Die Unsicherheit der Niederschlagsänderung ist im Einzugsgebiet (EZG) flussaufwärts von Basel größer, insbesondere für die abnehmenden Trends im Sommer.



**Abbildung 5:** Klimatische Veränderungen im ASG-Ensemble als Mittelwerte der biaskorrigierten und räumlich interpolierten Datenreihen der Ensemblemitglieder (RCP8.5 Szenario). Gezeigt sind die mittleren Veränderungen in der nahen Zukunft (2031–2060) und der fernen Zukunft (2071–2100) gegenüber der Referenzperiode (1981–2010). Schwarze Linien: Rhein-EZG und Teil-EZGs.



**Abbildung 6:** Zeitreihen zehnjähriger Mittelwerte der Jahresmitteltemperatur (links) und der Jahresniederschlagssumme (rechts) des Ensemblemittelwerts (dicke Linie) und der einzelnen sieben Ensemblemitglieder (dünnere Linien); schwarze Linien zeigen die verwendeten Klimabeobachtungsdaten bis 2019. Gezeigt sind räumlich gemittelte Modellrasterdaten für die Teilgebiete flussaufwärts und flussabwärts des Pegels Basel.



**Abbildung 7:** Zeitreihen 1981–2100 für je einen Monat (innerhalb des entsprechenden Grafikkompartmentes): Zehnjährige Mittelwerte der monatlichen Mitteltemperatur (oben) und der monatlichen Niederschlagssumme (unten), räumlich gemittelt für die Teilgebiete stromaufwärts und stromabwärts des Pegels Basel; schwarze Linien zeigen die verwendeten Klimabeobachtungsdaten bis 2019.