

Forschungsbericht KLIMOPASS

Statistische Analyse eines zeitlich und räumlich
hochaufgelösten Ensembles regionaler
Klimaprojektionen für Baden-Württemberg

VON A. Wagner, K. Gerlinger, E. Chomoev, D. Aigner

Gefördert mit Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und
Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM)

November 2013

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 100163, 76231 Karlsruhe
KONTAKT	Dr. Kai Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, Kai.Hoepker@lubw.bwl.de ;
AUFTRAGGEBER	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg - Forschungsprogramm Klimawandel und modellhafte Anpassung in Baden- Württemberg (KLIMOPASS)
BEARBEITUNG	Andreas Wagner, Dr. Kai Gerlinger, Erkin Chomoev, Dirk Aigner HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH Haid-und-Neu-Straße 7 76131 Karlsruhe
BEZUG	http://www.fachdokumente.lubw.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/91063/ ID Umweltbeobachtung U41-W03-N11
STAND	November 2013, Internetausgabe Dezember 2013

ZUSAMMENFASSUNG	1	
1	AUSGANGSLAGE UND AUFGABENSTELLUNG	4
2	AUSGEWÄHLTE REGIONALE KLIMAPROJEKTIONEN IN BADEN-WÜRTTEMBERG	5
2.1	Überblick über die regionalen Klimaprojektionen	5
2.2	Beschaffung und Aufbereitung der regionalen Klimaprojektionen	5
2.3	Ausgewertete Kennzahlen	8
3	AUSWERTUNG DER BEOBACHTUNGSDATEN UND DER REGIONALEN KLIMAPROJEKTIONEN	11
3.1	Form der Auswertung der regionalen Klimaprojektionen	11
3.2	Aufbereitung der Kennzahlen	15
3.3	Delta-Change-Verfahren	16
3.4	Auswertung der Kennzahlen	20
3.5	Vertiefte Einordnung der Klimaprojektionen WETTREG und CCLM	36
4	ANALYSE DER KENNZAHLEN AUF BASIS HÖHERER RÄUMLICHER UND ZEITLICHER AUFLÖSUNGEN	46
4.1	Höhere zeitliche Auflösung von Kennzahlen	46
4.1.1	Aufbereitung von Kennzahlen auf Monatsbasis	46
4.1.2	Monatsweise Analyse der Anzahl der Tage ohne Niederschlag	48
4.1.3	Jahreszeitliche Analyse der Niederschlagssumme	48
4.2	Höhere räumliche Auflösung von Kennzahlen	50
4.2.1	Regionsspezifische Auswertung von Kennzahlen	50
4.2.2	Interpolation auf ein 1x1 km Raster	57
5	WEITERFÜHRENDE STATISTISCHE ANALYSEN	61
5.1	Grundlagen der durchgeführten statistischen Analyse	61
5.2	Test auf Normalverteilung der Daten	63
5.3	Vorgehensweise	64
5.4	Ergebnisse	65

6	EINFLUSS DER NEUEN IPCC-SZENARIEN	70
6.1	Grundlagen der SRES-Szenarien	70
6.2	Grundlagen der RCP-Szenarien	71
6.3	Vergleich der SRES- und RCP-Szenarien	74
7	LITERATUR	78

VERZEICHNIS DER ANLAGEN

- Anlage A: Übersichtskarten der Naturgroßräume und Flusseinzugsgebiete für Baden-Württemberg als Grundlage der regionsspezifischen Auswertungen
- Anlage A-01: Naturgroßräume in Baden-Württemberg
- Anlage A-02: Flusseinzugsgebiete in Baden-Württemberg
-
- Anlage B: Flächendifferenzierte Darstellung ausgewählter Kennzahlen für die Beobachtungsdaten und für Modelldaten des Ist-Zustands für 24 Klimaprojektionen
- Anlage B-01: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Jahresmitteltemperatur“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage B-02: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Frosttag“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage B-03: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Sommertag“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage B-04: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Niederschlagssumme im Jahr“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage B-05: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „Summe der Globalstrahlung/Jahr“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
- Anlage B-06: Flächendifferenzierte Darstellung der Kennzahl „mittlere Windgeschwindigkeit“ für die Beobachtungsdaten und für die 24 Klimaprojektionen für den Ist-Zustand (1971-2000)
-
- Anlage C: Box-Whisker-Diagramme für die Modelldaten der 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie der 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage C-01: „Tagesmitteltemperatur“ als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Monatsbasis
- Anlage C-02: „Niederschlagssumme“ als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Monatsbasis
- Anlage C-03: „Frosttag“ als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Monatsbasis
- Anlage C-04: „Sommertag“ als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Monatsbasis
- Anlage C-05: „Tage ohne Niederschlag“ als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Monatsbasis
- Anlage C-06: „Tage mit Starkniederschlag“ als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Monatsbasis

VERZEICHNIS DER ANLAGEN

- Anlage C-07: „Veränderlichkeit der Niederschlagssumme“ als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Monatsbasis
- Anlage D: Saisonale Niederschlagssumme als Mittel über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 14 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage E: Box-Whisker-Diagramme für die regionsspezifische Analyse der 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie der 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100)
- Anlage E-01: „Mitteltemperatur“ in 6 Naturgroßräumen (oben) und 6 Flusseinzugsgebieten (unten) für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Jahresbasis
- Anlage E-02: „Niederschlagssumme“ in 6 Naturgroßräumen (oben) und 6 Flusseinzugsgebieten (unten) für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Jahresbasis
- Anlage E-03: „Vegetationsbeginn“ in 6 Naturgroßräumen für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Jahresbasis
- Anlage E-04: „Frosttag“ in 6 Naturgroßräumen für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Jahresbasis
- Anlage E-05: „Sommertag“ in 6 Naturgroßräumen für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Jahresbasis
- Anlage E-06: „Tage ohne Niederschlag“ in 6 Flusseinzugsgebieten für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000), und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Jahresbasis
- Anlage E-07: „Tage mit Starkniederschlag“ in 6 Flusseinzugsgebieten für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Jahresbasis
- Anlage E-08: „Veränderlichkeit der Niederschlagssumme“ in 6 Flusseinzugsgebieten für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000) und der nahen Zukunft (2021-2050) sowie für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Jahresbasis
- Anlage F: Flächenhafte Darstellung ausgesuchter Kennzahlen auf einem 1x1 km²-Raster
- Anlage F-01: Anzahl der Sommertage [Tage] für das 85. Perzentil der fernen Zukunft (2071-2100) regionalisiert auf ein 1x1 km²-Raster (links) und regionalisiert mit einfacher „Splinefunktion“ (rechts)
- Anlage F-02: Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr [mm] für das 50. Perzentil der nahen Zukunft (2021-2050) regionalisiert auf ein 1x1 km²-Raster (links) und regionalisiert mit einfacher „Splinefunktion“ (rechts)

VERZEICHNIS DER ANLAGEN (Fortsetzung)

- Anlage G: QQ-Plots auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) und naher und ferner Zukunft
- Anlage G-01: QQ-Plots für die Jahresmitteltemperatur (links) und den HUGLIN-Index (rechts) auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) und naher und ferner Zukunft.
- Anlage G-02: QQ-Plots für die Anzahl der Kühltage (links) und die Anzahl der Heiztage (rechts) auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) und naher und ferner Zukunft.
- Anlage G-03: QQ-Plots für die Anzahl der Tropentage (links) und die Anzahl der Tropennächte (rechts) auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) und naher und ferner Zukunft.
- Anlage G-04: QQ-Plots für die Anzahl der Frosttage (links) und die Klimatische Wasserbilanz (rechts) auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) und naher und ferner Zukunft.
- Anlage G-05: QQ-Plots für die Niederschlagssumme im Jahr (links) und die Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr (rechts) auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) und naher und ferner Zukunft.
- Anlage G-06: QQ-Plots für die Jahresmitteltemperatur auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050), unterteilt nach Naturgroßräumen.
- Anlage G-07: QQ-Plots für die Jahresmitteltemperatur auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit ferner Zukunft (2071-2100), unterteilt nach Naturgroßräumen.
- Anlage G-08: QQ-Plots für die Jahresmitteltemperatur auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich nahe Zukunft (2021-2050) mit ferner Zukunft (2071-2100), unterteilt nach Naturgroßräumen.
- Anlage G-09: QQ-Plots für die Niederschlagssumme im Jahr auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050), unterteilt nach Flusseinzugsgebieten.
- Anlage G-10: QQ-Plots für die Niederschlagssumme im Jahr auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit ferner Zukunft (2071-2100), unterteilt nach Flusseinzugsgebieten.
- Anlage G-11: QQ-Plots für die Niederschlagssumme im Jahr auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich nahe Zukunft (2021-2050) mit ferner Zukunft (2071-2100), unterteilt nach Flusseinzugsgebieten.

VERZEICHNIS DER ANLAGEN (Fortsetzung)

Anlage H: Flächenhafte Darstellung der Signifikanzwerte auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) und naher und ferner Zukunft

Anlage H-01: Signifikanzwerte ($p \leq 0,05$ (grün); $0,05 < p \leq 0,1$ (gelb) und $p > 0,1$ (rot)) auf Basis der 25×25 km²-Pixel für die Jahresmitteltemperatur (oben), den HUGLIN-Index (Mitte) und die Anzahl von Kühltagen (unten) auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050) (links), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) (Mitte) und naher und ferner Zukunft (rechts).

Anlage H-02: Signifikanzwerte ($p \leq 0,05$ (grün); $0,05 < p \leq 0,1$ (gelb) und $p > 0,1$ (rot)) auf Anlage H-02: Signifikanzwerte ($p \leq 0,05$ (grün); $0,05 < p \leq 0,1$ (gelb) und $p > 0,1$ (rot)) auf Basis der 25×25 km²-Pixel für die Anzahl von Heiztagen (oben), die Anzahl von Tropentagen (Mitte) und die Anzahl von Tropennächten (unten) auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050) (links), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) (Mitte) und naher und ferner Zukunft (rechts).

Anlage H-03: Signifikanzwerte ($p \leq 0,05$ (grün); $0,05 < p \leq 0,1$ (gelb) und $p > 0,1$ (rot)) auf Basis der 25×25 km²-Pixel für die Anzahl von Frosttagen (oben) und die klimatische Wasserbilanz (unten) auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050) (links), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) (Mitte) und naher und ferner Zukunft (rechts).

Anlage H-04: Signifikanzwerte ($p \leq 0,05$ (grün); $0,05 < p \leq 0,1$ (gelb) und $p > 0,1$ (rot)) auf Basis der 25×25 km²-Pixel für die Jahresniederschlagssumme (oben) und die Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr (unten) auf Basis der Jahreswerte aller Klimaprojektionen für den Vergleich Ist-Zustand (1971-2000) mit naher Zukunft (2021-2050) (links), Ist-Zustand mit ferner Zukunft (2071-2100) (Mitte) und naher und ferner Zukunft (rechts).

Anlage I: Definitionen der ausgewerteten Kennzahlen

Anlage I-01: Kennzahlen der Lufttemperatur

Anlage I-02: Kennzahlen des Niederschlags

Anlage I-03: Kennzahlen der Globalstrahlung

Anlage I-04: Kennzahlen der Windgeschwindigkeit

Anlage I-05: Kennzahlen der relativen Feuchte

Zusammenfassung

Die vorliegende Untersuchung knüpft an das Vorgängerprojekt „Vergleich regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg“ an, welches für die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg durchgeführt wurde (LUBW 2013). Beide Projekte werten die Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen aus, um daraus zukünftige klimatische Rahmenbedingungen für Baden-Württemberg abzuleiten. Dies erfolgt aus der Analyse der Veränderung zwischen Zukunft und Ist-Zustand von bestimmten Kennzahlen wie z.B. der Anzahl von Sommertagen oder der Niederschlagssumme im Winter-Halbjahr.

Zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Aussagen wurden für die Einschätzung des Klimawandels in Baden-Württemberg die Ergebnisse von 24 verschiedenen, als glaubwürdig eingestuften Klimaprojektionen analysiert (Ensemble-Ansatz). Die Klimaprojektionen (vorliegend auf Tagesbasis) wurden für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100) gemeinsam ausgewertet. Dabei erfolgte auch ein Vergleich mit gemessenen Beobachtungsdaten.

Den Schwerpunkt der vergleichenden Analyse bildeten diejenigen Klimaprojektionen, die mit einer Auflösung von 25x25 km² vorlagen. Für die Auswertung des Ist-Zustands und der nahen Zukunft ergaben sich so 20 Klimaprojektionen und für die ferne Zukunft 15 Klimaprojektionen. Zusätzlich zu den Klimaparametern Lufttemperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit wurde die relative Feuchte ausgewertet.

Im Vergleich zum Vorgängerprojekt wurden nun weitere Kennzahlen abgeleitet, die häufig aus mehreren Klimaparametern berechnet werden (z.B. klimatische Wasserbilanz). Zudem wurden Kennzahlen in höherer zeitlicher und räumlicher Auflösung bereitgestellt. Insgesamt wurden unter Verwendung der fünf Klimaparameter 49 Kennzahlen abgeleitet und analysiert. Aus der Änderung der Werte für die Zeiträume in der Zukunft zum Ist-Zustand ergeben sich die Klimasignale für jede Kennzahl. Die Analyse des Ensembles aus mehreren Klimaprojektionen erfolgte durch statistische Auswertungen. Für die Abschätzung der Bandbreite der Ergebnisse der untersuchten Klimaprojektionen wurden Box-Whisker-Plots und Perzentildarstellungen erstellt. Dies ermöglichte auch die Bereitstellung von Werten für die zukünftige Entwicklung der Kennzahlen als „klimatische Leitplanken“, zwischen denen sich die Veränderungen voraussichtlich befinden werden.

Für die Abschätzung der Werte der klimatischen Leitplanken wurde das Delta-Change-Verfahren eingesetzt. Dabei wird das Klimasignal des Modellensembles auf die Beobachtungsdaten übertragen, um Anhaltswerte für die klimatischen Verhältnisse der Zukunftsszenarien zu erhalten, die stärker mit den realen Bedingungen aufgrund der Verwendung der Beobachtungsdaten verknüpft sind. Untersuchungen anhand der Kennzahl der Jahresmitteltemperatur konnten zeigen, dass ein vereinfachtes Delta-Change-Verfahren für diese Kennzahl praktisch die gleichen Ergebnisse liefert wie ein deutlich aufwändigeres Verfahren. Es wird angenommen, dass sich dieses Resultat auch auf andere Kennzahlen übertragen lässt, die vom Klimaparameter Lufttemperatur abgeleitet werden.

Die Analyse eines Ensembles von Klimaprojektionen erlaubt auch, einzelne Klimaprojektionen im Vergleich zu den anderen einzuordnen. Dies wurde für die beiden Klimaprojektionen des statistischen WETTREG-Modells und des dynamischen COSMO-CLM-Modells durchgeführt.

Diese beiden regionalen Klimamodelle sind in Deutschland weit verbreitet und werden insbesondere im KLIWA-Projekt für wasserwirtschaftliche Fragestellungen angewandt. Einzelne Besonderheiten wie z.B. die geringere Veränderung der Niederschläge in den WETTREG-Daten für die Zukunftsszenarien im Vergleich zu den anderen Klimaprojektionen werden ersichtlich. Insgesamt stimmen aber die Ergebnisse der WETTREG- und COSMO-CLM-Modelle recht gut mit den Ergebnissen der anderen Klimaprojektionen überein.

Neben der Analyse der Veränderung der Kennzahlen auf Jahresbasis wurden ausgesuchte Kennzahlen auch auf Monatsbasis analysiert und so der Informationsgewinn aus den Klimaprojektionen deutlich gesteigert.

Auch hinsichtlich der räumlichen Auflösung wurden die Analysen gegenüber dem Vorläuferprojekt verfeinert. Neben den Gesamtauswertungen als Flächenmittel für Baden-Württemberg wurden bestimmte Kennzahlen regionsspezifisch für Naturgroßräume und Flusseinzugsgebiete innerhalb Baden-Württembergs genauer betrachtet. Damit können benachbarte, aber klimatisch deutlich unterschiedliche Gebiete wie der Schwarzwald und das Oberrheingebiet getrennt analysiert werden. So lässt sich beispielsweise die Tendenz erkennen, dass kühlere Regionen eine stärkere Vorverlegung des Vegetationsbeginns erfahren als wärmere Regionen.

Zur Erweiterung der flächenhaften Auswertungen wurden die im 25x25 km²-Raster vorliegenden Daten der Klimaprojektionen auf ein 1x1 km²-Raster mit Hilfe einer Interpolationsmethode umgerechnet. Dadurch kann der Einfluss der Interpolationsmethode bei einer Vergrößerung der räumlichen Auflösung gezeigt werden. Zur Interpolation auf das 1x1 km²-Raster wurde ein External-Drift-Kriging-Verfahren angewendet, bei dem die Geländehöhe als externe Zusatzinformation berücksichtigt wird. Entsprechend zeigen die Ergebnisse den Einfluss der Höhenverteilung bei den interpolierten Kennzahlen. So werden bei der Jahresmitteltemperatur z.B. die niedrigeren Temperaturen auf den Bergen und die höheren Temperaturen in den Tälern und somit der Einfluss der Geländetopographie sichtbar. Die so erzeugten Ergebnisse sind für Auswertungen, die eine höhere räumliche Genauigkeit benötigen, besser geeignet als Ergebnisse, die auf dem 25x25 km²-Raster beruhen.

Bislang wurde für die Kennzahlen die Stärke und Richtungssicherheit der Klimasignale aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen qualitativ abgeleitet, nicht jedoch statistisch belegt. Mit Hilfe eines statistischen Tests (U-Test) wurde nun für ausgewählte Kennzahlen die Signifikanz des Klimasignals für die Fläche von Baden-Württemberg sowie regionsspezifisch und flächenhaft untersucht. Zusätzlich wurden Quantil-Quantil-Plots erstellt, bei denen die Verteilungen der Kennzahlen und ihrer Änderungen in den Zukunftsszenarien dargestellt werden.

Die Ergebnisse der quantitativ-statistischen Untersuchungen bestätigen die bisherigen qualitativ-subjektiven Aussagen. Von den ausgewählten Kennzahlen, die vom Parameter Temperatur abgeleitet werden, zeigen sich überwiegend klare und statistisch deutlich signifikante Klimasignale (Irrtumswahrscheinlichkeit < 5%). Anders verhält es sich beim Niederschlag, dessen Modellierung erfahrungsgemäß größere Schwierigkeiten bereitet. Hier sind die Ergebnisse weniger einheitlich und es kann bei den ausgewählten Kennzahlen in den meisten Fällen kein statistisch signifikantes Klimasignal nachgewiesen werden. Lediglich für die Veränderung der Niederschlagssummen im hydrologischen Winterhalbjahr wird ein Klimasignal statistisch belegt.

Als Grundlage für das Emissionsszenario der weiteren Entwicklung der Treibhausgase wurde bei den ausgewerteten Klimaprojektionen das Szenario A1B verwendet.

Eine erste Einschätzung der zukünftig bereitgestellten Emissionsszenarien (RCP-Szenarien) zeigt, dass sich die Entwicklung der CO₂-Emissionen des A1B-Szenarios zwischen der angenommenen Entwicklung der CO₂-Emissionen des höchsten und des zweithöchsten RCP-Szenario befindet. Daher kann das A1B-Szenario auch weiterhin als mögliche Entwicklung der Treibhausgase gelten. Klimaprojektionen auf Basis der RCP-Szenarien liegen derzeit noch nicht vor.

Zusammen mit den Auswertungen im Vorgängerprojekt liegt nun eine Datenbasis von mehr als 60 verschiedenen Kennzahlen vor, häufig sogar in verschiedenen räumlichen und zeitlichen Auflösungen. Diese können für Vulnerabilitätsanalysen oder die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen herangezogen werden. Durch die statistischen Tests und die zusätzliche Bewertung mit Angabe von Streuungen und Richtungssicherheit kann die Zuverlässigkeit und Belastbarkeit der Ergebnisse eingeschätzt werden. Damit lassen sich basierend auf den derzeit verfügbaren Klimaprojektionen sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen zum Klimawandel in Baden-Württemberg treffen.

1 Ausgangslage und Aufgabenstellung

Der Klimawandel und seine Folgen sind auch auf der regionalen Ebene messbar. Daher hat das Land Baden-Württemberg schon frühzeitig damit begonnen, den Klimawandel und seine u.a. ökologischen, ökonomischen und sozio-ökonomischen Auswirkungen zu untersuchen. Eine Einschätzung der Folgen für die Regionen in Baden-Württemberg wurde in wichtigen Bereichen in den zurückliegenden Jahren im Rahmen verschiedener Forschungsvorhaben wie KLIWA, KLARA und „Herausforderung Klimawandel Baden-Württemberg“ durchgeführt (UM & LUBW 2012).

Grundlage für die Abschätzung des Klimawandels auf regionaler Ebene sind regionale Klimaprojektionen. Dies sind die Ergebnisse der Modellketten bestehend aus Annahmen zur Entwicklung der Treibhausgase und den Berechnungen von globalen sowie regionalen Klimamodellen. Damit können für unterschiedliche Fragestellungen Daten bereitgestellt und erforderliche Anpassungen, z.B. in den Bereichen der Raumplanung oder der Wasserwirtschaft, in die Wege geleitet werden.

Innerhalb des Projekts „Vergleich regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg“ der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) wurden verschiedene regionalen Klimaprojektionen bezogen auf Baden-Württemberg ausgewertet und die daraus abgeleiteten Veränderungen für unterschiedliche Kennzahlen (wie z.B. für die Kennzahl „Anzahl der Sommertage“) bereitgestellt. Dadurch wurden die Grundlagen geschaffen, um die Folgen des Klimawandels basierend auf den derzeit vorliegenden Klimaprojektionen besser einzuschätzen. Die Ergebnisse dieses Vorgängerprojekts sind unter LUBW (2013) veröffentlicht und bilden die Ausgangslage für diese Untersuchung.

Im vorliegenden Projekt werden weitere Kennzahlen auf Basis meteorologischer Parameter regionaler Klimaprojektionen abgeleitet. Diese Kennzahlen werden insbesondere als eine Grundlage für die Entwicklung einer baden-württembergischen Anpassungsstrategie verwendet. Neben der Erweiterung der Anzahl von Kennzahlen werden die Kennzahlen für verschiedene zeitliche und räumliche Auflösungen zur Verfügung gestellt und statistische Tests durchgeführt.

Das prinzipielle Vorgehen bei der Auswertung der Kennzahlen sowie die Auswahl der verwendeten Kennzahlen orientieren sich am oben genannten Vorgängerprojekt „Vergleich regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg“ der LUBW. Unter Einbeziehung regionaler Klimaprojektionen können die Veränderungen der Kennzahlen vom Ist-Zustand (1971-2000) zur nahen Zukunft (2021-2050) und fernen Zukunft (2071-2100) untersucht werden. Durch die Verwendung eines Ensembles von Klimaprojektionen wird den Unsicherheiten einzelner Klimamodelle Rechnung getragen. Dies gestattet eine Einschätzung der Schwankungsbreite möglicher zukünftiger Entwicklung, wodurch sich die Ergebnisse verlässlicher bewerten lassen.

Durch diese umfassende Aufbereitung von klimatischen Kennzahlen auf Basis des Ensembles regionaler Klimaprojektionen können anschließend klimabezogene Rahmenbedingungen („klimatische Leitplanken“) für die Entwicklung einer baden-württembergischen Anpassungsstrategie bereitgestellt werden. Diese Rahmenbedingungen können für Vulnerabilitätsabschätzungen und die Formulierung von Anpassungsmaßnahmen weiter verwendet werden.

2 Ausgewählte regionale Klimaprojektionen in Baden-Württemberg

2.1 ÜBERBLICK ÜBER DIE REGIONALEN KLIMAPROJEKTIONEN

Grundlage für die durchgeführte Auswertung der Klimaänderung in Baden-Württemberg sind regionale Klimaprojektionen. Als Ausgangsdatensatz standen im Vorgängerprojekt des Vergleichs regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg ursprünglich 29 Klimaprojektionen zur Verfügung. Fünf Klimaprojektionen wurden auf Grund hoher Abweichungen im Vergleich zu gemessenen Werten und zu den Modellergebnissen der anderen Projektionen ausgeschlossen. Für die Auswahl der Klimaprojektionen wird auf Kapitel 4 des Berichts des Vorgängerprojekts verwiesen.

Die als geeignet eingestuften 24 Klimaprojektionen wurden zu einem Auswerte-Ensemble zusammengefasst. Dieses Auswerte-Ensemble wird auch in dieser Untersuchung ausgewertet, so dass dieselben Klimaprojektionen wie beim Vorgängerprojekt verwendet werden. Eine Kurzübersicht über die 24 Klimaprojektionen, die für diese Untersuchung verwendet wurden, gibt Tabelle 2-1.

2.2 BESCHAFFUNG UND AUFBEREITUNG DER REGIONALEN KLIMAPROJEKTIONEN

Die Beschaffung und Aufbereitung der 24 regionalen Klimaprojektionen wurden im Vorgängerprojekt für die Klimavariablen Niederschlag, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit und Globalstrahlung durchgeführt. Da für dieses Projekt als weitere Klimavariablen die Werte der relativen Feuchte benötigt wurden, wurde die Aufbereitung der Klimaprojektionen für diese Klimavariablen durchgeführt.

Das Auswerte-Ensemble der 24 Klimaprojektionen lag zunächst in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen vor. Um die Klimaprojektionen miteinander vergleichen zu können war es daher erforderlich, von der Original-Auflösung der Daten zu einer einheitlichen Auflösung für alle Klimaprojektionen für die Auswertung zu kommen. Daher wurden die Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen auf ein einheitliches Raster mit 25x25 km² Auflösung überführt. Diese 25x25 km²-Auflösung wurde im ENSEMBLES-Projekt (Christensen & Christensen 2007) verwendet, aus dem 10 der 24 Klimaprojektionen übernommen wurden.

Für die Umrechnung von 10 anderen Klimaprojektionen, die in einer höheren Auflösung vorlagen, wurden die einzelnen Datensätze mit Hilfe bilinearer Interpolation auf das gemeinsame Raster interpoliert. Lediglich die Daten des WETTREG-Modells und die Stationsdaten der Messwerte wurden unter Verwendung eines Kriging-Interpolations-Verfahrens (External-Drift-Kriging) auf das gemeinsame Raster regionalisiert.

Für das WETTREG-Modell liegen die Ergebnisse aus verschiedenen Modellversionen vor, die jeweils durch die Jahreszahl der Veröffentlichung der Daten gekennzeichnet werden (vgl. z.B. Kreienkamp et al. 2010b). Hier werden die WETTREG-Daten 2003, 2006 und 2010 analysiert. Bei den WETTREG-Daten liegen 10 Realisationen und teilweise 20 Jahre je Dekade vor. Der gesamte Umfang der WETTREG-Daten wurde für die weitere Auswertung verwendet.

Somit ergeben sich insgesamt 20 Klimaprojektionen, die auf dem gemeinsamen 25x25 km²-Raster vorliegen.

Tabelle 2-1: 24 regionale Klimaprojektionen des Auswahl-Ensembles (mit räumlicher Auflösung und Kürzel)

SRES-Szenario	GCM	RCM	Original-Auflösung	Ausgewertete Auflösung	Kürzel
A1B	HadCM3Q0	CLM 2.4.6	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q0_CLM
		HadRM3Q0	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q0_H3Q0
	HadCM3Q3	HadRM3Q3	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q3_H3Q3
		SMHIRCA	25x25 km ²	25x25 km ²	H3Q3_RCA
	BCM	SMHIRCA	25x25 km ²	25x25 km ²	B_RCA
	ARPEGE	RM5.1	25x25 km ²	25x25 km ²	A_RM5.1
	ECHAM5-r3	SMHIRCA	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_RCA
		REGCM3	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_REGCM3
		RACMO2.1	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_RACMO2
		REMO 5.7	25x25 km ²	25x25 km ²	E3_REMO
		CCLM-4.8 ls [#]	7x7 km ²	25x25 km ²	E3_CCLM-25
		CCLM-4.8 ls [#]	7x7 km ²	7x 7 km ²	E3_CCLM-7
	ECHAM5-r2	CCLM-4.8 ls [#]	7x7 km ²	25x25 km ²	E2_CCLM-25
		CCLM-4.8 ls [#]	7x7 km ²	7x7 km ²	E2_CCLM-7
		CLM 2.4.11	20x20 km ²	25x25 km ²	E2_CLM
	ECHAM5-r1	CCLM-4.8 ls [#]	7x7 km ²	25x25 km ²	E1_CCLM-25
		CCLM-4.8 ls [#]	7x7 km ²	7x7 km ²	E1_CCLM-7
		REMO 2005	10x10 km ²	25x25 km ²	E1_REMO
		CLM 2.4.11	20x20 km ²	25x25 km ²	E1_CLM
		WETTREG2006	Stationen	25x25 km ²	E1_WETTREG06
		WETTREG2010	Stationen	25x25 km ²	E1_WETTREG10
	CGCM3	CCLM-4.8 ls [#]	7x7 km ²	25x25 km ²	C_CCLM-25
		CCLM-4.8 ls [#]	7x7 km ²	7x7 km ²	C_CCLM-7
	B2	ECHAM4	WETTREG2003 [#]	Stationen	25x25 km ²

#: Klimaprojektion nicht für die ferne Zukunft (2071 bis 2100) verfügbar

Für die vier Klimaprojektionen des COSMO-CLM-Modells der Version 4.8 (im weiteren Text immer als CCLM bezeichnet) werden zusätzlich die Daten in der Original-Auflösung des 7x7 km²-Rasters analysiert, um auch regionale Aussagen über die Verteilung der Klimagrößen in Baden-Württemberg treffen zu können. Daher werden für die CCLM-Daten die zwei räumlichen Auflösungen 25x25 km² und 7x7 km² untersucht.

Für alle 24 Klimaprojektionen wurden die Daten für die drei jeweils 30 Jahre umfassenden Zeiträume des Ist-Zustands 1971 bis 2000 und des Zukunftsszenarios 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 analysiert. Die Daten des CCLM- und des WETTREG2003-Modells liegen allerdings nur bis 2050 vor, so dass für diese Daten nur die nahe Zukunft 2021 bis 2050 aufbereitet wurde. Dies führt dazu, dass das Ensemble für die nahe Zukunft aus mehr regionalen Klimaprojektionen besteht als das Ensemble für die ferne Zukunft.

Zusätzlich zu den regionalen Klimaprojektionen werden als Vergleichsbasis gemessene Daten des Zeitraums des Ist-Zustands an Stationen verwendet. Als Vergleichsgrundlage für die Beobachtungsdaten liegen für Baden-Württemberg die gemessenen Stationsdaten von 318 Niederschlagsstationen und davon 79 Klimastationen (mit Werten zur Lufttemperatur, minimalen und maximalen Tagestemperatur, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer) für den Ist-Zustand vor. Diese Beobachtungsdaten sind die für die Anpassung der statistischen Klimaprojektion WETTREG2010 ausgewählten und qualitätsgeprüften Messstationen und wurden von CEC Potsdam zur Verfügung gestellt.

Die Beobachtungsdaten wurden ebenfalls auf das 25x25 km² Raster des ENSEMBLES-Datensatzes interpoliert, um eine einheitliche Grundlage für die Auswertungen zur Verfügung zu haben. Dies geschieht wie bei den WETTREG-Daten unter Verwendung eines External-Drift-Kriging-Verfahrens, bei dem die Geländehöhe mit einbezogen wird.

Eine detailliertere Beschreibung zu den Klimaprojektionen sowie zur Beschaffung und Aufbereitung der Daten (z.B. Umrechnung der Daten der Sonnenscheindauer in Globalstrahlung) findet sich in Kapitel 4 des Vorgängerprojekts zum Vergleich der regionalen Klimaprojektionen für Baden-Württemberg.

Die auszuwertenden Zeitbereiche für die Klimaprojektionen sind der Ist-Zustand (1971-2000), die nahe Zukunft (2021-2050) und die ferne Zukunft (2071-2100). Für alle Klimaprojektionen wurden entsprechend diese Zeitbereiche aufbereitet. Für folgende Datensätze gibt es Ausnahmen:

- Die Stationsmessungen (Beobachtungsdaten) liegen nur für den Zeitbereich des Ist-Zustands vor.
- Für die CCLM-Daten und die WETTREG2003-Daten existieren keine Daten für die ferne Zukunft, sondern nur für den Ist-Zustand und die nahe Zukunft.
- Einige ENSEMBLES-Datensätze reichen nur bis zum Jahr 2099 anstatt 2100 (H3Q0_CLM, H3Q16_RCA, B_HIRAM5, E1_HIRAM5)

Außerdem gibt es unterschiedliche Zeitbezüge bei einigen Klimaprojektionen:

- Die WETTREG-Daten liegen grundsätzlich ohne Schaltjahre vor.
- Bei Klimaprojektionen, die auf dem Hadley-Globalmodell beruhen (H3Q0_CLM, H3Q0_H3Q0, H3Q3_H3Q3, H3Q3_RCA, H3Q16_H3Q16), haben alle Monate 30 Tage

Durch die unterschiedliche Tageszahl eines Monats, durch das fehlende Jahr 2100 oder durch fehlende „Schalttage“ bei einigen Modellen sind keine Auswirkungen auf die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der einzelnen Klimaprojektionen über längere Zeiträume zu erwarten, da die Mittel über Zeiträumen von 30 Jahren betrachtet werden.

Aus den Ergebnissen der regionalen Klimaprojektionen wurde für dieses Projekt zusätzlich die relative Feuchte ausgelesen. Zusammen mit der vorherigen Bearbeitung liegen damit folgende Parameter vor:

- Mittlere Tagestemperatur (2m) [°C] oder [K]
- Maximum der Tagestemperatur (2m) [°C] oder [K]
- Minimum der Tagestemperatur (2m) [°C] oder [K]
- Tägliche Niederschlagshöhe [mm] oder [kg/m²*s]
- Tägliche Globalstrahlung [W/m²] oder [kJ/m²]
- Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s] oder [Bft]
- Relative Feuchte [-] oder [%]

Bei einigen Klimaprojektionen sind nicht alle Parameter verfügbar. Dies liegt entweder daran, dass nicht alle Parameter auf der entsprechenden Datenbank zur Verfügung gestellt wurden oder aber Daten fehlerhaft sind. Folgende Daten sind betroffen:

- E1_CLM: Globalstrahlung nicht verfügbar
- E2_CLM: Globalstrahlung nicht verfügbar
- E1_REMO: Niederschlag für die ferne Zukunft und relative Feuchte nicht verfügbar

In der Tabelle 2-2 sind jeweils die verfügbaren Klimaprojektionen pro Parameter und somit die Anzahl für die einzelnen Zeiträume (Ist-Zustand, nahe und ferne Zukunft) aufgeführt.

2.3 AUSGEWERTETE KENNZAHLEN

Für diese Untersuchung werden Auswertungen auf Grundlage der fünf meteorologischen Parameter Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Globalstrahlung und relative Feuchte durchgeführt. Unter Verwendung eines oder mehrerer dieser meteorologischen Parameter werden Kennzahlen gebildet (bspw. die Kennzahl „Anzahl der Trockenperioden“ anhand des Parameters -Niederschlag). Diese werden für die Landesfläche von Baden-Württemberg berechnet und analysiert (Kapitel 3, 4 und 5) und stellen eine Ergänzung zu dem Vorgängerprojekt LUBW (2013) dar.

Tabelle 2-3 gibt einen Überblick der 49 ausgewerteten Kennzahlen. Die Definitionen der einzelnen Kennzahlen findet sich in Anlage I.

Tabelle 2-2: Übersicht über die 24 ausgewählten regionalen Klimaprojektionen mit Verfügbarkeit und Anwendung für das Auswerte-Ensemble

GCM	RCM	Auswerte-Ensemble		
		Ist-Zustand	Nahe Zukunft	Ferne Zukunft
HadCM3Q0	CLM 2.4.6	x	x	x
	HadRM3Q0	x	x	x
HadCM3Q3	HadRM3Q3	x	x	x
	SMHIRCA	x	x	x
BCM	SMHIRCA	x	x	x
ARPEGE	RM5.1	x	x	x
ECHAM5-r3	SMHIRCA	x	x	x
	REGCM3	x	x	x
	RACMO2.1	x	x	x
	REMO 5.7	x	x	x
	CCLM-4.8 ls [#]	x	x	–
	CCLM-4.8 ls ^{##}	x	x	–
ECHAM5-r2	CCLM-4.8 ls [#]	x	x	–
	CCLM-4.8 ls ^{##}	x	x	–
	CLM 2.4.11	x ^{**}	x ^{**}	x ^{**}
ECHAM5-r1	CCLM-4.8 ls [#]	x	x	–
	CCLM-4.8 ls ^{##}	x	x	–
	REMO 2005	x ^{***}	x ^{***}	x ^{*/***}
	CLM 2.4.11	x ^{**}	x ^{**}	x ^{**}
	WETTREG2006	x	x	x
	WETTREG2010	x	x	x
CGCM3	CCLM-4.8 ls [#]	x	x	–
	CCLM-4.8 ls ^{##}	x	x	–
ECHAM4	WETTREG2003	x	x	–
ANZAHL		24	24	15

Auflösung 25x25 km²

Auflösung 7x7 km²

* Für den Parameter Niederschlag liegen keine Daten vor

** Für den Parameter Globalstrahlung liegen keine Daten vor

*** Für den Parameter relative Feuchte liegen keine Daten vor

Tabelle 2-3: Ausgewertete 49 Kennzahlen und die zeitliche Auflösung der durchgeführten Analysen in diesem Projekt

Parameter	Rastergröße	zeitliche Auflösung
Tagesmitteltemperatur	7x7; 25x25	Monatsweise
Tropennacht	7x7; 25x25	Monatsweise
Tropentag	7x7; 25x25	Monatsweise
Frosttag	7x7; 25x25	Monatsweise
Tage mit strengem Frost (< -10°C)	25x25	Monatsweise
Eintrittsdatum des ersten Frosts	25x25; 7x7	Jahresweise
Sommertag	7x7; 25x25	Monatsweise
Eistag	7x7; 25x25	Monatsweise
Heiztag	7x7; 25x25	Monatsweise
Kühlgradtage	7x7; 25x25	Monatsweise
Tagesminimum der Temperatur	7x7; 25x25	Monatsweise
Tagesmaximum der Temperatur	7x7; 25x25	Monatsweise
Schwankung der Lufttemperatur	25x25; 7x7	Jahresweise
Dauer der Hitzeperioden (1 Tag)	25x25	Jahresweise
Dauer der Hitzeperioden (3 Tage)	25x25	Jahresweise
Anzahl von Hitzeperioden (1 Tag)	25x25	Jahresweise
Anzahl von Hitzeperioden (3 Tage)	25x25	Jahresweise
Dauer der Vegetationsperiode	25x25	Jahresweise
Wachstumsgradtage	25x25	Jahresweise
Huglin-Index	25x25; 7x7	Jahresweise
Heizgradtage	7x7; 25x25	Monatsweise und Jahresweise
Kühltage	7x7; 25x25	Monatsweise und Jahresweise
Niederschlagssumme	7x7; 25x25	Monatsweise
Veränderlichkeit der Niederschlagssumme	25x25; 7x7	Jahresweise
Veränderlichkeit der Niederschlagssumme	25x25; 7x7	Hydrologisches Sommer-Halbjahr
Veränderlichkeit der Niederschlagssumme	25x25; 7x7	Hydrologisches Winter-Halbjahr
Jahresschwankung des Niederschlags	25x25; 7x7	Jahresweise
Anteil der 10 niederschlagsreichsten Tage am Gesamtniederschlag	25x25; 7x7	Jahresweise
Anzahl der Tage mit Starkniederschlag	7x7; 25x25	Monatsweise
Starkniederschlags-Höhe	7x7; 25x25	Monatsweise
Anzahl Starkniederschlagstage (APR-SEP)	7x7; 25x25	Jahresweise
Anzahl der Tage ohne Niederschlag	7x7; 25x25	Monatsweise
Anzahl der Trockenperioden im Jahr	25x25; 7x7	Jahresweise
Länge der Trockenperioden	25x25	Monatsweise
Lage der Trockenperioden im Jahr	25x25	Monatsweise
Nassperiode	25x25; 7x7	Jahresweise
Summe der Globalstrahlung	7x7; 25x25	Monatsweise
Mittlere Windgeschwindigkeit	7x7; 25x25	Monatsweise
Wind Tag>8 ms	7x7; 25x25	Monatsweise
Wind Max	7x7; 25x25	Monatsweise
Mittlere relative Luftfeuchtigkeit	7x7; 25x25	Monatsweise
Wasserdampfdruck > 18 hPa (Anzahl Tage)	7x7; 25x25	Monatsweise
Wasserdampfdruck > 15 hPa (Anzahl Tage)	7x7; 25x25	Monatsweise
Rel. Luftfeuchte > 85% (Anzahl Tage)	7x7; 25x25	Monatsweise
Mittlerer Wasserdampfdruck	7x7; 25x25	Monatsweise
Feuchtkugeltemperatur < -3°C	7x7; 25x25	Monatsweise
Feuchtkugeltemperatur_min < -3°C	7x7; 25x25	Monatsweise
Feuchtkugeltemp_max < -3°C	7x7; 25x25	Monatsweise
Klimatische Wasserbilanz	7x7; 25x25	Monatsweise und Jahresweise

3 Auswertung der Beobachtungsdaten und der regionalen Klimaprojektionen

3.1 FORM DER AUSWERTUNG DER REGIONALEN KLIMAPROJEKTIONEN

Eine detaillierte Beschreibung der Form der Auswertung der regionalen Klimaprojektionen findet sich in Kapitel 5.1 des Berichts zum Vorgängerprojekt zum Vergleich der regionalen Klimaprojektionen für Baden-Württemberg. Im Folgenden werden nur die wichtigsten Informationen zur Beschreibung der Auswertung wiedergegeben.

Für die statistischen Auswertungen der Ensembledaten werden aus Tabelle 2-1 die 20 Klimaprojektionen (nahe Zukunft) bzw. 15 Klimaprojektionen (ferne Zukunft) ausgewertet, die in der gleichen gemeinsamen räumlichen Auflösung des 25x25 km²-Rasters vorliegen. Die Daten der aufbereiteten Klimaprojektionen auf dem 25x25 km²-Raster werden für die in der Zukunft liegenden Zeiträume und auch für den Ist-Zustand verwendet. Aus dem Vergleich der beiden Zukunftsszenarien mit dem Ist-Zustand kann das Änderungssignal in Folge der Klimaänderung identifiziert werden.

Somit werden die Daten für den Vergleich der beiden dreißigjährigen Mittelungszeiträume (für die nahe Zukunft 2021-2050 im Vergleich zu 1971-2000 und für die ferne Zukunft 2071-2100 im Vergleich zu 1971-2000) aufbereitet. Neben den Änderungen zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand werden auch die Abweichungen zwischen Ist-Zustand und den Beobachtungsdaten für den Zeitraum 1971 bis 2000 visualisiert. Dazu werden Modellergebnisse und Beobachtungsdaten vergleichend gegenübergestellt. Für die folgenden Auswertungen der Beobachtungsdaten und der regionalen Klimaprojektionen des Auswerte-Ensembles werden verschiedene Grafiken erstellt:

- Es werden Box-Whisker-Plots für alle Kennzahlen erstellt, um die Schwankungsbreite der unterschiedlichen Klimaprojektionen vergleichen zu können (Flächenmittel über Baden-Württemberg). Für die Interpretation der Box-Whisker-Plots ist in Abbildung 3-1 ein Beispiel illustriert:
 - Die farbigen Marker neben den Box-Whisker-Diagrammen beschreiben die jeweiligen Simulationsergebnisse der vorliegenden Klimaprojektionen.
 - Der rote Balken in den Box-Whisker-Diagrammen markiert den Median (50. Perzentil) der Klimaprojektionen.
 - Die Ausdehnung der Box gibt den Bereich des 1. Quartils (25. Perzentil) bis zum 3. Quartil (75. Perzentil) an. Innerhalb dieses sogenannten Interquartilsabstands liegen 50 Prozent der Daten, weshalb die Länge der Box als ein robustes Maß für die Streuung der Daten herangezogen werden kann.
 - Der grün gestrichelte Bereich bis zu den zwei schwarzen Balken (Whisker) beschreibt den Bereich, in dem alle Klimaprojektionen liegen, die nicht als Ausreißer angesehen werden (1,5-facher Interquartilsabstand). Durch die Whisker wird somit die Spannweite der Daten ohne Ausreißer dargestellt.

- Werte von Klimaprojektionen außerhalb der Whisker gelten als Ausreißer.

Die Box-Whisker-Plots werden für die Absolutwerte der Beobachtungsdaten und aller Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und der fernen Zukunft (2071-2100) für die 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands und der nahen Zukunft und die 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft auf Basis der 25x25 km²-Auflösung erstellt.

- Für ausgewählte Kennzahlen werden flächenhafte Darstellungen der Perzentile der Zukunftsszenarien für die Kennzahlen der Klimaprojektionen in 25x25-km²-Auflösung erstellt.

Durch die zur Verfügung stehenden Daten aus einer bestimmten Anzahl von Klimaprojektionen ist es möglich, Verteilungsfunktionen von Änderungssignalen und somit Perzentile aus einem Klimaprojektionsensemble zu ermitteln und grafisch darzustellen. Dieses Vorgehen ist z.B. auch bei den Auswertungen des DWD für den Klimaatlas (vgl. Imbery & Namyslo 2011, Becker et al. 2012) und das KLIWAS-Projekt (Imbery et al. 2013) oder den Klimaprojektionen der Schweiz (CH2011 2011) gewählt worden.

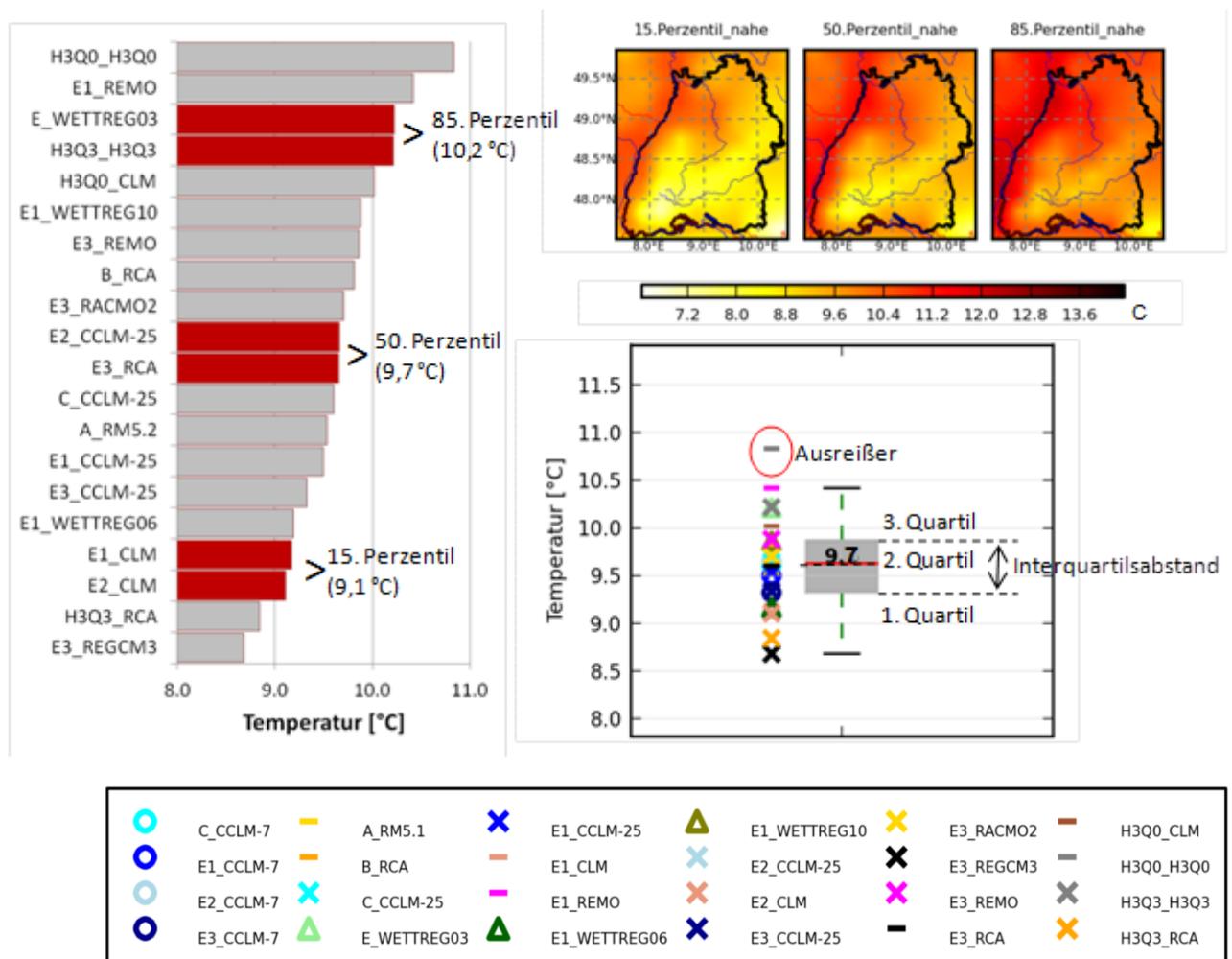


Abbildung 3-1: Exemplarische Erläuterung der Perzentile und der Box-Whisker-Diagramme am Beispiel der Jahreslufttemperatur der nahen Zukunft:

a) Perzentile: ermittelt aus den 20 Klimaprojektionen in der Auflösung 25x25 km² (links: Perzentile am Beispiel der über die Fläche von Baden-Württemberg gemittelten Temperatur; rechts oben: flächenhafte Darstellung der 15., 50. und 85. Perzentile)

b) Box-Whisker-Diagramme (rechts Mitte): über die Fläche von Baden-Württemberg gemittelte Temperaturen, ermittelt aus den 20 Klimaprojektionen in der Auflösung 25x25 km²

Auf Grundlage der hier ausgewerteten Klimaprojektionen werden die Perzentile (15. Perzentil, 50. Perzentil und 85. Perzentil) für die möglichen zukünftigen Änderungen für alle Modellrasterzellen in Baden-Württemberg angegeben.

Eine anschauliche Erklärung für die Ermittlung der Perzentile findet sich auch auf den Internetseiten des Klimaatlas¹ des DWD. In Abbildung 3-1 ist die Ermittlung der Perzentile anhand der Ergebnisse für das Jahresmittel der Lufttemperatur der Klimaprojektionen schematisch dargestellt:

- Die mittleren Werte aus den regionalen Klimaprojektionen werden zunächst der Größe nach sortiert.
- Das 50. Perzentil ist der Wert, für den jeweils die Hälfte der Klimaprojektionen höhere bzw. niedrigere Änderungen zeigt. Er repräsentiert somit innerhalb des Ensembles ein mittleres Klimaänderungssignal.
- Neben dem 50. Perzentil werden das 15. und 85. Perzentil angegeben, um die Spannweite der Modellergebnisse zu verdeutlichen, ohne das einzelne, besonders extreme Ergebnisse diesen Eindruck verfälschen:
- Das 15. Perzentil ist der oberste Grenzwert der untersten 15% aller Modellsimulationen. Das heißt, 15% aller Modellergebnisse liegen unterhalb dieses Werts oder erreichen diesen genau. Die übrigen 85% der Modellsimulationen zeigen größere Änderungen. Entsprechend umgekehrt verhält es sich mit dem 85. Perzentil.
- Zwischen das 15. und 85. Perzentil fallen somit insgesamt 70% aller Modellergebnisse.

Die Wahl des 15. und 85. Perzentils anstelle z.B. des 10. und 90. Perzentils wurde getroffen, um bei der relativ geringen Anzahl von 20 Klimaprojektionen Ausreißer stärker auszuklammern.

Um die Vergleichbarkeit der Klimaprojektionen zu wahren, werden für die flächenhaften Perzentildarstellungen aus den in Tabelle 2-1 aufgeführten 24 Klimaprojektionen die vier Klimaprojektionen in der 7x7 km²-Auflösung weggelassen und nur die Klimaprojektionen in 25x25 km²-Auflösung betrachtet. Da für die ferne Zukunft nicht alle Klimaprojektionen verfügbar sind, ergeben sich für Ist-Zustand und nahe Zukunft 20 Klimaprojektionen, für die ferne Zukunft 15 Klimaprojektionen.

Analog werden bei den Box-Whisker-Diagrammen für den Ist-Zustand und die nahe Zukunft 20 Klimaprojektionen und für die ferne Zukunft 15 Klimaprojektionen ausgewertet. Dadurch stimmt das 50. Perzentil einer Kennzahl mit dem entsprechendem Median bei den Box-Whisker-Diagrammen überein (vgl. Abbildung 3-1: Median bei den Perzentilen 9,7 °C, bei den Box-Whisker-Diagrammen 9,7 °C).

Bei den Perzentilkarten ist zu berücksichtigen, dass die Datengrundlage für die Karten mit einer räumlichen Auflösung von 25x25 km² vorliegt.

¹ <http://www.dwd.de/klimaatlas>

In den Kartendarstellungen wurde für eine bessere Anschaulichkeit der Ergebnisse nicht das Raster von 25x25 km² zugrundegelegt, sondern die Ergebnisse wurden mit Hilfe von Spline-Interpolationen räumlich höher aufgelöst. Die Perzentilkarten enthalten damit Farbverläufe, die aber nicht darüber hinwegtäuschen dürfen, dass die eigentliche Datengrundlage auf einem 25x25 km²-Raster vorliegt und auch nur im Bewusstsein dieser räumlichen Auflösung interpretiert werden darf. Abbildung 3-2 verdeutlicht die Unterschiede zwischen den Ergebnissen auf Basis des 25x25 km²-Rasters (wie die Ergebnisdaten vorliegen) und den interpolierten Karten, wie sie hier zur Visualisierung der Ergebnisse erstellt wurden. Die Auswirkung der Interpolation auf eine feinere räumliche Auflösung im Vergleich zum 25x25 km²-Raster wird in Kapitel 4.2.2. weiter erläutert.

Der Flächenmittelwert für die gesamte Landesfläche von Baden-Württemberg, der in den Box-Whisker-Plots dargestellt ist, wird durch (arithmetische) Mittelwertbildung der Mediane der einzelnen 25x25 km²-Modellraster berechnet. Dabei werden am Rand der Landesfläche gelegene Rasterzellen entsprechend ihres Anteils innerhalb Baden-Württembergs gewichtet.

Wie bereits erwähnt ist bei der Auswertung der Ergebnisse der Klimaprojektionen zu beachten, dass für die WETTREG2003- und die CCLM-Modelle keine Werte für die ferne Zukunft vorliegen. Daher basieren die Angaben zu Mittelwerten und Median für die nahe Zukunft und für die ferne Zukunft auf einer unterschiedlichen Anzahl von Klimaprojektionen. Aufgrund der Unterschiede in der Anzahl der Klimaprojektionen zwischen der nahen Zukunft und der fernen Zukunft sind die Gegenüberstellungen in den Box-Whisker-Plots nicht direkt miteinander vergleichbar. Hierbei ist es entscheidend, wie stark die WETTREG2003- und CCLM-Modelle, deren Werte für die ferne Zukunft nicht vorliegen, von den anderen Klimaprojektionen abweichen.

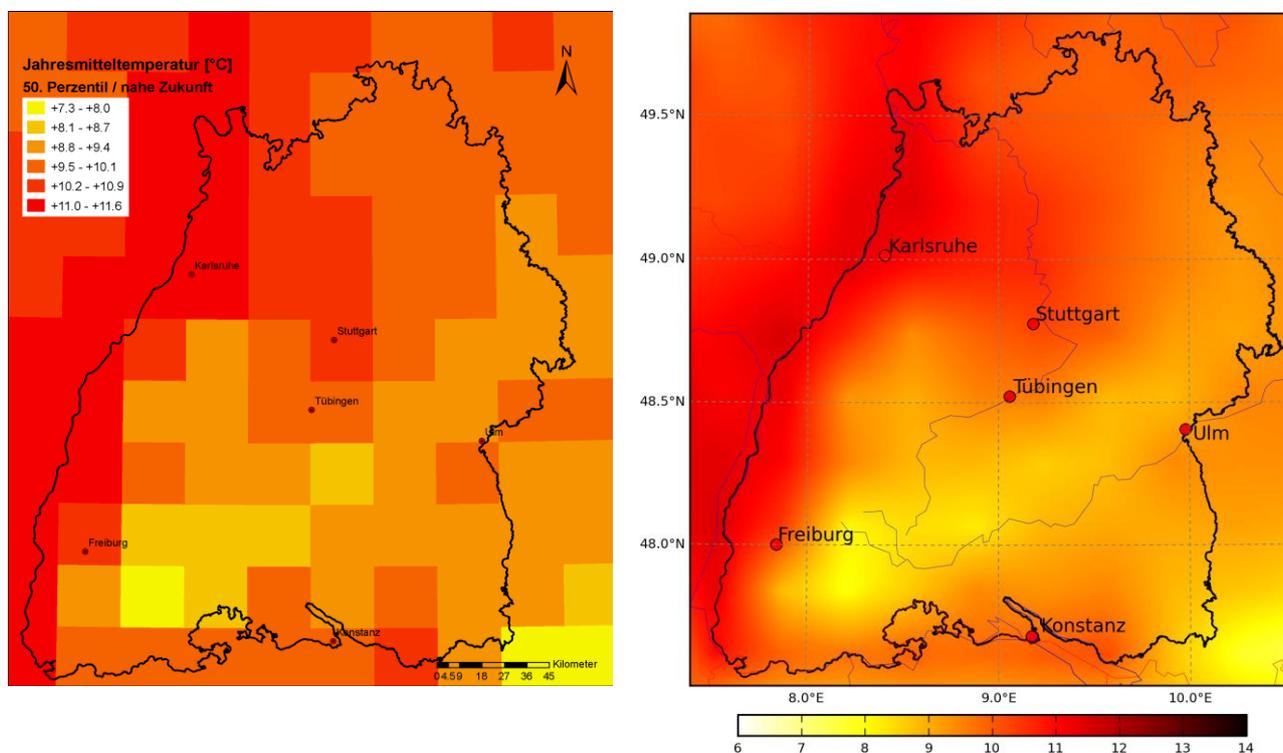


Abbildung 3-2: Vergleich der Auflösung der Ergebnisse der ausgewerteten Klimaprojektionen auf dem 25x25 km²-Raster (links) mit der für die Visualisierung gewählten Auflösung der interpolierten Ergebnisse (rechts) (anhand der Karte des 50. Perzentils der Jahresmitteltemperatur in der nahen Zukunft)

Die unterschiedliche Anzahl der Klimaprojektionen kann dazu führen, dass der Wert des Medians einer Kennzahl aus den 20 Klimaprojektionen für die ferne Zukunft z.B. kleiner ist als der Wert des Medians aus den 15 Projektionen für die nahe Zukunft, aber dennoch das Klimasignal für die ferne Zukunft größer ist, wenn nur die 15 Klimaprojektionen sowohl bei der nahen wie auch bei der fernen Zukunft betrachtet werden.

Die gelieferten Ergebniswerte der Klimaprojektionen sind mathematisch errechnete Werte und spiegeln nicht die tatsächlich vorhandene Verlässlichkeit der Ergebnisse wider. Die dargestellten Zahlenwerte werden oft mit einer Nachkommastelle in den Tabellen aufgeführt, um Unterschiede zwischen den Modellergebnissen aufzeigen zu können. Da bereits die Messungen der untersuchten Klimaparameter große Schwankungsbreiten aufweisen, sind die zum Teil großen Schwankungsbreiten der Klimaparameter auch unter diesem Gesichtspunkt zu betrachten. Bei der Interpretation der unterschiedlichen Klimaprojektionen ist somit zu berücksichtigen, welche Genauigkeit bei Messungen der Klimaparameter überhaupt zu erwarten ist.

So kann die Unsicherheit einer Punktmessung der Klimagrößen Temperatur, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit je nach Parameter durchaus bei etwa 5 % bis 10 % liegen, beim Niederschlag noch etwas darüber. Durch die Regionalisierung der Punktmessung auf die Fläche ist eine weitere große Unsicherheit gegeben. Die Angabe einer Genauigkeit von mehr als einer Nachkommastelle ist demnach unrealistisch. Daher wird hier generell eine Genauigkeit von einer Nachkommastelle verwendet.

Bei hohen absoluten Werten wie bei Niederschlagssummen oder Globalstrahlungssummen pro Monat wäre ebenso eine Darstellung der Werte ohne Nachkommastellen denkbar. Aus Gründen der Einheitlichkeit wird darauf aber verzichtet.

3.2 AUFBEREITUNG DER KENNZAHLEN

Die im Vorgängerprojekt „Vergleich regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg“ ausgewerteten 28 Kennzahlen wurden um weitere Kennzahlen ergänzt. Dazu wurde auch der Klimaparameter relative Feuchte in die Auswertung mit aufgenommen, der unter anderem die Berechnung komplexer Kennzahlen wie die der klimatischen Wasserbilanz ermöglicht. Tabelle 2-3 aus dem vorangegangenen Kapitel gibt einen Überblick über die ausgewerteten Kennzahlen.

Für alle Kennzahlen werden die Perzentile des Auswerteensembles aus den Klimaprojektionen berechnet. Zudem werden die Dateien für die flächenhaften Darstellungen der Perzentile auf dem 25x25 km²-Raster bereitgestellt. Darüber hinaus werden für jede Kennzahl die berechneten Flächenmittelwerte von Baden-Württemberg berechnet. Für die gesamte Fläche von Baden-Württemberg wird in der 25x25 km² Auflösung für jede Kennzahl eine Datei erzeugt, die sowohl die Perzentile der Absolutwerte als auch die Perzentile des Klimasignals für jeden Zeitabschnitt (Ist-Zustand, nahe Zukunft und ferne Zukunft) beinhaltet.

Für Mittelwerte über Baden-Württemberg werden für alle Kennzahlen Box-Whisker-Plots erstellt. Diese werden jeweils sowohl für den Ist-Zustand als auch für die beiden Zukunftsszenarien (soweit vorhanden) in einer Grafik zusammengefasst. Dadurch können die einzelnen Kennzahlen für den Ist-Zustand und für die beiden Zukunftsszenarien direkt miteinander verglichen werden.

Für ausgewählte Kennzahlen werden flächenhafte Abbildungen für das 15., 50. und 85. Perzentil des Zukunftsszenarios erzeugt.

Bei der räumlichen Auflösung von 7×7 km² liegen nur vier Klimaprojektionen vor. Mit dieser geringen Anzahl an Klimaprojektionen ist die Berechnung von Perzentilen nicht sinnvoll, weshalb hierfür keine flächenhaften Perzentildarstellungen erzeugt wurden.

Um die Veränderung der Kennzahlen vom Ist-Zustand zur Zukunft einstufen zu können, werden drei Kriterien definiert. Diese beziehen sich immer auf eine Einschätzung des Klimasignals, also der Änderung zwischen den Ergebnissen für das Zukunftsszenario im Vergleich zum Ist-Zustand. Beurteilt werden die „Streuung“ des Klimasignals zwischen den Klimaprojektionen, die „Stärke“ des Klimasignals und die „Richtungssicherheit“ des Klimasignals. Die drei Kriterien werden (subjektiv) in die Klassen „gering“, „mäßig“ und „hoch“ (bzw. „stark“) eingestuft. Dabei meint „Streuung“ die Spannweite der Werte eines Szenarios zwischen den einzelnen Klimaprojektionen. Die „Stärke“ kennzeichnet das Ausmaß und die Höhe des Klimasignals. „Richtungssicherheit“ besteht, wenn die Klimaprojektionen weitgehend die gleiche Richtung der Entwicklung des Klimasignals (zunehmend, abnehmend oder unverändert) zeigen.

Für die Einschätzung der Streuung der Klimaprojektionen in die drei Klassen „gering“, „mäßig“ und „hoch“ wurde zur Vereinfachung kein weiteres statistisches Maß wie z.B. die Standardabweichung eingeführt, sondern die Einschätzung konzentriert sich auf die Box-Whisker-Plots. Dabei erfolgt die subjektive Einschätzung maßgeblich anhand der Breite der Box, die den Wertebereich von 50% der Projektionen umfasst. Als weiteres Kriterium wurde die Spannweite der Whisker berücksichtigt.

Exemplarisch werden in Kapitel 3.4 am Beispiel der Kennzahl „Jahresschwankung des Niederschlags“ die Auswertungen beschrieben und eine Interpretation der Daten gegeben. Im Anschluss erfolgt in Kapitel 3.5 eine Kurzbeschreibung derjenigen Kennzahlen, die auf Jahresbasis vorliegen und die im Vorgängerprojekt „Vergleich regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg“ noch nicht erläutert wurden.

3.3 DELTA-CHANGE-VERFAHREN

Die in den folgenden Interpretationen in Kapitel 3.4 im Text angeführten Werte der Kennzahlen für die Zukunftsszenarien basieren auf dem Delta-Change-Verfahren. Dadurch stimmen die Werte in der Regel nicht exakt mit den absoluten Ergebnissen der Klimaprojektionen überein, wie sie z.B. den Box-Whisker-Diagrammen zu entnehmen sind. Beim Delta-Change-Verfahren wird zunächst das Klimasignal, also die Änderung zwischen Zukunftsszenario und Ist-Zustand, für jede Kennzahl aus der Analyse der Klimaprojektionen ermittelt. Das Klimasignal wird dann zum Wert der Beobachtungsdaten jeder Kennzahl addiert, um eine Auskunft über den zukünftig zu erwartenden Wert der Kennzahl zu erhalten (Hay et al. 2000, Andréasson et al. 2004).

Das Prinzip des Delta-Change-Verfahrens besteht somit darin, das Klimasignal der Modellergebnisse mit den Beobachtungswerten den Messdaten zu verknüpfen. Dabei wird das Klimasignal der Modelldaten (Veränderung vom Ist-Zustand zum Zukunftsszenario) isoliert berechnet und den Beobachtungsdaten zugeschlagen. Der Vorteil ist, dass systematische Abweichungen (Bias) der Modelldaten von den Beobachtungsdaten nicht bei der Ermittlung der Ergebnisse für das Zukunftsszenario eingehen. Die erhaltenen Ergebnisse für das Zukunftsszenario lassen sich somit direkt im Vergleich mit den Beobachtungsdaten interpretieren.

Im Kapitel 3.4 werden zur Auswertung der Veränderung der Kennzahlen Ergebnisse verwendet, die anhand eines Delta-Change-Verfahrens erzeugt wurden.

Die Darstellungen in den Box-Whisker-Diagrammen und flächenhaften Abbildungen beruhen hingegen direkt auf den Ergebnissen der Klimaprojektionen (d.h. ohne Anwendung eines Delta-Change-Verfahrens). Die Entwicklungstrends lassen sich gleichwohl auch in den Box-Whisker-Diagrammen und flächenhaften Abbildungen erkennen.

Durch ein Delta-Change-Verfahren erzeugte Ergebnisse für ein Zukunftsszenario sind leichter zusammen mit den Beobachtungsdaten interpretierbar, da ihnen das grundsätzliche Niveau der Beobachtungsdaten sowie deren räumliche Verteilung zugrunde liegen.

Allerdings wird bei diesem Vorgehen davon ausgegangen, dass die räumliche Verteilung der Daten in der Zukunft der heutigen entspricht (wie z.B. die höheren Niederschläge auf der Westseite des Schwarzwalds in Folge der vorherrschenden Westwindzirkulation). Die Annahme des Delta-Change-Ansatzes besteht also darin, dass die grundlegenden Strukturen der untersuchten Klimadaten (z.B. aufgrund der derzeitigen Wetterlagen) von Gegenwart und Zukunft vergleichbar bleiben. Während dies für die nahe Zukunft wahrscheinlich zutrifft, ist die Gültigkeit dieser Annahme für die ferne Zukunft ungewiss. Vor- und Nachteile des Delta-Change-Verfahrens finden sich z.B. in Bosshard et al. (2011).

Für die Umsetzung des Delta-Change-Ansatzes stehen zwei Verfahren zur Verfügung, die sich durch den jeweils notwendigen Aufwand unterscheiden:

- **Aufwändiges Delta-Change-Verfahren:** Das Delta-Change-Verfahren wird auf die Beobachtungsdaten unter Verwendung der Daten jeder einzelnen Klimaprojektion für jedes Rasterfeld angewandt.

Bei 20 Klimaprojektionen würde dies bedeuten, dass 20 neue Datensätze zur Verfügung gestellt werden, die eine Kombination aus Beobachtungswerten und Klimasignal jeder einzelnen der 20 Klimaprojektion besteht. Anschließend können dann die Auswertungen, wie z.B. der Perzentile, durchgeführt werden. Dies stellt bei der Auswertung eines Ensembles von Klimaprojektionen einen sehr hohen Aufwand dar.

Dazu ein Beispiel: die gemessene Jahresmitteltemperatur an einem Messpunkt beträgt $9\text{ }^{\circ}\text{C}$. Das Klimaänderungssignal aus der ersten Klimaprojektion für die Jahresmitteltemperatur für die nahe Zukunft beträgt $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Somit ergibt sich nach dem Delta-Change-Verfahren als erster Wert für die nahe Zukunft $9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Eine zweite Klimaprojektion zeigt ein Klimaänderungssignal von $1,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, so dass sich ein zweiter Wert von $10,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ergibt. Dieses Vorgehen wird analog mit den anderen Klimaprojektionen fortgesetzt. Die Werte für das Zukunftsszenario werden somit erst für alle Klimaprojektionen einzeln ermittelt und dann statistisch ausgewertet. So könnte z.B. der Median der nach dem aufwändigen Delta-Change-Verfahren aus den 20 Klimaprojektionen errechneten Werten an dieser Stelle einen Wert für die Jahresmitteltemperatur von $9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ für die nahe Zukunft haben.

- **Vereinfachtes Delta-Change-Verfahren:** Beim vereinfachten Delta-Change-Verfahren werden nur die Perzentilwerte des ermittelten Klimasignals auf Beobachtungsdaten übertragen. Somit werden im Gegensatz zum aufwändigen Delta-Change-Verfahren nicht die Daten jeder Klimaprojektion verwendet und auf die Zeitreihe der Beobachtungsdaten addiert und anschließend eine erneute Perzentilauswertung durchgeführt, sondern es werden die Perzentilwerte des Klimasignals aus dem Ensemble auf die bereits berechneten Kennzahlen der Beobachtungsdaten addiert. Wie bei der aufwändigeren Methode wird auch hier die räumliche Verteilung der Beobachtungswerte verwendet.

Dadurch werden u.a. die Unterschiede der räumlichen Muster von „Perzentilkarte“ und Verteilung der Beobachtungswerte vernachlässigt. Das Vorgehen ermöglicht somit eine Näherung.

Das Verfahren soll wieder anhand des obigen Beispiels erläutert werden: die gemessene Jahresmitteltemperatur an einem Messpunkt beträgt 9 °C. Der Median des Klimasignals der Jahresmitteltemperatur der ausgewerteten 20 Klimaprojektionen für die nahe Zukunft soll an dieser Stelle 0,6 °C betragen. Dieser Wert wird direkt auf den Beobachtungswert übertragen. So ergibt sich für den Median für die Jahresmitteltemperatur für die nahe Zukunft nach dem vereinfachten Delta-Change-Verfahren an dieser Stelle ein Wert von 9,6 °C.

Um die Unterschiede zwischen den beiden beschriebenen Delta-Change-Verfahren zu ermitteln, wurden flächenhafte Abbildungen der Perzentilwerte (15., 50. und 85. Perzentil) für die Jahresmitteltemperatur (Tagesmitteltemperatur auf Jahresbasis) auf Basis beider Delta-Change-Verfahren erstellt. Dazu wurden die Daten entsprechend aufbereitet, visualisiert und Box-Whisker-Plots der Jahresmitteltemperatur erzeugt. Durch diese vergleichende Untersuchung soll herausgefunden werden, ob auch das vereinfachte Verfahren über ausreichende Genauigkeit verfügt.

Abbildung 3-3 zeigt exemplarisch den Vergleich der Flächenmittelwerte der Jahresmitteltemperatur für Baden-Württemberg auf Basis des Delta-Change-Verfahrens für die aufwendige Berechnung (links) und die vereinfachte Berechnung (rechts). Für das Mittel von Baden-Württemberg ergeben sich keine sichtbaren Unterschiede zwischen den beiden Verfahren. Die Ergebnisse sind praktisch identisch. Nur bei einem Vergleich mit einer höheren Anzahl von Nachkommastellen zeigen sich geringe Unterschiede.

Um nun auszuschließen, dass die Übereinstimmung der Flächenmittelwerte zufällig durch Mittelung unterschiedlicher räumlicher Verteilungen der Temperaturwerte auf Basis beider Verfahren entsteht, wird zusätzlich die räumliche Verteilung der Jahresmitteltemperatur verglichen. In Abbildung 3-4 werden das 15., 50. und 85. Perzentil der Jahresmitteltemperatur flächenhaft sowohl für das aufwändige als auch das vereinfachte Delta-Change-Verfahren vergleichend dargestellt.

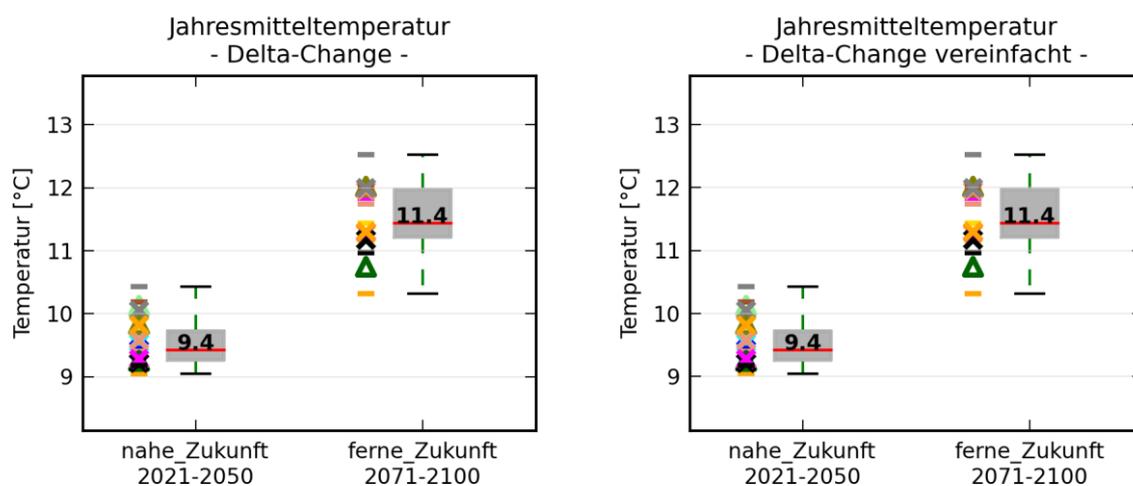


Abbildung 3-3: „Jahresmitteltemperatur“ über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Basis des aufwendigen (links) und des vereinfachten (rechts) Delta-Change-Verfahrens

Auch bei der flächenhaften Darstellung lassen sich keine Unterschiede zwischen den beiden Abbildungen ausmachen. Generell zeigt sich im Norden beziehungsweise Nordwesten von Baden-Württemberg eine Tendenz der etwas höheren Temperaturwerte auf Basis des aufwändigeren Verfahrens im Vergleich zum vereinfachten Verfahren. Im Süden und Südosten verhält es sich genau umgekehrt. Besonders ausgeprägt erscheint dies bei den Perzentilen der fernen Zukunft.

Um die vorhandenen kleinen Unterschiede sichtbar zu machen, die aufgrund des Skalenbereichs der Abbildung 3-4 von 7 °C bis 14 °C nicht sichtbar werden, wird in Abbildung 3-5 die Differenz zwischen den Perzentilen der Jahresmitteltemperatur auf Basis des aufwändigeren und des vereinfachten Verfahren dargestellt.

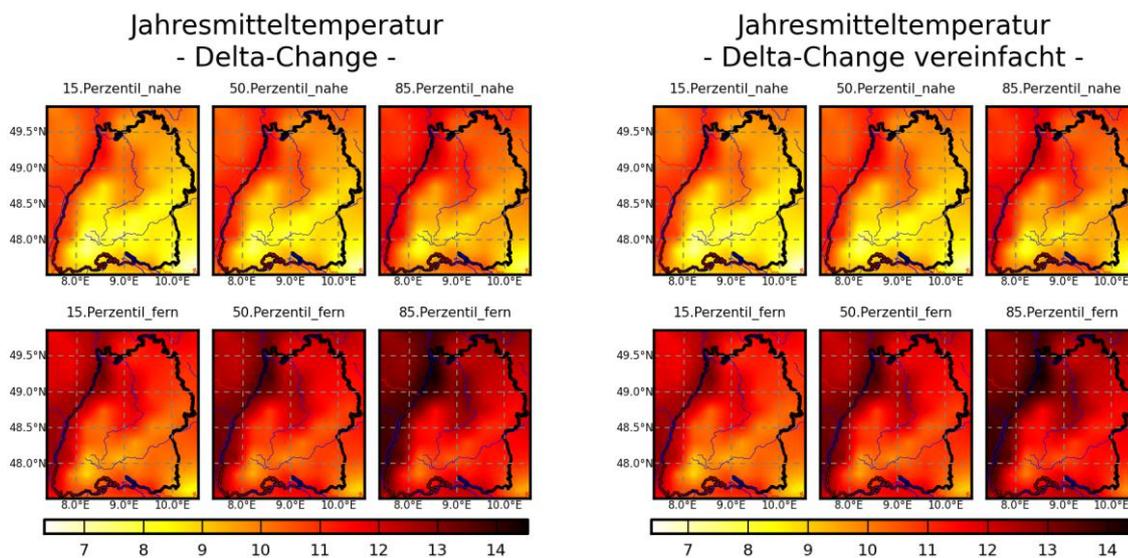


Abbildung 3-4: Flächenhafte Darstellungen des 15., 50. und 85. Perzentil der „Jahresmitteltemperatur“ für 20 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Basis des aufwendigen (links) und des vereinfachten (rechts) Delta-Change-Verfahrens

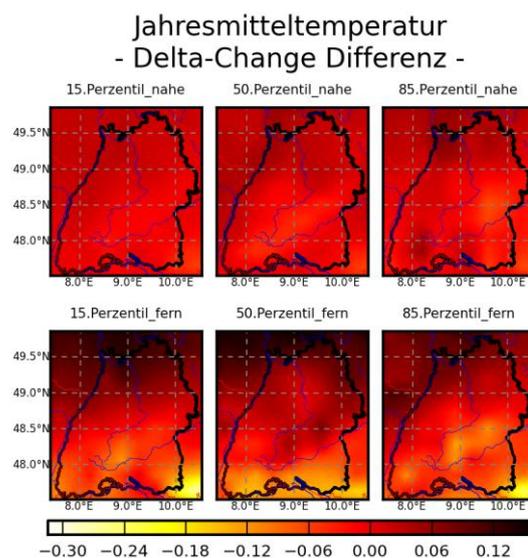


Abbildung 3-5: Flächenhafte Darstellungen der Differenz des 15., 50. und 85. Perzentil der „Jahresmitteltemperatur“ für 20 Klimaprojektionen der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) zwischen dem aufwendigen und dem vereinfachten Delta-Change-Verfahren

Bei der Darstellung der Differenzen ergeben sich nun regional gewisse Unterschiede. Die maximalen Unterschiede je Rasterpunkt des 25x25 km-Rasters liegen maximal zwischen -0,26 °C und +0,13 °C. Dabei treten innerhalb von Baden-Württemberg nur maximale Differenzen von -0,15 °C (50. Perzentil; ferne Zukunft) und +0,13 °C (15. Perzentil; ferne Zukunft) auf. In der nahen Zukunft sind die Unterschiede mit -0,08 °C (85. Perzentil) und +0,07 °C (85. Perzentil) noch geringer.

Bei detaillierter Betrachtung lassen sich also durchaus Unterschiede zwischen den beiden Delta-Change-Verfahren auffinden. Dabei liegen die maximalen Abweichungen allerdings im Bereich der Datengenauigkeit (0,1 °C) und somit deutlich unterhalb der Stärke des Klimasignals. Es erscheint demnach für die Jahresmitteltemperatur zweckmäßig, das vereinfachte Verfahren zu verwenden. Inwieweit der vereinfachte Delta-Change-Ansatz auch beispielsweise für Kennzahlen geeignet ist, die vom Parameter Niederschlag abgeleitet werden, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden.

In Kapitel 3.4 werden im Text auch die Ergebnisse des vereinfachten Delta-Change-Verfahrens erläutert, um neben den Werten, die in den Box-Whisker-Darstellungen aus der Analyse der Klimaprojektionen enthalten sind, auch Anhaltswerte zur Verfügung zu stellen, die stärker mit den Beobachtungsdaten verknüpft sind.

3.4 AUSWERTUNG DER KENNZAHLEN

Jahresschwankung des Niederschlags („N-Schwank Jahr“)

Definition:

Die Jahresschwankung des Niederschlags wird definiert als Quotient der Niederschlagssumme des meteorologischen Sommers (Juni bis August) und des meteorologischen Winters (Dezember bis Februar) [*dimensionslos*].

Ist-Zustand (1971-2000)

Die Kennzahl „Jahresschwankung des Niederschlags“ ergibt sich aus dem Quotienten zwischen Niederschlag im meteorologischen Sommer (Juni bis August) und dem meteorologischen Winter (Dezember bis Februar).

Trotz der deutlichen Streuung der Kennzahl zwischen den einzelnen Modellen (von 0,9 bis 1,6) zeigen mit einer Ausnahme alle Klimaprojektionen Werte größer 1 und damit generell höhere Sommer- als Winterniederschläge im Ist-Zustand. Dennoch unterschätzen im Ist-Zustand die Modelle die Jahresschwankung des Niederschlags im Vergleich zu den Beobachtungsdaten. Während bei den Beobachtungsdaten etwa ein Wert von 1,6 den deutlich höheren Niederschlagsanteil in den Monaten des meteorologischen Sommers anzeigt, liegen laut Klimaprojektionen bei einem Median von 1,2 die Niederschlagssummen in den meteorologischen Sommer- und Wintermonaten fast gleichauf (Abbildung 3-6).

Nahe Zukunft (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100)

Für die Zukunft ergibt sich eine klare Tendenz der Abnahme für die Jahresschwankung des Niederschlags. Dieses Ergebnis deckt sich mit der simulierten Abnahme der Niederschlagsmengen in den Sommermonaten und der Zunahme der Niederschlagsmengen in den Wintermonaten (vgl. Kapitel 4.1.2).

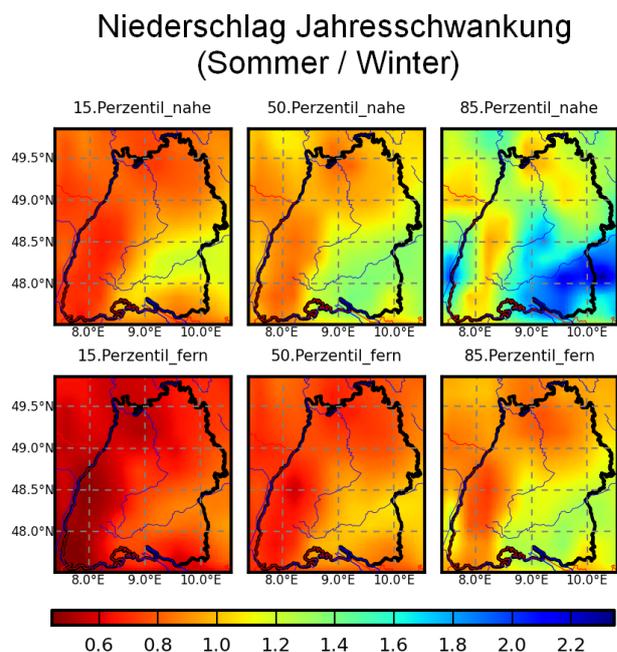
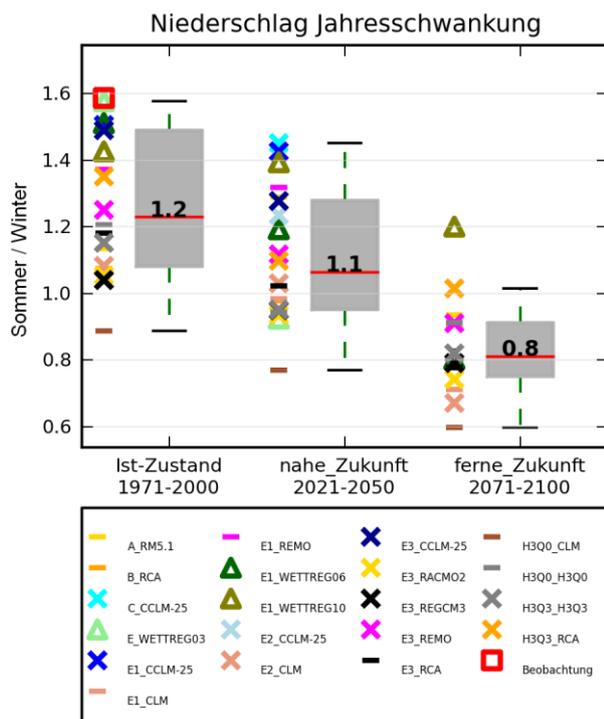


Abbildung 3-6: Box-Whisker-Diagramme (links) und flächenhafte Perzentildarstellungen (25x25 km²-Auflösung) (rechts) für die Kennzahl „Jahresschwankung des Niederschlags“ über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100).

Eine Veränderung der Kennzahl vom Ist-Zustand zur Zukunft entspricht dem Klimasignal. Dieses fällt zur nahen Zukunft mit einer Abnahme von 0,1 geringer aus, als die Abnahme von 0,4 zur fernen Zukunft. Unter Verwendung des Delta-Change-Ansatzes ergibt sich für die nahe Zukunft auf Basis des Beobachtungswerts von 1,6 eine Jahresschwankung des Niederschlags von 1,5 für die nahe Zukunft und 1,2 für die ferne Zukunft. Dies bedeutet eine beginnende, zunächst leichte Tendenz einer Verschiebung der Niederschlagssummen vom hydrologischen Sommer- zum Winterhalbjahr. Diese Tendenz verstärkt sich deutlich zur fernen Zukunft hin (Verschiebung um 25 %).

Die Veränderung der Jahresschwankung des Niederschlags zeigt einen interessanten Unterschied zwischen den ermittelten Werten aufgrund der Anwendung des Delta-Change-Verfahrens und den Werten des Medians in den Box-Whisker-Plots. Für die ferne Zukunft ergibt sich aus der Anwendung des Delta-Change-Verfahrens ein Wert von 1,2 für den Median. Somit überwiegen die Sommerniederschläge die Winterniederschläge auch noch in der fernen Zukunft. Entsprechend der Darstellung in den Box-Whisker-Plots simulieren alle verwendeten Klimaprojektionen (mit einer Ausnahme) jedoch einen höheren Niederschlag im Winter als im Sommer, da die Werte der Jahresschwankungen unter 1,0 liegen. Dadurch ergibt sich auch ein Wert von 0,8 für den Median. Da der Beobachtungswert mit 1,6 am oberen Ende der Simulationsergebnisse der Klimaprojektionen liegt, führt die Anwendung des Delta-Change-Verfahrens auch in der fernen Zukunft zu Werten größer 1. Die Anwendung des Delta-Change-Verfahrens ist zulässig, obwohl der falsche Eindruck erweckt wird, dass sich aus den Klimaprojektionen mehr Sommer- als Winterniederschlag ergäbe.

Für die Jahresschwankung des Niederschlags ergibt sich folgende Einstufung in die drei Kriterien „Streuung“, „Stärke“ und „Richtungssicherheit“:

- Die Streuung der Klimaprojektionen, zu erkennen an der Spannweite der Whisker und insbesondere an der Länge der Box, ist hoch (Ist-Zustand) bis mäßig (ferne Zukunft).

- Das Klimasignal ist mäßig bis stark, d.h. es zeigt sich vom Ist-Zustand eine zur nahen Zukunft zunächst leichte, aber zur fernen Zukunft deutliche Veränderung der Werte.
- Die Richtungssicherheit ist hoch, d.h. alle Klimaprojektionen stimmen in der Richtung der zu erwartenden Änderung, also hier der Abnahme der Werte, überein.

Zusammenfassend ergibt sich aus diesen drei Kriterien (mäßiges bis starkes Klimasignal mit großer Richtungssicherheit und mäßiger bis hoher Streuung) ein klares Bild einer zur Zukunft anfänglich leichten, dann sich jedoch zunehmend verstärkenden Verschiebung der Niederschlagssummen vom Sommer in den Winter.

Die Kennzahlen werden im weiteren Text in die Gruppen „zufriedenstellend“, „eingeschränkt zufriedenstellend“ und „nicht zufriedenstellend“ eingeordnet, um die Belastbarkeit der Klimaprojektionen einzuschätzen. Aufgrund der bestehenden Unsicherheiten in den Klimaprojektionen werden keine besseren Bewertungen vergeben. Die Bewertung erfolgte anhand der Kriterien „Streuung“ zwischen den Klimaprojektionen sowie „Stärke“ des Klimasignals und „Richtungssicherheit“ des Klimasignals subjektiv in die drei Klassen „gering“, „mäßig“ und „hoch“. Eine Kennzahl mit mäßiger (und somit mittlerer) Streuung wird daher als weniger zuverlässig beurteilt als eine Kennzahl mit geringer Streuung. Je nachdem wie Streuung, Stärke und Richtungssicherheit eingeschätzt werden, erfolgt die generelle subjektive Einstufung der Kennzahl als „zufriedenstellend“, „eingeschränkt zufriedenstellend“ oder „nicht zufriedenstellend“. In Tabelle 3-1 sind die Veränderungen der Kennzahlen und ihre Bewertung zusammenfassend dargestellt.

Die Bewertungen der Kennzahlen hinsichtlich Streuung, Stärke und Richtungssicherheit erfolgen subjektiv. Obwohl die Kennzahlen generell nur als „zufriedenstellend“ oder „eingeschränkt zufriedenstellend“ eingeordnet werden, lassen sich Rückschlüsse auf die zukünftige Entwicklung ziehen, wenn die Unsicherheiten berücksichtigt und die Interpretationen der Daten entsprechend vorsichtig durchgeführt werden.

Für einzelne Kennzahlen sind im folgenden Text z.T. nur Box-Whisker-Plots ohne Perzentildarstellungen aufgeführt, da nicht für alle Kennzahlen Perzentildarstellungen vorliegen.

Kennzahlen mit der Bewertung „zufriedenstellend“

Wachstumsgradtage („W-Gradtag“)

Definition:

Ein Wachstumsgradtag (WGT) wird aus der Tagesminimum- und der Tagesmaximum-Temperatur wie folgt berechnet: $WGT = ((T_{\min} + T_{\max}) / 2) - T_{10}$ (mit $T_{10} = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$) [*dimensionslos*].

Der Beginn der Wachstumsgradtage ist festgelegt auf den Zeitpunkt, an dem drei Tage in Folge die $10 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -Marke überschreiten. Das Ende der Wachstumsgradtage ist durch den ersten Frosttag gegeben.

Der Wert der **Wachstumsgradtage** aus den Beobachtungsdaten liegt mit $WGT = 1691$ etwas höher als auf Basis der Klimaprojektionen (Abbildung 3-7). Die Kennzahl wird als „zufriedenstellend“ eingestuft, da die Klimaprojektionen ein starkes Klimasignal mit hoher Richtungssicherheit und geringer Streuung des Klimasignals zeigen. Zur nahen Zukunft zeigt sich bei Verwendung des Delta-Change-Verfahrens eine Zunahme auf 1946 und zur fernen Zukunft sogar auf 2409 bei nur geringer Streuung des Klimasignals der einzelnen Klimaprojektionen.

Die Abweichungen der hier im Text angegebenen Wachstumsgradtage der Zukunftsszenarien (1946 bzw. 2409) zu den Werten im Box-Whisker-Diagramm in Abbildung 3-7 (1924 bzw. 2470) folgen aus der unterschiedlichen Berechnungsmethode. Während in den Box-Whisker-Diagrammen die absoluten Werte jeder Kennzahl aus der Analyse der Klimaprojektionen dargestellt sind, basiert die Berechnung der hier im Text angegebenen Werte auf dem Delta-Change-Verfahren. Dabei wird auf den Beobachtungswert (1691) das Klimasignal der Wachstumsgradtage von 255 (ermittelt aus dem 50%-Perzentil-Wert) für die nahe Zukunft (Summe somit: 1946) bzw. von 718 für die ferne Zukunft (Summe somit: 2409) addiert (vgl. Tabelle 3-1). Im weiteren Text werden für die Kennzahlen immer die Werte für die nahe und ferne Zukunft auf Basis des Delta-Change-Verfahrens angegeben.

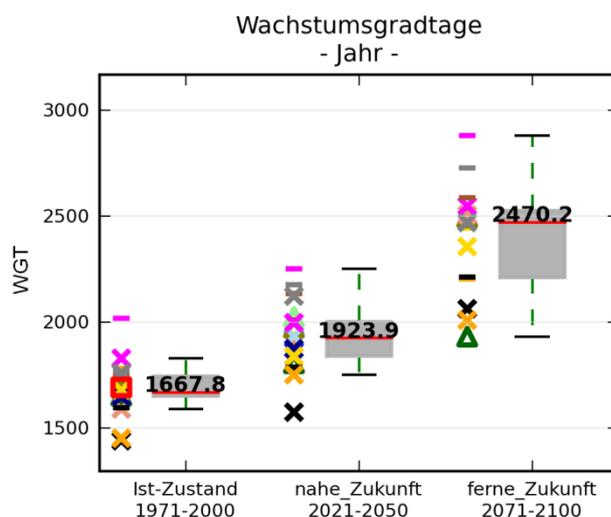


Abbildung 3-7: Auswertung der Klimaprojektionen für die Wachstumsgradtage (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Heizgradtage („Heizgradtage“)

Definition:

Ein Heiztag ist definiert als ein Tag, an dem die Tagesmitteltemperatur den Wert 15 °C unterschreitet. Zur Berechnung der Kennzahl „Heizgradtage“ wird zuerst für alle Heiztage die Differenz der Tagesmitteltemperatur vom Schwellenwert 15 °C ermittelt. Diese Temperaturdifferenzen werden anschließend über den Bezugszeitraum (hier: ein Jahr) addiert. Daraus ergibt sich die Einheit [°Kelvin * Tage] bzw. [°C * Tage].

Aus der Kennzahl „Heizgradtage“ kann abgeleitet werden, wie viel Energie notwendig ist, um Gebäude auf eine angenehme Raumtemperatur zu heizen.

Für die Heizgradtage ergibt sich ein starkes Klimasignal: infolge der Zunahme der Lufttemperatur (Abbildung 3-8) nehmen die Heizgradtage in der Zukunft deutlich ab. So verringern sich die Heizgradtage im Mittel von 4113 Kelvin*Tage (Beobachtungsdaten) auf 3750 Kelvin*Tage in der nahen Zukunft und auf 3042 Kelvin*Tage in der fernen Zukunft. Die Richtungssicherheit des Klimasignals ist hoch und die Streuung der Projektionen gering. Damit kann die Belastbarkeit der Kennzahl als zufriedenstellend eingestuft werden.

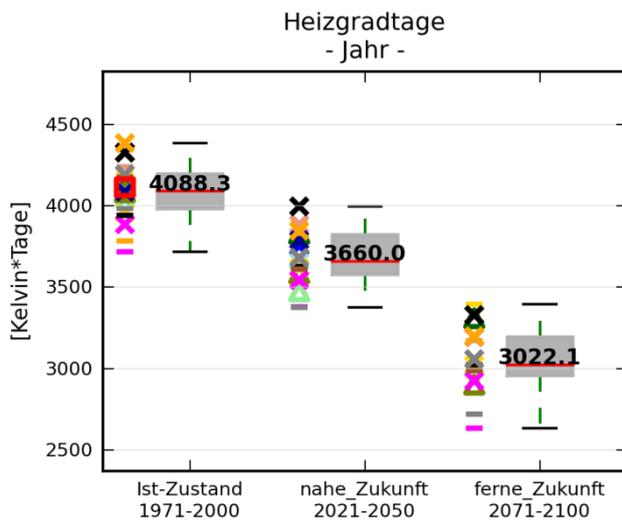


Abbildung 3-8: Auswertung der Klimaprojektionen für die Heizgradtage (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Dauer der Vegetationsperiode („Veg-Per Dauer“)

Definition:

Die Dauer der Vegetationsperiode ist definiert als Anzahl der Tage eines Jahres mit einer Tagesmitteltemperatur von mindestens 5 °C [Anzahl Tage].

Die **Dauer der Vegetationsperiode** liegt in Baden-Württemberg für die Beobachtungsdaten bei 236 Tagen. Die Klimaprojektionen liegen im Mittel bei 235 Tagen, d.h. die Dauer der Vegetationsperiode für den Ist-Zustand wird vom Mittel der Projektionen sehr gut abgebildet (Abbildung 3-9). Dabei weisen die Klimaprojektionen eine geringe Streuung auf, die erst zur fernen Zukunft zu einer mäßigen Streuung wächst. Bereits in der nahen Zukunft ist eine klare Zunahme bei der Dauer der Vegetationsperiode zu erkennen, die sich zur fernen Zukunft hin weiter verstärkt. Das Klimasignal ist stark und weist eine hohe Richtungssicherheit auf.

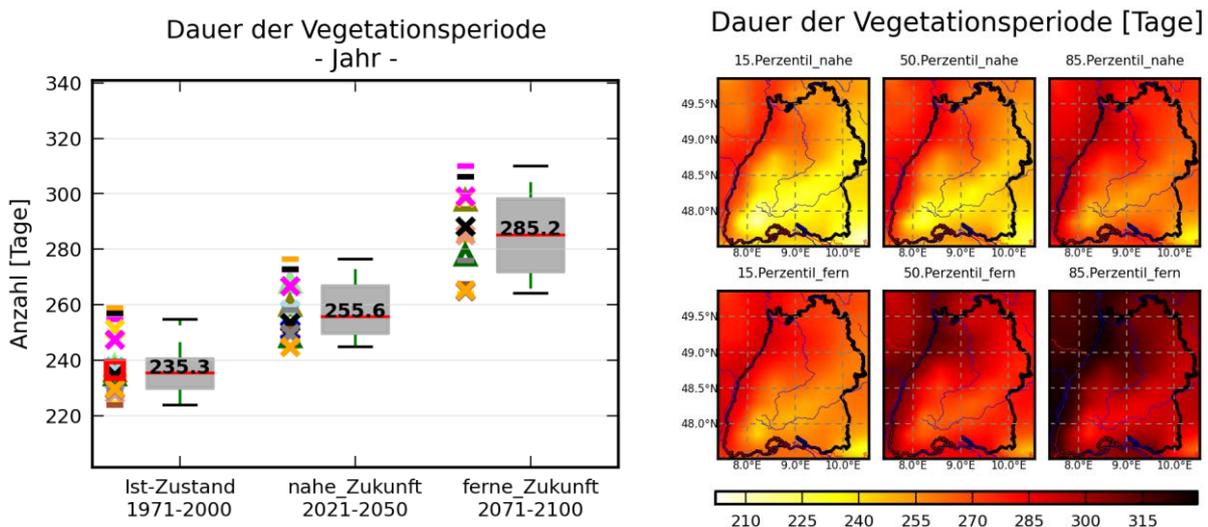


Abbildung 3-9: Auswertung der Klimaprojektionen für die Dauer der Vegetationsperiode (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Kennzahlen mit der Bewertung „eingeschränkt zufriedenstellend“

Der nachfolgend beschriebene Huglin-Index wird wie die weiteren folgenden Kennzahlen als „eingeschränkt zufriedenstellend“ bewertet. Insgesamt ergeben sich meist verlässliche Ergebnisse, allerdings ist entweder die Streuung der Klimaprojektionen hoch oder das Klimasignal wird hinsichtlich der Richtungssicherheit als mäßig oder gering bewertet.

Huglin-Index („Huglin-Index“)

Definition:

Der mittlere Huglin-Index errechnet sich aus der Tagesmittel- und Tagesmaximum-Temperatur:

$$H = HI = K \cdot \sum_{01.04.}^{30.09.} \left(\frac{T_{\text{med}} + T_{\text{max}}}{2} - 10 \right)$$

Dabei ist K ein vom Breitengrad abhängiger Faktor (hier: 1,05).

Die Kennzahl **Huglin-Index** wird für die Klassifizierung von Weinbaugebieten hinsichtlich der Temperatur verwendet. Mit der Zunahme der Jahresmitteltemperatur zur Zukunft hin nimmt auch der Huglin-Index von 1225 auf 1403 (nahe Zukunft) bzw. auf 1853 (ferne Zukunft) zu. Das Klimasignal ist stark und die Richtungssicherheit hoch (Abbildung 3-9). Allerdings steigt die geringe Streuung der Projektionen im Ist-Zustand auf eine mäßige Streuung in der nahen Zukunft bzw. eine mäßige bis hohe Streuung in der fernen Zukunft an.

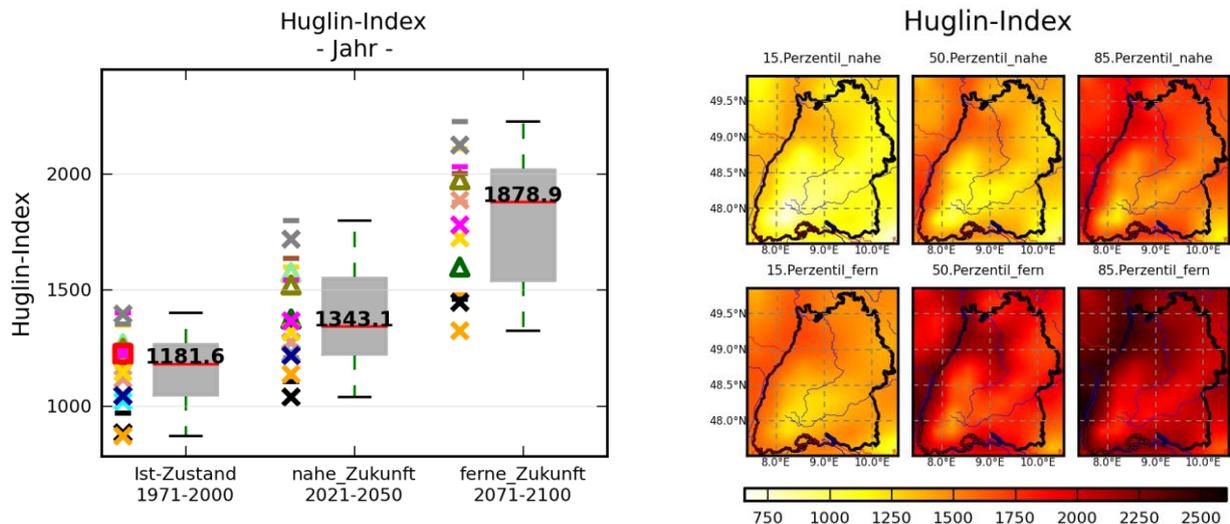


Abbildung 3-10: Auswertung der Klimaprojektionen für den Huglin-Index (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Kühltage („Kühltag“)

Definition:

Ein Kühltag ist definiert als ein Tag, an dem die Tagesmitteltemperatur einen Wert von 18,3 °C überschreitet. Es wird die Anzahl der Kühltage je Zeitbezug ermittelt [Anzahl Tage].

Bei der Anzahl der **Kühltage** stimmen Beobachtungsdaten und Median der Klimaprojektionen im Ist-Zustand gut überein (33,9 Tage bzw. 33 Tage). Die geringe Streuung im Ist-Zustand wächst zur nahen und fernen Zukunft hin zu einer mäßigen bis hohen Streuung an (Abbildung 3-10). Die Richtungssicherheit des starken Klimasignals ist hoch. Es ergibt sich für die nahe Zukunft eine Erhöhung auf 47,8 Tage und in der fernen Zukunft mehr als eine Verdopplung der Kühltage auf 76,2 Tage.

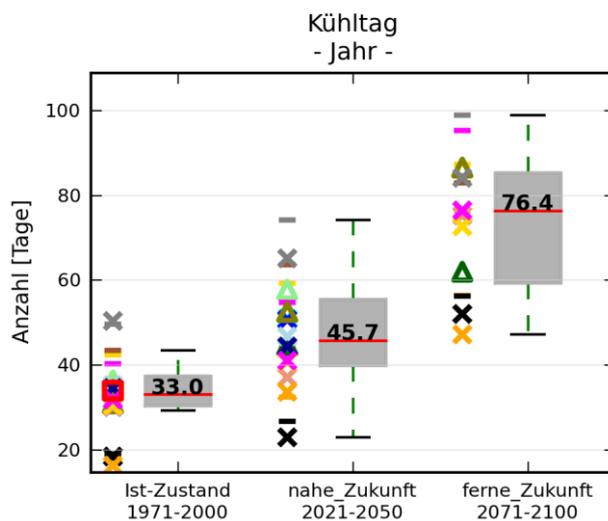


Abbildung 3-91: Auswertung der Klimaprojektionen für die Kühltage (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Schwankung der Lufttemperatur („T Schwankung“)

Definition:

Die Schwankung der Lufttemperatur wird definiert als Differenz der Mitteltemperatur des wärmsten Monats und des kältesten Monats [°C].

Auf Basis der Beobachtungsdaten beträgt die **Schwankung der Lufttemperatur** 19,3 °C. Zur nahen Zukunft zeigt sie keine nennenswerte Veränderung und auch zur fernen Zukunft lässt sich kein eindeutiges Klimasignal erkennen. Somit können mit mäßiger bis hoher Richtungssicherheit gleichbleibende Verhältnisse hinsichtlich der Schwankung der Temperatur festgestellt werden. Die Streuung der Projektionen ist mäßig.

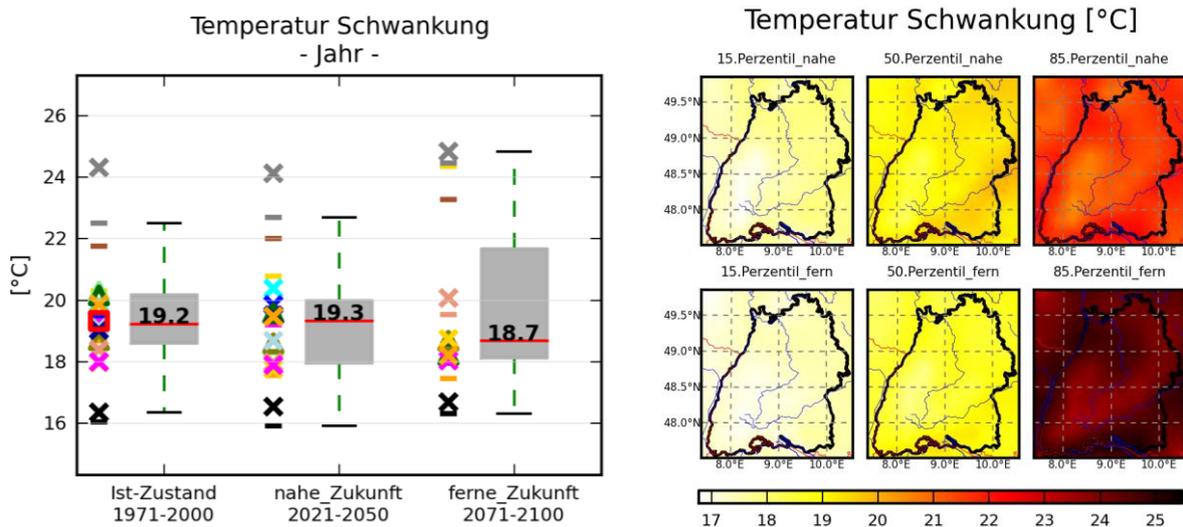


Abbildung 3-12: Auswertung der Klimaprojektionen für die Schwankung der Lufttemperatur (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Eintrittsdatum des ersten Frosts („Erster Frost“)

Definition:
 Das Eintrittsdatum des ersten Frosts wird anhand des mittleren Datums bestimmt, an dem die Tagesminimum-Temperatur maximal 0 °C erreicht [Anzahl Tage seit Jahresbeginn]. Dabei wird lediglich die zweite Jahreshälfte betrachtet.

Das **Datum des ersten Frosts** liegt laut Beobachtungsdaten im Mittel am 326. Tag nach Jahresbeginn (dies entspricht etwa dem 23. Oktober). Auf Basis der Klimaprojektionen liegt es etwa 6 Tage später. Die Kennzahl zeigt ein mäßiges bis starkes Klimasignal mit hoher Richtungssicherheit, bei einer geringen bis mäßigen Streuung der Projektionen (Abbildung 3-13). In der nahen Zukunft wird der erste Frost etwa 10 Tage später, in der fernen Zukunft sogar 23 Tage später simuliert. Alle Klimaprojektionen weisen die gleiche Tendenz eines „späteren“ ersten Frosttags auf.

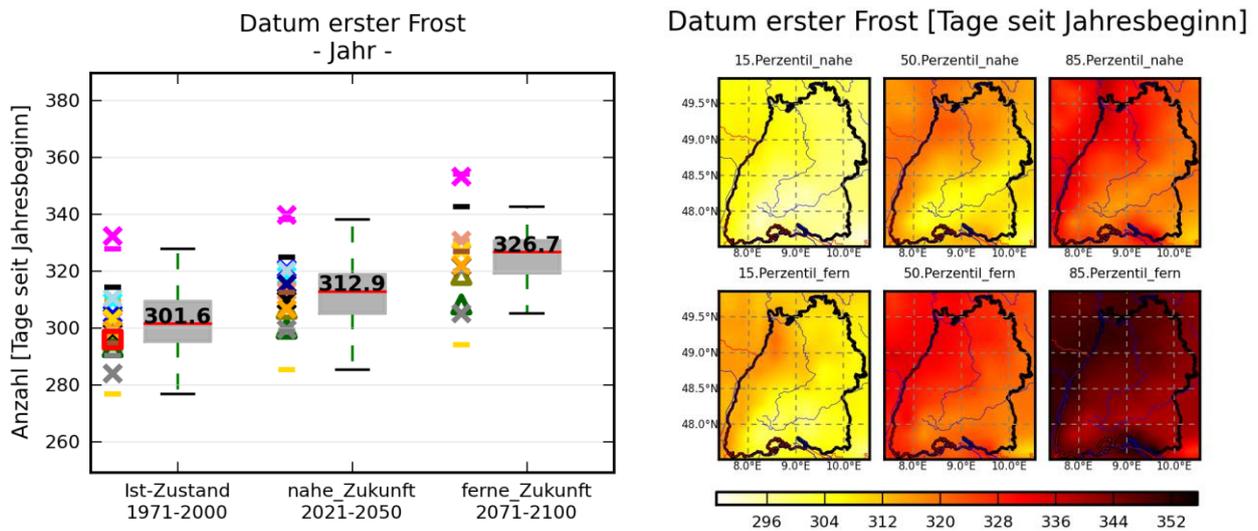


Abbildung 3-10: Auswertung der Klimaprojektionen für das Eintrittsdatum des ersten Frosts (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Dauer der Hitzeperioden (mind. 3 Tage) („Hitze-Per Dauer (3T)“)

Definition:

Es wird die mittlere Dauer von Hitzeperioden je Zeitbezug (hier: Jahr) bestimmt [Anzahl Tage]. Eine Hitzeperiode ist dabei definiert als mindestens drei zusammenhängende Tage mit einer Tagesmaximum-Temperatur von mindestens 30 °C und einer Tagesminimum-Temperatur von mindestens 18 °C.

Bei der Berechnung der Kennzahl **Dauer der Hitzeperioden** (mit mindestens drei Tagen Länge) sind einige Besonderheiten zu berücksichtigen. Viele Klimaprojektionen weisen an einzelnen Rasterpunkten über ein gesamtes Szenario (30 Jahre) keinerlei Hitzeperioden auf. Ebenso tritt an einigen Rasterpunkten nicht jedes Jahr eine Hitzeperiode ein.

Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit der Klimaprojektionen zu gewährleisten, werden bei der Berechnung der mittleren Anzahl von Hitzeperioden erstens nur diejenigen Rasterpunkte verwendet, die auch Hitzeperioden aufweisen. Rasterpunkte ohne Hitzeperioden werden somit aus der Berechnung ausgeschlossen. Zweitens werden nur diejenigen Jahre berücksichtigt, in denen eine Hitzeperiode auftritt.

Daraus ergeben sich zwei Konsequenzen: Zum einen geht somit bei einzelnen Klimaprojektionen nur ein Teil der Rasterpunkte in die Bildung des Flächenmittelwerts für Baden-Württemberg ein. Zum anderen steigt mit der Zunahme der Jahresmitteltemperatur zur Zukunft auch die Anzahl der Rasterpunkte, die eine Hitzeperiode aufweisen. Somit basiert der Flächenmittelwert in der Zukunft überwiegend auf einer größeren Anzahl an Rasterpunkten als der Ist-Zustand. Dadurch wird die Vergleichbarkeit, einerseits der Zeitbereiche (Ist-Zustand und nahe bzw. ferne Zukunft) und andererseits der verschiedenen Klimaprojektionen untereinander, eingeschränkt.

Bei der Erstellung flächenhafter Abbildungen (15., 50. und 85. Perzentil) für die Dauer der Hitzeperioden werden nur diejenigen Rasterpunkte in die Darstellung mit einbezogen, an denen mindestens 80 % der Klimaprojektionen des Ensembles zählbare Hitzeperioden im jeweiligen Zeitraum aufweisen.

Bei der mittleren Dauer von Hitzeperioden stimmen Beobachtungsdaten und Klimaprojektionen im Ist-Zustand mit einer Dauer von 3,6 Tagen sehr gut überein (Abbildung 3-14). Zur nahen Zukunft deutet sich eine beginnende Zunahme an, die sich zur fernen Zukunft hin verstärkt. Der geringe Unterschied, insbesondere von Ist-Zustand und nahe Zukunft, ist zum Teil auf die in den oben beschriebenen Einschränkungen bei der Berechnung der Kennzahl zurückzuführen (die geforderte minimale Dauer einer Hitzeperiode von drei Tagen wird nicht von allen Klimaprojektionen und Rasterpunkten erreicht).

Es ist anzunehmen, dass in der nahen Zukunft an denjenigen Rasterpunkten die Dauer der Hitzeperioden zunimmt, die bereits im Ist-Zustand eine Hitzeperiode aufweisen. Weiter ist zu vermuten, dass vom Ist-Zustand zur nahen Zukunft hin die Anzahl der Rasterpunkte steigt, die eine Hitzeperiode von mindestens drei Tagen Dauer aufweisen. Da diese Rasterpunkte nun in der nahen Zukunft in die Berechnung des Mittelwerts aufgenommen werden, aber zugleich nahe am unteren Grenzwert von drei Tagen Dauer liegen, ziehen sie den Mittelwert für die nahe Zukunft herab. Somit ist es möglich, dass zur nahen Zukunft die Dauer der Hitzeperioden generell zunimmt, dies aber nicht in diesem Maße im Box-Whisker-Plot zu erkennen ist. Daher besitzt der Box-Whisker-Plot nur beschränkte Aussagekraft in der Frage, wie sich die Dauer der Hitzeperioden zur Zukunft hin verändert.

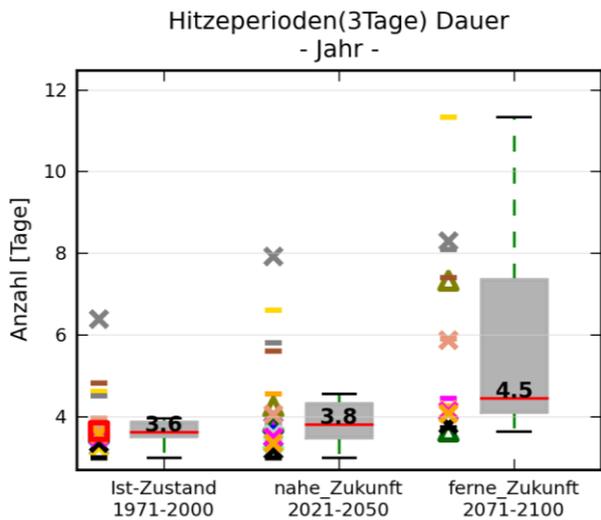


Abbildung 3-11: Auswertung der Klimaprojektionen für die Dauer der Hitzeperioden mit mindestens 3 Tage Dauer (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Anzahl der Tage mit Starkniederschlag (APR-SEP) („N Tage-StarkN-Veg“)

Definition:

Es wird die Anzahl der Tage eines Jahres zwischen April und September ermittelt, an denen die Niederschlagssumme eine Höhe von 25 mm überschreitet [Anzahl Tage].

Sowohl Beobachtungsdaten als auch Klimaprojektionen liefern für den Ist-Zustand eine mittlere **Anzahl von Starkniederschlagstagen** in der Vegetationszeit (hier definiert als Zeitraum ab April bis September) von etwa 2 Tagen (Abbildung 3-15). Im Mittel aller Projektionen zeigt sich zur Zukunft hin keine nennenswerte Veränderung der Anzahl von Starkniederschlagstagen. Allerdings widersprechen sich einzelne Klimaprojektionen hinsichtlich der Richtung des Klimasignals (Abnahme bzw. Zunahme). Die Streuungen der Ergebnisse sind mäßig, Stärke und Richtungssicherheit des Klimasignals sind gering. Daher kann auf Grundlage der Ergebnisse nicht von einer Veränderung der Anzahl der Tage mit Starkniederschlag während des Zeitraums April bis September ausgegangen werden.

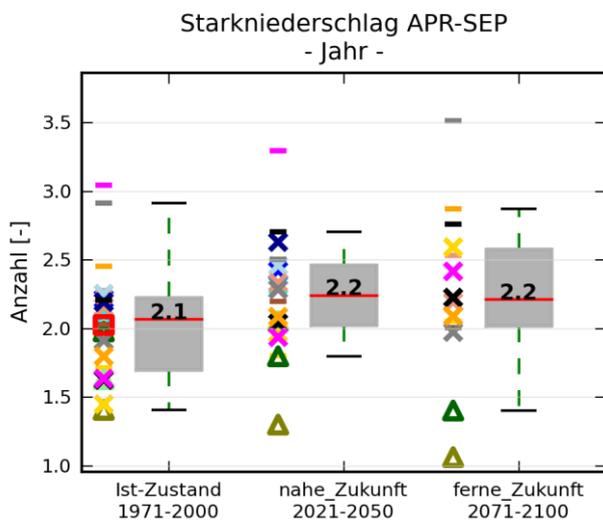


Abbildung 3-12: Auswertung der Klimaprojektionen für die Anzahl der Starkniederschlagstage in der Vegetationsperiode (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Anteil der 10 niederschlagsreichsten Tage am Gesamtniederschlag („N Top10-anteil“)

Definition:

Es wird der Quotient der Niederschlagssumme der zehn niederschlagsreichsten Tage und der Niederschlagssumme eines Jahres berechnet und daraus der prozentuale Anteil der zehn niederschlagsreichsten Tage ermittelt [%].

Der Anteil der 10 niederschlagsreichsten Tage am Gesamtniederschlag liegt auf Basis der Beobachtungsdaten bei 25,8 %, während die Klimaprojektionen den Anteil um 5 % niedriger berechnen (Abbildung 3-21). Für die Zukunftsszenarien ergibt sich keine nennenswerte Veränderung des Anteils der 10 niederschlagsreichsten Tage am Gesamtniederschlag. Die Streuung ist hoch und auch die Spannweite der Ergebnisse ist beträchtlich. Zwar zeigen einzelne Klimaprojektionen eine leichte Zunahme des Anteils der 10 niederschlagsreichsten Tage am Gesamtniederschlag an, insgesamt lassen sich jedoch mit mäßiger Richtungssicherheit gleichbleibende Verhältnisse erkennen.

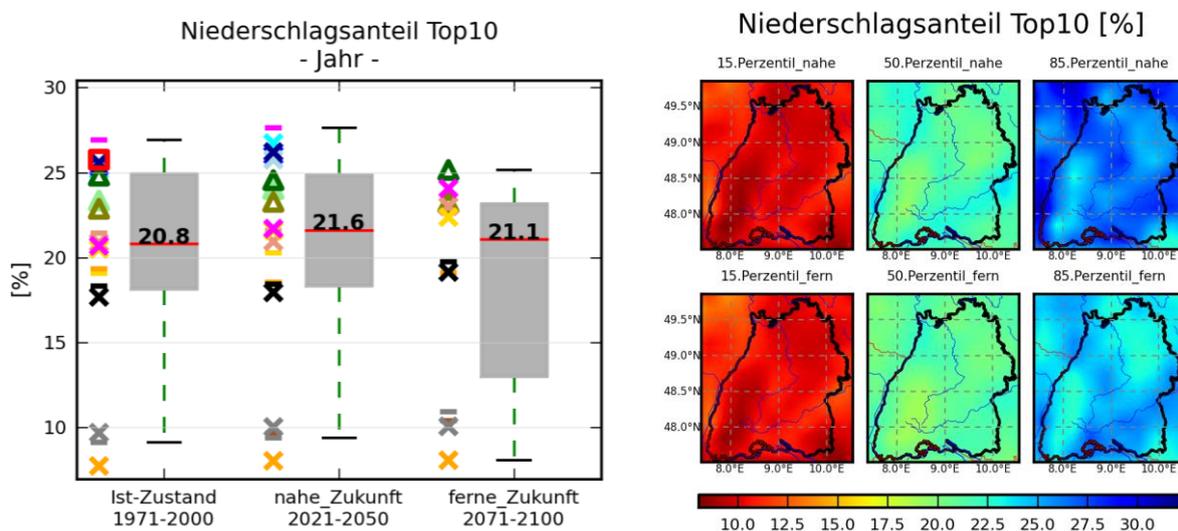


Abbildung 3-16: Auswertung der Klimaprojektionen für den Anteil der 10 niederschlagsreichsten Tage am Gesamtniederschlag (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Veränderlichkeit der Niederschlagssumme („N Variab“)

Definition:

Die Veränderlichkeit der Niederschlagssumme ist definiert als Quotient der Standardabweichung der jährlichen Niederschlagssumme und der mittleren jährlichen Niederschlagssumme über 30 Jahre [%].

Für die **Veränderlichkeit der Niederschlagssumme** bzw. Niederschlagsveränderlichkeit existieren drei Kennzahlen, die die Veränderlichkeit für das Gesamtjahr (*N Variab Jahr*), das Sommerhalbjahr (*N Variab SOHJ*) und das Winterhalbjahr (*N Variab WIHJ*) beschreiben. Für alle drei Kennzahlen zeigen sich mäßige Streuungen. Für das Gesamtjahr ergibt sich auf Basis der Beobachtungsdaten eine Variabilität von 15,1 %, für das Sommerhalbjahr von 19,3 % und für das Winterhalbjahr von 22,7 %. Die Klimaprojektionen zeigen eine um -1,2 % (Sommerhalbjahr) bis -4,4 % (Winterhalbjahr) geringere Variabilität an (Abbildungen 3-17 bis 3-19).

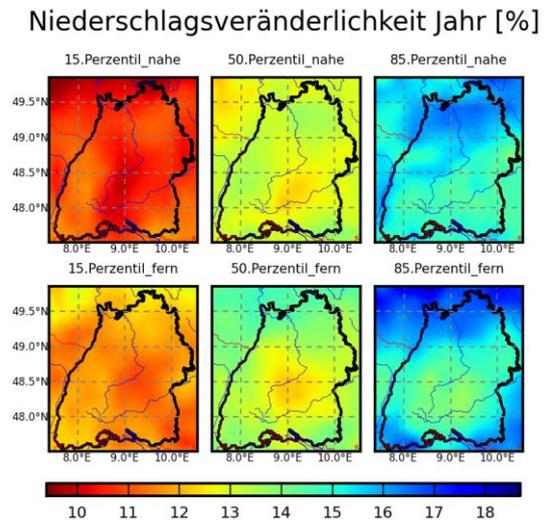
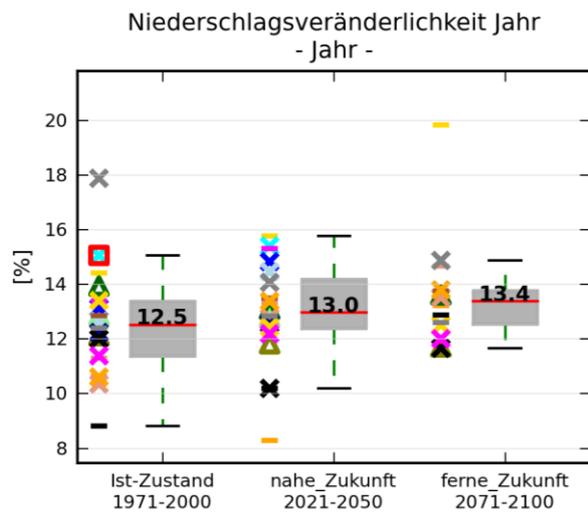


Abbildung 3-17: Auswertung der Klimaprojektionen für die Veränderlichkeit der Niederschlagssumme im Gesamtjahr (Legende vgl. Abbildung 3-6)

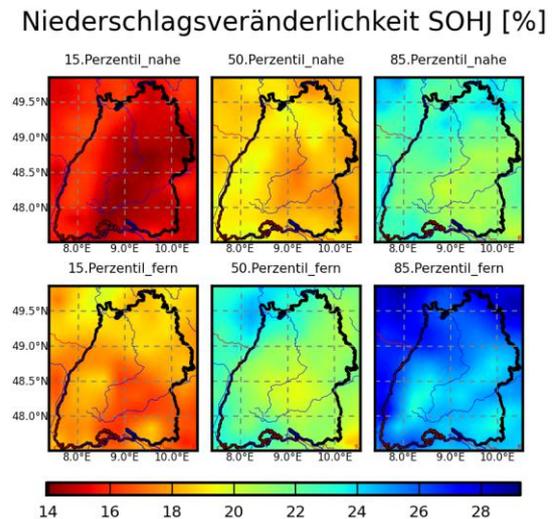
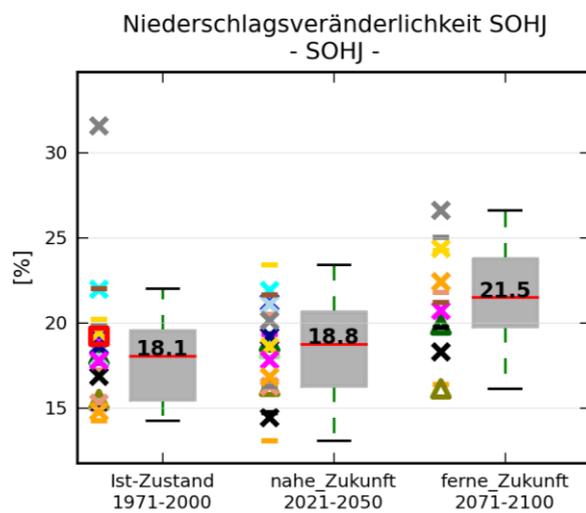


Abbildung 3-18: Auswertung der Klimaprojektionen für die Veränderlichkeit der Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr (Legende vgl. Abbildung 3-6)

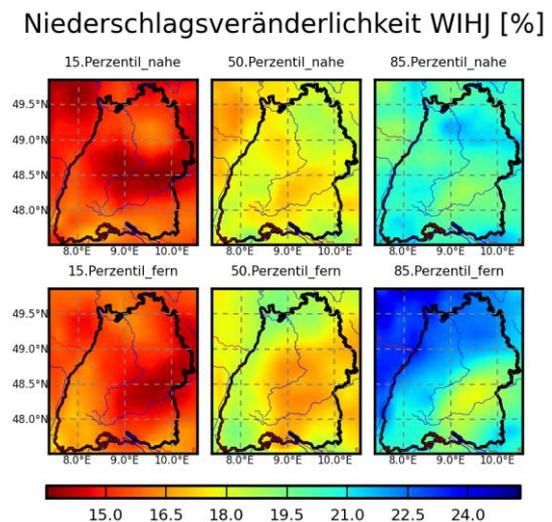
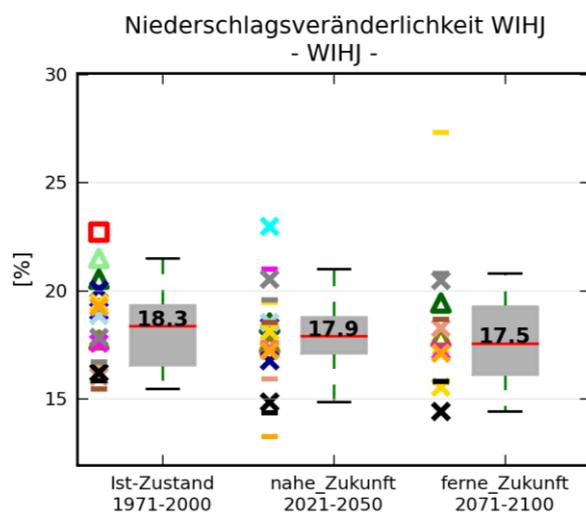


Abbildung 3-19: Auswertung der Klimaprojektionen für die Veränderlichkeit der Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Insgesamt sind die Ergebnisse zur Niederschlagsveränderlichkeit undeutlich. Das nur geringe Klimasignal wird durch die mäßige Streuung der Projektionen verschleiert. Tendenziell lässt sich eine leichte Zunahme der Niederschlagsveränderlichkeit bezogen auf das gesamte Jahr erkennen (Abbildung 3-16). Diese ist auf die Zunahme im Sommerhalbjahr zurückzuführen (Abbildung 3-17), die insbesondere zur fernen Zukunft hin deutlich ausfällt. Der Effekt dieser Zunahme wird durch die tendenzielle Abnahme der Niederschlagsveränderlichkeit im Winterhalbjahr abgeschwächt (Abbildung 3-18). Insgesamt ergibt sich für die ferne Zukunft auf Basis des Delta-Change-Ansatzes sowohl für das Sommerhalbjahr als auch für das Winterhalbjahr eine Variabilität von 22,8 %. Die Stärke des Klimasignals für alle drei Kennzahlen ist mäßig bis gering bei einer ebenfalls mäßigen bis geringen Richtungssicherheit.

Kennzahlen mit der Bewertung „nicht zufriedenstellend“

Nassperiode („Nassperiode“)

Definition:

Es wird die Anzahl der Nassperioden pro Jahr gezählt. Eine Nassperiode ist dabei definiert als Zeitbereich von mindestens 8 zusammenhängenden Tagen, bei der pro Tag mehr als 1 mm Niederschlag fällt. Die Nassperiode darf einen Tag mit Niederschlägen unter 1 mm beinhalten [Anzahl].

Die mittlere Anzahl von **Nassperioden** pro Jahr liegt bei den Beobachtungsdaten bei 3,2, bei den Klimaprojektionen jedoch bei 5,8 (Abbildung 3-20). Somit treten große Unterschiede bereits im Ist-Zustand auf. Auch die Streuungen der Ergebnisse der Klimaprojektionen sind hoch. Zur Zukunft hin ergibt sich kein klares Klimasignal. Einige Klimaprojektionen simulieren eine leichte Zunahme der Anzahl von Nassperioden, andere wiederum simulieren eine Abnahme der Anzahl von Nassperioden.

Eine Veränderung der Anzahl der Nassperioden ist auf Grundlage der Untersuchungen nicht feststellbar. Aufgrund der hohen Streuung wird die Belastbarkeit der Kennzahl als „nicht zufriedenstellend“ eingestuft.

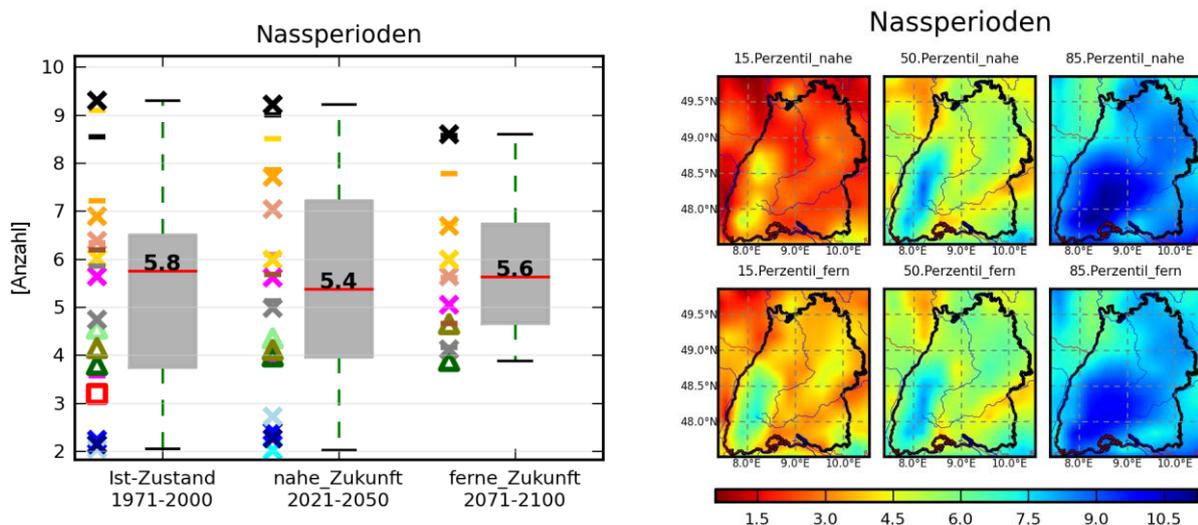


Abbildung 3-20: Auswertung der Klimaprojektionen für die Nassperioden (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Anzahl der Trockenperioden im Jahr („Trocken-Per“)

Definition:

Es wird die Anzahl der Trockenperioden pro Jahr gezählt. Eine Trockenperiode ist dabei definiert als Zeitbereich von mindestens 11 Tagen, bei der pro Tag weniger als 1 mm Niederschlag fällt [dimensionslos].

Die **Anzahl der Trockenperioden im Jahr** liegt bei den Beobachtungsdaten mit 4,1 deutlich höher als das Mittel der Klimaprojektionen (2,6) (Abbildung 3-21). Allerdings streuen die Ergebnisse der Projektionen stark. Insgesamt zeigt sich eine leichte Tendenz einer Zunahme der Anzahl von Trockenperioden. Allerdings liegt diese selbst in der fernen Zukunft bei nur 0,5, was unter Anwendung des Delta-Change-Verfahrens einer mittleren Anzahl von 4,5 Trockenperioden in der fernen Zukunft entspricht. Das Klimasignal ist entsprechend gering und weist eine geringe bis mäßige Richtungssicherheit auf. Aufgrund der hohen Streuung in Verbindung mit dem schwachen Klimasignal kann die Belastbarkeit der Kennzahl nicht als zufriedenstellend eingestuft werden.

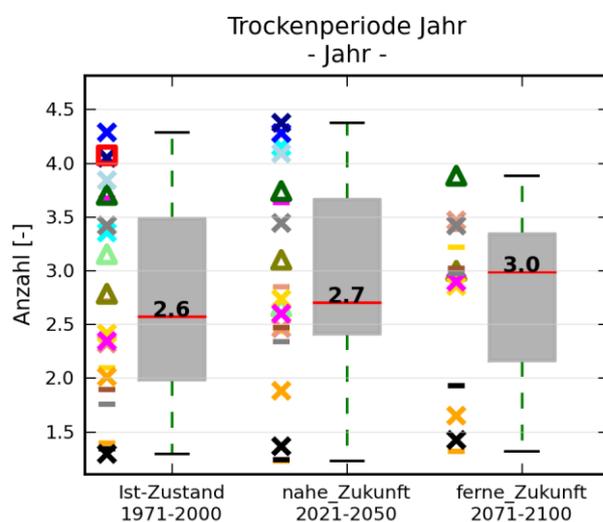


Abbildung 3-21: Auswertung der Klimaprojektionen für die Anzahl der Trockenperioden im Jahr (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Klimatische Wasserbilanz („Klim-Wasser-Bil“)

Definition:

Die mittlere klimatische Wasserbilanz berechnet sich aus der Differenz von Niederschlag und potentieller Verdunstung [mm]. Die Berechnung der potentiellen Verdunstung erfolgt nach Penman.

Für das Mittel von Baden-Württemberg errechnet sich unter Verwendung von Beobachtungsdaten ein Wert von 528 mm für die klimatische Wasserbilanz für den Ist-Zustand 1971-2000. Damit ist dieser Wert etwas höher als beispielsweise die rund 425 mm, die im Rahmen des KLIWA-Projekts (KLIWA 2008) für Baden-Württemberg für den Zeitraum 1931 bis 1997 ermittelt wurden. Eine Ursache hierfür ist die abweichende Vorgehensweise zur Berechnung der Verdunstung, welche einen maßgeblichen Einfluss auf die Ergebnisse der klimatischen Wasserbilanz ausübt. Im vorliegenden Bericht wird auf die Formel nach Penman zur Berechnung der potentiellen Evapotranspiration zurückgegriffen. Im Rahmen des KLIWA-Projekts wurde eine modifizierte Form des einfachen Turc-Verfahrens verwendet, da für die lange Zeitreihe 1931 bis 1997 nicht die Eingangsdaten für die aufwendig Berechnung nach Penman zur Verfügung standen.

Somit sind die Werte der klimatischen Wasserbilanzen generell aufgrund der mit verschiedenen Ansätzen möglichen Berechnung der Verdunstung nur eingeschränkt untereinander vergleichbar. Bei dem hier ermittelten Wert aus den Beobachtungsdaten handelt es sich um einen relativ hohen Wert für die klimatische Wasserbilanz.

Unter Verwendung der Daten aus den Klimaprojektionen liegt die klimatische Wasserbilanz für den Ist-Zustand im Mittel bei knapp 600 mm, also noch höher als auf Grundlage der Beobachtungsdaten. Grund hierfür ist vor allem die von den meisten Klimamodellen generell zu hoch simulierte relative Luftfeuchte. Dies bewirkt eine relativ geringe Verdunstung, was wiederum eine erhöhte klimatische Wasserbilanz nach sich zieht. Aus diesem Beispiel wird deutlich, dass insbesondere bei komplexeren Kennzahlen wie der klimatischen Wasserbilanz weniger die absoluten Werte der Klimaprojektionen im Zentrum des Interesses stehen sollten als vielmehr deren relative Veränderung von Ist-Zustand zur Zukunft (Klimasignal).

Diesbezüglich lässt sich hier keine Tendenz hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung der jährlichen klimatischen Wasserbilanz erkennbar. Einige Klimaprojektionen simulieren deutliche Zunahmen der klimatischen Wasserbilanz, wohingegen andere deutliche Abnahmen in ähnlicher Größenordnung anzeigen. Aufgrund der hohen Streuungen und der sehr geringen Richtungssicherheit des Klimasignals sind die Ergebnisse der klimatischen Wasserbilanz auf Jahresbasis nur bedingt aussagekräftig und wenig belastbar. Wie bereits beim Niederschlag wird auch bei der klimatischen Wasserbilanz erst durch eine Verfeinerung der zeitlichen Auflösung (z.B. auf Monatswerte) das Klimasignal ersichtlich.

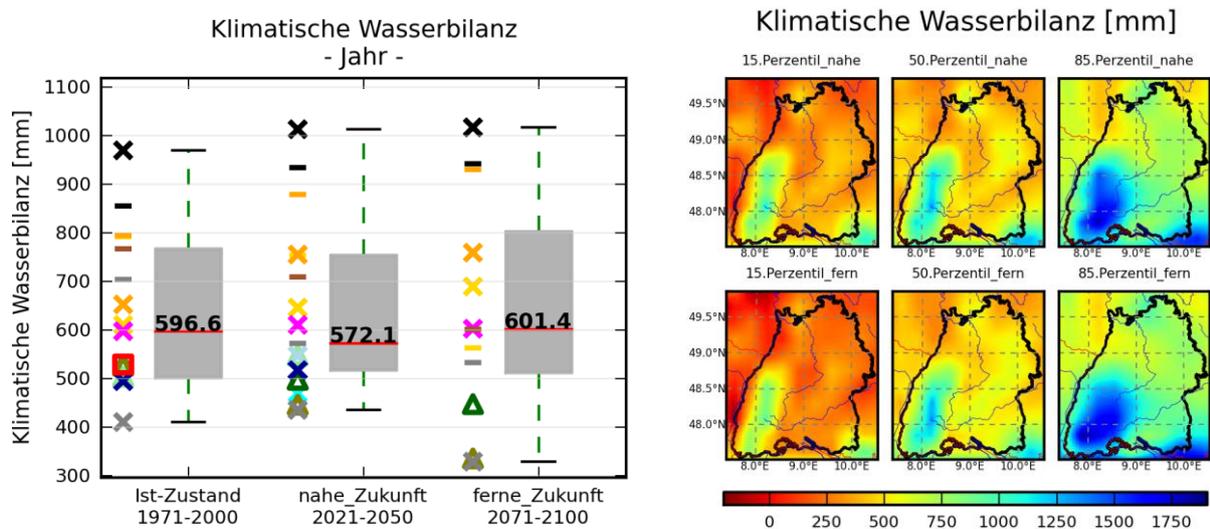


Abbildung 3-22: Auswertung der Klimaprojektionen für die klimatische Wasserbilanz (Legende vgl. Abbildung 3-6)

Tabelle 3-1: Übersicht über die Ergebnisse der Analyse der Kennzahlen (nur Jahresbasis) auf Basis der Perzentilbetrachtung sowie subjektiver Bewertung (Erläuterung der Kennzahlen in Kapitel 2.3, Kürzel der Kennzahlen in den Überschriften in Kapitel 3.2)

Kennzahl	Ist-Zustand				Klimasignal (nahe Zukunft)					Klimasignal (ferne Zukunft)					Klimasignal			Einschätzung
	Beob.	Bias	Spannw.	Streuung	min	15. Perz.	50. Perz.	85. Perz.	max	min	15. Perz.	50. Perz.	85. Perz.	max	Streuung	Stärke	Richt-sich.	zufriedenst.?
Heizgradtage [K*d]	4112.8	-24.5	371.4	gering	-611.9	-553.0	-362.6	-314.3	-234.5	-1268.1	-1188.3	-1070.4	-825.6	-778.0	gering	hoch	hoch	ja
Huglin-Index [-]	1225.5	-43.8	355.8	gering	38.5	137.9	177.4	314.1	445.1	309.2	434.9	627.5	762.0	873.6	mäßig	hoch	hoch	eingeschränkt
Kühltage [d]	33.9	-0.9	18.8	gering	3.3	7.5	13.9	20.8	24.6	27.3	30.2	42.3	50.8	55.5	mäßig	hoch	hoch	eingeschränkt
T Schwankung [°C]	19.3	-0.1	3.0	mäßig	-1.7	-0.5	-0.1	0.5	0.9	-1.9	-1.3	0.3	1.7	4.0	mäßig	-	hoch	eingeschränkt
Veg-Per Dauer [d]	236.5	-0.9	21.8	gering	13.9	15.0	19.1	23.5	29.9	24.6	35.5	47.4	55.8	61.5	mäßig	hoch	hoch	ja
W-Gradtag [-]	1690.7	-22.9	181.0	gering	109.6	155.9	255.0	333.8	410.1	279.6	524.2	718.3	877.3	960.2	gering	hoch	hoch	ja
Erster Frost [d]	296.1	5.6	20.7	mäßig	5.2	6.5	9.6	14.7	17.9	15.2	17.1	23.3	29.9	32.2	mäßig	hoch	hoch	eingeschränkt
Hitze-Per Dauer (3T) [d]	3.6	0.0	1.3	gering	-0.2	-0.2	0.2	1.0	2.0	0.0	0.5	0.9	3.6	6.7	mäßig	mäßig	hoch	eingeschränkt
N-Schwank Jahr [-]	1.6	-0.4	0.4	hoch	-0.7	-0.3	-0.1	-0.1	0.2	-0.7	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	mäßig	mäßig	hoch	eingeschränkt
Nassperiode [d]	3.2	2.6	5.7	hoch	-0.7	-0.4	0.0	0.7	0.8	-2.4	-1.6	-0.6	0.2	0.6	hoch	gering	gering	nein
N Tage-StarkN-Veg [d]	2.0	0.0	0.7	mäßig	-0.4	-0.1	0.2	0.4	0.5	-0.6	-0.2	0.3	0.7	1.1	mäßig	gering	gering	eingeschränkt
N Top10-anteil [%]	25.8	-5.0	16.1	hoch	-0.8	0.1	0.4	1.1	1.6	-0.2	0.3	1.5	2.7	3.8	hoch	-	mäßig	eingeschränkt
Trocken-Per [d]	4.1	-1.5	2.2	hoch	-0.5	-0.1	0.1	0.5	0.8	-0.4	0.0	0.5	1.1	1.2	hoch	gering	gering	nein
N Variab Jahr [%]	15.1	-2.5	3.6	mäßig	-3.8	-1.4	0.5	2.0	2.8	-3.0	-0.6	0.8	3.7	5.4	mäßig	gering	gering	eingeschränkt
N Variab SOHJ [%]	19.3	-1.2	6.0	mäßig	-11.4	-1.8	0.5	3.1	3.3	-5.0	0.1	3.5	5.9	7.6	mäßig	mäßig	mäßig	eingeschränkt
N Variab WHJ [%]	22.7	-4.4	3.7	mäßig	-3.9	-2.6	-0.5	2.8	3.9	-3.9	-2.0	0.1	3.6	8.1	mäßig	gering	gering	eingeschränkt
Klim-Wasser-Bil [mm]	528.1	68.5	298.7	hoch	-131.3	-57.2	23.2	77.1	103.3	-229.3	-184.9	-38.1	101.1	136.4	hoch	gering	gering	nein

Beob.: Wert der Beobachtungsdaten

Bias: Abweichung des Medians der Klimaprojektionen zum Beobachtungswert

Perz.: Perzentilwert

Richt-sich.: Richtungssicherheit des Klimasignals

Spannw.: Die Spannweite ist die Differenz des 85. und des 15. Perzentils

Einschätzung: Wird die Belastbarkeit der Klimaprojektionen als zufriedenstellend beurteilt?

Bewertungen anhand drei Klassenstufen: gering - mäßig - hoch

3.5 VERTIEFTE EINORDNUNG DER KLIMAPROJEKTIONEN WETTREG UND CCLM

Die einzelnen Klimaprojektionen des Ensembles wurden bisher gleichberechtigt ausgewertet. In einer vertieften Auswertung können die Klimaparameter und ausgewählte Kennzahlen einzelner Klimaprojektionen im Vergleich zu den anderen Klimaprojektionen analysiert werden, um diese in das Auswerte-Ensemble einzuordnen. Dabei lassen sich eventuell Klimaprojektionen identifizieren, die systematische Schwächen aufweisen.

Ein wichtiges Qualitätskriterium für die weitergehende Verwendung der Klimaprojektionen ist die Lagegenauigkeit der Ergebnisse der Klimaprojektionen. Insbesondere beim Niederschlag ist die präzise räumliche Verteilung schwierig zu simulieren, nimmt aber beispielsweise bei Wasserhaushaltssimulationen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Es wurden bereits erste Analysen im Vorgängerprojekt „Vergleich regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg“ hinsichtlich der Modellunsicherheit durchgeführt. Nun werden die CCLM-Modelle und die WETTREG-Modelle im Vergleich mit dem restlichen Ensemble näher untersucht.

Diese Klimaprojektionen wurden ausgewählt, da sie unter anderem bereits für Wasserhaushaltssimulationen im KLIWA-Projekt benutzt wurden und mit den Beobachtungsdaten gut übereinstimmen (LUBW & LUWG 2007, LUBW & LUWG 2008, LUBW 2010, LUBW & LUWG 2012, Gerlinger & Meuser 2013).

Gerade die WETTREG-Daten („Wetterlagen-basierte Regionalisierungsmethode“) eignen sich für einen detaillierten Vergleich mit Beobachtungsdaten, da die WETTREG-Daten wie auch die Beobachtungsdaten Daten an Stationen bereitstellen. Beim WETTREG-Modell handelt es sich um ein statistisches Modell, welches auf Beobachtungsdaten beruht und diese mit Hilfe statistischer Methoden und unter Einbeziehung der Ergebnisse der Wetterlagensimulation der Globalmodelle modifiziert (Kreienkamp et al. 2010a). Die WETTREG-Daten liegen sowohl für den Ist-Zustand als auch für Zukunftsszenarien vor. Aufgrund ihrer engen Verbindung zu den Beobachtungsdaten verfügen sie über einen starken Bezug zum heutigen Klima. Daher können statistische Modelle den Ist-Zustand in der Regel besser darstellen als dynamische Klimamodelle.

Bei den CCLM-Daten handelt es sich um die Berechnungsergebnisse eines dynamischen regionalen Modells, die als Werte für das Modellraster vorliegen (Schädler 2009). Die CCLM-Daten als Ergebnisse der Modellkette vom Emissionsszenario zum Globalmodell zum Regionalmodell weisen aufgrund der Unsicherheiten in der Modellkette Abweichungen zu den Beobachtungsdaten (Bias) auf. Um diese Unterschiede zu minimieren, wurden die CCLM-Daten der Temperatur, des Niederschlags und der Globalstrahlung mit Hilfe von Beobachtungsdaten bias-korrigiert (Berg et al. 2012, Berg et al. 2013). Bei den hier ausgewerteten CCLM-Daten wurde eine Bias-Korrektur mit linearer Skalierung durchgeführt. Dabei wurde für jeden Modellrasterpunkt durch Vergleich mit den Beobachtungsdaten ein mittlerer monatlicher Korrekturfaktor für den Ist-Zustand bestimmt und sowohl auf die Zeitreihen des Ist-Zustands als auch auf die Zeitreihen der nahen Zukunft angewendet.

Die meteorologischen Daten, die die Grundlage für die Bias-Korrektur der CCLM-Daten für Temperatur, Niederschlag und Globalstrahlung bildeten, und die in dieser Studie verwendeten Beobachtungsdaten unterscheiden sich. Für Temperatur und Niederschlag wurden für die Bias-Korrektur der CCLM-Daten die HYRAS-Daten (interpolierte Stationsdaten) des Deutschen Wetterdienstes verwendet (Rauthe et al. 2013).

Die hier zum Vergleich angeführten Mittelwerte der Beobachtungsdaten basieren auf einer unterschiedlichen Stationsanzahl und einem anderen Interpolationsverfahren als die HYRAS-Daten. Unterschiede der korrigierten CCLM-Daten und der hier zum Vergleich herangezogenen Beobachtungsdaten können somit zum Teil auf der unterschiedlichen (Beobachtungs-)Datengrundlage beruhen. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Einfluss gering ist.

Für die Globalstrahlung wurden Satellitendaten als Korrekturgrundlage der CCLM-Daten benutzt. Dagegen beruhen die hier angeführten Vergleichsdaten auf Stationsdaten der Sonnenscheindauer, die in Globalstrahlung umgerechnet wurden. Dadurch sind größere Abweichungen beider Datensätze möglich sind. Für den Parameter Windgeschwindigkeit liegen nur unkorrigierte CCLM-Daten vor.

Somit ist bereits aufgrund der Bias-Korrektur der CCLM-Daten zu erwarten, dass die CCLM-Daten des Ist-Zustands für Niederschlag und Lufttemperatur und den daraus abgeleiteten Kennzahlen recht gut mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen. Größere Abweichungen zwischen den CCLM-Daten des Ist-Zustands und den Beobachtungsdaten sind bei der Globalstrahlung und insbesondere bei den nicht bias-korrigierten Daten der Windgeschwindigkeit zu erwarten.

Die vertiefte Einordnung der Klimaprojektionen erfolgt anhand ausgewählter Kennzahlen. Diese repräsentieren sowohl die mittleren als auch die extremen Werte bestimmter Klimagrößen. Folgende Kennzahlen werden analysiert:

- Jahresmitteltemperatur
- Frosttage
- Sommertage
- Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr
- Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr
- Summe der Globalstrahlung
- Mittlere Windgeschwindigkeit

Die Analysen zur Lagegenauigkeit für den Ist-Zustand werden für diejenigen der aufgeführten Kennzahlen durchgeführt, für die bereits flächenhafte Grafiken aus dem Vorgängerprojekt vorhanden sind (Anlage B). Beim Niederschlag wird daher hier die Summe im Kalenderjahr betrachtet.

Die Auswertungen erfolgen deskriptiv anhand der vorliegenden und der neu erstellten Grafiken. Zudem wird unter Verwendung entsprechender Studien und Veröffentlichungen eine Einschätzung der entsprechenden Modelle durchgeführt. Die Legende für die Klimaprojektionen in den folgenden Abbildungen entspricht der bisher verwendeten Legende. Somit sind die vier CCLM-Klimaprojektionen durch blaue X-Zeichen (in der Abbildung links angeordnet) und die drei WETTREG-Klimaprojektionen durch grüne Dreiecke (rechts angeordnet) erkennbar.

In Anlage B sind die CCLM-Klimaprojektionen blau umrandet, die WETTREG-Klimaprojektionen grün. Blau gestrichelt umrandet sind in Anlage B die jeweiligen CCLM-Klimaprojektionen auf dem 7x7 km²-Raster.

— A_RM5.1	— E1_REMO	✕ E3_CCLM-25	— H3Q0_CLM
— B_RCA	▲ E1_WETTREG06	✕ E3_RACMO2	— H3Q0_H3Q0
✕ C_CCLM-25	▲ E1_WETTREG10	✕ E3_REGCM3	✕ H3Q3_H3Q3
▲ E_WETTREG03	✕ E2_CCLM-25	✕ E3_REMO	✕ H3Q3_RCA
✕ E1_CCLM-25	✕ E2_CLM	— E3_RCA	□ Beobachtung
— E1_CLM			

Die Analysen werden für den Ist-Zustand und die Zukunftsszenarien (soweit vorhanden) durchgeführt. Die Ergebnisse der CCLM-Modellläufe und der WETTREG2003-Daten liegen nicht für die ferne Zukunft vor.

Jahresmitteltemperatur

Mittel Baden-Württemberg

Im Ist-Zustand stimmen Beobachtungsdaten, WETTREG-Daten und CCLM-Modelle hinsichtlich der Jahresmitteltemperatur für Baden-Württemberg sehr gut überein. Die Modelle liegen im mittleren Bereich aller Klimaprojektionen.

Für die nahe Zukunft ergibt sich ein ähnliches Bild. Die Unterschiede zwischen den CCLM-Versionen liegen in der nahen Zukunft bei etwa 0,5 °C, die Unterschiede zwischen den WETTREG-Versionen bei etwa 1 °C. Zur fernen Zukunft hin vergrößert sich der Unterschied zwischen WETTREG2006 und WETTREG 2010 auf fast 1,5 °C. WETTREG2010 weist eine hohe Jahresmitteltemperatur auf. Beide WETTREG-Simulationen liegen leicht außerhalb des Interquartilsabstands (1. Quartil bis 3. Quartil), wobei WETTREG 2006 stärker unterhalb des Medians liegt als WETTREG2010 oberhalb des Medians.

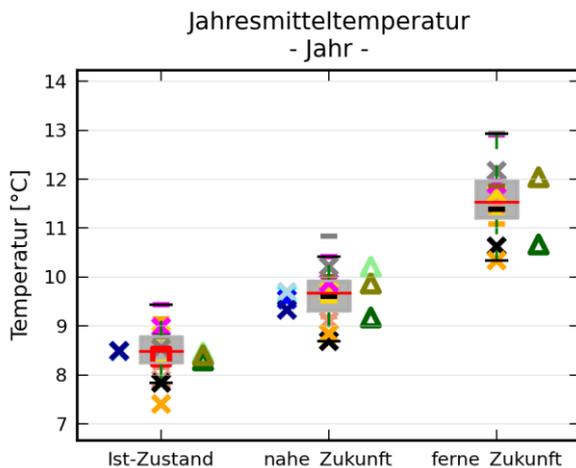


Abbildung 3-23: Vertiefte Einordnung anhand der Jahresmitteltemperatur

Flächenhafte Betrachtung

Bei der flächenhaften Betrachtung der Jahresmitteltemperatur zeigen sich kaum Unterschiede zwischen den Modelldaten und den Beobachtungsdaten (Anlage B-01). Geringe Abweichungen der absoluten Werte sind möglich, können aber visuell nicht quantifiziert werden. Die Lagegenauigkeit scheint sowohl für die WETTREG-Modelle als auch die CCLM-Modelle in etwa übereinzustimmen. Durch die starke Höhenabhängigkeit der Temperatur ist die korrekte räumliche Wiedergabe der Verteilung der Temperaturwerte bei der Modellierung weniger schwierig als beim Niederschlag.

Frosttag

Definition:

Ein Tag wird als Frosttag definiert, wenn das Temperaturminimum unter 0 °C liegt. Es wird die Anzahl der Frosttage je Zeitbezug (hier: Jahre) ermittelt [Anzahl Tage].

Mittel Baden-Württemberg

Im Ist-Zustand liegen die CCLM-Modelle zwar im Vergleich zu den anderen Klimaprojektionen in der Nähe des gemeinsamen Medians, im Vergleich zu den Beobachtungsdaten unterschätzen sie jedoch die Anzahl der Frosttage um etwa 20 Tage. Werden alle Klimaprojektionen betrachtet, so stimmen die WETTREG-Daten wie die Beobachtungsdaten eher im Bereich mit einer hohen Anzahl von Frosttagen. Auch für die Zukunftsszenarien werden für die CCLM-Daten eine eher geringere und für die WETTREG-Daten eine etwas höhere Anzahl von Frosttagen im Vergleich zum Median simuliert.

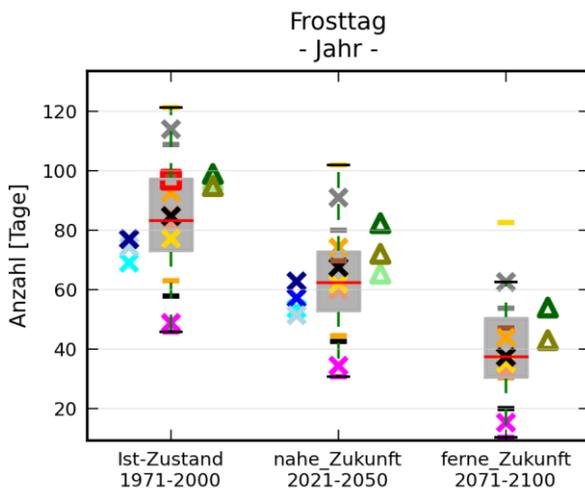


Abbildung 3-24: Vertiefte Einordnung anhand der Frosttage

Flächenhafte Betrachtung

Beim Frosttag stimmt die Lagegenauigkeit der WETTREG-Daten sehr gut mit den Beobachtungsdaten überein (Anlage B-02). Die Unterschiede zwischen den WETTREG-Modellen sind zwar sichtbar, aber sehr gering. Die CCLM-Modelle simulieren eine deutlich niedrigere Anzahl an Frosttagen im Jahr. Die räumliche Verteilung mit Maxima im Schwarzwald und der Schwäbischen Alb sowie im Alpenbereich stimmt jedoch sehr gut mit der Verteilung der Frosttage auf Basis der Beobachtungen oder der WETTREG-Daten überein

Sommertag

Definition:

Ein Tag wird als Sommertag definiert, wenn das Temperaturminimum mindestens 25 °C beträgt. Es wird die Anzahl der Sommertage je Zeitbezug (hier: Jahre) ermittelt [Anzahl Tage].

Mittel Baden-Württemberg

Beim Sommertag zeigt sich eine hohe Variabilität der Modellergebnisse. Mit unter 20 Sommertagen gehören die CCLM-Daten zu den Klimaprojektionen mit einer eher geringen Anzahl an Sommertagen. Die WETTREG-Daten stimmen sehr gut mit den Beobachtungsdaten überein. In den Zukunftsszenarien wird für die CCLM-Modelle eine geringere Anzahl an Sommertagen simuliert als für die WETTREG-Modelle. Auffällig ist der deutliche Unterschied zwischen WETTREG2006 und WETTREG2010 in der fernen Zukunft von etwa 25 Sommertagen.

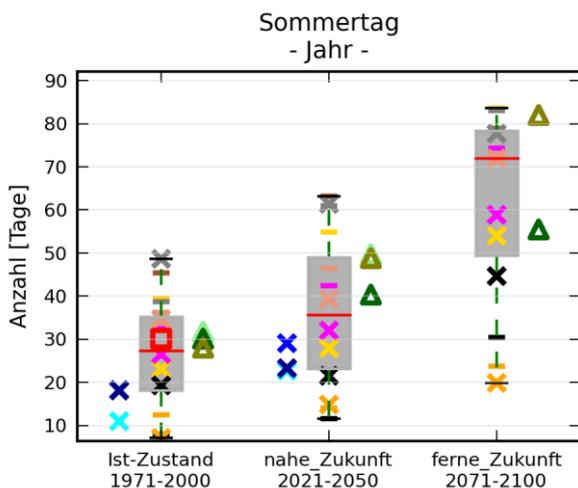


Abbildung 3-25: Vertiefte Einordnung anhand der Sommertage

Flächenhafte Betrachtung

Beim Sommertag zeigt sich ein ähnliches Bild wie beim Frosttag (Anlage B-03). WETTREG-Modelle und Beobachtungsdaten stimmen hinsichtlich Lage und absoluter Anzahl der Sommertage sehr gut überein.

Die CCLM-Modelle können zwar die räumliche Verteilung der Sommertage auf Basis der Beobachtungsdaten sehr gut wiedergeben, bei der absoluten Anzahl unterschätzen die CCLM-Modelle jedoch wiederum die Anzahl der Sommertage der Beobachtungsdaten.

Niederschlagssumme der hydrologischen Halbjahre

Mittel Baden-Württemberg

Die CCLM-Modelle und die WETTREG-Modelle können die Beobachtungsdaten der Niederschlagssummen der hydrologischen Halbjahre im Ist-Zustand sehr gut simulieren. Bei Betrachtung der Ergebnisse der Ensemble-Simulationen des Ist-Zustands liegen die Beobachtungsdaten sowie die WETTREG- und CCLM-Daten am unteren Ende des Ensembles an Klimaprojektionen auf etwa gleichem Niveau und somit (fast) außerhalb des Interquartilbereichs. Während viele anderen Klimaprojektionen den wirklichen Niederschlag sowohl im Sommer- wie im Winter-Halbjahr überschätzen, stimmen die bias-korrigierten CCLM-Daten und die auf Beobachtungsdaten beruhenden WETTREG-Daten erwartungsgemäß besser mit den Messwerten überein.

Auch in den Zukunftsszenarien weisen die CCLM- und WETTREG-Projektionen eher geringe Niederschlagssummen auf im Vergleich zu den anderen Klimaprojektionen. Auffällig ist dagegen die WETTREG2003-Simulation mit einer deutlichen Niederschlagszunahme im Winterhalbjahr der nahen Zukunft. Zudem fällt die Abnahme der Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr der WETTREG2006-Daten auf, was als sehr abweichend im Vergleich zu den anderen Klimaprojektionen zu bezeichnen ist.

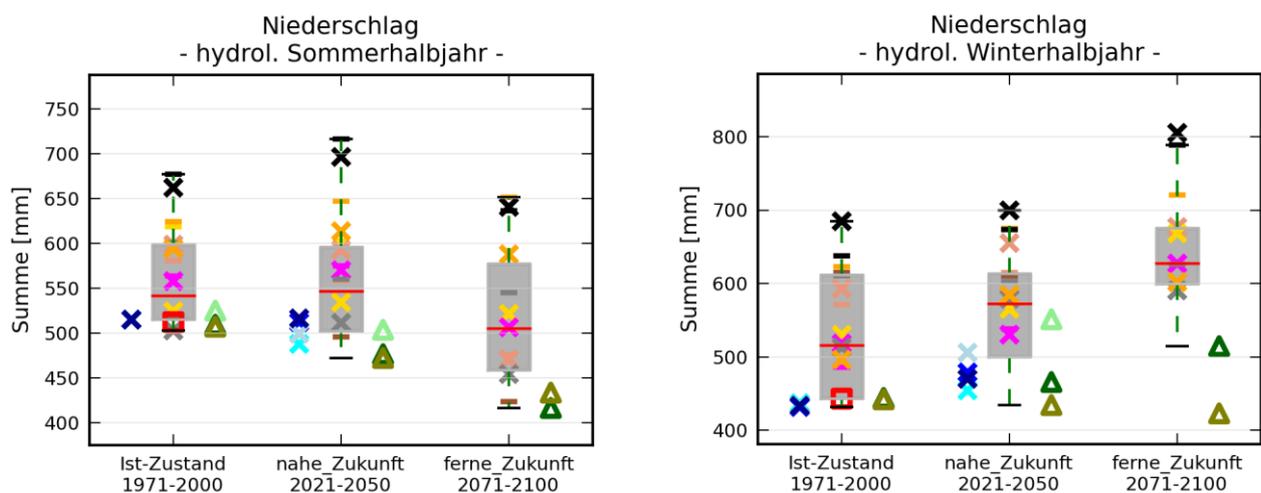


Abbildung 3-26: Vertiefte Einordnung anhand der Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr (links) und hydrologischem Winterhalbjahr (rechts)

Flächenhafte Betrachtung

Auch bei flächenhafter Betrachtung der Niederschlagssumme im Jahr zeigen WETTREG-Daten und Beobachtungsdaten nahezu identische Ergebnisse (Anlage B-04). Durch die Bias-Korrektur der CCLM-Daten werden auch hier nur geringe Abweichungen deutlich, die vermutlich auf die Unterschiede zwischen den HYRAS-Daten als Korrekturgrundlage und den verwendeten interpolierten Stationsdaten zurückzuführen sind. Die Niederschlagsmaxima in Schwarzwald und Voralpenland werden in ähnlicher guter Weise von CCLM und WETTREG simuliert.

Gerade beim Niederschlag zeigen sich größere Unterschiede bei den anderen Klimaprojektionen. Während die Hadley-Modelle die Lage, aber nicht die absoluten Niederschlagshöhen gut simulieren, befindet sich das Niederschlagsmaximum im Oberrheinbereich bei den REMO- und CLM-Daten zu weit westlich, während bei den RCA-Modellen das Niederschlagsmaximum zu sehr im Osten auftritt.

Jahressumme Globalstrahlung

Mittel Baden-Württemberg

Die Simulation der Globalstrahlungssumme im Jahr weist eine sehr große Spannweite von etwa 870 kWh/Jahr bis 1300 kWh/Jahr im Ist-Zustand auf. Die CCLM-Daten liegen bei der Globalstrahlungssumme etwa 100 kWh/Jahr über den WETTREG-Daten und Beobachtungsdaten. Grund dafür ist zum einen die Berechnung der Globalstrahlung aus der Sonnenscheindauer bei den WETTREG-Daten und den Beobachtungsdaten sowie die Verwendung von Satellitendaten als Korrekturgrundlage für die CCLM-Modelle. Die Klimaprojektionen bewegen sich jedoch auch in der Zukunft alle in einem engen Bereich um den Median aller Klimaprojektionen. Während bei den CCLM-Daten kaum eine Änderung der Globalstrahlung zur nahen Zukunft hin simuliert wird, nimmt die Summe der Globalstrahlung bei den WETTREG-Daten leicht zu.

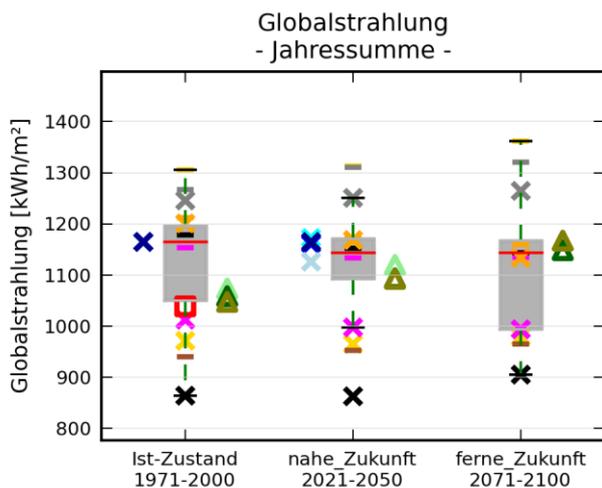


Abbildung 3-27: Vertiefte Einordnung anhand der Jahressumme der Globalstrahlung

Mittlere Windgeschwindigkeit

Mittel Baden-Württemberg

Die Beobachtungsdaten und die WETTREG-Daten liegen nur als Windstärke und nicht als Windgeschwindigkeit vor. Die Umrechnung ist sicherlich mit ein Grund für die sehr niedrigen Windgeschwindigkeiten im unteren Wertebereich des Ensembles der Klimaprojektionen. Dagegen weisen die CCLM-Modelle eher hohe Windgeschwindigkeiten im Bereich des 3. Quartils aller Projektionen auf.

Flächenhafte Betrachtung

Bei der Jahressumme Globalstrahlung zeigen sich große Unterschiede zwischen den Klimaprojektionen (Anlage B-05). Es liegen jedoch im Gegensatz zum Niederschlag keine deutlich ausgeprägten Maxima oder Minima vor, sodass die größten Unterschiede eher in der absoluten Höhe der Globalstrahlungssumme liegen als in der räumlichen Verteilung. Die WETTREG-Daten stimmen hinsichtlich absoluter Globalstrahlungssumme gut mit den Beobachtungen überein, räumlich sind gewisse Unterschiede insbesondere im östlichen Baden-Württemberg erkennbar. Die CCLM-Daten zeigen generell eher geringe räumliche Unterschiede mit Ausnahme eines Maximums im Voralpengebiet, das von den Beobachtungsdaten so nicht wiedergegeben wird.

Insgesamt ändern sich die Windgeschwindigkeiten wenig zwischen Zukunftsszenarien und Ist-Zustand.

Flächenhafte Betrachtung

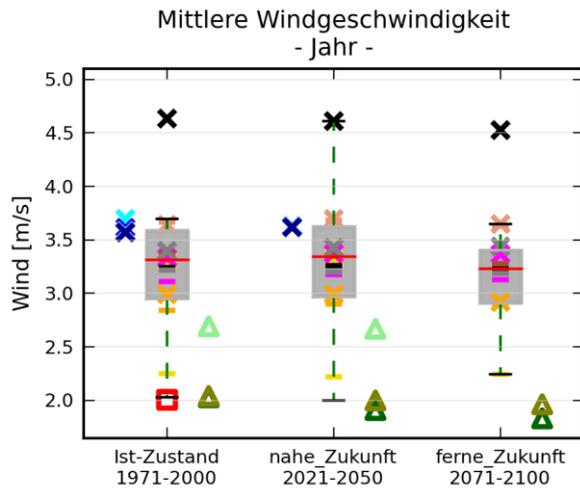


Abbildung 3-28: Vertiefte Einordnung anhand der mittleren Windgeschwindigkeit

Die Maximalwerte der Windgeschwindigkeit zeigen sich bei den Beobachtungsdaten in den Höhen des Schwarzwalds und der Schwäbischen Alb (Anlage B-06). Allerdings sind diese Maxima nicht sehr deutlich ausgeprägt. Die WETTREG-Daten weisen eine ähnliche räumliche Verteilung der Windgeschwindigkeiten auf mit etwas ausgeprägteren Minima und Maxima. Die CCLM-Daten simulieren ähnlich den meisten anderen Klimaprojektionen deutlich höhere Windgeschwindigkeiten. Die räumliche Verteilung unterscheidet sich jedoch merklich von den Beobachtungsdaten. Die beobachteten Windmaxima im Schwarzwald treten bei den CCLM-Daten nicht auf. Dagegen finden sich die Maxima der Windgeschwindigkeit auf Basis der CCLM-Daten im östlichen Bereich Baden-Württembergs nicht in den Beobachtungsdaten.

Fazit

CCLM-Modelle

Bei den CCLM-Daten spielt die Bias-Korrektur eine sehr wichtige Rolle. Durch die mittlere Anpassung der Temperatur, des Niederschlags und der Globalstrahlung stimmen diese Daten bei Kennzahlen, die das mittlere Verhalten von diesen meteorologischen Parametern (wie beispielsweise die Jahresmitteltemperatur oder die Jahresniederschlagssumme) beschreiben, sehr gut mit den Beobachtungsdaten überein. Da die Bias-Korrektur auch flächenhaft angewendet wird, sind auch bei der flächenhaften Betrachtung kaum Unterschiede zwischen CCLM-Daten und Beobachtungsdaten zu erwarten. Hinsichtlich des Klimasignals, das weitgehend unabhängig von der Bias-Korrektur ist, sind keine Auffälligkeiten der CCLM-Daten im Vergleich mit den restlichen Klimaprojektionen zu beobachten.

Bei den beiden Kennzahlen, die sich auf die Tagesminimums- und Tagesmaximums-Temperatur beziehen (Frosttag und Sommertag), ergeben sich dagegen merkliche Unterschiede. Im Ist-Zustand unterschätzen die CCLM-Modelle die Tagesanzahlen der Sommertage und der Frosttage im Vergleich zu den Beobachtungsdaten. Auch im Vergleich mit den anderen Klimaprojektionen weisen die CCLM-Daten eher eine geringe Anzahl von Frosttagen und Sommertagen auf.

Die für die CCLM-Daten verwendete Bias-Korrektur mit linearer Skalierung korrigiert alle Tageswerte der Temperatur lediglich um einen bestimmten Betrag, der aus den mittleren Monatswerten abgeleitet wird. Durch diese Korrektur anhand mittlerer Werte werden die Tagesminimums- und Tagesmaximums-Temperatur nicht so stark verändert, dass sie mit den Beobachtungsdaten übereinstimmen.

Den Ergebnissen zu Folge (geringere Anzahl der Sommertage und der Frosttage) scheint die tages- und jahreszeitliche Schwankung der Lufttemperatur in den CCLM-Daten kleiner als die der Beobachtungsdaten zu sein, da sich bei den Beobachtungsdaten mehr Sommer- und Frosttage ergeben.

Bei der Windgeschwindigkeit ist ein Vergleich mit Beobachtungsdaten schwierig, da diese aus der Windstärke errechnet wurden und damit mit Unsicherheiten behaftet sind. Generell weisen die Windgeschwindigkeiten auf Basis der CCLM-Daten im Vergleich zu den restlichen Klimaprojektionen recht hohe Werte auf. Bei der räumlichen Verteilung der Windgeschwindigkeiten zeigen sich deutliche Unterschiede zu den Beobachtungsdaten, insbesondere im Bereich des Schwarzwalds und im östlichen Baden-Württemberg.

Bei Berg et al. (2012) und Wagner et al. (2013) findet sich eine interessante Ensemble-Analyse auf einem 7x7 km² Raster (bzw. bei REMO mit 10 x 10 km² Raster). Es werden die zwei Globalmodelle CCCma2 (vergleichbar zu CGCM3) und ECHAM5 sowie drei verschiedene Regionalmodelle verwendet (CCLM, WRF und REMO), jedoch ohne Bias-Korrektur. Es wurden Simulationen mit Re-Analysedaten durchgeführt (ERA-40). Hier zeigte sich, dass das CCLM-Modell einen Fehler von etwa -1 °C bei der Mitteltemperatur und +36 % beim Niederschlag bezogen auf Deutschland selbst produziert. Fehler in dieser Größenordnung sind jedoch bei den Regionalmodellen üblich. Gleichzeitig waren die CCLM-Daten jedoch im Stande, die räumliche Verteilung auch des Niederschlags gut zu reproduzieren (Berg et al. 2012).

Hinsichtlich des Klimasignals der Temperatur können werden die Ergebnisse der vorliegenden Auswertungen durch die Analysen von Wagner et al. (2013) bestätigt. Für die Temperatur ergibt sich ein klares Klimasignal von etwa +1 °C für Deutschland. Die Ergebnisse für den Niederschlag zeigen ebenfalls für die drei ECHAM-Simulationen leichte Zunahmen im Gesamtjahr und eine leichte Abnahme der Niederschläge für das kanadische Globalmodell (CCCma2). Trotz der Bias-Korrektur werden somit in dieser Studie ähnliche Ergebnisse wie bei Wagner et al. (2013) erzielt.

Das CCLM-Modell wurde auf Basis des LM-Modells (Lokalmodell) des Deutschen Wetterdienstes entwickelt. Seit 2005 ist das CCLM-Modell das gemeinsame Klimamodell der Deutschen Klimaforschung. Es ist damit ein sehr junges Modell, dessen Attraktivität besonders in der hohen räumlichen Auflösung von meist 7x7 km² und der bereits erwähnten guten Lagegenauigkeit von Niederschlagsmustern liegt.

WETTREG

Während die WETTREG2003-Daten noch auf dem Globalmodell ECHAM4 beruhen, basieren die WETTREG2006-Daten und die WETTREG2010-Daten bereits auf dem Globalmodell ECHAM5. Bei den WETTREG2006-Daten stand die Anpassung an Beobachtungsdaten im Vordergrund. Es wurden Beziehungen zwischen großräumigen atmosphärischen Mustern und den lokalen klimatischen Konsequenzen aus Re-Analysen und Messdaten erstellt.

Bei den WETTREG2010-Daten stand dann die Frage im Vordergrund, welche Änderungen der Eigenschaften großräumiger atmosphärischer Muster sich in Folge der sich ändernden klimatischen Bedingungen auf Basis der Szenarios von Klimamodellen ergeben. Es zeigte sich, dass die Vielfalt der Muster der Gegenwart nicht ausreicht, die Zukunft zu beschreiben. Deshalb wurden zusätzliche extreme Muster, die sogenannten Trans-Wetterlagen, eingeführt. Im Vergleich zu den WETTREG2006-Daten wurden also die Spezifikationen des antreibenden Klimamodells stärker berücksichtigt (Kreienkamp et al. 2010b, Kreienkamp et al. 2011).

Durch diese Trans-Wetterlagen sollte auch versucht werden, der Kritik entgegen zu wirken, dass statistische Klimamodelle aufgrund ihrer Herangehensweise und der Verwendung von Beobachtungsdaten für die Simulation insbesondere der fernen Zukunft 2071 bis 2100 ungeeignet sind.

Die WETTREG-Daten stimmen für alle betrachteten Kennzahlen im Ist-Zustand sowohl flächenhaft betrachtet als auch als Mittel über Baden-Württemberg sehr gut mit den Beobachtungsdaten überein. Die Änderungen zur Zukunft hin können jedoch recht unterschiedlich zwischen den WETTREG-Versionen ausfallen.

So ist z.B. das deutliche Klimasignal der WETTREG2003-Daten bei der Niederschlagssumme des hydrologischen Winterhalbjahres auffällig. Auch zeigen sich teilweise deutliche Unterschiede zwischen den Ergebnissen der WETTREG2006-Daten und der WETTREG2010-Daten bei der Temperatur und beim Niederschlag. Besonders deutlich sind die Unterschiede der beiden Datensätze im hydrologischen Winterhalbjahr. Hier zeigen die WETTREG2006-Daten für die Zukunftsszenarien eine leichte Zunahme der Niederschlagssummen, während bei den WETTREG2010-Daten eine leichte Abnahme zu beobachten ist.

Die deutliche Niederschlagsabnahme im Sommerhalbjahr zeigt, dass die WETTREG-Daten im Zukunftsszenario vor allem im Sommerhalbjahr ein starkes Klimasignal besitzen. Den Ergebnissen der Anzahl von Frosttagen und Sommertagen zu Folge scheint das Klimasignal der WETTREG-Daten bezogen auf die Temperaturextrema recht hoch zu sein. Insbesondere die WETTREG2010-Daten stellen ein Szenario mit sehr hohen Temperaturen dar. Mit der Entwicklung der WETTREG2010-Daten wurde die Tendenz der relativen geringen Temperaturentwicklung in den WETTREG2006-Daten ausgeglichen. Bei den WETTREG-2006-Daten bleiben etwa ab der Mitte des 21. Jahrhunderts die regionalisierte Temperaturentwicklung insbesondere im Sommer hinter den Vorgaben des globalen Modells zurück (Kreienkamp et al. 2010a).

Ein Vergleich der WETTREG2010- und WETTREG2006-Ergebnisse mit den Regionalmodellen REMO und CLM zeigt, dass das Temperatursignal der WETTREG2010-Daten ab Mitte des 21. Jahrhunderts insbesondere im Sommer deutlich über den Regionalisierungen mit den dynamischen Modellen REMO und CLM liegt, während die Werte der WETTREG2006-Daten hier deutlich darunter liegen (LUGV 2010).

Wasserhaushaltssimulationen im Rhein-Einzugsgebiet bestätigen die Unterschiede zwischen den WETTREG2006-Daten und WETTREG2010-Daten, wobei statt den WETTREG2010-Daten die Daten der Vorgängerversion WETTREG2009 verwendet wurde (LUBW 2010, LUBW & LUWG 2012). Die Version WETTREG2010 wurde in Baden-Württemberg innerhalb des KLIWA-Projekts aufgrund der hohen Temperaturen im Zukunftsszenario nicht verwendet. Die Abflüsse auf Basis der WETTREG2006-Daten liegen in der nahen Zukunft deutlich über den Abflüssen der WETTREG2009-Daten, was wohl primär auf den unterschiedlichen Niederschlagsinput zurückzuführen ist. Auch die deutliche Niederschlagszunahme im Winterhalbjahr der nahen Zukunft bei den WETTREG2003-Daten führt zu einer Abflussspitze in den Abflussregimekurven.

Die WETTREG2006-Daten wurden in einer Studie des Umweltbundesamts analysiert (Umweltbundesamt 2007). Dabei wurden sowohl für Deutschland als auch für einzelne Regionen die Parameter Temperatur und Niederschlag für die Klimaszenarien A1B und B1 betrachtet. Die Änderungen der Temperaturen und der Niederschlagssummen vom Ist-Zustand (hier: 1961-1990) zur fernen Zukunft (2071-2100) sind vergleichbar mit den Ergebnissen der vorliegenden Auswertungen. Speziell für den Oberrheingraben wurde die Station Freiburg betrachtet.

Sowohl die Ergebnisse für die Anzahl der Frosttage als auch für die Anzahl der Sommertage an der Station Freiburg zeigen ein vergleichbares Klimasignal und auch vergleichbare absolute Werte wie in der vorliegenden Arbeit.

Das statistische Modell WETTREG wird in Deutschland vielfach für Klimaszenarienrechnungen oder Ensemble-Analysen verwendet. So haben z.B. Innerhalb des Projekts INKLIM A sämtliche Bundesländer (mit Ausnahme Bremen) die Weiterentwicklung der WETTREG-Modelle finanziert beziehungsweise beauftragt (Kreienkamp et al. 2010b). Gerade die sehr gute Übereinstimmung mit Messdaten im Ist-Zustand macht dieses Modell sehr attraktiv. Dabei ist diese Übereinstimmung verfahrensbedingt und lässt somit keine Rückschlüsse für die Zuverlässigkeit des Klimasignals zu.

Grenzen des Modellvergleichs

Bei der Interpretation des Vergleichs der Klimaprojektionen sind die Einschränkungen der statistischen und dynamischen Regionalmodelle insgesamt zu berücksichtigen. Die statistischen Modelle basieren auf den Beobachtungsdaten und den Simulationsergebnissen für die Wetterlagen aus dem Globalmodell. Die dynamischen Regionalmodelle verwenden die Ergebnisse des Globalmodells zum Antrieb an den Modellrändern. Beiden liegt also bereits die Unsicherheiten des Emissionsszenarios und des Globalmodells zugrunde.

Da die dynamischen Regionalmodelle nur vereinfacht die natürlichen Abläufe simulieren können und zudem durch die Modellkette bereits Unsicherheiten vorliegen, ergeben sich Abweichungen zu den Beobachtungsdaten. Diese werden bei den CCLM-Daten durch die Bias-Korrektur verringert. Bei den statistischen Modellen ist dies nicht erforderlich, da auf Beobachtungsdaten aufgesetzt wird. Aber dadurch ist insbesondere die Simulation der fernen Zukunft unsicher.

In dem hier durchgeführten Vergleich werden somit Modelle unterschiedlicher Grundstruktur (dynamische und statistische Modelle) sowie Modelle mit und ohne Bias-Korrektur gemeinsam betrachtet. Aus diesen Gründen sind die Ergebnisse des Vergleichs der WETTREG- und CCLM-Daten mit den Beobachtungsdaten und den Daten der anderen Klimaprojektionen nur als erster Eindruck zu verstehen.

Der Vergleich zeigte, dass die WETTREG- und CCLM-Modelle zwar die Lufttemperatur sowie die räumliche Verteilung des Niederschlags gut und die Niederschlagshöhe im Vergleich zu den Beobachtungsdaten zufriedenstellend simulieren können. Weitere Klimaparameter aber können meist nicht belastbar simuliert werden. Aus diesem Grund sind die Ergebnisse beispielsweise der simulierten Windgeschwindigkeit kritisch zu hinterfragen. Auch die Betrachtungen simulierter Extremwerte (T_{\min} , T_{\max} usw.) sind vorsichtig zu interpretieren, da Extremereignisse durch Klimamodelle nur unzureichend simuliert werden können.

Der hier durchgeführte Vergleich der Ergebnisse der CCLM- und WETTREG-Modelle mit den anderen Klimaprojektionen dient nur einer ersten Einschätzung der Unterschiede. Die Analyse der Mittelwerte über ganz Baden-Württemberg gibt einen Hinweis auf Tendenzen zwischen den Klimaprojektionen, die aber regional verschieden ausfallen können. Gerade für Kennzahlen, deren räumliche Verteilung z.B. für die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen besonders wichtig, ist die regionale Betrachtung der Unterschiede wichtig. Die hier durchgeführten Analysen der Lagegenauigkeit anhand der Abbildungen in den Anlagen kann aufgrund der Größe der Karten allerdings nur einen ersten Eindruck über die erreichte Genauigkeit ermöglichen.

4 Analyse der Kennzahlen auf Basis höherer räumlicher und zeitlicher Auflösungen

Für jede Klimaprojektion und Kennzahl wurde eine zeitliche und räumliche Auflösung gewählt, die sich aus den bereitgestellten Daten und den gewünschten Auswertungen ergibt. Für verschiedene Fragestellungen ist es jedoch sinnvoll, diese Auflösungen zu ändern und somit die Daten räumlich bzw. zeitlich zu aggregieren oder zu disaggregieren. In Kapitel 4.1 wird das Vorgehen zur Veränderung der zeitlichen Auflösung gesuchter Kennzahlen beschrieben. In Kapitel 4.2 wird dagegen dargestellt, wie die Berechnung der unterschiedlichen räumlichen Auflösungen ausgewählter Kennzahlen erfolgt.

4.1 HÖHERE ZEITLICHE AUFLÖSUNG VON KENNZAHLEN

Die maximale zeitliche Auflösung der Klimaparameter auf Basis der ausgewerteten regionalen Klimaprojektionen sind Tageswerte. Einige Kennzahlen wie beispielsweise der Vegetationsbeginn sind nur in jahresweiser Auflösung sinnvoll. Andere Kennzahlen, wie die Niederschlagssumme, können zeitlich weiter diskretisiert werden. Eine zeitliche Diskretisierung auf Monatsbasis wird als zulässig angesehen. Eine höhere zeitliche Auflösung als Monatswerte wird nicht durchgeführt, da die Ergebnisse von Klimaprojektionen nicht datumstreu sind, sondern nur statistisch mögliche Zustände repräsentieren.

4.1.1 AUFBEREITUNG VON KENNZAHLEN AUF MONATSBASIS

Für verschiedene Fragestellungen ist eine zeitliche Auflösung der Kennzahlen auf Jahresbasis nicht ausreichend. Durch die Bereitstellung der Daten in der zeitlichen Auflösung auf Monatsbasis kann hier vielfach ein nützlicher Informationsgewinn erzielt werden. Für die Landwirtschaft ist es beispielsweise interessant, wie sich die Anzahl der Tage ohne Niederschlag in bestimmten Monaten zur Zukunft hin entwickelt (vgl. Abbildung 4-1). Mit diesem Wissen kann beispielsweise der zukünftige Trockenstress oder Bewässerungsbedarf für bestimmte Feldfrüchte abgeschätzt werden. Ein Überblick der auf Monatsbasis bereitgestellten Kennzahlen findet sich in Tabelle 2-3 (Kapitel 2). Anlagen C-01 bis C-07 zeigen Box-Whisker-Diagramme ausgewählter Kennzahlen, die auch für die regionsspezifischen Auswertungen verwendet werden.

Vergleichbar zur Aufbereitung neuer Kennzahlen in Kapitel 3.2 wurden für alle gewünschten Kennzahlen die Perzentile des Auswerteensembles der Klimaprojektionen berechnet. Dabei wurden die Grundlagendaten für die Erzeugung flächenhafter Darstellungen bereitgestellt. Zudem wurden für jede Kennzahl die Flächenmittelwerte von Baden-Württemberg berechnet. Somit wurde für die gesamte Fläche von Baden-Württemberg in der 25x25 km²-Auflösung für jede ausgewählte Kennzahl eine Datei erzeugt, die sowohl die Perzentile der absoluten Werte als auch die Perzentile des Klimasignals für jeden Zeitabschnitt (Ist-Zustand, nahe Zukunft und ferne Zukunft) und jeden Monat beinhaltet.



Abbildung 4-1: „Anzahl der Tage ohne Niederschlag“ über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Monatsbasis

Für die Mittelwerte jeder Kennzahl für Baden-Württemberg wurden Box-Whisker-Plots erstellt. Die Box-Whisker-Plots wurden jeweils sowohl für den Ist-Zustand als auch die beiden Zukunftsszenarien (soweit vorhanden) in einer Grafik zusammengefasst. Dadurch können die einzelnen Kennzahlen für den Ist-Zustand und für die beiden Zukunftsszenarien direkt miteinander verglichen werden. Für jede Kennzahl und Monat wird je eine Grafik erstellt.

Aufgrund des Datenumfanges erfolgt keine Interpretation aller bereitgestellten Kennzahlen auf Monatsbasis. Exemplarisch soll im Folgenden am Beispiel der Kennzahl „Anzahl der Tage ohne Niederschlag“ der Informationsgewinn durch die höhere zeitliche Auflösung gezeigt werden (vgl. Abbildung 4-1). Weitere Auswertungen von monatsweise bereitgestellten Kennzahlen erfolgen in Kapitel 4.2.

4.1.2 MONATSWEISE ANALYSE DER ANZAHL DER TAGE OHNE NIEDERSCHLAG

Ist-Zustand (1971-2000)

Die Klimaprojektionen unterschätzen im Ist-Zustand die Beobachtungsdaten bezüglich der Kennzahl „Anzahl der Tage ohne Niederschlag“ in allen Monaten. In den Wintermonaten ist die Streuung der Simulationsergebnisse der Klimaprojektionen höher als in den Sommermonaten. Zudem ist die Abweichung zu den Beobachtungsdaten im Winter mit etwa 4 Tagen pro Monat höher als im Sommer mit etwa nur 2 Tagen pro Monat. In den Monaten Juli bis November treten in Baden-Württemberg die häufigsten Tage ohne Niederschlag auf. Der höchste Wert des Medians liegt laut Klimaprojektionen bei etwa 19,1 Tagen ohne Niederschlag pro Monat im Oktober.

Nahe Zukunft (2021-2050) und Ferne Zukunft (2071-2100)

Zur nahen und fernen Zukunft hin zeigt sich ein vergleichbares, aber monatlich unterschiedliches Verhalten der Zu- und Abnahmen von Tagen ohne Niederschlag. Von Januar bis April zeigt sich eine tendenzielle Abnahme der Tage ohne Niederschlag. Von Juni bis September nehmen die Tage ohne Niederschlag dagegen zu. Ab November wird wieder eine Abnahme der Tage ohne Niederschlag deutlich.

Die monatsweise Auswertung der Kennzahl „Tage ohne Niederschlag“ zeigt, dass durch die Unterteilung des Jahres in Einzelmonate ein deutlicher Informationsgewinn erfolgt. Die Abnahme der Tage ohne Niederschlag erfolgt primär in den Wintermonaten, während sich in den Sommermonaten eine leichte Zunahme der Tage ohne Niederschlag zeigt. Weiterhin kann gefolgert werden, dass nicht nur die Niederschlagssummen zur Zukunft hin im Sommerhalbjahr abnehmen und im Winterhalbjahr zunehmen (vgl. Kennzahl „Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr“ und „Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr“; Abbildung 3-26), sondern auch insgesamt über das gesamte Jahr die Anzahl der Tage zunehmen, an denen Niederschlag fällt.

4.1.3 JAHRESZEITLICHE ANALYSE DER NIEDERSCHLAGSSUMME

Eine jahreszeitliche Analyse von Kennzahlen wird anhand der Kennzahl „Niederschlagssumme“ durchgeführt. Für die Niederschlagssumme liegen bereits verschiedene zeitliche Diskretisierungen vor. Die Kennzahlen „Niederschlagssumme Kalenderjahr“, „Niederschlagssumme hydrologisches Sommerhalbjahr“ und „Niederschlagssumme hydrologisches Winterhalbjahr“ wurden im Endbericht des Vorgängerprojekts „Vergleich regionaler Klimaprojektionen für Baden-Württemberg“ diskutiert. Zudem wurden hier die Niederschlagssummen in monatlicher Auflösung bereitgestellt.

Eine Aggregation von Perzentilen von Monatswerten ist jedoch statistisch nicht korrekt, um daraus die Niederschlagssummen der Jahreszeiten abzuleiten. Daher wurden die Jahresquartale der Niederschlagssumme neu berechnet und die Perzentilwerte entsprechend abgeleitet.

Abbildung 4-2 gibt einen Überblick über die Ergebnisse für die vier Quartale. Es wurden Box-Whisker-Darstellungen jedes Quartals erstellt. Zudem wurden die Perzentilwerte für flächenhafte Auswertungen zur Verfügung gestellt. Wie bereits erwähnt, ist bei der Änderung der Perzentilwerte vom Ist-Zustand und nahen Zukunft zur fernen Zukunft hin zu beachten, dass die Perzentilwerte auf einer verschiedenen Anzahl von Klimaprojektionen beruhen. Während im Ist-Zustand und in der nahen Zukunft 20 Klimaprojektionen zur Verfügung stehen, reduziert sich die Anzahl für die ferne Zukunft auf 14 Klimaprojektionen. Ein direkter Vergleich der Perzentilwerte der nahen Zukunft zur fernen Zukunft ist also nur unter diesem Vorbehalt möglich.

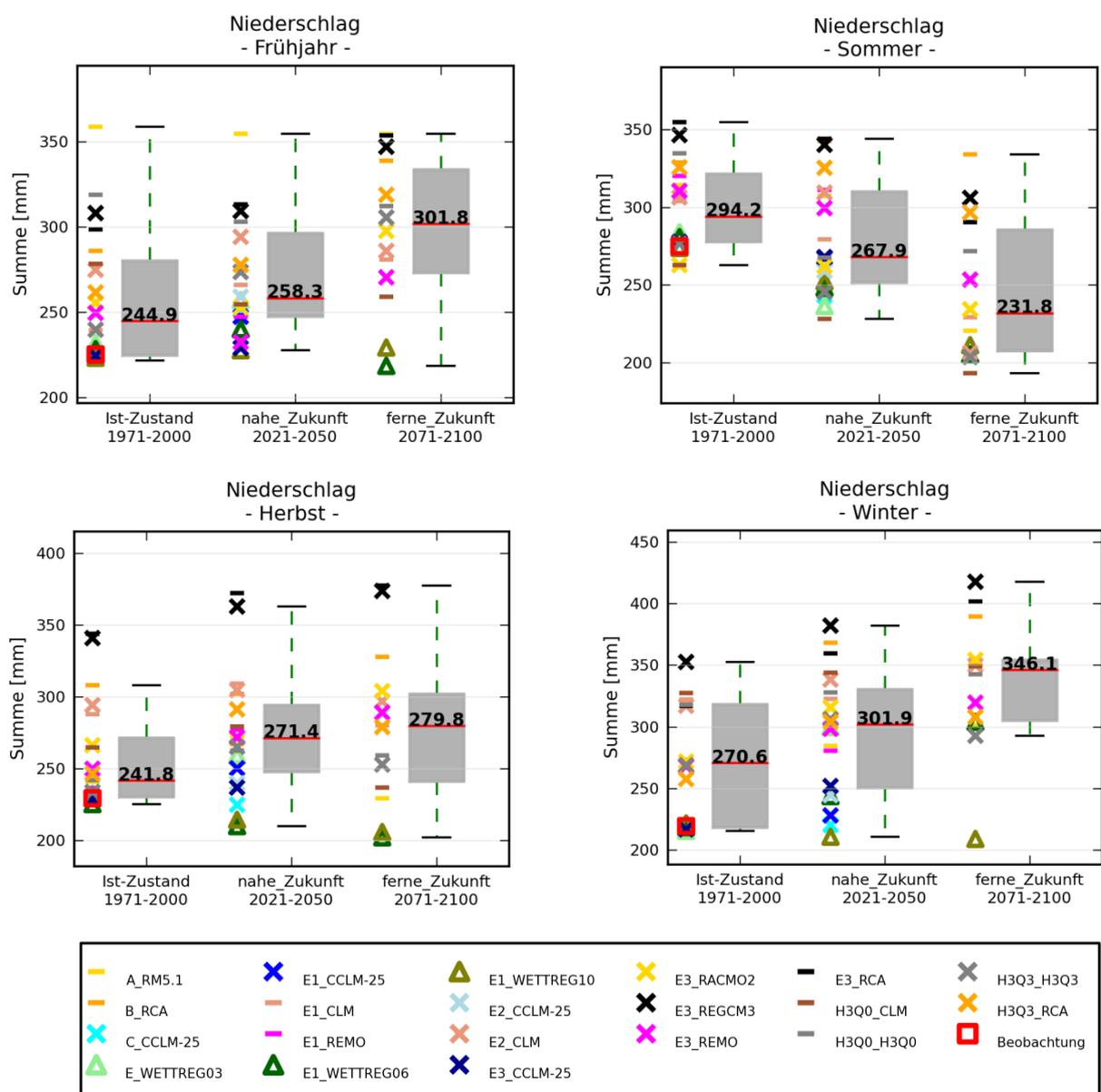


Abbildung 4-2: „Niederschlagssumme“ über Baden-Württemberg für 20 Klimaprojektionen des Ist-Zustands (1971-2000), der nahen Zukunft (2021-2050) und für 15 Klimaprojektionen der fernen Zukunft (2071-2100) auf Basis der meteorologischen Jahreszeiten

Ist-Zustand (1971-2000)

Auf Basis der Klimaprojektionen fällt der meiste Niederschlag mit 294 mm in den Sommermonaten (Juni bis August), während im Frühjahr (März bis Mai) und im Herbst (September bis November) mit etwa 240 mm die geringsten Niederschläge fallen.

Das meteorologische Winterhalbjahr weist eine Niederschlagssumme von etwa 270 mm auf. Insgesamt überschätzen die Klimaprojektionen damit die Beobachtungsdaten in allen Jahreszeiten. Laut Beobachtungsdaten fallen im Frühjahr, Herbst und Winter etwa zwischen 220 mm und 230 mm und in den Sommermonaten etwa 270 mm. Damit liegen die Ergebnisse der Klimaprojektionen insbesondere in den Wintermonaten um mehr als 20 % über den Werten der Beobachtungsdaten. Trotz der Unterschiede wird die jahreszeitliche Änderung der Niederschlagsmenge von den Klimaprojektionen gut wiedergegeben. Die Streuung der Ergebnisse der Klimaprojektionen ist in allen Jahreszeiten recht ähnlich.

Nahe Zukunft (2021-2050) und Ferne Zukunft (2071-2100)

Für das Frühjahr des Zukunftsszenarios zeigt sich eine deutliche Zunahme der Niederschlagsmengen, insbesondere zur fernen Zukunft hin. Dagegen wird in den Sommermonaten eine mindestens ebenso hohe Abnahme der Niederschlagsmengen deutlich. Im Herbst dagegen zeigt sich wiederum eine (moderate) Zunahme der Niederschlagsmengen, ebenso im Winter, jedoch mit einer stärkeren Niederschlagszunahme.

Damit ändern sich auch deutlich die Verhältnisse der Niederschlagssummen zwischen den Jahreszeiten. In der nahen Zukunft zeigen sich nur geringe jahreszeitliche Unterschiede der Niederschlagssummen. In der fernen Zukunft erhalten die Sommermonate, mit den höchsten Niederschlagssummen im Ist-Zustand, nun die geringsten Summen (230 mm), gefolgt vom Herbst (280 mm), dem Frühjahr (300 mm) und den Wintermonaten (350 mm). Damit werden in der fernen Zukunft um 50 % höhere Niederschläge für die Wintermonate als für die Sommermonate berechnet. Die Größenverhältnisse von Sommer- und Wintermonate drehen sich also vom Ist-Zustand zur fernen Zukunft um.

4.2 HÖHERE RÄUMLICHE AUFLÖSUNG VON KENNZAHLEN

Die grundlegende räumliche Auflösung für 20 Klimaprojektionen stellt je ein Raster mit einer Maschenweite von 25x25 km², für 4 Klimaprojektionen ein Raster von 7x7 km² dar. Für die Interpretation der Ergebnisse bietet es sich an, zuerst einen Überblick über die Ergebnisse zu bekommen, in dem Flächenmittelwerte für ganz Baden-Württemberg erzeugt werden.

Für Fragestellungen, die räumlich detailliertere Daten benötigen, ist diese räumliche Auflösung jedoch nicht geeignet. Eine Diskretisierung der räumlichen Auflösung erhöht aber im Gegenzug deutlich die Datenmenge, die berechnet und insbesondere interpretiert werden sollte. In Kapitel 4.2.1 wird die regionsspezifische Auswertung von Kennzahlen sowohl auf Basis von Naturräumen als auch auf Basis von Flusseinzugsgebieten beschrieben. In Kapitel 4.2.2 wird dargestellt, wie für ausgesuchte Kennzahlen und Perzentile eine Interpolation auf ein 1x1 km Raster erfolgt.

4.2.1 REGIONSSPEZIFISCHE AUSWERTUNG VON KENNZAHLEN

Die bisherigen Auswertungen des Ensembles aus Klimaprojektionen basieren hauptsächlich auf der Analyse der Flächenmittelwerte für die gesamte Fläche von Baden-Württemberg.

Da die Daten aber auf einem 25x25 km²-Raster (die CCLM-Daten sogar auf einem 7x7 km²-Raster) vorliegen, können für Teilgebiete detailliertere Auswertungen durchgeführt werden. Durch die regionsspezifische Bereitstellung der Kennzahlen sind zusätzliche Informationen verfügbar, um die Regionen zu identifizieren, in denen der Klimawandel verstärkt auftreten kann und in denen schwerpunktmäßig Anpassungsmaßnahmen zu ergreifen sind.

Acht ausgewählte Kennzahlen werden sowohl für sechs Flusseinzugsgebiete als auch für sechs Naturräume innerhalb von Baden-Württemberg ausgewertet (vgl. Tabelle 4-1). Eine Darstellung der ausgewählten Flusseinzugsgebiete und Naturräume findet sich in Anlage A. Die Ergebnisdarstellung der Monatswerte für die gesamte Fläche von Baden-Württemberg erfolgt durch die Box-Whisker-Abbildungen. Bei den regionalen Auswertungen auf jährlicher Basis wird für jede Region ein Box-Whisker-Plot erstellt. Bei den regionalen Auswertungen auf monatlicher Basis wurden dagegen auf Grund der hohen Anzahl an Werten die Ergebnisse in Form von Tabellen dargestellt. Zudem wurden die Daten als Excel-Dateien geliefert.

Die Diagramme für die Analyse der obigen Kennzahlen auf Monatsbasis finden sich in den Anlagen C-01 bis C-07. Anlagen E-01 bis E-08 zeigen die Box-Whisker-Diagramme für die regionsspezifischen Auswertungen. Die absoluten Ergebniswerte der folgenden regionsspezifischen Analyse basieren auf dem 50. Perzentil der Klimaprojektionen und können aus den Box-Whisker-Diagrammen entnommen werden. Die Änderungen zur Zukunft hin ist dagegen das 50. Perzentil der Klimasignale aller Klimaprojektionen, berechnet nach dem Delta-Change-Verfahren und muss folglich nicht der Differenz des 50. Perzentils aus den Box-Whisker-Diagrammen entsprechen.

Tabelle 4-1: Kennzahlen für die regionsspezifische Auswertung

Parameter	Zeitl. Auflösung	Flusseinzugsgebiete	Naturgroßräume	Gesamt-BW
Mitteltemperatur	Monatlich	X	X	X
	Jährlich	X	X	
Niederschlagssumme	Monatlich	X	X	X
	Jährlich	X	X	
Vegetationsbeginn	Jährlich		X	
Frosttag	Monatlich		X	X
	Jährlich		X	
Sommertag	Monatlich		X	X
	Jährlich		X	
Anzahl der Tage ohne Niederschlag	Monatlich	X		X
	Jährlich	X		
Anzahl der Tage mit Starkniederschlag	Monatlich	X		X
	Jährlich	X		
Veränderlichkeit der Niederschlagssumme	Monatlich	X		X
	Jährlich	X		

Monatsmitteltemperatur

Analyse auf Monatsbasis (Anlage C-01)

Die monatsweise Auswertung der Flächenmittel der Lufttemperatur über Baden-Württemberg zeigt erwartungsgemäß einen deutlichen Jahresgang mit einem Temperaturmaximum im Juli (17,5 °C) und einem Temperaturminimum im Januar (-0,1 °C) auf Basis der Klimaprojektionen.

Die Ergebnisse der Klimaprojektionen stimmen im Median sehr gut mit den Beobachtungsdaten in allen Monaten überein. Dennoch weichen das „wärmste“ Modell vom „kältesten“ Modell um etwa 3 °C für alle Monate ab.

Zur Zukunft hin steigt in allen Monaten die Temperatur im Mittel an. In der nahen Zukunft wird im Januar die höchste Temperaturzunahme mit etwa 1,5 °C verzeichnet, während in den Frühjahrs- und Sommermonaten Zunahmen mit teilweise nur 0,4 °C (März) berechnet werden. Zur fernen Zukunft hin wird eine weitere Temperaturerhöhung augenscheinlich.

Nun werden sowohl in den Sommer- als auch in den Wintermonaten Temperaturerhöhungen bis 3,9 °C (Dezember) deutlich. Im Frühjahr dagegen bleiben die Temperaturerhöhungen bei etwa 2 °C. Die Bandbreite der Simulationsergebnisse der Klimaprojektionen nimmt für die Zukunftsszenarien leicht zu.

Regionsspezifische Analyse der Jahreswerte (Naturgroßräume) (Anlage E-01)

Erwartungsgemäß wird in der Region Oberrhein (in Anlage E als „Oberrhein“ bezeichnet) mit 9,9 °C die höchste Jahresmitteltemperatur für den Ist-Zustand simuliert. Auch die Region Neckar- und Tauber-Gäuplatten („Neckar-Tauber“) zeigt ähnlich hohe Jahresmitteltemperaturen. Die niedrigsten Temperaturen ergeben sich für die Schwäbische Alb („Schwäbische Alb“) mit 7,5 °C. Die Regionen Schwarzwald („Schwarzwald“), Alpenvorland („Alpenvorland“), und Schwäbisches Keuper-Lias-Land & Obere Gäue („Keuper-Lias & Gäue“) weisen ähnlich niedrige Temperaturen auf. Auch die Temperaturen auf Basis der Beobachtungsdaten bestätigen diese Verteilung.

Der Temperaturanstieg zur Zukunft hin zeigt nur geringe regionale Unterschiede. Zur nahen Zukunft hin ergeben sich im Mittel keinerlei Unterschiede zwischen den Regionen mit einer generellen Zunahme von +1,1 °C. Zur fernen Zukunft weisen die nördlichen Regionen „Neckar-Tauber“ und „Keuper-Lias & Gäue“ mit +3,0 °C etwas geringere Temperaturzunahmen auf als die südliche Region „Alpenvorland“ (+3,2 °C).

Regionsspezifische Analyse der Jahreswerte (Flusseinzugsgebiete) (Anlage E-01)

Bei der Flussgebietsunterteilung zeigt das Schwarzwald-Einzugsgebiet („Schwarzwald-EZG“) die höchsten Jahresmitteltemperaturen mit etwa 9,1 °C. Trotz der Höhen des Schwarzwalds wirkt sich die warme Oberrheinebene deutlich auf die Mitteltemperatur aus. Auch das Tauber-Einzugsgebiet („Tauber-EZG“) und das Neckar-Einzugsgebiet („Neckar-EZG“) weisen recht hohe Mitteltemperaturen mit 8,7 °C und 8,6 °C auf. Das Einzugsgebiet der baden-württembergischen Donau („DonauBW-EZG“) mit großen Teilen der Schwäbischen Alb zeigt mit 7,7 °C die geringste Jahresmitteltemperatur. Ähnlich niedrig sind die Temperaturen im Hochrhein-Einzugsgebiet („Hochrhein-EZG“) und im Bodensee-Einzugsgebiet („Bodensee-EZG“).

Bei den Flusseinzugsgebieten zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei den Naturgroßräumen. In der nahen Zukunft können keine regionalen Unterschiede ausgemacht werden, während zur fernen Zukunft wieder die nördlichen Regionen geringere Temperaturzunahmen aufweisen (+3,0 °C) als die südlichen Regionen (+3,2 °C). Damit zeigt sich, dass das Klimasignal überregional etwa gleich groß ausfällt, aber dass die zukünftigen Temperaturen von den regionalen Topographien bestimmt werden. Dies bedeutet, dass es in den Regionen, in denen heute schon hohe Temperaturen vorliegen, zukünftig noch wärmer wird. Dagegen werden die heute kühleren Regionen zwar zukünftig wärmer, bleiben aber kühler in Relation zu anderen Landesteilen.

Niederschlagssumme

Analyse auf Monatsbasis (Anlage C-02)

Die Analyse der Niederschlagssumme wurde bereits in Kapitel 4.1.2 anhand der jahreszeitlichen Niederschlagssummen vorgenommen, weshalb hier nur kurz die wichtigsten Auffälligkeiten erwähnt werden.

Die höchsten monatlichen Niederschlagswerte im Ist-Zustand werden laut Klimaprojektionen im Juni und Juli mit bis zu 103,1 mm simuliert. Die geringsten Niederschlagsmengen fallen im Frühjahr und Herbst mit Werten zwischen 70 mm und 80 mm. Generell überschätzen die Klimaprojektionen die Beobachtungsdaten. Insbesondere in den Wintermonaten treten Überschätzungen bis zu +20 % auf.

Die Änderungen der Niederschlagssummen zur Zukunft hin sind für die Monate recht verschieden. Von November bis April nehmen die Niederschlagssummen zu, von Juni bis August wird dagegen eine Abnahme simuliert. Die maximale Niederschlagszunahme von etwa +40 % (ferne Zukunft) im Mittel zeigt sich im April, bei einer jedoch sehr großen Schwankungsbreite der Modellergebnisse. Die größte Abnahme wird für den Juli mit -32 % (ferne Zukunft) simuliert. In den Winter- und Sommermonaten sind das Klimasignal und dessen Richtung für alle Klimaprojektionen deutlich, in den Übergangsjahreszeiten dagegen uneinheitlich. Generell zeigt sich eine große Schwankungsbreite der simulierten monatlichen Niederschlagssummen.

Regionsspezifische Analyse der Jahreswerte (Naturgroßräume) (Anlage E-02)

Der Naturraum Schwarzwald zeigt mit über 1434 mm die höchsten Jahresniederschlagssummen. Alle anderen Regionen weisen mittlere Jahresniederschläge unter 1100 mm auf. Am wenigsten Niederschlag wird für die Region „Neckar-Tauber“ mit 897 mm simuliert.

Alle Regionen zeigen für die Zukunftsszenarien eine Zunahme der jährlichen Niederschlagssummen. In der nahen Zukunft ergeben sich für die nördlichen Regionen Neckar-Tauber sowie Keuper-Lias & Gäue mit +4,4 % bzw. +4,3 % größere Niederschlagszunahmen als in den südlichen Regionen. Allerdings sind die absoluten Niederschlagssummen in den nördlichen Regionen auch geringer. Für die ferne Zukunft ist die Niederschlagszunahme geringer als in der nahen Zukunft mit einem Maximum in der Region Neckar-Tauber (+2,3 %) und einem Minimum in der Region Schwarzwald (+1,3 %).

Regionsspezifische Analyse der Jahreswerte (Flusseinzugsgebiete) (Anlage E-02)

Bei der flusseinzugsgebietsbezogenen Auswertung der Niederschlagssumme zeigt das Schwarzwald-EZG mit 1217 mm die höchsten Werte an. Auch im Bodensee-EZG und im Hochrhein-EZG werden Werte über 1100 mm im Mittel simuliert. Das Neckar-EZG und das DonauBW-EZG weisen dagegen Summen unter 1000 mm auf, das Tauber-EZG sogar nur etwa 870 mm. In allen Einzugsgebieten zeigen die Beobachtungsdaten niedrigere Niederschlagssummen an, insbesondere im Tauber-EZG mit unter 700 mm.

Vergleichbar zu den Naturräumen weisen die nördlichen Flusseinzugsgebiete in der nahen Zukunft mit +4,6 % (Tauber-EZG) größere Niederschlagszunahmen auf als die südlichen Gebiete (Donau-BW, +3,3 %). Zur fernen Zukunft hin zeigt das Tauber-EZG (+3,3 %) die größten und das Schwarzwald-EZG (+1,2 %) die geringsten Niederschlagszunahmen.

Die Streuung der Modellergebnisse ist jedoch insgesamt sehr hoch. Es existieren mehrere Klimaprojektionen, die für die Zukunft eine Abnahme der Niederschlagssumme simulieren.

Vegetationsbeginn

Regionsspezifische Analyse der Jahreswerte (Naturgroßräume) (Anlage E-03)

Der früheste Vegetationsbeginn wird mit 84,1 Tagen seit Jahresbeginn (24. März) in der Region Oberrhein simuliert. Die Region Neckar-Tauber zeigt einen ähnlich frühen Vegetationsbeginn. In der Region Schwäbische Alb ergibt sich ein um etwa 12 Tage späterer Vegetationsbeginn. Die Regionen Schwarzwald, Alpenvorland sowie Keuper-Lias & Gäue weisen einen ähnlich späten Vegetationsbeginn auf. Die Beobachtungsdaten zeigen einen geringfügig früheren Vegetationsbeginn.

Zur Zukunft hin ist in allen Regionen ein früherer Vegetationsbeginn im Vergleich zum Ist-Zustand erkennbar. Wird in der nahen Zukunft der Vegetationsbeginn um 4 bis 6 Tage vorverlegt, so tritt laut Klimaprojektionen in der fernen Zukunft der Vegetationsbeginn bereits um etwa 12 Tage (Oberrhein) bis 16 Tage (Schwäbische Alb) früher ein. Dabei zeigen die Regionen mit dem späteren Vegetationsbeginn die größeren Änderungen zur Zukunft hin.

Frosttag

Analyse auf Monatsbasis (Anlage C-03)

Die Auswertung der Kennzahl „Frosttag“ für die Sommermonate ist nicht sinnvoll. Auch die Monate Mai und September weisen nur im Ist-Zustand minimale Anzahlen von Frosttagen auf. Das Maximum der Frosttage liegt mit 20,7 Tagen (Ist-Zustand) im Januar. Dabei weisen die Klimaprojektionen im Vergleich zu den Beobachtungsdaten für nahezu alle Monate eine Unterschätzung der Anzahl an Frosttagen von bis zu 3 Tagen (Februar und April) auf.

In allen Monaten, in denen im Ist-Zustand Frosttage auftreten, nehmen die Anzahl der Frosttage vor allem zur fernen Zukunft hin deutlich ab. Während sich im Januar und Februar die Anzahl der Frosttage etwa halbieren, ist in den anderen Monaten sogar eine weitaus höhere Abnahme zu verzeichnen. Laut Simulationsergebnissen wird selbst im Januar in der fernen Zukunft im Mittel nur knapp jeder dritte Tag ein Frosttag sein.

Regionsspezifische Analyse der Jahreswerte (Naturgroßräume) (Anlage E-04)

Mit annähernd 97 Frosttagen auf Basis der Klimaprojektionen zeigt die Region Schwäbische Alb die höchste Zahl an Frosttagen im Jahresmittel. Auch die Regionen Alpenvorland, Schwarzwald, Keuper-Lias & Gäue simulieren über 80 Frosttage im Ist-Zustand. Dagegen zeigen Oberrhein mit 61,8 Tage und Neckar-Tauber mit 71,1 Tagen die geringsten Anzahlen an Frosttagen im Jahresmittel. Die Beobachtungsdaten weisen etwa 10 Frosttage mehr pro Region aus.

In den Zukunftsszenarien nehmen die Frosttage in den Naturgroßräumen deutlich ab. Bis zur fernen Zukunft zeigt sich mindestens eine Halbierung der Frosttage. Je höher die Ausgangszahl der Frosttage im Ist-Zustand, desto stärker ist die absolute Abnahme der Frosttage zur Zukunft hin. In der Region Oberrhein werden für die ferne Zukunft nur noch etwa 26 Frosttage im Jahresmittel simuliert.

Sommertag

Analyse auf Monatsbasis (Anlage C-04)

Die monatliche Auswertung der Kennzahl „Sommertag“ ist für die Wintermonate nicht sinnvoll. Nur von April bis Oktober treten Sommertage „messbar“ auf. Das Maximum bei den Klimaprojektionen liegt mit 8,8 Tagen im Juli. Bei den Beobachtungsdaten ergibt sich für das Maximum im Juli und August sogar ein Wert von etwa 10 Tagen. Die Beobachtungsdaten zeigen insgesamt meist eine höhere Anzahl an Sommertagen als die Klimaprojektionen für den Ist-Zustand an. Die Schwankung der Klimaprojektionen ist für alle Monate mit Sommertagen recht groß.

Für die Zukunftsszenarien ergibt sich eine Zunahme der Anzahl von Sommertagen. Ist die Zunahme zur nahen Zukunft noch gering bzw. moderat, so ist für die ferne Zukunft mit einer massiven Zunahme an Sommertagen zu rechnen. Im Juli und August steigt die Anzahl auf über 18 Tage in der fernen Zukunft. Die Streuung der Modellergebnisse ist zwar sehr hoch, die Tendenz der Zunahme an Sommertagen jedoch recht eindeutig.

Regionsspezifische Analyse der Jahreswerte (Naturgroßräume) (Anlage E-05)

In der Region Oberrhein werden laut Klimaprojektionen 39,8 Sommertage pro Jahr simuliert. 18 Tage weniger zeigt die Region Schwäbische Alb und auch die Regionen Schwarzwald, Alpenvorland und Keuper-Lias & Gäue weisen eine ähnlich niedrige Anzahl von unter 27 Sommertagen im Jahresmittel aus. Diese Ergebnisse der Klimaprojektionen stimmen gut mit den Beobachtungsdaten überein.

Zur Zukunft hin nehmen die Sommertage im Jahresmittel in den Naturgroßräumen zu. In der nahen Zukunft werden zwischen 9 und 12 zusätzliche Sommertage simuliert. In der fernen Zukunft zeigt sich dann eine deutliche Zunahme um über 30 Tage in allen Regionen. Maximal ergeben sich 85 Sommertage im Jahresmittel in der fernen Zukunft in der Region Oberrhein, wo auch in der nahen und fernen Zukunft die größten Zunahmen an Sommertagen auftreten.

Tage ohne Niederschlag

Analyse auf Monatsbasis (Anlage C-05, Abbildung 4-1)

Die Ergebnisse der monatsweisen Auswertung der Kennzahl „Tage ohne Niederschlag“ wurden bereits zu Beginn von Kapitel 4.1.1 erläutert und werden hier ergänzend dargestellt. Im Ist-Zustand gibt es bei der Anzahl der Tage ohne Niederschlag nur geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Monaten. Die höchsten Anzahlen werden auf Basis der Klimaprojektionen für die Monate Juli bis Oktober simuliert, mit einem Maximum im Oktober von 19,1 Tagen. Die Beobachtungsdaten zeigen sogar um 1 bis 3 Tage höhere Anzahlen an und liegen damit am oberen Ende der Wertemenge der Klimaprojektionen.

Für die nahe Zukunft ergeben sich nur geringe Änderungen der Anzahl an Tagen ohne Niederschlag im Vergleich zum Ist-Zustand. Zudem ist das Klimasignal für die Änderungen in der Zukunft nicht immer eindeutig. Beispielsweise tritt im Mai eine Zunahme der Tage ohne Niederschlag in der nahen Zukunft, aber eine Abnahme zur fernen Zukunft hin auf. In der nahen Zukunft liegen gerade die Werte der CCLM-Modelle am oberen Rand der auftretenden Modellergebnisse.

Da aber CCLM-Modellergebnisse für die ferne Zukunft nicht vorliegen, ist das beobachtete Verhalten zumindest teilweise auf die unterschiedliche Anzahl von Klimaprojektionen in der nahen und fernen Zukunft zurückzuführen. In der fernen Zukunft zeigt sich eine Abnahme der Tage ohne Niederschlag von November bis April und eine Zunahme von Juni bis September. Somit sind die Unterschiede von Monat zu Monat in der fernen Zukunft mit Werten zwischen 12,8 Tagen (Dezember) und 20,9 Tagen (August) deutlich größer als im Ist-Zustand.

Regionsspezifische Analyse der Jahreswerte (Flusseinzugsgebiete) (Anlage E-06)

Im Tauber-EZG werden fast 205 Tage ohne Niederschlag im Jahresmittel simuliert, im Schwarzwald-EZG 186 Tage. Somit zeigen alle Einzugsgebiete eine recht ähnliche Anzahl von Trockentagen.

Allerdings liegen diese auf den Klimaprojektionen basierten Werte um bis zu 40 Tagen unter den Ergebnissen der Beobachtungsdaten. Diese Diskrepanz zeigte sich bereits bei der Niederschlagssumme. Es fällt laut Modelldaten nicht nur mehr Niederschlag, sondern auch an mehreren Tagen.

Zur Zukunft hin gibt es wenige Änderungen zwischen den Einzugsgebieten. Es wird ein minimaler Anstieg der Tage ohne Niederschlag in der nahen Zukunft im Jahresmittel simuliert. Zur fernen Zukunft hin ist dieser Anstieg etwas höher. Allerdings lassen mehrere Klimaprojektionen auch auf eine Abnahme der Tage ohne Niederschlag schließen. Das Tauber-EZG zeigt mit -0,2 Tagen (nahe Zukunft) und +1,9 Tagen (ferne Zukunft) die geringsten Zunahmen an Tagen ohne Niederschlag. Maximal werden +8 Tage (Hochrhein-EZG, ferne Zukunft) verzeichnet.

Tage mit Starkniederschlag

Analyse auf Monatsbasis (Anlage C-06)

Die Häufigkeiten der Tage mit Starkniederschlag pro Monat sind generell sehr gering und liegen in allen Monaten bei im Mittel maximal 0,5 Tage pro Monat und im Maximum bei unter 1 Tag pro Monat. Die Ergebnisse der Klimaprojektionen und die Ergebnisse der Beobachtungsdaten stimmen im Mittel recht gut überein. Im Juli werden im Ist-Zustand die meisten (0,5 Tage) und im April die wenigsten Tage (0,1 Tage) mit Starkniederschlag simuliert.

Durch die geringe Anzahl der Tage mit Starkniederschlag pro Monat ist eine deutliche Änderung zur Zukunft hin nur schwer auszumachen. Bis auf die Monate Mai bis August zeigt sich eine leichte Zunahme der Anzahl von Tagen mit Starkniederschlag zur fernen Zukunft.

Regionsspezifische Analyse der Jahreswerte (Flusseinzugsgebiete) (Anlage E-07)

Die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag im Jahresmittel ist von Region zu Region sehr unterschiedlich. In den nördlichen weniger reliefierten Regionen werden von den Klimaprojektionen im Jahresmittel minimal 1,3 Tage (Tauber-EZG) berechnet. In den süd- und südwestlichen Regionen liegen die Werte zwischen 5 und 6 Tagen. Die Werte der Beobachtungsdaten liegen in einem ähnlichen Wertebereich.

Zur Zukunft hin zeigt sich eine Zunahme der Tage mit Starkniederschlag im Jahresmittel in allen Regionen.

Die geringsten Zunahmen für nahe und ferne Zukunft weist das Einzugsgebiet Tauber auf (+0,3 Tage bzw. +0,6 Tage). Die größten Zunahmen der Tage mit Starkniederschlag im Jahresmittel sind im Einzugsgebiet Hochrhein zu finden (+1,0 Tage bzw. +1,7 Tage).

Veränderlichkeit der Niederschlagssumme

Analyse auf Monatsbasis (Anlage C-07)

Das auffälligste Merkmal bei der monatlichen Auswertung der Veränderlichkeit der Niederschlagssumme ist die hohe Diskrepanz in einigen Monaten zwischen Beobachtungsdaten und Klimaprojektionen. Bis auf die Sommermonate Juni bis September sowie November liegen die Beobachtungsdaten am oberen Ende der Ergebnisse der Klimaprojektionen.

So werden Veränderlichkeiten auf Seiten der Beobachtungsdaten bis über 60 % (Oktober) registriert, während bei den Klimaprojektionen das Maximum unter 50 % liegt (September). Bei den Klimaprojektionen dagegen zeigen sich geringe Unterschiede zwischen den Veränderlichkeiten von Monat zu Monat.

Für die Zukunftsszenarien sind lediglich Tendenzen erkennbar. Oft zeigt sich eine uneinheitliche Richtung des Klimasignals von naher und ferner Zukunft. Generell zeigt sich in den Wintermonaten eine tendenzielle aber nur leichte Abnahme der Niederschlagsveränderlichkeit, während in den Sommermonaten dagegen eine leichte Zunahme simuliert wird.

Regionsspezifische Analyse der Jahreswerte (Anlage E-08)

Bei der Veränderlichkeit der Niederschlagssumme im Jahresmittel pro Region zeigen sich wenig regionale Unterschiede. Die Werte für den Ist-Zustand liegen zwischen 12,3 % (Bodensee-EZG) und 13,1 % (Tauber-EZG) auf Basis der Klimaprojektionen. Die Beobachtungsdaten weisen wie bei der monatsweisen Auswertung höhere Werte der Veränderlichkeit des Niederschlags auf im Vergleich zu den Klimaprojektionen (bis zu 3 % höhere Werte).

Für die Zukunftsszenarien zeigt sich eine geringfügige Zunahme der Niederschlagsveränderlichkeit in den Regionen. Bis zur fernen Zukunft treten Zunahmen zwischen 0,1 % und 1,6 % auf. Die geringen Abnahmen von der nahen zur fernen Zukunft in der Region Schwarzwald-EZG sind wohl auf die unterschiedliche Anzahl der verwendeten Klimaprojektionen zurückzuführen. Die maximale Veränderlichkeit findet sich für die nahe und ferne Zukunft in der Region Bodensee-EZG mit +1,0 % bzw. +1,6 %.

4.2.2 INTERPOLATION AUF EIN 1X1 KM RASTER

Alle bisher vorgestellten Ergebnisse der Klimaprojektionen liegen für ein 25x25 km²-Raster vor (ausgenommen der vier CCLM-Ergebnisse, die zusätzlich für ein 7x7 km²-Raster vorliegen). Der Wert einer für eine Rasterzelle stellt dabei jeweils den mittleren Wert für die gesamte Fläche der betreffenden Rasterzelle dar.

Die Visualisierung der Daten in dieser räumlichen Auflösung hätte zur Folge, dass auf den Perzentilkarten die 25x25 km²-Rasterstruktur deutlich sichtbar wäre. Für eine höhere Anschaulichkeit der Ergebnisse wurden die Perzentilkarten aber nicht auf Rasterbasis erzeugt, sondern als interpolierte Karten. Dadurch ergeben sich Farbverläufe, die die Perzentilkarten wesentlich anschaulicher sowie leichter interpretierbar machen. Für die Interpolation der rasterbasiert vorliegenden Modellergebnisse wurden Spline-Funktionen verwendet.

Bei einer weitergehenden Verwendung dieser interpolierten Perzentilkarten darf nicht vergessen werden, dass die eigentliche räumliche Auflösung und somit die höchste räumliche Genauigkeit der Ursprungsdaten bei einem Raster von 25x 25 km² (bzw. bei den ausgewählten CCLM bei 7x7 km²) liegt (vgl. Abbildung 3-2).

In der Bereitstellung der digitalen Daten der hier ausgewerteten Klimaprojektionen werden nur die Werte für den Mittelpunkt der Rasterzellen abgegeben. Sowohl die ursprünglichen Ergebnisse der bereitgestellten Klimaprojektionen als auch die Ergebnisse der durchgeführten Auswertungen liegen somit gleich großen Rastern vor. Die Auswertungen auf Basis der Rasterzellen besitzen damit die maximale Genauigkeit, die die Klimaprojektionen liefern. Nur die Perzentilkarten sind optisch höher aufgelöst.

Um zu überprüfen, welchen Einfluss die Bereitstellung der Ergebnisse auf einem 25 x 25 km² Raster im Vergleich zu den weitergehend interpolierten Daten haben, wurden beispielhafte Vergleiche durchgeführt.

Durch die Interpolation der Daten von dem 25x25 auf ein 1x1 km²-Raster sollte einerseits der Zugewinn an Genauigkeit gegenüber den mittels Spline-Funktionen interpolierten Perzentilkarten analysiert werden. Andererseits sollte das Interpolationsverfahren der Perzentilkarten überprüft werden.

Um eine höhere Auflösung der 25x25 km²-Rasterdaten beispielsweise für räumlich präzisere Auswertungen zu erhalten, ist es erforderlich, Zusatzinformationen und aufwändige Interpolationsverfahren zu verwenden. Bei Parametern die eine deutliche Abhängigkeit von der Geländehöhe zeigen, wie beispielsweise die Temperatur, kann die Geländehöhe als Zusatzinformation benutzt werden, um die vorliegende räumliche Auflösung der Daten zu erhöhen. In der Regel wird eine solche Zusatzinformation innerhalb von aufwändigen Kriging-Interpolationsverfahren als sogenannte „Drift-Variable“ verwendet.

Die Art der Interpolation und somit die Wahl des Kriging-Verfahrens hat großen Einfluss auf die Ergebnisse. Es gibt verschiedene Parameter innerhalb der Kriging-Verfahren, die je nach Kennzahl eventuell angepasst werden müssen. Das hier vorliegende Ausgangsraster der Klimaprojektionsergebnisse ist mit 25x25 km² sehr grob. Um nun einen wirklichen Zugewinn bei der Interpolation auf ein 1x1 km²-Raster zu erzielen, wird als Zusatzinformation (Driftvariable) die Geländehöhe mit einbezogen, die die feineren Strukturen innerhalb der 25x25 km²-Pixel mitbestimmt.

Ohne eine solche Zusatzinformation ist der Zugewinn der feineren Auflösung nur gering. Liegt eine Abhängigkeit der zu interpolierenden Größe und der Driftvariable vor und ist der räumliche Abstand der zu interpolierenden Werte sehr groß, so wird sich folglich das räumliche Muster der Driftgröße (hier: Geländehöhe) deutlich durchpausen. Liegt keine Abhängigkeit von der Geländehöhe auf, so wirkt das resultierende Interpolationsmuster weiterhin recht grob.

Das Kriging-Verfahren geht von Punktwerten aus, die interpoliert werden. Die hier verwendeten Daten der Klimaprojektionen sind jedoch Rasterwerte, also Mittelwerte über eine bestimmte Fläche. Es wird zwar der Rastermittelpunkt für die Interpolation verwendet, dabei kann aber über die sogenannte „Nugget-Konstante“ festgelegt werden, wie hoch der Einfluss der Nachbapixel und wie hoch der Einfluss des lokalen Anteils am Zielwert ist. Die Nugget-Konstante wurde hier auf 0,1 festgelegt. Das bedeutet, dass direkt am Rastermittelpunkt 90 % des Zielwerts durch den dortigen Modellwert und 10 % durch die umgebenden Rasterwerte bestimmt wird.

Die Wirkung des Kriging-Interpolationsverfahrens auf ein 1x1 km²-Raster wird exemplarisch an Kennzahlen des Niederschlags und der Lufttemperatur gezeigt. Dabei wird für alle Interpolationen das „External Drift Kriging“ verwendet. Tests mit dem „Ordinary Kriging“ haben gezeigt, dass der Zusatzgewinn durch dieses Kriging-Verfahren im Vergleich mit herkömmlichen Interpolationsmethoden niedrig ist.

Der Parameter Temperatur weist eine deutliche Höhenabhängigkeit auf. Auch die von der Temperatur abgeleiteten Kennzahlen zeigen ein ähnliches Verhalten und sind weitgehend linear von der Geländehöhe abhängig.

Beim Niederschlag ist dieser Zusammenhang nicht so deutlich. Singuläre Niederschlagsereignisse sind eher durch eine räumliche Nachbarschaft geprägt als von der Geländehöhe abhängig. Je länger der betrachtete Zeitraum ist, desto stärker ist jedoch in der Regel auch die Höhenabhängigkeit. Trotzdem ist zu erwarten, dass nicht bei allen Kennzahlen des Niederschlags eine deutliche Höhenabhängigkeit vorhanden ist. Zudem ist die Zunahme des Niederschlags mit der Höhe meist nicht linear. Durch bspw. verringert sich die Zunahme des Niederschlags mit der Höhe. Die Niederschlagsmenge steigt also nicht direkt mit der Geländehöhe, sondern eher mit dem Logarithmus der Geländehöhe. Um diesen Effekt bei der Regionalisierung zu berücksichtigen, wird als Driftvariable bei den Kennzahlen des Niederschlags entsprechend der Logarithmus der Geländehöhe verwendet.

In Abbildung 4-3 ist exemplarisch ein Vergleich der beiden Varianten zur räumlichen Interpolation (External-Drift-Kriging und Spline-Funktionen) der flächenhaften Perzentildarstellung dargestellt. Eine vergrößerte Ansicht sowie ein weiteres Beispiel finden sich in Anlage F.

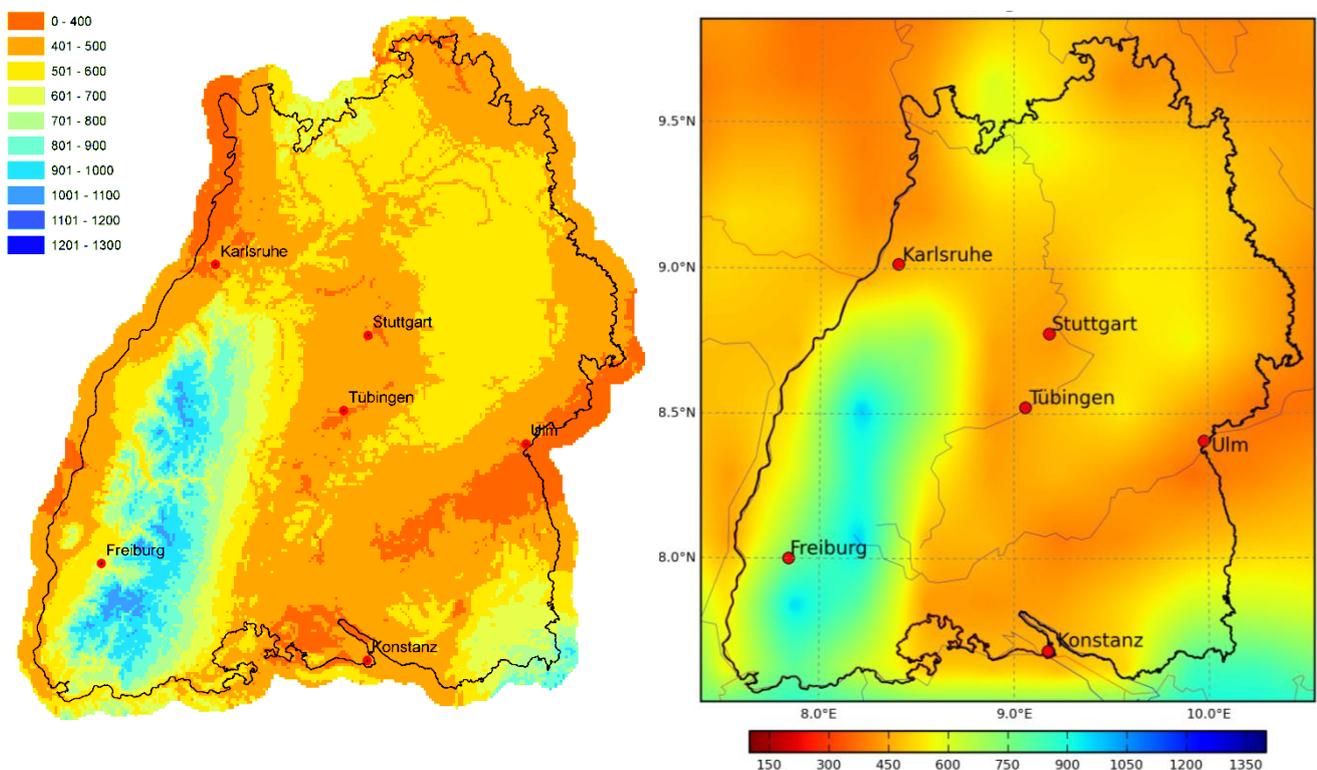


Abbildung 4-3: Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr [mm] für das 50. Perzentil der nahen Zukunft (2021-2050) regionalisiert auf ein 1x1 km²-Raster (links) und regionalisiert mit Splinefunktion (rechts)

Der Vergleich zeigt, dass die großräumlichen Strukturen bei den beiden Karten gleich wiedergegeben werden. Kleinräumig zeigen sich durch die Interpolation auf 1x1 km² feinere Strukturen. Die größten Unterschiede ergeben sich bei der Niederschlagsverteilung in den Höhenlagen. Aber auch die Flusstäler treten bei der 1x1 km²-Regionalisierung deutlicher in Erscheinung. Daher ist davon auszugehen, dass die auf das 1x1 km²-Raster interpolierten Karten die genauere Datengrundlage liefern. Dies insbesondere, wenn es sich um Kennzahlen handelt, bei der eine Abhängigkeit der Werte mit der Höhenlage und somit der Topographie vorliegt.

Die mit der Splinefunktion interpolierten Perzentilkarten verfügen über die gleichen großräumlichen Strukturen wie die Darstellungen des 1x1km²-Rasters und können somit für die Visualisierung der Ergebnisse verwendet werden. Für weitergehende Auswertung, die eventuell räumlich detailliertere Angaben benötigen, sind die auf das 1x1 km²-Raster interpolierten Perzentilkarten zu verwenden.

Die Erstellung der Perzentilkarten auf dem 1x1 km²-Raster ist recht aufwändig, so dass diese Karten nur für ausgewählte Kennzahlen digital erstellt wurden. Eine Übersicht dieser Kennzahlen bietet die folgende Tabelle 4-2.

Tabelle 4-2: Kennzahlen für die Interpolation auf ein 1x1 km-Raster

Kennzahlen
Jahresmitteltemperatur
Heiztage
Kühlgradtage
Vegetationsbeginn
Tropennacht
Frosttag
Datum letzter Frost
Heißer Tag (Tropentag)
Sommertag
Eistag
Niederschlagssumme im Jahr
Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr
Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr
Anzahl der Tage mit Starkniederschlag
Starkniederschlags-Höhe
Niederschlag Frühjahr
Niederschlag Vegetationsperiode
Trockenperiode Vegetation
Trockenperiode maximal (längste Dauer von Trockenperioden)
Summe der Globalstrahlung/Jahr
Mittlere Windgeschwindigkeit
Maximale Windgeschwindigkeit
Anzahl der Tage > 8m/s Windgeschwindigkeit

5 Weiterführende statistische Analysen

5.1 GRUNDLAGEN DER DURCHGEFÜHRTEN STATISTISCHEN ANALYSE

Die Klimaprojektionen des Ensembles wurden im ersten Schritt mithilfe deskriptiver Methoden ausgewertet und die Verteilung ihrer Werte mittels Box-Whisker-Plots dargestellt. Um die Verlässlichkeit der deskriptiven Auswertungen zu prüfen, bieten sich quantitative statistische Methoden an. Dabei erscheinen prinzipiell zwei Verfahrensgruppen als sinnvoll, nämlich Trendanalysen und Testfahren auf Signifikanz.

Die Auswertungen des Ensembles von Klimaprojektionen erfolgten nicht in einer durchgängigen Zeitreihe vom Ist-Zustand bis zur fernen Zukunft, sondern jeweils für die drei dreißigjährigen Zeiträume 1971 bis 2000, 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100. Aufgrund der unterbrochenen Zeitreihen vom Ist-Zustand zur nahen Zukunft sowie zur fernen Zukunft wird auf eine Trendanalyse verzichtet. Stattdessen werden statistische Tests durchgeführt.

Als Testverfahren auf statistische Signifikanz bieten sich hier der T-Test und der Rangsummentest (U-Test) an. Beide Verfahren erlauben es, zwei Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz zu vergleichen. Somit kann für eine Klimakennzahl geprüft werden, ob ihre Veränderungen, beispielsweise vom Ist-Zustand zur nahen Zukunft, statistisch signifikant sind:

- Der T-Test prüft anhand der Mittelwerte zweier Stichproben, ob die arithmetischen Mittelwerte ihrer zugrundeliegenden Grundgesamtheiten gleich sind. Dabei setzt der T-Test unter anderem voraus, dass beide Stichproben normalverteilten Grundgesamtheiten entstammen. Wird diese Annahme verletzt, liefert der Test womöglich falsche Resultate. Weiter reagiert der T-Test bei kleinen Stichproben sehr empfindlich auf Ausreißer.
- Rangsummentests wie der U-Test unterscheiden sich vom T-Test dahingehend, dass nicht die exakten Werte, sondern die Ränge der sortierten Stichproben hinsichtlich ihrer zentralen Tendenz (Median) verglichen werden. Dadurch sind Rangsummentests nicht auf eine Normalverteilung der Daten angewiesen und können somit auch für nicht normalverteilte Daten verwendet werden. Die Teststärke von Rangsummentests ist für nicht normalverteilte Stichproben deutlich höher als die des T-Tests, während die Teststärke für normalverteilte Daten praktisch der des T-Tests entspricht (Crawley 2007). Der U-Test gilt damit als stärkster nicht-parametrischer Test. Da Ränge anstatt absoluter Werte betrachtet werden, eignen sich Rangsummentests auch für kleine Stichproben mit Ausreißern. Allerdings reagiert der U-Test mit abnehmender Stichprobengröße zunehmend empfindlich.

Neben dem statistischen Test kommen Quantil-Quantil-Plots (QQ-Plots) zur Auswertung der Ergebnisse zum Einsatz. Das folgende Beispiel (Abbildung 5-1) soll exemplarisch die Interpretation eines QQ-Plots erläutern. Auf Abbildung 5-1 sind alle Jahresmitteltemperaturen des gesamten Modellensembles (d.h. 20 Modelle mit jeweils 30 Jahreswerte = 600 Werte) für den Ist-Zustand (X-Achse) und die nahe Zukunft (Y-Achse) aufgetragen. Jeder Punkt entspricht dabei einem ganz bestimmten Quantil mit einer definierten Auftretenswahrscheinlichkeit. Dieser Wahrscheinlichkeit (bspw. 50 % für den Median) kann sowohl für den Ist-Zustand als auch für die nahe Zukunft ein bestimmter Wert innerhalb des Modellensembles zugeordnet werden.

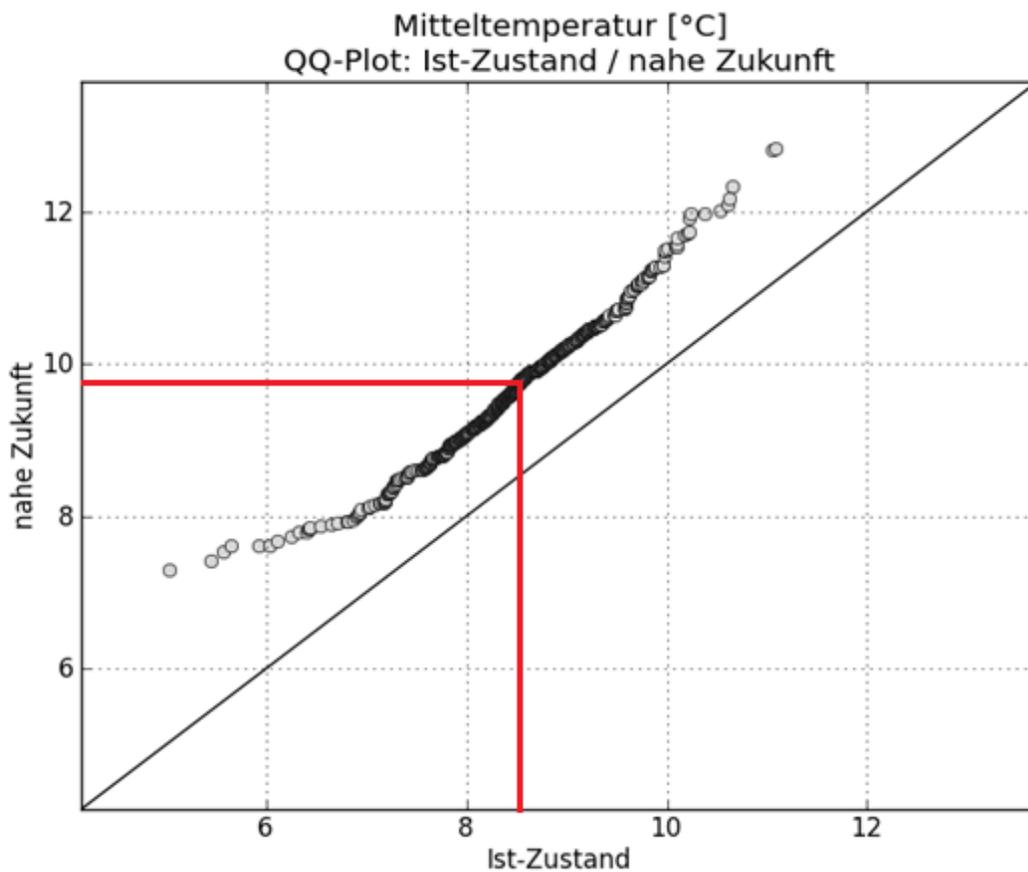


Abbildung 5-1: QQ-Plot von Jahresmitteltemperaturen des Modellensembles für den Ist-Zustand (1971-2000) (Y-Achse) im Vergleich mit den Jahresmitteltemperaturen des Modellensembles für die nahe Zukunft (2021-2050) (X-Achse)

Angenommen, der Median (= 50 %-Quantil) der Jahresmitteltemperatur liegt für den Ist-Zustand in der obigen Abbildung 5-1 bei ca. 8,5 °C. Sucht man diesen Wert auf der X-Achse, so lässt sich der zugehörige Wert des 50 %-Quantils auf der Y-Achse bestimmen, der hier etwa bei 9,8 °C liegt. Somit lässt sich aus der Abbildung eine Zunahme des Medians der Jahresmitteltemperatur vom Ist-Zustand zur nahen Zukunft von rund 1,3 °C ablesen.

Interessanter als der Vergleich einzelner Werte im QQ-Plot ist jedoch die Betrachtung der gesamten Verteilung. Würden alle Punkte auf der Winkelhalbierenden liegen, so wären die Werte von Ist-Zustand und naher Zukunft identisch. Alle Punkte oberhalb der Winkelhalbierenden zeigen eine Zunahme der Werte vom Szenario auf der X-Achse (hier: Ist-Zustand) zum Szenario auf der Y-Achse (hier: nahe Zukunft) an. Umgekehrt kennzeichnen Punkte unterhalb der Geraden eine Abnahme.

In Abbildung 5-1 lässt sich erkennen, dass beispielsweise im Bereich mittlerer Temperaturen von knapp 8 °C bis über 9 °C im Ist-Zustand eine gleichmäßige Verschiebung der Werte zur Winkelhalbierenden vorliegt. Dies bedeutet, dass innerhalb dieses Wertebereichs die Temperaturen etwa im gleichen Verhältnis vom Ist-Zustand zur nahen Zukunft hin ansteigen. In den besonders warmen Jahren sowie noch deutlicher bei den besonders kühlen Jahren steigt der Abstand zur Geraden an. Dies bedeutet, dass in diesen Bereichen die Zunahme der Jahresmitteltemperaturen vom Ist-Zustand zur nahen Zukunft besonders groß ist.

5.2 TEST AUF NORMALVERTEILUNG DER DATEN

Zur Auswahl eines geeigneten statistischen Testverfahrens ist vorerst zu kontrollieren, ob die untersuchten Daten normalverteilt sind. Eine Überprüfung mittels Shapiro-Wilks-Test ergibt, dass bei der Gesamtheit der Jahreswerte aller Modelle (Stichprobengröße $n = 600$) für keine der ausgewählten Kennzahlen eine Normalverteilung vorliegt.

In Abbildung 5-2 ist dies exemplarisch am Beispiel der Jahresmitteltemperaturen anhand eines QQ-Plots dargestellt. Für diesen speziellen Plot wurden zunächst Mittelwert und Standardabweichung der Jahresmitteltemperaturen des Modellensembles für den Ist-Zustand ermittelt. Anschließend wurde unter Verwendung dieser beiden Parameter Mittelwert und Standardabweichung ein normalverteilter Datensatz für die Lufttemperatur generiert. Dieser Datensatz hat die gleiche Anzahl an Werten wie das Modellensemble sowie den gleichen Mittelwert und dieselbe Standardabweichung. Die Besonderheit des künstlich erzeugten Datensatzes besteht darin, dass dieser streng normalverteilt ist. Nun kann der so erzeugte Datensatz der Lufttemperatur in einem QQ-Plot mit den Jahresmitteltemperaturen des Modellensembles verglichen und somit geprüft werden, ob dem Datensatz des Modellensembles eine Normalverteilung zugrunde liegt. Liegen die Punkte auf der Winkelhalbierenden, so sind die Verteilungen beider Datensätze identisch. Abweichungen von der Winkelhalbierenden zeigen Unterschiede der Verteilungen an.

Aus der Abbildung 5-2 ist zu erkennen, dass die Werte des Modellensembles der Lufttemperatur und des normalverteilten Datensatzes der Lufttemperatur im mittleren Bereich um ca. 7 bis 9 °C eine gute Übereinstimmung zeigen. Dies bedeutet, dass in diesem Wertebereich von einer Normalverteilung der Jahresmitteltemperaturen des Modellensembles ausgegangen werden kann.

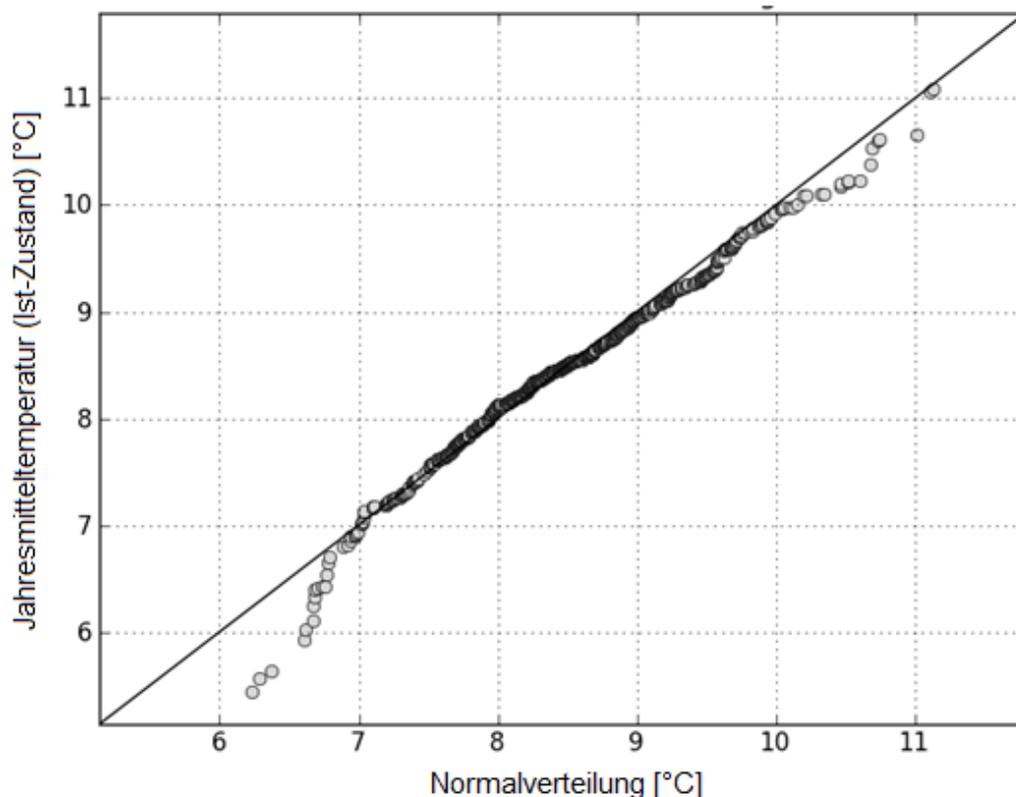


Abbildung 5-2: QQ-Plot von Jahresmitteltemperaturen des Modellensembles für den Ist-Zustand (1971-2000) (Y-Achse) im Vergleich mit einer geschätzten Normalverteilung der Daten (X-Achse) (der Signifikanzwert des zugehörigen Shapiro-Wilks-Test beträgt 0,000146).

Bei den extremeren Temperaturen zeigt sich jedoch eine zum Teil klare Abweichung von der Geraden. Hier sind die Modelldaten demnach nicht mehr normalverteilt. Dies erklärt das Resultat des zugehörigen Shapiro-Wilks-Test auf Normalverteilung, der mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von weniger als 1 % eine Normalverteilung der Jahresmitteltemperaturen des Modellensembles ablehnt.

Somit muss selbst für die Jahresmitteltemperatur, welche von den untersuchten Kennzahlen noch am ehesten normalverteilt vorliegt, die Annahme einer Normalverteilung abgelehnt werden. Bei anderen Kennzahlen, wie beispielsweise dem Niederschlag, ist das Ergebnis noch weitaus deutlicher. Aus diesem Grund wird in den folgenden Analysen nicht der T-Test, sondern ein Rangsummentest eingesetzt, um die statistische Signifikanz des Klimasignals zu untersuchen. Dabei wird der U-Test nach Mann-Whitney verwendet, ein nicht-parametrischer, zweiseitiger Rangsummentest (für Erläuterung des Tests siehe oben, Kapitel 5.1).

5.3 VORGEHENSWEISE

Wie bei allen statistischen Tests wird auch beim U-Test eine Hypothese aufgestellt, die anschließend mittels statistischer Methoden geprüft wird. Für die vorliegenden Auswertungen lautet die sogenannte Nullhypothese, dass die beiden Stichproben sich statistisch nicht signifikant unterscheiden, also dass kein statistisch signifikantes Klimasignal vorliegt. Dabei wird im Folgenden eine Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% angesetzt. Dies bedeutet, dass die Nullhypothese verworfen wird, wenn die berechnete Wahrscheinlichkeit für das Zutreffen der Nullhypothese weniger als 5% beträgt.

Im Einzelnen erfolgt der Testentscheid also anhand des sogenannten Signifikanzwerts (p-Wert). Liegt dieser unterhalb von $p=0,05$, so wird die Nullhypothese verworfen und das Klimasignal als statistisch signifikant interpretiert.

Für ausgewählte Kennzahlen werden verschiedene Analysen auf Basis des U-Tests durchgeführt. Dabei kommen zwei Varianten zum Einsatz, die sich hinsichtlich der dem Test zugrundeliegenden Stichprobe unterscheiden:

- „Mittelwerte“: Bei der ersten Variante wird von jeder Klimaprojektion der Mittelwert der dreißig Einzeljahre des untersuchten Szenarios bestimmt. Dann werden diese Mittelwerte der Klimaprojektionen statistisch untersucht. Daraus ergibt sich ein Stichprobenumfang von $n = 20$ (nahe Zukunft) bzw. $n = 15$ (ferne Zukunft).
- „Jahreswerte“: Bei der zweiten Variante wird auf die Mittelwertbildung der einzelnen Klimaprojektionen verzichtet. Somit fließen alle Jahreswerte direkt in den statistischen Test ein. Daraus ergibt sich eine Stichprobenanzahl von $n = 600$ (nahe Zukunft) bzw. $n = 450$ (ferne Zukunft). Da der U-Test bei kleinem Stichprobenumfang sehr empfindlich reagiert, kann die zweite Variante als robuster angesehen werden.

Es werden die folgenden statistischen Analysen durchgeführt:

- Flächenmittel von Baden-Württemberg (*Anlagen G-01 bis G-05*):
U-Test für Variante 1 und Variante 2 für zehn Kennzahlen (siehe Tabelle 5-1). QQ-Plots zur 2. Variante.

- Regionsspezifische Auswertungen (*Anlagen G-06 bis G-11*):
U-Test und QQ-Plots der Jahresmitteltemperatur für sechs Naturgroßräume (2. Variante). U-Test und QQ-Plots der Niederschlagssumme im Jahr für sechs Flusseinzugsgebiete (2. Variante).
- Flächenhafte Auswertungen (*Anlagen H-01 bis H-04*):
U-Test (Variante 1) für jedes Modellpixel des 25x25 km²-Rasters. Grafische Darstellung mit folgender Farbsignatur:
 - grün: $p < 0,05$: Das Klimasignal ist statistisch signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit beträgt maximal 5 %)
 - gelb: $0,1 < p > 0,05$: Klimasignal ist auf einem Niveau von 10 % statistisch signifikant (Irrtumswahrscheinlichkeit 5-10 %)
 - rot: $p > 0,1$: Klimasignal ist statistisch *nicht* signifikant

5.4 ERGEBNISSE

Im Folgenden werden die Ergebnisse der untersuchten Kennzahlen dargestellt. Die zugehörigen Grafiken befinden sich in den Anlagen, die Signifikanzwerte für Baden Württemberg und die Teilregionen werden in Tabelle 5-1, Tabelle 5-2 und Tabelle 5-3 aufgeführt. Bei den Farben rot, gelb und dunkelgrün sind die Signifikanzwerte eingetragen. Hellgrüne Felder in den Tabellen zeigen Signifikanzwerte $p < 0,01$ an. Die Spalten in Tabelle 5-1 sind hinsichtlich der Auswertung der Mittelwerte (1. Variante) und der Jahreswerte (2. Variante) unterteilt.

Tabelle 5-1: Signifikanzwerte ausgewählter Kennzahlen für Baden-Württemberg auf Basis des U-Tests nach Mann-Whitney (hellgrüne Felder entsprechen p-Werten < 0,01)

	Ist-Zust. - nahe Zuk.		Ist-Zust. - ferne Zuk.		nahe Zuk. - ferne Zuk.	
	Variante 1 (n = 20)	Variante 2 (n = 600)	Variante 1 (n = 15)	Variante 2 (n = 450)	Variante 1 (n = 15)	Variante 2 (n = 450)
Jahresmitteltemperatur	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Huglin-Index	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Kühltage	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Heiztage	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Tropentage	0.09	< 0.01	< 0.01	< 0.01	0.03	< 0.01
Tropennächte	0.05	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Frosttag	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Klim. Wasserbilanz (Juli)	0.07	< 0.01	0.03	< 0.01	0.14	< 0.01
N-Summe Jahr	0.52	< 0.01	0.98	0.53	0.87	0.25
N-Summe hydr. Winterhj	0.19	< 0.01	0.06	< 0.01	0.26	< 0.01

Tabelle 5-2: Signifikanzwerte der Jahresmitteltemperatur (Variante 2) für die Naturgroßräume auf Basis des U-Tests nach Mann-Whitney (hellgrüne Felder entsprechen p-Werten < 0,01)

	Ist-Zust. - nahe Zuk.	Ist-Zust. - ferne Zuk.	nahe Zuk. - ferne Zuk.
Alpenvorland	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Keuper-Lias & Gäue	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Neckar- Tauber	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Oberrhein	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Schwäbische Alb	< 0.01	< 0.01	< 0.01
Schwarzwald	< 0.01	< 0.01	< 0.01

Tabelle 5-3: Signifikanzwerte der Niederschlagssumme im Jahr (Variante 2) für die Flusseinzugsgebiete auf Basis des U-Tests nach Mann-Whitney (hellgrüne Felder entsprechen p-Werten < 0,01)

	Ist-Zust. - nahe Zuk.	Ist-Zust. - ferne Zuk.	nahe Zuk. - ferne Zuk.
Bodensee-EZG	0.02	0.74	0.30
BW-Donau-EZG	0.09	0.60	0.67
Hochrhein-EZG	0.02	0.80	0.26
Neckar-EZG	< 0.01	0.50	0.32
Schwarzwald-EZG	0.02	0.29	0.64
Tauber-EZG	0.01	0.14	0.54

Jahresmitteltemperatur (Anlagen G-01, G-06 bis G-08 und H-01)

Bei der Jahresmitteltemperatur ist das Klimasignal eindeutig statistisch signifikant. Die p-Werte liegen bei beiden Varianten für alle drei Szenarien-Vergleiche deutlich unterhalb 0,01. Somit lässt sich bezüglich der Jahresmitteltemperaturen auch quantitativ-statistisch zweifelsfrei ein Klimasignal bestätigen. Den QQ-Plots ist dieses Klimasignal durch die Verschiebung der Wertepaare hin zu höheren Temperaturen in der Zukunft zu entnehmen (Anlage G-01). Bei den kältesten und wärmsten Jahreswerten zeigt sich ein verstärkter Anstieg der Temperaturen. Dies bedeutet, dass Extremwerte besonders von dem Temperaturanstieg betroffen sind. Bei der flächenhaften Analyse zeigt sich, dass das Klimasignal in allen Bereichen Baden-Württembergs statistisch signifikant ist (Anlage H-01).

Dies wird durch die regionsspezifische Untersuchung gedeckt (Tabelle 5-2). Die QQ-Plots der einzelnen Naturgroßräume wiesen ebenso kaum Unterschiede zwischen den einzelnen Gebieten auf (Anlage G-06 bis G-08). Hier ist der verstärkte Temperaturanstieg besonders kalter und besonders warmer Jahre vom Ist-Zustand zur nahen Zukunft sowie zur fernen Zukunft herauszustellen.

Huglin-Index (Anlagen G-01 und H-01)

Der Test auf Signifikanz fällt beim Huglin-Index ähnlich deutlich aus wie bei der Jahresmitteltemperatur (Tabelle 5-1). Der QQ-Plot zeigt eine etwa parallele Verschiebung der Werte zur Winkelhalbierenden (Anlage G-01). Die Zunahme des Huglin-Index zur Zukunft hin ist somit etwas stärker für große als für kleine Werte. Auch flächenhaft zeigt sich ausnahmslos eine klare Signifikanz des Klimasignals (Anlage H-01).

Kühltag und Heiztag (Anlagen G-02 und H-02)

Das Klimasignal der beiden Kennzahlen Kühltag und Heiztag sind ebenfalls klar signifikant (Tabelle 5-1). Bei den QQ-Plots zeigt sich für den Kühltag bei Jahren mit einer höheren Anzahl von Kühltagen eine verstärkte Zunahme zur Zukunft (Anlage G-02). Demnach ist der Anstieg an Kühltagen in den Jahren heißen Jahren am größten. Beim Heiztag lässt sich im QQ-Plot eine Parallelverschiebung der Werte erkennen. Die flächenhafte Analyse zeigt in allen Bereichen eine deutliche Signifikanz des Klimasignals an (Anlage H-02).

Tropentag, Tropennacht und Frosttag (Anlagen G-03, G-04, H-02 und H-03)

Die drei Klimakennzahlen Tropentag, Tropennacht und Frosttag zeigen ebenfalls ein signifikantes Klimasignal. Dieses ist allerdings etwas weniger stark ausgeprägt, als bei den bisher beschriebenen Kennzahlen (Tabelle 5-1). Bei den QQ-Plots der Tropentage und Tropennächte (Anlage G-03) ist besonders eine ausgeprägte Zunahme beider Kennzahlen zur fernen Zukunft hin zu erkennen.

Während sich in den flächenhaften Darstellungen (Anlage H-03) beim Frosttag für alle Pixel eine Signifikanz des Klimasignals abzeichnet, ist bei der Tropennacht beim Vergleich von Ist-Zustand und nahe Zukunft die Bestätigung des Klimasignals nicht in allen Teilbereichen gegeben (Anlage H-02 unten). Beim Tropentag ist das Klimasignal im nördlichen Baden-Württemberg nicht signifikant. In den Höhen des Schwarzwalds und der Schwäbischen Alb liegt hingegen ein statistisch signifikantes Klimasignal vor. In der restlichen südöstlichen Hälfte Baden-Württembergs ist das Klimasignal nur auf einem Niveau von 10 % signifikant (Anlage H-02 Mitte).

Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die flächenhaften Darstellungen auf der ersten Variante ("Mittelwerte") beruhen. Aufgrund des geringen Stichprobenumfangs reagiert der U-Test hier äußerst sensibel und tendiert womöglich zu stark dazu, ein statistisch signifikantes Klimasignal zu verneinen. Die sehr deutlichen Ergebnisse der ersten Variante für die gesamte Fläche von Baden-Württemberg (Tabelle 5-1) legen die Vermutung nahe, dass dennoch ein statistisch nachweisbares Klimasignal vorliegt. Die flächenhafte Darstellung sollte hier somit eher zur Bewertung der räumlichen Unterschiede im Klimasignal herangezogen werden, als zur Entscheidung darüber, ob überhaupt ein Klimasignal vorhanden ist.

Klimatische Wasserbilanz (Anlage G-04 und H-03)

Die Auswertung der Jahresmittelwerte der klimatischen Wasserbilanz haben nur wenige Veränderungen zwischen Ist-Zustand und den Zukunftsszenarien gezeigt (vgl. Abbildung 3-18). Daher wurde nun für den Test auf Signifikanz statt den Jahresmittelwerten die klimatische Wasserbilanz für den Monat Juli herausgegriffen, in dem die Wasserbilanz aufgrund der hohen Temperaturen besonders interessant scheint.

Bei der klimatischen Wasserbilanz für den Monat Juli liegt der Signifikanzwert bei der 1. Variante mit Mittelwerten im Bereich der Signifikanzgrenze von 0,05 (Tabelle 5-1). Werden die Signifikanzwerte auf Basis der 2. Variante mit Jahreswerten sowie die QQ-Plots betrachtet, so kann von einem signifikanten Klimasignal ausgegangen werden. Für negative und gering positive Werte wird eine Abnahme der klimatischen Wasserbilanz im Juli zur nahen und fernen Zukunft hin beobachtet (Anlage G-04). Dagegen bleiben die hohen Werte auch in der Zukunft in einer vergleichbaren Größenordnung wie im Ist-Zustand. Dies bedeutet, dass der Juli insbesondere in ohnehin trockenen Jahren noch trockener wird.

Bei der flächenhaften Analyse ergeben sich sowohl regional als auch zwischen den einzelnen Zeitabschnitten Unterschiede in der Signifikanz des Klimasignals (Anlage H-03). Der Vergleich vom Ist-Zustand und der nahen Zukunft zeigt im Nordosten sowie im Schwarzwald und teilweise auf der Schwäbischen Alb Pixel mit signifikantem Klimasignal. Vom Ist-Zustand zur fernen Zukunft ist das Klimasignal annähernd flächendeckend signifikant. Von der nahen Zukunft zur fernen Zukunft zeigen sich hingegen kaum statistisch signifikante Änderungen. So wird deutlich, dass sich die klimatische Wasserbilanz des Monats Juli vom Ist-Zustand zur fernen Zukunft nachweisbar abnimmt, diese Veränderung in weiten Teilen Baden-Württembergs bereits zur nahen Zukunft hin einsetzt, sich aber weitgehend von der nahen zur fernen Zukunft hin in ihrer Intensität abschwächt.

Niederschlagssumme im Jahr und im hydrologischen Winter-Halbjahr (Anlage G-05, G-09 bis G-11 und H-04)

Bei Kennzahlen des Niederschlags ist das Klimasignal auf Jahresbasis oft nicht signifikant. So zeigt sich bei der Niederschlagssumme im Jahr für das Klimasignal sogar bei der 2. Variante ("Jahreswerte") häufig keine Signifikanz (Tabelle 5-1). Bei der Niederschlagssumme des hydrologischen Halbjahres sind die Unterschiede ausgeprägter.

In den QQ-Plots lassen sich jedoch auch auf Jahresbasis systematische Veränderungen erkennen (Anlage G-05). Die feuchten Jahre werden in der Zukunft noch feuchter und die trockenen Jahre noch trockener. Dies ist an der verschiedentlichen Steigung der Werte im Vergleich zur Winkelhalbierenden erkennbar. Zudem ergibt sich für den Vergleich von Ist-Zustand und naher Zukunft für nahezu alle Jahre (außer den sehr trockenen) eine geringe Zunahme der Niederschlagsmengen. Hingegen zeigt sich von der nahen zur fernen Zukunft zwar für die feuchten Jahre eine Zunahme der Niederschlagssummen, für die meisten anderen Jahre jedoch eine geringfügige Abnahme der Niederschlagsmengen. Im hydrologischen Winterhalbjahr ist eine tendenzielle Zunahme der Niederschlagssummen zu erkennen. Insbesondere zur fernen Zukunft nehmen die Niederschlagssummen der niederschlagsreichen Winterhalbjahre zu.

Die flächenhafte Darstellung mit der ersten Variante ("Mittelwerte") zeigt sowohl für die Niederschlagssumme im Jahr als auch im hydrologischen Winterhalbjahr kein bzw. kaum ein signifikantes Klimasignal (Anlage H-04). Bei der Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr lassen sich dagegen für einzelne Pixel im nördlichen Bereich Baden-Württembergs beim Vergleich Ist-Zustand und ferner Zukunft signifikante Klimasignale erkennen.

Bei der regionsspezifischen Betrachtung einzelner Flusseinzugsgebiete (Tabelle 5-3) zeigen sich beim Vergleich von Ist-Zustand und naher Zukunft statistisch weitgehend signifikante Klimasignale. Sowohl der Vergleich Ist-Zustand und ferne Zukunft als auch der Vergleich nahe und ferne Zukunft lassen für die Niederschlagssummen im Jahr keine statistische Signifikanz des Klimasignals erkennen.

Auch hier lassen sich wieder durch die Betrachtung der QQ-Plots weitere Informationen gewinnen (Anlagen G-09 bis G-11). Zur nahen Zukunft zeigt sich gegenüber dem Ist-Zustand in allen Gebieten mehr oder weniger eine tendenzielle Zunahme der Niederschlagssummen, vor allem in feuchten Jahren.

Mit Ausnahme des Schwarzwald-Einzugsgebiets verstärkt sich diese Tendenz (Zunahme in feuchten Jahren) zur fernen Zukunft, wird aber durch die nun auftretende Abnahme der Niederschlagssummen in trockenen Jahren kompensiert (Ausnahme Hochrhein-Einzugsgebiet).

Während die Ergebnisse des U-Tests den Anschein erwecken, dass sich die Niederschlagsverhältnisse vom Ist-Zustand zur fernen Zukunft hin nicht signifikant ändern, zeigen die QQ-Plots genau das Gegenteil. Dabei ist keines dieser beiden scheinbar widersprüchlichen Ergebnisse falsch; sie unterscheiden sich lediglich in ihrer zeitlichen Auflösung. Die Jahressummen der Niederschläge zeigen im Mittel keine bedeutende Veränderung vom Ist-Zustand zur fernen Zukunft (siehe Ergebnis des U-Test). Dies schließt jedoch nicht aus, dass es erwähnenswerte Veränderungen im Bereich der Extremwerte gibt (siehe QQ-Plots).

Fazit:

Die statistisch-quantitativen Auswertungen bestätigen die bereits in den vorangegangenen Kapiteln deskriptiv festgestellten Stärken und Richtungssicherheiten des Klimasignals der untersuchten Kennzahlen. Für alle auf dem Parameter Temperatur beruhenden Kennzahlen lässt sich eine statistisch deutliche Signifikanz des Klimasignals nachweisen.

Bei Kennzahlen, die auf dem Parameter Niederschlag beruhen, zeichnet sich kein so deutliches Bild ab. Während für die Jahressumme des Niederschlags lediglich vom Ist-Zustand zur nahen Zukunft ein Klimasignal statistisch bestätigt werden kann, lässt sich für die Summe des Niederschlags im hydrologischen Winterhalbjahr eine signifikante Zunahme statistisch belegen.

Hier liefern die QQ-Plots entscheidende Zusatzinformationen, welche den Informationsgehalt der Daten deutlich steigern. Während das Ergebnis des statistischen Tests lediglich aus einer einzigen Zahl besteht und nur das mittlere Verhalten des Modellensembles widerspiegelt, gestatten die QQ-Plots eine differenzierte Analyse von mittleren bis hin zu extremen Werten. Dadurch lassen sich bei den Jahressummen des Niederschlags systematische Veränderungen im Bereich besonders trockener und feuchter Jahre erkennen. Diese Veränderungen äußern sich in einer Akzentuierung der Extreme zur Zukunft, d.h. feuchte Jahre werden noch feuchter und trockene Jahre noch trockener.

Die flächenhaften Abbildungen beruhen auf der ersten Variante des U-Tests ("Mittelwerte") mit geringer Stichprobengröße. Da der U-Test für diese Variante überempfindlich reagiert, sollten die flächenhaften Darstellungen unter Berücksichtigung der Testresultate der ersten Variante ("Jahreswerte") für gesamt Baden-Württemberg (Tabelle 5-1) interpretiert werden. Der wesentliche Nutzen der flächenhaften Abbildungen besteht somit vor allem darin, räumliche Unterschiede in der Ausprägung des Klimasignals zu identifizieren.

Regionsspezifisch ergeben sich für die Jahresmitteltemperatur kaum regionale Unterschiede. Beim Niederschlag zeigen die meisten Regionen die erwähnte Zunahme der Niederschlagssummen feuchter Jahre, insbesondere zur fernen Zukunft. Davon am schwächsten betroffen ist die Region des Schwarzwald-Einzugsgebiets.

6 Einfluss der neuen IPCC-Szenarien

6.1 GRUNDLAGEN DER SRES-SZENARIEN

Ausgangspunkt für die bisherige Abschätzung der regionalen Auswirkungen der Klimaänderung sind Annahmen zu den weiteren Entwicklungen der Emissionen der Treibhausgase wie z.B. der CO₂-Konzentration. Diese sind allerdings von ökonomischen, sozialen und politischen Entwicklungen abhängig, die grundsätzlich nicht vorhersagbar sind. Daher wurden vom IPCC unterschiedliche Emissionsszenarien definiert (SRES-Szenarien (SRES: „Special Report on Emissions Scenarios“; IPCC 2001)), die die möglichen Entwicklungen im 21. Jahrhundert berücksichtigen.

Die SRES-Szenarien für den Antrieb der globalen Klimamodelle zur Berechnung der Klimaprojektionen geben die zukünftige Entwicklung der Emissionen vor. Charakterisiert werden die SRES-Szenarien durch das Niveau der Treibhausgas-Konzentration (gemessen in ppm CO₂ oder in ppm CO₂-Äquivalenzwerten), das sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts einstellt (Stabilisierungskonzentration).

Die Szenarien werden in die vier Hauptgruppen A1, A2, B1 und B2 unterteilt. Dabei ist B1 das Szenario mit den geringsten, A1B mit mittleren und A1 mit den höchsten Treibhausgasemissionen und somit auch Temperaturerhöhungen bis 2100. Die meisten Modellrechnungen werden mit den Vorgaben der Szenarien B1, A2 und insbesondere A1B durchgeführt.

Das hier verwendete Ensemble aus regionalen Klimaprojektionen hat für den Antrieb der globalen Klimamodelle das Emissionsszenario A1B zu Grunde (mit Ausnahme der Projektion E_WETTREG03 auf Grundlage des Emissionsszenarios B2). Das A1B-Emissionsszenario wird häufig für die Ermittlung von Klimaprojektionen verwendet. Dieses Szenario geht von einer global orientierten Entwicklung mit starkem Wirtschaftswachstum aus. Eine schnelle Einführung neuerer und effizienterer Techniken ebenso wie die Nutzung fossiler und erneuerbarer Energien charakterisiert das Szenario. Sowohl für die Weltbevölkerung als auch für die CO₂-Emissionen geht man von einem Anstieg bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts aus, sowie einer folgenden Abnahme bis 2100 (Umweltbundesamt 2007).

Die SRES-Szenarien wurden durch die später entwickelten so genannten post-SRES-Szenarien ergänzt. In den post-SRES-Szenarien wurde analysiert, wie sich ein Szenario verändern könnte, wenn sich zum Beispiel die CO₂-Emissionen auf einem bestimmten Niveau stabilisieren (IPCC-TGICA 2007).

Abbildung 6-1 zeigt die Entwicklung der Treibhausgase und der Oberflächentemperaturen im globalen Mittel für die unterschiedlichen SRES-Szenarien sowie die Bandbreite der post-SRES-Szenarien.

Für den 5. Sachstandsbericht des IPCC (IPCC 2013) wurden neue Szenarien für die Entwicklung der Konzentration von klimarelevanten Treibhausgasen in der Atmosphäre entwickelt, die sogenannten RCP („Representative Concentration Pathways“). Die neuen RCP-Szenarien lösen die bisherigen SRES-Emissionsszenarien ab. Neue wirtschaftliche Daten, neue Technologien, sich wandelnde Umweltfaktoren (z.B. Flächennutzung) und Bodenbedeckung machten eine Aktualisierung beziehungsweise Neuerstellung von Szenarien notwendig (Van Vuuren et al. 2011). Zudem gibt es einen steigenden Bedarf an Szenarien, die Auswirkungen einer möglichen Klimapolitik berücksichtigen (Moss et al. 2010). Dies war mit den bisherigen SRES-Szenarien nicht möglich.

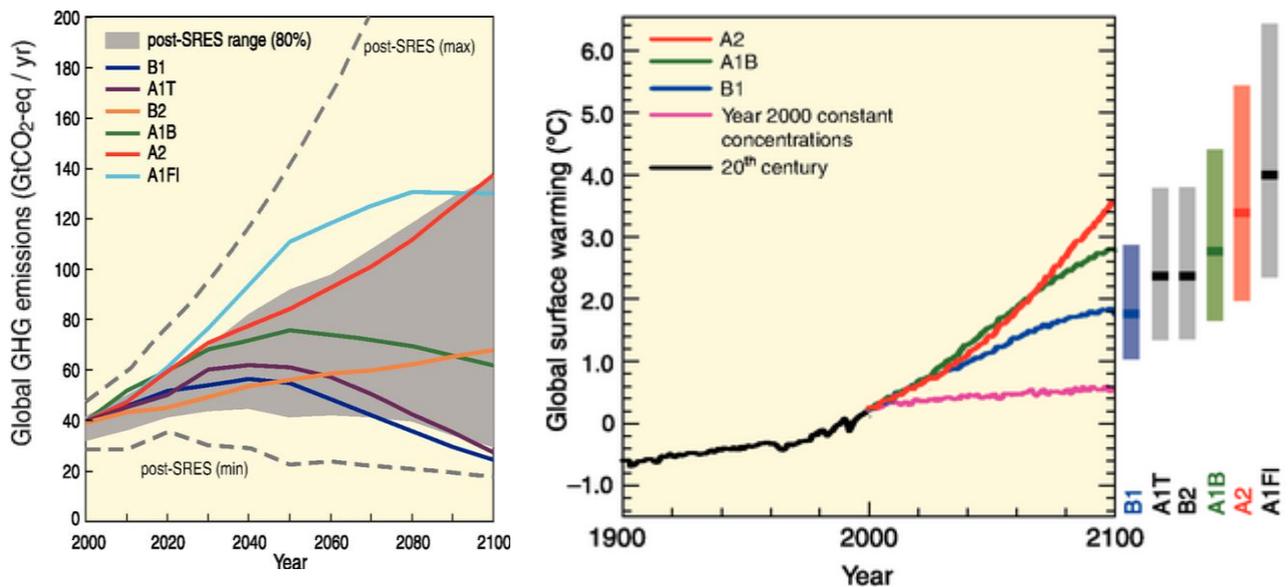


Abbildung 6-1: Links: Entwicklung der gesamten Treibhausgasemissionen in CO₂-Äquivalente von 2000 bis 2100 (ohne zusätzliche Maßnahmen der Klimapolitik): sechs beispielhafte SRES-Szenarien (farbige Linien) und der 80. Perzentilbereich der post-SRES-Referenzszenarien (grau schattierter Bereich). Gestrichelte Linien zeigen die gesamte Bandbreite der post-SRES-Szenarien. Rechts: Zugehörige Projektionen für die Oberflächentemperatur (rechts) für drei ausgewählte SRES-Szenarien. Die Balken rechts neben der Abbildung beschreiben die beste Schätzung und den möglichen Unsicherheitsbereich für sechs SRES-Szenarien im Zeitraum 2090-2099. Alle Temperaturen sind relativ zum Zeitraum 1980-1999. (IPCC 2007a)

6.2 GRUNDLAGEN DER RCP-SZENARIEN

Die RCP-Szenarien unterscheiden sich in ihrer Herangehensweise deutlich von den SRES-Szenarien. Bisher wurden die SRES-Szenarien meist durch ihre Stabilisierungskonzentration charakterisiert, d.h. welche CO₂-Konzentration (bzw. CO₂-Äquivalenzkonzentration) die Szenarien am Ende der Betrachtungsperiode erreichen (und dann nicht weiter steigen). Im Zentrum steht nun bei den RCP-Szenarien nicht mehr die Stabilisierungskonzentration an Treibhausgasen, sondern der sogenannte „anthropogene Strahlungsantrieb“, der am Ende der Zeitskala herrscht. Dieser Strahlungsantrieb ist ein Maß für die (physikalische) Leistung, die die anthropogen verursachte Erwärmung der Atmosphäre antreibt, und ist eine für den durch die Menschen verursachten Treibhauseffekt geeignetere Maßzahl (in Watt pro Quadratmeter) als die Konzentration der Treibhausgase. Somit sind in den RCP-Szenarien anstelle der Treibhausgasemissionen unterschiedliche Vorgaben für den Strahlungsantrieb und damit für die Erwärmungs-Wirkung einer entsprechenden Treibhausgas-Konzentration enthalten.

Für die Aufstellung der RCP-Szenarien wird aus unterschiedlichen Entwicklungen der atmosphärischen Treibhausgas-Konzentrationen mit gekoppelten Energie-Ökonomie-Klima-Landnutzungs-Modellen („Integrated Assessment Models“) berechnet, welche maximalen Emissionsverläufe mit dem RCP kompatibel wären, um diesen Konzentrationspfad einzuhalten (ReKliEs-De 2013). Ausgehend von den vordefinierten Strahlungsantrieben am Ende des 21. Jahrhunderts werden somit durch die Modelle mögliche Bandbreiten und zeitliche Verläufe der Strahlungsantriebe sowie – sozusagen rückwärts – die dazugehörigen Entwicklungen von Treibhausgasemissionen und chemischen Konzentrationen in der Atmosphäre entwickelt. Diese repräsentieren wiederum jeweils unterschiedliche Szenarien sozioökonomischer Entwicklungen, Landnutzungsänderungen etc..Dadurch können viele unterschiedliche sozioökonomische Entwicklungen untersucht und beschrieben werden, die zu einer Einhaltung dieser Emissionsverläufe führen würden.

Durch die parallelen Arbeiten der beteiligten Modelliergruppen aus Klima- und Wirkmodellierern können Rückkopplungseffekte der verschiedenen Modellkompartimente in den Szenarien besser berücksichtigt werden. Deshalb wurde die Entwicklung des RCP-Szenarien nicht mehr direkt vom IPCC durchgeführt, sondern den Klimamodellierern und anderen benachbarten Wissenschaften überlassen. Es werden in den verwendeten Modellen möglichst alle Verursacher anthropogener Treibhausgasemissionen abgebildet und in neue Szenarien zukünftiger Treibhausgaskonzentrationen und Strahlungsantriebe umgesetzt.

Während also für die Erstellung der SRES-Szenarien ein sequentieller Prozess angewandt wurde (Erstellung sozio-ökonomischer Szenarien => Änderungsraten der Treibhausgas-Emissionen, Aerosolen und anderer chemisch aktiver Stoffe => atmosphärische Konzentrationen der Treibhausgase => Klimamodellierung), wurde für die Erstellung der RCP-Szenarien ein paralleler Prozess der beteiligten Arbeitsgruppen durchgeführt (Imbery & Plagemann 2011). Die Treibhausgas-Konzentrationen der RCP-Szenarien gehen – wie auch bei den SRES-Szenarien – in die globalen Klimamodelle ein, mit denen dann die zu erwartenden Klimaänderungen berechnet werden.

Die Namensgebung der RCP-Szenarien setzt sich aus bestimmten Überlegungen zusammen. Das Wort „pathways“ soll die Zeitabhängigkeit der Projektion von Treibhausgas-Konzentrationen verdeutlichen. Es soll also eine zeitliche Entwicklung der Treibhausgas-Konzentrationen geliefert werden. In diesen Szenarien wird nicht nur das Stabilisierungsniveau, sondern auch der Weg, der dazu führt, abgebildet. „Representative“ wurde als Titel verwendet, um zu verdeutlichen, dass es eine Vielzahl von möglichen Szenarien gibt. Darunter sind auch die sogenannten „Integrierte Szenarien“, die verschiedene Möglichkeiten der Auswirkungen des Klimawandels mit berücksichtigen. Hierbei werden auch denkbare Vermeidungs- und Anpassungsmaßnahmen, also aktive Klimapolitik, berücksichtigt. Beispiele für Klimaschutzmaßnahmen, die zu den RCP-Pfaden führen können, sind unter anderem eine Steigerung der Energieeffizienz, Dekarbonisierung der Energieerzeugung, Reduktion der Methanerzeugung in der Energieproduktion und der Landwirtschaft, Erhöhung der Agrarproduktivität (bei Sicherung der Ernährung und der Biodiversität) sowie die Verlangsamung der Entwaldung (ReKliEs-De 2013). Alle diese Maßnahmen können zu unterschiedlichen Anteilen zur Einhaltung der verschiedenen RCP-Szenarien beitragen.

Aus dieser Vielzahl an Szenarien wurden nun vom IPCC vier Szenarien ausgewählt, die plausible, unterschiedliche Entwicklungen des Klimas repräsentieren. Da im Unterschied zu den bisherigen Szenarien der Schwerpunkt der Szenarien nicht auf den Emissionen, sondern auf die Konzentrationen und den Strahlungsantrieb gelegt wird, wurden die Szenarien auch nach dem Strahlungsantrieb „RCP3-PD“, „RCP4.5“, „RCP6“ und „RCP8.5“ benannt (IPCC 2007b). Dabei wurden verschiedene Kriterien für die Auswahl der RCPs herangezogen. Zum einen sollte die Spannweite der möglichen und sinnvollen Szenarien abgedeckt werden. Die Anzahl sollte gerade sein, damit kein mittleres Szenario entsteht, das eventuell fälschlicherweise als „mittlere Ausprägung“ interpretiert werden könnte. Alle vier Szenarien sollten sich deutlich voneinander in ihrer Ausprägung und in ihrem Verlauf unterscheiden. Zudem sollten möglichst alle Einflussfaktoren (Gase, Aerosole, usw.) berücksichtigt werden.

Die vier Szenarien können wie folgt charakterisiert werden (IPCC 2007b, Van Vuuren et al. 2011):

- RCP3-PD: In der Literatur findet sich auch die Bezeichnung „RCP2.6“. Dieses Szenario bildet die untere Grenze der wahrscheinlichen zukünftigen Entwicklung des Klimas.

Dabei wird angenommen, dass der Spitzenwert von 3 W/m² bereits vor 2100 erreicht wird und danach eine Abnahme des Strahlungsantriebs erfolgt („PD“ = peak and decline). Die Treibhausgaskonzentration im Jahr 2100 liegt dann etwa bei 400 ppm CO₂-Äquivalente.

- RCP4.5: Dieses Szenario kann wohl am ehesten als mittleres Szenario charakterisiert werden. Es erfüllt das Stabilitätskriterium, also eine Zunahme des Strahlungsantriebs bis auf 4,5 W/m² (~650 ppm CO₂-Äquivalente) im Jahr 2100 und danach keine weitere Zunahme.
- RCP6: Dieses Szenario liefert voraussichtlich eher hohe Konzentrationen an Treibhausgasen. Es erfüllt ebenfalls das Stabilitätskriterium, also eine Zunahme des Strahlungsantriebs bis auf 6 W/m² (~850 ppm CO₂-Äquivalente) im Jahr 2100 und danach keine weitere Zunahme.
- RCP8.5: Dieses Szenario zeigt die Obergrenze möglicher zukünftiger Entwicklungen. Bis zum Jahr 2100 wird der Strahlungsantrieb auf 8,5 W/m² (~1370 ppm CO₂-Äquivalente) steigen und danach auch weiter zunehmen.

Abbildung 6-2 zeigt Vergleiche der vier RCPs im Jahr 2100 im Vergleich mit der Gegenwart (2000) hinsichtlich sowohl Primärenergieverbrauch und Zusammensetzung als auch hinsichtlich Zusammensetzung der Treibhausgaskonzentrationen. RCP2.6 zeigt den geringsten fossilen Energieverbrauch und den höchsten Anteil an Biomasse. RCP4.5 und RCP6 sind bei den fossilen Energieträgern vergleichbar. Bei den regenerativen Energien zeigt RCP4.5 einen höheren Anteil. Das RCP8.5-Szenario legt für nahezu alle Energieträger den höchsten Bedarf zu Grunde.

Für die Treibhausgaskonzentrationen ergeben sich in Abbildung 6-2 deutliche Unterschiede. Während das RCP2.6 nur geringfügige Konzentrationsänderungen bis 2100 zeigt, findet beim RCP8.5-Szenario fast eine Verdreifachung der Gesamtkonzentrationen statt. Insbesondere die CO₂-Konzentration bestimmt die Unterschiede zwischen den Szenarien.

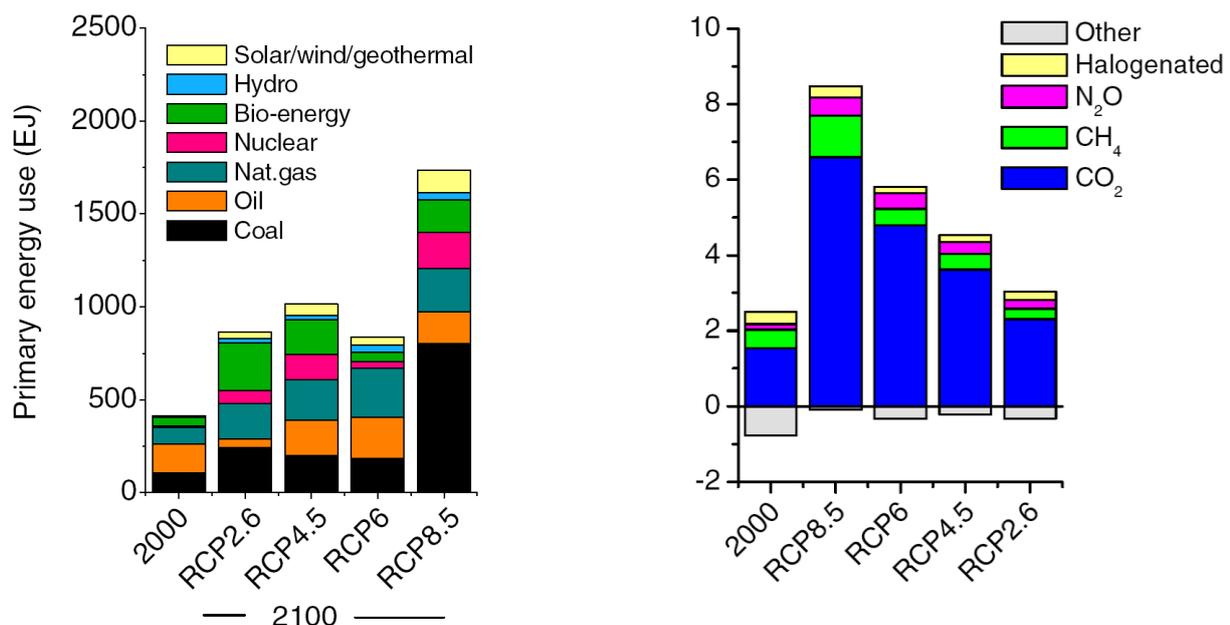


Abbildung 6-2: Änderungen der Primärenergienutzung und der Treibhausgaskonzentrationen im Jahr 2100 für RCP-Szenarien (van Vuuren et al. 2011)

6.3 VERGLEICH DER SRES- UND RCP-SZENARIEN

Durch die unterschiedlichen Ansatzpunkte bei der Erstellung der SRES- und RCP-Szenarien sowie durch die Verwendung unterschiedlicher Modellversionen ist ein direkter Vergleich schwer möglich. Auf Grund der Notwendigkeit der Einordnung bisheriger Studien in die neue RCP-Welt wurden dennoch Versuche unternommen. So erstellten Rogelj et al. (2012) probabilistische Klimaprojektionen für SRES- und RCP-Szenarien in einer gemeinsamen Umgebung. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass das RCP-Szenario RCP3-PD kein Pendant bei den 40 Szenarien der SRES-Szenarien findet. Das RCP4.5-Szenario stimmt am ehesten mit dem B1-Szenario, das RCP6-Szenario mit dem B2-Szenario und das RCP8.5-Szenario mit dem A1FI-Szenario überein.

Dies zeigt sich auch in den Vergleichen des Strahlungsantriebs und der CO₂-äquivalenten Konzentrationen in Abbildung 6-3 und Abbildung 6-4. In den beiden Abbildungen wird auch deutlich, dass in Erweiterung zu den SRES-Szenarien bei den RCP-Szenarien auch die Entwicklungen über das Jahr 2100 hinaus (Langfristskala) abgeschätzt werden. Für die Jahre nach 2100 wurden dabei einfache Annahmen getroffen:

- Konstante Emissionen („constant emissions“): Emissionen sind auf Werte des Jahres 2100 fixiert
- Konstanter Antrieb („constant forcing“): Strahlungsantrieb ist auf Werte des Jahres 2100 fixiert
- Angepasste Emissionen („adapted emissions“): Veränderung der Emissionen und des Strahlungsantriebs basierend auf einer einfachen Regel (z.B. konstante jährliche prozentuale Änderung).

Das sehr häufig benutzte und auch in dieser Studie verwendete A1B-Szenario findet kein direktes Pendant bei den RCP-Szenarien. Je nach betrachteter Kenngröße (Strahlungsantrieb, CO₂-Emission) liegt das A1B-Szenario näher an RCP6 oder näher an RCP8.5. Der resultierende Strahlungsantrieb des A1B-Szenarios liegt deutlich oberhalb des Szenarios RCP6.0 (und damit automatisch auch weit oberhalb der Szenarien RCP4.5 und RCP2.6). Es ist daher zu erwarten, dass die mittlere globale Erwärmung für die drei RCP-Szenarien 2.6, 4.5 und 6.0 geringer ausfallen wird als die Ergebnisse mit dem SRES-A1B-Szenario. Lediglich das Szenario RCP8.5 stellt ein sogenanntes Hochemissionsszenario dar und liegt über dem Szenario A1B und sogar über dem Szenario A2.

In Abbildung 6-5 sind zum Vergleich der SRES- und der RCP-Szenarien die CO₂-Emissionen und die resultierenden Strahlungsantriebe aus beiden Szenarien-Familien aufgetragen. Aus der Abbildung wird z.B. ersichtlich, dass auch bei Unterschieden im zeitlichen Verlauf der CO₂-Emissionen (links) bei den Szenarien SRES-B2 (grau, gestrichelte Linie) und RCP6.0 (rosa) relativ ähnliche Strahlungsantriebe (rechts) resultieren.

Außer in der Methodik zur Erstellung besteht ein weiterer wesentlicher Unterschied zwischen den SRES- und den RCP-Szenarien im zeitlichen Verlauf der Emissionen. Die tatsächlichen globalen THG-Emissionen waren zum Zeitpunkt der Erstellung der RCP-Szenarien (ab ca. 2007) bereits höher als in den SRES-Szenarien für die erste Dekade dieses Jahrhunderts angenommen. Die RCP-Szenarien folgen in der ersten Dekade den beobachteten Werten und liegen daher über den Werten der SRES-Szenarien B1 und B2 (Abbildung 6-5 links). Im weiteren Verlauf des Jahrhunderts spalten sich die RCP-Szenarien – ähnlich wie die SRES-Szenarien – auf. Die RCP-Szenarien definieren zunächst nur einen Konzentrationsverlauf und ermöglichen es daher, diese Konzentrationspfade durch unterschiedliche Klimaschutzmaßnahmen einzuhalten.

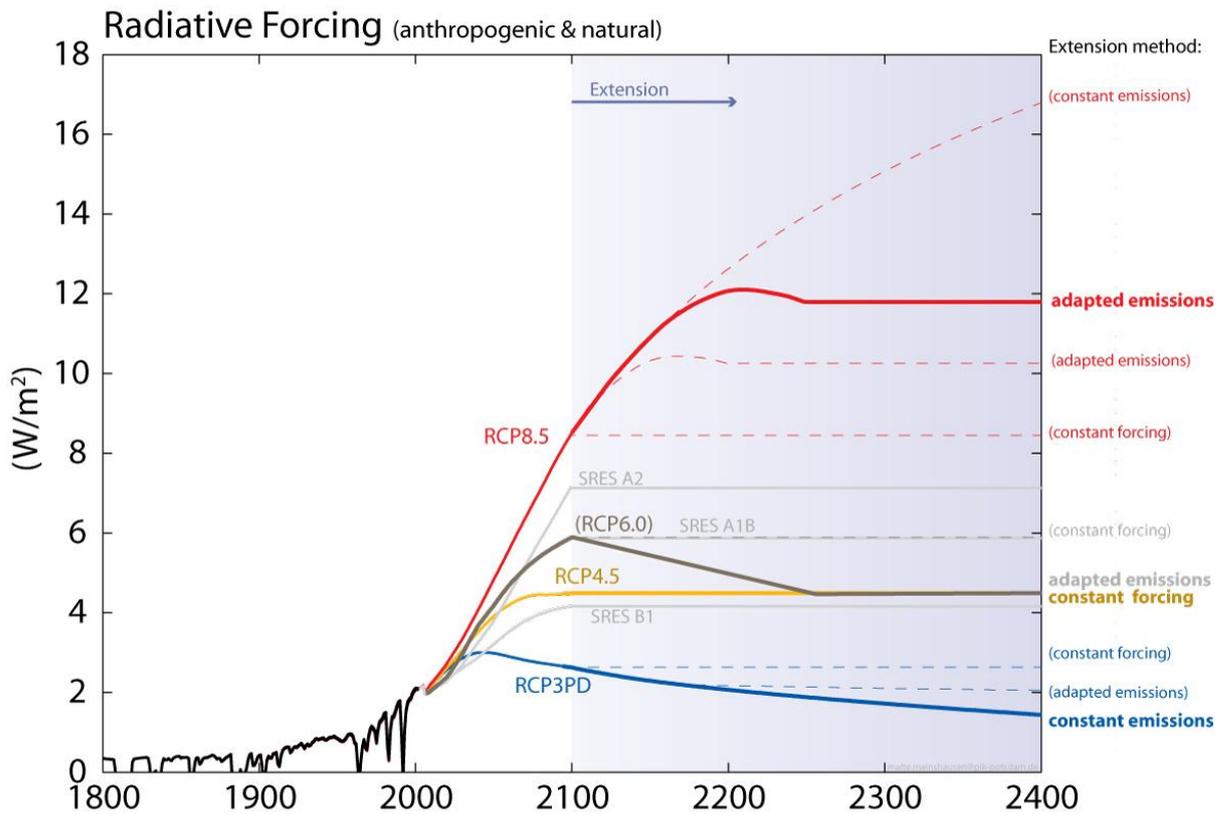


Abbildung 6-3: Vergleich des Strahlungsantriebs für SRES- und RCP-Szenarien (Van Vuuren et al. 2009)

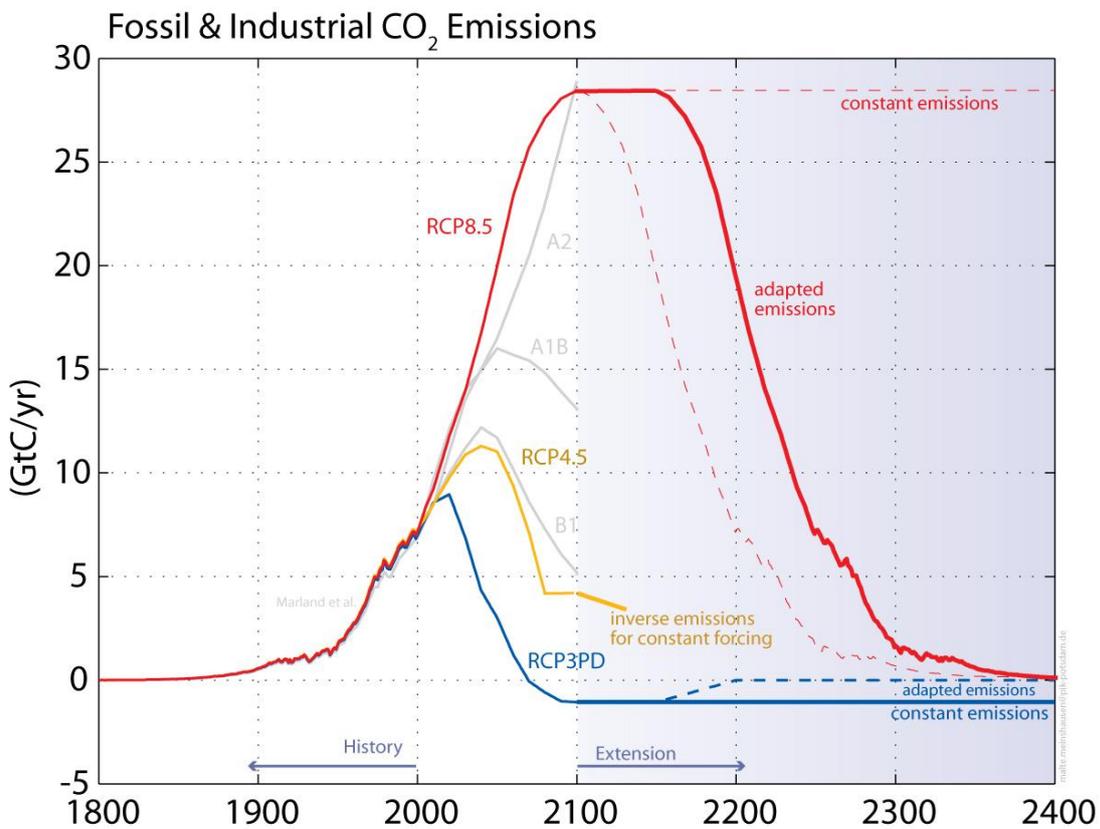


Abbildung 6-4: Vergleich der CO_2 -äquivalenten Konzentrationen für SRES- und RCP-Szenarien (Van Vuuren et al. 2009)

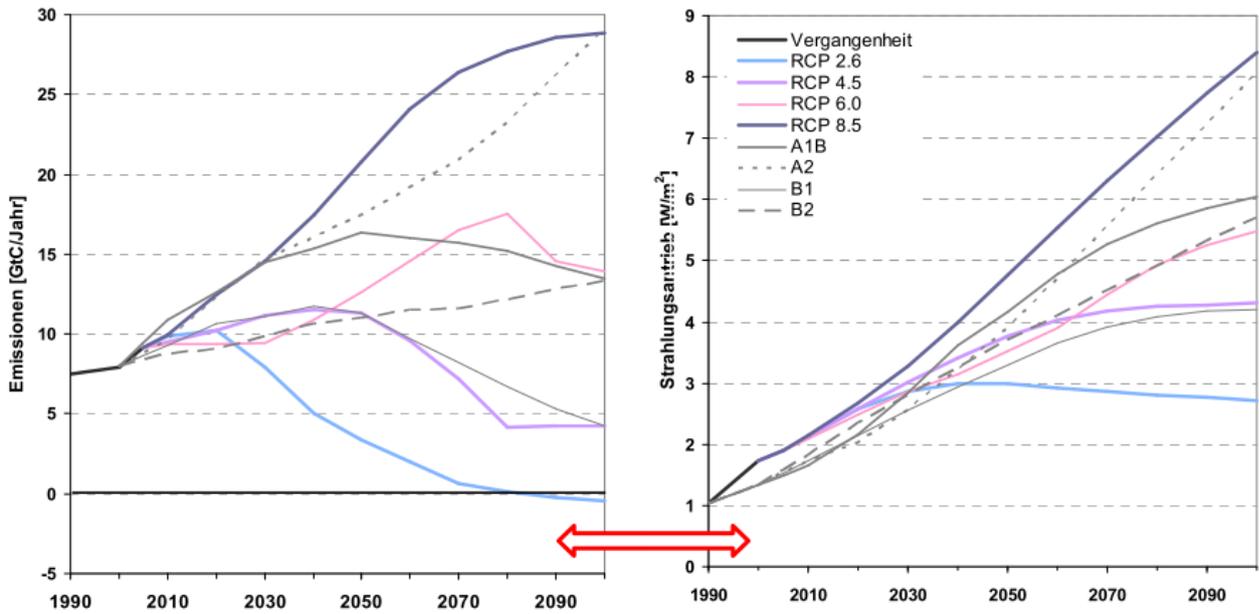


Abbildung 6-5: CO₂-Emissionen (GtC/Jahr) und Strahlungsantrieb (W/m²) für die SRES- und RCP-Szenarien bis zum Jahr 2100. Für die SRES-Szenarien wurde der Strahlungsantrieb aus den Emissionen berechnet, für die RCP-Szenarien umgekehrt (ReKliEs-De 2013).

Eine vergleichbare Abbildung wie Abbildung 6-5 hinsichtlich einer Einordnung der SRES-Szenarien im Vergleich zu den RCP-Szenarien und zu den aktuellen Entwicklungen der Treibhausgase ist Abbildung 6-6, in der die Emissionen aber zeitlich höher aufgelöst bis zum Jahr 2050 dargestellt sind.

Erste Modellergebnisse aus globalen Klimamodellen zum Vergleich der globalen mittleren Temperaturanstiege für die unterschiedlichen SRES- und RCP-Szenarien sind in Tabelle 6-1 zusammengestellt (ReKliEs-De 2013, basierend auf Knutti & Sedlacek (2013)).

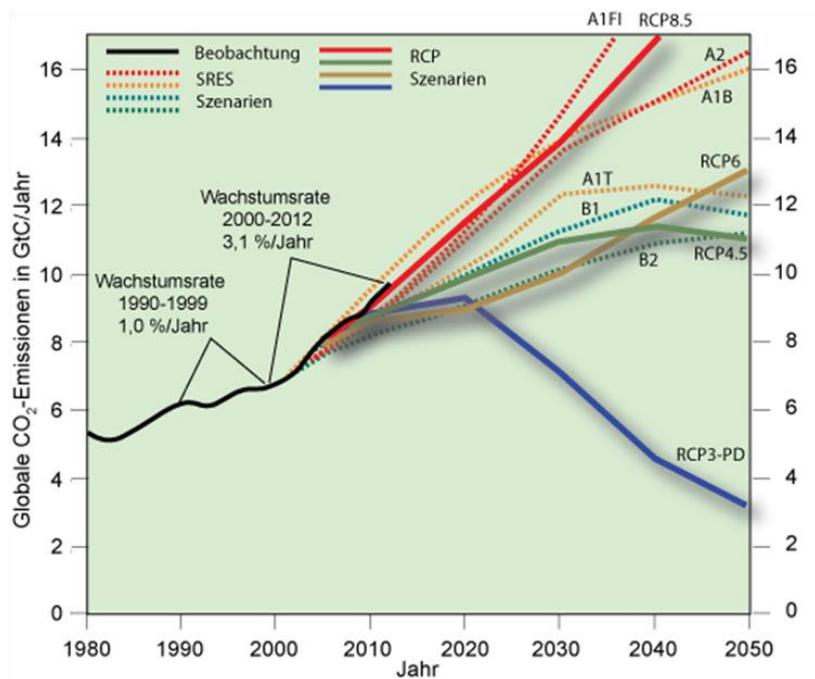


Abbildung 6-6: Die RCP-Emissionspfade im Vergleich zu den SRES-Emissionspfaden bis 2050 sowie zu den realen Entwicklungen der CO₂-Emissionen (Bildungsserver 2013, Peters et al. 2013)

Tabelle 6-1: Mittlerer beobachteter globaler Temperaturanstieg im Beobachtungszeitraum 1906–2005 (Spalte 1), simulierter mittlerer Temperaturanstieg in Modellensembles für die verschiedenen Szenarien bis 2100 (Spalte 3) und der insgesamt von 1906 bis 2100 zu erwartende Temperaturanstieg (Spalte 4). Auf die Angabe von Bandbreiten in Spalte 3 und 4 wurde bewusst verzichtet. (ReKliEs-De 2013)

Beobachteter T-Anstieg 1906–2005 [Bandbreite]	Szenario	Simulierter T-Anstieg 2100 gegenüber 1986–2005 ⁵	T-Anstieg 2100 gegenüber 1906 (beob.+simul.)
+0,74°C [+0,56 bis +0,92°C]	RCP8.5	+ 4 °C	+ 4,7 °C
	RCP6.0	+ 2,5 °C	+ 3,2 °C
	RCP4.5	+ 2 °C	+ 2,7 °C
	RCP2.6	+ 1 °C	+ 1,7 °C
	SRES A2	+ 3,5 °C	+ 4,2 °C
	SRES A1B	+ 2,7 °C	+ 3,4 °C
	SRES B1	+ 1,7 °C	+ 2,4 °C

Die Tabelle 6-1 enthält in Spalte 1 die mittlere globale Erwärmung von der vorindustriellen Zeit bis zum Zeitraum 1986–2005, in Spalte 2 die SRES- und die RCP-Szenarien, in Spalte 3 die jeweiligen simulierten Temperaturanstiege bis zum Jahr 2100 relativ zum (von dem jeweiligen Modell simulierten) Zeitraum 1986–2005 und in Spalte 4 der Gesamtanstieg der Temperaturen relativ zur vorindustriellen Zeit. Daraus wird ersichtlich, dass das Szenario A1B einen höheren mittleren globalen Temperaturanstieg als die Szenarien RCP6.0, RCP4.5 oder RCP2.6 erwarten lässt (wobei die Differenz zu RCP6.0 nur gering ist).

Zusammenfassend lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- Der Vergleich zwischen den beobachteten Wachstumsraten der CO₂-Emissionen in den Jahren ab 2000 mit den Annahmen der Entwicklung der CO₂-Emissionen für das SRES-Szenario A1B zeigt, dass das in dieser Untersuchung verwendete A1B-Szenario die gegenwärtige Entwicklung der Treibhausgase gut beschreibt. Die Annahmen des A1B-Szenarios sind also (noch) nicht von der realen Entwicklung der Treibhausgase überholt worden. Daher ist die Verwendung des A1B-Szenarios in dieser Untersuchung gut begründbar.
- Das A1B-Szenario liegt hinsichtlich der Entwicklung der Treibhausgase zwischen dem RCP6- und dem RCP8.5-Szenario. Damit wird deutlich, dass das A1B-Szenario eine Entwicklung der Treibhausgase beschreibt, die auch aktuell als realistisch angesehen wird und die in der Weiterentwicklung der SRES-Szenarien als mittleres Szenario zwischen RCP6 und RCP8.5 enthalten ist. Die vorliegenden Untersuchungsergebnisse unter Zugrundelegung des A1B-Szenarios sind somit also auch unter Berücksichtigung der neuen RCP-Szenarien zunächst weiterhin verwertbar.

Die direkte Übertragung der SRES-Szenarien auf die RCP-Szenarien ist nur bedingt möglich. Erste Berechnungen mit den RCP-Szenarien in Regionalmodellen wie beispielsweise für das statistische Modell STAR liegen seit Ende letzten Jahres vor. Es gab eine Vereinbarung, dass die anderen regionalen Klimamodellierer ihre Modelldaten auf Basis der RCP-Szenarien erst ab Sommer 2013 gemeinsam freigeben wollen (mündliche Mitteilung Herr Kreienkamp). Auch aus diesem Grund sind die vorliegenden Ergebnisse auf Basis des SRES-Szenarios A1B aktuell. Trotz des erwarteten großen Interesses an den neuen Klimadaten wird es sicherlich einige Zeit dauern, bis aussagekräftige Ergebnisse und Erfahrungen mit Regionalmodellen und den neuen RCP-Szenarien gesammelt werden.

7 Literatur

- Andréasson J., Bergström S., Carlsson B., Graham L.P. & Lindström G. (2004): Hydrological Change – Climate Change Impact Simulations for Sweden. *Ambio* Vol. 33 No. 4-5, Royal Swedish Academy of Sciences
- Becker P., Deutschländer T. & Imbery F. (2012): Klimasimulation- wie hart trifft es Deutschland? – *Spektrum der Wissenschaft* 4/2012
- Berg P., Feldmann H. & Panitz H.-J. (2012): Bias correction of high resolution RCM data. – *Journal of Hydrology*, Volume 448, p. 80-92.
- Berg P., Wagner S., Kunstmann H. & Schädler G. (2013): High resolution regional climate model simulations for Germany: Part 1 – validation. *Climate Dyn.*, 40, 401-414.
- Bildungsserver (2013): verfügbar unter <http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Klimaszenarien> (letztmalig abgerufen am 06.11.2013)
- Bosshard T., Kotlarski S., Ewen T. & Schär C. (2011): Klimaszenarien für Klimaimpaktstudien in der Schweiz. – IAC, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (interner Bericht)
- CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011 - published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp.
- Christensen J.H. & Christensen O.B. (2007): A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century. - *Climatic Change*, 81, S. 7-30.
- Crawley M.J. (2007): *The R Book*. Chichester
- Gerlinger K. & Meuser A. (2013): Modellierung des Wasserhaushalts – methodisches Vorgehen und Ergebnisse. – In: AK KLIWA (Hrsg.): 5. KLIWA-Symposium 06.-07.12.2012 in Würzburg, Fachvorträge. KLIWA-Berichte (in Vorbereitung)
- Hay L.E., Wilby R.L. & Leavesley G.H. (2000): A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. - *Journal of the American Water Resources Association* 36, 387-398.
- Imbery F. & Namyslo J. (2011): Verteilungsfunktionen von Änderungssignalen aus einem Klimaprojektionsensemble. – Deutscher Wetterdienst, internes Arbeitspapier
- Imbery F. & Plagemann S. (2011): Die neuen RCP-Szenarien für den 5. IPCC Sachstandsbericht. <http://dwd.de> -> Klimawandel -> Klimaszenarien (Zukunft) -> Emissionsszenarien für den IPCC
- Imbery F., Plagemann S. & Namyslo, J. (2013): Processing and analysing an ensemble of climate projections for the joint research project KLIWAS, *Adv. Sci. Res.*, 10, 91-98
- IPCC (2001): Special Report on Emissions Scenarios (SRES). Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. - Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds.), Cambridge.
- IPCC (2007a): *Climate Change 2007: Synthesis Report*.
- IPCC (2007b): Expert meeting Report – onwards New Scenarios for Analysis of Emissions, Climate Change, Impacts and Response Strategies. – Noordwijkerhout, The Netherlands, 19-21 September 2007.
- IPCC (2013): Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*.

- IPCC-TGICA (2007): General guidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment. Version 2. Prepared by T.R. Carter on behalf of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Assessment. 66 pp.
- KLIWA (2008): Langzeitverhalten von Sonnenscheindauer und Globalstrahlung sowie von Verdunstung und Klimatischer Wasserbilanz in Baden-Württemberg und Bayern. – KLIWA-Berichte, Heft 12.
- Knutti R. & Sedlacek J. (2013): Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. - Nature Climate Change, 3, 369-373
- Kreienkamp F., Spekat A. & Enke W. (2010a): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. – Bericht, CEC Potsdam GmbH
- Kreienkamp F., Spekat A. & Enke W. (2010b): Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen. - Bericht, CEC Potsdam GmbH
- Kreienkamp F., Spekat A. & Enke W. (2011): Ergebnisse regionaler Szenarienläufe für Deutschland mit der statistischen Methode WETTREG auf der Basis der SRES Szenarios A2 und B1modelliert mit ECHAM5/MPI-OM. - Bericht, CEC Potsdam GmbH
- LUBW & LUWG (2007): Ergebnisse der Wasserhaushaltsmodellierungen unter Verwendung der WETTREG-Daten im Rhein-Einzugsgebiet von Baden-Württemberg und der Schweiz. – Ingenieurbüro Dr. Ludwig im Auftrag der LUBW und des LUWG (unveröffentlicht)
- LUBW & LUWG (2008): Berechnung von Klimaszenarien bis zum Jahr 2065 mit dem Wasserhaushaltsmodell LARSIM für das Einzugsgebiet des Rheins in der Schweiz und in Baden-Württemberg – HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW und des LUWG (unveröffentlicht)
- LUBW (2010): Wasserhaushaltssimulationen mit COSMO-CLM-Daten (Version 4.2) und mit WETTREG-Daten für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms. – HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW (unveröffentlicht)
- LUBW & LUWG (2012): Wasserhaushaltssimulationen mit COSMO-CLM-Daten Version 4.8 (run1 bis 3, linear skaliert; run1, quantile mapping) für das Rhein-Einzugsgebiet bis zum Pegel Worms. – HYDRON GmbH im Auftrag der LUBW (unveröffentlicht)
- LUBW (2013): Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg – Perspektiven aus regionalen Klimamodellen. – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Referat 23 LUBW-Berichte (im Druck)
- LUGV (2010): Auswertung regionaler Klimamodelle für das Land Brandenburg – Teil 2 – Gegenüberstellung klimatologischer Parameter mittels WettReg und WettReg2010 und deren Einordnung in das Ensemble der Regionalmodelle. - Fachbeiträge des Landesamtes für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz Brandenburg (LUGV), Titelreihe Heft-Nr. 115
- Moss R., Edmonds J.A., Hibbard K., Manning M., Rose S., van Vuuren D., Carter T., Emori S., Kainuma M. & Kram T (2010): The next generation of scenarios for climate change research and assessment. - Nature 463, S. 747-756
- Peters G.P., Andrew R.M., Boden T., Canadell J.G., Ciais P., Le Quéré C., Marland G., Raupach M.R. & Wilson C. (2013): The challenge to keep global warming below 2 °C. Nature Climate Change 3, 4–6
- ReKliEs-De (2013): Regionales Klimaszenarien Ensemble für Deutschland. ReKliEs Newsletter Nr. 1 August 2013.
- Rogelj J., Meinshausen M. & Knutti R. (2012): Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates. Nature Climate Change, 2, 248-253

- Schädler G. (2009): Dynamisches Modell COSMO-CLM. – Vorträge zum 4. KLIWA-Symposium Mainz, KLIWA-Berichte Heft 15, S. 85-96
- UM & LUBW (2012): Klimawandel in Baden-Württemberg – Fakten-Folgen-Perspektiven. ISBN 978-3-88251-368-4
- Umweltbundesamt (2007): Neue Ergebnisse zu regionalen Klimaänderungen – Das statistische Regionalisierungsmodell WETTREG.
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/neue-ergebnisse-zu-regionalen-klimaaenderungen>
 (letztmalig abgerufen am 06.11.2013)
- Van Vuuren et al. (2009): RCP Extension White Paper, IAM Group,
http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/modeling_documents.html (letztmalig abgerufen am 06.11.2013)
- Van Vuuren D.P., Edmonds J., Thomson A., Kainuma M., Riahi K., Thomson A., Hibbard, K., Hurtt G.C., Kram T., Krey V., Lamarque J-F., Masui T., Meinshausen M., Nakicenovic N., Smith S. & Rose S.K. (2011): The representative concentration pathways: an overview. - Climatic Change, 109, 5-31
- Wagner S., Berg P., Schädler G. & Kunstmann H. (2013): High resolution regional climate model simulations for Germany: Part 2 - projected climate changes Climate Dyn.. 40, 415-427.

