

Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg

 Perspektiven aus regionalen Klimamodellen
– Kurzfassung –



Baden-Württemberg

Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg

 Perspektiven aus regionalen Klimamodellen
– Kurzfassung –

HERAUSGEBER	LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg Postfach 10 01 63, 76231 Karlsruhe, www.lubw.baden-wuerttemberg.de
KONTAKT	Dr. Kai-Achim Höpker, Referat Medienübergreifende Umweltbeobachtung, Klimawandel; Tel.:0721/56001465, Kai.Hoepker@lubw.bwl.de
AUFTRAGGEBER	Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
BEARBEITUNG	Andreas Wagner, Dr. Kai Gerlinger, Erkin Chomoev, Markus Mast HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft mbH Haid-und-Neu-Straße 7, 76131 Karlsruhe, www.hydron-gmbh.de Dr. Kai-Achim Höpker (LUBW) Daniel Schulz-Engler (LUBW)
BEZUG	Kostenloser Download unter: www.lubw.baden-wuerttemberg.de
ISBN	978-3-88251-376-9
STAND	Februar 2013

Nachdruck – auch auszugsweise – ist nur mit Zustimmung des Herausgebers unter Quellenangabe und Überlassung von Belegexemplaren gestattet.

ZUSAMMENFASSUNG	7
1 AUSGANGSLAGE	8
2 METHODISCHES VORGEHEN	11
2.1 Auswahl der Klimaprojektionen	11
2.2 Auswertung der Klimaprojektionen	12
3 ERGEBNISSE	16
3.1 Ergebnis der Bewertung der Kennzahlen	16
3.2 Kennzahlen mit der Bewertung „Zufriedenstellend“	16
3.3 Kennzahlen mit der Bewertung „eingeschränkt zufriedenstellend“	19
3.4 Kennzahlen mit der Bewertung „Nicht Zufriedenstellend“	27
3.5 Fazit und Ausblick	28
4 LITERATUR	29
ANLAGE: DEFINITION DER KENNZAHLEN	30

Zusammenfassung

Für die Ableitung zukünftiger klimatischer Rahmenbedingungen für Baden-Württemberg wurden Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen ausgewertet. Unter „regionalen Klimaprojektionen“ werden dabei die Ergebnisse von Modellketten bestehend aus der Vorgabe eines Emissions-szenarios für die Entwicklung der zukünftigen Treibhaus-gaskonzentrationen, aus globalen Klimamodellen und aus regionalen Klimamodellen verstanden.

Um die Zuverlässigkeit der Aussagen zu erhöhen, wurden für die Einschätzung des Klimawandels in Baden-Württemberg die Ergebnisse von 29 verschiedenen Klimaprojektionen analysiert (Ensemble-Ansatz). Die Klimaprojektionen wurden für den Ist-Zustand (1971-2000), für die nahe Zukunft (2021-2050) und für die ferne Zukunft (2071-2100) gemeinsam ausgewertet.

Aus den 29 Klimaprojektionen wurden zunächst fünf Klimaprojektionen ausgeschlossen, die für Baden-Württemberg aufgrund von deutlich unrealistischen Ergebnissen für die Simulation des derzeitigen Klimas ungeeignet erscheinen.

Somit standen 24 Klimaprojektionen für die Auswertung der nahen Zukunft zur Verfügung. Für die ferne Zukunft sind generell weniger Klimaprojektionen verfügbar, hier wurden 15 Klimaprojektionen ausgewertet. Aus den vier Klimaparameter Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit wurden 28 Kennzahlen (wie z.B. Anzahl der Sommertage) abgeleitet und für die Landesfläche von Baden-Württemberg analysiert. Aus der Änderung der Werte für beide Zeiträume in der Zukunft zum Ist-Zustand ergeben sich die Klimasignale für jede Kennzahl.

Durch die Auswertungen der verschiedenen Klimaprojektionen war es möglich, die zu erwartenden zukünftigen Entwicklungen aufzuzeigen:

- Für alle Kennzahlen der Temperatur ergibt sich eine deutliche Veränderung der Werte in der Zukunft im Vergleich zum Ist-Zustand und somit ein starkes Klimasignal mit hoher Richtungssicherheit. Es kann von einer Temperaturzunahme in der Zukunft ausgegangen werden.
- Der Klimaparameter Niederschlag ist schwieriger zu simulieren als die Temperatur. Entsprechend sind die Streuungen der Klimaprojektionen in der Regel höher als bei der Temperatur. Die Stärke des Klimasignals ist je nach Kennzahl unterschiedlich und die Richtungssicherheit ist weniger deutlich als bei den Kennzahlen der Temperatur.
- Die Kennzahlen der Globalstrahlung sind geprägt von hohen Streuungen. Die Änderungen zur Zukunft hin sind im Mittel sehr klein.
- Für die Kennzahlen der Windgeschwindigkeit sind kaum Änderungen zur Zukunft hin zu erwarten. Die Stärke des Klimasignals ist gering.

Mit Hilfe einer statistischen Auswertung wurde die Bandbreite der Klimaprojektionen analysiert und Werte für die Kennzahlen als „klimatische Leitplanken“ angegeben. Diese Werte können für Vulnerabilitätsanalysen oder die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen herangezogen werden. Durch die durchgeführte Bewertung mit Angabe der Streuungen und der Richtungssicherheit kann die Zuverlässigkeit und Belastbarkeit der jeweiligen Kennzahl eingeschätzt werden. Damit lassen sich basierend auf den derzeitigen verfügbaren Klimaprojektionen sowohl qualitative als auch quantitative Aussagen zum Klimawandel in Baden-Württemberg treffen.

Zu diesem Bericht liegt eine Langfassung mit dem Titel „Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg – Perspektiven aus regionalen Klimamodellen – Langfassung“ vor, die auf der Internetseite der LUBW herunterladbar ist.

1 Ausgangslage

Entsprechend den Erkenntnissen des Vierten Sachstandsberichts des UNO-Weltklimarats (IPCC) gibt es klare Belege für den Klimawandel (IPCC 2007). Dieser kann bereits eindeutig anhand von Messdaten in der Erwärmung des globalen Klimasystems nachgewiesen werden. Auch in Baden-Württemberg ist der Klimawandel bereits am Anstieg der Lufttemperatur (Abb. 1) und in den Veränderungen weiterer Messdaten ersichtlich (Rudolf et al. 2009). Zudem zeigen sich erste Veränderungen in der Umwelt und Natur Baden-Württembergs, die auf den Klimawandel zurückzuführen sind (UM & LUBW 2012).

Dabei liegen die Ursachen für den Klimawandel sehr wahrscheinlich in dem vom Menschen verursachten Anstieg der Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre. Wegen der Trägheit des Klimasystems werden sich die Wirkungen der heutigen deutlich höheren Treibhausgasemissionen erst in den kommenden Jahrzehnten bemerkbar machen. Es kann von einer weiteren Erwärmung der Erde ausgegangen werden.

Vor diesem Hintergrund müssen einerseits auch weiterhin große Anstrengungen zur Emissionsminderung unternommen werden. Andererseits wird es zunehmend wichtig,

Maßnahmen für die Anpassung an den nicht vermeidbaren Klimawandel zu entwickeln und zu realisieren. Diese Anpassungsmaßnahmen haben zum Ziel, die Auswirkungen eines sich wandelnden Klimas zu verringern.

Die Folgen des Klimawandels werden weitreichende Konsequenzen in allen Bereichen des Lebens haben. Dabei werden verschiedenste Handlungsfelder wie Wasserwirtschaft, Landwirtschaft, Naturschutz und Biodiversität, Energiewirtschaft, Infrastrukturen, Raumplanung, Tourismus und andere betroffen sein. Damit rechtzeitig Anpassungsmaßnahmen in Angriff genommen werden können, ist es erforderlich, auf Regionen bezogene Aussagen zum Klimawandel zur Verfügung zu stellen.

Mit der vorliegenden Kurzfassung einer umfangreichen Studie zum Vergleich regionaler Klimaprojektionen werden klimabezogene Rahmenbedingungen („klimatische Leitplanken“) für die Entwicklung einer baden-württembergischen Anpassungsstrategie für die nahe Zukunft (2021-2050) und ferne Zukunft (2071-2100) bereitgestellt. Diese Rahmenbedingungen sollen die Grundlagen für Vulnerabilitätsabschätzungen und die Formulierung von Anpassungsmaßnahmen liefern.

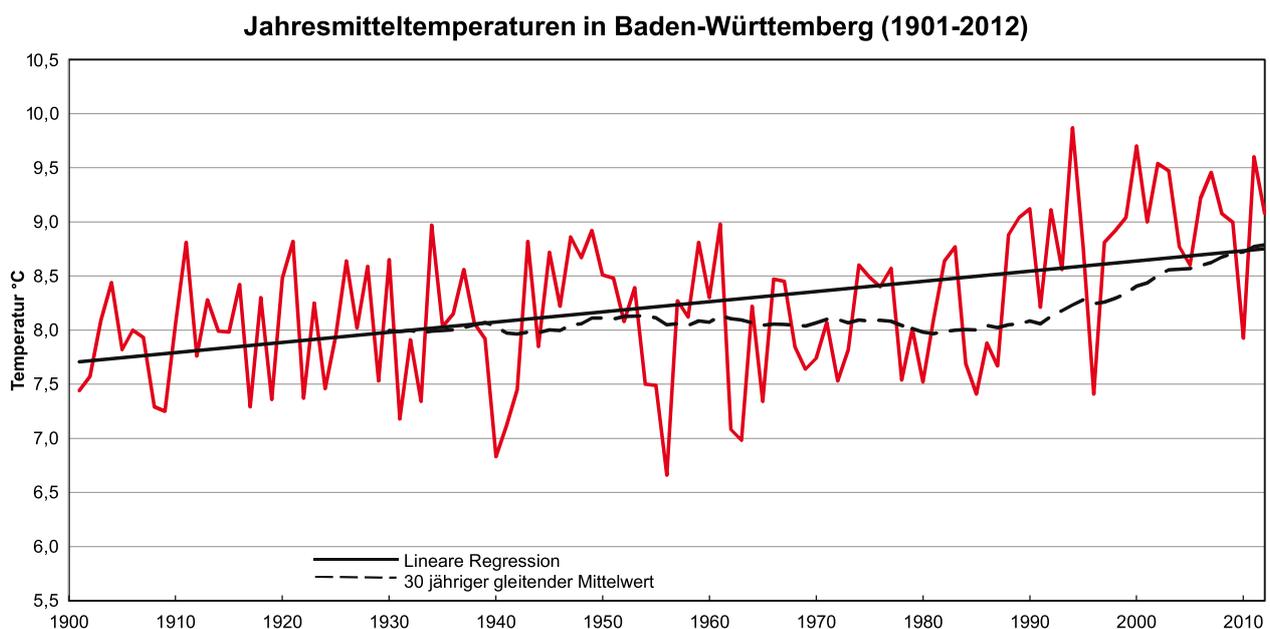


Abb. 1: Jahresmitteltemperaturen in Baden-Württemberg 1901 bis 2012 (Daten des DWD, Bearbeitung LUBW)

Ausgangspunkt für die Abschätzung der regionalen Auswirkungen des Klimawandels sind Annahmen zur weiteren Entwicklung der Emissionen wie z.B. dem Anstieg der CO₂-Konzentration. Diese sind allerdings von ökonomischen, sozialen und politischen Entwicklungen abhängig, die grundsätzlich nicht vorhersagbar sind. Daher wurden unterschiedliche Emissionsszenarien definiert (SRES-Szenarien (IPCC 2001)), die die möglichen Entwicklungen im 21. Jahrhundert berücksichtigen. Für die folgende Studie wurde ein mittleres Szenario A1B aus den vier Hauptgruppen der SRES-Szenarien A1, A2, B1 und B2 ausgewählt, das in den meisten aktuellen Klimaanalysen Anwendung findet (Abb. 2).

Unter Verwendung der SRES-Emissionsszenarien werden zur Berechnung des Klimas für die Zukunft globale Zirkulationsmodelle verwendet. Auf Grund der komplexen Prozesse und der zur Verfügung stehenden Computerkapazitäten sind diese Globalmodelle in ihrer räumlichen Modellauflösung limitiert (z.B. Modellelemente mit 250 km x 250 km). Für die Erstellung von Aussagen zum Klimawandel auf der regionalen Skala werden daher Regionalmodelle verwendet, die als Antriebsdaten die Modellergebnisse eines Globalmodells nutzen (Abb. 3). Um die gewünschten Klimainformationen für spezielle Anwendungszwecke zu erhalten, können die Ergebnisse der Regionalmodelle weiter in einem Wirkmodell verwendet werden.

Die Ergebnisse der Globalmodelle zusammen mit den Ergebnissen der Folgemodelle innerhalb einer Modellkette werden entsprechend IPCC DCC (2007) als „Klimaprojektion“ bezeichnet. Eine „Klimaprojektion“ ist eine durch Klimamodelle abgeleitete Abschätzung des zukünftigen Klimas unter der Annahme eines Emissionsszenarios.

Die Forschungsergebnisse der letzten Jahre haben gezeigt, dass die Verwendung einer einzelnen Modellkette bestehend aus einem Emissionsszenario, einem Globalmodell und einem Regionalmodell nicht ausreicht, um den möglichen Klimawandel eindeutig zu beschreiben. Jeder Baustein der Modellkette enthält Unsicherheiten, die zur Gesamtunsicherheit der regionalen Klimaprojektion beitragen:

- Durch die chaotische Dynamik des Klimas überlagern die natürlichen Klimaschwankungen die anthropogen verursachten Veränderungen.
- Aufgrund der Komplexität des Klimas sind die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge bisher nicht vollständig erfasst.
- Die Menge der zukünftigen Treibhausgase kann nur abgeschätzt werden, da sie direkt durch Faktoren wie die wirtschaftliche Entwicklung und die Ergebnisse internationaler Klimaverhandlungen beeinflusst wird, die nicht vorhersehbar sind.
- Die regionalen Auswirkungen von Klimaveränderungen auf natürliche Systeme sind hochkomplex und werden noch erforscht. Eine besondere Rolle hierbei spielen Kippunkte des Klimasystems.

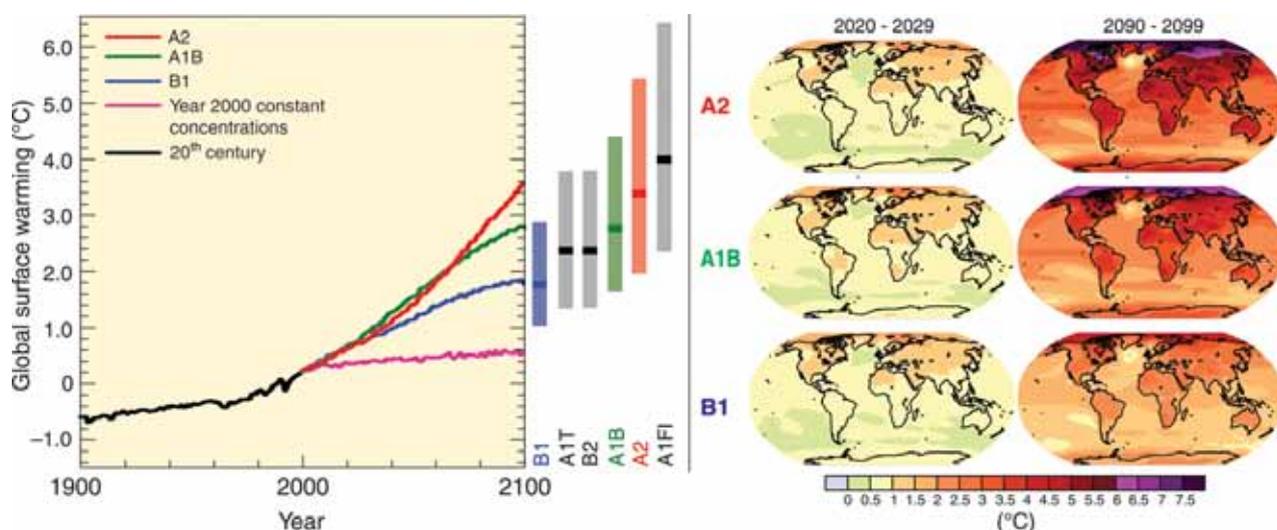


Abb. 2: Beobachtete und abgeschätzte Entwicklung der mittleren globalen Lufttemperatur in Abhängigkeit vom angenommenen SRES-Emissionsszenario. Die farbigen Balken rechts außen geben für die SRES-Emissionsszenarien die Bandbreite der Streuung aufgrund der Verwendung eines Ensembles aus verschiedenen Klimamodellen an (nach IPCC 2007).

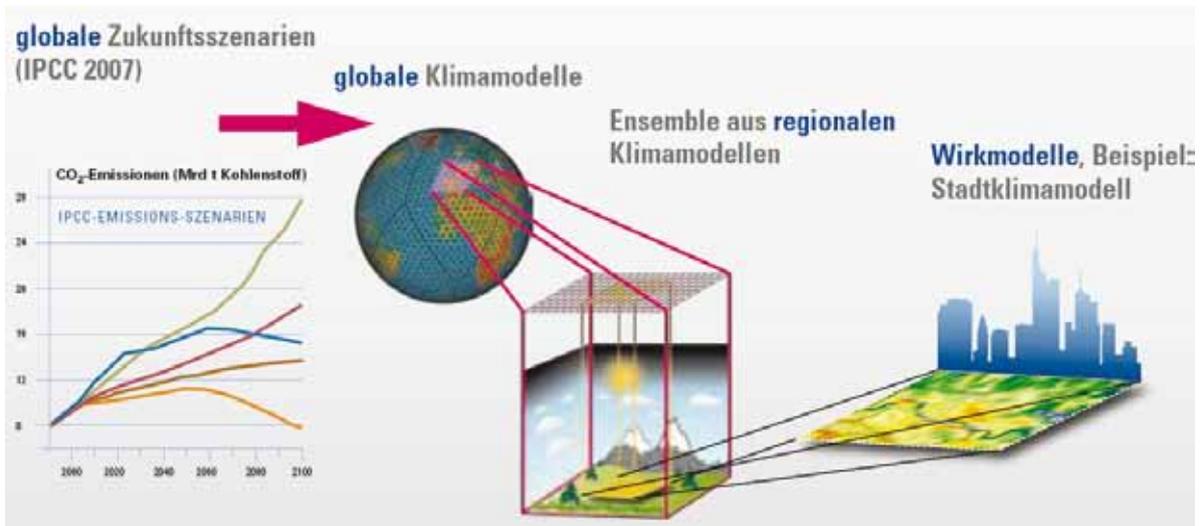


Abb. 3: Beispiel einer Modellkette bestehend aus Emissionsszenarien, globalen Klimamodelle (mit geringer räumlicher Auflösung) und eingebettet regionale Klimamodelle (mit hoher räumlicher Auflösung) sowie nachfolgendem Wirkmodell (DWD 2010)

Jedes Klimamodell und jede Modellkette besitzt Stärken und Schwächen. Daher ist es notwendig, verschiedene Klimaprojektionen gemeinsam als ein Ensemble zu verwenden und eine Ergebnisbandbreite darzustellen, in der eine Klimaentwicklung möglich ist.

In dieser Studie wurden 29 Klimaprojektionen in ein Ensemble aufgenommen. Dabei sind auch Klimaprojektionen enthalten, die in vorliegenden Projekten (z.B. KLIWA 2006) verwendet wurden, so dass eine Einordnung der bisherigen Ergebnisse möglich ist.

Da in einem Ensemble nicht nur eine Klimaprojektion zur Ermittlung des Klimaänderungssignals vorliegt, sondern eine ganze Reihe von Klimaprojektionen, wurde dieses Ensemble von Klimaprojektionen statistisch ausgewertet. Hierdurch werden nicht nur Erkenntnisse über den tendenziell wahrscheinlichsten Wert gewonnen, sondern auch über die Streuung und somit Unsicherheit der Ergebnisse.

Dabei hängt die Unsicherheit auch immer von der Komplexität der Zielgröße ab, für die eine Aussage gewünscht wird. Aussagen zu Extremwerten oder für kleine räumliche Skalen sind auch bei einer Ensemblebetrachtung derzeit noch mit größeren Unsicherheiten verbunden.

Auch mit dem vorliegenden außergewöhnlich umfangreichen Vergleich von Klimaprojektionen kann die Entwicklung für die nahe und ferne Zukunft nicht „vorhergesagt“ werden. Dies ist aber selbstverständlich, wenn es sich um in die Zukunft gerichtete Fragestellungen handelt. Vielmehr können hier die möglichen Entwicklungen unter der Vorgabe des A1B-Szenarios für wichtige Klimaparameter und abgeleitete Kennzahlen auf der Basis einer sehr umfassenden, in dieser Form bislang nicht durchgeführten Untersuchung plausibilisiert und abgesichert werden. Sollten sich in den nächsten Jahren Hinweise auf erhebliche Abweichungen der ökonomischen, sozialen und politischen Entwicklungen oder neue wissenschaftliche Erkenntnisse ergeben, so können Neuberechnungen notwendig werden.

Der komplette Bericht ist unter dem Titel „Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg – Perspektiven aus regionalen Klimamodellen – Langfassung“ auf der Internetseite der LUBW herunterladbar.

2 Methodisches Vorgehen

2.1 Auswahl der Klimaprojektionen

Für die Ableitung klimatologischer Rahmenbedingungen für die nahe und ferne Zukunft wurden 29 Klimaprojektionen für Baden-Württemberg hinsichtlich der Klimaparameter Temperatur, Niederschlag, Globalstrahlung und Windgeschwindigkeit untersucht. Die Auswahl der 29 Klimaprojektionen orientiert sich an verfügbaren Klimaprojektionen v.a. aus den Projekten ENSEMBLES (van der Linden & Mitchell 2009), CEDIM (Schädler et al. 2012) und KLIWA sowie an vergleichbaren Auswertungen (z.B. Becker et al. 2012, Görden et al. 2010, CH2011 (2011)).

Aus den 29 Klimaprojektionen wurden zunächst fünf Klimaprojektionen ausgeschlossen, die für Baden-Württemberg aufgrund von deutlich unplausiblen Ergebnissen für die Simulation des derzeitigen Klimas ungeeignet erschienen. Die verbleibenden 24 Klimaprojektionen wurden detailliert ausgewertet, indem 28 ausgewählte Kennzahlen analysiert wurden (Tab. 1). Diese Kennzahlen wurden aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen für vier Klimaparameter abgeleitet.

Um zu überprüfen, wie gut die Klimaprojektionen und die daraus abgeleiteten Kennzahlen den Ist-Zustand (1971 bis 2000) des jetzigen Klimas wiedergeben können, wurden die Kennzahlen für den Ist-Zustand mit regionalisierten realen Beobachtungsdaten des Zeitraums 1971 bis 2000 für Baden-Württemberg verglichen.

Für die Auswertung der zukünftigen Entwicklung wurden zwei 30-jährige Zeiträume in der Zukunft ausgewählt, die als „nahe Zukunft“ (2021-2050) und „ferne Zukunft“ (2071-2100) bezeichnet werden.

Für die beiden Zeiträume in der Zukunft wurde jeweils das Klimasignal aus den Klimaprojektionen untersucht, also die Änderung der Kennzahlen der beiden Zukunftsszenarien zu den Werten des Ist-Zustands. Allerdings verfügen nicht alle 24 Klimaprojektionen über Daten für die ferne Zukunft, so dass für die ferne Zukunft nur 15 Klimaprojektionen zur Verfügung standen.

Tab. 1: Ausgewertete Kennzahlen (genaue Definition der Kennzahlen vgl. Anlage am Berichtsende)

Temperatur	Niederschlag
Jahresmitteltemperatur	Niederschlagssumme im Jahr
Heiztag	Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr
Kühlgradtage	Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr
Vegetationsbeginn	Anzahl der Tage ohne Niederschlag
Tropennacht	Anzahl der Tage mit Starkniederschlag
Frosttag	Starkniederschlags-Höhe
Datum letzter Frost	Niederschlagssumme im meteorologischen Frühjahr
Heißer Tag (Tropentag)	Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode
Sommertag	Trockenperioden in der Vegetationsperiode
Eistag	Längste Dauer von Trockenperioden
Windgeschwindigkeit	Globalstrahlung
Mittlere Windgeschwindigkeit	Summe der Globalstrahlung/Jahr
Standardabweichung der Windgeschwindigkeit	Standardabweichung der Globalstrahlung
Maximale mittlere Windgeschwindigkeit	Minimale mittlere Globalstrahlung
Anzahl der Tage > 8 m/s Windgeschwindigkeit	Maximale mittlere Globalstrahlung

Die Klimaprojektionen lagen entweder als Stationsdaten oder in unterschiedlichen räumlichen Auflösungen als Rasterdaten vor. Um daher die Vergleichbarkeit zu ermöglichen, wurden die Ergebnisse auf ein einheitliches Raster von 25 x 25 km² übertragen. Das Untersuchungsgebiet ist die Landesfläche von Baden-Württemberg. Vier Klimaprojektionen wurden neben dieser 25 x 25 km²-Auflösung zudem in der originalen 7 x 7 km²-Auflösung analysiert, um etwaige Unterschiede, die sich durch verschiedene räumliche Auflösungen ergeben, herauszustellen.

Zudem wird zu Vergleichszwecken eine Klimaprojektion verwendet, die anstelle mit dem A1B-Szenario mit dem B2-Szenario gerechnet wurde. Da deren Ergebnisse gut zu den anderen Klimaprojektionen passen, wird diese Klimaprojektion im Weiteren gemeinsam mit den Klimaprojektionen auf Basis des A1B-Szenarios betrachtet.

2.2 Auswertung der Klimaprojektionen

Für die Auswertung der Klimaprojektionen wurde zum einen der Median der Klimaprojektionen betrachtet. Der Median ist der Mittelpunkt einer Bandbreite von Ergebnissen der Klimaprojektionen, die alle als gleich wahrscheinlich zu betrachten sind. Daher wurde zum anderen aus der Bandbreite der Klimaprojektionen ein Korridor bestimmt, in dem der zu erwartende Klimawandel in Baden-Württemberg wahrscheinlich eintreten wird.

Die Werte dieses Korridors werden als zukunftsbezogene „klimatische Leitplanken“ verstanden, da die unteren und oberen Bereiche der Auswirkungen des Klimawandels angegeben werden. Durch die dargestellten Bandbreiten wird zum einen die Streuung der Ergebnisse bei den derzeitigen Klimaprojektionen ersichtlich, zum anderen kann aber auch die Stärke und Richtungssicherheit der zu erwartenden Änderungen eingeschätzt werden. Die Stärke kennzeichnet das Ausmaß und die Höhe des Klimasignals. Richtungssicherheit liegt vor, wenn die Klimaprojektionen weitgehend die gleiche Richtung der Entwicklung des Klimasignals (zunehmend, abnehmend oder unverändert) zeigen.

Als Korridor bzw. klimatische Leitplanken wird der Bereich des 15. Perzentils und des 85. Perzentils vorgeschlagen. Die Betrachtung der Perzentile bietet den Vorteil, eine gewisse Bandbreite von Modellergebnissen zu erlauben und gleichzeitig Ausreißerwerte unberücksichtigt zu lassen. In Abbildung 4 (links) ist die Ermittlung der Perzentile anhand der Ergebnisse für die Jahreslufttemperatur der Klimaprojektionen schematisch dargestellt:

- Die mittleren Werte aus den regionalen Klimaprojektionen werden der Größe nach sortiert.
- Das 50. Perzentil ist der Wert, für den jeweils die Hälfte der Modellsimulationen höhere bzw. niedrigere Änderungen zeigt. Er repräsentiert somit den Median und innerhalb des Ensembles ein mittleres Klimaänderungssignal.
- Neben dem 50. Perzentil werden das 15. und 85. Perzentil angegeben, um die Bandbreite der Modellergebnisse zu verdeutlichen, ohne dass 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 Perzentile der verschiedenen Kennzahlen wurden für jedes Rasterelement ermittelt und flächendifferenziert für die Landesfläche von Baden-Württemberg dargestellt (Abb. 4 rechts oben). Um die Vergleichbarkeit der Klimaprojektionen zu wahren, wurden für die flächenhaften Perzentildarstellungen die vier Klimaprojektionen in der 7 x 7 km²-Auflösung nicht berücksichtigt und nur die Klimaprojektionen in 25 x 25 km²-Auflösung betrachtet. Da für die ferne Zukunft nicht alle Klimaprojektionen verfügbar sind, ergeben sich für Ist-Zustand und nahe Zukunft 20, für die ferne Zukunft 15 Klimaprojektionen.

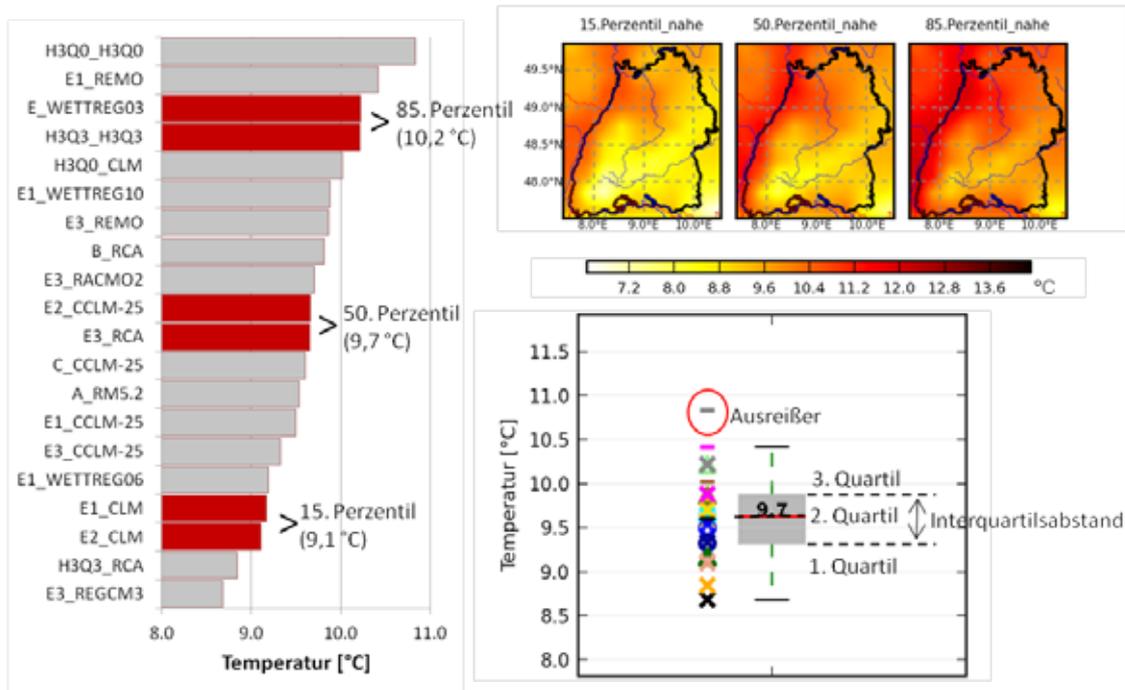


Abb. 4: Exemplarische Erläuterung der Perzentile und der Box-Whisker-Diagramme am Beispiel der Jahreslufttemperatur der nahen Zukunft:
 a) Perzentile: ermittelt aus den 20 Klimaprojektionen in der Auflösung 25 x 25 km² (links: Perzentile am Beispiel der über die Fläche von Baden-Württemberg gemittelten Temperatur; rechts oben: flächenhafte Darstellung der 15., 50. und 85. Perzentile)
 b) Box-Whisker-Diagramm (unten rechts): über die Fläche von Baden-Württemberg gemittelten Temperatur, ermittelt aus den 20 Klimaprojektionen in der Auflösung 25 x 25 km². Nähere Erläuterungen im Text.

Zudem wurden für die Analyse der Kennzahlen Box-Whisker-Diagramme mit den Flächenmittelwerten über Baden-Württemberg erzeugt (Abb. 4 unten rechts):

- 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 und umfasst damit 50 % der Klimaprojektionen.
- 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).
- Werte von Klimaprojektionen außerhalb der Whisker gelten als Ausreißer.

Dabei wurden bei den Box-Whisker-Diagrammen für den Ist-Zustand und die nahe Zukunft ebenfalls 20 Klimaprojektionen und für die ferne Zukunft 15 Klimaprojektio-

nen ausgewertet. Durch die ausschließliche Verwendung von Klimaprojektionen mit 25 x 25 km² Auflösung stimmt das 50. Perzentil der Tabelle 3 mit dem Median bei den Box-Whisker-Diagrammen einer Kennzahl überein.

Beim Vergleich der Mediane für die nahe und für die ferne Zukunft ist die unterschiedliche Anzahl verwendeter Klimaprojektionen in den Grundgesamtheiten zu berücksichtigen. In der Regel sind die Unterschiede der Ergebnisse aber gering und insbesondere für die Ermittlung der Richtungen der zukünftig zu erwartenden Änderungen weniger bedeutend.

Somit können anhand der Perzentile und der Box-Whisker-Diagramme die Korridore identifiziert werden, in denen die Klimaprojektionen eine mögliche Klimaentwicklung auf der Basis der angenommenen Szenarien beschreiben.

Auf dieser Grundlage können Fachexperten für eine Vulnerabilitätsanalyse bzw. die Ableitung von Anpassungsstrategien und Maßnahmen für ihren Bedarf geeignete „kli-

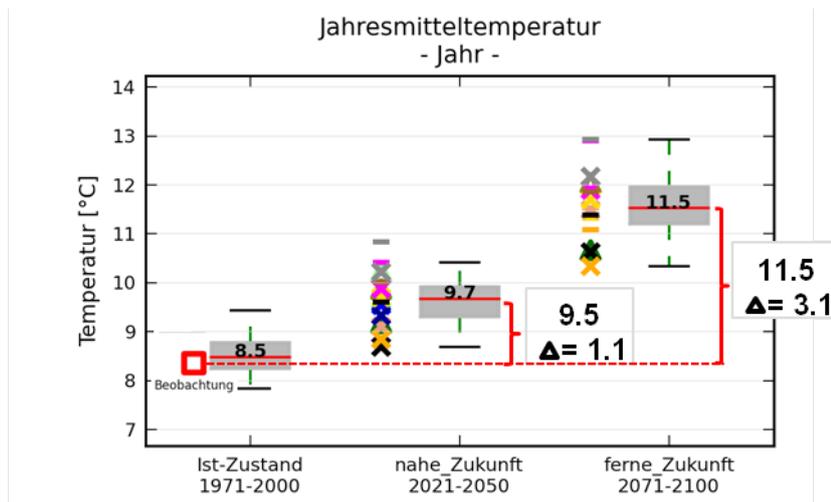


Abb. 5: Schematische Darstellung der Ableitung des Klimasignals aus den Ergebnissen der Klimaprojektionen zur Übertragung auf die Beobachtungsdaten (Delta-Change-Verfahren)

matische Leitplanken“ ablesen. Hier bieten sich beispielsweise „worst-case“-Strategien an, bei denen die Werte an den Korridor Grenzen herangezogen werden. Dabei kann je nach Fragestellung das 85. Perzentil oder das 15. Perzentil relevant sein. Eine mittlere Entwicklung könnte durch die Verwendung des Medians abgedeckt werden. Letztendlich hängt eine geeignete Auswahl von der jeweiligen Fragestellung im Handlungsfeld ab und ist von den Fachexperten zu entscheiden.

Um direkt verwertbare Werte für die Kennzahlen in der nahen und fernen Zukunft zu haben, wurden zusätzlich die Ergebnisse der Klimaprojektionen auf die Beobachtungswerte übertragen. Dazu wurden die relativen Veränderungen der Werte zwischen der Simulation des Ist-Zustands und der Zukunftsszenarien auf die beobachteten Werte aufaddiert.

So ergibt sich z.B. aus der Auswertung der Klimaprojektionen als Median für die nahe Zukunft für die Lufttemperatur ein Wert von 9,7 °C im Vergleich zum modellierten Ist-Zustand mit 8,5 °C und somit eine Temperaturerhöhung um +1,1 °C (Abb. 5). Nun wird nicht der Wert von 9,7 °C als Abschätzung des Werts für die zukünftige Entwicklung der Temperatur genommen. Stattdessen wird der Wert von +1,1 °C als Klimasignal verstanden und auf den mittleren Beobachtungswert (hier 8,4 °C) aufaddiert, um den Wert für die Temperatur der nahen Zukunft zu erhalten (somit 9,5 °C).

Für eine konservative Abschätzung können statt des Medians die Werte z.B. des 85. Perzentils der nahen Zukunft bzw. der fernen Zukunft auf die Beobachtungsdaten aufaddiert werden.

Das Verfahren zur Übertragung des Klimasignals auf die Beobachtungsdaten wird als Delta-Change-Verfahren bezeichnet (Hay et al. 2000, Andréasson et al. 2004). Dadurch können eventuelle systematische Über- oder Unterschätzungen in den Klimaprojektionen minimiert und somit die Zuverlässigkeit der bereitgestellten Werte erhöht werden. Die so ermittelten Werte werden zusätzlich zu den Werten, wie sie in den Grafiken vorliegen, bereitgestellt.

Bei der Interpretation der angegebenen Zahlenwerte (z. T. mit Nachkommastellen) ist zu berücksichtigen, dass die erzielbare Genauigkeit immer vor dem Hintergrund der Modellunsicherheit gesehen werden muss. Die aufgeführten genauen Zahlenwerte sind somit eher als Richtgrößen zu verstehen.

Die Kennzahlen wurden hinsichtlich ihrer Aussagesicherheit bewertet, in dem zum einen ein Vergleich der Simulation des Ist-Zustands mit den realen Beobachtungswerten durchgeführt wurde. Zum anderen wurden die Ergebnisse der Regionalmodelle untereinander anhand der Streuung für die Zeiträume der Zukunftsszenarien ausgewertet.

Konkret wurde für die Bewertung wie folgt vorgegangen:

- Für die Einstufungen der Kennwertberechnungen werden die drei Klassen „gering“, „mäßig“ und „hoch“ verwendet.
- Bei der Bewertung der Streuung des Werts im Ist-Zustand wird zum einen die Spannweite der auftretenden Simulationsergebnisse aus den Klimaprojektionen mit dem Beobachtungswert verglichen. Dabei wird als Spannweite die Differenz des 85. und des 15. Perzentils bezeichnet. Zum anderen wird die Abweichung („Bias“) des Medians der Klimaprojektionen vom Beobachtungswert betrachtet.
- Für die Bewertung der Streuung des Klimasignals wird zudem die Spannweite der Klimaprojektionen in der nahen und fernen Zukunft mit dem jeweiligen Median der Klimaprojektionen verglichen.
- Bei der Richtungssicherheit wird überprüft, ob alle Klimaprojektionen die gleiche Tendenz für die Zukunft zeigen oder nicht. Auch die Stärke, d.h. die Deutlichkeit des Klimasignals, wird beachtet.

Auf Grundlage der Streuung, der Stärke und der Richtungssicherheit des Klimasignals wird eine Gesamteinschätzung gemacht, inwieweit die Ergebnisse der Klimaprojektionen zufriedenstellend sind und somit verlässlich erscheinen.

Dabei werden folgende Einschätzungen getroffen:

- „zufriedenstellend“: Dies ist die beste vergebene Bewertung.
- „eingeschränkt zufriedenstellend“: Diese Gruppe umfasst die meisten Kennzahlen. Dabei werden Ergebnisse erzielt, die eine Aussagekraft besitzen, jedoch durch beispielsweise hohe Streuungen mit einer größeren Unsicherheit verbunden sind.
- „nicht zufriedenstellend“: Die Kennzahlen dieser Gruppe besitzen meist so große Streuungen innerhalb des Ensembles, dass kaum eine Aussage über die zukünftige Entwicklung möglich ist.

Bei der Bewertung der Streuungen der Klimaprojektionen wurde berücksichtigt, dass auch Messungen realer Werte Streuungen aufweisen, die je nach untersuchtem

Klimaparameter unterschiedlich groß sind. So wird z.B. die Lufttemperatur deutlich genauer als die Niederschlagsmenge erfasst.

Für die Bewertung der Streuungen und Richtungssicherheit des Klimasignals und der Einschätzung der Klimaprojektion wurde keine abschließende statistische Einschätzung durchgeführt, sondern es erfolgte eine Experteneinschätzung aus der Zusammenschau der Ergebnisse. Dabei wurden vor allem die Streuung des Klimasignals und die Streuung im Ist-Zustand für die Bewertung herangezogen, während die Richtungssicherheit des Klimasignals weniger stark gewichtet wurde. Die Stärke des Klimasignals ging nicht in die Bewertung ein. Eine erweiterte statistische Auswertung wird folgen.

Für einige Anpassungsmaßnahmen kann aber die Richtungssicherheit von großer Bedeutung sein, während die Streuung weniger Einfluss hat. Dies ist z.B. der Fall, wenn die Werte des Klimasignals von untergeordneter Bedeutung sind und es nur darauf ankommt zu wissen, in welche Richtung sich der Klimawandel auswirken wird. Somit kann es bei einer anderen Wichtung der vorgeschlagenen Kriterien zu einer abweichenden Gesamtbewertung für die Kennzahl durch den Anwender kommen.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnis der Bewertung der Kennzahlen

Die Ergebnisse der Bewertung der in Tabelle 1 gelisteten Kennzahlen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Für alle Kennzahlen der **Temperatur** ergibt sich ein starkes Klimasignal mit hoher Richtungssicherheit. Es kann von einer Temperaturzunahme in der Zukunft ausgegangen werden. Die Simulationsergebnisse sind meist (eingeschränkt) zufriedenstellend. Je nachdem, ob die Kennzahl auf dem Tagesmittelwert, dem Tagesminimum oder dem Tagesmaximum der Temperatur basiert, ergeben sich meist typische Verteilungen der einzelnen Klimaprojektionen innerhalb des Wertebereichs in den Diagrammen. Damit werden bestimmte Charakteristika der einzelnen Klimaprojektionen hinsichtlich einer tendenziellen Temperaturüberschätzung oder Temperaturunterschätzung deutlich.
- Der Klimaparameter **Niederschlag** ist deutlich schwieriger zu simulieren als die Temperatur. Entsprechend sind die Streuungen der Modellsimulationen in der Regel höher als bei der Temperatur. Generell zeigen die Klimaprojektionen des Ist-Zustands eine Tendenz der Überschätzung der gemessenen Niederschlagssummen. Die Stärke des Klimasignals ist je nach Kennzahl unterschiedlich, die Richtungssicherheit meist nur mäßig. Trotz teilweise hoher Streuungen der Modellergebnisse werden die Kennzahlen des Niederschlags meist als eingeschränkt zufriedenstellend bewertet.
- Die Kennzahlen der **Globalstrahlung** sind geprägt von sehr hohen Streuungen und damit hohen Unsicherheiten. Die Änderungen zur Zukunft hin sind im Mittel sehr klein, wobei die Aussagekraft durch die teilweise hohen Streuungen bei geringer Klimasignalarstärke sehr eingeschränkt ist.
- Generell gilt für die Kennzahlen der **Windgeschwindigkeit**, dass kaum Änderungen zur Zukunft hin zu erwarten sind. Die Stärke des Klimasignals ist gering. Die Übereinstimmung der Klimaprojektionen ist sehr gut: alle Klimaprojektionen weisen darauf hin, dass zur Zukunft hin nur geringe Änderungen zu erwarten sind, so dass die Richtungssicherheit hoch ist. Diese Änderungen können sowohl leichte Zunahmen als auch leichte Abnahmen sein.

Im Folgenden werden von den 28 untersuchten Kennzahlen ausgewählte Kennzahlen einzeln aufgeführt und diskutiert. In Tabelle 2 werden die Ergebnisse der Analyse aller Kennzahlen aufgeführt. Die angegebenen Werte können für die Klimafolgenbetrachtungen für verschiedenste Themenbereiche verwendet werden. Die Erläuterung der Ergebnisse für die Kennzahlen wird in drei Kapiteln entsprechend der Bewertungsklassen aus der Analyse der Klimaprojektionen unterteilt. Einen zusammenfassenden Überblick über die Bewertung aller abgeleiteten Kennzahlen gibt Tabelle 4.

Für die folgenden Erläuterungen werden hauptsächlich die Box-Whisker-Diagramme sowie die Werte in Tabelle 3 herangezogen. Die ebenfalls aufgeführten flächenbezogenen Perzentildarstellungen sind als Zusatzinformation hilfreich, um erste regionale Unterschiede z.B. zwischen Oberrheingraben und Schwarzwald zu erkennen. Die textlichen Ausführungen basieren jedoch auf den Flächenmittelwerten für Baden-Württemberg. Die folgenden Box-Whisker-Diagramme und Perzentildarstellungen zeigen jeweils die Werte der Klimaprojektionen vor Durchführung des Delta-Change-Verfahrens.

3.2 Kennzahlen mit der Bewertung „Zufriedenstellend“

Jahresmitteltemperatur („T Mittel“)

Die **Jahresmitteltemperatur** für Baden-Württemberg auf Basis der Beobachtungsdaten liegt bei 8,4°C und wird von den Klimaprojektionen gut wiedergegeben. Die Spannweite der Klimaprojektionen für die Simulation des Ist-Zustands beträgt 0,9°C, ist also relativ gering (Tabelle 2). Der Median der Klimaprojektionen liegt bei 8,5°C, somit beträgt der Bias 0,1°C (Tabelle 2) und ist somit auch gering. Daher wird diese Streuung als gering eingestuft. Auch beim Klimasignal ergeben sich nur geringe Streuungen der Ergebnisse der Klimaprojektionen (Abb. 6). Die Spannweite in der nahen Zukunft liegt zwischen 0,8°C und 1,7°C, in der fernen Zukunft zwischen 2,5°C und 3,6°C (Tabelle 2). Alle Klimaprojektionen haben ein eindeutiges Signal der Zunahme der Temperatur.

Tab. 2: Übersicht über die Ergebnisse der Analyse der Kennzahlen auf Basis der Perzentilbetrachtung (Flächenmittelwerte über Baden-Württemberg). Die im folgenden Text exemplarisch vorgestellten Kennzahlen sind gelb markiert. Die Erläuterung der Definitionen der aufgeführten Kennzahlen und ihrer Abkürzung findet sich in der Anlage.

	Ist-Zustand			Klimasignal (nahe Zukunft)						Klimasignal (ferne Zukunft)			
	Beobachtung	Bias	Spannweite	min	15. Perzentil	50. Perzentil	85. Perzentil	max	min	15. Perzentil	50. Perzentil	85. Perzentil	max
Einschätzung "zufriedenstellend"													
T Mittel [°C]	8.4	0.1	0.9	0.7	0.8	1.1	1.7	2.1	1.9	2.5	3.0	3.6	4.2
Heiztag [d]	287	-0.5	23.1	-28.5	-22.9	-16.1	-13.8	-2.6	-61.5	-55.7	-49.9	-38.5	-32.2
Wind Jahr [m/s]	2.0	1.3	1.2	-0.2	0.0	0.0	0.1	0.1	-0.2	-0.1	0.0	0.0	0.1
Wind Stabw [m/s]	1.5	0.3	0.3	-0.1	0.0	0.0	0.1	0.1	-0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Einschätzung "bedingt zufriedenstellend"													
Frosttag [d]	97	-13.8	43.5	-31.3	-27.0	-19.1	-15.2	-14.3	-55.2	-51.9	-47.2	-35.2	-32.7
Wind Max [m/s]	8.8	0.1	1.2	-0.3	-0.1	0.1	0.4	0.8	-0.3	-0.2	0.2	0.5	0.8
Veg-Beginn [d]	91	0.7	9.7	-8.7	-7.7	-5.2	-2.9	-2.5	-20.7	-20.2	-13.3	-9.5	-8.3
Letzter Frost [d]	114	-15.1	26.9	-12.7	-11.8	-6.8	-4.6	-1.7	-29.5	-26.7	-20.5	-16.7	-8.1
N Tage-StarkN [d]	3.6	0.0	1.2	-0.3	0.1	0.7	1.0	1.2	-0.7	0.0	0.9	2.0	2.2
Trockenper-Veg [d]	3.6	-0.5	0.7	-0.1	0.0	0.2	0.5	0.6	0.0	0.1	0.8	1.3	1.6
Sommertag [d]	30.2	-2.9	27.3	1.7	4.1	10.1	17.8	22.2	11.4	20.1	32.3	44.3	54.1
Eistag [d]	23.4	2.1	15.4	-17.5	-13.7	-8.9	-4.8	-4.1	-27.4	-23.4	-17.9	-10.0	-6.2
N Hyd. Sommer [mm]	512	5.8%	21.4%	-7.0%	-5.8%	-0.7%	3.4%	5.8%	-21.3%	-18.3%	-9.4%	-0.9%	4.3%
StarkN [mm]	40.7	-5.6%	17.5%	-2.6%	-0.1%	6.5%	12.1%	15.4%	-7.2%	4.8%	12.8%	24.7%	37.9%
Trockenper-Max [d]	20.7	-3.7	5.5	-2.3	-0.7	0.8	2.0	2.4	-1.0	-0.4	1.2	4.8	6.9
Glob Jahr [kWh/nf]	1038	127.1	259.8	-39.9	-30.8	-1.2	42.2	45.9	-66.8	-45.1	18.9	74.5	119.9
Kühlgradtage [K*d]	77	8.9	87.2	12.2	23.5	48.1	108.7	167.8	80.9	91.0	231.0	350.8	402.5
Tropentag [d]	3.8	-0.2	12.5	0.3	1.1	2.8	8.8	13.8	1.5	5.4	20.9	27.9	36.1
N Hyd. Winter [mm]	443	16.3%	42.2%	-1.8%	-1.0%	7.1%	14.8%	24.1%	-4.2%	-3.0%	15.9%	22.3%	26.1%
N Veg-Per [mm]	435	5.7%	22.8%	-14.0%	-8.1%	-0.9%	4.4%	6.3%	-23.1%	-20.6%	-13.1%	-4.2%	4.1%
N Frühj [mm]	225	8.7%	35.1%	-8.5%	-3.0%	5.6%	11.6%	15.3%	-7.0%	-2.9%	10.4%	19.8%	27.4%
N Jahr [mm]	949	12.5%	31.0%	-4.6%	-1.8%	4.1%	6.5%	9.8%	-10.4%	-9.0%	1.3%	10.6%	12.6%
Glob Stabw [W/m²]	80.4	11.1	26.6	-1.4	-0.3	1.7	3.5	4.1	-0.8	0.2	3.7	6.7	8.5
Einschätzung "nicht zufriedenstellend"													
Tropennacht [d]	0.0	0.2	3.6	0.0	0.1	1.0	5.8	9.1	0.3	0.7	7.7	18.4	22.5
N Tage-Trocken [d]	227	-34.4	64.7	-8.3	-3.5	0.3	7.6	11.0	-11.3	-5.7	3.4	14.7	30.4
Glob Min [W/m²]	-	-16.2	15.8	-1.3	-0.8	-0.2	0.2	0.4	-1.7	-1.5	-0.3	0.9	1.9
Glob Max [W/m²]	315	30.3	132.0	-3.5	-2.4	-1.5	1.7	7.1	-6.8	-3.9	-1.8	4.2	6.7
Wind Tag>8ms [m/s]	1.6	1.0	4.7	-3.1	0.0	0.5	1.4	1.8	-3.1	-0.4	0.4	1.3	1.8

Bias: Abweichung des Medians der Klimaprojektionen zum Beobachtungswert
 Spannweite: Differenz des 85. und des 15. Perzentils

Die Stärke des Klimasignals ist hoch bei gleichzeitig hoher Richtungssicherheit. Eine Zunahme der mittleren Jahrestemperatur für die nahe und ferne Zukunft ist den Ergebnissen der Klimaprojektionen nach sehr wahrscheinlich. Insgesamt betrachtet wird die Simulation der Lufttemperatur als zufriedenstellend eingestuft.

Nach dem Delta-Change-Verfahren ergibt sich aus der Kombination der Jahresmitteltemperatur der Beobachtungsdaten (8,4 °C) mit dem Median des Klimasignals von +1,1 °C für die nahe Zukunft ein mittlerer Temperaturwert von etwa 9,5 °C und für die ferne Zukunft mit dem Median des Klimasignals von +3,0 °C ein Wert von 11,4 °C.

Bei einer konservativen Orientierung an einem worst-case-Szenario können hier statt dem Median die Werte des 85. Perzentils als Wert für das Klimasignal verwendet werden. Entsprechend Tabelle 3 (Klimasignal +1,7 °C (nahe Zukunft) und +3,6 °C (ferne Zukunft)) ergibt sich dann für die nahe Zukunft ein mittlerer Temperaturwert von etwa 10,1 °C und für die ferne Zukunft ein Wert von 12,0 °C.

Heiztag („Heiztag“)

Ein Tag wird als **Heiztag** definiert, wenn die Tagesmitteltemperatur unter 15 °C liegt. Die Anzahl der Heiztage pro Jahr wird ähnlich gut simuliert wie die mittlere Jahres-

Tab. 3: Bewertung der Verlässlichkeit der aus den Klimaprojektionen abgeleiteten 28 Kennzahlen. Die im folgenden Text exemplarisch vorgestellten Kennzahlen sind gelb markiert. Die Erläuterung der Definitionen der aufgeführten Kennzahlen und ihrer Abkürzung findet sich in der Anlage

Kennzahl	Ist-Zustand	Klimasignal			Einschätzung
	Streuung	Streuung	Stärke	Richtungssicherheit	zufriedenstellend
T Mittel	gering	gering	hoch	hoch	ja
Heiztag	gering	gering	hoch	hoch	ja
Wind Jahr	hoch	gering	gering	hoch	ja
Wind Stabw	mäßig	gering	gering	hoch	ja
Frosttag	hoch	gering	hoch	hoch	eingeschränkt
Wind Max	gering	mäßig	gering	hoch	eingeschränkt
Veg-Beginn	gering	mäßig	hoch	hoch	eingeschränkt
Letzter Frost	mäßig	mäßig	hoch	hoch	eingeschränkt
N Tage-StarkN	mäßig	mäßig	stark	mäßig	eingeschränkt
Trockenper-Veg	mäßig	mäßig	mäßig	mäßig	eingeschränkt
Sommertag	hoch	mäßig	hoch	hoch	eingeschränkt
Eistag	hoch	mäßig	hoch	hoch	eingeschränkt
N Hyd. Sommer	mäßig	hoch	mäßig	mäßig	eingeschränkt
StarkN	mäßig	hoch	mäßig	mäßig	eingeschränkt
Trockenper-Max	mäßig	hoch	gering	mäßig	eingeschränkt
Glob Jahr	mäßig	hoch	gering	gering	eingeschränkt
Kühlgradtage	hoch	hoch	hoch	hoch	eingeschränkt
Tropentag	hoch	hoch	hoch	hoch	eingeschränkt
N Hyd. Winter	hoch	hoch	stark	mäßig	eingeschränkt
N Veg-Per	hoch	hoch	mäßig	mäßig	eingeschränkt
N Frühj	hoch	hoch	stark	mäßig	nein
N Jahr	hoch	hoch	gering	gering	eingeschränkt
Glob Stabw	hoch	hoch	gering	gering	eingeschränkt
Tropennacht	hoch	hoch	hoch	hoch	nein
N Tage-Trocken	hoch	hoch	gering	mäßig	nein
Glob Min	-	-	-	-	nein
Glob Max	hoch	hoch	gering	gering	nein
Wind Tag>8ms	hoch	hoch	gering	gering	nein

temperatur. Die Streuung im Ist-Zustand und die Streuung des Klimasignals sind gering (Abb. 7). Zudem ist die Stärke und Richtungssicherheit des Klimasignals hoch, so dass insgesamt eine zufriedenstellende Simulationsqualität dieser Kennzahl erreicht wird. Die absolute Anzahl von 287 Heiztagen als Flächenmittel für Baden-Württemberg aus den Beobachtungsdaten nimmt in der nahen und fernen Zukunft deutlich ab. Dies ist angesichts einer wahrscheinlichen Temperaturzunahme in der Zukunft plausibel.

Für die nahe Zukunft liegt die mittlere Abnahme bei -16 Tagen (Median des Klimasignals), bei der fernen Zukunft bei -50 Tagen. Mit dem Delta-Change-Verfahren ergibt sich auf Basis der Beobachtungsdaten und dem Median des Klimasignals für die nahe Zukunft eine Anzahl von 271 Heiztagen und für die ferne Zukunft eine Anzahl von 237 Heiztagen. Bei einer Orientierung an dem 15. Perzentil

ergeben sich niedrige Zahlen für die Heiztage: 264 (nahe Zukunft) bzw. 229 Heiztage (ferne Zukunft).

Mittlere Windgeschwindigkeit („Wind Jahr“)

Die **mittlere Windgeschwindigkeit** aus den Beobachtungsdaten liegt bei 2 m/s. Die Klimaprojektionen zeigen im Mittel um +1,3 m/s höhere Windgeschwindigkeiten an als die Beobachtungsdaten. Zusammen mit einer Spannweite der Simulationsergebnisse der Modelle im Ist-Zustand von 1,2 m/s ergibt sich eine hohe Streuung (Abb. 8). Die Stärke des Klimasignals ist gering: Da die Streuung gering ist, ergibt sich eine hohe Richtungssicherheit. So kann gefolgert werden, dass sich die mittlere Windgeschwindigkeit zur Zukunft hin kaum ändert. Die Simulationsergebnisse sind trotz der hohen Streuung im Ist-Zustand zufriedenstellend.

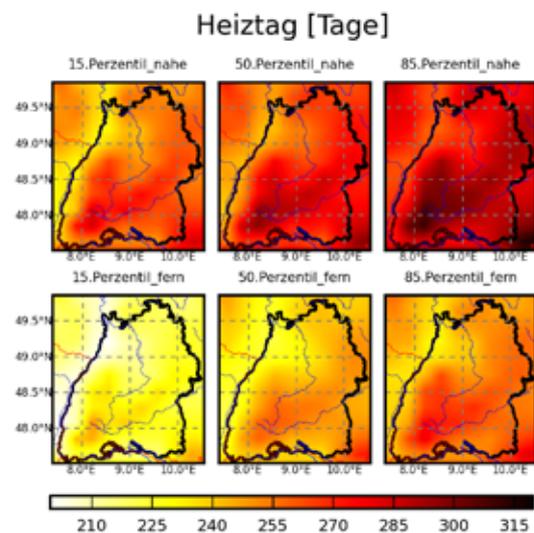
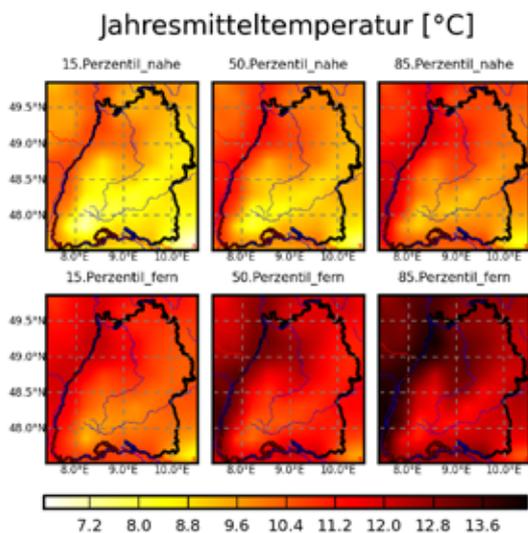
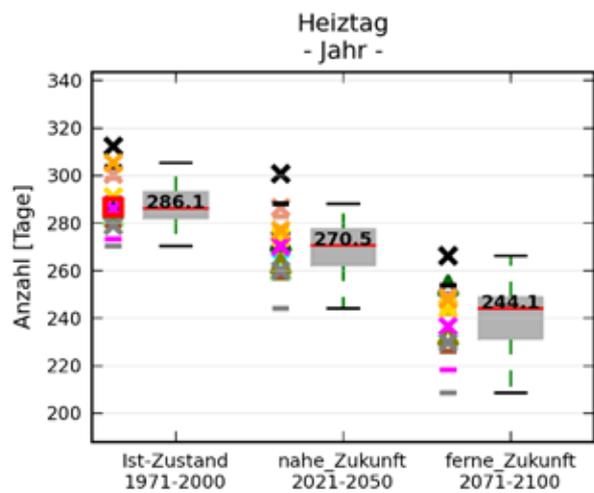
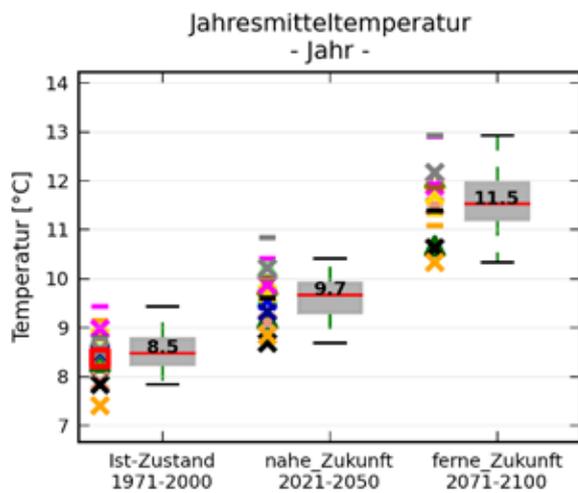


Abb. 6: Auswertung der Klimaprojektionen für die Jahresmitteltemperatur

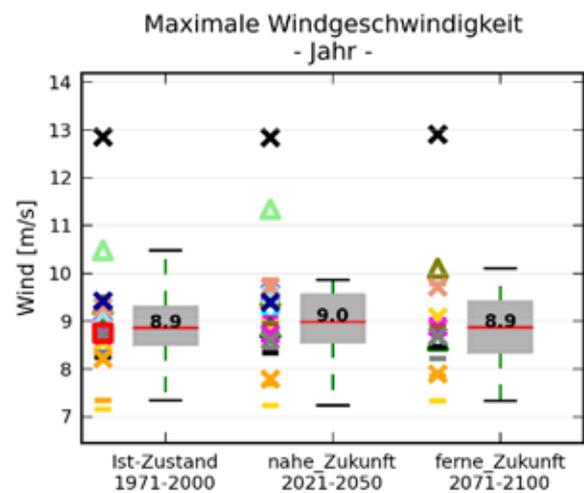
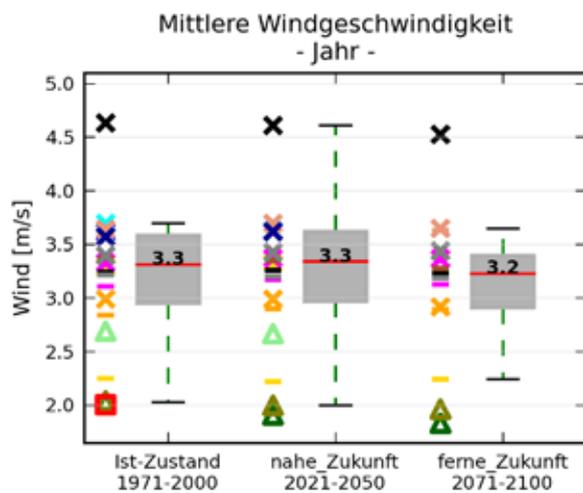
Abb. 7: Auswertung der Klimaprojektionen für die Heiztage

3.3 Kennzahlen mit der Bewertung „eingeschränkt zufriedenstellend“

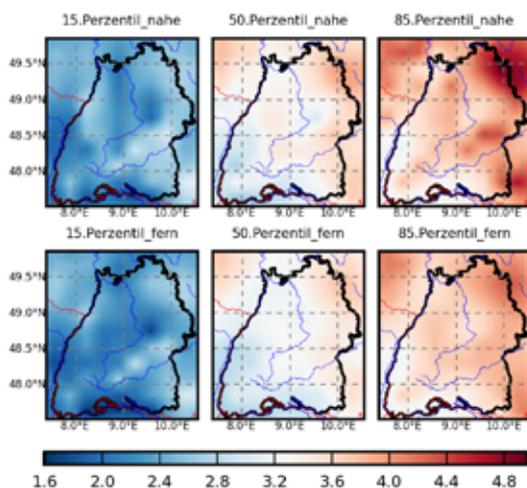
Maximale mittlere Windgeschwindigkeit („Wind Max“)

Als **maximale mittlere Windgeschwindigkeit** wird der maximale Wert pro Kalenderjahr verstanden. Die maximale mittlere Windgeschwindigkeit der Beobachtungsdaten (8,8 m/s) stimmt sehr gut mit dem Median der Klimaprojektionen überein (8,9 m/s) bei nur geringer Streuung der Modellergebnisse.

Zur Zukunft hin zeigen sich kaum Änderungen der mittleren maximalen Windgeschwindigkeit (Abb. 9). Bei dieser Kennzahl treten mäßige Abweichungen der Klimaprojektionen untereinander auf, weswegen die Bewertung „eingeschränkt zufriedenstellend“ folgt. Bis auf wenige Ausreißer liegen die Modellergebnisse jedoch in einem recht engen Wertebereich. Trotz der mäßigen Streuung wird die Richtungssicherheit daher als hoch eingestuft.



Mittlere Windgeschwindigkeit [m/s]



Maximale Windgeschwindigkeit [m/s]

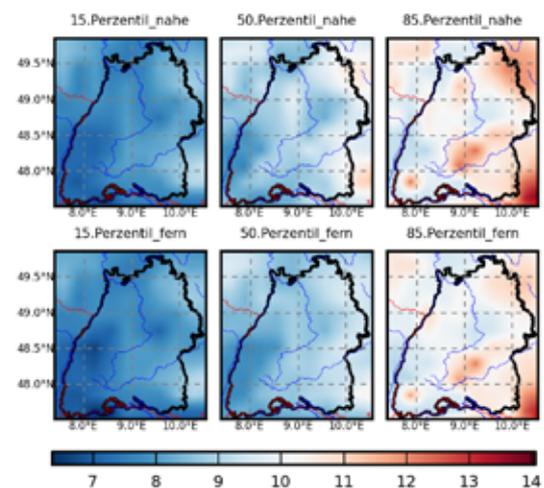


Abb. 8: Auswertung der Klimaprojektionen für die mittlere Windgeschwindigkeit

Abb. 9: Auswertung der Klimaprojektionen für die maximale Windgeschwindigkeit

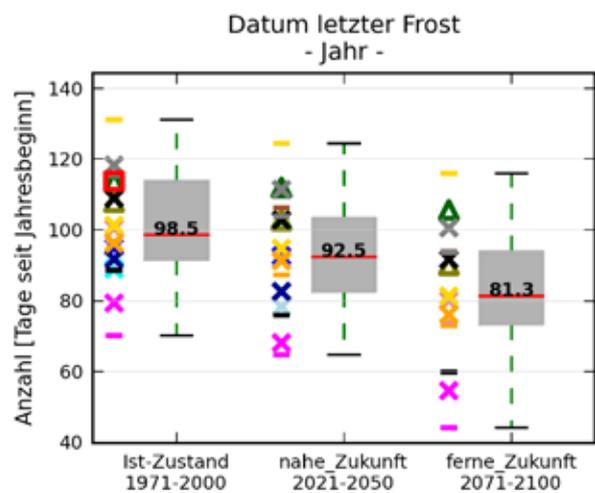
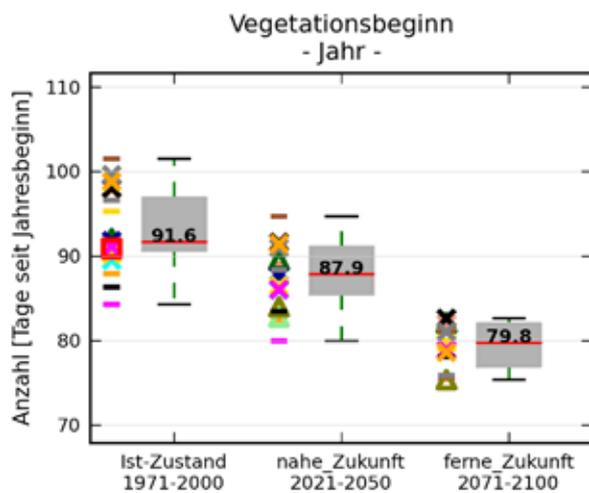
Vegetationsbeginn („Veg-Beginn“)

Die Definition des **Vegetationsbeginns** basiert auf der Berechnungsmethode von Janssen (2010), die auch beim Deutschen Wetterdienst Verwendung findet. Für die Auswertung wird die Anzahl der Tage seit Jahresbeginn bis zum Vegetationsbeginn analysiert und in einen Datumswert umgerechnet.

Der Vegetationsbeginn liegt entsprechend den Klimaprojektionen für den Ist-Zustand und den Beobachtungsdaten um den 1. April. Die Streuung der Modellergebnisse im Ist-Zustand ist gering und beim Klimasignal (Abb. 10) mäßig.

Werden die absoluten Unterschiede der Modellergebnisse beim Klimasignal betrachtet, so sind die Unterschiede recht deutlich. Daraus folgt eine eingeschränkt zufrieden-

stellende Bewertung dieser Kennzahl bei starkem Klimasignal und hoher Richtungssicherheit. Für das Zukunftsszenario wird eine klare zeitliche Vorverlegung des Vegetationsbeginns simuliert. Für die nahe Zukunft zeigt sich im Mittel ein Klimasignal mit einem früheren Vegetationsbeginn von -5,2 Tagen, für die ferne Zukunft von -13,3 Tagen. Mit dem Delta-Change-Verfahren ergibt sich aus der Kombination des Vegetationsbeginns der Beobachtungsdaten und dem mittleren Klimasignal der Klimaprojektionen für die nahe Zukunft ein Vegetationsbeginn um den 28. März und für die ferne Zukunft um den 19. März.



Vegetationsbeginn [Tage seit Jahresbeginn]

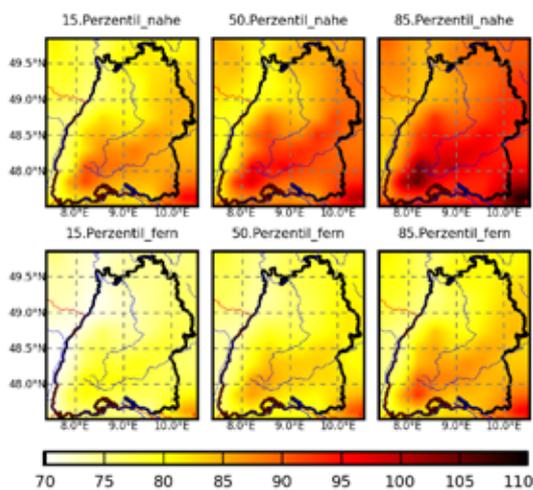


Abb. 10: Auswertung der Klimaprojektionen für den Vegetationsbeginn

Datum des letzten Frosts („Letzter Frost“)

Das **Datum des letzten Frosts** liegt in der ersten Jahreshälfte und beschreibt das Datum, an dem das Temperaturminimum zuletzt unter 0 °C liegt. Es wird die Anzahl der Tage seit Jahresbeginn bis zu dem letzten Tag mit einem Temperaturminimum unter 0 °C angegeben.

Bei der Kennzahl für das Datum des letzten Frosts ergibt sich für die Beobachtungsdaten etwa der 24. April. Die Modelldaten simulieren im Ist-Zustand den letzten Frost dagegen im Mittel um -15,1 Tage früher. Die Simulationsergebnisse für diese Kennzahl sind demnach allenfalls ausreichend bei einer hohen Unsicherheit. Für die Zukunft ergibt sich ähnlich dem Vegetationsbeginn eine zeitliche Vorverlegung (Abb. 11). Das Klimasignal ist sowohl für die nahe als auch ferne Zukunft mit im Mittel -6,8 Tagen bzw. -20,5 Tagen eindeutig. Mit dem Delta-Change-

Abb. 11: Auswertung der Klimaprojektionen für das Datum des letzten Frosts

Verfahren ergibt sich bei Verwendung des Medians ein Datum des letzten Frostes für die nahe Zukunft um den 17. April und für die ferne Zukunft etwa der 4. April. Aufgrund der mäßigen Streuungen zwischen den Projektionen beim Ist-Zustand und beim Klimasignal werden die Ergebnisse als eingeschränkt zufriedenstellend eingestuft.

Anzahl der Tage mit Starkniederschlag („N Tage-Stark-N“)

Für die **Anzahl der Tage mit Starkniederschlag** werden die Tage eines Jahres gezählt, an denen die Niederschlagssumme eine Höhe von 25 mm überschreitet. Die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag ist mit 3,6 Tagen bei den Beobachtungsdaten sehr niedrig, wird jedoch auch von den Klimaprojektionen gut simuliert bei nur mäßiger Streuung.

Für die Zukunftsszenarien zeigen sich nur geringe absolute Änderungen der Anzahl der Starkniederschlagstage (Abb. 12). Dennoch ist ein eindeutiges Klimasignal mit einer Zunahme der Starkniederschlagstage zu beobachten. Diese Zunahme liegt für die nahe Zukunft im Mittel bei +0,7 Tagen und für die ferne Zukunft bei +0,9 Tagen.

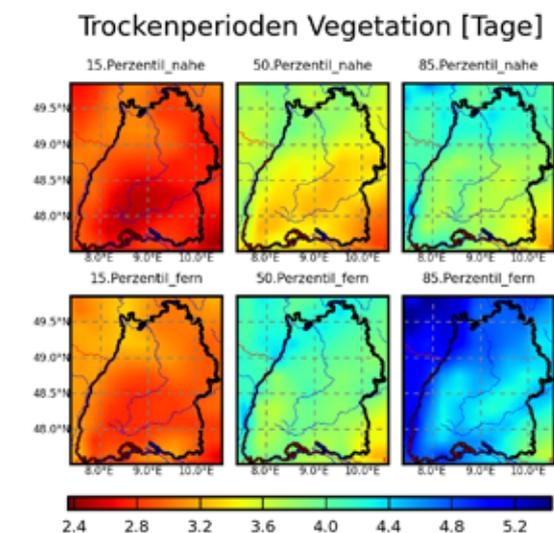
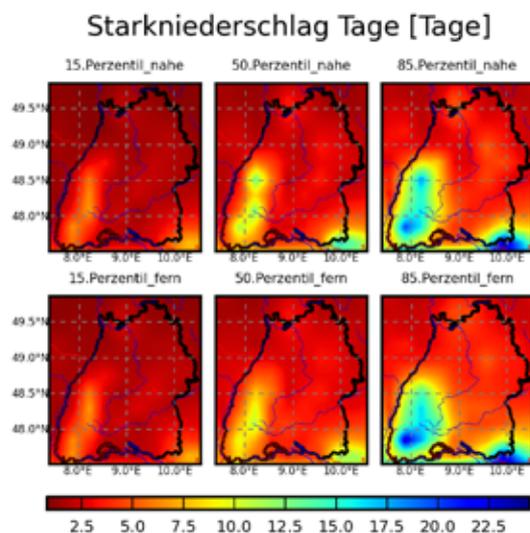
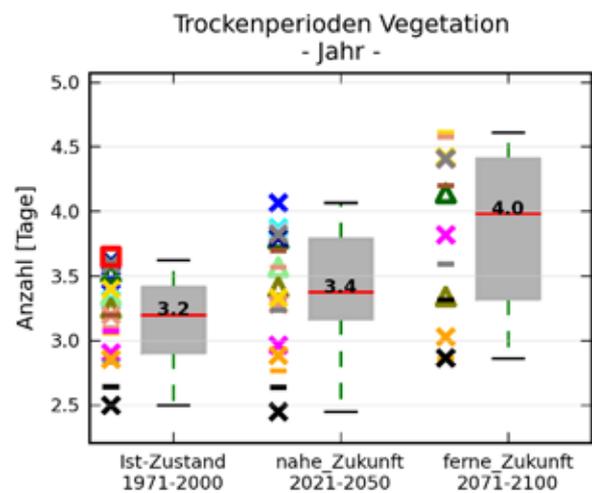
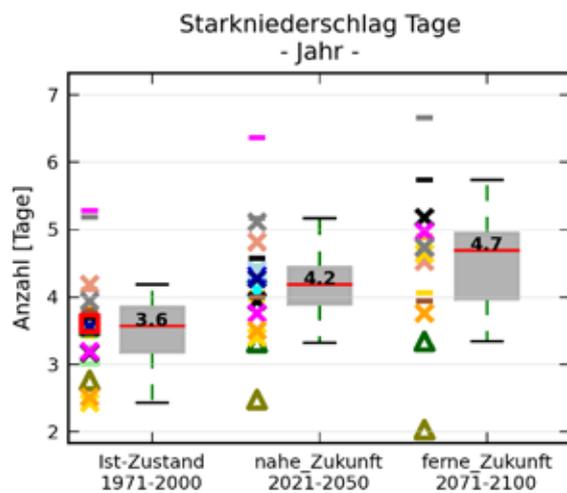


Abb. 12: Auswertung der Klimaprojektionen für die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag

Abb. 13: Auswertung der Klimaprojektionen für die Trockenperioden während der Vegetationsphase

Mit dem Delta-Change-Verfahren ergibt sich auf Grundlage der beobachteten Anzahl der Starkniederschlagstage für die nahe Zukunft eine Anzahl von 4,3 Starkniederschlagstagen im Jahr und für die ferne Zukunft 4,5 Tage. Mit einer worst-case-Annahme ergibt sich bei Verwendung des 85. Perzentils eine Zunahme der Starkniederschlagstage auf 4,6 Tage (nahe Zukunft) bzw. 5,6 Tage (ferne Zukunft).

Die Kennzahl „Starkniederschlagshöhe“ zeigt ähnliche Charakteristika, wobei die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag mit nur mäßigen Streuungen im Ist-Zustand und des Klimasignals etwas besser bewertet wird. Insgesamt erhalten beide Kennzahlen die Bewertung „eingeschränkt zufriedenstellend“.

Trockenperioden_{Vegetation} („Trockenper-Veg“)

Unter **Trockenperioden_{vegetation}** wird die durchschnittliche Dauer von Trockenperioden in der Vegetationsperiode (Mai bis September) definiert. Als Trockenperioden werden zusammenhängende Zeiträume bezeichnet, bei denen pro Tag unter 1 mm Niederschlag fällt.

Aus den Beobachtungsdaten ergibt sich für Trockenperioden in der Vegetationszeit eine mittlere Dauer von 3,6 Tagen. Aus der Analyse der Klimaprojektionen werden die Streuung als auch die Stärke und Richtungssicherheit des Klimasignals als mäßig eingestuft. Die Gesamtbewertung wird daher als „eingeschränkt zufriedenstellend“ bezeichnet. Die meisten Klimaprojektionen liegen in einem recht engen Wertebereich zusammen, wobei vier Modelle deutliche Unterschätzungen aufweisen und zusätzlich Einfluss auf Median und Streuung der Klimaprojektionen nehmen

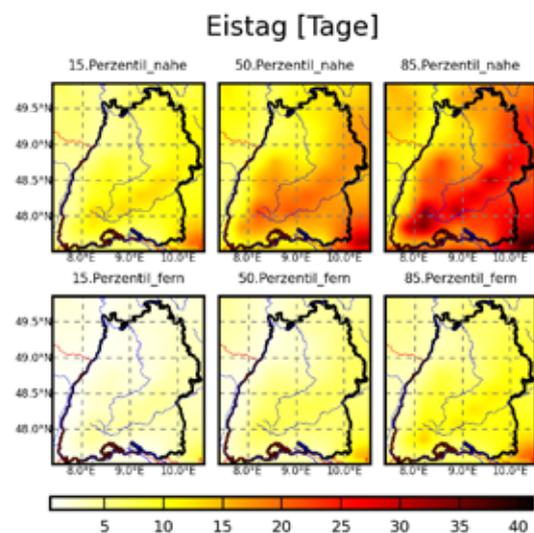
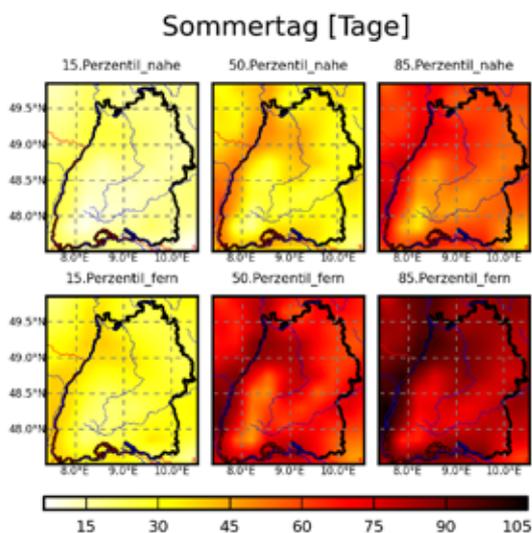
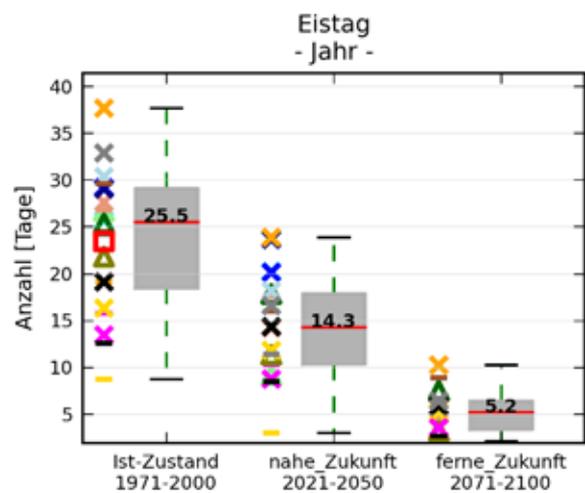
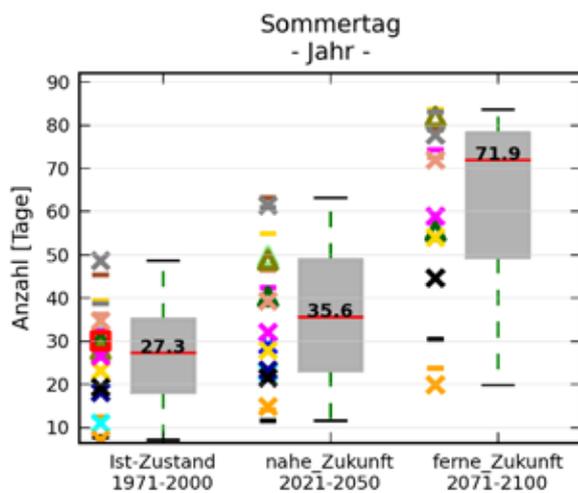


Abb. 14: Auswertung der Klimaprojektionen für die Sommertage

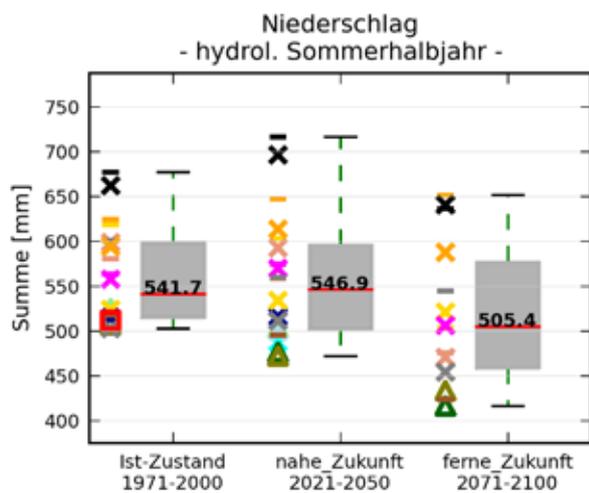
Abb. 15: Auswertung der Klimaprojektionen für die Eistage

(Abb. 13). Die Simulationsergebnisse für die Zukunftsszenarien liefern eine geringe Zunahme der mittleren Dauer von Trockenperioden in der Vegetationszeit von +0,2 Tagen für die nahe Zukunft und +0,8 Tagen für die ferne Zukunft. Zusammen mit dem Beobachtungswert und dem Median ergibt sich für die nahe Zukunft eine mittlere Dauer von Trockenperioden von 3,8 Tagen (mit 85. Perzentil statt Median: 4,1 Tagen) und für die ferne Zukunft von 4,4 Tagen (mit 85. Perzentil statt Median: 4,9 Tagen).

Zustand und in den Zukunftsszenarien (Abb. 14) unterscheiden sich die Klimaprojektionen hinsichtlich des Klimasignals merklich. Durch das starke Klimasignal ergibt sich jedoch eine nur mäßige Streuung. Im Mittel (Median der Modellergebnisse) wird für die nahe Zukunft eine Zunahme von +10,1 Tagen und für die ferne Zukunft von +32,3 Tagen simuliert.

Sommertag („Sommertag“)

Als **Sommertag** wird ein Tag definiert, an dem das Temperaturmaximum mindestens 25 °C erreicht. Die Anzahl der Sommertage pro Kalenderjahr wird ermittelt. Die Anzahl der Sommertage liegt laut Beobachtungsdaten bei etwa 30 Tagen. Durch die Klimaprojektionen werden dagegen mit 27 Tagen drei Tage weniger simuliert. Im Ist-



Niederschlag hydrol. Sommerhalbjahr [mm]

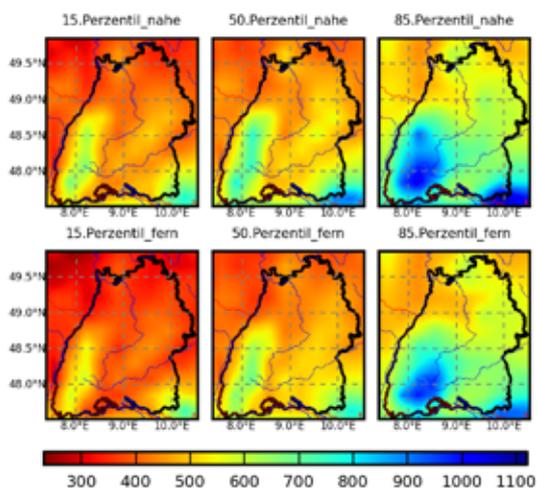


Abb. 16: Auswertung der Klimaprojektionen für die Niederschläge im hydrologischen Sommerhalbjahr

Mit dem Delta-Change-Verfahren ergibt sich aus der Verbindung des Werts der Beobachtungsdaten mit dem Klimasignal für die nahe Zukunft eine mittlere Anzahl von 40,3 Sommertagen pro Jahr und für die ferne Zukunft eine Anzahl von 62,5 Tagen pro Jahr. Damit zeigt sich eine Verdopplung der Sommertage zur fernen Zukunft hin bei eingeschränkt zufriedenstellenden Simulationsergebnissen. Unter Annahme eines worst-case-Falls (Verwendung des 85. Perzentils) ergeben sich sogar in der nahen Zukunft 48 Sommertage und in der fernen Zukunft 74,5 Sommertage.

Eistag („Eistag“)

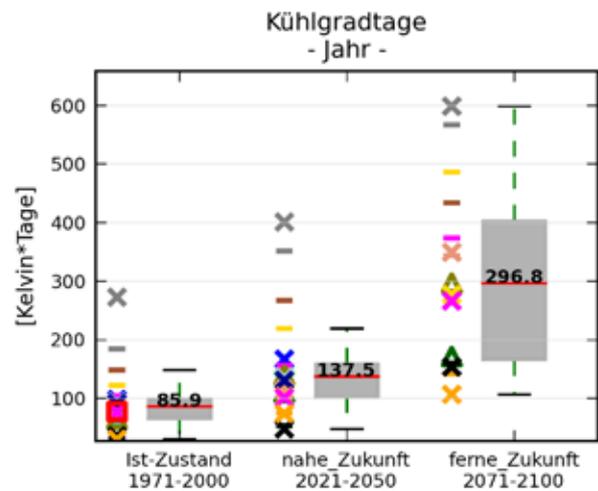
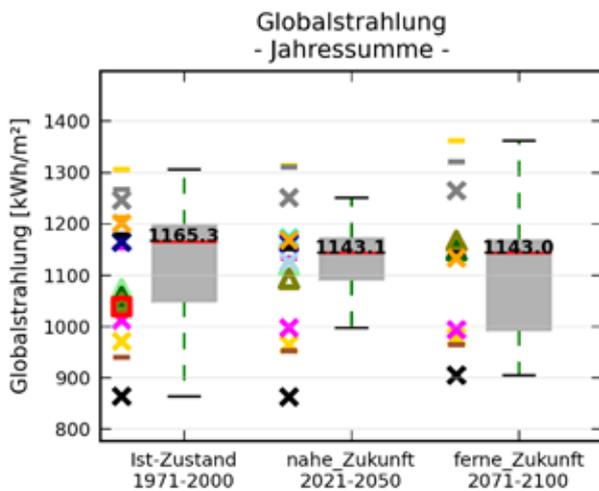
Als **Eistag** wird ein Tag definiert, bei dem das Temperaturmaximum unter 0 °C liegt. Die Anzahl der Eistage pro Kalenderjahr wird ermittelt.

Die Anzahl der **Eistage** wird bei den Beobachtungsdaten mit 23,4 Tagen angegeben. Die Streuung der Modellergebnisse im Ist-Zustand ist recht hoch. Auch beim Klimasignal ergeben sich mäßige bis hohe Streuungen der Simulationsergebnisse (Abb. 15), weshalb die Simulation dieser Kennzahl nur als eingeschränkt zufriedenstellend bewertet wird. Für die nahe und die ferne Zukunft wird eine klare Abnahme der Eistage von -8,9 Tagen beziehungsweise -17,9 Tagen im Mittel simuliert. Aus der Kombination von Messdaten und Klimasignal mit dem Delta-Change-Verfahren ergeben sich für die nahe Zukunft 14,5 Eistage pro Jahr und für die ferne Zukunft nur noch 5,5 Eistage.

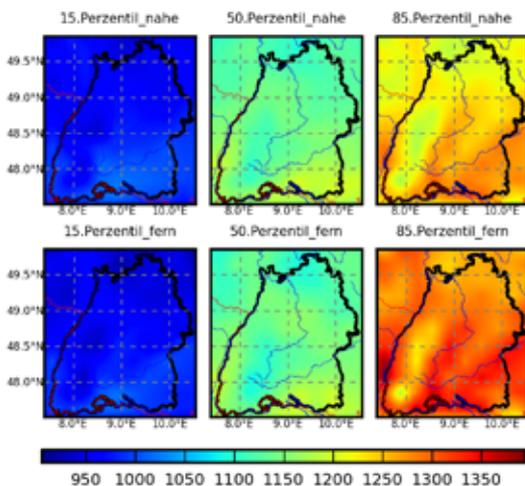
Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr („N Hyd. Sommer“)

Für die **Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr** (Mai bis Oktober) überschätzen die Klimaprojektionen die Beobachtungsdaten (512 mm). Allerdings liegen die Unterschiede im Mittel bei nur +5,8 %. Die Streuung der Modellergebnisse im Ist-Zustand ist mäßig, die Streuung des Klimasignals dagegen hoch (Abb. 16). Die Stärke und Richtungssicherheit des Klimasignals ist insgesamt nur mäßig. In der nahen Zukunft sind Stärke und Richtungssicherheit sogar nur gering, während in der fernen Zukunft beide Größen als hoch einzustufen sind.

Auf Basis der Beobachtungsdaten ergibt sich mit dem Delta-Change-Verfahren zusammen mit dem mittleren Klimasignal der Klimaprojektionen für die nahe Zukunft (-0,7 %) kaum eine Änderung der Niederschlagssumme im Sommerhalbjahr und für die ferne Zukunft eine Abnahme auf etwa 464 mm bei jedoch nur eingeschränkt zufriedenstellenden Simulationsergebnissen.



Jahressumme Globalstrahlung [kWh/m²]



Kühlgradtage [Kelvin*Tage]

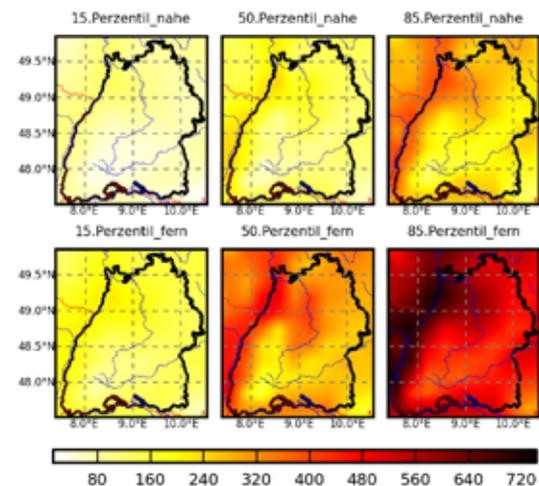


Abb. 17: Auswertung der Klimaprojektionen für die Globalstrahlung

Abb. 18: Auswertung der Klimaprojektionen für die Kühlgradtage

Summe der Globalstrahlung pro Jahr („Glob Jahr“)

Die **Summe der Globalstrahlung pro Jahr** beschreibt die gesamte an der Erdoberfläche auftreffende Solarstrahlung. Diese setzt sich zusammen aus der auf direktem Weg eintreffenden Solarstrahlung und der Strahlung, die über Streuung an Wolken, Wasser- und Staubteilchen die Erdoberfläche erreicht. Die Messung und Simulation der Globalstrahlung sind schwierig und mit größeren Unsicherheiten als z.B. bei der Lufttemperatur verbunden. Für den Zeitraum des Ist-Zustands sind keine Globalstrahlungsdaten für Baden-Württemberg verfügbar, so dass die Globalstrahlungsdaten aus Messdaten zur Sonnenscheindauer abgeleitet wurden. Dies führt zu Unsicherheiten beim Vergleich der Messdaten mit den Simulationen für den Ist-Zustand.

Die Summe der Globalstrahlung pro Jahr liegt laut Beobachtungsdaten bei 1038 kWh/m². Die Streuung der Simulationsergebnisse im Ist-Zustand ist mäßig. Absolut gesehen ist die Streuung jedoch hoch. Für das Klimasignal ist die Streuung generell hoch bei gleichzeitig schwachem Klimasignal und geringer Richtungssicherheit (Abb. 17).

Das Klimasignal ist im Vergleich zu der absoluten Globalstrahlungssumme so klein, dass sich die Summe der Globalstrahlung pro Jahr wahrscheinlich kaum ändert. Allerdings ist diese Aussage durch die hohen Streuungen der Modellergebnisse nur bedingt möglich.

Kühlgradtage („Kühlgradtage“)

Aus dem Wert für die **Kühlgradtage** kann abgeleitet werden, wie viel Energie notwendig ist, um Gebäude auf eine angenehme Raumtemperatur abzukühlen. Ein Tag wird

als Kühltage definiert, wenn die Tagesmitteltemperatur 18,3 °C (65° Fahrenheit) überschreitet. Für die Ermittlung der Kühlgradtage wird an allen Kühltagen die Differenz zwischen 18,3 °C und dem Temperatur-Mittelwert des Tages berechnet. Diese Temperaturdifferenzen werden für alle Kühltage aufaddiert. Dadurch ergibt sich die Einheit [Kelvin*Tage].

Bei den Kühlgradtagen zeigen die Klimaprojektionen eine Überschätzung der Beobachtungsdaten (77 Kelvin*Tage) im Mittel um +9 Kelvin*Tage. Trotz der hohen Streuungen im Ist-Zustand und beim Klimasignal (Abb. 18) wird diese Kennzahl eingeschränkt zufriedenstellend simuliert. In den Zukunftsszenarien zeigt sich ein starkes eindeutiges Klimasignal mit einer Zunahme der Werte der Kühlgradtage. Für die nahe Zukunft nehmen die Werte im Mittel um +48 Kelvin*Tage und in der fernen Zukunft um +231 Kelvin*Tage zu. Wird das Klimasignal der Modelldaten auf die Werte der Kühlgradtage aus den Beobachtungsdaten übertragen, so ergibt sich für die nahe Zukunft ein Wert von 125 Kelvin*Tage und für die ferne Zukunft eine Anzahl von 308 Kelvin*Tage.

Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr („N Hyd. Winter“)

Die Qualität der Simulationsergebnisse der **Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr** (November bis April) ist wie bei den anderen Niederschlagsauswertungen nur mäßig. Es zeigen sich hohe Streuungen der Modelsergebnisse sowohl für den Ist-Zustand als auch für das Klimasignal. Der Median der Klimaprojektionen überschätzt die Beobachtungsdaten um über 16 %. Die hohe Stärke des Klimasignals deutet trotz der nur mäßigen Richtungssicherheit auf eine Zunahme der Winterniederschläge als Flächenmittelwert für Baden-Württemberg hin (Abb. 19).

Es existieren jedoch auch Klimaprojektionen, die eine Abnahme der Winterniederschläge in der nahen und fernen Zukunft simulieren. Der Median des Klimasignals für die nahe Zukunft liegt bei +7,1 %, für die ferne Zukunft bei +16 %. Die Kombination aus Beobachtungswert (443 mm) und Klimasignal führt für die nahe Zukunft zu einer Niederschlagssumme im Winterhalbjahr von etwa 475 mm und für die ferne Zukunft von 514 mm. Bei Verwendung des

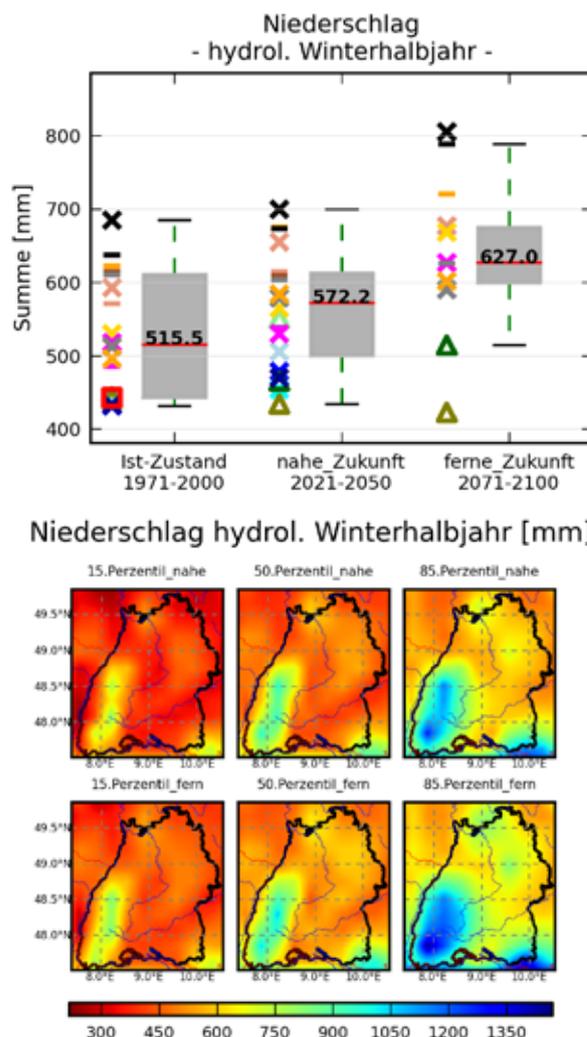
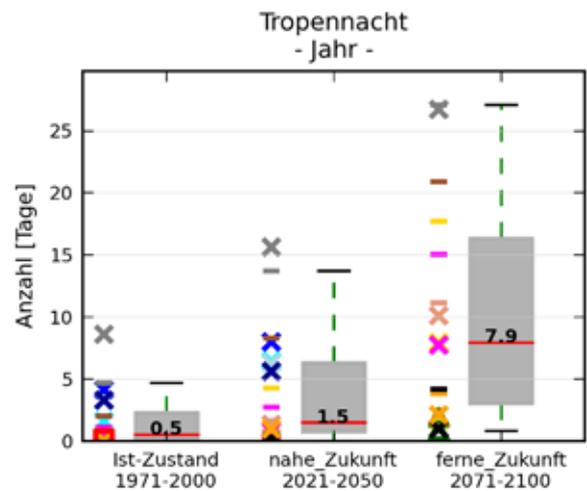
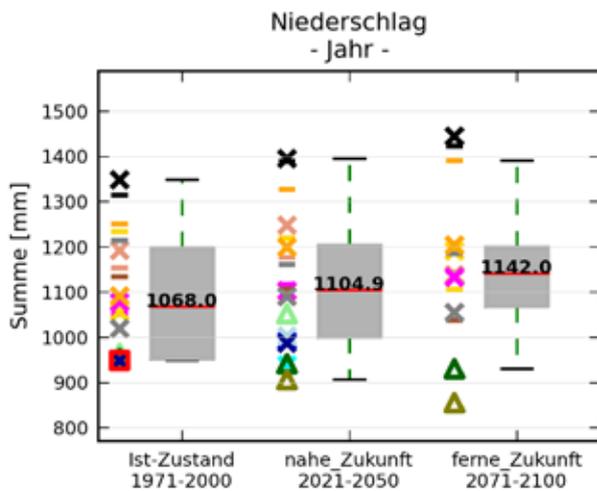


Abb. 19: Auswertung der Klimaprojektionen für die Niederschläge im hydrologischen Winterhalbjahr

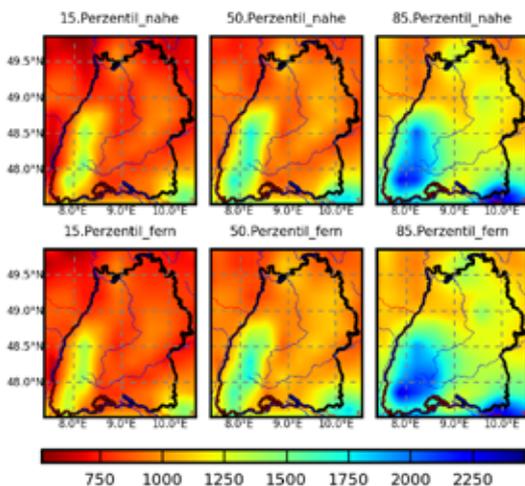
85. Perzentils als worst-case-Annahme ergeben sich sogar für die nahe Zukunft 508 mm und für die ferne Zukunft 542 mm. Aufgrund der hohen Unsicherheiten sind die Simulationsergebnisse dieser Kennzahl nur eingeschränkt zufriedenstellend.

Niederschlagssumme im Jahr („N Jahr“)

Auch die **Niederschlagssumme im Jahr** wird von den Klimaprojektionen im Ist-Zustand überschätzt. Die Werte liegen mit +12,5 % (Überschätzung im Mittel) bei jedoch hoher Streuung zwischen den Ergebnissen von Winter- und Sommerhalbjahr. Laut Beobachtungsdaten ergibt sich eine Jahressumme von 949 mm für Baden-Württemberg. Die Werte für das Gesamtjahr sind eine Kombination der Ergebnisse aus den beiden Halbjahren, entsprechend ist keine klare Tendenz des Klimasignals erkennbar (Abb. 20).



Niederschlagssumme Jahr [mm]



Tropennacht [Tage]

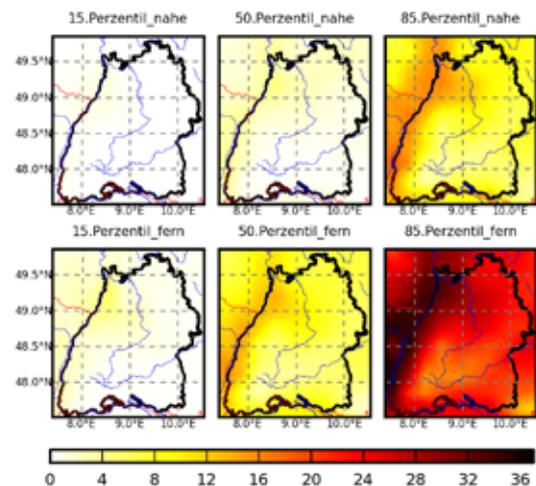


Abb. 20: Auswertung der Klimaprojektionen für die Niederschläge im gesamten Jahr

Abb. 21: Auswertung der Klimaprojektionen für die Tropennächte

Die Mittelwerte von +4,1% für die nahe Zukunft und +1,3% für die ferne Zukunft sind angesichts der Streuung des Klimasignals wenig aussagekräftig. Es sind somit für die zukünftige Niederschlagssumme im Gesamtjahr wenige Änderungen zu erwarten.

3.4 Kennzahlen mit der Bewertung „Nicht Zufriedenstellend“

Auf die Kennzahlen, deren Simulationen mit den Klimaprojektionen nicht zufriedenstellend gelingt, wird nur exemplarisch anhand der Kennzahl der Tropennächte eingegangen.

Tropennacht („Tropennacht“)

Ein Tag bzw. Nacht wird als **Tropennacht** definiert, wenn das Temperaturminimum größer oder gleich 20 °C ist. Die Anzahl der Tropennächte pro Kalenderjahr wird ermittelt.

Die Anzahl der Tropennächte liegt laut Median der Klimaprojektionen und laut Beobachtungsdaten deutlich unter einem Tag, wobei auch Ergebnisse von Klimaprojektionen mit bis zu 3,6 Tropennächten pro Jahr existieren. Dieser sehr kleine Ausgangswert hat zur Folge, dass sich Änderungen der Temperatur sehr stark ausprägen und die Simulationsergebnisse der Modelle entsprechend sehr unterschiedlich sein können. Damit ist eine hohe Unsicherheit der Aussagekraft dieser Kennzahl verbunden, was zu einer nicht zufriedenstellenden Bewertung der Simulation dieser Kennzahl führt. Das Klimasignal für die Anzahl der Tropennächte zeigt eine Zunahme, die zumindest für die

ferne Zukunft sehr deutlich ausfällt (Abb. 21). Im Mittel wird für die nahe Zukunft eine Zunahme von +1,0 Tagen und für die ferne Zukunft von +7,7 Tagen simuliert. Aufgrund der hohen Streuungen ist die Aussagekraft des Klimasignals für die Tropennächte jedoch äußerst klein.

3.5 Fazit und Ausblick

Dieser Kurzfassung liegt eine umfangreichere Untersuchung zu Grunde, die einen weiten Überblick über die mögliche zukünftige klimatische Entwicklung auf der Basis des aktuell am meisten verwendeten Emissionsszenarios A1B gibt. Es ist keine derartige Arbeit bezogen auf die Landesfläche von Baden-Württemberg, aber auch für andere Bundesländer bekannt, die ähnlich umfassende Analysen aufweist.

Die Ergebnisse der Untersuchung von 29 Klimaprojektionen für die nahe und ferne Zukunft untermauern die Besorgnis über den Klimawandel und die Notwendigkeit, sich mit dem Thema Klimawandel und seinen Folgen in Baden-Württemberg in vielen gesellschaftlichen Bereichen intensiv zu beschäftigen. Es wird auch deutlich gemacht, dass mit Klimamodellen und Szenarien grundsätzlich kein Blick in die Zukunft geworfen werden kann. Vielmehr trägt diese Vergleichsuntersuchung zur Plausibilisierung und Abschätzung der Bandbreite einer möglichen Entwicklung bei und zeigt deren Unsicherheiten auf.

Mit den Auswertungen zu 28 Kennzahlen für das Klima und abgeleiteter Größen werden dabei für zahlreiche Handlungsfelder Grundlagen bereitgestellt, mit denen die Erstellung von Vulnerabilitätsanalysen und die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen für Baden-Württemberg unterstützt wird. Dabei wird insbesondere die Möglichkeit gegeben durch die Formulierung „klimatischer Leitplanken“ bzw. klimatischer Rahmenbedingungen einer zukünftigen Entwicklung strategische Entscheidungen z.B. für die Nutzung von Anpassungsoptionen oder die Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen zu treffen. Mit den flächenhaft dargestellten Daten ist dabei aber auch eine detailliertere räumliche Betrachtung der zu erwartenden Änderungen in den Naturräumen Baden-Württembergs möglich.

Die vorliegenden Auswertungen stellen nur einen Ausschnitt der möglichen Auswertungen und statistischen Analysen dar, die an Hand des umfangreichen Datenmaterials des Klimaprojektionsensembles bei Bedarf umgesetzt werden könnten. Neben den untersuchten 28 Kennzahlen könnten weitere Kennzahlen (z.B. Wachstumsgradtage, Tage mit Wechselfrost, Schwankung der Lufttemperatur,...) entsprechend den Anforderungen von Nutzern berechnet werden. Auch die Bereitstellung von Zeitreihen mit Tageswerten für die weitere Verwendung in Wirkmodellen ist möglich.

4 Literatur

- ANDRÉASSON J., BERGSTRÖM S., CARLSSON B., GRAHAM L. & 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): Klimasi-mulation- wie hart trifft es Deutschland? – *Spektrum der Wissenschaft* 4/2012
- CH2011 (2011): Swiss Climate Change Scenarios CH2011 - published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp.
- DWD (2010): Klimaservices im DWD. – Broschüre DWD Geschäftsbereich Klima und Umwelt
- GÖRGEN K., BEERSMA J., BRAHMER G., BUITEVELD H., CAR-RAMBIA M., DE KEIZER O., KRAHE P., NILSON E., LAMMERSEN R., PERRIN C. & VOLKEN D. (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. - CHR report, I-23, 229 pp., Lelystad
- HAY L.E., WILBY R.L. & LEAVESLEY G.H. (2000): A compa-ri-son 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.
- 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 (2007): Climate Change 2007. - Intergovernmental Pa-nel on Climate Change - Synthesis Report.
- JANSSEN W. (2010): Definition des Vegetationszeitraumes über Temperatursummen – Berichte des Meteorologi-schen Instituts der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Nr. 20, S. 312-319
- KLIWA (2006): Regionale Klimaszenarien für Süddeutsch-land - Abschätzung der Auswirkungen auf den Wasser-haushalt. - KLIWA-Berichte Heft 9.
- UM & LUBW (2012): Klimawandel in Baden-Württemberg – Fakten-Folgen-Perspektiven. ISBN 978-3-88251-368-4
- RUDOLF R., MALITZ G. & GRATZKI A. (2009): Klimamoni-toring für KLIWA. - Vorträge zum 4. KLIWA-Symposium Mainz, KLIWA-Berichte Heft 15, S. 97-106
- SCHÄDLER, G., BERG, P., DÜTHMANN, D., FELDMANN, H., IHRIN-GER, J., KUNSTMANN, H., LIEBERT, J., MERZ, B., OTT, I., & WAGNER, S. (2012): Flood Hazards in a Changing Climate. Project Report. 83 pp. Center for Disaster Management and Risk Reduction Technology (CEDIM), Karlsruhe
- VAN DER LINDEN P. & MITCHELL J.F.B. (2009): ENSEMBLES: Climate change and its impacts: summary of research and results from the ENSEMBLES project. – Met Office Had-ley Centre, Exeter EX1 3PB, UK

Anlage: Definition der Kennzahlen

A. Kennzahlen der Lufttemperatur:

T Mittel [°C]: Die Jahresmitteltemperatur beschreibt das arithmetische Mittel aller Tagesmitteltemperaturen im betrachteten Zeitbereich.

Heiztag [Anzahl Tage]: Ein Tag wird als Heiztag definiert, wenn die Tagesmitteltemperatur unter 15 °C liegt. Die Anzahl der Heiztage pro Kalenderjahr wird ermittelt. Entgegen der sonst üblichen Definition wird hier statt des Medians der Temperatur das arithmetische Mittel der Temperatur benutzt, da nur dieser Mittelwert für Tageswerte in den Klimaprojektionen vorliegt. Es sind kaum Unterschiede durch die Verwendung des arithmetischen Mittels anstelle des Medians zu erwarten.

Kühlgradtage [Kelvin*Tag]: Aus dem Wert für die Kühlgradtage kann abgeleitet werden, wie viel Energie notwendig ist, um Gebäude auf eine angenehme Raumtemperatur abzukühlen. Ein Tag wird als Kühhtag definiert, wenn die Tagesmitteltemperatur 18,3 °C (65° Fahrenheit) überschreitet. Für die Ermittlung der Kühlgradtage wird an allen Kühltagen (also den Tagen, an denen die Lufttemperatur den gewählten Basiswert der Lufttemperatur von 18,3 °C überschreitet) die Differenz aus dem Basiswert und dem Temperatur-Mittelwert des Tages berechnet. Beträgt also z.B. die mittlere Lufttemperatur eines Tages 20 °C, so ist die Differenz zum Basiswert von 18,3 °C 1,7 Kelvin. Die Temperaturdifferenzen an den jeweiligen Kühltagen werden für alle Kühltage aufaddiert. Dadurch ergibt sich die Einheit [Kelvin*Tag]. Bezugszeitraum ist ein Kalenderjahr.

Veg-Beginn [Tage seit Jahresbeginn]: Für die Definition des Vegetationsbeginns wurde die Berechnung nach Janssen (2010) vom Deutschen Wetterdienst verwendet. Dabei wird die Blattentfaltung der Stachelbeere als Vegetationsbeginn definiert. Aus Beobachtungen wurde eine rein empirische Formel abgeleitet. Der Vegetationsbeginn ist dabei definiert als der Tag, an dem die Temperatursumme der Tagesmitteltemperatur ab dem 18. Februar über 164 °C liegt. Es wird die Anzahl der Tage seit Jahresbeginn bis zu dem Tag, an dem der Vegetationsbeginn auftritt, angegeben.

Tropennacht [Anzahl Tage]: Ein Tag bzw. Nacht wird als Tropennacht definiert, wenn das Temperaturminimum größer oder gleich 20 °C ist. Die Anzahl der Tropennächte pro Kalenderjahr wird ermittelt.

Frosttag [Anzahl Tage]: Ein Tag wird als Frosttag definiert, wenn das Temperaturminimum unter 0 °C liegt. Die Anzahl der Frosttage pro Kalenderjahr wird ermittelt.

Letzter Frost [Tage seit Jahresbeginn]: Das Datum des letzten Frosts liegt in der ersten Jahreshälfte und beschreibt das Datum, an dem das Temperaturminimum zuletzt unter 0 °C absinkt. Es wird die Anzahl der Tage seit Jahresbeginn bis zu dem Tag angegeben, an dem das Temperaturminimum zuletzt unter 0 °C absinkt.

Tropentag [Anzahl Tage]: Als Heißer Tag oder Tropentag wird ein Tag definiert, an dem das Temperaturmaximum größer oder gleich 30 °C ist. Die Anzahl der Heißen Tage pro Kalenderjahr wird ermittelt.

Sommertag [Anzahl Tage]: Als Sommertag wird ein Tag definiert, an dem das Temperaturmaximum mindestens 25 °C erreicht. Die Anzahl der Sommertage pro Kalenderjahr wird ermittelt.

Eistag [Anzahl Tage]: Als Eistag wird ein Tag definiert, bei dem das Temperaturmaximum unter 0 °C liegt. Die Anzahl der Eistage pro Kalenderjahr wird ermittelt.

B. Kennzahlen des Niederschlags

N Jahr [mm]: Als Niederschlagssumme im Jahr wird die Gesamtniederschlagssumme des Jahres bezeichnet.

N Hyd. Winter [mm]: Die Niederschlagssumme im hydrologischen Winterhalbjahr ist die Gesamtniederschlagssumme, die in den Monaten November (Vorjahr) bis April fällt.

N Hyd. Sommer [mm]: Die Niederschlagssumme im hydrologischen Sommerhalbjahr ist die Gesamtniederschlagssumme, die in den Monaten Mai bis Oktober fällt.

N Tage-Trocken [Anzahl Tage]: Bei der Bezeichnung „Anzahl der Tage ohne Niederschlag“ handelt es sich um die Anzahl der Tage mit einer Niederschlagshöhe unter 1 mm/Tag pro Kalenderjahr. Je nach Messprinzip des Niederschlagsmessgeräts („Sammler“, „Tropfer“ oder „Wägeprinzip“) ist die Messgenauigkeit sehr unterschiedlich. Durch Definition eines Grenzwertes von 1 mm, bei dem die Messgenauigkeit keine Rolle spielt, wird eine stabilere und vergleichbare Kennzahl definiert.

N Tage-StarkN [Anzahl Tage]: Für die Anzahl der Tage mit Starkniederschlag werden die Tage eines Jahres gezählt, an denen die Niederschlagssumme eine Höhe von 25 mm überschreitet.

StarkN [mm]: Die Starkniederschlags-Höhe ist die Summe des maximalen Niederschlags an einem Tag innerhalb eines Kalenderjahrs.

N Frühj [mm]: Als Niederschlag_{Frühjahr} wird die Niederschlagssumme im meteorologischen Frühjahr, also in den Monaten März bis Mai, bezeichnet.

N Veg-Per [mm]: Als Niederschlag_{Vegetationsperiode} wird die Niederschlagssumme in der Vegetationsperiode, also in den Monaten Mai bis September, bezeichnet.

Trockenper-Veg [Anzahl Tage]: Unter Trockenperioden_{vegetation} wird die durchschnittliche Dauer von Trockenperioden in der Vegetationsperiode (Mai bis September) definiert. Als Trockenperioden werden zusammenhängende Zeiträume bezeichnet, bei denen pro Tag unter 1 mm Niederschlag fällt.

Trockenper-Max [Anzahl Tage]: Als Trockenperioden_{maximal} wird die längste Dauer einer Trockenperiode pro Jahr bezeichnet (vgl. Definition Trockenperiode_{vegetation}).

C. Kennzahlen der Globalstrahlung

Glob Jahr [kWh/m²]: Die Summe der Globalstrahlung pro Jahr bezeichnet die eingefallene solare Leistung pro Quadratmeter im Jahr.

Glob Stabw [W/m²]: Die Standardabweichung der Werte der Globalstrahlung ist ein Maß für die Schwankungsbreite der Globalstrahlung.

Glob Min [W/m²]: Das Minimum der täglichen Globalstrahlungswerte wird pro Kalenderjahr ausgewertet.

Glob Max [W/m²]: Das Maximum der täglichen Globalstrahlungswerte wird pro Kalenderjahr ausgewertet.

D. Kennzahlen der Windgeschwindigkeit

Wind Jahr [m/s]: Die mittlere Windgeschwindigkeit ist das arithmetische Mittel der täglichen Windgeschwindigkeiten eines Jahres.

Wind Stabw [m/s]: Die Standardabweichung der Werte der Windgeschwindigkeit wird ebenfalls aus den täglichen Windgeschwindigkeiten eines Tages gebildet und ist damit ein Maß, wie stark die Windgeschwindigkeiten variieren.

Wind Max [m/s]: Als maximale mittlere Windgeschwindigkeit wird der maximale Wert pro Kalenderjahr verstanden.

Wind Tag > 8m/s [Anzahl Tage]: Die Anzahl der Tage eines Jahres, an denen die Windgeschwindigkeit im Mittel über 8 m/s liegt, ist eine Maßzahl, die insbesondere für den Betrieb von Windkraftanlagen interessant ist.



