

Klimawandelstudie Unterallgäu

**Analyse und prognostizierte Änderung des Klimas im
Landkreis auf Basis von Beobachtungsdaten und
hochaufgelösten regionalen Klimamodellläufen**

Abschlussbericht

Vera Gebhardt
Dr. Michael Warscher
Dr. Gerhard Smiatek
Prof. Dr. Harald Kunstmann

September 2019

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einführung	1
2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage	4
2.1 Landkreis Unterallgäu	4
2.2 Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes	4
2.3 Klimamodelldaten WRF	5
3 Methoden	8
3.1 Zeitreihen- und Trendanalyse der Stationsdaten	8
3.1.1 Aufbereitung und Analyse der Zeitreihen	8
3.1.2 Trendanalyse	8
3.1.3 Trend nach Mann-Kendall-Trendtest	9
3.2 WRF Reanalyselauf vs. Stationsdaten	9
3.3 Aufbereitung und Auswertung der Klimäläufe	13
3.4 Ermittlung der Extremereignisse	15
3.5 Ermittlung der Vegetationsperiode	16
4 Ergebnisse	18
4.1 Klimaentwicklung in der Vergangenheit	18
4.1.1 Temperatur	18
4.1.2 Niederschlag	19
4.2 Klimaentwicklung in der Zukunft auf Basis der Klimasimulationen .	21
4.2.1 Temperatur	21
4.2.2 Niederschlag	24
4.3 Extremereignisse	24
4.3.1 Starkregen	24
4.3.2 Trockenperioden	28
4.4 Klimatologische Vegetationsperiode	29
5 Diskussion der Ergebnisse	31
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	33
Literaturverzeichnis	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Globale Land- und Ozeantemperaturanomalien zwischen 1880 - 2018.	1
Abbildung 2:	Mittlere Monatsmittelwerte an der DWD Station Hohenpeißenberg von 1781 - 2016.	2
Abbildung 3:	Geländemodell der Klimasimulation für Mitteleuropa und den Landkreis	4
Abbildung 4:	WRF Modellsystem mit den drei Domains (D1, D2 und D3) in 45 km, 15 km und 5 km räumlicher Auflösung . .	6
Abbildung 5:	RCP Szenarien des IPCC	7
Abbildung 6:	Vergleich zwischen Beobachtungsdaten (DWD) und Modelldaten (WRF) für die Lufttemperatur in Memmingen	11
Abbildung 7:	Vergleich zwischen Beobachtungsdaten (DWD) und Modelldaten (WRF) für die monatliche Niederschlagssumme in Memmingen	12
Abbildung 8:	Simulationen für die durchschnittliche Lufttemperatur in 2 Meter Höhe in Grad Celsius	14
Abbildung 9:	Simulationen für die jährlichen Niederschlagssumme in mm	14
Abbildung 10:	Niederschlagstrends in der Vergangenheit	20
Abbildung 11:	Projizierte Veränderung der mittleren Lufttemperatur für den Landkreis Unterallgäu	21
Abbildung 12:	Mittlere jährliche Lufttemperaturen für einzelne Jahre im Landkreis Unterallgäu	22
Abbildung 13:	Projizierte Veränderung der mittleren Lufttemperatur für den Landkreis Unterallgäu im Winter, Frühling, Sommer und Winter	23
Abbildung 14:	Projizierte Veränderung der mittleren Niederschlagssumme für den Landkreis Unterallgäu	24
Abbildung 15:	Projizierte Veränderung der mittleren Niederschlagssumme für den Landkreis Unterallgäu im Winter, Frühling, Sommer und Winter	25
Abbildung 16:	Tägliche Niederschlagssumme und Häufigkeitsdiagramm der Beobachtungsdaten	26
Abbildung 17:	Häufigkeitsdiagramm der Modelldaten bezüglich Starkniederschläge	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Analysierte Stationsdaten des DWD	5
Tabelle 2:	Bestimmung von Länge, Beginn und Ende der klimato- logischen Vegetationsperiode	16
Tabelle 3:	Temperaturänderung pro Jahr in der Vergangenheit . . .	18
Tabelle 4:	Niederschlagsänderung pro Jahr in der Vergangenheit . .	19
Tabelle 5:	Häufigkeit von von Starkniederschlägen	27
Tabelle 6:	Trendanalyse hinsichtlich der Länge von Trockenperioden	28
Tabelle 7:	Trend der Vegetationsperiode	30

Abkürzungsverzeichnis

DWD	Deutscher Wetterdienst
ET	Erster Tag der Vegetationsperiode
LT	Letzter Tag der Vegetationsperiode
NN	Normalnull
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
RCM	Regional Climate Modelling / Regionale Klimamodellierung
VP	Vegetationsperiode
WRF	Weather Research and Forecasting Model

1 Einführung

Seit Beginn der globalen Wetteraufzeichnungen, welche etwa im Jahr 1880 begannen, stellen die letzten vier Jahre die wärmsten Jahre in der Geschichte der globalen Wetteraufzeichnung dar (Waldmann, 2019). Bei dieser Häufung von Temperaturrekorden in kürzester Zeit ist davon auszugehen, dass es sich bei den überdurchschnittlich warmen Temperaturen nicht um eine Ausnahmeerscheinung, sondern um einen Trend handelt (vgl. Abb.1). Nach Berechnung der NOAA nimmt die globale Temperatur im Zeitraum 1880 bis 2017 im Schnitt um $0,07^{\circ}\text{C}$ pro Dekade zu (NOAA, 2019).

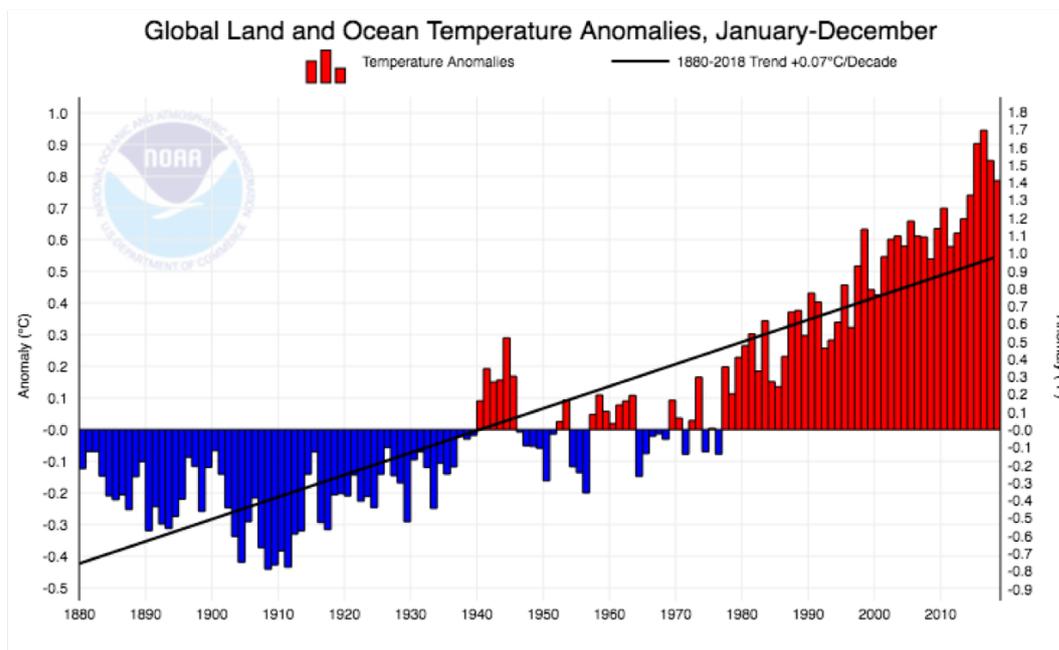


Abbildung 1: Globale Land- und Ozeantemperaturanomalien zwischen 1880 - 2018 (NOAA, 2019).

Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend in naher Zukunft fortsetzen wird. Nach den überdurchschnittlich warmen Jahren in letzter Zeit wahrscheinlich sogar stärker als $0,07^{\circ}\text{C}$ pro Dekade.

Ähnlich sieht die Temperaturentwicklung in Bayern aus: Auch hier nimmt die Temperatur über die letzten Jahrzehnte im Mittel zu.

Dies ist beispielsweise an der Zeitreihe der durchschnittlichen monatlichen Temperaturwerte des DWD am Standort Hohenpeißenberg zu sehen, welche die Temperaturentwicklung seit 1781 zeigt. Jede Kurve steht für die durchschnittlichen Monatswerte einer 30-Jahre-Perioden (vgl. Abb. 2). Vergleicht man die verschiedenen Kurven miteinander, so fällt auf, dass die kältesten Werte zu Beginn und die wärmsten Werte zum Ende der Zeitreihe vorkommen. Ebenso wie bei der Entwicklung der

globalen Temperaturanomalien, ist auch am Standort Hohenpeißenberg in Bayern eine Temperaturerhöhung festzustellen (vgl. Abb. 1 und Abb. 2).

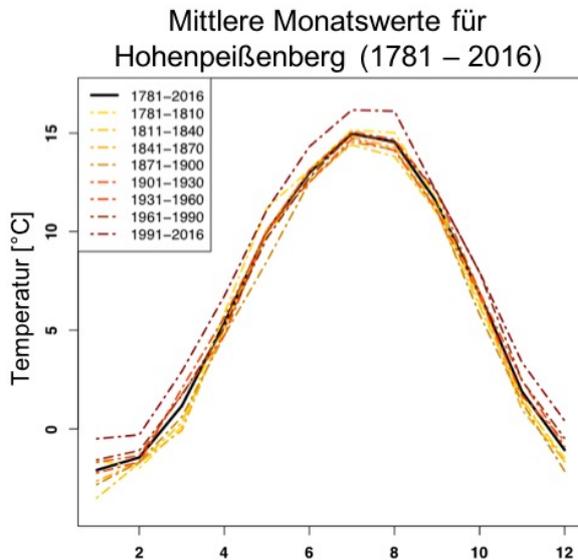


Abbildung 2: Mittlere Monatsmittelwerte an der DWD Station Hohenpeißenberg von 1781 - 2016.

Es ist zudem erkennbar, dass die Temperatur je nach Zeitpunkt im Jahr unterschiedlich stark zunimmt. So liegt die Differenz zwischen der kältesten und wärmsten Temperatur im Januar bei 3°C , während sich die Werte im September lediglich um 1°C voneinander unterscheiden.

Dies zeigt, wie wichtig eine hohe zeitliche Auflösung bei der Untersuchung klimarelevanter Variablen ist.

Um eine Aussage über die bisherige Klimaentwicklung im Landkreis Unterallgäu treffen zu können, wurden Beobachtungsdaten des DWD von Messstationen im Landkreis (siehe Kapitel 2.2) untersucht und mithilfe einer Trendanalyse ausgewertet (siehe Kapitel 3.1 und 4.1).

Neben der hohen zeitlichen Auflösung ist auch eine hohe räumliche Auflösung für die Analyse des aktuellen und zukünftigen Klimas entscheidend. In Abbildung 10 (Kapitel 4.1.2) sind die Standorte der Niederschlagsstationen des DWD im Untersuchungsgebiet dieser Studie abgebildet. Obwohl an den meisten Stationen der Niederschlag über den Zeitraum der jeweiligen Datenreihe zunimmt, gibt es auch Standorte, an denen der Niederschlag über den Messzeitraum abnimmt.

Globale Klimamodelle wie das MPI-ESM operieren derzeit auf Skalen mit einer räumlichen Auflösung von etwa 100 km und können daher solche Unterschiede nicht abbilden, da diese auf einem kleineren Raum stattfinden. Mithilfe von dynamischen und statistischen Verfahren ist es jedoch möglich, globale Simulationen zu verfeinern und damit die notwendigen räumlich (und zeitlich) hochaufgelösten Informationen über die zu erwartende Entwicklung des zukünftigen Klimas zu erhalten (siehe Kapitel 4.2).

In dieser Studie wurden Modelldaten mithilfe solcher Verfahren (siehe Kapitel 2.3) verfeinert, um mit einer Zeitreihen- und Trendanalyse neben der bisherigen auch die zukünftige Temperatur- und Niederschlagsentwicklung im Landkreis Unterallgäu zu projizieren und so eine Aussage über die zukünftige Klimaentwicklung machen zu können.

Auf Basis von zeitlich und räumlich hochaufgelösten Informationen über regionale Klimaänderungen können insbesondere politische Entscheidungsträger Maßnahmen zu einer erfolgreichen Klimawandelanpassung treffen. Hierfür ist vor allem die Analyse von Trends und die Identifizierung von möglichen Veränderungen von Risikobereichen wichtig. Zu diesen Risikobereichen gehören insbesondere extreme Niederschlagsereignisse und Trockenperioden. Nach den Analysen der Munich Re hat die langanhaltende Trockenperiode im Jahr 2018 mit hohen Schäden in der Landwirtschaft und vielen Waldbränden zu einem wirtschaftlichen Schaden von 3,2 Mrd. € geführt. Dies hatte auch Auswirkungen auf die Vegetation. Durch die sommerlichen Temperaturen im Frühjahr wurden Getreide und weitere Feldfrüchte zu früh reif und an vielen Orten fiel die Ernte aus (Münchener Rückversicherungsgesellschaft, 2019). Um auf solche Veränderungen in Zukunft besser vorbereitet zu sein, wird in dieser Studie die Veränderung der Häufigkeit von Starkniederschlägen, der Länge von Trockenperioden und die Länge der klimatologischen Vegetationsperiode genauer betrachtet (siehe Kapitel 4.3 und 4.4).

Die dabei erzielten Ergebnisse können dem Landkreis als wissenschaftliche Grundlage für die Erstellung eines Maßnahmenkataloges im Bereich der Klimawandelanpassung dienen.

2 Untersuchungsgebiet und Datengrundlage

2.1 Landkreis Unterallgäu

Der Landkreis Unterallgäu gehört zum Freistaat Bayern und befindet sich im deutschen Voralpenland. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, zeichnet sich der Landkreis durch eine Höhenzunahme von Norden Richtung Süden aus.

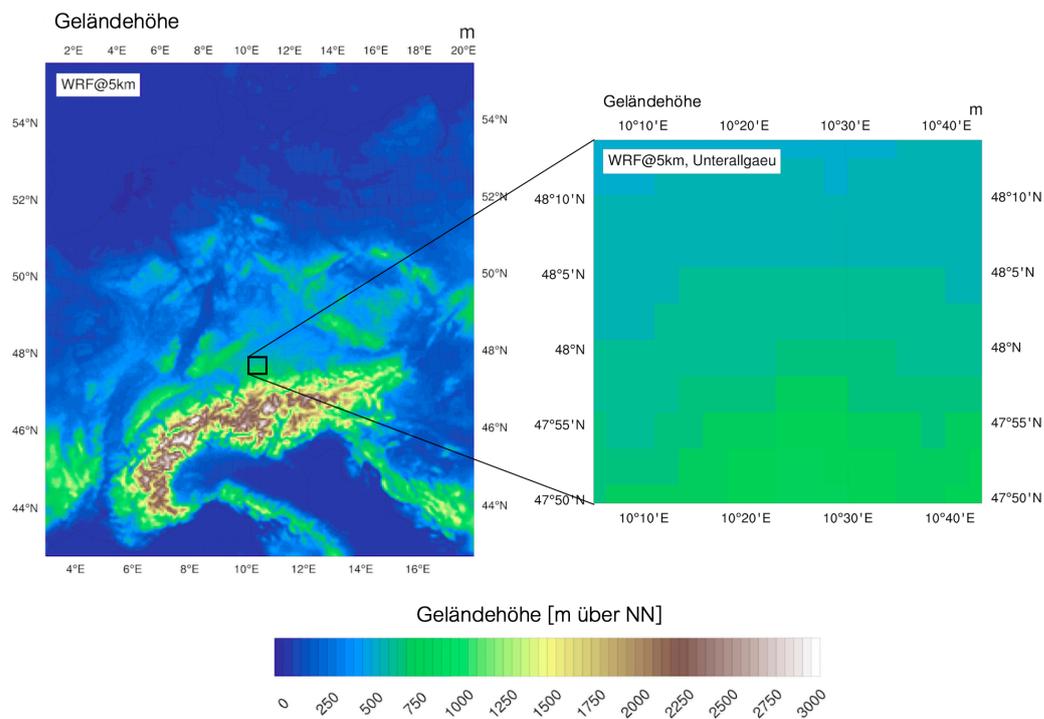


Abbildung 3: Geländemodell der Klimasimulationen (RCM WRF) für Mitteleuropa (links) und die Zielregion Unterallgäu (rechts).

2.2 Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes

Die Grundlage für das bisher beobachtete Klima bilden Temperatur- und Niederschlagsdaten aus Messstationen des DWD im Untersuchungsgebiet. Neben den erwähnten Variablen wurden auch Zeitreihen zu den Variablen Wind, Schnee und relative Feuchte untersucht, welche jedoch aus Kapazitätsgründen nur eingeschränkt ausgewertet wurden. Im Landkreis Unterallgäu wurden Daten folgender Messstationen aufbereitet und ausgewertet: Babenhausen, Boos, Breitenbrunn-Fürbuch, Epishausen, Grönenbach-Thal, Kronburg, Lauben / Unterallgäu-Frickenhausen, Legau, Markt Wald, Memmingen, Mindelheim, Ottobeuren, Salgen, Sontheim, Türkheim, Bad Wörishofen.

Des Weiteren wurden bei Bedarf Zeitreihen von Stationen in der unmittelbaren Umgebung des Landkreises ausgewertet. Dazu gehören die Stationen Hohenpeiß-

berg, Kaufbeuren, Kaufering, Landsberg, Lechfeld, Leutkirch, Raisting und Wiedenbach.

Über welchen Zeitraum zwischen den Jahren 1781 und 2018 die Daten verfügbar sind, variiert abhängig von der ausgewählten Station und der gewählten zeitlichen Auflösung (Monats-/Tages-/Stundenwerte). Insgesamt wurden für diese Studie 114 Zeitreihen im erweiterten Untersuchungsgebiet ausgewertet und analysiert. 75 Datensätze davon bilden die Temperatur- oder Niederschlagsentwicklung in der Vergangenheit ab. Eine genaue Auflistung der ausgewerteten Stationsdaten ist in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Analysierte Stationsdaten des DWD

Variable	Zeitliche Auflösung	Anzahl an Stationen	Zeitraum
Temperatur	Monatsmittelwerte	8	1781 - 2017
Temperatur	Tagesmittelwerte	9	1901 - 2017
Temperatur	Stundenmittelwerte	2	1966 - 2017
Niederschlag	Monatssumme	26	1781 - 2017
Niederschlag	Tagessumme	20	1891 - 2017
Niederschlag	Stundensumme	10	1995 - 2017
Relative Feuchte	Monatsmittelwerte	8	1781 - 2017
Relative Feuchte	Tagesmittelwerte	9	1901 - 2017
Relative Feuchte	Stundenmittelwerte	2	1966 - 2017
Schnee	Tagessumme	15	1936 - 2017
Wind	Stundenmittelwerte	5	1969 - 2017

2.3 Klimamodelldaten WRF

Im Rahmen des BIAS II Projektes, gefördert vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz und unter der Leitung der Universitäten Augsburg und Innsbruck, wurde eine regionale Klimasimulation (RCM) mit einer Auflösung von 5 km je Pixel für Deutschland und den Alpenraum durchgeführt. Hierfür wurden statistische und dynamische Verfahren eingesetzt, um globale Simulationen mit dem regionalen Klimamodell WRF (Weather Research and Forecasting Model) mithilfe einer Modellkette ("nesting") zu verfeinern. Dieser Ansatz erlaubt die Verwendung von höher aufgelösten Randdaten über Topographie, Landnutzung und Bodeneigenschaften als bei einem globalen Klimamodell. Mithilfe der Modellkette wird schrittweise die Modellauflösung erhöht und die Ergebnisse der Simulation mit niedrigerer Auflösung bilden die Randwerte für die jeweils höhere Auflösung. Dadurch wurde in insgesamt drei Schritten die Auflösung von 100 km auf 5 km er-

höht. Das bedeutet, dass es nach dem letzten Schritt in der Zielregion für jede Fläche der Größe 5 km x 5 km einen Mittelwert über diese Fläche gibt. Es handelt sich bei den Modelldaten daher um Flächendaten, während es sich bei den Beobachtungsdaten um Punktdaten handelt.

Abbildung 4 veranschaulicht das Modellsystem mit den drei Domains, welche nach den einzelnen Schritten erstellt wurden (Warscher et al., 2019).

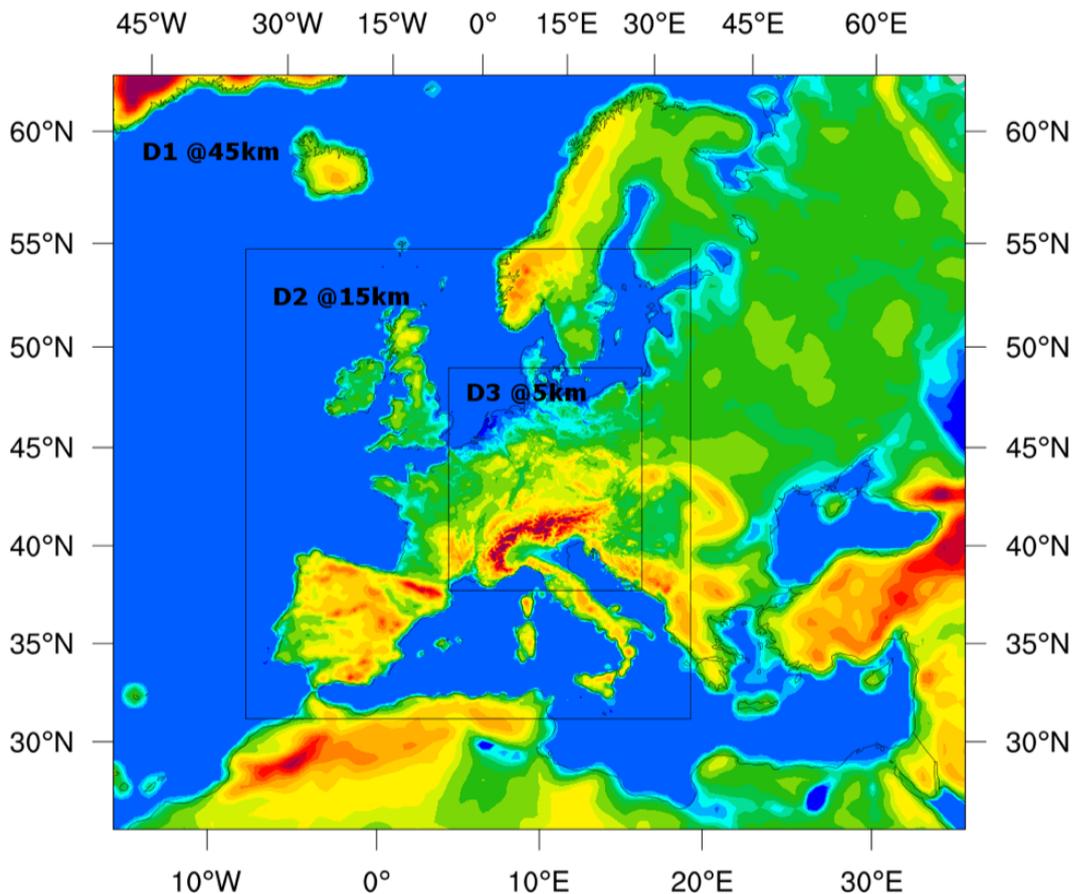


Abbildung 4: Das WRF Modellsystem mit den drei Domains (D1, D2 und D3) in 45 km, 15 km und 5 km räumlicher Auflösung (Warscher, Kunstmann, 2017).

Als Randdaten für den ersten Schritt des Modells wurden globale Modelldaten mit einer Auflösung von etwa 100 km als Antrieb genutzt. Dies sind zum einen die Reanalysedaten ERA-Interim (Dee et al., 2011) und zum anderen historische und Szenariosimulationen aus dem CMIP5 Projekt basierend auf dem Globalmodell MPI-ESM (Giorgetta, 2012). Das in diesem Projekt verwendete Szenario ist das IPCC-Szenario RCP4.5, welches von einer moderaten Klimaentwicklung ausgeht (Anstieg des CO_2 -Äquivalent auf 650 ppm bis 2100) (Van Vuuren et al., 2011). Da die Simulationen den Zeitraum bis zum Jahr 2049 abdecken und sich die einzelnen Szenarien bis zu diesem Zeitpunkt nicht sehr stark voneinander unterscheiden

(vgl. Abb. 5), spielt die Tatsache, dass nur ein Szenario untersucht wurde, keine entscheidende Rolle.

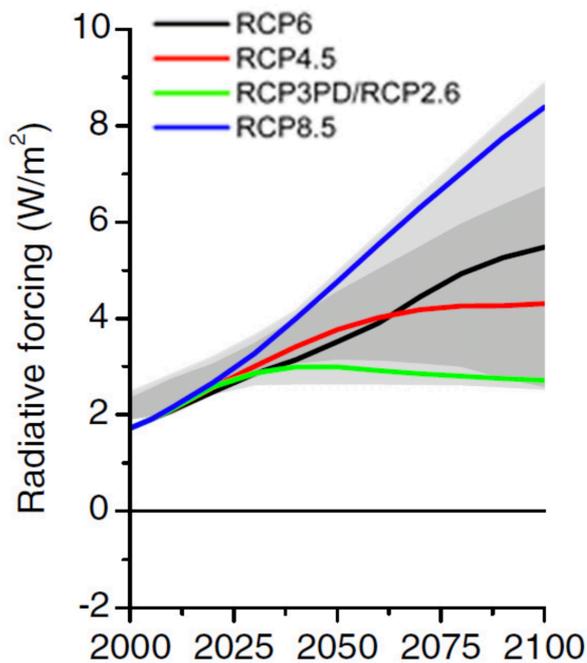


Abbildung 5: RCP Szenarien des IPCC (IPCC Data Distribution Centre, 2018).

Die RCM-Simulationen im BIAS II - Projekt setzen sich aus drei langjährigen Klimasimulationen zusammen. Dies sind der Reanalyselauf (1980-2009), der Kontrolllauf „E6 Hist“ (1980-2009) und der Szenariolauf „E6 Scen“ (2020-2049) (Warscher et al., 2019).

Für diese Zeiträume wurden die entsprechenden globalen Modell-Antriebsdaten für den Landkreis über die oben beschriebene Modellkette aufbereitet. Mit Hilfe des Reanalyselaufs, dessen Antriebsdaten durch ständige Assimilierung von Beobachtungsdaten möglichst nahe an der Realität liegen, wurde zunächst die Modellperformance im Klimamodus überprüft (vgl. Kapitel 3.2).

Ein Vergleich zwischen Kontroll- und Szenariolauf ermöglicht in der Folge eine Analyse der im Szenario zu erwartenden Klimaveränderungen (Warscher, Kunstmann, 2017).

3 Methoden

Alle Analysen und Abbildungen wurden mithilfe der Programmiersprachen R und NCL erstellt. R eignet sich insbesondere für statistische Analysen, während NCL sich durch seinen guten Umgang mit netcdf-Dateien auszeichnet.

3.1 Zeitreihen- und Trendanalyse der Stationsdaten

3.1.1 Aufbereitung und Analyse der Zeitreihen

Die Stationsdaten des DWD wurden zunächst auf mögliche Fehler und Datenlücken untersucht, bevor anschließend für jeden größeren Zeitabschnitt (Tag/Monat/Jahr), für den es keine Zeitreihen des DWD gab, Durchschnittswerte berechnet wurden. Bei den Durchschnittswerten handelt es sich bezüglich der Variablen Temperatur, Wind und relative Feuchte um Mittelwerte, während es sich bei den Variablen Niederschlag und Schnee um die Summe der Werte im jeweiligen Zeitabschnitt handelt. Dieser Schritt war vor allem notwendig um Jahreswerte zu erhalten, da der DWD die Stationsdaten lediglich in einer zeitlichen Auflösung von Stunden, Tagen und Monaten zur Verfügung stellt.

Des Weiteren wurden für alle Zeitreihen mit Monatswerten die mittleren Monatswerte über verschiedene Zeiträume berechnet, um beispielsweise zu untersuchen, inwieweit sich die durchschnittliche Temperatur im Januar im Vergleich von Zeitraum A zu Zeitraum B geändert hat (vgl. Abb. 2). Darüber hinaus können diese Zeitreihen durch Abzug der mittleren Monatswerte ohne ihren Jahresgang analysiert werden, wodurch eine langfristige Änderung der durchschnittlichen Werte leichter zu erkennen ist und man ohne die folgende Trendanalyse eine erste Aussage über die Änderung der jeweiligen Variablen treffen kann.

3.1.2 Trendanalyse

Um einen möglichen Trend quantitativ untersuchen zu können, werden die Messdaten im Zeitraum $x = x_1 - x_n$ mithilfe eines Polynomfit 1. Grades analysiert. Bei einem Polynomfit 1. Grades handelt es sich um eine lineare Funktion, welche sich aus der Steigung a und dem y-Achsenabschnitt b zusammensetzt:

$$f(x) = a * x + b. \quad (1)$$

Subtrahiert man $f(x_n) - f(x_1)$ erhält man die absolute Änderung zwischen Start- und Endwert der Trendgerade. Geteilt durch die Anzahl der Zeitschritte der Datenreihe (n) erhält man eine quantitative Aussage über die durchschnittliche Änderung des Trends pro Zeitschritt.

3.1.3 Trend nach Mann-Kendall-Trendtest

Um eine Aussage über die Signifikanz des mit dem Polynomfit 1. Grades erstellten Trends treffen zu können, wurde diese mit dem Mann-Kendall-Trendtest getestet. Dabei handelt es sich um einen auf Rängen basierenden Trendtest (Huxol, 2019). Da alleine der relative An- oder Abstieg der Reihenwerte untersucht wird, trifft dieser Test keine Aussage über die Art des Trends und setzt keine Voraussetzungen an die Verteilung der Daten. Der Rangkorrelationskoeffizient τ berechnet sich wie folgt:

$$\tau = \frac{S}{D} = \frac{\sum_{i < j} \text{sign}(x[j] - x[i]) * \text{sign}(y[j] - y[i])}{n(n-1)/2} \quad (2)$$

Ist $\tau > 0$ handelt es sich um einen ansteigenden Trend, ist $\tau < 0$ handelt es sich um einen absteigenden Trend.

Die Nullhypothese des Trendtests besagt, dass kein Trend vorliegt. Ist der Signifikanzwert „2-sided p-value“ unter dem selbstgewählten Signifikanzniveau α , wird die Nullhypothese verworfen und das Resultat ist statistisch signifikant. Somit macht der Signifikanzwert „2-sided p-value“ eine Aussage über die Signifikanz des berechneten Trends (McLeod, 2018). Bei dieser Studie wird der Trend auf Signifikanzniveau von $\alpha = 0,1\%/1\%/5\%$ geprüft (Menzel et al., 2003). Dies entspricht jeweils einem p-Wert von $<0,001$ (= „äußerst signifikant“ / $<0,01$ (= „stark signifikant“), $<0,05$ (= „signifikant“). Liegt der p-Wert unter 0,2 wird von einer Tendenz gesprochen (Huxol, 2019).

3.2 WRF Reanalyselauf vs. Stationsdaten

Um die Modellperformance der WRF Daten zu überprüfen, wurde für jede verwendete DWD Station das dazugehörige WRF-Pixel (5 km x 5 km Fläche) identifiziert. Erst dadurch können Punkt- und Flächendaten miteinander verglichen werden. Ein kritischer Punkt hierbei ist der Höhenunterschied zwischen der mittleren Höhe der Fläche und der Höhe des Standortes der Messstation. Daher wurde in allen Fällen zunächst die Differenz in der Höhe über NN berechnet und bei einer deutlichen Differenz wurde diese in der Analyse der Daten berücksichtigt.

Unterscheidet sich die Höhe zwischen DWD-Station und der durchschnittlichen Höhe über die 5x5 km² des Pixels, hat dies insbesondere auf die Temperaturzeitreihe signifikante Auswirkungen. Ursache hierfür ist die Änderung der Temperatur mit zunehmender Höhe. Liegt die Station jedoch beispielsweise 100 m höher als die Durchschnittshöhe des Pixels, dann würde aufgrund des adiabatischen Temperaturgradienten das Modell die Temperaturwerte an dieser Station immer um 0,5 bis 0,98 Kelvin überschätzen.

Für das jeweilige Pixel wurden die ERA-Interimsdaten des Reanalyseverfahrens (Temperatur- und Niederschlagsdaten) extrahiert und mit den Temperatur- und Niederschlagsdaten der dazugehörigen DWD Station (sofern diese Daten in diesem Zeitraum verfügbar waren) für den gleichen Zeitraum (1980-2009) über verschiedene Methoden verglichen (vgl. Abb. 6 und 7).

Im Folgenden wird die Temperatur- und Niederschlagsmessreihe der DWD Stationen in Memmingen für den Vergleich zwischen Modell- und Stationsdaten genauer analysiert um anschließend eine Aussage über die Modellperformance im Untersuchungsgebiet treffen zu können.

Die Messstation ist aufgrund der Qualität der Beobachtungszeitreihe für den jeweiligen Variable und aufgrund des geringen Höhenunterschieds zwischen Pixel und Station für den Vergleich sehr gut geeignet.

Die Übereinstimmung der beiden Zeitreihen für den jeweiligen Variable wird quantitativ mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 untersucht. Das Bestimmtheitsmaß ist ein Gütemaß für die lineare Regression und gibt den Zusammenhang zwischen einer abhängigen Variable und einer oder mehreren unabhängigen Variablen wieder. Damit beschreibt es den linearen Zusammenhang der Variablen beider Zeitreihen (Ghosh, 2019).

Im Falle der Temperaturdaten liegen die Werte für R^2 zwischen 0,9 und 0,98 und im Durchschnitt bei 0,95, während bei Niederschlagsdaten lediglich eine Übereinstimmung von durchschnittlich 0,5 vorliegt. In Anbetracht dessen, dass Niederschlagsdaten deutlich schwerer zu modellieren sind als Temperaturdaten, kann in beiden Fällen von einer sehr guten Übereinstimmung zwischen Modell- und Stationsdaten gesprochen werden (IPCC, 2013).

Dies unterstreicht die Abbildung der Residuen, welche bei den Temperaturdaten meist bei unter einem Kelvin liegt und bei den Niederschlagsdaten weniger als 0,01% beträgt.

Im Scatterplot werden die Stationsdaten auf der y-Achse und die Modelldaten auf der x-Achse gegenübergestellt. Die rote Gerade gibt den gemittelten Wertebereich der einzelnen Datenpunkte an. Je näher diese Gerade an der grauen Gerade liegt, desto größer ist die Übereinstimmung der beiden Zeitreihen. Analog zum Bestimmtheitsmaß, ist die Übereinstimmung der Zeitreihen bei der Temperatur höher als beim Niederschlag.

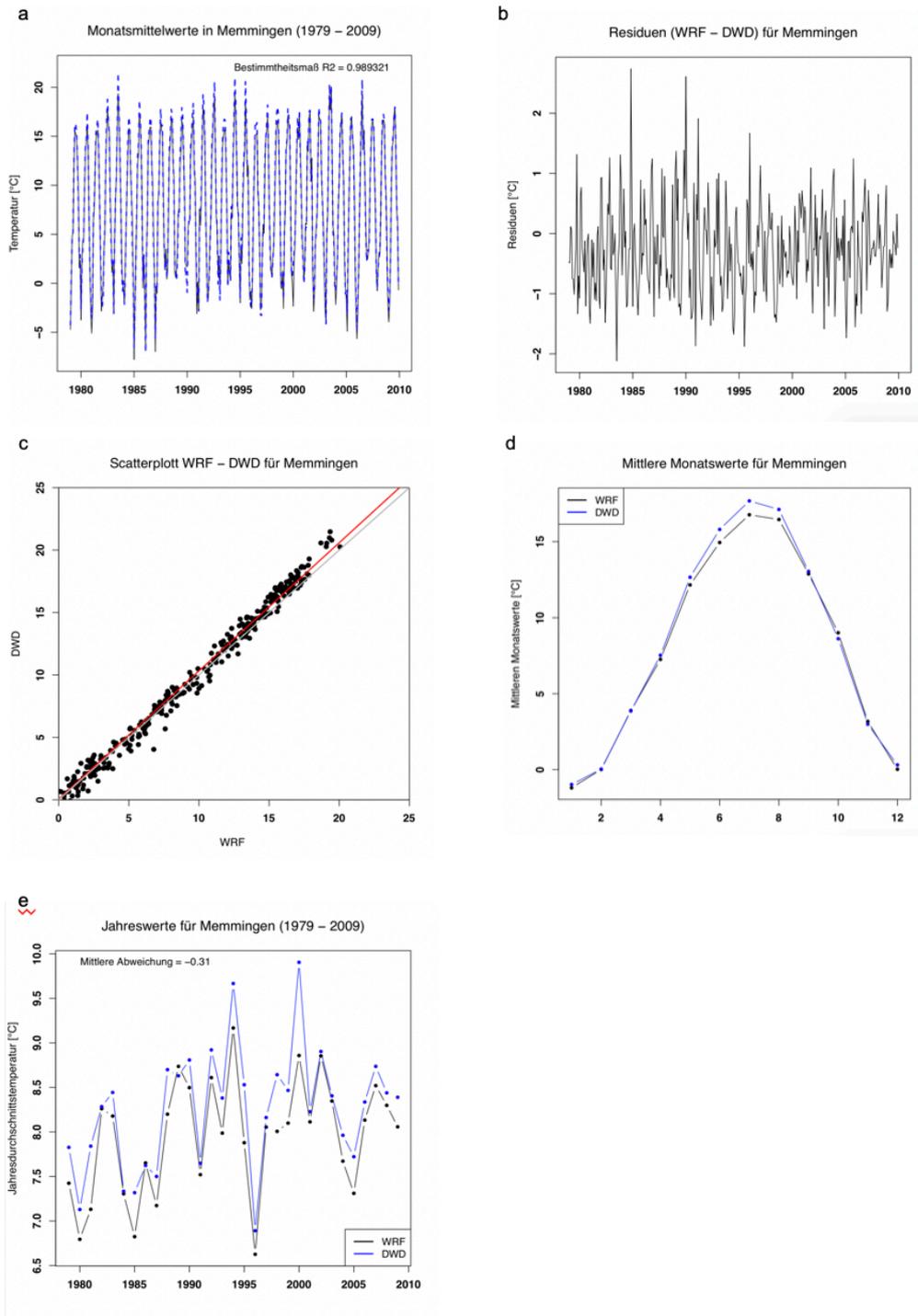


Abbildung 6: Vergleich zwischen Beobachtungsdaten (DWD) und Modelldaten (WRF) für den Monatsmittelwert der Lufttemperatur in Memmingen bzw. dem $5 \times 5 \text{ km}^2$ Pixel um Memmingen für den Zeitraum 1979 bis 2009: a) Gegenüberstellung der Monatsmittelwerte mit Bestimmtheitsmaß R^2 ; b) Residuen: Modelldaten minus Beobachtungsdaten; c) Scatterplot mit Modelldaten auf der x-Achse, Beobachtungsdaten auf der y-Achse, die rote Gerade gibt den mittleren Verlauf an, die graue Gerade zeigt den idealen Verlauf bei einer perfekten Übereinstimmung an; d) Mittlere Monatswerte der beiden Datenreihen; e) Jahresdurchschnittswerte und mittlere Abweichung der jeweiligen Jahreswerte (WRF - DWD)

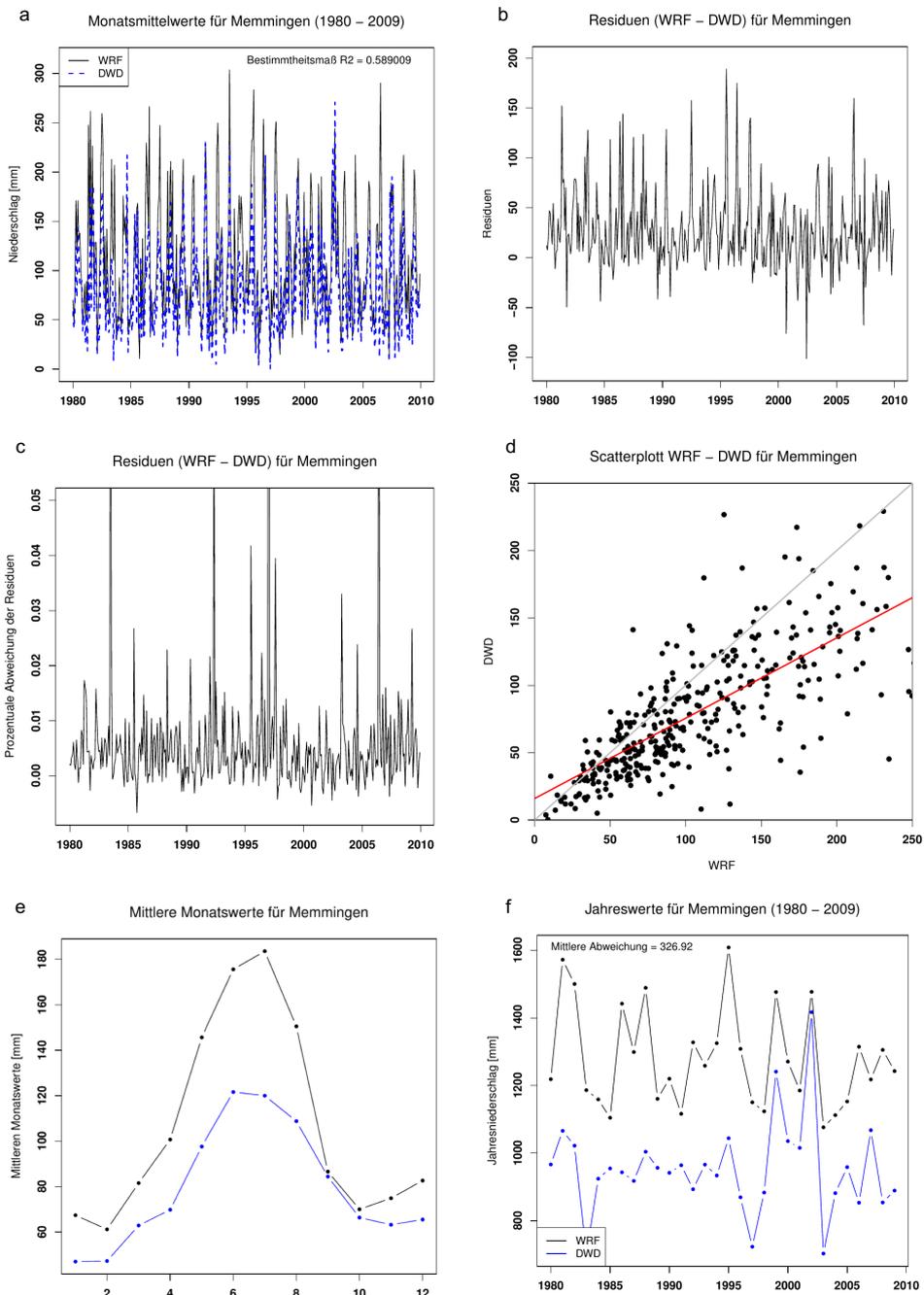


Abbildung 7: Vergleich zwischen Beobachtungsdaten (DWD) und Modelldaten (WRF) für die monatliche Niederschlagssumme in Memmingen bzw. dem $5 \times 5 \text{ km}^2$ Pixel um Memmingen für den Zeitraum 1980 bis 2009: a) Gegenüberstellung der Monatssummen mit Bestimmtheitsmaß R^2 ; b) Residuen: Modelldaten minus Beobachtungsdaten; c) Residuen in %: prozentuale Abweichung zwischen den beiden Datenreihen; d) Scatterplot mit Modelldaten auf der x-Achse, Beobachtungsdaten auf der y-Achse, die rote Gerade gibt den mittleren Verlauf an, die graue Gerade zeigt den idealen Verlauf bei einer perfekten Übereinstimmung an; e) Mittlere Monatswerte der beiden Datenreihen; f) Jahressummen und mittlere Abweichung der jeweiligen Jahreswerte (WRF - DWD)

Betrachtet man die mittleren Monatswerte, so erkennt man, dass in den Sommermonaten die Differenz zwischen Modell- und Beobachtungsdaten am größten ist, während ansonsten insbesondere bei den Temperaturwerten eine sehr gute Übereinstimmung herrscht.

Vergleicht man die Werte der mittleren Jahrestemperatur, spiegelt sich auch hier die sehr gute Übereinstimmung von beiden Zeitreihen wider. Stellt man die Summen der Jahresniederschläge gegenüber, fällt auf, dass beide Zeitreihen einen ähnlichen Verlauf haben, jedoch ist die Jahressumme des Modells immer größer als die gemessene Jahressumme an der Station.

Ein möglicher Grund hierfür ist der schon weiter oben erwähnte Unterschied in der Höhe zwischen der DWD-Station und dem Pixel.

3.3 Aufbereitung und Auswertung der Klimaläufe

Wie in Kapitel 2.3 beschrieben und in Abbildung 4 abgebildet, wurde das Konzept der Klimaläufe mit einer Auflösung von 5×5 km je Pixel für Deutschland und den Alpenraum im Rahmen des Projektes BIAS II erstellt und im Rahmen dieser Studie für den Landkreis aufbereitet und ausgewertet. Konkret handelt es sich hierbei um Jahres-, Monats- und Tagesdaten für Temperatur und Niederschlag über den jeweiligen Zeitraum des Kontroll- und Szenariolaufes (1980-2009 bzw. 2020-2049). Für die kartographische Darstellung wurden die Daten in die Auflösung von $0.04 \times 0.04^\circ$ umgerechnet.

In den Abbildungen 8 und 9 sind die Simulationen für den Landkreis auf Basis der jährlichen Durchschnittswerte abgebildet. Für jedes Pixel wird der durchschnittliche Temperaturwert in Grad Celsius bzw. die Niederschlagssumme in mm für die Zeiträume 1980 - 2009 bzw. 2020 - 2049 angegeben. Die Temperaturwerte liegen zwischen $6,5$ und $7,8^\circ$ im Landkreis. Die zunehmende Höhe von Norden Richtung Süden (vgl. Abb. 3) bewirkt einen Temperaturgradienten von Norden nach Süden (vgl. Abb. 8). Umgekehrt sieht es bei den Niederschlagssummen aus: die Niederschläge nehmen im Landkreis Unterallgäu von Süden nach Norden (vgl. Abb. 9) ab.

Für eine weitere Differenzierung wurden die Klimasimulationen für jede Jahreszeit erstellt, wobei immer drei Monate, entsprechend der meteorologischen Definition der vier Jahreszeiten, eine Jahreszeit bilden. So setzt sich beispielsweise der Winter aus den Zeitreihen der Monate Dezember, Januar und Februar zusammen (vgl. z.B. Abb. 13).

Die Ergebnisse aus der Trendanalyse der Stationsdaten und der Simulationsläufe werden in Kapitel 4 beschrieben.

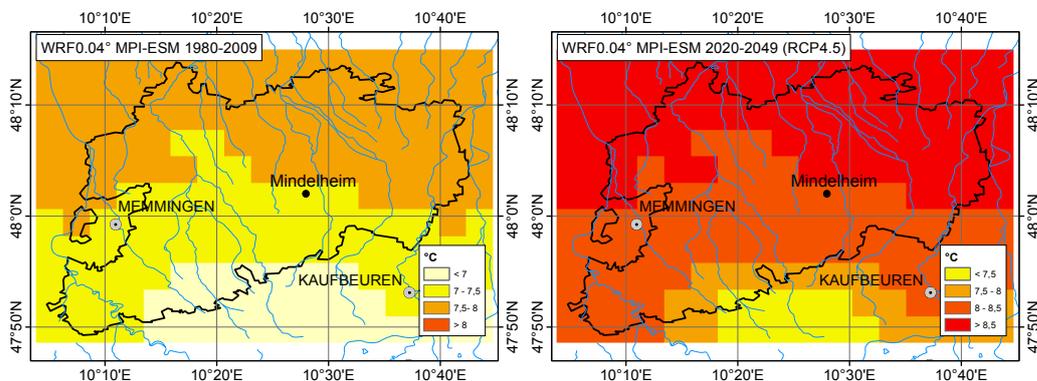


Abbildung 8: Simulationen für die durchschnittliche Lufttemperatur in 2 Meter Höhe in Grad Celsius für den Landkreis Unterallgäu. Links sind die Ergebnisse des Kontrolllaufs (Pixelauflösung $0.04 \times 0.04^{\circ}$, globales Klimamodell MPI-ESM, 1980-2009) und rechts des Szenariolaufs (Pixelauflösung $0.04 \times 0.04^{\circ}$, globales Klimamodell MPI-ESM, 2020-2049, RCP 4.5) dargestellt

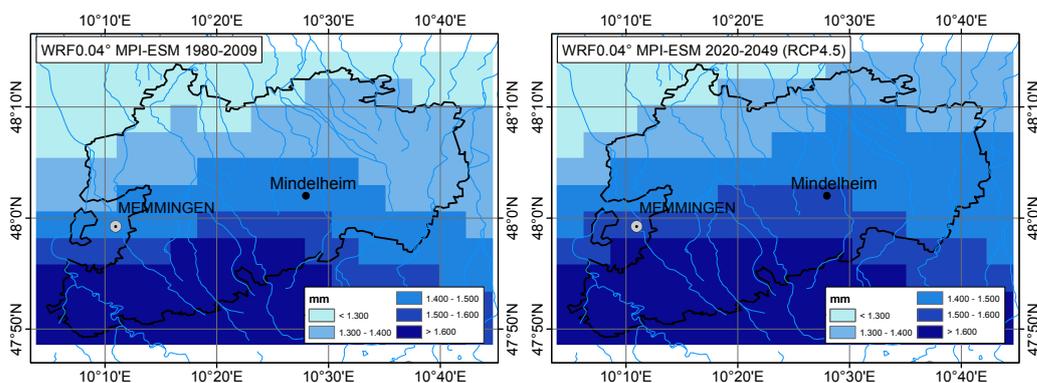


Abbildung 9: Simulationen für die jährlichen Niederschlagssumme in mm für den Landkreis Unterallgäu. Links sind die Ergebnisse des Kontrolllaufs (Pixelauflösung $0.04 \times 0.04^{\circ}$, globales Klimamodell MPI-ESM, 1980-2009) und rechts des Szenariolaufs (Pixelauflösung $0.04 \times 0.04^{\circ}$, globales Klimamodell MPI-ESM, 2020-2049, RCP 4.5) dargestellt.

3.4 Ermittlung der Extremereignisse Starkniederschläge und Trockenperioden

In dieser Studie wurden Beobachtungs- und Modelldaten miteinander hinsichtlich der Häufigkeit von Starkniederschlägen und der Länge von Trockenperioden verglichen. Indem bei den Modelldaten die Fläche (auch Pixel genannt) identifiziert wurde, welche am nächsten zur jeweiligen Messstation des DWD liegt, konnte für jeden Modelllauf eine 30 jährige Zeitreihe mit täglichen Temperaturmittelwerten und Niederschlagssummen ausgewertet und analysiert werden. Somit wurden jeweils drei verschiedenen Zeitreihen mit täglichen Daten für jeden Standort mit Beobachtungsdaten hinsichtlich Starkniederschlägen und Trockenperioden ausgewertet: die Beobachtungszeitreihe des DWD, die Zeitreihe aus dem WRF Kontrolllauf über den Zeitraum 1980-2009 und die Zeitreihe aus dem WRF Szenariolauf (RCP 4.5) über den Zeitraum 2020-2049.

Von Starkniederschlägen spricht man, sobald an einem Tag mehr als 30 mm Niederschlag fallen. Ab diesem Grenzwert gibt der DWD eine Wetterwarnung heraus. Bei täglichen Niederschlagssummen zwischen 30 und 50 mm wird dies als Unwetter bezeichnet. Sobald es mehr als 80 mm am Tag regnet, gibt es eine Warnung für ein extremes Unwetter (Deutscher Wetterdienst, 2019). Anhand dieser Grenzwerte wurden jeweils zwei Perioden der Beobachtungsdaten und der Modelldaten miteinander verglichen und es wurde untersucht, ob die Ereignisse mit Starkniederschlägen über 30 mm von Periode 1 zu Periode 2 zu- oder abgenommen haben. Dadurch kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob Ereignisse, welche einer Wetterwarnung bedingen, von Periode 1 zu Periode 2 zu- oder abnehmen. Bei den Beobachtungsdaten des DWD wurden die Zeiträume 1950-1979 und 1980-2009 miteinander verglichen. Bei den Modelldaten wurden gemäß der Modellläufe die Zeiträume 1980-2009 und 2020-2049 miteinander verglichen.

Für die Analyse der Trockenperiode wurden ebenfalls die täglichen Niederschlagssummen miteinander verglichen. Als Trockenperiode wird ein Zeitraum von mindestens zehn Tagen in Folge mit keinem oder geringen Niederschlägen, abhängig vom Grenzwert, bezeichnet (Umweltbundesamt, 2015). In dieser Studie wird der Grenzwert auf 1 mm festgelegt. Dies bedeutet, dass von einer Trockenperiode die Rede ist, wenn es an mindestens zehn Tagen in Folge höchstens 1 mm pro Tag geregnet hat.

3.5 Ermittlung der Vegetationsperiode

Nach Linderholm (2006) gibt es drei verschiedene Methoden die Veränderung der Vegetationsperiode zu ermitteln: auf Basis von Phänologiedaten, des Vegetationsindex NDVI aus Satellitendaten oder der Lufttemperatur. Aufgrund der bereits beschriebenen Datengrundlage dieser Studie wurde in diesem Fall die zuletzt genannte Methode angewendet.

Bei der Bestimmung der Vegetationsperiode auf Basis von Temperaturdaten wird oft auch von der klimatologischen Vegetationsperiode gesprochen. Es handelt sich hierbei um die gesamte Zeitspanne, in der theoretisch Wachstum stattfinden kann. Sie wird definiert als die Periode zwischen dem letzten Tag unterhalb einer bestimmten Temperaturgrenze im Frühjahr bis zum ersten Tag unterhalb derselben Temperaturgrenze im Herbst. Dabei handelt es sich bei den Grenzwerten um tägliche Temperaturmittelwerte (Linderholm, 2006).

Für das Untersuchungsgebiet wurden die Grenzwerte aus der Studie von Menzel et al. (2003) übernommen. Demnach ist die klimatologische Vegetationsperiode (VP) die Periode, in der die mittlere Tagestemperatur (T_{mean}) konstant gleich oder größer der Grenzwerte $T_{mean} \geq 5, 7$ oder 10°C ist. Kurzfristige Temperatureinbrüche in den Monaten Juni, Juli und August wurden nicht berücksichtigt. Somit beginnt die Vegetationsperiode am ersten Tag (ET) im Frühjahr, an dem der Tagesdurchschnittswert der Temperatur mindestens $5/7/10^\circ\text{C}$ beträgt.

Tabelle 2: Bestimmung von Länge, Beginn und Ende der klimatologischen Vegetationsperiode basierend auf durchschnittlichen Tagestemperaturwerten nach Menzel et al. (2003)

Frühling	Beginn (ET)	$T_{mean} \geq 5^\circ\text{C}$	Erster Tag, an dem T_{mean}
	Beginn (ET)	$T_{mean} \geq 7^\circ\text{C}$	gleich oder größer
	Beginn (ET)	$T_{mean} \geq 10^\circ$	als der Grenzwert ist.
Herbst	Ende (LT)	$T_{mean} \geq 5^\circ\text{C}$	Letzter Tag, an dem T_{mean}
	Ende (LT)	$T_{mean} \geq 7^\circ\text{C}$	gleich oder größer
	Ende (LT)	$T_{mean} \geq 10^\circ$	als der Grenzwert ist.
Periode	Vegetationsperiode (VP)	$T_{mean} \geq 5^\circ\text{C}$	Vegetationsperiode, in der an
	Vegetationsperiode (VP)	$T_{mean} \geq 7^\circ\text{C}$	allen Tagen T_{mean} gleich oder
	Vegetationsperiode (VP)	$T_{mean} \geq 10^\circ$	größer als der Grenzwert ist.

Analog dazu endet die Vegetationsperiode an dem Tag im Herbst (LT), an dem die durchschnittliche Tagestemperatur zuletzt gleich oder größer als der Grenzwert ist (vgl. Tabelle 2) (Menzel et al., 2003). Für jede Station wurde mit der schon beschrie-

benen Methode der Trendanalyse ein linearer Trend berechnet, dessen Signifikanz ebenfalls mit dem Mann-Kendall-Trendtest ermittelt wurde. Die Daten wurden in dieser Studie für einen Temperaturgrenzwert von 7°C ausgewertet.

4 Ergebnisse

4.1 Klimaentwicklung in der Vergangenheit

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse auf Basis der Beobachtungszeitreihen im erweiterten Gebiet des Landkreises Unterallgäu vorgestellt. Dabei werden zunächst die Ergebnisse für die Variable Temperatur und anschließend die Ergebnisse für die Variable Niederschlag vorgestellt.

4.1.1 Temperatur

Aufgrund der geringen Anzahl an qualitativ und quantitativ hochwertigen Temperatur-Zeitreihen von Messstationen im Landkreis, wurden auch Zeitreihen verhältnismäßig nah zum Landkreis gelegener Messstationen ausgewertet. Es handelt sich hierbei um Monatsmittelwerte, für welche mithilfe eines Polynomfits 1. Grades ein linearer Trend berechnet wurde. Die Signifikanz des Trends wurde mit dem Mann-Kendall-Trendtest analysiert. Die Ergebnisse der Trendanalyse der ausgewählten Stationen sind in Tabelle 3 abgebildet.

Tabelle 3: Temperaturänderung pro Dekade (10 Jahre) in der Vergangenheit mit Beginn und Ende der Zeitreihe sowie der Signifikanz des Trends nach Mann-Kendall (**** = äußerst signifikant ($p < 0,001$), *** = stark signifikant ($p < 0,01$), ** = signifikant ($p < 0,05$), * = Tendenz ($p < 0,2$)).

Station	Beginn	Ende	Temperaturänderung pro Dekade	Signifikanz (p-Wert)
Hohenpeißenberg	1781	2017	0,066	****
Kaufbeuren	1939	2016	0,184	*
Kaufering	1968	2008	0,625	**
Landsberg	2000	2017	-0,092	
Lechfeld	2000	2017	0,370	
Leutkirch	2007	2017	0,674	
Memmingen	1939	2017	0,301	**
Wielenbach	1999	2017	0,245	

Wie zu sehen ist, nimmt an allen Stationen die Temperatur zu, sofern es sich um einen signifikanten Trend handelt. Im Falle der längsten Zeitreihe an der Station Hohenpeißenberg bedeutet dies, dass es im Jahr 2017 durchschnittlich $1,55^{\circ}\text{C}$ wärmer war als im Jahr 1781.

Der Begriff Klima wird als das durchschnittliche Wetter über einen Zeitraum von mindestens 30 Jahren definiert (Umweltbundesamt, 2015). Da jede Zeitreihe mit ei-

nem signifikanten Trend länger als 30 Jahre ist, kann man hier von einer Änderung des Klimas in Bezug auf die Lufttemperatur sprechen.

Die größte Änderung mit $0,625^{\circ}$ C pro zehn Jahre wurde am Standort Kaufering im Landkreis Landsberg am Lech von 1968 bis 2008 gemessen.

4.1.2 Niederschlag

Die Ergebnisse der Trendanalyse für den Variable Niederschlag im Untersuchungsgebiet sind in Tabelle 4 abgebildet.

Tabelle 4: Niederschlagsänderung pro Jahr in der Vergangenheit mit Beginn und Ende der Zeitreihe sowie der Signifikanz des Trends nach Mann-Kendall (**** = äußerst signifikant ($p < 0,001$), *** = stark signifikant ($p < 0,01$), ** = signifikant ($p < 0,05$), * = Tendenz ($p < 0,2$)).

Station	Beginn	Ende	Niederschlagsänderung [mm/Jahr]	Signifikanz (p-Wert)
Babenhausen	1938	2017	1,45	**
Boos	1950	2017	0,59	
Breitenbrunn	1983	2017	-3,64	*
Grönebach-Thal	1899	2005	1,52	****
Eppishausen	1928	2917	-0,83	*
Kronburg	1946	2017	0,52	
Lauben	1901	2005	1,97	**
Legau	1937	2005	1,38	*
Markt Wald	1921	2005	1,46	*
Memmingen	1879	2017	0,42	
Mindelheim	1891	2017	1,16	****
Ottobeurn	1891	2017	1,04	***
Salgen	1912	2005	0,82	
Sontheim	1961	2017	1,45	*
Türkheim	1914	2005	0,3	
Bad Wörishofen	1899	2017	2,05	***

Bis auf zwei Stationen nimmt der Niederschlag über den Messzeitraum zu. Jedoch unterschieden sich die positiven Trendgeraden deutlich in ihrer Steigung (0,3 bis 2,05 mm/Jahr). Am stärksten ist der Jahresniederschlag mit einer Zunahme um 2,05 mm jährlich in Bad Wörishofen gestiegen. Addiert man die Änderung pro Jahr auf den gesamten Zeitraum auf, so hat die durchschnittliche jährliche Niederschlags-summe um 242 mm von 1899 zu 2017 zugenommen. In Breitenbrunn hat der Niederschlag mit 3,64 mm/Jahr hingegen stark abgenommen. Dies zeigt, dass es große regionale Unterschiede in der Niederschlagsentwicklung gibt.

Um die verschiedenen Stationen noch besser miteinander vergleichen zu können, muss ein Zeitraum festgelegt werden, in welchem Niederschlagsdaten an allen Stationen gemessen wurden. Dies trifft auf die Periode von 1968 bis 2005 zu, für welche die Trendanalyse erneut durchgeführt wird. Dadurch ist es möglich, regionale Unterschiede aufzudecken, allerdings ist die Signifikanz der jeweiligen Trendlinien aufgrund des kürzeren Zeitraums deutlich geringer. Wie in Abbildung 10 zu sehen ist, unterscheiden sich auch für diesen Zeitraum die Trendlinien je nach Station deutlich voneinander. Bei sieben Stationen nimmt der Niederschlag über den Untersuchungszeitraum ab, während er bei neun Stationen zunimmt. Betrachtet man lediglich die Stationen, die über eine signifikante Trendlinie verfügen, nimmt der Niederschlag bis auf bei einer Station immer zu.

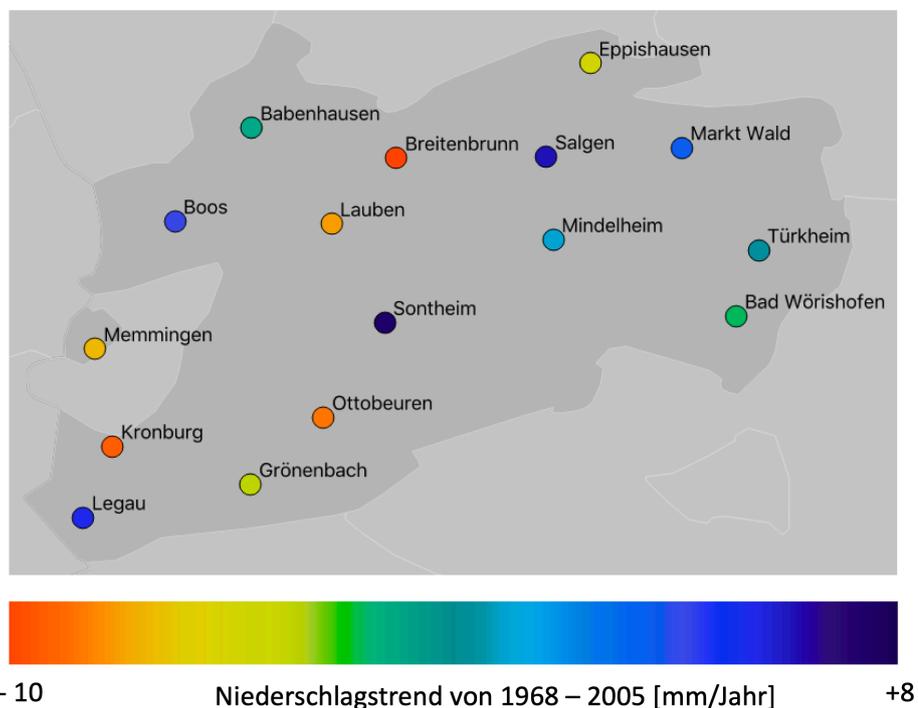


Abbildung 10: Niederschlagstrends für den Zeitraum 1968 - 2005 nach der Trendanalyse mit einem Polynomfit auf Basis von Stationsdaten des DWD.

Anhand von Abbildung 10 ist gut zu erkennen, wie unterschiedlich die Niederschlagsentwicklung trotz unmittelbarer räumlicher Nähe an jedem Standort ausfallen kann und wie wichtig daher eine hohe räumliche Auflösung von Klimadaten ist.

4.2 Klimaentwicklung in der Zukunft auf Basis der Klimasimulationen

Die jeweils 30-jährigen Klimasimulationen (Kontrolllauf und Szenariolauf) wurden für die Variable Temperatur (Lufttemperatur zwei Meter über der Erdoberfläche) und Niederschlag ausgewertet.

4.2.1 Temperatur

In Abbildung 11 ist die projizierte Veränderung der Temperatur zwischen der Kontrollperiode 1980-2009 und dem Szenariozeitraum 2020-2049 im Untersuchungsgebiet dargestellt. Die absoluten Werte der Lufttemperatur in beiden Zeiträumen sind in Abbildung 8 dargestellt.

Die projizierte Änderung zeigt eine deutliche Erwärmung der mittleren Lufttemperatur in diesem Szenario und Untersuchungsgebiet zwischen + 0,95 und + 1,05°C. Dabei tritt die stärkste Erwärmung im Süden des Landkreises auf.

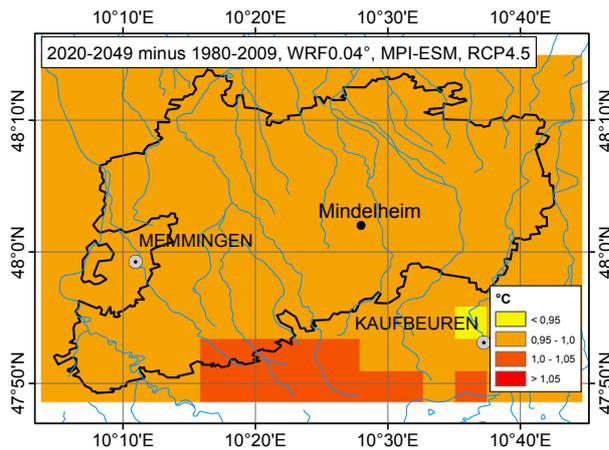


Abbildung 11: Projizierte Veränderung der mittleren Lufttemperatur in 2 Meter Höhe in Grad Celsius für den Landkreis Unterallgäu zwischen 1980-2009 und 2020-2049.

Betrachtet man die Mittelwerte der Temperatur für die einzelnen Jahre (vgl. Abb. 12), so zeigt sich auch hier der deutliche Anstieg der Lufttemperatur. Dabei gilt jedoch zu beachten, dass es sich hierbei nur um eine Realisation eines Klimamodells handelt, was bedeutet, dass nicht einzelne Jahre im Fokus stehen, sondern die durchschnittliche Veränderung über die beiden Zeiträume. In Abbildung 12 ist zur Veranschaulichung jeweils die aus

Mittelwert und Standardabweichung für das 99,7%-Konfidenzintervall berechnete Normalverteilung eingezeichnet (Warscher, Kunstmann, 2017). Der Mittelwert der Verteilung wird durch das Maximum der Kurve gezeigt. Auch wenn es in beiden Zeitspannen kühle Jahre mit Temperaturen weit unter dem Durchschnitt geben wird, verschiebt sich das Maximum der Kurve um etwa 1°C. Liegt der Mittelwert für die Periode 1980 - 2009 noch bei etwa 7,4°C, so steigt er für den Szenariozeitraum 2020 - 2049 auf 8,4°C an. Dies bedeutet, dass in der Zukunft die durchschnittlichen Jahre etwa 1°C wärmer sind als es zwischen 1980 und 2009 der Fall war.

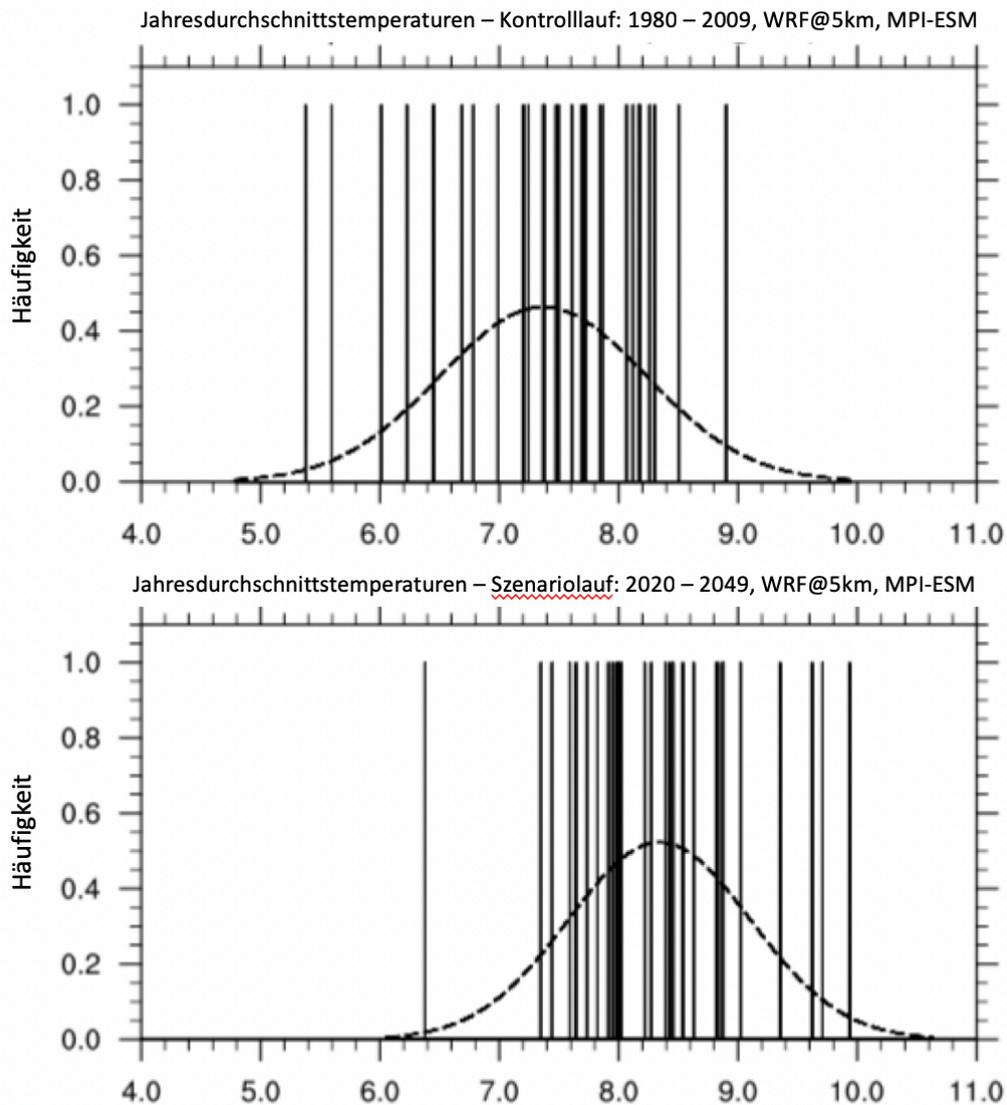


Abbildung 12: Mittlere jährliche Lufttemperaturen für einzelne Jahre in den Perioden 1980 - 2009 (oben) und 2020 - 2049 (unten) im Landkreis Unterallgäu auf Basis von WRF@5km, MPI-ESM, RCP4.5.

Differenziert man diese Ergebnisse in die einzelnen Jahreszeiten, sind weitere Details zu erkennen. Die Zunahme tritt insbesondere im Winter und Frühling auf, während im Sommer und Herbst die Temperaturen deutlich geringer zunehmen (vgl. Abb. 13). Anzumerken ist jedoch, dass die Temperaturen in jeder Jahreszeit um mindestens $0,5^{\circ}\text{C}$ zunehmen. Interessanterweise sind die Temperaturgradienten im Untersuchungsgebiet im Winter und Frühling unterschiedlich. Im Winter nimmt die Temperatur im Norden des Landkreises am stärksten zu (vgl. Abb. 13), während

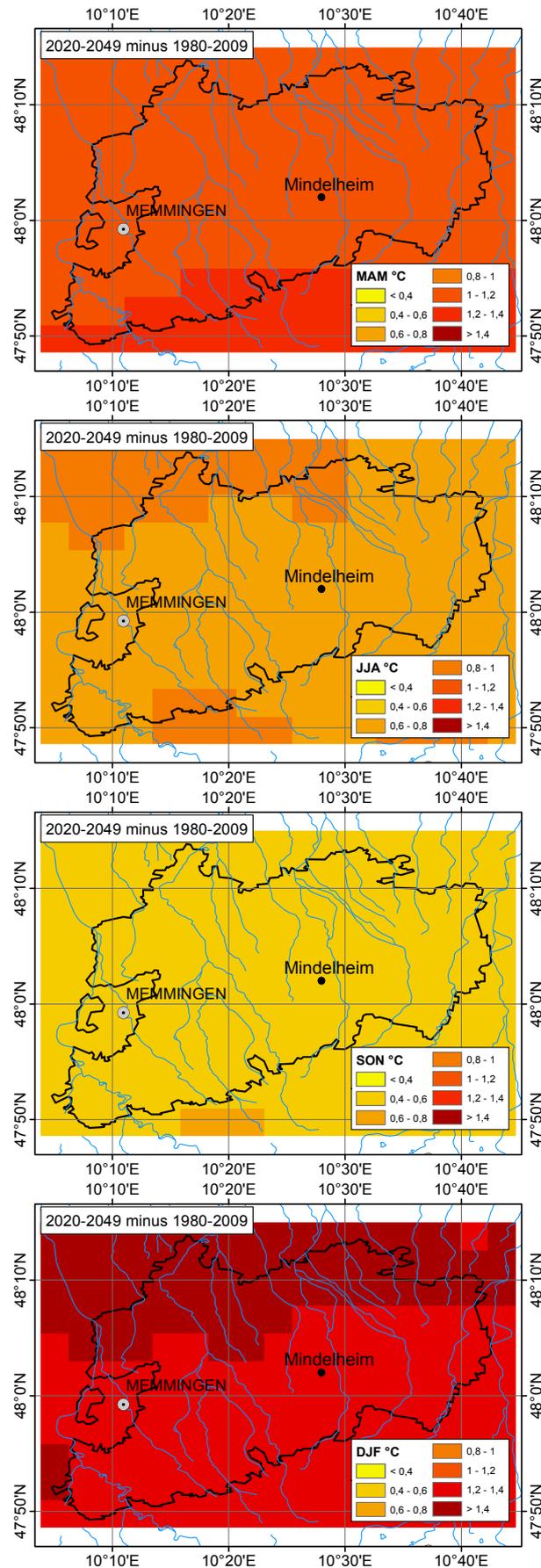


Abbildung 13: Projizierte Veränderung der mittleren Lufttemperatur in 2 Meter Höhe in Grad Celsius für den Landkreis Unterallgäu im Frühling (MAM), Sommer (JJA) Herbst (SON) und Winter (DJF) zwischen 1980-2009 und 2020-2049.

im Frühling (vgl. Abb. 13) ein ähnlicher Temperaturverlauf wie bei der Temperaturänderung über das gesamte Jahr (vgl. Abb. 11) auftritt.

4.2.2 Niederschlag

In Abbildung 14 ist die projizierte Veränderung der durchschnittlichen jährlichen Niederschlagssumme zwischen dem Kontrollzeitraum 1980-2009 und der Szenarioperiode 2020-2049 im Untersuchungsgebiet dargestellt.

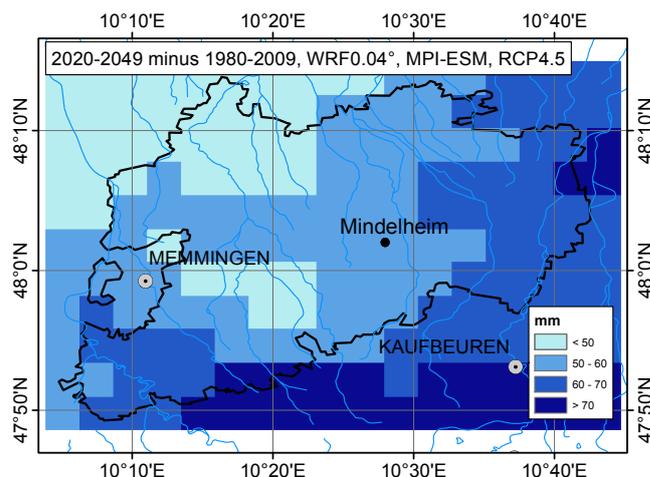


Abbildung 14: Projizierte Veränderung der mittleren Niederschlagssumme in mm für den Landkreis Unterallgäu zwischen 1980-2009 und 2020-2049.

Die absoluten Werte der jährlichen Niederschlagssumme in beiden Zeiträumen sind in Abbildung 9 dargestellt.

Die Zunahme der jährlichen Niederschlagssumme liegt unter Verwendung des Szenarios zwischen +50 und +70 mm im Untersuchungsgebiet. Die Niederschlagsänderung nimmt von Nordwesten Richtung Südosten zu.

Betrachtet man diese Ergebnisse für die einzelnen Jahreszeiten, sind weitere Details zu

erkennen. Die Zunahme des Jahresniederschlags wird vor allem durch eine Zunahme der Herbst- und Winterniederschläge bestimmt. Im Frühling und Sommer fällt die Änderung insgesamt geringer aber unterschiedlicher aus. In manchen Regionen wird der Niederschlag in diesen Jahreszeiten abnehmen, in anderen Regionen hingegen zunehmen (vgl. Abb. 15). Im Süden des Landkreises nehmen die Niederschläge im Sommer z. T. um etwa 10 mm ab, während sie im Frühjahr leicht zunehmen (vgl. Abb. 15). Im nördlichen Bereich des Landkreises verhält es sich umgekehrt: Abnahme im Frühling und geringe Zunahme im Sommer.

4.3 Extremereignisse

4.3.1 Starkregen

Für die Entwicklung der Häufigkeit von Starkregenereignissen in der jüngeren Vergangenheit wurden die Perioden 1950-1979 und 1980-2009 miteinander verglichen.

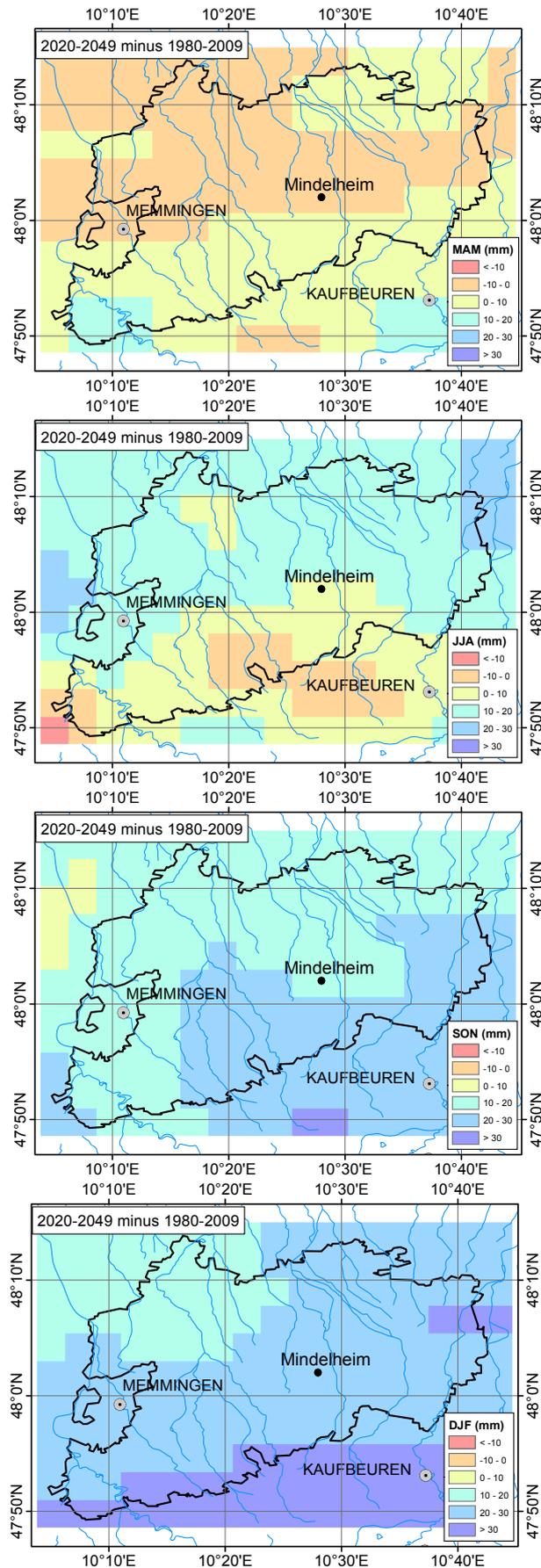


Abbildung 15: Projizierte Veränderung der mittleren Niederschlagssumme in mm für den Landkreis Unterallgäu im Frühling (MAM), Sommer (JJA) Herbst (SON) und Winter (DJF) zwischen 1980-2009 und 2020-2049.

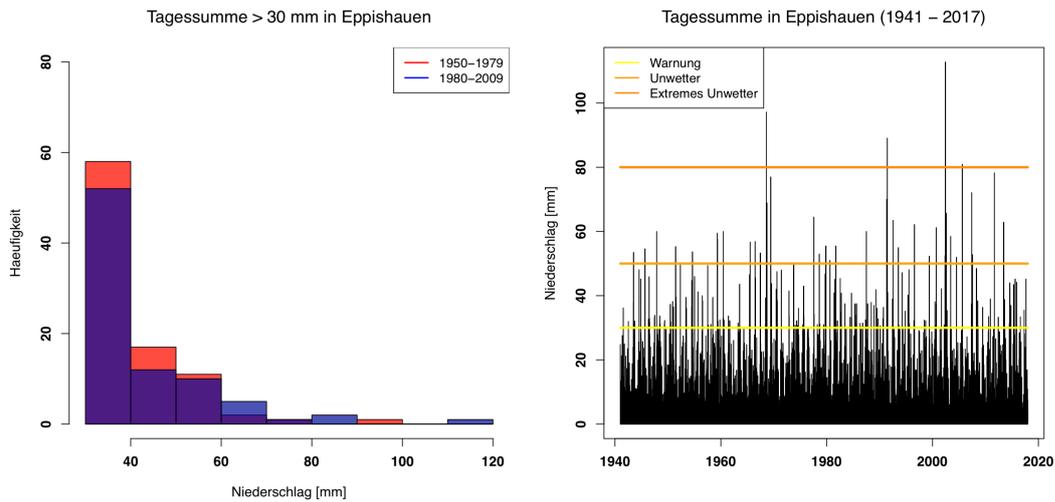


Abbildung 16: Rechts: Häufigkeitsdiagramm mit Vergleich der Niederschläge über 30 mm für die Perioden 1950-1979 (rot) und 1980-2009 (blau). Ist der Balken lila gefärbt, bedeutet dies, dass bis zu dieser Anzahl Niederschläge dieser Höhe in beiden Perioden gegeben hat. Links: Tägliche Niederschlagssummen gemessen an der DWD Station Eppishausen. Warnstufen nach DWD: ab 30 mm Warnung, ab 50 mm Unwetter, ab 80 mm extremes Unwetter.

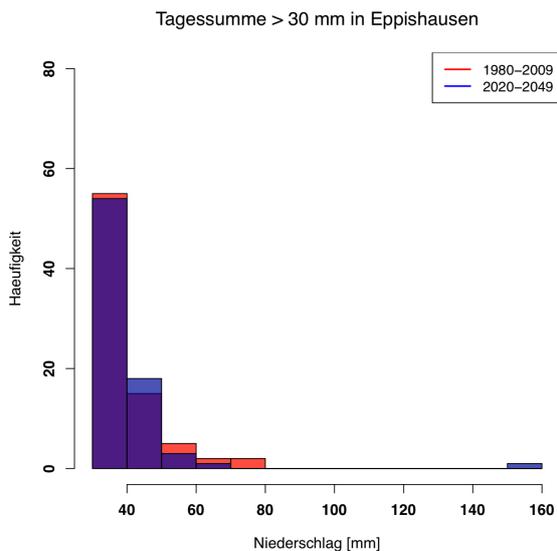


Abbildung 17: Häufigkeitsdiagramm mit Vergleich der Niederschläge über 30 mm für die Perioden 1980-2009 (rot) und 2020-2049 (blau) für das Modellpixel, welches am nächsten zur Station Eppishausen liegt.

Wie in Abbildung 16 zu sehen ist, gibt es keine eindeutige Tendenz der Starkniederschläge an der Station Eppishausen. In manchen Bereichen kommen mehr Ereignisse in der früheren Periode vor, in anderen Bereichen wiederum in der späteren Periode. Dies wird sich nach den Modelldaten auch in der Zukunft an diesem Standort nicht ändern. Jedoch kann es anhand des Szenariolaufes zu einem extremen Ereignis mit 150-160 mm Niederschlag an einem Tag kommen (vgl. Abb. 17).

In Tabelle 5 sind alle Ergebnisse der Häufigkeitsanalyse abgebildet.

Nach den Beobachtungsdaten ist die Entwicklung in der Vergangenheit sehr unterschiedlich ausgefallen. An manchen Stationen haben starke Niederschlagsereignisse zugenommen, an anderen Stationen wiederum abgenommen. Auch die Analyse

Tabelle 5: Häufigkeit von von Starkniederschlägen auf Basis der DWD Beobachtungsdaten zwischen Periode 1 (1950-1979) (P1) und Periode 2 (1980-2009) (P2) und der WRF Modell-daten zwischen Periode 1 (1980-2009) (P1) und Periode 2 (2020-2049) (P2) für Warnstufen gemäß des DWD: Tägliche Niederschlagssumme zwischen 30 und 50 mm = Warnung (W1); Tägliche Niederschlagssumme zwischen 50 und 80 mm = Unwetter (W2); Tägliche Niederschlagssumme höher als 80 mm = Extremes Unwetter (W3).

Station	P1, W1	P2, W1	P1, W2	P2,W2	P1, W3	P2, W3
<i>Beobachtungsdaten DWD</i>						
Babenhausen	58	51	11	10	0	0
Boos	89	80	18	14	1	3
Eppishauen	75	64	14	16	1	3
Grönebach-Thal	110	88	27	16	0	0
Kronburg	70	104	16	14	1	0
Lauben	79	60	13	10	1	0
Legau	99	113	24	16	0	0
Markt Wald	67	67	16	13	1	2
Memmingen	76	78	16	9	1	4
Mindelheim	68	77	11	14	1	3
Ottobeuren	92	86	23	16	1	1
Salgen	49	55	11	13	0	2
Sontheim	48	61	8	10	3	3
Türkheim	73	65	13	13	2	1
Bad Wörishofen	77	79	18	12	2	1
<i>Modelldaten WRF</i>						
Babenhausen	79	75	6	7	1	1
Boos	99	88	5	6	1	1
Eppishausen	70	72	9	4	0	1
Grönenbach-Thal	162	158	21	16	1	1
Kronburg	116	114	13	4	2	1
Lauben	99	78	11	9	0	1
Legau	172	151	19	21	3	1
Markt Wald	78	66	7	4	1	1
Memmingen	95	102	15	5	1	1
Mindelheim	93	78	15	6	0	2
Ottobeuren	136	137	21	14	1	2
Salgen	83	79	12	4	1	2
Sontheim	104	89	11	8	1	1
Türkheim	99	80	12	7	1	0
Bad Wörishofen	102	96	13	8	0	1

der Modelldaten ergibt kein eindeutiges Bild. Am ehesten ist eine Zunahme der Ereignisse mit 30 - 50 mm pro Tag feststellbar.

4.3.2 Trockenperioden

Als Trockenperiode wird ein Zeitraum zwischen Mai und September bezeichnet, in dem an mindestens 10 Tagen in Folge kein bzw. kaum Niederschlag fällt. In dieser Studie liegt der Grenzwert bei 1 mm Niederschlag pro Tag. Dementsprechend wurden die täglichen Niederschlagsdaten der DWD Stationen und der dazugehörigen WRF Pixel ausgewertet und in Bezug auf einen möglichen Trend analysiert. Dabei wurde insbesondere untersucht, ob Trockenperioden länger oder kürzer werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6: Ergebnis der Trendanalyse hinsichtlich der Veränderung der Länge von Trockenperioden in Tagen pro Jahr auf Basis der täglichen Niederschlagssumme von DWD Messstationen und Szenariolauf (E6 Szen) des nächstgelegenen WRF Pixel. Signifikanz des Trends nach Mann-Kendall (**** = äußerst signifikant ($p < 0,001$), *** = stark signifikant ($p < 0,01$), ** = signifikant ($p < 0,05$), * = Tendenz ($p < 0,2$)).

Station	Messzeitraum DWD	Trend DWD	Trend E6Scen
Babenhausen	1941-2017	0,002	0,2313
Boos	1950-2017	0,118*	0,0983
Breitenbrunn	1983-2017	-0,0659	0,2313
Eppishausen	1941-2017	-0,0151	0,2179*
Grönebach-Thal	1932-2004	-0,0028	0,0156
Kronburg	1961-2017	0,0281*	-0,0264
Lauben	1932-2005	0,0094	0,1324
Legau	1952-2004	-0,0176	-0,0263
Markt Wald	1932-2005	-0,0148	0,2289*
Memmingen	1951-2017	-0,0032	-0,0265
Mindelheim	1892-2017	-0,0008	0,2564*
Ottobeurn	1941-2017	-0,0117	0,1788
Salgen	1932-2005	-0,0201*	0,2564
Sontheim	1961-2016	-0,0245*	0,1094
Türkheim	1932-2004	0,0064	0,1939
Bad Wörishofen	1951-2017	0,0164	0,1534

Die Analysen zeigen, dass es bei den meisten Zeitreihen keinen signifikanten Trend gibt und die Änderung insgesamt relativ gering ausfällt, was sich auch im Wertebereich (-0,07 bis 0,26) widerspiegelt. Vergleicht man die durchschnittlichen Trends aller Stationen der jeweiligen Datenquellen miteinander, ist ein Wandel von einem

leicht negativen Trend (DWD Daten) zu einem positiven Trend (Szenariolauf) zu erkennen. Da Beobachtungsdaten des DWD mitunter das gesamte 20. Jahrhundert und der Szenariolauf die Zukunft ab 2020 abgedeckt, lässt sich daraus schließen, dass sich der Trend der Anzahl an Tagen in Folge ohne bzw. mit lediglich geringfügigem Niederschlag bereits in der Vergangenheit von einem negativen zu einem positiven Trend gewandelt hat und auch in Zukunft weiter zunehmen wird.

4.4 Klimatologische Vegetationsperiode

Aufgrund der geringen Anzahl an qualitativ und quantitativ hochwertigen Temperatur-Zeitreihen von Messstationen im Landkreis, wurden auch Zeitreihen verhältnismäßig nah zum Landkreis gelegener Messstationen ausgewertet (vgl. Kapitel 4.1.1).

Die Ergebnisse der Trendanalyse sind in den Tabelle 7 dargestellt. Unabhängig von der Datengrundlage zeigen alle das gleiche Ergebnis: die Vegetationsperiode wird länger, was vor allem daran liegt, dass der Beginn der Vegetationsperiode (ET) immer früher im Jahr stattfindet. Insbesondere die langen Temperaturzeitreihen des DWD an den Stationen Hohenpeißenberg, Kaufbeuren, Kaufering und Memmingen weisen jeweils über einen signifikanten positiven Trend für die Länge der Vegetationsperiode bis 2 Tage pro Jahr und einen signifikanten negativen Trend für den Beginn der Vegetationsperiode bis -2 Tage pro Jahr auf. Die gleiche Tendenz zeigen die beiden Modellläufe auf, jedoch sind die Trendgeraden flacher, was bedeutet, dass die jährliche Änderung in Zukunft schwächer ausfallen wird, als es in den letzten Jahren der Fall war. Das Ende der Vegetationsperiode (LT) ändert sich im Gegensatz zu den anderen beiden Variablen (VP und ET, vgl. Tabelle 7) bei allen Datensätzen nur geringfügig. In der Vergangenheit (DWD bzw. Kontrolllauf) ist der Trend bei einer (DWD) bzw. zwei (Kontrolllauf) Stationen negativ, jedoch ist keine dieser Trendkurven nach dem Mann-Kendall-Test als signifikant einzustufen. Bei allen anderen Stationen verschiebt sich das Ende der Vegetationsperiode in Richtung eines späteren Zeitpunktes im Jahr.

Tabelle 7: Trend (Tage pro 10 Jahre) der Vegetationsperiode (VP), des ersten Tag im Frühling (ET) und des letzten Tages im Herbst (LT) auf Basis der täglichen Temperaturmittelwerte der Beobachtungsdaten des DWD (täglichen Temperaturmittelwerte von DWD Messstationen) und des WRF E6 Scen Szenariolaufs (2020-2049) im Untersuchungsgebiet ($T_{mean} \geq 7^{\circ}C$). N = Anzahl an Jahren über die der Trend berechnet wurde. Signifikanz des Trends nach Mann-Kendall (**** = äußerst signifikant ($p < 0,001$), *** = stark signifikant ($p < 0,01$), ** = signifikant ($p < 0,05$), * = Tendenz ($p < 0,2$)).

Station	N	VP Trend	ET Trend	LT Trend
<i>Beobachtungsdaten DWD</i>				
Hohenpeißenberg	115	3,9****	-3,6****	0,3
Kaufbeuren	45	9,1**	-7*	2,1*
Kaufering	40	19,1****	-16,2****	2,9*
Landsberg	11	58,8	-51,2	7,2
Memmingen	56	10***	-9,2****	0,8
Raisting	11	-22,7	14,2	-8,5
Wielenbach	18	10,4	-6,2	4,1
<i>Szenariolauf E6 Scen (2020-2049)</i>				
Hohenpeißenberg	30	3,3	-0,8	2,5*
Kaufbeuren	30	2,7	-0,1	2,6
Kaufering	30	2,3	-0,5	1,9
Landsberg	30	1,7	-0,2	1,5
Memmingen	30	0	0	0
Raisting	30	3,7	-1,6	2,1
Wielenbach	30	1,6	-1,4	0,2

5 Diskussion der Ergebnisse

Basierend auf Beobachtungs- und Modelldaten von Temperatur und Niederschlag wurde die bisherige und zukünftige Klimaentwicklung im Landkreis Unterallgäu dargestellt.

Der bereits in der Vergangenheit auf Beobachtungsdaten basierende erkennbare Trend einer Temperaturzunahme im gesamten Untersuchungsgebiet setzt sich in den Ergebnissen der hoch aufgelösten Klimamodellierung fort. Die durchschnittlichen Jahrestemperaturen werden im Vergleich zwischen den Perioden 1980-2009 und 2020-2049 um etwa 1°C höher ausfallen. Dies bedeutet, dass Jahre, welche aktuell als besonders warm empfunden werden, die durchschnittlichen Jahre der Zukunft sein werden. Betrachtet man die einzelnen Jahreszeiten, so nimmt die Temperatur im Winter ($+1,4^{\circ}\text{C}$) am stärksten zu, gefolgt von Frühling ($+1,1^{\circ}\text{C}$), Sommer ($+0,8^{\circ}\text{C}$) und Herbst ($+0,6^{\circ}\text{C}$). Dass sich die Temperatur im Frühling stärker ändert, spiegelt sich auch bei der Entwicklung der Vegetationsperiode wider: durch die insgesamt höheren Temperaturen wird die Vegetationsperiode länger. Vergleichsmäßig verschiebt sich der Beginn im Frühling jedoch stärker (nach vorne im Jahr) als sich das Ende im Herbst (nach hinten im Jahr) verschiebt.

Aus der räumlichen Perspektive ist aufgrund des Höhenprofils ein Nord-Süd-Gradient zu erkennen, der je nach Jahreszeit jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Im Frühling nimmt die Temperatur im Süden des Landkreises stärker zu, während es sich im Winter genau umgekehrt verhält.

Bei der Niederschlagsentwicklung gibt es sowohl in der Vergangenheit, als auch in der Zukunft regional größere Unterschiede. Zusätzlich zu der räumlichen Differenzierung, hängt der Trend auch sehr von der gewählten Zeitperiode ab. Während die meisten Stationsdaten über ihren gesamten Messzeitraum einen positiven Trend (Niederschlagszunahme) aufweisen, gibt es für den Zeitraum 1968 - 2005 beinahe gleich viele Stationen mit einem positiven oder negativen Trend. Jedoch verfügen diese Trendgeraden zum Großteil über kein ausreichendes Signifikanzniveau. Im Durchschnitt besagen die Beobachtungsdaten eine Niederschlagszunahme in der rezenten Vergangenheit. Diese Entwicklung wird sich nach den Modelldaten auch in der Zukunft fortsetzen. Im Vergleich zwischen den Perioden 1980-2009 und 2020-2049 werden die jährlichen Niederschlagssummen um durchschnittlich etwa 50-70 mm zunehmen. Je nach Jahreszeit unterscheidet sich die Entwicklung der Niederschläge jedoch deutlich. Während im Herbst und Winter die Niederschläge voraussichtlich überall im Landkreis um etwa 20 bis 30 mm zunehmen, ist der Trend im Frühling und im Sommer ortsabhängig. Im Sommer nehmen die Niederschläge

im Norden um etwa 20 mm zu, während sie im Süden z.T. um 10 mm abnehmen. Im Frühling ändern sich die Niederschläge am geringsten. Es wird zu einer leichten Zunahme im Süden (+10 mm) und einer leichten Abnahme im Norden(-10 mm) der Niederschläge kommen. Diese regionalen Unterschiede auf kleinstem Raum zeigen, wie wichtig eine hohe räumliche Auflösung bei der Klimamodellierung ist und wären mit einem globalen Klimamodell nicht feststellbar.

Bei der Entwicklung der Häufigkeit von Ereignissen mit starken Niederschlägen, welche eine Wetterwarnung des DWD erfordern, hat die Analyse kein eindeutiges Bild ergeben.

Bezüglich der vergangenen Entwicklung fällt der Trend der Trockenperioden wie bei den Starkniederschlagsereignissen je nach Station sehr unterschiedlich aus. Im Durchschnitt besagen jedoch sowohl die Beobachtungsdaten, als auch die Modelldaten des Kontrolllaufes einen positiven Trend bzgl. der Länge von Zeiträumen ohne bzw. mit sehr geringen Niederschlägen. Dieser Trend wird sich in Zukunft noch weiter verstärken.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Studie wurde die Entwicklung des Klima auf Basis von Temperatur- und Niederschlagsdaten in der rezenten Vergangenheit und nahen Zukunft für den Landkreis Unterallgäu untersucht.

Als Grundlage dienten Beobachtungsdaten des DWD und Modelldaten des regionalen Klimamodells WRF. Beide Datenquellen zeichnen sich durch eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung aus. Mithilfe des Vergleichs von Reanalysedaten und Beobachtungsdaten wurde die Aussagekraft der Modellläufe validiert.

Es wurde gezeigt, dass sowohl Temperatur als auch Niederschlag unabhängig vom gewählten Zeitraum im Jahresdurchschnitt zunehmen. Der in den letzten Jahren feststellbare positive Trend der Temperaturwerte wird auch in der nahen Zukunft anhalten, wobei die Temperaturen insbesondere im Winter und Frühling stark ansteigen werden. Bei der Entwicklung der Niederschläge zeigen sich größere regionale Unterschiede. Im Durchschnitt nimmt jedoch auch der Niederschlag überall zu. Betrachtet man die einzelnen Jahreszeiten, so werden insbesondere im Herbst und Winter die Niederschläge zunehmen, während es im Frühling und Sommer in Teilen des Landkreises zu einer Abnahme und in anderen Teilen zu einer Zunahme der Niederschläge kommen wird.

Des Weiteren wurden die Extremwetterereignisse Starkniederschläge und Trockenperioden untersucht. Für eine eindeutigere Aussage über die weitere Entwicklung von Starkniederschlagsereignissen sind weitere Analysen notwendig. Insbesondere eine Analyse von stündlichen Daten verspricht hierbei weiteren Aufschluss darüber, ob solche Ereignisse häufiger und intensiver vorkommen. Dies ist insbesondere für die Bauleitplanung von Bedeutung und sollte daher untersucht werden.

Die Analyse der Trockenperioden zeigt, dass die lange Trockenperiode im vergangenen Jahr (2018) voraussichtlich keine Ausnahmeerscheinung war, da Trockenperioden auch in Zukunft leicht länger werden. Dies muss insbesondere in der Land-, Forst- und Wasserwirtschaft des Landkreises beachtet werden, da die Wasserreserven im Sommer immer öfter knapp werden können.

Durch den immer früheren Beginn und das spätere Ende der klimatischen Vegetationsperiode, wird der Zeitraum, in dem Pflanzen wachsen können, länger.

Die Studie zeigt, dass sich das Klima im Unterallgäu ändert und dass Maßnahmen getroffen werden sollten um sich diesem Wandel anzupassen. Ein empfehlenswerter Schritt hierfür ist basierend auf den Ergebnissen der Studie einen Maßnahmenkatalog zu erstellen.

Literaturverzeichnis

Dee D., Uppala S., Simmons A., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda, M. and Balsamo G., Bauer P. (2011): The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. In: Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(656), S. 553–597.

Deutscher Wetterdienst: Warnkriterien. URL: https://www.dwd.de/DE/wetter/warnungen_aktuell/kriterien/warnkriterien.html?nn=508722 (Letzter Abruf: 28.01.2019). (2019).

Ghosh A.: Bestimmtheitsmas R2. URL: https://www.inwt-statistics.de/blog-artikel-lesen/Bestimmtheitsmass_R2-Teil1.html (Letzter Abruf: 20.09.2018). (2019).

Giorgetta, M. e. a. (2012): CMIP5 simulations of the Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M) based on the MPI-ESM-LR model: The rcp45 experiment, served by ESGF. In: World Data Cent Clim., 10(1594).

Huxol S.: Trendanalyse von Zeitreihen der Komponenten des Wasserkreislaufes im Einzugsgebiet der Dreisam zur prozessorientierten Beurteilung hydrologischer Klimafolgen. URL: http://www.hydrology.uni-freiburg.de/abschluss/Huxol_S_2007_DA.pdf (Letzter Abruf: 28.01.2019). (2019).

IPCC (2013): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC Data Distribution Centre: Scenario Process for AR5. URL: http://sedac.ipcc-data.org/ddc/ar5_scenario_process/RCPs.html (Letzter Abruf: 28.01.2019). (2018).

Linderholm H. W. (2006): Growing season changes in the last century. In: Agricultural and Forest Meteorology, 137, S. 1–14.

McLeod A. I.: Package Kendall. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/Kendall/Kendall.pdf> (Letzter Abruf: 20.09.2018). (2018).

Menzel A., Jakobi G., Ahas R., Scheifinger H., Estrella N. (2003): Variations of the climatological growing season (1951-2000) in Germany compared with other countries. In: International Journal of Climatology, 23, S. 793–812.

- Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft: Schäden durch Naturkatastrophen im Jahr 2018. URL: <https://www.munichre.com/de/media-relations/publications/press-releases/2019/2019-01-08-press-release/index.html> (Letzter Abruf: 28.01.2019). (2019).
- NOAA: Global Land and Ocean Temperature Anomalies January - November. URL: <https://www.ncdc.noaa.gov/climate-monitoring/> (Letzter Abruf: 28.01.2018). (2019).
- Umweltbundesamt: Monitoringbericht 2015 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/_376/publikationen/monitoringbericht_2015_zur_deutschen_anpassungsstrategie_an_den_klimawandel.pdf (Letzter Abruf: 28.01.2019). (2015).
- Van Vuuren D., Edmonds J., Kainuma M. (2011): The representative concentration pathways: an overview. In: *Climate change*, 109, S. 5–31.
- Waldmann S.: 2018 was the 4th warmest year on record, Berkeley Group Announces. URL: <https://www.scientificamerican.com/article/2018-was-the-4th-warmest-year-on-record-berkeley-group-announces/> (Letzter Abruf: 28.01.2019). (2019).
- Warscher M., Kunstmann H.: IPCC-AR5 Klimaszenarien (RCPs) zur hydrologischen Klimaimpaktanalyse: Synthese hochaufgelöster Regionalisierung, multivariater stochastischer Biaskorrektur und optimierter hydrologischer Modell- und Prozessanalyse am Beispiel Nationalpark Berchtesgaden (BIAS II), (2017). Zwischenbericht ZB2.
- Warscher M., Wagner S., Marke T., Laux P., Strasser U., Kunstmann H. (2019): A very high-resolution regional climate simulation for central europe: Performance in high mountain areas and projected near future climate. In: *J. Geophys. Res. Atmos.* (in review).