



universität
wien

MASTERARBEIT/MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

Unstetigkeiten in grenznahen Klimaszenarien: Eine Fallstudie in der Region Bodensee

verfasst von / submitted by

Martha Kogler, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfillment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2020 / Vienna, 2020

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 066 614

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Masterstudium Meteorologie
Priv.-Doz. Mag. Dr. Christoph Matulla
(ZAMG, Universität Wien)

Betreut von / Supervisor:

Zusammenfassung

Der Klimawandel stellt eine große Herausforderung für die Menschheit dar und wird mit erheblichen Kosten verbunden sein. Um gezielt die Auswirkungen durch Anpassungsmaßnahmen minimieren zu können, werden Abschätzungen zukünftiger Klimaentwicklungen (sogenannte Projektionen) mit, von verschiedenen Emissionsszenarien angetriebenen, Klimamodellen berechnet. In Europa stehen die EURO-CORDEX-Regionalmodelle zur Verfügung, auf die jedes Land spezifische, nachgelagerte Verfahren anwendet. Durch die verschiedenen Herstellungsketten ergeben sich Projektionen, die sich hinsichtlich räumlicher Auflösung, Modellauswahl und technischer Details unterscheiden. Das führt dazu, dass es in grenznahen Regionen zu Unstetigkeiten zwischen den Klimaprojektionen der verschiedenen Wetterdienste kommt. Im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit steht die Frage, wie signifikant die Klimaprojektionen in grenznahen Gebieten voneinander abweichen. Des Weiteren sollen mögliche Einflussfaktoren für diese Differenzen diskutiert werden. Ziel dieser Arbeit ist den Bedarf transnationaler Kooperationen bei der Entwicklung von Klimaprojektionen aufzuzeigen.

Diese Fragestellung wird anhand einer Fallstudie in der Region Bodensee durchgeführt, bei der deutsche, österreichische und Schweizer Modellergebnisse verglichen werden. Als Grundlage werden Ensembles von Klimaprojektionen der einzelnen Wetterdienste für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 genutzt. Zuerst werden Tageswerte für die Parameter Niederschlag und 2m-Temperatur auf jährlicher und saisonaler Basis aggregiert, um dann einen Vergleich der Klimaänderungssignale der einzelnen Modellläufe für die unterschiedlichen Projektionen relativ zur Referenzperiode durchzuführen. Weiters wird ein Ländervergleich anhand acht ausgewählter Klimaindizes durchgeführt. Um mögliche Einflussfaktoren für die Unstetigkeiten zwischen den Ländern zu diskutieren, wird der Bias betrachtet, eine Höhenkorrektur durchgeführt, Referenzperioden angepasst, sowie eine Schwellwert-Bias-Adjustierung analysiert. Als Beobachtungsdaten zur Berechnung des Bias werden Zeitreihen der ZAMG der Station Bregenz verwendet.

Beim Vergleich der Klimaänderungssignale der Niederschlagssumme und der 2m-Temperatur zeigen sich geringe Differenzen zwischen den einzelnen Ländern. Die Streuung der Läufe eines Modelles ist im Allgemeinen größer als die Unterschiede, die sich aus dem Ländervergleich ergeben. Damit hat die Auswahl der Modelle sowie die Anzahl der ausgewählten Läufe einen großen Einfluss auf die Abschätzung der Klimaentwicklung. Größere Unterschiede im Ländervergleich zeigen sich in den Ergebnissen für die Klimaindizes, da sie weniger robust sind als die Grundgrößen. Klimaindizes sind schwellwertabhängig und zur Berechnung werden Extremwerte verwendet. Daher wirken sich kleine Änderungen in den Methoden stärker aus und Fehler skalieren sich. Unterschiedliche Projektionen können hier beispielsweise große Auswirkungen auf den Tourismus in der Bodenseeregion haben. Die Diskussion möglicher Einflussfaktoren zeigt einen deutlichen Bias für die Daten der Schweiz und Deutschlands. Dieser entsteht vermutlich durch die Verwendung landseigener Beobachtungsdaten in der Kalibrierung der verschiedenen Methoden.

Mit dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass die Klimaprojektionen für angrenzende Länder zum Teil erhebliche Unterschiede aufweisen können. Das liegt vor allem in der Auswahl der Klimamodelle, der Anzahl der verwendeten Läufe und der zugrundeliegenden Methode eines etwaigen Downscalings. Diese Unterschiede betreffen vor allem Klimaindizes und weniger die Basisgrößen Niederschlagssumme und Mitteltemperatur. Als Konsequenz sind bei der Aufbereitung von Klimawandelinformationen zukünftig länderübergreifende Kooperationen und enge Abstimmungen erforderlich, um konsistente, geeignete Anpassungsmaßnahmen durchführen zu können.

Abstract

Climate change is one of the biggest challenges for humankind and will be associated with considerable costs. In order to minimise impacts with adaptation measures, assessments of the future climate (so-called projections) will be discussed by climate models using different emission pathways. In Europe, EURO-CORDEX regional models are available. Each country uses its own methods to gain high-resolution climate models. Thus, there are several chains of processes that differ in spatial resolution, model selection or technical details. This causes discontinuities in climate projections of different weather services in areas that are near country borders. This thesis shows the significance of these projection differences. Additionally, possible drivers for discontinuities should be discussed. The aim is to show the need for action regarding transnational cooperation to develop climate projections.

The question will be addressed by a case study in the Lake Constance region. Climate model results for the scenarios RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5 from Germany, Austria and Switzerland will be compared. At first, daily data for the parameters precipitation sum and 2m-temperature are aggregated on an annual and seasonal basis. Then climate change signals of each model run of the different projections are compared relative to their period of reference. Furthermore, climate models will be compared using eight selected climate indices. In order to discuss possible drivers for discontinuities between the models, an analysis of the bias, height correction, a variation of the period of reference and threshold-bias-adjustment will be carried out. An observational data set from Bregenz by ZAMG will be used for assessing the bias.

The outcome shows few differences between the countries for precipitation sum and 2m-temperature. The model range for each country is a more crucial factor than the difference between the countries, thus model selection has a large influence on the estimation of climate change signals. More discrepancy is shown when considering the results of climate indices, because they are less robust than base variables. Climate indices depend on the threshold and extreme values are used for the assessment. Thus, small method changes have a huge impact and errors are scaled. Therefore, varying predictions between countries could have for example a huge impact for tourism in the Lake Constance region. The discussion of possible drivers shows a bias for Swiss and German models. This is caused by the use of different observation data in the calibration of models.

This work demonstrates that uncertainties regarding climate projections of different countries exist. This is mainly caused by model selection, the number of used realisations and the downscaling method. These differences concern mainly climate indices and not the basis variables precipitation sum and 2m-temperature. As consequence, transnational cooperation is required for processing climate change information. A close collaboration is recommended to conduct consistent, adequate adaptation measures.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	viii
Abbildungsverzeichnis	ix
Abkürzungen und Symbole	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Emissionspfade und Klimamodelle	1
1.3 Ist-Zustand und DACH-Kooperation	2
1.4 Fallstudie	3
1.5 Zielsetzung	4
2 Daten	5
2.1 Modelldaten	5
2.1.1 Einschub: Biaskorrektur	5
2.1.2 DWD-Ensemble	6
2.1.3 EPISODES	7
2.1.4 ÖKS15	7
2.1.5 CH2018	8
2.2 Beobachtungsdaten	8
3 Methoden	11
3.1 Auswahl der Region	11
3.2 Auswahl der Perioden	12
3.3 Berechnung der Klimamittel	13
3.4 Temperaturmittelung	13
3.5 Höhenkorrektur Temperatur	14
3.6 Berechnung der Klimaindizes	14
3.7 Berechnung der Klimasignale und Bias	15
3.8 Natürliche Variabilität	15
4 Ergebnisse	17
4.1 Klimatologie	17
4.2 Vergleich	19
4.2.1 Erklärung zu den Abbildungen	19
4.2.2 Niederschlag	21
4.2.3 Temperatur	24
4.2.4 Klimaindizes	27

4.3	Diskussion möglicher Einflussfaktoren	33
4.3.1	Bias	33
4.3.2	Höhenkorrektur	35
4.3.3	Referenzperiode	37
4.3.4	Schwellwert-Bias-Adjustierung	39
5	Schlussfolgerung	40
	Literaturverzeichnis	43

Tabellenverzeichnis

1	Verwendete Datensätze mit Anzahl der Läufe pro RCP-Szenario und der Summe. (v. o. n. u.) Deutschland: EURO-CORDEX, ReKliEs-De, EPISODES; Österreich: ÖKS15; Schweiz: CH2018. Zu beachten gilt, dass nicht ausnahmslos alle Datensätze für alle verwendeten Parameter verfügbar sind.	10
2	Mittlere Seehöhe der Domänen in m und Koordinaten in °	12
3	Klimatologie von Bregenz (1971-2000): Jahres- und Saisonmittelwerte für Niederschlag, mittlere 2m-Temperatur, Minimumtemperatur und Maximumtemperatur.	19
4	Natürliche Variabilität von Bregenz bezogen auf den Zeitraum 1881-2000 für Niederschlag und mittlere 2m-Temperatur.	19
5	Klimaindizes von Bregenz (1971-2000): mittlere Jahreswerte für Sommertage, Hitzetage, Tropennächte, mittlere max. Temperatur, Vegetationsperiodendauer, Tage ohne Niederschlag, max. Niederschlagssumme, max. 5-tägige Niederschlagssumme.	19

Abbildungsverzeichnis

1	Domäne mit Anzahl der Gitterboxen für deutsche Daten (grün durchgezogen), EPISODES (grün strichliert), österreichische Daten (orange) und Schweizer Daten (blau)	11
2	Klimatologie von Bregenz (1971-2000): Auf der linken Achse ist in Rot die 2m-Temperatur in ° C (Maximumtemperatur: durchgezogene Linie, Minimumtemperatur: strichlierte Linie), auf der rechten Achse ist in Blau die monatliche Niederschlagssumme in mm als Balkendiagramm dargestellt. . .	18
3	Beispiel eines Box-Whisker-Plots zur Erklärung. Quelle: www.towardsdatascience.com/understanding-boxplots-5e2df7bcbd51 , 25.11.2019	20
4	Ländervergleich Niederschlagsänderung (RCP8.5-Ref) in mm: Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	22
5	Modellvergleich Niederschlagsänderung (RCP8.5-Ref) in mm: Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	23

6	Saisonvergleich (links Winter, rechts Sommer) Niederschlagsänderung (RCP8.5-Ref) in mm: Saisonmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	23
7	Ländervergleich Temperaturänderung (RCP8.5-Ref) in ° C: Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	25
8	Modellvergleich Temperaturänderung (RCP8.5-Ref) in ° C: Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	26
9	Saisonvergleich (links Winter, rechts Sommer) Temperaturänderung (RCP8.5-Ref) in ° C: Saisonmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	26
10	Änderung der Anzahl der Sommertage (o.) und Änderung der Anzahl der Hitzetage (u.) (RCP8.5-Ref): Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	29
11	Änderung der Anzahl der Tropennächte (o.) und Änderung der mittleren max. Temperatur (u.) (RCP8.5-Ref): Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	30
12	Änderung der Dauer der Vegetationsperiode (o.) und Änderung der Anzahl der Tage ohne Niederschlag (u.) (RCP8.5-Ref): Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	31
13	Änderung der max. Niederschlagssumme (o.) und Änderung der max. 5-tägigen Niederschlagssumme (u.) (RCP8.5-Ref): Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	32
14	Niederschlagsbias (Ref-Obs) in mm: Jahresmittel 1971-2000 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	33
15	Bias der mittleren Temperatur (Ref-Obs) in ° C: Jahresmittel 1971-2000 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	34

16	Änderung der mittleren Temperatur original (l.) und höhenkorrigiert (r.) (RCP8.5-Ref) in ° C: Mittel über 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun). Hier geht nur eine Schnittmenge an Modellen ein.	36
17	Änderung der Niederschlagssumme original (l.) und mit einheitlicher Referenzperiode (r.) (RCP8.5-Ref) in ° C: Jahresmittel über 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	37
18	Änderung der mittleren Temperatur original (l.) und mit einheitlicher Referenzperiode (r.) (RCP8.5-Ref) in ° C: Jahresmittel über 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).	38
19	Änderung der Anzahl der Hitzetage (RCP8.5-Ref): Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot), verkleinertes Ensemble (violett), Schwellwert-Bias-Adjustierung (dunkelbraun), sowie ein Histogramm (braun).	39

Abkürzungsverzeichnis und Symbole

CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project 5
DJF	Winter: Dezember, Jänner, Februar
DWD	Deutscher Wetterdienst
EURO-CORDEX	Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment - European Domain
° C	Grad Celsius
GCM	Global Climate Model
GPARD1	Gridded Precipitation for Austria at Daily 1 km Resolution
HISTALP	Historical Instrumental Climatological Surface Time Series Of The Greater Alpine Region
hPa	Hekto Pascal
HYRAS	Hydrologische Rasterdatensätze
JJA	Sommer: Juni, Juli, August
LOCI	Local Intensity Scaling
m	Meter
MAM	Frühling: März, April, Mai
mm	Millimeter
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	National Centers for Environmental Prediction
Perfect Prog	perfect prognosis approach
QM	Quantile Mapping
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway

ReKliEs-De	Regionale Klimaprojektionen Ensemble für Deutschland
SDM	Scaled Distribution Mapping
SON	Herbst: September, Oktober, November
SPARTACUS	Spatiotemporal Reanalysis Dataset for Climate in Austria
STRAHLGRID	Global radiation and sunshine duration extracted from disturbance Dataset
WCRP	World Climate Research Programme
WEGC	Wegener Center für Klima und Globalen Wandel der Universität Graz
W/m²	Watt pro Quadratmeter
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
Z_GIS	Interfakultärer Fachbereich für Geoinformatik der Paris Lodron Universität Salzburg

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Klimawandel stellt eine große Herausforderung für die Menschheit dar. Bis jetzt haben Aktivitäten durch den Menschen einen globalen Temperaturanstieg von rund $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ gegenüber dem Wert der vorindustriellen Zeit verursacht. Zwischen 2030-2052 wird die globale Erwärmung wahrscheinlich bis $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ansteigen (IPCC (2018)). In Österreich ist die Erwärmung doppelt so stark ausgeprägt wie im globalen Mittel. Ein weiterer Temperaturanstieg ist zu erwarten. Auch beim Niederschlag zeigt sich im Vergleich zu den letzten 150 Jahren eine Zunahme in Westösterreich um 10-15 %, im Süden eine Abnahme. Für die Zukunft wird mit einer Verschiebung des Niederschlags vom Sommer in den Winter gerechnet (APCC (2014)).

Die Auswirkungen des Klimawandels werden mit erheblichen Kosten verbunden sein. Bereits heute verursachen wetter- und klimabedingte Schäden in Österreich rund 1 Milliarden Euro jährlich. Deshalb müssen neben den unverzichtbaren Maßnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen auch Strategien zur Anpassung entwickelt und umgesetzt werden – die österreichische Klimapolitik verfolgt daher seit einigen Jahren das 2-Säulen-Prinzip. Unter Anpassung werden Maßnahmen verstanden, die „die Empfindlichkeit natürlicher oder menschlicher Systeme gegenüber Auswirkungen der Klimaänderung zu verringern“. Dabei werden drei Kategorien von Anpassungsmaßnahmen unterschieden: rein technische (z.B. Anlagen zum Hochwasserschutz, Hangstabilisierung), rein natürliche (z.B. Bepflanzungen) sowie eine Bewusstseinssteigerung bzw. Wissenszuwachs und Schaffen von ökonomischen Anreizen. Als Beispiel wurde im Herbst 2016 das Förderprogramm „Klimawandel-Anpassungsmodellregionen“ (KLAR!) gegründet. Ziel des Programmes ist es, Regionen und Gemeinden die Möglichkeit zu geben, sich auf den Klimawandel vorzubereiten und mittels Anpassungsmaßnahmen die negativen Folgen des Klimawandels zu minimieren (BMNT (2017)).

1.2 Emissionspfade und Klimamodelle

Um Abschätzungen über das zukünftige Klima machen zu können, werden sogenannte „Repräsentative Emissionspfade“ (RCPs) verwendet. Das sind Szenarien, die den Verlauf von Treibhausgas- und Aerosolkonzentrationen und deren Auswirkungen auf das Klimasystem als Strahlungsantrieb beschreiben. Z.B. wird bei RCP8.5 von einer Zunahme des Strahlungsantriebes um 8.5 W/m^2 bis 2100 im Vergleich zur zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts ausgegangen. Die Szenarien werden bezüglich der Energiezunahme als relativ niedrig (2.6 W/m^2), mittel (4.5 W/m^2), hoch (6.0 W/m^2) und sehr hoch (8.5 W/m^2) eingestuft. Für

RCP2.6 geht man davon aus, dass es das 2 ° C-Ziel erfüllt mit einer sehr starken und schnellen Reduktion der Emissionen. Der Höchstwert des Strahlungsantriebes wird vor dem Jahr 2050 erreicht. Noch vor 2080 dürfen keine Emissionen von Treibhausgasen mehr vorhanden sein (Null-Emission oder auch negative Emissionen). RCP8.5 wird auch als „Business-as-usual-Szenario“ bezeichnet, bei dem die Entwicklung wie bisher verläuft und es zu keinen Emissionsminderungsmaßnahmen kommt (DWD (2017)).

Diese Szenarien werden übertragen in globale Klimamodelle (GCMs) und stellen eine Approximation für zukünftige Änderungen dar. GCMs haben eine räumliche Auflösung von 100-200 km und sind nur für Abschätzungen über größere Regionen wie Kontinente geeignet. Für lokalskalige Untersuchungen müssen Downscalingmethoden angewendet werden (DWD (2017)). Zum einen gibt es das dynamische Downscaling, bei dem übernehmen regionale Klimamodelle (RCMs) am Rand die Ergebnisse der GCMs („nesting“). Durch die höhere räumliche Auflösung wird eine realistischere Topografie erlangt und kleinskaligere Effekte können aufgelöst werden. Da RCMs systematische Abweichungen zwischen dem beobachteten Klima der Gegenwart und der Simulation zeigen, wird vor Anwendung oft eine Biaskorrektur angewandt (Knoche & Keuler (2017)). Zum anderen gibt es das empirisch statistische Downscaling. Dieses Verfahren stützt sich auf Beobachtungen, die in der Vergangenheit einerseits auf der grobskaligen GCM-Skala und andererseits auf der regionalen, lokalen Skala gemacht wurden, und verknüpft diese durch statistisch und physikalisch sinnvolle Zusammenhänge („Transferfunktionen“). Dafür gibt es verschiedene statistische Modelle (Kreienkamp et al. (2017)).

Die Produktion von lokalskaligen, hochaufgelösten Klimaprojektionen - vom Emissionsszenario bis hin zum gewählten GCM und RCM - wird von einer Kaskade von Unsicherheiten begleitet. Weiters treten auch Unsicherheiten bei Anwendung von Biaskorrektur-Verfahren - einerseits durch die Auswahl der Methode und andererseits durch Fehler in den verwendeten Beobachtungsdaten - auf. Diese Kaskade setzt sich bis zur Impact-Modellierung und zur Anwendung von Anpassungsmaßnahmen fort (CH2018 (2018)).

1.3 Ist-Zustand und DACH-Kooperation

Für Europa stehen die EURO-CORDEX-Projektionen zur Verfügung. Das sind in GCM schon genestete Modelle, die ein Set an RCMs für eine Domäne über Europa produzieren. Darauf wendet jedes Land eigene Methoden an, um hochaufgelöste Klimaprojektionen zu erlangen. Durch die dabei verwendeten verschiedenen Herstellungsketten ergeben sich Projektionen, die eine unterschiedliche räumliche Auflösung haben, andere Modelle und Biaskorrekturen wurden gewählt und andere Beobachtungsdaten verwendet.

In der Hydrologie gibt es schon bestehende internationale Zusammenarbeiten. Hier werden bereits in grenzübergreifenden Flusseinzugsgebieten - wie z.B. im Rheingebiet zwischen Schweiz, Deutschland, Frankreich und den Niederlanden (van Pelt & Swart (2011)) oder in den Einzugsgebieten von Douro, Tagus and Guadiana zwischen Portugal und Spanien (Guerreiro et al. (2016)) - gemeinsam Modelle gerechnet und einheitliche Klimawandelanpassungsstrategien überlegt.

Im deutschsprachigen Raum wurde daher in Bezug auf die Entwicklung regionaler Klimawandelszenarien eine Kooperation zwischen Österreich, Deutschland und der Schweiz gebildet. Ziel ist es, sich über bestehende Projektionen auszutauschen und sich bei Modellauswahl, Zeitperioden, Domäne und technische Details abzustimmen. Dafür ist auch die Ausweitung der EPISODES-Projektionen (das sind empirisch-statistische Projektionen, die aktuell nur für Deutschland vorliegen), auf die gesamte DACH-Region geplant. In Zukunft soll ein DACH-Referenzensemble etabliert werden, welches von allen drei Wetterdiensten verwendet und angeboten wird.

Im Rahmen dieser Zusammenarbeit haben erste Untersuchungen von Fischer (2018) ergeben, dass es im grenzübergreifenden Gebiet der Bodenseeregion zu signifikanten Unstetigkeiten zwischen deutschen, österreichischen und Schweizer Klimaprojektionen kommt, die auf die verschiedenen Herstellungsketten zurückzuführen sind.

1.4 Fallstudie

In dieser Arbeit sollen die Unstetigkeiten zwischen länderabhängigen Projektionen in der Region Bodensee aufgezeigt werden, bei der die Städte Lindau (Deutschland), Bregenz (Österreich) und Rorschach (Schweiz) betrachtet werden. Die Fallstudie beschreibt einen "real-case": Ein/e Bürgermeister/in aus der östlichen Bodenseeregion möchte wissen, wie sich das Klima in seinem/ihrem Gebiet z.B. ohne Klimaschutz (RCP8.5) gegen Ende des 21. Jahrhunderts verändern wird. Dafür holt er/sie Klimawandelprojektionen vom nationalen Wetterdienst aus seinem/ihrem Land ein. Lindau informiert sich beim DWD, Bregenz bei der ZAMG und Rorschach bei der MeteoSwiss. Keiner der Stadtvertreter/innen ist mit Downscalingmethoden, der Auswahl von Klimamodellen, Biaskorrektur oder dem Einfluss von räumlicher Auflösung vertraut. Bei einem trilateralen Treffen wundern sich die Bürgermeister/innen, dass ihre Projektionen so unterschiedlich ausgefallen sind. Fast scheint es so, als beschrieben die Ergebnisse unterschiedliche Klimazonen.

1.5 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, den Handlungsbedarf transnationaler Kooperationen der Wetterdienste bei der Generierung regionalskaliger Klimaprojektionen aufzuzeigen. Dabei wird zu Beginn analysiert, ob und wie groß die Unterschiede zwischen den deutschen, österreichischen und Schweizer Klimaprojektionen sind. Weiters sollen mögliche Einflussfaktoren für diese Unstetigkeiten diskutiert werden, wie z.B. die Auswahl der Klimamodelle, räumliche Auflösungen und technische Details. Letztendlich wird mit dieser Arbeit ein Beitrag für zukünftig gemeinsame Entwicklungen transnationaler, regionaler Klimawandelszenarien geschaffen.

Kapitel 2 stellt die in dieser Fallstudie verwendeten Datensätze dar und erklärt die unterschiedlich verwendeten Biaskorrekturverfahren. Kapitel 3 widmet sich der Vorgangsweise, insbesondere der verwendeten Domäne, der gewählten Zeitperioden sowie der angewandten Formeln. Die Ergebnisse sind in Kapitel 4 beschrieben. Hier wird zuerst auf die Klimatologie der Referenzstation Bregenz eingegangen. Weiters wird ein detaillierter Ländervergleich bezogen auf den von den nationalen Wetterdiensten angebotenen Klimaprojektionen für Niederschlag und Temperatur durchgeführt und anschließend ausgewählte Klimaindizes untersucht. Zum Schluss werden noch mögliche Einflussfaktoren für die in dieser Arbeit gezeigten Differenzen analysiert. Kapitel 5 liefert eine Zusammenfassung und unterstreicht die in dieser Masterarbeit aufgezeigte Bedeutung transnationaler Kooperationen bei der Generierung von Klimaprojektionen.

2 Daten

Verglichen werden regionale Klimamodelle, die für Klimaprojektionen in Deutschland, Österreich und der Schweiz verwendet werden. Als Referenz zur Berechnung der Klimatologie und für die Berechnung eines Bias wird ein Beobachtungsdatensatz für die Station Bregenz verwendet.

Die Parameter 2m-Temperatur und die Niederschlagsmenge werden untersucht. Für eine Berechnung der Klimaindizes werden zusätzlich die Parameter 2m-Temperaturmaximum und 2m-Temperaturminimum verwendet, zur Berechnung der Seehöhe der Parameter Orographie.

2.1 Modelldaten

Verwendet werden Datensätze auf täglicher Basis für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5. In Tabelle 1 sind alle verwendeten Modelldatensätze mit der Anzahl der Läufe pro RCP-Szenario und der Summe aufgelistet. Zu beachten gilt, dass nicht ausnahmslos alle Datensätze für alle verwendeten Parameter verfügbar sind. Die Modelle unterliegen entweder dynamischen Downscalingmethoden oder statistisch-dynamischen Methoden. Für Deutschland gibt es das DWD-Ensemble (EURO-CORDEX und ReKliEs-De) und den EPISODES-Datensatz, für Österreich die ÖKS15-Modelldaten und für die Schweiz die CH2018-Modelldaten. Die ÖKS15, CH2018 und zum Teil die ReKliEs-De-Daten wurden biaskorrigiert.

2.1.1 Einschub: Biaskorrektur

Ein Bias bezeichnet die systematische Abweichung eines Wertes in den Modelldaten mit der Beobachtung. Ursache für einen Bias sind nicht exakte Modellformulierungen durch unzureichendes Verständnis oder limitierender Computerrechenleistung. Um diesen Fehler zu minimieren, wird der Bias oft mit Beobachtungsdaten korrigiert.

Ein sehr häufig verwendetes Verfahren ist das Quantile Mapping (QM). Hier wird eine Beziehung zwischen der Verteilungsfunktion der Modelldaten und der der Beobachtungen betrachtet (Hennemuth et al. (2013)). Daraus ergeben sich drei Parameter pro Verteilungsfunktion. Die Verteilungsfunktion der Modelle wird in die der Beobachtung übergeführt. Hier wird eine analytische Transferfunktion abgeleitet, die jeden Wert umrechnet und korrigiert. Die relative Häufigkeitsverteilung der korrigierten Tagesniederschläge im Modell hat sich der Verteilung der Beobachtungsdaten angenähert (Hübener et al. (2017)). Diese Methode funktioniert gut bei Betrachtung von Klimamittelwerten. Die Grundannahme bei der QM-Methode ist, dass die Biasentwicklung stationär ist. Voraussetzung ist ein

ausreichend langer Beobachtungsdatensatz in täglicher Auflösung und hoher räumlicher Auflösung (Hennemuth et al. (2013)).

Ein weiteres Verfahren ist die Local Intensity Scaling (LOCI)-Methode für Niederschlagsmengen. Hier wird ein Schwellwert bestimmt, bei dem im Mittel gleich viele Niederschlags-tage in den Modelldaten wie im Referenzzeitraum in den Beobachtungsdaten mit einem definierten Schwellwert von ≥ 1 mm überschritten werden. Dann werden die mittleren Niederschlagsmengen aus den Beobachtungen oberhalb des Schwellwertes von 1 mm und den Modelldaten oberhalb des simulierten Schwellwertes berechnet. Aus dem Verhältnis der beiden mittleren Niederschlagsmengen wird ein Korrekturfaktor bestimmt. Die Modelldaten werden mit dem Korrekturfaktor angepasst, indem die Differenz jedes Tagesniederschlags im Modell minus dem angepassten Schwellwert mit dem Korrekturfaktor multipliziert und zum definierten Schwellwert von ≥ 1 mm addiert wird. Werte unterhalb des Schwellwertes werden auf Werte kleiner als 1 mm korrigiert, oberhalb auf Werte größer als 1 mm. Die korrigierten Modelldaten haben die gleiche Anzahl an nassen und trockenen Tagen wie in den Beobachtungen (Hübener et al. (2017)).

2.1.2 DWD-Ensemble

Das DWD-Referenz-Ensemble besteht aus den EURO-CORDEX Rohdaten und zusätzlich für Deutschland generierten ReKliEs-De-Modellen.

Die CORDEX-Initiative stammt aus einer Arbeitsgruppe des WCRP, um einheitlich koordinierte regionale Klimaprojektionen für alle Regionen der Welt im Rahmen des fünften Sachstandberichtes des IPCC (AR5) bereitzustellen. Teil der CORDEX-Initiative ist für Europa das EURO-CORDEX-Projekt. EURO-CORDEX liefert regionale Klimaprojektionen (dynamisch) auf Grundlage der Ergebnisse der globalen CMIP5 Klimaprojektionen für die Domäne Europa (Jacob et al. (2014)). Die Projektionen mit den Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 mit täglicher Auflösung für die Jahre 1971-2100 und einer räumlichen Auflösung von 12,5 km (0,11 °) werden verwendet (WCRP (2019)). Davon werden vier verschiedene regionale Klimamodelle (CCLM, REMO, RACMO und RCA) betrachtet, die von vier verschiedenen Globalmodellen (EC-EARTH, IPSL, HadGEM2-ES und MPI-ESM-LR) angetrieben werden.

Die ReKliEs-De-Modelle wurden zusätzlich zu den EURO-CORDEX-Modellen erstellt, um die Anzahl der regionalen Klimaprojektionen für die Szenarien RCP2.6 und RCP8.5 zu erhöhen. Die räumliche Auflösung beträgt 12,5 km (0,11°) und umfasst die Domäne Deutschland inklusive nach Deutschland entwässernden Flusseinzugsgebieten. Die Daten liegen auf täglicher Basis im Zeitraum von 1971 bis 2100 vor. Aus diesem Projekt werden drei verschiedene dynamische regionale Klimamodelle (CCLM, REMO und WRF) und zwei

empirisch-statistische Modelle (STARS3 und WETTREG2013) verwendet, die von sechs verschiedenen globalen Klimamodellen (CanESM2, CNRM-EM5, EC-EARTH, HadGEM2-ES, MIROC5 und MPI-ESM-LR) angetrieben werden. Eine Bias-Korrektur wurde für die tägliche Niederschlagssumme angewendet. Als Beobachtung wurde der hydrologische Rasterdatensatz HYRAS verwendet. Die mittlere Niederschlagsmenge wurde mit dem Local Intensity Scaling (LOCI-Verfahren) korrigiert. Die Häufigkeitsverteilung von Tagesniederschlagsintensitäten wurde mit dem analytischen QM angepasst, bei dem eine Verteilungsfunktion (Generalisierte Pareto-Verteilung) an die Tagesniederschläge der Modelle und HYRAS angepasst wurde (Hübener et al. (2017)).

Für die Datensätze ReKliEs-De und EURO-CORDEX wurde für einige Läufe eine Anpassung der Kennzahlberechnung an den Modell-Bias durchgeführt. Ist ein Modell zum Beispiel im Mittel etwas zu warm, so werden besonders viele warme Kenntage identifiziert. Für jedes Modell wurde derjenige Schwellwert identifiziert, der dieselbe Anzahl von Über- oder Unterschreitungen liefert wie der ursprüngliche Schwellwert in der Beobachtung. Simuliert ein Modell zum Beispiel mehr warme Tage oberhalb des Schwellwertes für Hitzetage ($30\text{ }^{\circ}\text{C}$) als im Referenzzeitraum beobachtet werden, so würde der Schwellwert für Hitzetage so weit erhöht (z.B. auf $30.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) (Hübener et al. (2017)).

2.1.3 EPISODES

EPISODES ist eine vom DWD entwickelte empirisch-statistische Downscaling Methode mit dem Perfect Prog-Ansatz. Der Datensatz wird von fünf verschiedenen Globalmodellen des CMIP5-Projektes (EC-EARTH, CanESM2, CNRM-EM5, NorESM1 und MPI-ESM-LR) angetrieben. Auf regionaler Skala geht der gegitterte HYRAS Beobachtungsdatensatz (5 km räumliche Auflösung) ein. Auf großräumiger Skala wird der NCEP/NCAR Reanaly-sendatensatz mit den Parametern Geopotentielle Höhe, Temperatur und Relative Feuchte auf 1000, 850, 700 und 500 hPa verwendet. Die Modelle sind für Deutschland verfügbar und liegen auf dem EURO-CORDEX-Gitter mit einer räumlichen Auflösung von 12,5 km ($0,11^{\circ}$). EPISODES-Projektionen sind räumlich konsistent und daher für geographische Auswertungen gut geeignet. Die Modelle stehen mit einer täglichen Auflösung (1971-2100) für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 zur Verfügung. Der Bias ist auf jährlicher Basis pro Gitterbox meist niedriger als $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ für die Temperatur und 10 % für die Niederschlagssumme (Kreienkamp et al. (2019)).

2.1.4 ÖKS15

Der ÖKS15-Datensatz wurde gemeinsam von der ZAMG, WEGC und Z_GIS generiert, um einheitliche hochaufgelöste Klimaprojektionen zur Verfügung zu stellen. Die ÖKS15-

Modelldaten sind biaskorrigierte Klimaprojektionen für Österreich, die auf einem Ensemble von Projektionen mit einer räumlichen Auflösung von 12,5 km des EURO-CORDEX-Projektes basieren. Als Beobachtungsdaten gehen die gegitterten Datensätze SPARTACUS (Temperatur), GPARD1 (Niederschlag) und STRAHLGRID (Strahlung, Sonnenscheindauer) mit jeweils einer Auflösung von 1 km ein. Die Biaskorrektur wurde mit dem Verfahren Scaled Distribution Mapping (SDM), einer konservativen Methode, durchgeführt. SDM ist eine Erweiterung des QM-Verfahrens, bei dem zusätzliche Korrekturterme angewendet werden, um Klimaänderungen aus den RCMs zu erhalten (Chimani et al. (2016b)). Diese Methode ist im Gegensatz zu QM nicht stationär, sondern trenderhaltend (Switanek et al. (2017)). Die räumliche Auflösung der ÖKS15-Daten beträgt 1 km. Die Daten stehen täglich für den Zeitraum 1971-2100 für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 zur Verfügung (Chimani et al. (2016a)). Aus diesem Projekt werden sieben verschiedene regionale Klimamodelle (CCLM, Aladin, RCA, HIRHAM, RACMO, REMO und WRF) verwendet, die von sechs verschiedenen globalen Klimamodellen (CNRM-EM5, EC-EARTH, IPSL, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR und NorESM1) angetrieben werden. RCA4 Modelle weisen teilweise einen Bias im Sommer in der Niederschlagssumme auf. Die Temperatur hat keinen Bias (Chimani et al. (2016b)).

2.1.5 CH2018

Die CH2018-Modelldaten sind biaskorrigierte Klimaprojektionen für die Schweiz. Die Projektionen basieren auf einem Set an Modellen der EURO-CORDEX Klimasimulationen mit einer räumlichen Auflösung von 12,5 km und 50 km. Als Beobachtungsdatensatz wurde der MeteoSwiss 2 km gegitterte Datensatz verwendet. Die Biaskorrektur wurde mit Quantile Mapping (nicht trenderhaltend) durchgeführt. Die räumliche Auflösung der CH2018-Daten beträgt nach der Biaskorrektur mit statistischem Downscaling 2 km. Die Daten sind mit einer täglichen Auflösung zwischen 1981-2099 für die Szenarien RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 vorhanden (Kotlarski & Rajczak (2018), CH2018 (2018)). Aus diesem Projekt werden sechs verschiedene regionale Klimamodelle (CCLM, RCA, HIRHAM, RACMO, RegCM und REMO) verwendet, die von neun verschiedenen globalen Klimamodellen (CanESM2, CSIRO, EC-EARTH, IPSL, MIROC5, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR, NorESM1 und GFDL) angetrieben werden.

2.2 Beobachtungsdaten

Zur Berechnung der Klimatologie als Referenz wird der HISTALP-Beobachtungsdatensatz verwendet. Das sind harmonisierte Stations- und Gitterdaten für den alpinen Großraum von circa 4-19 °E bis 43-49 °N für die Parameter Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnen-

scheindauer und Bewölkung. Bei homogenisierten Zeitreihen wurden alle nicht-klimatologischen Störungen entfernt, wie zum Beispiel Datenlücken, Brüche durch Instrumententausch oder Beobachtungsfehler. Die Daten sind auf täglicher Basis verfügbar und die längsten Zeitreihen gehen bis 1760 zurück. Als Beobachtung wird der Stationsdatensatz für Bregenz (Klimastationsnummer 11100, Seehöhe 424 m) von 1881-2018 für die Parameter 2m-Temperatur und Niederschlag verwendet (Auer et al. (2007)).

Region	GCM	RCM	RCP2.6	RCP4.5	RCP8.5	
D	ICHEC-EC-EARTH	CLMcom-CCLM4-8-17	1	1	1	
	ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	1	2	2	
	ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	1	1	1	
	IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4	1	1	1	
	MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17		1	1	
	MOHC-HadGEM2-ES	KNMI-RACMO22E	1	1	1	
	MOHC-HadGEM2-ES	SMHI-RCA4	1	1	1	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17		1	1	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009	2	2	2	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4	1	1	1	
	CCCma-CanESM2	PIK-STARS3			1	
	CCCma-CanESM2	GERICS-REMO2015			1	
	CCCma-CanESM2	CEC-WettReg2013			1	
	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	PIK-STARS3			1	
	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	GERICS-REMO2015			1	
	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CEC-WettReg2013			1	
	ICHEC-EC-EARTH	PIK-STARS3	1		1	
	ICHEC-EC-EARTH	GERICS-REMO2015			1	
	ICHEC-EC-EARTH	CEC-WettReg2013			1	
	MIROC-MIROC5	CLMcom-CCLM4-8-17			1	
	MIROC-MIROC5	PIK-STARS3			1	
	MIROC-MIROC5	GERICS-REMO2015			1	
	MIROC-MIROC5	CEC-WettReg2013			1	
	MOHC-HadGEM2-ES	PIK-STARS3	1		1	
	MOHC-HadGEM2-ES	GERICS-REMO2015			1	
	MOHC-HadGEM2-ES	CEC-WettReg2013			1	
	MOHC-HadGEM2-ES	UHOH-WRF361H			1	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-BTU-CCLM	1			
	MPI-M-MPI-ESM-LR	PIK-STARS3	1		1	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	CEC-WettReg2013	1		1	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	UHOH-WRF361H	1			
	CCCma-CanESM2	DWD-EPIISODES2018	5	5	5	
	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	DWD-EPIISODES2018	1	1	1	
	ICHEC-EC-EARTH	DWD-EPIISODES2018	1	3	3	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	DWD-EPIISODES2018	3	3	3	
	NCC-NorESM1-M	DWD-EPIISODES2018	1	1	1	
	A	CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CLMcom-CCLM4-8-17		1	1
		CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	CNRM-ALADIN53	1	1	1
		CNRM-CERFACS-CNRM-CM5	SMHI-RCA4		1	1
		ICHEC-EC-EARTH	CLMcom-CCLM4-8-17	1	1	1
		ICHEC-EC-EARTH	DMI-HIRHAM5	1	1	1
		ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	1	1	1
		ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	1	1	1
		IPSL-IPSL-CM5A-MR	IPSL-INNERIS-WRF331F		1	1
		IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4		1	1
		MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17		1	1
MOHC-HadGEM2-ES		SMHI-RCA4	1	1	1	
MPI-M-MPI-ESM-LR		CLMcom-CCLM4-8-17		1	1	
MPI-M-MPI-ESM-LR		MPI-CSC-REMO2009	2	2	2	
MPI-M-MPI-ESM-LR		SMHI-RCA4	1	1	1	
NCC-NorESM1-M		DMI-HIRHAM5		1	1	
CH		CCCma-CanESM2	SMHI-RCA4		1	1
		CSIRO-QCCCE-CSIRO-Mk3-6-0	SMHI-RCA4		1	1
	ICHEC-EC-EARTH	CLMcom-CCLM4-8-17		1	1	
	ICHEC-EC-EARTH	CLMcom-CCLM5-0-6			1	
	ICHEC-EC-EARTH	DMI-HIRHAM5	1	2	2	
	ICHEC-EC-EARTH	KNMI-RACMO22E	1	1	1	
	ICHEC-EC-EARTH	SMHI-RCA4	2	2	2	
	IPSL-IPSL-CM5A-MR	SMHI-RCA4		2	2	
	MIROC-MIROC5	CLMcom-CCLM5-0-6			1	
	MIROC-MIROC5	SMHI-RCA4	1	1	1	
	MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM4-8-17		1	2	
	MOHC-HadGEM2-ES	CLMcom-CCLM5-0-6			1	
	MOHC-HadGEM2-ES	ICTP-RegCM4-3			1	
	MOHC-HadGEM2-ES	KNMI-RACMO22E	1	1	1	
	MOHC-HadGEM2-ES	SMHI-RCA4	1	2	2	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM4-8-17		2	2	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	CLMcom-CCLM5-0-6			1	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	MPI-CSC-REMO2009	4	4	4	
	MPI-M-MPI-ESM-LR	SMHI-RCA4	1	2	2	
	NCC-NorESM1-M	SMHI-RCA4	1	1	1	
NOAA-GFDL-GFDL-ESM2M	SMHI-RCA4		1	1		
	Summe		46	66	91	

Tabelle 1: Verwendete Datensätze mit Anzahl der Läufe pro RCP-Szenario und der Summe. (v. o. n. u.) Deutschland: EURO-CORDEX, ReKliEs-De, EPISODES; Österreich: ÖKS15; Schweiz: CH2018. Zu beachten gilt, dass nicht ausnahmslos alle Datensätze für alle verwendeten Parameter verfügbar sind.

3 Methoden

3.1 Auswahl der Region

Für jedes Land wird ein gleich großer Ausschnitt gewählt, der die Städte Lindau, Bregenz und Rohrschach in der Bodenseeregion am besten abbildet. Als kleinste gemeinsame Auflösung wird pro Land eine rund 12x12 km Fläche betrachtet. Das heißt für die deutschen Daten wird eine Gitterbox (GP) verwendet, für die Schweizer Daten wird über 6x6 Gitterboxen und für die österreichischen Daten über 12x12 Gitterboxen gemittelt (Abbildung 1). Da der EPISODES-Datensatz nur für Deutschland verfügbar ist, wird eine nordöstlichere Domäne verwendet.

In Tabelle 2 sind die mittlere Seehöhe und die Koordinaten der Domänen ersichtlich. Die Domänen unterscheiden sich in der mittleren Seehöhe bis zu 100 m, der EPISODES-Datensatz mit einer anderen Domäne weicht mit einer Seehöhe von 577.5 m noch stärker ab. Bregenz liegt im Vergleich dazu auf 424 m.

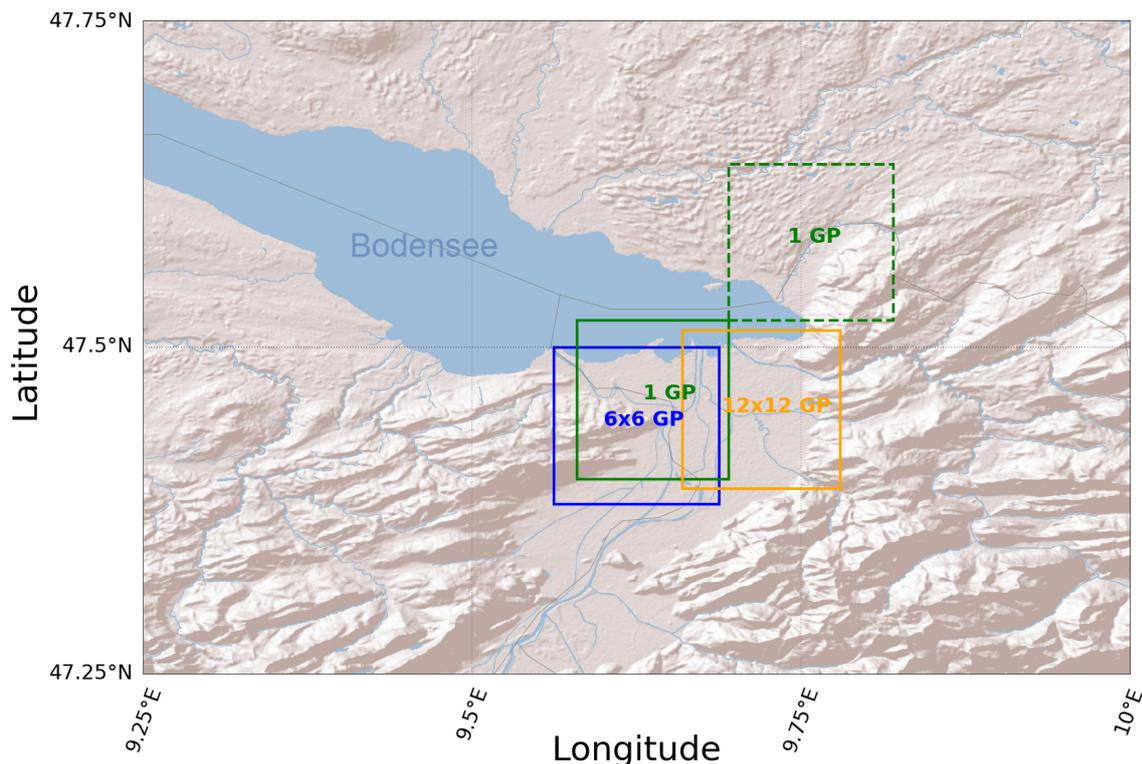


Abbildung 1: Domäne mit Anzahl der Gitterboxen für deutsche Daten (grün durchgezogen), EPISODES (grün strichliert), österreichische Daten (orange) und Schweizer Daten (blau)

Region	Modell	Höhe [m]	lon [°]	lat [°]
D	CCLM	561.3	9.552/9.695	47.399/47.520
	RACMO	530.3		
	REMO2009	527.9		
	REMO2015	523.3		
	RCA	551.7		
	PIK-STARS/WETTREG	473.3		
	EPISODES	577.5	9.695/9.839	47.520/47.641
A		534.2	9.655/9.806	47.400/47.513
CH		449.5	9.563/9.688	47.375/47.500

Tabelle 2: Mittlere Seehöhe der Domänen in m und Koordinaten in °

3.2 Auswahl der Perioden

Die Ergebnisse werden bei der Temperatur als Jahres- und Saisonmittelwerte bzw. beim Niederschlag als mittlere Jahres- und Saisonsummen für drei unterschiedliche Perioden zu jeweils 30 Jahren dargestellt (Formel 1, 2, 3). Da die CH2018-Daten erst mit dem Jahr 1981 beginnen, wird die spätere Referenzperiode in Formel 1 verwendet, für alle anderen Daten die frühere.

$$\text{Referenzperiode: } ref = 1971 - 2000 \text{ (1981 - 2010)} \quad (1)$$

$$\text{Nahe Zukunftprojektion: } prj_1 = 2020 - 2049 \quad (2)$$

$$\text{Ferne Zukunftsprojektion: } prj_2 = 2070 - 2099 \quad (3)$$

Die Saisonen sind in den Gleichungen 4, 5, 6 und 7 definiert. Zu beachten ist, dass in den Berechnungen alle Wintermonate aus dem selben Jahr stammen und nicht aus einer zusammengehörigen Winterperiode. Der Unterschied wird hier vernachlässigt, da er durch die Mittelung über eine 30-jährige Periode als gering angenommen wird.

$$\text{Winter} = \text{Dezember, Jänner, Februar} \quad (4)$$

$$\text{Frühling} = \text{März, April, Mai} \quad (5)$$

$$\text{Sommer} = \text{Juni, Juli, August} \quad (6)$$

$$\text{Herbst} = \text{September, Oktober, November} \quad (7)$$

3.3 Berechnung der Klimamittel

Nach Auswahl der Domänen und Perioden erfolgt eine Mittelung über die Gitterboxen (8). Für die Auswertung des Niederschlags wird zuerst ein Monatsmittel (9) berechnet. Hier werden eine Monatssumme, eine Summe über die Anzahl der Tage pro Monat (t), gebildet und weiters eine Mittelung der Monate über einen Periodenzeitraum (= 12 Werte). Durch Summieren von jeweils drei Monatsmittelwerten werden Saisonsummen (10) gebildet (= vier Werte), eine Jahressumme (11) entsteht durch Summieren der 12 Monatsmittelwerten (= ein Wert).

Für die Auswertung der Temperatur werden ein Saisonmittel (12) und ein Jahresmittel (13) berechnet. Das Saisonmittel setzt sich aus einer Mittelung über drei Monate und einer Mittelung über 30 Jahre zusammen (= vier Werte). Das Jahresmittel ist eine Mittelung über alle Monate und 30 Jahre (= ein Wert).

$$\text{Flächenmittel} = \frac{\sum_{lat} \sum_{lon} x(lat, lon)}{\sum_{lat} \sum_{lon}} \quad (8)$$

$$\text{Monatsmittel} = \frac{\sum_{j=1}^{30} \sum_{i=1}^t \text{Flächenmittel}(i, j)}{\sum_{j=1}^{30}} \quad (9)$$

$$\text{Saisonsumme} = \sum_{m=1}^3 \text{Monatsmittel}(m) \quad (10)$$

$$\text{Jahressumme} = \sum_{m=1}^{12} \text{Monatsmittel}(m) \quad (11)$$

$$\text{Saisonmittel} = \frac{\sum_{j=1}^{30} \sum_{m=1}^3 \text{Flächenmittel}(m, j)}{\sum_{j=1}^{30} \sum_{m=1}^3} \quad (12)$$

$$\text{Jahresmittel} = \frac{\sum_{j=1}^{30} \sum_{m=1}^{12} \text{Flächenmittel}(m, j)}{\sum_{j=1}^{30} \sum_{m=1}^{12}} \quad (13)$$

3.4 Temperaturmittlung

Bei den ÖKS15-Daten steht die mittlere 2m- Temperatur als eigener Datensatz nicht zur Verfügung und muss nachträglich berechnet werden. Dafür gibt es verschiedene Verfahren wie in Hiebl et al. (2009). Eine simple Methode ist die Berechnung aus der Minimumstemperatur und Maximumstemperatur mit der Formel (14).

$$T_{\text{mittel}} = \frac{T_{\text{min}} + T_{\text{max}}}{2} [\text{° C}] \quad (14)$$

3.5 Höhenkorrektur Temperatur

Wie in Tabelle 2 basieren die Modelle auf unterschiedlichen Seehöhen. Daher wird mit dem feuchtisentropen Temperaturgradienten nach Etling (1996) die Temperatur auf die Seehöhe der Referenzstation Bregenz reduziert mit der Erdbeschleunigung g , der spezifischen Wärmekapazität bei konstantem Druck c_p und der Höhendifferenz ∂z .

$$\text{Feuchtisentropen Temperaturgradient: } \partial T = -\frac{g}{c_p} \partial z = -\frac{0.65}{100} \partial z \left[\frac{K}{m} \right] \quad (15)$$

3.6 Berechnung der Klimaindizes

Klimaindizes sind wichtige Kenngrößen, um Klimaänderungen zu beschreiben. Daher werden hier acht verschiedene Klimaindizes untersucht. Alle Klimaindizes werden auf täglicher Basis berechnet und über 30-Jahresperioden gemittelt (3.2). Unter Sommertage fallen alle Tage, die eine Tageshöchsttemperatur von 25 °C erreichen (16), unter Hitzetage die, die eine Tageshöchsttemperatur von 30 °C erreichen (17). Tropennächte geben die Anzahl der Tage, bei denen die Tagesminimumtemperatur nicht unter 20 °C fällt, wieder (18). Bei der mittleren maximalen Temperatur wird der Parameter Maximumtemperatur wie in Abschnitt 3.3 gemittelt (19). Die Vegetationsperiode beginnt und endet mit mindestens sechs aufeinanderfolgenden Tagen mit einer Tagesmitteltemperatur von ≥ 5 °C (20). Tage ohne Niederschlag sind Tage mit einer Niederschlagsmenge (Pr) unter 1 mm (21). Die maximale tägliche Niederschlagsmenge ist die maximale Niederschlagsmenge an einem Niederschlagstag im Jahr (22), die maximale fünftägige Niederschlagsmenge die maximale Niederschlagsmenge von fünf aufeinanderfolgenden Tagen (23) (Chimani et al. (2016b), Hübener et al. (2017)).

$$\text{Sommertage (Tage): } T_{max} \geq 25^{\circ}\text{C} \quad (16)$$

$$\text{Hitzetage (Tage): } T_{max} \geq 30^{\circ}\text{C} \quad (17)$$

$$\text{Tropennächte (Tage): } T_{min} \geq 20^{\circ}\text{C} \quad (18)$$

$$\text{mittlere maximale Temperatur (}^{\circ}\text{C): siehe 3.3} \quad (19)$$

$$\text{Vegetationsperiode (Tage): } T_{mittel} \geq 5^{\circ}\text{C für 6 Tage} \quad (20)$$

$$\text{Tage ohne Niederschlag (Tage): } Pr < 1\text{mm} \quad (21)$$

$$\text{maximale tägliche Niederschlagsmenge (mm): } \max(Pr \geq 1 \text{ mm}) \quad (22)$$

$$\text{maximale fünftägige Niederschlagsmenge (mm): } \max(Pr \geq 1 \text{ mm) für 5 Tage} \quad (23)$$

3.7 Berechnung der Klimasignale und Bias

Zur Auswertung der Veränderung des Klimas (Klimasignal) werden die Abweichungen der Mittelungen betrachtet. Dabei wird der Klimamittelwert der Zukunftsperiode eines Modells von dem Mittelwert der zugehörigen Referenzperiode subtrahiert. Die Abweichung wird als absolute Differenz (24) dargestellt.

$$\text{Klimasignal absolut: } \mathit{diff} = \mathit{pr}_{1,2} - \mathit{ref} \quad (24)$$

Die Biasberechnung erfolgt mit einer Differenz zwischen dem Referenzwert eines Modells und dem Beobachtungswert aus der Klimatologie von Bregenz (siehe 4.1). Der Bias wird absolut (25) dargestellt.

$$\text{Bias absolut: } \mathit{Bias} = \mathit{ref} - \mathit{obs} \quad (25)$$

3.8 Natürliche Variabilität

Auch ohne äußere Einflüsse, wie z.B. anthropogene Einflüsse, variiert das Klima von Jahr zu Jahr. Ein 30-jähriges Klimamittel ist daher nicht konstant, sondern hängt von der ausgewählten Zeitperiode ab. Um die Bandbreite eines Klimamittels angeben zu können, wird die Natürliche Variabilität (26) eines 30-jährigen Mittelwertes, als Maß für die Zuverlässigkeit, berechnet. Dieses Maß dient zur Überprüfung, ob ein Änderungssignal im Vergleich zur Vergangenheit signifikant ist oder ob es noch in der natürlichen Bandbreite

liegt. In Formel 26 ist die Berechnung der Natürlichen Variabilität nach van den Hurk et al. (2014) dargestellt, die die Varianz einer 30-jährigen Periode mit einer um ein Jahr verschobenen Periode beinhaltet. Die Multiplikation mit dem Term 2 stellt das zweiseitige Konfidenzintervall ($\pm NV$) dar und der Term 30 die 30-jährige Periode. Eine Normalverteilung wird angenommen, das 90 % Konfidenzintervall gilt mit dem Term ± 1.645 * Standardabweichung. Ist die Zeitreihe autokorreliert ($r > 0.2$), wird bei der Berechnung ein Korrekturfaktor (mit r = Korrelationskoeffizient, lag-1-Korrelation) aufgeschlagen (27), ansonsten ist der Korrekturfaktor gleich 1. Um eine robustere natürliche Variabilität zu erhalten, wird die Berechnung für den Zeitraum von 1881-2000 durchgeführt und über die resultierenden Ergebnisse gemittelt.

$$\text{Natürliche Variabilität: } NV(t) = 2 * cf * 1.645 * \sqrt{0.5 * \frac{var(x_t - x_{t-1})}{30}} \quad (26)$$

$$\text{Korrekturfaktor: } cf = \frac{\sqrt{1+r}}{1-r} \quad (27)$$

4 Ergebnisse

Zu Beginn wird die Klimatologie aus den Beobachtungsdaten von Bregenz berechnet (Abschnitt 4.1). Einige Jahres- bzw. Saisonmittelwerte sowie Varianzen, die für einen späteren Vergleich benötigt werden, werden in Tabellen dargestellt. Es folgen ein detaillierter Ländervergleich für die Niederschlagssumme sowie die mittlere 2m-Temperatur auf jährlicher und saisonaler Basis (Abschnitt 4.2). Weiters wird ein Ländervergleich anhand Klimaindizes durchgeführt. Im Anschluss werden mögliche Einflussfaktoren für die aufgezeigten Länderunterschiede diskutiert (Abschnitt 4.3). Als Vereinfachung werden hier nur die Ergebnisse des RCP8.5 Szenarios für die ferne Zukunftsperiode gezeigt. Auf die Ergebnisse der RCP2.6 und RCP4.5 Szenarien und für die nahe Zukunftsperiode wird erst in der Schlussfolgerung eingegangen.

4.1 Klimatologie

Für Bregenz wurde eine Klimatologie von 1971-2000 aus den Beobachtungsdaten als Referenz für die Vergangenheit berechnet. Das Klimadiagramm für Bregenz ist in Abbildung 2 dargestellt. Auf der linken Achse ist in Rot die 2m-Temperatur in ° C zu sehen, mit der durchgezogenen Linie die Maximumtemperatur und mit der strichlierten Linie die Minimumtemperatur. Auf der rechten Achse ist in Blau die monatliche Niederschlagssumme in mm aufgetragen als Balkendiagramm. Jeder Balken steht für eine Monatssumme. Die Jahresmitteltemperatur beträgt 9.9 ° C und die Jahresniederschlagssumme 1556 mm. Für die Schweizer Daten ergibt sich aufgrund der späteren Referenzperiode eine Jahresmitteltemperatur von 10.3 ° C und eine Jahresniederschlagssumme von 1521 mm. Die Temperatur erreicht im Monat Juli ihr Maximum und sinkt im Jänner auf ihr Minimum. Die Differenz zwischen Maximumtemperatur und Minimumtemperatur ist im Sommer etwas stärker ausgebildet. Die niederschlagsstärksten Monate sind Juli und Juni. Im Herbst tritt besonders viel Niederschlag im November auf. Die Wintermonate wie Jänner und Februar weisen ein Niederschlagsminimum auf.

In Tabelle 3 sind weitere Mittelwerte jährlich und saisonal für Niederschlag, Mitteltemperatur, Minimumtemperatur und Maximumtemperatur ersichtlich. Die Niederschlagssumme ist im Sommer am höchsten, gefolgt von den Herbstmonaten. Im Winter ist die Niederschlagssumme am geringsten. Die Temperatur zeigt einen klassischen Verlauf mit dem Sonnenstand, im Sommer mit den wärmsten und im Winter mit den kältesten Monaten. Im Frühling und Herbst ist die Temperatur ähnlich.

In Tabelle 4 ist die Natürliche Variabilität in Bezug auf den Zeitraum 1881-2000 für die Niederschlagssumme und für die Mitteltemperatur ersichtlich. Daraus ergibt sich eine jährliche Natürliche Variabilität von rund 170 mm bei der Niederschlagssumme und 0.7 ° C bei der Temperatur.

Tabelle 5 gibt die mittleren Klimaindizes pro Jahr von Bregenz für den Referenzzeitraum wieder. Momentan gibt es 30-40 Sommertage pro Jahr und keine bis nur wenige Hitzetage und Tropennächte. Die Vegetationsperiode dauert im Schnitt 9.5 Monate. Die maximale tägliche Niederschlagssumme im Jahr liegt zwischen 70-80 mm. Die maximale 5-tägige Niederschlagssumme macht etwas weniger als 10 % des Jahresniederschlags aus.

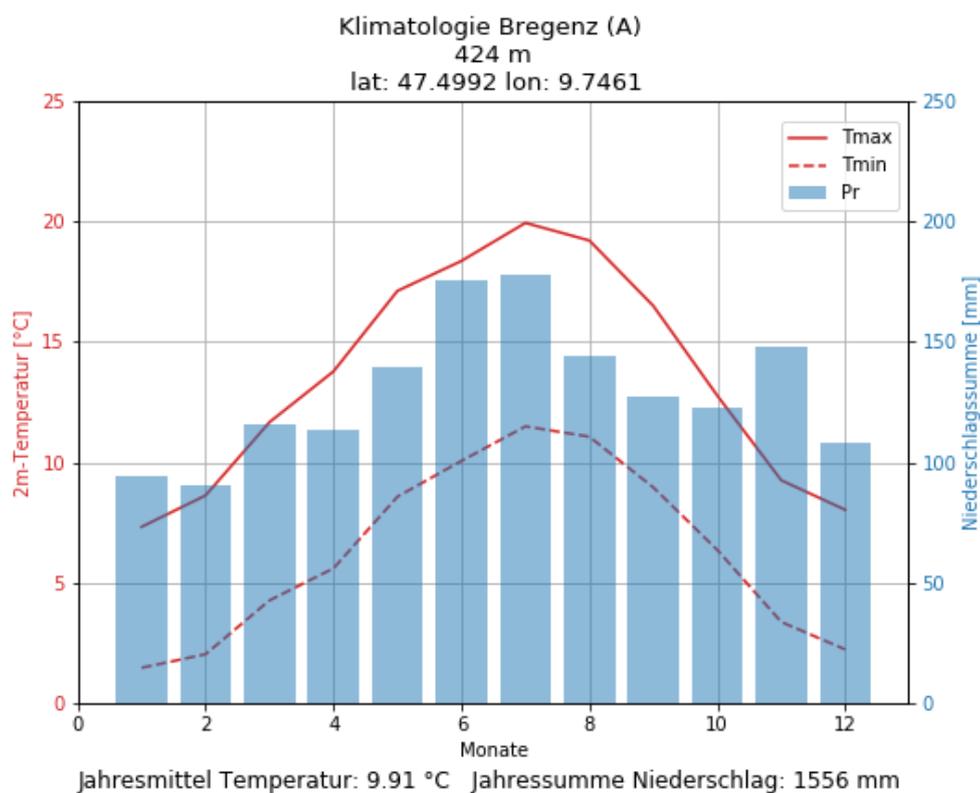


Abbildung 2: Klimatologie von Bregenz (1971-2000): Auf der linken Achse ist in Rot die 2m-Temperatur in ° C (Maximumtemperatur: durchgezogene Linie, Minimumtemperatur: strichlierte Linie), auf der rechten Achse ist in Blau die monatliche Niederschlagssumme in mm als Balkendiagramm dargestellt.

Parameter	Jahresmittel	DJF	MAM	JJA	SON
Pr [mm]	1556.4	292.3	368.6	497.4	398.1
T [° C]	9.9	5.0	10.2	15.0	9.5
Tmin [° C]	6.3	1.9	6.4	10.9	6.2
Tmax [° C]	13.5	8.0	14.2	19.2	12.8

Tabelle 3: Klimatologie von Bregenz (1971-2000): Jahres- und Saisonmittelwerte für Niederschlag, mittlere 2m-Temperatur, Minimumtemperatur und Maximumtemperatur.

Parameter	Natürliche Variabilität
Pr [mm]	171.8
T [° C]	0.7

Tabelle 4: Natürliche Variabilität von Bregenz bezogen auf den Zeitraum 1881-2000 für Niederschlag und mittlere 2m-Temperatur.

Klimaindex	Jahr
Sommertage [Tage]	34.7
Hitzetage [Tage]	3.0
Tropennächte [Tage]	1.1
Mittlere max. Temperatur [° C]	13.5
Vegetationsperiodendauer [Tage]	287.9
Tage ohne Niederschlag [Tage]	222.2
Max. Niederschlagssumme [mm]	74.2
Max. 5-tägige Niederschlagssumme [mm]	116.1

Tabelle 5: Klimaindizes von Bregenz (1971-2000): mittlere Jahreswerte für Sommertage, Hitzetage, Tropennächte, mittlere max. Temperatur, Vegetationsperiodendauer, Tage ohne Niederschlag, max. Niederschlagssumme, max. 5-tägige Niederschlagssumme.

4.2 Vergleich

4.2.1 Erklärung zu den Abbildungen

Zur Auswertung der Ergebnisse werden Box-Whisker-Plots verwendet, um einen Ländervergleich zu veranschaulichen. In Abbildung 3 ist ein Beispiel für einen Box-Whisker-Plot mit einer Erklärung zur Interpretation zu sehen. Der Boxplot setzt sich aus den zwei mittleren Quartilen (25. bis 75. Perzentil) als Box zusammen, der Median ist in der Mitte

in Gelb eingezeichnet (= 50. Perzentil). Als Whisker ist die restliche Verteilung bis zum 1.5 fachen Interquartilsabstand (IQR) abgebildet. Die übrigen Punkte - hier in Grün dargestellt - sind Ausreißer.

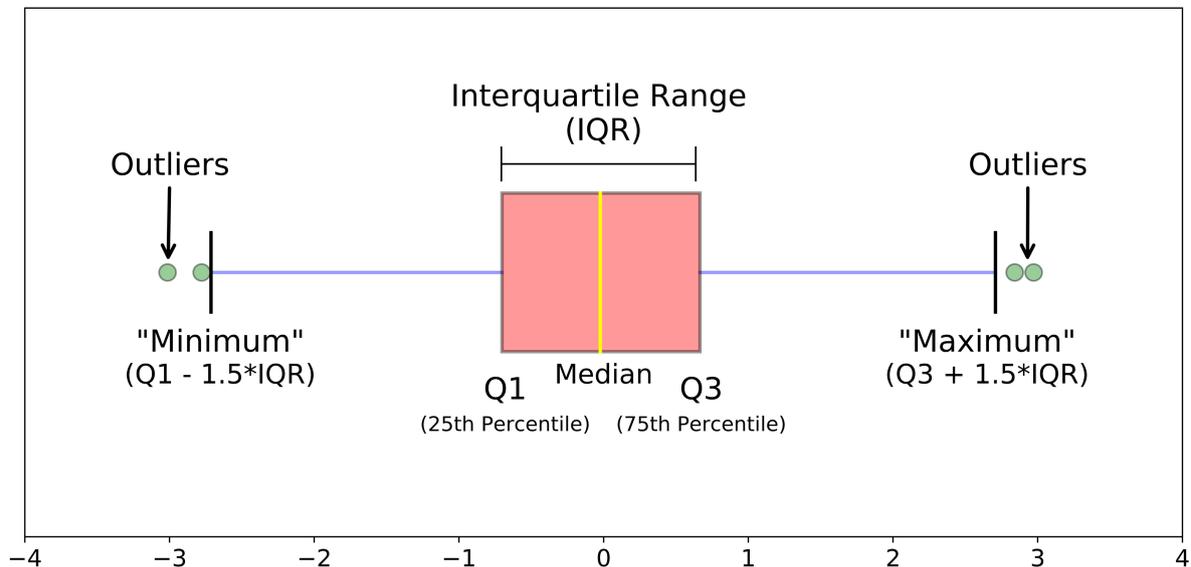


Abbildung 3: Beispiel eines Box-Whisker-Plots zur Erklärung. Quelle: www.towardsdatascience.com/understanding-boxplots-5e2df7bcbd51, 25.11.2019

Ein Ländervergleich ist in den Abbildungen 4, 7 und in den Klimaindizesabbildungen 10, 11, 12 und 13 dargestellt. Dabei sind als Boxplot alle Modelle für jedes Land zusammengefasst. Der blaue Boxplot umfasst die Schweizer Modelle, der orangefarbene die österreichischen, der grüne die deutschen. Als roter Boxplot werden alle Modelle zusammengefasst. Die strichlierte Hilfslinie ist der Median aller Modelle. Auf der linken Achse ist in Braun die Häufigkeitsverteilung aller Modelle dargestellt. Auf der rechten Achse ist in Klammer die Anzahl der Modellläufe pro Land zu sehen.

Die Abbildungen 5 und 8 zeigen eine detailliertere Aufschlüsselung der Ergebnisse der Abbildungen 4 und 7 nach den verwendeten RCMs. Jeder Punkt steht für einen Modelllauf, Modellläufe mit dem gleichen RCM werden in eine Zeile zusammengefasst. Die Anzahl der Modellläufe ist wieder auf der rechten Achse in der Klammer ersichtlich.

Die Abbildungen 6 und 9 zeigen den Ländervergleich saisonal. In der linken Grafik ist ein Mittel über die Wintermonate (Formel 4) und in der rechten Grafik eines über die Sommermonate (Formel 6) zu sehen.

4.2.2 Niederschlag

In Abbildung 4 und 5 ist die Niederschlagsänderung in mm dargestellt, das heißt die Differenz zwischen dem RCP8.5 Szenario und der Referenzperiode (Formel 24), gemittelt über die Domäne und über die ferne Zukunftsperiode (Formel 2).

Zu sehen ist im Ländervergleich eine leichte Zunahme der Niederschlagssumme bei den österreichischen Werten und eine Abnahme bei den deutschen. Die Schweizer Modelle sind um den gemeinsamen Median gestreut. Das Histogramm ist annähernd normalverteilt mit einem kleineren Maximum bei den extrem trockenen Zuständen und einzelnen Ausreißern bei den extrem feuchten.

Die detailliertere Betrachtung zeigt eine sehr große Streubreite bei den deutschen Modellen. Die empirisch-statistischen Methoden, wie die Modelle EPISODES, PIK-STARS3 und WETTREG2013, gehen von einer starken Niederschlagsabnahme aus. Im Gegensatz dazu geht das Modell GERICS-REMO2015 von einer sehr starken Zunahme aus. Auch bei den österreichischen Modellen sticht das IPSL-INNERIS-WRF331-Modell als sehr feucht hervor. Die Schweizer Modelle sind um den gemeinsamen Median gleichmäßig verteilt.

Der Saisonvergleich (Abbildung 6) zeigt im Winter ein sehr einheitliches Bild mit einer leichten Zunahme bei allen Ländern. Die Bandbreite ist kleiner als die Natürliche Variabilität und die Unterschiede sind minimal. Die Ausreißer bei den deutschen Modellen sind wieder Läufe des Modells GERICS-REMO2015. Das Histogramm ist sehr schmal gestreut und normalverteilt, bis auf die sehr feuchten Ausreißer.

Im Sommer zeigen alle Länder im Mittel eine Abnahme, die Bandbreite, vor allem bei den deutschen und österreichischen Modellen, ist aber deutlich größer als im Winter. Das Histogramm ist sehr breit aufgefächert. Bei den österreichischen Modellen sticht das IPSL-INNERIS-WRF331-Modell wieder mit einer sehr starken Niederschlagszunahme hervor.

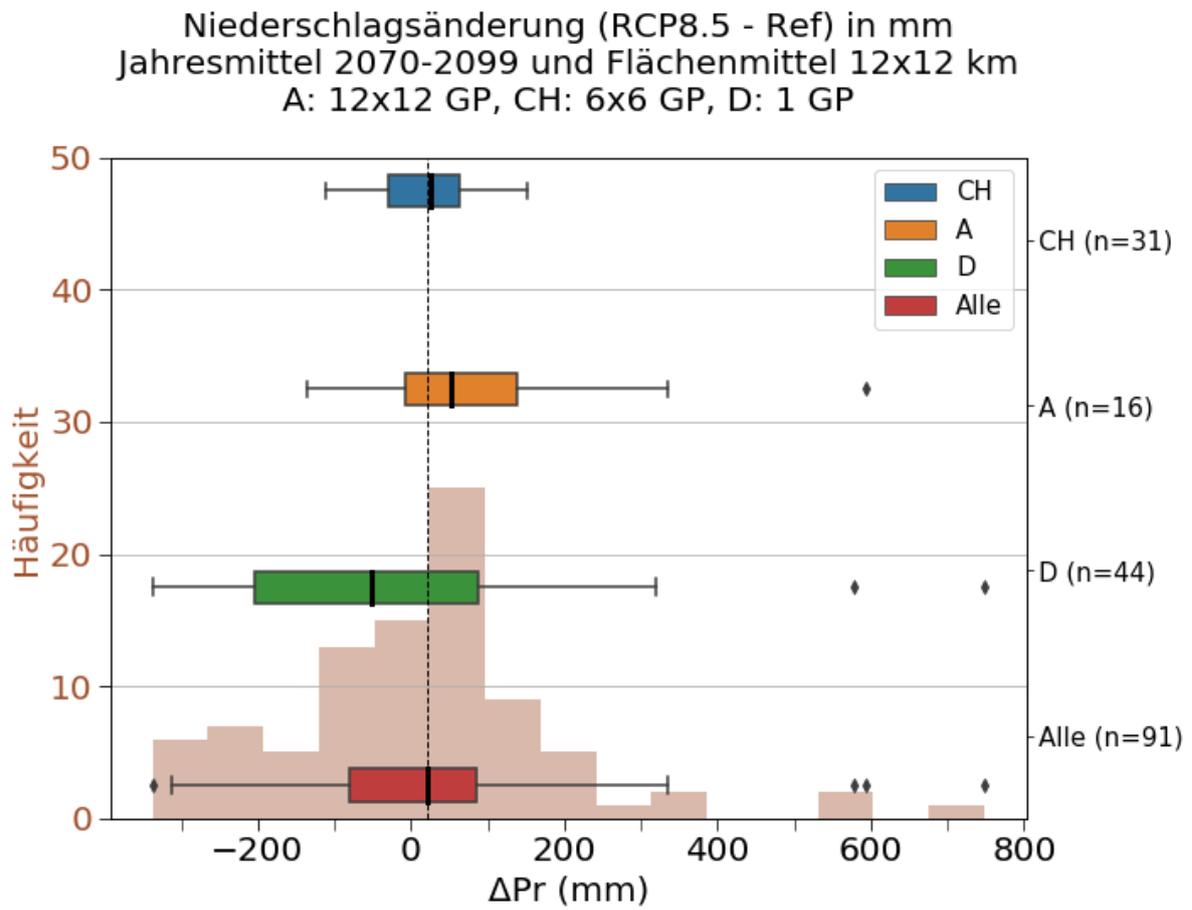


Abbildung 4: Ländervergleich Niederschlagsänderung (RCP8.5-Ref) in mm: Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

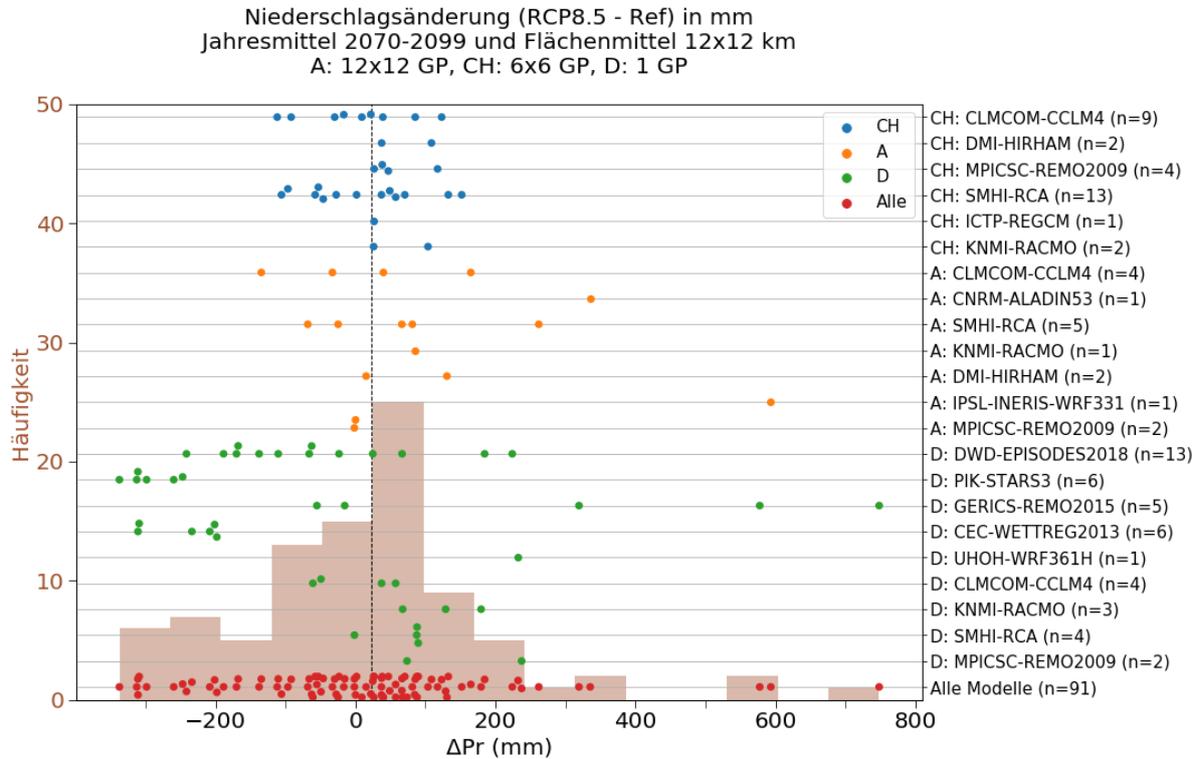


Abbildung 5: Modellvergleich Niederschlagsänderung (RCP8.5-Ref) in mm: Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

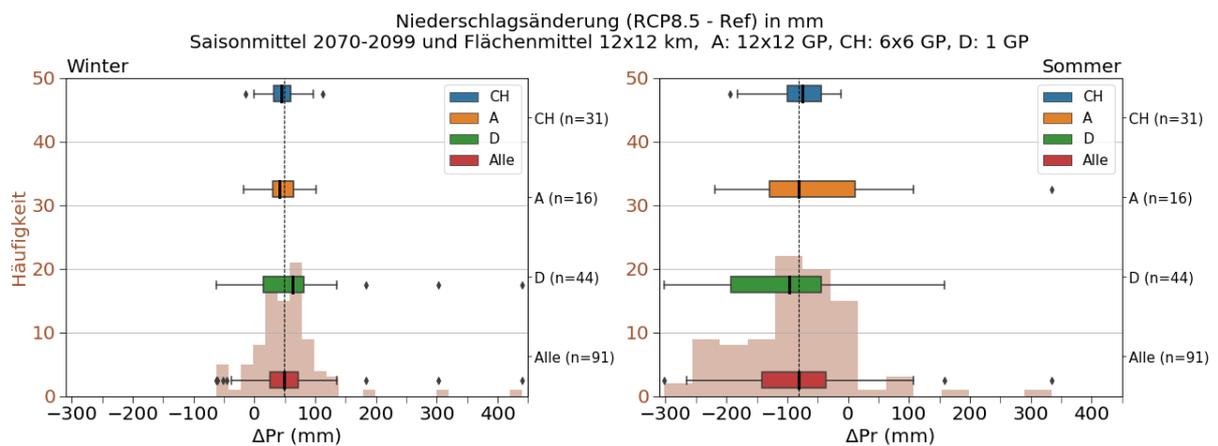


Abbildung 6: Saisonvergleich (links Winter, rechts Sommer) Niederschlagsänderung (RCP8.5-Ref) in mm: Saisonmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

4.2.3 Temperatur

In Abbildung 7 und 8 ist die Änderung der mittleren 2m-Temperatur in ° C dargestellt, als Differenz zwischen dem RCP8.5 Szenario und der Referenzperiode, gemittelt über die Domäne und für den Zeitraum der fernen Zukunftsperiode.

Im Ländervergleich zeigen die Boxplots ein einheitliches Bild mit einer großen Spannbreite bis über 3 ° C und somit weit über der Natürlichen Variabilität. Es gibt in keinem Land Ausreißer. Die österreichischen Modelle zeigen eine etwas niedrigere Temperaturzunahme als die deutschen Modelle, die Schweizer Modelle liegen im Mittel. Die Häufigkeitsverteilung ist flach mit einer großen Streubreite. Die stärkste Häufung tritt bei einer Zunahme von 3 bis 3.5 ° C auf.

Die Detailansicht zeigt bei den deutschen Modellen zwei Gruppen. Eine Gruppe geht von einer niedrigeren Temperaturzunahme als dem gemeinsamen Median aus und eine von einer höheren. Hier ist die Spannbreite der Läufe innerhalb eines Modells größer, als die Länderunterschiede sind.

Der Saisonvergleich (Abbildung 9) zeigt sowohl im Winter als auch im Sommer stärkere Unterschiede als im Jahresmittel. Im Winter sind die deutschen Modelle kälter, die Schweizer am wärmsten. Das Histogramm ist ähnlich breit wie im Jahresmittel.

Im Sommer stechen die österreichischen Modelle mit einer niedrigeren Temperaturzunahme hervor. Obwohl die Bandbreite im Sommer sehr hoch ist, zeigt die Häufigkeitsverteilung einen Peak. Einzelne deutsche Läufe und ein österreichischer Lauf zeigen eine besonders starke Erwärmung bis zu 8 ° C, das sind Läufe, die vom HadGEM2 Modell angetrieben werden.

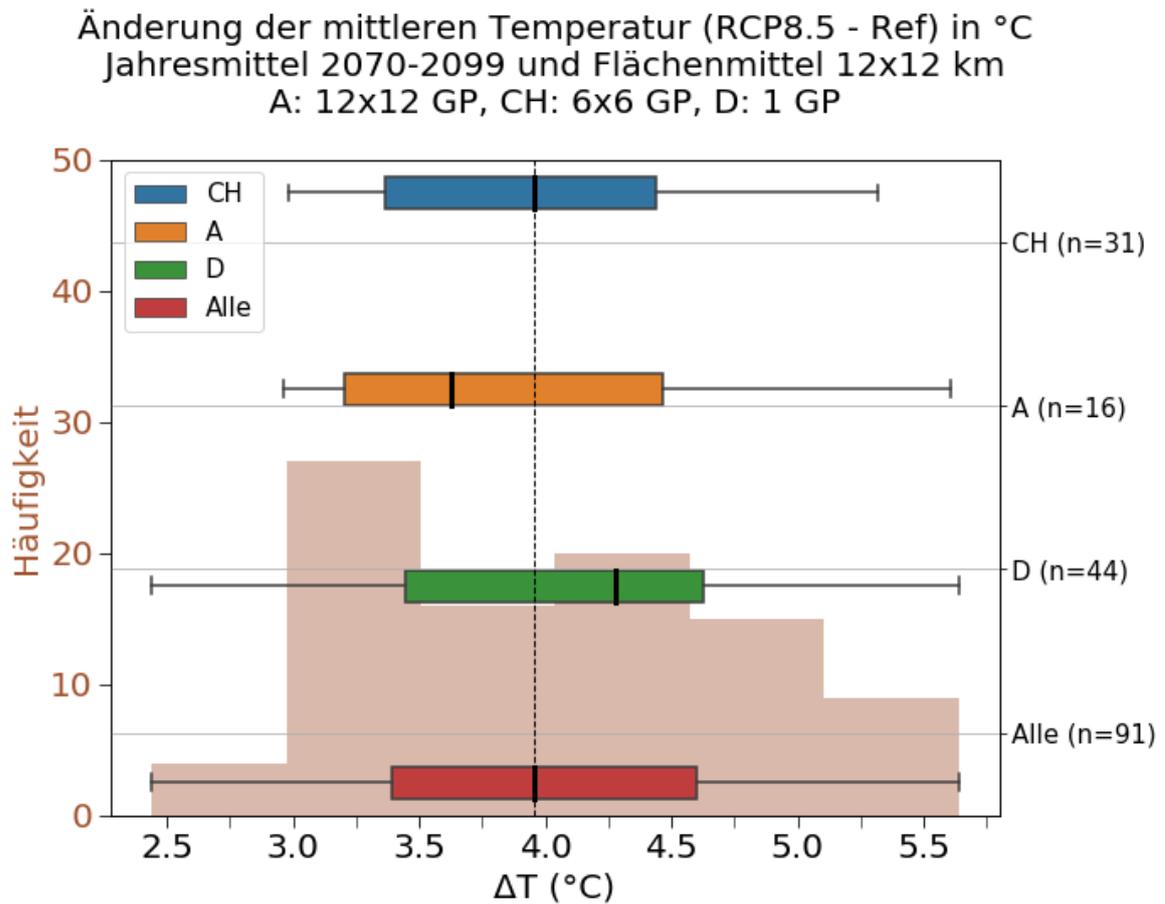


Abbildung 7: Ländervergleich Temperaturänderung (RCP8.5-Ref) in °C: Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

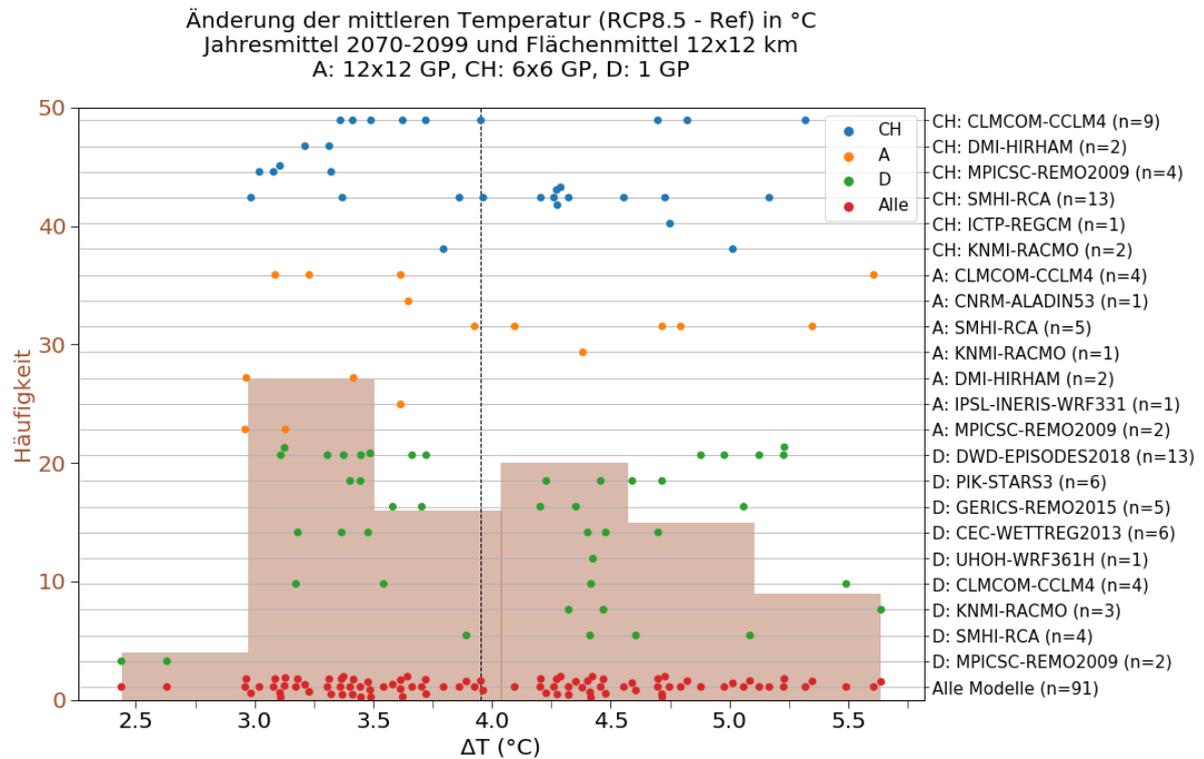


Abbildung 8: Modellvergleich Temperaturänderung (RCP8.5-Ref) in °C: Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

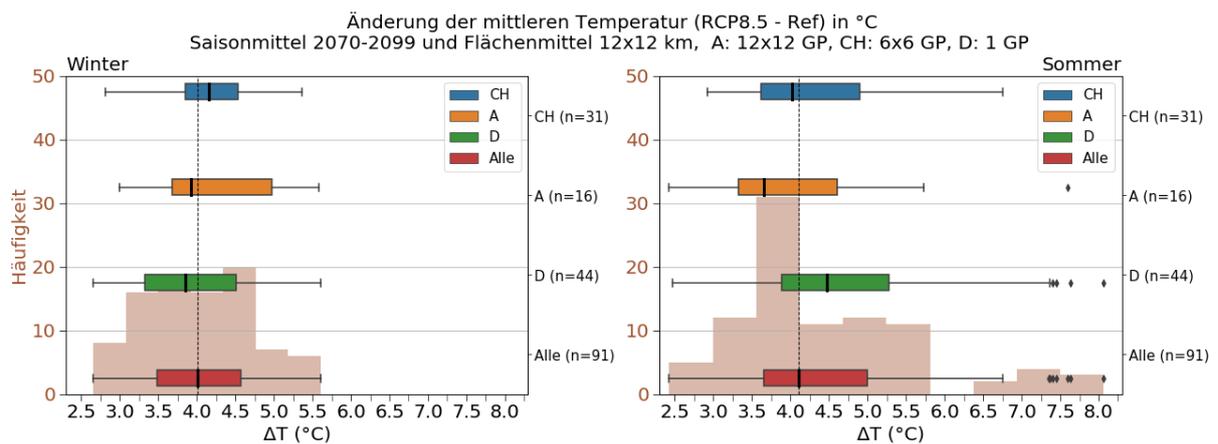


Abbildung 9: Saisonvergleich (links Winter, rechts Sommer) Temperaturänderung (RCP8.5-Ref) in °C: Saisonmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

4.2.4 Klimaindizes

Die Klimaindizes sind als Ländervergleich in Abbildung 10, 11, 12 und 13 zu sehen, wieder als Änderung des Szenarios RCP8.5 minus der Referenzperiode und gemittelt über Domäne und ferne Zukunftsperiode. Der Ländervergleich bei den Klimaindizes zeigt stärkere Unterschiede als in 4.2.2 und 4.2.3.

Bei der Änderung der Anzahl der Sommertage liegt die österreichische Box außerhalb des gemeinsamen Medians mit weniger Zunahme bei den Sommertagen. Im Vergleich zur Vergangenheit (Tabelle 5) wird in den österreichischen Modellen die Anzahl der Sommertage mehr als verdoppelt, die deutschen Modelle gehen von einer Verdreifachung aus. Es gibt auch zwei deutsche Ausreißer mit nur sehr wenig Zunahme. Das Histogramm ist flach gleichverteilt.

Bei der Änderung der Anzahl der Hitzetage sind die österreichischen Modelle wieder etwas passiver bis auf einen Ausreißer, der Median liegt in keiner der anderen Boxen. Die deutschen Modelle weisen eine sehr hohe Bandbreite von keiner Zunahme bis zu 70 Tagen mehr Hitzetage auf. Das Histogramm zeigt einen starken Peak bei rund 20-25 Tage Zunahme und einen kleinen sekundären durch Ausreißer verursacht.

Bei der Änderung der Anzahl der Tropennächte zeigen die Schweizer und österreichischen Modelle ähnliche Ergebnisse. Die deutschen Modelle haben wieder eine sehr hohe Bandbreite von keiner Zunahme bis hin zu extrem vielen Tropennächten. Im Mittel sind hier die deutschen Modelle aber kälter. Das Histogramm gibt eine ungleichmäßige Verteilung mit mehreren Peaks wieder.

Die Änderung der mittleren maximalen Temperatur zeigt im Mittel ähnliche Ergebnisse bei den Schweizer und deutschen Modellen, die österreichischen Modelle sind hier kälter. Das Histogramm ist sehr flach.

Die Ergebnisse bei der Änderung der Vegetationsperiodendauer weisen wenige Unterschiede auf, alle Modelle zeigen eine deutliche Zunahme der Vegetationsperiodendauer. Im Mittel tritt hier eine Abweichung von bis zu 10 Tage auf, bei der die deutschen Modelle von einer längeren Vegetationsperiode ausgehen, die österreichischen bei einer kürzeren Vegetationsperiode liegen. Das Histogramm ist annähernd gleichverteilt mit einem Peak bei rund 65 Tagen Zunahme.

Bei der Änderung der Anzahl der Tage ohne Niederschlag zeigen die Schweizer und österreichischen Modelle wenig Zunahme. Die deutschen Modelle zeigen im Mittel eine stärkere Zunahme, wobei die Bandbreite hier wieder sehr hoch ist. Das Histogramm ist annähernd gleichverteilt und reicht von schwachen Abnahmen bis zu starken Zunahmen. Der Peak liegt hier bei rund 10 Tagen Zunahme, ein zweiter weit weniger ausgeprägter Peak liegt bei 20-25 Tagen.

Die Änderung der maximalen Niederschlagssumme zeigt große Abweichungen. Die Schweizer Modelle streuen um den gemeinsamen Median, die österreichischen Modelle sind sehr feucht, sodass die Box weit vom gemeinsamen Median entfernt ist. Die deutschen Modelle sind sehr breit gestreut, jedoch im Mittel trockener und Deutschland zeigt als einziges Land eine Abnahme der maximalen Niederschlagssumme. Das Histogramm ist flach mit einem Peak bei keiner Änderung.

Die Änderung der maximalen fünftägigen Niederschlagssumme zeigt ein ähnliches Muster wie bei der maximalen Niederschlagssumme. Die Schweizer Modelle streuen um den gemeinsamen Median, die österreichischen Modelle sind sehr feucht und die deutschen Modelle sind im Mittel trockener. Das Histogramm ist steiler als zuvor, aber ebenfalls mit einem Peak bei keiner Änderung.

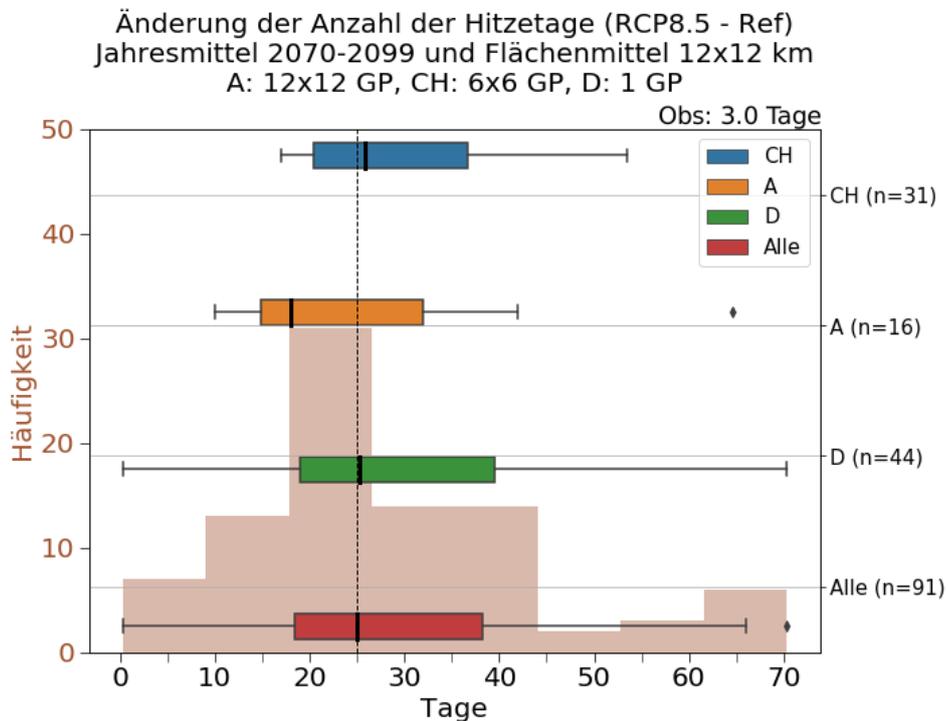
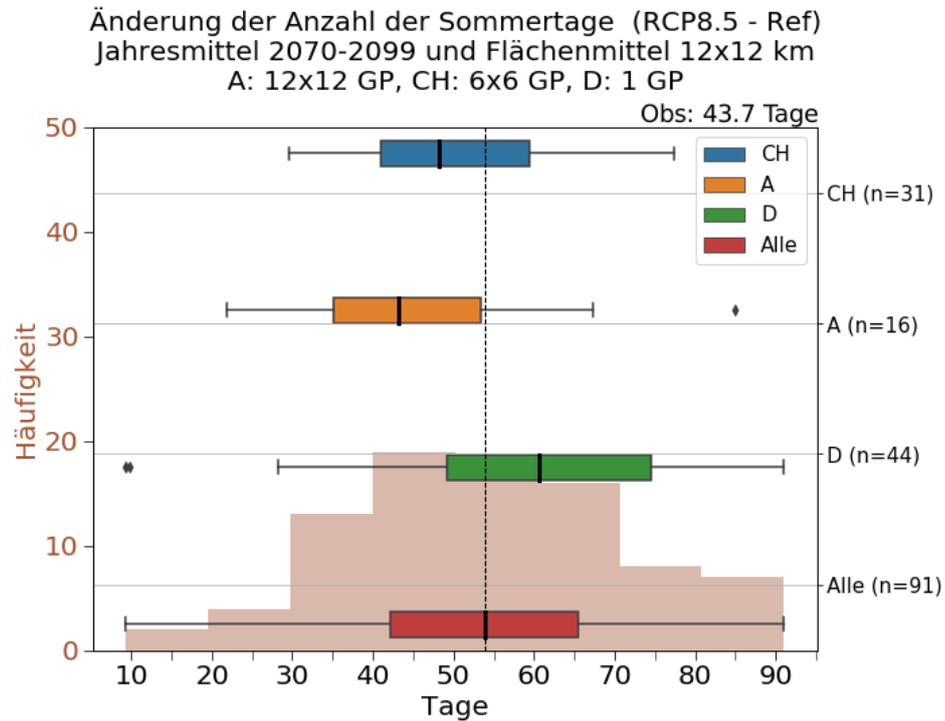


Abbildung 10: Änderung der Anzahl der Sommertage (o.) und Änderung der Anzahl der Hitzetage (u.) (RCP8.5-Ref): Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

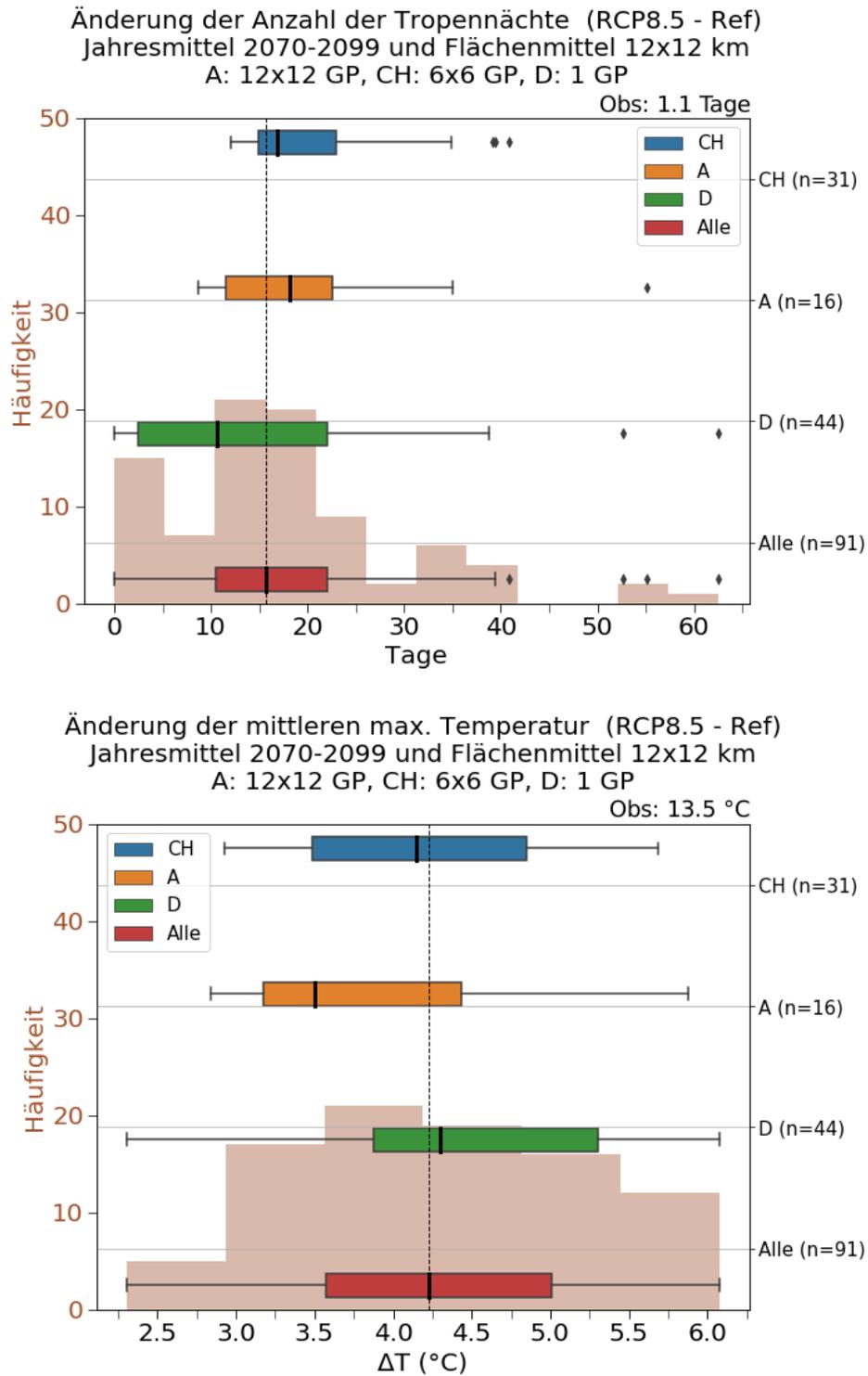
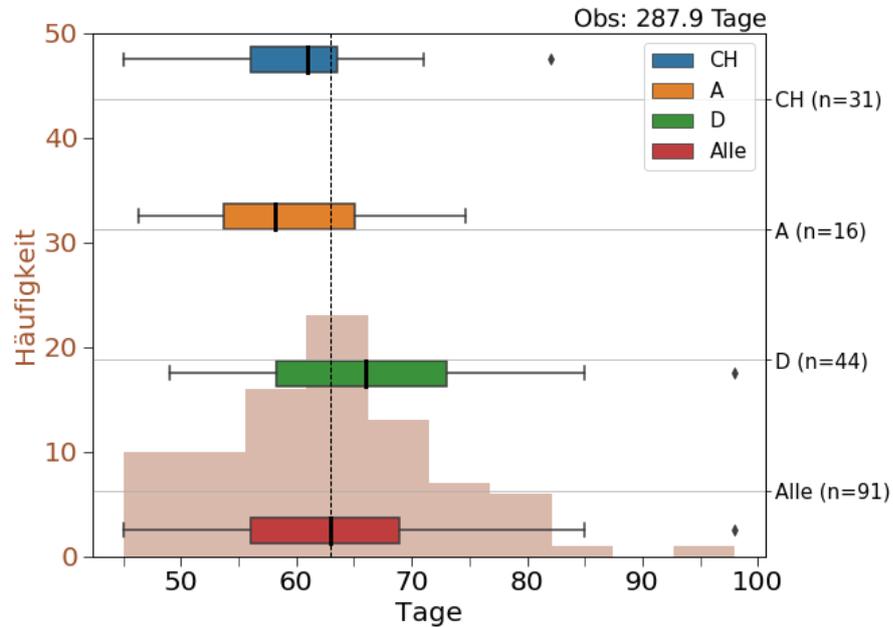


Abbildung 11: Änderung der Anzahl der Tropennächte (o.) und Änderung der mittleren max. Temperatur (u.) (RCP8.5-Ref): Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

Änderung der Dauer der Vegetationsperiode (RCP8.5 - Ref)
 Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km
 A: 12x12 GP, CH: 6x6 GP, D: 1 GP



Änderung der Anzahl der Tage ohne Niederschlag (RCP8.5 - Ref)
 Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km
 A: 12x12 GP, CH: 6x6 GP, D: 1 GP

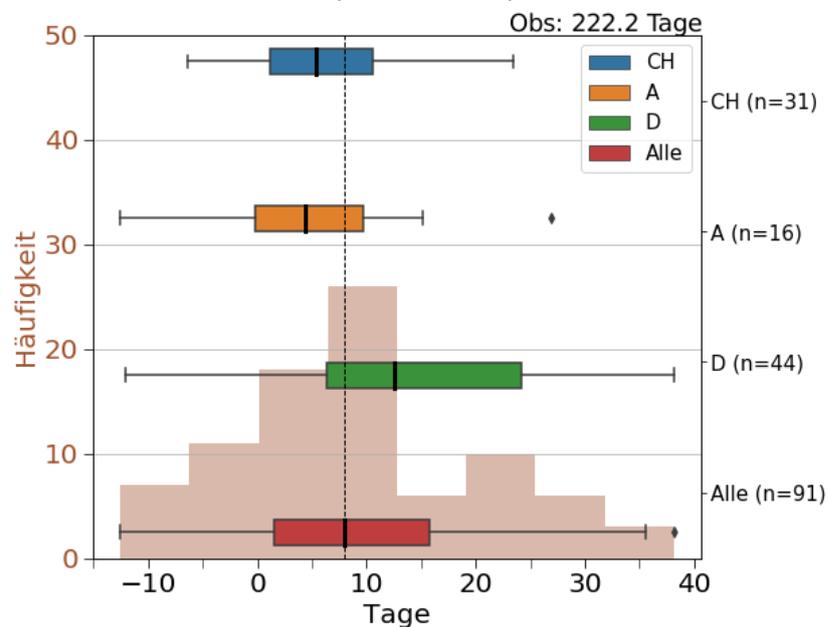


Abbildung 12: Änderung der Dauer der Vegetationsperiode (o.) und Änderung der Anzahl der Tage ohne Niederschlag (u.) (RCP8.5-Ref): Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

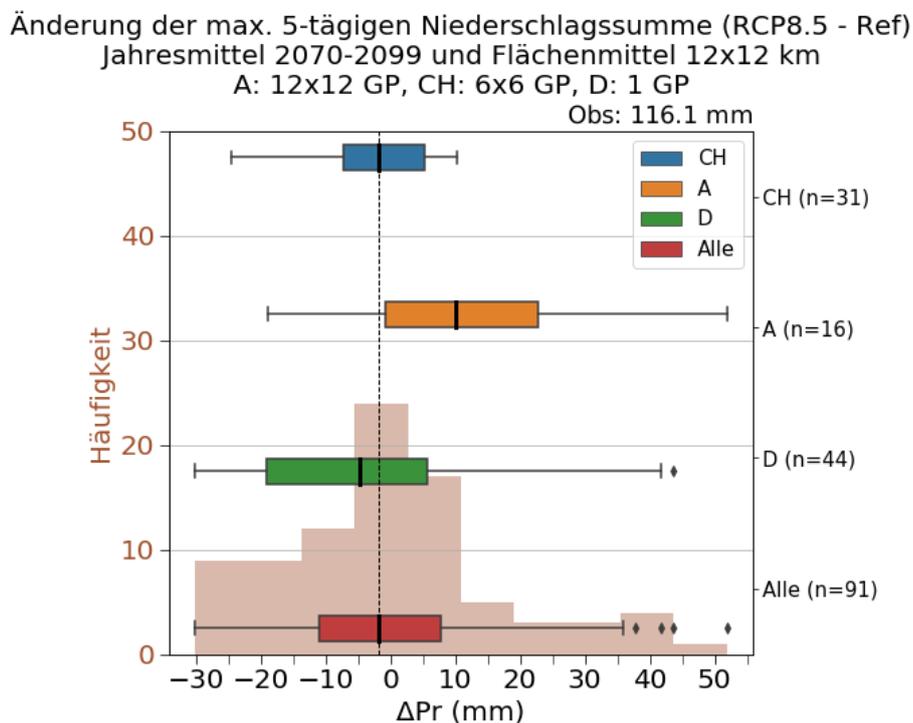
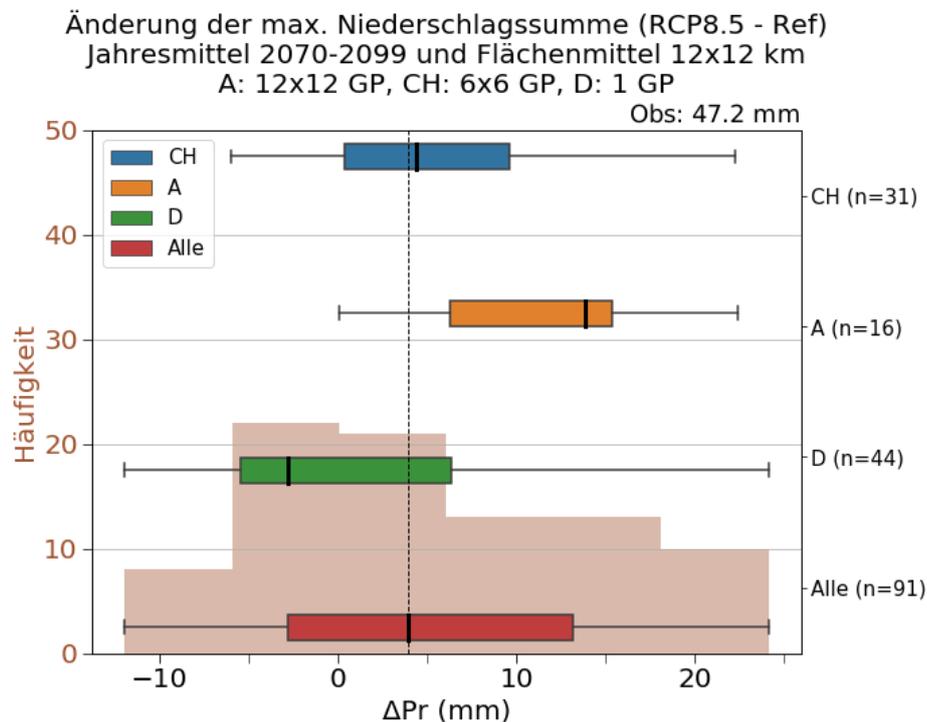


Abbildung 13: Änderung der max. Niederschlagssumme (o.) und Änderung der max. 5-tägigen Niederschlagssumme (u.) (RCP8.5-Ref): Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

4.3 Diskussion möglicher Einflussfaktoren

4.3.1 Bias

In Abbildung 14 ist der Niederschlagsbias in mm dargestellt, das heißt Modelldaten gemittelt über Referenzperiode und Domäne minus der Beobachtung von Bregenz. Hier steht die durchgezogene Hilfslinie für keine Abweichung. Wie in Formel 1 erwähnt, wird für die Schweizer Daten der spätere Referenzzeitraum verwendet. Die Klimatologie unterscheidet sich zwischen den Referenzperioden um ca. 30 mm. Die Schweizer Modelle haben einen signifikanten Bias von rund 300 mm. Die österreichischen Modelle weisen bis auf drei Läufe des RCM SMHI-RCA, die zu trocken sind, kaum einen Bias auf. Bei den deutschen Modellen gibt es eine Bandbreite von zu trocken bis zu extrem feuchten Modellen. Hier zeigt nur das Modell EPISODES keinen Bias. Die anderen empirisch-statistischen Modelle zeigen eine einheitliche Abweichung, die ähnlich wie die der Schweizer Modelle ist. Die deutschen Ausreißer, wie das GERICS-REMO2015, sind Modelle, die auch im Kapitel 4.2.2 als extrem feuchte Modelle hervorgestochen sind. Bei Betrachtung der Häufigkeitsverteilung gibt es zwei Gruppen, eine um ca. 300 mm zu trocken und eine ohne Bias.

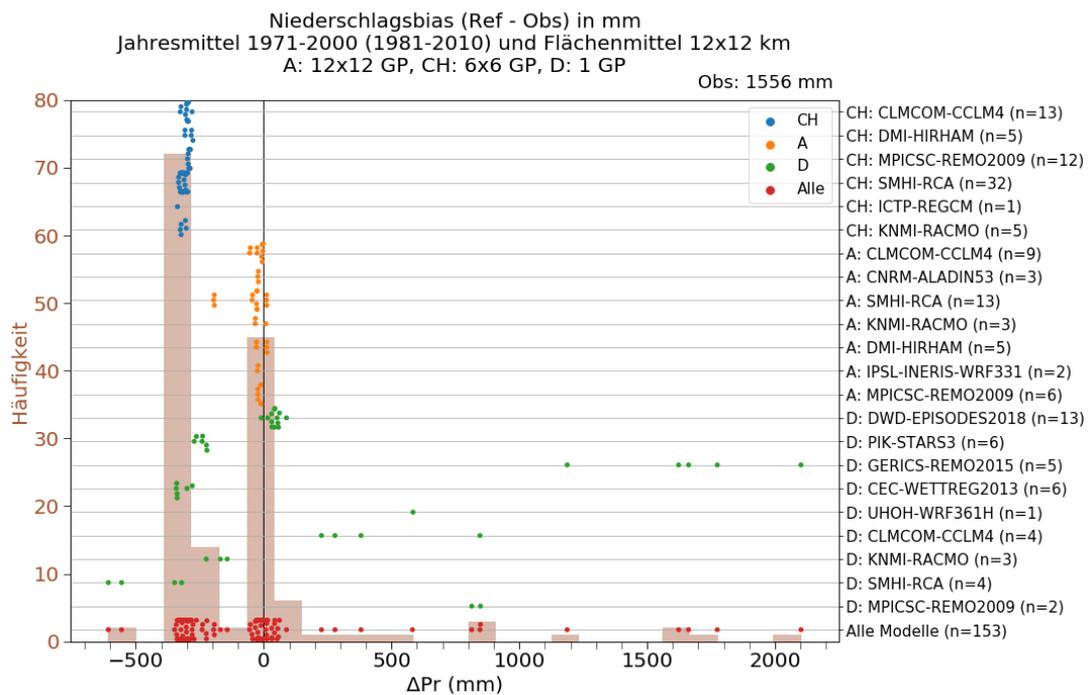


Abbildung 14: Niederschlagsbias (Ref-Obs) in mm: Jahresmittel 1971-2000 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

4 Ergebnisse

Der Bias für die mittlere 2m-Temperatur in ° C ist in Abbildung 15 dargestellt. Die Schweizer Modelle weisen kaum einen Bias auf, die österreichischen Modelle sind um rund 0.8 ° C zu kalt. Die deutschen Modelle haben eine große Bandbreite an Abweichungen, das KNMI-RACMO sticht mit über 5 ° C zu kalt besonders hervor. Die EPISODES-Läufe haben wieder einen einheitlichen Bias von rund -1.5 ° C. Am wenigsten Bias hat das Modell WETTREG2013. An dieser Stelle wird an die unterschiedliche Domänenhöhe in Tabelle 2 erinnert. Wird hier eine Höhenkorrektur durchgeführt, so weisen weder die Schweizer noch die österreichischen Modelle einen Bias auf. Auch die große Bandbreite der deutschen Modelle wird dadurch leicht eingeschränkt. Das Histogramm hat einen starken Peak leicht unter 0 ° C und zwei sekundäre Peaks bei rund -1 und -1.5 ° C.

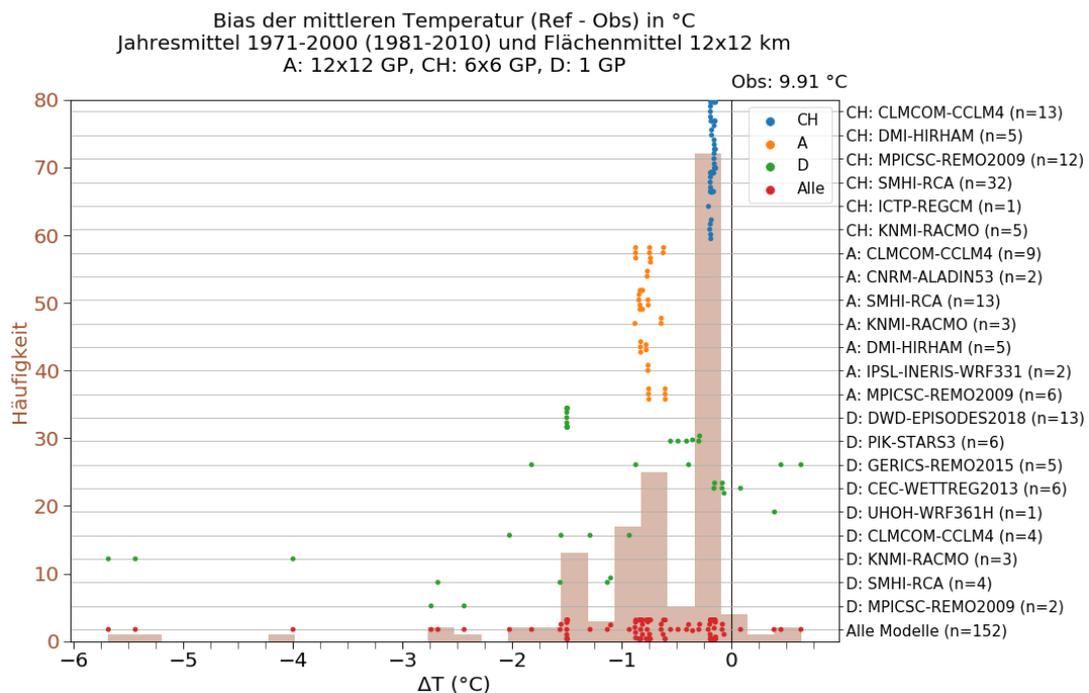


Abbildung 15: Bias der mittleren Temperatur (Ref-Obs) in ° C: Jahresmittel 1971-2000 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

4.3.2 Höhenkorrektur

In Abbildung 16 ist ein Vergleich mit Modellen, die höhenkorrigiert wurden, ersichtlich. Betrachtet wird die mittlere 2m-Temperatur als Differenz zwischen RCP8.5 und der Referenzperiode als Mittel über die ferne Zukunftsperiode. Als Vergleich geht hier nur die Schnittmenge an Modellen ein, die jedes Land verwendet. Das ergibt sechs Modellläufe pro Land aus drei verschiedenen RCMs. In folgender Abbildung ist jeweils links das Originalsample und rechts das höhenkorrigierte Sample zu sehen.

In den oberen Grafiken ist der Jahresmittelwert dargestellt. Im linken Bild zeigen die Länder ein einheitliches Muster mit nahezu keinen Differenzen. Die Häufigkeitsverteilung zeigt jedoch eine ausgeprägte bimodale Verteilung mit zwei Gruppen, eine um die 3 ° C und eine um die 5 ° C. Die höhenkorrigierte Grafik zeigt mehr Unterschiede zwischen den Ländern. Der Länderunterschied kommt erst nach einer Höhenkorrektur zum Vorschein. Die Schweizer Modelle gehen von einer etwas niedrigeren Temperaturzunahme aus. Die bimodale Verteilung bleibt nach der Höhenkorrektur erhalten und verschiebt sich leicht ins positive.

In den mittleren Grafiken ist eine saisonale Auswertung für die Wintermonate zu sehen. Das Original zeigt wenige Unterschiede im Winter, die deutschen Modelle sind etwas kälter. Die Häufigkeitsverteilung ist schmal und flach. Bei der höhenkorrigierten Grafik sind im Winter ebenso keine großen Differenzen zu sehen, hier sind die Schweizer Modelle am kältesten. Die Häufigkeitsverteilung ist etwas breiter als im Original und flach gleichverteilt.

In den unteren Grafiken ist die saisonale Auswertung für die Sommermonate dargestellt. Im Sommer sind die österreichischen und deutschen Modelle wärmer als im Mittel. Das Histogramm hat einen Peak bei um die 3 ° C und ist sehr breit gefächert. Im höhenkorrigierten Bild ergeben sich größere Unterschiede mit über 1 ° C Abweichung der Mediane. Die Häufigkeitsverteilung bleibt wie im Original.

4 Ergebnisse

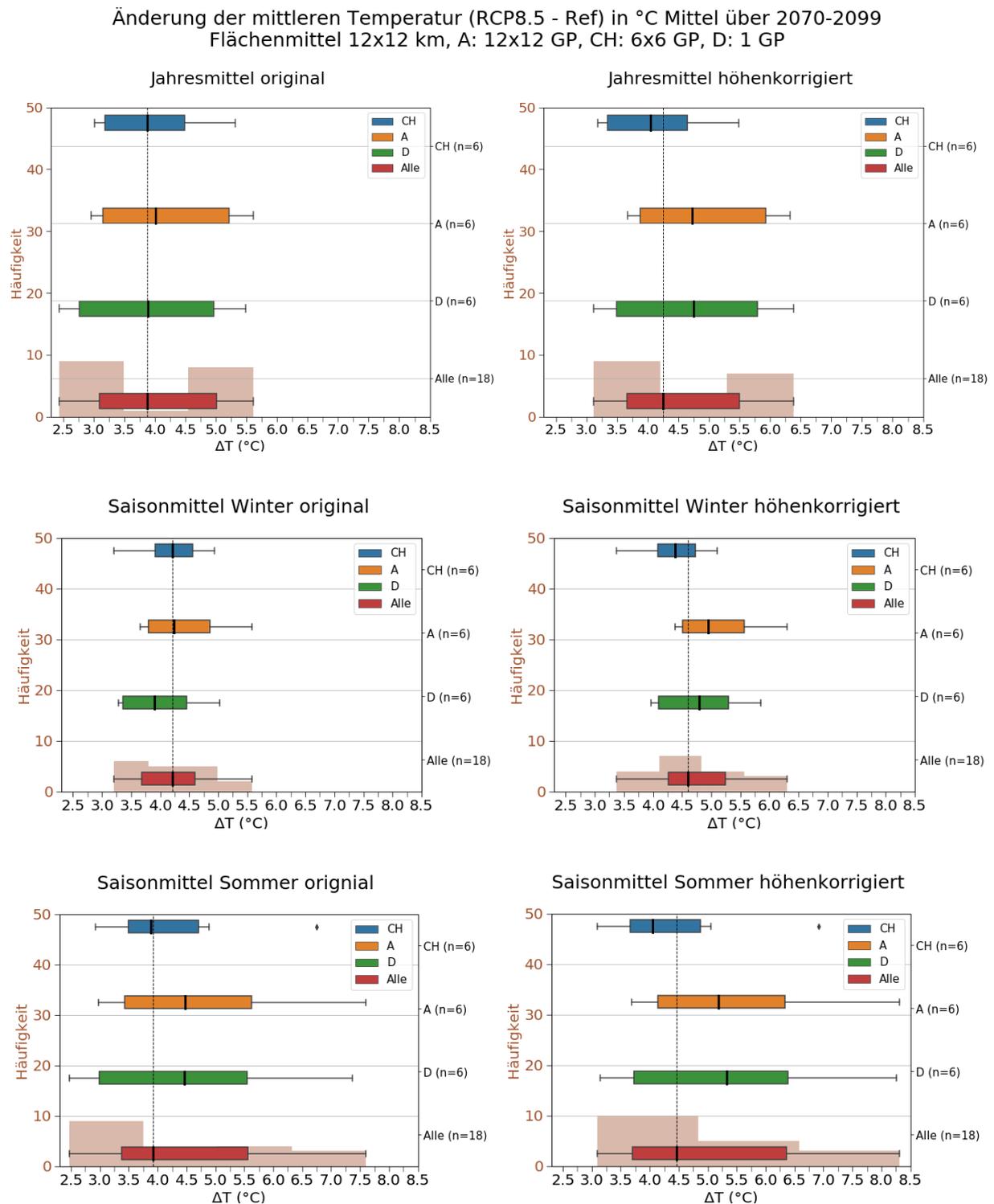


Abbildung 16: Änderung der mittleren Temperatur original (l.) und höhenkorrigiert (r.) (RCP8.5-Ref) in °C: Mittel über 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun). Hier geht nur eine Schnittmenge an Modellen ein.

4.3.3 Referenzperiode

In den Abbildungen 17 und 18 ist ein Vergleich der Modelle zu sehen, bei dem für alle Länder die spätere Referenzperiode von 1981-2010 verwendet wurde. Der Vergleich soll zeigen, wie stark die Wahl der Referenzperiode Einfluss auf die Unstetigkeiten hat. Betrachtet wird hier die Niederschlagssumme und die 2m-Temperatur als Differenz zwischen RCP8.5 und der Referenzperiode als Mittel über die ferne Zukunftsperiode. In den Abbildungen ist jeweils links der bereits zuvor gezeigte Vergleich, bei dem die Länder mit unterschiedlichen Referenzperioden betrachtet werden, sowie rechts ein Vergleich mit einheitlicher Referenzperiode.

Bei der Niederschlagssumme gibt es kaum Unterschiede zwischen dem Original und dem Vergleich mit der einheitlichen Referenzperiode. Der Median liegt nach wie vor knapp über 0 mm. Auch das Histogramm hat sich kaum verändert.

Beim Vergleich mit der 2m-Temperatur gibt es kleine Unterschiede. Die Differenz zwischen RCP8.5 und der Referenzperiode ist - wie vermutet - mit einer späteren Referenzperiode etwas kleiner. Der Range der deutschen Modelle hat leicht abgenommen. Der Länderunterschied ist dadurch nicht weniger geworden, sondern hat sich verschoben, die Schweizer Modelle zeigen nun die stärkste Erwärmung. Das Histogramm ist bei der einheitlichen Referenzperiode flacher geworden.

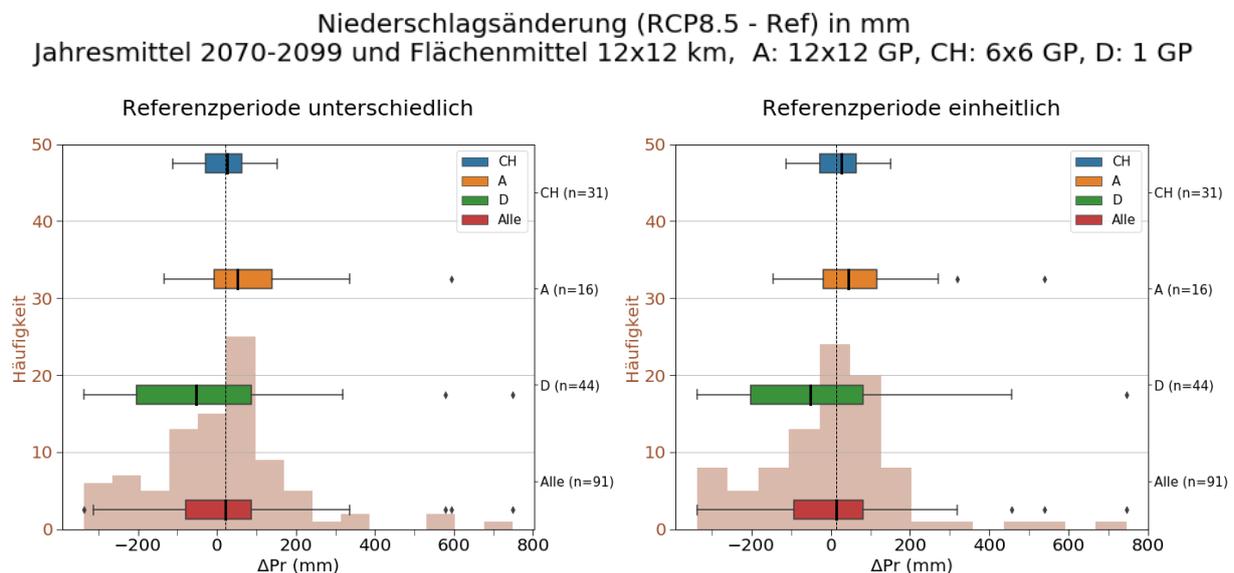


Abbildung 17: Änderung der Niederschlagssumme original (l.) und mit einheitlicher Referenzperiode (r.) (RCP8.5-Ref) in ° C: Jahresmittel über 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

Änderung der mittleren Temperatur (RCP8.5 - Ref) in °C
 Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km, A: 12x12 GP, CH: 6x6 GP, D: 1 GP

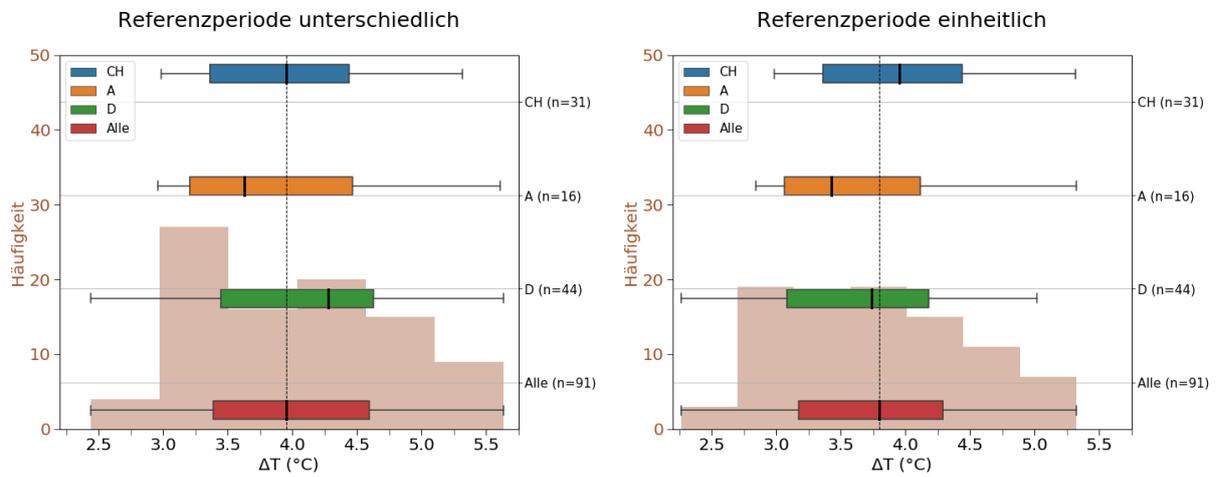


Abbildung 18: Änderung der mittleren Temperatur original (l.) und mit einheitlicher Referenzperiode (r.) (RCP8.5-Ref) in °C: Jahresmittel über 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot) sowie ein Histogramm (braun).

4.3.4 Schwellwert-Bias-Adjustierung

In Abbildung 19 ist als Beispiel die Änderung der Anzahl der Hitzetage, als RCP8.5 minus der Referenzperiode, dargestellt. Diese Abbildung zeigt einen Vergleich von der in Abbildung 10 ersichtlichen Änderung der Anzahl der Hitzetage mit den Schwellwert-Bias-adjustierten Klimaindizes aus den Datensätzen von ReKliES-De und EURO-CORDEX. Da nicht für alle deutschen Modelle eine Schwellwert-Bias-Adjustierung verfügbar ist, wird hier ein verkleinertes Ensemble verwendet. Der violette Boxplot dient als Referenz für das verkleinerte Ensemble. Im dunkelbraunen Boxplot gehen die selben Modelle wie beim violetten ein, nur dass sie aus dem Schwellwert-Bias-adjustierten Datensatz stammen. Zu sehen ist, dass sich die sehr hohe Bandbreite bei den deutschen Modellen leicht verkleinern lässt. Die Schwellwert-Bias-adjustierten Klimaindizes weisen eine Verschiebung des Medians um 1-2 Tage auf.

Ein Vergleich mit allen berechneten Klimaindizes zeigt ähnliche Muster. Der deutliche Unterschied im Ländervergleich kann nicht erklärt werden.

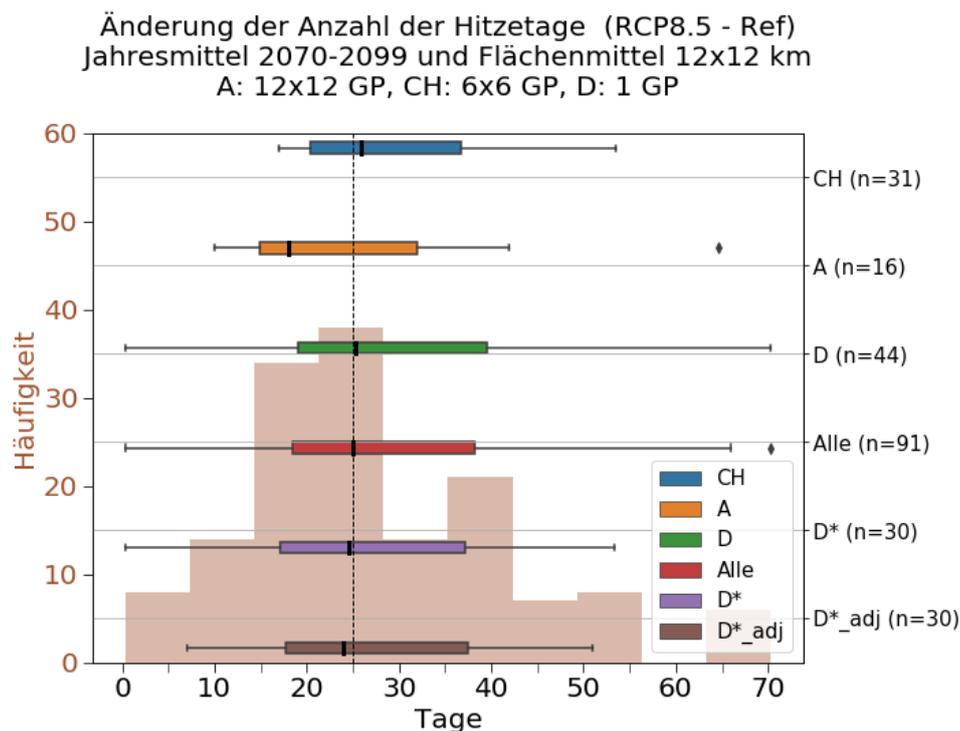


Abbildung 19: Änderung der Anzahl der Hitzetage (RCP8.5-Ref): Jahresmittel 2070-2099 und Flächenmittel 12x12 km für Schweizer (blau), österreichische (orange), deutsche (grün) und alle Modelle (rot), verkleinertes Ensemble (violett), Schwellwert-Bias-Adjustierung (dunkelbraun), sowie ein Histogramm (braun).

5 Schlussfolgerung

Die wichtigsten Ergebnisse des Vergleichs, der von den nationalen Wetterdiensten unterschiedlich angebotenen Klimaprojektionen, sind:

- Bei der Niederschlagssumme zeigen die österreichischen Ergebnisse im Mittel eine leichte Zunahme, die deutschen eine Abnahme. Diese Abnahme kommt hauptsächlich durch die Anwendung empirisch statistischer Modelle zustande. Diese Methoden basieren auf Beobachtungsdaten und es kann daher daran liegen, dass früher beobachtete hohe Temperaturen - die beim Szenario RCP8.5 gegen Ende des 21. Jahrhunderts verstärkt auftreten - im Zusammenhang mit trockenen Hitzeperioden zusammengefallen sind. Daher könnten mit diesen Modellen simulierte Hitzeperioden gegen Ende des 21. Jahrhunderts von zu geringen Niederschlagstotalen begleitet sein (vgl. Kapitel 1.2).
- Bei der Temperatur zeigen die deutschen Ergebnisse im Mittel eine etwas höhere Zunahme als die österreichischen. Dabei teilen sich die deutschen Resultate in zwei Gruppen auf. Die eine zeigt zu niedrige, die andere zu hohe Zunahmen.
- Die mit den Szenarien RCP2.6 und 4.5 angetriebenen Ergebnisse zeigen in der nahen Zukunft ein ähnliches Muster wie jene von RCP8.5. Die Niederschlagsänderungen nach RCP2.6 und die nahe Zukunft weisen bei den Schweizer und den österreichischen Ergebnissen Abnahmen auf. Die Temperaturverteilung nach RCP2.6 und die ferne Zukunft ist dahingehend deutlich bimodaler.
- Bei den Klimaindizes bei den Sommer- und Hitzetagen, mittlere maximale Temperatur sowie Vegetationsperiodendauer zeigen die österreichischen Modelle die geringste Zunahme, die deutschen Modelle bzw. bei den Hitzetagen auch die Schweizer eine sehr starke Zunahme. Betrachtet man jedoch Tropennächte modellieren Schweizer und österreichische Ergebnisse ausgeprägtere Zunahmen als die vom DWD angebotenen Projektionen.
- Die untersuchten Niederschlagsindizes verhalten sich ähnlich wie die Ergebnisse für den bereits erwähnten Vergleich. Die vom DWD angebotenen Simulationen zeigen höchste Zunahmen von Tagen ohne Niederschlag, sowie - im Gegensatz zu ZAMG und MeteoSwiss - auch Abnahmen der maximalen Niederschlagssummen. Konträr dazu weisen die österreichischen Ergebnisse hohe Zunahmen maximaler Niederschlagssummen auf.

Zusammenfassend sind in den Auswertungen für das RCP8.5 Szenario sowohl bei der mittleren 2m-Temperatur als auch bei der Niederschlagssumme keine großen Differenzen in den Klimaänderungssignalen der einzelnen Wetterdienste detektierbar. Die Streuung der von den Modellen erzeugten Läufe ist im Allgemeinen größer als die im Vergleich detektierbaren Unterschiede zwischen den Wetterdiensten. Damit hat die Auswahl der Modelle sowie die Anzahl der ausgewählten Läufe einen großen Einfluss auf die Abschätzung der Klimaentwicklung. Betrachtet man dahingegen die Ergebnisse der Klimaindizes, so sind zwischen den Wetterdiensten größere Unterschiede erkennbar. Dies tritt besonders bei Betrachtung der Sommertage oder der maximalen Niederschlagssumme in Erscheinung. Konkret bedeutet das im Sinne der Prognosen für Lindau eine Zunahme von 20 Sommertagen mehr, jedoch 10 Topennächten weniger als jene für Bregenz. Das gilt beispielsweise auch für die Starkniederschläge, bei denen die Prognosen für Lindau Abnahmen, während die in Bregenz eine Intensivierung der Starkniederschläge voraussagen. Derartige Unterschiede deuten stark darauf hin, dass diese Prognosen für nahe beinanderliegende Ortschaften keine geeignete Entscheidungsgrundlage z.B. für die Tourismusentwicklung in der Bodenseeregion darstellen.

Die Diskussion möglicher Einflussfaktoren zeigt einen deutlichen Bias bei den Schweizer und deutschen Werten. Hier wurde gezeigt, dass andere zugrundeliegende Beobachtungsdaten einen großen Einfluss auf den Bias haben können. Der Höhenunterschied der Domänen stellte sich bei der Biasberechnung in der Referenzperiode als Problem heraus. Bei der Änderung bis hin zur fernerer Zukunftsperiode zeigten die Ergebnisse keine Verbesserung nach der Höhenkorrektur. Hier waren die Unterschiede nach einer Höhenkorrektur stärker ausgeprägt als davor. Bei Verwendung der einheitlich für alle Modelle, späteren Referenzperiode gab es kaum Unterschiede und keine signifikante Verbesserung. Die Verwendung von Schwellwert-Bias-adjustierten Kennzahlen anstatt der unbearbeiteten Rohdaten zeigte nur eine minimale Verbesserung. Der Länderunterschied konnte dadurch nicht verkleinert werden.

Es konnte gezeigt werden, dass Klimaprojektionen verschiedener Wetterdienste in Grenzregionen zum Teil erhebliche Unterschiede aufweisen. Das liegt vor allem an den Unterschieden der gewählten EURO-CORDEX-Läufe und deren Anzahl, sowie an der Wahl der zur Weiterverarbeitung verwendeten Methoden (Downscaling). Diese Unterschiede betreffen vor allem Klimaindizes und weniger die Grundgrößen Niederschlagssumme und Mitteltemperatur. Daher ist bei Klimaindizes besondere Vorsicht bei der Interpretation der von den verschiedenen Wetterdiensten angebotenen Projektionen geboten. Das liegt unter anderem an der Schwellwertabhängigkeit der Berechnung von Klimaindizes, sowie dabei verwendeter Extremwerte.

Eine Konsequenz dieser Ergebnisse ist der Bedarf an Kooperation der DACH-Wetterdienste bei der Entwicklung von Klimaprojektionen. Das Ensemble soll sich aus genügend Läufen

zusammensetzen. Eine enge Zusammenarbeit bei der Auswahl der Modellketten und durch Generierung eines gemeinsamen Referenz-Beobachtungsdatensatzes für Methoden-Kalibrierung und Validierungen ist erforderlich, um die Auswirkungen des Klimawandels robuster abschätzen und entsprechende Anpassungsmaßnahmen gezielt durchführen zu können.

Literatur

- APCC (2014). *Zusammenfassung für Entscheidungstragende (ZfE)*. In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Technical Report Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich.
- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., & Nieplova, E. (2007). HISTALP – Historical instrumental climatological surface time series of the greater Alpine region 1760-2003. *International Journal of Climatology*, 27, 17–46.
- BMNT (2017). *Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel, Teil 1 - Kontext*. Technical Report Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.
- CH2018 (2018). *CH2018-Climate Scenarios for Switzerland*. Technical Report National Centre for Climate Services, Zürich.
- Chimani, B., Matulla, C., Eitzinger, J., Hiebl, J., Hofstätter, M., Kubu, G., Maraun, D., Mendlik, T., Schellander-Gorgas, T., & Thaler, S. (2016a). *Endbericht ÖKS15, Klimaszenarien für Österreich: Daten - Methoden - Klimaanalyse*. Technical Report Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wegener Center für Klima und globalen Wandel, Interfakultärer Fachbereich Geoinformatik Universität Salzburg.
- Chimani, B., Matulla, C., Eitzinger, J., Hiebl, J., Hofstätter, M., Kubu, G., Maraun, D., Mendlik, T., Schellander-Gorgas, T., & Thaler, S. (2016b). *Guideline zur Nutzung der ÖKS15-Klimawandelsimulationen sowie der entsprechenden gegitterten Beobachtungsdatensätze*. Technical Report Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wegener Center für Klima und globalen Wandel, Interfakultärer Fachbereich Geoinformatik Universität Salzburg.
- DWD (2017). *Nationaler Klimareport*. Technical Report 3. korrigierte Auflage, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, Deutschland.
- Etling, D. (1996). *Theoretische Meteorologie: Eine Einführung*. Friedr. Vieweg und Sohn Verlagsgesellschaft mbH Braunschweig/Wiesbaden. doi:10.1007/978-3-322-93977-7.
- Fischer, A. (2018). DACH Bodensee Vergleich. Unterlagen zum DACH Meeting Mai 2018 in Zürich.

- Guerreiro, S. B., Kilsby, C. G., & Fowler, H. J. (2016). Rainfall in Iberian transnational basins: a drier future for the Douro, Tagus and Guadiana? *Climatic Change*, *135*, 467–480. doi:10.1007/s10584-015-1575-z.
- Hennemuth, B., Bender, S., Bülow, K., Dreier, N., Keup-Thiel, E., Krüger, O., Mudersbach, C., Radermacher, C., & Schoetter, R. (2013). *Statistische Verfahren zur Auswertung von Klimadaten aus Modell und Beobachtung, eingesetzt in Projekten und Institutionen, die sich mit Klimafolgen und Anpassung befassen*. Technical Report CSC Report 13, Climate Service Center, Germany.
- Hiebl, J., Auer, I., Böhm, R., Schöner, W., Maugeri, M., Lentini, G., Spinoni, J., Brunetti, M., Nanni, T., Perčec Tadić, M., Bihari, Z., Dolinar, M., & Müller-Westermeier, G. (2009). A high-resolution 1961-1990 monthly temperature climatology for the greater Alpine region. *Meteorologische Zeitschrift*, *18*, 507–530. doi:10.1127/0941-2948/2009/0403.
- van den Hurk, B., Siegmund, P., Tank, A. K., Attema, J., Bakker, A., Beersma, J., Bessembinder, J., Boers, R., Brandsma, T., van den Brink, H., Drijfhout, S., Eskes, H., Haarsma, R., Hazeleger, W., Jilderda, R., Katsman, C., Lenderink, G., Loriaux, J., van Meijgaard, E., van Noije, T., van Oldenborgh, G. J., Selten, F., Siebesma, P., Sterl, A., de Vries, H., van Weele, M., de Winter, R., & van Zadelhoff, G.-J. (2014). *KNMI'14: Climate Change scenarios for the 21st Century – A Netherlands perspective*. Technical Report KNMI WR2014-01, De Bilt, The Netherlands, www.climatescenarios.nl.
- Hübener, H., Spekat, A., Bülow, K., Früh, B., Keuler, K., Menz, C., Radtke, K., Ramthun, H., Rathmann, T., Steger, C., Toussaint, F., & Warrach-Sagi, K. (2017). *ReKliEs-De Nutzerhandbuch*. Technical Report Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie, Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung, Climate Service Center Germany, Deutscher Wetterdienst, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, Deutsches Klimarechenzentrum, Universität Hohenheim. doi:10.2312/WDCC/ReKliEsDe_Nutzerhandbuch.
- IPCC (2018). *Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. In: 1,5 °C globale Erwärmung. Ein IPCC-Sonderbericht über die Folgen einer globalen Erwärmung um 1,5 °C gegenüber vorindustriellem Niveau und die damit verbundenen globalen Treibhausgasemissionspfade im Zusammenhang mit einer Stärkung der weltweiten Reaktion auf die Bedrohung durch den Klimawandel, nachhaltiger Entwicklung und Anstrengungen zur Beseitigung von Armut*. Technical Report [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H. O., Roberts D., Skea J., Shukla P. R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J. B. R., Chen Y., Zhou X., Gomis M. I., Lonnoy

- E., Maycock T., Tignor M. , Waterfield T. (Hrsg.)). World Meteorological Organization, Genf, Schweiz. Deutsche Übersetzung auf Basis der Version vom 14.11.2018. Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, ProClim/SCNAT, Österreichisches Umweltbundesamt, Bonn/Bern/Wien.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O. B., Bouwer, L. M., Braun, A., Colette, A., Déqué, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Kröner, N., Kotlarski, S., Kriegsmann, A., Martin, E., van Meijgaard, E., Moseley, C., Pfeifer, S., Preuschmann, S., Radermacher, C., Radtke, K., Rechid, D., Rounsevell, M., Samuelsson, P., Somot, S., Soussana, J.-F., Teichmann, C., Valentini, R., Vautard, R., Weber, B., & Yiou, P. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg Environ Change*, *14*, 563–678. doi:10.1007/s10113-013-0499-2.
- Knoche, R., & Keuler, K. (2017). Dynamische Regionalisierung. *promet Meteorologische Fortbildung, Deutscher Wetterdienst*, *99*, 29–40.
- Kotlarski, S., & Rajczak, J. (2018). *Documentation of the localized CH2018 datasets*. Technical Report National Centre for Climate Services.
- Kreienkamp, F., Paxian, A., Früh, B., Lorenz, P., & Matulla, C. (2019). Evaluation of the empirical–statistical downscaling method EPISODES. *Climate Dynamics (2019)*, *52*, 991–1026. doi:10.1007/s00382-018-4276-2.
- Kreienkamp, F., Spekat, A., & Hoffmann, P. (2017). Empirisch-Statistisches Downscaling - Eine Übersicht ausgewählter Methoden. *promet Meteorologische Fortbildung, Deutscher Wetterdienst*, *99*, 20–28.
- van Pelt, S. C., & Swart, R. J. (2011). Climate Change Risk Management in Transnational River Basins: The Rhine. *Water Resour Manage*, *25*, 3837–3861. doi:10.1007/s11269-011-9891-1.
- Switanek, M., Troch, P., Castro, C., Leuprecht, A., i Chang, H., Mukherjee, R., & Demaria, E. (2017). Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences*, *21*, 2649–2666. doi:10.5194/hess-21-2649-2017.
- WCRP (2019). EURO-CORDEX - Coordinated Downscaling Experiment - European Domain, Stand Okt. 2019. <https://euro-cordex.net/index.php/en>.