

CLIWA-STMK

Einfluss von Klimaveränderungen auf die
Wasserverfügbarkeit in der steirischen Landwirtschaft

Abschlussbericht CLIWA-STMK

Projekt Steirerteich

Einfluss von Klimaveränderungen auf die Wasserverfügbarkeit in der steirischen Landwirtschaft

Projektleitung:

Mag. Dr. Andreas Schaumberger, MSc, HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Projektmitarbeiter:

Mag. Vojko Daneu, MSc, Raumberg-Gumpenstein Research & Development

Projektpartner:

Assoc.Prof. Dr. Herbert Formayer, Institut für Meteorologie, Universität für Bodenkultur

Projektlaufzeit:

2018 – 2019

Impressum

Medieninhaber und Herausgeber:
HBLFA Raumberg-Gumpenstein
Landwirtschaft
Raumberg 38, 8952 Irdning
raumberg-gumpenstein.at

Autorinnen und Autoren: Andreas Schaumberger und Vojko Daneu
Gesamtumsetzung: Andreas Schaumberger

Copyright und Haftung: Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundeskanzleramtes und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtssprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Das Projekt wurde aus Mitteln des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung (Abteilung 10 Land- und Forstwirtschaft) gefördert.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an andreas.schaumberger@raumberg-gumpenstein.at.

Inhalt

1 Einleitung	4
2 Material und Methoden.....	5
2.1 Klimadaten und Klimaszenarien.....	5
2.1.1 Aufbereitung der Klimadaten	5
2.1.2 Modell ICHEC-EC-EARTH mit den Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5.....	6
2.1.3 Modell MOHC-HadGEM2-ES mit dem Szenario RCP 8.5.....	6
2.2 Datenformat und Programmierung.....	7
2.3 Berechnung der klimatischen Wasserbilanz.....	8
2.3.1 Referenz-Evapotranspiration.....	8
2.3.2 Kulturangepasste Evapotranspiration.....	10
2.3.3 Klimatische Wasserbilanz	13
2.4 Auswertungen für Klimaperioden.....	14
3 Ergebnisse und Diskussion	15
3.1 Absolute Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz	15
3.2 Relative Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz.....	21
4 Schlussfolgerungen	26
5 Quellenverzeichnis Klimadaten	27
6 Literaturverzeichnis.....	29

1 Einleitung

Die landwirtschaftliche Produktion ist unmittelbar von den klimatischen Rahmenbedingungen abhängig und deshalb stellt die sich abzeichnende Veränderung des Klimas gerade für diesen Sektor eine enorme Herausforderung dar. Viele der wetter- und klimabestimmenden Kenngrößen sind zugleich wichtige Wachstumsfaktoren für Pflanzen, wodurch die Landbewirtschaftung vom Klimawandel besonders betroffen ist.

Klimaszenarien zeigen, dass sich die Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft in der Steiermark stark verändern werden. Besonders die Wasserversorgung während der Vegetationsperiode wird in manchen Regionen, vor allem im Süden und Südosten des Landes, zu einem kritischen Faktor für die Aufrechterhaltung einer Landbewirtschaftung, wie sie traditionell seit Jahrzehnten betrieben wird. Adaptionsmaßnahmen werden gerade in jenen Gebieten notwendig sein, die von der Klimaveränderung und der einhergehenden Verknappung der Ressource Wasser besonders betroffen sind.

Die Entwicklung und Umsetzung geeigneter Anpassungsstrategien kann nur auf der Grundlage einer möglichst guten Einschätzung zukünftiger Veränderungen erfolgen. Dazu wurden für Österreich verschiedene Klimaszenarien (ÖKS15) im Auftrag der Bundesländer und des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus ausgearbeitet, die nach dem aktuellen Stand der Klimaforschung unterschiedliche Intensitäten der Klimaveränderung für das 21. Jahrhundert in einem flächendeckenden, räumlich hoch aufgelösten Datensatz beschreiben. In der vorliegenden Arbeit wird aus den im ÖKS15-Datensatz bereitgestellten Klimadaten die „klimatische Wasserbilanz“ berechnet, ein Parameter, der besonders für die Landwirtschaft relevant ist und in erster Linie dazu dient, die natürliche Wasserversorgung für künftige Vegetationsperioden sowie deren Veränderung analysieren zu können.

Die klimatische Wasserbilanz ist eine vereinfachte Berechnung der Wasserverfügbarkeit, die ausschließlich auf meteorologischen Parametern basiert. Dabei wird angenommen, dass sich Boden und Bewirtschaftung konstant verhalten und sich zukünftige Änderungen ausschließlich auf das Klima beziehen. Ziel der Arbeit ist die Aufbereitung einer flächendeckenden Information der zukünftigen Entwicklung einer natürlichen Wasserverfügbarkeit für die Landbewirtschaftung in der Steiermark. Bei einem Rückgang der Wasserverfügbarkeit in einzelnen Regionen ergibt sich für die dort angesiedelten landwirtschaftlichen Betriebe ein auf diesen Rückgang abgestimmter Handlungsbedarf.

2 Material und Methoden

2.1 Klimadaten und Klimaszenarien

2.1.1 Aufbereitung der Klimadaten

Die zukünftige Veränderung des Klimas wird im Wesentlichen durch die fortgesetzte Emission von Treibhausgasen (THG) verursacht. Eine damit verbundene Erwärmung wirkt sich auf alle Komponenten des Klimasystems und damit auch auf viele Ökosysteme aus (IPCC, 2016). Mit dem Fünften Sachstandsbericht des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) wurden „Repräsentative Konzentrationspfade“ (RCP) eingeführt, um Klimaszenarien hinsichtlich der zugrundeliegenden THG-Emissionen einzuteilen. Die einzelnen Szenarien berücksichtigen einen unterschiedlichen Strahlungsantrieb zum Ende des 21. Jahrhunderts verglichen mit dem aus vorindustrieller Zeit, der von 2,6 bis 8,5 W/m² reicht und welcher die Erderwärmung entsprechend stark beeinflusst. Beim RCP4.5-Szenario wird angenommen, dass die mittlere globale Oberflächentemperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts um bis zu 2,6 °C ansteigt, bei RCP8.5 um bis zu 4,8 °C gegenüber dem Vergleichszeitraum 1986-2005 (IPCC, 2016). Während beim RCP4.5-Szenario Klimaschutzmaßnahmen umgesetzt werden und damit ein moderater Anstieg der CO₂-Konzentration auf bis zu 650 ppm begrenzt wird, stellt RCP8.5 ein Szenario mit sehr hoher THG-Konzentration von bis zu 1370 ppm CO₂-Äquivalenten dar. Klimaschutz spielt in diesem Fall keine bis eine sehr untergeordnete Rolle mit nur schwer absehbaren Folgen für das Klimasystem und unsere ganze Umwelt.

Um die Auswirkungen der Klimaveränderung auf die einzelnen Regionen Österreichs fundiert beurteilen zu können, braucht es regionalisierte, hochauflösende Klimaszenarien, die speziell für österreichische Verhältnisse aufbereitet wurden. Mit „ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich“ hat ein Konsortium, bestehend aus Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wegener Center für Klima und globalen Wandel und dem Interfakultären Fachbereich Geoinformatik der Universität Salzburg, im Auftrag von Bund und Bundesländern einen Datensatz geschaffen, der eine wichtige Grundlage für klimarelevante Studien in Österreich darstellt (ÖKS15, 2016). Ausgehend von Regionalmodellen des EURO-CORDEX-Ensemble (Jacob *et al.*, 2013) wurden dabei die Daten für ein Klimaschutz-Szenario (RCP4.5) und ein Business-as-Usual-Szenario (RCP8.5) aufbereitet und für die wichtigsten Parameter fehlerkorrigiert.

Die Fehlerkorrektur ist eine wichtige Voraussetzung für die Anwendung von Klimamodelldaten, bei der systematische Abweichungen von Mess- und Modelldaten (Fehler) der Vergangenheit analysiert und diese auf die Berechnungen für zukünftige Perioden angebracht werden

(vgl. Maraun und Widmann, 2018). Die Korrekturen für die in diesem Projekt verwendeten Daten wurden vom Wegener Center für Klima und globalen Wandel der Universität Graz (Weg-Center) sowie vom Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität für Bodenkultur (BOKU) durchgeführt. Die Fehlerkorrektur der Modelldaten erfolgte auf Basis von *Quantile Mapping* (Switanek *et al.*, 2017) bzw. Monatsmittelwerten (Thiemeßl *et al.*, 2011). Die korrigierten Daten sind über das Datenportal des Climate Change Center Austria (CCCA) verfügbar und können dort kostenfrei heruntergeladen werden (siehe Kapitel 5). Eine spezielle Aufbereitung für das vorliegende Projekt hinsichtlich des Datenformats und der Dateistruktur wurde vom Projektpartner BOKU vorgenommen. Für die Berechnung der klimatischen Wasserbilanz werden die Parameter Temperatur, Globalstrahlung, Wind, Luftfeuchte und Niederschlag benötigt, die von der BOKU auf Tagesbasis für den Zeitraum 1981 bis 2100 aufbereitet wurden. Die räumliche Auflösung dieser Daten beträgt 1 km und ist damit so hoch, dass Auswertungen auf regionaler Ebene durchgeführt werden können.

2.1.2 Modell ICHEC-EC-EARTH mit den Szenarien RCP 4.5 und RCP 8.5

EC-Earth-Klimaszenarien werden von einem europaweiten Konsortium unter Verwendung eines Earth System Model (ESM), aufbauend auf dem Forecast-System des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) berechnet. Die hier verwendeten Daten wurden vom Irish Centre for High-End Computing implementiert. ÖKS15 verwendet Szenarien des ICHEC-EC-EARTH Modells, welche sowohl das Klimaschutz-Szenario RCP4.5 als auch das Business-as-Usual-Szenario RCP8.5 umfassen. Beide Modelle beschreiben klimatische Veränderungen, welche sehr nahe bei einer mittleren Entwicklung des gesamten ÖKS15-Ensemble liegen. Damit repräsentieren sie eine mittlere Entwicklung des Klimas, die im Rahmen dieses Projektes besonders hinsichtlich ihrer Relevanz für die Landwirtschaft ausgewertet wird. Die Wasserverfügbarkeit spielt eine zentrale Rolle im Pflanzenbau und mit der vereinfachten Berechnung einer klimatischen Wasserbilanz können die zu erwartenden Konsequenzen einer erfolgreichen bzw. einer nicht erfolgreichen Umsetzung von Klimaschutzmaßnahmen miteinander verglichen werden.

2.1.3 Modell MOHC-HadGEM2-ES mit dem Szenario RCP 8.5

Mit dem RCP8.5-Szenario eines Klimamodells des Met Office Hadly Centre (MOHC) in der Version HadGEM2 (Hadley Centre Global Environment Model Version 2) wird ein Modelllauf verwendet, der eine starke Niederschlagsabnahme im Sommerhalbjahr aufweist und damit eine zunehmende Wahrscheinlichkeit für Trockenheit aufweist. Dieser Modelllauf stellt ein plausibles Extremszenario dar. Die Gefahr von Dürre und anhaltender Trockenheit ist für die Landwirtschaft mit starken Ertragseinbußen bis zu totalen Ertragsausfällen verbunden und daher

von höchstem Interesse. Dieser Aspekt des Klimawandels ist für einige Regionen der Steiermark, vor allem im Süden und Südosten, wo bereits jetzt häufig mit Trockenheit gerechnet werden muss, von großer Bedeutung. Auch wenn die nördlichen Bergregionen der Steiermark zurzeit meist ausreichend mit Niederschlägen versorgt werden, kann sich dies in Zukunft ändern. Ein Klimaszenario, in dem Trockenheit eine besondere Rolle spielt, zeigt das zukünftige Gefährdungspotenzial auch für solche Regionen auf und ist damit eine wichtige Bewertungsgrundlage für regional abgestimmte Anpassungsmaßnahmen.

2.2 Datenformat und Programmierung

Alle Daten in diesem Projekt wurden im *Network Common Data Format (NetCDF)* verarbeitet und gespeichert. Dieses wissenschaftliche Austauschformat wird weltweit von zahlreichen Forschungseinrichtungen und Wissenschaftlern, insbesondere aus dem Fachbereich der Klimatologie, Meteorologie und Geoinformation verwendet, um große Datenmengen effizient und effektiv verarbeiten zu können. Der offene Standard dieses Formats wird von der University Corporation for Atmospheric Research (*unidata.ucar.edu*) betreut. Als binäres, dateibasiertes Datenformat lassen sich NetCDF-Dateien mit hoher Performanz verwenden und durch die Verfügbarkeit von Schnittstellen zu vielen verschiedenen Programmiersprachen gut in automatisierbare Verarbeitungsroutinen einbauen. NetCDF ist ein selbstbeschreibendes Datenformat, in dem sich alle Metadaten, das sind Beschreibungen über Aufbau und Art der Daten, in einem Header befinden, an dem sich in einer *Data-Section* die eigentlichen Daten anschließen, die sowohl ein- als auch mehrdimensional strukturiert sein können.

Mit der objektorientierten Programmiersprache Java und der für NetCDF verfügbaren API (*Application Programming Interface*) lassen sich komplexe Algorithmen inklusive einer optionalen Benutzerschnittstelle zur automatisierten Bearbeitung der von entsprechend aufbereiteten Klimadaten implementieren. Im Rahmen von CLIWA-STMK wurden in Java Zugriffsstrukturen für die in NetCDF verfügbaren und von der BOKU aufbereiteten Klimadaten entwickelt, Algorithmen zur Berechnung der klimatischen Wasserbilanz mit einfachen Einstellmöglichkeiten und die Speicherung der Ergebnisse, ebenfalls als NetCDF-Dateien, implementiert. In einer Weiterentwicklung von CLIWA-STMK können die implementierten Algorithmen in Zukunft sehr einfach mit einer geeigneten Benutzerschnittstelle (zum Beispiel als Windows-Programmoberfläche) ausgestattet und erweitert werden, um die Bedienung in Zukunft ohne direkte Eingriffe in den Programmcode zu unterstützen.

Die im Format NetCDF erzeugten Ergebnisse wurden in ESRI ArcGIS eingelesen, in Raster einer File Geodatabase transformiert und in ArcGIS kartografisch aufbereitet. Für weitere Anwendungen stehen die Daten der Wasserverfügbarkeit somit in zwei Formen zur Verfügung: in NetCDF und in einem ArcGIS-Standardrasterformat zur Integration in GIS-Oberflächen.

2.3 Berechnung der klimatischen Wasserbilanz

2.3.1 Referenz-Evapotranspiration

Die hier angeführten Gleichungen und Erklärungen zu den einzelnen Modellparametern beziehen sich zur Gänze auf das FAO *Irrigation and Drainage Paper 56* (Allen *et al.*, 1998). Die Referenzoberfläche ist als hypothetische Oberfläche mit vollständiger Grasbedeckung und einer Wuchshöhe von 12 cm, einer Albedo von 0,23 und einem aerodynamischen Widerstandsbeiwert mit 70 s m^{-1} definiert. Es wird angenommen, dass der Grasbestand sich im aktiven Wachstum ohne Wasserlimitierung befindet. Der aerodynamische Widerstandsbeiwert mit 70 s m^{-1} bezieht sich dabei auf einen moderat trockenen Oberboden.

Die FAO-Penman-Monteith-Gleichung (1) wird bei Verfügbarkeit aller erforderlichen Wetterdaten auf Tagesbasis angewendet und hat die Form

$$ET_0 = \frac{0.408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 vpd}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

wobei ET_0 die Referenz-Evapotranspiration der definierten Grasoberfläche [mm Tag^{-1}] darstellt, R_n die Strahlungsbilanz an der Referenzoberfläche [$\text{MJ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$], G die Bodenwärmestromdichte [$\text{MJ m}^{-2} \text{ Tag}^{-1}$], welche hier aufgrund der im Vergleich zu R_n geringen Größe vernachlässigt wird, T die Lufttemperatur in 2 Meter Höhe [$^{\circ}\text{C}$], u_2 die Windgeschwindigkeit in 2 Meter Höhe [m s^{-1}], vpd das Sättigungsdefizit [kPa], Δ die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] und γ die Psychrometerkonstante [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$].

Der Wind wird an meteorologischen Stationen in 10 Meter Höhe gemessen. Um auf die in Gleichung 1 geforderte Höhe von 2 Metern über Grund zu kommen, wird in Gleichung 2 ein logarithmisches Windgeschwindigkeitsprofil der Form

$$u_2 = u_z \frac{4.87}{\ln(67.8 z - 5.42)} \quad (2)$$

zur Anpassung verwendet, wobei z die Messhöhe über dem Boden [m] und u_z die Windgeschwindigkeit [m s^{-1}] in z Metern Höhe angibt. Vor Anwendung der Formel ist zu prüfen, auf welche Messhöhe sich die im Klimamodell verfügbaren Winddaten beziehen.

Die Beziehung zwischen Sättigungsdampfdruck und Temperatur wird durch die Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve Δ [$\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$] ausgedrückt und wie folgt ermittelt:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 e^{\left(\frac{17.27 T}{T + 237.3} \right)} \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (3)$$

Für die Berechnung der Psychrometerkonstante γ [kPa °C⁻¹] wird in der vorliegenden Arbeit der atmosphärische Druck als Funktion der Seehöhe z herangezogen:

$$\gamma = 0.665 \cdot 10^{-3} \left[101.3 \left(\frac{293 - 0.0065 z}{293} \right)^{5.26} \right] \quad (4)$$

Der Berechnung des Sättigungsdefizits vpd [kPa] geht die Bestimmung des Sättigungsdampfdrucks e_s [kPa] nach Deutschem Wetterdienst (1976) voraus:

$$e_s = \begin{cases} 0.61078 e^{\left(\frac{17.08085 T}{234.175 + T} \right)} & T \geq 0 \\ 0.61078 e^{\left(\frac{17.84362 T}{245.425 + T} \right)} & T < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Weiters wird der aktuelle Dampfdruck e_a [kPa] benötigt, welcher näherungsweise aus dem Tagesmittel der relativen Luftfeuchtigkeit RH [%] in der Form

$$e_a = e_s \frac{RH}{100} \quad (6)$$

abgeleitet werden kann. Die Differenz aus e_s und e_a in Gleichung 7 ergibt das mittlere tägliche Sättigungsdefizit vpd :

$$vpd = e_s - e_a \quad (7)$$

Die in Gleichung 1 einzusetzende Strahlungsbilanz (Nettostrahlung) R_n ergibt sich aus der Differenz von kurzwelliger Nettostrahlung R_{ns} (direkte und diffuse Sonnenstrahlung) und langwelliger Nettostrahlung R_{nl} (terrestrische Strahlung):

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (8)$$

Die Berechnung von R_{ns} [MJ m⁻² Tag⁻¹] erfolgt gemäß der Beziehung

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_S \quad (9)$$

wobei α den Albedowert 0,23 für die hypothetische Grasreferenzoberfläche darstellt. Für die Gleichung 9 wird die Globalstrahlung R_S verwendet. Die langwellige Nettostrahlung R_{nl} [MJ m⁻² Tag⁻¹] wird gemäß der Form

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,K}^4 + T_{\min,K}^4}{2} \right] \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left(1.35 \frac{R_S}{R_{SO}} - 0.35 \right) \quad (10)$$

ermittelt, wobei σ die Stefan-Boltzmann-Konstante [4,903 10⁻⁹ MJ K⁻⁴ m⁻² Tag⁻¹] darstellt. Die Maximum- und Minimumtemperaturen T_{\max} bzw. T_{\min} sind in Kelvin umzurechnen. R_{SO} beschreibt die potenzielle Strahlung (*Clear-sky Radiation*) [MJ m⁻² Tag⁻¹] und wird unter Berücksichtigung der Seehöhe z gemäß der Beziehung

$$R_{SO} = (0.75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a \quad (11)$$

bestimmt. Durch die Relation von R_S und R_{SO} in Gleichung 10 wird der Einfluss der Wolkenbedeckung auf die langwellige Nettostrahlung R_{nl} beschrieben. Sämtliche Gleichungen zur Berechnung der Globalstrahlung R_S [$\text{MJ m}^{-2} \text{Tag}^{-1}$] sind Allen *et al.* (1998, 41ff) entnommen:

$$R_S = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a \quad (12)$$

n bezeichnet die aktuelle, N die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer [h]. Die Berechnung der extraterrestrischen Strahlung R_a ist wie folgt definiert:

$$R_a = \frac{24 (60)}{\pi} G_{SC} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (13)$$

wobei G_{SC} die Solarkonstante $0,0820$ [$\text{MJ m}^{-2} \text{min}^{-1}$], d_r die inverse relative Distanz Erde-Sonne [rad] (14), δ die Sonnendeklination [rad] (15), ω_s den Stundenwinkel der Sonne bei Sonnenuntergang [rad] sowie φ die geografische Breite [rad] bezeichnen. Die inverse relative Distanz Erde-Sonne d_r und die Sonnendeklination δ sind gegeben durch:

$$d_r = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad (14)$$

$$\delta = 0.409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1.39\right) \quad (15)$$

wobei J den Tag des Jahres im Wertebereich von 1 bis 365 oder 366 bezeichnet. Die Konstante von 365 in den Gleichungen 14 und 15 wird auch in Schaltjahren nicht verändert (Allen *et al.*, 2005, 24).

Der in (13) verwendete Stundenwinkel ω_s [rad] ist gegeben durch:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (16)$$

Die astronomisch mögliche Sonnenscheindauer N [h] ergibt sich aus der Gleichung:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (17)$$

Als astronomisch mögliche Sonnenscheindauer wird N hier ohne Berücksichtigung der topografischen Abschattung bestimmt und hat deshalb in Abhängigkeit der Reliefenergie eine Unterschätzung der in Gleichung 12 berechneten Globalstrahlung zur Folge.

2.3.2 Kulturangepasste Evapotranspiration

Die Anpassung der Referenz-Evapotranspiration, welche sich auf eine definierte und unveränderliche Grasoberfläche bezieht (vgl. Abschnitt 2.3.1), an den phänologischen Verlauf einer

theoretisch durchschnittlichen Vegetation ist notwendig, um die innerhalb einer Vegetationsperiode variierende Evapotranspiration mit Hilfe eines Kulturarten-Koeffizienten (*Crop Coefficient* = K_c) vereinfacht anzupassen. Im vorliegenden Projekt wurde der K_c aus dem Durchschnitt aller in Allen *et al.* (1998, 110ff) angeführten Kulturarten gebildet und, wie in Abbildung 1 dargestellt, einer zeitlichen Abfolge zugeordnet.

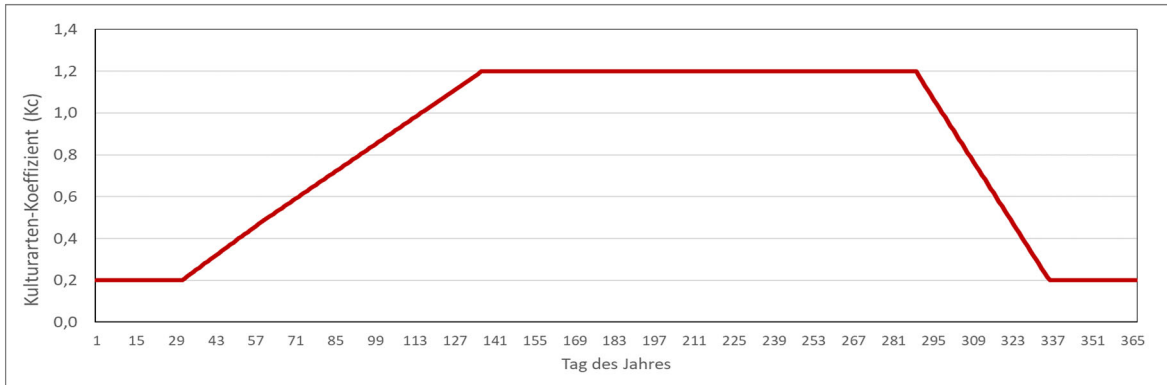


Abbildung 1: Jahresgang eines vereinfachten Kulturarten-Koeffizienten (K_c)

Als Ruhezeit wurden die Monate Dezember und Jänner definiert, der K_c beträgt hier 0,2. Vom 1. Februar bis 1. März nimmt der K_c linear von 0,2 bis 0,5 zu und steigt dann bis zum 15. Mai auf 1,2 wo er zwischen 15. Oktober und 30. November linear bis auf 0,2 abnimmt. Diese Abfolge phänologischer Phasen wie Ruhezeit, Entwicklung, entwickelte und späte Phase wurden in Anlehnung an die flächenmäßig wichtigsten Kulturart Grünland unter Berücksichtigung einer durchschnittlichen Vegetationsperiode, jedoch ohne Einbeziehung der unterschiedlichen Schnittnutzungen gewählt und stellt ebenfalls eine Näherung dar. Die frühe lineare Anhebung des K_c bereits ab Februar trägt dem Umstand Rechnung, dass in den kommenden Jahren ein zunehmend früher Vegetationsbeginn angenommen wird. Der Effekt einer Anpassung der Referenz-Evapotranspiration ist in Abbildung 2 an einem Beispielsjahresgang dargestellt.

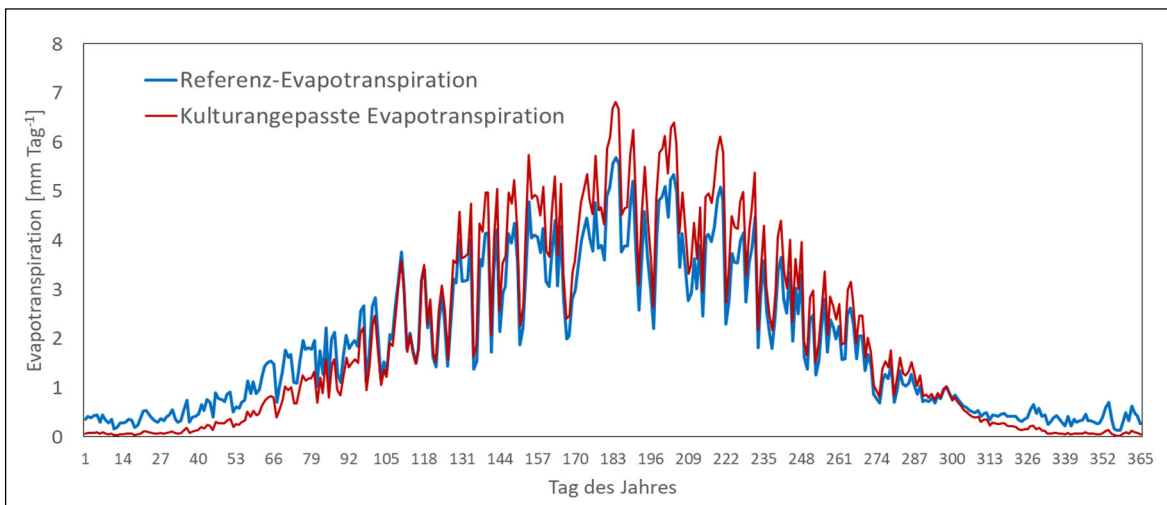


Abbildung 2: Vergleich des Jahresganges von Referenz- und kulturangepasster Evapotranspiration am Beispiel des Standortes Feldbach im Jahr 1985

Da in der vorliegenden Arbeit klimatische Auswertungen, d.h. über mindestens 30-jährige Zeiträume, durchgeführt werden, ist eine mittlere Anpassung des K_c -Verlaufs gerechtfertigt und reduziert den ohnehin erheblichen Rechenaufwand um ein Vielfaches. Zudem wird im relativen Vergleich zwischen einer vergangenen und einer zukünftigen Klimaperiode durch die einheitliche Verwendung einer durchschnittlichen Vegetationsentwicklung der Einfluss von Vegetation konstant gehalten und die Veränderung der Wasserverfügbarkeit auf den Klimaeffekt reduziert.

Die Anpassung der Referenz-Evapotranspiration auf den oben dargestellten Verlauf einer durchschnittlichen Vegetationsbedeckung erfolgt näherungsweise und formal durch

$$ET_c = K_c ET_0 \quad (18)$$

Der Kulturarten-Koeffizient K_c passt die tägliche Referenz-Evapotranspiration ET_0 [mm Tag⁻¹] an eine kulturartenspezifische Evapotranspiration ET_c [mm Tag⁻¹] an.

In Allen *et al.* (1998, 98ff) werden zwei Möglichkeiten zur Berechnung von Kulturarten-Koeffizienten diskutiert. Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Ansatz des *Single Crop Coefficient* fasst den Effekt der Evaporation und Transpiration zu einem kombinierten Faktor (K_c) zusammen. Im *Dual Crop Coefficient* werden beide Verdunstungsparameter getrennt berücksichtigt. Dies hat den Vorteil, dass vor allem in der Initialisierungsphase der vergleichsweise geringen Bodenbedeckung durch höhere Evaporationsraten Rechnung getragen wird. Bei Kulturarten, welche vor allem zu Beginn der vegetativen Phase eine geringe Bedeckung aufweisen, trägt diese Unterscheidung zu einer Verbesserung der kulturartenspezifischen Evapotranspiration (ET_c) bei (vgl. Allen, 2000). Da hier eine theoretische Vegetationsbedeckung angenommen wird, ist eine getrennte Erfassung der Evaporation des offenen Bodens von untergeordneter Bedeutung und deshalb die Anwendung eines *Single Crop Coefficient* vor allem auch hinsichtlich des geringeren Rechenaufwandes praktikabel.

Die Berechnung der potenziellen oder Referenz-Evapotranspiration für Szenarien in zukünftigen Perioden muss nach Chimani *et al.* (2019, 53) angepasst werden, da die Penman-Monteith-Gleichung die Austrocknung des Bodens stark überschätzt. Der Grund dafür liegt in einer Anpassung der stomatären Leitfähigkeit an die steigende CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. Um dies entsprechend zu berücksichtigen, schlägt Milly und Dunne (2016) vor, für eine Anwendung der Penman-Monteith-Evapotranspiration auf Tagesbasis die Konstante von 0,34 in Gleichung 1, welche sich invers proportional mit der stomatären Leitfähigkeit verhält, mit 60 % zu dividieren. Für die Berechnung der Zielperiode 2071 bis 2100 wurde die von Milly und Dunne (2016) vorgeschlagene Modifikation der Verdunstungsformel angewendet.

2.3.3 Klimatische Wasserbilanz

Die klimatische Wasserbilanz (*CWB*) ist eine einfache Methode, die natürliche Wasserversorgung zu beschreiben, indem die tägliche Differenz von Niederschlag (*P*) und Verdunstung (*ET*) gebildet und über einen gewissen Zeitraum, in diesem Fall über die Vegetationsperiode von März bis November ($d = 60.$ bis zum 334. Tag des Jahres) aufsummiert wird:

$$CWB = \sum_{d=60}^{334} (P_d - ET_{c_d}) \quad (19)$$

In Gleichung 19 wird die kulturartenangepasste Evapotranspiration (ET_c) verwendet, um die Entwicklung einer durchschnittlichen Vegetation bei der Differenzbildung mit zu berücksichtigen und damit den Ausführungen von Lalic *et al.* (2018, 124ff) zu folgen.

Die Berechnung der klimatischen Wasserbilanz wird nicht nur in Form von absoluten Werten, wie in Gleichung 19 dargestellt, sondern auch als relative Variante durchgeführt, indem die Niederschlagssumme in ein Verhältnis zur Verdunstungssumme gebracht wird:

$$CWB = \sum_{d=60}^{334} \left(\frac{P_d}{ET_{c_d}} \right) \quad (20)$$

Da sich diese Berechnungen ausschließlich auf Wetterdaten beziehen und alle Informationen über die aktuelle Bodenfeuchte vernachlässigt werden, ist das Ergebnis der klimatischen Wasserbilanz nicht mit dem tatsächlichen Bodenwassergehalt gleichzusetzen. In diesem Fall müsste die nutzbare Feldkapazität des Bodens einbezogen und die Bodenwasserbilanz für unterschiedliche Horizonte unter Berücksichtigung von Tiefenversickerung und Kapillarhub berechnet werden. Dennoch bietet dieser Parameter die Möglichkeit, das Wasserangebot für landwirtschaftliche Anwendungen besser zu quantifizieren, als dies möglich wäre, wenn nur der Niederschlag berücksichtigt werden würde. So bietet beispielsweise der Deutsche Wetterdienst auf <https://www.dwd.de/DE/leistungen/wasserbilanzq/wasserbilanzq.html> eine laufend aktualisierte Karte der klimatischen Wasserbilanz für alle meteorologischen Jahreszeiten an, um den Landwirten eine Übersicht über die agrarmeteorologische Situation im Verlauf einer Vegetationsperiode geben zu können.

Bei einer Analyse der klimabedingten Veränderungen zwischen einer Referenz- und einer Zielperiode kann davon ausgegangen werden, dass sich die Bodenparameter nicht wesentlich verändern und deshalb wird angenommen, dass die Abhängigkeit der Wasserverfügbarkeit zu einem überwiegenden Teil auf klimatische Parameter zurückzuführen ist. Aus Vereinfachungsgründen wird hier allerdings das Grundwasser vernachlässigt, welches jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit einer zukünftigen Veränderung unterworfen sein wird. Bereits die letzten Jahre haben gezeigt, dass sich beim Auftreten längerer Trockenperioden die Grundwasserspeicher leeren und auch über längere Zeiträume nicht mehr in allen Regionen vollständig auffüllen. Die Absenkung des Grundwasserspiegels bedeutet eine Verschärfung der Trockengefährdung, da

eine wichtige Reserve nicht mehr in ausreichender Menge zur Verfügung steht. Nicht berücksichtigt wird auch der gerade bei Starkniederschlägen relevante Oberflächenabfluss. Die Klimaveränderung bewirkt nach ÖKS15 (2016) eine Zunahme von Extremereignissen, unter anderem von außergewöhnlich starken Niederschlagsereignissen. Diese Niederschläge gehen zwar in die klimatische Wasserbilanz ein, können jedoch aufgrund des Oberflächenabflusses nicht vollständig von den Pflanzen genutzt werden. Während die jährlichen Niederschlagsmengen auch in Zukunft annähernd gleichbleiben, kommt es zu einer Änderung in der Niederschlagsverteilung. Da sowohl die Grundwasserverfügbarkeit als auch der Oberflächenabfluss in der hier durchgeführten Wasserverfügbarkeitsanalyse nicht einbezogen werden, kommt es zu einer gewissen Unschärfe und damit zu einer Abweichung von realen Verhältnissen.

2.4 Auswertungen für Klimaperioden

Im Gegensatz zu Wetter und Witterung müssen für klimatische Auswertungen längere Zeiträume betrachtet werden. Die WMO (*World Meteorological Organisation*) legt dafür 30-jährige Perioden fest. Für CLIWA-STMK wird als Referenzperiode daher der Zeitraum 1981 bis 2010, das ist die aktuelle Klimanormalperiode, herangezogen. Die Zielperiode kann beliebig gewählt werden, da die Wetterdaten für den gesamten Zeitraum von 1981 bis 2100 auf Tagesbasis zur Verfügung stehen. Um ein starkes Änderungssignal zu erhalten, wurde in CLIWA-STMK die Zielperiode 2071 bis 2100 gewählt.

Die tägliche Bilanzierung von Niederschlag und Evapotranspiration wurde für die einzelnen Jahre des Berechnungszeitraums auf die Summe über die jeweiligen Vegetationsperioden beschränkt, da die Wasserverfügbarkeit für die Landwirtschaft in diesem Zeitraum von besonders großer Bedeutung ist. Aus Vereinfachungsgründen wurde die Vegetationsperiode einheitlich als Zeitraum zwischen 1. März und 30. November definiert (siehe Gleichung 19 und 20).

Die jährlichen Bilanzsummen über die Vegetationsperioden werden sowohl für die Referenz- als auch für die Zielperiode ausgewertet. Neben der Bildung des arithmetischen Mittelwertes für jede Rasterzelle in diesen 30, den berechneten Jahren entsprechenden Oberflächen, wurde auch der Median sowie die Standardabweichung berechnet. Für die Präsentation der Ergebnisse im vorliegenden Bericht wurden die Auswertungen der Median-Oberflächen herangezogen, da diese gegenüber den Mittelwerten eine etwas robustere Aussage gewährleisten.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Absolute Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz

Die hier präsentierten Ergebniskarten beschreiben die klimatische Wasserbilanz als Median über einen 30-jährigen Berechnungszeitraum. Als Einheiten sind Millimeter aufgetragen, die über die Vegetationsperiode aufsummiert wurden. Negative Werte weisen auf eine negative Bilanz hin, d.h. die Verdunstung war in diesen Regionen höher als der Niederschlag, positive Werte beschreiben eine ausreichende Wasserversorgung hinsichtlich der klimatischen Rahmenbedingungen. Es ist zu beachten, dass der ausgewiesene Wasserversorgungsgrad nicht dem tatsächlichen bzw. pflanzenverfügbaren Bodenwasser entspricht, da in diesem Fall detaillierte Informationen über die Wasserhaltefähigkeit des Bodens sowie über die Grundwasserhältnisse vorliegen müssten. In diesem Zusammenhang wird auch explizit darauf hingewiesen, dass es sich hier um keine Jahressummen handelt, wie sie bei derartigen Auswertungen in Regel verwendet werden, sondern um einen auf landwirtschaftliche Anwendungen abgestimmten Zeitraum von März bis November als Vegetationsperiode. Für jedes der drei berechneten Klimaszenarien (RCP4.5 und RCP8.5 mit Trockenszenario) werden die absoluten Ergebnisse für die Referenz- und die Zielperiode sowie als Differenz zwischen diesen beiden Zeiträumen dargestellt. Die folgenden drei Karten verweisen auf das Szenario RCP4.5.

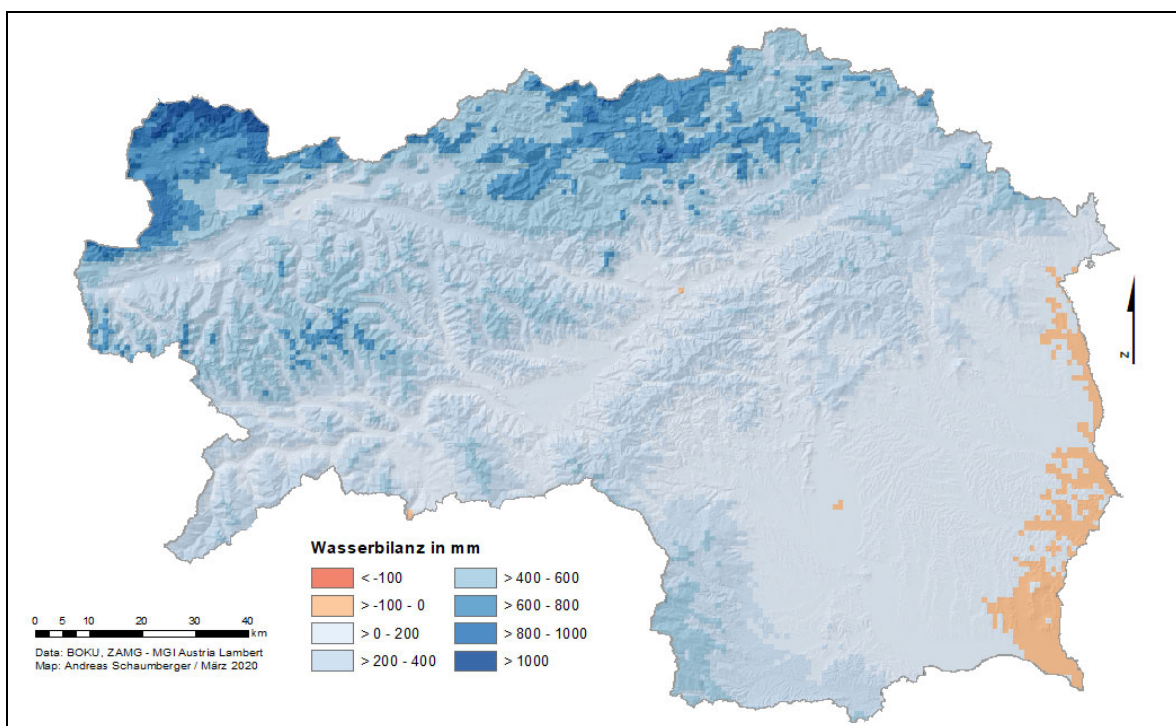


Abbildung 3: Median der klimatischen Wasserbilanz für die Referenzperiode 1981-2010 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP4.5

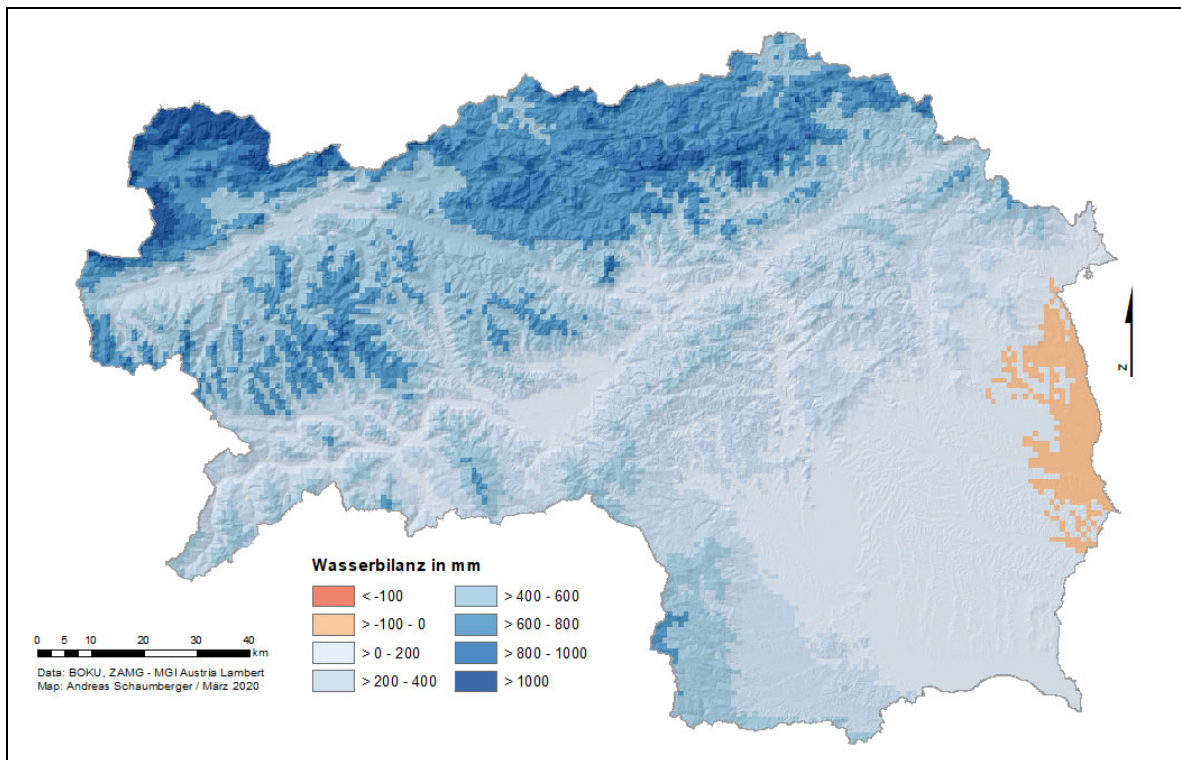


Abbildung 4: Median der klimatischen Wasserbilanz für die Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP4.5

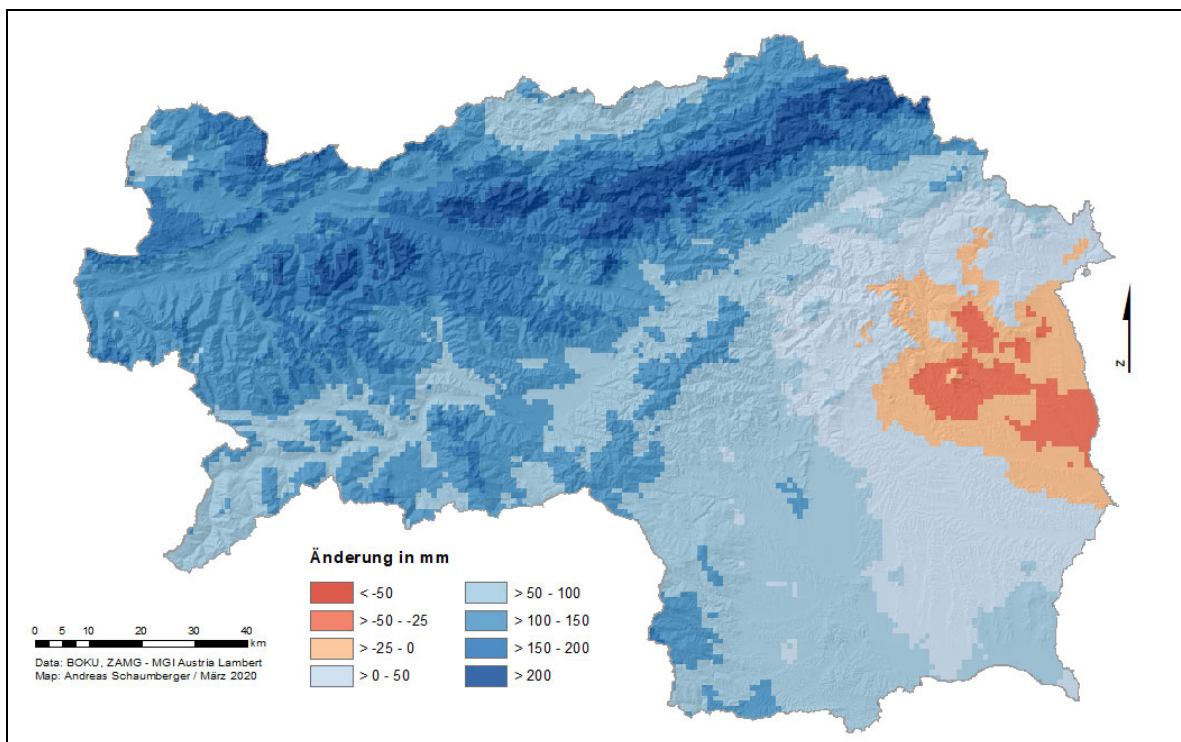


Abbildung 5: Differenz der klimatischen Wasserbilanz zwischen Referenzperiode 1981-2010 und Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP4.57

Im Klimaschutzszenario RCP4.5 gibt es zwischen Referenz- (Abbildung 3) und Zielperiode (Abbildung 4) kaum nennenswerte negative Entwicklungen der Wasserbilanz (Abbildung 5).

Das Änderungssignal des Niederschlags ist in den Klimaszenarien nicht sehr deutlich ausgeprägt und daher weisen Projektionen dieses Parameters generell ein geringeres Vertrauen auf (IPCC, 2016). Im RCP4.5-Ansatz nimmt zudem die globale Mitteltemperatur deutlich weniger zu, als dies in Szenarien mit größerem Strahlungsantrieb der Fall ist. Ein nicht eindeutiger Trend der Niederschlagsentwicklung sowie relativ moderate Temperatur- und damit Verdunstungszunahmen führen dazu, dass es zu keinen bedeutenden Verschlechterungen hinsichtlich der Wasserversorgung kommt, in der nördlichen Steiermark wird sogar eine Niederschlagszunahme ausgewiesen. Auch in den südlichen Regionen kommt es mit Ausnahme des Raumes Hartberg zu keiner Verschlechterung der Wasserversorgung. Hier muss allerdings auch erwähnt werden, dass sich die Wasserbilanz in der Süd- bzw. Südoststeiermark bereits auf einem niedrigen Niveau befindet und jetzt auch schon häufig intensivere Trockenperioden zu beobachten sind. Die Standardabweichung im Mittel aller Rasterzellen ist in den beiden Vergleichsperioden annähernd gleichgeblieben und weist in der Referenzperiode 181 mm und in der Zielperiode 190 mm auf.

Im Gegensatz zu RCP4.5 kommt es im Szenario RCP8.5 auf Grund höherer Verdunstungswerte zu einem deutlicheren Änderungssignal. Während die Referenzperiode in Abbildung 6 weitgehend jener aus Abbildung 3 entspricht, beiden liegt das Modell ICHEC-EC-EARTH zugrunde, zeigt die Zielperiode (Abbildung 7) in der Südoststeiermark einen Rückgang in der Wasserversorgung auf. Die Wasserbilanz in der Obersteiermark folgt auch hier keinem klaren Trend.

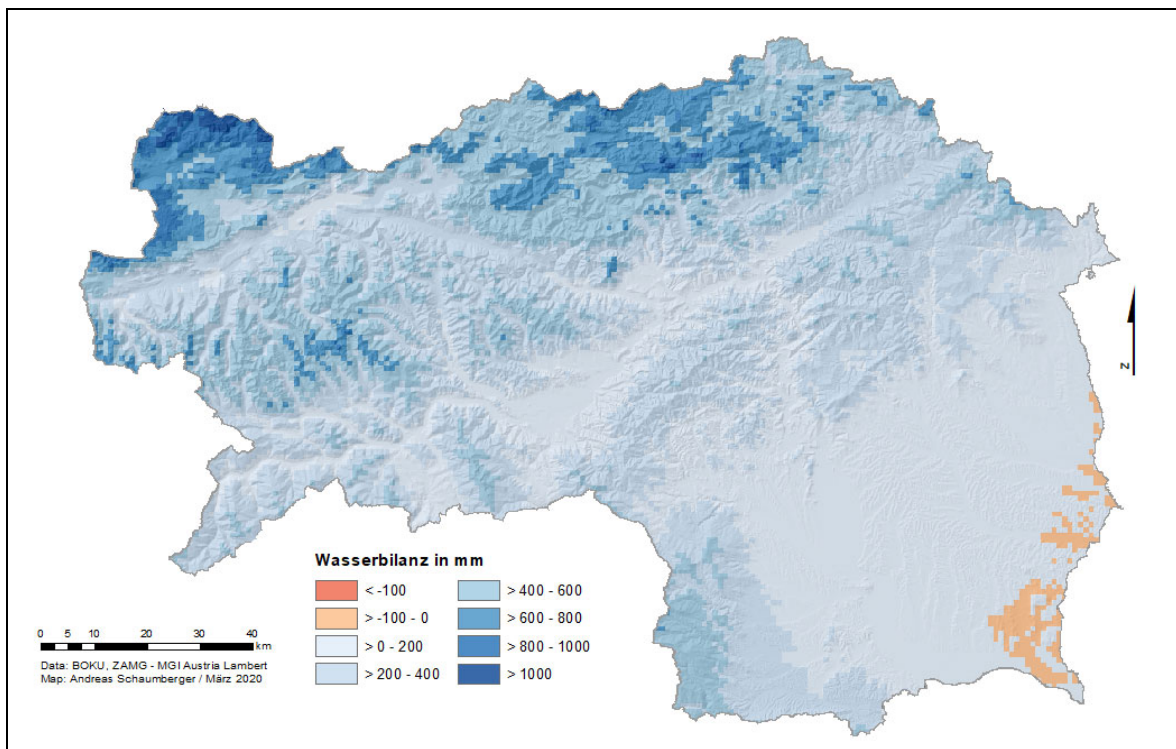


Abbildung 6: Median der klimatischen Wasserbilanz für die Referenzperiode 1981-2010 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP8.5

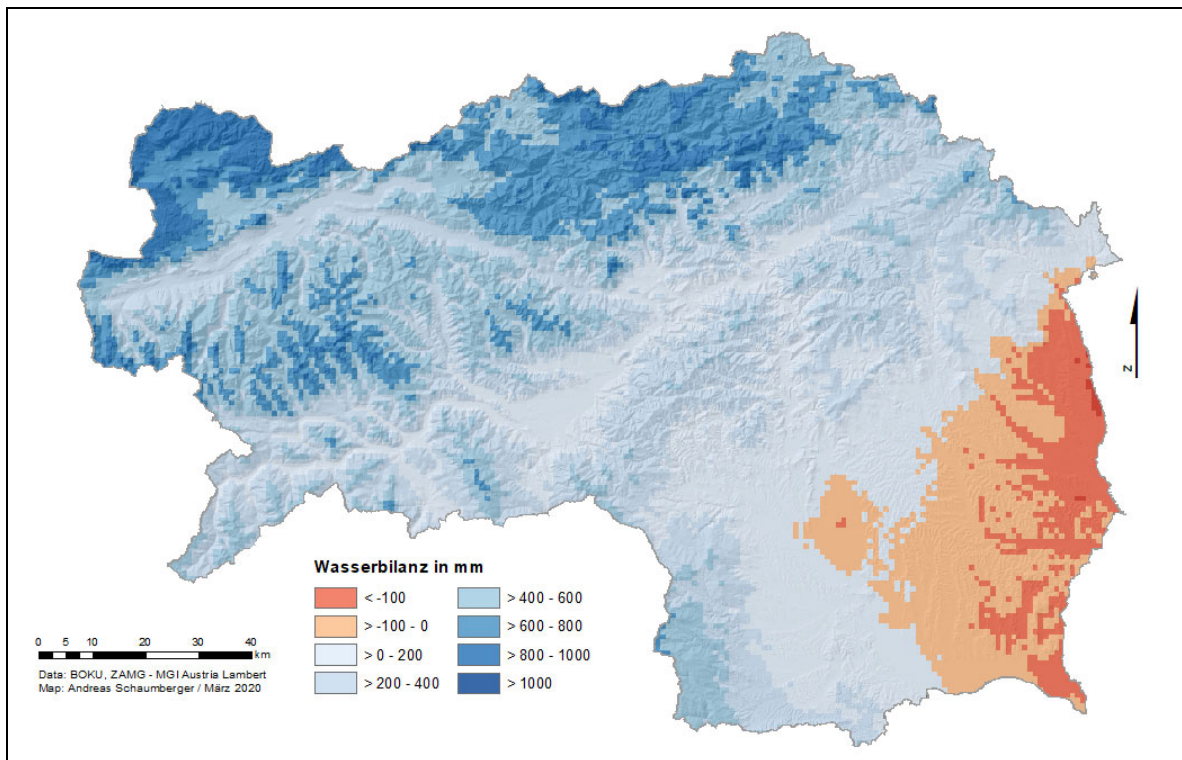


Abbildung 7: Median der klimatischen Wasserbilanz für die Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP8.5

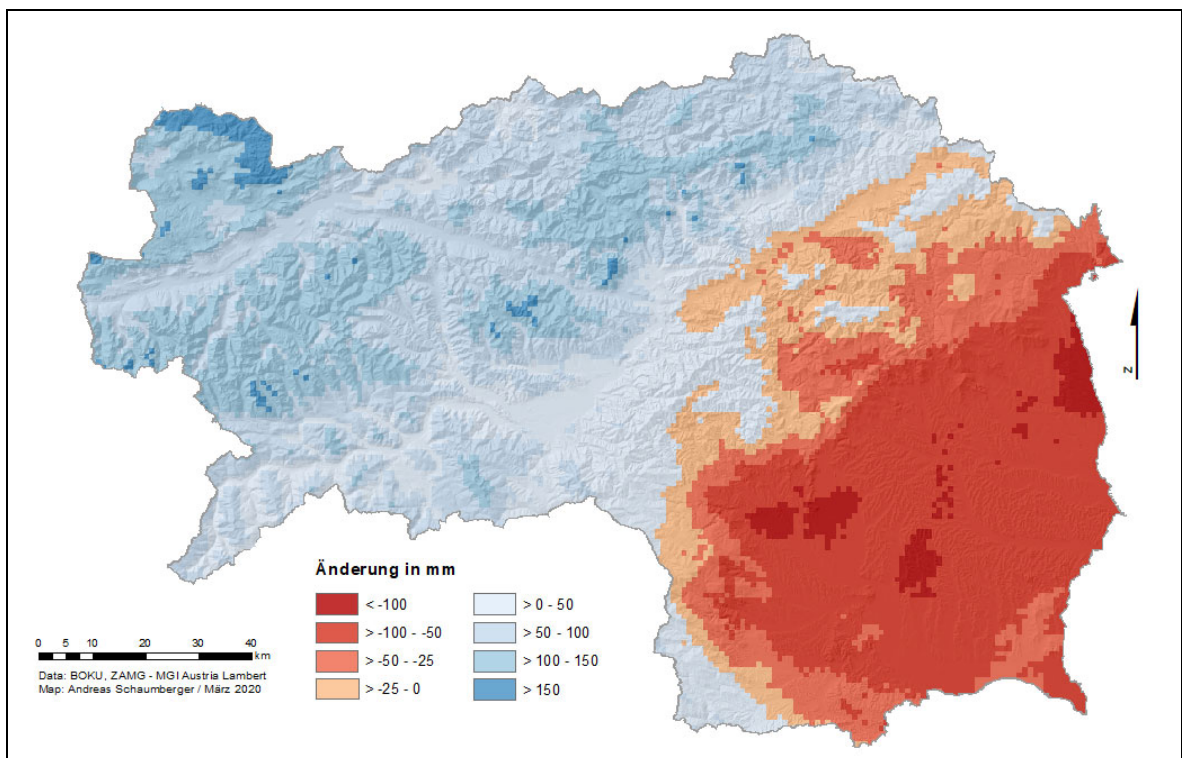


Abbildung 8: Differenz der klimatischen Wasserbilanz zwischen Referenzperiode 1981-2010 und Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP8.5

Die Differenz zwischen Referenz- und Zielperiode in Abbildung 8 zeigt eine klare Trennung der Steiermark in zwei unterschiedliche Regionen, die sich kaum bzw. deutlich verändern werden.

In der Obersteiermark können in diesem RCP8.5-Szenario nahezu gleichbleibende Verhältnisse festgestellt werden. Die Untersteiermark weist großflächig deutliche Rückgänge der natürlichen Wasserverfügbarkeit auf. Die Standardabweichung für die Zielperiode beträgt im Mittel aller Regionen 168 mm. Unter Berücksichtigung des bereits jetzt relativ niedrigen Versorgungsniveaus bedeutet dies für die Landwirtschaft in den südlichen Landesteilen einen markanten Einschnitt. Die Verknappung um weitere 100 mm im langjährigen Mittel bedeutet, dass die Gefahr von ausgedehnten und intensiven Trockenperioden in dieser Region zunehmen wird. Dies stellt für viele landwirtschaftliche Betriebe eine große Herausforderung dar, wo das frühzeitige Ergreifen von Anpassungsmaßnahmen zur Aufrechterhaltung bestehender Landbewirtschaftungsstrukturen als notwendig zu erachten ist.

Für das dritte hier berechnete Szenario, ein MOHC-HadEM2-ES-Modell mit RCP8.5, erhält Trockenheit ein besonderes Gewicht. Gegenüber dem ICHEC-EC-EARTH-Modell (Abbildung 3 und Abbildung 6) ergibt sich dadurch eine unterschiedliche Ausgangssituation (siehe Abbildung 9). Die Südoststeiermark weist eine deutlich negativere Wasserbilanz auf, als dies bei den anderen Szenarien zu beobachten ist. Entscheidend für eine Interpretation der MOHC-Ergebnisse ist die Änderung zwischen Referenz- und Zielperiode, wie sie in Abbildung 11 dargestellt ist. Mit einer mittleren Standardabweichung von 230 (Abbildung 9) bzw. 235 mm (Abbildung 10) ist die Streubreite in diesem Modell etwas höher als bei ICHEC.

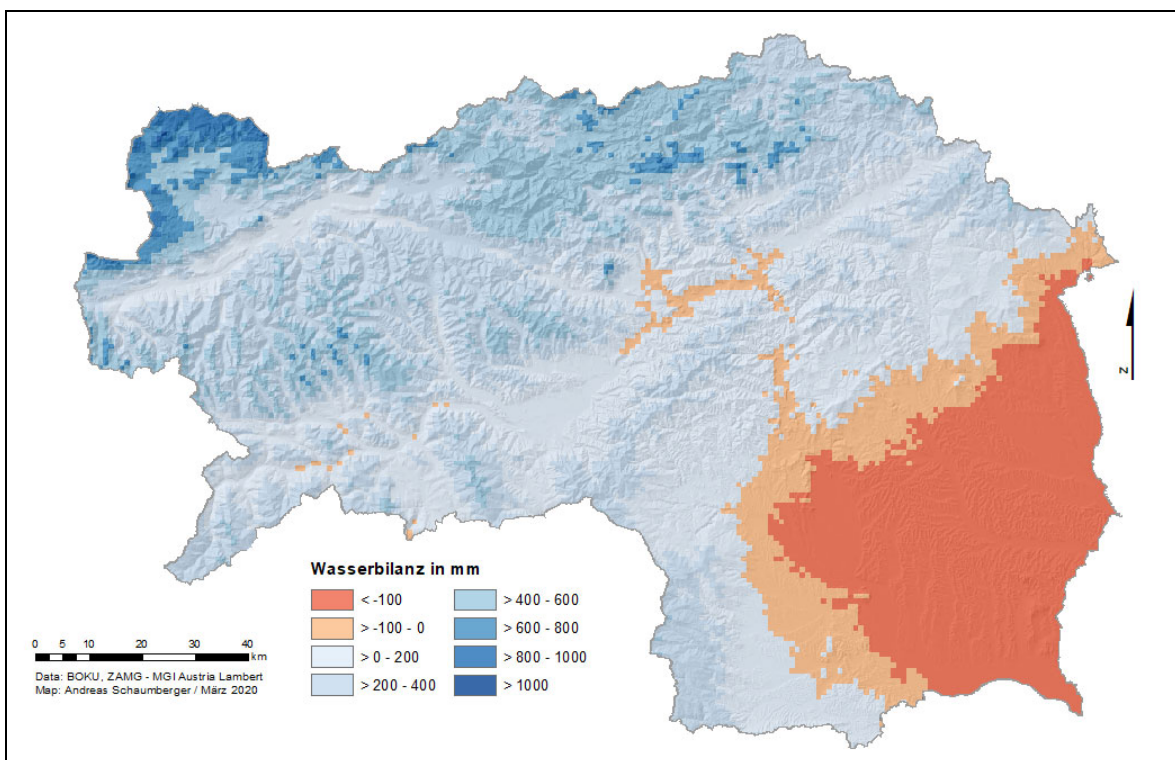


Abbildung 9: Median der klimatischen Wasserbilanz für die Referenzperiode 1981-2010 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells MOHC-HadGEM2-ES RCP8.5

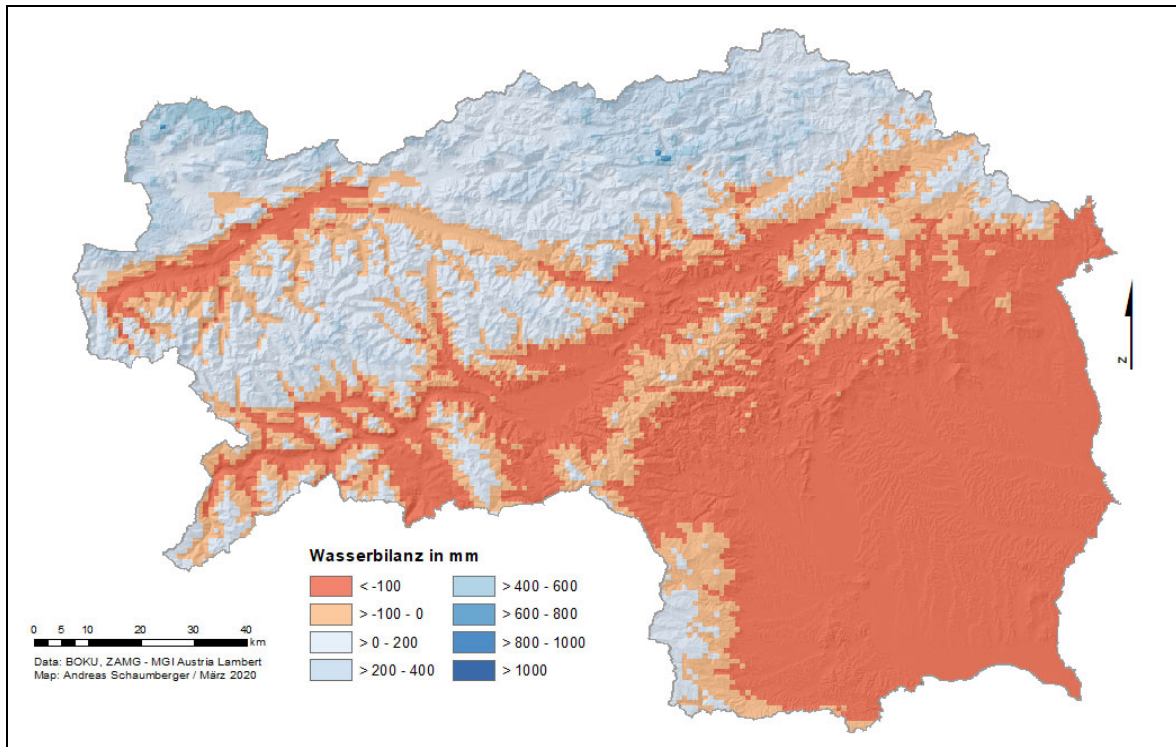


Abbildung 10: Median der klimatischen Wasserbilanz für die Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells MOHC-HadGEM2-ES RCP8.5

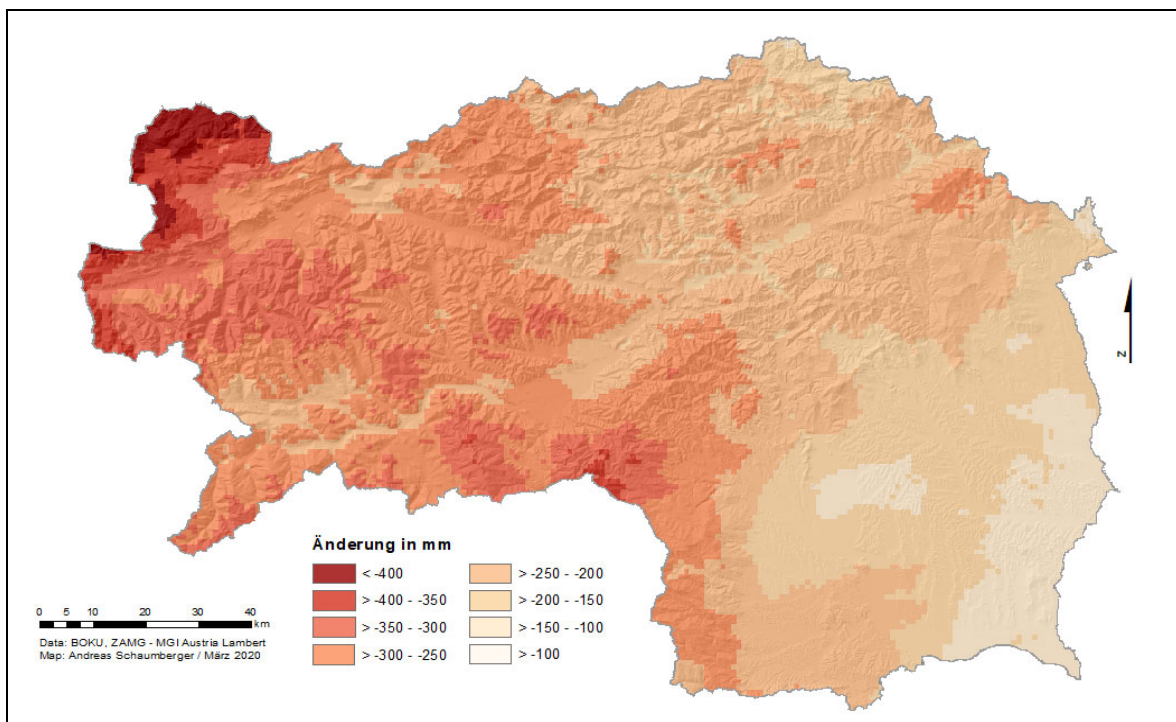


Abbildung 11: Differenz der klimatischen Wasserbilanz zwischen Referenzperiode 1981-2010 und Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells MOHC-HadGEM2-ES RCP8.5

Die Zielperiode (Abbildung 10) weist großflächig negative Wasserbilanzwerte von über 100 mm auf. Im Fall dieses Trockenszenarios bleibt die negative Entwicklung nicht nur auf den Süden des Landes beschränkt, sondern reicht bis zu den großen Tälern der Obersteiermark. Die

Differenzkarte zwischen Referenz- und Zielperiode (Abbildung 11) zeigt ausnahmslos eine Abnahme der Wasserbilanz in der gesamten Steiermark. Während im ohnehin bereits trockenen Süden die Reduktion um die 100 mm beträgt, ähnlich der Situation im ICHEC-RCP8.5-Modell (Abbildung 8), nimmt die Wasserbilanz im Norden mit 300 bis 400 mm vergleichsweise stark ab. Dieses Szenario verdeutlicht, dass klimatisch bedingte Veränderungen der Wasserbilanz die Landwirtschaft im gesamten Land betreffen können. Während im obersteirischen Ennstal beispielsweise gegenwärtig um die 1000 mm Niederschlag fallen, was einer positiven Wasserbilanz von etwa 200 bis 400 mm entspricht, würde die im Szenario projizierte Abnahme eine in Zukunft weitgehend ausgeglichene bzw. leicht negative Bilanz bedeuten. Das wiederum heißt eine starke Steigerung des Dürrerisikos und würde etwa jener Situation entsprechen, die zurzeit im Süden des Landes besteht. Ausreichende Erträge im Grünland als die wichtigste Kulturart des Berggebietes und Grundlage der dort betriebenen Viehwirtschaft wären in den meisten Jahren dieser zukünftigen Periode sehr stark gefährdet.

3.2 Relative Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz

Die Karten in Abbildung 12 bis Abbildung 20 zeigen die Ergebnisse der Berechnung nach Gleichung 20 und sind im Wesentlichen mit den absoluten Ergebnissen im Abschnitt 3.1 vergleichbar. Sie werden nicht gesondert interpretiert, da obige Beschreibungen auch hier gelten.

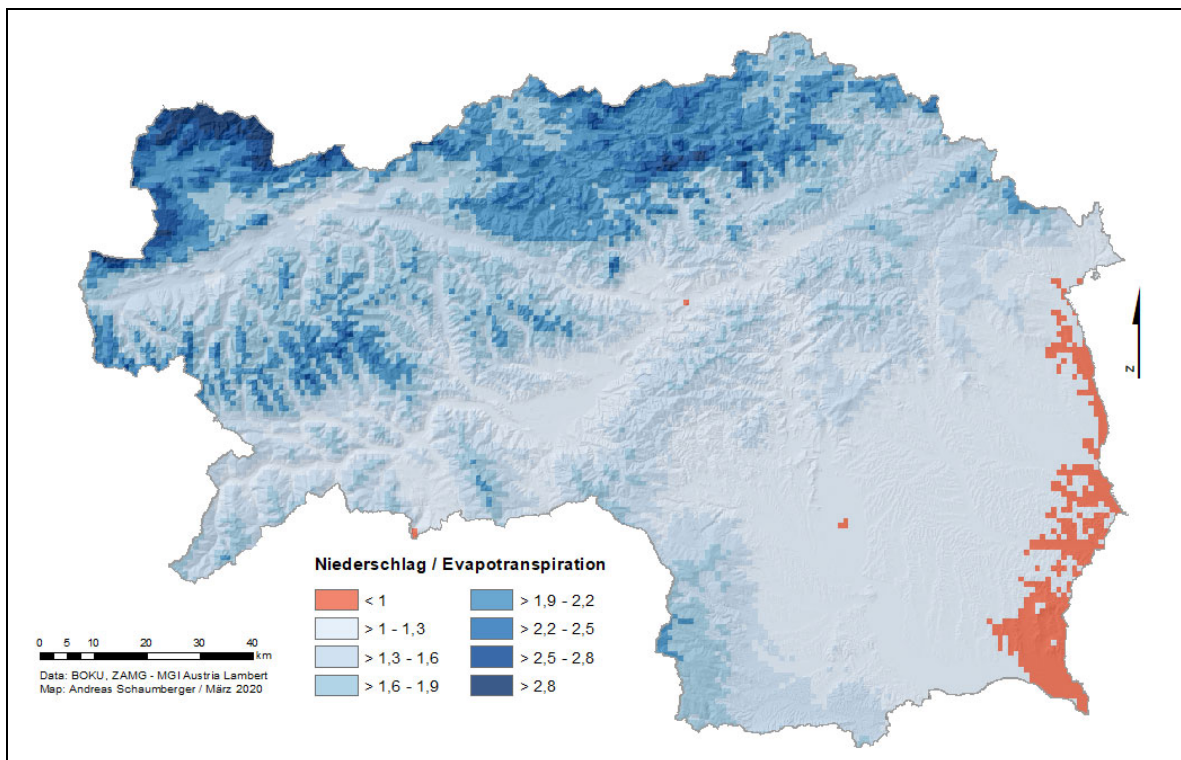


Abbildung 12: Median der relativen klimatischen Wasserbilanz für die Referenzperiode 1981-2010 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP4.5

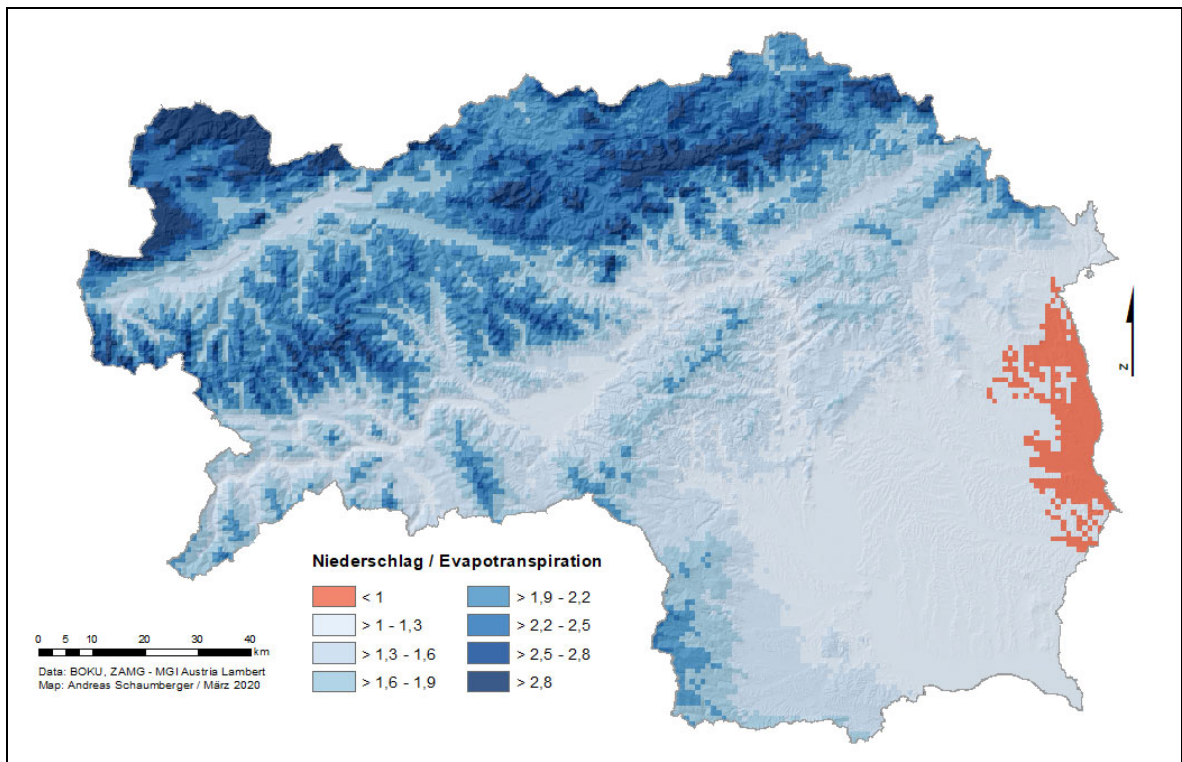


Abbildung 13: Median der relativen klimatischen Wasserbilanz für die Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP4.5

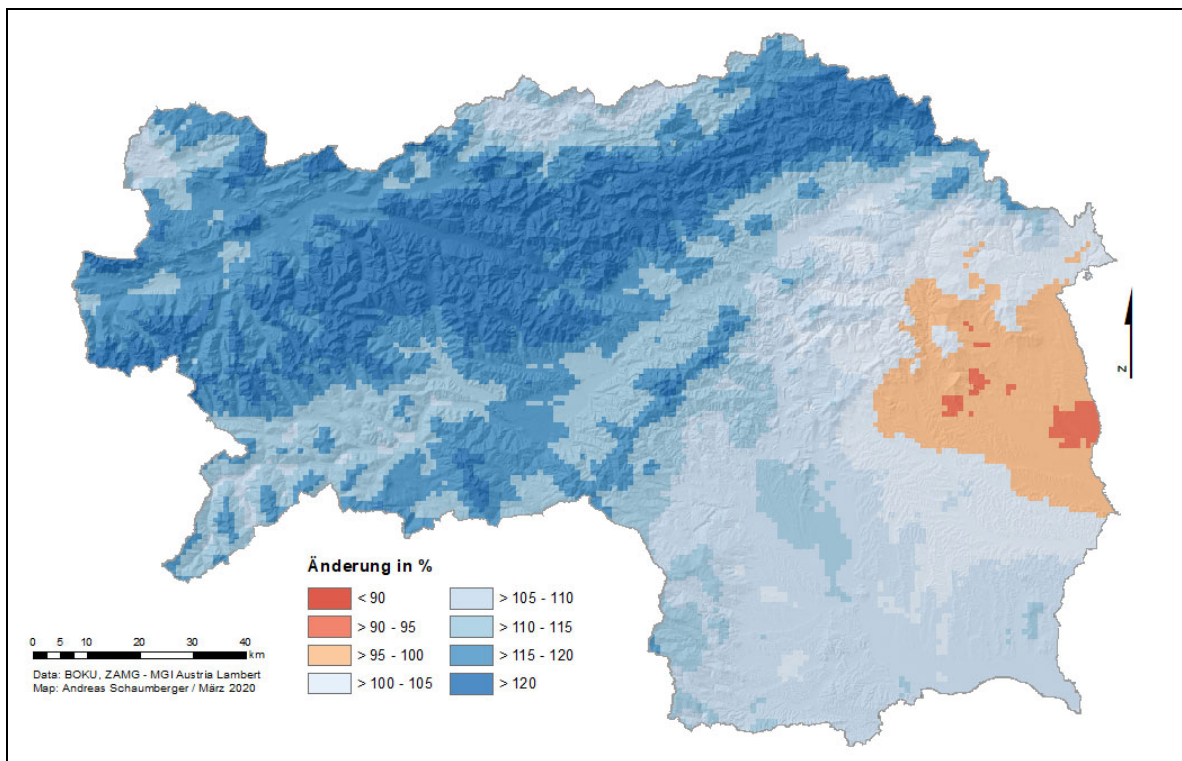


Abbildung 14: Differenz der relativen klimatischen Wasserbilanz zwischen Referenzperiode 1981-2010 und Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP4.5

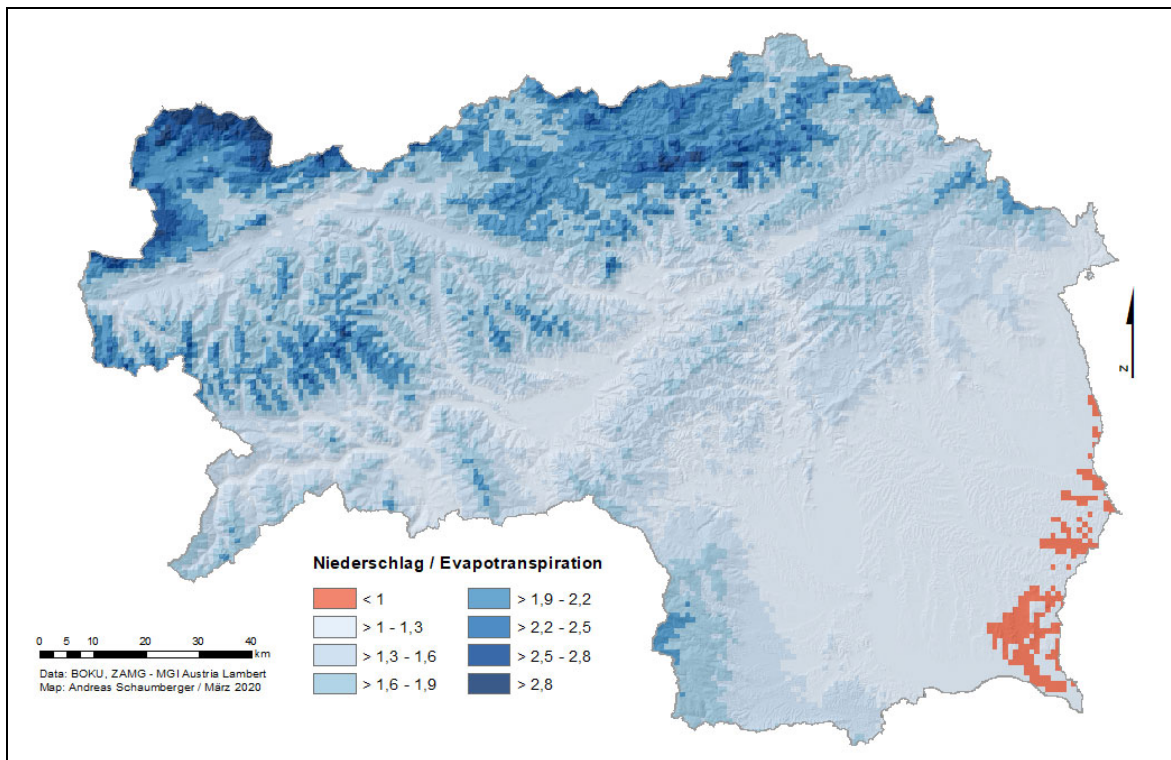


Abbildung 15: Median der relativen klimatischen Wasserbilanz für die Referenzperiode 1981-2010 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP8.5

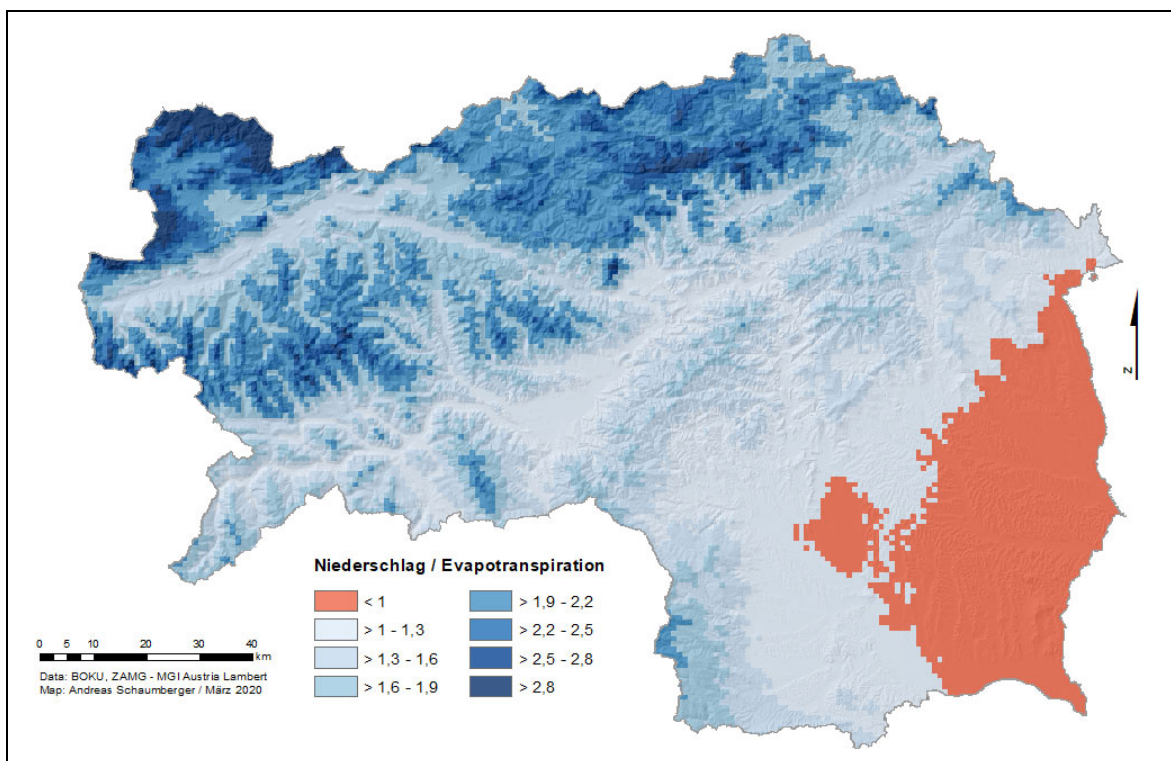


Abbildung 16: Median der relativen klimatischen Wasserbilanz für die Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP8.5

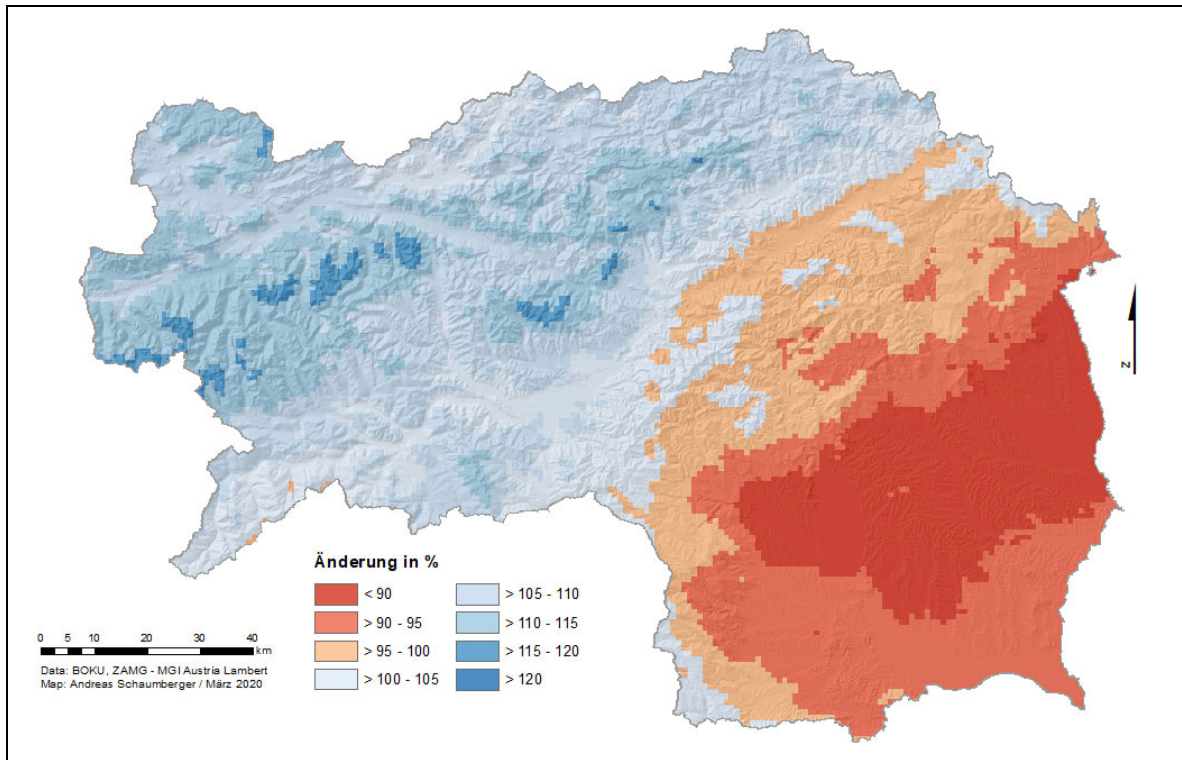


Abbildung 17: Differenz der relativen klimatischen Wasserbilanz zwischen Referenzperiode 1981-2010 und Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells ICHEC-EC-EARTH RCP8.5

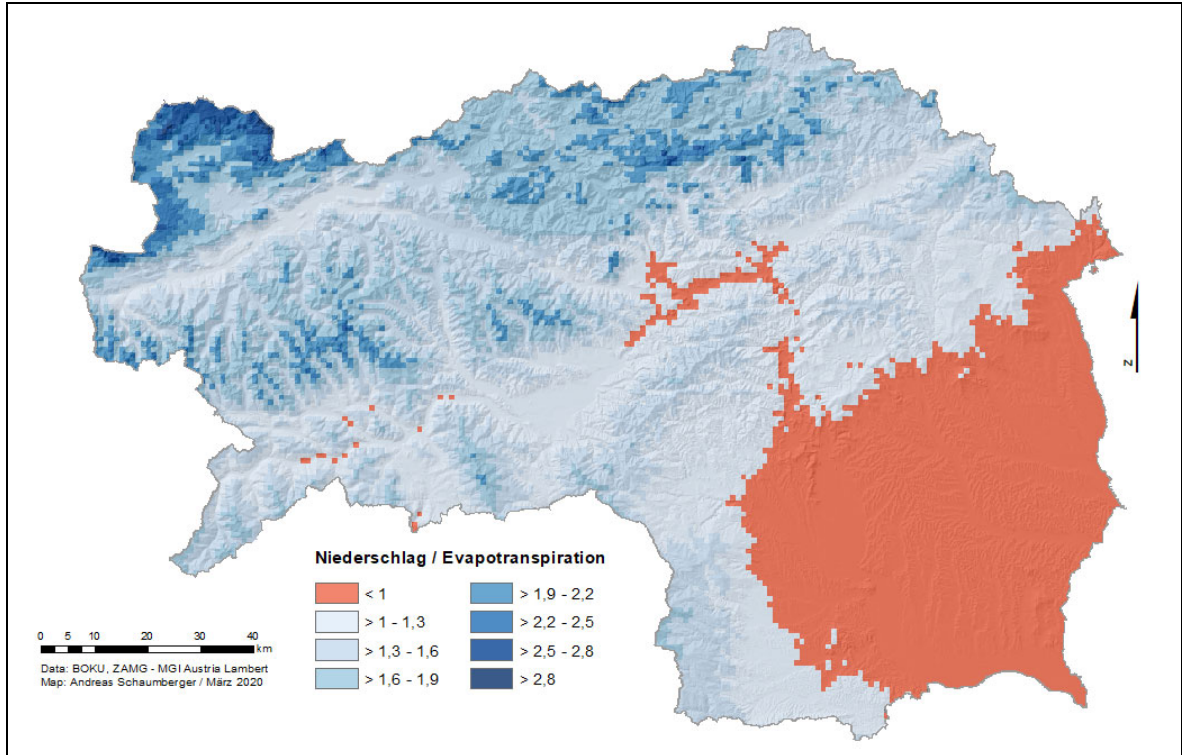


Abbildung 18: Median der relativen klimatischen Wasserbilanz für die Referenzperiode 1981-2010 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells MOHC-HadGEM2-ES RCP8.5

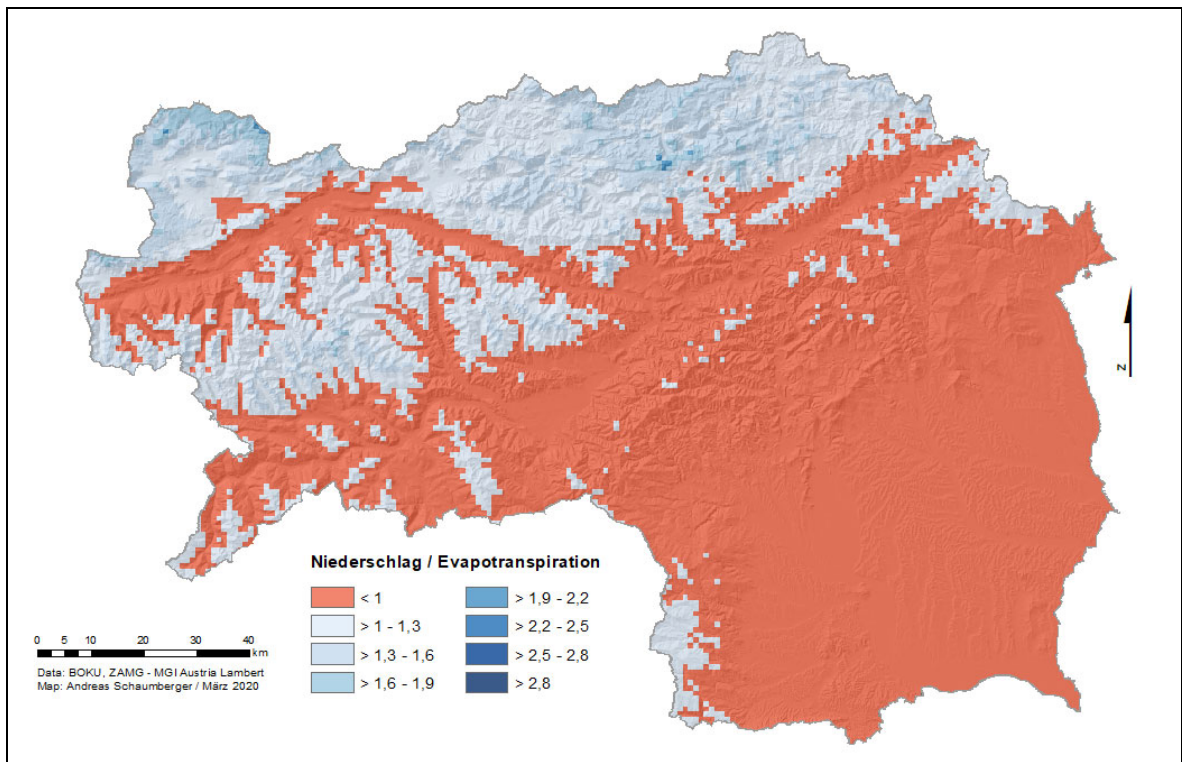


Abbildung 19: Median der relativen klimatischen Wasserbilanz für die Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells MOHC-HadGEM2-ES RCP8.5

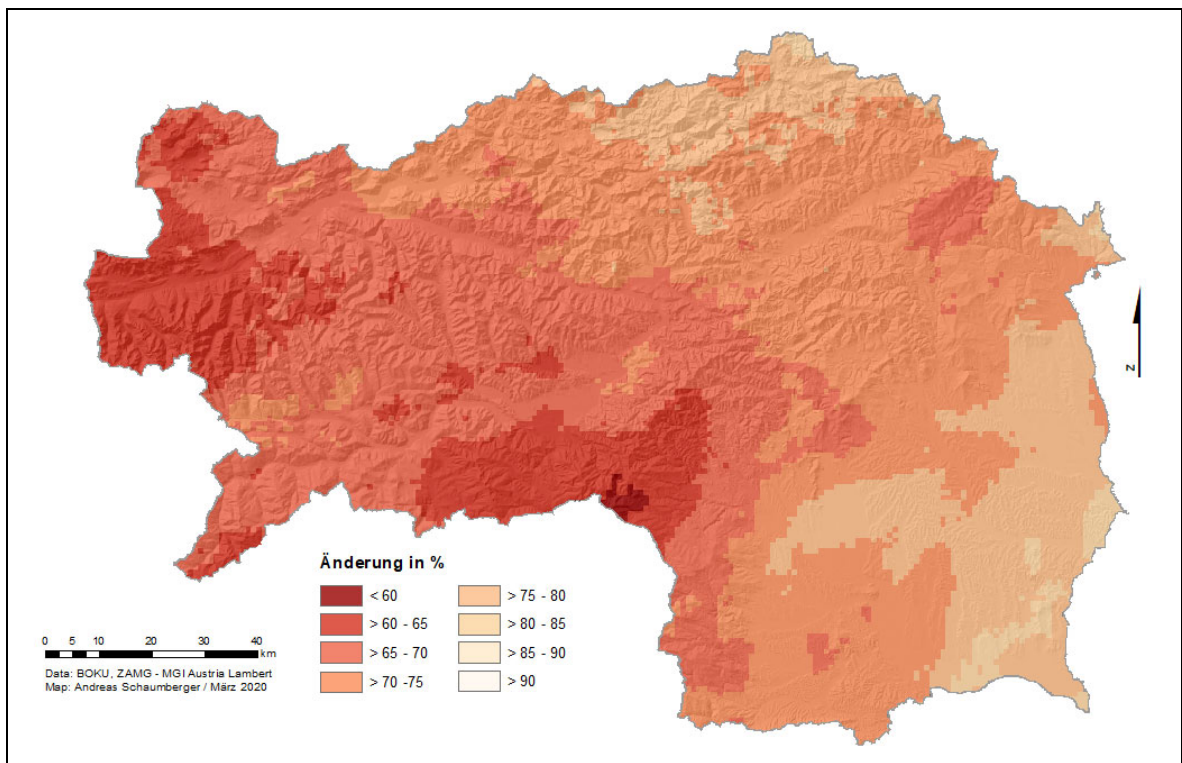


Abbildung 20: Differenz der relativen klimatischen Wasserbilanz zwischen Referenzperiode 1981-2010 und Zielperiode 2071-2100 des fehlerkorrigierten ÖKS15 EURO-CORDEX Modells MOHC-HadGEM2-ES RCP8.5

4 Schlussfolgerungen

Klimaszenarien beschreiben mögliche Projektionen für die Zukunft und sind hilfreich, wenn es darum geht, wahrscheinliche Entwicklungen als Grundlage für früh- und rechtzeitigen Anpassungsstrategien heranzuziehen. Die Eintrittswahrscheinlichkeiten der in diesem Projekt verwendeten Szenarien stehen gleichwertig nebeneinander, sie repräsentieren mittlere Modellläufe unter den gegebenen Annahmen von RCP4.5 und RCP8.5. Allein das Trockenszenario MOHC-HadGEM2-ES setzt verstärkt auf Trockenheit, eine Gefahr, die besonders für die Landwirtschaft relevant ist und bereits in den vergangenen Jahren zur ernststen Bedrohung in manchen Regionen geworden ist.

Ausgehend von globalen Klimamodellen mit einigen hundert Quadratkilometern Auflösung, sind mit ÖKS15 Daten verfügbar, die durch dynamisches und statistisches Downscaling soweit regionalisiert wurden, dass sie auch für kleinräumige Auswertungen verwendet werden können. Zudem wurden die Daten mit Hilfe von Messdaten fehlerkorrigiert und damit von systematischen Fehlern weitgehend bereinigt – eine wichtige Voraussetzung für die Aufbereitung von Klimaszenarien für die Erforschung von konkreten Auswirkungen des Klimawandels. Im vorliegenden Projekt wurden diese räumlich hoch aufgelösten und fehlerkorrigierten Daten dazu verwendet, um die zukünftige Wasserverfügbarkeit für die Landwirtschaft abschätzen zu können. Mit der klimatischen Wasserbilanz, ein wichtiger agrarmeteorologischer Parameter, wurde ein einfacher Ansatz gewählt, der im Gegensatz zur einer vollständigen Berechnung der Bodenwasserbilanz nur Anhaltspunkte zum Trend einer zukünftigen Entwicklung geben kann. Die Bewältigung von Rechenprozessen auf einfachen Computern sowie die Beschränkung der Komplexität auf wenige Modellparameter erfordert die Reduzierung auf maßgebliche Änderungssignale, die hauptsächlich in den Klimadaten enthalten sind. Aus diesem Grund werden wichtige Elemente der Wasserbilanz wie beispielsweise die Oberflächenstruktur mit ihrem Oberflächenabflussverhalten, die Bodeneigenschaften sowie die Grundwassersituation nicht einbezogen. Dies muss bei der Interpretation der Ergebnisse mit beachtet werden.

Die klimatische Wasserbilanz als Gegenüberstellung von Niederschlag und Verdunstung ist kein Parameter, aus dem sich ein Wasserbedarf für landwirtschaftliche Kulturen ableiten lässt. Die hier berechneten absoluten Ergebnisse (Abschnitt 3.1) eignen sich deshalb nicht für eine Bedarfsanalyse. Lediglich die relativen Veränderungen zwischen Referenz- und Zielperiode können dafür genutzt werden, aus einer Kombination von aktueller Wasserverfügbarkeit und der Höhe des Wasserbedarfs bestimmter landwirtschaftlicher Kulturen auf die zukünftige Bedarfsdeckung unter der in Zukunft gegebenen Wasserverfügbarkeit zu schließen. Damit bilden ausschließlich die in den Abbildungen 14, 17 und 20 dargestellten relativen Veränderungen der klimatischen Wasserbilanz die Grundlage für weitere Anwendungen und Analysen.

5 Quellenverzeichnis Klimadaten

Leuprecht et al (2017). ÖKS15 Bias Corrected EURO-CORDEX Model Temperature: tas_ICHEC-EC-EARTH_RCP4.5_r1i1p1_KNMI-RACMO22E, Version 2. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/f2cd5e8a>. [February 28, 2020]

Leuprecht et al (2016). ÖKS15 Bias Corrected EURO-CORDEX Model Radiation: rsds_ICHEC-EC-EARTH_RCP4.5_r1i1p1_KNMI-RACMO22E, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/41438ff0>. [February 28, 2020]

Leuprecht et al (2016). ÖKS15 Bias Corrected EURO-CORDEX Model Precipitaion: pr_ICHEC-EC-EARTH_RCP4.5_r1i1p1_KNMI-RACMO22E, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/b42e7d12>. [February 28, 2020]

Nadeem et al. (2019). Bias Corrected EURO-CORDEX Model for Relative Humidity on ÖKS15 Grid: ICHEC-EC-EARTH_rcp45_r1i1p1_KNMI-RACMO22E, Version 2. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/b4dfbba3>. [February 28, 2020]

Nadeem et al. (2018). Bias Corrected EURO-CORDEX Model for Wind Speed on ÖKS15 Grid: ICHEC-EC-EARTH_rcp45_r1i1p1_KNMI-RACMO22E, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/b7edb975>. [February 28, 2020]

Leuprecht et al (2017). ÖKS15 Bias Corrected EURO-CORDEX Model Temperature: tas_ICHEC-EC-EARTH_RCP8.5_r1i1p1_KNMI-RACMO22E, Version 2. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/86da4428>. [February 28, 2020]

Leuprecht et al (2016). ÖKS15 Bias Corrected EURO-CORDEX Model Radiation: rsds_ICHEC-EC-EARTH_RCP8.5_r1i1p1_KNMI-RACMO22E, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/15de2c80>. [February 28, 2020]

Leuprecht et al (2016). ÖKS15 Bias Corrected EURO-CORDEX Model Precipitaion: pr_ICHEC-EC-EARTH_RCP8.5_r1i1p1_KNMI-RACMO22E, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/1c30814d>. [February 28, 2020]

Nadeem et al. (2019). Bias Corrected EURO-CORDEX Model for Relative Humidity on ÖKS15 Grid: ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r1i1p1_KNMI-RACMO22E, Version 2. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/766d91a9>. [February 28, 2020]

Nadeem et al. (2018). Bias Corrected EURO-CORDEX Model for Wind Speed on ÖKS15 Grid: ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r1i1p1_KNMI-RACMO22E, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/61ccdb49>. [February 28, 2020]

Leuprecht et al (2017). ÖKS15 Bias Corrected EURO-CORDEX Model Temperature: tas_MOHC-HadGEM2-ES_RCP8.5_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17, Version 2. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/472220c1>. [February 28, 2020]

Leuprecht et al (2016). ÖKS15 Bias Corrected EURO-CORDEX Model Precipitation: pr_MOHC-HadGEM2-ES_RCP8.5_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/f6748f11>. [February 28, 2020]

Leuprecht et al (2016). ÖKS15 Bias Corrected EURO-CORDEX Model Radiation: rsds_MOHC-HadGEM2-ES_RCP8.5_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/4ff0d66e>. [February 28, 2020]

Nadeem et al. (2018). Bias Corrected EURO-CORDEX Model for Relative Humidity on ÖKS15 Grid: MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/b73b7a18>. [February 28, 2020]

Nadeem et al. (2018). Bias Corrected EURO-CORDEX Model for Wind Speed on ÖKS15 Grid: MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17, Version 1. Vienna, Austria. CCCA Data Centre. PID: <https://hdl.handle.net/20.500.11756/085b993d>. [February 28, 2020]

6 Literaturverzeichnis

- Allen, R.G. (2000): Using the FAO-56 dual crop coefficient method over an irrigated region as part of an evapotranspiration intercomparison study. *Journal of Hydrology* 229 (1-2), 27-41.
- Allen, R.G.; Walter, I.A.; Elliott, R.; Howell, T.; Itenfisu, D. und Jensen, M.E. (2005): *The ASCE Standardized Reference Evapotranspiration Equation*, American Society of Civil Engineers, Reston, VA, USA, 216 S.
- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D. und Smith, M. (1998): *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Papers. Paper No 56, FAO, Rome, 326 S.
- Chimani, B.; Matulla, C.; Eitzinger, J.; Hiebl, J.; Hofstätter, M.; Kubu, G.; Maraun, D.; Mendlik, T.; Schellander-Gorgas, T. und Thaler, S. (2019): *Guideline zur Nutzung der ÖKS15-Klimawandelsimulationen sowie der entsprechenden gegitterten Beobachtungsdatensätze*. CCCA, Wien, 102 S.
- Deutscher Wetterdienst (1976): *Aspirations-Psychrometer-Tafeln*, 5. Auflage, Vieweg Verlag, Braunschweig.
- IPCC (2016): *Klimaänderung 2014: Synthesebericht, Beitrag der Arbeitsgruppen I, II und III zum Fünften Sachstandsbericht des Zwischenstaatlichen Ausschusses für Klimaänderung (IPCC)*, Deutsche IPCC Koordinierungsstelle, Bonn, 164 S.
- Jacob, D.; Petersen, J.; Eggert, B.; Alias, A.; Christensen, O.; Bouwer, L.; Braun, A.; Colette, A.; Déqué, M.; Georgievski, G.; Georgopoulou, E.; Gobiet, A.; Menut, L.; Nikulin, G.; Hagensler, A.; Hempelmann, N.; Jones, C.; Keuler, K.; Kovats, S.; Kröner, N.; Kotlarski, S.; Kriegsmann, A.; Martin, E.; 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. und Yiou, P. (2013): *EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research*. *Regional Environmental Change*, 1-16.
- Lalic, B.; Eitzinger, J.; Dalla Marta, A.; Sremac, A.F.; Orlandini, S. und Pacher, B. (2018): *Agrarmeteorologie und Agrarklimatologie*, Firenze University Press, Firenze, Italy, 338 S.
- Maraun, D. und Widmann, M. (2018): *Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research*, Cambridge University Press, Cambridge, 341 S.
- Milly, P.C.D. und Dunne, K.A. (2016): Potential evapotranspiration and continental drying. *Nature Climate Change* 6, 946.
- ÖKS15 (2016): *Klimaszenarien für Österreich, Daten - Methoden - Klimaanalyse*. ÖKS15-Arbeitsgruppe, Wien, 358 S.
- Switanek, M.B.; Troch, P.A.; Castro, C.L.; Leuprecht, A.; Chang, H.-I.; Mukherjee, R. und Demaria, E.M.C. (2017): Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes. *Hydrology and Earth System Sciences* 21 (6), 2649-2666.
- Themeßl, M.J.; Gobiet, A. und Leuprecht, A. (2011): Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *31 (10)*, 1530-1544.

HBLFA Raumberg-Gumpenstein

Landwirtschaft

Raumberg 38, 8952 Irdning-Donnersbachtal

raumberg-gumpenstein.at