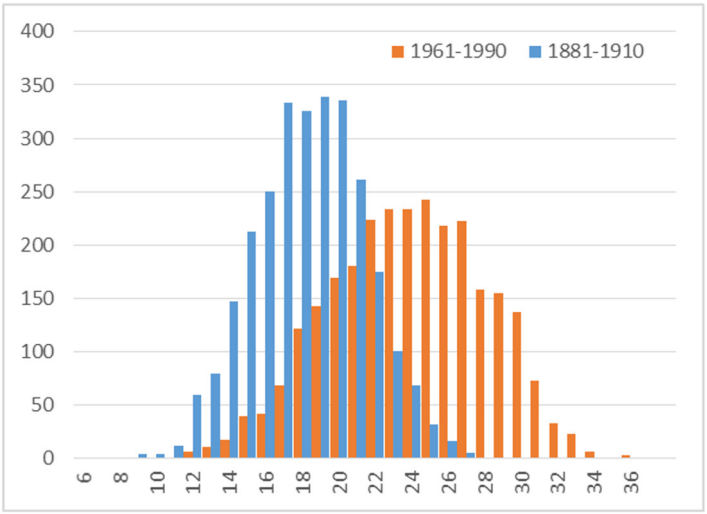
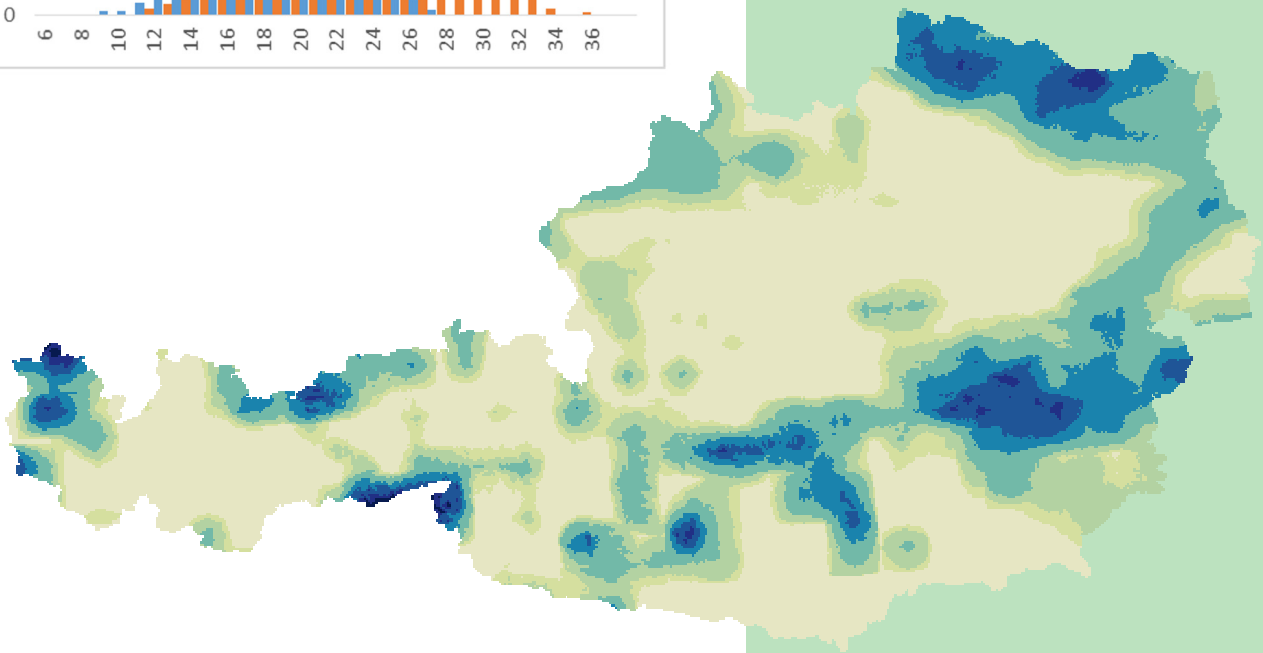
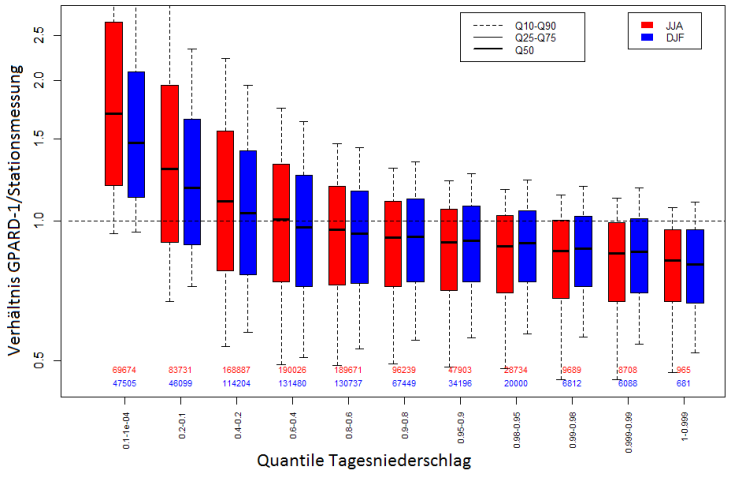
# GUIDELINE

## ZUR NUTZUNG DER ÖKS15-KLIMAWANDELSIMULATIONEN SOWIE DER ENTSPRECHENDEN GEGITTERTEN BEOBACHTUNGSDATENSÄTZE







Barbara Chimani
Christoph Matulla
Josef Eitzinger
Johann Hiebl
Michael Hofstätter
Gerhard Kubu
Douglas Maraun
Thomas Mendlik
Theresa Schellander-Gorgas
Sabina Thaler

# Inhalt


**Einleitung....4**
Abkürzungsverzeichnis und Begriffserklärung....5
Zeichenerklärung....7
**Teil 1: Allgemeine Informationen....8**
Klima und Klimaänderung....8
Klimasystem....10
Menschlicher Einfluss....10
Szenarien....11
Klimamodelle....13
Globale Klimamodelle (GCMs)....13
Effektive Auflösung....14
Downscaling....15
Dynamisches Downscaling....15
Regionale Klimamodelle (RCMs)....15
Statistisches Downscaling....15
Gegitterte Klimabeobachtungsdaten....17
Unsicherheiten....18
Modelldaten....18
Gegitterte Beobachtungsdaten....20
Impaktmodelle am Beispiel eines Getreidewachstumsmodells....21

**Teil 2: Evaluierung der verwendeten gegitterten Beobachtungsdaten und der ÖKS15 Klimasimulationen....22**
Einführendes zu den ÖKS15-Daten....22
Evaluation der gegitterten Beobachtungsdaten....22
Wie groß sind die mittleren Fehler....23
Ändert sich die Qualität über die Zeit hinweg?....24
Wird die Qualität des Datensatzes von Jahreszeiten und Wetterlagen beeinflusst?....25
Welche Bedeutung hat die effektive Auflösung (im Vergleich zur technischen Auflösung)?....27
Welche Auswirkung hat der Glättungseffekt?....29
Ist die Qualität in ganz Österreich gleich gut?....31
Wie gut ist die Qualität abgeleiteter Indizes?....32
Wie gut sind die ÖKS15-Datensätze im Vergleich zu anderen Gitterdatensätzen?....35
Evaluation der Klimasimulationen....38
Beträgt die räumliche Auflösung der ÖKS15-Daten tatsächlich 1 km?....41
Simulieren die ÖKS15-Daten die beobachteten Großwetterlagen?....43
Unterscheidet sich das historische Klima der ÖKS15-Daten von den Beobachtungen?....45
Wie gut werden die hergeleiteten Indizes der ÖKS15-Simulationen dargestellt?....46
Welche ÖKS15 Simulationen soll ich für meine Analyse verwenden?....49
Werden lokale Auswirkungen der Großwetterlagen richtig dargestellt?....51
Wie wurde PET berechnet?....53

Die ÖKS15-Daten in Anwendung....53
Welche Unsicherheiten treten bei Verwendung der ÖKS15-Projektionen als Modelleingabedaten auf (Untersuchungszeitraum 1981-2010)?....55
Welchen Einfluss hat eine unterschiedliche räumliche Auflösung der Klimaszenarien auf ausgewählte simulierte Indikatoren und Ergebnisse?....57
Wie entwickelt sich der Ernteertrag im Klimawandel und warum?....61

**Teil 3: Fragen aus der Praxis....65**
Wo finde ich Daten und Beratung?....65
Welche Beobachtungsdaten sind für meine Fragestellung am besten geeignet?....65
Welche unterschiedliche Arten von Klimamodelldaten gibt es?....67
Welches Modell ist für meine Anwendung und meine Region am besten geeignet?....68
Wie wichtig ist welches Klimaszenario?....70
Muss ich unterschiedliche Klimaprojektionen zu verschiedenen Szenarien verwenden?....70
Was tun, wenn andere als die im Rahmen von ÖKS15 bereitgestellten Parametern benötigt werden?....71
Was kann ich tun, wenn es in meinem Untersuchungsgebiet keine Stationsdaten gibt?....71
Warum fehlen in den Klimamodelldaten ein paar Tage?....72
Was ist netcdf (*.nc) und wie kann ich damit arbeiten?....72
Wie kann ich auf ÖKS15-Daten zugreifen?....73
Wie kann ich die Qualität meiner Impaktstudie verbessern?....73

**Anhänge....74**
Referenzen....74
Quellenverzeichnis....74
Weiterführende Literatur....75
Auswahl an Providern von Klimadaten....79
Informationen zu Modellfehlern....80
Weitere Grafiken zur Klimamodellevaluation....80
Ad: Simulieren die ÖKS15 Daten die beobachteten Großwetterlagen?....80
Ad: Wie gut werden die hergeleiteten Indizes der ÖKS15 Simulationen dargestellt?....83
Ad: Wie gut werden die hergeleiteten Indizes der ÖKS15 Simulationen dargestellt? (nach Regionen)....86
Ad: Welche ÖKS15 Simulationen soll ich für meine Analyse verwenden?....91

# EINLEITUNG

Ziel dieses Dokumentes ist es, Hilfestellung zur optimalen Nutzung der im Projekt „ÖKS15-Klimaszenarien für Österreich“ erstellten Klimaszenarien zu bieten. Diese Basisdaten sind über das CCCA Datenzentrum für die Klima- und Klimafolgenforschung frei zugänglich. Zum einen soll damit die Belastbarkeit dieses Datensatzes dargestellt werden, damit darauf aufbauende Arbeiten vertrauenswürdiger gestaltet werden können. Zum anderen, wollen wir in diesem Dokument auch generelle Informationen zur Klimamodellierung geben, die die Grenzen der Anwendbarkeit der untersuchten Datensätze begründen, diese dem Datennutzer verständlich machen und Hilfestellung bei immer wiederkehrenden Fragen bezüglich der Nutzung von Modell- und Beobachtungsdaten bieten.

Im ersten Teil des Dokumentes sind allgemeine Informationen zu Klimamodellen, Downscalingmethoden und Analysen zu finden.

Im zweiten Teil sind die Ergebnisse der Evaluation der ÖKS15-Modelldaten, sowie der dabei verwendeten gegitterten Beobachtungsdaten zu finden. Information zu den Methoden mit denen die Daten erzeugt wurden, können im ÖKS15-Endbericht (Chimani et al., 2016) nachgelesen werden.

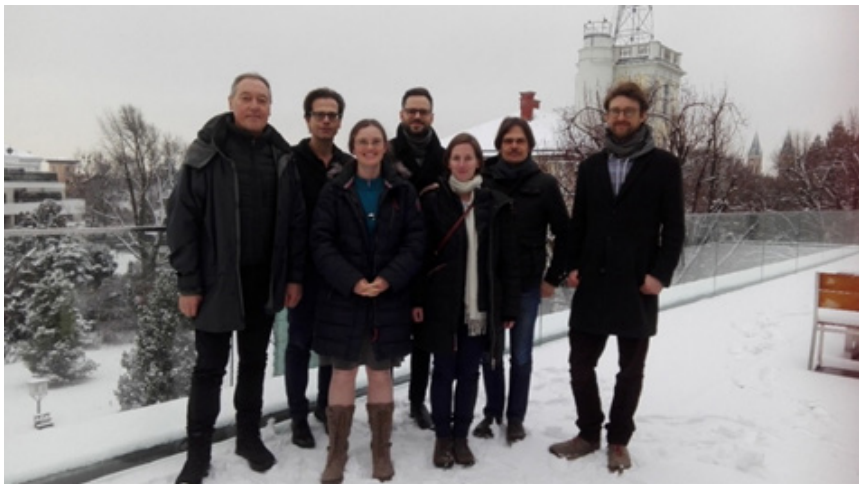
Im dritten Teil sind gesammelte Fragen aus der Praxis zusammengeführt und beantwortet. Der Fragenkatalog ergab sich aus der im Projekt durchgeführten Internetumfrage, sowie dem ersten Projektworkshop.

Weiters wurde beschlossen, eine WIKI-Seite am CCCA einzurichten, auf der im Laufe der Zeit bekannt werdende Schwierigkeiten in dem einen oder anderen in ÖKS15 verwendeten Modelllauf in Zukunft zu finden sein sollen.

Wir hoffen, mit dieser Arbeit im Rahmen von STARC-Impact einen Beitrag zu einer erfolgreichen Klimaimpakt- und Anpassungsforschung in Österreich zu leisten, sowie die wichtigsten Fragen hinsichtlich der Verwend- und Anwendbarkeit der untersuchten Datensätze klären zu können.

Wir wünschen viel Erfolg bei den geplanten Untersuchungen!

Das STARC-Impact-Projektteam



Diese Arbeit ist das Ergebnis des ACRP-Projektes „STARC-Impact“ (“Supporting the Austrian Research Community in using recent Climate Change Projections for Climate Impact Studies“, KR15AC8K12604).

## Abkürzungsverzeichnis und Begriffserklärung

| Abkürzung | Erklärung |
|---|---|
| **AIT** | Austrian Institute of Technology |
| **BOKU** | Universität für Bodenkultur Wien |
| **CCCA** | Climate Change Centre Austria |
| **COSMO-CLM CCLM** | Name eines regionalen Klimamodells (Consortium for Small Scale Modelling – Climate) |
| **CORDEX** | Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment, Internationale Initiative zur Erstellung regionaler Klimasimulationen |
| **COST Action** | Möglichkeit der Zusammenarbeit zu verschiedenen wissenschaftlichen Frage-stellungen |
| **DJF** | Winter (Dezember, Jänner, Feber) |
| **ECMWF** | Europäisches Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage |
| **ENSEMBLE** | Name eines internationalen Projektes zum Ensembleansatz in der Klima-modellierung , das auch eine Reihe an Klimaprojektionen generiert hat. |
| **EOF** | Empirische Orthogonal Funktion (multivariate statistische Verfahren) |
| **ERA-Interim** | Name von Reanalysen des ECMWF mit Daten ab 1979 |
| **EURO-CORDEX** | Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment-European Domain: Internationale Initiative zur Erstellung regionaler Klimasimulationen für Europa, Basis der ÖKS15-Daten |
| **GCOS** | Global Climate Observing System |
| **GCM** | Globales Klimamodell (Global Climate Model) |
| **GERICS** | Climate Service Center Germany |
| **IPCC** | Intergovernmental Panel on Climate Change (UNO Organisation) |
| **INCA** | Integrated Nowcasting through comprehensive analysis, Operationelle Analyse und Nowcastingsystem der ZAMG |
| **IS92** | IPCC Emissionszenarien (verwendet im ersten und zweiten Sachstandsbericht) |
| **JJA** | Sommer (Juni, Juli, August) |
| **MAM** | Frühling (März, April, Mai) |
| **MAE** | mittlerer absoluter Fehler |
| **ME** | mittlerer Fehler |
| **NCAR** | National Center for Atmospheric Research (Amerikanisches Forschungszentrum) |
| **RR** | Niederschlag |
| **SON** | Herbst (September, Oktober, November) |
| **SRES** | Special Report on Emissions Scenarios (Name älterer Emissionsszenarien, verwendet im dritten und vierten IPCC Sachstandsbericht) |
| **Tn** | Temperaturminimum |
| **Tx** | Temperaturmaximum |
| **PET** | Potentielle Evapotranspiration (maximale mögliche Verdunstung unter der Annahme, dass ausreichend Flüssigkeit zur Verfügung steht) |
| **ppm** | parts per million, Einheit für Konzentrationsangaben |
| **RCA** | Name eines regionalen Klimamodells |
| **RCM** | regionales Klimamodell (Regional Climate Model) |

| | |
|---|---|
| **RCP** | Representative Concentration Pathway (aktuelle Emissionsszenarien, verwendet im fünften IPCC Sachstandsbericht) |
| **RMSE** | Root-mean-square error, Verifikationsmaß |
| **RMSF** | root-mean-square error fraction, Verifikationsmaß |
| **WEGC** | Wegener Center der Universität Graz |
| **WRF** | Name eines Wetter- und regionalen Klimamodells (Weather Research and Forecasting model) |
| **ZAMG** | Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik |

| Begriff | Erklärung |
|---|---|
| **Analogmethode** | Empirisch-Statistisches Downscalingverfahren zur Generierung von zeitlich hoch-aufgelösten Projektionen (häufig auf Tagesbasis, geht aber auch feiner) |
| **Bias** | Mittlerer Fehler (siehe auch konditionaler Bias) |
| **Biaskorrektur** | Korrektur des Bias (siehe Bias) von Klimaprojektionen |
| **downscalen / Downscaling** | Erhöhung der Auflösung eines Modellergebnisses - durch Verwendung eines physikalischen Modells (dynamisches Downscaling, DD) oder mathematisch-statistischer Abbildungen (empirisch-statistisches Downscaling, ESD) (siehe Teil 1: Abschnitt „Downscaling“, Seite 18) |
| **homogenisiert/Homogenisierung** | Statistische Korrektur für nicht-klimatologische Effekte (Standortwechsel, Gerätetausch,…) in den Stationszeitreihen |
| **Kanonische Korrelationsanalyse** | Ein lineares, empirisch-statistisches Downscalingverfahren zur Ableitung von Klimaänderungen auf monatlicher oder saisonaler Basis |
| **Klimatologie** | Mittlerer Zustand der Atmosphäre in Bezug auf meteorologische Parameter (z. B. Temperatur oder Niederschlag) |
| **konditionaler Bias** | Mittlerer Fehler unter bestimmten Voraussetzungen (z. B. wenn nur Werte in einem bestimmten Wertebereich betrachtet werden) |
| **Leave-one-out-Kreuzvalidierung** | Bei dieser Art der Validierung z. B. im Bereich der Validierung von räumlichen Interpolationen wird jeweils ein Messwert ausgelassen und dieser Vorgang für jeden Messwert wiederholt. Aus der Differenz der interpolierten und gemessenen Werte können Aussagen über die Güte der Interpolation getroffen werden. |
| **Modelllauf (Run)** | Das Ergebnis eines Modelldurchlaufes. Unterscheidung mehrerer Modellläufe bei gleicher Modellkette und Szenarienwahl durch geänderte Anfangsbedingungen. |
| **Median** | Zentraler Wert einer geordneten Datenreihe oder Mittel der 2 zentralen Werte bei gerader Werteanzahl [z. B. 1,5,7,8,11 =>7 bzw. 1,5,7,8,11,13 =>7,5] der Median ist = 50. Perzentil |
| **multiple Lineare Regressionsmethode** | Lineares, empirisch-statistisches Downscalingverfahren, das auf mehr als einer unabhängigen Variable (Parameter) beruht |
| **parametrische Schätzmethode** | Die Schätzung einer Größe beruht auf Zufallsvariablen, die einer bestimmten Verteilung folgen. Bei der nicht-parametrischen Schätzung trifft man keine Annahme über die Verteilung der Zufallsvariable. |
| **Projektion** | Ergebnis eines Klimamodells |

| | |
|---|---|
| **Radarkomposit** | Bei einem Radarkomposit werden die Ergebnisse mehrere Radar-anlagen miteinander verschnitten. |
| **run** | Siehe Modelllauf |
| **effektive Auflösung** | sinnvoll interpretierbare horizontale Auflösung gegitterter Daten (andere Bezeichnungen: skillfull scale, physikalische Auflösung) |
| **stratiform** | Stratiformer Niederschlag ist im Gegensatz zu konvektivem (z. B. Gewitter) Niederschlag großflächiger und meist länger andauernd. Er tritt z. B. beim Durchgang von Fronten auf. |
| **Variabilität, Streuung, Varianz** | Maß für die Schwankung der Daten (z. B. einer Zeitreihe) um einen Wert (z. B. Median, arithmetisches Mittel) |

## Zeichenerklärung

Für **lila gedruckte Worte** ist eine Erklärung in der Begriffserklärungstabelle gegeben. (Kommt der gleiche Begriff mehrmals knapp hintereinander vor, so ist für ein ungestörteres Lesen nur das erste Vorkommen hervorgehoben)

**Teil 1 & 2:**

Text in grünen Kästen am Anfang von Abschnitten bietet eine kurze Einführung in das Thema, die je nach Hintergrund für das Lesen dieser Guideline eventuell schon ausreichend ist.

Mit diesem Informationssymbol gekennzeichnete blaue Kästchen bieten interessante Information an, die auch dann von Interesse sind, wenn man nicht den gesamten Abschnitt lesen möchte.

**Teil 2 & 3:**

Dieses Symbol kennzeichnet den Anfang einer neuen Fragestellung

**Fett geschriebene Wörter** in den einzelnen Absätzen sollen eine leichtere Orientierung im Text ermöglichen, für den Fall, dass eine bestimmte Information gesucht wird.

*Modellketten und Bezeichnungen von Klimaindizes* sind kursiv gedruckt um ein leichteres Auffinden dieser Stichwörter zu ermöglichen.

**Teil 3:**

Neben diesem Symbol sind Vorteile unterschiedlicher Datensätze angeführt

Neben diesem Symbol sind Nachteile unterschiedlicher Datensätze angeführt

Neben diesem Symbol sind Anwendungsbeispiele für unterschiedliche Datensätze angeführt.

# TEIL 1: ALLGEMEINE INFORMATIONEN

## Klima und Klimaänderung

Klima ist der langjährige Zustand des Wetters und seiner Schwankungen über eine Periode von mindestens 30 Jahren. Klimaänderung ist eine Änderung dieses typischen Zustandes.

Im Gegensatz zum Wetter, das kurzfristig und aktuell stattfindet und laufend wahrgenommen wird, beschreibt das Klima den langfristigen (z. B. 30-jährigen) Zustand der Atmosphäre. Das Klima ist die „Statistik des Wetters". Klima beschreibt etwa die Verteilung der Beobachtungen eines meteorologischen Parameters (z. B. Temperatur) an einem bestimmten Ort/einer bestimmten Gegend.

Neben dem Mittelwert ist auch die Schwankungsbreite (=Varianz) wichtig und auch die Art der Verteilung selbst. Während die Temperatur üblicherweise als annähernd normalverteilt („Gaußsche Glockenkurve", siehe Abbildung 1) betrachtet wird, ist das beim täglichen Niederschlag mit einer hohen Anzahl sehr geringer Niederschlagsmengen und sehr wenigen sehr starken Niederschlägen (siehe Abbildung 2) nicht der Fall.

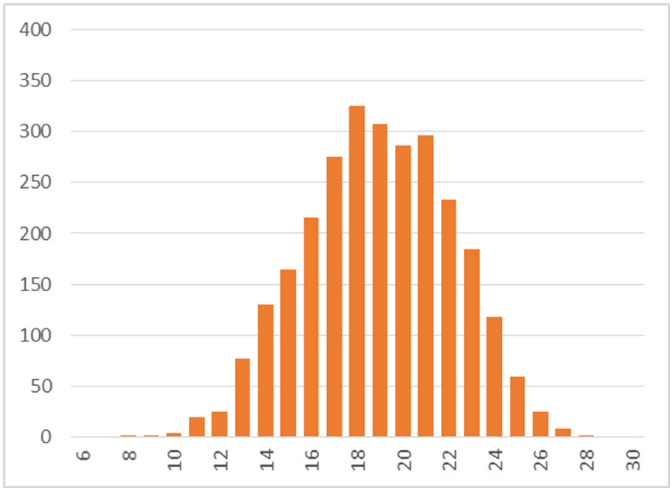



*Abbildung 1: Absolute Häufigkeitsverteilung der Tagesmitteltemperatur für die Sommer 1961-1990 für Wien Hohe Warte. Häufigkeit in Tagen auf der y-Achse, Temperaturmittel [°C] (angegeben ist jeweils die Obergrenze des Temperaturintervalls in der entsprechenden Klasse) auf der x-Achse*

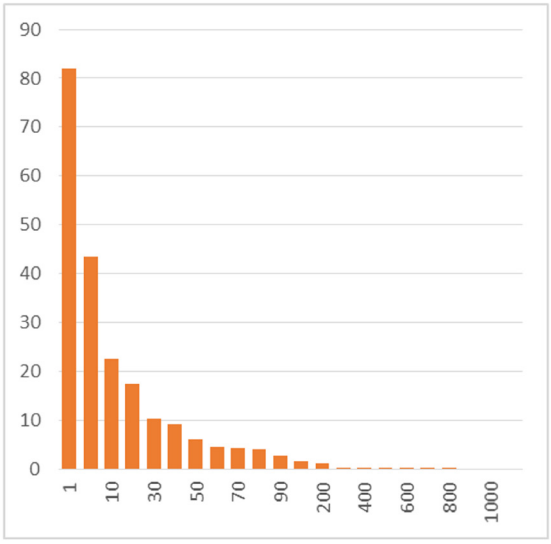



*Abbildung 2: Häufigkeitsverteilung der täglichen Niederschlagsmengen (für Tage ab 1mm Niederschlag) für die Sommer 1961-1990 für Wien Hohe Warte. Häufigkeit in Tagen auf der y-Achse, Niederschlagsmengen [mm] (angegeben ist jeweils die Obergrenze des Niederschlagsintervalls in der entsprechenden Klasse) auf der x-Achse*

Das Klima ist nicht direkt wahrnehmbar, da das subjektive Erinnerungsvermögen den Eindruck verfälscht. Um das Klima eines Ortes zu beschreiben sind also objektive Langzeitmessungen und deren Auswertung notwendig. Klimaänderungen (siehe Abbildung 3) stellen die Änderung des mittleren Zustandes zwischen 2 Klimaperioden dar.

Allerdings ist zu beachten, dass, so wie sich das Wetter von Tag zu Tag ändert, kein Jahr genauso verläuft wie das Vorige. Damit sind die das Klima beschreibenden Mittelwerte auch in einem gleichbleibenden Klima nicht ident, wenn unterschiedliche Perioden zur Bestimmung der Mittelwerte verwendet werden (siehe Abb. 4).

Das bezeichnet man als natürliche **Variabilität** des Klimas. Von einer Klimaänderung wird gesprochen, wenn der Unterschied zwischen 2 Perioden deutlich über die natürliche **Variabilität** hinausgeht. Für diese Abschätzung sind lange, qualitative hochwertige Zeitreihen notwendig.

Für einige Parameter wie der Temperatur ist die Unterscheidung leichter als für andere (z. B. den stark variablen täglichen Niederschlag).

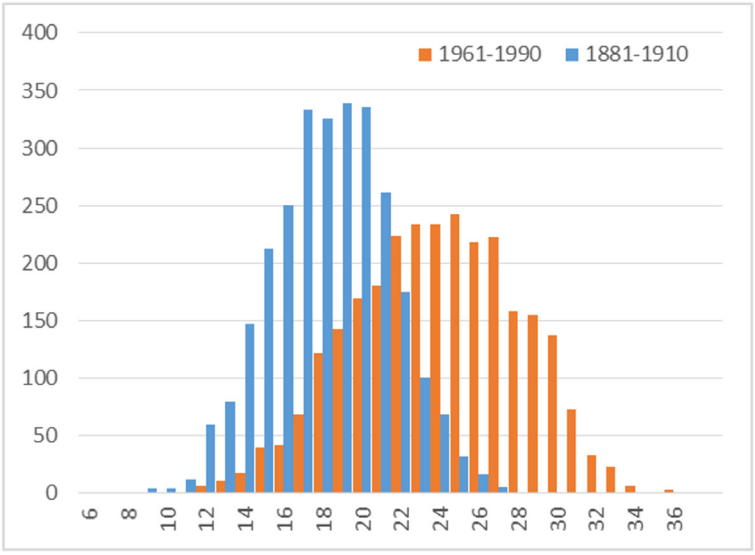



*Abbildung 3: Häufigkeitsverteilung der tägl. Temperaturmaxima [°C] im Sommer für Wien Hohe Warte für die Periode 1881-1910 und 1961-1990*

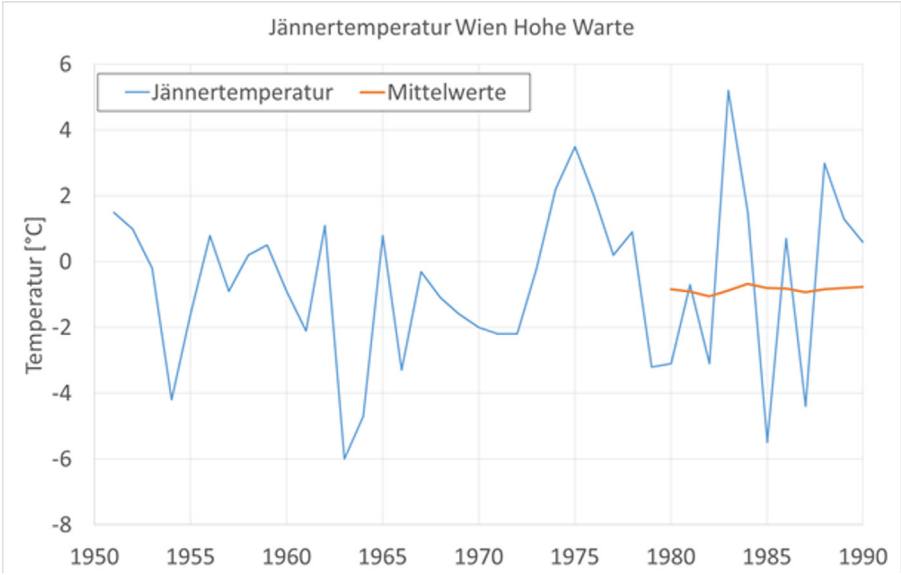



*Abbildung 4: Zeitreihe der jährlichen Monatsmitteltemperatur für Jänner an der Station Wien Hohe Warte (blau) und die daraus abgeleiteten 30-jährigen Mittelwerte (Wert jeweils bei letztem Jahr des betrachteten Zeitraumes dargestellt) 1951-1980 bis 1961-1990 (orange)*

Das Außergewöhnliche des gegenwärtig, seit 1850 beobachteten Klimawandels ist, dass er überwiegend von zunehmenden Temperaturmittelwerten begleitet ist und sich diese Entwicklung beschleunigt.

## Klimasystem

Das Klimasystem besteht aus unterschiedlichen Komponenten (z. B. Ozeanen, Gletscher und Pflanzen). Die Energie für die im Klimasystem ablaufenden Prozesse (z. B. globale Zirkulation, Monsun, El Nino…) kommt von der Sonne.

Das Klima spielt sich nicht nur in der Atmosphäre ab, sondern es ist auch von den Wechselwirkungen und Prozessen in und zwischen den anderen sogenannten Klimasphären abhängig:

- die Hydrosphäre mit Flüssen, Seen, Bodenfeuchte und Ozeanen aber auch dem Wasserdampf. Unter anderem ist durch die Verdunstung, die Meeresströmungen und die Fähigkeit der Ozeane Wärme und $CO_2$ aufzunehmen und zu speichern ein massiver Einfluss auf das Klima gegeben.
- die Kryosphäre als ein Teil der Hydrosphäre, die Gletscher, Schnee und Meereis beinhaltet. Sie beeinflusst unter anderem die Albedo (die Fähigkeit Energie von der Sonne aufzunehmen oder zu reflektieren) und die Meeresströmungen durch lokale Änderung des Salzgehaltes.
- die Biosphäre, die nicht nur aus Pflanzen sondern auch aus Mikroben und Tieren besteht, und unter anderem einen jahreszeitlichen Einfluss auf den $CO_2$-Gehalt der Atmosphäre hat.
- die Pedosphäre, also der Boden, der je nach Bodenart ein Wasserspeicher ist und im Fall von auftauendem Permafrostboden eine Methanquelle darstellt.
- die Anthroposphäre, die den Einfluss des Menschen auf das Klima beschreibt, wird inzwischen häufig als eigene Sphäre des Klimasystems betrachtet

Das Klimasystem wird hauptsächlich durch die Energie der Sonne angetrieben. Je nach Lage der Erde im Weltall (Erdbahn um die Sonne, Schiefe der Erdachse…) erwärmt sich der Planet regional unterschiedlich, wodurch es z. B. zu der Entstehung von Windsystemen kommt. Die Menge der dem Klimasystem zur Verfügung stehenden Energie wird durch Treibhausgase, Aerosole starker Vulkanausbrüche und industriell erzeugte Aerosole sowie unterschiedliche Landnutzung beeinflusst.

Hierbei beeinflusst die Landnutzung vor allem die Albedo, also das Reflexionsvermögen der Oberfläche. Aerosole streuen und absorbieren Strahlung und beeinflussen die Wolkenbildung (und somit indirekt die Albedo und den Treibhauseffekt der Wolken). Treibhausgase wie Kohlendioxid, Wasserdampf und Methan sind zwar für kurzwellige Sonnenstrahlung durchlässig, absorbieren aber von der Erde ausgehende langwellige Wärmestrahlung und strahlen diese teilweise wieder zur Erde zurück.

## Menschlicher Einfluss

Seit der industriellen Revolution beginnt der Mensch über die bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen entstehenden Treibhausgase und Aerosole nachweisbar auf das Klima einzuwirken.

Angesichts der langen Existenz menschlichen Lebens auf der Erde, war der Mensch bis vor kurzem Wetter und Klima ausgesetzt, ohne bemerkenswerte Einflussnahme auf die Klimaentwicklung. Frühe Beispiele der Einflussnahme auf das Klima durch den Menschen sind zum Beispiel die Ausweitung der Agrartätigkeit in Mesopotamien, lange vor Christi Geburt oder die Abholzung im Mittelmeerraum durch die Römer. Seit etwa Mitte des 19 Jh. nimmt der Mensch massiveren Einfluss auf die Entwicklung des globalen Klimas von dem er nach wie vor abhängig ist.

Diese Einflussnahme ist getrieben von der Bevölkerungsentwicklung, dem Energieverbrauch, usw. (siehe Abschnitt „Szenarien“, Seite 11) und passiert vor allem über die Atmosphären-Chemie, d. h. die Veränderung des Treibhausgas- und Aerosol-Gehaltes der Atmosphäre, aber z. B. auch über die Veränderung der Erdoberfläche (´Landnutzung´ - siehe Abschnitt „Klimasystem“, Seite 10).

Um diese Veränderungen zu beschreiben und zu verstehen, werden seit über drei Dekaden an den großen Klimarechenzentren Klimamodelle (= Abbildungen des Klimasystems, siehe Abschnitt „Klimamodelle“, Seite 13) entwickelt. Mit Klimamodellen können die Konsequenzen verschiedener, künftiger Entwicklungspfade der Menschheit, auf die Klimaentwicklung abgeschätzt werden. Die Vielfalt der Ergebnisse der globalen Klimamodelle (GCMs, siehe Abschnitt „Klimamodelle“, Seite 13), angetrieben mit unterschiedlichen Entwicklungspfaden der Menschheit, liefert ein Bild der potentiellen, zukünftigen Auswirkungen menschlichen Handelns auf die Klimaentwicklung der Erde.

## Szenarien

Szenarien sind logisch/physikalisch verknüpfte Annahmen über Entwicklungen in der Zukunft. Der Begriff wird oft in unterschiedlichem Kontext verwendet. Zum einen wird er für die in die Klimamodelle eingehenden Information über Treibhausgase verwendet („Emissionsszenarien“), zum anderen auch für die Ergebnisse der Klimamodelle selbst. Hier wird im Weiteren der Begriff „Szenarien“ für Emissionsszenarien verwendet, während Ergebnisse der Klimamodelle als „Projektionen“ bezeichnet werden.

Mit der Verwendung von Emissionsszenarien können die Veränderungen des Klimas als Reaktion auf unterschiedliche vom Menschen beeinflusste Treibhausgaskonzentrationen untersucht werden. Emissionsszenarien sind mit sozioökonomischen Überlegungen hinsichtlich der Entwicklung der Menschheit (z. B. Energieverbrauch und daraus resultierende Emissionen) verbunden.

Ausgehend von unterschiedlichen Annahmen über die Zukunft (dabei werden z. B. Bevölkerungswachstum, Fortschritte in der Technologie, Ressourcenverbrauch, wirtschaftliche Entwicklung und weltweite Vernetzung betrachtet) werden unterschiedliche Verläufe der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre bestimmt. Darauf basieren die Aussagen älterer IPCC-Reports. Im aktuellen IPCC-Report werden die Szenarien anders gebildet. Diese Szenarien gehen von einer gegebenen Änderung der dem Klimasystem zur Verfügung stehenden Energie aus. Dadurch können sozio-ökonomische Rückkopplungen besser berücksichtigt werden.

**Vorhandene Emissionsszenario-Generationen:**

| Szenarien | Anwendung | Ungefähres Jahr der Veröffentlichung - Ende des Szenarios |
|---|---|---|
| IS92 | 1. & 2. IPCC-Bericht | 1990-2100 |
| SRES (Special Report on Emissions Scenarios) | 3. & 4. IPCC-Bericht & APCC-Bericht | 2000-2100 |
| RCP (Representative Concentration Pathways) | 5. IPCC-Bericht; ÖKS15-Daten | 2006-2300 |

*Tabelle 1: Information zu den in unterschiedlichen nationalen und internationalen Berichten verwendete Szenarien*

Für die aktuellsten **Projektionen** liegen die meisten Klimamodellergebnisse für RCP4.5 und RCP8.5 vor. Also Emissionsszenarien bei denen dem Klimasystem am Ende des Jahrhunderts 4.5 W/m² bzw. 8.5 W/m² im Vergleich zur vorindustriellen Periode zusätzlich zur Verfügung stehen.

In den letzten 7000 Jahren schwankte die auf der Erdoberfläche auftreffende Energie der Sonne zwischen 340.5 und 342.5 W/m² (und über lange Zeiträume davon waren Schwankungen der Sonne noch geringer). Daher ist eine Veränderung um 4.5 bzw. 8.5 W/m² in dem kurzen Zeitraum bis zum Ende des Jh. deutlich mehr als zweimal bzw. um rund 4.25 mal größer.

Effekte wie die geänderte Einstrahlung der Sonne durch natürliche, aber nicht genau prognostizierbare Schwankungen in der Sonne selbst (z. B. Sonnenfleckenzyklus), oder plötzliche Emissionen durch starke Vulkanausbrüche, die kurzfristig zu einer Abkühlung führen könnten, sind in den Szenarien aus verständlichen Gründen nicht berücksichtigt. Studien zeigen aber, dass die Sonnenflecken und die natürliche Zunahme der Sonnenenergie keinen wesentlichen Beitrag zur Klimaerwärmung leisteten (z. B. Foukal et al. 2006).

Auch wenn SRES und RCP nicht ident sind, so gibt es doch zum Teil Ähnlichkeiten bezüglich des Einflusses auf die Strahlung. Die sich jeweils grob entsprechenden Szenarien (Abbildung 5) sind in der folgenden Tabelle nebeneinander dargestellt:

| SRES | RCP | Beschreibung (bis 2100): |
|---|---|---|
| A2 | RCP 8.5 | **A2**: heterogene Welt mit dem Bestreben nach Autarkie und Bewahrung lokaler Identitäten, stetig zunehmende Bevölkerung, wirtschaftliche Entwicklung vorwiegend regional, Pro-Kopf-Wirtschaftswachstum und technologische Veränderungen langsamer als in anderen Szenarien<br>**RCP8.5**: Über 1370ppm $CO_2$-Äquivalent im Jahr 2100 |
| A1B | RCP 6.0 | **A1B**: rasches Wirtschaftswachstum, geringes Bevölkerungswachstum, rasche Einführung neuer, effizienterer Technologie, Verringerung regionaler Unterschiede im Einkommen, ausgewogene Nutzung von allen Energiequellen (keine allzu große Abhängigkeit von einer bestimmten Energiequelle), persönlicher Reichtum wird mehr angestrebt als hohe Qualität der Umwelt.<br>**RCP6.0**: Stabilisierung des Strahlungsantriebes im Jahr 2100 bei ~850 ppm $CO_2$-Äquivalent |
| B1 | RCP 4.5 | **B1**: Max. Weltbevölkerung in Mitte des 21 Jhd., danach Abnahme, rasche Änderung wirtschaftlicher Strukturen in Richtung Dienstleistungs- und Informationswirtschaft mit Rückgang des Materialverbrauchs und Einführung von sauberen, ressourceneffizienten Technologien. Globale Lösungen für wirtschaftliche, soziale und umweltgerechte Nachhaltigkeit, aber ohne zusätzliche Klimainitiativen.<br>**RCP4.5**: Anstieg des $CO_2$-Äquivalent bis 2100 auf 650 ppm |

*Tabelle 2: Vergleich der SRES- und RCP-Emissionsszenarien*

Es ist noch zu beachten, dass in keinem der bisherigen Szenarien das in Paris beschlossene 1.5 °C-Ziel für den maximalen Anstieg der globalen Mitteltemperatur gegenüber dem vorindustriellen Niveau erreicht wird. Für RCP2.6 geht man davon aus, dass es das 2 °C-Ziel erfüllt (basierend auf dem Ensemble des CMIP5 - Projektes).

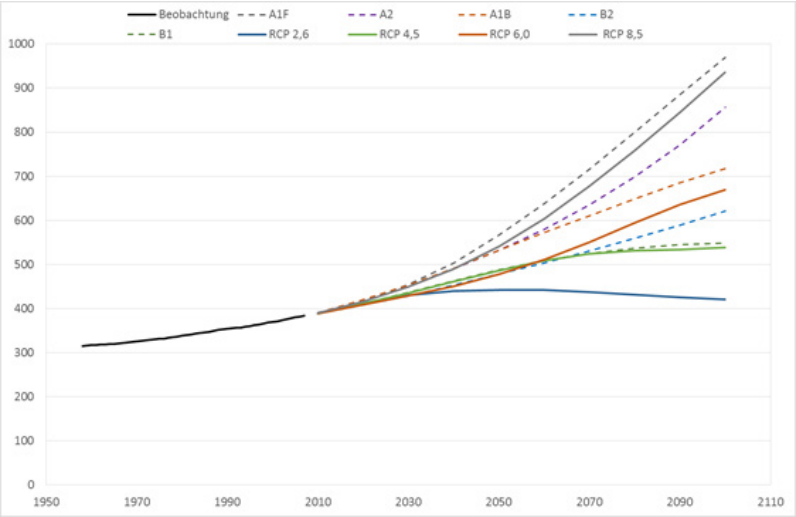



*Abbildung 5: Atmosphärische $CO_2$-Konzentrationen [ppm] entsprechend der bisherigen SRES (gestrichelt) und der aktuellen RCP (durchgezogen) Szenarien. Die schwarze Linie zeigt die historischen Konzentrationen. Nach Kotlarski und Truhetz (2017) unter der Annahme des idealen Gases.*

## Klimamodelle

Klimamodelle werden verwendet um komplexe Abläufe im Klimasystem zu untersuchen und vergangene oder zukünftige Zustände des Klimasystems in Abhängigkeit vom Verlauf der Antriebsgrößen (Sonne, Vulkanausbrüche, Treibhausgas/Aerosol-Gehalt der Atmosphäre, Oberflächeneigenschaften der Erde, usw.) zu bestimmen.

Möchte man künftige Klimaentwicklungen abschätzen (z. B. zur Planung von Anpassungsmaßnahmen), müssen zuerst Annahmen über die Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen getroffen werden (siehe Abschnitt „Szenarien“ Seite 11). Die Ergebnisse sind nicht auf Gitterpunkten sondern nur über eine größere Fläche (abhängig von der Auflösung der Modelle, siehe „Effektive Auflösung“, Seite 14) interpretierbar.

Globale Klimamodelle (GCM) erfassen wie der Name schon sagt globale Prozesse in und zwischen den Sphären des Klimasystems sowie deren Abhängigkeiten von den Antriebsgrößen. Sie beschreiben also nicht nur Prozesse in der Atmosphäre, sondern berücksichtigen auch Prozesse in allen Klimasphären, deren Wechselwirkungen und Antriebe. Sie beruhen auf physikalischen Gleichungen, die auf drei-dimensionalen Gittern (von aktuell etwa 150-200 km horizontaler Gitterpunktabstand, siehe Abbildung 6) die den Zustand der Atmosphäre und weiterer Komponenten des Klimasystems von Zeitschritt zu Zeitschritt rund um den Globus beschreiben. Damit stehen Temperatur, Feuchte, Windgeschwindigkeit, usw. an den Gitterpunkten zu jedem Zeitschritt zur Verfügung.

Klimawandelsimulationen sind keine Vorhersagen (wie z. B. Wetter- oder saisonale Vorhersagen): sie simulieren zwar die Reaktion des Klimasystems auf Änderungen im Strahlungshaushalt, sie sagen aber nicht die genaue zeitliche Entwicklung natürlicher Schwankungen voraus. Stattdessen geben sie nur ein Maß für die Spannbreite möglicher natürlicher Schwankungen um den zu erwartenden Klimawandel.

Eine einzelne Klimawandelsimulation ist deshalb keine wahrscheinliche Entwicklung des Klimasystems (wie bei einer Vorhersage), sondern nur eine mögliche. Deshalb werden Klimawandelsimulationen Projektionen genannt. Sie machen vor allem Sinn für längere Zeithorizonte, wenn der Klimawandel deutlich aus den natürlichen Schwankungen hervortritt.

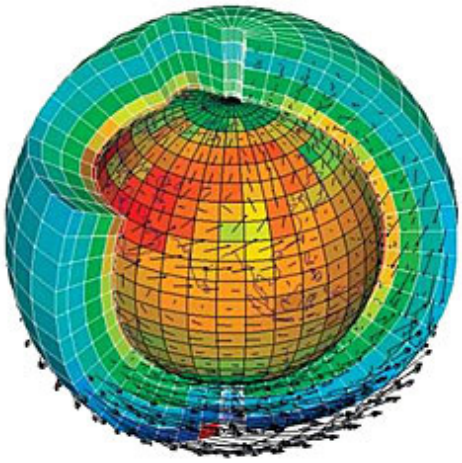


*Abbildung 6: Symbolbild für ein 3-dimensionalen Gitters eines globalen Klimamodells. Farben stehen für die Temperatur und die Pfeile den Wind an der Gitterzelle bedeuten (Quelle: L. Fairhead/LMD/CNRS).*

Klimawandelsimulationen sind keine Vorhersagen, sondern **Projektionen** des Klimas. Deshalb macht es keinen Sinn, sie für einen exakten Zeitpunkt wie z. B. ein bestimmtes Jahr in der Zukunft zu interpretieren. Vielmehr lassen sich statistisch sinnvolle Aussagen nur treffen, wenn die Spannbreite natürlicher Schwankungen durch die Betrachtung langer Klimaperioden (z. B. 1961-1990, 2021-2050) oder große Modellensembles berücksichtigt wird.

Auch räumlich unterliegt ihre Interpretierbarkeit einer Einschränkung und ihre Ergebnisse sollten unterhalb ihrer **effektive Auflösung** (siehe Abschnitt „Effektive Auflösung“, Seite 14) nicht ausgewertet werden. Interessiert man sich für kleineren räumlichen Skalen, müssen die Ergebnisse von Klimamodellen ‚downgescaled‘ werden. (siehe Abschnitt „Downscaling“, Seite 15).

GCMs werden an mehreren Forschungsinstituten und Klimarechenzentren rund um den Globus entwickelt und betrieben. In Europa zählen unter anderem das Hadley Center in Großbritannien, das Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg oder das Institut Pierre Simon Laplace und das Centre National de Recherches Météorologiques in Frankreich dazu.

Die effektive Auflösung ist von Fall zu Fall unterschiedlich, je nachdem welche physikalische Größe betrachtet wird. In der Literatur sind verschiedene Richtwerte angegeben, die von 4-8 Gitterdistanzen reichen (Storch et al. 1993, Johansson et al. 1995). Es muss daher für jeden Gitterdatensatz und Anwendung geprüft werden, welche Auflösung vertretbar ist. (siehe auch Teil 2 „Beträgt die räumliche Auflösung der ÖKS15 Daten tatsächlich 1 km?“, Seite 41)

Um eine statistisch sinnvolle Interpretation zu ermöglichen, sollten zudem ausreichend lange Perioden betrachtet werden.

### Effektive Auflösung

Die horizontale Auflösung dieser Gitter, also der Gitterpunktabstand, von einem GCM liegt aktuell bei rund 100-200 km und es gibt zwischen 20 und 40 Höhenlevels bis an den oberen Rand der Atmosphäre. Mit der Gitterdistanz hängt eine entscheidende Eigenschaft von Klimamodellen zusammen, nämlich die räumliche Ausdehnung geographischer Gebiete auf denen sie gültige Aussagen liefern. Mit GCMs können also z. B. zeitliche Entwicklungen künftiger Zustände der Atmosphäre über Gebieten, die sich über Kontinente erstrecken, bestimmt werden – nicht jedoch solche die sich auf kleinere Regionen, wie etwa Österreich, beziehen.

Die Ergebnisse von regionalen Klimamodellen (siehe Abschnitt „Regionale Klimamodelle“, Seite 15) liegen in einer höheren räumlichen Auflösung vor (im Fall der ÖKS15 zugrundeliegenden Daten ~12 km). Damit ist die Auflösung der hier betrachteten RCMs etwa 10 mal feiner als die von GCMs. Interessiert man sich für Ergebnisse auf kleineren räumlichen Skalen, müssen die **Projektionen** herunterskaliert, in der Fachsprache ‚downgescaled‘, werden (siehe Abschnitt „Downscaling“, Seite 15).

## Downscaling

Um die Projektionen unterhalb ihrer effektiven Auflösung anwenden zu können, muss die Auflösung physikalisch sinnvoll verfeinert werden. Dafür stehen zwei Ansätze zur Verfügung, das dynamische Downscaling (über feiner aufgelöste Klimamodelle) und das statistische Downscaling (über die Nutzung statistischer Zusammenhänge zwischen den großräumigen und kleinräumigen meteorologischen Zuständen).

Downscaling kann sowohl für zukünftige wie vergangene Klimadaten angewendet werden. GCMs können aufgrund ihrer geringen Auflösung regionale Klimaprozesse und Einflüsse komplexer Topografie nicht beschreiben. Die Auswirkungen des Klimawandels (z. B. auf sozioökonomische Strukturen oder Ökosysteme) finden allerdings auf regionaler bzw. lokaler Skala statt. Daher ist es oft notwendig, GCM-**Projektionen** downzuscalen.

Dynamisches Downscaling der GCM-Ergebnisse beruht auf der Verwendung von Regionalen Klimamodellen (**RCMs**).

Regionale Klimamodelle (**RCMs**) simulieren, wie die GCM auf physikalischen Formeln basierend die Entwicklung des Klimas. Geographische Regionen, für die Simulationen mit regionalen Modellen durchgeführt werden, bewegen sich in der Größenordnung von z. B. Europa bis zum Alpenraum. Dabei übernehmen regionale Klimamodelle am Rand der betrachteten Region die Ergebnisse der GCMs. Innerhalb der betrachteten Domäne, kann sich das Klima weitgehend unabhängig vom antreibenden GCM entwickeln. Auf Grund der höheren räumlichen (im Fall der in ÖKS15 genutzten ~12 km x 12 km) können RCMs feinskaligere Effekte darstellen, die durch die grobe Auflösung im GCM nicht explizit abgebildet werden können. Einer dieser Effekte ist die topografische Gegebenheit. Ein Effekt, der in Österreich durch die Alpen von spezieller Bedeutung ist.

In Österreich laufen regionale Klimamodelle für unterschiedliche Anwendungen am Wegener Center der Universität Graz, der ZAMG, der BOKU, dem AIT und der Universität Innsbruck. Es kommen dabei hauptsächlich die Modelle COSMO-CLM (http://www.clm-community.eu/) und WRF (http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/) zum Einsatz. Eine Evaluierung des EURO-CORDEX RCM-Ensembles wurde z. B. in Kotlarski et al., 2014 durchgeführt.

Statistisches Downscaling geht davon aus, dass lokale Ausprägungen des Wetters von großskaligen Bedingungen beeinflusst und vorgegeben werden. Ein Beispiel dafür ist der Einfluss der Nordatlantischen Oszillation (Ausprägung von Azorenhoch und Islandtief) auf die Winter in den Regionen Europas. Das statistische Downscaling stützt sich auf Beobachtungen, die in der Vergangenheit einerseits auf der grobskaligen GCM-Skala und andererseits auf der regional/lokalen Skala (z. B. Gitterpunkts- oder Stationsdaten) gemacht wurden, und verknüpft diese durch statistische und physikalisch sinnvolle Zusammenhänge – ‚Transferfunktionen' genannt. Nachdem diese Transferfunktionen in sogenannten ‚Validierungsexperimenten' auf deren Leistung geprüft worden sind, werden sie auf GCM-**Projektionen** angewendet um die entsprechenden regional/lokalskaligen Realisierungen für die Zukunft zu berechnen.

Unterschiedliche Statistische Downscalingmethoden wurden in der COST-Action VALUE evaluiert (z. B. Gutiérrez et al, 2017; Hertig et al., 2018)

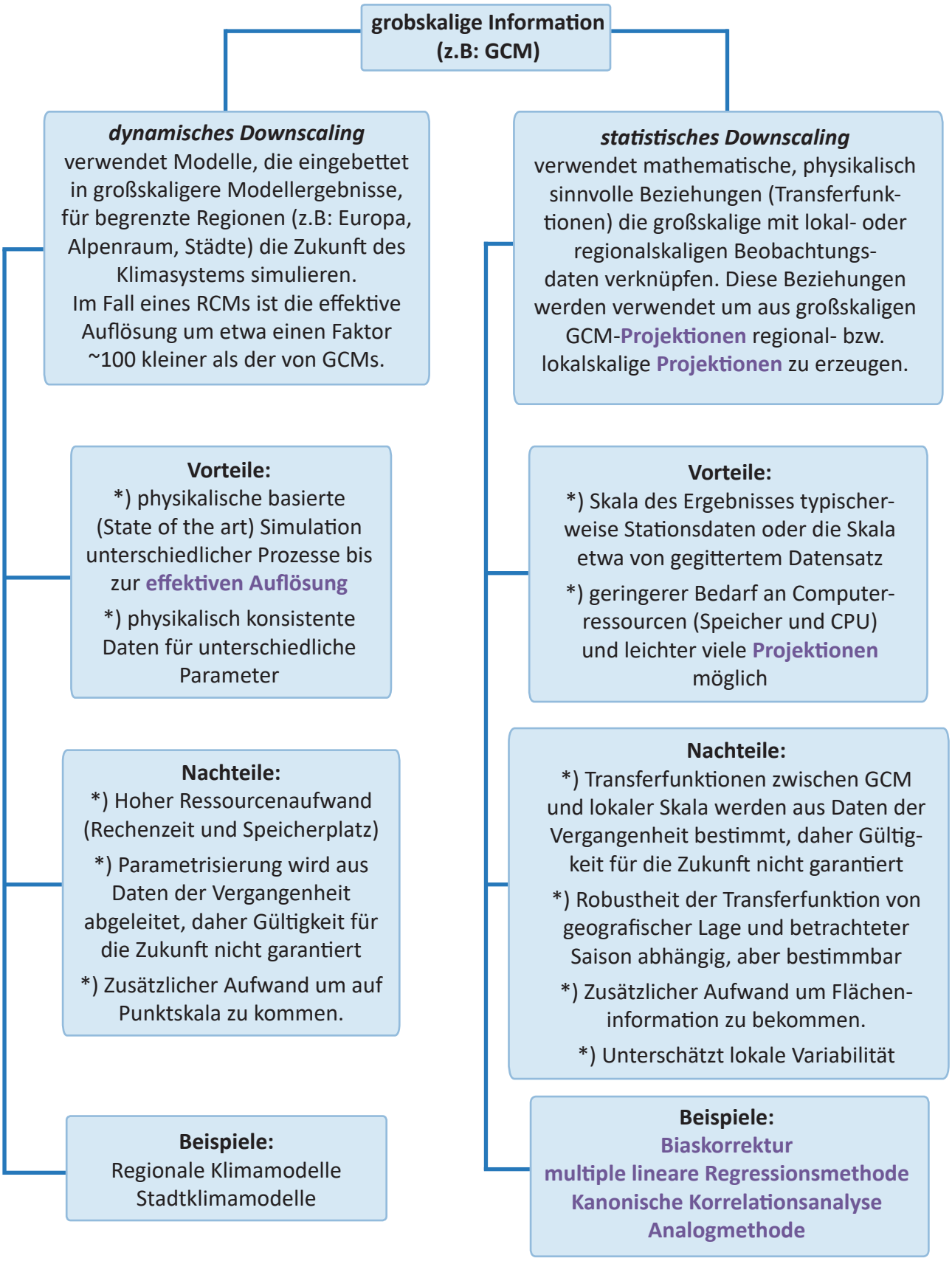



*Abbildung 7: Zusammenfassung der Information zu unterschiedlichen Downscalingverfahren. Generell ist Fachwissen für die korrekte Anwendung der unterschiedlichen Verfahren erforderlich. (siehe auch Teil 2, „Beträgt die räumliche Auflösung der ÖKS15 Daten tatsächlich 1 km?“, Seite 41)*

## Gegitterte Klimabeobachtungsdaten

Nicht nur Modelldaten sind von hohem Wert, wenn es um Klimaimpaktforschung, Katastrophenmanagement oder Planungsaufgaben geht, auch Beobachtungsdatensätze stellen eine wichtige Informationsquelle dar, um Zusammenhänge zu erkennen, Ereignisse in einem längerfristigen Zusammenhang zu sehen oder um auf den aktuellen Zustand reagieren zu können.

Sie werden auch zur Evaluierung oder Korrektur von Klimamodellergebnissen herangezogen. Der Begriff *gegitterter Klimabeobachtungsdatensatz* enthält alle Bestandteile zu seinem Verständnis: Die Datenwerte sind auf einem regelmäßigen Gitter im Raum angeordnet.

Klima impliziert nicht nur, dass es sich um atmosphärische Größen wie Lufttemperatur oder Niederschlag handelt, sondern auch, dass ein zumindest jahrzehntelanger Zeitraum in gleichbleibender Qualität abgedeckt ist. Die Datengrundlage sind tatsächliche Beobachtungen.

Die Ergebnisse, tägliche Gitterpunktfelder von Klimavariablen, sind standardisiert in einem Datensatz zusammengefasst, der für Forschungs- und Anwendungszwecke weitergegeben wird.

Das meteorologische Messnetz der ZAMG umfasst derzeit etwa 250 Stationen, an denen die wichtigsten Parameter der bodennahen Atmosphäre (Lufttemperatur, Niederschlagssumme, Luftdruck, Globalstrahlung, Windgeschwindigkeit usw.) beobachtet und aufgezeichnet werden. Während diese Aufgabe bis in die 1980er-Jahre ausschließlich von Beobachterinnen und Beobachtern übernommen wurde, erfolgen die Messungen heute größtenteils automatisch. An etwa 120 Orten in Österreich sind Klimastationen vorhanden, die aufgrund ausreichender Messkontinuität jahrzehntelange Klimabeobachtungsreihen in Tagesauflösung aufweisen. Diese Klimabeobachtungsreihen eignen sich zur Analyse von Zustand und Änderungen des Klimas – möglichst nach einer Datenhomogenisierung, d. h. nach der Detektion und Entfernung unerwünschter künstlicher Einflüsse auf die Messung.

Naturgemäß sind Beobachtungen, die an einer Station erhoben wurden, nur für den Standort bzw. seine nächste Umgebung gültig. Noch dazu sind die Stationen im Raum unregelmäßig verteilt – horizontal wie vertikal. Viele wissenschaftliche Fragestellungen und praktische Anwendungen sind aber an Klimainformation interessiert, die für Standorte fernab von Klimastationen oder gar über Flächen hinweg gelten. Hier kommen gegitterte Beobachtungsdaten zum Einsatz.

In einer eigenen Forschungsnische wurden in den letzten Jahren Methoden entwickelt, die sich mit der Übertragbarkeit von punktgebundenen Klimabeobachtungen über größere Flächen hinweg beschäftigen. Sie nennen sich geostatistische Interpolationsmethoden, da sie versuchen, Punktinformationen mit Hilfe statistischer Modelle mit geographischen Eigenschaften zu verknüpfen und so Information in der Fläche zu erzeugen. In Gebirgsregionen, wo das Wetter von einem Ort zum Nächsten extremen Schwankungen unterliegen kann, ist die Entwicklung solcher Modelle besonders herausfordernd.

Im Zuge der Interpolation wird die Datenmenge vervielfacht: Aus einigen hundert Stationswerten werden einige zehntausend Punktwerte, die sich – wie an einem Gitter angeordnet – in regelmäßigen Abständen über die Fläche des Untersuchungsgebietes verteilen. Das Ergebnis sind so genannte gegitterte Klimabeobachtungsdatensätze.

Gegitterte Klimabeobachtungsdatensätze können bestenfalls so gut sein wie die Klimabeobachtungen, auf denen sie beruhen. Großes Gewicht wird daher auf die Qualität der Messreihen gelegt. Der Begriff „Klima“ verlangt, dass die Rahmenbedingungen so konstant wie möglich gehalten werden. Deshalb wird das Netz der eingehenden Stationen möglichst konstant gehalten und die Messreihen werden qualitätsgeprüft oder im besten Fall **homogenisiert**.

## Unsicherheiten

### Modelldaten:

Auf dem Weg zu einer Klimaimpaktstudie und deren Ergebnissen werden etliche Annahmen getroffen und verschiedene Modelle verwendet, die jeweils spezifische Unsicherheiten haben. Je mehr Schritte notwendig sind um zum Ergebnis zu erlangen, umso mehr Unsicherheitsquellen sind beteiligt. Daher sollten die mit den Ergebnissen verbundenen Unsicherheiten möglichst vollständig angegeben werden.

Bei der Ableitung von regional/lokal-skaligen Klimaänderungsszenarien wird eine Kaskade von Analyseschritten durchlaufen bei der jeder Schritt eine individuelle Quelle an Unsicherheiten darstellt (siehe Abbildung 8). Diese Unsicherheiten können im Wesentlichen in drei Kategorien eingeteilt werden:

1. **Szenario-Unsicherheit:** Die wohl größte Unsicherheit steht am Anfang des Prozesses: Wie wird sich die Menschheit in den nächsten Dekaden bis zum Ende des Jahrhunderts entwickeln? (Siehe Abschnitt „Szenarien“, Seite 11)
2. **Modellunsicherheiten:** Diese sozio-ökonomischen Szenarien werden nun verwendet um GCMs (siehe Abschnitt „Globale Klimamodelle“, Seite 13) anzutreiben, und damit die Reaktion des Klimasystems der Erde auf die veränderten Bedingungen zu simulieren. Jeder sogenannte GCM-Lauf, der diese Szenarien verwendet, stellt eine (näherungsweise) mögliche zeitliche Entwicklung des Klimasystems der Erde dar. Durch mathematisch notwendige Vereinfachungen, Näherungen oder noch nicht komplett verstandene Phänomene sind diese Ergebnisse mit Unsicherheiten behaftet. Im Bezug auf das Klima in Europa haben aktuelle GCMs z. B. nach wie vor Probleme Sturmzugbahnen, Kaltlufteinbrüche oder lange Dürren und Hitzewellen richtig zu simulieren. Diese Probleme können auch nicht durch Downscaling oder Biaskorrektur behoben werden.
3. **Natürlich Schwankungen:** Eine weitere Unsicherheit ist durch die natürliche Variabilität des Klimasystems gegeben. Dabei spielt der Anfangszustand des Systems eine wichtige Rolle. So kann das gleiche GCM unter Nutzung des gleichen Szenarios unterschiedliche Ergebnisse liefern, wenn die Anfangsbedingungen (beispielhaft gesagt, das Modell bekommt geänderte Wetterdaten als Ausgangssituation) modifziert werden. Daher werden von den Modellen sofern möglich jeweils mehrere Läufe (runs) angeboten, bei denen nur der Anfangszustand modifiziert ist, die sonstigen Bedingungen allerdings ident bleiben.

Werden diese **Projektionen** downgescaled, so kommen weitere Unsicherheiten hinzu. Unterschiedliche Downscalingmethoden (siehe Abschnitt „Downscaling“, Seite 15) führen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Zusätzliche Unsicherheiten kommen hinzu wenn danach noch Impaktmodelle (z. B. bei der Kalibration hydrologische Modelle) angewendet werden. Um diese Unsicherheiten abschätzen zu können, kommt der sogenannte Ensembleansatz ins Spiel. Weil kein Modell und keine Annahme „perfekt“ ist, aber alle die gleiche Berechtigung haben, geht man davon aus, dass der Mittelwert/**Median**/Schwankungsbreite von mehreren **Projektionen** die Realität besser abbildet als ein einzelner **Modelllauf**.

Daher wird nicht nur eine einzelne Klima**projektion** betrachtet sondern mehrere davon gemeinsam ausgewertet. Die Zusammensetzung des verwendeten Ensembles hängt von der geplanten Untersuchung ab:

- Auswirkungen eines sozio-ökonomischen Szenarios untersuchen:
  Multi-GCM Ensemble: ein sozio-ökonomisches Szenario, welches als Antrieb für verschiedene GCMs verwendet wird).
- Spannweite aller möglichen Entwicklungen des Klimasystems interessiert:
  Multi-GCM-Multi-Scenario Ensemble: verschiedene GCMs und Szenarien

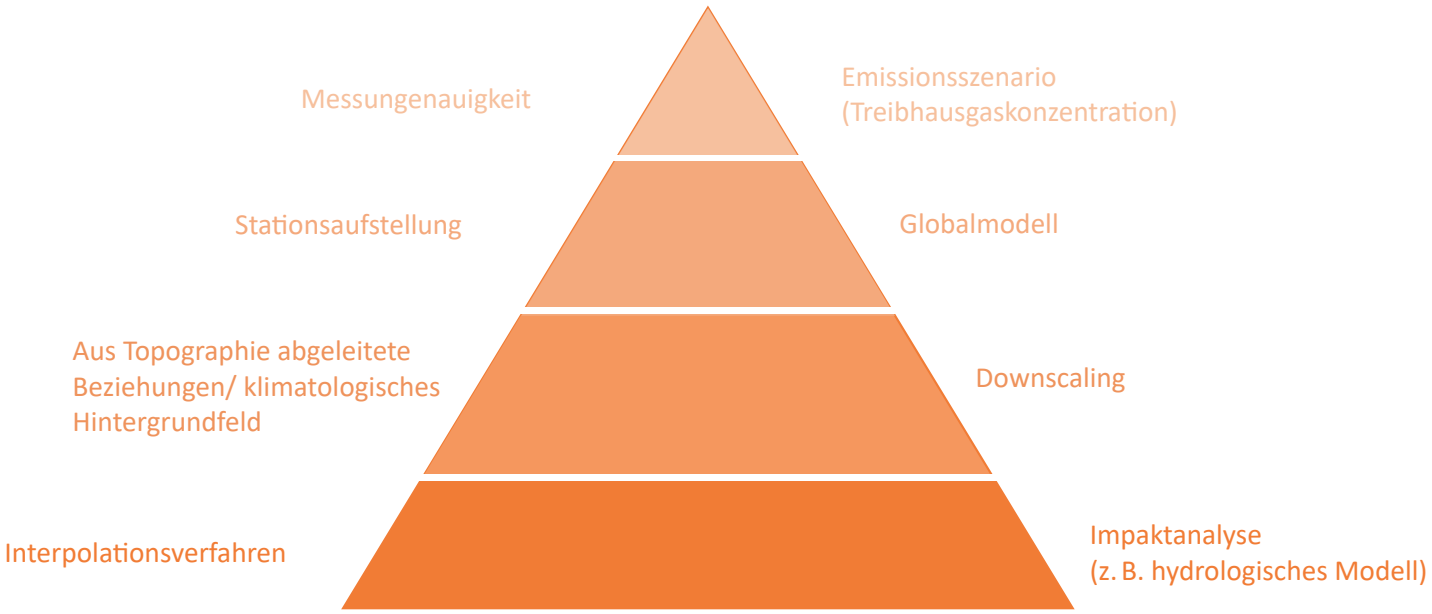



*Abbildung 8: Die Graphik zeigt (unskaliert) unterschiedliche Unsicherheitsquellen beim Erstellen von Gitterdatensätzen aus Stationsdaten (links) bzw. bei Klimaimpaktstudien (rechts).*

Üblicherweise sind Unsicherheiten für den Niederschlag, aufgrund des fehleranfälligeren Messverfahrens (z. B. Einfluss durch Wind) und der höheren räumlich/zeitlichen Variabilität des Niederschlages größer als für die Temperatur.

Wie in Abbildung 8 gezeigt, ist jeder Schritt in einer Modellierungskette mit Unsicherheiten behaftet. Auch Downscaling vergrößert dadurch die Spannbreite der Unsicherheiten der Modellkette. Allerdings bedeutet dies natürlich nicht, dass man ohne Downscaling bessere regionale Klimaprojektionen erreicht. Ohne Downscaling werden regionale Wetterprozesse und Einflüsse der Topografie nicht aufgelöst.

Die Spannbreite wäre dann zwar kleiner, die Simulation aber wahrscheinlich auch unrealistisch. Ist eine räumliche Skala bzw. ein Prozess nicht aufgelöst, kann auch keine Aussage über seine zukünftige klimatische Entwicklung getroffen werden. Je kleinskaliger die Wetterphänomene und je komplexer die Topographie, desto wichtiger wird adäquates Downscaling.

### Gegitterte Beobachtungsdaten:

> Verschiedene Arten von Fehlern summieren bzw. kompensieren sich in gegitterten Klimabeobachtungsdatensätzen: Messfehler an der Station, Inhomogenitäten in den Messreihen, Eigenheiten des Stationsnetzes und methodisch bedingte Interpolationsfehler. Mess- und Homogenitätsprobleme werden in der Fachliteratur ausführlich behandelt und gelten für alle Klimaauswertungen, nicht nur für Gitterdatensätze. Es ist wichtig zu verstehen, dass sich die Evaluierung der Gitterdatensätze auf den Interpolationsfehler konzentriert.

Gegitterte Klimabeobachtungsdatensätze beschreiben eine möglichst genaue räumliche Abschätzung eines vergangenen Zustandes der Atmosphäre. Sie sind jedoch nur ein Modell der Wirklichkeit und können diese nicht absolut wahrheitsgetreu darstellen. Die Unsicherheiten lassen sich nach unterschiedlichen Fehlerquellen zusammenfassen:

- **Messfehler:** Im Allgemeinen führen ein schlecht ausgewählter Standort, schlechte Eichung und Ablesefehler zu Messproblemen. Bei der Lufttemperatur treten Überschätzungen aufgrund von mangelndem Strahlungsschutz oder Stauhitze in der Wetterhütte eher ein als Unterschätzungen. Die Niederschlagsmessung steht überhaupt vor dem ungelösten Problem der systematischen Unterschätzung. Messfehler sind unvermeidlich, werden aber durch Datenprüfung bestmöglich minimiert.
- **Inhomogenitäten:** Sie sind häufig auf Standortwechsel oder Änderungen in der Vegetation oder Bebauung der Umgebung zurückzuführen und verfälschen den langfristigen Verlauf von Klimamessreihen. Die Sichtung von Metadaten ergibt, dass seit 1961 98 % der Lufttemperaturreihen in Österreich Standortverlegungen unterlagen. Statistische Verfahren können Inhomogenitäten detektieren und entfernen (Homogenisierung), sind jedoch methodisch aufwändig und zeitintensiv. Daher beruhen die gegitterten Datensätze derzeit nur zu einem Bruchteil auf homogenisierten Reihen (Lufttemperatur 41 %, Niederschlag 4 %, Globalstrahlung 0 %, Evapotranspiration k. A.).
- **Räumliche Stationsverteilung:** Die Beobachtungsstationen sind unregelmäßig im Raum verteilt, sowohl horizontal als auch vertikal. Langjährige Niederschlagsreihen etwa stammen nur zu 9 % von Seehöhen über 1000 m (39 % der Bundesfläche). Tiefe Lagen in Ostösterreich sind hingegen überrepräsentiert. Die Interpolationsmethoden können einen Gutteil dieser Diskrepanz ausgleichen. Trotzdem werden Niederschläge aber aufgrund der Stationsdichte unterschätzt, da Niederschlagsmaxima zwischen den Stationen auftreten oder Höhengradienten nicht ausreichend erfasst werden.
- **Interpolationsfehler:** Diese entstehen tatsächlich im Zuge der räumlichen Interpolation und bilden methodische Unsicherheiten ab. (siehe dazu für den ÖKS15-Datensatz Teil 2: Abschnitt „Einführendes zu den ÖKS15-Daten“, Seite 22)

Auch wenn diese Fehler nicht vermeidbar sind, ist es umso wichtiger, die Relevanz der einzelnen Fehlerquellen für die eigene Anwendung zu kennen, um deren Auswirkungen auf Auswertungsergebnisse abschätzen zu können. Beispielsweise ist bei einer Auswertung eines Gitterpunktes zu einem Zeitpunkt der Messfehler die dominante Fehlerquelle, bei langfristiger zeitlicher Auswertung sind hingegen Inhomogenitäten dominant.

Den Niederschlagsmessfehler betreffend muss man grundsätzlich zwischen gemessenem und tatsächlichem Niederschlag unterscheiden. Infolge von windbedingter Abdrift über dem Messgerät, Verlusten durch Spritzwasser und Schneeverfrachtung, Benetzung am Messgerät und Verdunstung ergibt sich im Allgemeinen eine systematische Niederschlagsunterschätzung.

Versuche, diesen Messfehler im Alpenraum zu quantifizieren (Sevruk, 1985; Richter, 1995), ergaben mittlere Jahresabweichungen zwischen etwa 7 % an tiefgelegenen oder windgeschützten Stationen und bis zu 25 % an hochgelegenen, windausgesetzten Stationen. An Tagen mit Schneefall und Sturm kann der Fehler leicht 50 % überschreiten. Besonders für hydrologische Anwendungen ist es entscheidend, sich bewusst zu sein, dass der gegitterte Niederschlagsdatensatz *gemessene* Niederschläge ausweist. Diese Entscheidung wurde getroffen, um durch vage Korrekturen nicht zusätzliche Unsicherheiten zu induzieren.

## Impaktmodelle am Beispiel eines Getreidewachstumsmodells

Da die ÖKS15-Daten auch an Hand einer Klimaimpaktstudie evaluiert wurden (siehe „Die ÖKS15-Daten in Anwendung“, Seite 53) wird hier auf ein Pflanzenwachstumsmodells für landwirtschaftliche Nutzpflanzen beispielhaft für andere Impaktmodelle für Agrarökosysteme eingegangen. Pflanzenwachstumsmodelle für landwirtschaftliche Nutzpflanzen beschreiben je nach Modell in unterschiedlicher Vereinfachung das Wachstum von Nutzpflanzen auf Grund der Genetik, der Produktionstechnik (Düngung, Bodenbearbeitung, Bewässerung usw.), des Bodens und des Wetters.

Sie sind daher ein Werkzeug um die Auswirkungen unterschiedlicher Umweltbedingungen (z. B. durch Klimawandel oder Managementoptionen) auf den Agrarbereich zu untersuchen. Auf Grund der Vereinfachungen, die in den Modellen getroffen werden, sind die Ursachen der dabei auftretenden Unsicherheiten nicht nur in den Eingangsdaten, sondern auch in dem Modell selbst zu finden.

Wie Klimamodelle sind Pflanzenwachstumsmodelle mehr oder weniger vereinfachte Modelle der Realität allerdings für die pflanzenphysiologischen Prozesse. Sie können in beschreibende und erklärende Modelle unterteilt werden. Während beschreibende Modelle auf rein empirischen Zusammenhängen zwischen unterschiedlichen Variablen (z. B. Temperatur, Niederschlag und Wachstum) basieren, beschreiben die erklärenden Modelle in Form mathematischer Gleichungen und Funktionen zum überwiegenden Teil die zugrundeliegenden Mechanismen und Prozesse des Pflanzenwachstums.

In diesen Modellen werden unterschiedliche Arten von Variablen verwendet: Zustandsgrößen (z. B. Nitratgehalt des Bodens, Bodenwassergehalt, Blattflächenindex, Biomasse, phänologischer Entwicklungszustand,...), beeinflussende Größen (z. B. meteorologische Variablen wie Temperatur und Niederschlag), Boden- und Pflanzeneigenschaften und Umwandlungsraten, die von den beiden anderen Variablenarten abhängen und durch Untersuchungen der physikalischen, chemischen und physiologischen Prozesse des Pflanzenwachstums bestimmt wurden. Die Modelle sind so in der Lage, die Interaktionen zwischen Pflanze, Boden und Atmosphäre zu untersuchen und bilden daher ein wichtiges Hilfsmittel für Agrarstudien.

Unsicherheiten ergeben sich zum einen aus den verwendeten Eingangsdaten, aber auch durch die unterschiedlich detaillierte oder repräsentative Darstellung der betrachteten Prozesse im Modell. Für die Qualität der Modellergebnisse ist eine Kalibrierung mit einem qualitativ hochwertigen, gemessenen Datensatz unerlässlich. Bei Eingabedaten für die Kalibrierung ist nicht nur die Messgenauigkeit ein wesentlicher Punkt, sondern auch die Repräsentativität der Daten für die betrachtete Region oder den einzelne lokale Punkte, die Bodenart und die Pflanzensorte. Wie auch Klimamodelle können Pflanzenwachstumsmodelle auf Grund ihrer unterschiedlichen Parametrisierung und Komplexität mit gleichen Eingangsdaten zu unterschiedlichen Ergebnissen kommen. Daher wird auch hier die Verwendung eines Multi-Modell-Ensembles empfohlen.

# TEIL 2: EVALUIERUNG DER VERWENDETEN GEGITTERTEN BEOBACHTUNGSDATEN UND DER ÖKS15-KLIMASIMULATIONEN

## Einführendes zu den ÖKS15-Daten

Der ÖKS15-Datensatz wurde 2015/16 durch ein Projektkonsortium aus ZAMG, WEGC und Z_GIS der Universität Salzburg im Auftrag von Bund und Ländern erzeugt um einen einheitlichen Klimadatensatz für die Klima- und Klimaimpaktforschung zur Verfügung zu haben und so künftige Studien vergleichbar zu machen. Eine detaillierte Beschreibung der Methoden, die bei der Erstellung des Datensatzes zum Einsatz kamen, können in dem Projektbericht (Chimani et al. 2016) nachgelesen werden.

Dieser ist über das CCCA-Datenzentrum (https://data.ccca.ac.at/dataset/endbericht-oks15-klimaszenarien-fur-osterreich-daten-methoden-klimaanalyse-v01) sowie die Ministeriumswebseite (https://www.bmnt.gv.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik_national/anpassungsstrategie/klimaszenarien.html) downloadbar.
Die Erweiterung des Modelldatensatzes für weitere Modelle und zusätzliche Szenarien wurden analog zu den in ÖKS15 verwendeten Methoden durchgeführt.

## Evaluation der gegitterten Beobachtungsdaten

Gegitterte **Klimabeobachtungsdaten** bestehen aus einer zeitlichen Abfolge räumlicher Felder mit gemessener Klimainformation. Im konkreten Fall kann man sich darunter Gitterpunktfelder von Lufttemperatur, Niederschlagssumme, Globalstrahlung und potentielle Evapotranspiration vorstellen, die für jeden Tag seit 1961 vorliegen und das Staatsgebiet Österreichs in Ein-Kilometer-Auflösung räumlich abdecken. Die Grundlage bilden immer Beobachtungsdaten von Klimastationen.

Diese Datensätze werden üblicherweise von den nationalen meteorologischen Diensten, die auch das Stationsnetz betreiben, erstellt. In Österreich wurden gegitterte Beobachtungsdatensätze an der ZAMG entwickelt, von denen folgende im CCCA-Datenportal bereitgestellt sind und hier näher begutachtet werden:

- SPARTACUS: Minimum und Maximum der Lufttemperatur (Hiebl und Frei, 2016)
- GPARD1: Niederschlagssumme (Hofstätter et al., 2015)
- APOLIS: Globalstrahlung (Olefs, 2013)
- ARET: potentielle Evapotranspiration (Haslinger und Bartsch, 2016)

Ihnen sind die zeitliche **Auflösung** von einem Tag, die räumliche Auflösung von einem Kilometer, der Geltungsbereich Österreich sowie das räumliche Bezugssystem (ETRS89/Austria Lambert) gemein. Während Lufttemperatur, Niederschlag und potentielle Evapotranspiration ab 1961 vorliegen, ist die Globalstrahlung erst ab 1980 verfügbar. Der Zeitraum aller Datensätze endet in der vorliegenden Betrachtung mit dem Jahr 2011.
Die Entwicklung gegitterter Klimabeobachtungsdatensätze ist stark anwendungsgetrieben. Bereits realisierte und **naheliegende Anwendungen** betreffen Modellierungs-, Reanalyse-, Monitoring- und Planungsaufgaben in der Hydrologie (z. B. Abflussmodellierung, Hochwasserschutz, Dürrerisiko), in der Land- und Forstwirtschaft (z. B. Eignungskarten, Agrarintensität, Pflanzenschädlinge), im Bereich Energie und Infrastruktur (z. B. erneuerbare Energieressourcen, Bauplanung), im Themenkreis Schnee und Eis (z. B. Schneedecken-, Gletschermodellierung, Hangstabilität) und nicht zuletzt in der Klimaforschung (z. B. Klimamonitoring, Downscaling von Klimamodellen, Modellvalidierung, Klimaanpassung).

So vielfältig die Anwendungsmöglichkeiten sind, so gut müssen Nutzerinnen und Nutzer Kenntnis über Potenziale und Einschränkungen gegitterter Klimabeobachtungsdatensätze Bescheid wissen. Sie müssen die Stärken und Schwächen der Datensätze kennen, um deren Eignung für die geplante Anwendung verlässlich beurteilen zu können. Das ist eine unverzichtbare Voraussetzung für die sichere und somit nutzbringende Interpretation der eigenen Ergebnisse! Dieser Wissensvermittlung dienen die folgenden Seiten. Sie enthalten die Ergebnisse umfassender Tests, Validierungen und Expertisen in stark komprimierter und nutzernaher Form.

Ziel ist es, anwendungsorientiert Antworten auf wesentliche, die Datenqualität betreffende Fragen zu geben. Da einerseits die vier betrachteten Datensätze Unterschiede in der Erstellung aufweisen (verschiedene Messnetze, verschiedene Interpolationsmethoden) und andererseits unterschiedliche Evaluierungsmöglichkeiten gegeben sind (in Abhängigkeit von der Interpolationsmethode, Verfügbarkeit unabhängiger Datensätze), ergeben sich naturgemäß unterschiedliche Möglichkeiten der Evaluierung. Anders gesagt: Nicht jede Validierungsmethode ist für jeden Datensatz umsetzbar oder sinnvoll.

## Wie groß sind die mittleren Fehler?

Um informierte Anwendungen und Entscheidungsfindungen auf Grundlage der gegitterten Klimabeobachtungsdatensätze zu fördern, ist ein quantitatives Verständnis der Datengenauigkeit hilfreich. Die zentralen Ergebnisse von Leave-one-out-Kreuzvalidierung werden hier aus Nutzersicht diskutiert.

Die mittleren Interpolationsfehler spiegeln die räumliche Variabilität der Klimavariablen wieder: Sie sind vertretbar bei der Temperatur, erhöht bei der Globalstrahlung, jedoch beträchtlich beim Niederschlag.

| Abk. | deutsche Bezeichnung | englische Bezeichnung | Interpretation | ideale Interpolation |
|---|---|---|---|---|
| ME | mittlerer Fehler | mean error (bias) | Verzerrung, systematische Fehlerkomponente | T: 0 °C<br>RR, G, PET: 1 |
| MAE | mittlerer absoluter Fehler | mean absolute error | „mittlerer (additiver) Fehler“, gibt nicht die Richtung an | T: 0 °C |
| RMSE | Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler | root-mean-square error | „Standardabweichung“ des Fehlers, sensitiv auf Ausreißer, von Zufallsfehlern dominiert | T: 0 °C |
| RMSF | Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerbruch | root-mean-square error fraction | mittlerer (multiplikativer) Fehler, von Zufallsfehlern dominiert | RR, G, PET: 1 |

***Tabelle 3:*** *Die wichtigsten Fehlermaße und ihre Bedeutung (T...Temperatur, RR...Niederschlag, G...Globalstrahlung, PET...potentielle Evaptranspiration)*

In den täglichen **Lufttemperaturfeldern** gibt es keine systematische Unter- oder Überschätzung durch die Interpolationsmethode. Anwendungen müssen mit einem MAE von 1,1 °C für die Minimum- (Tn) und 1,0 °C für die Maximumtemperatur (Tx) rechnen.

Bei den täglichen **Niederschlagsfeldern (RR)** müssen Nutzerinnen und Nutzer laut **Leave-one-out-Kreuzvalidierung** (beschränkt auf Beobachtungsfälle ≥3 mm) mit einem substanziellen Zufallsfehler in der Größenordnung von 1,5 rechnen. Das bedeutet, dass beispielsweise 10mm tatsächlicher Niederschlag in der Interpolation an einem Gitterpunkt als 10mm/1,5=6,7mm oder 10mm*1,5=15mm dargestellt wird (allerdings gehen in diese Auswertung auch geringe Niederschlagsmengen von etwas über 3mm ein). Der gesamte systematische Fehler ist auch hier vernachlässigbar.

Die täglichen **Globalstrahlungsfelder** haben einen nicht vernachlässigbaren mittleren Fehler im Vergleich zu unabhängigen Stationsdaten.
Der RMSF beträgt durchschnittlich etwa 31 %. Das entspricht in etwa 0,5 kWh/m².

| Klimavariable | Datensatz | N | ME | MAE | RMSE | RMSF |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Tn<br>Tx | SPARTACUS | 3.211.278<br>3.211.278 | 0,0 °C<br>0,0 °C | 1,1 °C<br>1,0 °C | 1,5 °C<br>1,3 °C | –<br>– |
| RR (≥ 3 mm) | GPARD1 | 9.554.566 | 0,99 | – | – | 1,48 |
| Globalstrahlung (≥ 0,5 kWh/m²) | APOLIS | 124.026 | 1,05 | – | – | 1,31 |

*Tabelle 4: Mittlere Fehlermaße aus Leave-one-out-Kreuzvalidierung (Tn, Tx, RR) bzw. Validierung mit unabhängigen Beobachtungsdaten (Globalstrahlung, PET). N gibt die Anzahl der für die Verwendung verwendeten Werte an.*

Geringe mittlere Fehler bedeuten allerdings nicht, dass es nicht in bestimmten Situationen zu relevanten systematischen Fehlern kommt, wie der Abschnitt „Wird die Qualität des Datensatzes von Jahreszeiten und Wetterlagen beeinflusst?“ (Seite 25) verdeutlicht.

Die Evaluierungen in dieser Guideline beruhen großteils auf so genannter **Leave-one-out-Kreuzvalidierung**. Dabei werden modellierte Werte an Gitterpunkten und Beobachtungen gegenübergestellt, was oft die einzige Möglichkeit bildet, Fehlermaße zu berechnen.

Allerdings steht diese punktfixierte Gegenüberstellung im klaren Widerspruch der meisten Anwendungen, welche Gitterpunktwerte als räumlich repräsentative Werte interpretieren sollten oder Gebietsmittel betrachten. Die in den Guidelines diskutierten Evaluierungsfehler sind also pessimistische Annahmen und können als Obergrenzen des zu erwartenden Fehlers angesehen werden.

## Ändert sich die Qualität über die Zeit hinweg?

Eine hohe zeitliche Konsistenz der Qualität ist für die Verlässlichkeit von Klimadatensätzen besonders wichtig. Schließlich werden aus ihnen u. a. zeitliche Trends und Veränderungen des Klimas abgeleitet.

Eine leichte zeitliche Inkonsistenz in den ÖKS15-Beobachtungsdatensätzen (für Temperatur, Niederschlag und potentielle Evapotranspiration) ergibt sich daraus, dass in den frühen Jahren der Datensätze (etwa 1961-1970) häufiger Fehlwerte auftraten als in späteren Jahren. Diese sollte vom Ausmaß her allerdings keine Auswirkungen auf Anwendungsergebnisse haben.

Die **zeitliche Konstanz der Datensätze** ist im Wesentlichen von der durchgehenden Verfügbarkeit der zugrundeliegenden Beobachtungsdaten abhängig. Daher wurden für die Generierung der ÖKS15-Beobachtungsdatensätze möglichst konsistente Zeitreihen verwendet. Dies betrifft vor allem die Temperaturdatensätze (Tagesmittel, -minimum und –maximum, SPARTACUS) sowie den Niederschlagsdatensatz (GPARD-1), da hier ausschließlich Interpolationsverfahren mit Berücksichtigung topographischer Gegebenheiten angewendet wurden.

Für den Datensatz der Globalstrahlung (APOLIS) wurde hingegen ein Strahlungsmodell (STRAHLGRID) verwendet, der Datensatz der potentiellen Evapotranspiration (ARET) wurde direkt aus dem SPARTACUS-Temperaturdatensatz abgeleitet.

Um einen robusten **Niederschlagsdatensatz** zu generieren, wurden Daten auf Tagesbasis und auf Monatsbasis kombiniert (Hofstätter et al., 2015). Dabei wurden bei der zeitlichen Konsistenz der Tagesdaten besonders strenge Maßstäbe angelegt. So wurden z. B. Stationszeitreihen, die längere Lücken aufweisen (> 100 Tage), ausgeschlossen genauso wie jene, die eine zu hohe Anzahl an Fehlwerten aufweisen oder deren Standort sich im Laufe der Zeit wesentlich verändert hat.

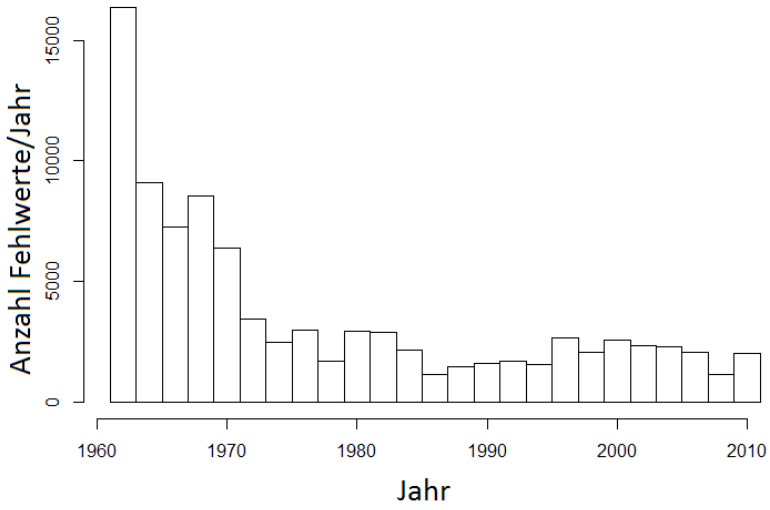



*Abbildung 9: Entwicklung der Fehlwerte pro Jahr (Summe von 523 verwendeten Österreichischen Stationen) im Niederschlagsdatensatz (Tagesdaten) für den Zeitraum 1961-2010*
*Beispiele:*
*1961: 8 Fehlwerte/Station*
*1962-1965: ca. 16 Fehlwerte/Station*
*2001-2010: ca. 5 Fehlwerte/Station*

Bei den Beobachtungszeitreihen für die **Temperatur** wurden alle Zeitreihen, die mehr als 5 % Fehlwerte im Zeitraum 1961-2011 aufweisen, von der Interpolation ausgeschlossen. Für Stationen, die im Beobachtungszeitraum um mehr als 30m in der Höhe verlegt wurden, wurde eine Höhenanpassung durchgeführt. Die verbleibenden Zeitreihen wurden teilweise **homogenisiert**. Des Weiteren wurden lineare Langzeittrends an jene der **homogenisierten** Stationszeitreihen angepasst (Hiebl und Frei, 2016).

Trotz dieser Maßnahmen sind sehr leichte **Qualitätsunterschiede** zwischen den Zeiträumen 1961-1970 und 2001-2010 für die Datensätze von Temperatur und Niederschlag zu bemerken, die allerdings bei Anwendung der Datensätze kaum ins Gewicht fallen sollten. Für den Datensatz der **Globalstrahlung** war es auf Grund der insgesamt sehr geringen Anzahl an Stationsdaten nicht möglich, auf eine zeitliche Konsistenz zu achten.

Bei der Erstellung der Temperatur- und Niederschlagsdatensätze wurde auf ein hohes Maß an Robustheit geachtet. Stationen, die die Anforderungen an die zeitliche Konsistenz der Messungen nicht erfüllten, wurden zur Erzeugung der Datensätze nicht verwendet. Stationen, mit zu geringer Datendichte oder zu starken Standortsänderungen wurden nicht berücksichtigt. Korrekturen für nicht-klimatische Einflussfaktoren wurden durchgeführt.

### Wird die Qualität des Datensatzes von Jahreszeiten und Wetterlagen beeinflusst?

Ja. Im Unterschied zur langjährigen Konsistenz unterliegt die Qualität der Beobachtungsdatensätze jahreszeitlichen Schwankungen sowie Schwankungen aufgrund wechselnder Wetterlagen. Einige Gründe dafür sind z. B. Kaltluftseen und Inversionswetterlagen im Winter, veränderliche Temperaturprofile in der Atmosphäre und der Wechsel zwischen großräumigen Niederschlagsperioden und lokalen Schauern und Gewittern.

Die Qualität der Beobachtungsdatensätze verändert sich sowohl im Jahresverlauf wie auch durch die Abfolge unterschiedlicher Wetterlagen. Je nachdem welcher Parameter betrachtet wird, hat dies unterschiedliche Ursachen sowie Auswirkungen auf die Interpretation der Daten.

**Temperatur**fehler sind generell im Winter etwas höher als im Sommer, wie die mittleren Jahresläufe des mittleren absoluten Fehlers zeigen. Der mittlere Fehler zeigt, dass Temperaturminima in typischen Kaltluftseelagen systematisch überschätzt werden (sofern keine Beobachtungsstation in der Nähe liegt). Umgekehrt werden Maxima in Gipfellagen systematisch überschätzt.

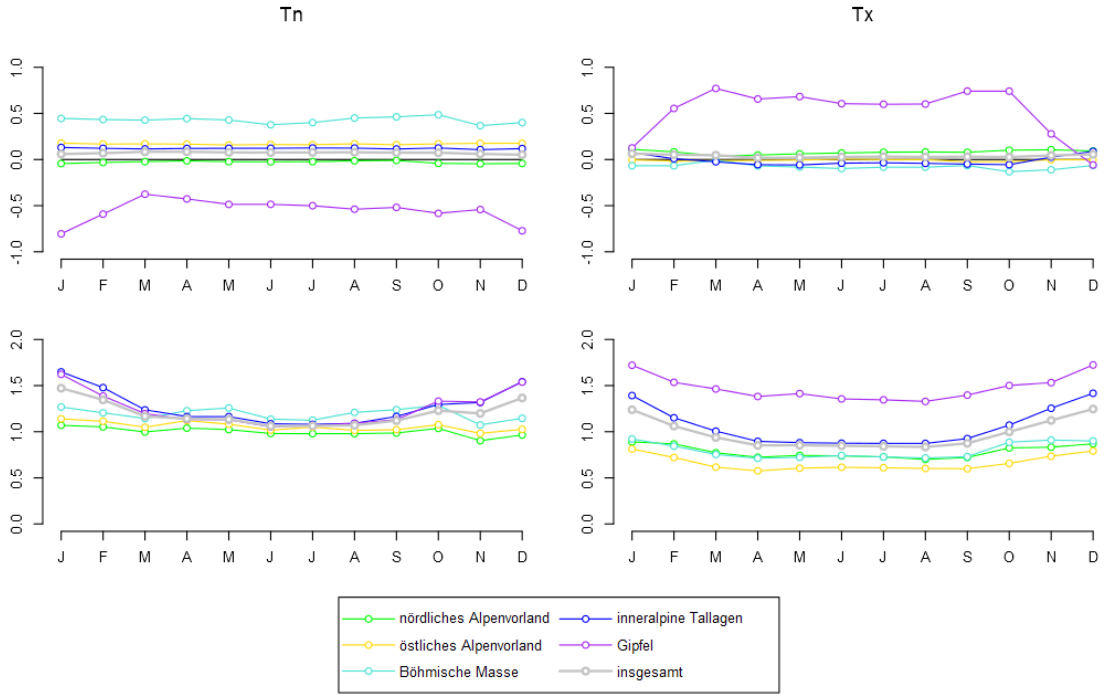



*Abbildung 10: Mittlere Jahresgänge von mittleren Fehler (ME, oben) und mittlerem absoluten Fehler (MAE, unten) der Interpolation von Temperaturminimum (Tn) und -maximum (Tx), aufgegliedert nach Großlandschaften.*

Beim **Niederschlag** wird die Qualität der gegitterten Niederschlagsfelder hauptsächlich durch unterschiedliche Niederschlagsarten bestimmt. **Stratiforme** Niederschläge, wie sie z. B. im Einflussbereich von Tiefdruckgebieten auftreten, sind großräumig und dauern typischer Weise länger als einen Tag bis hin zu mehreren Tagen. Die räumliche Niederschlagsverteilung ist dabei relativ gleichmäßig und kann vom Stationsnetz gut erfasst werden. Dadurch weisen die gegitterten Niederschlagsdaten für Tage mit **stratiformem** Niederschlag eine relativ hohe Qualität auf. Anders ist dies an Tagen mit überwiegend konvektiven Niederschlägen.

Diese treten häufig im Zuge von Frontdurchgängen aber auch während Gewittern an Tagen mit labiler Luftschichtung auf. Sie gehen oft als Starkregen nieder, dauern nur wenige Stunden und beschränken sich auf eingegrenzte Räume. Sehr kleinräumige Starkregen können einerseits vom Messnetz unterschätzt werden, oder aber sie werden gar nicht erst erfasst.

Dies führt dazu, dass der Beobachtungsdatensatz die Niederschlagssituation an solchen Tagen nur annähernd genau darstellen kann. Da konvektive Niederschläge hauptsächlich im Frühjahr und Sommer auftreten, und **stratiforme** Niederschläge im Winter deutlich überwiegen, kann die Qualität des gegitterten Niederschlagsdatensatzes im Winter generell höher eingeschätzt werden als im Sommer, auch wenn man in Betracht zieht, dass die Niederschlagsmessung durch Schneefall beeinflusst sein kann.

Die absoluten Fehlermaße der **Globalstrahlungs**interpolation (in kWh/m²) zeigen deutlich erkennbare Jahresgänge. Während im Winter keine systematische Verzerrung vorliegt, werden sommerliche Strahlungswerte tendenziell geringfügig unterschätzt. Der mittlere absolute Fehler unterliegt einem markanten Jahresgang mit höheren Werten im Sommer, spiegelt allerdings den jahreszeitlichen Verlauf der mittleren Globalstrahlung wider. Relative Fehlermaße, in Bezug auf die monatlichen Beobachtungswerte, zeigen, dass die Interpolationsgüte tatsächlich im Sommer am besten ist. Das ist durch die gleichmäßigere Verteilung der Bewölkung im Sommer im Vergleich zu kleinräumigen Nebelfeldern im Winter zu erklären.

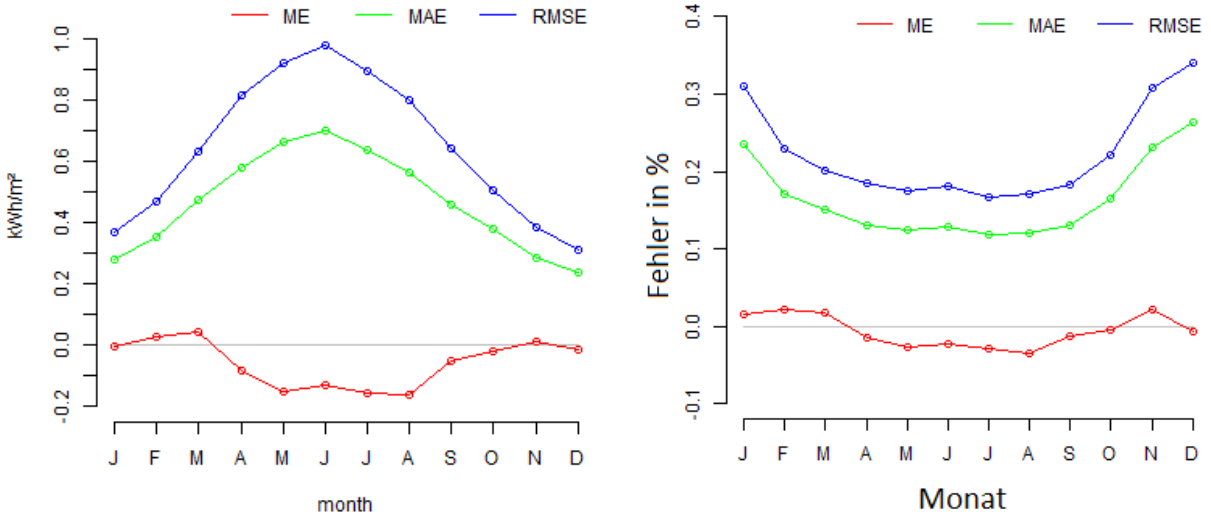



*Abbildung 11: Mittlere Jahresgänge von mittleren Fehler (ME), mittlerem absoluten Fehler (MAE) und Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehler (RMSE) der Interpolation von Globalstrahlung, in absoluten Einheiten (links) und bezogen auf die jeweiligen monatlichen Globalstrahlungssummen (rechts).*

Der Evapotranspirationsdatensatz ARET beruht im Gegensatz zu den anderen drei Datensätzen nicht auf der direkten Interpolation von Stationsdaten, sondern setzt auf die Analyse bestehender Temperaturfelder auf.

Deshalb ist für die Evapotranspiration keine quantitative Fehlerabschätzung anhand von Leave-one-out-Kreuzvalidierung möglich. Aussagen hierzu beschränken sich auf quantitativen Vergleich und Erfahrungswerte (siehe Abschnitt „Wie gut sind die ÖKS15-Datensätze im Vergleich zu anderen Gitterdatensätzen?“, Seite 35).

## Welche Bedeutung hat die effektive Auflösung (im Vergleich zur technischen Auflösung)?

Die **effektive Auflösung** beschreibt die räumliche Auflösung, die für einen gegitterten Datensatz ab der der Datensatz sinnvoll interpretiert werden kann. Sie ergibt sich durch die dem Datensatz zugrundeliegende Stationsdichte und die Auflösung weiterer verwendeter geographischer Informationen.

In den meisten Fällen ist die effektive Auflösung weitaus geringer als die technische Auflösung (1 km x 1 km für die ÖKS15-Datensätze). Die Verwendung des Datensatzes in höherer Auflösung als der effektiven Auflösung führt zu höheren Unsicherheiten in den Ergebnissen und wird daher nur mit Vorbehalt empfohlen. Beim Niederschlag ist die Unsicherheit durch die Wahl der Gitterpunkte ab einer Fläche von 40 km x 40 km (**effektive Auflösung**) zu vernachlässigen.

Der ÖKS15-Datensatz bietet mit seinem 1 km x 1 km Gitternetz (technische **Auflösung**) eine sehr hohe Dichte an Datenpunkten. Je nach Anwendung kann der Datennutzer entscheiden welche und wie viele Datenpunkte für die jeweiligen Auswertungen verwendet werden sollen. Dennoch ist bei der Auswahl der Datenpunkte Vorsicht geboten, da einzelne Datenpunkte sich als nicht repräsentativ für die angegebene geographische Lage herausstellen können und die Qualität des Auswertungsergebnisses dadurch beeinträchtigt sein kann. Im ungünstigsten Fall kann es zu **Fehlinterpretationen** kommen, die das lokale Klima und seine Entwicklung stark abweichend von der Realität darstellen, wodurch falsche Rückschlüsse z. B. für Anpassungsmaßnahmen abgeleitet werden können. Das kann durch mikroklimatische Prozesse, wie zum Beispiel kleinräumige Kaltluftseen, bedingt sein, die die nächstgelegene Station nicht beeinflussen. Die effektive Auflösung ist daher jene Auflösung, ab der zugrundeliegende Datensatz räumlich repräsentative Aussagen unterstützt. Sie ist von Parameter zu Parameter verschieden und hängt u. a. von der Stationsdichte, Topographie, Wetterlage und Jahreszeit ab. Daher kann man für sie auch keinen exakten Wert angeben.

Es empfiehlt sich die Auswahl mehrerer Gitterpunkte um das Zielgebiet herum. Dadurch können

1) Mittelwerte berechnet werden, die für das Gebiet repräsentativ sind.
2) Die Spannweite der Daten bestimmt werden, die eine erste Aussage über Unsicherheit der Einzelwerte erlaubt.

Je nach Parameter und geplanten Untersuchungen variiert die Größe der Auswahl. Abbildung 12 zeigt am Beispiel des **Niederschlags**, ab welcher Auflösung die räumlich bedingte Unsicherheit nicht mehr ins Gewicht fällt (**effektive Auflösung**). Für diese Untersuchung wurden unterschiedliche Einzugsgebiete Österreichs verwendet und für mehrere Jahre ausgehend von den gemessenen Tageswerten jeweils 100 Tagesniederschlagswerte für jedes Gebiet erzeugt (die Bestimmung des so erzeugten Ensembles erfolgte über geostatische Methoden). Die Spanne der dadurch erzeugten Tagesniederschläge in den einzelnen Gebieten wurde in Abhängigkeit von der Größe des Gebietes ausgewertet. Für den Niederschlag zeigt sich, dass Gebiete bis 2000 km$^2$ hohe Unsicherheiten haben. Das entspricht einer Gitterbox von etwa 40 km Seitenlänge. Werden kleinere Gebiete gewählt, so ist mit erhöhter Wahrscheinlichkeit mit Fehlinterpretationen zu rechnen, die im Zusammenhang mit der **effektiven Auflösung** des Datensatzes stehen.

Für die **Temperatur** ist die **effektive Auflösung** deutlich feiner und ist von dem Stationsabstand (räumlich unterschiedlich) sowie der verwendeten Topographie abhängig. Die aus der Temperatur abgeleitete potentielle **Evapotranspiration** hat die gleiche effektive Auflösung.

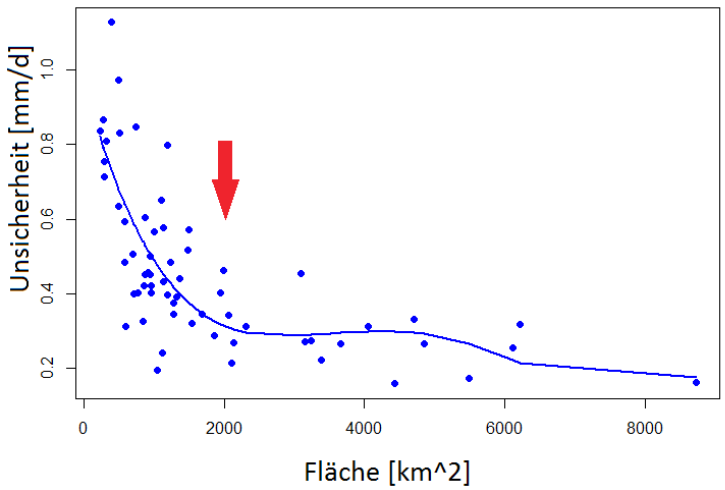



*Abbildung 12: Auswertung zur effektiven räumlichen Auflösung des Beobachtungsdatensatzes für den Niederschlag in ÖKS15. Die Unsicherheit ergibt sich aus der Standardabweichung von Tagesniederschlägen in Einzugsgebieten mit unterschiedlichen Größen. Der rote Pfeil markiert die effektive Auflösung.*

Um Interpretationsprobleme im Zusammenhang mit der effektiven Auflösung zu vermeiden empfiehlt es sich jeweils eine größere Umgebung um den gewünschten Datenpunkt für die Auswertung heranzuziehen. Die Datenpunkte dieser Umgebung könne entweder als räumliches Mittel oder aber als Vielzahl von Einzelwerten mit statistischer Spanne betrachtet werden.

### Welche Auswirkung hat der Glättungseffekt?

Nahezu jeder Interpolationsprozess führt zu einer Glättung der interpolierten Werte im Vergleich zur ursprünglichen Datengrundlage. Er führt etwa dazu, dass die ursprünglichen gemessenen Maxima und Minima im interpolierten Datensatz niedriger bzw. höher ausfallen. Zusätzlich werden niedrige Werte im gegitterten Datensatz tendenziell überschätzt und höhere unter-

Unter Abschnitt „Welche Bedeutung hat die effektive Auflösung im Vergleich zur technischen Auflösung?“ (Seite 27) wird beschrieben, dass die mittlere Abweichung der ÖKS15-Beobachtungsdatensätze gering ausfällt. Dennoch kann man für unterschiedliche Wertebereiche der gegitterten meteorologischen Parameter auch unterschiedliche mittlere Abweichungen feststellen, den sogenannten **konditionalen Bias**.

Bei gegitterten, d. h. interpolierten Beobachtungsdatensätzen ist oft zu beobachten, dass als Folge des Interpolationsvorganges niedrige Werte überschätzt und hohe Werte unterschätzt werden. Die gegitterten Daten sind dadurch etwas glatter als die Realität, d. h. sie weisen im Mittel eine geringere **Variabilität** als die ursprünglichen Messdaten auf.

Für den Anwender der Daten bedeutet dies, dass **Klimaextreme** teilweise gedämpft erscheinen. Ein Phänomen, das sich auch auf die von den ursprünglichen Parametern abgeleiteten Klimaindizes auswirkt. Dennoch darf nicht übersehen werden, dass diese Glättungseffekte zwar im Mittel zutreffen, dass andererseits die Werte einzelner Datenpunkte davon ausgenommen sein können.

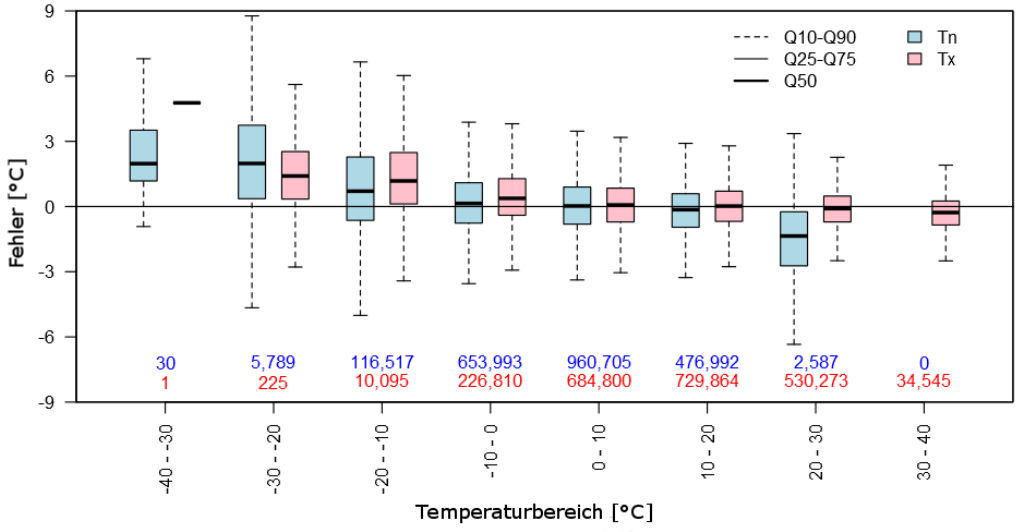
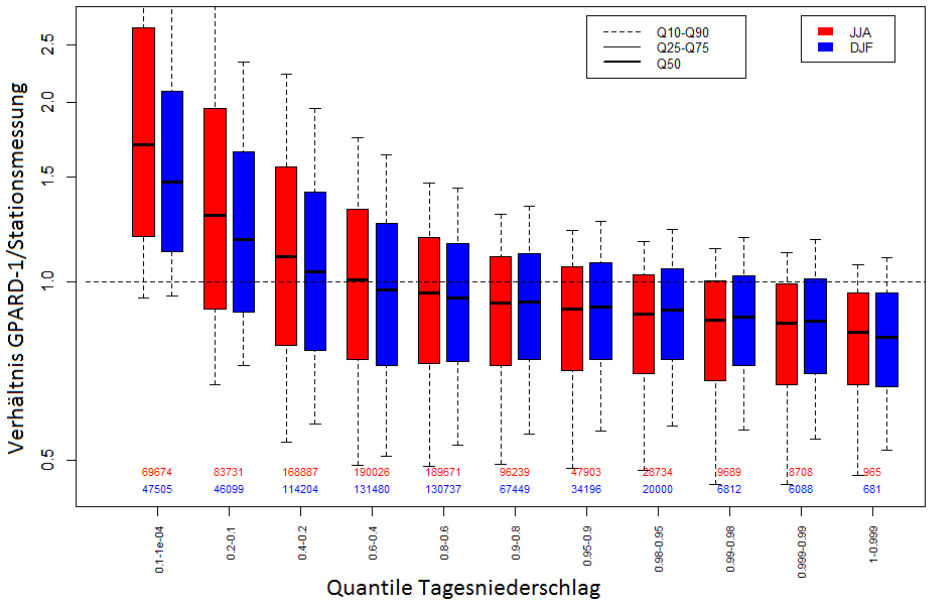



*Abbildung 13: Konditionaler Bias für Tagesminima (blau) und Tagesmaxima (rosa). Die Zahlen unterhalb der Balken geben die Anzahl der berücksichtigten Niederschlagsereignisse in der entsprechenden Quantilklasse an.*

Im häufig auftretenden **Temperaturbereich** zwischen –10 und +30 °C treten keine auffälligen systematischen Verzerrungen auf. Eine Ausnahme bilden besonders hohe Minimumtemperaturen über 20 °C, die systematisch unterschätzt werden. Der Grund hierfür liegt darin, dass derartige Temperaturen an Innenstadtstationen bei Weglassen der Messung (Leave-one-out-Kreuzvalidierung) nicht reproduziert würden. Für den Wertebereich von unter –10 °C ist ein positiver konditionaler (werteabhängiger) **Bias** ersichtlich: Sehr tiefe Temperaturen werden also bei Fehlen einer Messung systematisch überschätzt. (Abbildung 13)




| | **Sommer: Juni, Juli, August (ungefähres Mittel (gerundet) der Klasse 60 %-80 % = 12mm/Tag)** | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Grenze | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 0.98 | 0.99 | 0.999 | 1 |
| mm/Tag | 1.6 | 2.5 | 4.8 | 8.7 | 16.0 | 23.8 | 31.8 | 42.8 | 52.2 | 89.0 | 228.0 |
| | **Winter: Dezember, Jänner, Februar (ungefähres Mittel (gerundet) der Klasse 40 %-60 % = 4mm/Tag)** | | | | | | | | | | |
| Grenze | 0.1 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.8 | 0.9 | 0.95 | 0.98 | 0.99 | 0.999 | 1 |
| mm/Tag | 1.4 | 1.9 | 3.2 | 5.5 | 9.9 | 15.1 | 21.0 | 29.6 | 37.0 | 66.4 | 174.5 |

*Abbildung 14: Konditionaler Bias für Tagesniederschläge in den Sommer- (JJA, rot) und Wintermonaten (DJF, blau) und die Grenzen der Quantilklassen (0,1≙10 % d.h: 10 % der Tagesniederschläge sind geringer als der angegebene Wert in mm/Tag,0,2≙20 % d.h: 20 % der Tagesniederschläge sind geringer als der angegebene Wert in mm/Tag,…) in mm/Tag. Die Zahlen unterhalb der Balken geben die Anzahl der berücksichtigten Niederschlagsereignisse in der entsprechenden Quantilklasse an.*

Das Beispiel in Abbildung 14 zeigt den Glättungseffekt für den **Tagesniederschlag** an 523 stationsnahen Datenpunkten. Die Über- bzw. Unterschätzung ist als das Verhältnis zwischen den gegitterten Werten und den Stationsmessungen angegeben, wobei zwischen Sommer- und Wintermonaten unterschieden wird. So ist etwa die Grenze zwischen Niederschlagsunterschätzung und –überschätzung im Sommer bei etwa 12mm/Tag anzusiedeln und im Winter bei etwa 4mm/Tag. Da die durchschnittlichen Niederschlagshöhen im Sommer und Winter stark variieren, sind die Wertebereiche in Quantilen anstatt in Absolutwerten angegeben.

Klimaextreme können aufgrund des Glättungseffektes gedämpft erscheinen, das gilt auch für abgeleitete Klimaindizes. Beim Niederschlag kann die Grenze zwischen Über- und Unterschätzung bei ca. 12mm/Tag im Sommer und etwa 4mm/Tag im Winter festgelegt werden.

### Ist die Qualität in ganz Österreich gleich gut?

Nein. Die Fehlermaße für gegitterte Beobachtungsdatensätze weisen in unterschiedlichen Regionen Österreichs unterschiedliche Werte auf. Je komplexer das Gelände und somit die regionale Abwandlung des Klimas und je weniger Beobachtungsstationen in der Umgebung vorhanden sind, desto höher sind die Fehler, mit denen zu rechnen ist.

Österreich weist aufgrund seiner stark gegliederten **Topographie** ein extrem vielfältiges Geländeklima mit oft starken Unterschieden auf kurzer Entfernung auf. Das trifft etwa auf Inversions- und Föhnlagen oder Gewitterregen zu. Dementsprechend ist auch die Interpolationsgüte von Region zu Region unterschiedlich. Zusätzlich hängt die Qualität der Interpolationsergebnisse von der räumlichen Dichte des Stationsnetzes ab. Die Stationsdichte variiert nicht nur in der Horizontalen, sondern nimmt auch mit zunehmender Seehöhe drastisch ab. Im Folgenden werden Österreichkarten des mittleren Fehlers betrachtet.

Der Interpolationsfehler des **Temperaturminimums** ist größtenteils höher als jener des **Temperaturmaximums**. In flachen Regionen mit vielen Stationen beträgt der mittlere absolute Fehler meist unter 1,0 °C. Im Alpenbereich liegen die mittleren absoluten Fehler verbreitet zwischen 1,0 °C und 1,5 °C. In hochalpinen Lagen an der Grenze zu Südtirol werden die höchsten Fehlerwerte erreicht: bis zu 2,4 °C beim Temperaturminimum, bis zu 2,1 °C beim Temperaturmaximum. Die Abwandlung der Fehlermaße der Temperaturinterpolation nach Großlandschaften wurde schon in Abschnitt „Wird die Qualität des Datensatzes von Jahreszeiten und Wetterlagen beeinflusst?“ (Seite 25) besprochen.

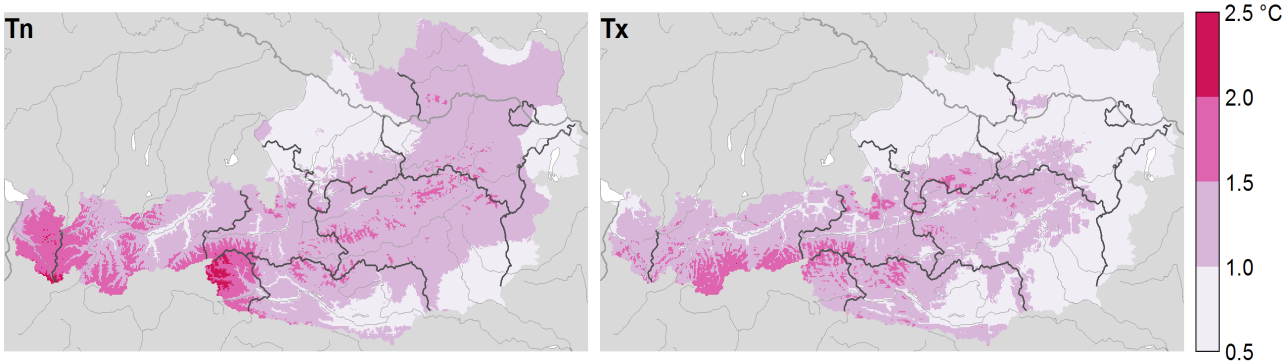



*Abbildung 15: Räumliche Verteilung des mittleren absoluten Fehlers (MAE) für Temperaturminimum (Tn) und -maximum (Tx).*

Die Interpolationsfehler der täglichen **Niederschlags**summe sind im Mittel noch im Rheintal, im oberösterreichischen Donauraum und in Wien am geringsten. Die Interpolationsgüte ist in alpinen Hochlagen, besonders in den Zentralalpen, herabgesetzt.

Aufgrund der dynamischen Art der **Globalstrahlungs**interpolation und mangelnder unabhängiger Beobachtungsstationen ist die Erzeugung einer Fehlerkarte für die Globalstrahlung nicht möglich. Ähnliches gilt für die potentielle **Evapotranspiration**, deren Interpolation nicht direkt auf Stationsbeobachtungen beruht.

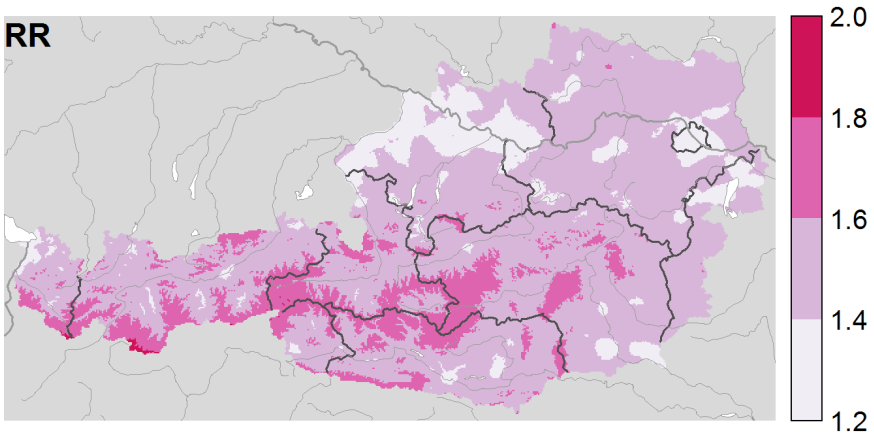



*Abbildung 16: Räumliche Verteilung der mittleren Wurzel aus dem mittleren quadratischen Fehlerbruch (RMSF) für Niederschlag (RR).*

Betrachtet man statt Gitterpunktsdaten Flächenmittel, dann sind die Fehlermaße der Leave-one-out-Kreuzvalidierung zu hoch angesetzt. Zufällige Fehler gleichen sich nämlich über größere Gebiete (und über längere Zeiträume) aus. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Interpolationsfehler schon in einem Gebiet von 16 km×16 km gegenüber der originalen 1-km-Auflösung um über ein Viertel niedriger ist.

## Wie gut ist die Qualität abgeleiteter Indizes?

Prinzipiell orientiert sich die Qualität abgeleiteter Klimaindizes an den Unsicherheiten, die für die ursprünglichen Parameter im ÖKS15-Datensatz bekannt sind. Jedoch ist je nach Definition des jeweiligen Klimaindex mit höherer oder niedrigerer Unsicherheit im Vergleich zum Basisdatensatz zu rechnen. So können z. B. Indizes, die Extremwerte abbilden (e. g. Hitze-/Kältetage und -perioden) aufgrund des Glättungseffektes eher unterschätzt werden, Niederschlagsperioden hinsichtlich ihrer Dauer hingegen überschätzt werden.

Die abgeleiteten **Klimaindizes** wurden analog zu den ursprünglichen meteorologischen Parametern evaluiert. Dabei stellt sich heraus, dass die Muster der statistischen Abweichungen, die für die Ursprungsparameter gefunden wurden, im Großen und Ganzen auch auf die Klimaindizes übertragbar sind, allerdings in unterschiedlicher Intensität.

Tabelle 5 liefert mittlere Fehler der Klimaindizes. Je nach Definition des Index werden die Werte im gegitterten Datensatz gegenüber den Stationszeitreihen tendenziell über- oder unterschätzt. Hier kommt u. a. auch der weiter oben erwähnte Glättungseffekt zum Tragen.

| Index kurz | Index lang | Beschreibung | mittlerer Fehler |
|---|---|---|---|
| **su25** | Sommertage | Tage mit einem Tagesmaximum über 25 °C | **+1 %** |
| **su30** | Hitzetage | Tage mit einem Tagesmaximum über 30 °C | **–5 %** |
| **tr20** | Tropennächte | Tage mit einem Tagesminimum über 20 °C | **–5 %** |
| **hw_sum_ days** | Hitzeepisoden | Eine mindestens 3 Tage andauernde durchgängige Episode, in der das Tagesminimum über 18 °C und das Tagesmaximum über 30 °C liegt. Betrachtet wird die Anzahl aller Tage, die in eine Hitzeepisode fallen. | **–1 %** |
| **kys** | Kysely Episoden | Eine Serie von zumindest 3 aufeinanderfolgenden Tagen mit einem Tagesmaximum über 30 °C. Die Episode wird nicht durch Tage unterbrochen deren Tageshöchsttemperatur über 25 °C liegt. | **–5 %** |
| **gsl** | Vegetationsperiode | Die Vegetationsperiode beginnt, wenn an mindestens 6 aufeinanderfolgenden Tagen die Tagesmitteltemperatur über 5 °C liegt und hält so lange an, bis an mindestens 6 aufeinanderfolgenden Tagen die Tagesmitteltemperatur unter 5 °C liegt. Betrachtet wird die mittlere Länge der Vegetationsperiode. | **+1 %** |
| **sd_gsl** | Beginn der Vegetationsperiode | Der mittlere Kalendertag des Jahres, an dem die Vegetationsperiode beginnt | **–0 d** |
| **cdd** | Kühlgradtagzahl | Summe der täglich ermittelten Differenzen zwischen der Raumtemperatur (20 °C) und der Tagesmitteltemperatur der Außenluft an jenen Tagen, an denen die Tagesmitteltemperatur 18,3 °C überschreitet.(Kühlbedarf wird angenommen) | **+5 %** |
| **fd0** | Frosttage | Tage, an denen das Tagesminimum unter 0,0 °C fällt | –1 % |
| **cw_sum_days** | Kälteepisoden | Eine zumindest 5 Tage andauernde durchgängige Episode, in der das Tagesmaximum unter 0 °C bleibt. Betrachtet wird die Summe aller Tage, die in eine Kälteepisode fallen | **+4 %** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **id0** | Eistage | Tage, an denen das Tagesmaximum und daher auch das Tagesminimum unter 0 °C liegen | **–1 %** |
| **id7** | Extreme Eistage | Tage, an denen das Tagesminimum unter -7 °C und das Tagesmaximum unter 0 °C liegt | **+3 %** |
| **tpd** | Tauperiodentage | Tage, an denen die Tagesmitteltemperatur 1,5 °C überschreitet | **+1 %** |
| **ftc** | Frost-Tau-Wechsel-tage | Tage an denen das Tagesmaximum über 0 °C liegt das Tagesminimum aber unter 0 °C bleibt. | **+0 %** |
| **hdd** | Heizgradtagszahl | Summe der täglich ermittelten Differenzen zwischen der Raumlufttemperatur (20 °C) und der Tagesmitteltemperatur der Außenluft an jenen Tagen, an denen die Tagesmitteltemperatur der Außenluft 12 °C unterschreitet (Heizbedarf wird angenommen) | **–0 %** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **rr1** | Niederschlagstage | Anzahl der Tage/Jahr, an denen die Niederschlagssumme mindestens 1 mm erreicht. | **+10 %** |
| **sdii** | Eintägige Niederschlagsintensität | Mittlere Niederschlagssumme an Niederschlagstagen | **-10 %** |
| **rx1day** | Maximale tägliche Niederschlagsmenge | Größte Niederschlagssumme eines Tages im Jahr | **-5 %** |
| **rx5day** | Maximale fünftägige Niederschlagsmenge | Größte Niederschlagssumme über einen zusammenhängenden Zeitraum von fünf Tagen | **0 %** |
| **rr1_30pct** | Niederschlagsmenge an Niederschlagstagen (30. Perzentil) | Niederschlagsschwellwerte für das 30. Perzentil | **0 %** |
| **rr1_60pct** | Niederschlagsmenge an Niederschlagstagen (60. Perzentil) | Niederschlagsschwellwerte für das 60. Perzentil | **-10 %** |

| | | | |
|---|---|---|---|
| **rr1_95pct** | Niederschlagsmenge an Niederschlagstagen (95. Perzentil) | Niederschlagsschwellwerte für das 95. Perzentil | **-15 %** |
| **rr1_moderate** | Anzahl der Tage im Perzentilbereich | Niederschlagsklasse moderat: 30 %-60 % | **+15 %** |
| **rr1_significant** | Anzahl der Tage im Perzentilbereich | Niederschlagsklasse beträchtlich: 60 %-90 % | **+10 %** |
| **rr1_extreme** | Anzahl der Tage im Perzentilbereich | Niederschlagsklasse extrem: >= 98 % | **-30 %*** |
| **cwd_sum_days** | Niederschlagsepisoden | Anzahl der Tage/Jahr, die in eine Niederschlagsepisode fallen (mind. 3 aufeinanderfolgende Tage mit mind. 1 mm Niederschlag) | **+20 %** |
| **cdd_sum_days** | Trockenepisoden | Anzahl der Tage/Jahr, die in eine Trockenepisode fallen (mind. 5 aufeinanderfolgende Tage mit Niederschlag unter 1 mm) | **-10 %** |

*Tabelle 5: Mittlerer (relativer) Fehler aus dem Vergleich jährlicher Klimaindexwerte, die aus Stationsdaten und Gitterpunktdaten berechnet wurden. * zeigt eine starke räumliche Variabilität der Abweichungen (von -50 % im Flachland zu +50 % im Gebirge) an.*

### Wie gut sind die ÖKS15-Datensätze im Vergleich zu anderen Gitterdatensätzen?

Der visuelle Vergleich einzelner Beispielfelder aus den gegitterten ÖKS15-Beobachtungsdaten mit entsprechenden Feldern aus anderen Gitterdatensätzen erlaubt eine qualitative Einschätzung der Interpolationsgüte.

Auch wenn andere Datensätze häufig mehr Eingangsinformation verwerten, sind die ÖKS15-Felder meist von ähnlicher oder annähernder Plausibilität. Und das obwohl für den längeren Zeitraum, für den sie zur Verfügung stehen, weniger Beobachtungsreihen eingebunden werden konnten.

Der **Vergleichsdatensatz** INCA ist das dynamische Nowcasting- und Kurzfristvorhersage-Tool der ZAMG und benutzt neben typischerweise mehr als 500 Stationsbeobachtungen auch Fernerkundungsdaten wie Satelliten- und Radardaten. Algorithmen und Eingangsdaten werden allerdings ständig angepasst.

INCA ist in 1-km-Auflösung bis ins Jahr 2006 zurück verfügbar. E-OBS ist ein europaweiter Klimagitterdatensatz des niederländischen Wetterdienstes KNMI. Es berücksichtigt im Bereich Österreichs nur rund 18 Stationen und bietet eine grobe Auflösung von ca. 28 km×19 km. Die Beispieltage wurden aufgrund signifikanter synoptischer Situationen, ohne Vorkenntnis der Plausibilität in einem bestimmten Datensatz, gewählt.

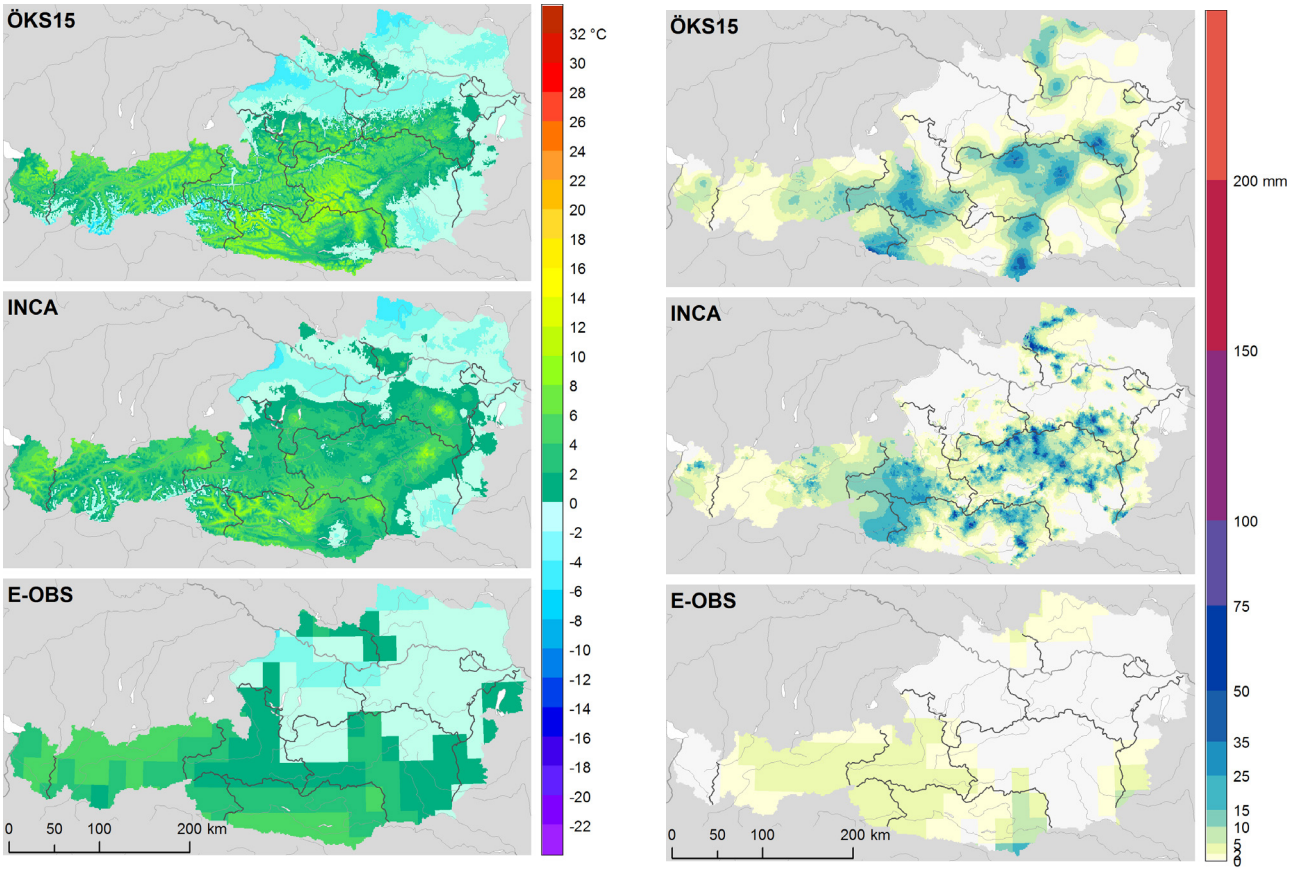



*Abbildung 17: Temperaturmaximum an einem Tag mit Inversionswetterlage (13.01.2006, links). Niederschlagssumme an einem Tag mit konvektiver Tätigkeit (23.07.2006, rechts).*

Eine komplexe Temperaturverteilung bietet ein Tag mit flachen **außeralpinen Inversionen und milden Bedingungen in Mittelgebirgslagen** (Abbildung 17 links). INCA zeigt innerhalb der Alpen ein Muster mit lokalen kalten und warmen Anomalien um Stationsstandorte. Das ÖKS15-Feld bietet ein sehr ähnliches Bild, aber mit wesentlich stärkerer topographischer Struktur. Die Auflösung von E-OBS lässt keine geländebezogenen Muster zu.

Eine flache Druckverteilung und labil geschichtete Warmluft charakterisieren diesen **heißen Sommertag mit verstreuten gewittrigen Regenschauern** (Abbildung 17 rechts). Die INCA-Analyse bietet ein reich strukturiertes Muster mit vielen intensiven, konvektiven Schauerzellen. Die hohe Auflösung in INCA stammt aus der Einbindung von Radardaten. Die Radareinbindung führt allerdings zu räumlich (und zeitlich) uneinheitlicher Genauigkeit. Das Muster ist viel glatter in inneralpinen Bereichen, in denen die Sichtbarkeit des Radars in tiefen Lagen abgeschattet ist. An anderen Tagen (nicht dargestellt) zeigt die Niederschlagsanalyse künstliche radiale Strukturen in der Nähe von Radarstandorten. E-OBS erkennt den kleinräumigen Charakter des Niederschlagsmusters nicht.

Das ÖKS15-Feld reproduziert das Muster, das in INCA zu sehen ist, mit allen großräumigeren Merkmalen, aber in einem glatteren Erscheinungsbild. Isolierte konvektive Zellen, die vom Stationsnetz nicht registriert werden, fehlen in ÖKS15. Es ist jedoch fraglich, ob alle kleinräumigen Bereiche konvektiver Aktivität aus dem **Radarkomposit** in INCA tatsächlich mit Niederschlag am Boden verbunden sind. Derartige Muster stellen die größte Herausforderung für rein stationsbasierte Datensätze dar. In der Mehrheit der Tage mit **stratiformer** oder gemischter Niederschlagscharakteristik liefert ÖKS15 verlässlichere Verteilungsmuster.

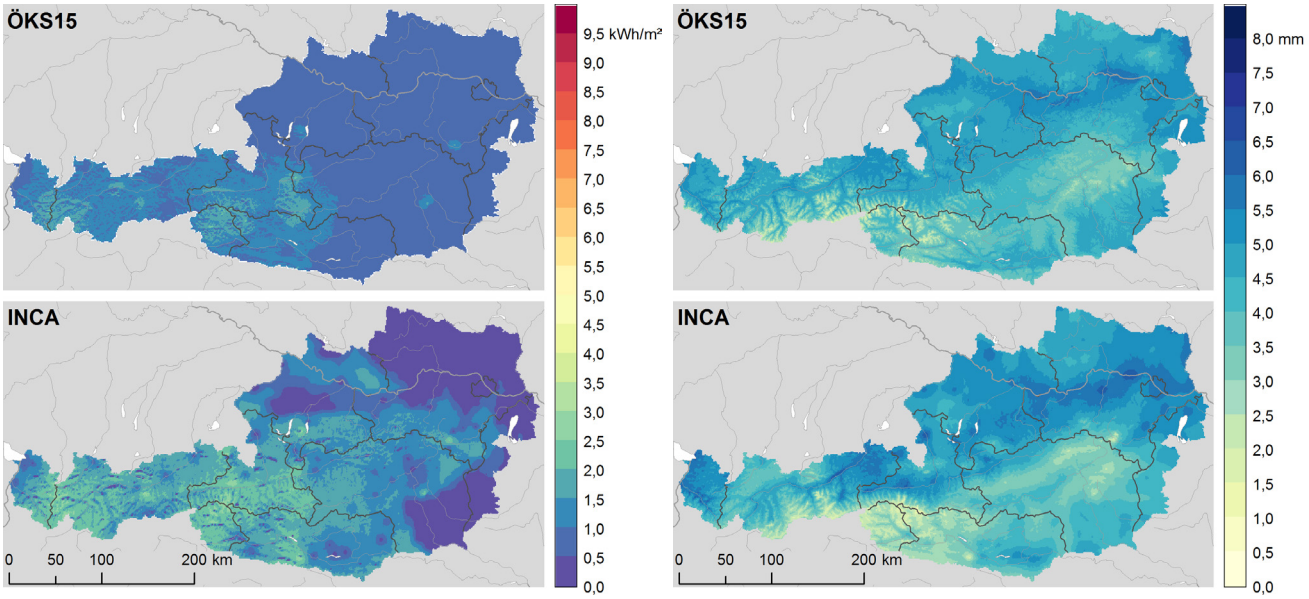



*Abbildung 18: Globalstrahlung an einem Tag mit tiefer Inversionsbewölkung (14.11.2005, links). Potentielle Evapotranspiration an einem trockenen, sonnigen, windigen Tag (13.05.2007, rechts).*

An einem Spätherbsttag führt **tiefe Inversionsbewölkung in den außeralpinen Vorländern** und vereinzelt auch inneralpin zu sehr niedrigen Globalstrahlungswerten (Abbildung 18 links). Der Globalstrahlungsdatensatz schneidet im Vergleich zu INCA am schlechtesten ab. Die INCA-Analyse weist auf teilweise deutlich höhere Strahlungseinträge in Berglagen hin und enthält auch ein sehr feines topografisch induziertes Muster.

Diese feinen Strukturen sind teilweise auch in ÖKS15 erkennbar. Das darf aber nicht zum Trugschluss führen, dass die Genauigkeit des Datensatzes in diesem Maßstabsbereich liegt. Der Vergleich mit INCA zeigt, dass das Verteilungsmuster viel zu glatt ist und wesentliche Merkmale fehlen. Die Interpretation der ÖKS15-Globalstrahlungsfelder hat daher mit besonderer Vorsicht zu geschehen.

Ein Beispiel mit hohen Verdunstungswerten an einem **niederschlagsfreien, sonnigen und windigen Frühlingstag** wurde gewählt (Abbildung 18 rechts). Obwohl auf unterschiedlichen Methoden basierend, zeigen ÖKS15 und INCA sehr ähnliche Evapotranspirationsmuster. Eine Verifikation ist schwierig. Die potentielle Evapotranspiration ist mit den größten Unsicherheiten behaftet – nicht nur bei der Interpolation sondern schon bei den spärlichen Messungen. Quantitative Aussagen sind kaum möglich.

Die ÖKS15-Gitterdatensätze der Lufttemperatur und des Niederschlages nutzen nicht alle verfügbaren Beobachtungsreihen, sondern nur solche, welche beinahe den gesamten Untersuchungszeitraum abdecken. Somit können die Datensätze für klimatische Monitoring- und Trendanalysen verwendet werden. Insofern ist der visuelle Vergleich mit einem Datentyp, der auf wesentlich mehr Eingangsinformationen beruht, besonders interessant.

## Evaluation der Klimasimulationen

Die 13 **ÖKS15**-**Projektionen** sind ein Ensemble von Klimasimulationen des CORDEX-Experiments (Jacob et al., 2013) für den Zeitraum 1951 bis 2100 für die Variablen Temperatur, Niederschlag und Strahlung mit einer Modellauflösung von 12.5 km. Diese Variablen wurden statistisch nachbearbeitet („biaskorrigiert“, siehe Teil 1: Abschnitt „Downscaling“, Seite 15), um Abweichungen zwischen Simulation und beobachtetem Klima in der Gegenwart zu reduzieren. Als Referenz für die Korrektur wurde ein auf 1 km gegitterte Beobachtungsdatensatz benutzt, so dass die nominelle Auflösung der Projektionen auch 1 km beträgt (siehe Abschnitt „Beträgt die räumliche Auflösung der ÖKS15-Daten tatsächlich 1 km?“, Seite 41). Zusätzlich wurden aus den korrigierten Variablen weitere Klimaindizes abgeleitet. Solche biaskorrigierten Projektionen wurden sowohl für die Szenarien RCP4.5 („Klimaschutz“-Szenario) als auch RCP8.5 (“business-as-usual“-Szenario) erstellt (siehe Teil 1: Abschnitt „Szenarien“, Seite 11) (siehe Abbildung 19 a).

Die Projektionen basieren auf Modellsimulationen von regionalen Klimamodellen (RCMs) mit einer Auflösung von 12.5 km aus der **EURO-CORDEX Initiative**, die wiederum angetrieben werden durch Globale Klimamodelle (GCMs) der internationalen CMIP5 Initiative (Taylor et al., 2012). Um Unsicherheiten aus Modellfehlern und natürlichen Klimaschwankungen möglichst gut zu berücksichtigen, wurden 13 verschiedene Modellketten aus GCMs und RCMs ausgewählt (siehe Teil 1: Abschnitt „Klimamodelle“, Seite 13).

Innerhalb des STARC-Impact Projektes wurden noch einige weitere Klimasimulationen biaskorrigiert:

- 3 weitere EURO-CORDEX Simulationen angetrieben mit RCP4.5 und RCP8.5 (siehe Abbildung 19 a)
- 9 Simulationen, welche gemäß dem RCP2.6 angetrieben wurden (siehe Abbildung 19 b).
- 11 RCMs für das A1B Szenario (siehe Teil 1: Abschnitt „Szenarien“, Seite 11) mit einer Modellauflösung von 25 km aus dem ENSEMBLES Projekt erweitert (Abbildung 19 d).
- 6 RCMs, welche durch ERA-Interim Reanalysen (siehe Teil 3: „Welche Beobachtungsdaten sind für meine Fragestellung am besten geeignet?“, Abschnitt „Reanalysen“, Seite 66) getrieben wurden (siehe Abbildung 19c). Reanalysen sind Simulationen des vergangenen Wetters mit Wettervorhersagemodellen, in die Wetterbeobachtungen eingeflossen sind. Dadurch repräsentieren Reanalysen in der Regel sehr gut das tatsächlich beobachtete Wettergeschehen, zumindest auf größeren Skalen, und werden deshalb als Quasi-Beobachtungen eingesetzt. Auf größeren Skalen sind Unsicherheiten durch Modellfehler und natürliche Klimaschwankungen zumindest in den mittleren Breiten gering. Mit Reanalysen getriebene RCM Simulationen sind deshalb sehr gut geeignet, RCM Unsicherheiten zu isolieren. (siehe Teil 1: Abschnitt „Unsicherheiten“, Seite 18 und Teil 1: Abschnitt „Effektive Auflösung“, Seite 14).

Für alle EURO-CORDEX und die mit ERA-interim angetriebenen Simulationen wurde der Parameter **Potential Evapotranspiration (PET)** hergeleitet.

Auch die zusätzlich erzeugten Projektionen sind verfügbar und gingen in die Evaluierung ein. Kein Modell bildet die Wirklichkeit perfekt und komplett ab, sondern ist für einen bestimmten Zweck entwickelt und nur eine Annäherung der Realität. Deshalb sind auch die ÖKS15-Projektionen für bestimmte **Anwendungen** gut geeignet, für manche Anwendungen brauchbar, und für wiederum andere Anwendungen ungeeignet. Um eine Interpretationshilfe für konkrete Ergebnisse bereitzustellen, diskutieren wir in den folgenden Abschnitten, in welchem Kontext die Anwendung der ÖKS15-Projektionen problematisch sein kann.

Ein Ziel des ÖKS15-Projekts war es, gegitterte Klimaprojektionen mit einer räumlichen Auflösung von 1 km bereitzustellen. Wie auch bei den Beobachtungsdaten muss zwischen nomineller und effektiver Auflösung unterschieden werden (siehe auch Abschnitt „Effektive Auflösung“, Seite 14). Grundsätzlich steht weltweit zur Zeit kein Modellensemble von Klimaprojektionen auf einer 1 km Auflösung zur Verfügung. Für dynamische Klimamodelle ist dabei der Rechenaufwand sehr hoch (zur Zeit entsteht gerade ein Ensemble von Projektionen über dem Alpenraum mit einer 3 km Auflösung, an dem Wegener Center und ZAMG beteiligt sind).

Statistisches Downscaling kann zwar prinzipiell auf ein 1 km Gitter downscalen; um das lokale Wetter dabei realistisch darzustellen, sind aber sehr aufwendige räumliche stochastische Modelle notwendig, und Rückkopplungseffekte wie weiter unten besprochen können durch statistisches Downscaling im allgemeinen auch nicht berücksichtigt werden.

Im ÖKS15-Projekt wurde deshalb als pragmatischer Ansatz eine Biaskorrektur verwendet. Diese berücksichtigt zumindest klimatologische (also langfristige Effekte wie z. B. den mittleren Einfluss der Topografie) auf der 1 km-Skala, stellt aber regionale Prozesse und den wetterabhängigen Einfluss der Topographie nur auf der 12 km-Skala dar. Dieser Ansatz ist zur Zeit der einzig mögliche, aber mit diversen Problemen verbunden, die im folgenden erläutert werden.

**Was können die ÖKS15 Klimaprojektionen?**

Im nachfolgenden Text werden vor allem Probleme der ÖKS15 Simulationen dargestellt, um Nutzern zu veranschaulichen, auf welche Dinge sie bei der Benutzung der Daten achten sollten. Nichtsdestotrotz sind die ÖKS15 Daten State-of-the-Art in der Klimamodellierung und für zahlreiche Typen von Impaktstudien geeignet.

Die Modelle basieren auf den aktuellen CORDEX Simulationen, also den neuesten globalen und regionalen Klimamodellen. Auf der 12 km-Skala werden wichtige Wetterphänomene (z. B. Stürme, Wetterfronten, langandauernde Starkniederschläge, heiße und kalte Tage, Rückkopplungen mit dem Boden) realistisch dargestellt. Die Biaskorrektur wurde bewusst so gewählt, dass sie auf dieser Skala das Klimaänderungssignal der dynamischen Modelle nicht verfälscht.

Kleinräumigere Effekte (z. B. die Abnahme der Temperatur in der Höhe oder Regenschatten an Bergen) werden durch die Biaskorrektur zumindest im klimatologischen Mittel dargestellt. Vorsicht ist vor allem geboten, wenn bestimmte Wetterlagen oder Klimaindizes mit einer zeitlichen Dimension, oder wenn kleinräumige Extremereignisse relevant sind.

Im ersten Fall können Fehler der Globalmodelle wichtig sein (Abschnitte „Simulieren die ÖKS15 Daten die beobachteten Großwetterlagen?“, Seite 43) und „Wie gut sind die ÖKS15-Datensätze im Vergleich zu anderen Gitterdatensätzen?“, Seite 35), im zweiten Fall sind relevante Prozesse nicht aufgelöst, eventuell erzeugt die Biaskorrektur Artefakte (Abschnitt „Beträgt die räumliche Auflösung der ÖKS15 Daten tatsächlich 1 km?“, Seite 41).

Zu beachten ist, dass alle auf den nächsten Seiten dargelegten Eigenschaften der ÖKS15-Simulationen sich auf daraus abgeleitete Produkte und Ergebnisse auswirken. Entsprechende Überlegungen sollten daher in deren Interpretation einfließen.

a)

scenario RCP4.5 & 8.5

| EUR-11, rcp45 | ALADIN | ARPEGE | CCLM | HIRHAM5 | PROMES | RACMO | RCA | RegCM | REMO | WRF | sum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ACCESS1-3 | | | | | | | | | | | 0 |
| CanESM2 | | | | | | | | | | | 0 |
| CCSM4 | | | | | | | | | | | 0 |
| CNRM-CM5 | 1 | | 1 | | | | 1 | | | | 3 |
| CSIRO-Mk3-6-0 | | | | | | | | | | | 0 |
| EC-EARTH | | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | | 4 |
| GFDL-ESM2M | | | | | | | | | | | 0 |
| GISS-E2-R | | | | | | | | | | | 0 |
| HadGEM2-ES | | | 1 | | | | 1 | | | | 2 |
| IPSL-CM5A-MR | | | | | | | 1 | | | 1 | 2 |
| MIROC5 | | | | | | | | | | | 0 |
| MIROC-ESM | | | | | | | | | | | 0 |
| MPI-ESM-LR | | | 1 | | | | 1 | | 2 | | 4 |
| NorESM1-M | | | | 1 | | | | | | | 1 |
| sum | 1 | 0 | 4 | 2 | 0 | 1 | 5 | 0 | 2 | 1 | 16 |

b)

scenario RCP2.6

| EUR-11, rcp26 | ALADIN | ARPEGE | CCLM | HIRHAM5 | PROMES | RACMO | RCA | RegCM | REMO | WRF | sum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ACCESS1-3 | | | | | | | | | | | 0 |
| CanESM2 | | | | | | | | | | | 0 |
| CCSM4 | | | | | | | | | | | 0 |
| CNRM-CM5 | 1 | | | | | | | | | | 1 |
| CSIRO-Mk3-6-0 | | | | | | | | | | | 0 |
| EC-EARTH | | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | | 4 |
| GFDL-ESM2M | | | | | | | | | | | 0 |
| GISS-E2-R | | | | | | | | | | | 0 |
| HadGEM2-ES | | | | | | | 1 | | | | 1 |
| IPSL-CM5A-MR | | | | | | | | | | | 0 |
| MIROC5 | | | | | | | | | | | 0 |
| MIROC-ESM | | | | | | | | | | | 0 |
| MPI-ESM-LR | | | | | | | 1 | | 2 | | 3 |
| NorESM1-M | | | | | | | | | | | 0 |
| sum | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 3 | 0 | 2 | 0 | 9 |

c)

reanalysis

| EUR-11, ERA | ALADIN | ARPEGE | CCLM | HIRHAM5 | PROMES | RACMO | RCA | RegCM | REMO | WRF | sum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ERA-int | 1 | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | 1 | | 6 |

d)

| ENSEMBLES A1B | CLM | HIRHAM5 | HadRM3 | RACMO | REMO | RCA | sum |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ARPEGE | | 1 | | | | | 1 |
| BCM | | 1 | | | | 1 | 2 |
| ECHAM5 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | 4 |
| HadCM3Q0 | 1 | | 1 | | | | 2 |
| HadCM3Q3 | | | 1 | | | 1 | 2 |
| HadCM3Q16 | | | 1 | | | 1 | 2 |
| sum | 1 | 3 | 3 | 1 | 1 | 4 | 13 |

*Abbildung 19: ÖKS15 Simulationen (grau) und erweiterte Simulationen (gelb) für EURO-CORDEX (RCP4.5 und RCP8.5 (a), RCP2.6 (b) und ERA-Interim (c) und ENSEMBLES (A1B) (d).*

## Beträgt die räumliche Auflösung der ÖKS15-Daten tatsächlich 1 km?

Obwohl die ÖKS15-Projektionen nominal eine Auflösung von 1 km haben, ist die tatsächliche Auflösung viel gröber, da das zugrundeliegende Klimamodell physikalische Vorgänge auf einem Gitter von 12.5 km simuliert.

Kleinskalige Ereignisse, wie etwa Gewitter und damit verbundene Extremniederschläge, oder Wetterlagen abhängige Regenschatten, werden aus diesem Grund durch die ÖKS15-Daten nicht dargestellt. Weiters erzeugt die Biaskorrektur bei Extremniederschlägen auch Artefakte. Die **effektive Auflösung** des Klimamodells ist auch gröber als der Gitterabstand.

Die ÖKS15-Projektionen (siehe Seite 48) basieren auf regionalen Klimamodellen mit einer Auflösung von 12.5 km. Mit einer **Biaskorrektur** (siehe Teil 1: Abschnitt „Downscaling“, Seite 15) wurden diese Simulationen dann nominell auf einem 1 km Gitterbereitgestellt.

Biaskorrektur passt die langjährige Verteilung einer simulierten Klimavariable (wie Temperatur oder Niederschlag) an die entsprechende beobachtete Verteilung an. Im wesentlichen systematische Unterschiede zwischen der simulierten und beobachteten Verteilung werden so im Referenzzeitraum entfernt. Dadurch werden aber keine zusätzlichen physikalischen Prozesse berücksichtigt. Das heißt, dass Prozesse, welche nicht explizit im regionalen Klimamodell simuliert wurden, auch nicht in den korrigierten ÖKS15-Projektionen berücksichtigt sind. Die **effektive Auflösung** der ÖKS15-Projektionen ist also durch die Auflösung der zugrundeliegenden RCMs begrenzt.

1. **Kleinskalige meteorologische Prozesse** werden nicht aufgelöst. Niederschlagsfelder sind räumlich (und zeitlich) sehr variabel. Diese Variabilität kann durch eine Biaskorrektur nicht erzeugt werden, nur systematische Effekte der Topographie werden berücksichtigt (siehe unter 2.). In den simulierten Feldern ist deshalb auch nach der Biaskorrektur klar die Gitterstruktur des RCMs sichtbar (siehe Abbildung 20). Die unzureichende Auflösung kann aber auch Einflüsse auf die Simulation von Klimaänderungen haben. Zum Beispiel sind typische Gewitterzellen kleiner als die Auflösung der EURO-CORDEX RCMs, sie werden nicht direkt simuliert, sondern durch sogenannte Parameterisierungen berücksichtigt. Aktuelle Studien deuten darauf hin, dass diese Parameterisierungen Klimaänderungen in Extremniederschlägen nicht vertrauenswürdig abbilden.
2. **Kleinskalige topographische Effekte** werden nicht berücksichtigt. Wenn z. B. ein Berg nicht vom regionalen Klimamodell aufgelöst wird, erfasst die Biaskorrektur nur die systematischen Einflüsse des Berges auf das Klima, nicht aber die Einflüsse an einzelnen Tagen. Wenn der Wind in der Regel aus Westen weht, wird der Westhang im Mittel feuchter und der Osthang trockener sein. Diesen mittleren Effekt bildet die Biaskorrektur ab. Wenn der Wind an einem speziellen Tag allerdings aus Osten weht, wird die Biaskorrektur immer noch den Westhang feucht und den Osthang trocken darstellen, auch wenn die tatsächliche Situation umgekehrt sein sollte. Ähnliches gilt für z. B. Inversionswetterlagen : In Liezen (638 m) ist die tägliche Maximaltemperatur an etwa 16 % aller Wintertagen niedriger als am etwa 10 km entfernten Berg Warscheneck (2156 m im 1 km Gitter). In den ÖKS15-Daten taucht diese Inversion nicht auf.
3. **Kleinskalige Rückkopplungen** und deren Effekt auf Klimaänderungen werden nicht dargestellt. Z. B. hängt die Stärke der zukünftigen Klimaerwärmung von der Höhe ab. Eine wichtige Rolle spielt hierbei die Schnee-Albedo Rückkopplung: schmilzt der Schnee, wird der Boden dunkler und erwärmt sich dadurch schneller, so dass wiederum der Schnee weiter schmilzt. Insbesondere im Frühjahr zur Zeit der Schneeschmelze ist dieser Effekt relevant und kann in hohen Lagen zusammen mit anderen Effekten eine deutliche zusätzliche ausmachen. Insbesondere in komplexer Topographie wie den Alpen werden solche Effekte durch RCMs mit 12.5 km Auflösung nur grob angenähert. Eine Biaskorrektur kann diese Effekte nicht korrigieren.

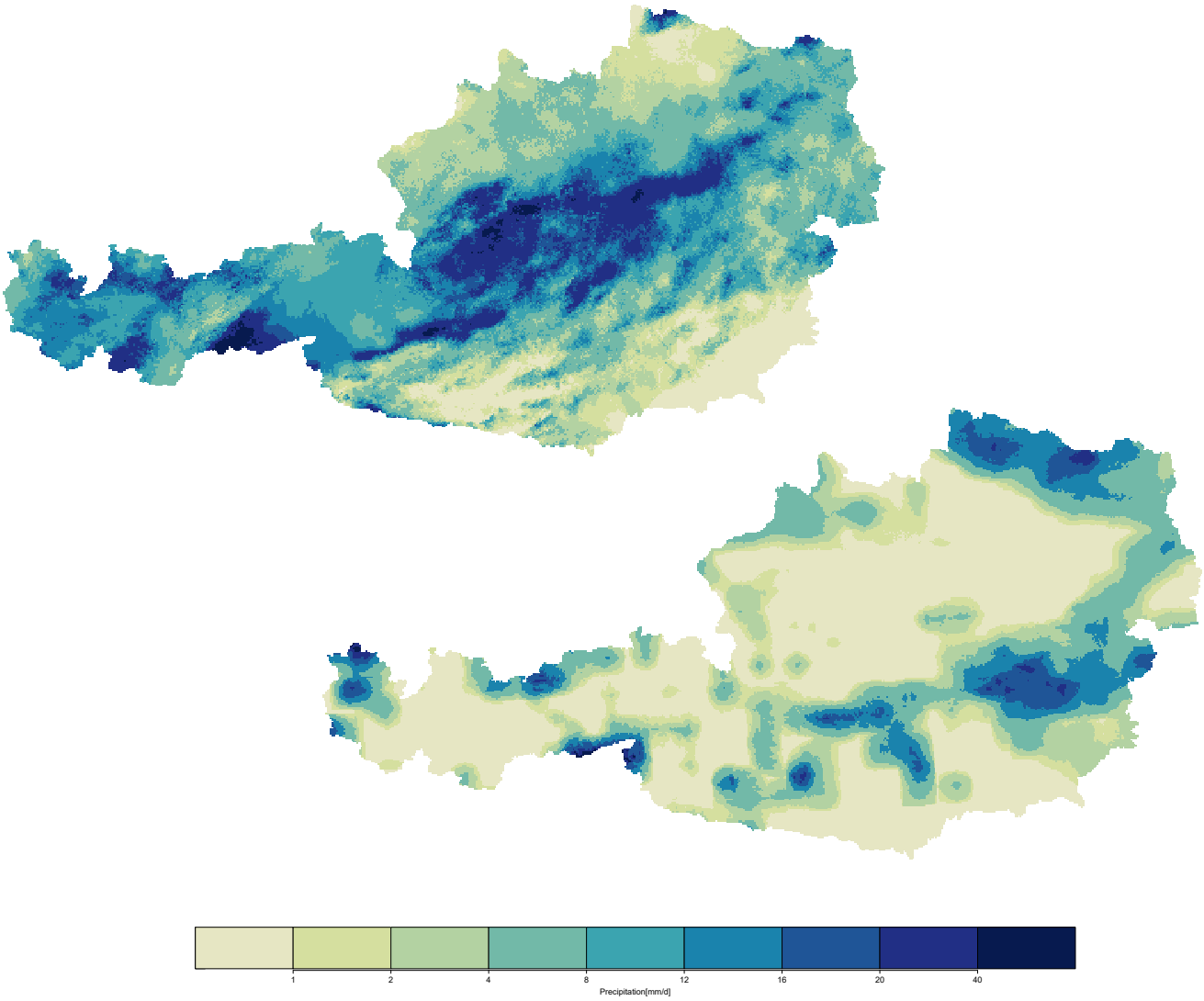



*Abbildung 20: Niederschlagsereignis am 21.6.2007. INCA Beobachtung (oben) und biaskorrigiertes RCM durch ERA-Int angetrieben (unten). Die Beobachtung weist feiner strukturierte Niederschlagsfelder auf als das Modell. Im Modell ist deutlich das 12km Raster zu erkennen.*

Insbesondere in komplexer Topographie wie den Alpen werden solche Effekte durch RCMs mit 12.5 km Auflösung nur grob angenähert. Eine Biaskorrektur kann diese Effekte nicht korrigieren.

4. Eine zum Downscaling eingesetzte **Biaskorrektur** kann selbst Artefakte erzeugen, insbesondere für Extremniederschläge. Im Fall von ÖKS15 passt die Biaskorrektur einen simulierten Niederschlagswert in einer 12.5 km Gitterbox für jede darin liegende 1 km Gitterbox so an, dass systematische Biase (insbesondere auch topographische Effekte, siehe unter 2.) korrigiert werden. Simuliert das RCM zum Beispiel eine Gewitterzelle, wird in jeder 1 km Gitterzelle ein Gewitter erzeugt, nur dass systematische Effekte korrigiert werden, das Gewitter ersteckt sich also über eine Fläche von 12.5 km x 12.5 km. In Wirklichkeit ist die Zelle aber typischerweise deutlich kleiner, die Gesamtsumme des Niederschlags deshalb stark überschätzt. In Simulationen für ein Mittelgebirge (Harz, Deutschland) wurde gezeigt, dass Flächenmittel von Extremniederschlägen so um ca. 30 % überschätzt werden. Dieses Problem ist insbesondere bei der Simulation von Abflüssen in kleinen Flusseinzugsgebieten mit verteilten hydrologischen Modellen relevant.

## Simulieren die ÖKS15-Daten die beobachteten Großwetterlagen?

Das Klima in Österreich wird wesentlich durch verschiedene Wetterlagen bestimmt. Wenn Klimamodelle diese Wetterlagen, ihre Häufigkeit und ihre Dauer nicht realistisch simulieren, werden entsprechend das Klima und seine Variabilität in den Regionen auch nicht realistisch dargestellt. Durch eine Biaskorrektur werden allerdings solche Wetterlagen nicht korrigiert. Eine Evaluierung zeigt jedoch, dass die meisten ÖKS15-Modelle zumindest die Häufigkeit der Wetterlagen realistisch darstellen.

Zusätzliches Bildmaterial analog zu Abbildung 21 kann in dem Anhang „Ad: Simulieren die ÖKS15 Daten die beobachteten Großwetterlagen?“, Seite 80 gefunden werden.

Großräumige Wetterlagen bestimmen das regionale Klima: Westwinde bringen feuchte Luft vom Atlantik, Genuatiefs Starkniederschläge im Süden und Osten Österreichs. Ein Hoch über Nordeuropa sorgt im Winter für Kaltlufteinbrüche, blockierende Hochdrucklagen im Sommer bringen Hitze und Dürre. Viele GCMs haben allerdings Schwierigkeiten, die Lage, Auftrittshäufigkeit und Dauer von großräumigen Wetterlagen realistisch darzustellen. Diese Fehler setzen sich in den RCMs fort und können durch eine Biaskorrektur nicht sinnvoll korrigiert werden. Für regionale Klimawandelstudien ist es also entscheidend zu evaluieren, wie gut welche Klimamodelle die relevanten Wetterlagen simulieren. Daher wird in diesem Kapitel die Darstellung der Wetterlagen in den ÖKS15-Klimasimulationen über dem Alpenraum evaluiert.

Im **Sommer** werden die wichtigsten Wetterlagen großteils sehr gut dargestellt. Eine Ausnahme stellt die *HadGEM - CLM* Modellkette dar, welches die Häufigkeiten der Tiefdruckgebiete stark überschätzt (um fast 50 %), allerdings gleichzeitig in der Zeit auch zu trocken ist (siehe Abschnitt „Unterscheidet sich das historische Klima der ÖKS15-Daten von den Beobachtungen?“, Seite 45).

Wetterabläufe im **Herbst** werden auch realitätsnah abgebildet. Die meisten Modelle tendieren jedoch zu einer leichten Unterschätzung der Häufigkeit von Hochdruckwetterlagen. Die zwei mit *IPSL - CM5* Simulationen sind hier besonders hervorzuheben, da diese Schwierigkeiten haben großskalige Hochdrucklagen darzustellen (Unterschätzung der Häufigkeit um fast -50 %). Diese zwei Modelle tendieren zu einer gradientenschwachen Luftdruckverteilung.

Etwas problematischer wird es für die ÖKS15-Daten allerdings im **winter**lichen Wetterablauf. Hier überschätzen alle ÖKS15-Simulationen die für den Winter typischen Weststrømungen um 50 % bis 100 %. Außerdem wird die Dauer dieser Lagen überschätzt. Gleichzeitig werden Hochdruckgebiete zu kurz und zu selten dargestellt (im Schnitt -50 %). Besonders auffällig sind hier wieder die zwei *IPSL - CM5* Projektionen, welche im Grunde keine Hochdruckgebiete zu dieser Zeit modellieren.

Die beiden *IPSL-CM5* Simulationen haben das gleiche Problem mit der Darstellung der westlichen Strömungen und den Hochdruckgebieten im **Frühling**. Im Gegenzug dazu tendieren einige andere Modellketten im Frühling dazu, die Anzahl der Hochwetterlagen etwas zu überschätzen, dies gilt vor allem für die Modellkette *EC-EARTH - RACMO* (+100 %).

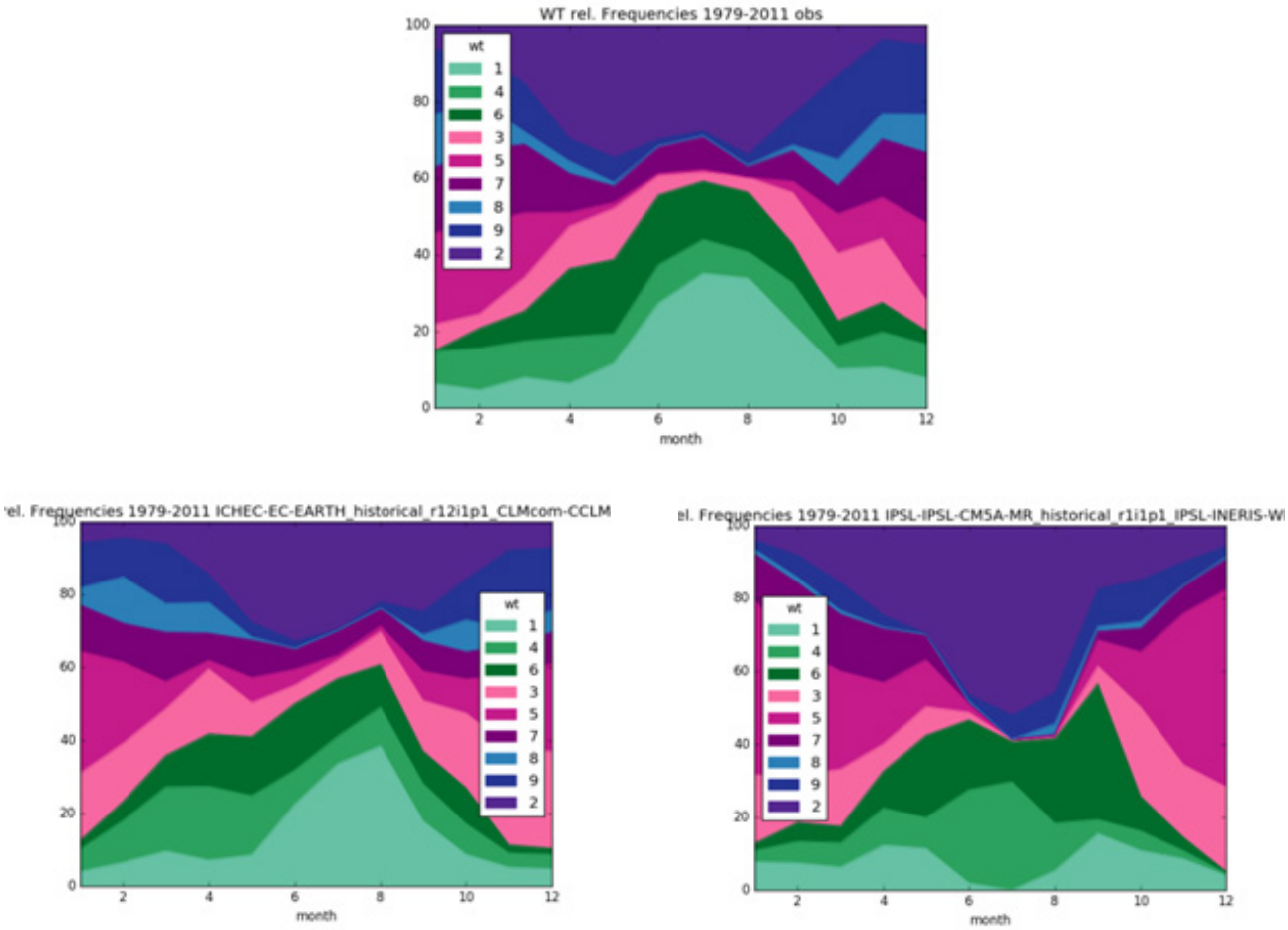



*Abbildung 21: Jahresgang der Häufigkeiten der Wetterlagen aus der Beobachtung (oben), einer Projektion der Modellkette EC-EARTH - CLM (unten links) und einer Projektion der Modellkette IPSL-CM5 - WRF (unten rechts) mit Tiefdruck (1,4,6), Hochdruck (8,9), Weststrømungen (3,5,7) und gradientenschwacher Druckverteilung (2) von 1979-2005. Beobachtung (links), und zwei beispielhafte RCMs (mitte und rechts). Das Modell WFR_IPSL-CM5 weicht am stärksten von der Beobachtung ab, da es im Sommer die Häufigkeit der Tiefdruckgebiete nicht richtig darstellt,im Winter die Westströmungen überschätzt und zu wenige Hochdrucklagen simuliert.*

In Reanalysedaten werden großskalige Wetterlagen per Konstruktion gut dargestellt. Die **Evaluierung** der mit ERA-Interim angetriebenen Simulationen (siehe Seite 48) fällt deshalbentsprechend gut aus. Weiters wurden die Simulationen aus dem ENSEMBLES-Projekt evaluiert. Obwohl diese Modelle älter sind und eine gröbere Auflösung haben, fällt deren Evaluation im Schnitt gleich gut aus wie die der ÖKS15-Projektionen.

**Zusammenfassend** gilt: Die physikalischen (Zirkulations-)Prozesse, bzw. Wetterabläufe werden grundsätzlich gut dargestellt, v. a. im Sommer. Im Winter werden Westströmungen tendenziell etwas zu häufig, Hochs zu selten simuliert, was vor allem vom antreibenden GCM abhängt. Dies hat Auswirkungen auf die Anzahl der Trockentage (siehe Abschnitt „Wie gut werden die hergeleiteten Indizes der ÖKS15-Simulationen dargestellt?“, Seite 46). ERA-Interim getriebene Daten schneiden hier am besten ab. Abbildung 22 fasst die Zirkulationsbiase zusammen.

Achtung: die Darstellung der Dauer von Wetterlagen wurde in STARC-Impact nicht umfassend evaluiert. Rückschlüsse auf die Darstellung von Hitze- und Kältewellen sowie Dürren können deshalb nicht getroffen werden.

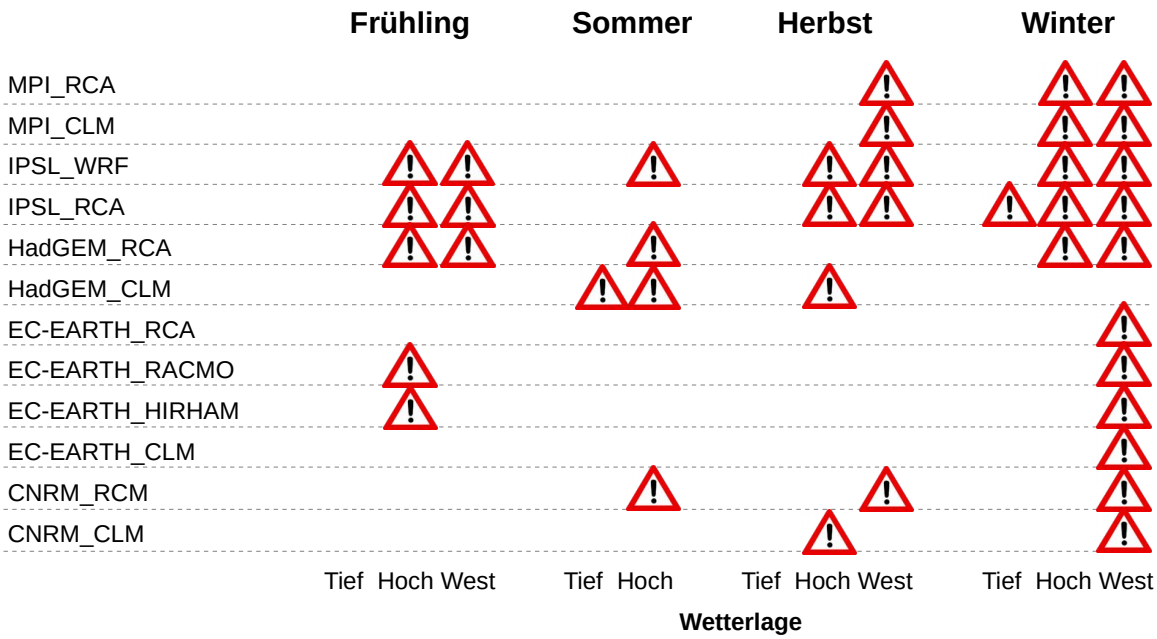



*Abbildung 22: Darstellung von typischen Wetterlagen über dem Alpenraum aus ÖKS15-Daten. Mit einem Warnzeichen markierte Wetterlagen werden bei dem entsprechenden Modell in der entsprechenden Jahreszeit in Häufigkeit um mehr als 40 % über- bzw. unterschätzt.*

## Unterscheidet sich das historische Klima der ÖKS15-Daten von den Beobachtungen?

Obwohl die ÖKS15-Daten biaskorrigiert wurden um mit dem beobachteten Klima übereinzustimmen, bleiben gewisse Abweichungen erhalten. Aus methodischen Gründen haben ÖKS15-Simulationen teilweise zu wenig Niederschlag in Regionen und Saisonen, in denen das zugrundeliegende RCM ebenfalls zu trocken ist. Dies hat auch einen Einfluss auf hergeleitete Niederschlagsindizes. Weiters zeigen teilweise hergeleitete Indizes einen zusätzlichen Bias auf, welcher aufgrund des zeitlichen Wetterablaufs des RCMs entsteht. Wie bereits in den vorigen Kapiteln beschrieben, werden diese zeitlichen Wetterverläufe von einer Biaskorrektur nicht korrigiert.

Die ÖKS15-Simulationen basieren auf regionalen Klimamodellsimulationen. Diese unterscheiden sich aufgrund von Modellfehlern und natürlichen Klimaschwankungen jedoch vom tatsächlich beobachteten Klima. Die Biaskorrektur minimiert diese Diskrepanzen für die Variablen Tagesmittel-, -höchst-, und -tiefsttemperatur, Niederschlag und Globalstrahlung. Es gibt allerdings einige Gründe, warum die ÖKS15-Daten trotz der durchgeführten Biaskorrektur etwas von der beobachteten **Klimatologie** abweichen können:

1. **Interne Modellvariabilität:** Die Biaskorrektur bezieht sich auf die historische Periode von 1961-2005 (bzw. 1981-2005 für Globalstrahlung). Betrachtet man einen anderen Zeitraum so wird aufgrund der natürlichen **Variabilität** (siehe Teil 1: Abschnitt „Klima und Klimaänderung“, Seite 8) die **Klimatologie** von der Beobachtung abweichen. Je kürzer die Vergleichsperiode gewählt wird, desto höher wird die Abweichung sein. Ein Spezialfall der hier zu erwähnen ist bezieht sich auf die ÖKS15-Daten, welche vom Modell *RCA4* abstammen: Diese Modelle besitzen nämlich nur historische Simulationen in der Periode 1971-2005 (welche trotzdem gegen die beobachtete **Klimatologie** von 1961-2005 korrigiert wurde) und sind hier bei Abweichungen in der Validierungsperiode noch empfindlicher.

2. **Bias Korrektur Methode**: Da für die Übereinstimmung des modellierten und beobachteten Klimas eine parametrische Schätzmethode (die eine Verteilung durch wenige Parameter beschreibt) verwendet wurde, kann es sein, dass das bias-korrigierte Modell im Mittelwert nicht ganz dem beobachteten Mittelwert entspricht (dies gilt vor allem für den Niederschlag; hätte man statt der Biaskorrektur eine sogenannte nichtparametrische Methode angewendet, dann wären die Daten zwar für die Gegenwart perfekt angepasst, wäre aber auch sehr anfällig für rein zufällige Wettereffekte, die wiederum die Projektionen negativ beeinflussen könnten. Von solchen Methoden wird deshalb generell abgeraten). Manche Modelle aus dem ÖKS15-Ensemble reagieren hier sensibler als andere, vor allem bei Modellketten welche ein sehr trockenes Klima simulieren (etwa MOHC - CLM im Sommer in der Osthälfte Österreichs). Weiters wird während der Biaskorrektur ein Regentag definiert als ein Tag an welchem es mehr als 0.1mm regnet. Alle darunterliegenden Werte wurden beim Modell auf 0mm gesetzt. Wenn man bei einer Impaktanalyse einen Regentag anders definiert, wird man möglicherweise leichte Abweichungen zu den Beobachtungen bekommen. Diese Fehler fließen bei der Berechnung der Indizes mit ein (siehe nächster Abschnitt).

3. **Fehler in der zeitlichen Struktur**: Klimamodelle haben noch Schwierigkeiten, die zeitliche Dauer und Abfolge von Wetterlagen realistisch zu simulieren. Ein typischer Fehler ist z. B. dass lang andauernde Hochdruckwetterlagen zu kurz simuliert werden. Diese Fehler werden, wie oben beschrieben, nicht durch eine Biaskorrektur behoben. Daher können hergeleitete Parameter (Indizes), die eine zeitliche Komponente besitzen (etwa andauernde Trockenperioden), von beobachteten Werten abweichen (siehe Abschnitt „Wie gut werden die hergeleiteten Indizes der ÖKS15-Simulationen dargestellt?“, Seite 46).

Grundsätzlich weicht das historische Klima in den ÖKS15-Daten sehr wenig vom beobachteten Klima ab, aber aufgrund der oben genannten Punkte gibt es einige nennenswerte Ausnahmen. So sind CLM Modelle im Osten Österreichs im Sommerniederschlag zu trocken, besonders die Modellkette MOHC - CLM, welche im Sommer einen recht großen Niederschlagsbias hat. *RCA4* Modelle haben teilweise einen Bias im Sommerniederschlag, der ein gitterähnliches Muster aufweist. Allerdings ist dieser Bias im Vergleich zu den nicht biaskorrigierten Daten sehr klein. Ansonsten sind keine nennenswerten Fehler entdeckt worden. Die Temperatur weist keinen Bias auf.

Die Auswirkung von Fehlern im historischen Klima auf die Projektionen in der Zukunft sind noch Gegenstand der aktuellen Forschung und kann daher nicht klar beantwortet werden. Es ist aber anzunehmen, dass diese Fehler (z. B. Sommer zu trocken) auch in der Zukunft auftreten können, bzw. auch das Klimaänderungssignal fehlerhaft sein könnte. (Maraun, 2012; Bellprat et al., 2013)

## Wie gut werden die hergeleiteten Indizes der ÖKS15-Simulationen dargestellt?

Trotz der Biaskorrektur bleibt für zeitabhängige, hergeleitete Indizes, wie Niederschlags- und Trockenepisoden, sowie Hitzeepisoden, ein Bias übrig. Grund dafür ist, dass die zeitliche Struktur der Modelldaten nicht korrigiert wird. Am meisten betroffen sind hier sommerliche Hitzeepisoden, die von +20 % um bis zu +200 % zu häufig modelliert werden. Gleichzeitig wird die Anzahl der sommerlichen Trockenepisoden ebenfalls tendenziell überschätzt.
Zusätzliches Bildmaterial analog zu Abbildung 23 und Abbildung 24 kann in dem Anhang „Ad: Wie gut werden die hergeleiteten Indizes der ÖKS15 Simulationen dargestellt?“, Seite 83) und „Ad: Wie gut werden die hergeleiteten Indizes der ÖKS15 Simulationen dargestellt? (nach Regionen)“, Seite 86) gefunden werden.

Die Biaskorrektur der ÖKS15-Läufe bewirkt, dass zwar die historische Niederschlags- und Temperaturverteilung der Modelle mit der Beobachtung übereinstimmen (siehe Abschnitt „Unterscheidet sich das historische Klima der ÖKS15-Daten von den Beobachtungen?“, Seite 45). Wie aber in Abschnitt „Simulieren die ÖKS15-Daten die beobachteten Großwetterlagen?“, Seite 43 beschrieben, werden die simulierte Häufigkeit und Dauer von Wetterlagen nicht korrigiert. Daher bleiben gerade bei zeitabhängigen **Indizes** (Anzahl der Trockenepisoden) trotz Biaskorrektur Fehler übrig. In diesem Abschnitt untersuchen wir die Güte der Niederschlagsindizes (für den Zeitraum 1961-2005). Wie auch im vorigen Abschnitt („Unterscheidet sich das historische Klima der ÖKS15-Daten von den Beobachtungen?“, Seite 45) erläutert, hängt die Wahl der historischen Periode mit der Beobachtungsdiskrepanz zusammen.

| Index kurz | Index lang | Beschreibung |
|---|---|---|
| **hw** | Anzahl der Hitzeepisoden | Anzahl von mindestens 3 Tage andauernden durchgängigen Episoden, in der das Tagesminimum über 18 °C und das Tagesmaximum über 30 °C liegt. |
| **cw** | Anzahl von Kälteepisoden | Anzahl von zumindest 5 Tage andauernden durchgängigen Episoden, in der das Tagesmaximum unter 0 °C bleibt. |
| **cdd** | Anzahl der Trockenepisoden | Anzahl von mindestens 3-tägigen Zeiträumen, in denen täglich weniger als 1mm Niederschlag fällt |
| **tr20** | Tropennächste | Tage mit einem Tagesminimum über 20 °C |
| **id7** | Extreme Eistage | Tage, an denen das Tagesminimum unter -7 °C und das Tagesmaximum unter 0°C liegt |
| **cwd** | Anzahl der Niederschlagsepisoden | Anzahl von mindestens 3-tägigen Zeiträumen, in denen täglich mehr als 1mm Niederschlag fällt. |
| **rr** | Niederschlagsmenge | Mittlere tägliche Niederschlagsmenge |
| **rr1** | Niederschlagstage | Anzahl der Tage/Jahr, an denen die Niederschlagssumme mindestens 1 mm erreicht. |
| **rx5day** | Maximale fünftägige Niederschlagsmenge | Größte Niederschlagssumme über einen zusammenhängenden Zeitraum von fünf Tagen |

*Tabelle 6: Liste der in diesem Abschnitt verwendeten Klimaindizes*

Grundsätzlich gilt, dass sich der Bias innerhalb eines Modelles (für z. B. tägliche Niederschlagsmenge) auch auf hergeleitete Indizes auswirkt. So ist beispielsweise die Modellkette *HadGEM2 - CLM* im Sommer in der Osthälfte Österreichs zu trocken *(rr)* und hat daher auch zu wenige Niederschlagstage *(rr1)*.

Der Großteil der innerhalb von ÖKS15 hergeleiteten Indizes hat keine nennenswerten Abweichungen zu den beobachteten Indizes, mit der Ausnahme von mehrtägigen Ereignissen. Am stärksten betroffen ist hier die Anzahl der **mehrtägigen Trockenperioden** *(cdd)* und die Anzahl der **Hitzewellen** *(hw)*. *Cdd* wird im Sommer von so gut wie allen ÖKS15-Daten und innerhalb jeder Region Österreichs (außer im Osten) überschätzt (um etwa +20 % bis +40 %). Einen besonders starken Bias hat hier die Modellkette *HadGEM2 - CLM* (+100 %), welches im Sommer grundsätzlich zu trocken ist (siehe Abbildung 23).

Im Gegenzug dazu werden die Anzahl von **Niederschlagsepisoden** *(cwd)* tendenziell etwas unterschätzt, vor allem im Norden und Osten im Winter. Auch hier zeigt sich die Modellkette *a* als zu trocken und unterschätzt *cwd* um etwa -30 % im Sommer in der Osthälfte Österreichs. Im Süden regnet es dafür tendenziell etwas zu lange (im Schnitt ca. +10 %). Wenig Bias hat hingegen der 5-tägige **Maximalniederschlag** (rx5day), bei dem vor allem wieder *HadGEM2 - CLM* im Sommer zu trocken ist (-20 %). Den stärksten Bias der temperaturbasierten Indizes haben die ÖKS15-Projektionen bei der Anzahl der **Hitzewellen** *(hw)*, wo sie im Sommer eine Überschätzung von +20 % bis zu +200 % (*HadGEM - CLM*) im Osten Österreichs zeigen. Im Gegensatz dazu wird die Anzahl der **Tropennächte** (tr20) im Osten leicht unterschätzt (bis zu -14 %). Im Winter wird die Anzahl der **Kälteepisoden** (cw) ein wenig unterschätzt (um -5 % im Mühlviertel und im Süden Österreichs), und die Anzahl der **extremen Eistage** (id7) wird etwas überschätzt, vor allem im Osten um +5 % bis zu +20 %.

**Zusammenfassend** gilt, dass die meisten Indizes der ÖKS15-Daten kaum Bias aufweisen, bis auf eine starke Überschätzung der Hitzewellen *(hw)* und Überschätzung der andauernden Trockentagen *(cdd)* im Sommer. Andauernde Regentage werden lokal etwas unterschätzt. Das Modell MOHC - CLM zeigt einen starken Bias im Vergleich zum Rest der Simulationen. RCA Läufe zeigen für Niederschlag häufig ein kariertes Muster, welches vom Interpolieren stammt.

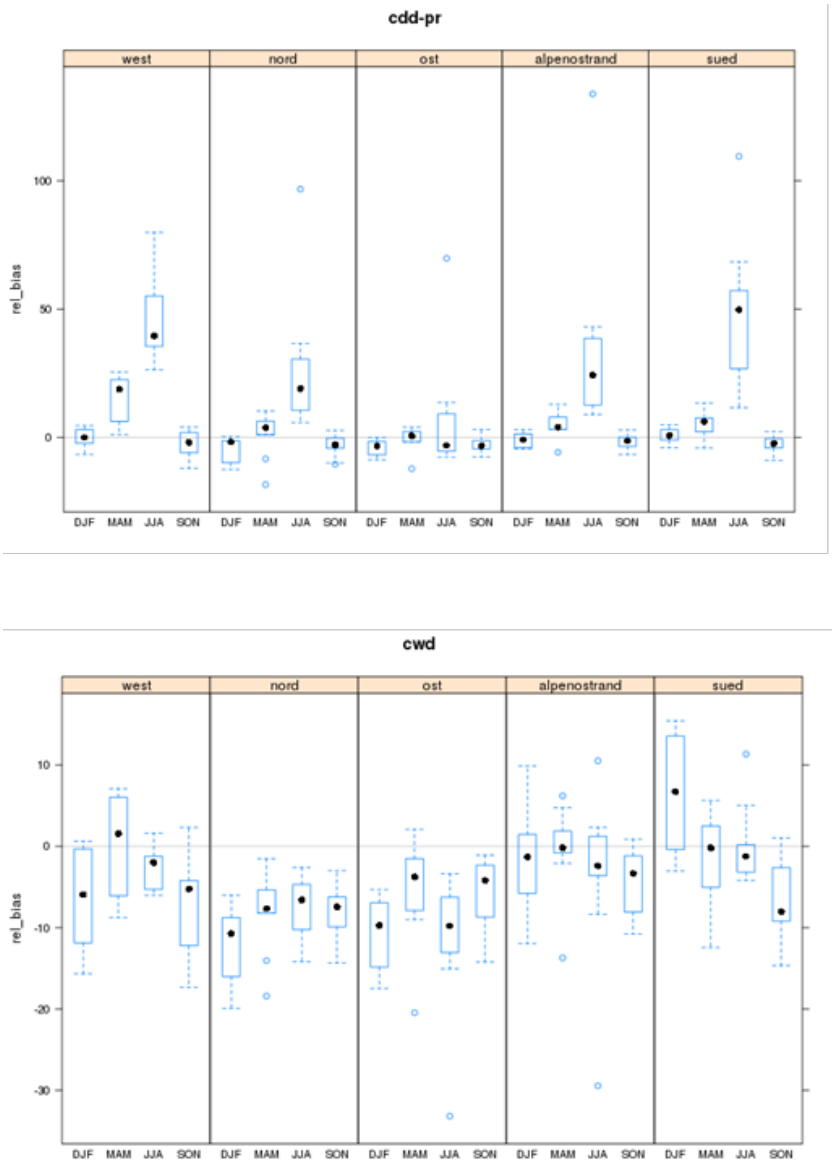



*Abbildung 23: Bias von "Consecutive dry days" (cdd, oben) und "Consecutive wet days" (cwd, unten).*

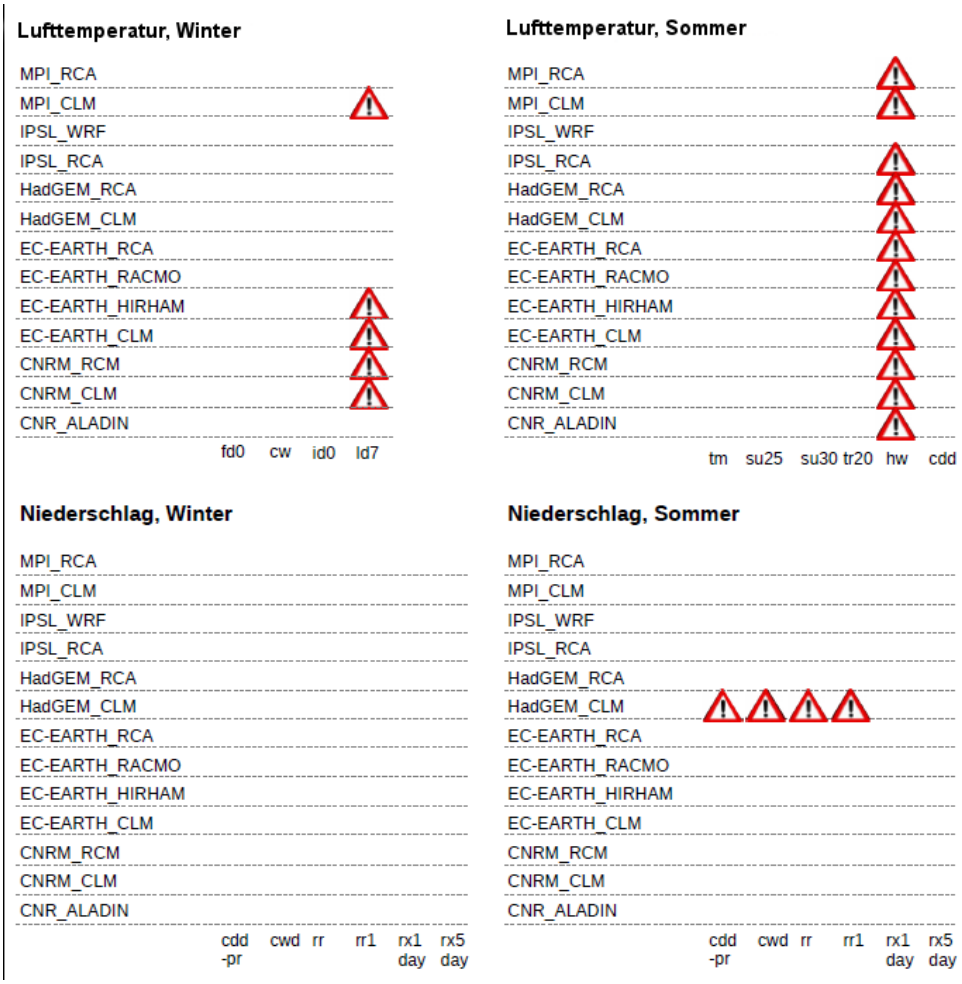



*Abbildung 24: Bias der hergeleiteten ÖKS15-Indizes (Temperatur oben, Niederschlag unten) für den östlichen Teil Österreichs im Winter (links) und Sommer (rechts). Mit Warnzeichen versehene Indizes weisen bei dem entsprechenden Modell und der entsprechenden Jahreszeit einen Fehler von +-20 % oder mehr auf.*

### Welche ÖKS15-Simulationen soll ich für meine Analyse verwenden?

Da Klimamodelle eine Reihe von Unsicherheiten aufweisen, wird grundsätzlich empfohlen möglichst alle ÖKS15-Modelle zur Analyse heranzuziehen. Allerdings gibt es, wie in den vorigen Abschnitten erläutert, qualitative Unterschiede unter diesen Simulationen. Je nach Anwendung kann entschieden werden, ob diese Simulationen ausgeschlossen werden sollen. Zusätzliches Bildmaterial analog zu Abbildung 25 kann in dem Anhang „Ad: Welche ÖKS15 Simulationen soll ich für meine Analyse verwenden?“, Seite 91 gefunden werden.

Grundsätzlich gilt es für Klimaanalysen so viele Modelle zu verwenden wie nur möglich (am besten alle Simulationen), da man sowohl die interne (chaotische) Klimavariabilität als auch die Modellunsicherheiten berücksichtigen muss (siehe Kapitel *Unsicherheiten*). Falls man für die Impaktanalyse nur wenige Simulationen verwenden kann (weil man z. B. nicht die genötigte Rechenkapazität zur Verfügung hat), ist es vor allem wichtig Simulationen auszuwählen, welche möglichst die **Unsicherheitsspanne** der projizierten Änderungssignale widergeben. Welche Klimaänderungssignale hier betrachtet werden müssen, hängt von der Anwendung ab.

Obwohl man so viele Simulationen wie möglich in seine Analysen einfließen lassen soll, ist es sinnvoll Modelle auszuschließen, welche die für die Studie relevantesten physikalischen Prozesse ungenügend gut oder sehr fehlerhaft darstellen. Wir haben in diesen Guidelines gezeigt, dass die ÖKS15-Projektionen grundsätzlich vertrauenswürdig sind, haben aber bei drei Simulationen Auffälligkeiten entdeckt:

1. Das Modell *„MOHC-HadGEM - CLM“* weist im Sommer (vor allem August) einerseits eine Unterschätzung der Niederschlagsmengen auf (vor allem in der Osthälfte Österreichs, siehe Abbildung 5), gleichzeitig überschätzt es die Häufigkeit von Tiefdruckgebieten (siehe Abbildung 3). In den Sommermonaten zeigt das Modell aus diesen Gründen auch relativ starke Abweichungen von hergeleiteten Niederschlagsindizes. In den anderen Jahreszeiten ist dieses Modell aber nicht auffällig.
2. Beim Modell *„CNRM-CM5 - Aladin“* wurde ein Fehler innerhalb der Simulation entdeckt, welches die physikalische Konsistenz zwischen den Parametern eventuell stark beeinträchtigen könnte. Auffällig ist auf jeden Fall der ungewöhnliche Zusammenhang zwischen Temperatur und der potentiellen Evapotranspiration bei dieser Simulation (siehe Abbildung 8).
3. Die zwei Simulationen welche mit dem *GCM IPSL - CM5* angetrieben wurden, zeigen besonders starke Abweichungen in großskaligen Zirkulationsmustern in den meisten Jahreszeiten. Vor allem die geringe Anzahl an Hochdruckgebieten in den Übergangsmonaten und den viel zu dominanten Westströmungen in der kalten Jahreszeit sind auffällig.

Wir zeigen die projizierten Klimaänderungssignale dieser drei Modelle in Abbildung 25. Man sieht teilweise Auffälligkeiten, welche möglicherweise auf die Fehler in den Modellen zurückführbar sind.

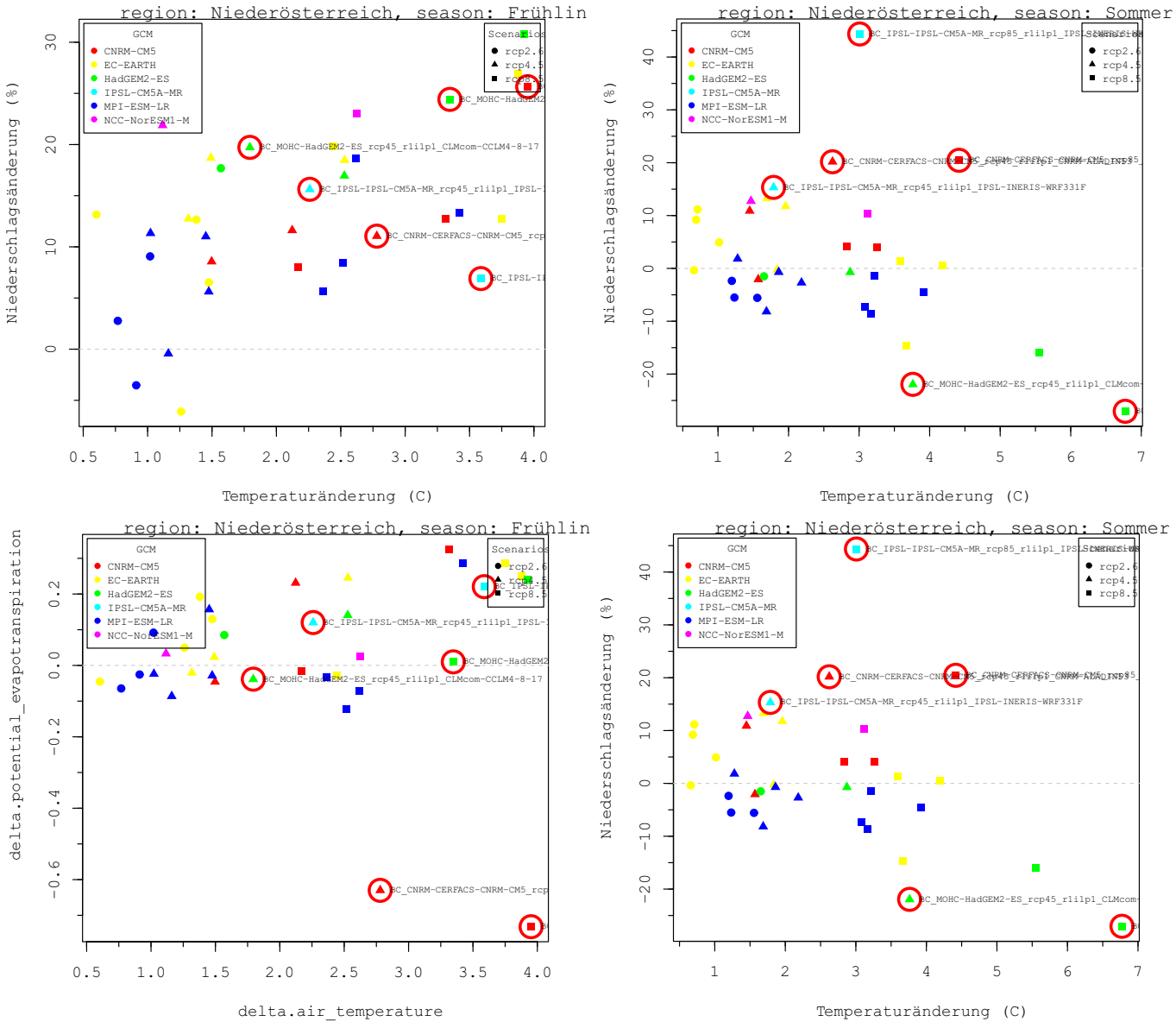



*Abbildung 25: Klimaänderungssignale (2071-2100 zu 1971-2000) der ÖKS15-Daten in Niederösterreich: Frühling (links) und Sommer (rechts). Jeder Punkt entspricht dem Änderungssignal eines Modelles für Temperatur und Niederschlag (oben) als auch Temperatur und Potentielle Evapotranspiration*

## Werden lokale Auswirkungen der Großwetterlagen richtig dargestellt?

Auch wenn über den ganzen Zeitraum der Bias korrigiert wurde, tritt ein Bias an den einzelnen Tagen auf. Dieser Bias ist von der Wetterlage abhängig.

Modellbiase sind Ausdruck von fehlerhaft dargestellten Prozessen in Klimamodellen. Je nach Wetterlage dominieren verschiedene Prozesse, Biase sind deshalb typischerweise wetterlagenabhängig. Beispiele für je zwei typische Wetterlagen und Modelle sind in Abbildung 26 und Abbildung 27 gezeigt. Die Bias-Korrektur in ÖKS15 ist wetterlagenunabhängig – es wird also implizit angenommen, dass die Biase selbst auch wetterlagenunabhängig sind.

Folglich bleiben auch nach der Biaskorrektur Biase erhalten. Je häufiger eine Wetterlage auftritt, desto mehr bestimmt sie den Gesamtbias, d. h., desto effektiver wird durch eine wetterlagenunabhängige Korrektur ihr Bias korrigiert. Tritt eine Wetterlage seltener auf (z. B. Hoch über Westeuropa), kann eine wetterlagenunabhängige Biaskorrektur entsprechende Biase nicht effektiv korrigieren. Beispiele sind ebenfalls in Abbildung 26 und Abbildung 27 gezeigt.

Prinzipiell könnte natürlich eine wetterlagenabhängige Biaskorrektur diese verbleibenden Biase eliminieren. Allerdings würde in der Regel dann der Gesamtbias über dem Kalibrierungszeitraum nicht verschwinden. Dies liegt daran, dass die Häufigkeit der Wetterlagen in den Modellen selbst gebiased ist (siehe Abschnitt „Simulieren die ÖKS15-Daten die beobachteten Großwetterlagen?“, Seite 43).

Grundsätzlich gilt, dass eine Biaskorrektur fundamentale Modellfehler prinzipiell nicht perfekt korrigieren kann und im konkreten Fall entschieden werden muss, welche Größe letztendlich korrigiert werden soll (Maraun et al., 2017). Im Fall von ÖKS15 wurde hier zugunsten der langjährigen Gesamtbiase entschieden.

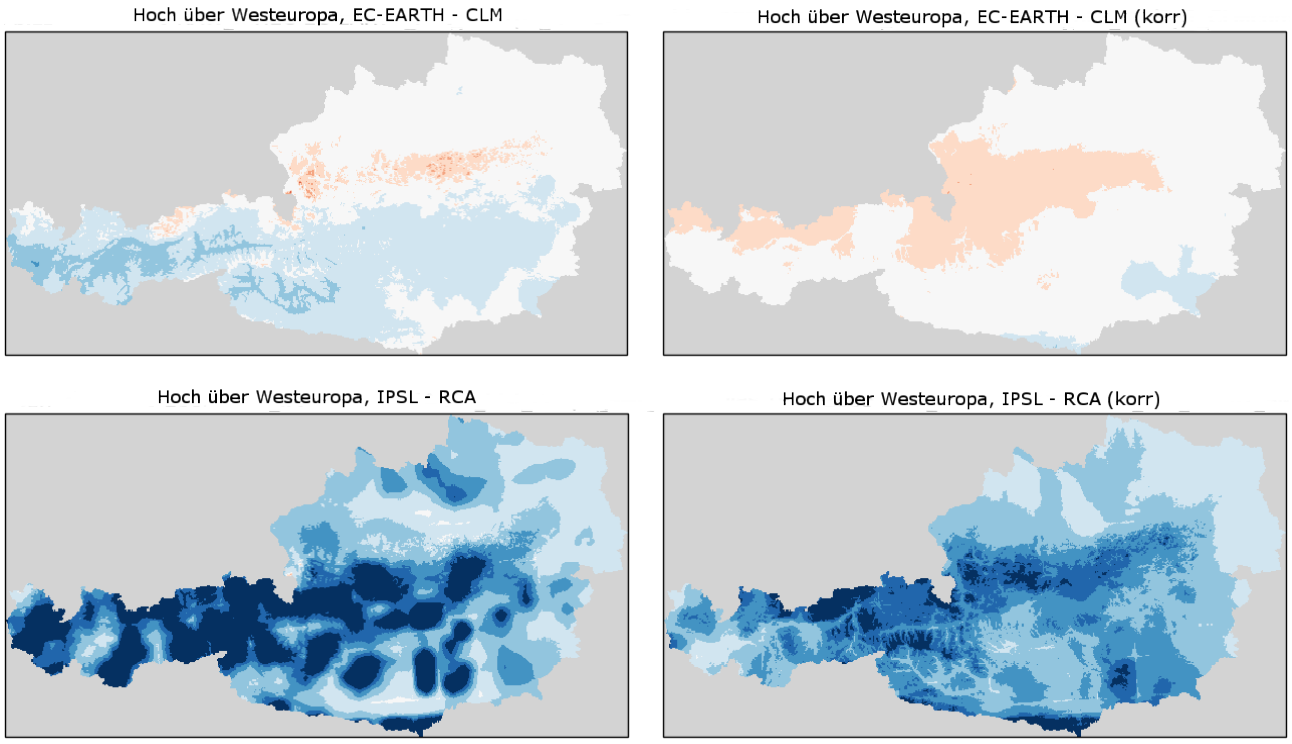



*Abbildung 26: Biase für eine Wetterlage mit Hoch über Westeuropa (WT 8 aus Abbildung 21), links: unkorrigiertes Modell, rechts: korrigiertes Modell für die Modellketten EC-EARTH-CLM (oben) und IPSL-RCA*

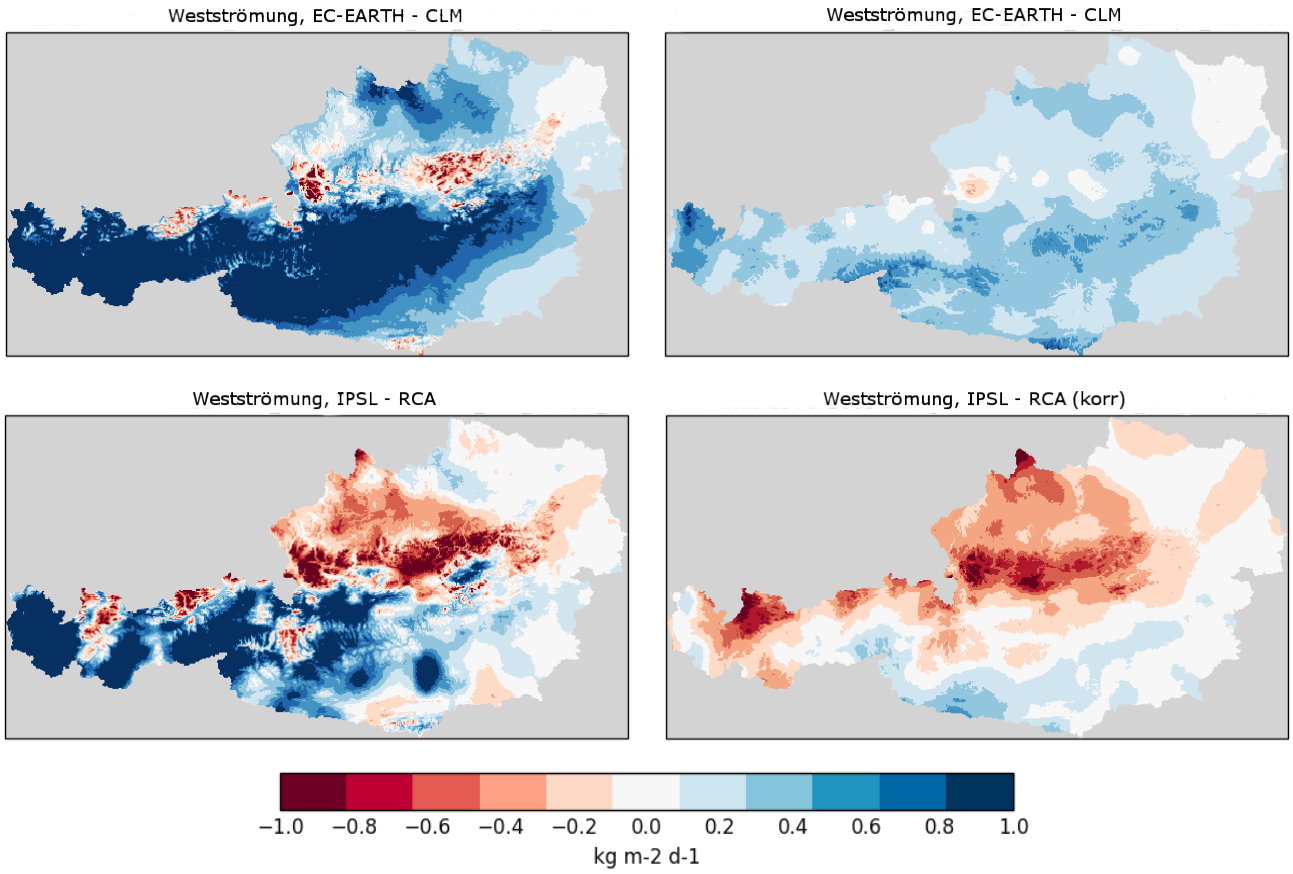



*Abbildung 27: Biase für eine Wetterlage mit Westströmung (WT 6 aus Abbildung 21), links: unkorrigiertes Modell, rechts: korrigiertes Modell für die Modellketten EC-EARTH-CLM (oben) und IPSL-RCA (unten)*

### Wie wurde PET berechnet?

Traditionell wird für die Berechnung von potenzieller Evapotranspiration (PET) aus Klimamodelldaten die Formel von Penman-Monteith benutzt. Studien der letzten Jahre zeigen jedoch, dass diese Formel das Austrocknen des Bodens im Zuge der Klimaerwärmung stark überschätzt (Sheffield et al., 2012; Milly und Dunne, 2016). Als wesentlicher Grund hierfür gilt, dass die stomatäre Leitfähigkeit sich an den höheren $CO_2$ Gehalt der Atmosphäre anpasst und reduziert, diese Änderung in der Penman-Monteith Formel aber nicht berücksichtigt wird (Milly und Dunne, 2016).

In STARC-Impact wurde deshalb die von Milly und Dunne (2016) vorgeschlagene Energy-only PET Formel benutzt:

$$PET = 0.8 (Rn - G)$$

wobei Rn (mm/d) and G (mm/d) die Netto-Strahlung am Boden und der Wärmefluss in den Boden darstellen (ausgedrückt in Einheiten der Evapotranspiration).

**Achtung:** diese Formel hat sich als am besten für Klimawandelstudien ergeben. Sie gilt aber vor allem auf längeren Zeitskalen (monatlich und länger).

## Die ÖKS15-Daten in Anwendung

Zur Feststellung des Einflusses der ÖKS15-Daten auf die Ergebnisse der Klimaimpactforschung bzw. um relevante Unsicherheiten darzustellen, wurde der Datensatz als Input für die Untersuchung von klimabedingten Wachstumseinflüssen an Getreide verwendet. Hierbei wurde das Getreidemodell DSSAT (Jones et al., 2003) und das agrar-klimatologische Risikoindikatormodell AGRICLIM (Trnka et al., 2011) verwendet.

Drei Forschungsfragen wurden untersucht:

- Welche Unsicherheiten treten bei Verwendung der ÖKS15-Projektionen als Modelleingabedaten auf (Untersuchungszeitraum 1981-2010)?
- Welchen Einfluss hat eine unterschiedliche räumliche Auflösung der Klimaszenarien auf ausgewählte simulierte Indikatoren und Ergebnisse?
- Mit welchen Auswirkungen auf den Ernteertrag kann man aufgrund eines Klimawandels rechnen (2071-2100)?

Der Schwerpunkt der österreichischen Pflanzenproduktion ist der Getreideanbau, der zum größten Teil im Osten Österreichs konzentriert ist. Zur Beantwortung der Fragestellungen wurden drei Kulturarten ausgewählt:

- Winterweizen, der im Herbst gesät und je nach Vegetationsverlauf und Witterung ab Mitte Juni des nächsten Jahres geerntet wird – normalerweise wird Winterweizen nicht bewässert
- Sommergerste: wird im Frühjahr gesät und benötigt nur einige Monate, bis sie erntereif ist – normalerweise wird Sommergerste nicht bewässert
- Körnermais: wird Anfang April bis Anfang Mai ausgesät und je nach klimatischen Gebieten ab Ende September bis Ende November geerntet – er wird in trockenen Gebieten bewässert

Drei klimatisch unterschiedliche Agrargebiete, welche die wichtigsten Klimazonen der Ackerbaugebiete Österreichs repräsentieren, wurden als Fallstudienregionen ausgewählt: eine Region in der Südsteiermark (illyrische Klimazone), im Weinviertel (pannonisches Klimagebiet) und in Oberösterreich (mitteleuropäisches Übergangsklima), siehe Abbildung 28.

Mit dem Pflanzenwachstumsmodell DSSAT wurden das Pflanzenwachstum und der Ertrag für die Standorte repräsentativer Wetterstationen (Bad Gleichenberg, Poysdorf und Kremsmünster) der drei Fallstudienregionen simuliert, während mit AGRICLIM flächenhafte Indikatoren und Ergebnisse berechnet wurden.

AGRICLIM verwendet als Inputdaten tägliche Wetterdaten (Tmax - Maximumtemperatur, Tmin - Minimumtemperatur, Rain - Niederschlag, SRad – Globalstrahlung, Vapo - relative Luftfeuchtigkeit, Wind - Windgeschwindigkeit) und berechnet damit verschiedenste agroklimatische Indizes.
DSSAT braucht als Inputdaten tägliche Wetterdaten (Tmax, Tmin, Rain, SRad), Bodendaten, Genetik der Pflanze und Management (z. B. Saattermin, Düngung, Bodenbearbeitung). Hierbei wurden drei verschiedene Bodenklassen, die mit Hilfe der nutzbaren Feldkapazität definiert wurden, berücksichtigt (Abbildung 28):

- Bodenklasse 1: nutzbare Feldkapazität < 140 mm im effektiven Wurzelraum; ca. 1 m Tiefe - geringwertige Ackerfläche
- Bodenklasse 2: 140-220 mm nutzbare Feldkapazität - mittel- und hochwertige Ackerflächen
- Bodenklasse 3: > 219 mm nutzbare Feldkapazität - mittel- und hochwertige Ackerflächen

Die Sorten „Capo“ für Winterweizen, „Magda“ für Sommergerste und „Parsival“ für Körnermais wurden im Gebiet Marchfeld kalibriert und validiert und ermöglichten somit die Simulation der Kulturen in anderen Gebieten von Österreich. Die Düngung wurde fix angenommen (laut ÖPUL Angaben), gesät wurde unter optimalen Saatbedingungen (Angabe eines Zeitfensters mit Bodentemperatur- und Bodenfeuchtespannbreite), geerntet wurde sobald das Getreide laut Modell reif war.

Die Wetterinputdaten wurden bei beiden Modellen geändert (ÖKS15-Projektionen), während die anderen Eingabedaten gleich blieben. Die $CO_2$ Konzentration wurde für den Zeitraum 1981-2010 mit 380 ppm angenommen, für 2071-2100 mit 520 ppm (RCP 4.5) bzw. 750 ppm (RCP 8.5).

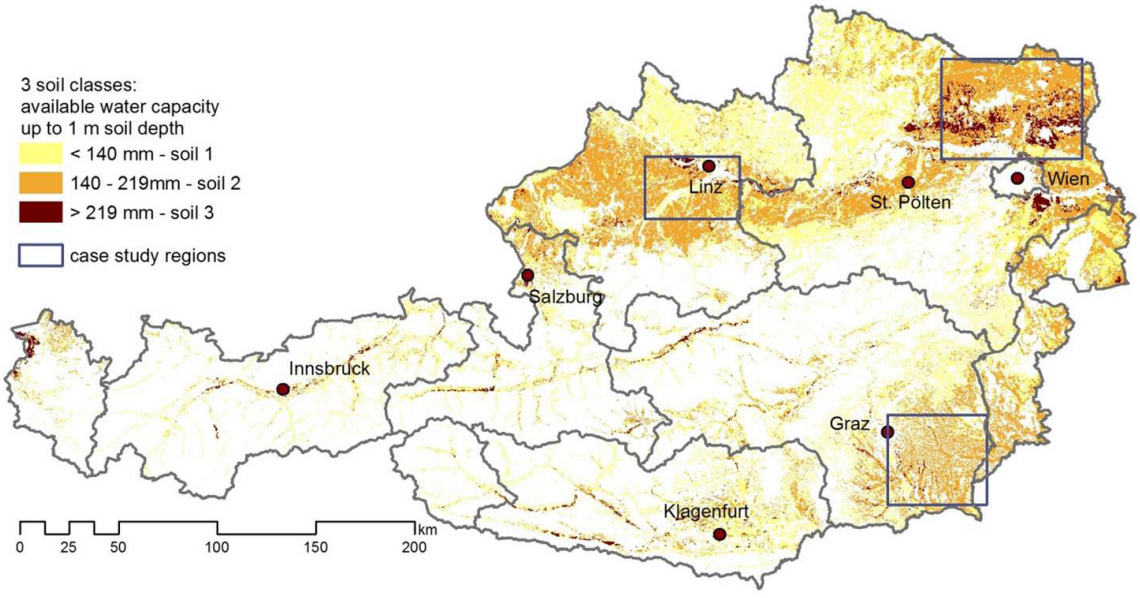



*Abbildung 28: Drei verschiedene Bodenklassen (soil 1 = Boden 1, soil 2 = Boden 2, soil 3 = Boden 3), die mit Hilfe der nutzbaren Feldkapazität definiert wurden, sowie die drei Untersuchungsgebiete*

## Welche Unsicherheiten treten bei Verwendung der ÖKS15-Projektionen als Modelleingabedaten auf (Untersuchungszeitraum 1981-2010)?

Kleine Unterschiede in den Tageswetterinputdaten können je nach Pflanzenwachstumsmodell und modellierter Kultur unterschiedlich starke Ertragsänderungen simulieren. Hier spielt insbesondere der Zeitraum mit dem höchsten Wasserverbrauch, also zwischen Ährenschieben und Reife, eine wichtige Bedeutung.

Um nutzpflanzenspezifische Unsicherheiten in den Eingangsdaten aufzuzeigen, wurden in den drei Untersuchungsstandorten (Bad Gleichenberg, Kremsmünster und Poysdorf) Winterweizen, Sommergerste (nicht bewässert) und Körnermais (optimal bewässert bzw. nicht bewässert) mit dem Wachstumsmodell DSSAT für den Zeitraum 1981-2010 simuliert. Hierbei wurden 13 verschiedene ÖKS15-Projektionen mit den gemessenen Stationswetterdaten der ZAMG verglichen.

In Abbildung 29 sind die Ertragsabweichungen auf einem mittel- bis hochwertigen Ackerboden (nutzbare Feldkapazität 140-220 mm im effektiven Wurzelraum; ca. 1 m Tiefe – Boden 2) zwischen den ÖKS15-Projektionen und den gemessenen Wetterdaten dargestellt. DSSAT steuert den Entwicklungsverlauf aller Getreidearten über die Akkumulation von Temperatursummen. Die Pflanze reagiert somit auf eine erhöhte Temperatur mit einer Verkürzung ihrer Entwicklung bzw. einzelner Phasen, bei einer niedrigen Temperatur genau entgegengesetzt. So sind viele Pflanzen um den Zeitpunkt der Blüte besonders empfindlich gegenüber zu hohen oder zu niedrigen Temperaturen. Auch kann die Periode mit dem höchsten Wasserverbrauch zwischen Ährenschieben und Reife festgelegt werden.

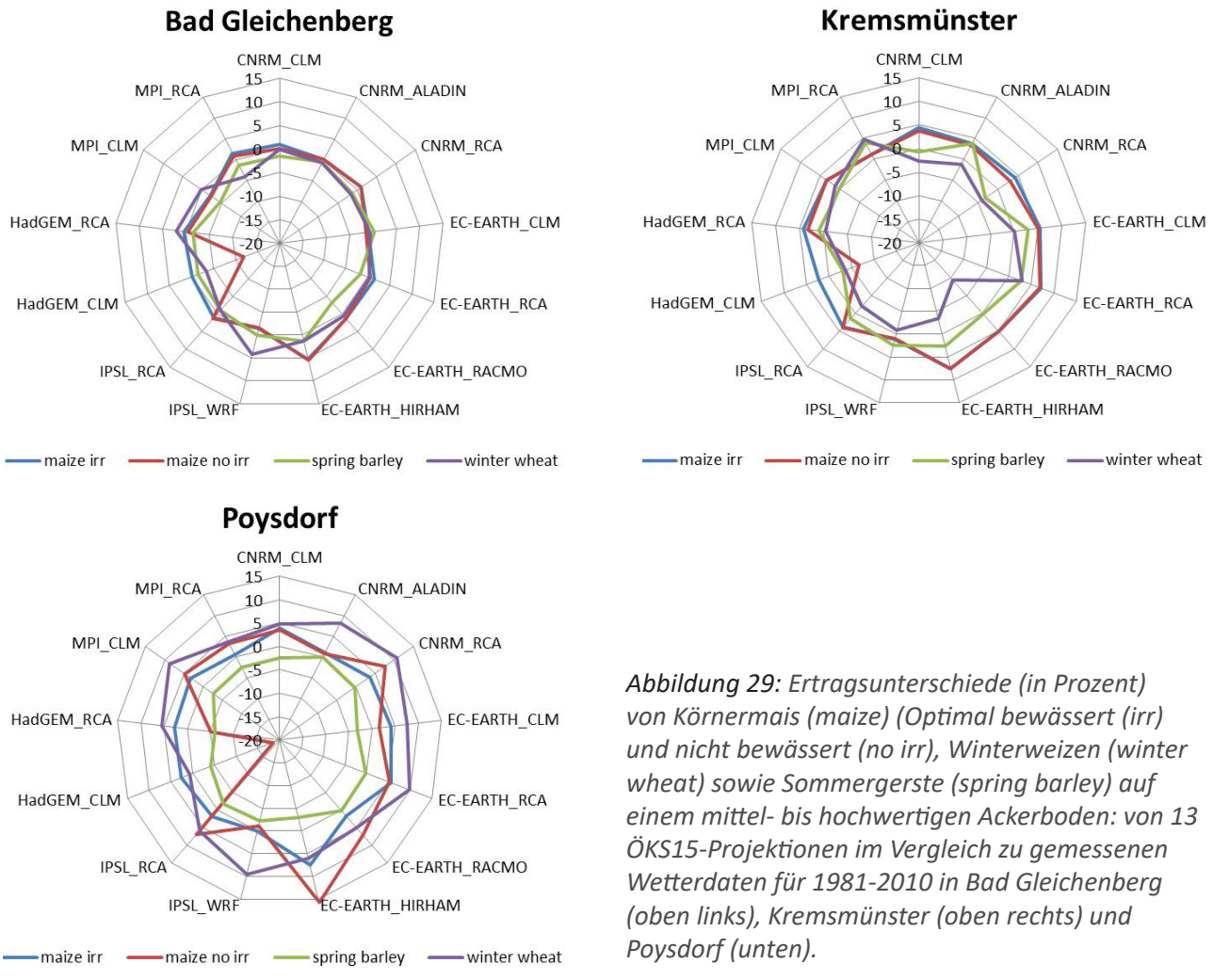



*Abbildung 29: Ertragsunterschiede (in Prozent) von Körnermais (maize) (Optimal bewässert (irr) und nicht bewässert (no irr), Winterweizen (winter wheat) sowie Sommergerste (spring barley) auf einem mittel- bis hochwertigen Ackerboden: von 13 ÖKS15-Projektionen im Vergleich zu gemessenen Wetterdaten für 1981-2010 in Bad Gleichenberg (oben links), Kremsmünster (oben rechts) und Poysdorf (unten).*

Die geringsten Abweichungen findet man in Bad Gleichenberg, insbesondere bei der Sommergerste. In Poysdorf, dem trockensten Gebiet, sind die stärksten Schwankungen vorhanden. Nicht bewässerter Mais zeigt in allen drei Untersuchungsgebieten große Schwankungen auf, was sehr stark bei der ÖKS15-Projektion *HadGEM_CCLM* ausgeprägt ist. Schon geringe Tagesabweichungen haben somit einen Einfluss auf die simulierten Erträge, auch wenn die Monatswerte in Summe gleich sind. Da für die ausgewählten Wetterstationen nicht für die ganze Untersuchungsperiode Strahlungsdaten vorhanden waren, wurden diese mit Hilfe einer einfachen Regressionsanalyse der monatlichen Sonnenscheindauer ergänzt. Die größten Abweichungen der Strahlungswerte zwischen ZAMG und ÖKS15-Projektionen konnten hierbei für Poysdorf festgestellt werden. Abweichungen können aber auch auf die Qualität der Kalibrierung der Kultur zurückgeführt werden. So waren für Winterweizen 17 Jahre Versuchsdaten zur Verfügung, 9 Jahre für Sommergerste und 4 Jahre für Körnermais. Für eine gute Kalibrierung benötigt man mindestens 10 Jahre an standortbezogenen gemessenen Ertragsdaten, die jedoch für eine gleichbleibende Sorte nur selten verfügbar sind.

Da die Kalibrierung der Ertragsmodelle auf die Qualität der Inputdaten basiert, sind die Unsicherheiten der Modelle an sich durch die Inputdaten definiert; d. h. die Kalibrierung und Validierung bestimmen die Unsicherheit der Modelle. In Abbildung 30 wird der agroklimatische Index „Hitze-Stress-Tage“ für Winterweizen des AGRICLIM Modells und seine räumliche Verteilung in der Fallstudien-Region Bad Gleichenberg beispielhaft für die zwei ÖKS15-Projektionen EC-Earth_RACMO und IPSL_WRF (1981-2010) im RCP8.5 Kontext dargestellt. Diese beiden Modelle wurden ausgewählt, da für sie im Gegensatz zu den anderen Modellen auch Werte zu relativer Luftfeuchtigkeit und Windgeschwindigkeit verfügbar waren. Der Index „Hitze-Stress-Tage“ ist pflanzenbezogen und folgendermaßen definiert: Anzahl der Tage pro Jahr mit Tmax>=35 °C und ETa/ETr<0,5, wobei die letztere Bedingung Trockenstress bedeutet.

**ETa** … aktuelle Evapotranspiration: jene Evapotranspiration, die dem Pflanzen Wachstumsstadium und dem aktuellen Status der Wasserverfügbarkeit des Bodens entspricht.

**ETr** … Referenz- Evapotranspiration: Evapotranspiration einer ausreichend bewässerten Fläche, die mit Gras einer Höhe von 0,12 m bewachsen ist.

Die höhere Anzahl von Hitze-Stress-Tagen in IPSL_WRF ist deutlich erkennbar. In den räumlichen Strukturen der Index-Werte spiegelt sich die Topographie wieder. Ein weiterer Vergleich, der die Periode 2071-2100 mit einschließt, findet sich in Tabelle 19, siehe Abschnitt „ Wie entwickelt sich der Ernteertrages im Klimawandel und warum?“, Seite 61.

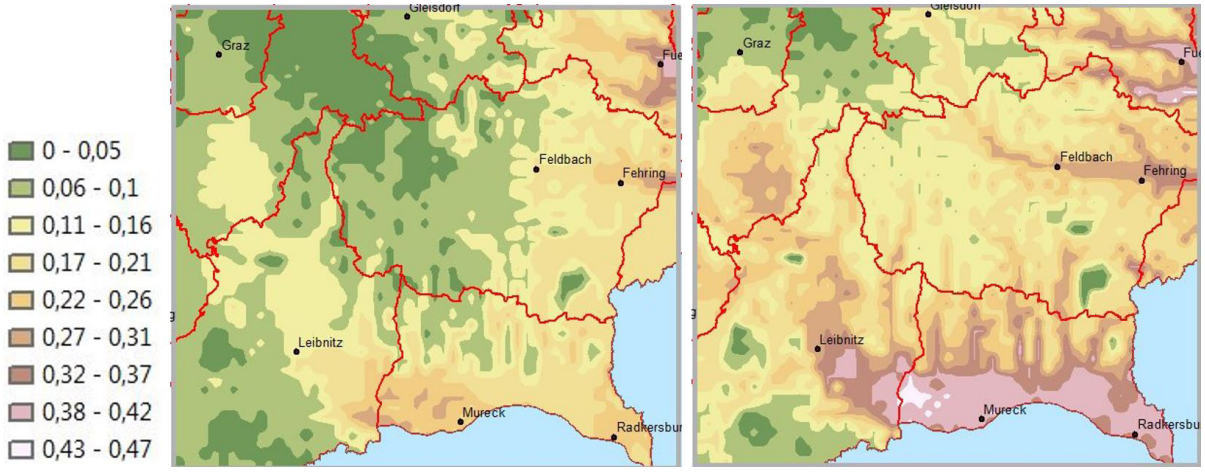



*Abbildung 30: Mittelwert der Anzahl der „Hitze-Stress-Tage“ für Winterweizen während der gesamten Wachstumsperiode in der Fallstudien-Region Bad Gleichenberg für den Zeitraum 1981-2010: EC-Earth_RACMO (links), IPSL_WRF (rechts).*

## Welchen Einfluss hat eine unterschiedliche räumliche Auflösung der Klimaszenarien auf ausgewählte simulierten Indikatoren und Ergebnisse?

Verändert man die Modellinputdaten der Klimadaten von 1 km auf 5, 11 und 21 km aggregierte Daten hat das ebenfalls Einfluss auf die verschiedenen Ernteerträge. Hier wurden die Mittelwerte im Zeitraum 1981-2010 sowie 2071-2100 (RCP8.5) für die drei Untersuchungsgebiete mit dem Pflanzenwachstumsmodell DSSAT und dem Risikoindikatormodell AGRICLIM verglichen. Die Ertragsunterschiede im Wachstumsmodell DSSAT für einen leicht sandigen Boden (geringwertige Ackerflächen, nutzbare Feldkapazität bis zu 140 mm im effektiven Wurzelraum; ca. 1 m Tiefe = Boden 1) und zwei ÖKS15-Projektionen im Zeitraum 1981-2010 sind in Tabelle 7 dargestellt. Die Differenzen sind für diese Bodenklasse viel stärker ausgeprägt als bei Böden mit höherer Wasserspeicherkapazität (nicht gezeigt), wie Boden 2 und 3.

| EC-EARTH_RACMO | | maize | maize_no irr | spring barley | winter wheat |
|---|---|---|---|---|---|
| Bad Gleichenberg | 5 km | 1.1 | 1.2 | -0.1 | -0.2 |
| | 11 km | 1.8 | 2.1 | 0.7 | -0.7 |
| | 21 km | 1.2 | 1.5 | 0.4 | 0.1 |
| Kremsmünster | 5 km | -1.7 | -1.0 | -1.3 | -8.4 |
| | 11 km | -1.3 | -0.8 | -4.6 | -9.2 |
| | 21 km | -1.0 | -0.7 | -1.4 | -10.7 |
| Poysdorf | 5 km | -0.3 | 1.1 | -3.1 | 8.5 |
| | 11 km | 2.5 | 5.5 | -2.2 | 8.2 |
| | 21 km | 2.4 | 5.3 | -1.8 | 9.2 |

| IPSL_WRF | | maize | maize_no irr | spring barley | winter wheat |
|---|---|---|---|---|---|
| Bad Gleichenberg | 5 km | 1.0 | 2.0 | -0.1 | 0.9 |
| | 11 km | 2.2 | 3.5 | 1.3 | 1.0 |
| | 21 km | 1.8 | 2.9 | 0.0 | 1.2 |
| Kremsmünster | 5 km | -0.6 | 1.2 | -1.2 | -3.4 |
| | 11 km | -0.5 | 1.3 | -1.3 | -3.0 |
| | 21 km | 0.1 | 1.5 | -0.7 | -6.0 |
| Poysdorf | 5 km | 0.1 | 1.3 | 0.3 | -3.6 |
| | 11 km | -0.1 | 4.2 | 1.7 | -2.4 |
| | 21 km | 0.5 | 3.9 | 1.5 | -2.8 |

*Tabelle 7: Ertragsunterschiede von Körnermais(maize) (optimal bewässert und nicht bewässert (no irr), Winterweizen (winter wheat) sowie Sommergerste (spring barley) (nicht bewässert) auf einem leicht sandigen Boden; 1 km Inputdaten vs. 5, 11 und 21 km aggregierte Daten für 2 ÖKS15-Projektionen (EC-Earth_RACMO und IPSL_WRF) in Bad Gleichenberg, Kremsmünster und Poysdorf - 1981-2010. Abweichungen in Prozent der Ergebnisse mit 1km-Auflösung.*

Bewässerter Körnermais und Sommergerste zeigen in allen drei Untersuchungsgebieten die kleinsten Ertragsabweichungen, da unter diesen Bedingungen die Wasserversorgung nicht ertragslimitierend wirkt. Je nach ÖKS15-Projektion werden positive oder negative Abweichungen simuliert. Mit AGRICLIM wurden verschiedene agroklimatische Indizes (Extreme Trockenheit (Tabelle 8 und Tabelle 9), Intensive Trockenheit (Tabelle 10), Summe der aktuelle nutzpflanzenspezifische Evapotranspiration (Tabelle 11), Durchschnittlicher Wasser-Stress-Index (Tabelle 12), Anbautage (Tabelle 13), Erntetage (Tabelle 14), trockene Tage (Tabelle 15), Anzahl der Wachstumstage (Tabelle 16) und Hitze-Stress-Tage (Tabelle 17)) aus den unterschiedlich aggregierten Daten berechnet. Als Beispiel wird hier Bad Gleichenberg angeführt, wo für Winterweizen die ÖKS15-Projektionen EC-EARTH-RACMO, IPSL_WRF und *HadGEM_CCLM* für den Zeitraum 1981-2010 genauer betrachtet werden.

Für den Großteil der betrachteten Indizes ergibt sich durch die Aggregation von 1x1 km zu 21x21 km Daten keine signifikante Änderung in den Ergebnissen. Geringfügige Änderungen sind bei der Summe der Evapotranspiration in den Monaten April-Juni (Tabelle 12) und bei der Anzahl der Hitze-Stress-Tage (Tabelle 17) zu bemerken, in beiden Fällen eine Abnahme des Wertes durch die Aggregation.

Dies kann damit zusammenhängen, dass die Temperaturwerte von der Geländehöhe beeinflusst sind. Je nach Höhenlage des 1x1 km Bezugspunktes und des umliegenden 21x21 km Geländes kann durch die Datenaggregation eine Abnahme oder eine Zunahme des berechneten Wertes resultieren. Merkbare Differenzen zeigen sich eher zwischen den unterschiedlichen Klimaprojektionen.

Beim Index für extreme Trockenheit in den Monaten April-Juni (Tabelle 8) zeigen sich zwischen den Klimaprojektionen generell Unterschiede. Die Aggregation bewirkt bei EC-EARTH-RACMO steigende Werte, während bei IPSL_WRF und *HadGEM_CCLM* dadurch keine signifikanten Unterschiede zu erkennen sind. Die folgende Tabelle 9, die denselben Index wie Tabelle 8, aber für die Monate Juni-August zeigt, hebt den Unterschied zwischen den Klimaprojektionen hervor, eine Aggregation bis zu 21x21 km weist keine signifikanten Unterschiede aus.

| | EC-EARTH-RACMO | | | | IPSL_WRF | | | | HadGEM_CCLM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Statistic** | 1km | 5km | 11km | 21km | 1km | 5km | 11km | 21km | 5km | 11km | 21km |
| **Avg** | 0.03 | 0.33 | 0.37 | 0.37 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.07 | 0.03 | 0.07 |
| **Std** | 0.18 | 1.27 | 1.43 | 1.43 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.36 | 0.18 | 0.25 |
| **Min** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Max** | 1 | 6 | 7 | 7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 | 1 | 1 |

*Tabelle 8: Extreme Trockenheit: Anzahl der Tage mit Wasserdefizit in den Monaten April-Juni (ETa/ETr< 0,3 (ETa…aktuelle Evapotranspiration, ETr…Referenzevapotranspiration))*

| | EC-EARTH-RACMO | | | | IPSL_WRF | | | | HadGEM_CCLM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Statistic** | 1km | 5km | 11km | 21km | 1km | 5km | 11km | 21km | 5km | 11km | 21km |
| **Avg** | 4.2 | 4.8 | 4.7 | 4.7 | 5.9 | 7.8 | 7.3 | 7.5 | 26.2 | 25.2 | 25.6 |
| **Std** | 7.1 | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 9.1 | 10.2 | 9.8 | 10.0 | 15.4 | 15.4 | 15.5 |
| **Min** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| **Max** | 27 | 27 | 28 | 28 | 31 | 35 | 34 | 34 | 59 | 59 | 60 |
| **Perc_10** | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4.7 | 3.7 | 3.7 |
| **Perc_90** | 15 | 16.2 | 16 | 15.1 | 19.2 | 23.2 | 22.2 | 22.3 | 43.5 | 41.6 | 43.4 |

*Tabelle 9: Wie Tabelle 8, aber für die Monate Juni-August*

| | EC-EARTH-RACMO | | | | IPSL_WRF | | | | HadGEM_CCLM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Statistic** | 1km | 5km | 11km | 21km | 1km | 5km | 11km | 21km | 5km | 11km | 21km |
| **Avg** | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| **Std** | 0.0 | 0.0 | 0.9 | 0.9 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| **Min** | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| **Max** | 0.0 | 0.0 | 5.0 | 5.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |

*Tabelle 10: Intensive Trockenheit: Anzahl der Tage ohne Niederschlag mit einer durchgehenden Dauer von mindestens 5 Tagen in den Monaten April-Juni mit einem Wasserdefizit ETa/ETr < 0,3 (ETa…aktuelle Evapotranspiration, ETr…Referenzevapotranspiration)*

| | EC-EARTH-RACMO | | | | IPSL_WRF | | | | HadGEM_CCLM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Statistic | 1km | 5km | 11km | 21km | 1km | 5km | 11km | 21km | 5km | 11km | 21km |
| Avg | 0.25 | 0.26 | 0.26 | 0.26 | 0.24 | 0.25 | 0.26 | 0.25 | 0.27 | 0.28 | 0.28 |
| Std | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.11 | 0.09 | 0.08 | 0.08 | 0.08 | 0.09 | 0.09 | 0.09 |
| Min | 0.05 | 0.07 | 0.08 | 0.07 | 0.05 | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.12 | 0.12 | 0.12 |
| Max | 0.54 | 0.54 | 0.54 | 0.54 | 0.42 | 0.43 | 0.44 | 0.44 | 0.43 | 0.43 | 0.43 |
| Perc_10 | 0.12 | 0.13 | 0.14 | 0.13 | 0.13 | 0.14 | 0.14 | 0.14 | 0.16 | 0.16 | 0.16 |
| Perc_90 | 0.36 | 0.37 | 0.37 | 0.37 | 0.34 | 0.34 | 0.34 | 0.33 | 0.39 | 0.40 | 0.40 |

*Tabelle 11: Durchschnittlicher Wasser-Stress-Index in den Monaten April-Juni WSI = 1 - ETa/ETr*

| | EC-EARTH-RACMO | | | | IPSL_WRF | | | | HadGEM_CCLM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Statistic | 1km | 5km | 11km | 21km | 1km | 5km | 11km | 21km | 5km | 11km | 21km |
| Avg | 225.6 | 224.6 | 222.1 | 222.7 | 225.5 | 225.0 | 222.7 | 223.7 | 213.4 | 211.0 | 211.7 |
| Std | 25.2 | 25.0 | 24.8 | 24.9 | 26.5 | 26.0 | 25.7 | 25.4 | 23.1 | 23.0 | 22.9 |
| Min | 158.2 | 158.2 | 157.2 | 157.2 | 169.4 | 173.8 | 171.7 | 170.9 | 168.5 | 166.2 | 166.5 |
| Max | 275.1 | 263.9 | 261.5 | 262.5 | 271.7 | 269.4 | 266.2 | 266.5 | 263.3 | 260.2 | 261.2 |
| Perc_10 | 197.1 | 197.4 | 195.0 | 196.8 | 190.0 | 186.6 | 184.3 | 185.3 | 183.9 | 181.3 | 182.5 |
| Perc_90 | 252.7 | 251.0 | 248.5 | 249.2 | 258.3 | 257.0 | 255.0 | 255.1 | 237.1 | 234.6 | 236.5 |

*Tabelle 12: Summe der aktuellen Evapotranspiration [mm] in den Monaten April-Juni*

| | EC-EARTH-RACMO | | | | IPSL_WRF | | | | HadGEM_CCLM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Statistic | 1km | 5km | 11km | 21km | 1km | 5km | 11km | 21km | 5km | 11km | 21km |
| Avg | 98.6 | 96.9 | 96.5 | 96.7 | 93.0 | 93.0 | 92.3 | 92.7 | 96.0 | 95.3 | 95.7 |
| Std | 20.3 | 20.7 | 20.6 | 20.2 | 19.9 | 19.3 | 19.4 | 19.7 | 16.1 | 16.0 | 15.9 |
| Min | 66.0 | 65.0 | 65.0 | 66.0 | 60.0 | 56.0 | 54.0 | 52.0 | 52.0 | 52.0 | 55.0 |
| Max | 144.0 | 145.0 | 143.0 | 142.0 | 137.0 | 136.0 | 136.0 | 136.0 | 119.0 | 117.0 | 118.0 |
| Perc_10 | 77.0 | 75.9 | 74.9 | 75.7 | 66.0 | 69.6 | 69.5 | 70.5 | 78.8 | 76.9 | 78.7 |
| Perc_90 | 126.0 | 128.0 | 128.0 | 129.0 | 118.6 | 118.0 | 117.0 | 117.3 | 112.2 | 113.1 | 114.1 |

*Tabelle 13: Anbautage: Anzahl der Tage von September bis November, die für die Aussaat geeignet sind.*

| | EC-EARTH-RACMO | | | | IPSL_WRF | | | | HadGEM_CCLM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Statistic | 1km | 5km | 11km | 21km | 1km | 5km | 11km | 21km | 5km | 11km | 21km |
| Avg | 53.2 | 53.2 | 53.1 | 52.6 | 55.6 | 56.2 | 56.2 | 55.9 | 59.3 | 59.3 | 58.9 |
| Std | 9.7 | 9.7 | 9.8 | 10.2 | 7.8 | 7.5 | 7.5 | 7.5 | 9.6 | 9.7 | 9.6 |
| Min | 29 | 31 | 31 | 28 | 39 | 41 | 41 | 40 | 30 | 30 | 30 |
| Max | 71 | 72 | 71 | 71 | 71 | 72 | 72 | 72 | 71 | 72 | 71 |
| Perc_10 | 42.8 | 41.9 | 41.8 | 41.7 | 44 | 45.9 | 45.9 | 46.9 | 45.8 | 45.8 | 44.9 |
| Perc_90 | 67 | 66.2 | 66.1 | 66.1 | 64 | 65 | 64.1 | 63.2 | 71 | 71 | 70.1 |

*Tabelle 14: Erntetage: Anzahl der für die Ernte geeigneten Tage in den Monaten April-Juni*

| | EC-EARTH-RACMO | | | | IPSL_WRF | | | | HadGEM_CCLM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Statistic | 1km | 5km | 11km | 21km | 1km | 5km | 11km | 21km | 5km | 11km | 21km |
| Avg | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 1.1 | 1.0 | 1.3 |
| Std | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 3.1 | 3.1 | 3.5 |
| Min | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Max | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 13 | 14 | 15 |
| Perc_10 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Perc_90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2.6 | 1.6 | 6.2 |

*Tabelle 15: Trockene Tage: Anzahl der Tage mit trockenem Boden*

| | EC-EARTH-RACMO | | | | IPSL_WRF | | | | HadGEM_CCLM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Statistic | 1km | 5km | 11km | 21km | 1km | 5km | 11km | 21km | 5km | 11km | 21km |
| Avg | 150 | 147 | 147 | 147 | 145 | 143 | 143 | 144 | 111 | 112 | 112 |
| Std | 14 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 14 | 15 | 17 | 18 | 17 |
| Min | 119 | 118 | 119 | 119 | 103 | 105 | 105 | 105 | 81 | 80 | 81 |
| Max | 172 | 174 | 173 | 173 | 170 | 168 | 167 | 171 | 148 | 149 | 148 |
| Perc_10 | 135 | 127 | 126 | 126 | 129 | 127 | 127 | 128 | 90 | 90 | 90 |
| Perc_90 | 167 | 165 | 164 | 165 | 163 | 159 | 159 | 159 | 133 | 133 | 134 |

*Tabelle 16: Anzahl der Wachstumstage: Anzahl der Tage bei denen spezielle Strahlungs- und Temperatur- Schwellenwerte zutreffen*

Die in Tabelle 16 angeführten Werte für die Anzahl der Wachstumstage zeigen Unterschiede der Klimaprojektionen auf, aber keinen Einfluss durch Daten Aggregation bis 21x21 km.

| | EC-EARTH-RACMO | | | | IPSL_WRF | | | | HadGEM_CCLM | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Statistic | 1km | 5km | 11km | 21km | 1km | 5km | 11km | 21km | 5km | 11km | 21km |
| Avg | 0.21 | 0.20 | 0.13 | 0.13 | 0.17 | 0.20 | 0.17 | 0.17 | 0.20 | 0.13 | 0.17 |
| Std | 0.48 | 0.48 | 0.34 | 0.34 | 0.91 | 0.91 | 0.9 | 0.9 | 0.48 | 0.34 | 0.37 |
| Min | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Max | 2 | 2 | 1 | 1 | 5 | 5 | 5 | 5 | 2 | 1 | 1 |

*Tabelle 17: Hitze-Stress-Tage: Anzahl der Tage mit Tmax>=35°C und ETa/ETr<0,5 (ETa = aktuelle Evapotranspiration, ETr = Referenz-Evapotranspiration)*

In einem weiteren Schritt wurden die DSSAT Ertragsänderungen im Zeitraum 2071-2100 ausgewertet (Tabelle 18).

| EC-EARTH_RACMO | | maize | maize_no irr | spring barley | winter wheat |
|---|---|---|---|---|---|
| Bad Gleichenberg | 5 km | -9.6 | -9.5 | -0.8 | -0.3 |
| | 11 km | -10.2 | -10.3 | 1.0 | 0.9 |
| | 21 km | -8.5 | -8.4 | 0.1 | 1.8 |
| Kremsmünster | 5 km | -1.1 | -1.1 | 0.6 | -1.6 |
| | 11 km | -2.0 | -2.0 | 0.7 | -1.4 |
| | 21 km | -1.2 | -1.2 | 0.7 | -0.6 |
| Poysdorf | 5 km | -3.1 | -2.9 | 0.3 | -0.4 |
| | 11 km | -3.8 | -2.8 | 0.8 | -0.9 |
| | 21 km | -3.5 | -2.6 | 0.9 | -1.2 |

| IPSL_WRF | | maize | maize_no irr | spring barley | winter wheat |
|---|---|---|---|---|---|
| Bad Gleichenberg | 5 km | -5.5 | -5.4 | 0.0 | 7.8 |
| | 11 km | -9.4 | -9.6 | -0.2 | 10.1 |
| | 21 km | -9.0 | -9.2 | 0.7 | 10.0 |
| Kremsmünster | 5 km | -1.2 | -1.2 | 0.6 | 19.6 |
| | 11 km | -1.2 | -1.2 | 0.4 | -9.1 |
| | 21 km | 0.8 | 0.8 | 2.8 | -38.6 |
| Poysdorf | 5 km | 0.2 | 0.5 | 0.0 | -3.2 |
| | 11 km | 1.1 | 1.6 | 1.8 | 1.2 |
| | 21 km | 1.4 | 2.0 | 2.0 | 0.5 |

*Tabelle 18: Ertragsunterschiede von Körnermais(maize) (optimal bewässert und nicht bewässert (no irr)), Winterweizen (winter wheat) sowie Sommergerste (spring barley) (nicht bewässert) auf einem leicht sandigen Boden; 1 km. Inputdaten vs. 5, 11 und 21 km aggregiert für 2 ÖKS15-Projektionen (EC-Earth_RACMO und IPSL_WRF) in Bad Gleichenberg, Kremsmünster und Poysdorf 2071-2100. Abweichungen in Prozent der Ergebnisse mit 1km-Auflösung*

Generell scheint Bad Gleichenberg die größten Unterschiede zwischen den verschiedenen aggregierten Inputdaten aufzuweisen, was auf die komplexere Topographie mit deutlicheren Unterschieden im Lokalklima, im Vergleich zu den anderen Standorten zurückgeführt werden kann. Poysdorf im Weinviertel liegt in einem eher flachen Gebiet und es werden kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Daten simuliert. Große Abweichungen im Winterweizen sind darauf zurückzuführen, dass das Wachstumsmodell im Herbst keinen idealen Saattermin vorfindet und somit das Jahr nicht simuliert wird, obwohl in der Praxis dann normalerweise zur Kultursicherung nachgesät wird. Die Ursachen sind dabei vorwiegend ein zu trockener oder zu warmer Herbst. Fallen einige Jahre in der 30-jährigen Untersuchungsperiode weg, können sich die Differenzen sehr schnell erhöhen. Hier sollte man die Modelleingabedaten auf die verschiedenen Klimabedingungen anpassen, was in dieser Studie nicht gemacht wurde.

Im Allgemeinen reagiert das Pflanzenwachstumsmodell DSSAT, das um einiges komplexer als AGRICLIM ist, viel stärker auf die verschiedenen Auflösungen. So werden im ersten Modell die Einflüsse der verschiedenen Boden- und Umweltfaktoren auf das Pflanzenwachstum mitberücksichtigt, während AGRICLIM nur Klimadaten zur Berechnung heranzieht.

### Wie entwickelt sich der Ernteertrag im Klimawandel und warum?

Am Ende des Jahrhunderts kann mit einer Ertragszunahme für Winterweizen und Sommergerste gerechnet werden, die auf die Zunahme der Temperaturen, der $CO_2$-Konzentration und der Frühlingsniederschläge zurückzuführen sind.

Jedoch können einzelne Extremereignisse auch negative Effekte auf diese Erträge haben, wenn z. B. bestimmte Schwellenwerte überschritten werden. Mais hingegen weist eine deutliche Ertragsreduktion auf.

Die Tendenz aller ÖKS15-Projektionen zeigt für den Zeitraum 2071-2100 gegenüber 1981-2010 eine Ertragszunahme für Winterweizen und Sommergerste. Höhere Temperaturen und vor allem mehr Niederschlag im Frühjahr begünstigten hier die simulierten Erträge, insbesondere bei Boden 2 und 3.

Mais, bewässert und nicht bewässert, hingegen, weist wegen einer verkürzten Wachstumsperiode bei unveränderter Reifegruppe sowie höheren Sommertemperaturen eine Ertragsreduktion in allen drei Untersuchungsgebieten auf. Die größten Abnahmen wurden mit *HadGEM_CCLM* simuliert.

Vergleicht man die relative Ertragsänderung von RCP 4.5 Simulationen mit jenen der RCP 8.5 im Zeitraum 2071-2100 (mittel- bis hochwertigen Ackerboden – Boden 2), erkennt man kaum bzw. negative Änderungen beim Körnermais, jedoch sehr große positive Abweichungen bei Sommergerste und Winterweizen (Abbildung 31).

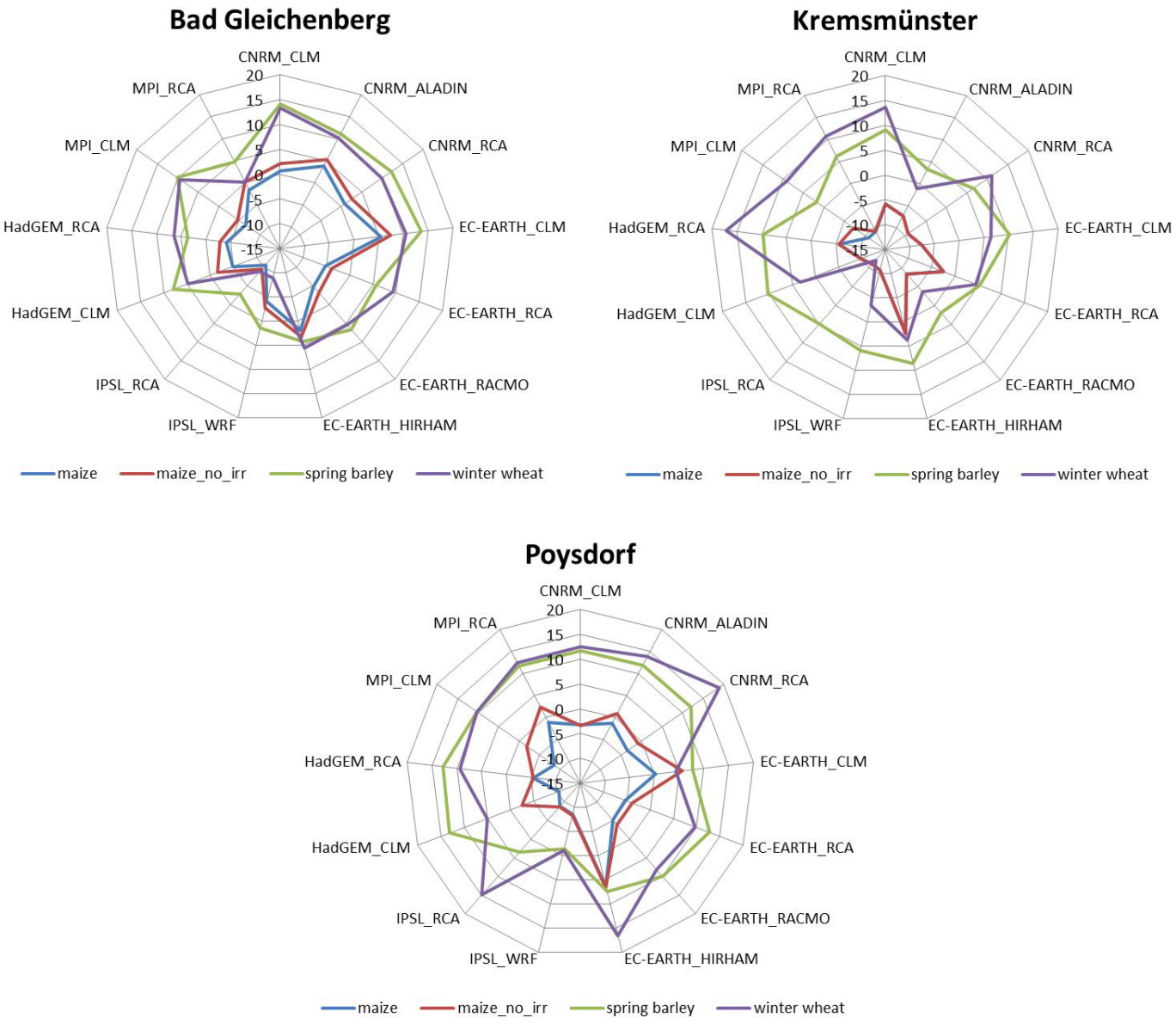



*Abbildung 31: Ertragsunterschiede von Körnermais (maize) (optimal bewässert und nicht bewässert (no_irr)), Winterweizen (winter wheat) sowie Sommergerste (spring barley) (nicht bewässert) auf einem mittel- bis hochwertige Ackerboden: RCP4.5 vs. RCP 8.5 für 13 ÖKS15-Projektionen 2071-2100 in Bad Gleichenberg, Kremsmünster und Poysdorf (in Prozent zu RCP4.5).*

Geringfügig simulierte schlechtere Erträge bei bewässertem Körnermais könnten auf N-Auswaschung zurückzuführen sein. Körnermais gehört zu der Gruppe der $C_4$-Pflanzen, die über einen effektiveren Mechanismus zur Speicherung von Kohlendioxid verfügen. Eine Zunahme der $CO_2$-Konzentration in der Atmosphäre steigert den Ertrag daher um nur wenige Prozent. Anders verhalten sich die $C_3$-Pflanzen, wie Winterweizen und Sommergerste, bei denen die Wirkung des $CO_2$-Düngungseffekt stärker spürbar ist. So erhöht z. B. eine Verdoppelung des $CO_2$-Gehaltes in der Atmosphäre den Ertrag um ca. 20 %.

Betrachtet man den agroklimatischen Index „Hitze-Stress-Tage“ für Winterweizen und seine räumliche Verteilung in der Fallstudien-Region Bad Gleichenberg für den Zeitraum 2071-2100, so erkennt man hier, dass sich das Verhältnis verändert hat und EC-EARTH-RACMO (links) höhere Indexwerte aufweist als IPSL_WRF (rechts), Abbildung 32.

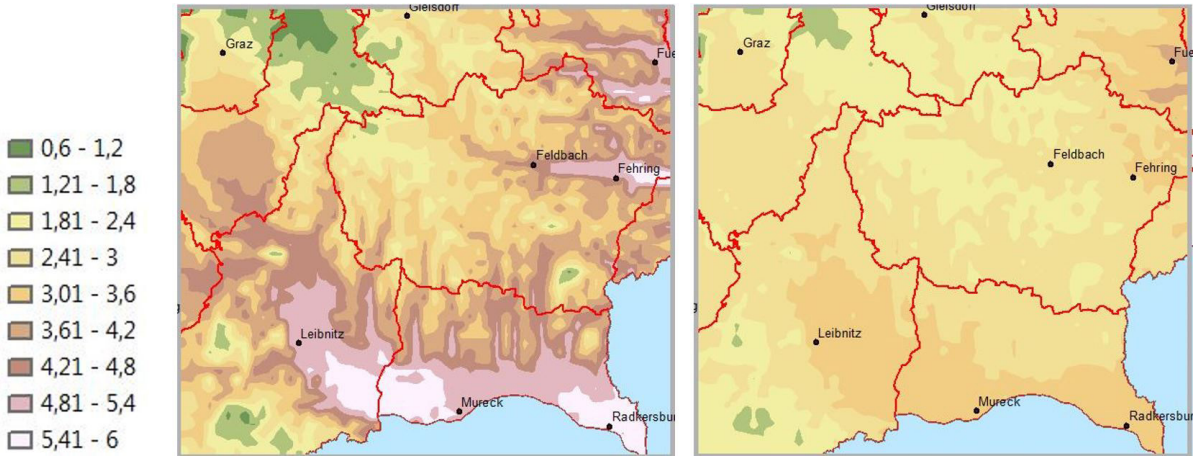



*Abbildung 32: Anzahl der „Hitze-Stress-Tage“ in der Fallstudien-Region Bad Gleichenberg 2071-2100: EC-Earth_Racmo (links), IPSL_WRF (rechts).*

Eine Farbskalierung, die den Zeitraum 1981-2010 abdeckt, stellt noch deutlich Zonen mit niedrigen Index-Werten dar, vgl. Abbildung 30. Der Bereich liegt zwischen 0-0.47. Die Farbskalierung des Zeitraumes 2071-2100 (für gesamt Österreich mit Werten von 0-13.5, vgl. Abbildung 34) auf den Zeitraum 1981-2010 angewendet, lässt die Details verschwinden (siehe Abbildung 33). Der Vergleich mit Abbildung 32 für den Zeitraum 2071-2100 macht den deutlichen Anstieg der Hitzestress-Tage deutlich. Das ist auch in Tabelle 19 verdeutlicht:

| Region Poysdorf (POY) - Hitze Stress Tage für Weizen | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Poysdorf H=230 m | | Pulkautal H=180 m | |
| RCP 8.5 | leicht hügelig | | Beckenlage, eben | |
| | 1981-2010 | 2071-2100 | 1981-2010 | 2071-2100 |
| ICHEC | 0.50 | 5.77 | 0.77 | 8.33 |
| IPSL | 0.70 | 5.53 | 1.10 | 5.90 |
| | | | | |
| Region Bad Gleichenberg (BGL) - Hitze Stress Tage für Weizen | | | | |
| | Bad Gleichenberg, H=320 | | Leibnitz H=270 m | |
| RCP 8.5 | leicht hügelig | | Beckenlage, eben | |
| | 1981-2010 | 2071-2100 | 1981-2010 | 2071-2100 |
| ICHEC | 0.20 | 3.93 | 0.13 | 5.20 |
| IPSL | 0.20 | 2.60 | 0.33 | 3.23 |

*Tabelle 19: Vergleich der Indexwerte „Hitze Stress Tage für Weizen“*

- In beiden Fallstudien-Regionen nimmt die Anzahl der Hitze Stress Tage im Zeitraum 2071-2100 gegenüber 1981-2010 signifikant zu
- Während in der Periode 1981-2010 das Modell IPSL höhere Werte liefert, ist dies in der Periode 2071-2100 umgekehrt, hier liefert das Modell ICHEC höhere Indexwerte
- Ebene Beckenlagen weisen in beiden Regionen höhere Indexwerte auf als leicht hügeliges Gelände

Die Abbildung 34 zeigt die Berechnungsergebnisse der Hitze-Stress-Tage für Winterweizen der ÖKS15-Projektion EC-Earth_Racmo, RCP8.5.

Die räumliche Verteilung der Hitze-Stress-Tage für Österreich zeigt die deutliche Dominanz in Ostösterreich auf mit seinen Maximalwerten im Seewinkel, in dem sich auch die "wärmste" ZAMG-Station Österreichs in Andau befindet.

*Abbildung 33: Anzahl der „Hitze-Stress-Tage“ pro Jahr für den Winterweizen in Österreich, ÖKS15-Projektion EC-Earth_Racmo, 1981-2010.*

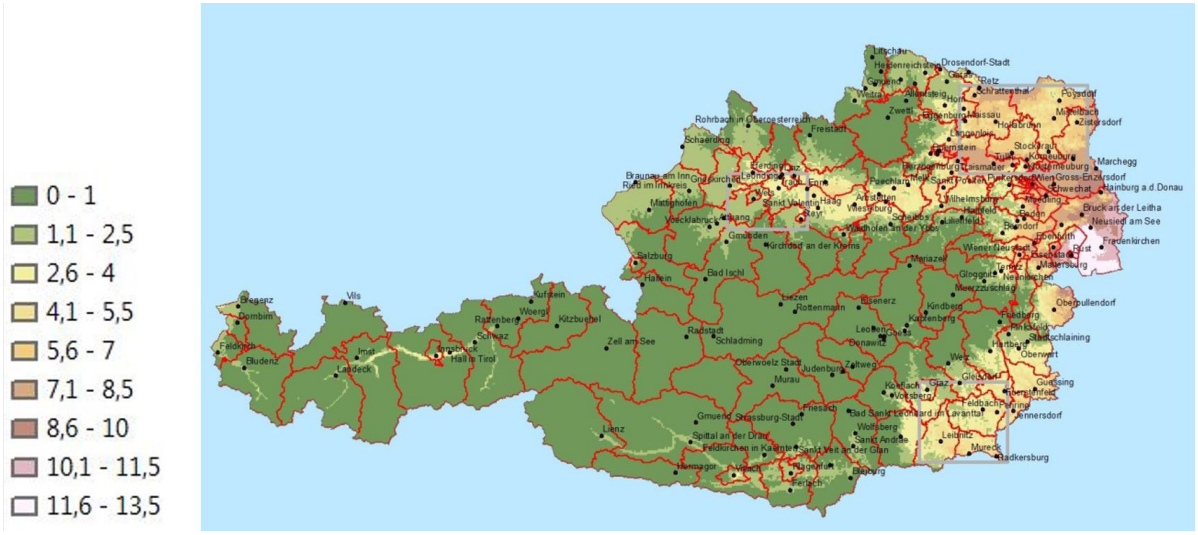



*Abbildung 34: Wie Abbildung 33 aber für den Zeitraum 2071-2100.*

# TEIL 3: FRAGEN AUS DER PRAXIS

## Wo finde ich Daten und Beratung?

Die beste Beratung werden Sie üblicherweise bei den Datenanbietern selbst erhalten, da diese wissen, was mit welchen Geräten gemessen bzw. unter welcher Annahme ein Datensatz erzeugt wurde. Wenn es sich um Fragen bezüglich der Vergleichbarkeit von Daten aus unterschiedlichen Quellen handelt, so muss diese Information entweder zeitaufwendig selbst zusammengesucht werden, oder Sie wenden sich an das CCCA-Datenzentrum (https://data.ccca.ac.at/), das diese Aufgabe für Sie übernimmt.

Das Ziel des Datenzentrums ist es möglichst viele, qualitativ hochwertige Daten auf einem zentralen Datenserver zentral zur Verfügung zu stellen, um allen den Zugriff zu erleichtern. Hier können auch Ihre Anfragen entgegengenommen und im Bedarfsfall an den Datenprovider weitergeleitet werden.
Die im Anhang gebotene Auflistung an Datenanbietern für Klimadaten bietet keine vollständige Auflistung, aber sie soll einen ersten Überblick über die wichtigsten Quellen geben. (siehe Anhang: Auswahl an Providern von Klimadaten, Seite 79) Darüber hinaus gibt es für diverse Datensätze natürlich auch andere Anbieter. GCOS bietet hier einen Überblick über unterschiedliche Angebote (www.gcos.at).

Das GERICS in Deutschland hat eine Broschüre mit Informationen zu unterschiedlichen Auswertungsmethoden, die in Deutschland bei Fragen zu Klimafolgen und Anpassung eingesetzt wurden zusammengestellt (http://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/projekte/csc-report13-deutsch-final-mit-umschlag.pdf). Die vorhandene Information besteht aus dem Ziel der Untersuchung, einer Beschreibung der Methode, Information für welche Parameter und Zeitperioden die Methode angewendet werden kann, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, einer Bewertung und Beispielen aus der Literatur. Es werden auch verschiedene graphische Darstellungsarten vorgestellt.

Ebenso gibt es dort ein vergleichendes Lexikon, dessen Ziel es ist verschiedene Definitionen aus unterschiedlichen Fachbereichen aufzuzeigen. Dadurch wird eine leichtere Kommunikation zwischen den Disziplinen unterstützt (http://www.climate-service-center.de/products_and_publications/ publications/detail/062659/index.php.de). Bei der Nutzung ist zu bedenken, dass es eventuell Unterschiede im Verständnis der Begriffe zwischen Deutschland und Österreich geben kann.

## Welche Beobachtungsdaten sind für meine Fragestellung am besten geeignet?

Diese Frage kann nicht allgemein beantwortet werden, doch sollen im Folgenden ein paar Hinweise und Überlegungsanstöße geboten werden, die Ihnen helfen, die richtigen Fragen zu stellen.

Bezüglich **Stationsdaten** sind repräsentative, qualitativ hochwertige Stationen für Ihr Untersuchungsgebiet zu empfehlen. Das muss nicht immer die nächstgelegene Station sein, da zum Teil sehr kleinräumige Effekte zum Tragen kommen können. Wenn Sie lange Zeitreihen benötigen, kann es sein, dass die gewünschte Station nicht durchgängig am gleichen Ort gemessen hat. Dann sollten Sie überlegen, ob nicht eine Korrektur eines Teils der Zeitreihen notwendig wird. Dies kann entweder durch direkte Anpassung passieren (im Fall von vorliegenden Parallelmessungen, aus denen die Unterschiede zwischen den Stationen ableitbar sind), oder durch ein statistisches **Homogenisierungsverfahren** über Referenzstationen.

Bei **gegitterten Datensätzen, die die Vergangenheit abbilden** stehen verschiedene zur Auswahl. Zum einen sind das **Analysen** in die nur die Beobachtungsdaten selbst sowie Wissen über die geographischen Gegebenheiten (Höhenmodell, Abstand zum Meer,…) eingehen. Dabei sollten Sie beachten, dass es hier unterschiedliche Möglichkeiten gibt:

Zeitliche konstante Verfügbarkeit der verwendeten Stationen: Hier ist eine zeitliche Konsistenz der räumlichen Qualität der Analysen gegeben, da zu jedem Zeitschritt dieselben Stationen verwendet werden (einzelne Messlücken ausgenommen)

Maximal mögliche Stationsanzahl: Hier werden so viele Stationen wie möglich für jeden Zeitschritt verwendet. Dadurch wächst die räumliche Qualität der Analysen mit der Anzahl der je verfügbaren Stationen (Tendenziell nimmt die Qualität ab, je weiter man in die Vergangenheit geht)

| | |
|---|---|
| | Punktinformation; direkte Messung; lokale Information |
| | Repräsentativität für die Umgebung nicht immer klar; eventuell Inhomogenitäten; Messfehler möglich |
| | z. B. statistisches Downscaling von Klimamodellen zur Station; Verwendung in Analysen bei denen bei der Station oder in deren Nähe einzelne oder mehrere Parameter ausgewertet werden müssen; Untersuchung der Vergangenheit |

Diese Analysen beschränken sich üblicherweise auf das Bodenniveau und einzelne Staaten. Meist werden Stationen der Nachbarländer bei der Analyse mitverwendet um die Qualität in den Grenzgebieten zu gewährleisten. Wenn Analysen von unterschiedlichen Parametern vorliegen, werden diese im Normalfall unabhängig voneinander erzeugt.

| | |
|---|---|
| | Vorhandene Information an Orten, an denen keine Stationen vorhanden sind; räumliche konsistente, flächendeckende Information |
| | Unsicherheiten durch Interpolationsmethode; vorliegende Auflösung muss nicht gleich der **„effektiven Auflösung“** (siehe Seite 16) sein; Konsistenz vorhandener Parameter ist nicht unbedingt gewährleistet |
| | **Biaskorrektur** von Klimamodellen; Evaluierung von Klimamodellen; Untersuchungen von größeren Gebieten in denen flächendeckende Information notwendig ist; Nutzung einzelner Gitterpunkte, wenn keine Stationsdaten verfügbar sind |

Zum anderen gibt es die Option von **Reanalysen**. Dabei kommen Wettermodelle zur Anwendung, die mit den Messungen unterschiedliche Beobachtungssysteme (Bodenstationen, Radiosondendaten, Satellitendaten,…) angetrieben werden. Dadurch ist eine physikalische Konsistenz zwischen unterschiedlichen Parametern gegeben und die Information auch in unterschiedlichen Höhenniveaus vorhanden. Üblicherweise werden alle verfügbaren Daten, die gewisse Qualitätsstandards erfüllen, verwendet. Dadurch kann es zu unterschiedlicher Qualität in den Reanalysefeldern kommen.

Die Auflösung der Reanalysen ist meist gröber als die von Analysen, dafür decken sie aber größere Gebiete (Europa, die gesamte Welt) ab. Reanalysen gibt es von den meisten Betreibern von Wettervorhersagemodellen (z.B. ECMWF, NCAR,…). Einige der vorhandenen Reanalysen wurden für einen vorgegebenen Zeitraum berechnet und danach nicht weiter fortgeführt.

| | |
|---|---|
| | Konsistenz der unterschiedlichen Parameter durch verwendetes Modell gegeben; mehrere Höhenniveaus vorhanden; viele unterschiedliche Parameter verfügbar |
| | basiert auf Modell; vorliegende Auflösung muss nicht gleich der „effektiven Auflösung“ (siehe Seite 16) sein; eventuell treten Inhomogenitäten durch Hinzunahme weiterer Datenquellen auf |
| | z. B.: Untersuchung komplexer Phänomene bei denen mehrere konsistente Parameter oder Höhenlevels notwendig sind |

## Welche unterschiedliche Arten von Klimamodelldaten gibt es?

Betrachtet man **Klimamodelldaten** ist das Angebot an verfügbaren Datensätzen noch größer als an Beobachtungsdaten, da nicht nur unterschiedliche Modelle sondern auch verschiedene Szenarien verfügbar sind. Zusätzlich gibt es von einigen Szenarien und Modellkombinationen (GCM+RCM) noch mehrere Läufe, die wieder zu verschiedenen Ergebnisse führen. Diese Vielfalt hilft die möglichen, vom Menschen getriebenen Klimaentwicklungen darzustellen.

Die erste Unterscheidung, die man treffen muss, ist die zwischen Global- und Regionalmodellen. Auf die Ergebnisse der Globalmodelle aufgesetzte Regionalmodelle verfeinern die räumliche **Auflösung** der Klimainformation indem sie regionale Effekte, die von globalen Klimamodellen nicht erfasst werden können (z. B. die Topographie der Alpen) simulieren. Soll die Auflösung noch höher sein, kommen weitere statistische Downscalingmethoden in Frage (z. B., Stadtklimamodellierung; siehe Teil 1: Abschnitt „Downscaling“, Seite 15) zur Anwendung. Generell wird die Unsicherheit mit jedem dieser Schritte weiter erhöht. Je nach Art der gewünschten Untersuchung (siehe Teil 1: Abschnitt „Unsicherheiten“, Seite 18) und der dabei benötigten Auflösung kann es daher empfehlenswert sein, die gröbstmögliche Auflösung zu verwenden.

Eine weitere Hürde künftige Veränderungen zu analysieren, können die unterschiedlichen Klimamodell-Datensätze für das **vergangene Klima** sein. Hier gibt es von den meisten Modellen einen „Control **run**“ und einen „historical **run**“. Beide bieten Daten für die Vergangenheit. Während der „historical **run**“ tatsächlich beobachtete Information über Vulkane und emittierte Treibhausgasmengen enthält, wird bei dem „Control **run**“ ein zeitlich unveränderlicher, vorindustrieller Treibhausgaszustand über die gesamte Zeit der Simulation beibehalten. Der „Control **run**“ stellt also den Zustand des Klimasystems vor der industriellen Revolution dar, währen der „historical **run**“ eine die Entwicklung des Klimasystems als Folge der beobachteten Veränderungen der Klimaantriebe darstellt.

Möchte man daher an Hand eines dieser Datensätze die Qualität des Modells in Bezug auf die eigenen Fragestellung evaluieren (durch einen Vergleich der Modellergebnisse mit gemessenen/beobachteten Ereignissen), empfiehlt sich der „historical **run**“. Der „control **run**“ kann hingegen für Sensitivitätsstudien zu veränderten Klimaantrieben verwendet werden.

## Welches Modell ist für meine Anwendung und meine Region am besten geeignet?

Bezüglich der Stärken und Schwächen des ÖKS15-Datensatzes und der dabei verwendeten Analysen sind detaillierte Informationen in Teil 2 dieses Dokumentes (Seite 22) zu finden.

Generell kann diese Frage nur in seltenen Fällen eindeutig beantwortet werden. Alle Modelle basieren auf den gleichen physikalischen Gesetzen aber ggfls. unterschiedlichen numerischen Lösungsverfahren und verschiedenen Parametrisierungen von z. B. kleinräumigen Effekten, die innerhalb der Modellauflösung nicht erfasst werden können. Grundsätzlich sind alle Modelle, die Klimawandel**projektionen** liefern, als gleichberechtigt zu betrachten und können daher nicht als besser oder schlechter eingestuft werden. Trotzdem haben die Modelle unterschiedliche Stärken und Schwächen, die sich mit neuen Modellversionen aber ändern können. Zusätzlich können Modelle manchmal Ursachen sehr gut simulieren, aber trotzdem die Auswirkungen nicht so gut wiedergeben, wie andere Modelle. Daher kann hier keine allgemeingültige Antwort gegeben werden.

Für einige Regionen und Modelle wurden **Evaluationen** durchgeführt und publiziert.

Eventuell wurden auch Modelle im fraglichen Gebiet und Zeitraum für eine, für Sie interessante Fragestellung ausgewertet. Es lohnt sich an dieser Stelle einen Blick in die Literatur zu werfen. Insbesondere, wenn man sich auf Grund eingeschränkter zeitlicher oder finanzieller Ressourcen auf wenige oder gar ein Modell beschränken muss. Da sich der Stand des Wissens laufend ändert, kann hier auf keine verbindliche Publikationsliste verwiesen werden. Die folgende Darstellung bietet nur einen groben First Guess zur Wahl des Klimamodells und ersetzt in keinen Fall die Suche nach entsprechenden Informationen in der Literatur! Besonders wichtig sind dabei Information über die Fähigkeit des Modells die Prozesse, die das untersuchte Phänomen auslösen oder daran beteiligt sind, nachzubilden.

Trotzdem wollen wir versuchen, Ihnen einige Anhaltspunkte zu geben, die Ihnen helfen sollen sich für spezifische Modelle entscheiden zu können. Die folgenden Empfehlungen beruhen auf Diskussion, die innerhalb der Wissenschaftscommunity geführt werden – also auf dem Austausch von Expertise und Erfahrung.

Je nachdem, wo die Klimarechenzentren liegen, die ihre eigenen Klimamodelle betreiben, liegt das Hauptaugenmerk der abgebildeten Prozesse und die Güte der Parametrisierungen auf unterschiedlichen Regionen. Es scheint daher zweckmäßig Modelle zu verwenden, die mit besonderem Fokus auf das gewählte Untersuchungsgebiet entwickelt worden sind. Zu beachten ist dabei, dass bei Modellketten Schwächen der Globalmodelle zum Teil durch die RCMs in der berücksichtigten Region kompensiert werden.

Für **Europa** sind das die globalen Modelle **ECHAM** des Max-Planck-Instituts (Hamburg, D) und das **HadGCM** des Hadley Centers (Exeter, UK), wobei die neuesten Modellgenerationen tendenziell zu bevorzugen sind. Regionalmodelle (dynamisch oder statistisch) sollten auf **Projektionen** dieser Globalmodelle basieren.

Bei dem dynamischen **Downscaling** gilt derselbe Grundsatz, wie bei den GCMs. Daher wären für Mitteleuropa die Regionamodelle **CLM** und **REMO** empfehlenswert, während z. B. über Fennoskandien HIRLAM besonders geeignet sein könnte. Bei der Anwendung von statistischem **Downscaling** (siehe dazu Abschnitt „Downscaling“ Seite 15) zur Erzeugung lokaler Daten hat sich für Monats- oder saisonale Klimainformation die **EOF-Methode gekoppelt** mit **Multiple Lineare Regression** als geeignet erwiesen. In so einem Fall wurde für die Erzeugung von Tagesdaten noch eine weitere statistische Methode herangezogen, z. B. ein Wettergenerator. Um direkt von der mit globalen Klimamodellen erzeugten **Projektion** zu täglichen Daten auf regionaler Skala zu kommen, kann die **Analogmethode** verwendet werden.

Für diejenigen Leser, die sich intensiver mit einzelnen Modellen und ihren Eigenschaften (Vor- und Nachteilen) auseinandersetzen wollen, sei erwähnt, dass für einige geographische Regionen und meteorologische Prozesse **Evaluierungen** der Leistung verschiedener Modelle durchgeführt und für die wissenschaftliche Community publiziert wurden. Neben ein paar Papers die mehrere Modelle behandeln (z. B.: Kotlarski et al, 2014) werden auch individuelle Evaluierungen, die nicht für jedes Modell, Gebiet, Parameter oder Prozess verfügbar sind durchgeführt. Es ist daher lohnend einen Blick in die Literatur zu werfen.

Die folgenden Webseiten sollen Ihnen auf der Suche nach benötigter Information einen Ausgangspunkt bieten: Die in ÖKS15 verwendeten Daten der Regionalmodelle wurden in dem internationalen Projekt EURO-CORDEX (http://www.euro-cordex.net/) produziert, die auf **Projektionen** von Globalmodellen aus der CMIP5-Initiative (http://cmip-pcmdi.llnl.gov/cmip5/) beruhen.

| Globalmodel | Betreiber | Genaue Information zu dem Modell |
|---|---|---|
| **CNRM-CM5** | Frankreich | http://www.umr-cnrm.fr/cmip5/ |
| **EC-EARTH** | Europa | http://ecearth.knmi.nl/ |
| **HadGEM2-ES** | Großbritannien | http://www.metoffice.gov.uk/research/modelling-systems/unified-model/climate-models/hadgem2 |
| **IPSL-CM5A-MR** | Frankreich | http://icmc.ipsl.fr/index.php/icmc-projects/icmc-international-projects/international-project-cmip5 |
| **MPI-ESM-LR** | Deutschland | https://www.mpimet.mpg.de/en/science/models/mpi-esm/ |

*Tabelle 20: Information zu Globalmodellen, die die Grundlage für die in ÖKS15 biaskorrigierten Regionalmodelldaten lieferten*

| Regionalmodel | Betreiber | Genauere Informationen zu dem Modell |
|---|---|---|
| **ALADIN53** | CNRM | http://www.umr-cnrm.fr/aladin/ |
| **CCLM4-8-17** | CLM Community | http://www.clm-community.eu |
| **RCA4** | SMHI (Swedish Meteorological and Hydrological Institute) | https://www.smhi.se/en/research/research-departments/climate-research-rossby-centre2-552 (webpage under construction) |
| **WRF331F** | Institut Pierre-Simon Laplace | https://www.ipsl.fr/en/ |
| **REMO** | MPI | http://www.remo-rcm.de/059966/index.php.en |

*Tabelle 21: Information zu Regionalmodellen (graue Nummern im Modellnamen geben die genaue Version des in ÖKS15 verwendeten Modells an)*

Diese Daten wurden mit Regionalmodellen downgescaled. Dabei können zwar kleinräumigere Phänomene beschrieben und eine höhere Auflösung der Topographie erreicht werden. Dennoch sind die Ergebnisse von den treibenden Globalmodellen abhängig. Nicht jedes RCM wurde mit jedem GCM kombiniert.

Hinweise zur Evaluation von Downscalingmethoden können im Abschnitt „Downscaling“ (Seite 15) sowie in der weiterführenden Literatur (Seite 75) gefunden werden. Da in der Regel im Laufe der Zeit Informationen über Schwächen einzelner Läufe bekannt werden, wird am CCCA eine Wiki-Seite erstellt, die mit entsprechede Nachrichten über die ÖKS15-Modellläufe befüllt wird.

## Wie wichtig ist welches Klimaszenario?

Welches Klimaszenario Sie für Ihre Untersuchung verwenden, hängt von dem Ziel der Untersuchung ab, bzw. davon, welches Sie als geeignet einschätzen. Für ein „Worst Case"-Szenario bezüglich der zu erwartenden Klimaänderung ist RCP8.5 (oder entsprechende) am besten geeignet. Man sollte allerdings im Hinterkopf behalten, dass die sozio-ökonomischen Überlegungen, die hinter allen Szenarien stecken, selbst unsicherheitsbehaftete Prognosen sind. Es kann also durchaus sein, dass selbst mit diesem Szenario der mögliche „Worst Case" nicht abgedeckt ist.

Wenn Sie eine Untersuchung über eine „realistische"/"wahrscheinlichste" Zukunft wollen, liegt es in Ihrem Ermessen, wie optimistisch oder pessimistisch Sie die Zukunft einschätzen. Alle vorhandenen Szenarien stehen Ihnen zur Verfügung, eine Auftrittswahrscheinlichkeit lässt sich ihnen prinzipiell nicht zuordnen.

Wenn Sie den „Best case" darstellen wollen, empfiehlt sich RCP2.6 (oder RCP 4.5, da für RCP2.6 momentan nur wenige Modelläufe vorliegen).

Wenn Ergebnisse für die Zukunft gezeigt werden, ist es immer notwendig, klar zu definieren, welches Szenario man gewählt hat. Nur so kann der Leser Ihrer Studie sich ein Bild darüber machen, wie die Ergebnisse zu bewerten sind. Da die Zukunft des Klimas von politischen Entscheidungen und deren Umsetzung sowie anderen nicht prognostizierbaren Ereignissen abhängt, liegt die Wahl des für Ihre Anwendung besten Szenarios bei Ihnen.

## Muss ich unterschiedliche Klimaprojektionen zu verschiedenen Szenarien verwenden?

Prinzipiell ist es immer sinnvoll die Ergebnisse mehrerer Klimamodelle zu berücksichtigen, da die Modelle auf Grund von notwendigen Vereinfachungen und noch nicht verstandenen Prozessen, Unsicherheiten haben.

Da in die Modellkette sowohl Globalmodelle als auch Regionalmodelle eingehen, sollte das gebildete Ensemble sowohl unterschiedliche GCMs als auch RCMs beinhalten. Für kurze Zeiträume (z. B. die nächsten 30 Jahre ist die Wahl des Szenariums nicht von Bedeutung und es ist essentiell mehrere Modelle zu verwenden, um die natürliche Variabilität abzubilden.

- Ergebnisse unterschiedlicher Klimamodelle für dasselbe Szenarium bieten Information über die Unsicherheit der Modelle selbst. Man geht davon aus, dass Mittel/**Median**/**Streuung** eines Ensembles eine realistischere Aussage über die zukünftige Entwicklung liefert als einzelne **Projektionen**.
- Mehrere von einem Modell erzeugte Läufe, basierend auf demselben Szenarium, bieten Information über die **Klimavariabilität**. Dabei werden für die unterschiedlichen Läufe unterschiedliche Anfangszustände gewählt.
- Ergebnisse eines Modells unter Nutzung unterschiedlicher Szenarien bieten Information über die Auswirkung unterschiedlicher Treibhausgaskonzentrationen.

## Was tun, wenn andere als die im Rahmen von ÖKS15 bereitgestellten Parameter benötigt werden?

Je nach Ihrer Expertise, finanziellen und zeitlichen Ressourcen stehen ihnen mehrere Möglichkeiten zur Verfügung:

a) Sie können die originalen Klimamodelläufe von entsprechenden Webseiten herunterladen (z. B.: http://www.euro-cordex.net/) und bearbeiten. Bei der Bearbeitung sind folgende Punkte zu beachten:

- Achten Sie darauf, welchen der angebotenen Datensätze sie herunterladen! Es gibt zum Beispiel für ein und dasselbe Modell historische Läufe, die unterschiedliche Einflussfaktoren berücksichtigen!
- Sie können Klimaänderungssignale für jedes Modell nur zwischen der vom Modell bestimmten Gegenwart / Vergangenheit und seinem Zukunftslauf bestimmen (nicht zwischen Beobachtungsdaten und dem Zukunftslauf).
- Klimamodelle haben räumlich variable mittlere Fehler. Daher wird oftmals eine Korrektur (z. B. **Biaskorrektur**) notwendig sein! Dabei sollte Biaskorrektur nie als Blackbox angewendet werden, sondern die in Teil 2 und in der weiterführenden Literatur diskutieren Probleme berücksichtigt werden!
- Die Auswertung von Klimamodellen kann nur über längere zeitliche Perioden erfolgen: Im Normalfall geht man, äquivalent zu den Klimanormalperioden, von 30jährigen Perioden aus. Aber je nach betrachtetem Parameter, kann es notwendig sein, längere Perioden zu wählen. Das ist zum Beispiel bei Extremwertbetrachtungen oder stark variablen Parametern der Fall.
- Orientieren Sie sich bei der Wahl der Perioden auf die Sie die Änderungen beziehen möchten möglichst an bereits verfügbaren Studien, damit eine Vergleichbarkeit leichter gegeben ist.
- Beachten Sie die effektive Auflösung der Modelle (siehe Teil 1: Abschnitt “Effektive Auflösung“, S 14).
- Denken Sie daran, dass Aussagen, die auf nur einem **Modelllauf** beruhen, nicht aussagekräftig sind und verwenden Sie daher Modellensembles.

b) Sie können eines der meteorologischen Institute in Österreich in Form eines Auftrages oder im Rahmen eines gemeinsamen Projektes um Unterstützung zu bitten.

Die vorhandenen Klimadaten können leicht dazu verleiten, zum einen die unterschiedlichsten Indizes daraus von biaskorrigierten Daten abzuleiten und zum anderen dazu alle Parameter biaskorrigieren. Dabei ist allerdings Vorsicht geboten!

Indizes, die etwa unterhalb der Tageskala angesetzt wären (z.B. sich auf den Tagesgang beziehen) sind nicht zu empfehlen. Vor allem, wenn sie Extremniederschläge beschreiben. (siehe auch Teil 2 Abschnitt „Beträgt die räumliche Auflösung der ÖKS15-Daten tatsächlich 1 km?“, Seite 41). Generell wird davon abgeraten Indizes abzuleiten, die von Klimamodellen nicht vertrauenswürdig simuliert werden.

## Was kann ich tun, wenn es in meinem Untersuchungsgebiet keine Stationsdaten gibt?

Je nach Anwendung können Sie entweder entsprechende Gitterpunkte aus Analysen oder Reanalysen verwenden, oder aber eine dem Untersuchungsgebiet nahe liegende und dafür repräsentative Station. Bei der Verwendung von Analyse-/Reanalysedaten sollten Sie beachten, dass die Werte eventuell nicht für den Gitterpunkt sondern für eine Gitterfläche gelten.

Bei einer nahe gelegenen Station können eventuell Höhenkorrekturen z. B. für die Temperatur sinnvoll sein. Vorsicht ist dabei im Winter geboten, da bei auftretenden Inversionen die Anwendung des Standardtemperaturgradienten nicht sinnvoll ist.

## Warum fehlen in den Klimamodelldaten ein paar Tage?

Die Kalender in Klimamodellen sind unterschiedlich aufgebaut: einige Modelle berücksichtigen den Gregorianischen Kalender mit Schaltjahren, einige vereinfachen den Kalender auf 365 Tage pro Jahr und andere gehen von generell 30 Tagen / Monat also insgesamt 360 Tagen im Jahr aus. Die Modelle sind entsprechend daran angepasst, es kommt also durch dieses verkürzte Jahr nicht zu einer Verschiebung der Jahreszeiten über die Modelllaufzeit. Je nach Auswertung muss aber eventuell auf die Eigenheit eines verkürzten Jahres Rücksicht genommen werden (z. B. bei der Berechnung von Klimaindizes (z. B. Anzahl von Frosttagen oder Hitzetagen).

## Was ist netcdf (*.nc) und wie kann ich damit arbeiten?

Netcdf (*.nc) ist ein speichersparendes Datenformat in dem speziell große Datenmengen wie Klimamodelldaten in der Klimatologie häufig bereitgestellt werden. In entsprechenden Dateien können Gitterdatensätze von mehreren Parametern für einen langen Zeitraum (z. B. 1970-2100 in täglicher Auflösung) für einen räumlichen Ausschnitt (z. B. Europa oder Österreich) für mehrere Höhenschichten bequem abgespeichert werden. Im Netcdf-File sind „Header"-Informationen enthalten, denen man entnehmen kann, welche Daten in der Datei enthalten sind. Standardmäßig ist das Information über den Zeitraum, die enthaltenen Parameter und den Namen des Datensatzes, aber auch Information über die Entstehung des Datensatzes (z. B. welches Modell wurde verwendet, wer ist der Datenerzeuger (z. B. Institut an dem die Daten erzeugt wurden) und wann wurde er erstellt).
Weitere Informationen zu netcdf: https://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/docs/index.html

Die gängigen Programmiersprachen inkludieren üblicherweise die Möglichkeit mit netcdf zu arbeiten, so sind etwa für R, C++ und Python entsprechende Libraries vorhanden. Damit können die Headerinformationen ausgelesen und die gewünschten Daten eingelesen werden.

**Achtung:** Aktuell sind unterschiedliche netcdf-Versionen verbreitet, da die frühere Version 3 noch immer verwendet wird und ältere Dateien dieses Format haben. Die aktuellere Version 4 nimmt aber laufend an Bedeutung zu. Diese Versionen sind nicht kompatibel es kann also notwendig sein, unterschiedliche Libraries zu verwenden. Auch außerhalb der mächtigen Programmiersprachen ist es möglich, an Information über die gespeicherten Datensätze zu kommen oder sie zu modifizieren. Auch wenn einige der unten genannten Tools für Linux entwickelt wurden, sind Versionen für Windows oder Cywin verfügbar.

Für Information zu den gespeicherten Daten

- Java-Tool von unidata "toolsUI-4.6.11.jar" (https://www.unidata.ucar.edu/downloads/netcdf/netcdf-java-4/index.jsp).
  Es muss dafür Java installiert sein (https://java.com/de/download/manual.jsp)

Für Information und graphische Ansicht:

- Ncview (http://meteora.ucsd.edu/~pierce/ncview_home_page.html)

Für Informationen und diversen Modifikationen (z. B.: Ausschneiden von Gebieten oder Perioden, Bilden von räumlichen oder zeitlichen Mittelwerten, Projizierung auf ein anderes Koordinatensystem, Berechnung ausgewählter Klimaindizes…)

- CDO (https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo)
- NCO (http://nco.sourceforge.net/)

## Wie kann ich auf die ÖKS15-Daten zugreifen?

Die im 2. Teil dieser Guideline diskutierten Datensätze (Beobachtungsanalysen und Modellprojektionen) sind im CCCA Datenzentrum gespeichert und können von dort bezogen werden. Für den Download der frei verfügbaren Daten ist ein Login notwendig. Ein Login kann über die Seite des Datenzentrums ohne weitere Bedingungen angelegt werden (Menüpunkt „Login", rechts oben). Von der Hauptseite des Datenzentrums (https://data.ccca.ac.at/) kommt man über den Link „Datasets" zu einer Auflistung der vorhandenen Datensätze. Um den gewünschten Datensatz leichter zu finden, kann die Suchfunktion verwendet, oder die Filtereinstellungen in der linken Spalte entsprechend gewählt werden. Es bieten sich dabei die Stichwörter „ÖKS15", der gesuchte Parameter oder auch Teile des Modellnamens an. Der ÖKS15-Endbericht mit den Informationen zu den bei der Entstehung des Datensatzes angewendeten Methoden ist ohne Login downloadbar. Bei einer Nutzung der Daten verwenden Sie bitte den vorgegeben Vorschlag zum Zitieren (Citation), zumindest den angegebenen Identifier, z. B. https://hdl.handle.net/20.500.11756/06edd0c9 und beachten Sie bitte die angegebenen Lizenzen.

Bei Fragen sind die Mitarbeiter des Datenzentrums über ein Kontaktformular (über den „Contact"-Menüpunkt am unteren Rand der Webseite bzw. von der Startseite aus über den Link „Quick Help") zu erreichen.

## Wie kann ich die Qualität meiner Impaktstudie verbessern?

Die folgenden Empfehlungen kommen aus Studien von Pflanzenwachstumsmodellen, sind aber auch für andere Impaktstudien gültig:

- Gründliche Kalibrierung und Evaluierung des Impaktmodells. Dabei sollten möglichst Daten von >10 Jahren für unterschiedliche Regionen verwendet werden. Bei der Wahl der Regionen sollte darauf geachtet werden, dass die ökologische und klimatische **Variabilität** der Zielregion möglichst gut abgedeckt wird.
- Verwende ein Ensemble an Klimamodellen, um den möglichen Bereich zukünftiger Entwicklungen möglichst vollständig abzudecken.
- Analysiere die verwendeten Klimamodelle auch in Bezug auf ungünstige Wetterbedingungen während kritischer Zeiträume in der Wachstumsperiode der Pflanzen (z. B. Häufigkeit und Stärke von ungünstigen Wetterbedingungen während empfindlicher Wachstumsphasen bei Pflanzen wie z. B. der Blühphase). Dadurch ist eine genauere Interpretation der Ergebnisse möglich.
- Verwende - wenn möglich - ein Ensemble von Impaktmodellen (z. B. unterschiedliche Pflanzenwachstumsmodelle) um die Unsicherheiten der unterschiedlichen Modelle (Modellaufbau, mathematische Beschreibung des Zusammenhanges mit dem Wetter) abzudecken. Speziell in Bezug auf kritische Schwellwerte (z. B. Hitze- oder Trockenstress bei Pflanzen) können sich dabei deutliche Unterschiede zeigen.
- Bei unsicheren künftigen Entwicklungen in der Produktionstechnik oder anderer Rahmenbedingungen sollten auch diesbezügliche Szenarien untersucht bzw. simulieren werden (z. B. geänderte Düngung, angepasste Pflanzensorten, geänderte Bodenbearbeitung,...).
- Frühere Klimaimpaktstudien sollten mit neuen Ergebnissen der Klimamodellierung überprüft werden, speziell wenn sich in den Klimamodellergebnissen Unterschiede in für die Impaktstudie wichtigen Prozessen ergeben (z. B. geänderter Niederschlag oder geänderte Häufigkeit von Hitzewellen in der Wachstumsperiode der Nutzpflanzen,...)
- In topographisch komplexem Gelände (Gebirgsregion, Hügelland) ist die räumliche **Variabilität** des Klimas größer. Die klimabedingten Änderungen können sich also auf kleinerem Raum stärker voneinander unterscheiden als in einer Flachlandregion. Daher sind hier hochaufgelöste Klima daten von großer Bedeutung für aussagekräftige Ergebnisse für spezifische Standorte, wie einzeln landwirtschaftliche Betriebe (siehe dazu auch „Effektive Auflösung" Seite 14).

# ANHÄNGE

## Referenzen

**Quellenverzeichnis:**

Bellprat O., Kotlarski S., Lüthi D., Schär C., 2013: Physical constraints for temperature biases in climate models, Geophysical Research Letters, 40, 4042-4047, DOI: 10.1002/grl.50737

Chimani B., Heinrich G., Hofstätter M., Kerschbaumer M., Kienberger S., Leuprecht A., Lexer A., Peßenteiner S., Poetsch M.S., Salzmann M., Spiekermann R., Switanek M. und H.Truhetz, 2016. ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse. Projektendbericht, Wien.

Foukal P., Fröhlich C., Spruit H., Wigley T.M.L., 2016: Variations in solar luminosity and their effect on the Earth's climate, Nature, 443, doi:10.1038/nature05072

Gutiérrez J.M., Maraun D., Widmann M., Huth R., Hertig E., Benestad R., Roessler O., Wibig J., Wilcke R., Kotlarski S., Martin D.S., Herrera S., Bedia J., Casanueva A., Manzanas R., Iturbide M., Vrac M., Dubrovsky M., Ribalaygua J., Pórtoles J., Räty O., Räisänen J., Hingray B., Raynaud D., Casado M.J., Ramos P., Zerenner T., Turco M., Bosshard T., Stepanek P., Bartholy J., Pngracz R., Keller D.E., Fischer A.M., Cardoso R.M., Soares P.M.M., Czernicki B., Pagé C., 2017: An intercomparison of a large ensemble of statistical downscaling methods over Europe: Results from the VALUE perfect predictor cross-validation experiment, International Journal of Climatology, DOI:10.1002/joc.5462

IPCC AR5 Synthesis Report (https://www.ipcc.ch/report/ar5/)

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. ,2013: EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research, Regional Environmental Change, 14, 563-578, DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2

Haslinger K., Bartsch A., 2016: Creating long-term gridded fields of reference evapotranspiration in Alpine terrain based on a recalibrated Hargreaves method, Hydrolology and Earth System Science, 20, 1211-1223, doi: 10.5194/hess-20-121-2016

Hertig E., Maraun D., Bartholy J., Pongracz R., Vrac M., Mares I., Gutiérrez J.M., Wibig J., Casanueva A., Soares P.M.M, 2018: Comparison of statistical downscaling methods with respect to extreme events over Europe: Validation results from the perfect predictor experiment of the COST Action VALUE, International Journal of Climatology, https://doi.org/10.1002/joc.5469

Hiebl J., Frei C., 2016: Daily temperature grids for Austria since 1961 – concept, creation and applicability, Theoretical and Applied Climatology, 124,161-178, doi: https://doi.org/10.1007/s00704-015-1411-4

Hofstätter M., Jacobeit J., Homann M., Lexer A., Chimani B., Philipp A., Beck C., Ganekind M., 2015: WETRAX WEather Patterns, CycloneTRAcks and related precipitation Extremes. Großflächige Starkniederschlagsereignisse im Klimawandel in Mitteleuropa, Projektendbericht, Geographica Augustana, 19, Universität Augsburg,

Johansson T., Jonsson T., Källen E., Kaas E., 1995: Climate change scenarios for the nordic countries, Clim. Res.,5, 181-195

Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H., Bootr K.J., Batchelor W.D., Hunt L.A., Wilkens P.W., Singh U., Gijsman S.J., Ritchie J.T, 2003: The DSSAT cropping system model, European Journal of Agronomy, 18, 235-265

Kotlarski S., Keuler K., Christensen O. B., Colette A., Déqué M., Gobiet A., Goergen K., Jacob D., Lüthi D., van Meijgaard E., Nikulin G., Schär C., Teichmann C., Vautard R., Warrach-Sagi K., Wulfmeyer V., 2014: Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO-CORDEX RCM ensemble, Geoscientific. Model Development, 7, 1297-1333, https://doi.org/10.5194/gmd-7-1297-2014

Kotlarski S., Truhetz H., 2017: Regionale Klimaprojektionen, in: Kunstmann H. und Früh B. (Eds.), Regionale Klimamodellierung I (Grundlagen), promet, Deutscher Wetterdienst (DWD)

Maraun D., 2012: Nonstationarities of regional climate model biases in European seasonal mean temperature and precipitation sums, Geophysical Research Letters, 39, DOI:10.1029/2012GL051210

Milly P. C. D., Dunne K. A., 2016: Potential evapotranspiration and continental drying, Nature Climate Change, 6, 946–949

Olefs M., 2013: Projekt APOLIS – Austrian Photovoltaic Information System, Projektendbericht, ZAMG

Richter D., 1995: Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagmessers, Offenbach aM., Selbstverlag des DWD

Sevruk B., 1985: Systematischer Niederschlagsfehler in der Schweiz, Der Niederschlag der Schweiz, Beiträge zur Geologie der Schweiz – Hydrologie, 31,65-75

Switanek M.B., Troch P.A., Castro C. L., Leuprecht A., Chang H.-I., Mukherjee R., Demaria E.M.C., 2016: Scaled distribution mapping: a bias correction method that preserves raw climate model projected changes, Hydrology and Earth System Sciences Discussions, doi:10.5194/hess-2016-435

Taylor K. E., Stouffer R. J., Meehl G. A., 2012, An overview of CMIP5 and the experiment design, Bulletin of the American Meteorological Society 93, 485–498. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1

Trnka M., Olesen J.E., Kersebaum K.C., Skjevåg A.O., Eitzinger J., Seguin B., Peltonen-ainio P., Rötter R., Iglesias A., Orlandini S., Dubrovský M., Hlavinka P., Balek J., Eckersten H., Cloppet E., Calanca P., Gobin A., Vučetić V., Nejedlik P., Kumar S., Lalic B., Mestre A., Rossi F., Kozyra J., Alexandrov V., Semerádová D., Žahlud Z., 2011: Agroclimatic conditions in Europe under climate change. GLOBAL CHANGE BIOLOGY, 17, DOI:10.1111/j.1365-2486.2011.02396.x

von Storch H., Zorita E., Cubasch U., 1993: Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An application to Iberian rainfall in wintertime, J. Clim, 6, 1161-1171

www.ipcc-data.org
www.drias-climate.fr
www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel

## Weiterführende Literatur:

### Klimawandel

IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp

Myers S.S., Zanobetti A., Kloog I., Huybers P., Leakey A.D.B., Bloom A.J., Carlisle E., Dietterich L.H., Fitzgerald G., Hasegawa T., Holbrook N.M., Nelson R.L., Ottman M.J., Raboy V., Sakai H., Sartor K.A., Schwartz J., Seneweera S., Tausz M., Usui Y., 2014: Increasing $CO_2$ threatens human nutrition, Nature, 510, 139-142

Porter J.R., Xie L., Challinor A.J., Cochrane K., Howden S.M., Iqbal M.M., Lobell D.B., Travasso M.I., 2014: Food security and food production systems, In Field C.B., Barros V.R., Dokken D.J., Mach K.J., Mastrandrea M.D., Bilir T.E., Chatterjee M., Ebi K.L., Estrada Y.O., Genova R.C., Girma B., Kissel E.S., Levy A.N., MacCracken S., Mastrandrea P.R., White L.L. (Eds.) Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, pp. 485-533

Siebert S., Ewert F., 2012: Spatio-temporal patterns of phenological development in Germany in relation to temperature and day length, Agric. Forest Meteorol., 152, 44-57

Wahlquist A., 2012: Researchers probe warming climate frost puzzle. Groundcover, Grains Research and Development Cooperation, Kingston, ACT, Australia

Wheeler T., von Braun J., 2013: Climate change impacts on global food security, Science, 41, 508-513

ZAMG(Hrg.), 2014: Unser Klima, facultas-Verlag

Informationsportal der ZAMG zu Klimamodellierung: https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informations-portal-klimawandel/klimaforschung/klimamodellierung/

### Daten

Chimani B., Heinrich G., Hofstätter M., Kerschbaumer M., Kienberger S., Leuprecht A., Lexer A., Peßenteiner S., Poetsch M.S., Salzmann M., Spiekermann R., Switanek M. und Truhetz H., 2016: ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse, Projektendbericht, https://www.bmlfuw.gv.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik_national/anpassungsstrategie/klimaszenarien.html

Hiebl J. and Frei C., 2016: Daily temperature grids for Austria since 1961 – concept, creation and applicability, Theor. Appl. Climatology, 124,161-178, DOI 10.1007/s00704-015-1411-4

Hiebl J. and Frei C., 2017: Daily precipitation grids for Austria since 1961-development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling, Theor. Appl. Climatology, online first, DOI 10.1007/s00704-017-2093-x

### Methoden, Downscaling

DWD (Hrg.), 2017: Regionale Klimamodellierung I, promet, 99

Maraun D., 2016: Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review, Curr. Clim. Change Rep., 2, 2011-220

Maraun D., Huth R., Gutiérrez J.M., Martin D.S., Dubrovsky M., Fischer A., Hertig E., Soares P.M.M., Bartholy J., Pongrácz R., Widmann M., Casado M.J., Ramos P., Bedia J., 2017: The VALUE perfect predictor experiment: evaluation of temporal variability, International Journal of Climatology, DOI: 10.1002/joc.5222

Maraun D., 2018: Statistical Downscaling in Climate Science, Oxford Research Encyclopedia of Climate Science, in press

Maraun D., Widman M., 2018: Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research, Cambridge University Press, DOI: 10.1017/9781107588783

Maraun D., Widmann M., Gutierrez J.M., Kotlarski S., Chandler R.E., Hertig E., Wibig J., Huth R. and Wilcke R., 2015: VALUE - A framework to validate downscaling approaches for climate change studies, Earth's Future, 3, 1, 1-14

Maraun D., Widmann M. and Gutierrez J.M, 2018: Statistical downscaling skill under present climate conditions: A synthesis of the VALUE perfect predictor experiment, Int. J. Climatol., DOI: 10.1002/joc.5877

Martre P., Wallach D., Asseng S., Ewert F., Jones J.W., Rötter R.P., Boote K.J., Ruane A.C., Thorburn P.J., Cammarano D., Hatfield J.L., Rosenzweig C., Aggarwal P.K., Angulo C., Basso B., Bertuzzi P., Biernath C., Brisson N., Challinor A.J., Doltra J., Gayler S., Goldberg R., Grant R.F., Heng L., Hooker J., Hunt L.A., Ingwersen J., Izaurralde R.C., Kersebaum K.C., Müller C., Kumar S.N., Nendel C., O'leary G., Olesen J.E., Osborne T.M., Palosuo T., Priesack E., Ripoche D., Semenov M.A., Shcherbak I., Steduto P., Stöckle C.O., Stratonovitch P., Streck T., Supit I., Tao F., Travasso M., Waha K., White J.W., Wolf J., 2015: Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one, Glob. Change Biol., 21, 911-925

O. Rössler, A. M. Fischer, H. Huebener, D. Maraun, R.E. Benestad, P. Christodoulides, P.M.M. Soares, R.M. Cardoso, C. Pagé, H. Kanamaru, F. Kreienkamp and D. Vlachogiannis: Challenges to link climate change data provision and user needs – perspective from the COST-action VALUE, Int. J. Climatol., online first, DOI: 10.1002/joc.5060, 2017.

White J.W., Hoogenboom G., Kimball B.A., Wall G.W., 2011: Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production, Field Crop. Res., 124, 357-368

Wilby R. L., Charles S. P., Zorita E., Timbal B., Whetton P., Mearns L. O., 2004: Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TGCIA, 27.

White J.W., Hoogenboom G., Kimball B.A., Wall G.W., 2011: Methodologies for simulating impacts of climate change on crop production, Field Crop. Res., 124, 357-368

Wilby R. L., Charles S. P., Zorita E., Timbal B., Whetton P., Mearns L. O., 2004: Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TGCIA, 27.

### Anpassung

Stocker, T. F., Dahe, Q., Plattner, G.-K. and Tignor, M. (2015), 'IPCC Workshop on Regional Climate Projections and their Use in Impacts and Risk Analysis Studies', https://www.ipcc.ch/pdf/supporting-material/RPW_WorkshopReport.pdf.

Trnka M., Hlavinka P., Semenov M.A., 2015: Adaptation options for wheat in Europe will be limited by increased adverse weather events under climate change, J. R. Soc. Interface, 12, 1-7

Tsuji G.Y., Hoogenboom G., Thornton P.K., 1998: Understanding Options for Agricultural Production, Springer

### Landwirtschaft (im Klimawandel)

Asseng S., Ewert F., Rosenzweig C., Jones J.W., Hatfield J.L., Ruane A., Boote, K.J., Thorburn, P., Rötter R.P., Cammarano D., Brisson N., Basso B., Martre P., Aggarwal P.K., Angulo C., Bertuzzi P., Biernath C., Challinor A., Doltra J., Gayler S., Goldberg R., Grant R., Heng L., Hooker J., Hunt T., Ingwersen J., Izaurralde C., Kersebaum K.C., Müller C., Naresh Kumar S., Nendel C., O'Leary G., Olesen J.E., Osborne T.M., Palosuo T., Priesack E., Ripoche D., Semenov M., Shcherbak I., Steduto P., Stöckle C., Stratonovitch P., Streck T., Supit I., Tao F.L., Travasso M., Waha K., Wallach D., White J., Williams J.R., Wolf J.,2013: Uncertainty in simulating wheat yields under climate change, Nature Climate Change, 3, 827-832

Asseng S., Ewert F., Martre P., Rötter R.P., Lobell D.B., Cammarano D., Kimball B.A., Ottman M.J., Wall G.W., White J.W., Reynolds M.P., Alderman P.D., Prasad P.V.V., Aggarwal P.K., Anothai J., Basso B., Biernath C., Challinor A., De Sanctis G., Doltra J., Fereres E., Garcia-Vila M., Gayler S., Hoogenboom G., Hunt T., Izaurralde C., Jabloun M., Jones C.D., Kersebaum K.C., Koehler A.-K., Müller C., Naresh Kumar S., Nendel C., O'Leary G., Olesen J.E., Palosuo T., Priesack E., Eyshi Rezaei E., Ruane A.C., Semenov M., Shcherbak I., Steduto P., Stöckle C., Stratonovitch P., Streck T., Supit I., Tao F., Thorburn P., Waha K., Wang E., Wallach D., Wolf J., Zhao Z., Zhu Y., 2015: Rising heat reduces global wheat production, Nat. Clim. Chang., 5, 143-147

Bassu S., Brisson N., Durand J.L., Boote K., Lizaso J., Jones J.W., Rosenzweig C., Ruane A.C., Adam M., Baron C., 2014: How do various maize crop models vary in their responses to climate change factors?, Glob. Change Biol., 20, 2301-2320

Challinor A., 2011: Agriculture: forecasting food, Nat. Clim. Chang., 1, 103-104

Challinor A.J., Watson J., Lobell D.B., Howden S.M., Smith D.R., Chhetri N., 2014: A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation, Nat. Clim. Chang., 4, 287-291

Chenu K., Porter J.R., Martre P., Basso B., Chapman S.C., Ewert F., Bindi M., Asseng S., 2017: Contribution of Crop Models to Adaptation in Wheat, Trends in Plant Science, 22, 472-490

Dadhwal V.K., 2003: Crop growth and productivity monitoring and simulation using remote sensing and GIS, Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology, 263-289

de Wit A.J.W., Boogaard H.L., van Diepen, C.A., 2005: Spatial resolution of precipitation and radiation: the effect on regional crop yield forecasts, Agricultural and Forest Meteorology, 135, 156-168

Eitzinger J., Formayer H., Thaler S., Trnka M., Zdenek Z., Alexandrov V.,2008: Results and uncertainties of climate change impact research in agricultural crop production in Central Europe, Die Bodenkultur, 59, 131–147

Gowda P.T., Satyareddi S.A., Manjunath S.B., 2013: Crop Growth Modeling: A Rewiev, RRJAAS, Vol. 2, 1-11

Li T., Hasegawa T., Yin X., Zhu Y., Boote K., Adam M., Bregaglio S., Buis S., Confalonieri R., Fumoto T., Gaydon D., Marcaida M., Nakagawa H., Oriol P., Ruane A.C., Ruget F., Singh B., Singh U., Tang L., Tao F., Wilkens P., Yoshida H., Zhang Z., Bouman B., 2015: Uncertainties in predicting rice yield by current crop models under a wide range of climatic conditions, Glob. Change Biol., 21, 1328-1341

Jones J.W., Antle J.M., Basso B., Boote K.J., Conant R.T., Foster I., Godfray C.J., Herrero M., Howitt R.E., Janssen S., Keating B.A., Munoz-Carpena R., Porter C.H., Rosenzweig C., Wheeler T.R., 2017: Brief history of agricultural systems modeling, Agricultural Systems, 155, 240-254

Nendel C., Rötter R.P., Thorburn P.J., Boote K.J., Ewert F., 2018: Editorial Introduction to the Special Issue "Modelling cropping systems under climate variability and change: impacts, risk and adaptation", Agricultural Systems, 159, 139-143

Penning de Vries F.W T., Jansen M., Berge H.F.M. ten, Bakema A., 1989: Simulation of ecophysiological processes of growth in several annual crops, Purdoc: Wageningen, NL

Palosuo T., Kersebaum K.C., Angulo C., Hlavinka P., Moriondo M., Olesen J.E., Patil R.H., Ruget F., Rumbaur C., Takáč J., Trnka M., Bindi M., Çaldağ B., Ewert F., Ferrise R., Mirschel W., Şaylan L., Šiška B., Rötter R., 2011: Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: a comparison of eight crop growth models, Eur. J. Agron., 35, 103-114

Rezaei E.E., Siebert S., Ewert F., 2015: Intensity of heat stress in winter wheat – phenology compensates for the adverse effect of global warming, Environ. Res. Lett., 10, 024012

Rosenzweig C., Jones J.W., Hatfield J.L., Ruane A.C., Boote K.J., Thorburn P., Antle J.M., Nelson G.C., Porter C., Janssen S., Asseng S., Basso B., Ewert F., Wallach D., Baigorria G., Winter J.M., 2013: The Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project (AgMIP): protocols and pilot studies, Agric. Forest Meteorol., 170, 166-182

Rötter R.P., Palosuo T., Pirttioja N.K., Dubrovsky M., Salo T., Fronzek S., Aikasalo R., Ristolainen A., Carter T.R., 2011a: What would happen to barley production in Finland if global warming exceeded 4 °C? A model-based assessment, Eur. J. Agron., 35, 205-214

Rötter, R.P.; Carter, T.R.; Olesen, J.E.; Port, J.R. Crop-climate models need an overhaul. Nat. Clim. Chang., 1, 175-177, 2011b.

Rötter R.P., Palosuo T., Kersebaum K.C., Angulo C., Bindi M., Ewert F., Ferrise R., Hlavinka P., Moriondo M., Nendel C., Olesen J.E., Patil R.H., Ruget F., Takáč J., Trnka M., 2012: Simulation of spring barley yield in different climatic zones of Northern and Central Europe: a comparison of nine crop models, Field Crops Res., 133, 23-36

Teixeira E.I., Fischer G., van Velthuizen H., Walter C., Ewert F., 2013: Global hot-spots of heat stress on agricultural crops due to climate change, Agric. Forest Meteorol., 170, 206-21

Trnka M., Rötter R.P., Ruiz-Ramos M., Kersebaum K.C., Olesen J.E., Zalud Z., Semenov M.A.,2014: Adverse weather conditions for European wheat production will become more frequent with climate change, Nat. Clim. Chang., 4, 637-643

| Auswahl an Providern von Klimadaten | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Organisation** | **Stationsdaten** | **Analysedaten** | **Reanalysedaten** | **Klimamodell-daten** | **Sonstiges** | **Anmerkungen** | **Webseite** | **Kontakt** |
| CCCA-Datenzentrum | | x | | x | x | | https://data.ccca.ac.at/ | datenzentrum@ccca.ac.at |
| ZAMG | x | x | | x | | | www.zamg.ac.at | klima@zamg.ac.at |
| Wegener Center | x | | | | | | https://wegenernet.org/portal/ | wegnet@wegener-net.org |
| ECMWF | | | x | | | | http://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets | Kontaktformular auf Webseite |
| ECA&D | x | | | | | auch Klimaindizes | http://www.ecad.eu/ | eca@knmi.nl |
| World Data Center for Climate | | | x | x | | Daten aus unter-schiedlichen internationalen Projekten | https://cera-www.dkrz.de | data@dkrz.de (mit Betreff „WDCC: …“) |
| NCEP / NOAA | | | | | x | z. B. Daten zu El Nino und anderen Oszil-lationen (ENSO, AO, NAO,SOI,..), globale Tempe-raturanomalien, Global Historical Network-Monthly | https://www.ncdc.noaa.gov/cag/ | https://www.ncdc.noaa.gov/contact |
| Office (Hadley Center) | | x | | | | Globale Daten-sätze | http://www.metoffice.gov.uk | |
| ESGF-CEDA | | | x | x | | | https://esgf-index1.ceda.ac.uk/projects/esgf-ceda/ | |
| COSMO Regional Reana-lysis | | | x | | | Für unterschied-liche Europaaus-schnitte in 12, 6 bzw. 2km | http://reanalysis.meteo.uni-bonn.de/?Overview | |

## Informationen zu Modellfehlern

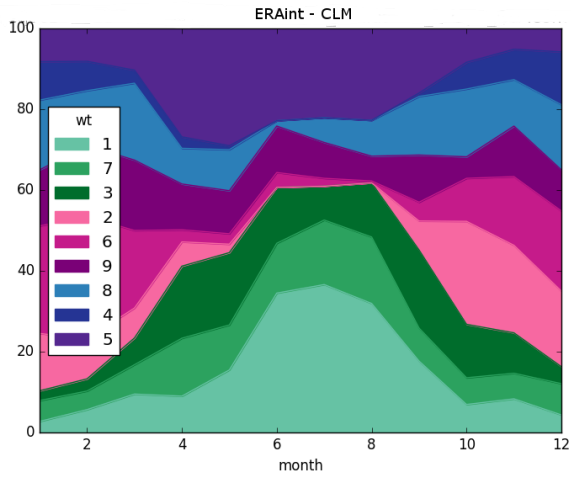
Sowohl Klimamodellbetreiber als auch Betreiber von Reanalysen führen Webseiten auf denen etwaige Probleme in den Daten allgemein bekannt gemacht werden. In der folgenden Tabelle sind einiger dieser Seiten aufgelistet. Die Aufbereitung und Tiefe der gegebenen Information ist unterschiedlich und die Information als Modellierungslaie nicht immer leicht verständlich.

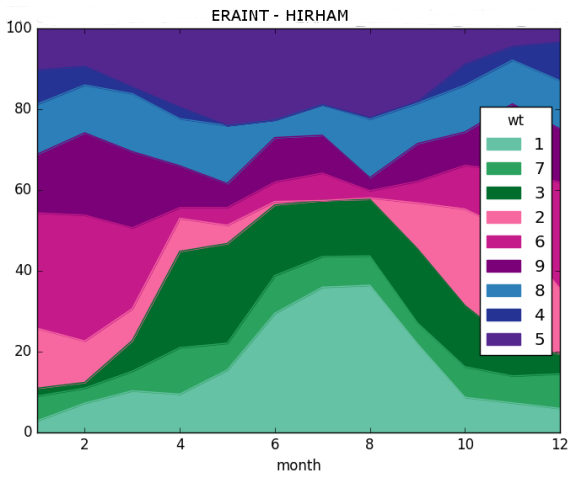
| Datensatz | Webseite |
|---|---|
| | **Klimamodelle** |
| **CORDEX** | https://madwiki.dkrz.de/CORDEX_errata |
| **CMIP5** | https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/errata.html |
| **IPCC AR5** | https://www.dkrz.de/up/services/data-management/projects-and-cooperations/ipcc-data/order-ipcc-data-on-dvd/ipcc-ar5-data-on-dvd |
| | **Reanalysen** |
| **ERA-Interim** | https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/ERA-Interim+known+issues |
| **ERA40** | http://artefacts.ceda.ac.uk/badc_datadocs/ecmwf-e40/news.html |
| **ERA5** | https://software.ecmwf.int/wiki/display/CKB/ERA5+data+documentation#ERA5datadocumentation-Knownissues |
| **NCEP-NCAR** | https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/problems.shtml |
| **JRA-55** | http://jra.kishou.go.jp/JRA-55/index_en.html#quality |

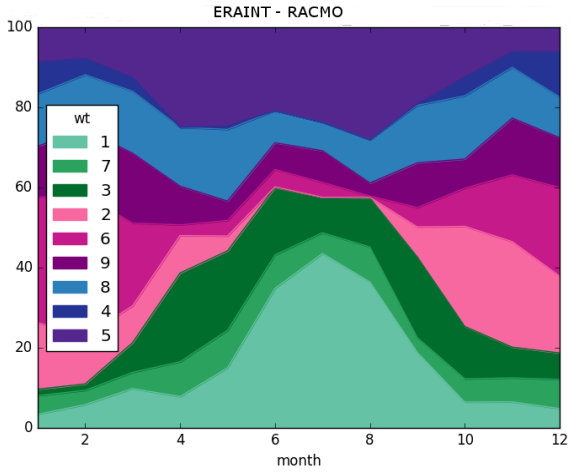
## Weitere Graphiken zur Klimamodellevaluation

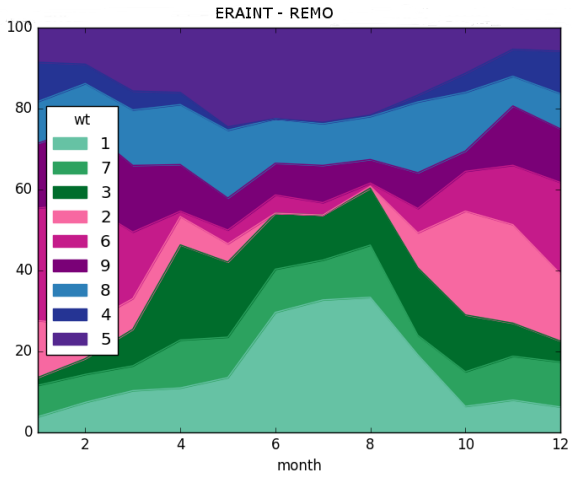
### Ad: Simulieren die ÖKS15-Daten die beobachteten Großwetterlagen?

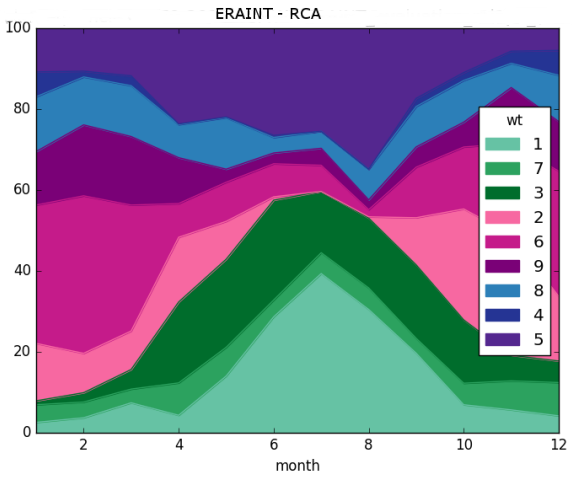
Die folgenden Graphiken zeigen den Jahresgang der Häufigkeiten der Wetterlagen unterschiedlicher Modellketten (siehe Überschriften der einzelnen Graphiken). Die in der Legende gegebenen Ziffern sind folgenden Wetterlagen zuzuordnen. Tiefdruck (1,4,6), Hochdruck (8,9), Westströmungen (3,5,7) und gradientenschwacher Druckverteilung (2). Die Auswertungen decken den Zeitraum 1979-2011 ab.

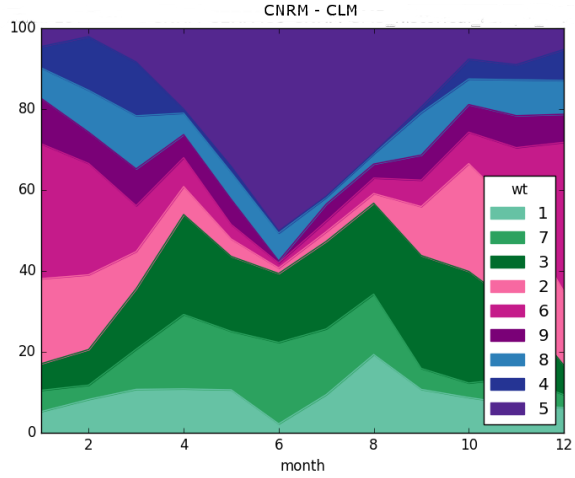


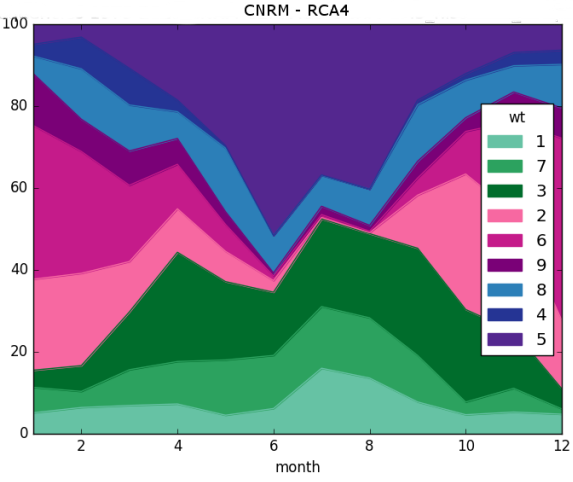



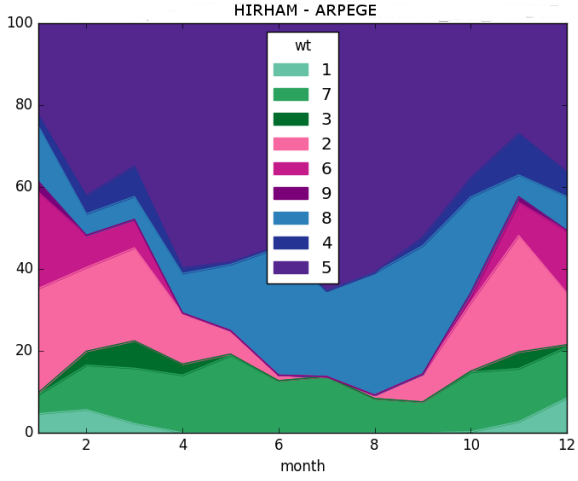

ERAINT - RACMO
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

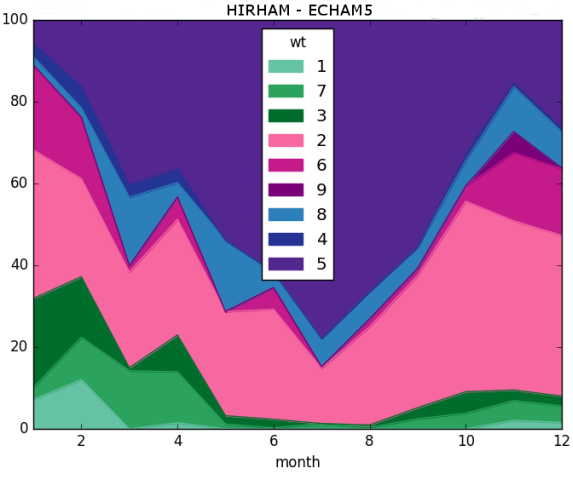

ERAINT - REMO
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

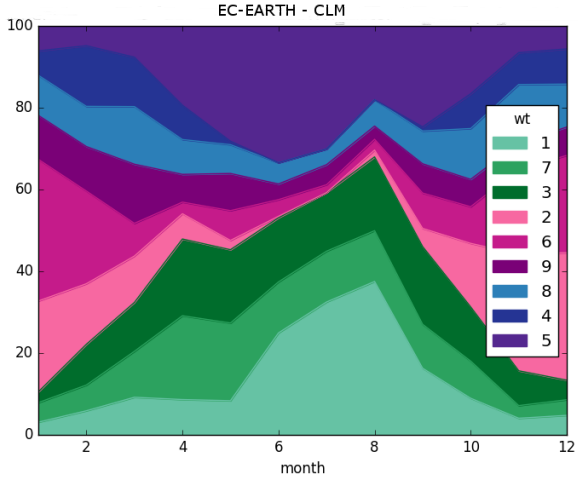

ERAINT - RCA
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

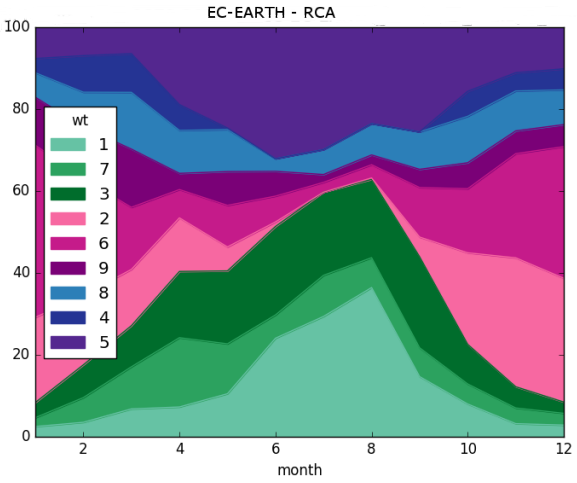

CNRM - CLM
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

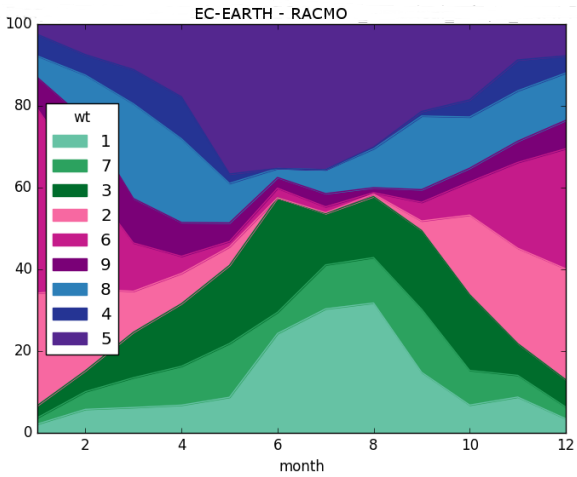

CNRM - RCA4
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

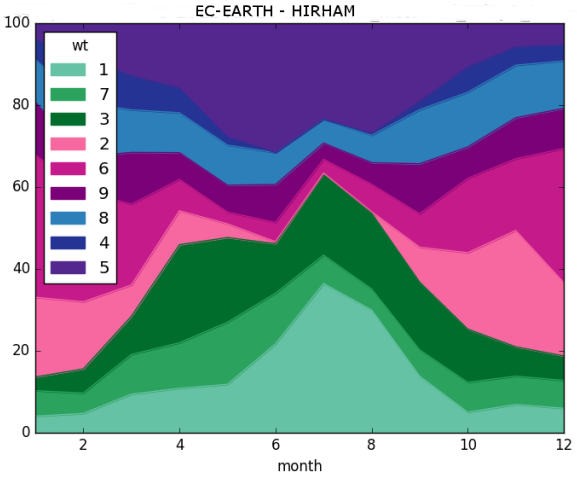

HIRHAM - ARPEGE
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

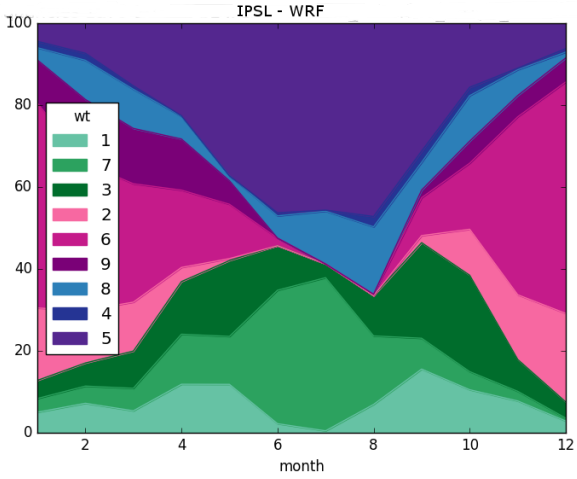

HIRHAM - ECHAM5
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

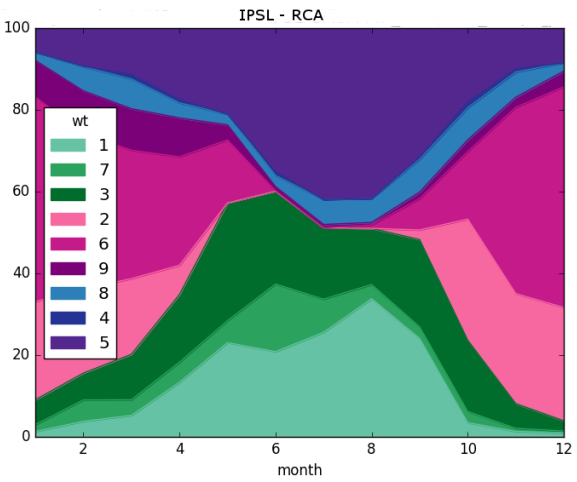

EC-EARTH - CLM
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

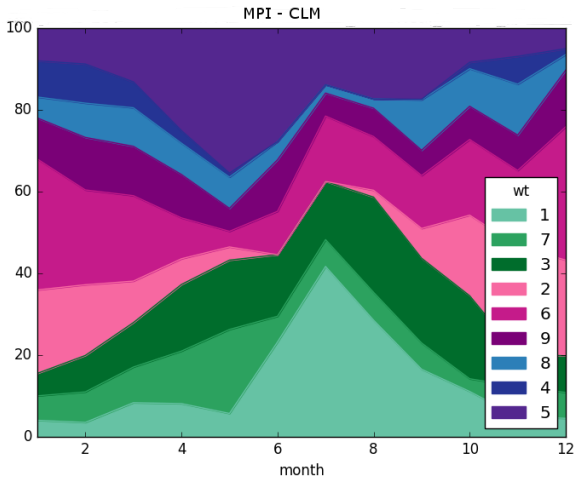

EC-EARTH - RCA
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

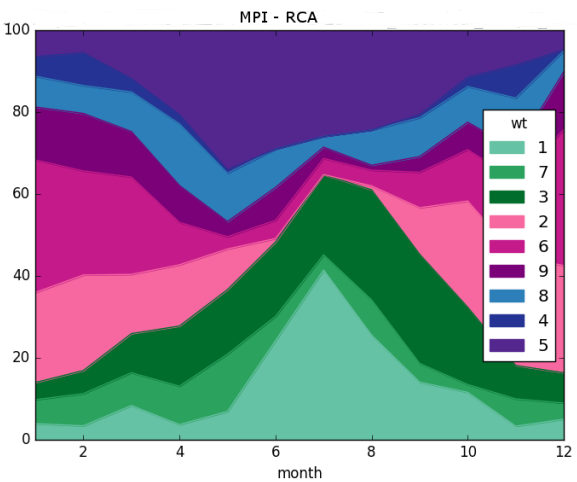

EC-EARTH - RACMO
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

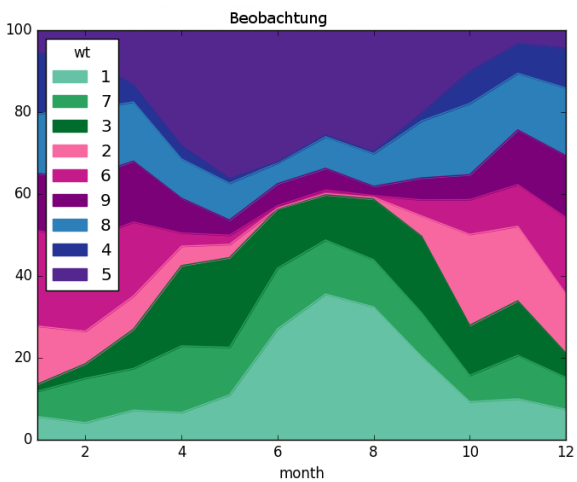

EC-EARTH - HIRHAM
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month


IPSL - WRF
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month


IPSL - RCA
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month


MPI - CLM
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month


MPI - RCA
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

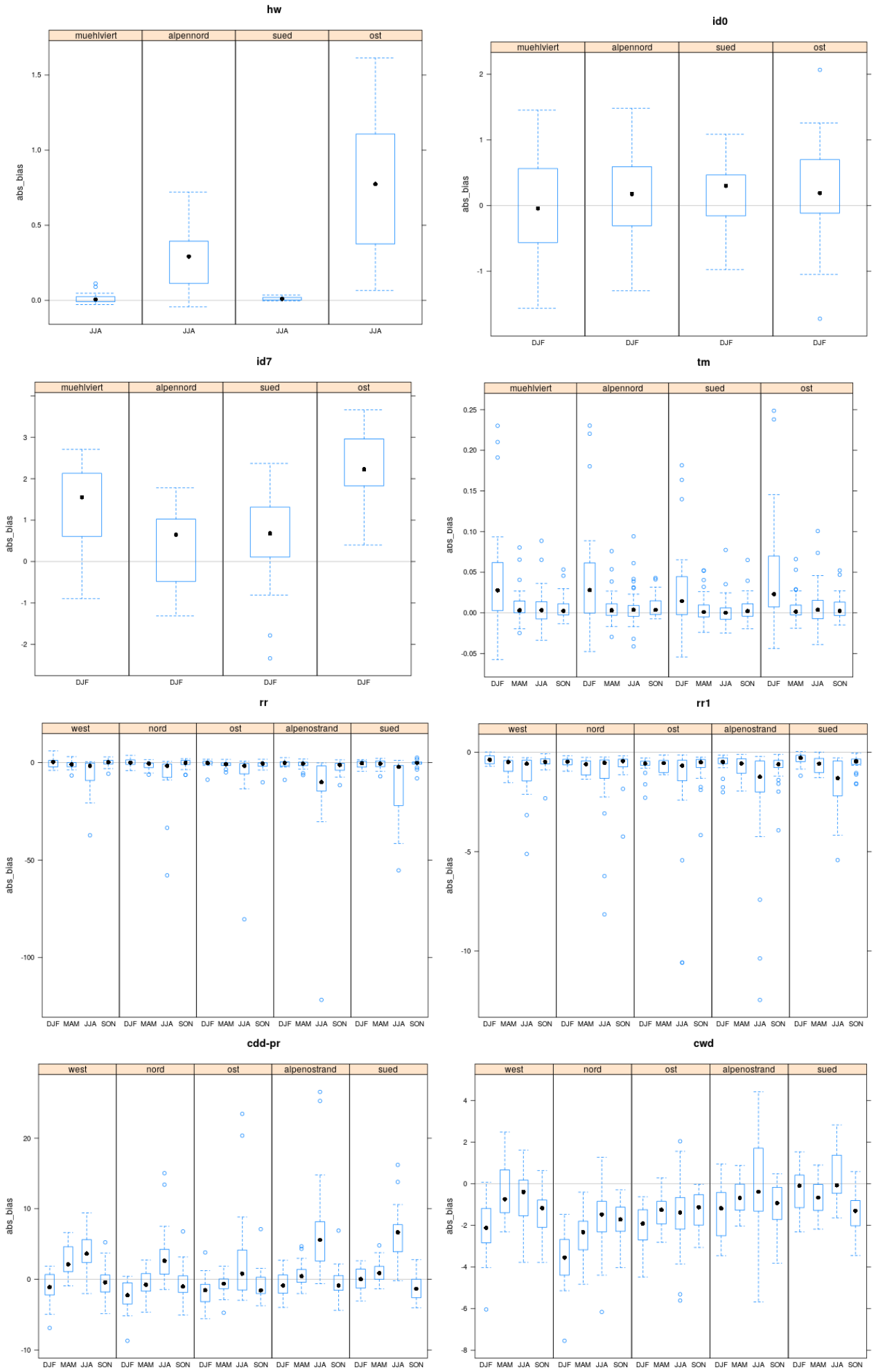

Beobachtung
wt
1
7
3
2
6
9
8
4
5
month

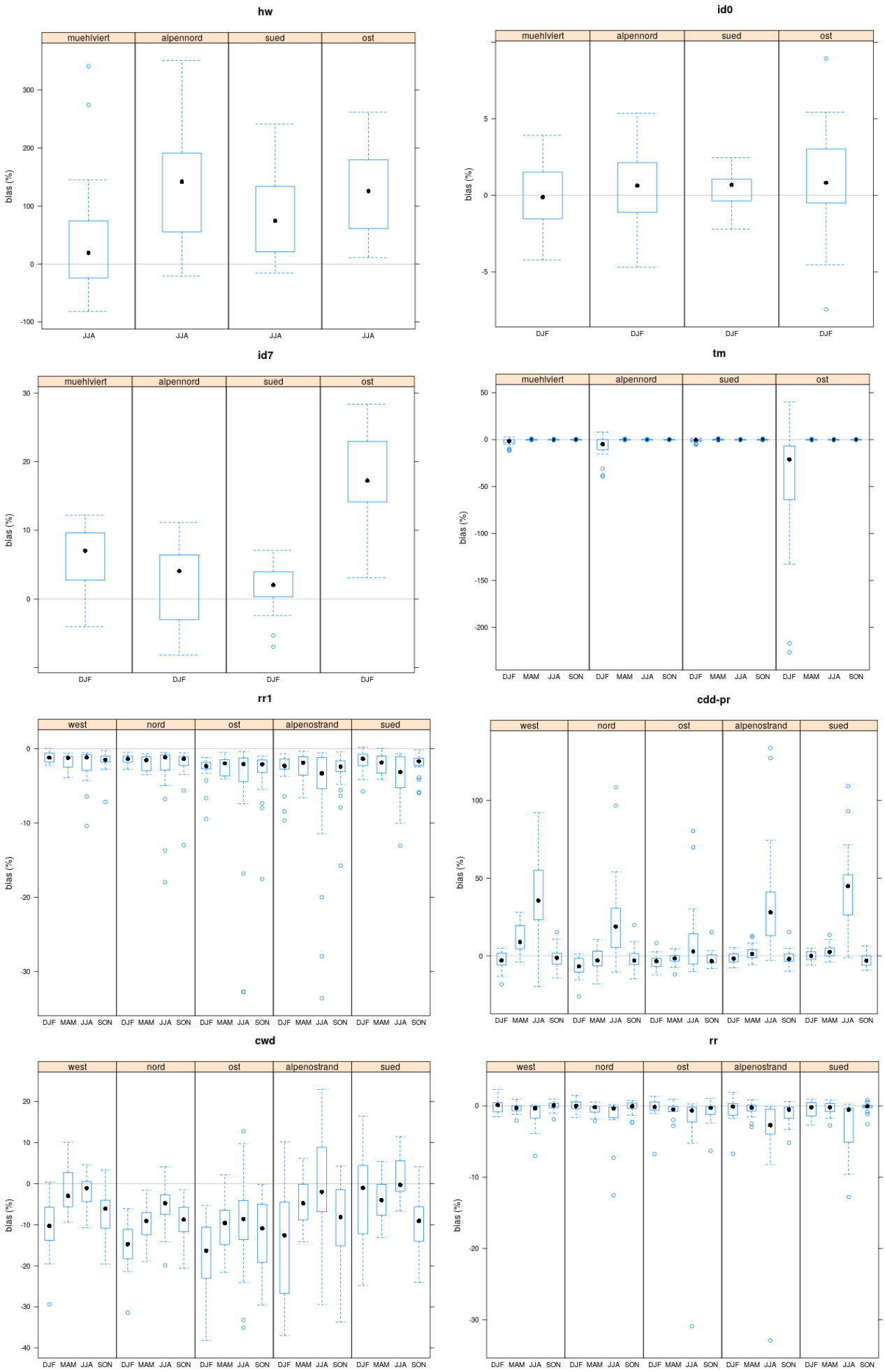
### Ad: Wie gut werden die hergeleiteten Indizes der ÖKS15-Simulationen dargestellt?

Im Folgenden sind die Verteilungen des Bias in den unterschiedlichen Modellen für diverse Klimaindizes dargestellt. Zum einen als absolute Bias zum anderen als relative Bias. Bei einem relativen Bias ist zu beachten, dass sich schon kleine Abweichungen bei kleinen absoluten Werten als großer Bias darstellen können. Trotzdem werden relative Abweichungen gerne im Zusammenhang mit dem Niederschlag verwendet.

| Index kurz | Index lang | Beschreibung |
|---|---|---|
| **hw** | Anzahl der Hitzeepisoden | Anzahl von mindestens 3 Tage andauernden durchgängigen Episoden, in der das Tagesminimum über 18 °C und das Tagesmaximum über 30 °C liegt |
| **cw** | Anzahl von Kälteepisoden | Anzahl von zumindest 5 Tage andauernden durchgängigen Episoden, in der das Tagesmaximum unter 0 °C bleibt |
| **tr20** | Tropennächte | Tage mit einem Tagesminimum über 20 °C |
| **tm** | Mitteltemperatur | Mittlere Tagestemperatur |
| **id0** | Eistage | Tage, an denen das Tagesmaximum und daher auch das Tagesminimum unter 0 °C liegen |
| **id7** | Extreme Eistage | Tage, an denen das Tagesminimum unter -7 °C und das Tagesmaximum unter 0 °C liegt |
| **cdd** | Anzahl der Trockenepisoden | Anzahl von mindestens 3-tägigen Zeiträumen, in denen täglich weniger als 1 mm Niederschlag fällt |
| **cwd** | Anzahl der Niederschlagsepisoden | Anzahl von mindestens 3-tägigen Zeiträumen, in denen täglich mehr als 1 mm Niederschlag fällt |
| **rr** | Niederschlagsmenge | Mittlere tägliche Niederschlagsmenge |
| **rr1** | Niederschlagstage | Anzahl der Tage/Jahr, an denen die Niederschlagssumme mindestens 1 mm erreicht |
| **rx5day** | Maximale fünftägige Niederschlagsmenge | Größte Niederschlagssumme über einen zusammenhängenden Zeitraum von fünf Tagen |

## Absoluter Bias



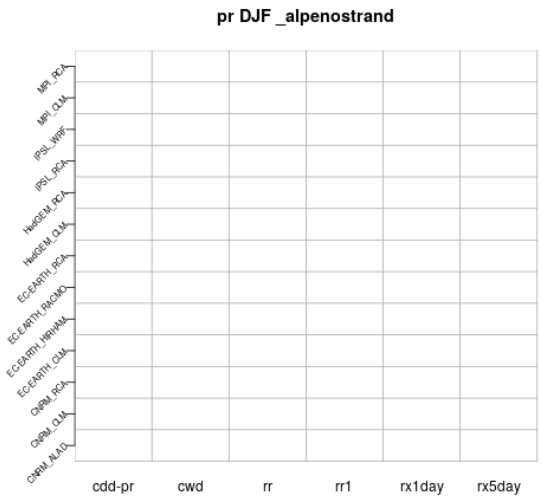

hw
muehlviert
alpennord
sued
ost
bias (%)
JJA
id0
DJF
id7
tm
DJF MAM JJA SON
rr1
west
nord
alpenostrand
cdd-pr
cwd
rr

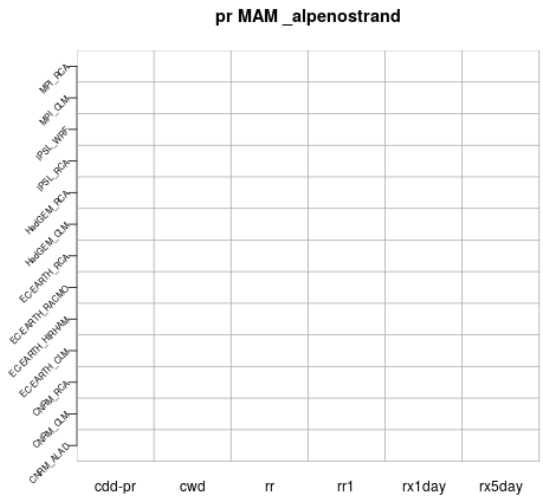
### Ad: Wie gut werden die hergeleiteten Indizes der ÖKS15 Simulationen dargestellt? (nach Regionen)

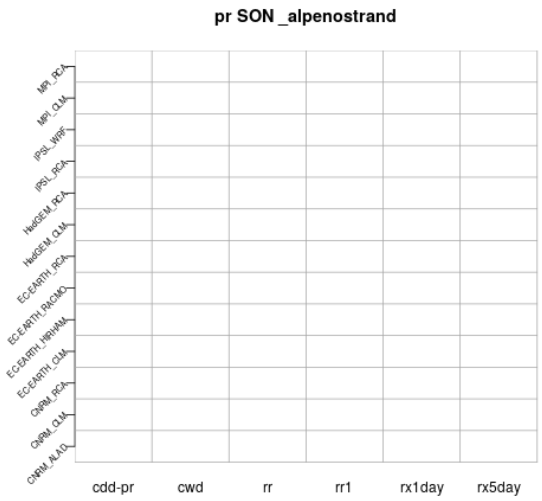
In den folgenden Graphiken sind diejenigen Kombinationen aus Index, Modell und Region rot markiert, bei denen ein Fehler von +-20 % oder mehr auftritt. Die Modelle sind von oben nach unten in der folgenden Reihenfolge dargestellt:

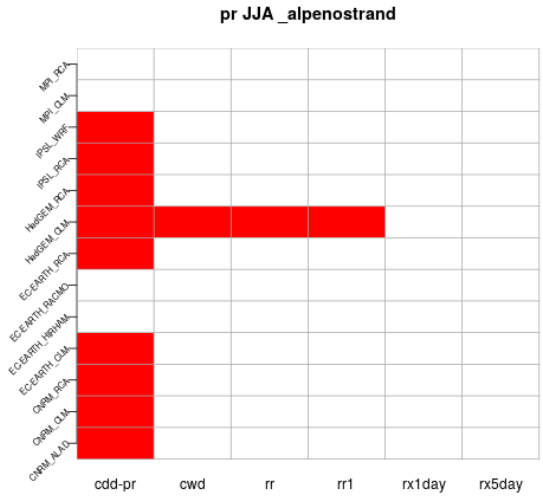
MPI - RCA
MPI - CLM
IPSL - RCA
HadGEM - RCA
HadGEM - CLM
EC-EARTH - RCA
EC-EARTH - RACMO
EC-EARTH - HIRHAM
EC-EARTH - CLM
CNRM – CLM

In der Überschrift der Graphiken ist mit tas bzw. pr gekennzeichnet, ob es sich um Temperatur- oder niederschlagsbasierte Indizes handelt. Die Jahreszeiten sind mit DJF (Winter), MAM (Frühling), JJA (Sommer), SON (Herbst) benannt und der letzte Teil der Überschrift beschreibt das Gebiet, für das diese Graphik gilt.

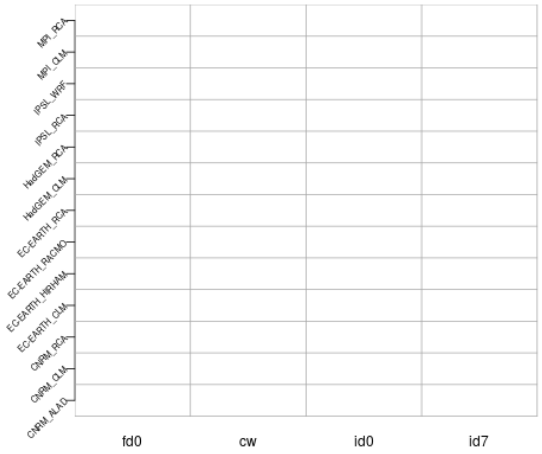


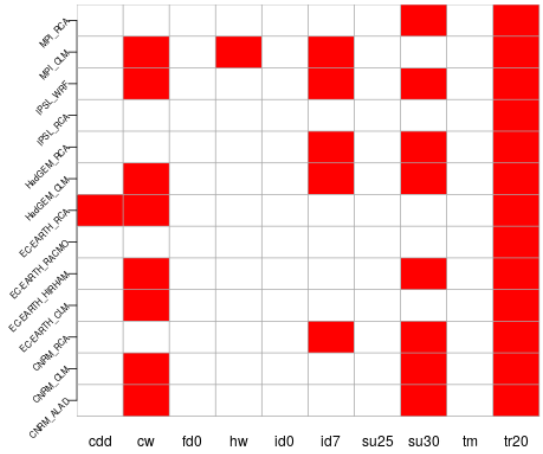



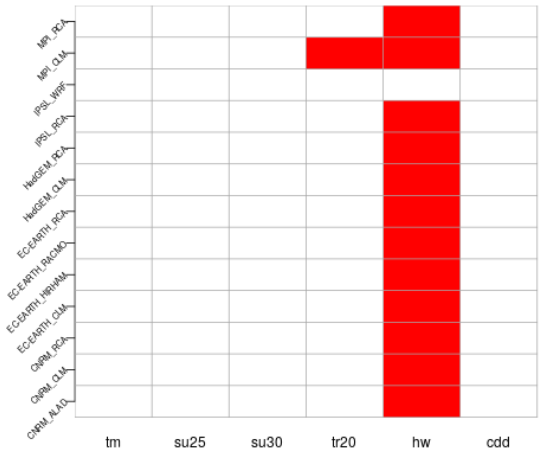
tas DJF _alpennord



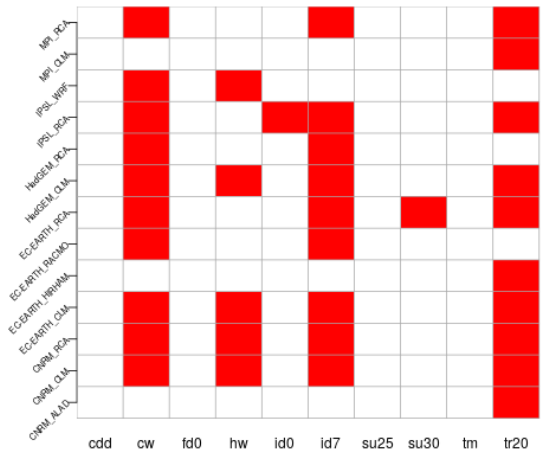

tas MAM _alpennord



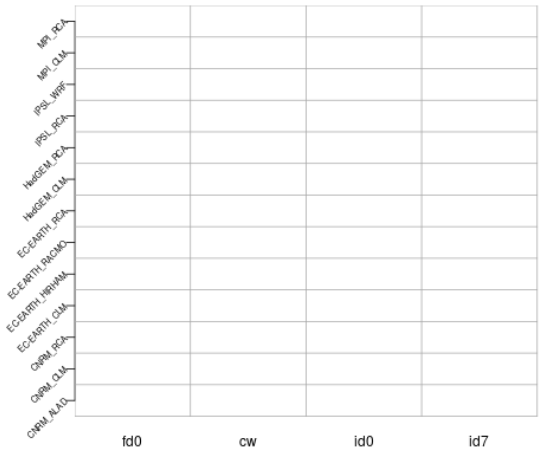

tas JJA _alpennord



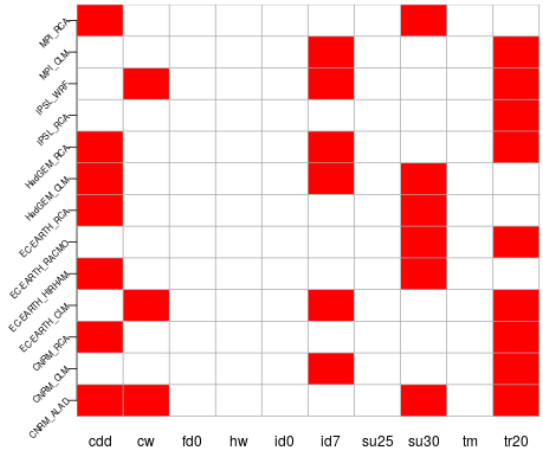

tas SON _alpennord



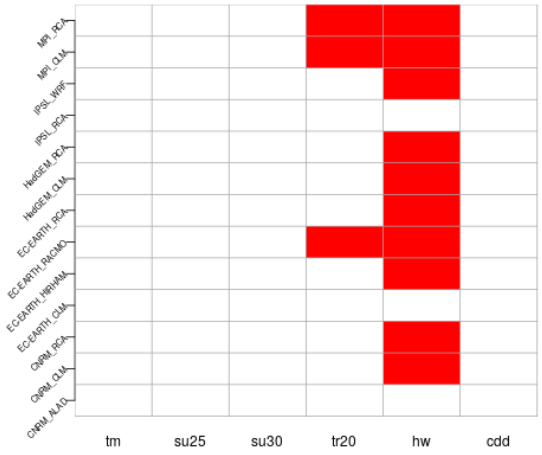

tas DJF _muehlviert



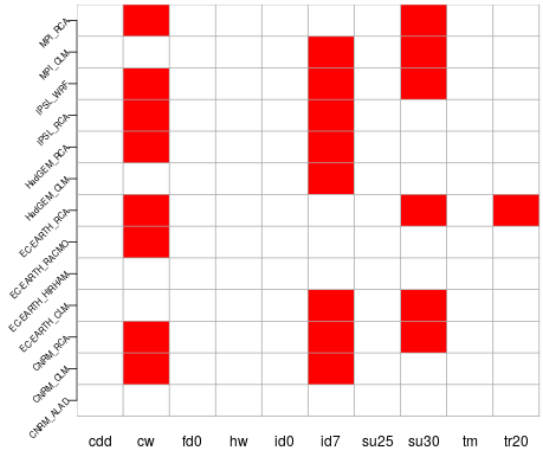

tas MAM _muehlviert



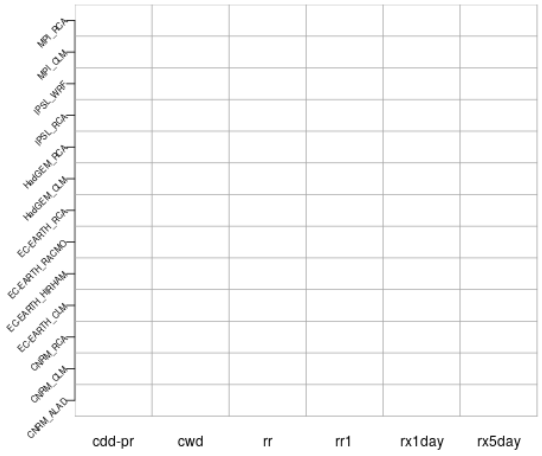

tas JJA _muehlviert



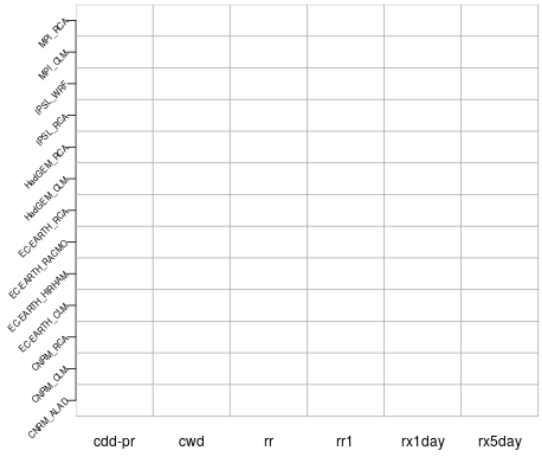

tas SON _muehlviert



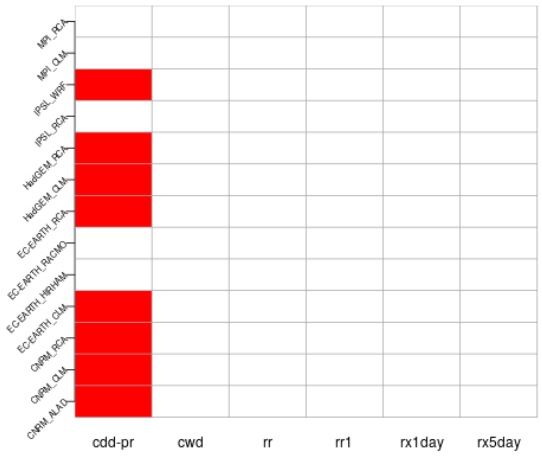
pr DJF _nord



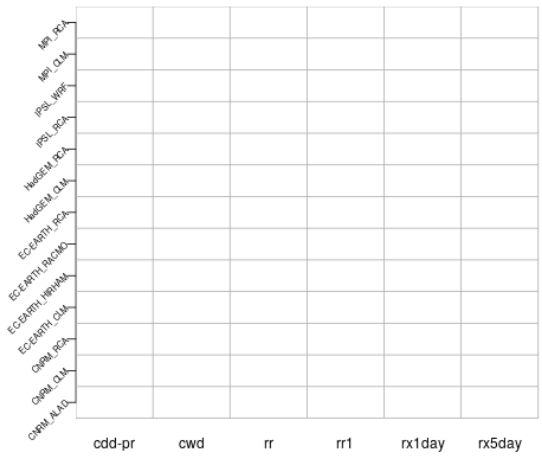

pr MAM _nord



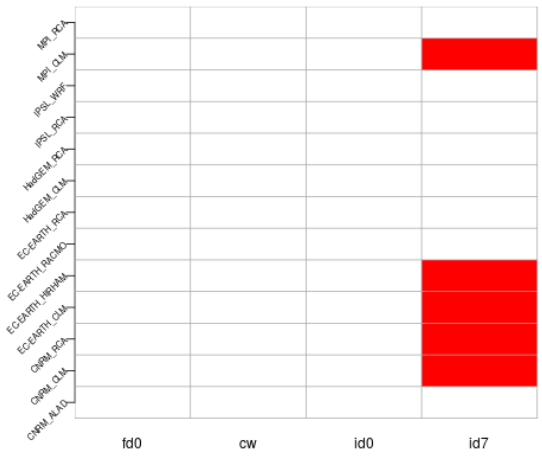

pr JJA _nord



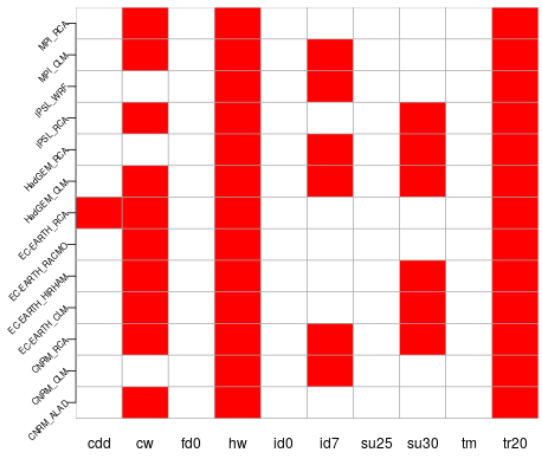

pr SON _nord



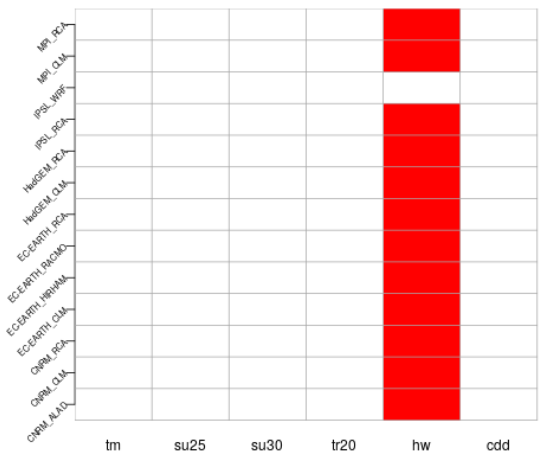

tas DJF _ost



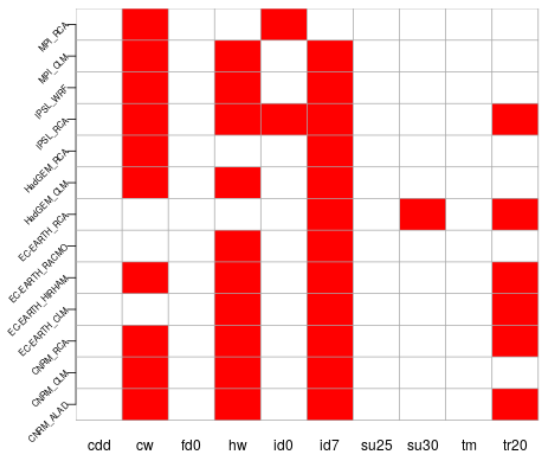

tas MAM _ost



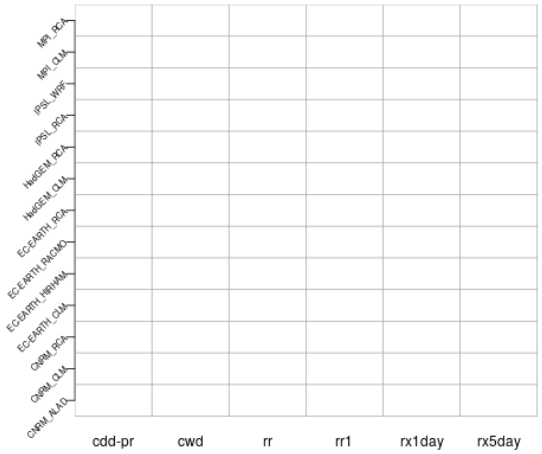

tas JJA _ost



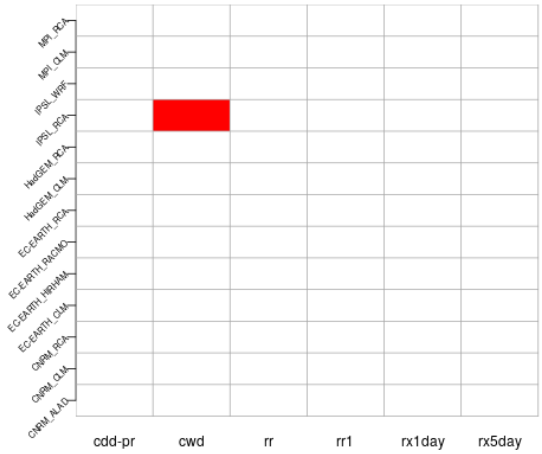

tas SON _ost



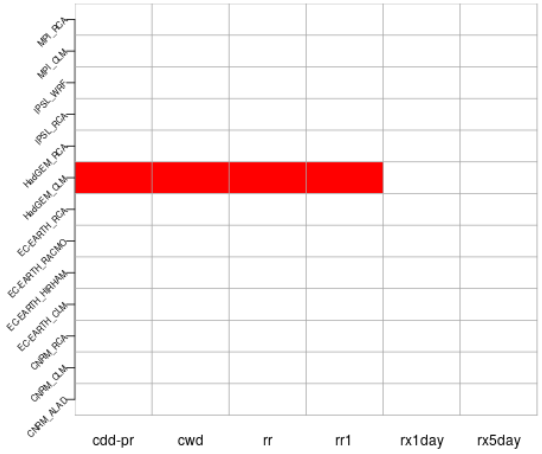
pr DJF _ost



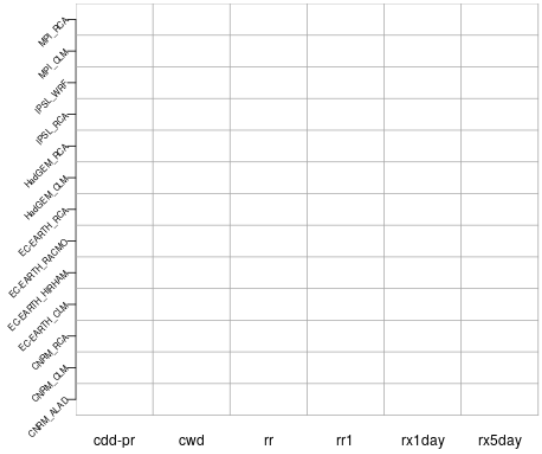

pr MAM _ost



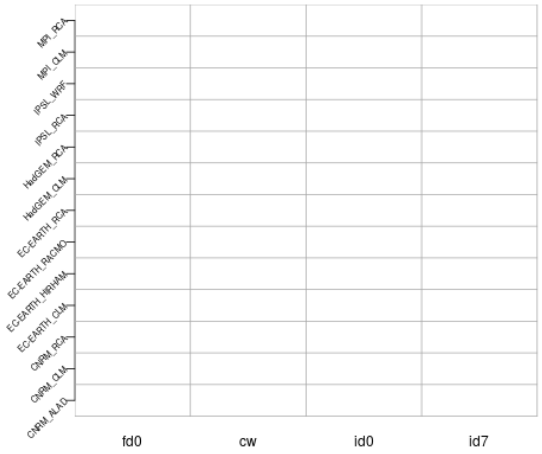

pr JJA _ost



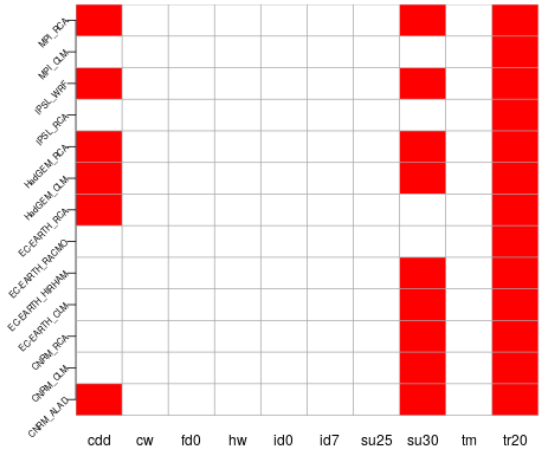

pr SON _ost



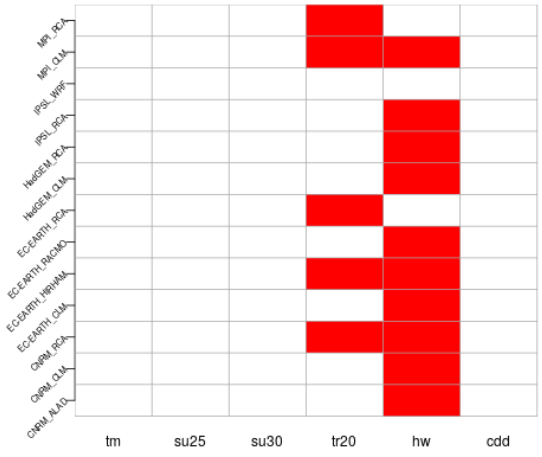

tas DJF _sued



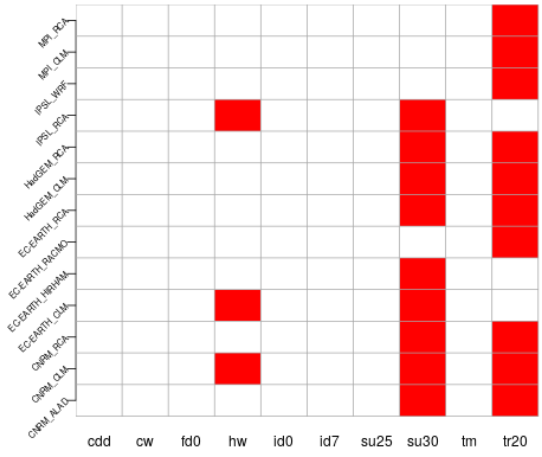

tas MAM _sued



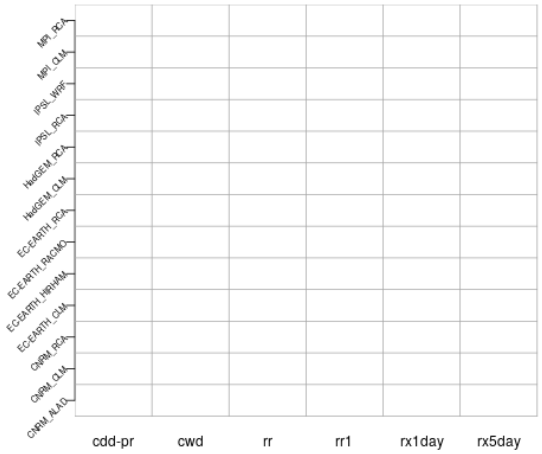

tas JJA _sued



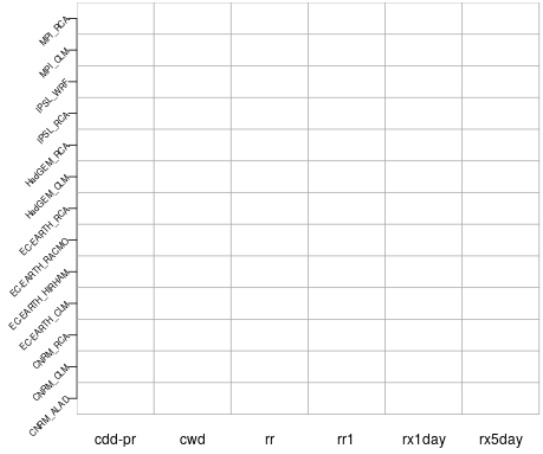

tas SON _sued



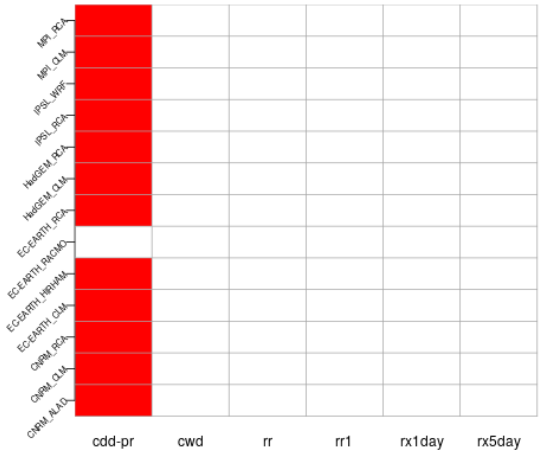
pr DJF _sued



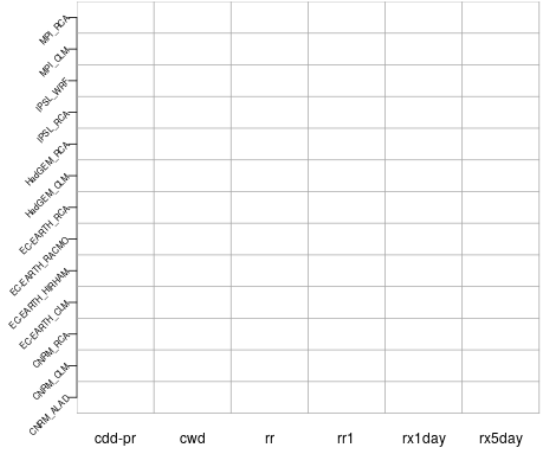

pr MAM _sued



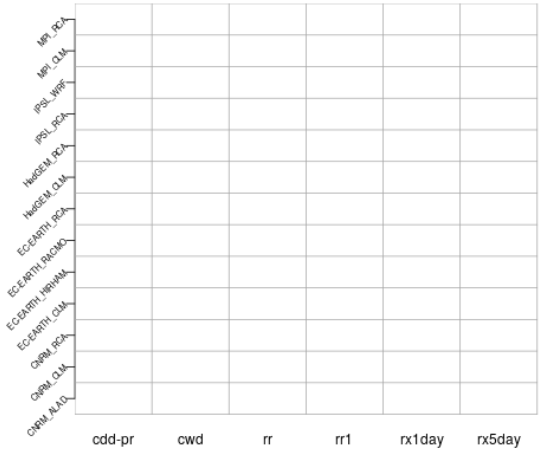

pr JJA _sued



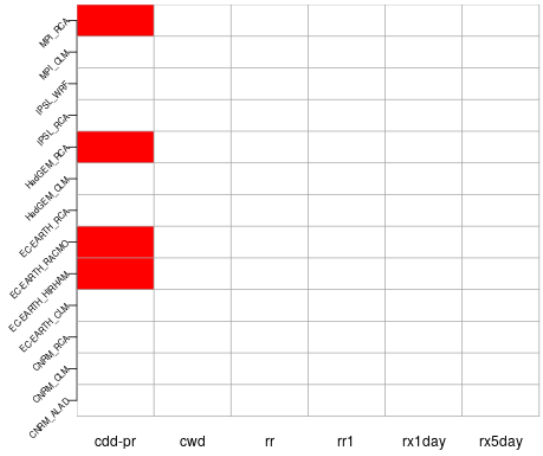

pr SON _sued



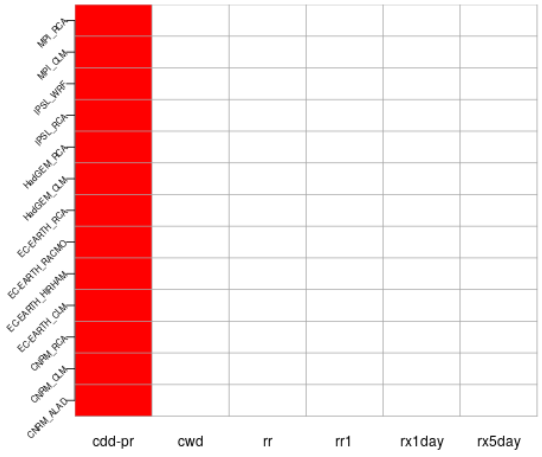

pr DJF _west



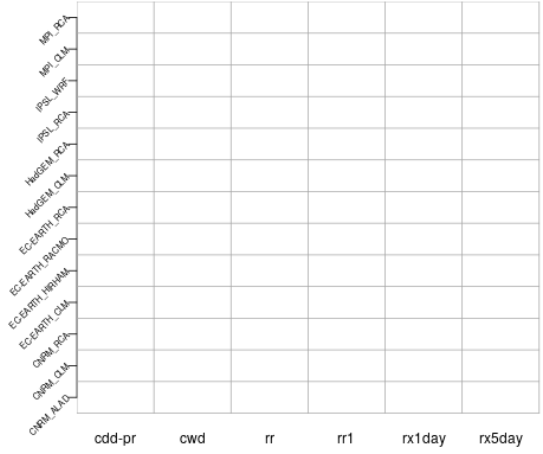

pr MAM _west




pr JJA _west

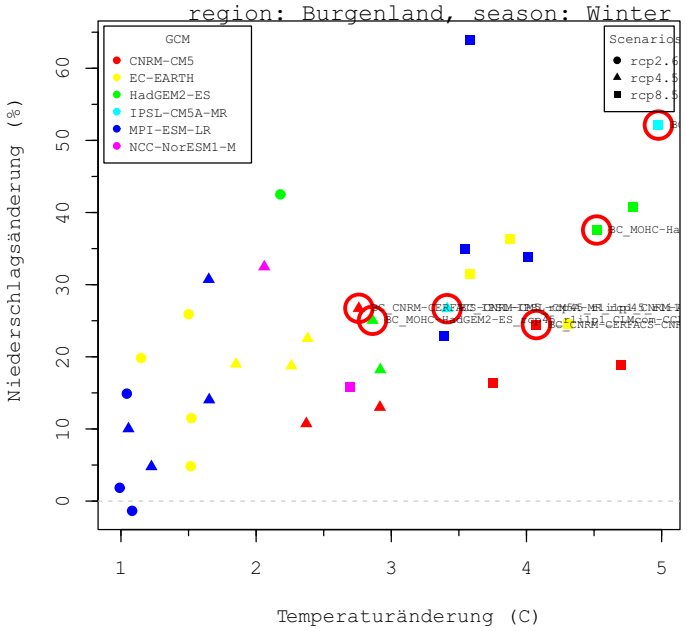


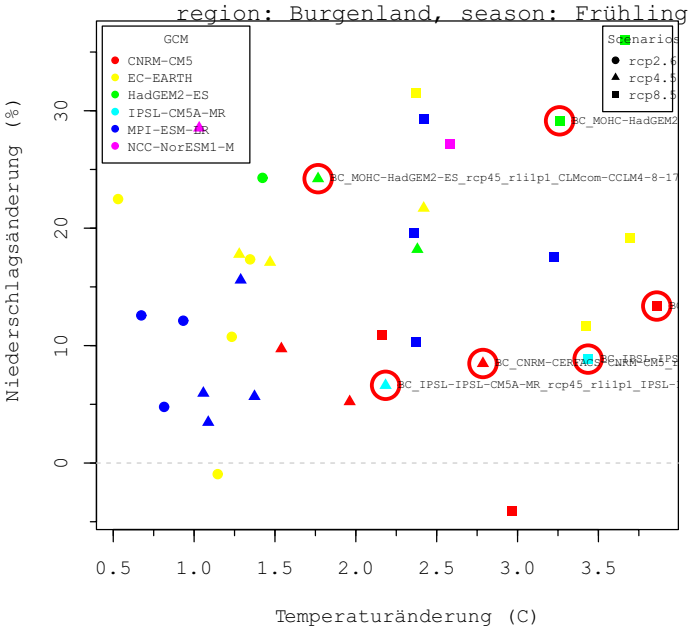

pr SON _west

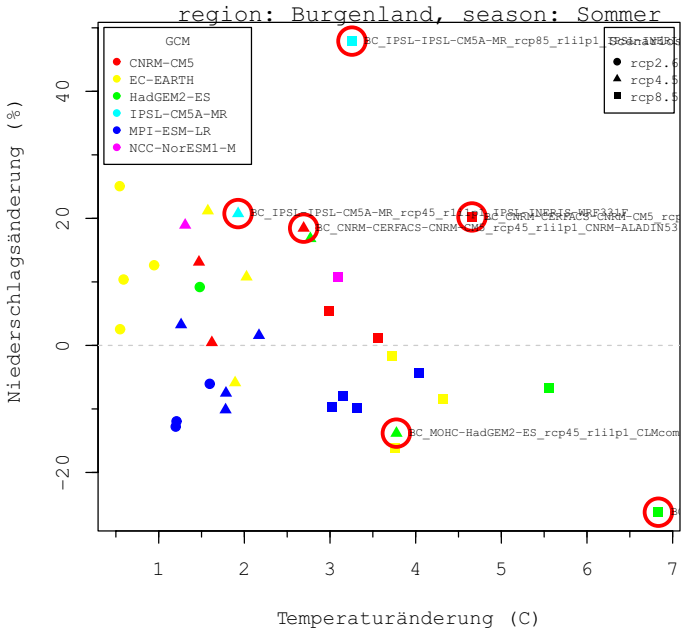


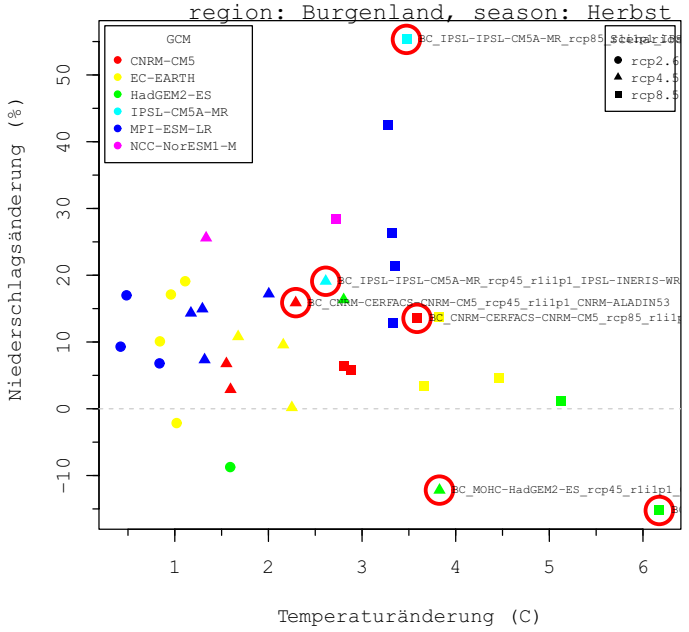
## Ad: Welche ÖKS15 Simulationen soll ich für meine Analyse verwenden?

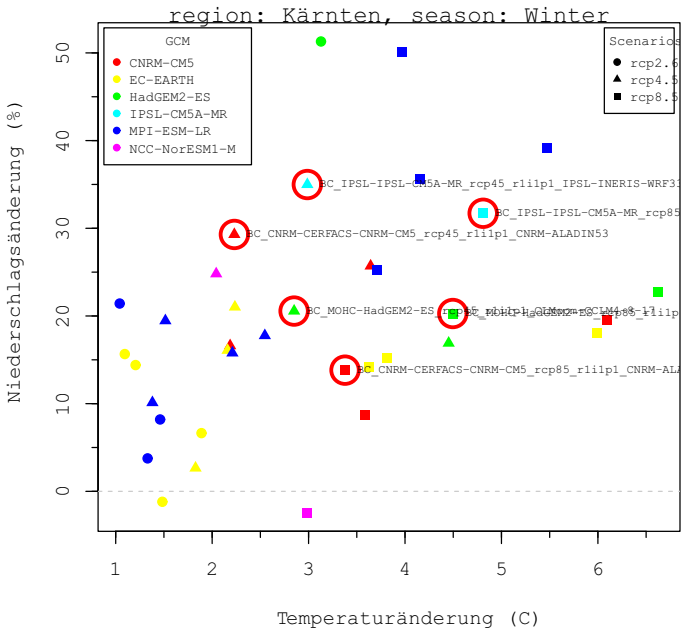
In den folgenden Graphiken werden die Klimaänderungssignale (2071-2100 zu 1971-2000) der ÖKS15 Daten in den unterschiedlichen Bundesländern und Jahreszeiten dargestellt. Jeder Punkt entspricht dem Änderungssignal eines Modelles für Temperatur und Niederschlag.

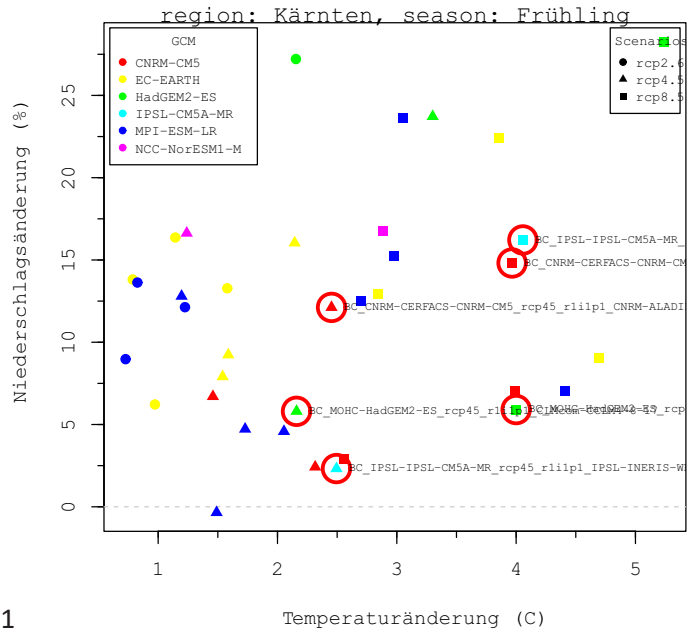


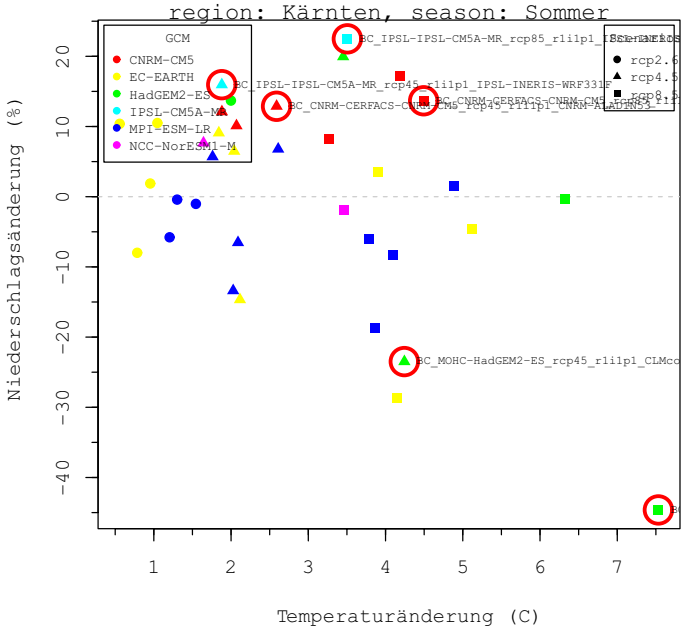



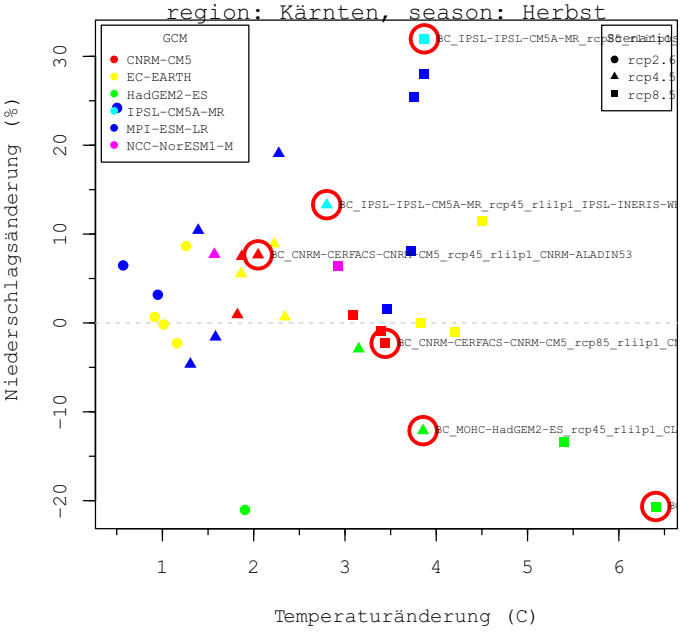



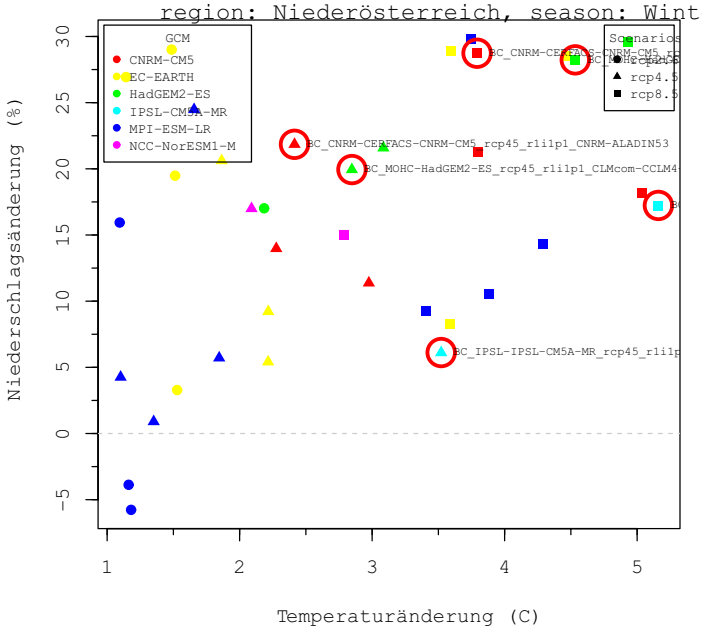
region: Kärnten, season: Sommer



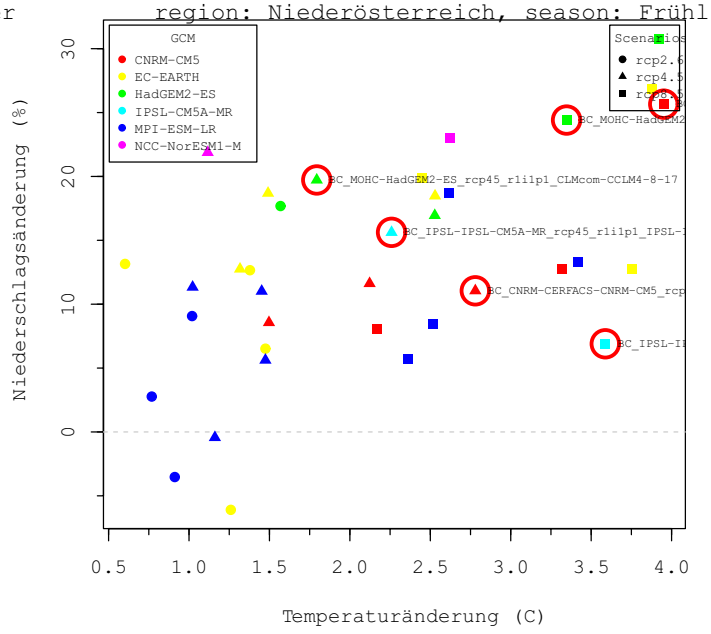

region: Kärnten, season: Herbst



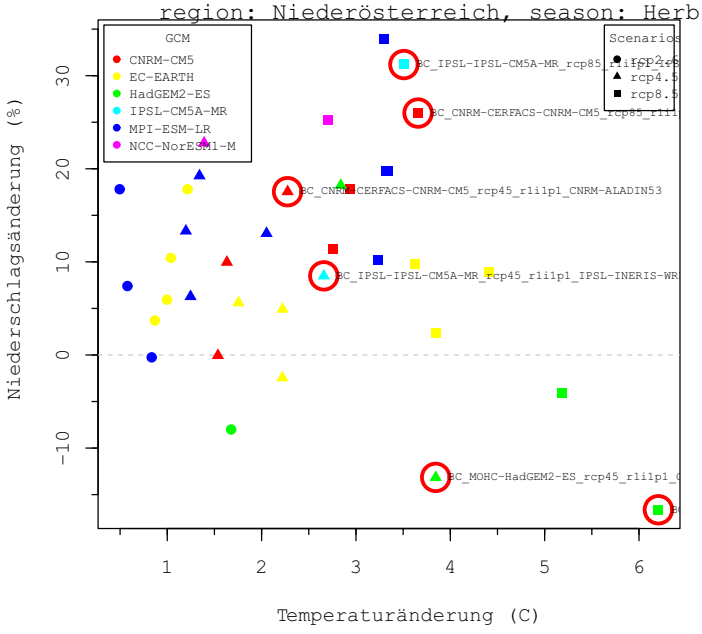

region: Niederösterreich, season: Winter



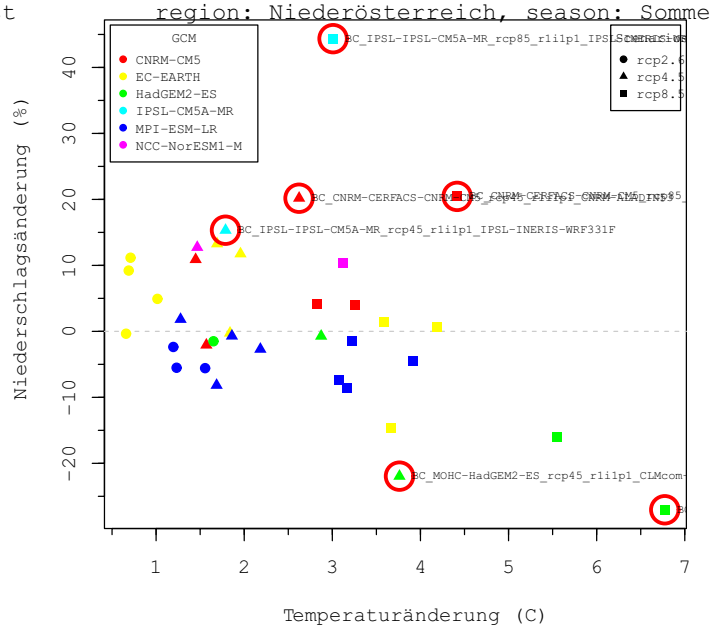

region: Niederösterreich, season: Frühlin

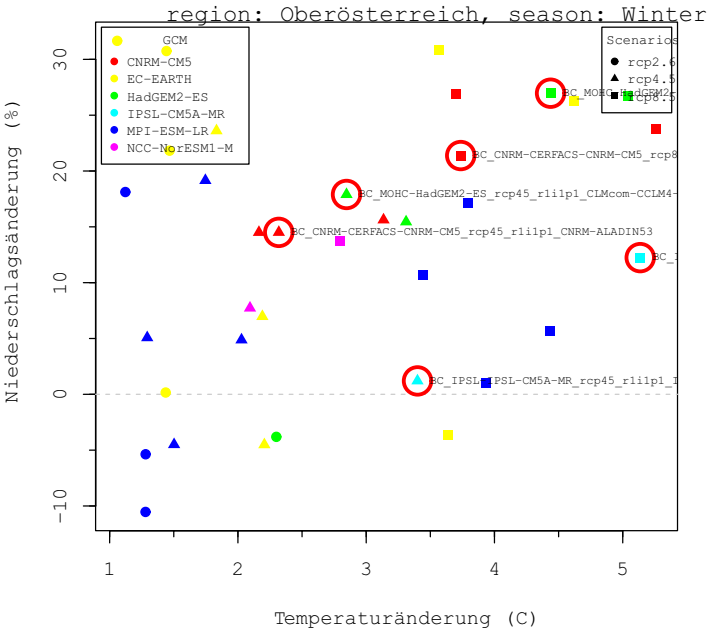


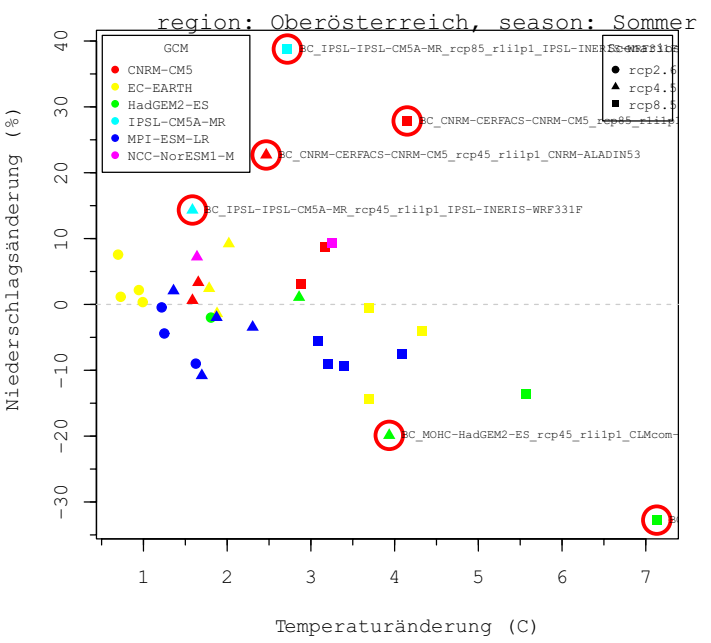

region: Niederösterreich, season: Herbst

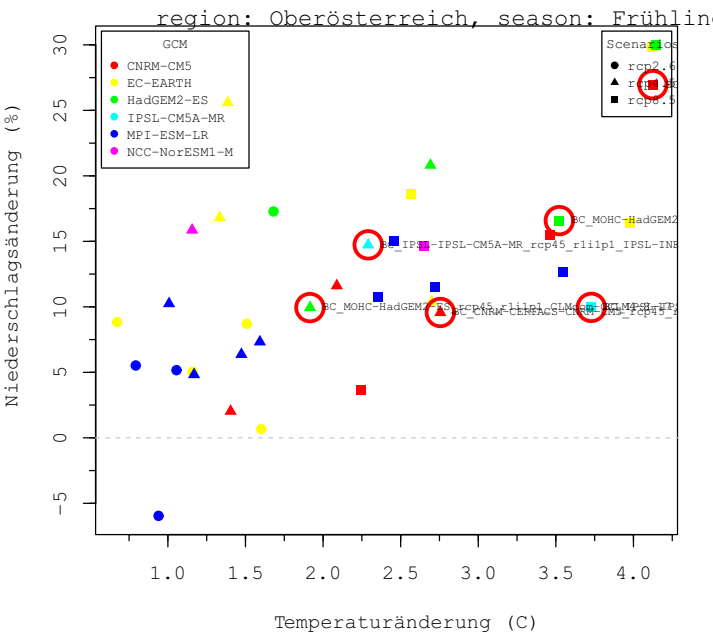


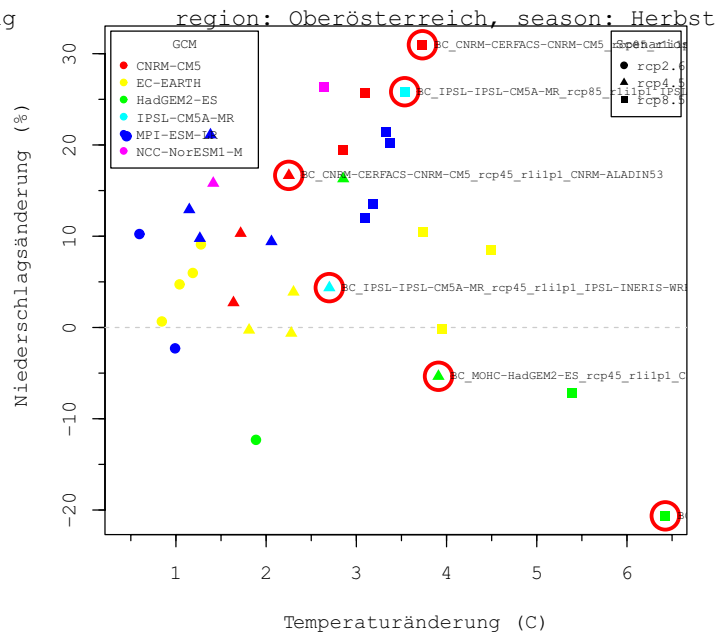

region: Niederösterreich, season: Sommer

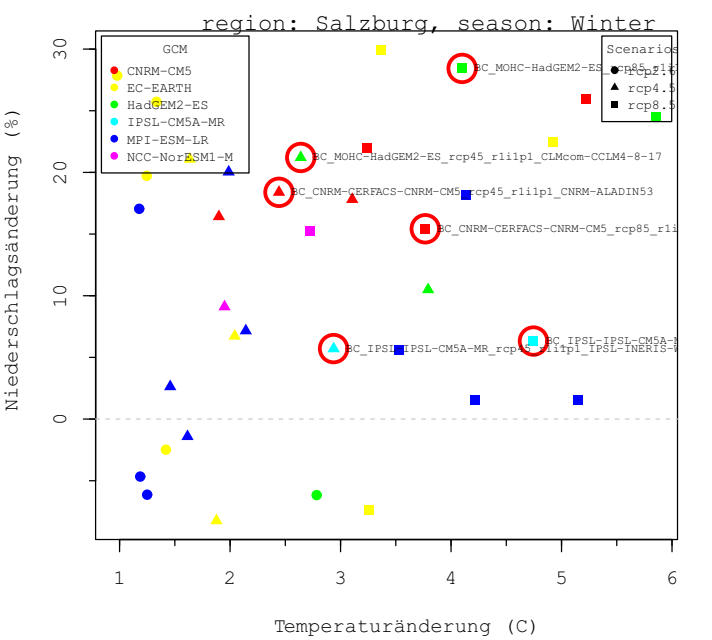


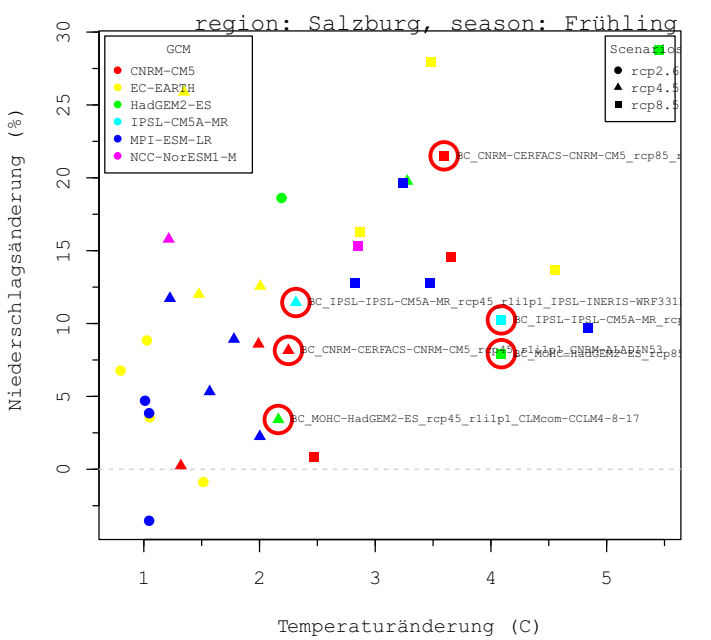

region: Oberösterreich, season: Winter
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5

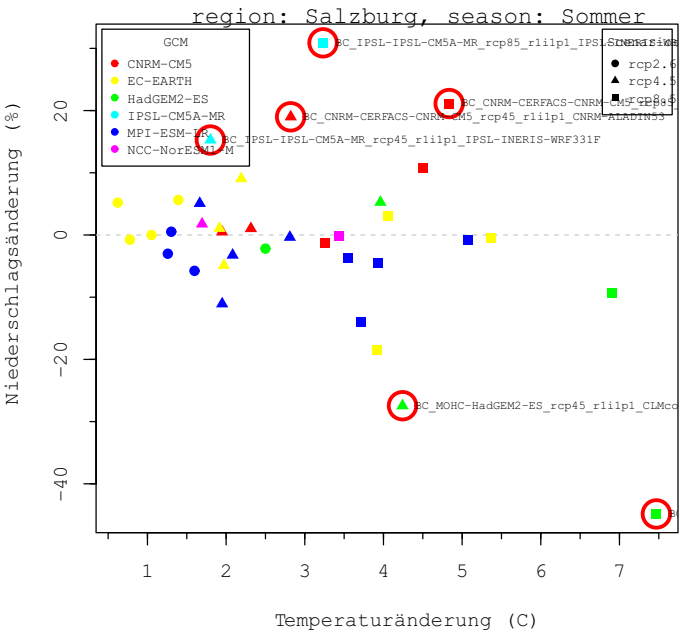

region: Oberösterreich, season: Sommer
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5

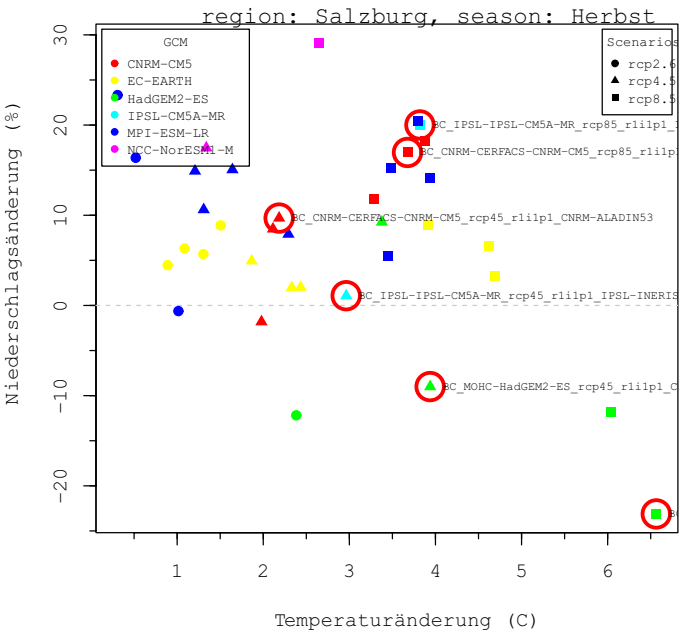

region: Oberösterreich, season: Frühling
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5

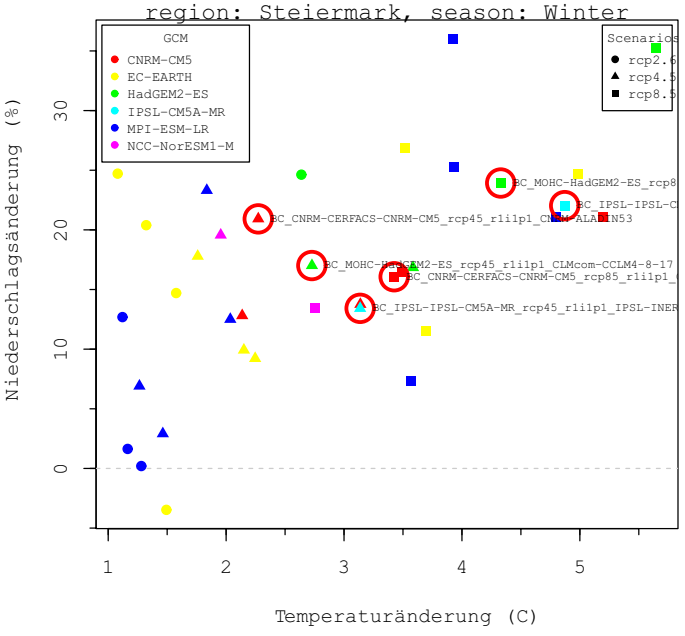

region: Oberösterreich, season: Herbst
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5

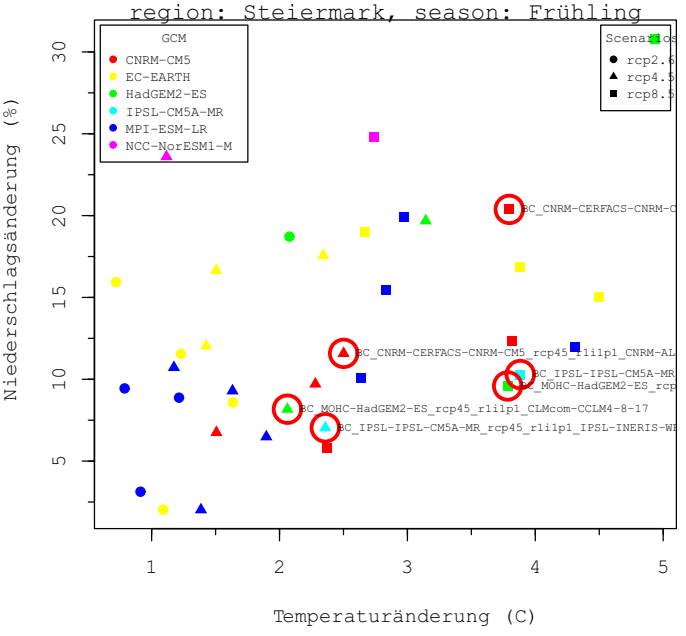

region: Salzburg, season: Winter
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5

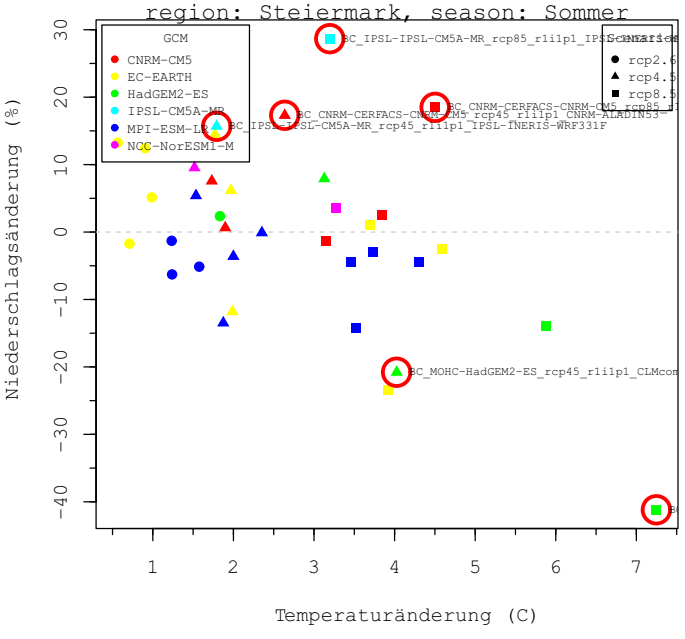

region: Salzburg, season: Frühling
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5

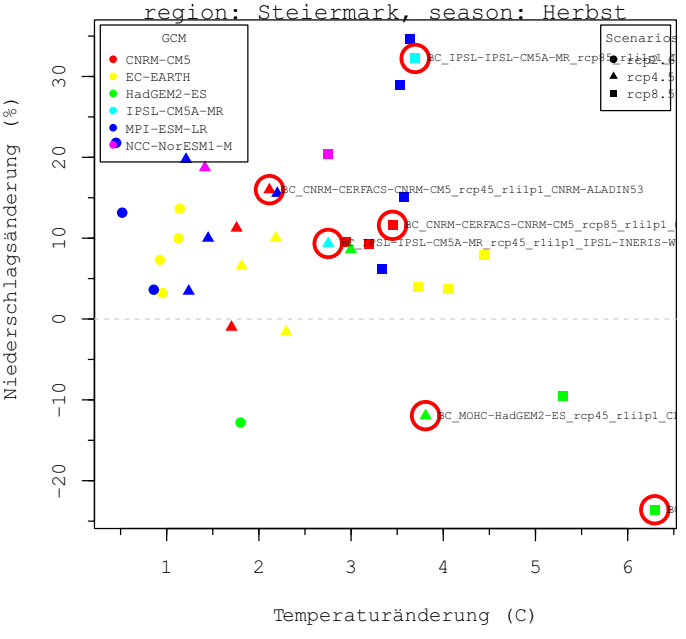

region: Salzburg, season: Sommer
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

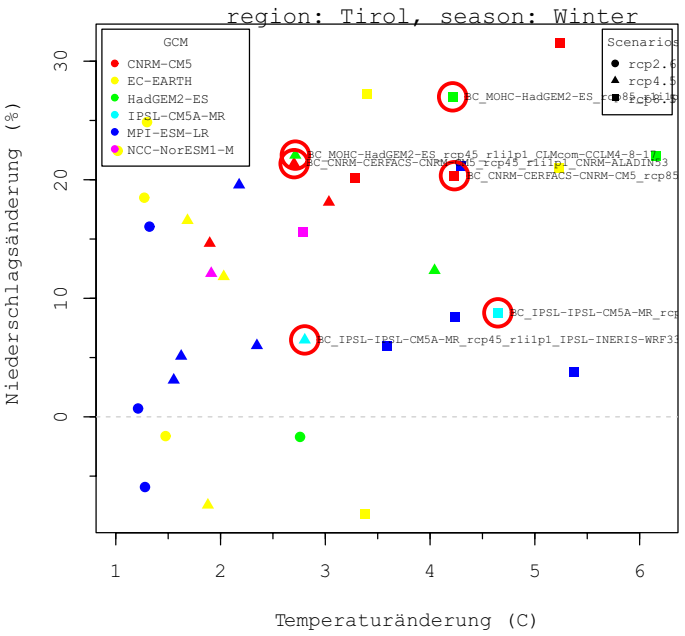

region: Salzburg, season: Herbst
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

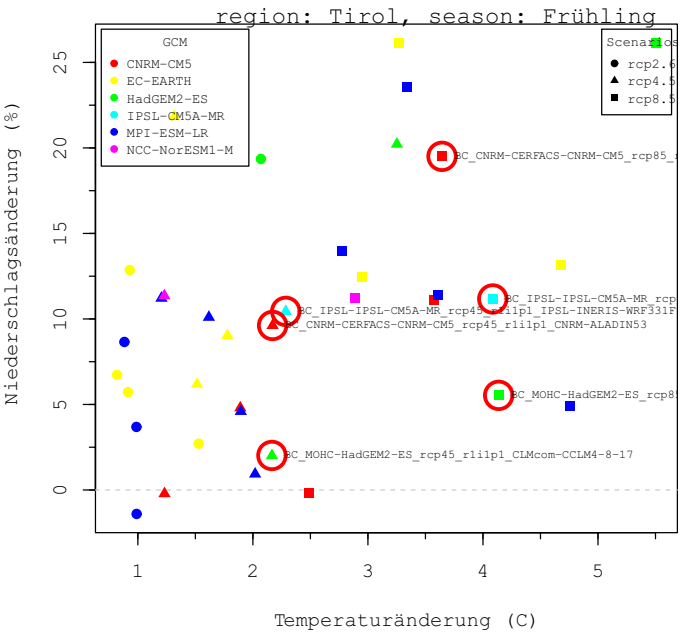

region: Steiermark, season: Winter
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

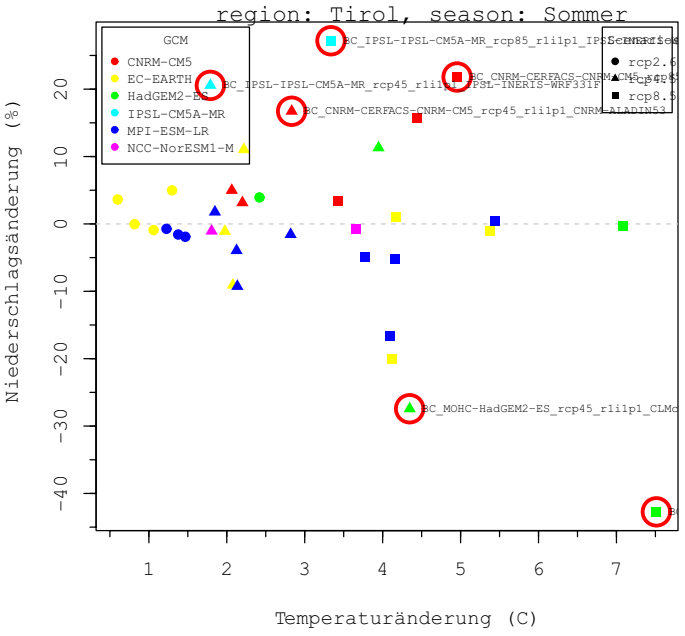

region: Steiermark, season: Frühling
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

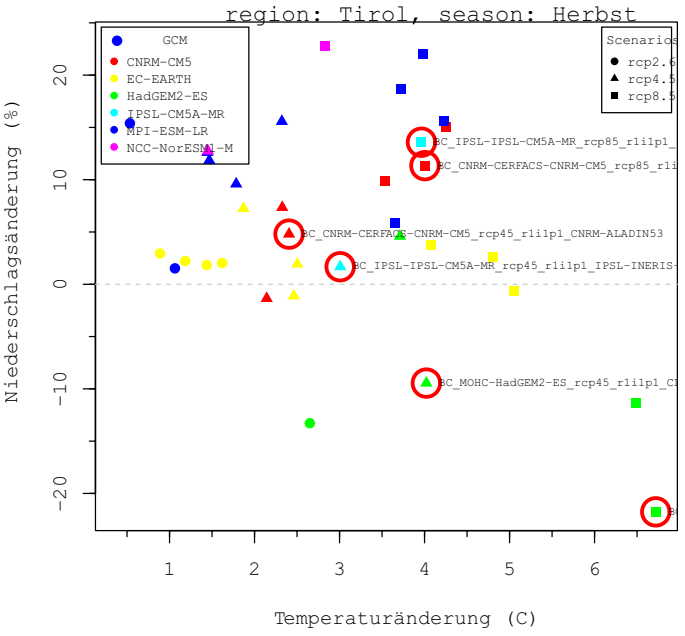

region: Steiermark, season: Sommer
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

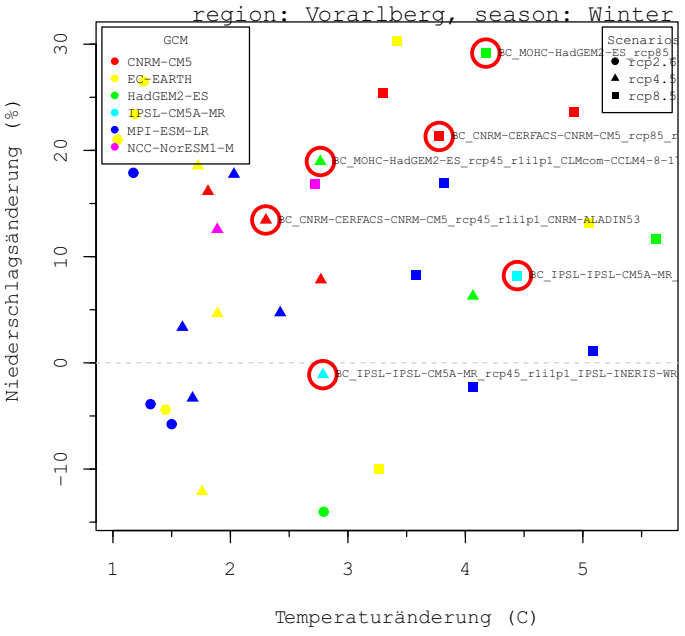

region: Steiermark, season: Herbst
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

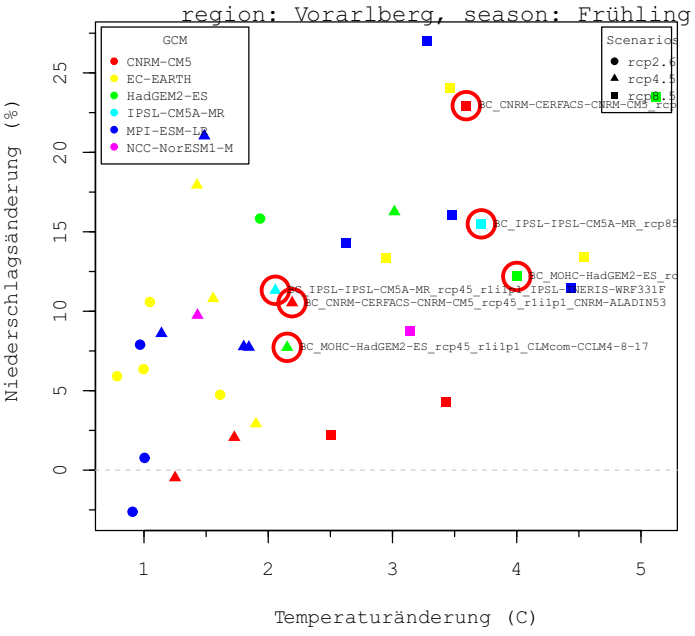

region: Tirol, season: Winter
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

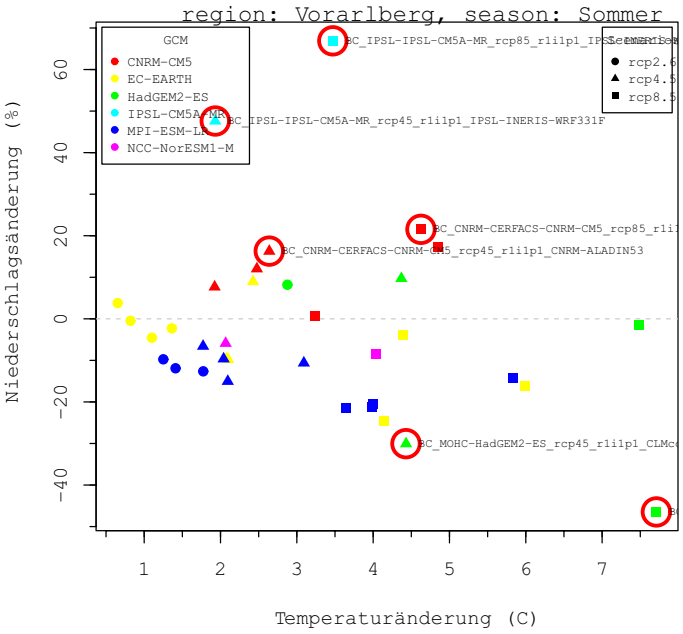

region: Tirol, season: Frühling
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

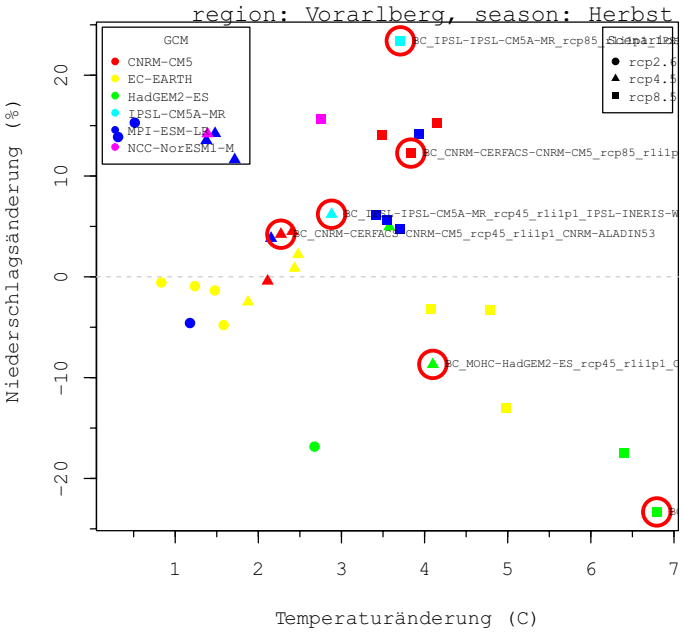

region: Tirol, season: Sommer
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

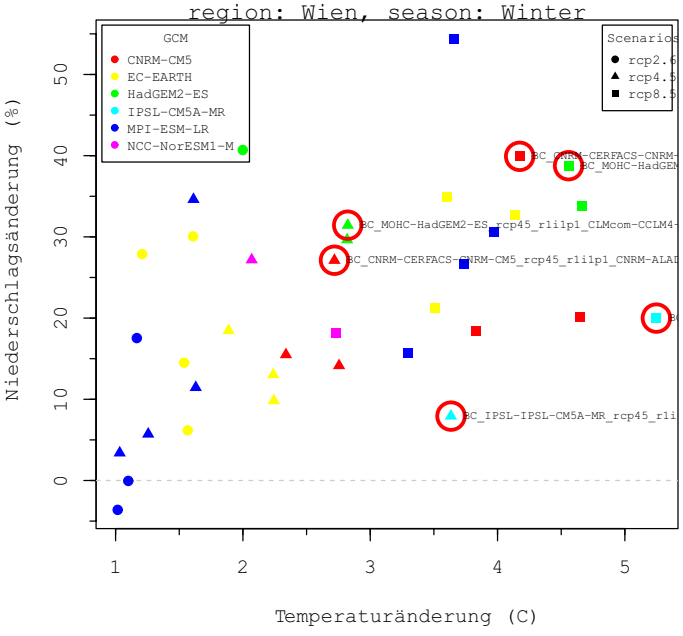

region: Tirol, season: Herbst
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

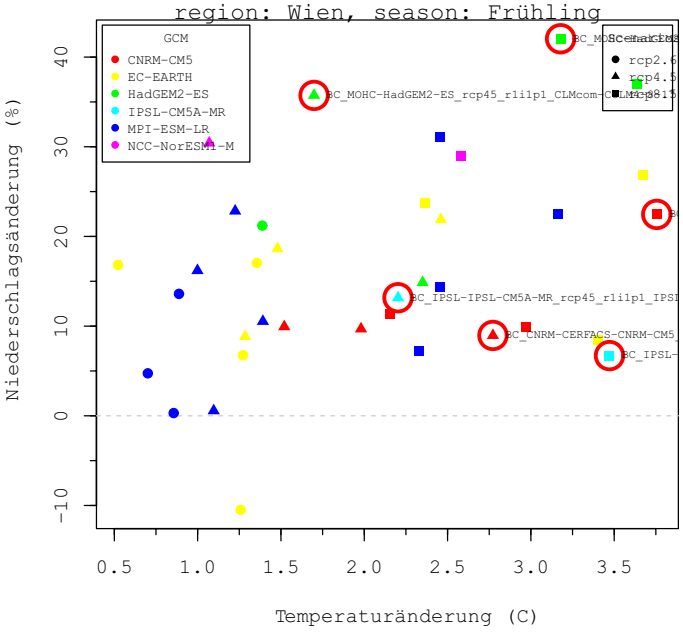

region: Vorarlberg, season: Winter
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

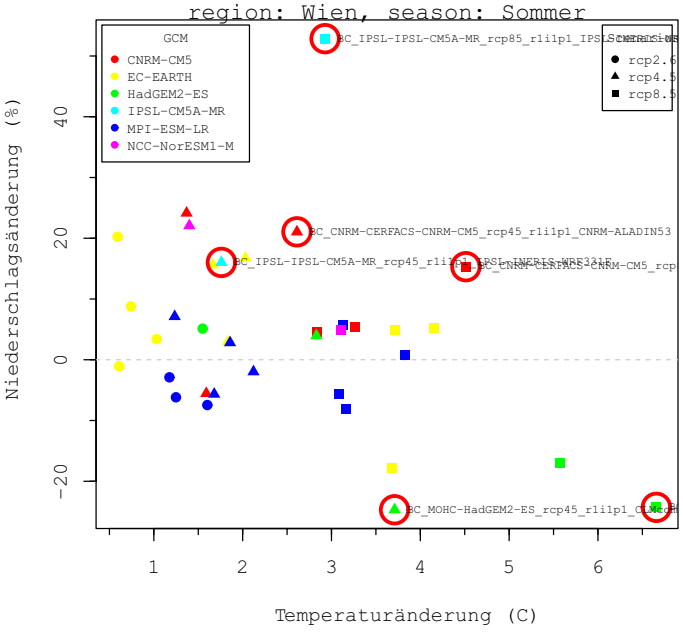

region: Vorarlberg, season: Frühling
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

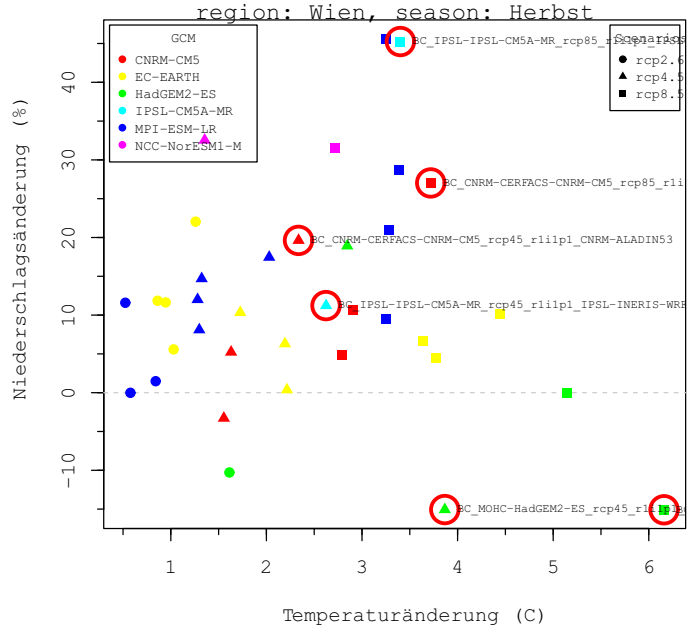

region: Vorarlberg, season: Sommer
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

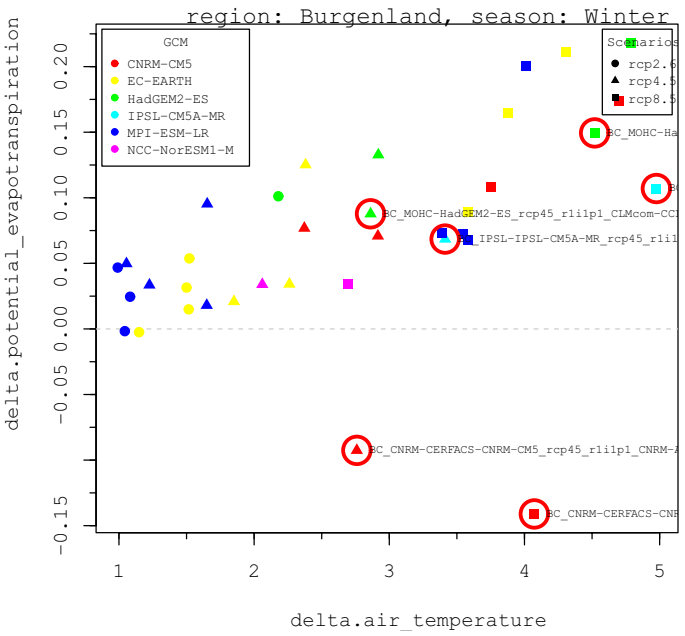

region: Vorarlberg, season: Herbst
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

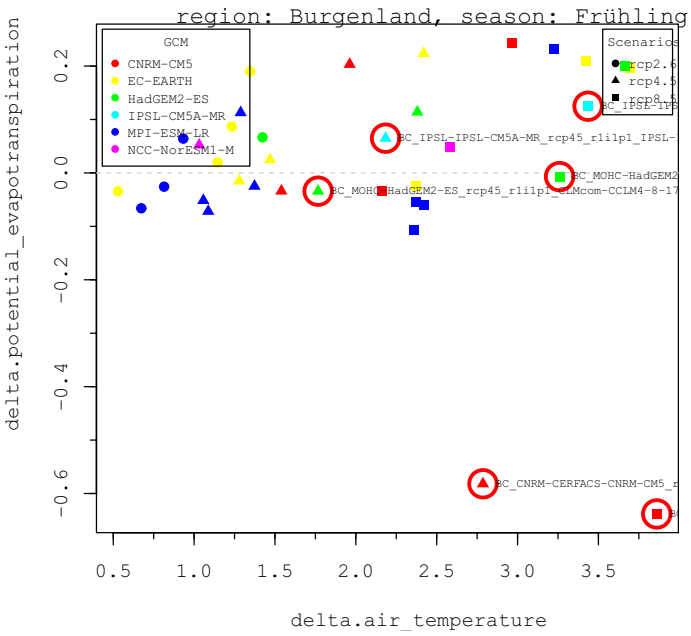

region: Wien, season: Winter
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

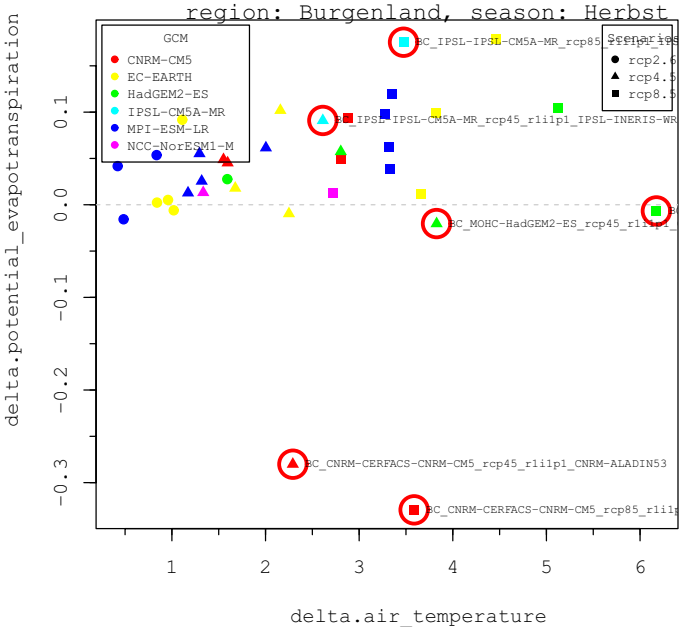

region: Wien, season: Frühling
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

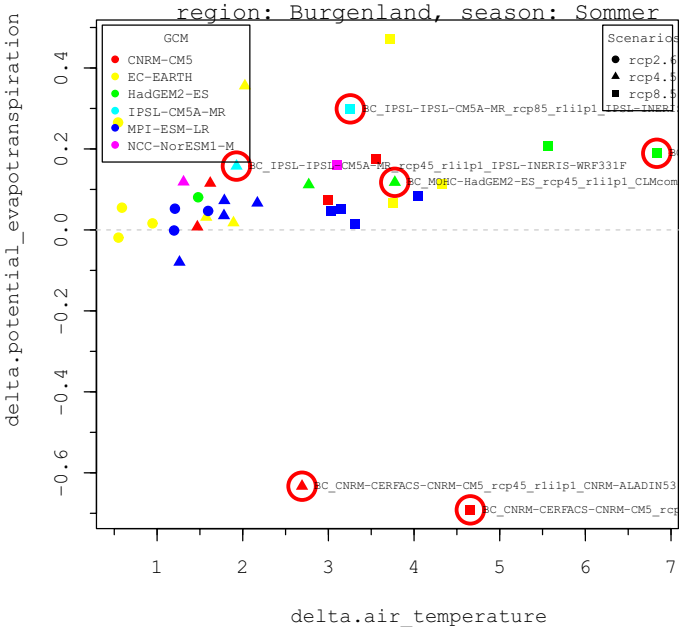

region: Wien, season: Sommer
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

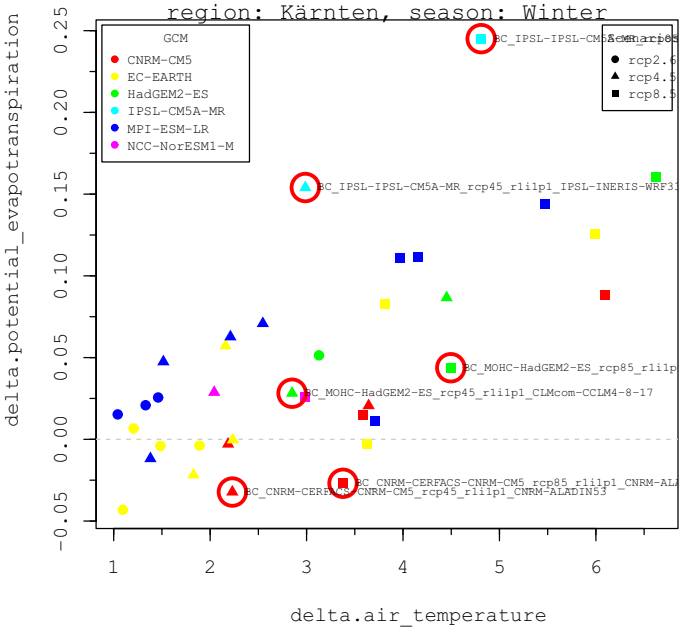

region: Wien, season: Herbst
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
Niederschlagsänderung (%)
Temperaturänderung (C)

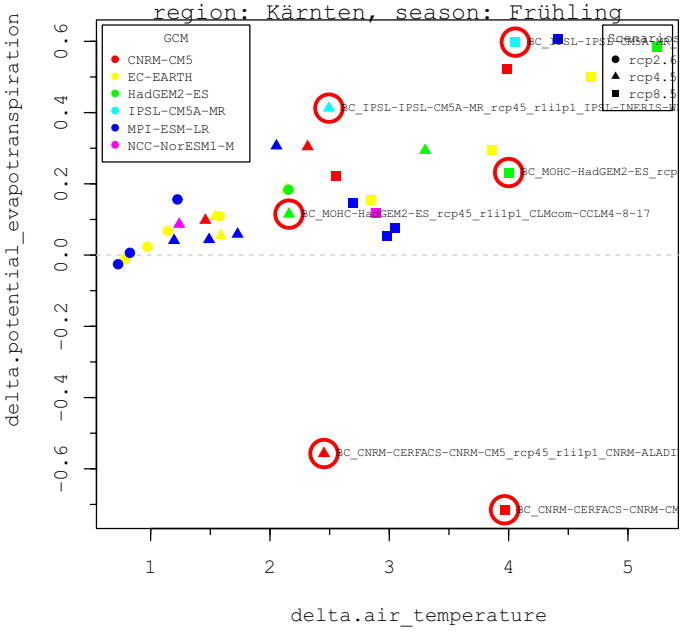

region: Burgenland, season: Winter
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

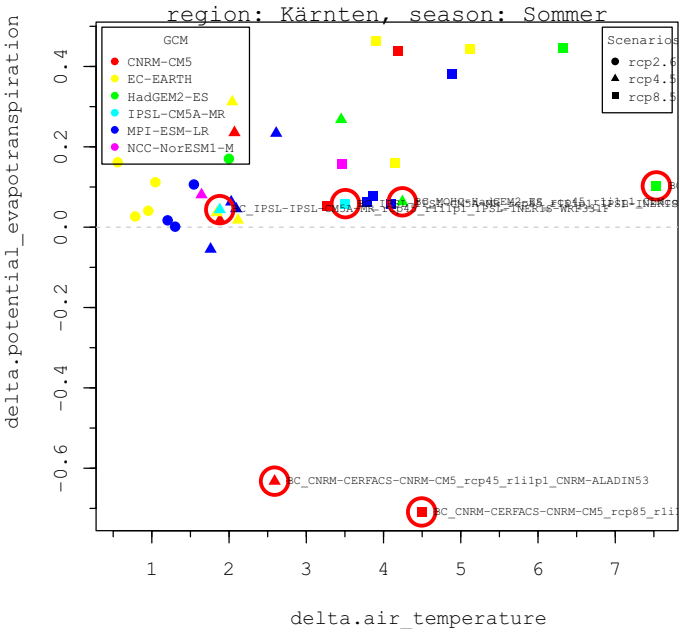

region: Burgenland, season: Frühling
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

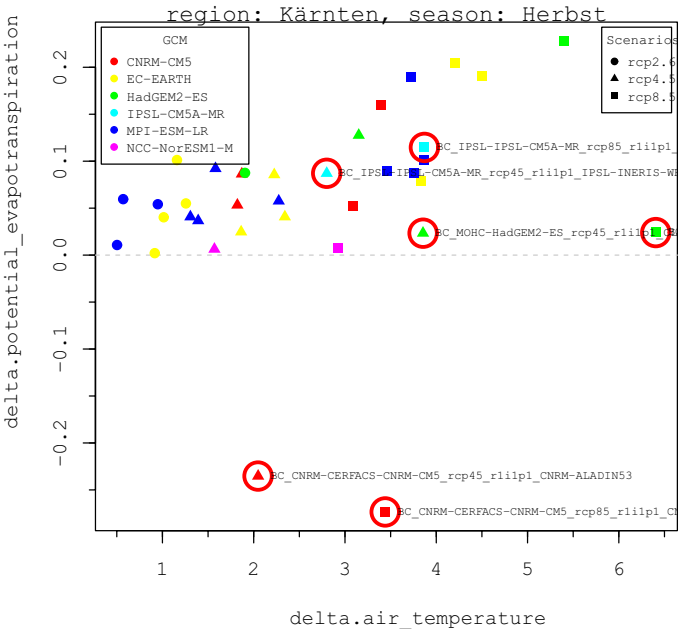

region: Burgenland, season: Herbst
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

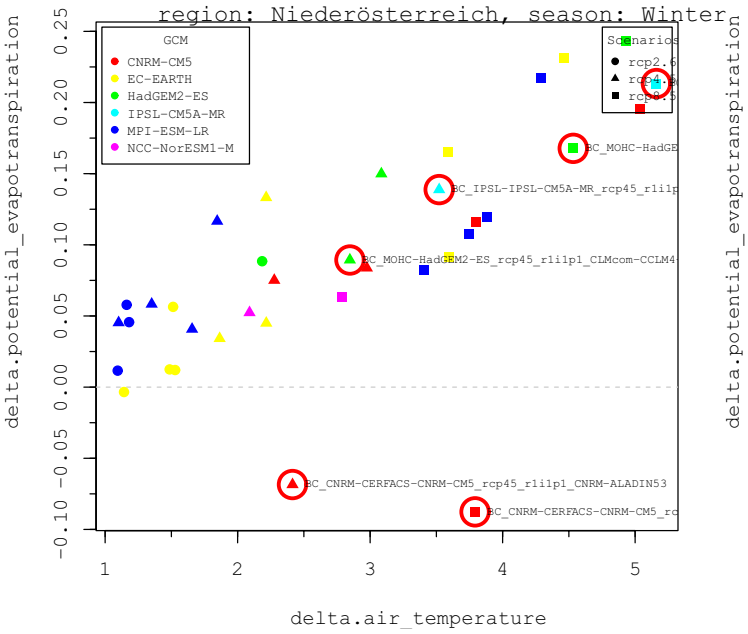

region: Burgenland, season: Sommer
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

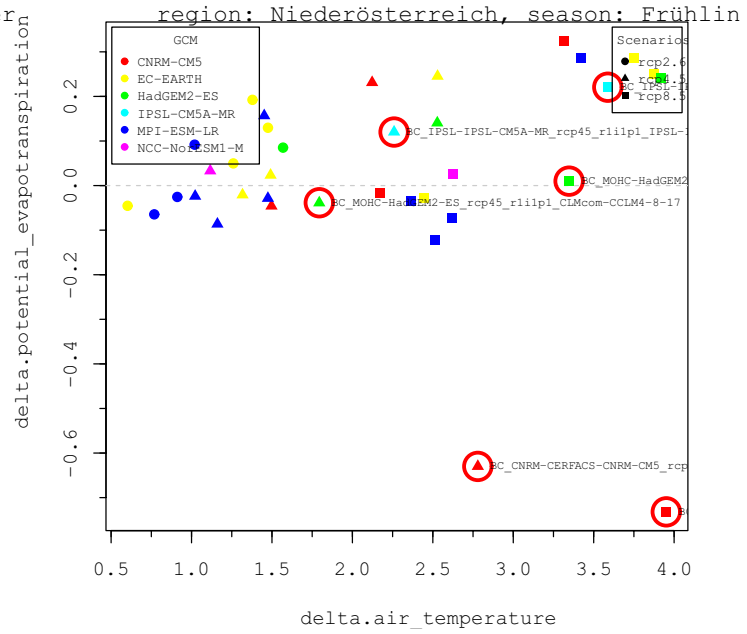

region: Kärnten, season: Winter
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

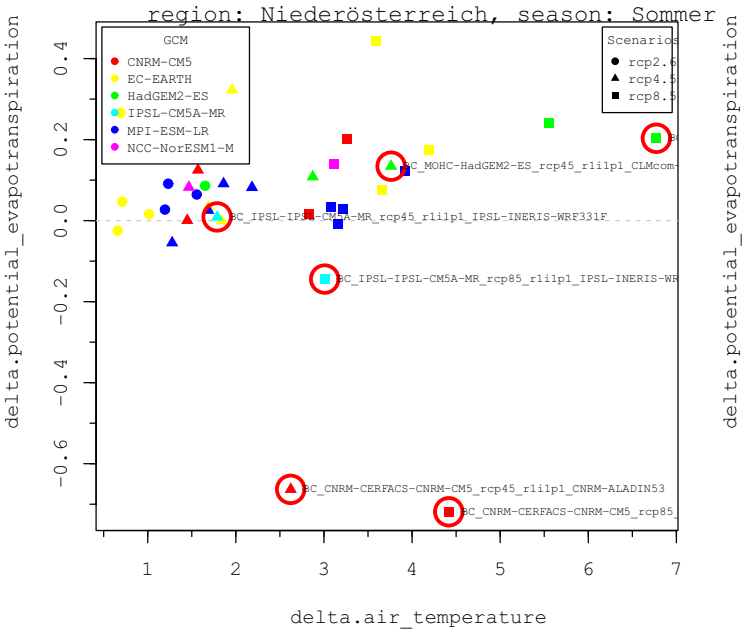

region: Kärnten, season: Frühling
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

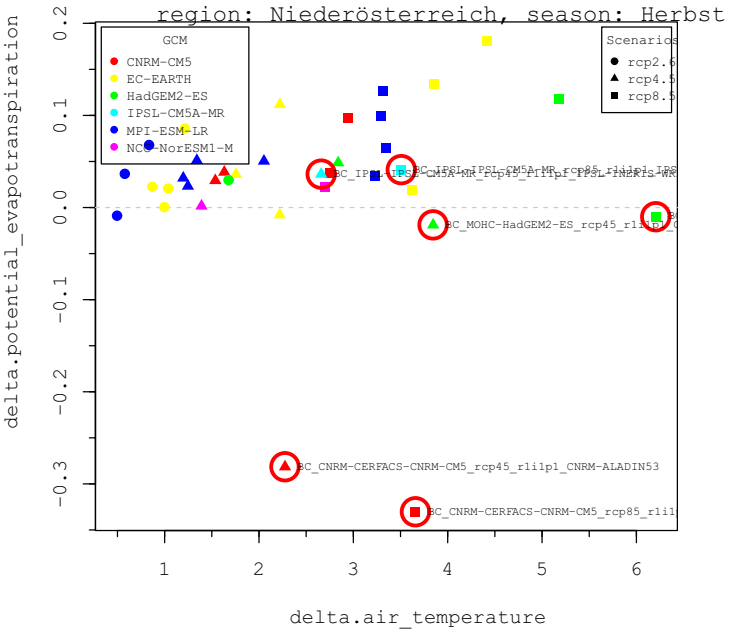

region: Kärnten, season: Sommer
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

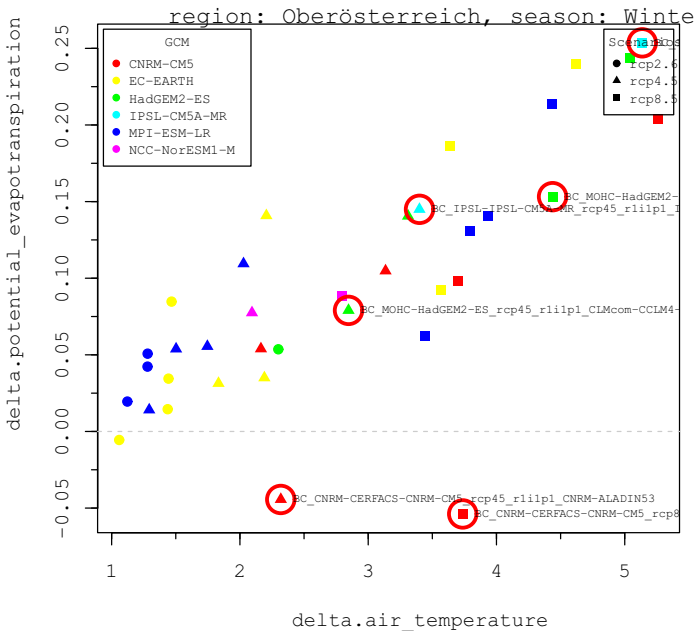

region: Kärnten, season: Herbst
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

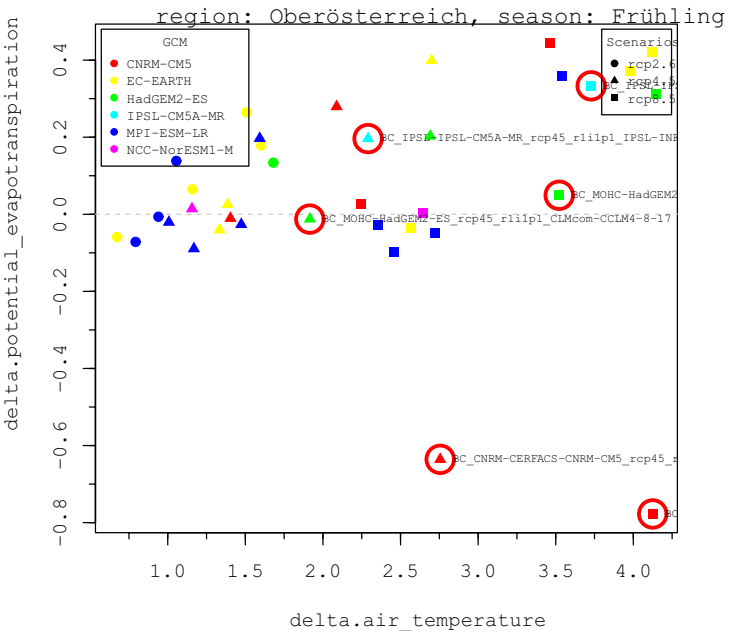

region: Niederösterreich, season: Winter
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

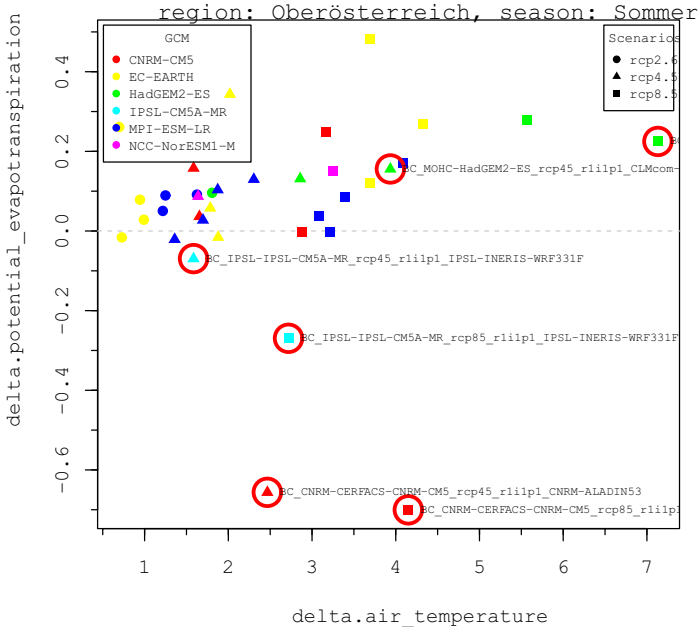

region: Niederösterreich, season: Frühlin
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

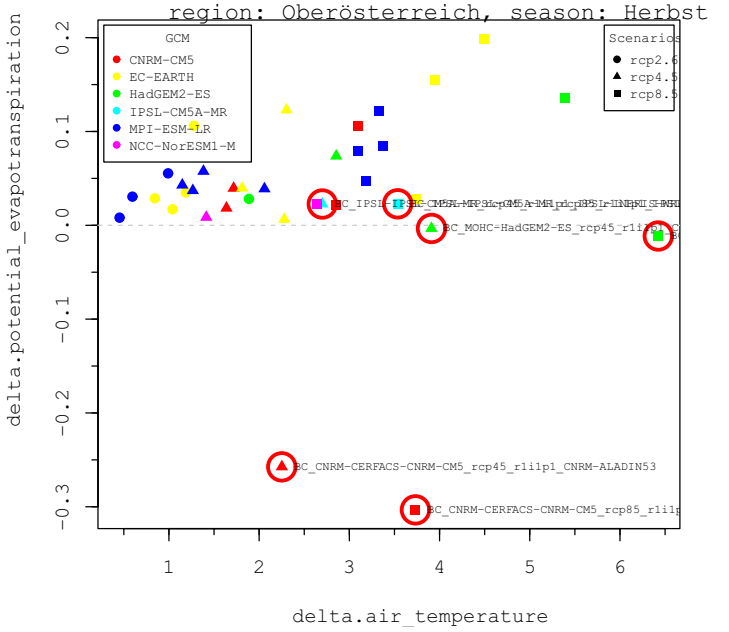

region: Niederösterreich, season: Sommer
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

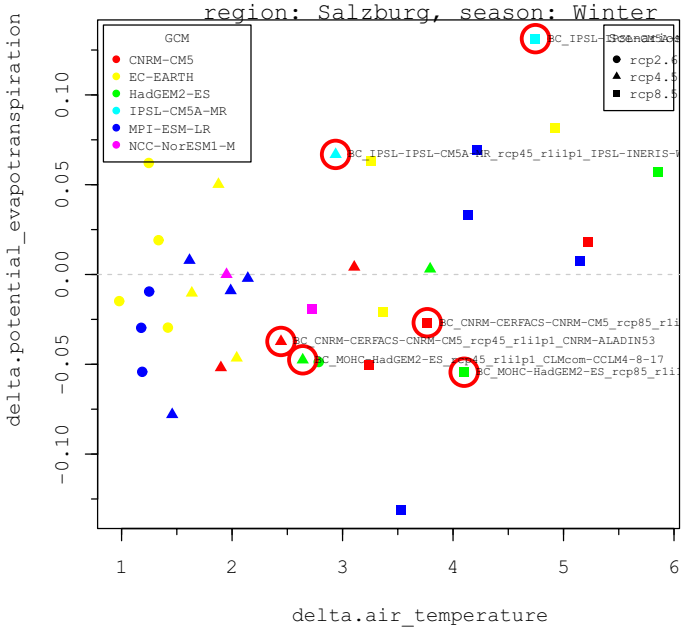

region: Niederösterreich, season: Herbst
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature

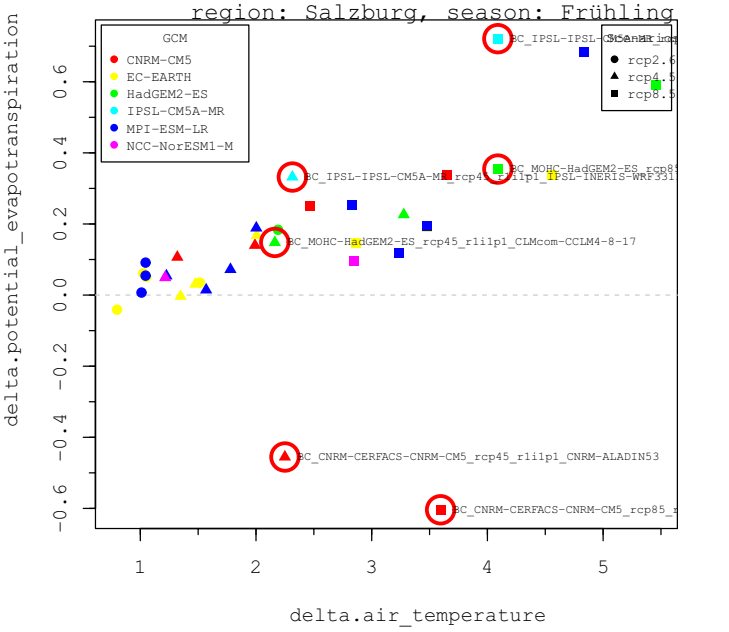

region: Oberösterreich, season: Winter
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_I
BC_MOHC-HadGEM2-
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp

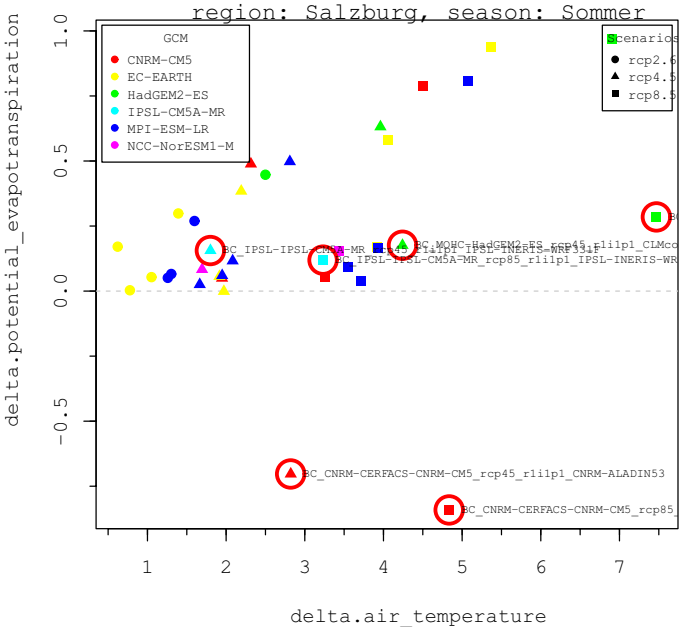

region: Oberösterreich, season: Frühling
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_IPSL-INE
BC_MOHC-HadGEM2
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r
BC

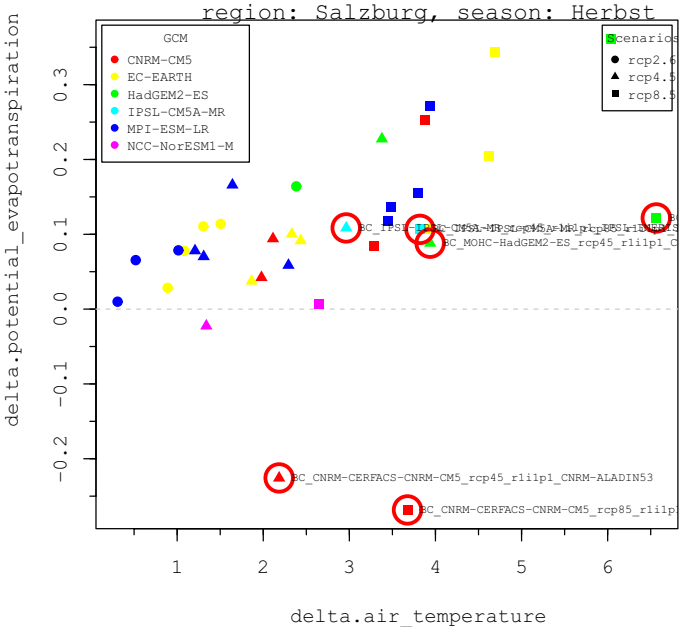

region: Oberösterreich, season: Sommer
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom-
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_IPSL-INERIS-WRF331F
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp85_r1i1p1_IPSL-INERIS-WRF331F
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1i1p

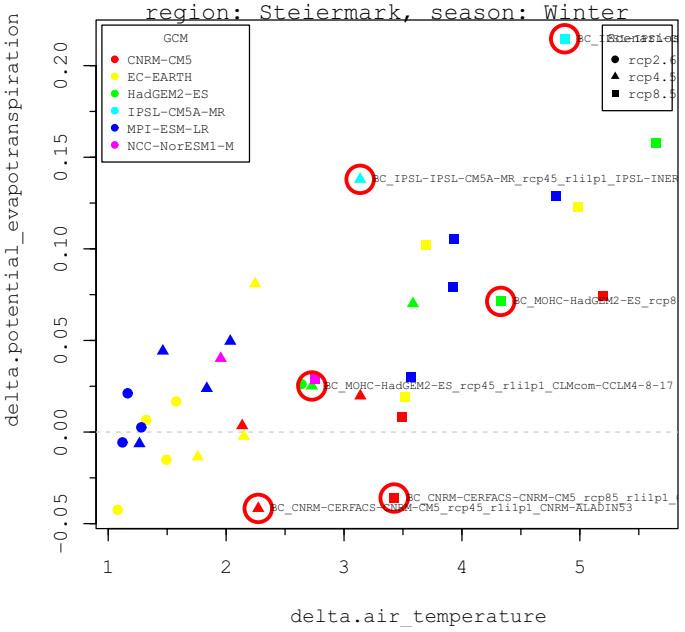

region: Oberösterreich, season: Herbst
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_C
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1i1p

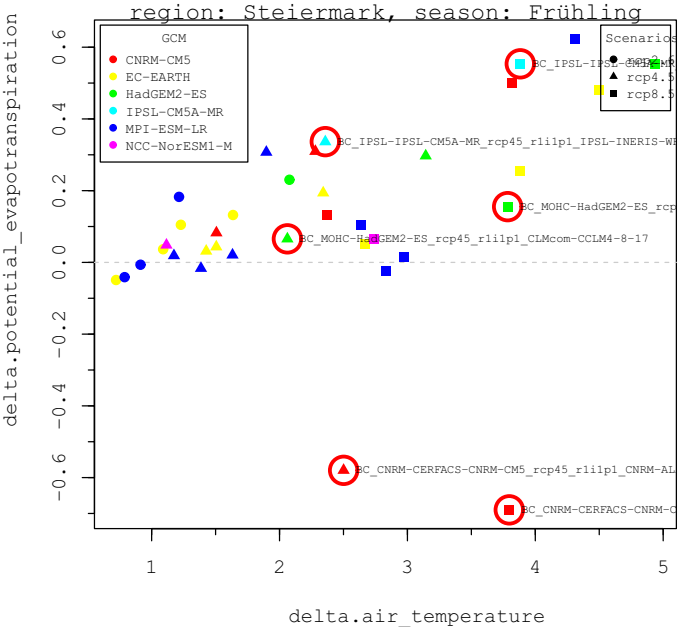

region: Salzburg, season: Winter
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_IPSL-INERIS-
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1i
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp85_r1i

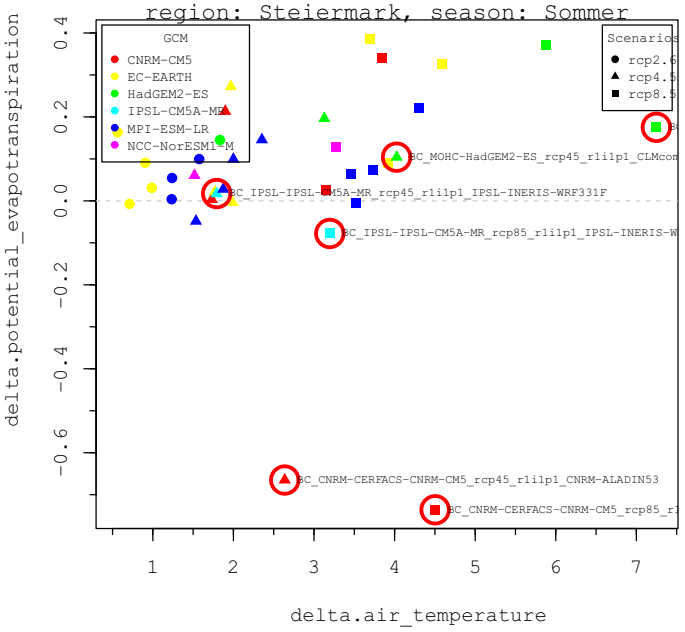

region: Salzburg, season: Frühling
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp85
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r

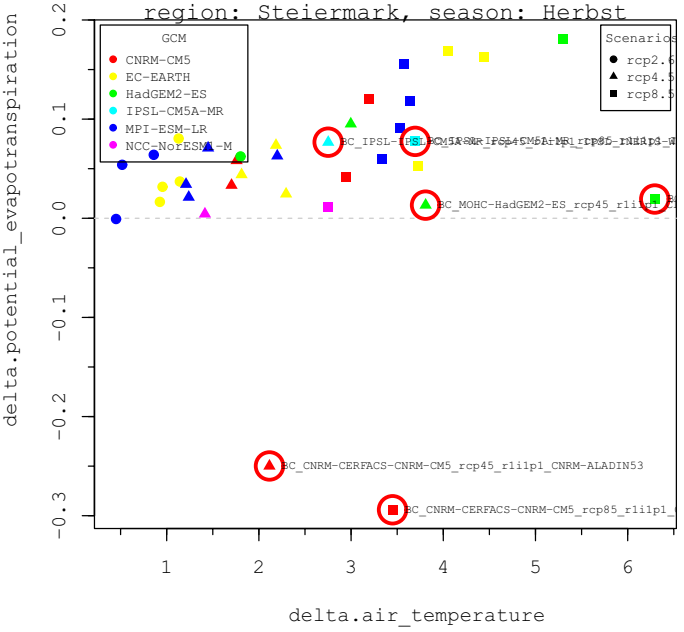

region: Salzburg, season: Sommer
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85

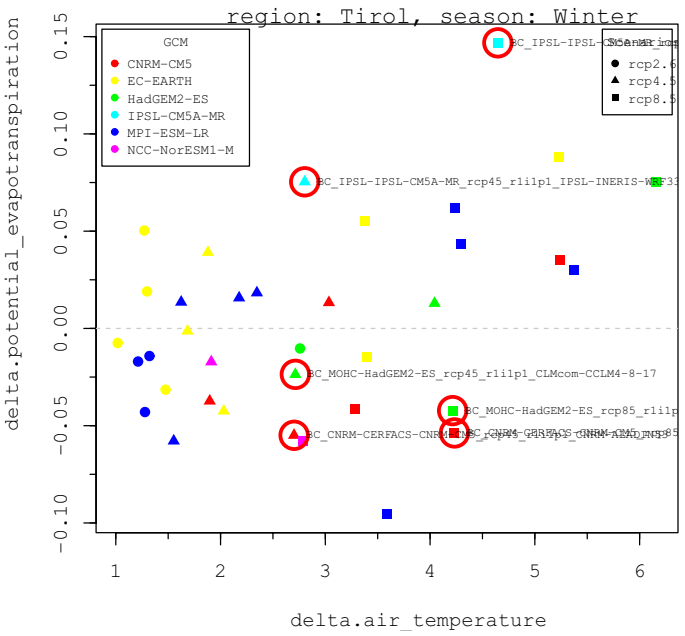

region: Salzburg, season: Herbst
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1i1p

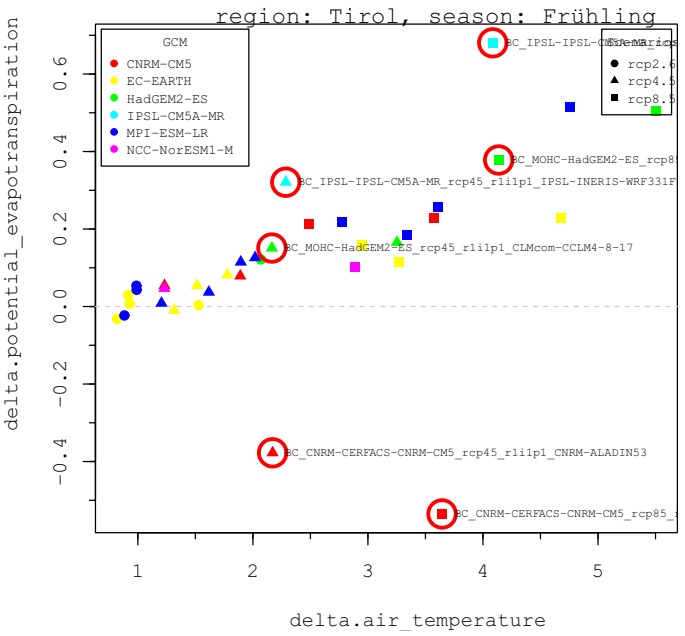

region: Steiermark, season: Winter
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_IPSL-INER
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp8
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1i1p1_
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53

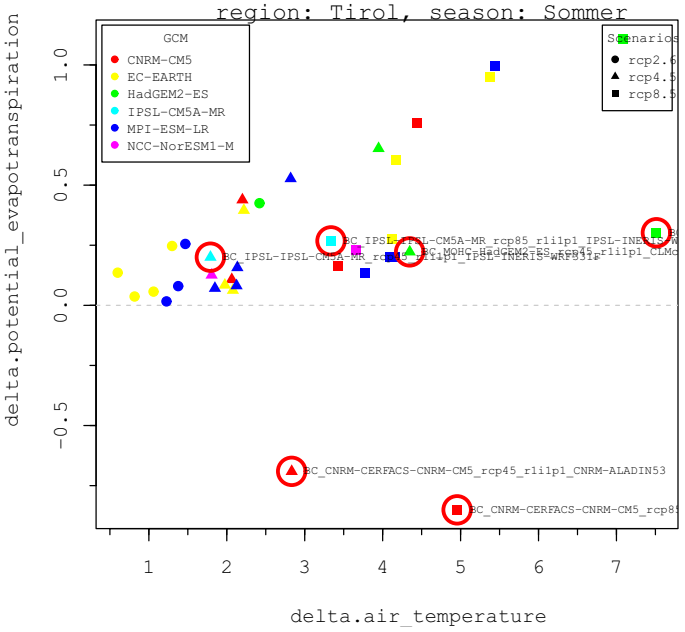

region: Steiermark, season: Frühling
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp4.5
rcp8.5
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_IPSL-INERIS-WR
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-AL
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-C

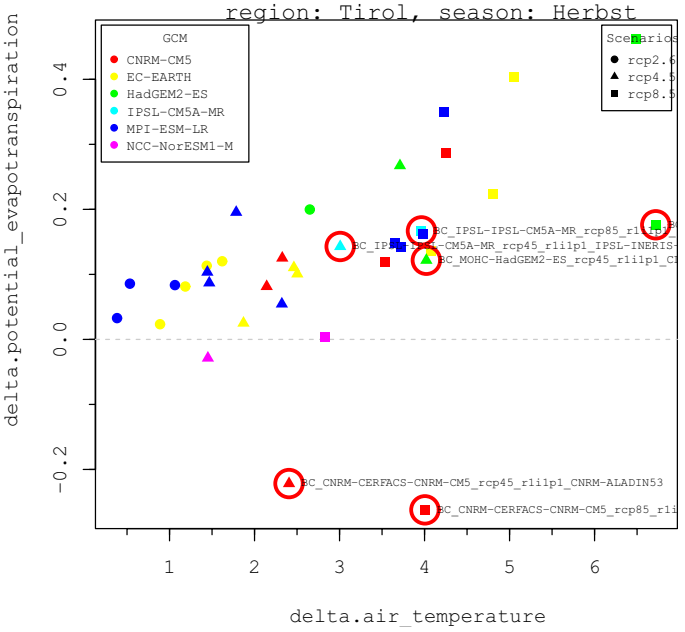

region: Steiermark, season: Sommer
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_IPSL-INERIS-WRF331F
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp85_r1i1p1_IPSL-INERIS-W
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1

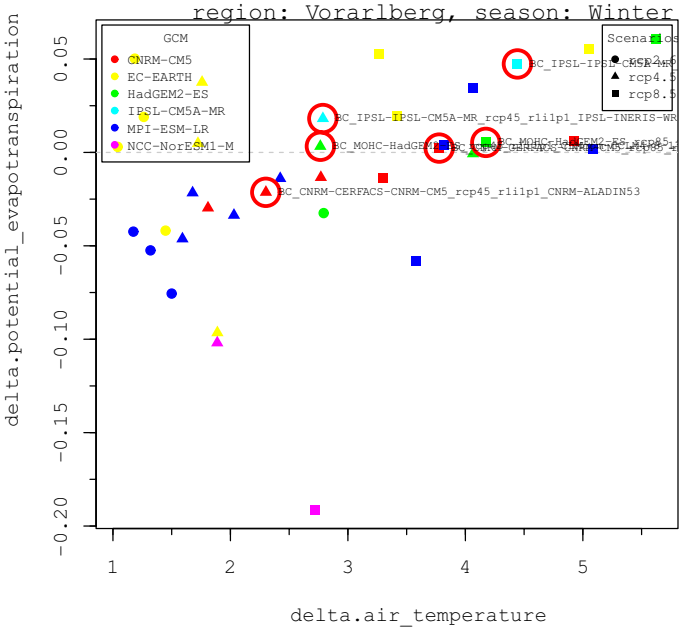

region: Steiermark, season: Herbst
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1i1p1_

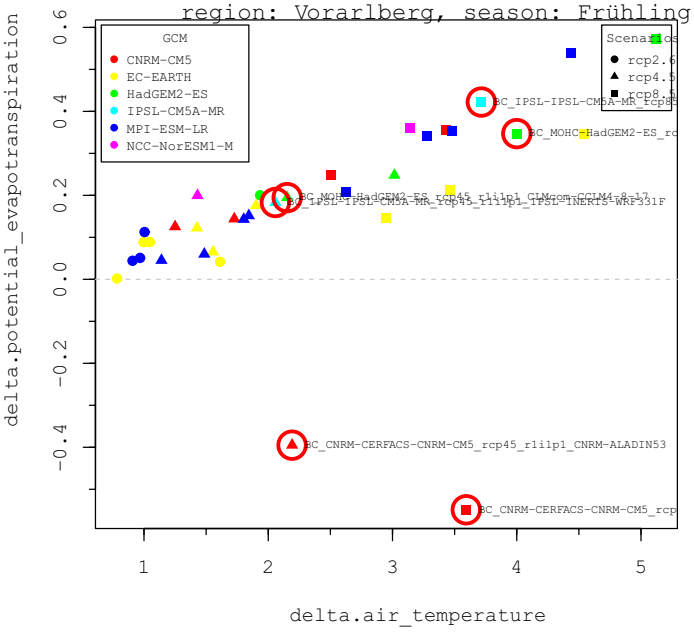

region: Tirol, season: Winter
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_IPSL-INERIS-WRF331F
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53

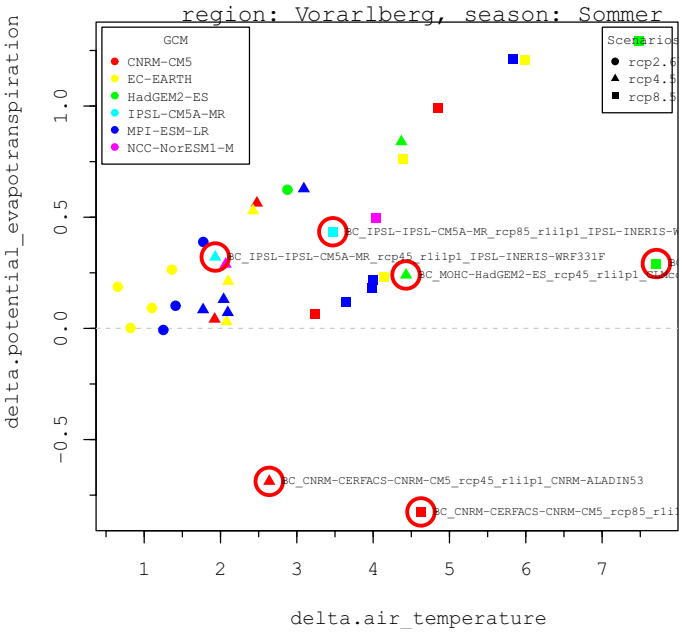

region: Tirol, season: Frühling
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_IPSL-INERIS-WRF331F
BC_MOHC-HadGEM2-ES_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53

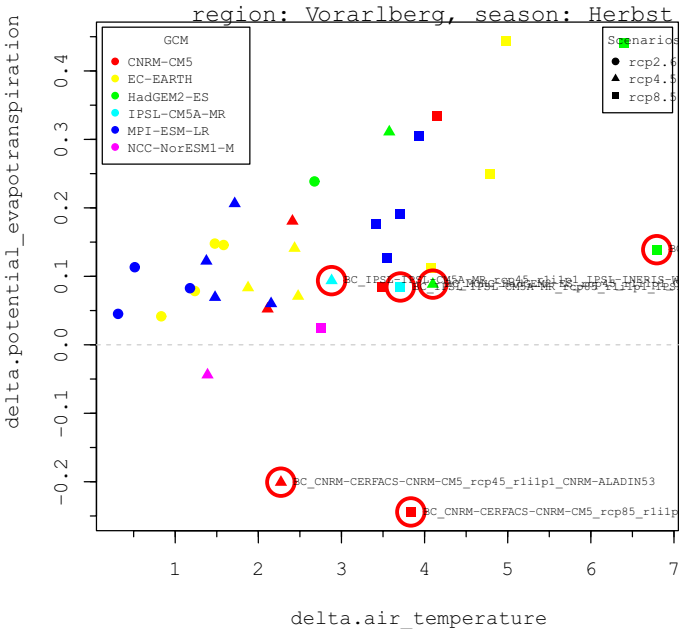

region: Tirol, season: Sommer
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53

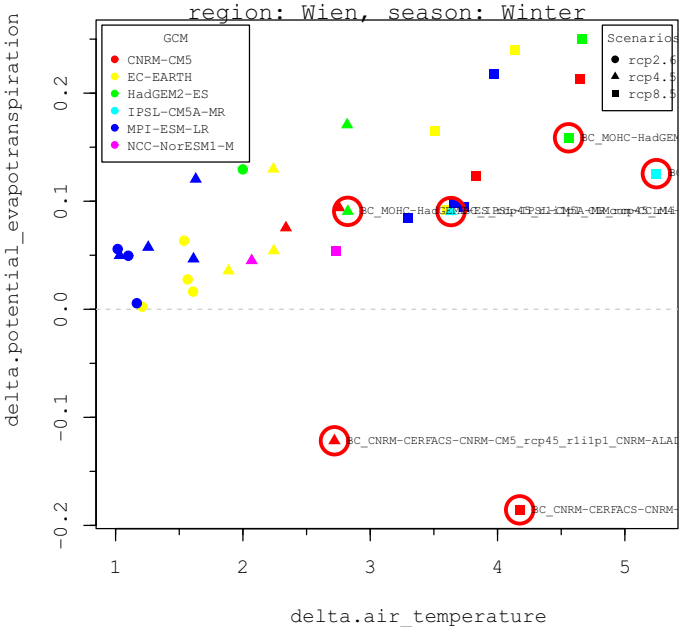

region: Tirol, season: Herbst
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53

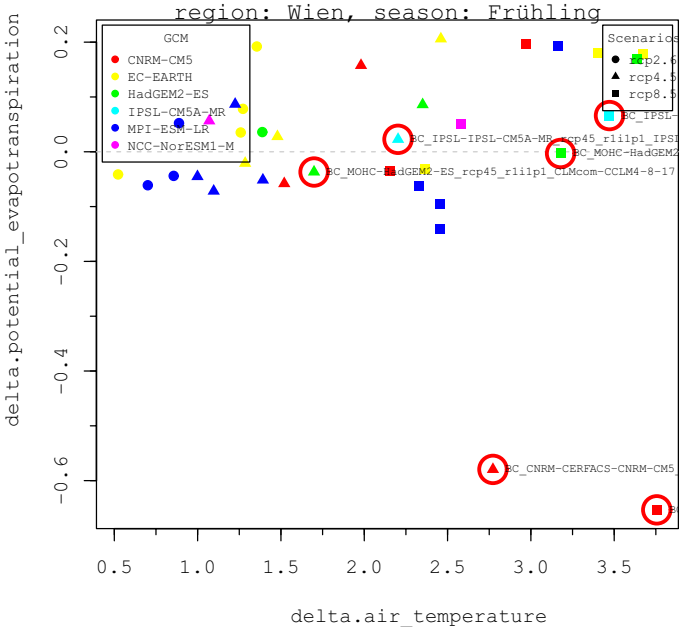

region: Vorarlberg, season: Winter
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53

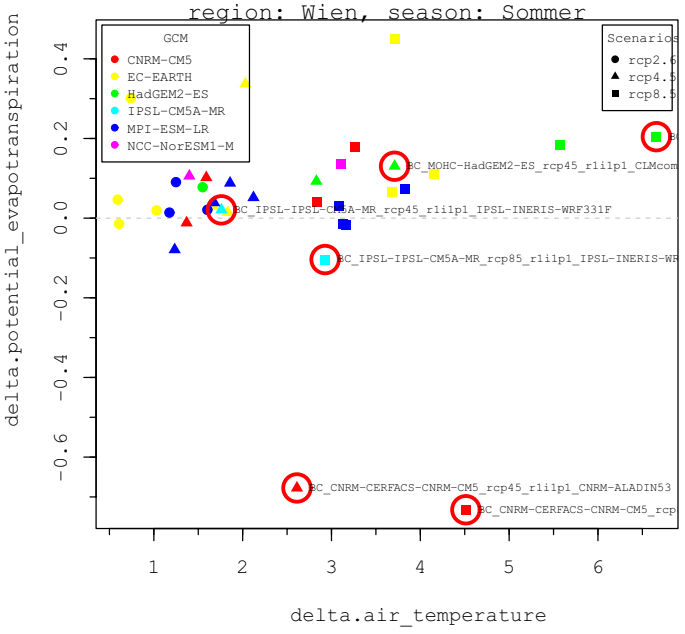

region: Vorarlberg, season: Frühling
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
BC_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53

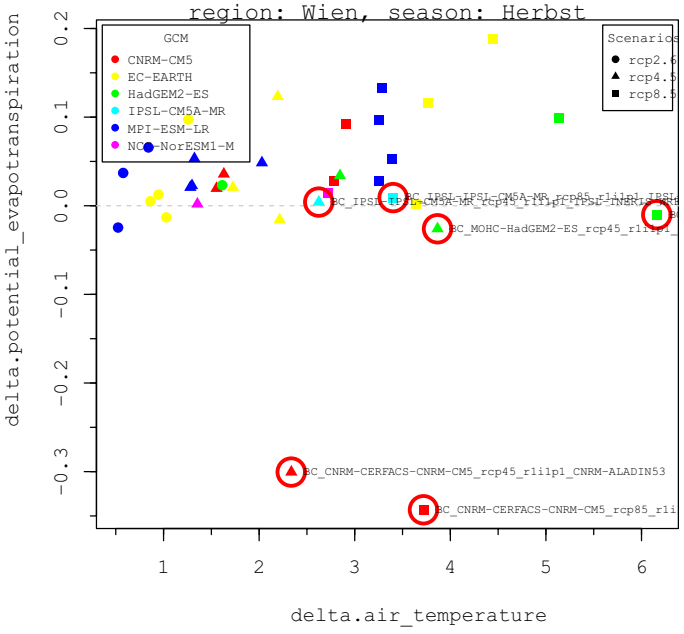

region: Vorarlberg, season: Sommer
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature


region: Vorarlberg, season: Herbst
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature


region: Wien, season: Winter
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature


region: Wien, season: Frühling
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature


region: Wien, season: Sommer
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature


region: Wien, season: Herbst
GCM
CNRM-CM5
EC-EARTH
HadGEM2-ES
IPSL-CM5A-MR
MPI-ESM-LR
NCC-NorESM1-M
Scenarios
rcp2.6
rcp4.5
rcp8.5
delta.potential_evapotranspiration
delta.air_temperature