

BSc Thomas Pliemon

Klimasimulationen zum 1.5°C - Ziel in Europa

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Space Sciences and Earth from Space

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Assoz. Prof. Dr. Douglas Maraun

Wegener Center for Climate and Global Change

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

0.1 Zusammenfassung

Die Limitierung auf eine Erwärmung von 1.5°C , relativ zur vorindustriellen Zeit, wurde im Vertrag von Paris ratifiziert, um die negativen Folgen des anthropogenen Klimawandels einzuschränken. Die möglichen Folgen im regionalen Klima, unter Berücksichtigung des global definierten 1.5°C Ziels, sind noch nicht im Detail analysiert worden. Anhand des RCP4.5 Pfades von GCMs aus dem CMIP5 - Projekt wird mittels „Pattern Scaling“ ein Skalierungsfaktor für die Klimaperiode 2071 - 2100 berechnet, welcher eine globale Erwärmung von 1.5°C darstellt. Mit zwei unterschiedlichen, statistischen Methoden für die Biaskorrektur („Deltachange - Method“ und „Direct - Method“) werden die RCMs von EURO-CORDEX korrigiert und an das 1.5°C Ziel mittels „Pattern Scaling“ angepasst. Als Observationsdatensatz dienen die E-OBS Datensätze von European Climate Assessment & Datasets für die Referenzklimaperiode 1971 - 2000. Untersucht werden Klimaindizes zur Maximaltemperatur, Minimaltemperatur und Niederschlag. Die Differenz der beiden Klimaperioden für das 1.5°C Ziel zeigt, dass in Europa großflächig mit einer höheren Erwärmung zu rechnen ist, als durchschnittlich 1.5°C und weiters zeigen temperaturbasierende Klimaindizes einen erkennbaren Ost - West Gradient und niederschlagsbasierende Klimaindizes einen Nord - Süd Gradient. Sowohl der Vergleich der beiden Biasmethoden, wie auch der Vergleich einer Erwärmung von 1.5°C und 2°C zeigen signifikante Unterschiede.

0.2 Abstract

A limit of global warming to 1.5°C above pre-industrial level was ratified at the Paris agreement in order to limit the negative effects of anthropogenic climate change. The possible changes in regional climate under this target, staying below the 1.5°C level of global warming, have so far not been investigated in detail. On the basis of GCMs of the CMIP5-Project following the RCP4.5 pathway a scaling factor is found by using „Pattern Scaling“ to represent the 1.5°C target of global warming. Two different statistical methods for bias correction („Deltachange - Method“ and „Direct - Method“) are used to correct the RCMs of EURO-CORDEX and these are corrected by „Pattern Scaling“ to fit to the 1.5°C target. The E-OBS datasets of the European Climate Assessment & Datasets are used as observational data for the climate period from 1971 - 2000. Several climate indices, that deal with the maximal temperature, minimal temperature and precipitation are investigated. The difference of the climate periods show, in respect to the 1.5°C target, that the warming in Europe is much higher, than the average warming of the 1.5°C target. Furthermore temperature based indices show a east - west gradient, whereas precipitation based indices show a north - south gradient. Both the comparison of the two Bias - Methods and the comparison of the warming between the 1.5°C target and the 2° target show significant differences.

Inhaltsverzeichnis

0.1	Zusammenfassung	i
0.2	Abstract	iii
1	Einleitung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Klimasystem	3
2.1.1	Allgemeines	3
2.2	Klimawandel	4
2.2.1	Allgemeines	4
2.2.2	Ursachen	4
2.2.3	Anthropogener Klimawandel	5
2.2.4	Klimaszenarien	6
2.3	Regionalmodellierung	7
2.4	1.5°C - Ziel	8
2.4.1	Hintergrund	8
2.4.2	Inhalt des Vertrages	9
2.5	Klimaindizes	9
3	Daten	11
3.1	GCM - Daten	11
3.2	Observationsdaten E-OBS von ECA&D	15
3.2.1	Prozess der Datensammlung	15
3.2.2	Verwendete Klimavariablen	16
3.2.3	Qualität der Daten	16
3.3	RCM - Daten von EURO-CORDEX	17
3.4	Analyse der RCM - Daten	21
3.4.1	Analyse mittels Boxplots	21
3.4.2	Analyse mittels Prüfverfahren	21
3.4.3	Analyse mittels Scatterplots, Quantilplots und Verteilungsplots	26
4	Methoden	31
4.1	Präprozessierung	31
4.1.1	GCMs	31
4.1.2	EOBs	31
4.1.3	RCMs	31
4.2	Pattern Scaling	32
4.2.1	Voraussetzungen/Bedingungen	33

4.3	Bias Korrektur	37
4.3.1	Delta Change Anpassung	38
4.3.2	Additive Korrektur und Skalierung (Direkte Methode)	38
4.4	Verwendung von Prudence Regionen	43
5	Ergebnisse	45
5.1	Simulationen des Klimaindexes tasmin	45
5.1.1	Simulationen anhand der Deltachange-Methode zum 1.5°C Ziel	45
5.1.2	Simulationen anhand der Direct-Methode zum 1,5° Ziel	50
5.1.3	Unterschied der Direct-Methode und der Deltachange-Methode zum 1.5° Ziel	54
5.1.4	Unterschied 2°C zum 1.5°C Ziel anhand der Direct-Methode	58
5.2	Simulationen des Klimaindexes tasmax	63
5.2.1	1.5°C Ziel mittels der Direct Methode	63
5.2.2	Unterschied der Direct-Methode und der Deltachange-Methode zum 1.5°C Ziel	67
5.2.3	Vergleich 1.5 Grad Ziel mit einer Erwärmung von 2 Grad	69
5.3	Simulationen des Klimaindexes pr	74
5.3.1	1.5°C Ziel mittels der Direct Methode	74
5.3.2	Vergleich 1.5 Grad Ziel mit einer Erwärmung von 2 Grad	82
6	Zusammenfassung/Diskussion	87

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schema des Klimasystems mit Subsystemen, Klimamechanismen und typischen Zeitkonstanten (Quelle: Hantel, 1997, S. 314)	4
2.2	Zeitreihe von Kohlendioxid, Methan und Stickstoff (Quelle: IPCC, 2013) .	5
2.3	Vergleich der Einflussparameter auf die Erwärmung (Quelle: IPCC, 2013) .	6
2.4	Vergleich verschiedener Klimaszenarien (Quelle: IPCC, 2013)	7
2.5	Vergleich verschiedener Klimaszenarien (Quelle: Maraun, 2016)	8
3.1	Schematische Darstellung der zwei Fokusgebiete von CMIP5 und die Prioritätsstufen der Experimente. (Quelle: Taylor et al., 2009)	12
3.2	Schematische Zusammensetzung der CMIP5 Langzeitexperimente (Quelle: Taylor et al., 2009)	12
3.3	Veranschaulichung eines GCM – Datensatzes	14
3.4	Messstationen (a) Niederschlag und (b) Mitteltemperatur (Quelle: Haylock et al., 2008)	15
3.5	Es ist jeweils tasmax für MAM 1971 (a) Geographische Lokalität des Datensatzes und (b) zentriert auf Europa	16
3.6	Zeigt die Standardabweichung der Observationsdaten für die Saison MAM 1971 für (a) Maximaltemperatur, (b) Minimaltemperatur und (c) Niederschlag	17
3.7	Es ist jeweils tasmax für MAM 1971 (a) Geographische Lokalität des Datensatzes und (b) zentriert auf Europa	19
3.8	Gezeigt ist jeweils das zeitliche Mittel von tasmax einer Klimaperiode (1971 - 2000) räumlich auf einen Gitterpunkt gemittelt (Von oben nach unten DJF, MAM, JJA und SON) für (a) CLMcom (CNRM-CM5), (b) CNRM (CNRM-CM5), (c) SMHI (CNRM-CM5), (d) KNMI (ICHEC EC-EARTH), (e) DMI (ICHEC EC-EARTH), (f) CLMcom (ICHEC EC-EARTH), (g) SMHI (ICHEC EC-EARTH), (h) IPSL-INERIS (IPSL CM5A MR), (i) Clmcom (MPI-ESM-LR), (j) MPI-CSC (MPI-ESM-LR) r1, (k) SMHI (MPI-ESM-LR), (l) MPI-CSC Clmcom (MPI-ESM-LR) r2 und (m) EOBS Daten	23

3.9	Gezeigt ist jeweils das zeitliche Mittel von tasmin einer Klimaperiode (1971 - 2000) räumlich auf einen Gitterpunkt gemittelt (Von oben nach unten DJF, MAM, JJA und SON) für (a) CLMcom (CNRM-CM5), (b) CNRM (CNRM-CM5), (c) SMHI (CNRM-CM5), (d) KNMI (ICHEC EC-EARTH), (e) DMI (ICHEC EC-EARTH), (f) CLMcom (ICHEC EC-EARTH), (g) SMHI (ICHEC EC-EARTH), (h) IPSL-INERIS (IPSL CM5A MR), (i) Clmcom (MPI-ESM-LR), (j) MPI-CSC (MPI-ESM-LR) r1, (k) SMHI (MPI-ESM-LR), (l)MPI-CSC Clmcom (MPI-ESM-LR) r2 und (m) EOBS Daten	24
3.10	Gezeigt ist jeweils das zeitliche Mittel von pr einer Klimaperiode (1971 - 2000) räumlich auf einen Gitterpunkt gemittelt (Von oben nach unten DJF, MAM, JJA und SON) für (a) CLMcom (CNRM-CM5), (b) CNRM (CNRM-CM5), (c) SMHI (CNRM-CM5), (d) KNMI (ICHEC EC-EARTH), (e) DMI (ICHEC EC-EARTH), (f) CLMcom (ICHEC EC-EARTH), (g) SMHI (ICHEC EC-EARTH), (h) IPSL-INERIS (IPSL CM5A MR), (i) Clmcom (MPI-ESM-LR), (j) MPI-CSC (MPI-ESM-LR) r1, (k) SMHI (MPI-ESM-LR), (l)MPI-CSC Clmcom (MPI-ESM-LR) r2 und (m) EOBS Daten	25
3.11	Linksseitig sind die Verteilungsfunktionen dargestellt absteigend mit den Saisonen DJF, MAM, JJA und SON für tasmax, Rechtsseitig der Quantilplot und der Scatterplot für tasmax	27
3.12	Linksseitig sind die Verteilungsfunktionen dargestellt absteigend mit den Saisonen DJF, MAM, JJA und SON für tasmin, Rechtsseitig der Quantilplot und der Scatterplot für tasmin	28
3.13	Linksseitig sind die Verteilungsfunktionen dargestellt absteigend mit den Saisonen DJF, MAM, JJA und SON für pr, Rechtsseitig der Quantilplot und der Scatterplot für pr	29
4.1	Schematische Darstellung der Gitter in (a) RCM, in (b) E-OBS und in (c) Vergleich der Auflösung	32
4.2	Darstellung der Zeitreihen des RCP26 Szenarios saisonal gegliedert	34
4.3	Darstellung der Zeitreihen des RCP45 Szenarios saisonal gegliedert	35
4.4	Mittelwert des globalen Niederschlags (mm d-1) gegen Temperaturänderung (°C) relativ zu 1986 - 2005 Basisperiode in CMIP5 Modell konzentrationstriebene Projektionen für die verschiedenen RCP Szenarien (a) Mittelwerte über Klimaperioden, welche jeweils 5 Jahre überlappen, beginnend im Jahr 2006 (z.B. 2006 - 2015, 2011 - 2100), jede Linie repräsentiert ein anderes Modell und (b) der korrespondierende Mult-Modell-Mittelwert für jedes RCP Szenario (Quelle: IPCC, 2013)	36
4.5	Vergleich der Biaskorrektur (Quelle: Maraun et al., 2018, S. 195)	38
4.6	Bias des Klimaindexes tasmin für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	40
4.7	Bias des Klimaindexes tasmax für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	41
4.8	Bias des Klimaindexes pr für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	42
4.9	Grafische Darstellung der Prudence - Regionen Quelle: (Christensen et al., 2007)	43

5.1 Darstellung des Klimaindexes tasmin mit der Deltachange-Methode für das 1.5°C Ziel des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 47

5.2 Darstellung des Klimaindexes FD0 mit der Deltachange-Methode für das 1.5°C Ziel des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Vergangenheit}} - \text{Daten}_{\text{Zukunft}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 48

5.3 Darstellung des Klimaindexes CSDI mit der Deltachange-Methode für das 1.5°C Ziel des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Vergangenheit}} - \text{Daten}_{\text{Zukunft}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 49

5.4 Darstellung des Klimaindexes tasmin (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 51

5.5 Darstellung des Klimaindexes FD0 (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Vergangenheit}} - \text{Daten}_{\text{Zukunft}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 52

5.6 Darstellung des Klimaindexes CSDI (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Vergangenheit}} - \text{Daten}_{\text{Zukunft}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 53

5.7	Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Direct-Methode}} - \text{Daten}_{\text{Deltachange-Methode}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes tasmin (Mulit-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	55
5.8	Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Direct-Methode}} - \text{Daten}_{\text{Deltachange-Methode}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes FD0 (Mulit-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	56
5.9	Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Direct-Methode}} - \text{Daten}_{\text{Deltachange-Methode}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes CSDI (Mulit-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	57
5.10	Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ\text{C}} - \text{Daten}_{1.5^\circ\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes tasmin (Mulit-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	59
5.11	Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ\text{C}} - \text{Daten}_{1.5^\circ\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes FD0 (Mulit-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	60
5.12	Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ\text{C}} - \text{Daten}_{1.5^\circ\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes CSDI (Mulit-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	61
5.13	Vergleich Klimasignal des 1.5°C Ziels (blau) mit einer Erwärmung von 2.0°C (grün) für den Klimaindex tasmin in (a) British Isles, (b) Iberian Peninsula, (c) France, (d) Mid-Europe, (e) Scandinavia, (f) Alps, (g) Mediterranean und (h) Eastern Europe	62
5.14	Darstellung des Klimaindexes tasmax (Mulit-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C Ziel Mulit-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), Mulit-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Mulit-Model-Mean des saisonalen Mittels des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.	64
5.15	Darstellung des Klimaindexes SU25 (Mulit-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C der Mulit-Model-Mean Ziel des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), der Mulit-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Mulit-Model-Mean der saisonalen Differenz ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.	65

5.16 Darstellung des Klimaindexes WSDI (Mult-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C Ziel der Mult-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), der Mult-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Mult-Model-Mean der saisonalen Differenz ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 66

5.17 Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Direct-Methode}} - \text{Daten}_{\text{Deltachange-Methode}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes SU25 (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON 67

5.18 Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Direct-Methode}} - \text{Daten}_{\text{Deltachange-Methode}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes WSDI (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON 68

5.19 Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ\text{C}} - \text{Daten}_{1.5^\circ\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes tasmin (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON 70

5.20 Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ\text{C}} - \text{Daten}_{1.5^\circ\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes SU25 (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON 71

5.21 Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ\text{C}} - \text{Daten}_{1.5^\circ\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes WSDI (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON 72

5.22 Vergleich Multi-Model-Mean des Klimasignals vom 1.5°C Ziels (blau) mit einer Erwärmung von 2.0°C (grün) für den Klimaindex tasmax in (a) British Isles, (b) Iberian Peninsula, (c) France, (d) Mid-Europe, (e) Scandinavia, (f) Alps, (g) Mediterranean und (h) Eastern Europe 73

5.23 Darstellung des Klimaindexes pr (Mult-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Vergangenheit}} / \text{Daten}_{\text{Zukunft}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 75

- 5.24 Darstellung des Klimaindexes R01 ($pr \geq 1\text{mm}$) (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 76
- 5.25 Darstellung des Klimaindexes CWD (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 77
- 5.26 Darstellung der Daten $pr < 1\text{mm}$ (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 78
- 5.27 Darstellung des Klimaindexes CDD (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 79
- 5.28 Darstellung der Niederschlagsintensität (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet. 80

5.29	Darstellung des 95% Quantil des Niederschlags (pr) (Mult-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals (Daten _{Zukunft} -Daten _{Vergangenheit}) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.	81
5.30	Darstellung der Differenz (Daten _{2°} /Daten _{1.5°}) vom Klimasignal des Klimaindexes pr (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	82
5.31	Darstellung der Differenz (Daten _{2°} -Daten _{1.5°}) vom Klimasignal des Klimaindexes R01 (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	83
5.32	Darstellung der Differenz (Daten _{2°} -Daten _{1.5°}) vom Klimasignal des Klimaindexes CWD (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON	84
5.33	Vergleich des 1.5°C Ziels (blau) mit einer Erwärmung von 2.0° (grün) für den Klimaindex pr in (a) British Isles, (b) Iberian Peninsula, (c) France, (d) Mid-Europe, (e) Scandinavia, (f) Alps, (g) Mediterranean und (h) Eastern Europe	85

Tabellenverzeichnis

2.1	Auflistung der in dieser Arbeit relevanten Klimaelemente und Klimaindizes (Vergleiche https://www.climdex.org/learn/indices.html)	10
3.1	Model overview of CMIP5 GCMs.	13
3.2	Rohdatensätze der EOBS - Daten	16
3.3	ModeloverviewRCMs	20
3.4	Ergebnisse eines t - Tests eines Gitterpunktes (Graz) zwischen den EOBS - Daten und (a) CLMcom (CNRM-CM5), (b) CNRM (CNRM-CM5), (c) SMHI (CNRM-CM5), (d) KNMI (ICHEC EC-EARTH), (e) DMI (ICHEC EC-EARTH), (f) CLMcom (ICHEC EC-EARTH), (g) SMHI (ICHEC EC-EARTH), (h) IPSL-INERIS (IPSL CM5A MR), (i) Clmcom (MPI-ESM-LR), (j) MPI-CSC (MPI-ESM-LR) r1, (k) SMHI (MPI-ESM-LR), (l)MPI-CSC Clmcom (MPI-ESM-LR) r2 und (m) Multimodelmean	22
3.5	Ergebnisse eines F - Tests eines Gitterpunktes (Graz) zwischen den EOBS - Daten und (a) CLMcom (CNRM-CM5), (b) CNRM (CNRM-CM5), (c) SMHI (CNRM-CM5), (d) KNMI (ICHEC EC-EARTH), (e) DMI (ICHEC EC-EARTH), (f) CLMcom (ICHEC EC-EARTH), (g) SMHI (ICHEC EC-EARTH), (h) IPSL-INERIS (IPSL CM5A MR), (i) Clmcom (MPI-ESM-LR), (j) MPI-CSC (MPI-ESM-LR) r1, (k) SMHI (MPI-ESM-LR), (l)MPI-CSC Clmcom (MPI-ESM-LR) r2 und (m) Multimodelmean	22
4.1	Ergebnisse des Skalierungsfaktors	33
4.2	Längen- und Breitengrade der Prudence - Regionen Quelle: (Vgl. Christensen et al., 2007)	43

Kapitel 1

Einleitung

Das Bestreben die globale, durchschnittliche Temperatur (an der Erdoberfläche) auf 2°C zu limitieren, wird international schon länger thematisiert. Erste Impulse bzw. das Aufzeigen von Konkretisierungen finden sich im Artikel 2 der United Nations Framework Convention on Climate Change aus dem Jahr 1992. Nämlich:

„The ultimate objective of this Convention and any related legal instruments that the Conference of the Parties may adopt is to achieve, in accordance with the relevant provisions of the Convention, stabilization of greenhouse gas concentrations in the atmosphere at a level that would prevent dangerous anthropogenic interference with the climate system. Such a level should be achieved within a time frame sufficient to allow ecosystems to adapt naturally to climate change, to ensure that food production is not threatened and to enable economic development to proceed in a sustainable manner.“ (UNFCCC, 1992)

Das Limitieren auf 2°C Erwärmung in Referenz zur vorindustriellen Zeit, wurde erstmals im IPCC 2nd Assessment Report eingeführt. Das Ziel war ernsthafte, negative Effekte bezüglich Wasserreserven, Ökosystem, Artenvielfalt und der menschlichen Gesundheit zu verhindern. (Vgl. IPCC, 1995) Bei den Pariser Verträgen im Dezember 2015 wurde die Erwärmungsobergrenze auf 1.5°C bis zum Jahr 2100 global betrachtet festgelegt und ratifiziert.

„Holding the increase in the global average temperature to well below 2°C above pre-industrial levels and pursuing efforts to limit the temperature increase to 1.5°C above pre-industrial levels, recognizing that this would significantly reduce the risks and impacts of climate change;“ (UNFCCC, 2015)

Mit dieser Obergrenze kommt nun die Frage auf, wie sich Klimaindizes bei dieser Erwärmung von der Gegenwart bis zur Zukunft verändern. Bisher wurden Simulationen auf globaler, wie auf regionaler Ebene anhand der RCP Pfade bzw. der SRES Szenarien durchgeführt. I.e. bei einer definierten Energiemenge wird eine bestimmte Erwärmung generiert/ermittelt. Wie zum Beispiel im IPCC-Assessment Report (Vgl. IPCC, 2013), oder in auf regionaler Ebene in Europa (Vgl. Jacob et al., 2014). Diese Masterarbeit beschäftigt sich nun damit, Simulationen verschiedener Klimaindizes zu generieren (mittels MATLAB), die sich bei einer globalen Erwärmung von 1.5°C einstellt. Als zu untersuchende Zeitspanne wird der Zeitraum von 2071-2100 gewählt und als Referenzzeitspanne

der Zeitraum von 1971-2000. Betrachtet wird hierbei der europäische Kontinent mit einer Auflösung von $0.22^\circ \times 0.22^\circ$. Um dies durchführen zu können werden globale Datensätze (GCMs) aus dem CMIP5 Projekt, regionale Datensätze (RCMs von EURO-CORDEX) und Messdaten von E-OBS verwendet. Eine Verbindung zwischen GCMs und RCMs wird mit der Pattern Scaling Methode (Vgl. Osborn et al., 2016) erreicht, womit auch der verwendete RCP4.5 Pfad auf eine Erwärmung von 1.5°C umskaliert wird. Die Verknüpfung zwischen Messdaten und Modelldaten wird mittels dem Delta Change Ansatz und der Biaskorrektur versucht (Vgl. Maraun et al., 2018). Neben den Klimaindizes Maximaltemperatur, Minimaltemperatur und Niederschlag wird noch eine Impaktanalyse durchgeführt.

In Kapitel 3 werden die verwendeten Datensätze näher behandelt, nämlich GCMs, E-OBS und RCMs. Die Ausdehnung der Gitter, Evaluierung der Datensätze und die Qualität der Daten wird näher behandelt. In Kapitel 4 werden die verwendeten Methoden genauer dargestellt. Die Preprozessierung wird kurz erläutert, die Pattern Scaling Methode, die Biaskorrektur und die Impaktanalyse. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse dargestellt und erklärt und das letzte Kapitel 6 enthält die Zusammenfassung und eine Diskussion der Ergebnisse.

Kapitel 2

Grundlagen

2.1 Klimasystem

2.1.1 Allgemeines

Um die Thematik des Klimawandels behandeln zu können, sollte der Begriff Klima kurz erläutert werden.

Klimatologie ist eine exakte Wissenschaft, jedoch entzieht sich ihr Gegenstand (das Klimasystem) und seine Eigenschaftsgesamtheit (das Klima) den klassischen Methoden der Experimentalphysik. I.e. Klimavariablen können gemessen werden (in situ und durch Fernbeobachtungen), aber man kann mit dem Klima nicht experimentieren. Das impliziert, dass Zukunftsprognosen von Klimavariablen nicht als absolut und real anzusehen sind, sondern jeweils einer gewissen Wahrscheinlichkeit unterliegen. (Vgl. Hantel, 1997, S. 312)

Das Klimasystem besteht aus denjenigen Komponenten der Erde, welche am Klimageschehen teilnehmen. Diese Komponenten stehen in stetiger Wechselwirkung und laut international gültiger Nomenklatur bestehen sie aus den folgenden 5 Subsystemen (Vgl. Hantel, 1997, 313 f):

- Atmosphäre
- Hydrosphäre
- Kryosphäre
- Lithosphäre
- Biosphäre

Zeitliche und räumliche Charakterisierung

In der Klimatologie ist die zu betrachtende Zeitskala stets zu berücksichtigen. Angewandt auf die 5 Subsysteme lässt sich eine weitere Klassifizierung in Klimafluide (Atmosphäre, Ozean, ...) und Klimasolide (Erdoberfläche, Landeis, ...) durchführen. I.e. bei Wettervorhersagen (bis ca. 10 Tage) werden in den Modellen alle Komponenten, exklusive der

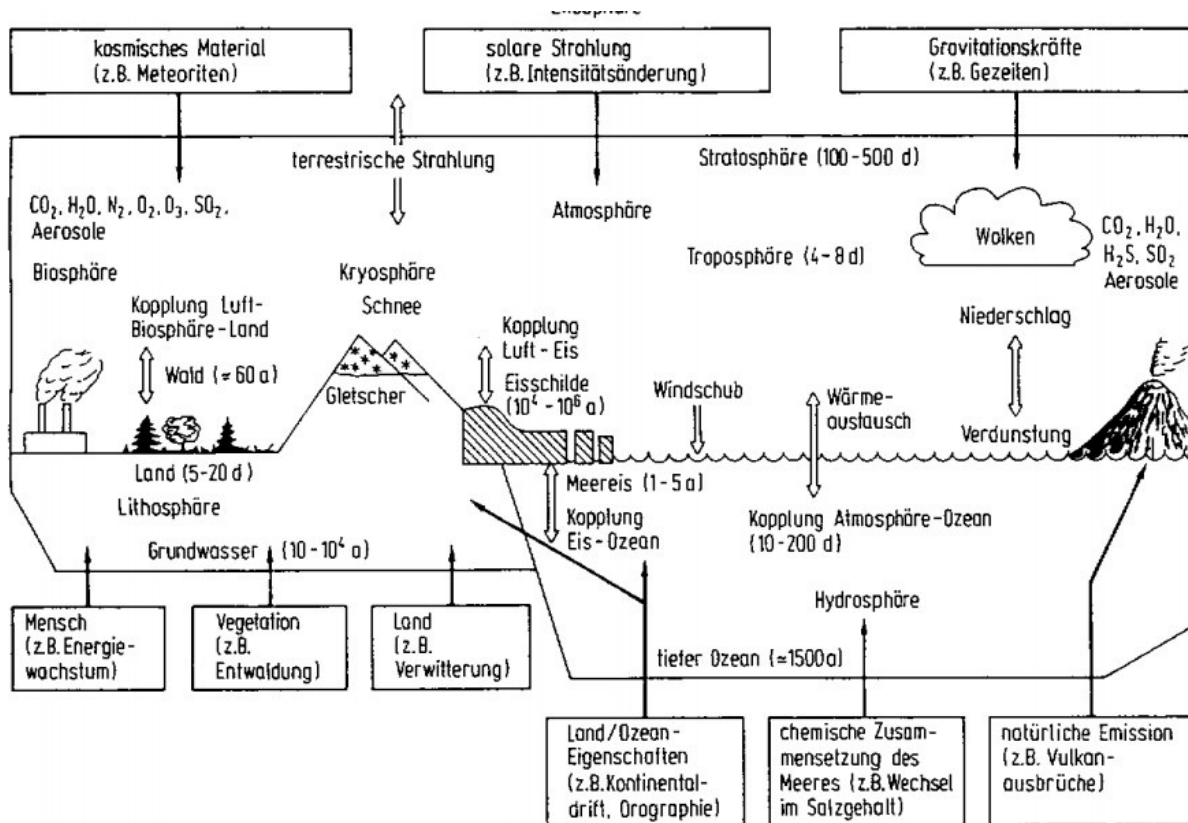


Abbildung 2.1: Schema des Klimasystems mit Subsystemen, Klimamechanismen und typischen Zeitkonstanten (Quelle: Hantel, 1997, S. 314)

Atmosphäre, als stationär angesehen. Betrachtet man hingegen das Langzeitklima (bis ca. 1000 Jahre) werden alle Komponenten, exklusive der Kontinente, als variabel angesehen.

Hieraus lässt sich ableiten, dass zeitliche und räumliche Auflösung speziell bei der Betrachtung von Klimaphänomenen und Klimamechanismen eine große Rolle spielen, i.e. für die Klimamodellierung wichtig ist.

2.2 Klimawandel

2.2.1 Allgemeines

Unter dem Begriff Klimawandel versteht man in erster Linie die Differenz des ersten absoluten Moments (Mittelwert) zweier Zeitreihen, die einen statistisch sinnvollen Zeitabstand zueinander aufweisen, des Klimaelements Temperatur. Da wie in Kapitel 1 erklärt Subsysteme miteinander interagieren, hat dies auch Einfluss auf andere Klimaelemente, was das Klima global beeinträchtigt.

2.2.2 Ursachen

Als externe Wärmequelle der Erde dient die Energie der Sonne ($S=1367 \text{ Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$). Die Entstehung von Wärmequellen (Tropen) und Wärmesenken (Pole) in der Atmosphäre,

welche sich über den Einfallswinkel der Sonnenstrahlen erklären lassen, treibt die globale Zirkulation in der Atmosphäre und den Ozeanen an und führt zu den bekannten Klimazonen. Der Treibhauseffekt jedoch beeinflusst den absoluten Wert der Temperatur. I.e. ohne diesen läge die mittlere globale Oberflächentemperatur um 33° unter dem durchschnittlichen Wert (15°C) (Vgl. Lozán et al., 2002, S. 4). Zu dem natürlichen Treibhauseffekt tragen die Treibhausgase Wasserdampf mit ca. $20,6^\circ\text{C}$, Kohlendioxid(CO_2) mit $7,2^\circ\text{C}$, Ozon (O_2) mit $2,4^\circ\text{C}$, Distickstoffoxyd (N_2O) mit $1,4^\circ\text{C}$, Methan (CH_4) mit $0,8^\circ\text{C}$ und die restlichen Treibhausgase mit $0,6^\circ\text{C}$ bei. (Vgl. Lozán et al., 2002, S. 9) Seit der Industrialisierung stieg die Emission von Kohlendioxyd, Methan und anderen Treibhausgasen an, somit wurde der Treibhauseffekt erhöht und aufgrund dessen wird dies als Hauptgrund für die Erwärmung angesehen (Siehe Abb. 2.2).

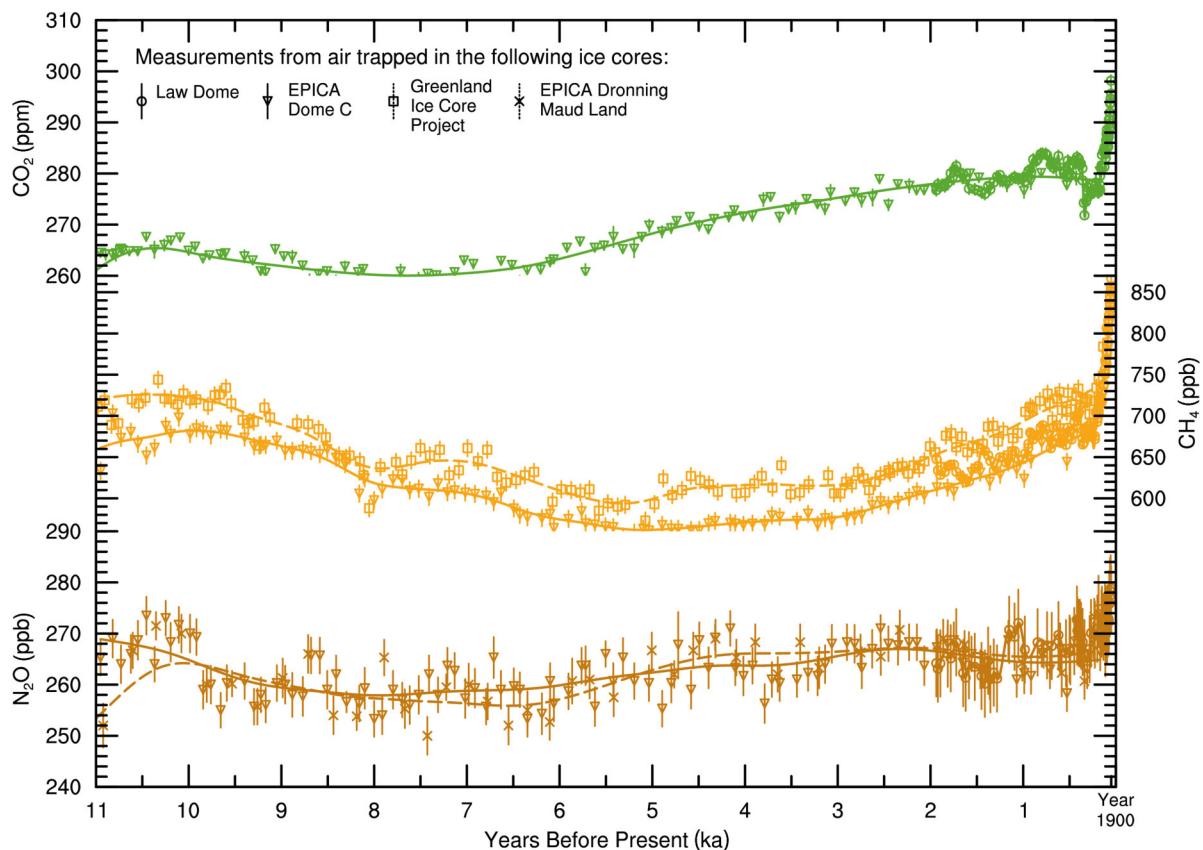


Abbildung 2.2: Zeitreihe von Kohlendioxid, Methan und Stickstoff (Quelle: IPCC, 2013)

2.2.3 Anthropogener Klimawandel

Diese Arbeit wird in weiterer Folge nicht darauf ausgelegt sein den anthropogenen Einfluss zu begründen/beweisen. Die Funktion der Treibhausgase ist physikalischer und chemischer Forschungsstand. Es fehlt somit der Nachweis einer Korrelation zwischen Mensch und Anstieg von Treibhausgasen. Folgende Punkte sollen dieses Bindeglied verständlich machen (Vgl. Lozán et al., 2002):

- Nutzung fossiler Brennstoffe (Industrialisierung)
- Intensiver betriebene Landwirtschaft und Viehhaltung (Anstieg Bevölkerung)
- Vernichtung Wälder (Lebensraumschaffung oder Gewinnung von Bodenschätzen)
- Neue Treibhausgase der Chemieproduktion wie z.B. FCKW

Das Problem ist, dass hierbei ein Transfer der Treibhausgase stattfindet von biologisch gebundenen Treibhausgasen in die Atmosphäre.

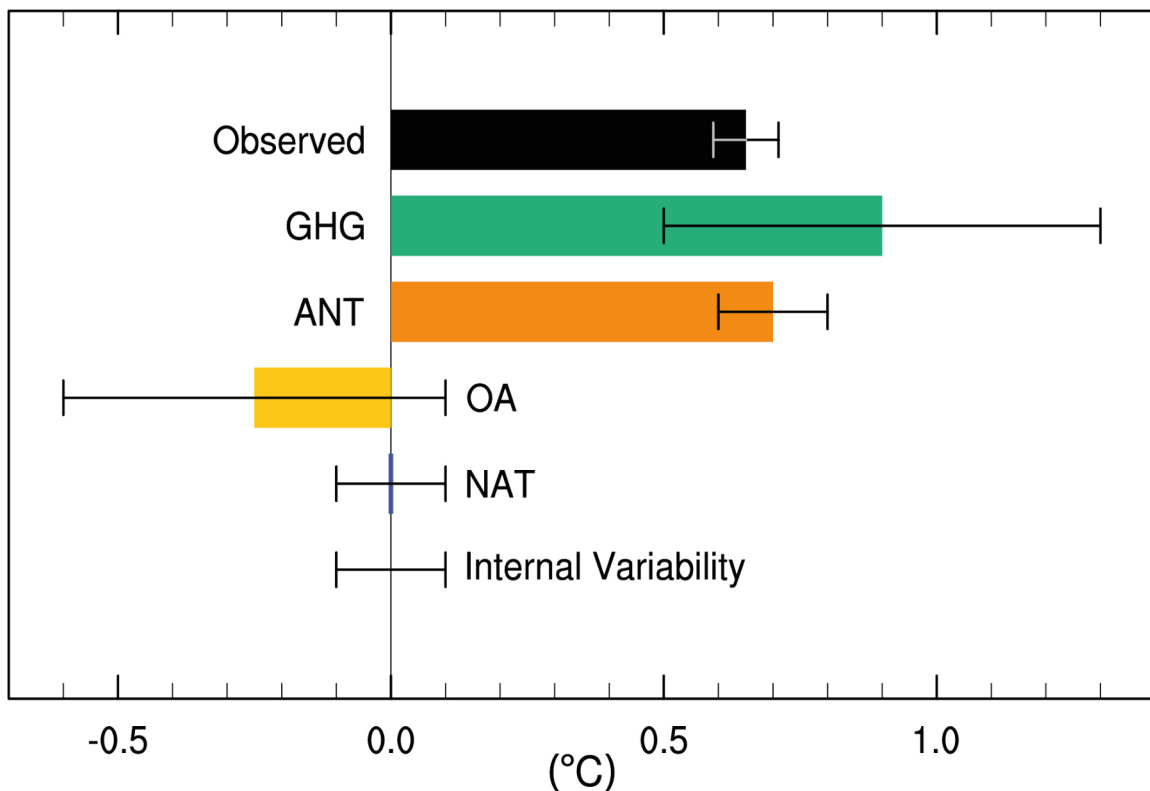


Abbildung 2.3: Vergleich der Einflussparameter auf die Erwärmung (Quelle: IPCC, 2013)

Klimamodelle repräsentieren das aktuelle physikalische und chemische Wissen. Es kann somit mit Klimamodellen der anthropogene Einfluss überprüft werden, indem Parameter geändert werden. Das Ergebnis zeigt Abb. 2.3, welches einen anthropogenen Einfluss zeigt.

2.2.4 Klimaszenarien

SRES Szenarien: Da sich alle Treibhausgase in der Atmosphäre homogen verteilen, ist für die Szenarien-Entwicklung der Emissionen und Konzentrationen eine globale Betrachtung nötig, die seit dem dritten Zustandsbericht des IPCC (2001) durch verschiedene, so genannte SRES-Szenarien erfolgt. Dabei werden mögliche Entwicklungspfade für die Weltbevölkerung, den Technologiestand, die gesamtwirtschaftliche Entwicklung, Regionalisierung/Globalisierung des Welthandels aber auch politische Faktoren wie internationales Konfliktmanagement (Möglichkeiten zur Konsensfindung etwa im Rahmen der

UNFCCC), kulturelle oder soziale Faktoren (Homogenisierung versus lokale Identität) berücksichtigt. All diese variablen Faktoren und viele andere mehr beeinflussen letztlich das Emissionsverhalten in den verschiedenen Weltregionen.

RCP Szenarien: Der wichtigste Unterschied zwischen den SRES-Szenarien und den RCP-Szenarien liegt darin, dass die RCPs klimapolitische Ziele einbinden. Der Schwerpunkt der neuen Szenarien liegt auf der Konzentration der Treibhausgase und den Strahlungsantrieb (kummulative Messung der menschlichen GHGs Emissionen aller Quellen, ausgedrückt in W/m^2). Die RCP-Szenarien werden als repräsentative Pfade bezeichnet. Es wurden vier verschiedene Pfade gewählt, die unterschiedliche Klimaschutzmaßnahmen (z.B. Steigerung der Energieeffizienz, Reduktion der fossilen Energieerzeugung, Verlangsamung der Entwaldung) repräsentieren. Die RCP-Szenarien stellen „wenn-dann“ Optionen der künftigen Entwicklung dar. (Vgl. Moss et al, 2010.):

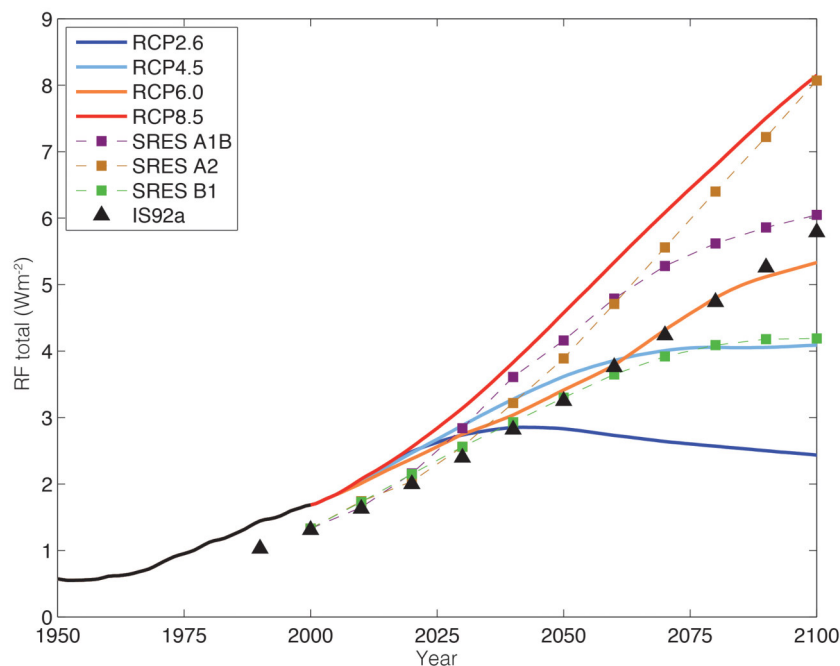


Abbildung 2.4: Vergleich verschiedener Klimaszenarien (Quelle: IPCC, 2013)

2.3 Regionalmodellierung

Grundsätzlich werden Global Climate Models (GCMs) verwendet um Klimaprojektionen zu erstellen. Allerdings wie in Abb. 2.5 ersichtlich haben GCMs eine große räumliche Auflösung. Räumliche wie auch zeitliche Auflösung sind entscheidend um atmosphärische Phänomene auflösen zu können. In Abb. 2.4 ist ersichtlich wo die jeweiligen Grenzen der verschiedenen Klimamodelle liegen. Klimaphänomene, die entweder aufgrund der zeitlichen oder räumlichen Skalierung nicht aufgelöst werden können, werden durch Parametrisierung berücksichtigt.

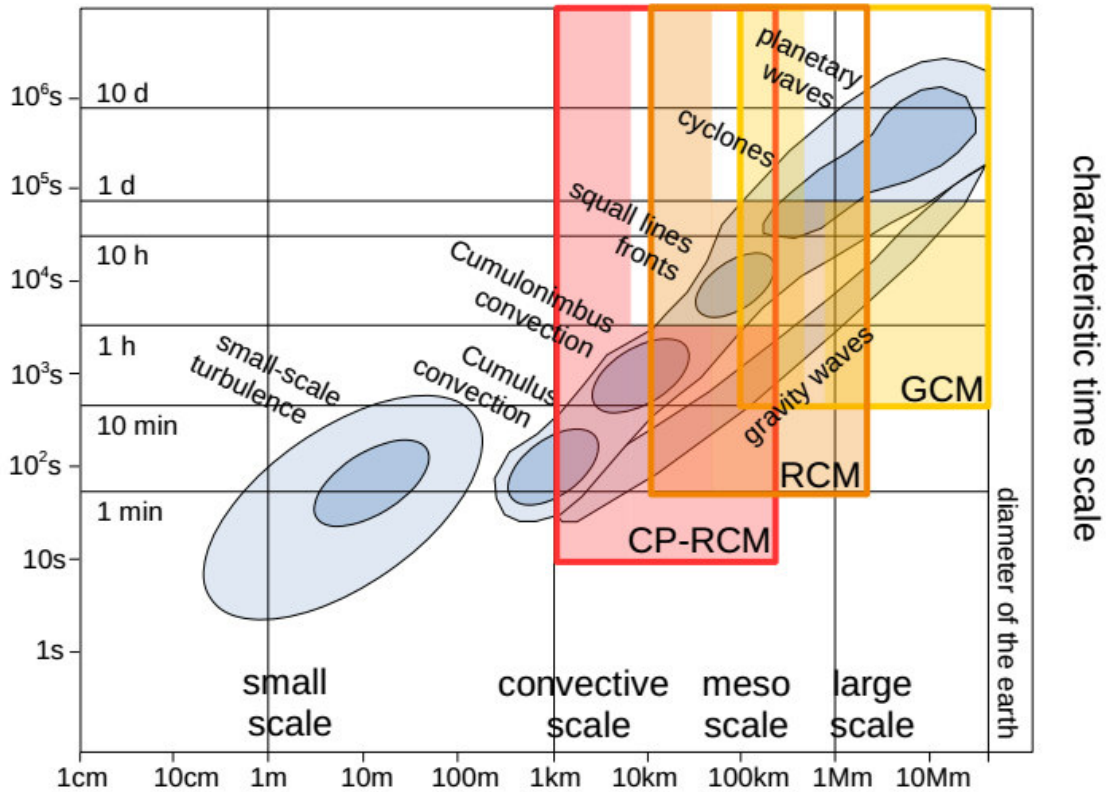


Abbildung 2.5: Vergleich verschiedener Klimaszenarien (Quelle: Maraun, 2016)

2.4 1.5°C - Ziel

2.4.1 Hintergrund

Das 1.5 Grad Ziel ist nur ein Beschluss unter vielen, der auf, von der UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change) geleiteten, Kongressen beschlossen wurde. Ziel ist es eine globale Lösung zu finden, die Aspekte wie Gerechtigkeit, spezielle individuelle Bedürfnisse, wissenschaftliche Erkenntnisse, wirtschaftliche Ausprägung uvm. berücksichtigt um die Nachteile für die jeweiligen Länder auf ein Minimum zu reduzieren. I.e. vereinfacht ausgedrückt ist es ein Konflikt zwischen ökonomischen Interessen, die sich zeitnah auswirken würden, und sozialen Interessen, wie Hungersnöte, vermehrte Naturkatastrophen, etc, welche in Korrelation mit einer globalen Erwärmung stehen und relativ zeitfern mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zunehmen werden. An dieser Stelle ein Zitat von Mahatma Gandhi: „Die Welt hat genug für jedermanns Bedürfnisse aber nicht für jedermanns Gier“. Der Prozess, um den Vertrag für das 1.5 Grad Ziel zustande zu bringen, war ein langwieriger und benötigte vielzählige COP (Conference of the Parties) Konferenzen.

Die Bedeutung für den Vertrag des „Paris Agreements“ liegt darin, dass der Vertrag nicht nur unterschrieben wurde von 196 Ländern, sondern auch ratifiziert. I.e. jeder Staat hat gewisse beschlossene Standards einzuhalten.

2.4.2 Inhalt des Vertrages

Der Inhalt dieses Kapitels lehnt sich an den Formulierungen im Pariser - Vertrag (Vgl. UNFCCC, 2015) an. Dieses Übereinkommen zielt darauf ab, durch Verbesserung der Durchführung des Rahmenübereinkommens einschließlich seines Zieles die weltweite Reaktion auf die Bedrohung durch Klimaänderungen im Zusammenhang mit nachhaltiger Entwicklung und den Bemühungen zur Beseitigung der Armut zu verstärken, indem unter anderem

- der Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur deutlich unter 2°C über dem vorindustriellen Niveau gehalten wird und Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf 1.5°C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, da erkannt wurde, dass dies die Risiken und Auswirkungen der Klimaänderungen erheblich verringern würde;
- die Fähigkeit zur Anpassung an die nachteiligen Auswirkungen der Klimaänderungen erhöht und die Widerstandsfähigkeit gegenüber Klimaänderungen sowie eine hinsichtlich der Treibhausgase emissionsarme Entwicklung so gefördert wird, dass die Nahrungsmittelerzeugung nicht bedroht wird;
- die Finanzmittelflüsse in Einklang gebracht werden mit einem Weg hin zu einer hinsichtlich der Treibhausgase emissionsarmen und gegenüber Klimaänderungen widerstandsfähigen Entwicklung.

Dieses Ziel ist nicht so zu verstehen, dass ein Überschreiten von 1.5°C eine Apokalypse losstreten würde. Sondern es sollte vielmehr als Ziel gesehen werden, welches auf einer wissenschaftlichen Basis ein akzeptables Risiko berücksichtigt.

2.5 Klimaindizes

Ein Klimaindex ist zu verstehen als eine berechnete Größe, die dazu verwendet werden kann, den Zustand und die Veränderung des Klimasystems zu beschreiben. Das Klima an einem Ort beschreibt den mittleren Zustand der Atmosphäre über einen längeren Zeitraum von zum Beispiel Monaten oder Jahren. Jeder Klimaindex bezieht sich auf bestimmte Parameter und beschreibt nur einzelne Aspekte des Klimas, daher gibt es eine Vielzahl von Klimaindizes, die in zahlreichen Veröffentlichungen definiert und untersucht wurden. Für jeden Klimaindex gibt es eine Definitionsgleichung in der die sogenannten Klimaelemente verwendet werden. Das sind messbare Parameter, die die Eigenschaften des Klimasystems hauptsächlich beeinflussen, zum Beispiel atmosphärische Parameter wie Luftdruck, Lufttemperatur, Niederschlag oder Sonneneinstrahlung, aber auch nicht-atmosphärische Parameter wie die Meeresoberflächentemperatur oder der Eisbedeckungsgrad. Für jeden dieser Klimaparameter können die Mittel- und Extremwerte, lineare Trends und Standardabweichungen der langjährigen Zeitreihen berechnet werden. Da diese Werte bereits eine Aussage über die Entwicklung des Klimas ermöglichen, ist dies eine einfache Form eines Klimaindex. Für viele Klimaparameter wurden aber speziellere Klimaindizes definiert.

Tabelle 2.1: Auflistung der in dieser Arbeit relevanten Klimaelemente und Klimaindizes (Vergleiche <https://www.climdex.org/learn/indices.html>)

ID	Indikator Name	Definition	Einheit
RR/pr	Niederschlags-summe	Niederschlagssumme eines Tages der Observationsdaten/Klimamodelle	mm
TN/tasmin	Tmin	Minimaltemperatur eines Tages der Observationsdaten/Klimamodelle	°C
TX/tasmax	Tmax	Maximaltemperatur eines Tages der KlimaObservationsdaten/Klimamodelle	°C
FD0	Frosttage	Anzahl an Tagen mit tasmin (Tägliches Minimum) $<0^{\circ}\text{C}$	Tage
SU25	Sommertage	Anzahl an Tagen mit tasmax (tägliches Maximum) $>25^{\circ}\text{C}$	Tage
WSDI	Index für Hitzeperioden	Längste Periode aufeinander folgender Tage mit tasmax $>25^{\circ}\text{C}$	Tage
CSDI	Index für Kälteperioden	Längste Periode aufeinander folgender Tage mit tasmin $<0^{\circ}\text{C}$	Tage
SDII	Tagesniederschlagsintensitätsindex	Saisonale Niederschlagssumme dividiert durch die saisonale Anzahl an Tagen mit Niederschlag ≥ 1.0 mm	mm/Tag
R01	Niederschlagstage	Anzahl der Tage mit pr ≥ 1 mm/Tag	Tage
CDD	Andauer von trockenen Tagen	Längste Periode aufeinander folgender Tage mit pr (Niederschlag) <1 mm	Tage
CWD	Andauer von Niederschlagstagen	Längste Periode aufeinander folgender Tage mit pr ≥ 1 mm	Tage
R95p	95% Perzentil des Niederschlags	Saisonale 95% Perzentil der Niederschlagstage pr ≥ 1 mm	mm

Kapitel 3

Daten

3.1 GCM - Daten

Die folgenden Ausführungen in diesem Kapitel beruhen auf dem Paper „A Summary of the CMIP5 Experiment Design“ (Vgl. Taylor et al., 2009). CMIP5 treibt ein Standardset von Modellsimulationen voran um

- zu evaluieren wie realistisch die Modelle in der Simulation der kürzlichen Vergangenheit sind.
- Projektionen des Klimasignals auf zwei Zeitskalen, nämlich zeitnahe (bis ca. 2035) und zeitferne (bis 2100 und weiter), zu entwickeln
- Faktoren, die für Differenzen in Modellprojektionen verantwortlich sind, zu verstehen und um Schlüsselrückkoppelungen, wie der von Wolken und dem Kohlenstoffzyklus, zu quantifizieren

Diese Punkte beeinflussen die Priorität der CMIP5 Experimente. Wie oben erwähnt wird der Fokus der Modellexperimente auf zeitnahe und auf zeitferne Experimente gelegt, wobei ersteres mit beobachteten Meereis initialisiert wird und letzteres mit AOGCMs (Atmosphere Ocean Global Climate Models) initialisiert wird.

Aufgrund der Vielzahl an verschiedener Simulationen im Rahmen des CMIP5 Standardsets, werden die Experimente für beide Zeitskalen in ein „Kernset“ und in ein/zwei „Schalensets“ gegliedert (siehe Abb. 3.1). Um einen systematischen Vergleich zwischen den Modellen tätigen zu können und einen qualitativen Multi-Modell Datensatz erstellen zu können, sollten die Kernsets von allen Forschungsgruppen erstellt werden. Die Tier 1 Experimente untersuchen spezifische Aspekte wie die Modelle getrieben, rückwirken und prozessieren. Die Tier 2 Experimente vertiefen diese Experimente.

Für diese Arbeit werden die Datensätze der Langzeitexperimente verwendet. Abb. 3.2 zeigt das Set der Experimente, welche AMIP Durchläufe, einen gekoppelten Kontrolldurchlauf und ein 20th Zeitalterexperiment mit allen Einflüssen (historischer Durchlauf) beinhalten. Kern der Simulationen sind das hohe Emissionsszenario (RCP8.5) und ein gelindertes Szenario (RCP4.5). Die verschiedenen Experimente, die in den verschiedenen Prioritätsstufen durchgeführt wurden, sind im Detail der Abb. 3.2 zu entnehmen.

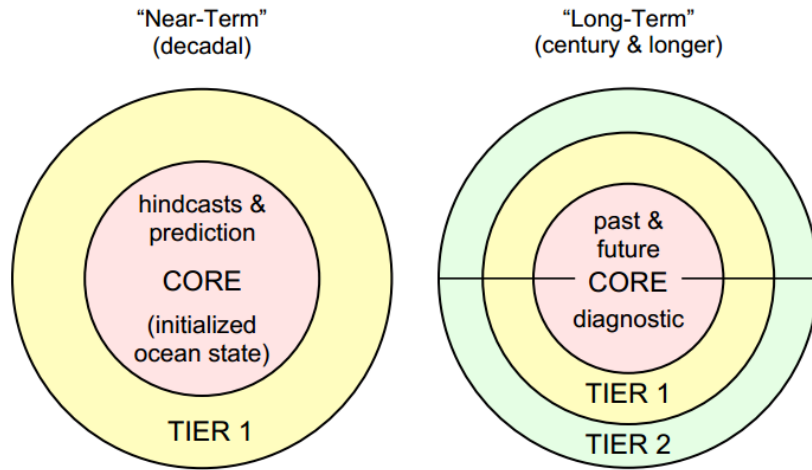


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der zwei Fokusgebiete von CMIP5 und die Prioritätsstufen der Experimente. (Quelle: Taylor et al., 2009)

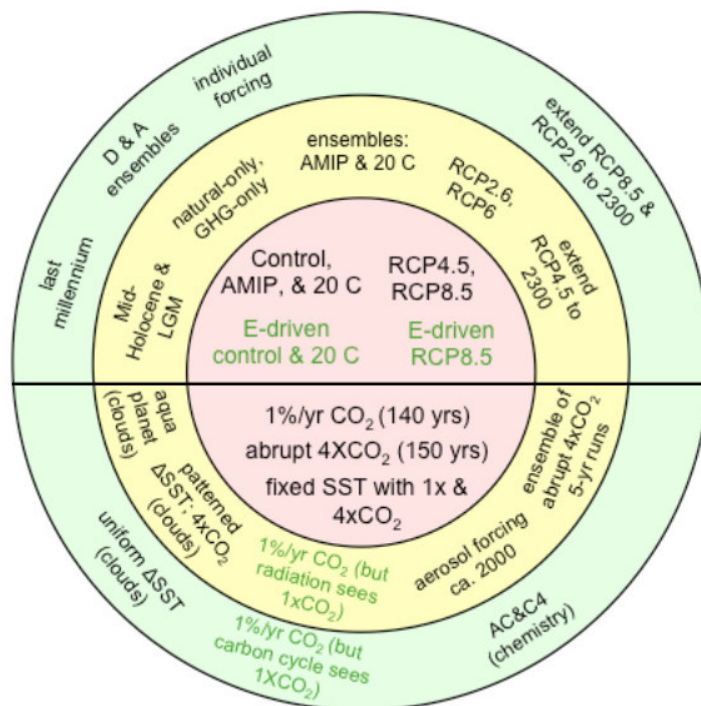


Abbildung 3.2: Schematische Zusammensetzung der CMIP5 Langzeitexperimente (Quelle: Taylor et al., 2009)

Tabelle 3.1: Verwendete Modelle der CMIP5 GCMs.

Modeling Center	Institution	Country	Model	N runs used	Reference
BCC	Beijing Climate Center	CHN	bcc-csm1-1	1	bcc.cma.gov.cn
CCCma	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	CAN	CanESM2	5	www.cccma.ec.gc.ca
CNRM-CERFACS	Centre National de Recherches Meteorologiques	FR	CNRM-CM5	1	www.cnrm.meteo.fr
CSIRO-QCCCE	Commonwealth Scientific and Industrial Res. Org.	AUS	CSIRO-Mk3-6-0	10	www.csiro.au
INM	Inst. for Numerical Math.	RUS	inmcm4	1	www.ksv.inm.ras.ru
IPSL	Institute Pierre-Simon Laplace	FR	IPSL-CM5A-LR	5	icmc.ipsl.fr
			IPSL-CM5A-MR	1	icmc.ipsl.fr
MIROC	Atmosphere and Ocean Research Institute (The University of Tokyo) and others	JAP	MIROC-ESM	1	www.aori.u-tokyo.ac.jp
			MIROC5	3	
			MIROC-ESM-CHEM	1	
MPI-M	Max-Planck-Inst. for Meteorology	GER	MPI-ESM-LR	3	www.mpimet.mpg.de
			MPI-ESM-MR	3	
MRI	Meteorological Research Institute	JAP	MRI-CGCM3	1	www.mri-jma.go.jp
			GISS-E2-H	5	www.giss.nasa.gov
			GISS-E2-H CC	1	www.giss.nasa.gov
			GISS-E2-R	16	www.giss.nasa.gov
NASA-GISS	NASA Goddard Institute for Space Studies	USA	GISS-E2-R CC	1	www.giss.nasa.gov
			GISS-E2-R	1	www.giss.nasa.gov
NCC	Norwegian Climate Centre	NOR	NorESM1-M	1	met.no
			NorESM1-ME	1	met.no
CMCC	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	ITA	CMCC CM	1	www.cmcc.it
			CMCC CMS	1	www.cmcc.it
NSF-DOE-	National Science Foundation and others	USA	CESM1(BGC)	1	www.cesm.ucar.edu
			CESM1(CAM5)	3	www.cesm.ucar.edu
NCAR	National Center for Atmospheric Research	USA	CCSM4	1	www.cesm.ucar.edu
GCESS	College of Global Change and Earth System Science	CHN	BNU-ESM4	1	www.bnu.edu.cn
FIO	The First Institute of Oceanography	CHN	FIO-ESM	3	www.fio.org.cn
LASG-CESS	Institute of Atmospheric Physics and others	CHN	FGOALS-g2	1	www.fio.org.cn

Einige Experimente benötigen Spezifikationen der Konzentrationen oder Emissionen von verschiedenen Klimabestandteilen (wie z.B. Treibhausgasen oder Aerosolen). Das Integrated Assessment Model Consortium stellt der Atmospheric Chemistry and Climate community (AC&C) die Konzentrations-, Emissions- und die sich zeitlich entwickelnden Landnutzungsänderungen bereit. Diese Daten werden von AC&C in ein globales Gitter, welche direkt von AOGCMs und ESMs genutzt werden können, konvertiert.

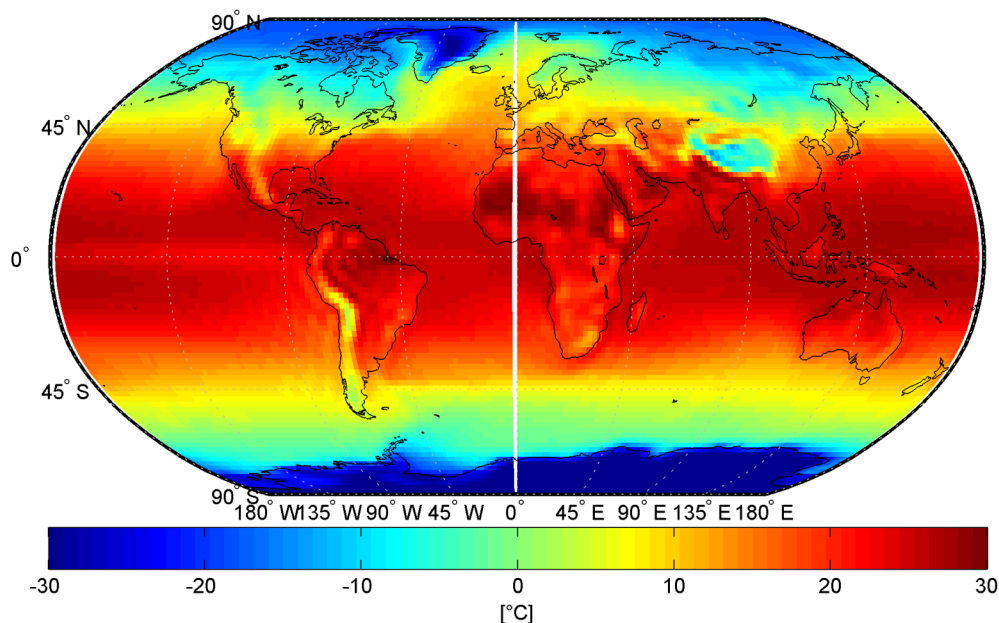


Abbildung 3.3: Veranschaulichung eines GCM – Datensatzes

Von den GCM - Datensätzen wird nur die Klimavariablen tas (Mitteltemperatur) verwendet und folgende Experimente sind von Relevanz:

- a) Historische Experiment von 1850 - 2005 (Kernexperiment)
- b) Zukunftsklimaprojektion RCP4.5 von 2006 - 2100 (Kernexperiment)
- c) Zukunftsklimaprojektion RCP2.6 von 2006 - 2100 (Tier 1 - Experiment)

ad a) Erhebt Änderungsgegebenheiten (übereinstimmend mit den Observationsdaten), welche eventuell folgende inkludieren:

- Atmosphärischer Aufbau (CO_2 inkludiert), jeweils für den Einfluss von Mensch und Vulkanen
- Sonnenstrahlung

- Emissionen oder Konzentrationen von kurzlebigen Spezies und natürlichen und anthropogenen Aerosolen oder deren Vorgänger
- Landnutzung

ad b) Der Strahlungsantrieb stabilisiert sich auf 4.5 W m^{-2} nach 2100.

ad c) Der Strahlungsantrieb stabilisiert sich auf 2.6 W m^{-2} nach 2100.

3.2 Observationsdaten E-OBS von ECA&D

3.2.1 Prozess der Datensammlung

Tägliche Datensätze für Niederschlag, Tagesmittel, Tagesminimum, Tagesmaximum und Meeresspiegeldruck sind in einer Zeitspanne von 1950 bis inklusive 2016 (aktuell) verfügbar. Die Sammlung der Daten wurde von dem Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI) durchgeführt und im Jahr 2005 wurde das Projekt auf Basis des European Climate Assessment and Data set (ECA&D) ins Leben gerufen. Dieser Datensatz verfügte europaweit über 250 Messpunkte und um die Qualität des Datensatzes, i.e. die räumliche Auflösung, zu verbessern wurden weitere Datensätze von Global Climate Observing (GCOS), Global History Climatology Network (GHCND) und Mesoscale Alpine Programme (MAP) hinzugefügt. Durch den Zugewinn neuer Messdaten wurde die Anzahl an Messstationen von 250 auf 2316 (Stand 2008, exakte Anzahl variiert) Stationen verbessert. Für ein hochauflösendes Gitter ($25 \times 25 \text{ km}$) bräuchte man, wenn man als die Gesamtfläche Europas mit $10.000.000 \text{ km}^2$ annimmt, ca. 16.000 Stationen. I.e. Interpolation der Messwerte ist erforderlich. (Vgl. Haylock et al., 2008)

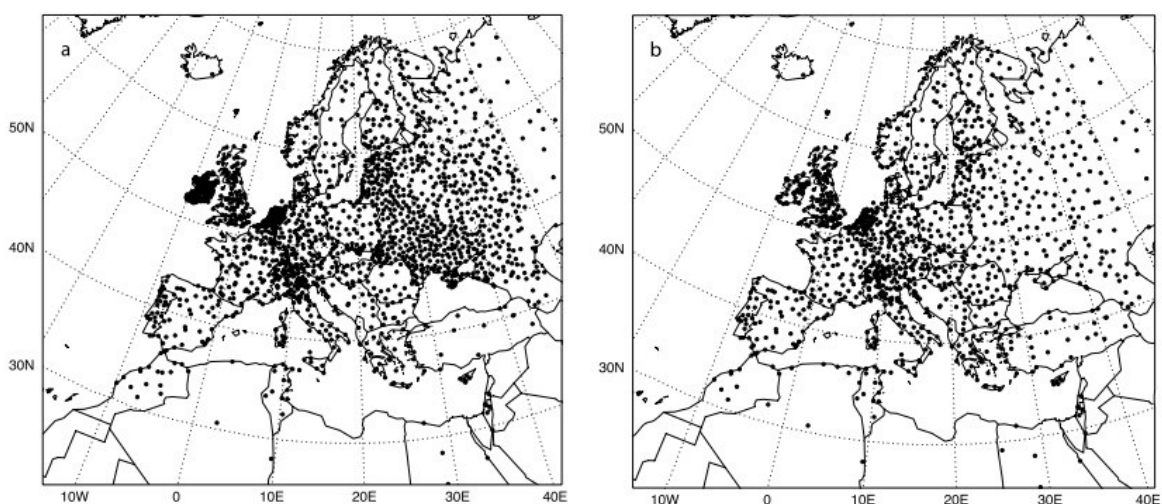


Abbildung 3.4: Messstationen (a) Niederschlag und (b) Mitteltemperatur (Quelle: Haylock et al., 2008)

Klimavariablen	Longitude	Lattitude	Auflösung	rot./reg.	Zeitraum	Version
tn	40°W-75°E	25°N-75°N	0.22	rot	1971-2000	17.0
tx	40°W-75°E	25°N-75°N	0.22	rot	1971-2000	17.0
rr	40°W-75°E	25°N-75°N	0.22	rot	1971-2000	17.0

Tabelle 3.2: Rohdatensätze der EOBS - Daten

3.2.2 Verwendete Klimavariablen

Die verwendeten Klimavariablen sind, Maximaltemperatur (tx), Minimaltemperatur (tn) und Niederschlag (rr), welche in Tab. 3.2 aufgelistet sind. Abb. 3.5 zeigt die räumliche Ausbreitung des Gitters für die Saison März, April und Mai (MAM) im Jahr 1971.

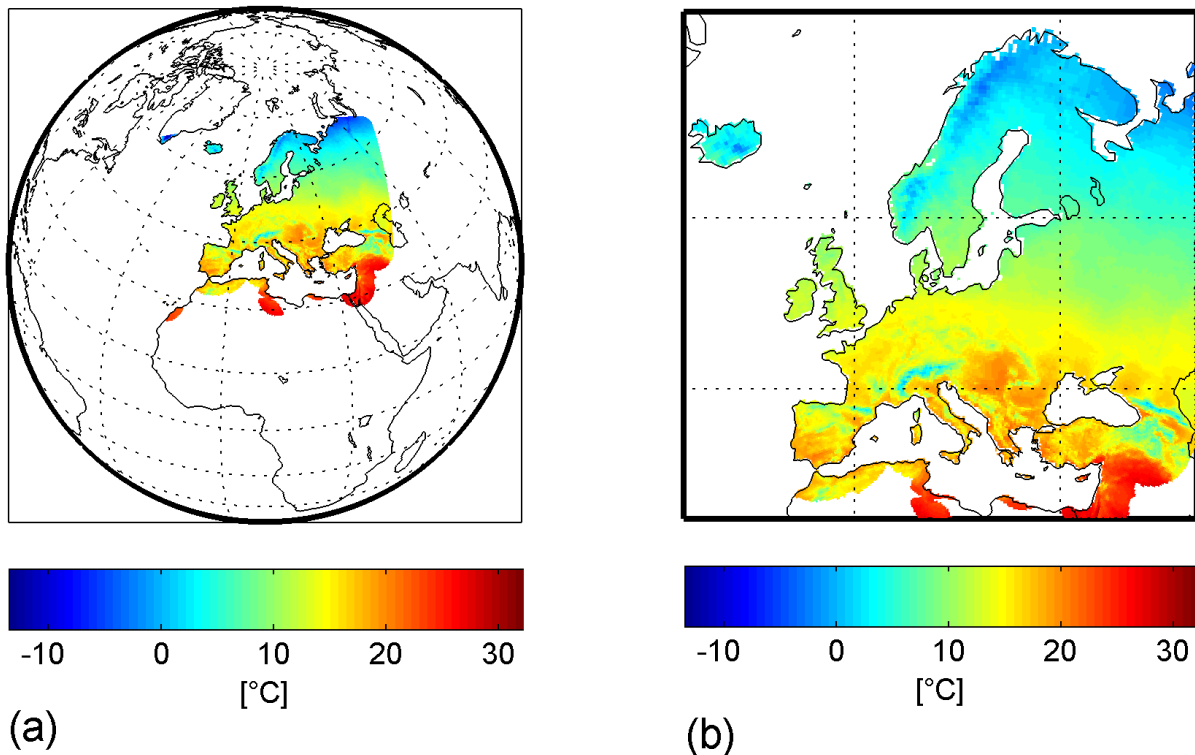


Abbildung 3.5: Es ist jeweils tasmax für MAM 1971 (a) Geographische Lokalität des Datensatzes und (b) zentriert auf Europa

3.2.3 Qualität der Daten

Zu bemerken ist, dass Messdaten nicht als Absolutwerte zu sehen sind, die die Wirklichkeit perfekt repräsentieren, sondern auch diese systematischen und zufälligen Messfehlern unterliegen. Folgende Zeilen erörtern ein paar Ursachen diesbezüglich.

Die Rohdaten unterliegen einer Serie von Qualitätstests, um physikalisch unlogische Werte zu entfernen. Dazu zählen z.B. Niederschlag kleiner 0 und größer 300 mm; Temperatur höher als 60°C; Minimaltemperatur größer als Maximaltemperatur; und mehr als 10 Tage mit dem selben (ungleich 0) Niederschlagswert.

Temperaturschübe werden durch Berechnung der Tage, die mehr als das Fünffache der Standardabweichung vom Mittel der Referenzzeit, Intervall $[-5, 5]$ Tage zum Kalendertag über alle Jahre, entfernt. Dabei wird der jeweils untersuchte Kalendertag aus dem Intervall, das gemittelt wird, ausgeschlossen, um den Einfluss von diesem zu unterbinden. (Vgl. Haylock et al., 2008)

Somit stellt EOB-S Datensätze mit der Standardabweichung bezüglich der Beobachtungsdaten zur Verfügung (Abb. 3.6), welche für spätere Analysen von Bedeutung ist.

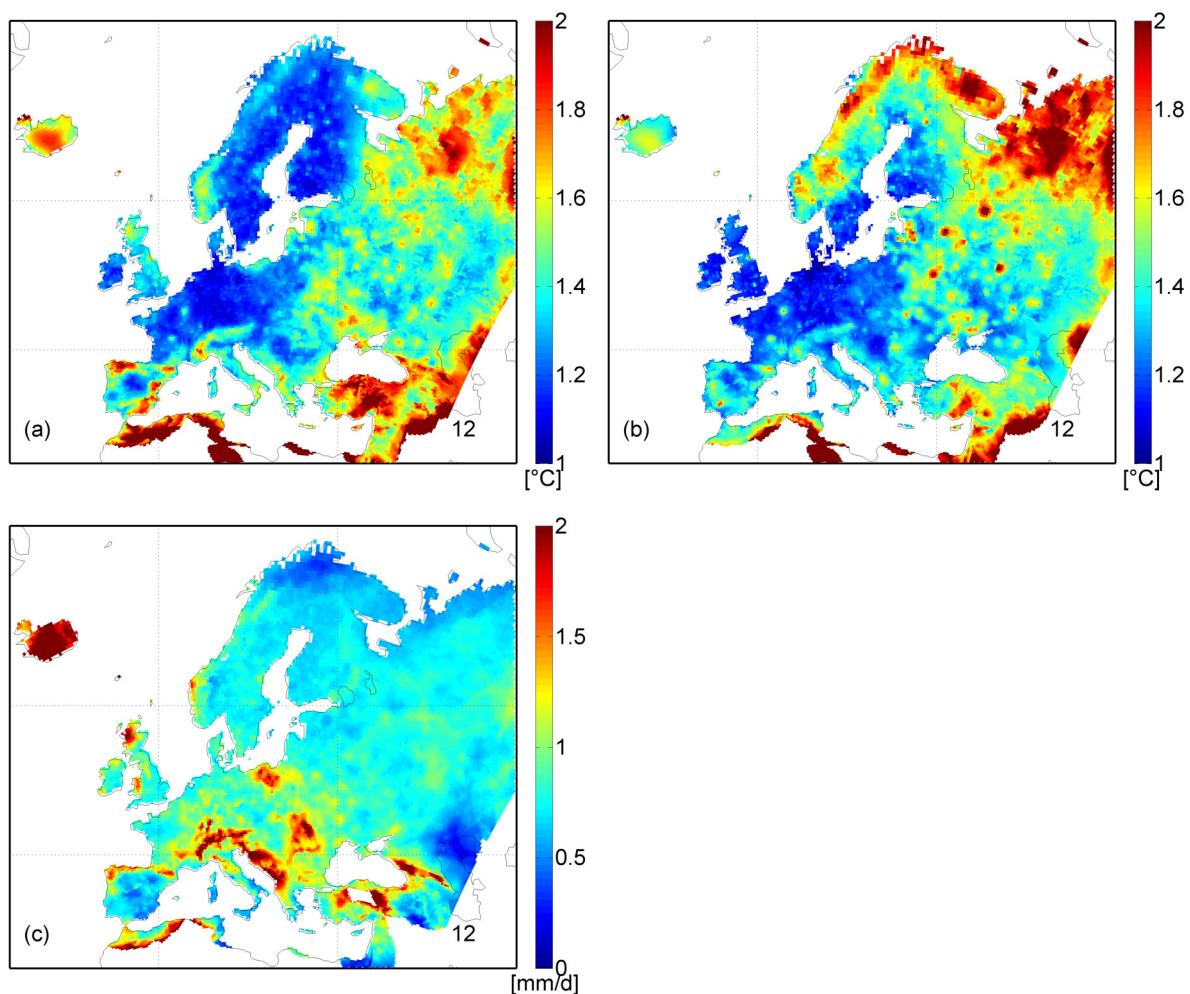


Abbildung 3.6: Zeigt die Standardabweichung der Observationsdaten für die Saison MAM 1971 für (a) Maximaltemperatur, (b) Minimaltemperatur und (c) Niederschlag

3.3 RCM - Daten von EURO-CORDEX

Das World Climate Research Programme (WCRP) hat 2009 eine Task Force for Regional Climate Downscaling (TFRCD) ins Leben gerufen, welche die CORDEX Initiative gründete und regionale Klimasignalprojektionen für terrestrische Regionen der Erde entwickelten. Die Hauptziele der CORDEX Initiative sind es einen abgestimmten Rahmen für

Modellevaluierungen, einen Klimaprojektionsrahmen und eine Schnittstelle zwischen den Klimaforschungszentren zu schaffen.

EURO-CORDEX ist der europäische Zweig der CORDEX Initiative und entwickelt Klimasimulierungsensembles, welche auf dynamische und empirisch statistische Downscaling Methoden basieren. Diese Modelle werden getrieben mit GCMs aus dem CMIP5 Projekt, wobei bei der Wahl der GCMs darauf geachtet wird, dass eine gute Performance des Modells über Europa gegeben ist und die Verteilung geeignet abgetastet ist. Für Europa existierten aber schon zuvor regionale Klimamodelle, nämlich von Ensembles und Prudence. Diese Klimaszenarien waren bis zu einer räumlichen Auflösung von 25 km erhältlich und basierten auf den SRES Emissionsszenarien. Die EURO-CORDEX Simulationen berücksichtigen des weiteren die RCP-Szenarien und verbessern die räumliche Auflösung auf bis zu 12 km.

Einige Fakten zu EURO-CORDEX:

- Region: 27N - 72N, 22W - 45E
- Räumliche Auflösung:
 - EUR-11: 0.11° (12,5 km)
 - EUR-44: 0.44° (50 km)
- Perioden
 - Hindcast (ERA Interim): 1989-2008
 - Control: 1951-2005 (1981-2010, 1951-80)
 - Szenario: 2006-2100

Kernprojekte für EURO-CORDEX sind die RCP4.5 und RCP8.5 Szenarien, es liegen aber auch 5 Ensembles für das RCP2.6 Szenario vor.

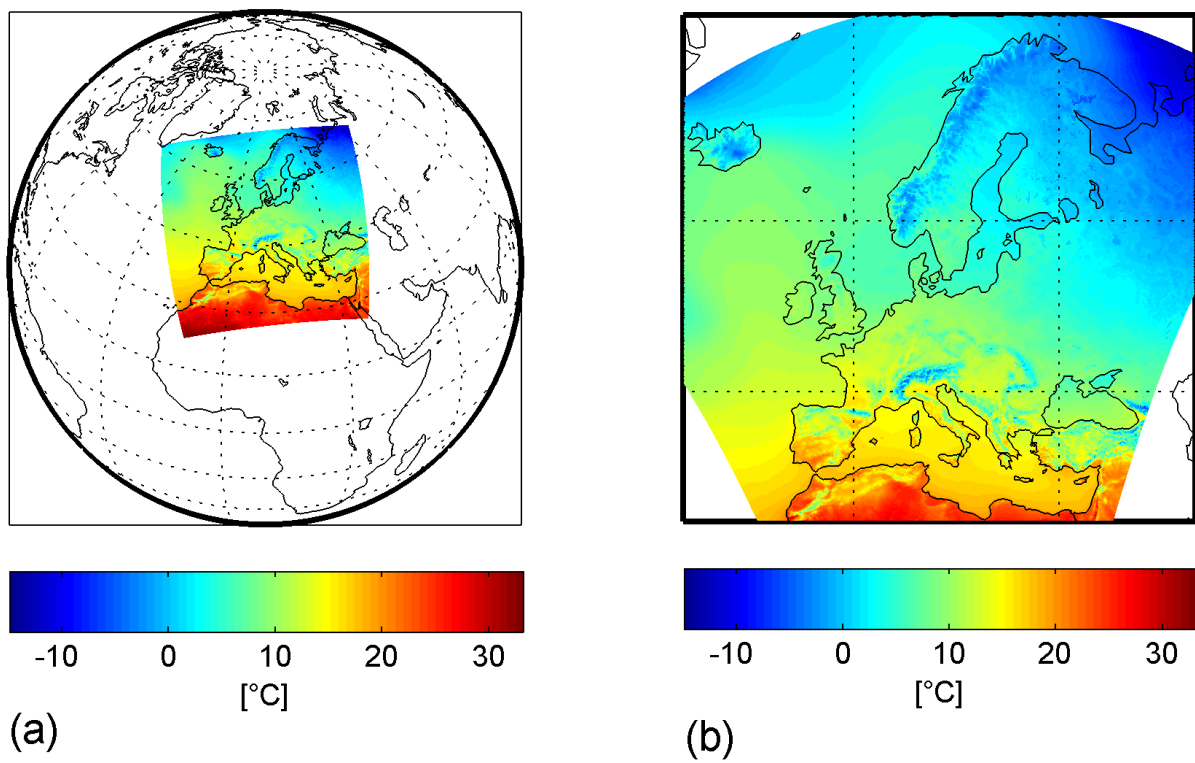


Abbildung 3.7: Es ist jeweils tasmax für MAM 1971 (a) Geographische Lokalität des Datensatzes und (b) zentriert auf Europa

Tabelle 3.3: Übersicht der verwendeten EURO-CORDEX RCMs.

Model	Institution	Driven Model	Boundary Forcing	Horizontal Resolution
ALADIN53 v1	Centre National de Recherches Meteorologiques	CNRM-CM5	Nudged towards ERA-Interim outside the EURO-CORDEX domain	0.11°, 0.44°
CCLM 4.8.17	CLM Community (CLMCOM)	CNRM-CM5, MPI-ESM-LR, ICHEC EC-EARTH	ERA-Interim directly	0.11°, 0.44°
HIRHAM 5	Danish Meteorological Institut (DMI)	ICHEC EC-EARTH	ERA-Interim directly	0.11°, 0.44°
REMO 2009	Climate Service Center (CSC)	MPI-ESM-LR r1i1p1 und r2i1p1	ERA-Interim directly	0.11°, 0.44°
RACMO 2.2	Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI)	ICHEC EC-EARTH	ERA-Interim directly	0.11°, 0.44°
RCA 4	Swedish Meteorological and Hydrological Institute (SMHI)	CNRM-CM5, ICHEC EC-EARTH, MPI-ESM-LR	ERA-Interim directly	0.11°, 0.44°
WRF 3.3.1	Institut Pierre Simon Laplace/Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (IPSL-INERIS)	IPSL CM5A MR	ERA-Interim directly	0.11°, 0.44°

3.4 Analyse der RCM - Daten

3.4.1 Analyse mittels Boxplots

Um grob einen Überblick über die Datensätze (statistische Momente etc.) zu bekommen bieten sich einige statistische Methoden an. Im ersten Schritt werden die 12 RCM Modelldaten und die EOBS Daten für tasmax, tasmin und pr mit Box - Plots dargestellt. Für die Zeitreihen wurde jeweils nur ein Gitterpunkt betrachtet, nämlich der Graz (Längengrad: 15.44 und Breitengrad: 47,07) am nächsten liegende. In Abb. 3.8 erkennt man, dass die meisten Datenpunkte innerhalb der Whiskers liegen. Nur in der Saison DJF gibt es einige Ausreisser. Schon hier ist die Wichtigkeit des Multimodelmeans erkennbar, da die Abweichungen der einzelnen Modelle bezüglich des Medians gegenüber der EOBS Messdaten sich im Mittel minimieren. Um die einzelnen Modelle identifizieren zu können wurde jeweils das Kürzel der Institution und das treibende Modell (in Klammer gesetzt) angegeben.

In Abb. 3.9 sind die Daten für tasmin dargestellt. Wie schon bei tasmax ist auch hier auffällig, dass die größte Streuung der Daten in der Saison DJF stattfindet. Auch der Quantilabstand ist speziell bei der Saison DJF bei (j), (k) und (l) im Vergleich bedeutend geringer.

Zur Vollständigkeit wird in Abb. 3.10 der Niederschlag pr dargestellt. Wie zu erwarten zeigt dies ein vollständig anderes Bild, als die Box Plots betreffend der Temperatur. Da eine Majorität der Werte 0 beträgt liegt der Median bei 0, i.e. mehr als die Hälfte der Daten ist 0. Da der einseitige Quantilabstand dementsprechend ebenfalls sehr gering ist werden die Regentage als Ausreisser dargestellt.

3.4.2 Analyse mittels Prüfverfahren

Eine weitere Möglichkeit besteht darin Prüfverfahren anzuwenden. Angewendet wurde ein t - Test, der den Unterschied auf Zufälligkeit zwischen zwei Datenreihen bezüglich des Mittelwertes überprüft und ein F - Test, der den Unterschied bezüglich der Varianzen auf Zufälligkeit überprüft. Eine 1 als Testergebnis entspricht der Nullhypothese, dass die Mittelwerte bzw. Varianzen der Zeitreihen zufällig sind zu einem Signifikanzniveau von 95%. Eine 0 als Testergebnis entspricht der Alternativhypothese, dass die Mittelwerte bzw. Varianzen der Zeitreihen nicht zufällig sind. Bei diesen Prüfverfahren wird die Notwendigkeit des Multimodelmeans verdeutlicht. Der Test wurde jeweils zwischen den einzelnen Modelldaten und den EOBS - Daten durchgeführt, wie auch zwischen dem Multimodelmean und den EOBS - Daten. Das Ergebnis zeigt, dass bei den einzelnen Modellen großteils die Alternativhypothese zutrifft, aber bei dem Multimodelmean die Nullhypothese angenommen wird.

Angewendet werden die Prüfverfahren auf die Datensätze von tasmax (Tab. 3.4) und auf tasmin (Tab. 3.5) da der Test nur für normalverteilte Daten zulässig ist. Jeweils wird nur die Zeitreihe in einem Gitterpunkt über Graz betrachtet.

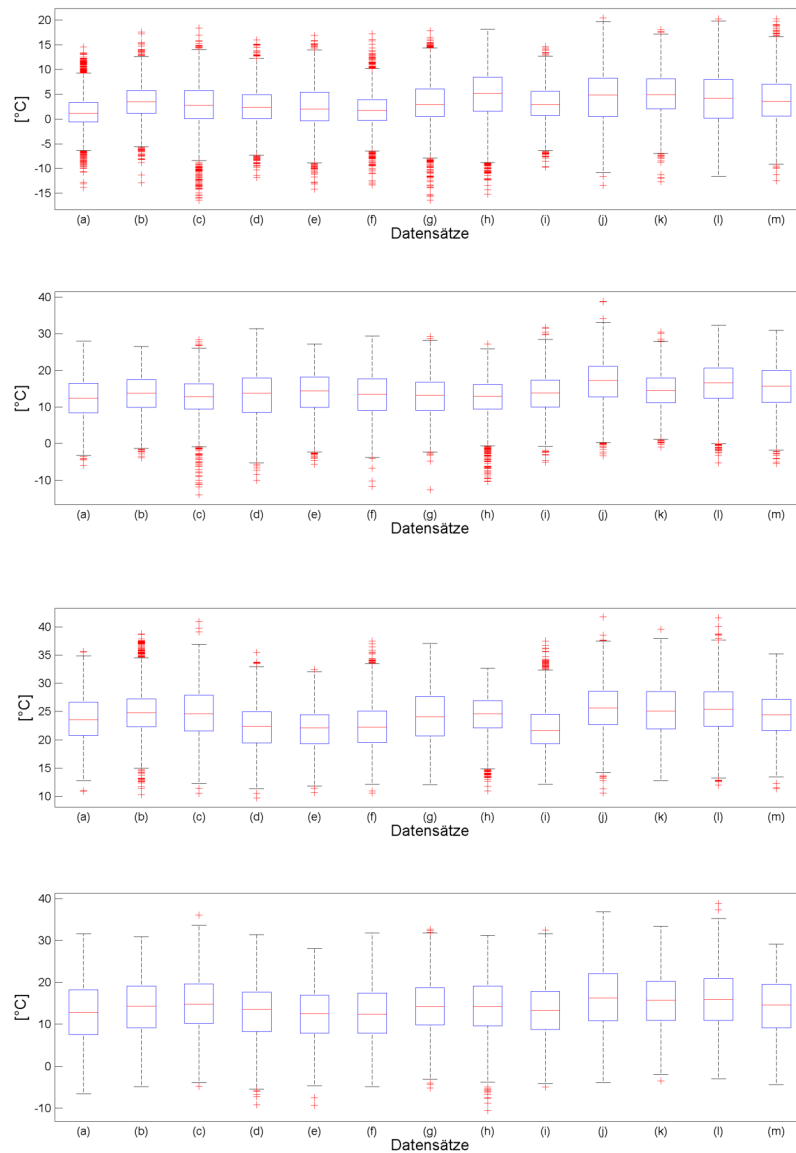


Abbildung 3.8: Gezeigt ist jeweils das zeitliche Mittel von tasmax einer Klimaperiode (1971 - 2000) räumlich auf einen Gitterpunkt gemittelt (Von oben nach unten DJF, MAM, JJA und SON) für (a) CLMcom (CNRM-CM5), (b) CNRM (CNRM-CM5), (c) SMHI (CNRM-CM5), (d) KNMI (ICHEC EC-EARTH), (e) DMI (ICHEC EC-EARTH), (f) CLMcom (ICHEC EC-EARTH), (g) SMHI (ICHEC EC-EARTH), (h) IPSL-INERIS (IPSL CM5A MR), (i) Clmcom (MPI-ESM-LR), (j) MPI-CSC (MPI-ESM-LR) r1, (k) SMHI (MPI-ESM-LR), (l) MPI-CSC Clmcom (MPI-ESM-LR) r2 und (m) EOBS Daten

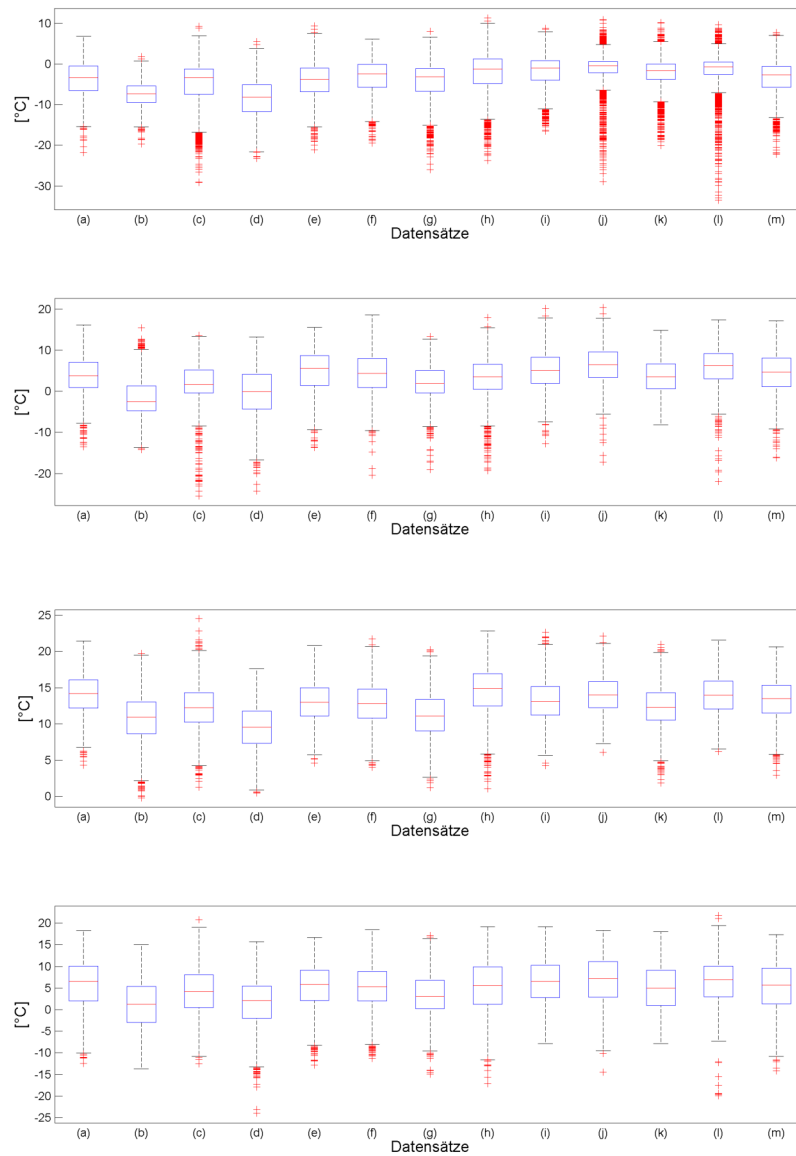


Abbildung 3.9: Gezeigt ist jeweils das zeitliche Mittel von tasmin einer Klimaperiode (1971 - 2000) räumlich auf einen Gitterpunkt gemittelt (Von oben nach unten DJF, MAM, JJA und SON) für (a) CLMcom (CNRM-CM5), (b) CNRM (CNRM-CM5), (c) SMHI (CNRM-CM5), (d) KNMI (ICHEC EC-EARTH), (e) DMI (ICHEC EC-EARTH), (f) CLMcom (ICHEC EC-EARTH), (g) SMHI (ICHEC EC-EARTH), (h) IPSL-INERIS (IPSL CM5A MR), (i) Clmcom (MPI-ESM-LR), (j) MPI-CSC (MPI-ESM-LR) r1, (k) SMHI (MPI-ESM-LR), (l) MPI-CSC Clmcom (MPI-ESM-LR) r2 und (m) EOBS Daten

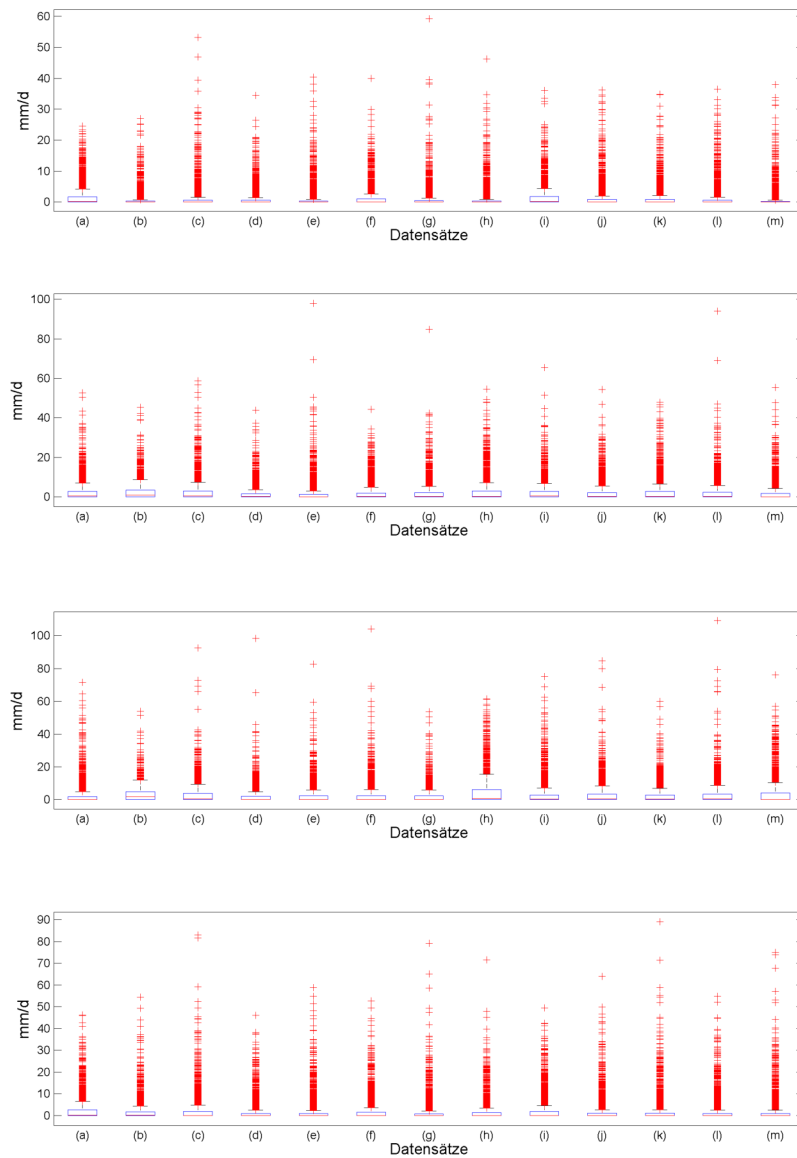


Abbildung 3.10: Gezeigt ist jeweils das zeitliche Mittel von pr einer Klimaperiode (1971 - 2000) räumlich auf einen Gitterpunkt gemittelt (Von oben nach unten DJF, MAM, JJA und SON) für (a) CLMcom (CNRM-CM5), (b) CNRM (CNRM-CM5), (c) SMHI (CNRM-CM5), (d) KNMI (ICHEC EC-EARTH), (e) DMI (ICHEC EC-EARTH), (f) CLMcom (ICHEC EC-EARTH), (g) SMHI (ICHEC EC-EARTH), (h) IPSL-INERIS (IPSL CM5A MR), (i) Clmcom (MPI-ESM-LR), (j) MPI-CSC (MPI-ESM-LR) r1, (k) SMHI (MPI-ESM-LR), (l) MPI-CSC Clmcom (MPI-ESM-LR) r2 und (m) EOBS Daten

3.4.3 Analyse mittels Scatterplots, Quantilplots und Verteilungsplots

Folgende Grafiken (Abb. 3.11 - Abb. 3.13) zeigen die Verteilungsfunktion, einen Scatterplot und einen Quantilplot, jeweils saisonal dargestellt für die Klimavariablen t_{\min} , t_{\max} und pr eines Gitterpunktes (Graz). Beim Quantilplot, wie auch beim Scatterplot wird auf der Abszisse die Messdaten (EOBS - Daten) und auf der Ordinate die Modelldaten (Multimodellmean) dargestellt. Speziell von Bedeutung ist der Scatterplot (hellgraue Kreuze). Erwartet man eine hohe Korrelation müsste dieser der schwarzen Linie folgen. Eine Interpretation für diese Ergebnisse ist, dass Modellwerte Extremwerte stark unterschätzen, sprich geringere Maximaltemperaturen aufweisen, wie auch höhere Minimaltemperaturen. Speziell beim Niederschlag erkennt man eine geringe Korrelation, weil die Messdaten sehr viele Messpunkte bei 0 Grad aufweisen, allerdings Extremniederschläge im Modell, wie im Quantilplot ersichtlich, stark unterschätzt werden.

Grundsätzlich ist es schwierig die Zuverlässigkeit der Datensätze mittels Quantilplot und Verteilungsplots zu zeigen, weil bei der Klimamodellierung Wettergeneratoren verwendet werden. I.e. auf Basis diverser Datensätze werden Zufallszahlen auf die Modelldaten angewandt um möglichst realistische Ergebnisse zu bekommen.

Weiters ist die Dichtefunktion dargestellt (linksseitig). Die zu erwartenden Dichtefunktionen für Temperatur und Niederschlag, nämlich eine Normalverteilung und eine Betaverteilung, sind gut ersichtlich. Zusammen aufgetragen sind die Dichtefunktionen für die EOBS - Daten, die Rohdaten der RCMs und die biaskorrigierten RCM - Daten. Auf letzteres wird später genauer eingegangen.

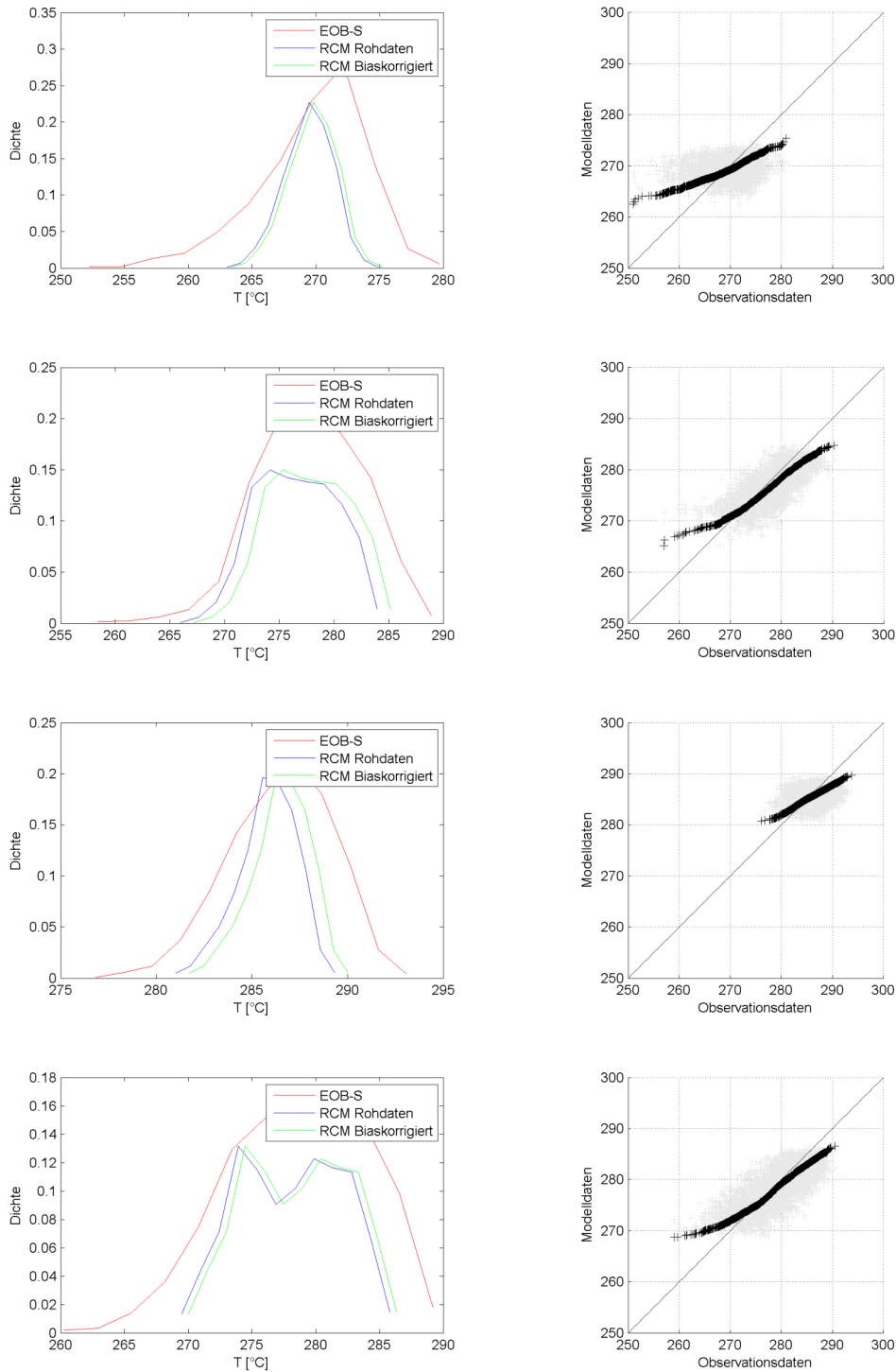


Abbildung 3.11: Linksseitig sind die Verteilungsfunktionen dargestellt absteigend mit den Saisonen DJF, MAM, JJA und SON für tasmax, Rechtsseitig der Quantilplot und der Scatterplot für tasmax

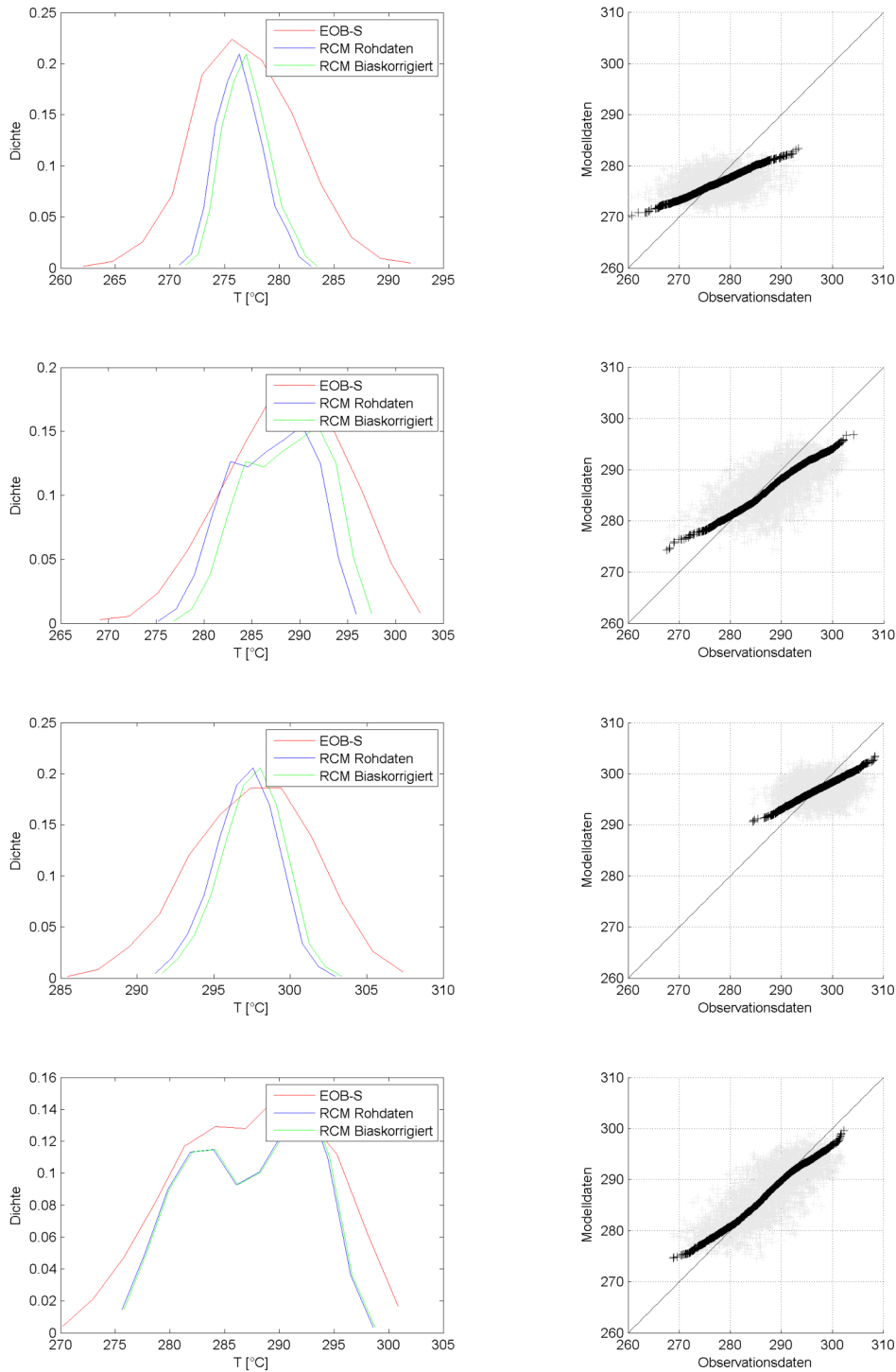


Abbildung 3.12: Linksseitig sind die Verteilungsfunktionen dargestellt absteigend mit den Saisonen DJF, MAM, JJA und SON für tasmin, Rechtsseitig der Quantilplot und der Scatterplot für tasmin

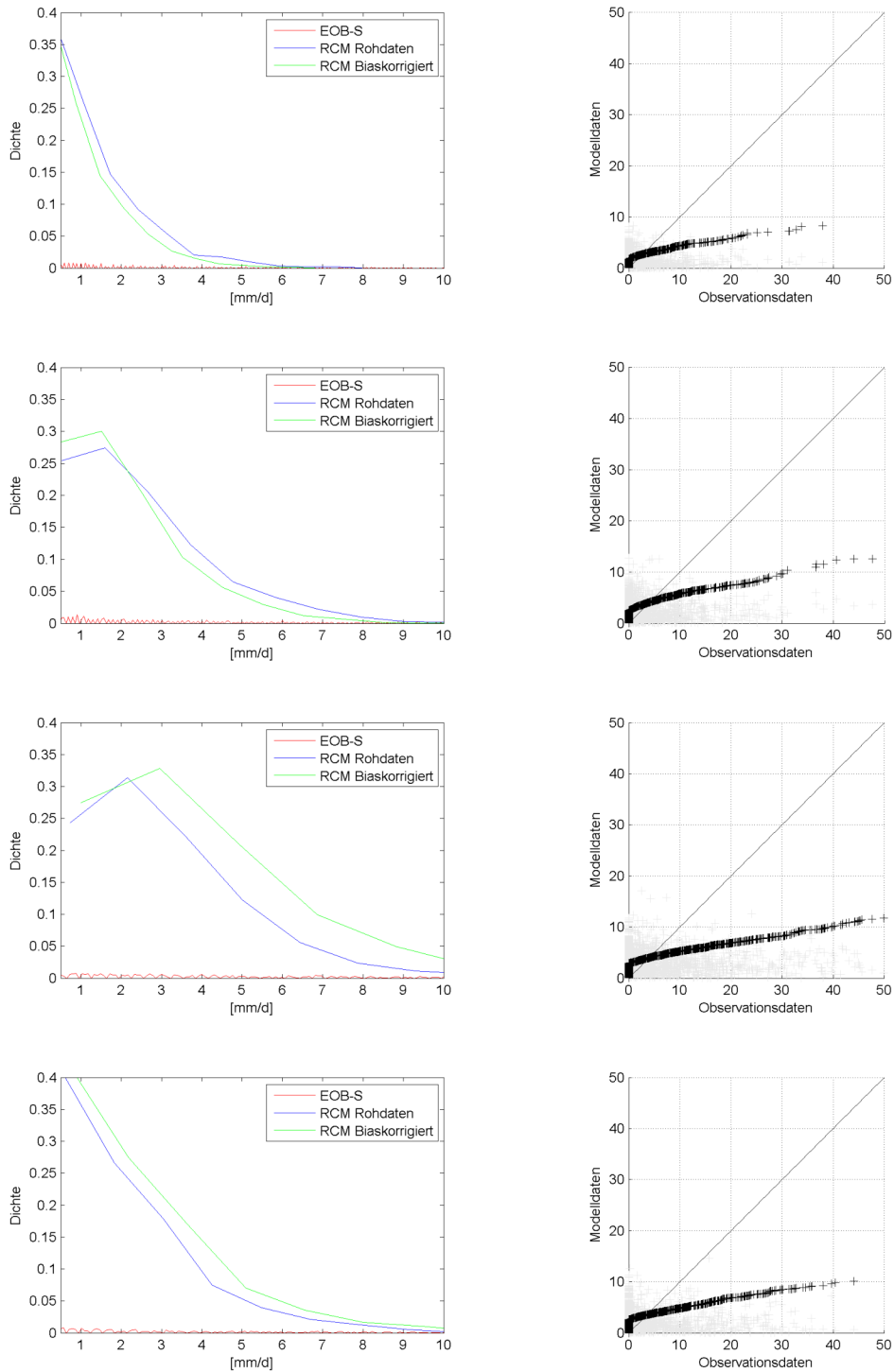


Abbildung 3.13: Linksseitig sind die Verteilungsfunktionen dargestellt absteigend mit den Saisonen DJF, MAM, JJA und SON für pr, Rechtsseitig der Quantilplot und der Scatterplot für pr

Kapitel 4

Methoden

4.1 Präprozessierung

Zu Beginn werden die Daten mit dem Programm CDO (Climate Data Operators) vorbearbeitet. Die Rohdatensätze von GCMs, RCMs und EOBs müssen zuerst zeitlich, wie auch räumlich homogenisiert werden. Details dazu in den nächsten Unterpunkten.

4.1.1 GCMs

Das 1.5°C Ziel bezieht sich in räumlicher Dimension über den gesamten Globus. I.e. wird für alle GCMs der Mittelwert aller Datenpunkte pro Zeitabschnitt berechnet. Die zeitliche Definition des 1.5°C Ziels besagt, dass dies die Erwärmung von 1.5°C darstellt von der vorindustriellen Zeit bis zum Jahr 2100. Also wird die zeitliche Ausprägung der Zeitreihe von 1850 - 2100 gewählt und die zeitliche Auflösung wird als saisonale festgelegt, i.e. 4 Datenpunkte pro Jahr.

4.1.2 EOBs

Diese Datensätze sind auf der Internetseite www.ecad.eu verfügbar und werden als Basisobservationsdatensatz auf den Zeitraum von 1971 - 2000 gebracht. Um RCMs und E-OBS in Verbindung setzen zu können muss das Gitter der einzelnen Datensätze übereinstimmen. Wie in Tab. 3.2 ersichtlich wird für das E-OBS Gitter ein rotiertes mit der Auflösung von $0,22^\circ \times 0,22^\circ$ verwendet. In Abb. 4.1 ist ersichtlich, dass das E-OBS Gitter hinsichtlich der räumlichen Ausprägung größer ist und wird an das Gitter des RCM - Datensatzes angepasst.

4.1.3 RCMs

Wichtig zu erwähnen ist, dass zur Betrachtung des Klimasignals nicht eine durchgehende Zeitreihe zur Betrachtung dient, sondern jeweils zwei Klimaperioden (nach Empfehlung der World Meteorological Organization 30 Jahre). Der Grund hierfür ist, dass man einen Konsens zwischen Nutzen und Rechenleistung finden muss und für den Kontext dieser Arbeit wird die Betrachtung zweier Zeitperioden als ausreichend empfunden. Als historischer Referenzzeitraum wird der Zeitraum von 1971 - 2000 gewählt und als Untersuchungszeitraum der Zeitraum von 2071 - 2100. Hier wird ein rotiertes Gitter mit der Auflösung von

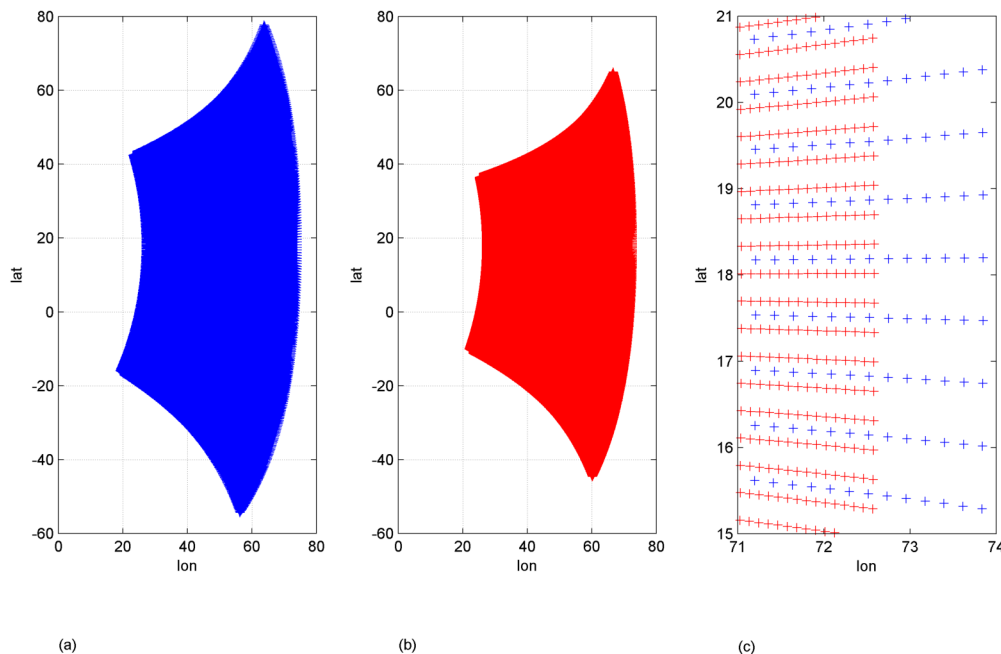


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Gitter in (a) RCM, in (b) E-OBS und in (c) Vergleich der Auflösung

0,11 Grad verwendet. Um dies an das E-OBS Gitter anzupassen wird dieses interpoliert. Hierfür wird eine bilineare Interpolation verwendet, da die Bedingung für diese Methode ein quadrilaterales kurvenlineares Gitter erfüllt ist. Die verwendeten Gitter haben also eine 0.22° Auflösung.

4.2 Pattern Scaling

Die Theorie dieses Kapitels lehnt sich an das Paper von Timothy J. Osborn an (Vgl. Osborn et al., 2016) Für die meisten Klimawandelszenarien, erhält man detaillierte Strukturen (geographisch, saisonal und multi-variable Strukturen) gewöhnlich aus Simulationen mit GCMs oder RCMs. Die Magnitude der Änderung (Klimasignal) wird nicht immer aus dem selben GCM oder RCM erhalten, weil Strukturen skaliert werden um

- Fälle mit unterschiedlicher Sensitivität von Klima zu Treibhausgasanstieg
- Fälle mit unterschiedlichen Zukunftsemissionen oder unterschiedlichen Konzentrationen der Treibhausgase und folglich verschiedene Klimasignale
- Zeitperioden für welche keine wissenschaftliche Zeitreihe erstellt wurde

zu repräsentieren. Diese Kombination das Erhalten einer Struktur und anschließendes Skalieren der Magnitude wird für gewöhnlich als „pattern scaling“ (PS) bezeichnet. PS wurde ursprünglich dazu entwickelt um Störsignale einzelner Klimaprojektionen zu erzeugen, bei

einer durchschnittlichen Antwort eines GCMs auf eine Verdoppelung der CO₂ Konzentration.

4.2.1 Voraussetzungen/Bedingungen

Die Grundannahme bei Verwendung dieser Methode ist, dass ein linearer Zusammenhang, welcher invariant ist, bei Betrachtung des erwarteten Klimasignals über das kommende Jahrhundert oder mehr, zwischen lokalem Klima und der globalen Temperaturänderung besteht. Diese Struktur wird von den in Tab. 3.1 aufgelisteten GCMs erhalten. Um ein statistisch sinnvolles Maß zu bekommen wird ein Multimodellmittel erstellt. Von einer Biaskorrektur der GCMs kann in diesem Fall abgesehen werden, da in dieser Methode nur das Klimasignal relevant ist und sich eine solche Korrektur diese subtraktiv wieder aufheben würde. Die Erwärmung von 1.5°C bezieht sich auf die globale Erwärmung in dem Zeitraum vorindustrieller Zeit bis zum Jahr 2100. Folglich wird räumlich betrachtet über alle Gitterpunkte der GCMs gemittelt und zeitlich separat saisonal gemittelt. I.e. es wird für jede Saison ein 30 Jahresmittel für die Klimaperioden 1971 - 2000 und 2071 - 2100 erstellt. Für die Temperatur wurde nach folgender Gleichung nach (Vgl. Osborn et al., 2016, S. 355) vorgegangen:

$$\Delta V = a\Delta T, \quad (4.1)$$

wobei a und ΔT wie folgt definiert sind:

$$a = \frac{\overline{RCM}_{2071-2100} - \overline{RCM}_{1971-2000}}{\overline{GCM}_{2071-2100} - \overline{GCM}_{1971-2000}} \quad (4.2)$$

$$\Delta T = 1,5 - \overline{GCM}_{1971-2000} - \overline{GCM}_{1851-1880} \quad (4.3)$$

Bevor das PS an den RCMs angewendet wird, wird der Skalierungsfaktor (Sf), welcher von obiger Gleichung abgeleitet ist, nach folgender Formel

$$Sf = \frac{\Delta T}{\overline{GCM}_{2071-2100} - \overline{GCM}_{1971-2000}}. \quad (4.4)$$

berechnet. Dabei repräsentiert ΔT die globale Erwärmung zwischen den betrachteten Zeitperioden. Dafür wird die Differenz von den Mittelwerten der betrachteten Klimaperiode 1971 - 2000 zur vorindustriellen Periode 1851-1880 gebildet und weiters von gewünschten 1.5°C im nächsten Schritt subtrahiert. Diese erwünschte Temperaturdifferenz ΔT wird dann durch das ΔGCM der beiden betrachteten Klimaperioden mit dem RCP2.6, wie auch dem RCP4.5 Szenario berechnet. Abb. 4.2 und Abb. 4.3 zeigen die Zeitreihen der GCMs für das RCP2.6 und das RCP4.5 Szenario.

Tabelle 4.1: Ergebnisse des Skalierungsfaktors

Erwärmung	Szenario	DJF	MAM	JJA	SON
1,5°	RCP2.6	0,74	0,81	0,78	0,70
1,5°	RCP4.5	0,47	0,53	0,51	0,45
2,0°	RCP2.6	1,17	1,25	1,21	1,10
2,0°	RCP4.5	0,74	0,81	0,79	0,70

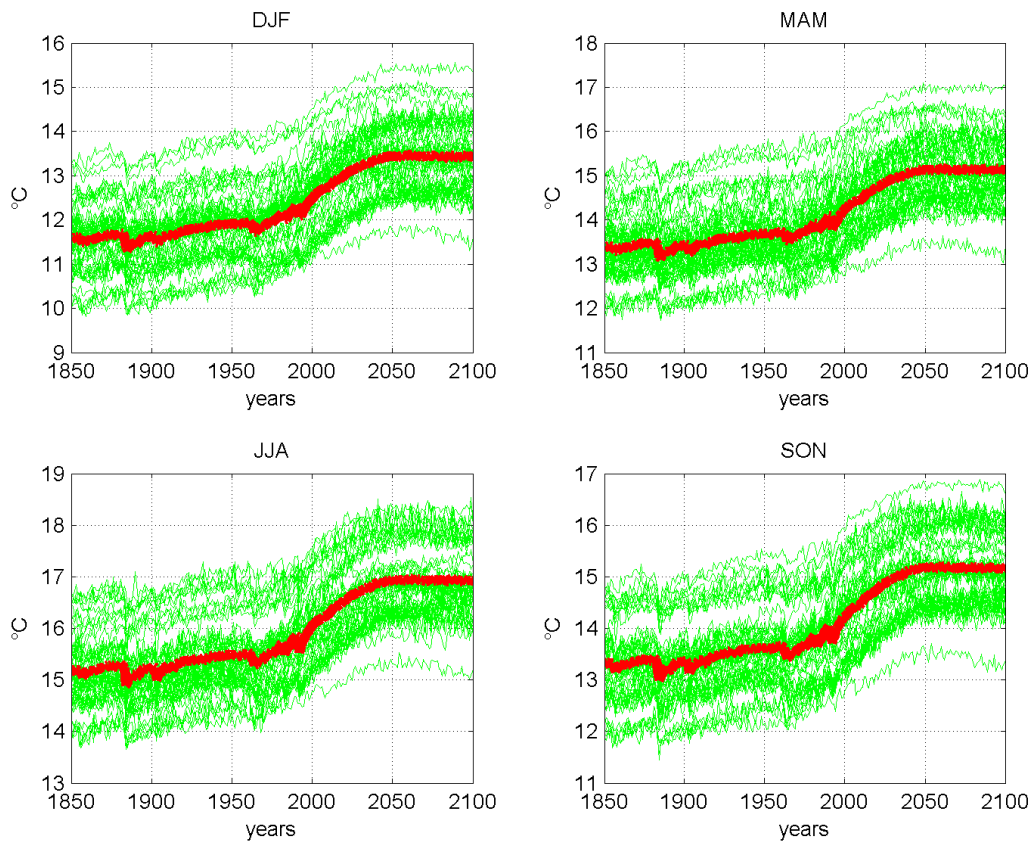


Abbildung 4.2: Darstellung der Zeitreihen des RCP26 Szenarios saisonal gegliedert

In Tab. 4.1 ist jeweils der Skalierungsfaktor für die RCP 2.6 und RCP 4.5 ausgewertet, allerdings wird in weiterer Folge nur der RCP 4.5 Pfad für die weiteren Simulationen herangezogen, weil nur 4 RCMs für den RCP 2.6 zur Verfügung stehen (zum Zeitpunkt der Auswertung) und somit statistisch nicht sinnvoll ist. Nichtsdestotrotz wäre der RCP 2.6 hinsichtlich des „overshoots“ sinnvoller gewesen. Ein $Sf < 1$ bedeutet, dass der zu analysierende Pfad für das 1.5°C unter dem herangezogenen RCP-Pfad liegt bei Betrachtung des Klimasignals. I.e. in Tab. 4.1 ist ersichtlich, dass der Pfad des 1.5°C unter jenen des RCP2.6 liegt.

Diese Methode kann auf die Klimavariablen *tasmin* (Minimaltemperatur) und *tasmax* (Maximaltemperatur) angewendet werden. Anhand Abb. 4.4 wird eine lineare Abhängigkeit zwischen Erwärmung und Steigerung des Niederschlags festgestellt. Somit kann für die Klimavariablen *pr* (Niederschlag) selbiger Skalierungsfaktor verwendet werden, was durch einfaches Einsetzen der linearen Beziehung in Gl. 4.4 leicht zu beweisen ist.

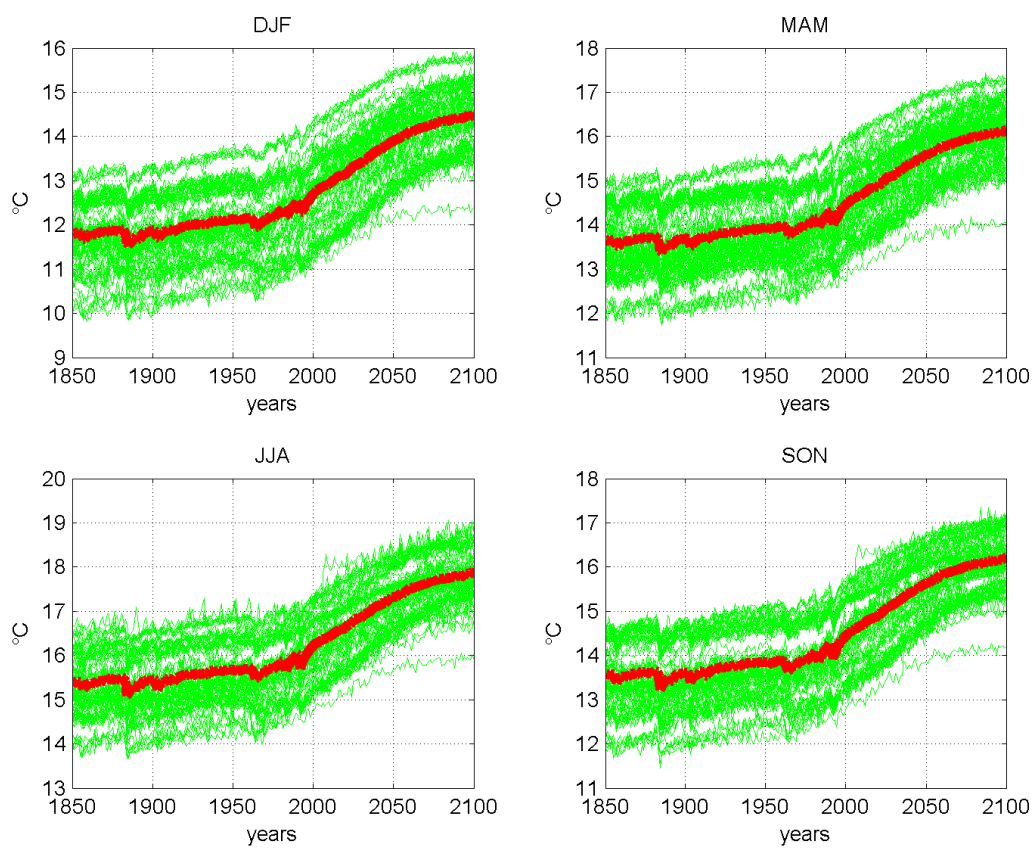


Abbildung 4.3: Darstellung der Zeitreihen des RCP45 Szenarios saisonal gegliedert

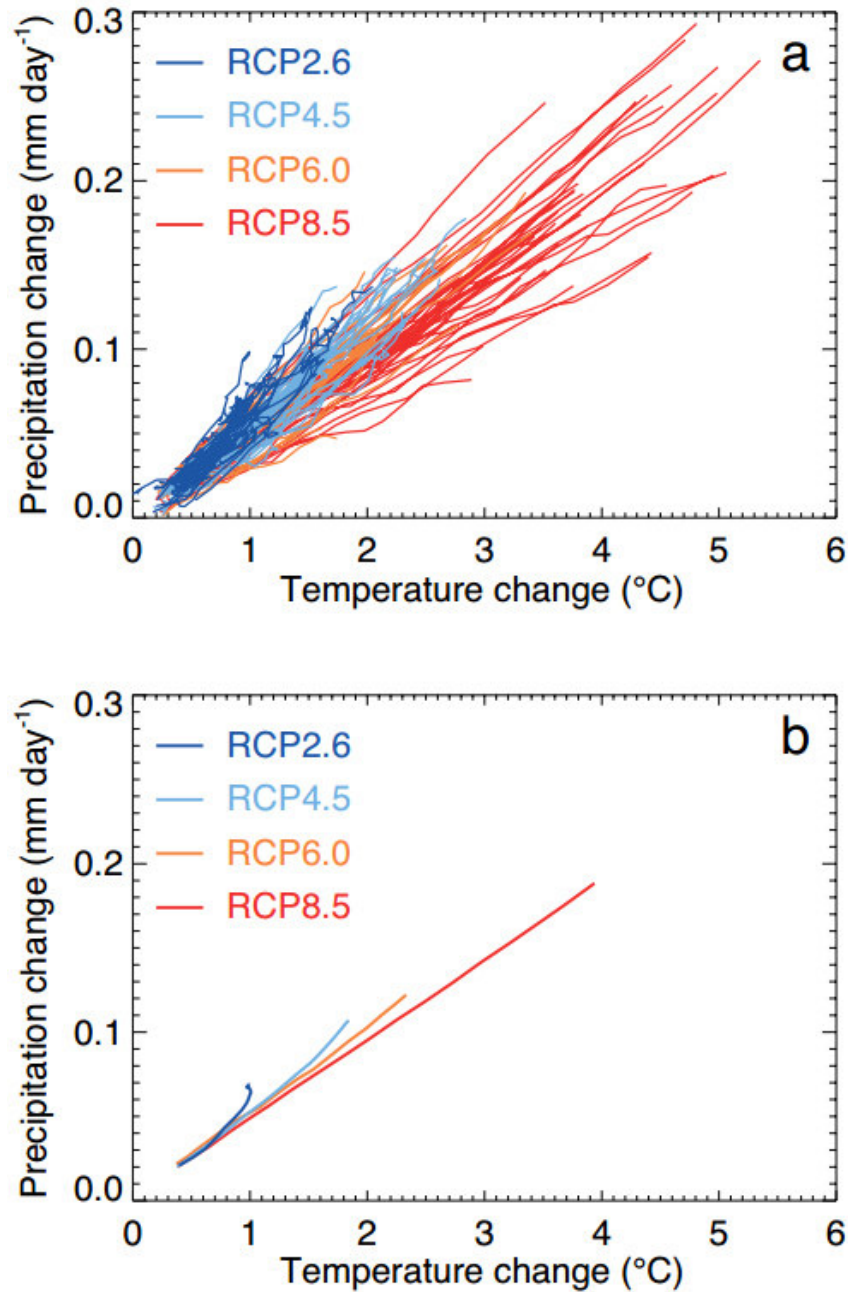


Abbildung 4.4: Mittelwert des globalen Niederschlags (mm d-1) gegen Temperaturänderung (°C) relativ zu 1986 - 2005 Basisperiode in CMIP5 Modell konzentrationen-getriebene Projektionen für die verschiedenen RCP Szenarien (a) Mittelwerte über Klimaperioden, welche jeweils 5 Jahre überlappen, beginnend im Jahr 2006 (z.B. 2006 - 2015, 2011 - 2100), jede Linie repräsentiert ein anderes Modell und (b) der korrespondierende Multi-Modell-Mittelwert für jedes RCP Szenario (Quelle: IPCC, 2013)

4.3 Bias Korrektur

Die Theorie dieses Kapitels ist aus dem Buch von Douglas Maraun entnommen. (Vgl. Maraun et al., 2018, S. 191 ff) Bei der Biaskorrektur wird grundsätzlich zwischen zwei Methoden unterschieden, nämlich Perfect Prognosis (PP) downscaling und Model Output Statistics (MOS). Für diese Arbeit wird letztere Methode angewandt. Als MOS versteht man eine Methode, welche eine statistische Transferfunktion zwischen Modell- und Observationsdaten aufstellt, um diese Transferfunktion auf Zukunftssimulationsdaten anzuwenden. In der numerischen Wettervorhersage basiert eine Prognose auf gemessenen Daten und auf Simulationsdaten in der Vergangenheit. Betrachtet man eine Zeitreihe zusammenhängender Wettervorhersagen, sind die simulierten und gemessenen Wettersequenzen annähernd synchron. Diese Synchronität erlaubt eine paarweise Kalibrierung. Für eine simple Biaskorrektur, wie in dieser Arbeit verwendet, seien der Einflusswert und der Erwartungswert die selbe Variable. In der Klimamodellierung jedoch sind Klimamodelle und Observationsdaten generell nicht synchron und die Kalibrierung erfolgt distributionsweise. Das hat folgende Konsequenzen:

- Nur in einem distributionsweisen Setting ist es möglich identische Variablen zu verwenden.
- Ohne der Synchronität zwischen Simulation und Messdaten sind Daten zur Performance (Korrelationen, RMS Fehler etc.) nicht durchführbar.
- Im Fokus von frei getriebenen Modellen steht nicht, dass diese forciert werden, Werte nahe der Messdaten zu generieren, wie in der numerischer Wettervorhersage. Deswegen haben diese Abweichungen sowohl in räumlicher und zeitlicher Auflösung.

Folgt man der statistischen Biasdefinition, kann man einen Bias zur Zeit t als die systematische Differenz zwischen einer simulierten Modelleigenschaft und einer gemessenen Eigenschaft nach (Maraun et al., 2018, S. 193) als

$$Bias_{\theta}(t) = \theta_{mod}(t) - \theta_{obs}(t)$$

angeben. Zu beachten bei der Durchführung dieser Berechnung ist, dass möglichst große Klimaperioden zur Mittelung verwendet werden, aufgrund der Klimavariabilität etc..

Um diese Methode durchführen zu können müssen folgende Annahmen erfüllt sein:

- MOS Einflusswerte müssen glaubwürdig simuliert werden. Gegenwärtige/vergangene Klimasimulationen müssen, abgesehen von den korrigierten Abweichungen, realistisch sein.
- MOS Einflusswerte müssen die selbe räumliche und zeitliche Auflösung haben wie die Erwartungswerte.
- Die Transferfunktion muss eine geeignete Struktur haben, welche unter geänderten Klimakonditionen anwendbar ist.

Unter MOS wird weiters zwischen verschiedenen Methoden unterschieden. In dieser Arbeit werden zwei Methoden herangezogen der Delta Change Anpassung und die Direkte Methode. Ein grafischer Vergleich ist in Abb. 4.5 dargestellt.

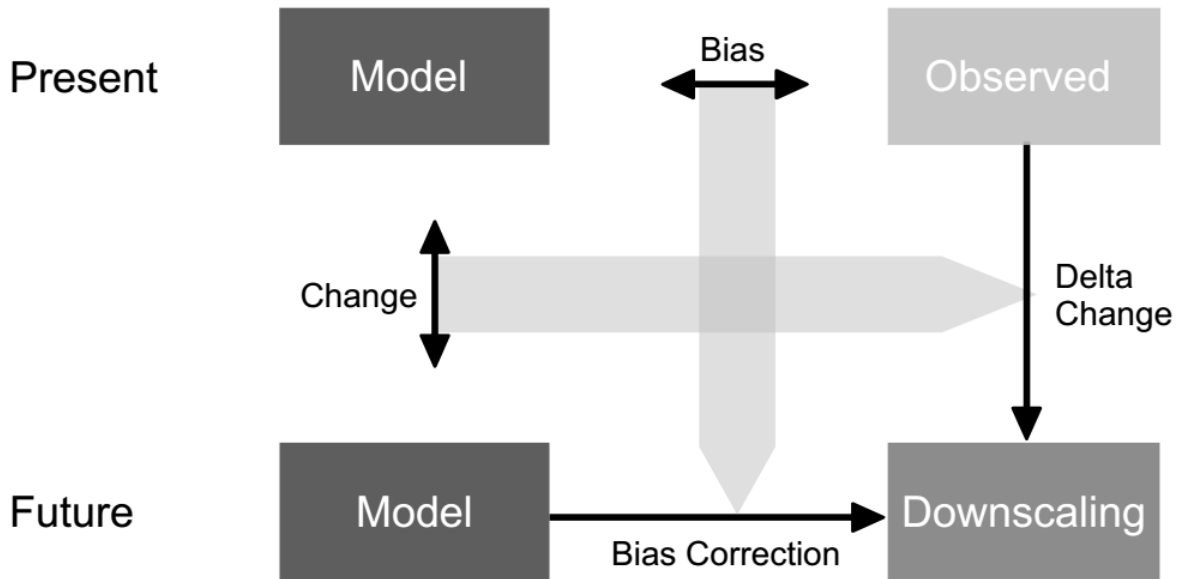


Abbildung 4.5: Vergleich der Biaskorrektur (Quelle: Maraun et al., 2018, S. 195)

4.3.1 Delta Change Anpassung

Diese Methode fügt zu den Messdaten ein Störsignal, das simulierte Klimasignal, hinzu. Es existieren zwei Varianten, weil zwischen additiven und relativen Variablen unterschieden werden muss. Die zu simulierende Temperatur y_{i+T}^f zu einer Zeit $i + T$ in der Zukunft wird repräsentiert durch eine gemessenen Temperatur $x_{obs,i}^p$ zur Zeit i der Klimaperiode, zuzüglich des Störsignals (Differenz der Mitteltemperatur aus der Zukunft \bar{y}_{mod}^f und des Mittelwertes aus dem Kontrolldurchlauf \bar{x}_{mod}^p) nach (Maraun et al., 2018, S. 196):

$$y_{i+T}^f = x_{obs,i}^p + (\bar{y}_{mod}^f - \bar{x}_{mod}^p)$$

. Bei der relativen Angabe wird der zu simulierenden Niederschlag, y_{i+T}^f zur Zeit $i + T$ in der Zukunft, repräsentiert durch den gemessenen Niederschlag $x_{obs,i}^p$, zur Zeit i , der gemessenen Klimaperiode, gestört durch das relative Klimaänderungssignals des mittleren Niederschlags nach (Maraun et al., 2018, S. 196):

$$y_{i+T}^f = x_{obs,i}^p \frac{\bar{y}_{mod}^f}{\bar{x}_{mod}^p}$$

. Hierfür gehen die Observationsdaten auf täglicher Basis und das Klimasignal auf saisonaler Basis in die oben genannten Gleichungen ein.

4.3.2 Additive Korrektur und Skalierung (Direkte Methode)

Mittlere Temperaturabweichungen haben wieder einen additiven Einfluss. Gegeben sind die Zeitreihen der Temperaturmessungen in der Gegenwart/Vergangenheit y_i^p , die simulierten Ergebnisse des Klimas der Gegenwart x_i^p und die simulierten Ergebnisse des Klimas

in der Gegenwart x_i^f . Die Biaskorrektur der Projektion $y_{corr,i}^f$ zur Zeit i wird mit folgender Gleichung nach (Maraun et al., 2018, S. 196) ermittelt:

$$y_{corr,i}^f = x_i^f - (\bar{x}^p - \bar{y}^p)$$

. Für relative Fehler wird wieder das Verhältnis, anstatt des additiven Einflusses genommen. Der projizierte Niederschlag $y_{corr,i}^f$ zur Zeit i in der Zukunft, wird durch die simulierte Zukunftsprojektion x_i^f zur Zeit i , korrigiert und durch den aktuellen mittleren Bias wie folgt (Maraun et al., 2018, S. 197) repräsentiert:

$$y_{corr,i}^f = x_i^f \frac{\bar{x}^p}{\bar{y}^p}$$

Diese additive und relative Methode wird auf jedes Modell (RCM) angewandt und erst danach der Multi-Model-Mean gebildet. Als zeitlicher Rahmen zur Mittelung wird wieder der saisonale verwendet.

Wenn ein hohes Vertrauen zur Korrektheit der Modelle in der täglichen Auflösung gegeben ist wird generell die direkte Methode verwendet. Diese hat den Aspekt dass, die Vorteile des dynamischen Modells, welche dynamische Eigenschaften wie zeitliche Abhängigkeit der Struktur beinhaltet, in den Ergebnissen erhalten bleiben. Ist dies nicht gegeben wird der Delta Change Ansatz verwendet, allerdings verzichtet man auf dynamische Änderungen und verwendet nur die simulierten Änderungen der Intensitäten und Magnituden. In dieser Arbeit werden beide Methoden verwendet und zum Vergleich gegenübergestellt.

Folgende Grafiken (Abb. 3.11 - Abb. 3.13) zeigen u.a. die Dichtefunktion der Rohdaten von den RCMs und der biaskorrigierten RCMs. Die Auswirkung der Biaskorrektur ist hier deutlich zu erkennen, nämlich indem der Mittelwert verschoben wird. Die Dichtefunktion (also auch die Varianz) bleibt bei dieser Methode erhalten. Die Notwendigkeit einer Biaskorrektur für die direkte Methode ist ersichtlich bei der Betrachtung der Abb. 4.6 - Abb. 4.8. Speziell bei Gebirgsketten, über Irland und Russland ist der Bias sehr groß und die Modelle weichen z.T. um mehr als 5°C von den Observationsdaten ab. Die tasmax - Zeitreihen scheinen sich am besten an die Observationsdaten anzupassen.

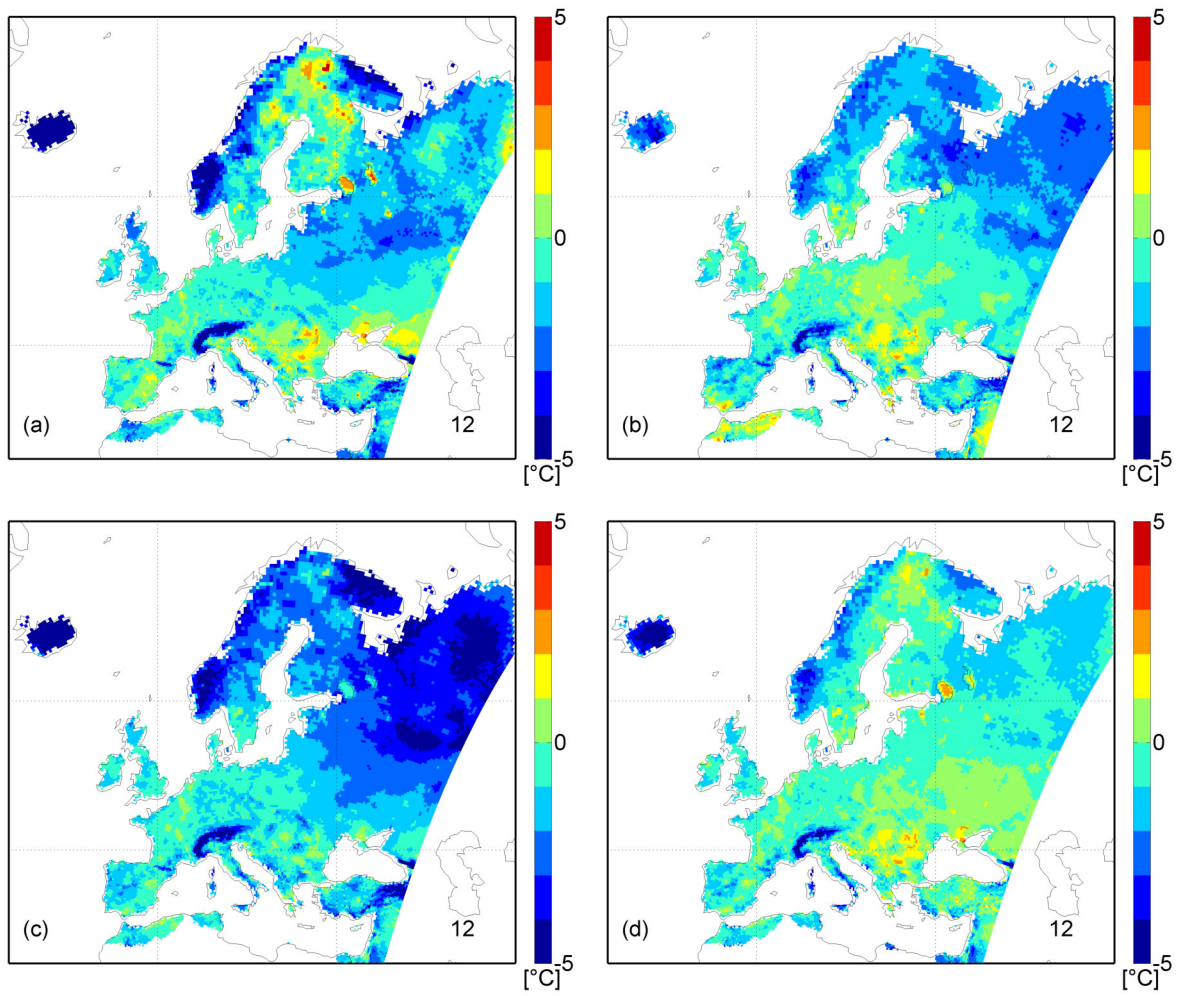


Abbildung 4.6: Bias des Klimaindexes tasmin für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

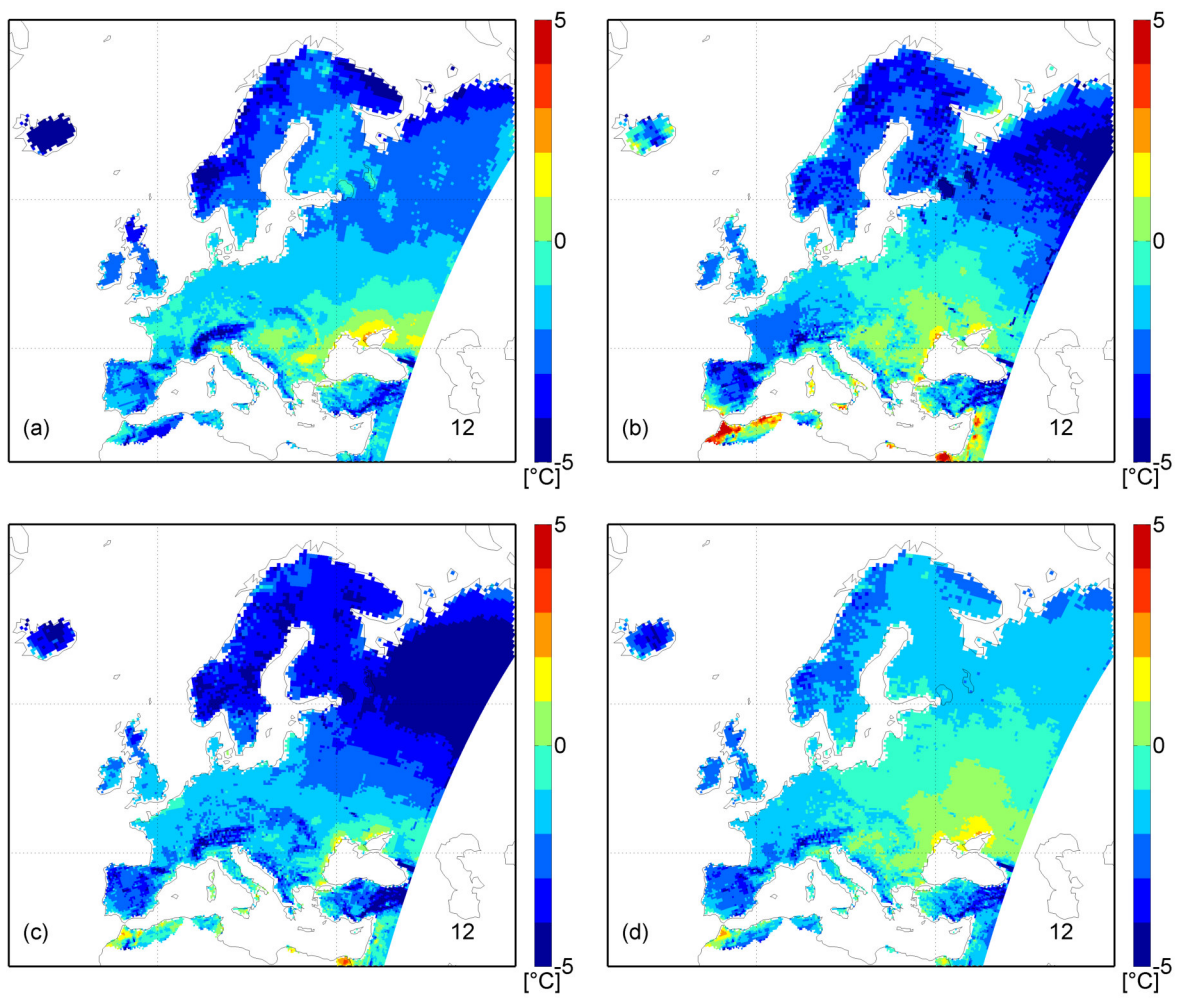


Abbildung 4.7: Bias des Klimaindexes t_{asmax} für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

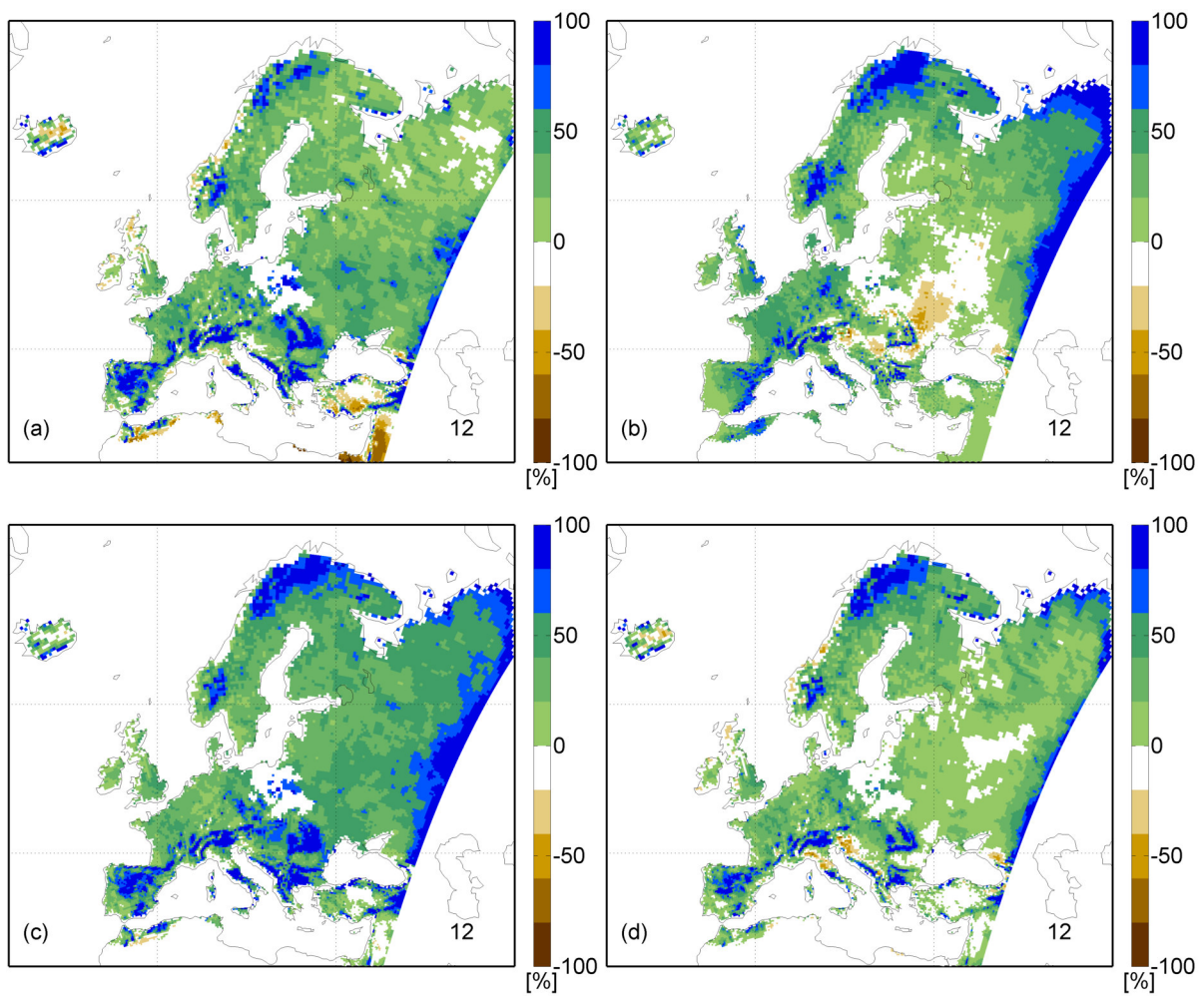


Abbildung 4.8: Bias des Klimaindexes pr für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

4.4 Verwendung von Prudence Regionen

Aufgrund der differentiellen Struktur des Klimasignals, ist es sinnvoll die europäische Landkarte in weitere kleinere Gebiete zu gliedern. Eine mögliche Aufspaltung in kleinere Gebiete wurde vom Prudence - Projekt eingeführt (daher die Namensgebung zu Prudence - Regionen). Das Prudence - Projekt war ein EU finanziertes Projekt zur regionalen Klimamodellierung, welches von 2004 von ENSEMBLES abgelöst und dieses wiederum von EURO - CORDEX im Jahr 2009 abgelöst wurde. (Vgl. Christensen et al., 2007)

Durch diese Aufspaltung ist es möglich durch Mittelwerte zwischen verschiedenen Klimaperioden zu vergleichen (siehe Abb. 5.13 - Abb. 5.33). Ein globaler Vergleich, global im Kontext der europäischen Landkarte, ist aufgrund der differentiellen Struktur wenig sinnvoll.

Tabelle 4.2: Längen- und Breitengrade der Prudence - Regionen Quelle: (Vgl. Christensen et al., 2007)

Gebiet	Westen	Osten	Süden	Norden
1 (BI) British Isles	-10	2	50	59
2 (IP) Iberian Peninsula	-10	3	36	44
3 (FR) France	-5	5	44	50
4 (ME) Mid-Europe	2	16	48	55
5 (SC) Scandinavia	5	30	55	70
6 (AL) Alps	5	15	44	48
7 (MD) Mediterranean	3	25	36	44
8 (EA) Eastern Europe	16	30	44	55

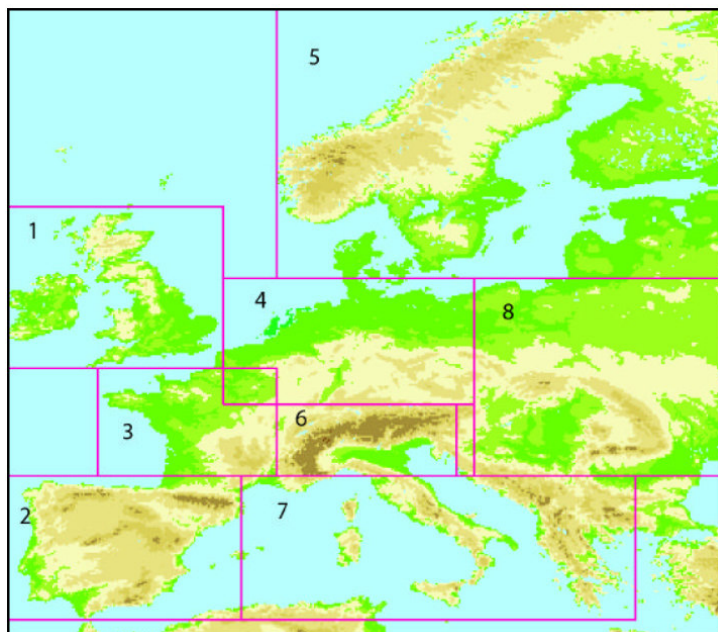


Abbildung 4.9: Grafische Darstellung der Prudence - Regionen Quelle: (Christensen et al., 2007)

Kapitel 5

Ergebnisse

5.1 Simulationen des Klimaindexes tasmin

5.1.1 Simulationen anhand der Deltachange-Methode zum 1.5°C Ziel

Die Ergebnisse werden in 12er Plots dargestellt. Nach den Reihen sind die Saisonen geordnet, absteigend von DJF (Dezember, Jänner und Februar), MAM (März, April und Mai), JJA (Juni, Juli und August) und SON (September, Oktober und November). Die erste Spalte zeigt die Klimaperiode von 1971 - 2000 an und die zweite Spalte repräsentiert die Klimaperiode von 2071 - 2100. In der dritten Spalte ist das Klimasignal bzw die Differenz der ersten beiden Spalten dargestellt. Wie in Kapitel 4.3 erläutert, ist die Basis für die erste Spalte der EOBS-Datensatz. In der zweiten Spalte wird das Klimasignal aufaddiert und ist die Basis für die Impaktanalyse der Zukunftsperiode, dargestellt in der zweiten Spalte der Abb. 5.2 und 5.3. Da die EOBS - Daten nur Daten über Festland beinhalten, werden in den Grafiken auch nur Daten über Festland angezeigt.

In Abb. 5.1 ist die erwartete gemittelte tägliche Minimaltemperatur dargestellt. In der ersten Spalte ist der Mittelwert der EOBS - Daten über die jeweilige Saison geplottet. In der zweiten additiv der Multi-Model-Mean der RCMs des Klimasignals und die EOBS-Daten und in der dritten der Multi-Model-Mean des Klimasignals. Man erkennt eine starke Erwärmung über den europäischen russischen Teil und über Skandinavien. Dies ist darin begründet, dass die schneebedeckten Gebiete zurückgehen, i.e. das Albedo sinkt und somit den Prozess der Erwärmung verstärkt. Weiters ist speziell in der JJA-Saison eine stärkere Erwärmung im Mittelmeerraum erkennbar. Während Mitteleuropa eine moderate Erwärmung wiederfährt über alle Saisonen, ist die nördliche Erwärmung in kalten Saisonen am ausgeprägtesten und die südliche Erwärmung in warmen Saisonen am ausgeprägtesten. Es ist also bei Betrachtung des Klimasignals ein Nord - Süd Gradient deutlich erkennbar.

In Abb. 5.2 ist die Anzahl der Tage dargestellt an denen die Temperatur die 0°C Schranke unterschreitet. Die Tendenz der vorhergehenden Abbildung ist auch hier erkennbar. In den kälteren Saisonen vermindert sich die Anzahl der Kältetage im Norden, was speziell in den Abbildungen (c), (f) und (l) ersichtlich ist. In (c) ist allerdings erkennbar, dass über Skandinavien und Russland die Differenz der Kältetage großflächig gegen 0 geht. Dies resultiert daraus, dass alle Tage in dieser Saison (DJF), sowohl in der Klimaperiode von 1971-2000, als auch in der Klimaperiode 2071-2100, einem Kälte-

tag entsprechen, also subtraktiv null ergeben. Im Süden bleibt die Anzahl der Kältetage annähernd konstant, da dort die Temperatur ohnehin die 0°C Grenze unterschreitet.

Abb. 5.3 zeigt die Kälteperioden, i.e. das Mittel der zusammenhängenden Kältetage über die Saisonen DJF, MAM, JJA und SON. Starker Rückgang der Kälteperioden ist folglich wieder im Norden, speziell in Skandinavien und Russland, in den kalten Saisonen zu erkennen. Hier ist jeweils, für jedes Jahr im Quartal die längste Periode, in der $t_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$ entspricht per Multi-Model-Mean gemittelt und dargestellt.

Wichtig ist explizit zu erwähnen, dass aus programmiertechnischen Gründen die letzte Spalte in Abb. 5.2 und 5.3 die Differenz der Daten der Klimaperiode 1971-2000 minus der Daten der Klimaperiode 2071-2100 ist.

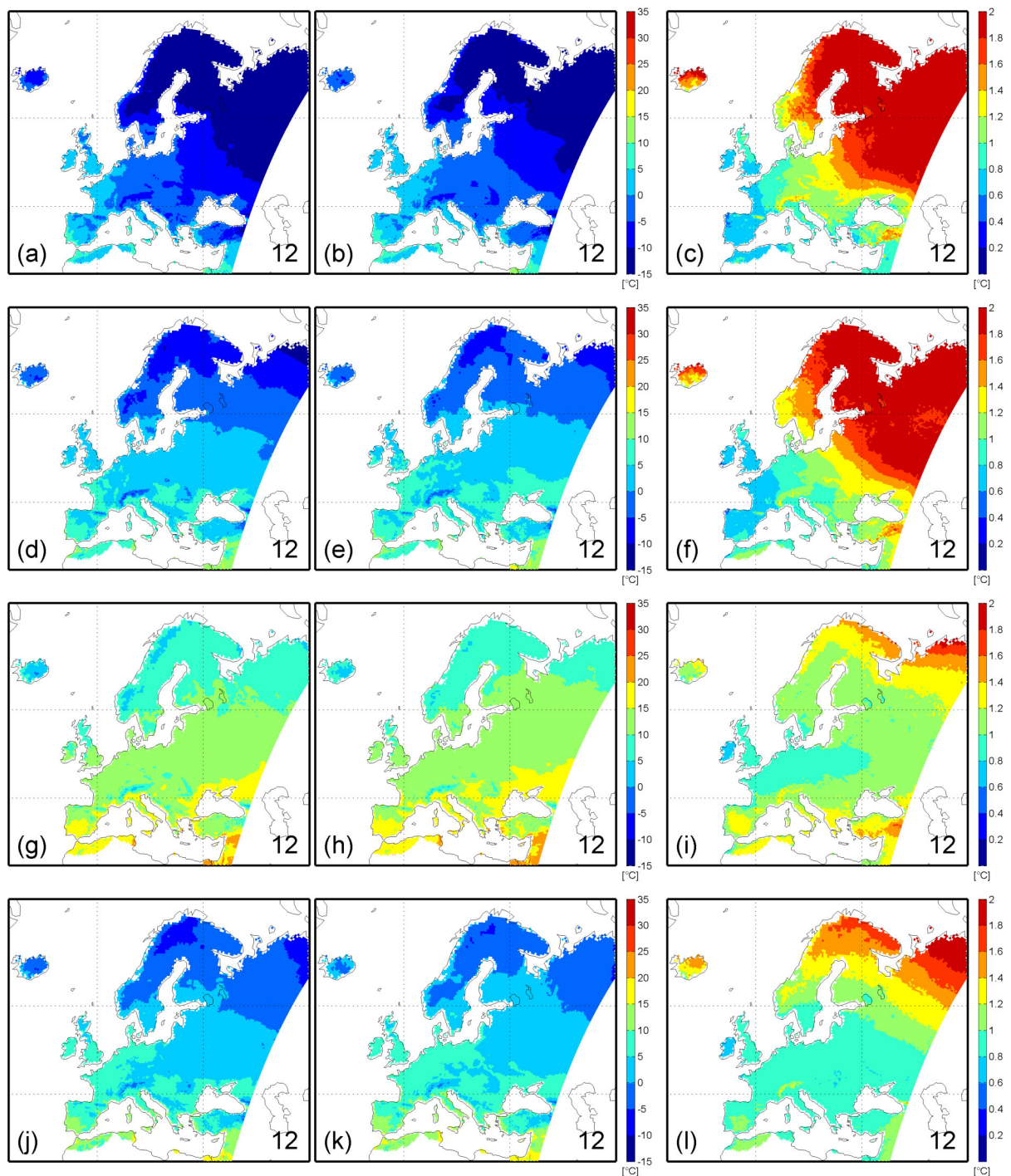


Abbildung 5.1: Darstellung des Klimaindexes tasmin mit der Deltachange-Methode für das 1.5°C Ziel des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

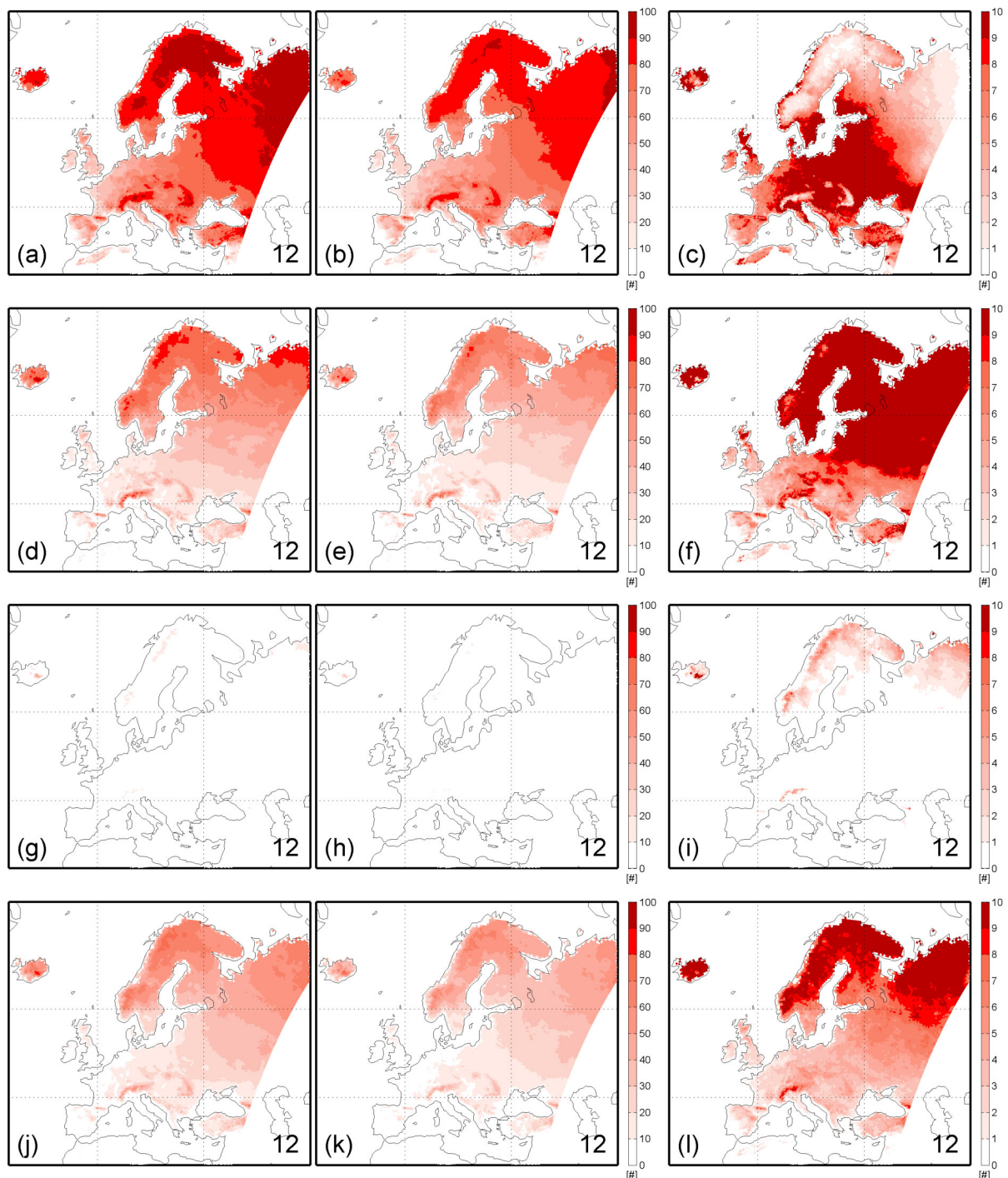


Abbildung 5.2: Darstellung des Klimaindexes FD0 mit der Deltachange-Methode für das 1.5°C Ziel des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Vergangenheit}} - \text{Daten}_{\text{Zukunft}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

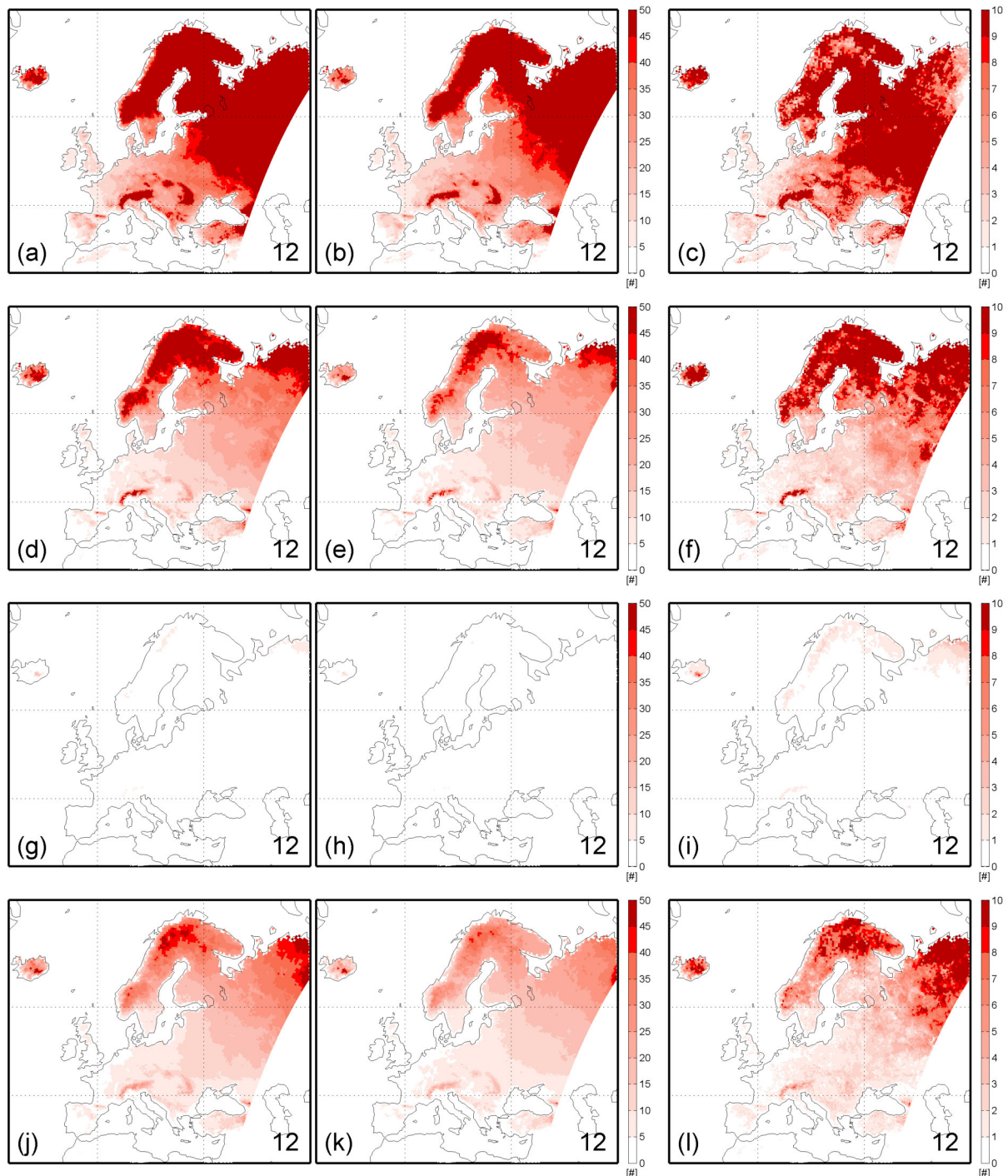


Abbildung 5.3: Darstellung des Klimaindexes CSDI mit der Deltachange-Methode für das 1.5°C Ziel des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des zeitlichen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Vergangenheit}} - \text{Daten}_{\text{Zukunft}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

5.1.2 Simulationen anhand der Direct-Methode zum 1,5° Ziel

Die Ergebnisse werden in 12er Plots dargestellt. Nach den Reihen sind die Saisonen geordnet, absteigend von DJF (Dezember, Jänner und Februar), MAM (März, April und Mai), JJA (Juni, Juli und August) und SON (September, Oktober und November). Die erste Spalte zeigt die Klimaperiode von 1971 - 2000 an und die zweite Spalte repräsentiert die Klimaperiode von 2071 - 2100. In der dritten Spalte ist das Klimasignal bzw die Differenz der ersten beiden Spalten dargestellt. Wie in Kapitel 4.3 erläutert, ist die Basis für die erste Spalte die Bias korrigierten RCM-Datensätze. Die zweite Spalte hat die durch Pattern Scaling und Biaskorrektur geänderten RCM-Datensätze zur Basis und ist die Basis für die Impaktanalyse der Zukunftsperiode, dargestellt in der zweiten Spalte der Abb. 5.5 und 5.6. Da die EOBS - Daten nur Daten über Festland beinhalten, werden in den Grafiken auch nur Daten über Festland angezeigt.

In Abb. 5.4 ist die erwartete gemittelte tägliche Minimaltemperatur dargestellt. In der ersten Spalte ist der Multi-Model-Mean des zeitlichen Mittelwerts der biaskorrigierten RCMs über die jeweilige Saison geplottet. In der zweiten Spalte ist der Multi-Model-Mean des zeitlichen Mittelwerts der biaskorrigierten und skalierten RCMs für den Klimaindex tasmin dargestellt. In der dritten Spalte ist das Klimasignal dargestellt. Die Struktur ist ident mit jener in Abb. 5.1.

In Abb. 5.5 sind die Tage dargestellt an denen die Temperatur die 0°C Schranke unterschreitet. Die Tendenz der vorhergehenden Abbildung ist auch hier erkennbar. In den kälteren Saisonen vermindert sich die Anzahl der Kältetage in Nordeuropa, wie auch in Mitteleuropa, was speziell in den Abbildungen (c), (f) und (l) ersichtlich ist. In (c) ist allerdings erkennbar, dass über Skandinavien und Russland die Differenz der Kältetage großflächig gegen 0 geht. Dies resultiert daraus, dass alle Tage in dieser Saison (DJF), sowohl in der Klimaperiode von 1971-2000, als auch in der Klimaperiode 2071-2100, einem Kältetag entsprechen, also subtraktiv null ergeben. Im Süden bleibt die Anzahl der Kältetage annähernd konstant, da dort die Temperatur ohnehin die 0°C Grenze unterschreitet.

Abb. 5.6 zeigt die Kälteperioden, i.e. den Multi-Model-Mean des zeitlichen Mittels der zusammenhängenden Kältetage über die Saisonen DJF, MAM, JJA und SON. Starker Rückgang der Kälteperioden ist folglich wieder im Norden, speziell in Skandinavien und Russland, in den kalten Saisonen zu erkennen. Hier ist jeweils, für jedes Jahr im Quartal die längste Periode, in der $t_{min} < 0^{\circ}\text{C}$ entspricht das saisonale Mittel und der Multi-Model-Mean gebildet worden.

Wichtig ist explizit zu erwähnen, dass aus programmiertechnischen Gründen die letzte Spalte in Abb. 5.2 und reffig:ergebnisse-rcp15-tasmin-extremwaves die Differenz der Daten der Klimaperiode 1971-2000 minus der Daten der Klimaperiode 2071-2100 ist.

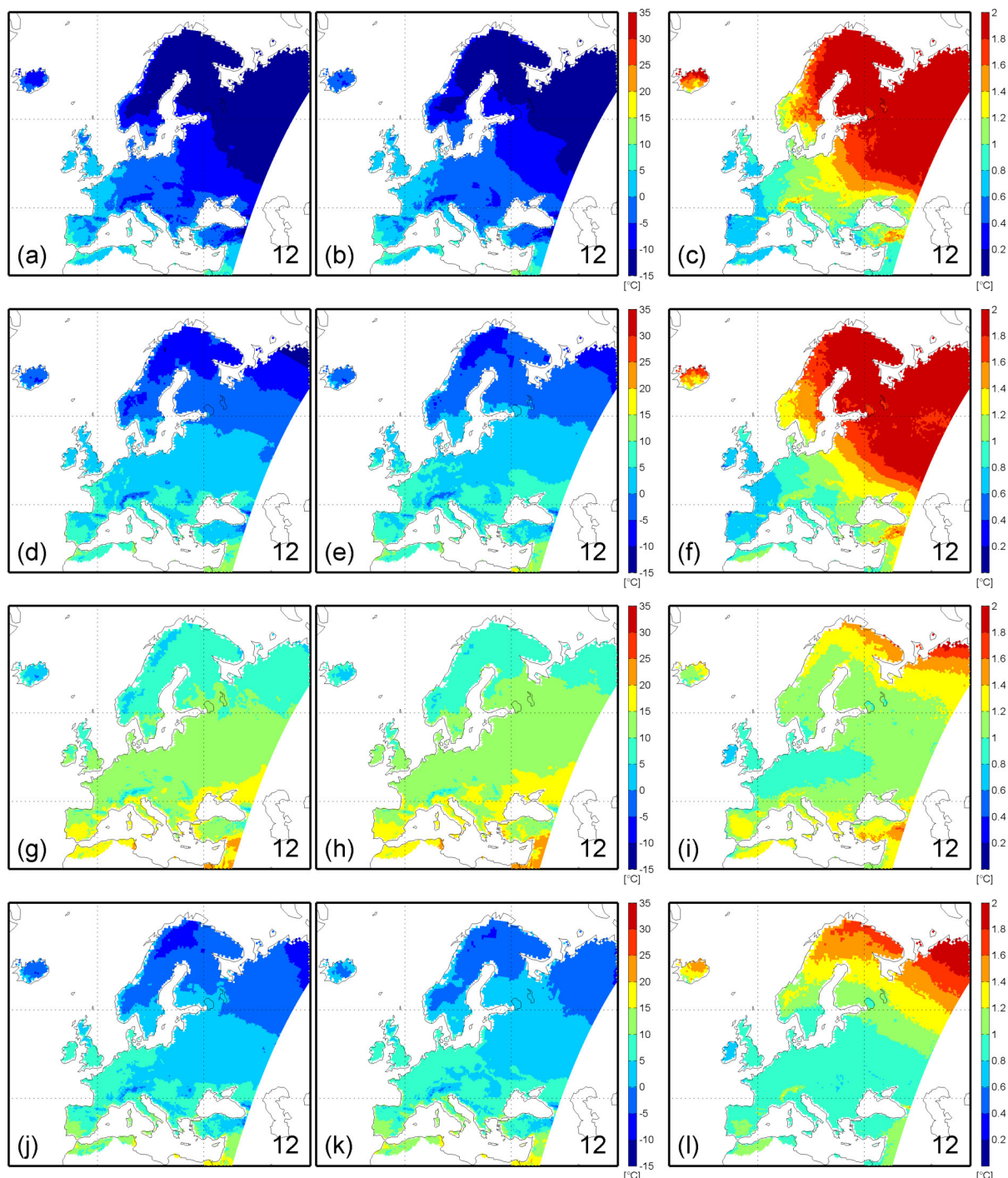


Abbildung 5.4: Darstellung des Klimaindexes tasmin (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels des Klimasignals (DatenZukunft-DatenVergangenheit) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

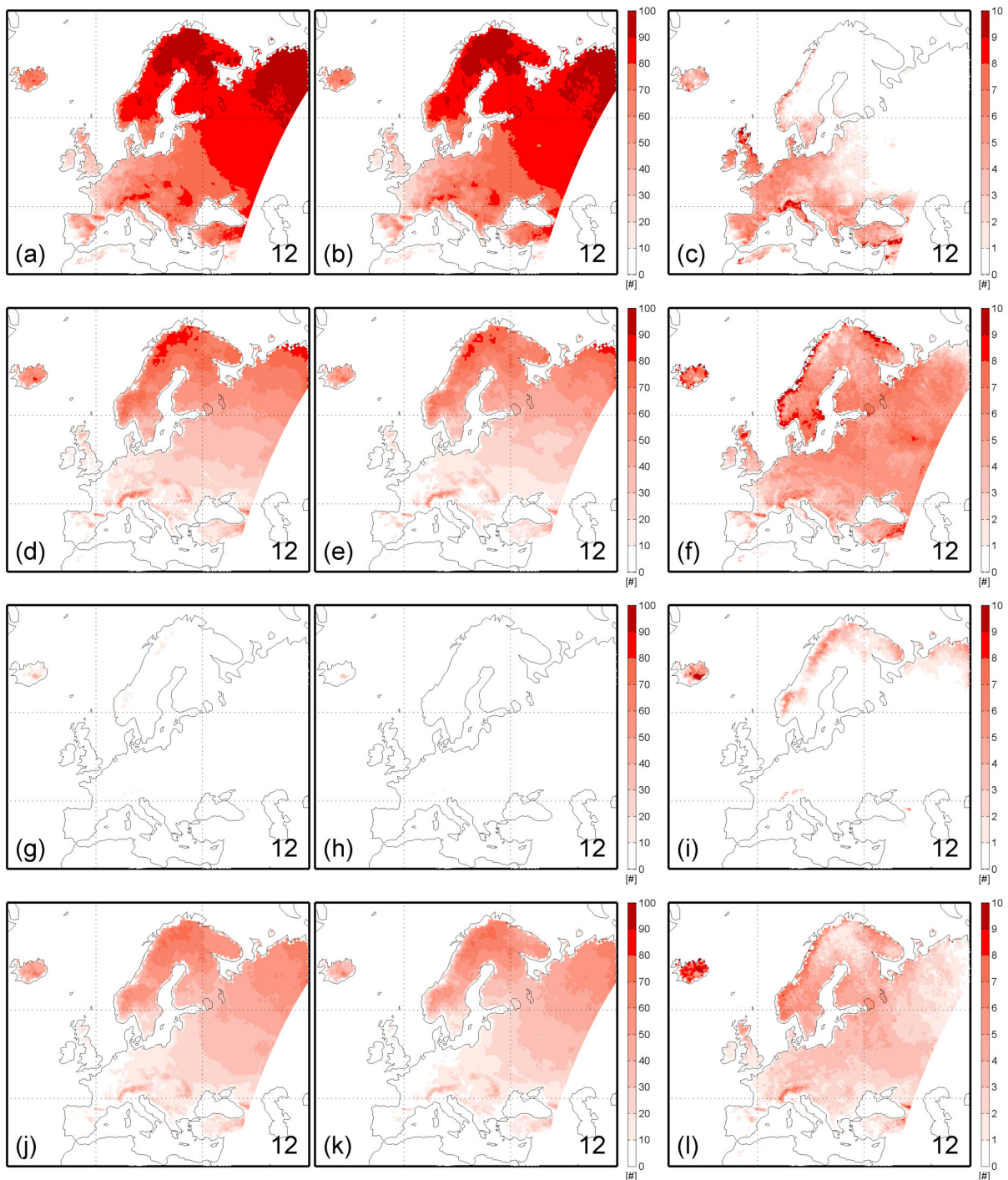


Abbildung 5.5: Darstellung des Klimaindexes FD0 (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean der Differenz (DatenVergangenheit-DatenZukunft) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

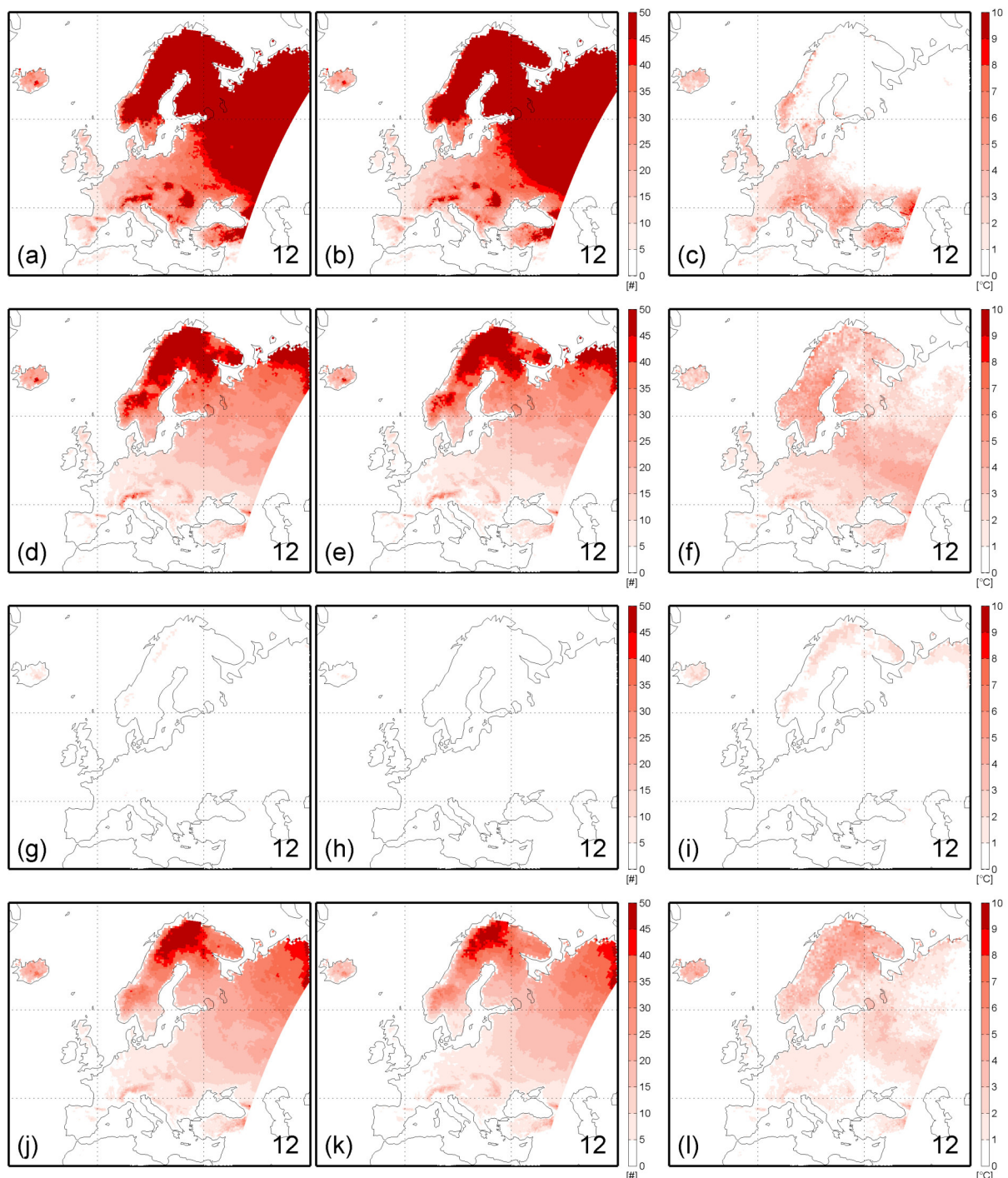


Abbildung 5.6: Darstellung des Klimaindexes CSDI (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Multi-Model-Mean der Differenz (DatenVergangenheit-DatenZukunft) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

5.1.3 Unterschied der Direct-Methode und der Deltachange-Methode zum 1.5° Ziel

In diesem Kapitel wird der Unterschied der Direct-Methode und der Deltachange-Methode dargestellt. Die unterschiedliche Methodik ist im Kapitel 4.3.1 dargestellt. Vergleicht man diese erkennt man, dass die beiden Methoden bei Betrachtung der zeitlichen Mittelwerte der Saisonen ident ist. Dies ist in der Abbildung 5.7 dargestellt. Man erkennt zwar eine Farbstruktur bei einer Auflösung zwischen -0.1°C - 0.1°C , aber diese ist auf Rundungsfehler bei der Programmierung zurückzuführen. Betrachtet man allerdings die Datensätze der Ergebnisse der beiden Methoden auf Tagesbasis, dann divergieren diese natürlich. Der Datensatz für die Klimaperiode von 2071 - 2100 auf Basis der Deltachange-Methode hat die gleiche tägliche Verteilung wie der zugrundeliegende EOB-S Datensatz, allerdings um einen Shift bzw. Änderung der Magnitude, wie in den Abbildungen 3.11 bis 3.13 ersichtlich ist. Die Direct-Methode unterliegt den Daten des Multi-Model-Means der RCMs. Aufgrund dieser Tatsache ist die Direct-Methode zu präferieren für die Impaktanalyse.

In Abbildung 5.8 sind signifikante Abweichungen zu erkennen. Vergleicht man die absoluten Minimaltemperaturen der Klimaperiode 2071 - 2100 in der Abbildung 5.4 sind die größten Abweichungen in den Bereichen, wo sich die durchschnittliche tägliche Minimaltemperatur ca. bei 0° befindet. Folgende Punkte sind mögliche Ursachen für diese Abweichung:

- Der Bias, der für jedes einzelne Modell extra ermittelt wurde (Multi-Model-Mean in Abb. 4.6), wird anhand der Referenzklimaperiode 1971-2000 berechnet. Ist der Bias nicht ident in beiden Perioden, führt dies zu einer Differenz.
- Anhand der Quantilplots in Abbildung 3.11 sieht man, dass die Streuung der Werte um den Mittelwert bei den Observationsdaten größer ist, als die der RCMs.
- Durch das Mitteln über 3 Monate in den jeweiligen Saisonen wird die Temperaturverteilung gedämpft.
- Kältewellen/Hitzewellen wirken sich beim Ergebnis gravierender aus.

In Abbildung 5.9 ist eine noch stärkere Abweichung zu erkennen. Dies kann an der stärkeren Streuung der Observationsdaten liegen. Fällt ein Wert der Zeitreihe über die 0° hat das starke Auswirkungen auf das Ergebnis. Weiters ist auffällig bei (a) DJF, dass Gebirge, im speziellen die Alpen, großen Abweichungen unterliegen. Dies ist schon im Bias in der Abbildung 4.6 ersichtlich, dass die RCMs die Temperaturen in den Gebirgen überschätzen.

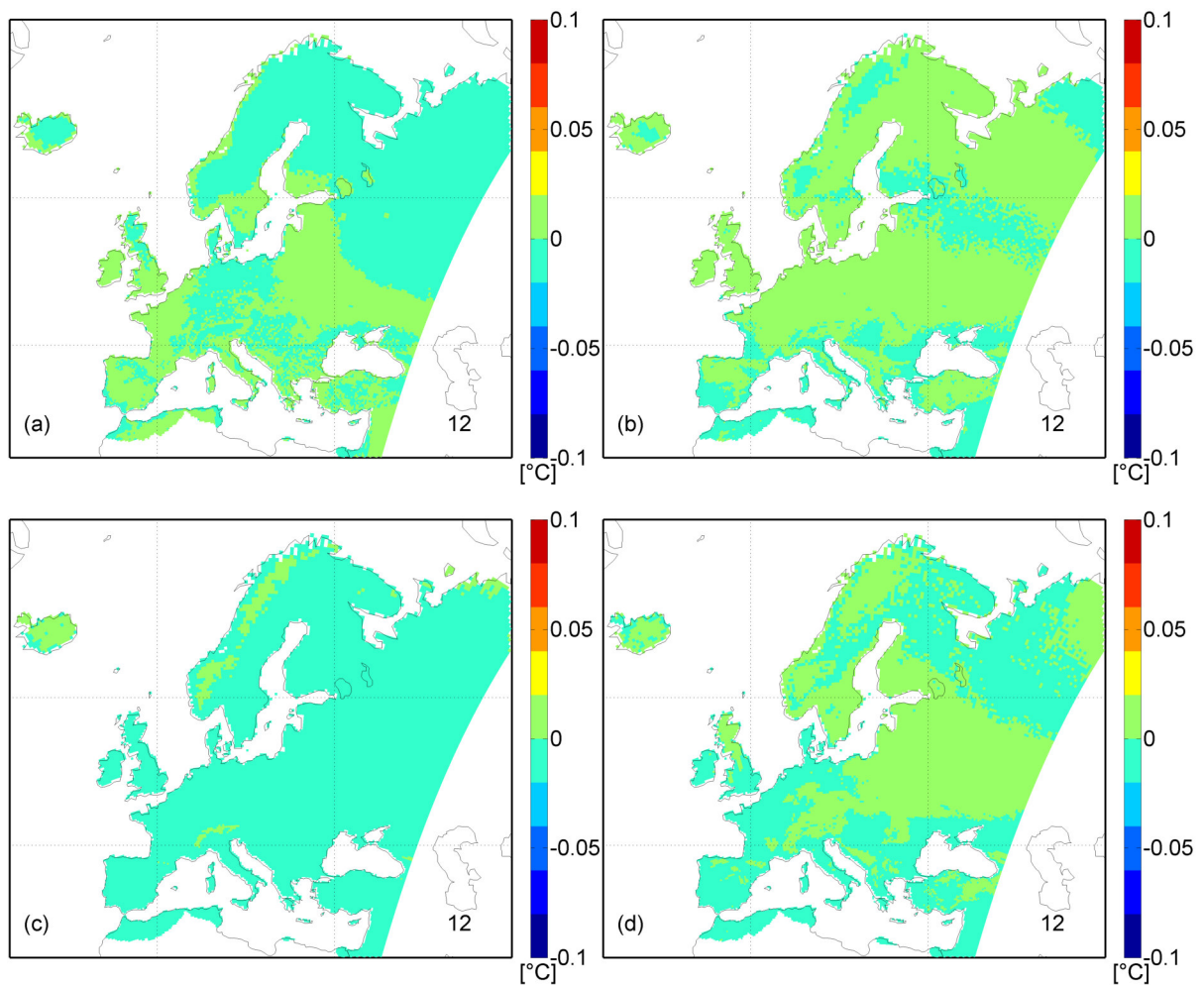


Abbildung 5.7: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Direct-Methode}} - \text{Daten}_{\text{Deltachange-Methode}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes tasmin (Multi-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

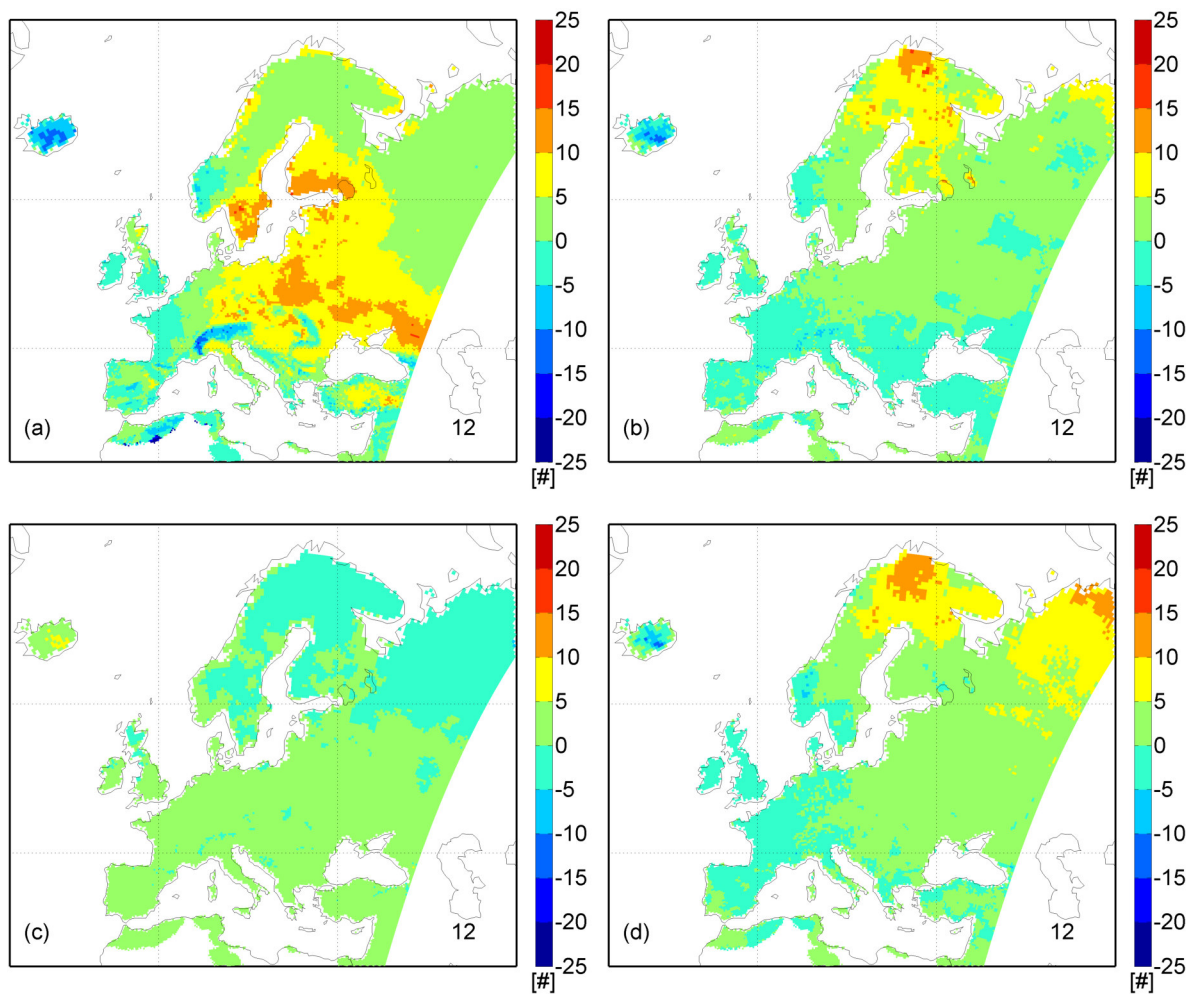


Abbildung 5.8: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Direct-Methode}} - \text{Daten}_{\text{Deltachange-Methode}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes FD0 (Multi-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

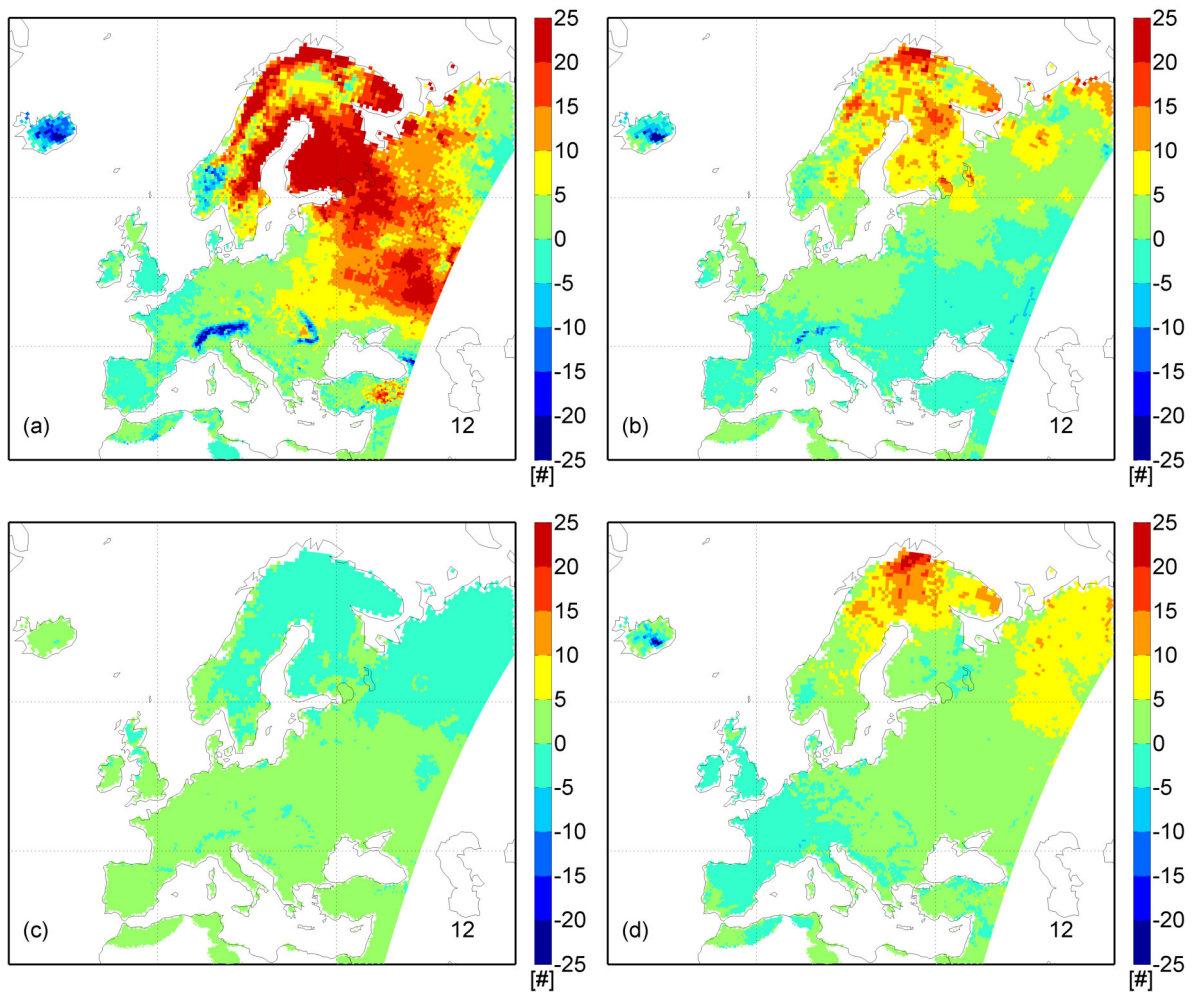


Abbildung 5.9: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Direct-Methode}} - \text{Daten}_{\text{Deltachange-Methode}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes CSDI (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

5.1.4 Unterschied 2°C zum 1.5°C Ziel anhand der Direct-Methode

Abb. 5.10 zeigt die Differenz der Klimasignal der Szenarien 1.5°C globaler Erwärmung und 2°C globaler Erwärmung. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich für den Klimaindex tasmin eine signifikante Differenz in der Magnitude einstellt. Auch hier ist in den kälteren Saisonen ein Nord-Süd Gradient erkennbar, also eine stärkerer Anstieg der Temperatur im Norden, als im Süden. In Teilen von Russland beträgt die Differenz zum Teil über 1.5°C.

In Abb. 5.11 wird die Differenz der Anzahl der Tage des Klimaindexes FD0 dargestellt, wobei die Daten für das Szenario der 1.5°C Ziels, von jenen des 2°C subtrahiert dargestellt sind.

Abb. 5.12 wird die Differenz der Anzahl Kälteperiode des Klimaindexes FD0 dargestellt, wobei die Daten für das Szenario der 1.5°C Ziels, von jenen des 2°C subtrahiert dargestellt sind.

In Abb. 5.13 wird die Europakarte in 8 Gebiete eingeteilt (siehe 4.4), nämlich in (a) Britische Inseln, (b) Iberische Halbinsel, (c) Frankreich, (d) Mitteleuropa, (e) Skandinavien, (f) Alpen, (g) Mediterranes Gebiet und in (f) Osteuropa. Die blaue Linie repräsentiert das Klimasignal für das 1.5°C Ziel und die grüne Linie das Klimasignal für das 2.0°C Ziel. Die Saisonen sind jeweils an den Schnittlinien des Kreises mit den Achsen aufgetragen und die Magnitude des Klimasignals wird entlang der Achsen aufgetragen. Aufgrund der verwendeten statistischen Methoden ist das Bild der Erwärmung ähnlich nur die Magnitude des 2.0° Ziels ist stärker ausgeprägt. Wie schon in den vorherigen Plots ersichtlich erkennt man auch hier, dass die stärkste Erwärmung in (e) Skandinavien und (h) Russland erfolgt mit einer Magnitude die zum Teil 2°C im Falle des 2.0°C Ziels überschreitet. Deutlich geringerer Anstieg der Erwärmung ist in den übrigen Gebieten erkennbar, speziell in (a) Britische Inseln, (b) Iberische Halbinsel und (c) Frankreich. Auch sieht man, dass für nördliche Gebiete die Erwärmung in den Monaten DJF und MAM stärker ist als für die Monate JJA und SON.

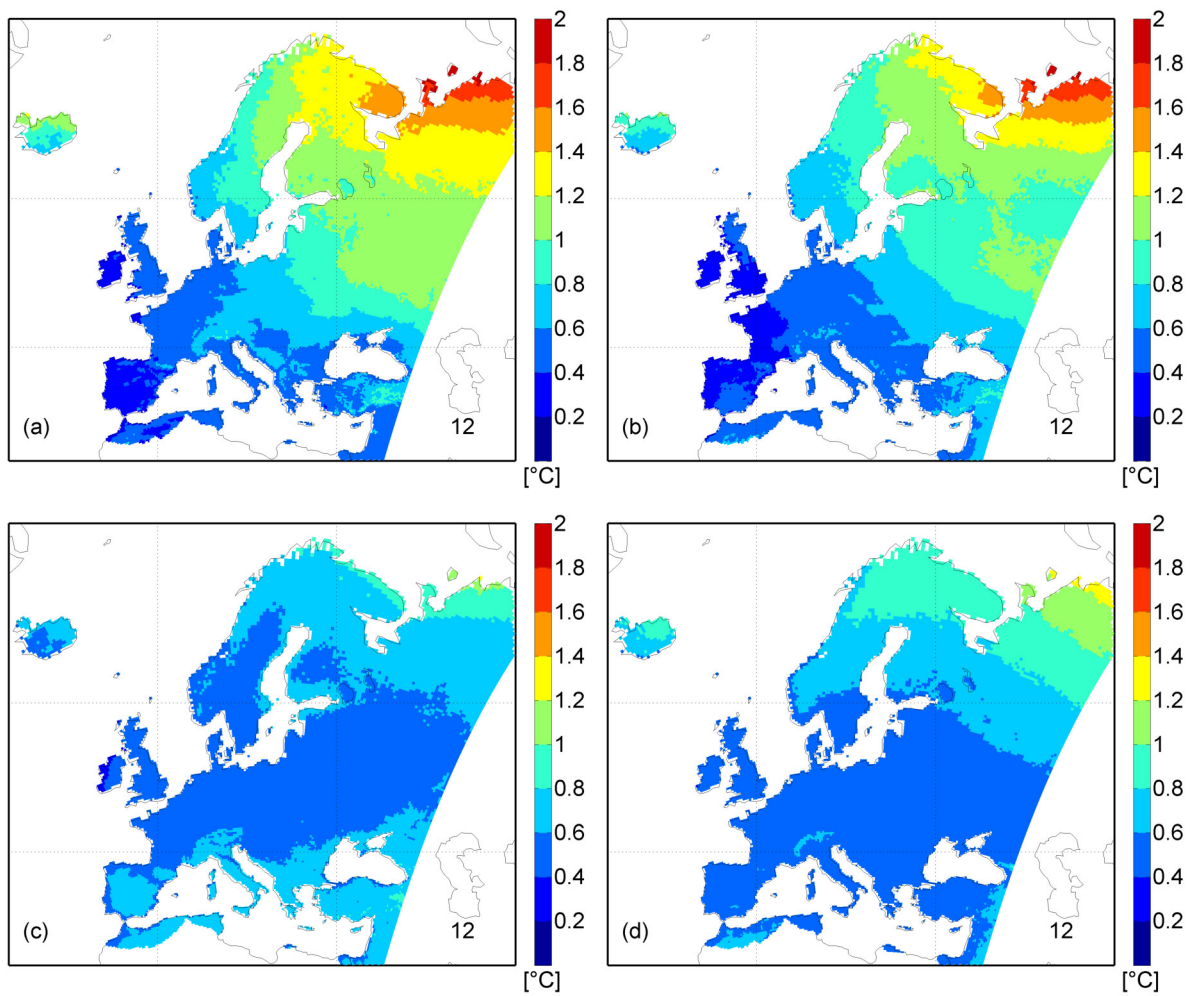


Abbildung 5.10: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ\text{C}} - \text{Daten}_{1.5^\circ\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes tasmin (Multi-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

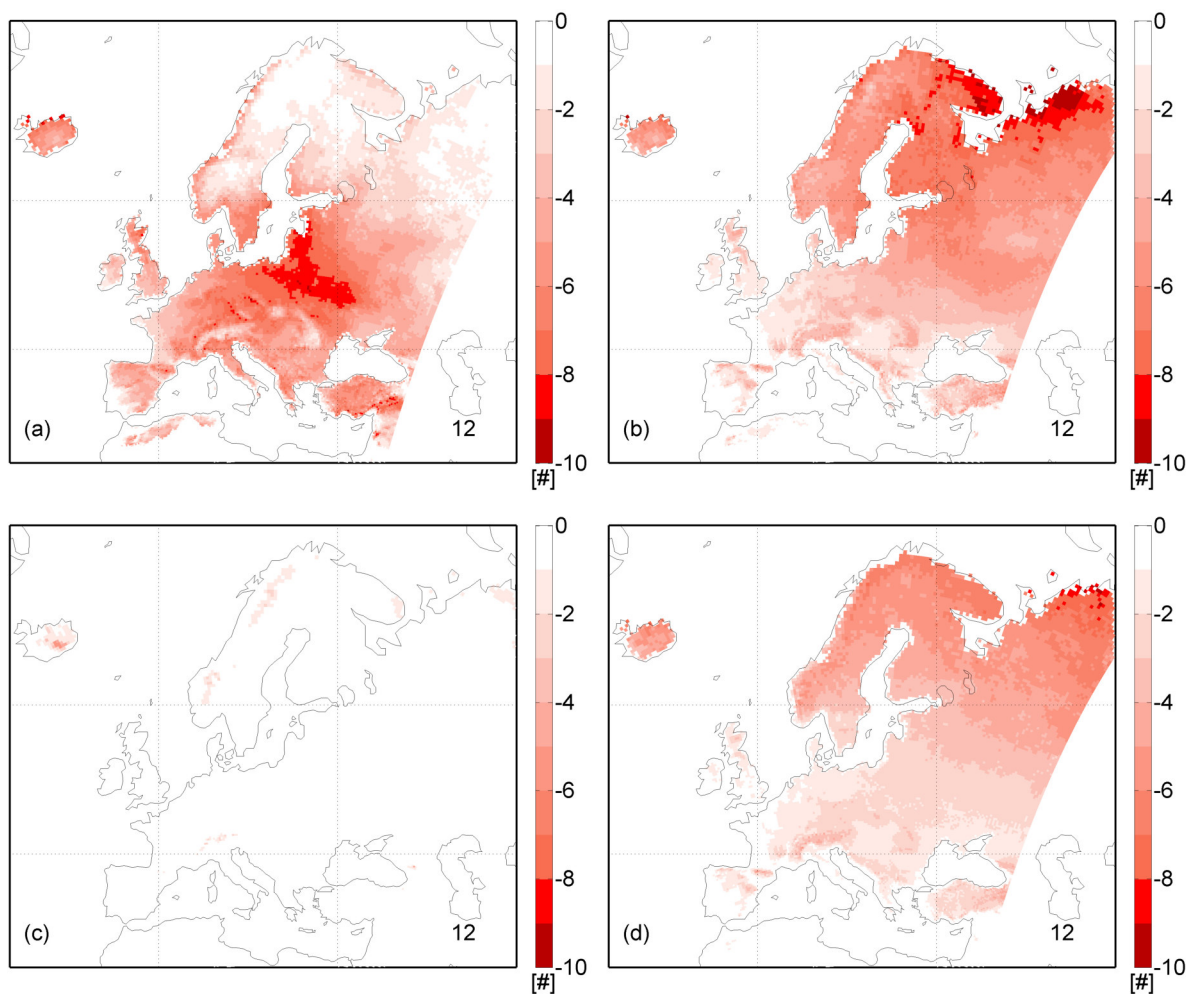


Abbildung 5.11: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^{\circ}\text{C}} - \text{Daten}_{1,5^{\circ}\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes FD0 (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

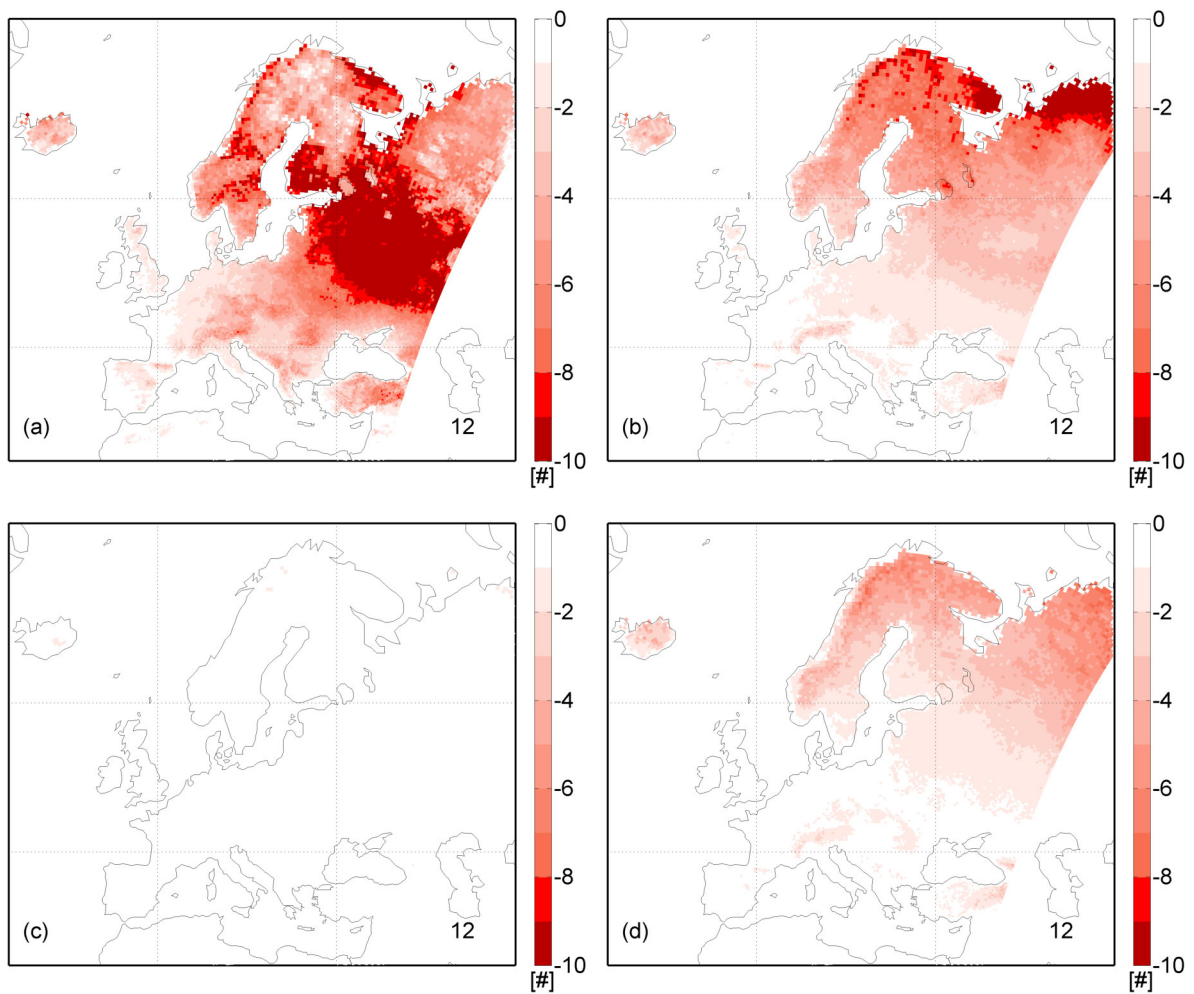


Abbildung 5.12: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ\text{C}} - \text{Daten}_{1.5^\circ\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes CSDI (Multi-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

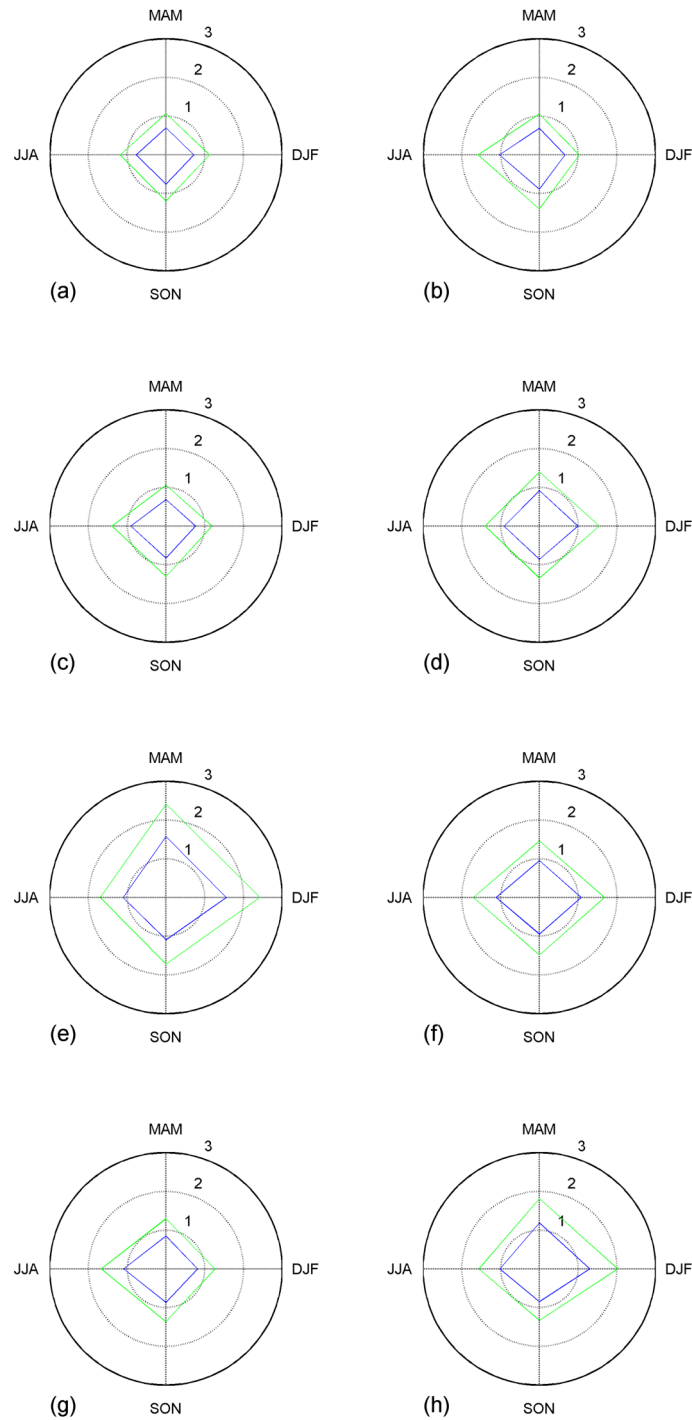


Abbildung 5.13: Vergleich Klimasignal des 1.5°C Ziels (blau) mit einer Erwärmung von 2.0°C (grün) für den Klimaindex tasmin in (a) British Isles, (b) Iberian Peninsula, (c) France, (d) Mid-Europe, (e) Scandinavia, (f) Alps, (g) Mediterranean und (h) Eastern Europe

5.2 Simulationen des Klimaindexes tasmax

5.2.1 1.5°C Ziel mittels der Direct Methode

In Abb. 5.14 ist die erwartete gemittelte tägliche Maximaltemperatur dargestellt. In der ersten Spalte ist der Multi-Model-Mean des saisonal Mittelwerts der Klimaperiode 1971 - 2000 anhand der RCMs - Bias über die jeweilige Saison geplottet. In der zweiten der Multi-Model-Mean des saisonal Mittelwerts der Klimaperiode 2071 - 2100 für das 1.5°C Ziel (Bias korrigiert und skaliert) und in der dritten der Multi-Model-Mean des saisonal gemittelten Klimasignals. Man erkennt auch hier eine starke Erwärmung über den europäischen russischen Teil und über Skandinavien. Dies liegt darin begründet, dass die schneebedeckten Gebiete zurückgehen, i.e. das Albedo sinkt und somit den Prozess der Erwärmung verstärkt. Weiters ist speziell in der JJA-Saison eine stärkere Erwärmung im Mittelmeerraum erkennbar. Während Mitteleuropa eine moderate Erwärmung wiederfährt über alle Saisonen ist die nördliche Erwärmung in kalten Saisonen am ausgeprägtesten und die südliche Erwärmung in warmen Saisonen am ausgeprägtesten. Das Maximum der Magnitude im Klimasignal überschreitet in Russland und Skandinavien 2°C und liegt somit weit über der durchschnittlichen Erwärmung des 1.5°C Ziels.

In Abb. 5.15 sind die Tage dargestellt an denen die Temperatur die 25°C Schranke überschreitet und jeweils das Maximum der längsten Periode pro Jahr wird über die 30 Jahre gemittelt, womit wieder der Multi-Model-Mean gebildet wird. Die Tendenz der vorhergehenden Abbildung ist auch hier erkennbar. Generell wird die 25°C Grenze europaweit nur selten überschritten, was in den Grafiken klar erkennbar ist. Repräsentativ und nähere Betrachtung erscheinen nur für die Saison JJA sinnvoll. Wenig überraschend erhöhen sich die Anzahl der Tage im mediterranen Gegenden. In mediterranen Gebieten und um das schwarze Meer steigt die Anzahl an Trockentagen im Schnitt auf über 10 Tage an.

Abb. 5.16 zeigt die Sommertage, i.e. das Mittel pro Saison über die Jahre der zusammenhängenden Hitzetage/Wärmetage. Deutlichste Erhöhung der Perioden findet man wieder in mediterranen Gegenden, wobei zu berücksichtigen ist, dass die Standardabweichung über den Gebieten die Afrika umfassen sehr hoch ist in den Observationsdaten, wie in Abbildung 3.6 ersichtlich.

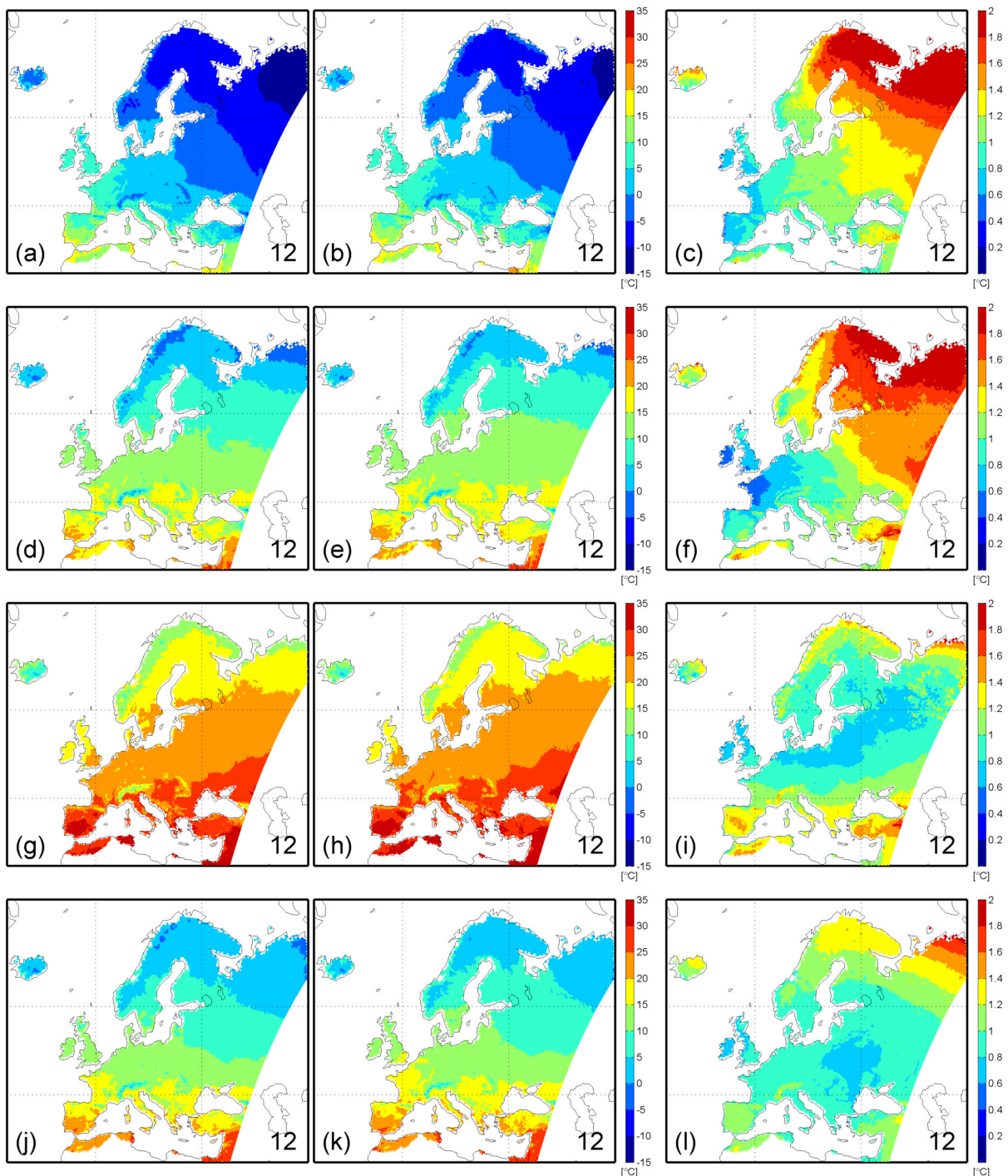


Abbildung 5.14: Darstellung des Klimaindexes tasmax (Muilt-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C Ziel Muilt-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), Muilt-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Muilt-Model-Mean des saisonalen Mittels des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

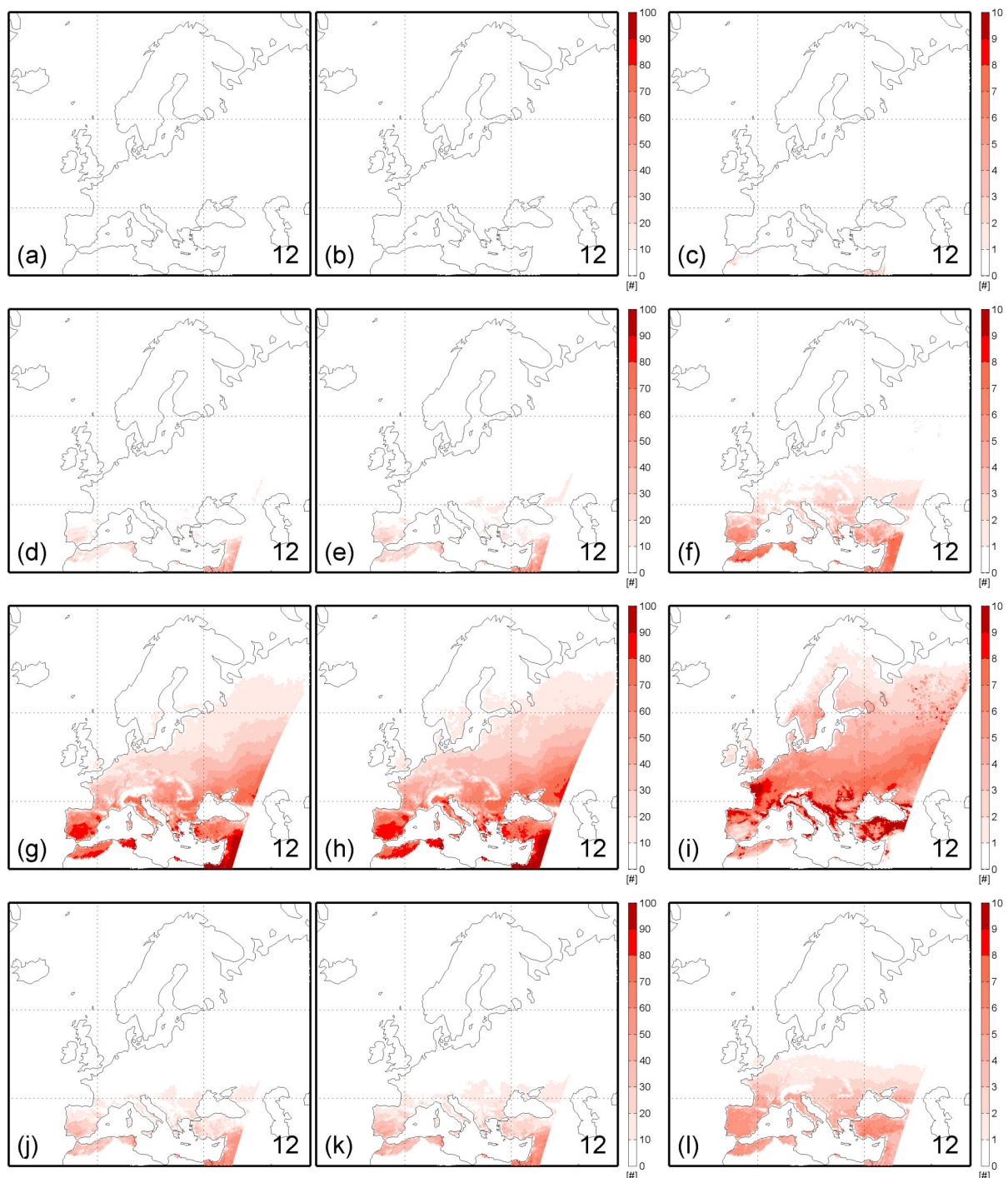


Abbildung 5.15: Darstellung des Klimaindexes SU25 (Mult-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C der Mult-Model-Mean Ziel des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), der Mult-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Mult-Model-Mean der saisonalen Differenz ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

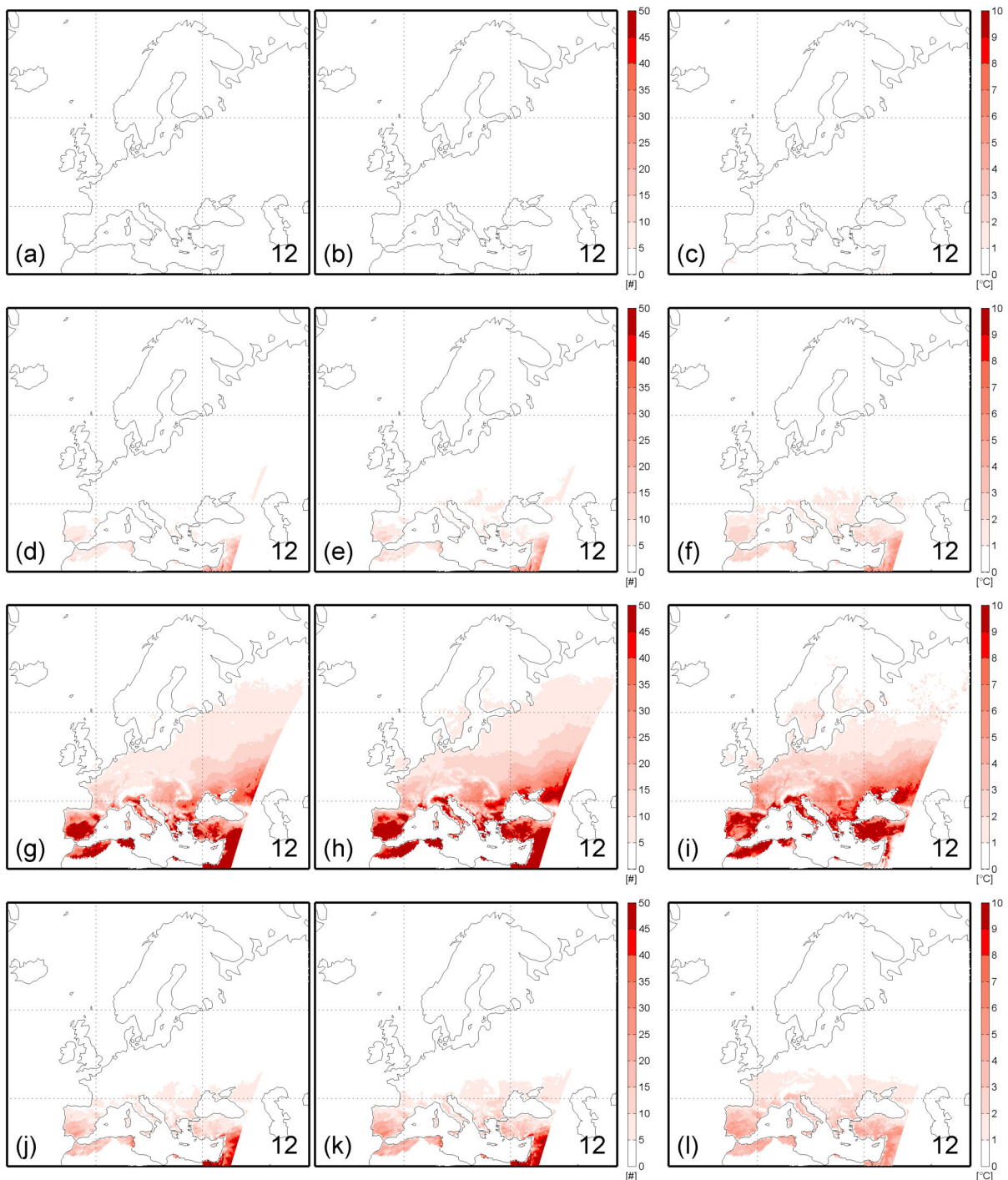


Abbildung 5.16: Darstellung des Klimaindexes WSDI (Mult-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5°C Ziel der Mult-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 in (a), (d), (g) und (j), der Mult-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und der Mult-Model-Mean der saisonalen Differenz ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

5.2.2 Unterschied der Direct-Methode und der Deltachange-Methode zum 1.5°C Ziel

In Abbildung 5.17 sind signifikante Abweichungen zu erkennen. Vergleicht man die absoluten Maximaltemperaturen der Klimaperiode 2071 - 2100 in der Abbildung 5.14 sind natürlich nur Abweichungen in den Bereichen, wo sich die durchschnittliche tägliche Minimaltemperatur oberhalb oder knapp unter 25°C liegt. Auffällig hierbei ist, dass die Deltachange-Methode in der Saison JJA Hitzetage/Wärmetage in Russland generiert.

In Abbildung 5.18 ist speziell in der Saison JJA eine stärkere Abweichung erkennbar. Dies kann an der stärkeren Streuung der Observationsdaten liegen. Fällt ein Wert der Zeitreihe über die 25°C hat das starke Auswirkungen auf das Ergebnis. In Südeuropa und Afrika ist die durchschnittliche Maximaltemperatur in (c) JJA über 25°C, hier ist zeigt die Direct-Methode weniger Hitzetage an. Am Balkan in (c) JJA sieht man hingegen, dass die Direct-Methode mehr Hitzetage anzeigt.

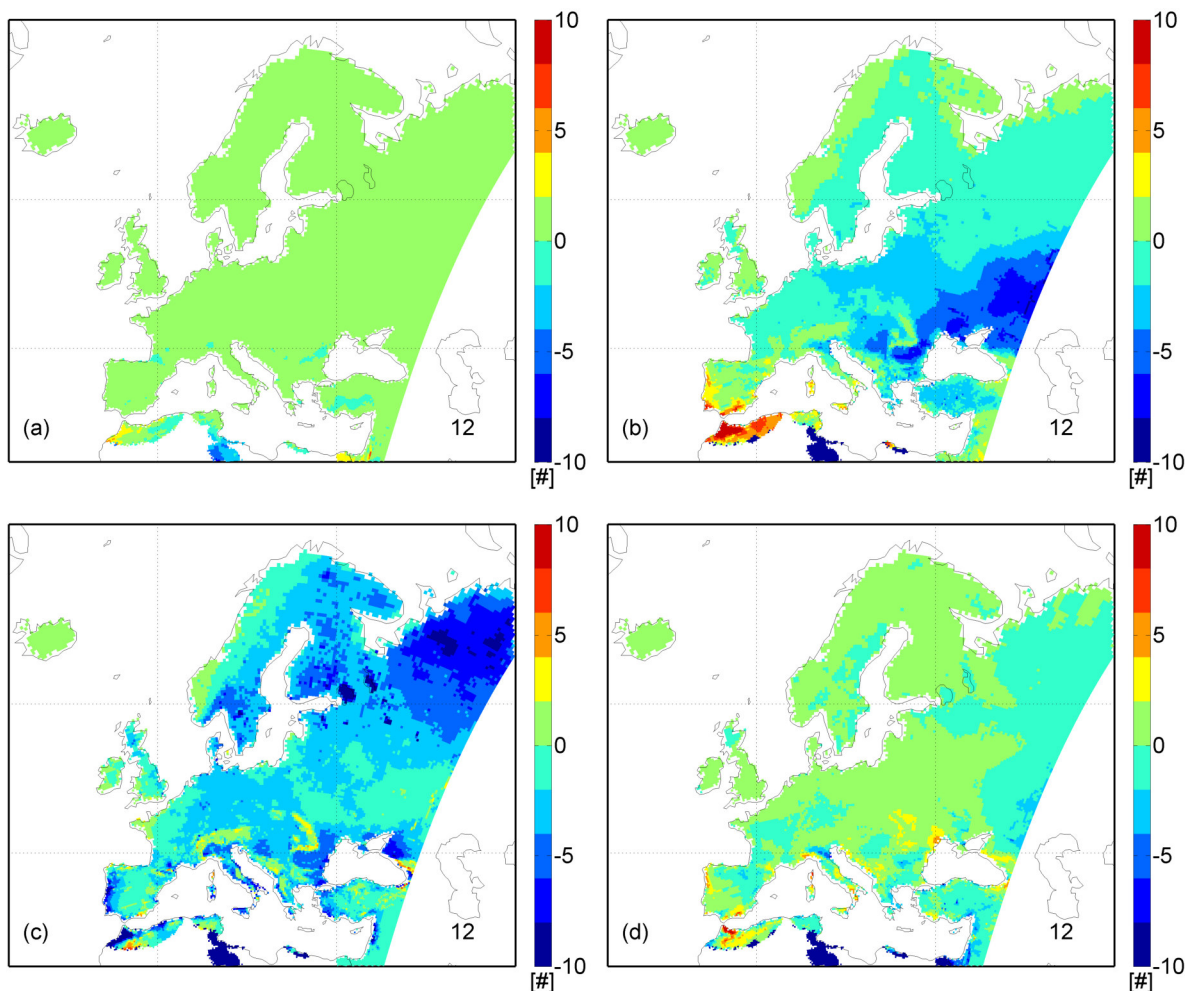


Abbildung 5.17: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Direct-Methode}} - \text{Daten}_{\text{Deltachange-Methode}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes SU25 (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

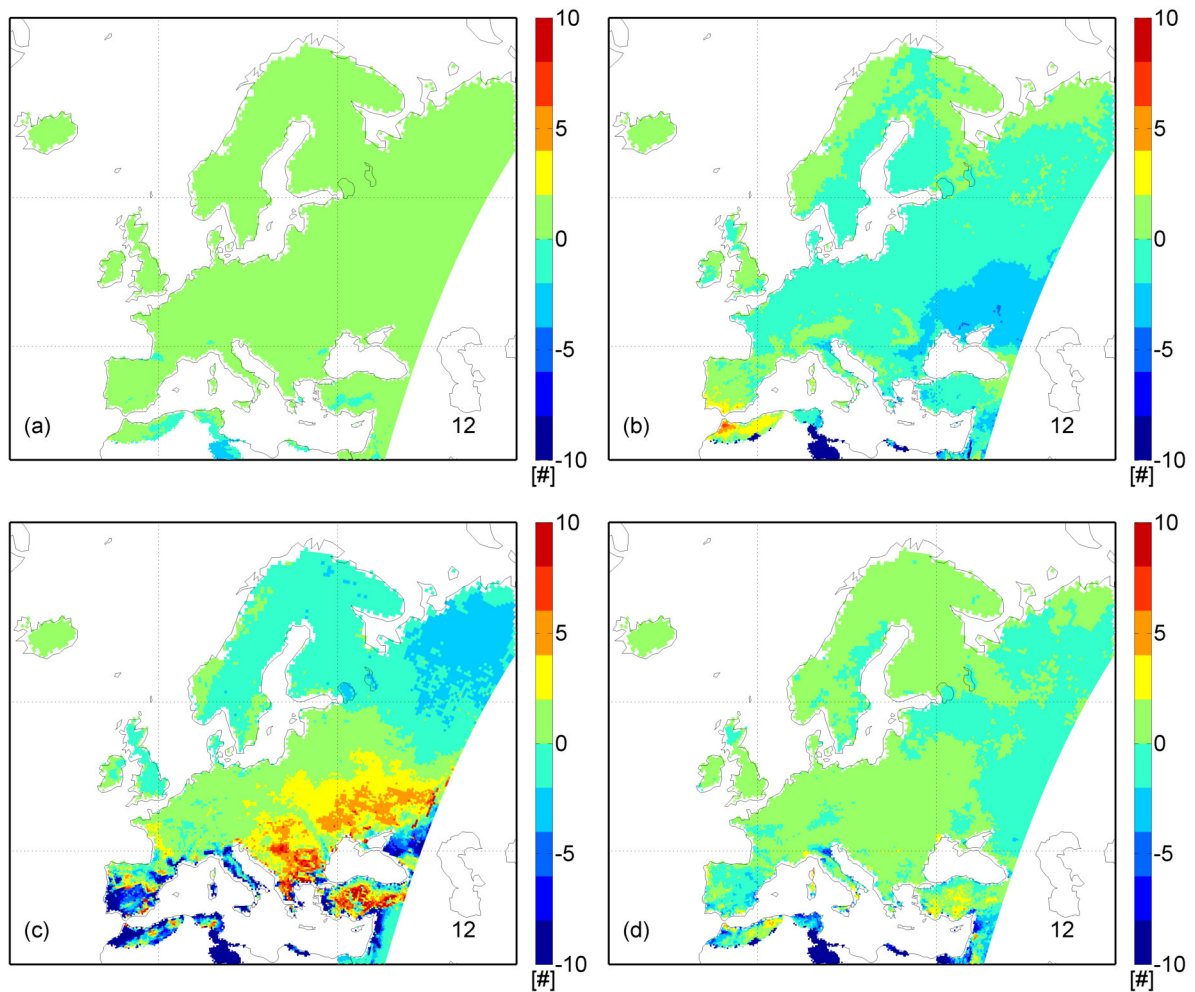


Abbildung 5.18: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{\text{Direct-Methode}} - \text{Daten}_{\text{Deltachange-Methode}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes WSDI (Multi-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

5.2.3 Vergleich 1.5 Grad Ziel mit einer Erwärmung von 2 Grad

Abb. 5.19 zeigt die Differenz der Klimasignale der Szenarien 1.5°C globaler Erwärmung und 2°C globaler Erwärmung. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich für den Klimaindex tasmax eine signifikante Differenz in der Magnitude einstellt. Auch hier ist in den kälteren Saisonen ein Nord-Süd Gradient erkennbar, also ein stärkerer Anstieg der Temperatur im Norden, als im Süden. In Teilen von Russland beträgt die Differenz zum Teil über 1.5°C.

In Abb. 5.20 wird die Differenz der Anzahl der Tage des Klimaindexes FD0 dargestellt, wobei die Daten für das Szenario der 1.5°C Ziels, von jenen des 2°C subtrahiert dargestellt sind.

Abb. 5.21 wird die Differenz der Anzahl Kälteperiode des Klimaindexes FD0 dargestellt, wobei die Daten für das Szenario der 1.5°C Ziels, von jenen des 2°C subtrahiert dargestellt sind.

In Abb. 5.22 wird die Europakarte in 8 Gebiete eingeteilt (siehe 4.4), nämlich in (a) Britische Inseln, (b) Iberische Halbinsel, (c) Frankreich, (d) Mitteleuropa, (e) Skandinavien, (f) Alpen, (g) Mediterranes Gebiet und in (h) Osteuropa. Die blaue Linie repräsentiert das Klimasignal für das 1.5°C Ziel und die grüne Linie das Klimasignal für das 2.0°C Ziel. Die Saisonen sind jeweils an den Schnittlinien des Kreises mit den Achsen aufgetragen und die Magnitude des Klimasignals wird entlang der Achsen aufgetragen. Aufgrund der verwendeten statistischen Methoden ist das Bild der Erwärmung ähnlich nur die Magnitude des 2.0° Ziels ist stärker ausgeprägt. Wie schon in den vorherigen Plots ersichtlich erkennt man auch hier, dass die stärkste Erwärmung in (e) Skandinavien und (h) Russland erfolgt mit einer Magnitude die zum Teil 2°C im Falle des 2.0°C Ziels überschreitet. Deutlich geringerer Anstieg der Erwärmung ist in den übrigen Gebieten erkennbar, speziell in (a) Britische Inseln, (b) Iberische Halbinsel und (c) Frankreich. Auch sieht man, dass für nördliche Gebiete die Erwärmung in den Monaten DJF und MAM stärker ist als für die Monate JJA und SON.

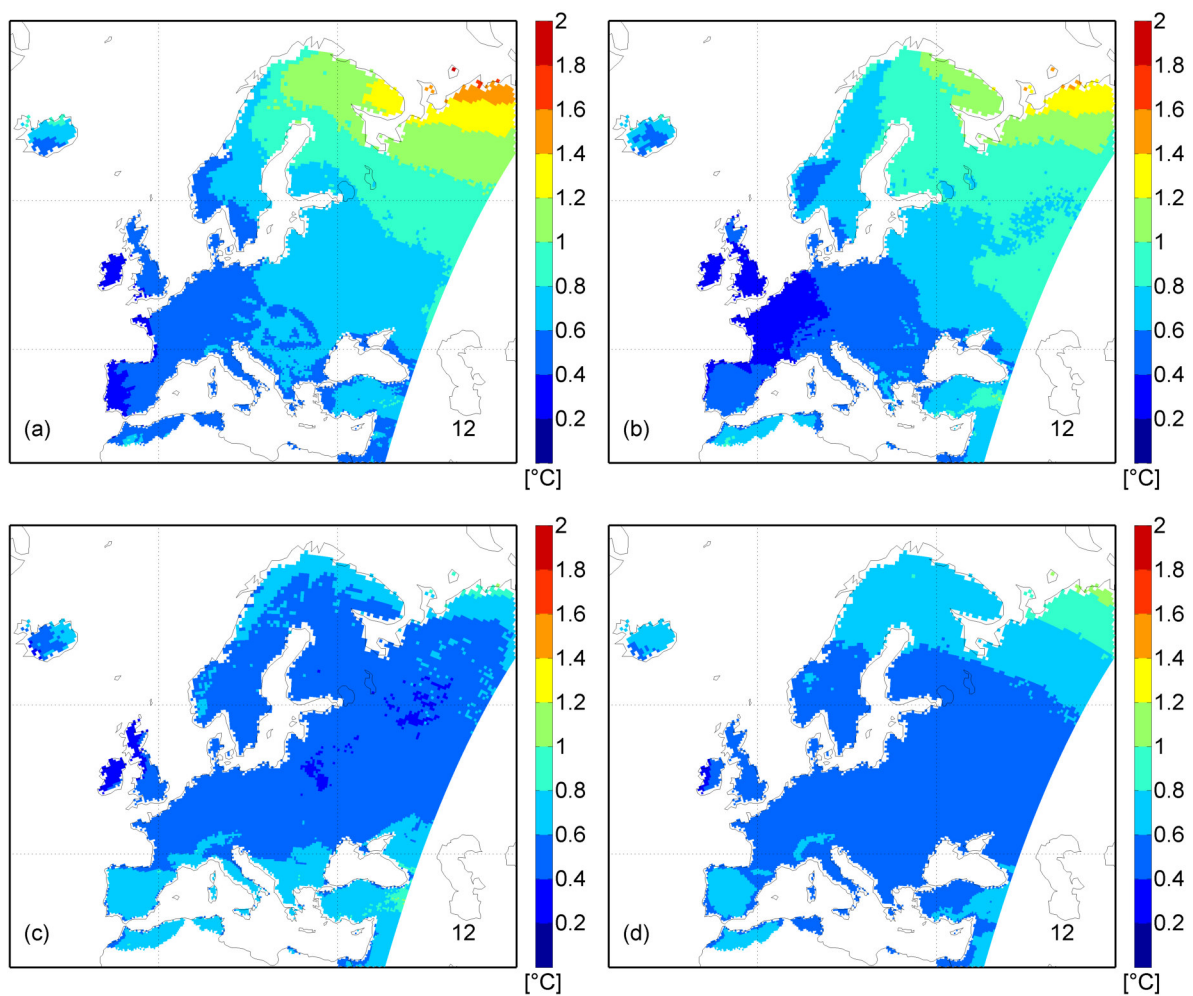


Abbildung 5.19: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^{\circ}\text{C}} - \text{Daten}_{1,5^{\circ}\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes tasmin (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

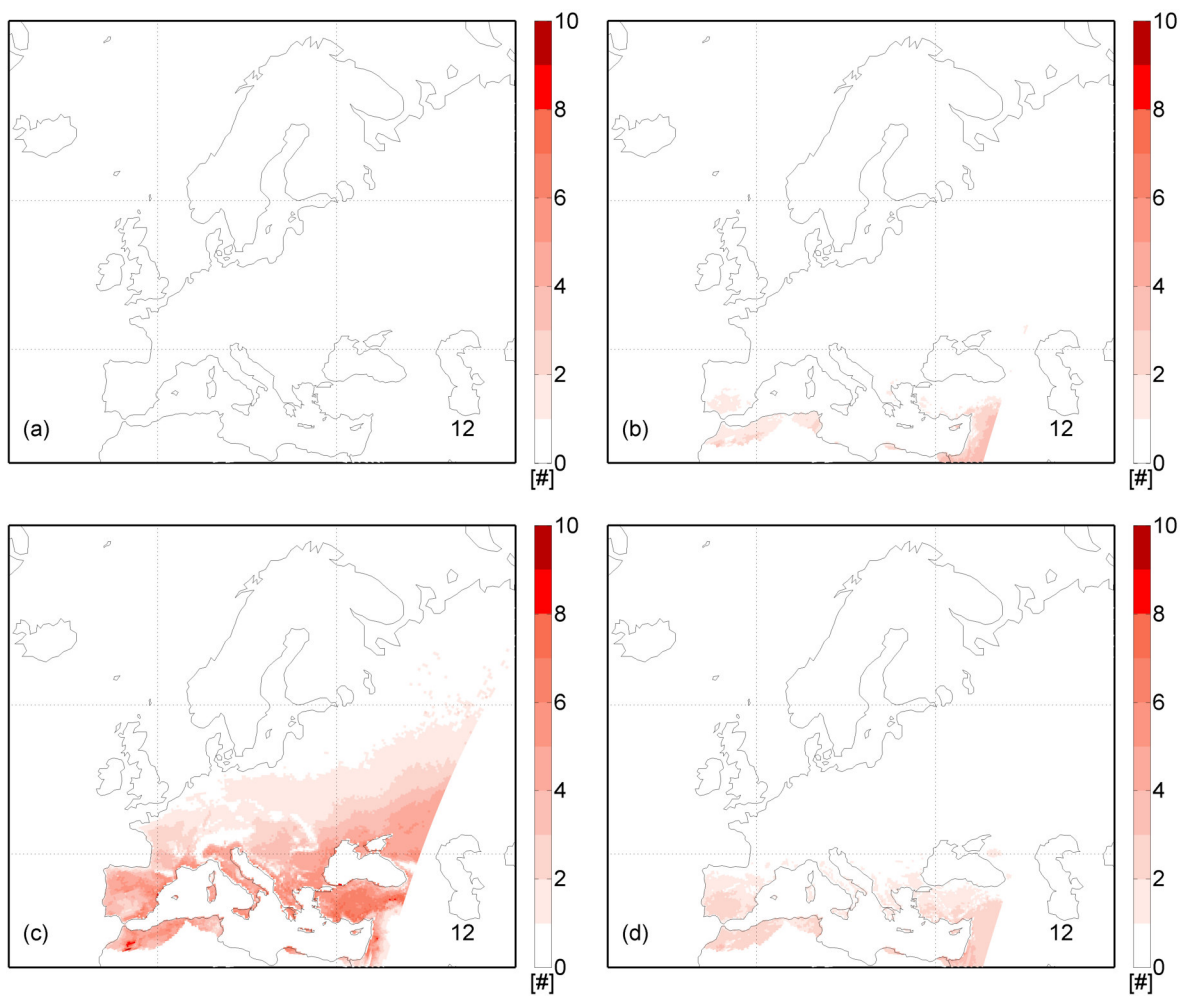


Abbildung 5.20: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ\text{C}} - \text{Daten}_{1.5^\circ\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes SU25 (Multi-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5°C Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

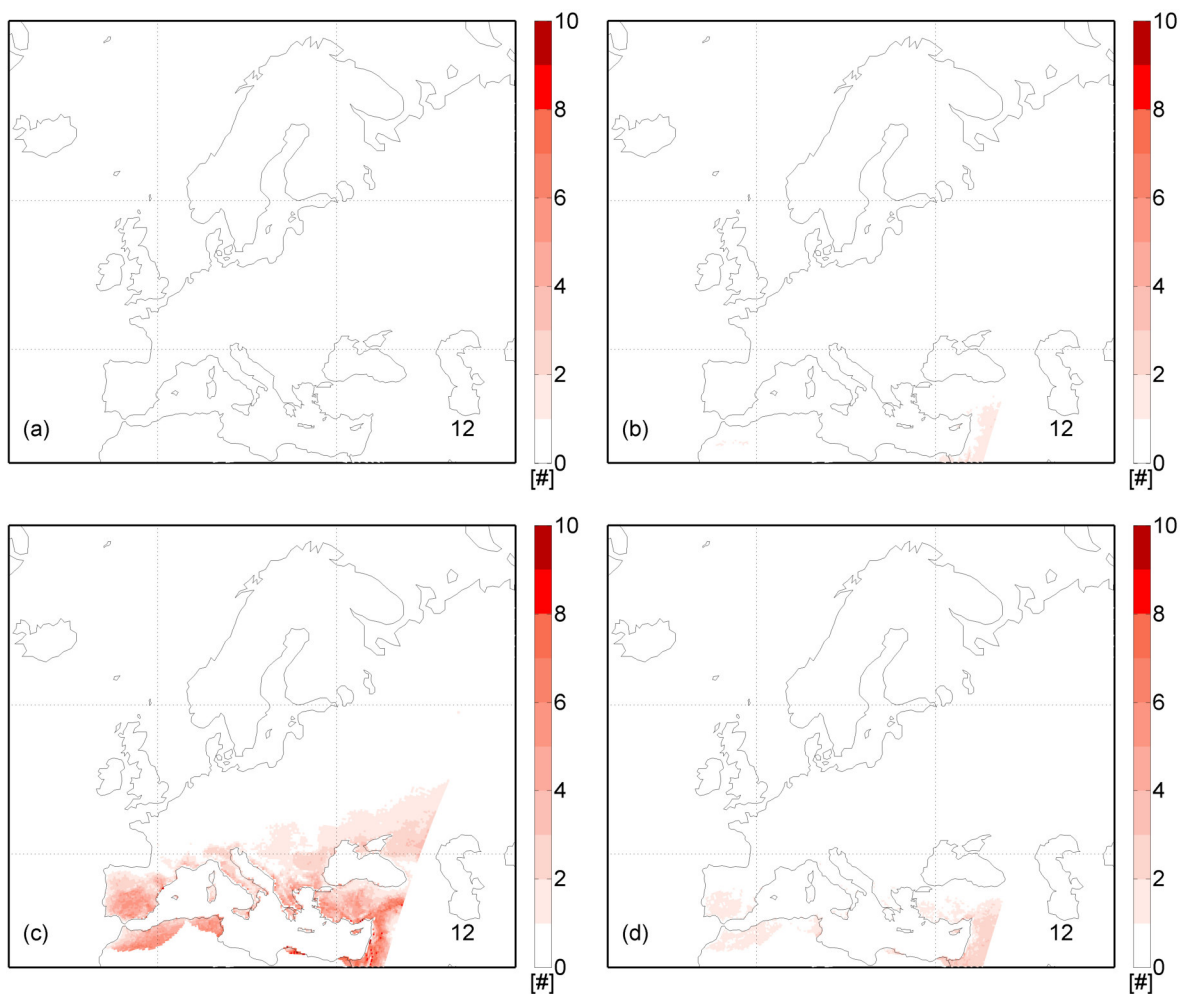


Abbildung 5.21: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^{\circ}\text{C}} - \text{Daten}_{1,5^{\circ}\text{C}}$) vom Klimasignal des Klimaindexes WSDI (Multi-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das $1,5^{\circ}\text{C}$ Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

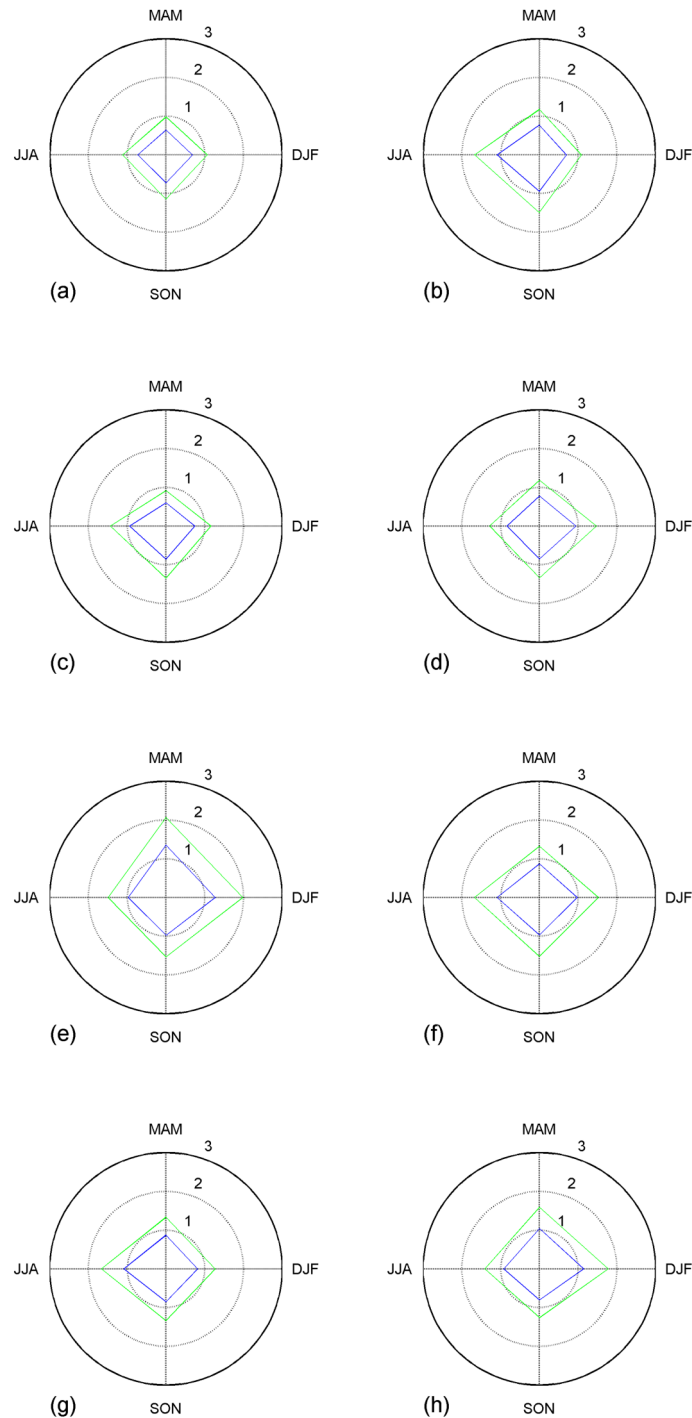


Abbildung 5.22: Vergleich Multi-Model-Mean des Klimasignals vom 1.5°C Ziels (blau) mit einer Erwärmung von 2.0°C (grün) für den Klimaindex tasmax in (a) British Isles, (b) Iberian Peninsula, (c) France, (d) Mid-Europe, (e) Scandinavia, (f) Alps, (g) Mediterranean und (h) Eastern Europe

5.3 Simulationen des Klimaindexes pr

5.3.1 1.5°C Ziel mittels der Direct Methode

Die Ergebnisse werden in 12er Plots dargestellt. Nach den Reihen sind die Saisonen geordnet, absteigend von DJF (Dezember, Jänner und Februar), MAM (März, April und Mai), JJA (Juni, Juli und August) und SON (September, Oktober und November). Die erste Spalte zeigt die Klimaperiode von 1971 - 2000 an und die zweite Spalte repräsentiert die Klimaperiode von 2071 - 2100. In der dritten Spalte ist das Klimasignal bzw die Differenz der ersten beiden Spalten dargestellt. Wie in Kapitel 4.3 erläutert, ist die Basis für die erste Spalte die Bias korrigierten RCM-Datensätze. Die zweite Spalte hat die durch Pattern Scaling und Biaskorrektur geänderten RCM-Datensätze zur Basis und ist die Basis für die Impaktanalyse der Zukunftsperiode, dargestellt in der zweiten Spalte der Abb. 5.5 und 5.6. Da die EOBS - Daten nur Daten über Festland beinhalten, werden in den Grafiken auch nur Daten über Festland angezeigt.

In Abb. 5.23 ist der Multi-Model-Mean des Niederschlags dargestellt. In der ersten Spalte ist der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittelwerts der biaskorrigierten RCMs für die Klimaperiode 1971-2000 des Klimaindexes pr über die jeweilige Saison geplottet. Dieser Datensatz wird für weitere Impaktanalysen verwendet. In der zweiten Spalte ist der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittelwerts der biaskorrigierten und skalierten RCMs für den Klimaindex pr dargestellt. Dieser Datensatz wird als zweiter Datensatz für die Impaktanalysen herangezogen. In der dritten Spalte ist der Multi-Modell-Mean vom saisonalen Mittelwert des Klimasignals dargestellt. Betrachtet man das Klimasignal in der letzten Spalte ((c), (f), (i) und (l)) ist jeweils ein Nord - Süd Gradient erkennbar. Nord- und Mitteleuropa werden feuchter und Südeuropa trockener.

In Abb. 5.24 ist die Anzahl der Tage dargestellt, an denen der Niederschlag über 1 mm/Tag liegt (Klimaindex R01), angegeben in Tagen. Hier sind bei Betrachtung des Klimasignals nur leichte Unterschiede erkennbar. Aber auch hier ist für die Saisonen MAM (f), JJA (i) und SON (l) eine Reduktion in der Anzahl der Feuchttage in Südeuropa zu erkennen.

Die Abb. 5.25 die den Multi-Modell-Mean der Anzahl der zusammenhängenden Tage mit einem Niederschlag über 1 mm/Tag (Klimaindex CWD), angegeben in Tagen. Hier sind nur lokal Unterschiede erkennbar, speziell über Irland und Skandinavien.

Die Abb. 5.26 und Abb. 5.27 zeigen die Anzahl der Tage bei einem Niederschlag kleiner 1 mm/Tag und die Anzahl des Maximums an zusammenhängenden Tagen (Klimaindex CDD). In beiden Grafiken ist ein Anstieg an Tagen in Südeuropa zu erkennen, i.e. Anzahl der Trockentage nimmt zu, wie auch die Anzahl des Maximums an aufeinanderfolgenden Trockentage.

In Abb. 5.28 wird die Niederschlagsintensität angezeigt. I.e. die Summe vom Niederschlag an Feuchttagen ($pr > 1\text{mm}$) dividiert durch die Anzahl der Feuchttage. Prozentuell betrachtet ist der stärkste Zuwachs in Skandinavien und Russland erkennbar.

In Abb. 5.29 zeigt das 95% Quantil des Niederschlags. Auch hier ist großflächig ein prozentueller Anstieg erkennbar.

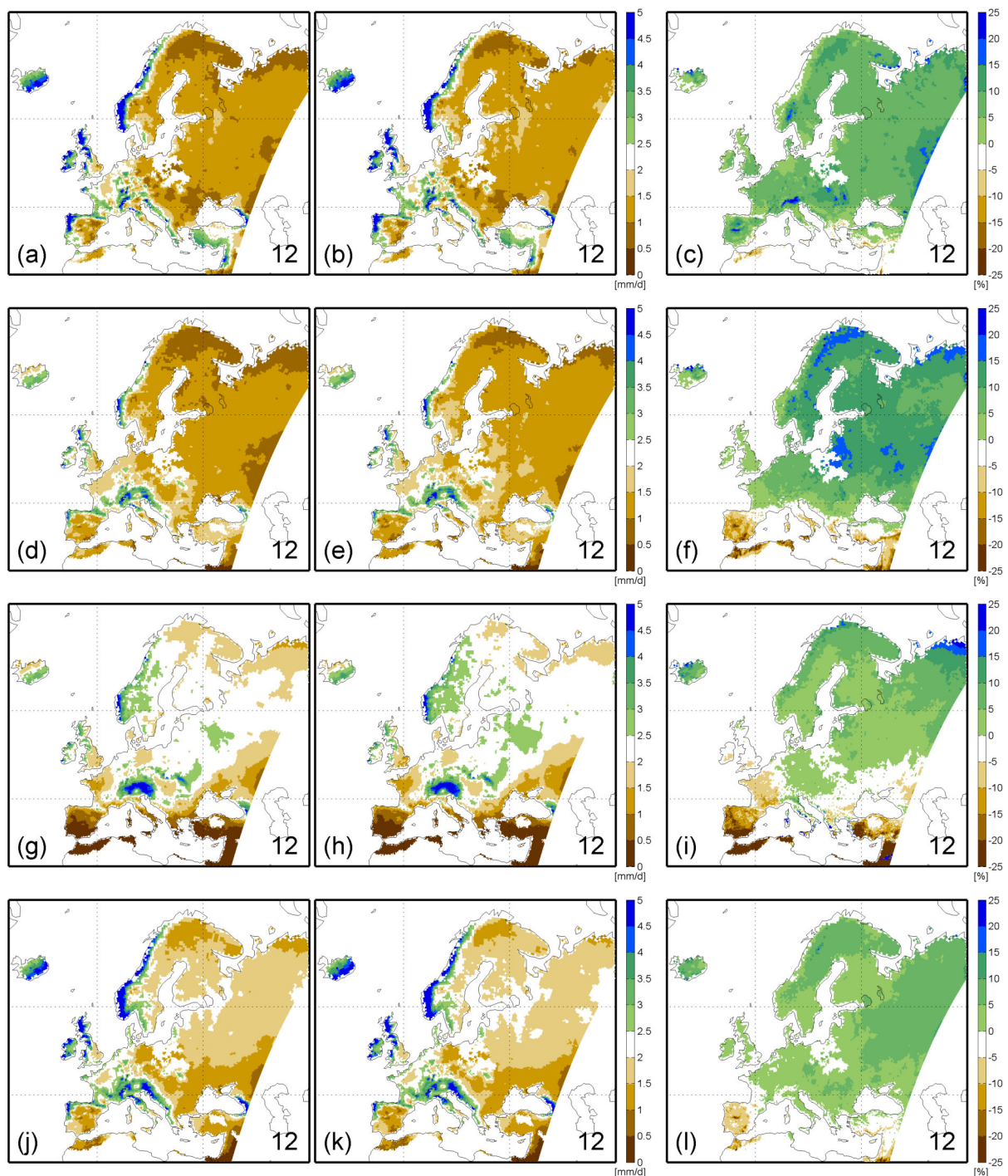


Abbildung 5.23: Darstellung des Klimaindexes pr (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals (DatenVergangenheit/DatenZukunft) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

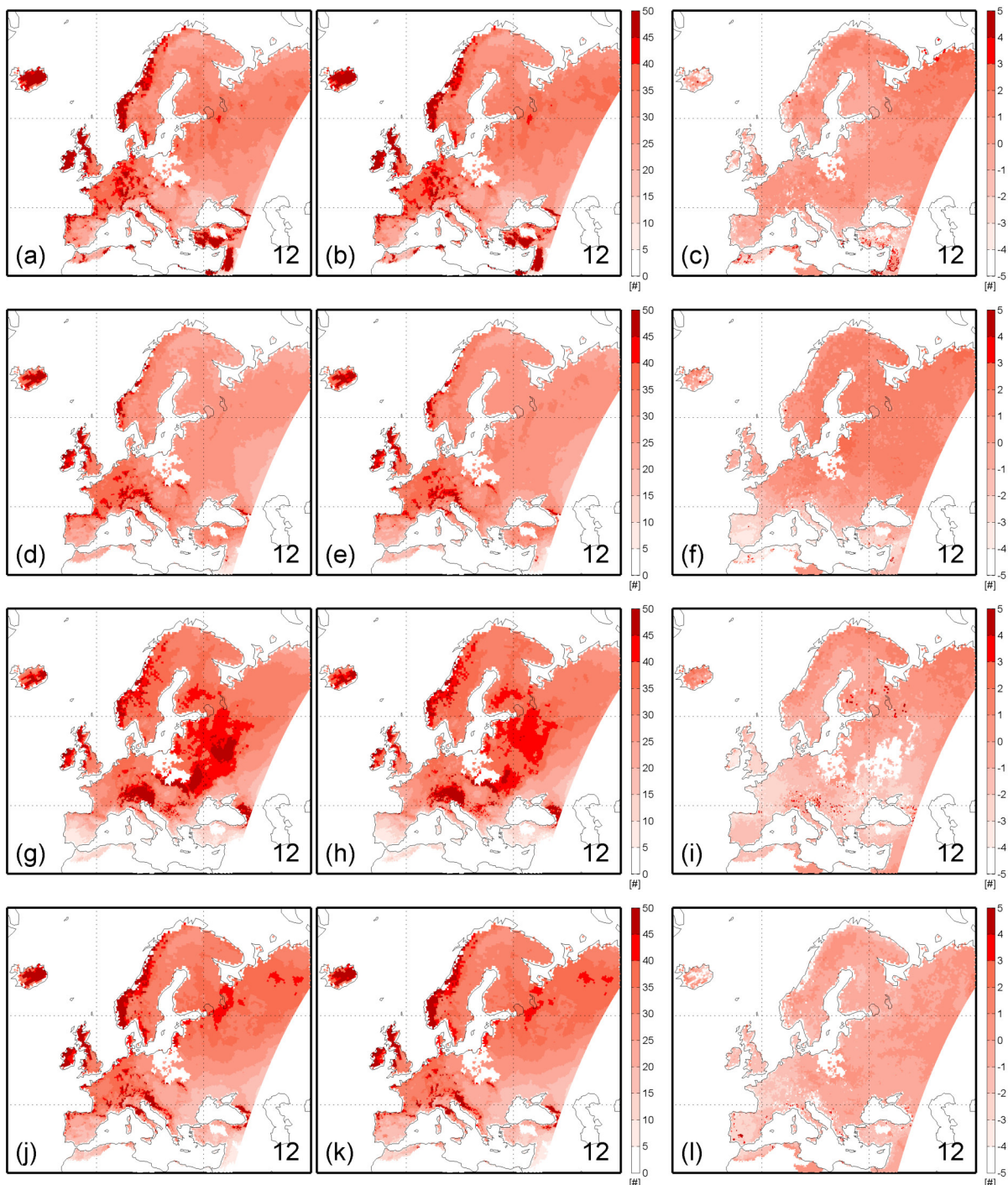


Abbildung 5.24: Darstellung des Klimaindexes R01 ($pr \geq 1\text{mm}$) (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

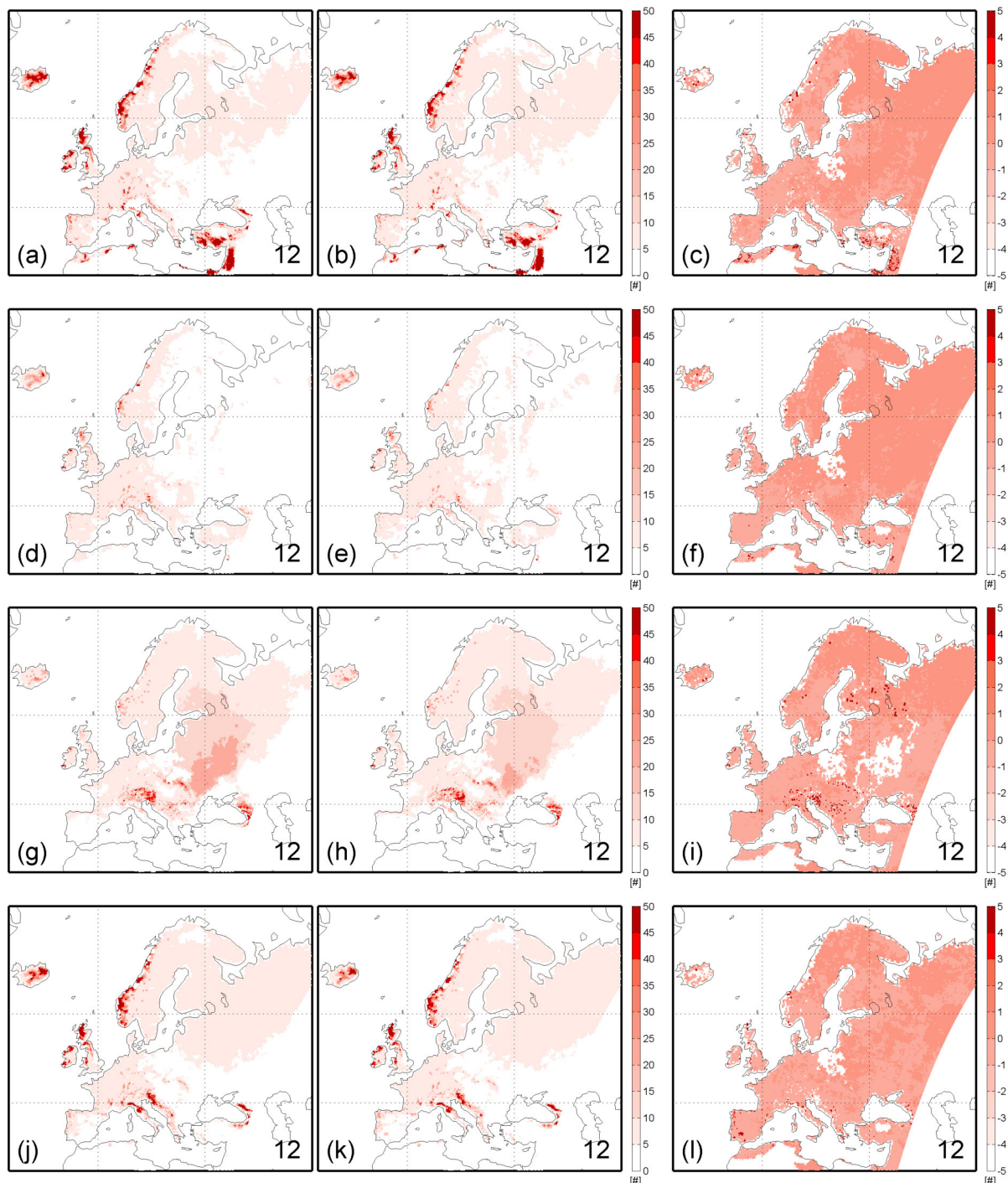


Abbildung 5.25: Darstellung des Klimaindexes CWD (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals (DatenZukunft-DatenVergangenheit) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

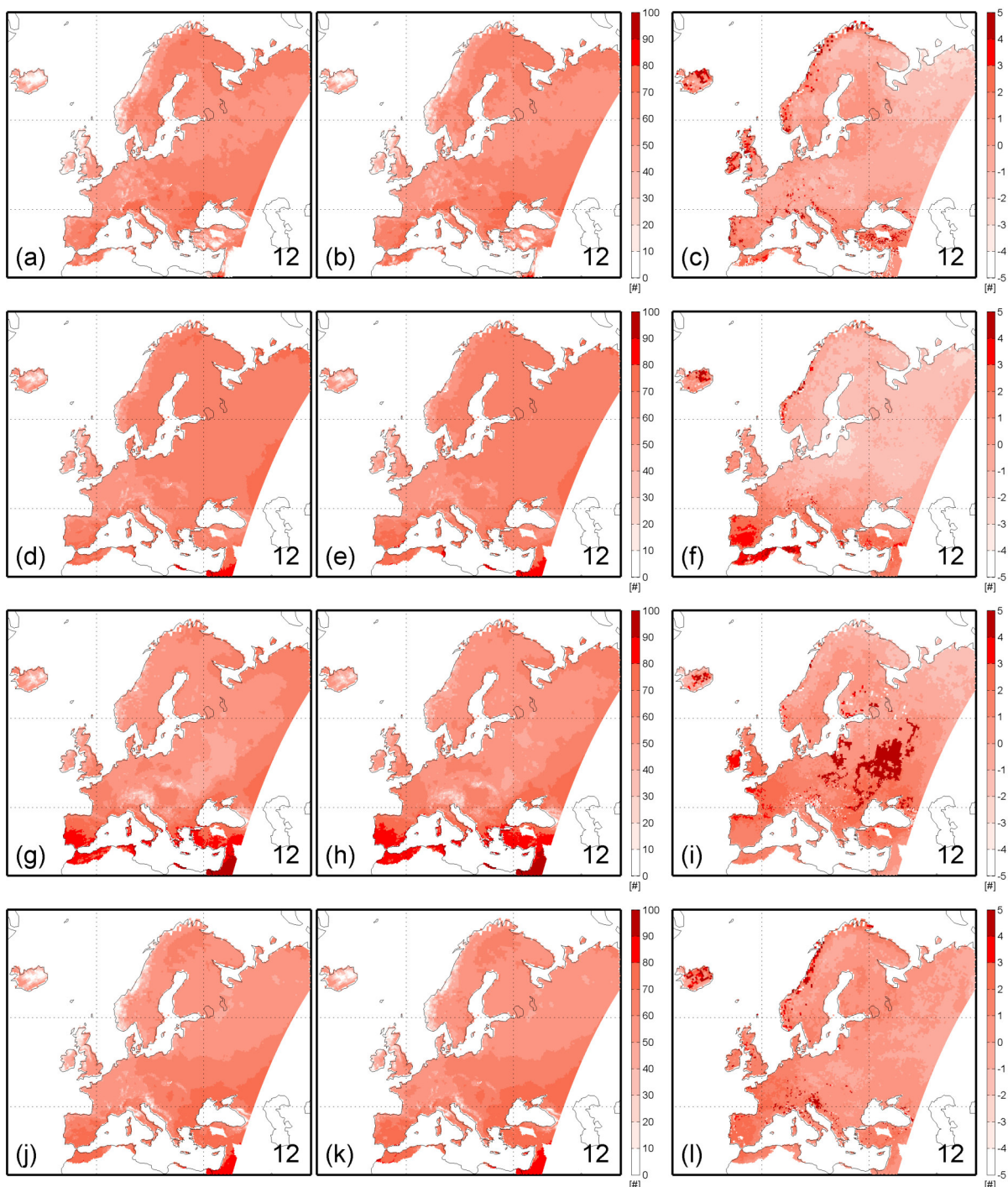


Abbildung 5.26: Darstellung der Daten $pr < 1\text{mm}$ (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals ($\text{Daten}_{\text{Zukunft}} - \text{Daten}_{\text{Vergangenheit}}$) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

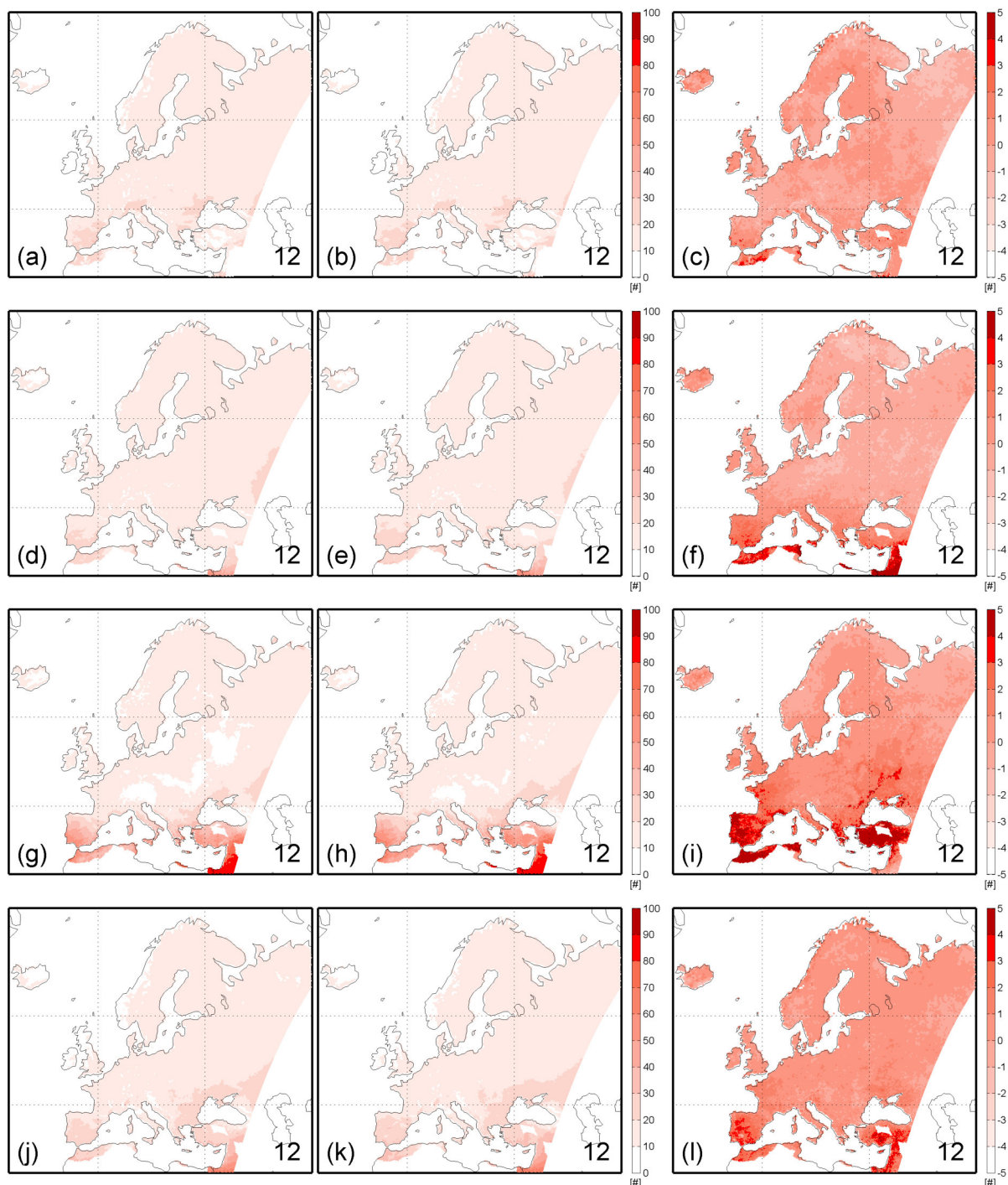


Abbildung 5.27: Darstellung des Klimaindexes CDD (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals (Daten_{Zukunft}-Daten_{Vergangenheit}) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

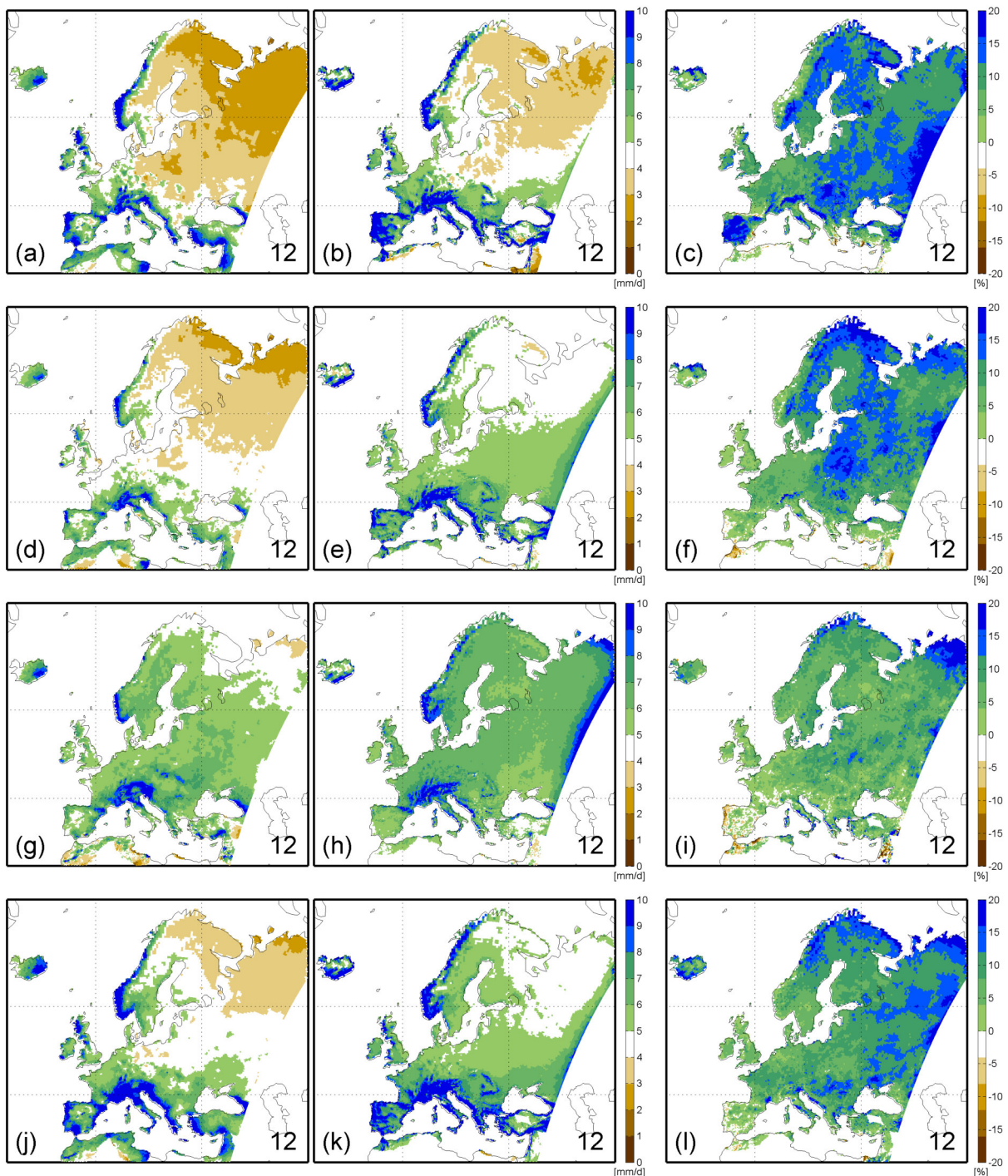


Abbildung 5.28: Darstellung der Niederschlagsintensität (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals (DatenZukunft-DatenVergangenheit) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

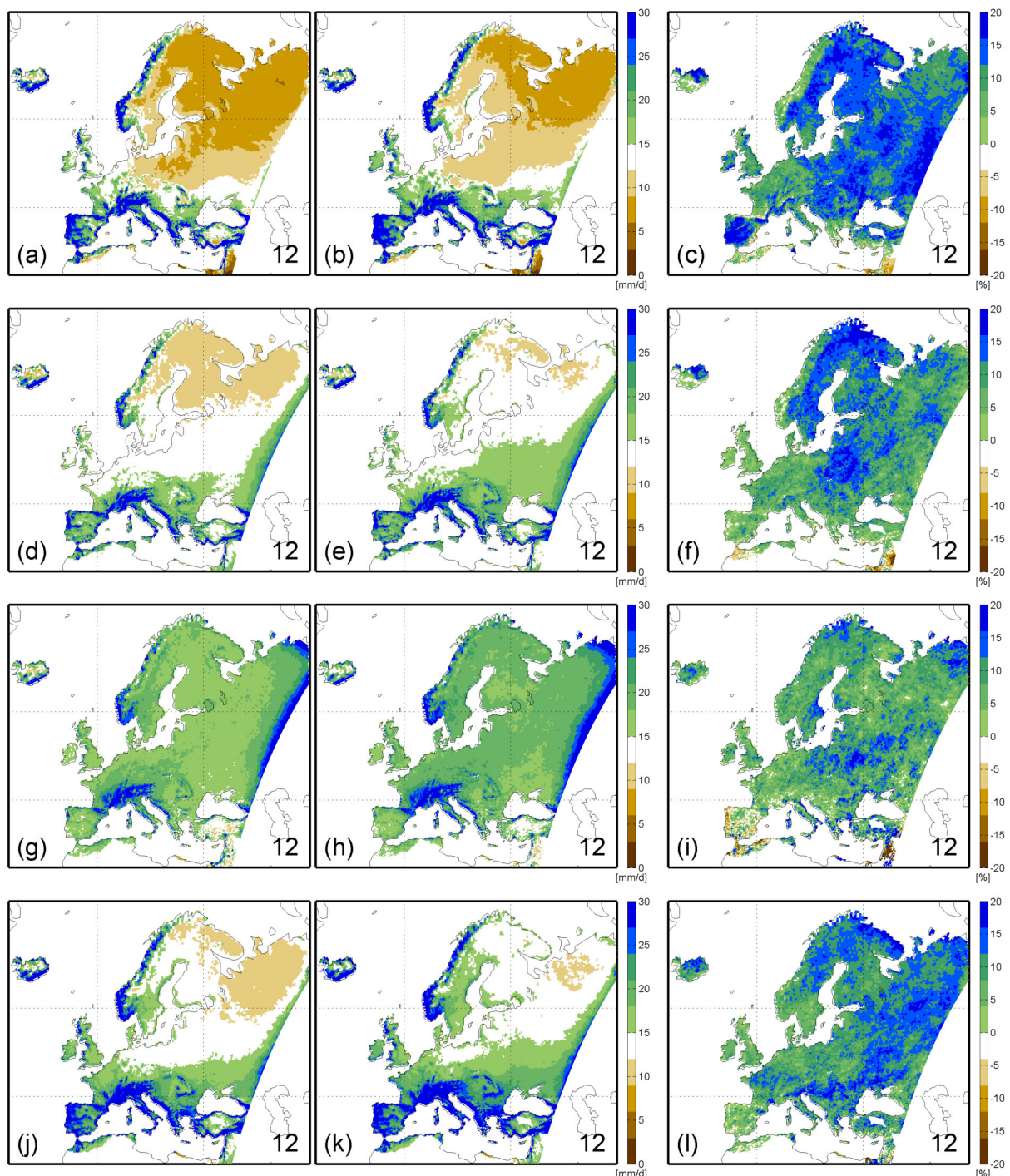


Abbildung 5.29: Darstellung des 95% Quantils des Niederschlags (pr) (Multi-Model-Mean von 12 RCMs) mit der Direct-Methode für das 1.5° Ziel der Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 1971-2000 (EOBS-Daten) in (a), (d), (g) und (j), Multi-Model-Mean des saisonalen Mittels der Klimaperiode 2071-2100 in (b), (e), (h) und (k) und des Klimasignals (Daten_{Zukunft}-Daten_{Vergangenheit}) in (c), (f), (i) und (l) jeweils nach den Quartalen/Saisonen von oben nach unten DJF ((a),(b) und (c)), MAM ((d),(e) und (f)), JJA ((g),(h) und (i)) und SON ((j),(k) und (l)) geordnet.

5.3.2 Vergleich 1.5 Grad Ziel mit einer Erwärmung von 2 Grad

In der Abb. 5.30 ist der Unterschied der Klimasignale des Klimaindex pr in Prozent angegeben. Auch hier ist speziell in der Saison JJA Südeuropa trockener im 2° Szenario, wohingegen der Norden feuchter wird. Selbiges ist in den Abbildungen 5.31 und 5.32 zu erkennen.

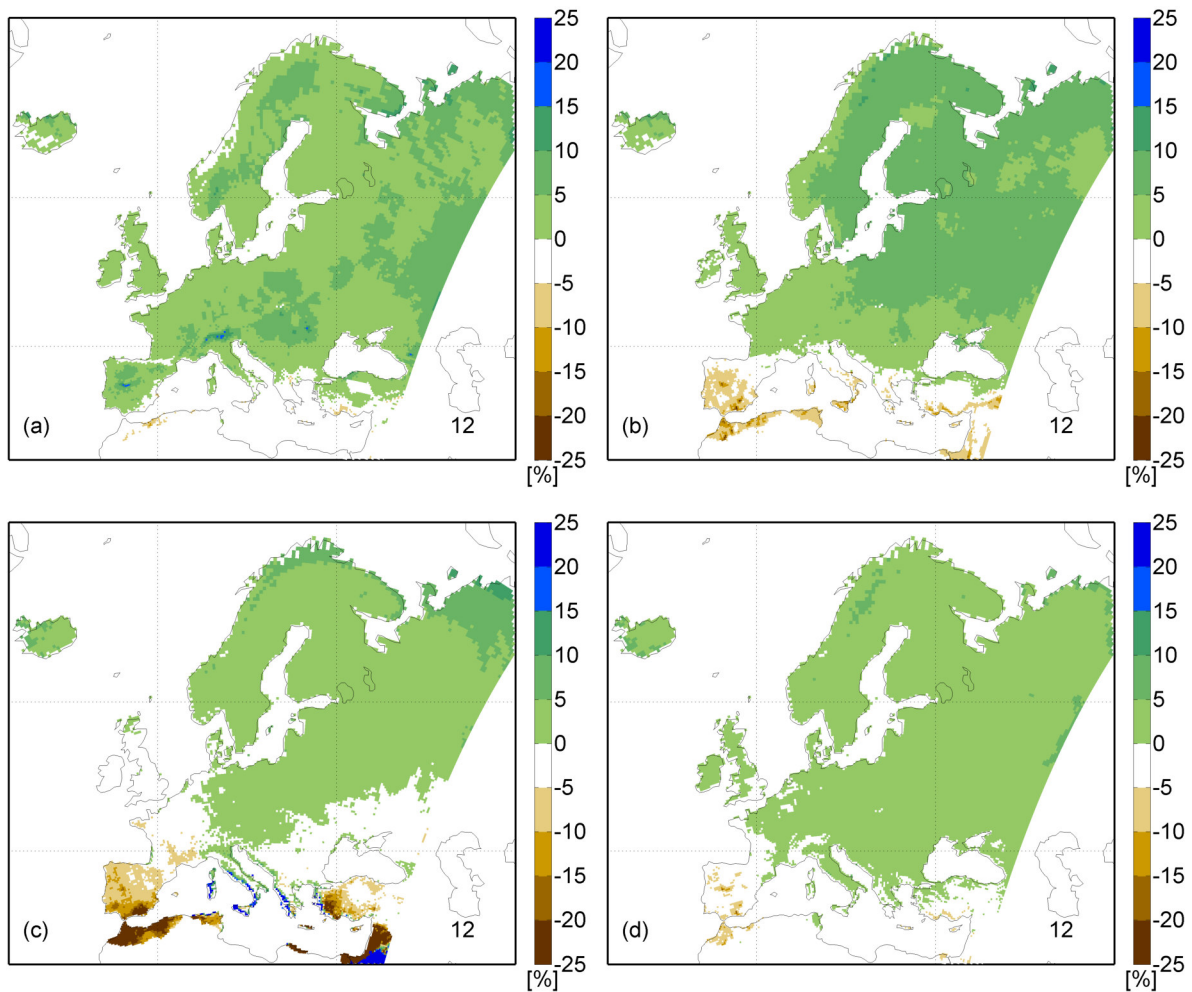


Abbildung 5.30: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ} / \text{Daten}_{1.5^\circ}$) vom Klimasignal des Klimaindexes pr (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

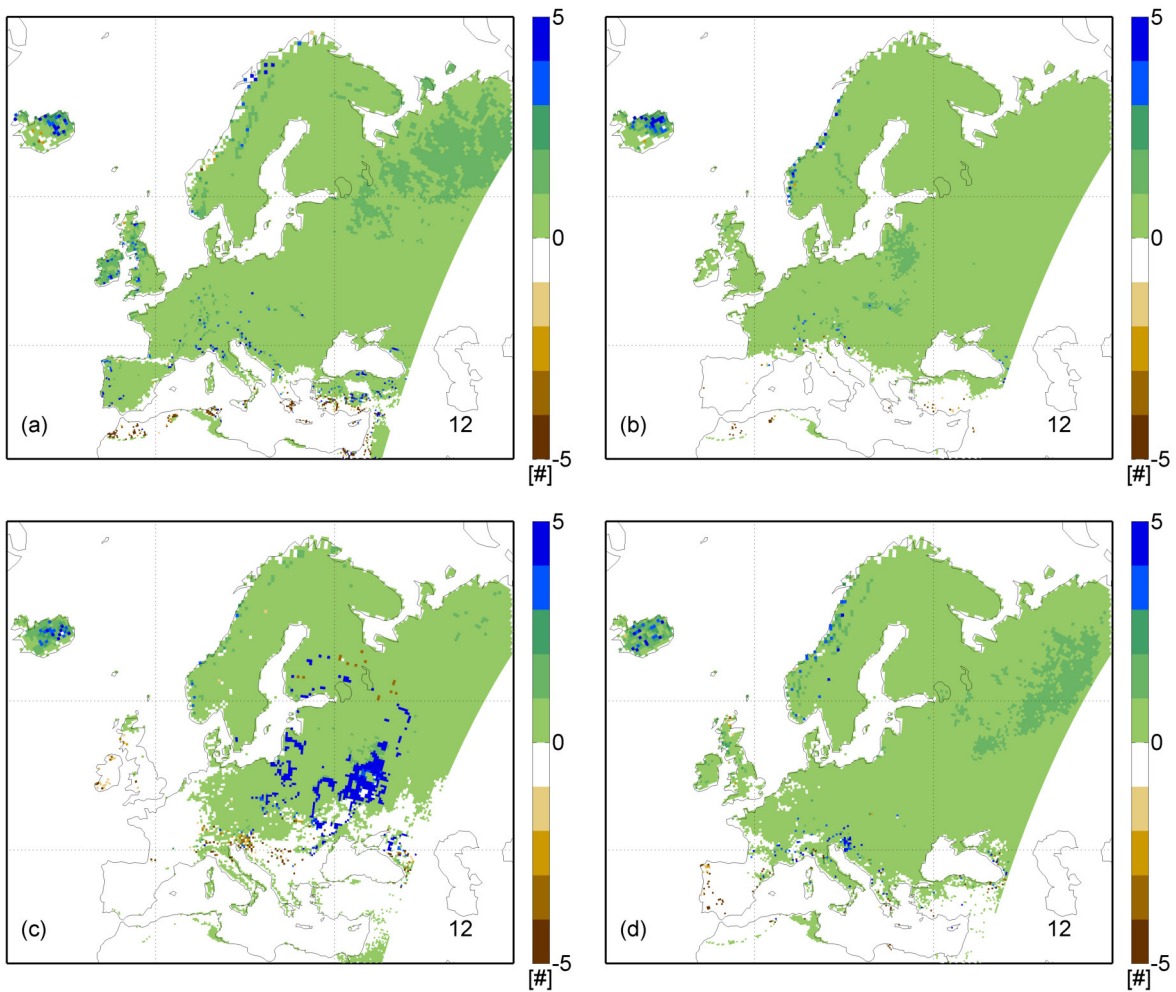


Abbildung 5.31: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ} - \text{Daten}_{1.5^\circ}$) vom Klimasignal des Klimaindexes R01 (Multi-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

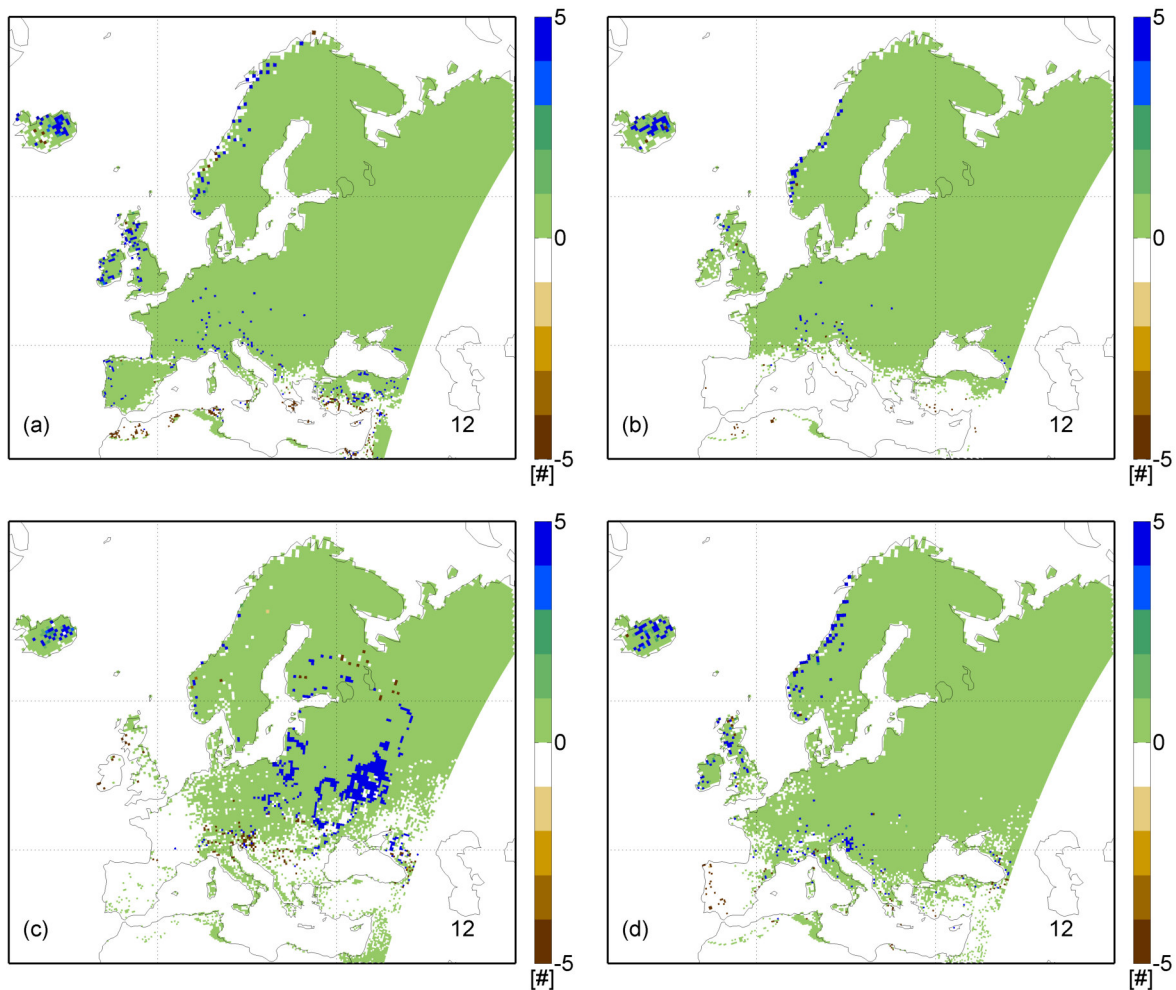


Abbildung 5.32: Darstellung der Differenz ($\text{Daten}_{2^\circ} - \text{Daten}_{1.5^\circ}$) vom Klimasignal des Klimaindexes CWD (Mult-Model-Mean von 12 RCMs zwischen den Zeitperioden 2071-2100 und 1971-2000) für das 1.5° Ziel für (a) DJF, (b) MAM, (c) JJA und (d) SON

In Abb. 5.33 wird die Europakarte in 8 Gebiete eingeteilt (siehe 4.4), nämlich in (a) Britische Inseln, (b) Iberische Halbinsel, (c) Frankreich, (d) Mitteleuropa, (e) Skandinavien, (f) Alpen, (g) Mediterranes Gebiet und in (f) Osteuropa. Die blaue Linie repräsentiert das Klimasignal für das 1.5°C Ziel und die grüne Linie das Klimasignal für das 2.0°C Ziel. Die Saisonen sind jeweils an den Schnittlinien des Kreises mit den Achsen aufgetragen und die Magnitude des Klimasignals wird entlang der Achsen aufgetragen. Bei der Darstellung des Klimaindexes pr zeigt diese Variante allerdings Schwächen. Da der Absolutwert des Klimasignals auch negativ sein kann, ist die Grafik nicht immer eindeutig.

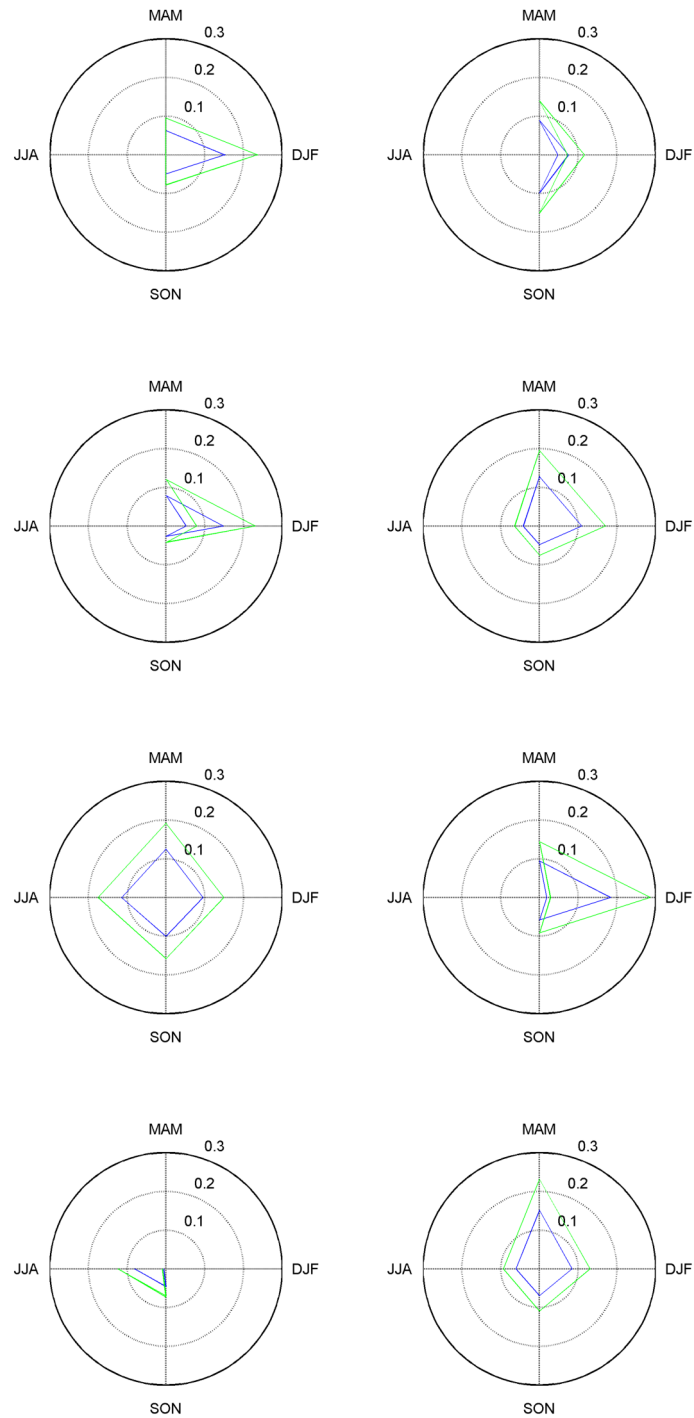


Abbildung 5.33: Vergleich des 1.5°C Ziels (blau) mit einer Erwärmung von 2.0° (grün) für den Klimaindex pr in (a) British Isles, (b) Iberian Peninsula, (c) France, (d) Mid-Europe, (e) Scandinavia, (f) Alps, (g) Mediterranean und (h) Eastern Europe

Kapitel 6

Zusammenfassung/Diskussion

Die Mittelwerte der Klimaindizes $tasmin$, $tasmax$ und pr zeigen in den Abb. 5.1, 5.14 und 5.23 eine plausible Struktur und Höhe der Magnitude (Vgl. King et al., 2017) (Vgl. Vautard et al., 2014). Die Mittelwerte der Klimaindizes $tasmin$ und $tasmax$ liegen signifikant über der Magnitude des 1.5°C Ziels. Wobei bei dieser Betrachtung, die bereits erfolgte Erwärmung von ca. 0.8°C der vorindustriellen Zeit zur Referenzklimaperiode zu berücksichtigen ist. I.e. diese ist von den angestrebten 1.5°C abzuziehen, womit die angestrebte Erwärmung zwischen der Klimaperiode 2071 - 2100 und der Referenzklimaperiode 1971 - 2000 ca. 0.7°C (siehe Tab. 4.1) ist. Bei Betrachtung der Klimasignale der Saisonen in der Abb. 5.4 und Abb 5.14 erkennt man aber, dass diese die Schwelle von 0.7°C größtenteils überschritten wird. In Detail stellt sich in Skandinavien und Russland eine Erwärmung von über 2°C ein in den Saisonen DJF, MAM und SON, sowohl für den Mittelwert des Klimaindexes $tasmin$, als auch für den Mittelwert des Klimaindexes $tasmax$. Es ist bei beiden Klimaindizes, wenn man den Monat JJA außen vor nimmt, ein West - Ost Gradient erkennbar, welcher durch die negative Albedo - Rückkoppelung zustande kommt. Betrachtet man den Multi-Model-Mean des Klimaindexes pr , in Abb. 5.23 dann ist zu erkennen, dass es in Südeuropa in den Saisonen MAM, JJA und SON trockener wird, während es in Mitteleuropa und Nordeuropa feuchter wird. Es ist somit ein Nord - Süd Gradient erkennbar. Die starke Erwärmung in Russland führt auch zu einem signifikanten Rückgang der Klimaindizes $FD0$ (Frosttage) und $CSDI$ (Anzahl Tage zusammenhängender Kältetage) (Abb. 5.5 und Abb. 5.6). Weiters erhöht sich die Anzahl der Sommertage (Klimaindex $SU25$) (Abb. 5.15) in der Saison JJA, wie auch das Maximum der zusammenhängenden Sommertage (Klimaindex $WSDI$) (Abb. 5.16) in der Saison JJA. Ein Vergleich mit einem Limit bezüglich globaler Erwärmung von 2°C zeigt signifikante Unterschiede, speziell über Russland und Skandinavien bei Betrachtung der Klimaindizes $tasmin$ und $tasmax$ (Abb. 5.10 und Abb 5.19). Wie in den Abb. 5.30 - 5.32 ersichtlich, zeigt sich beim Vergleich des 2°C Ziels und 1.5°C Ziels für die Klimaindizes pr , $R01$ und CWD ein Nord - Süd Gradient mit trockeneren Gebieten in Südeuropa und feuchteren in Nord- und Mitteleuropa. Der Vergleich der verschiedenen statistischen Methoden zur Bias - Korrektur, nämlich die Delta-Change Methode und die direkte Methode, zeigen signifikante Unterschiede wie für den Klimaindex in Abb. 5.8 ersichtlich.

Wie Detlef van Vuuren in seinem Artikel (Vgl. van Vuuren et al., 2017) und Oliver Geden (Vgl. Geden et al., 2017) anführen, gibt es noch einige Unstimmigkeiten bezüglich der Bestimmungen des 1.5°C Ziels. Ein Problem ist es die Referenztemperatur zu defi-

nieren. Nämlich zu welcher Zeitperiode die Erwärmung von 1.5°C in Bezug zu setzen ist. Der IPCC AR5 Bericht verwendet als Referenz die Zeitperiode von 1850 - 1900. In dieser Arbeit ist die Periode von 1850-1880 als Referenz gewählt worden. Erfolgte bereits eine Erwärmung vor der gewählten Referenzperiode, verändert das das Ergebnis signifikant.

Weiters ist es schwierig zu definieren, wann das 1.5°C Ziel erreicht werden soll. Dies liegt im Overshoot der Klimapfade begründet (Vgl. Zickfeld et al., 2016). Speziell beim RCP2.6 Pfad (Abb. 2.5) stellt sich, in der behandelten Zeitperiode dieser Arbeit, ein Maximum, bezüglich der Temperatur, ein und fällt danach wieder ab bzw. stabilisiert sich. Da das 1.5°C unterhalb des RCP2.6 Pfades liegt (siehe Tab. 4.1), bezüglich der Erwärmung, ist auch für diesen ein Overshoot zu erwarten im Temperaturverlauf. Somit ist davon auszugehen, dass mittels der verwendeten Methodik in dieser Arbeit, die 1.5°C Grenze in der untersuchten Klimazeitspanne überschritten wurde, da statistisch ein monotoner Anstieg als Basis gesetzt wurde. Es wäre notwendig den Overshoot zeitlich zu lokalisieren, bzw. hierzu die ganze Zeitreihe der betrachteten Zeitspanne zu betrachten und nicht nur die ersten 30 Jahre und letzten 30 Jahre.

Für das „Pattern Scaling“ sind von EURO-CORDEX die RCMs der Klimapfade RCP4.5 herangezogen worden. Dies hat denn Grund, dass es die Anzahl der RCMs der RCP2.6 Pfade nicht ausreichte um einen sinnvollen Multi-Model-Mean zu bilden und somit Unstimmigkeiten der einzelnen RCMs zu stark einfließen. Aber aufgrund der besseren Repräsentation des Overshoots, wären die RCMs der RCP2.6 Pfade zu präferieren.

Literatur

- Bindoff, N.L.; Stott, P.A.; AchutaRao, K.M.; Allen, M.R.; Gillett, N.; Gutzler, D.; Hansingo, K.; Hegerl, G.; Hu, Y.; Jain, S.; Mokhov, I.I.; Overland, J.; Perlwitz, J.; Sebbari, R.; Zhang, X. (2013): „13: Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional“, in: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, M., Tignor, S.K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V., Bex, P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Christensen, Jens Hesselbjerg; Christensen, Ole Bossing (2007): „A summary of the PRUDENCE model projections of changes in European climate by the end of this century“, in: *Climatic Change*, 81.
- Déqué, Michel (2007): „Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values“, in: *Global and Planetary Change* 57, S. 16–26. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.030.
- Geden, Oliver; Löffel, Andreas (2017): „Define limits for temperature overshoot targets“, in: *Nature Geoscience*, URL: www.nature.com/naturegeoscience.
- Hallegatte, Stéphane; Rogelj, Joeri; Allen, Myles; Clarke, Leon; Edenhofer, Ottmar; Field, Christopher B.; Friedlingstein, Pierre; Kesteren, Line van; Knutti, Reto; Mach, Katharine J.; Mastrandrea, Michael; Michel, Adrien; Minx, Jan; Oppenheimer, Michael; Plattner, Gian-Kasper; Riahi, Keywan; Schaeffer, Michiel; Stocker, Thomas F.; Vuuren, Detlef P. van (2016): „Mapping the climate change challenge“, in: *Nature Climate Change*, 6, S. 663–668. DOI: 10.1038/NCLIMATE3057. URL: www.nature.com/natureclimatechange.
- Hantel, Michael (1997): *Erde und Weltraum*. Springer-Verlag.
- Haylock, M. R.; Hofstra, N.; Tank, A. M. G. Klein; Klok, E. J.; Jones, P. D.; New, M. (2008): „A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950 - 2006“, in: *Journal of Geophysical Research*, 113, S. D20119.
- IPCC (1995): *IPCC Second Assessment: Climate Change 1995. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Full Report*. IPCC. www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-1995/ipcc-2nd-assessment/2nd-assessment-en.pdf (Accessed Nov. 2018).
- IPCC (2013): *IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. DOI: doi:10.1017/CB09781107415324. [Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, M., Tignor, S.K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V., Bex

- and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Jacob, Daniela; Petersen, Juliane; Eggert, Bastian; Alias, Antoinette; Christensen, Ole Bøssing; Bouwer, Laurens M.; Braun, Alain; Colette, Augustin; Déqué, Michel; Georgievski, Goran; Georgopoulou, Elena; Gobiet, Andreas; Menut, Laurent; Nikulin, Grigory; Haensler, Andreas; Hempelmann, Nils; Jones, Colin; Keuler, Klaus; Kovats, Sari; Kröner, Nico; Kotlarski, Sven; Kriegsmann, Arne; Martin, Eric; Meijgaard, Erik van; Moseley, Christopher; Pfeifer, Susanne; Preuschmann, Swantje; Radermacher, Christine; Radtke, Kai; Rechid, Diana; Rounsevell, Mark; Samuelsson, Patrick; Somot, Samuel; Soussana, Jean-Francois; Teichmann, Claas; Valentini, Riccardo; Vautard, Robert; Weber, Björn; Yiou, Pascal (2013): „EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research“, in: Published online, [Published online]. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2.
- King, Andre D; Karoly, David J (2017): „Climate extremes in Europe at 1.5°C and 2°C of global warming“, in: Environment Research Letters, 12 (114031). DOI: 10.1088/1748-9326/aa8c2c.
- Kirsten Zickfeld, et al. (2013): „Long-Term Climate Change Commitment and Reversibility: An EMIC Intercomparison“, in: Journal of Climate, 26, S. 5782–5809. DOI: 10.1175/JCLI-D-12-00584.1.
- Kotlarski, S.; Keuler, K.; Christensen, O. B.; Colette, A.; Déqué, M.; Gobiet, A.; Goergen, K.; Jacob, D.; D.Lüthi; Meijgaard, E. van; Nikulin, G.; Schär, C.; Teichmann, C.; Vautard, R.; V. Wulfmeyer, K. Warrach-Sagi ad (2014): „Regional climate modeling on European scales: a joint standard evaluation of the EURO - CORDEX RCM ensemble“, in: Geoscience Model Development, 7, S. 1297–1333. DOI: 10.5194/gmd-7-1297-2014.
- Lehner, Flavio; Deser, Clara; Sanderson, Benjamin M. (2016): „Future risk of record-breaking summer temperatures and its mitigation“, in: Climatic Change, 146, S. 363–375. DOI: 10.1007/s10584-016-1616-2.
- Lozàn, José; Graßl, Hartmut (2002): *Das Klima des 21. Jahrhunderts - Einführung in das globale Klimaproblem. Mehr Klimaschutz - weniger Risiken für die Zukunft*.
- Maraun D., et al. (2010): „Precipitation downscaling under climate change: Recent developments to bridge the gap between dynamical models and the end user“, in: Rev. Geophys. 57, RG3003. DOI: 10.1029/2009RG000314.
- Maraun D., Widmann M. (2018): *Statistical Downscaling and Bias Correction for Climate Research*. Cambridge University Press. [Vom Author für die Masterarbeit als PDF zur Verfügung gestellt].
- Maraun, Douglas (2016): „Bias Correcting Climate Change Simulations - a Critical Review“, in: Current Climate Change Report, 2, S. 211–220. DOI: 10.1007/s40641-016-0050-x.
- Maraun, Douglas (2018): *Climate Modeling and its Application in Climate Change Impact Research*. [Vorlesung an der Universität Graz].
- Moss, Richard H.; Edmonds, Jae A.; Hibbard, Kathy A.; Manning, Martin R.; Rose, Steven K.; Vuuren, Detlef P. van; Carter, Timothy R.; Emori, Seita; Kainuma, Mikiko; Kram, Tom; Meehl, Gerald A.; Mitchell, John F. B.; Nakicenovic, Nebojsa; Riahi, Keywan; Smith, Steven J.; Stouffer, Ronald J.; Thomson, Allison M.; Weyant, John P.; Wilbanks, Thomas J. (2010): „The Next Generation of Scenarios for Climate Change Research and Assessment“, in: NATURE, 463. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner,

- M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. DOI: [doi:10.1038/nature08823](https://doi.org/10.1038/nature08823).
- Osborn, Timothy J.; Wallace, Craig J.; Harris, Ian C.; Melvin, Thomas M. (2016): „Pattern scaling using CimGen: monthly-resolution future climate scenarios including changes in the variability of precipitation“, in: *Climatic Change*, 134, S. 353–369. DOI: [10.1007/s10584-015-1509-9](https://doi.org/10.1007/s10584-015-1509-9).
- o.V.: *Der fünfte Sachstandsbericht des IPCC*. URL: <http://klimawandelanpassung.at/index.php?id=24042>. (Letzter Zugriff: 20.11.2018).
- o.V.: *EURO-CORDEX Coordinated Downscaling Experiment - European Domain*. URL: <https://www.euro-cordex.net>. (Letzter Zugriff: 24.11.2018).
- Ramirez-Villegas, Julian (2010): „Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method Decision and Policy Analysis Working Paper No.1“, in: International Center for Tropical Agriculture,
- Reiter Philipp, et al. (2015): „Bias correction of ENSEMBLES precipitation data with focus on the effect of the length of the calibration period“, in: *Meteorologische Zeitschrift*, 25 (1), S. 85–96. DOI: [10.1127/meth/2015/0714](https://doi.org/10.1127/meth/2015/0714).
- Rogelj, Joeri; Elzen, Michel den; Höhne, Niklas; Fransen, Taryn; Fekete, Hanna; Winkler, Harald; Schaeffer, Roberto; Sha, Fu; Riahi, Keywan; Meinshausen, Malte (2016): „Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C“, in: *Nature*, 534, S. 631–639. DOI: [10.1038/nature18307](https://doi.org/10.1038/nature18307).
- Rummukainen, Markku (2010): „State-of-the-art with regional climate models“, in: *WIREs Clim Change*, 1.
- Russo, Simone; Silmann, Jana; Fischer, Erich M (2015): „Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades“, in: *Environ.Res.Lett.* 10 (124003). DOI: [10.1088/1748-9326/10/12/124003](https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/12/124003).
- Sanderson, Benjamin M.; Xu, Yangyang; Tebaldi, Claudia; Wehner, Michael; O’Neill, Brian; Jahn, Alexandra; Pendergrass, Angeline G.; Lehner, Flavio; Strand, Warren G.; Lin, Lei; Knutti, Reto; Lamarque, Jean Francois (2017): „Community climate simulations to assess avoided impacts in 1.5°C and 2°C futures“, in: *Earth Syst. Dynam.* 8, S. 827–847. DOI: [10.5194/esd-8-827-2017](https://doi.org/10.5194/esd-8-827-2017).
- Schellnhuber, Joachim; Rahmstorf, Stefan; Winkelmann, Ricarda (2016): „Why the right climate target was agreed in Paris“, in: *Nature Climate Change*, 6, S. 649–653. URL: www.nature.com/natureclimatechange.
- Schleussner, Carl-Friedrich; Lissner, Tabea K.; Fischer, Erich M.; Wohland, Jan; Perrette, Mahé; Golly, Antonius; Rogelj, Joeri; Childers, Katelin; Schewe, Jacob; Frieler, Katja; Mengel, Matthias; Hare, William; Schaeffer, Michiel (2013): „Differential climate impacts for policy-relevant limits to global warming: the case of 1.5°C and 2°C“, in: *Earth Syst. Dynam.* 7, S. 327–351. DOI: [10.5194/esd-7-327-2016](https://doi.org/10.5194/esd-7-327-2016).
- Taylor, Karl E.; Stoufer, Ronald J.; Meehl, Gerald A. (2012): „A Summary of CMIP5 and the Experiment Design“, in: Published online, [Published: 18 December 2009 (with updates/corrections made 22 January 2011)].
- UNFCCC (1992): *United Nations Framework Convention on Climate Change. Full Text of the convention*. [<https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf>].
- UNFCCC (2015): *United Nations Framework Convention on Climate Change. Adoption of the Paris Agreement*. Conference of the parties.

- Vautard, Robert; Gobiet, Andreas; Sobolowski, Stefan; Kjellström, Erik; Stegehuis, Annemiek; Watkiss, Paul; Mendlik, Thomas; Landgren, Oskar; Nikulin, Grigory; Teichmann, Claas; Jacob, Daniela (2014): „The European climate under a 2°C global warming“, in: *Environment Research Letters*, 9 (034006), 11 pp. DOI: 10.1088/1748-9326/9/3/034006.
- Vuuren, Detlef van; Hof, Andries; Gernaat, David; Boer, Harmen Sytze de (2017): „Limiting global temperature change to 1.5°C“, in: PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, URL: www.pbl.nl/en.
- ZAMG. URL: www.zamg.ac.at. (Letzter Zugriff: 24.11.2018).
- Zhao, Weining; Khail, M.A.K. (1991): „The Relationship between Precipitation and Temperature over the Contiguous United States“, in: *Journal of Climate*, 6, S. 1232–1236.