

Climate Change

Climate
Change

11
08

ISSN
1862-4359

Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland -

Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland



Umwelt
Bundes
Amt 
Für Mensch und Umwelt

UMWELTFORSCHUNGSPLAN DES
BUNDESMINISTERIUMS FÜR UMWELT,
NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT

Forschungsbericht 204 41 138
UBA-FB 000969



Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland – Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland

von

Dr. Daniela Jacob
Holger Göttel
Dr. Sven Kotlarski
Philip Lorenz
Kevin Sieck

Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Diese Publikation ist ausschließlich als Download unter
<http://www.umweltbundesamt.de>
verfügbar.

Die in der Studie geäußerten Ansichten
und Meinungen müssen nicht mit denen des
Herausgebers übereinstimmen.

Herausgeber: Umweltbundesamt
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel.: 0340/2103-0
Telefax: 0340/2103 2285
Internet: <http://www.umweltbundesamt.de>

Redaktion: Fachgebiet I 2.1
Petra Mahrenholz

Dessau-Roßlau, August 2008

Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland

– Phase 1:

Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland

Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 138

Dr. Daniela Jacob, Holger Göttel, Dr. Sven Kotlarski, Philip Lorenz, Kevin Sieck

Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M), Hamburg

Kennzeichen: 20441138

Berichtszeitraum: 1. Oktober 2004 bis 30. September 2007

Inhaltsverzeichnis

1.	Einführung	14
2.	Zielstellung.....	17
3.	Methodik	18
3.1.	Das regionale Klimamodell REMO.....	22
3.2.	Doppelnestung / Modellgebiete	24
3.3.	Validierungslauf	25
3.4.	Kontroll- und Szenarien-Modellläufe	26
4.	Aktualisierung der Modellrechnungen.....	27
4.1.	Vergleich mit Beobachtungen	28
4.2.	Vergleiche zwischen Validierungs- und Kontrollläufen.....	28
4.3.	Einfluss auf das Klimaänderungssignal	29
4.4.	Nachrechnungen.....	30
5.	Validierung der Modellergebnisse.....	32
5.1.	Verwendete Datensätze.....	32
5.2.	Räumliche Muster	34
5.3.	Zeitlicher Verlauf	36
5.4.	Niederschlagsmengen in verschiedenen Höhenstufen	37
5.5.	Analyse der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Lufttemperatur	37
5.6.	Zusätzliche Validierung des Kontrolllaufs	38
6.	Ergebnisse der Klimaszenarien für Monatsmittelwerte von Niederschlag und Temperatur	41
6.1.	Zeitlicher Verlauf	41
6.2.	Räumliche Muster	46
7.	Abgeleitete Größen und Extremwerte.....	50
7.1.	Räumliche Muster	51
7.2.	Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Sommertage und der heißen Tage	54
7.3.	Änderung weiterer Indizes	59

Inhaltsverzeichnis

8.	Zusammenfassung und Ausblick	60
----	------------------------------------	----

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Zeitliche Entwicklung der CO ₂ Konzentrationen gemäß Beobachtungen (1850-2000) sowie in den IPCC Szenarien A2, A1B und B1.....	72
Abb. 2: Zeitliche Entwicklung der global und jährlich gemittelten Temperaturänderungen in Erdbodennähe gegenüber dem Mittelwert der Jahre 1961-1990. Im Zeitraum 1860-2000 sind die natürlichen Antriebsfunktionen (wie z. B. Vulkanismus, Änderungen der Sonneneinstrahlung) nicht berücksichtigt worden. Dargestellt ist das Ensemblemittel aus 3 Realisierungen mit ECHAM5/MPI-OM.	72
Abb. 3: Konzept der fraktionellen Oberflächenbedeckung in REMO (Beispiel für eine Gitterbox mit 30% Wasseranteil, 10% Meereisanteil, 45% unbewachsener Landfläche und 15% bewachsener Landfläche).....	73
Abb. 4: Modellgebiet, das in der ersten Stufe des Doppelnestungsverfahrens genutzt worden ist (0.44°, ~50 km), mit eingezeichneter Topographie [m].	74
Abb. 5: Modellgebiet der zweiten Stufe des Doppelnestungsverfahrens (0.088°, ~10 km) mit eingezeichneter Topographie [m].	75
Abb. 6: Relatives Niederschlagsänderungssignal [%] des Zeitraums 2071-2078 in Bezug auf den Referenzzeitraum 1961-1990: links REMO Simulation mit einem Zeitschritt von 50 s für 2071-2078, rechts mit einem Zeitschritt von 30 s. Der Referenzzeitraum (1961-1990) wurde jeweils mit einem Zeitschritt von 30 s gerechnet.	76
Abb. 7: Differenzen [mm/Monat] des Gebietsmittels des Gesamtniederschlages für Deutschland zwischen den zwei REMO Rechnungen mit unterschiedlichen Zeitschritten (schwarze Linie); max. Differenzen der Beobachtungsklimatologien GPCP, GPCC und CRU (rot).....	76
Abb. 8: Mittlerer monatlicher Gesamtniederschlag im Rheineinzugsgebiet [mm/Monat] für den inkonsistenten Kontrolllauf (gelb), den konsistenten mit 30 s-Zeitschritt durchgeführten Kontrolllauf (blau), sowie für den Validierungslauf (rot).	77
Abb. 9: Wie Abb. 8, aber für das Neckareinzugsgebiet	78
Abb. 10: Wie Abb. 8, aber für das Mainseinzugsgebiet.....	79

- Abb. 11: Wie Abb. 8, aber für das Elbeeinzugsgebiet 80
- Abb. 12: Klimasignal. Relative Niederschlagsänderung [%] im Winter (DJF) für den 8 Jahreszeitraum 2071-2078 zu 1990-1999: links Simulationen mit einem Zeitschritt von 50 s für beide Zeiträume, rechts mit einem Zeitschritt von 30 s für beide Zeiträume. 81
- Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des relativen saisonalen Niederschlagsänderungssignals [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf den Referenzzeitraum 1961-1990 für Winter (DJF; durchgezogene Linien) und Sommer (JJA; gestrichelte Linien). Dargestellt sind die inkonsistenten Rechnungen mit teilweise 50 s-Zeitschritt (schwarz für den Kontrolllauf bzw. dunkelblau für das A1B-Szenario), sowie die konsistenten Rechnungen mit durchgängigem 30 s-Zeitschritt (braun für den Kontrolllauf bzw. hellblau für das A1B-Szenario). 82
- Abb. 14: Zeitlicher Verlauf des saisonalen 2m-Temperaturänderungssignals [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf den Referenzzeitraum 1961-1990 für Winter (DJF; durchgezogene Linien) und Sommer (JJA; gestrichelte Linien). Dargestellt sind die inkonsistenten Rechnungen mit teilweise 50 s-Zeitschritt (schwarz für den Kontrolllauf bzw. dunkelblau für das A1B-Szenario), sowie die konsistenten Rechnungen mit durchgängigem 30 s-Zeitschritt (braun für den Kontrolllauf bzw. hellblau für das A1B-Szenario). 83
- Abb. 15: Jahresmittel der 2-Meter Temperatur [°C] (oben) und der mittleren jährlichen Niederschlagssumme[mm] (mitte) simuliert von REMO (links) bzw. beobachtet (CRU-Datensatz; rechts) für den Zeitraum 1979-2000. Unten ist ferner eine hochaufgelöste Klimatologie von jährlichen Niederschlagssummen im Alpenraum für die Jahre 1971-1990 gezeigt (Quelle: Schwarb et al., 2001). 84
- Abb. 16: Monatsmittelwerte (links) sowie mittlerer Jahresgang (rechts) von Gebietsmitteln der 2m-Temperatur [°C] für den Zeitraum 1979-2000. Dargestellt sind jeweils die Gebietsmittel des Einzugsgebietes der Elbe (oben), des Einzugsgebietes des Rheins (mitte) sowie von Deutschland (unten). 85
- Abb. 17: Monatsmittelwerte (links) sowie mittlerer Jahresgang (rechts) von Gebietsmitteln des Gesamtniederschlags [mm/Monat] für den Zeitraum 1979-2000. Dargestellt sind jeweils die Gebietsmittel des Einzugsgebietes der Elbe

(oben), des Einzugsgebietes des Rheins (mitte) sowie von Deutschland (unten).	85
Abb. 18: Saisonales Flächenmittel von 1980-2000 (Winter, DJF) des Gesamtniederschlages [mm/Saison] für Deutschland aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen aus dem Validierungslauf (blau) im Vergleich zu Beobachtungen vom DWD (REGNIE Datensatz).....	86
Abb. 19: Saisonales Flächenmittel von 1980-2000 (Frühjahr, MAM) des Gesamtniederschlages für Deutschland [mm/Saison] aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen aus dem Validierungslauf (blau) im Vergleich zu Beobachtungen vom DWD (REGNIE Datensatz).....	86
Abb. 20: Saisonales Flächenmittel von 1980-2000 (Sommer, JJA) des Gesamtniederschlages [mm/Saison] für Deutschland aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen aus dem Validierungslauf (blau) im Vergleich zu Beobachtungen vom DWD (REGNIE Datensatz).....	87
Abb. 21: Saisonales Flächenmittel von 1980-2000 (Herbst, SON) des Gesamtniederschlages [mm/Saison] für Deutschland aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen aus dem Validierungslauf (blau) im Vergleich zu Beobachtungen vom DWD (REGNIE Datensatz).....	87
Abb. 22: Flächenmittel des Jahresgesamtniederschlages von 1980-2000 [mm/Jahr] für Deutschland aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen aus dem Validierungslauf (blau) im Vergleich zu Beobachtungen vom DWD (REGNIE Datensatz).....	88
Abb. 23: Zeitlicher Verlauf des Gebietsmittels der 2m-Temperatur für Deutschland [°C] aus dem Validierungslauf (blau) sowie dem Kontrolllauf (rot) im Vergleich zu Beobachtungen (grauer Bereich – von CRU und ERA40 aufgespannter Bereich).	89
Abb. 24: Zeitlicher Verlauf des Gebietsmittels des Gesamtniederschlages für Deutschland [mm/Jahr] aus dem Validierungslauf (blau) sowie dem Kontrolllauf (rot) im Vergleich zu Beobachtungen (schwarz – CRU; grauer Bereich – von CRU, GPCP und GPCC aufgespannter Bereich).	89
Abb. 25: Mittlerer Jahresgang des Gebietsmittels der 2m-Temperatur für Deutschland [°C] aus dem Validierungslauf (blau) sowie dem Kontrolllauf (rot) im Vergleich zu	

Beobachtungen (grauer Bereich – von CRU und ERA40 aufgespannter Bereich) für den Zeitraum 1960 - 2000.....	90
Abb. 26: Mittlerer Jahresgang des Gebietsmittels des Gesamtniederschlages für Deutschland [mm/Jahr] aus dem Validierungslauf (blau) sowie dem Kontrolllauf (rot) im Vergleich zu Beobachtungen (grauer Bereich – von CRU, GPCP und GPCC aufgespannter Bereich) für den Zeitraum 1960 - 2000.....	90
Abb. 27: Zeitlicher Verlauf der Änderung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).	91
Abb. 28: Zeitlicher Verlauf der Änderung des Frühjahrsmittels der 2m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).	91
Abb. 29: Zeitlicher Verlauf der Änderung des Sommermittels der 2m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).	92
Abb. 30: Zeitlicher Verlauf der Änderung des Herbstmittels der 2m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).	92
Abb. 31: Zeitlicher Verlauf der Änderung des Wintermittels der 2m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).	93
Abb. 32: Saisonale Druckverteilung [hPa] in der KNP (1961-1990) für a) Frühling, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.	94
Abb. 33: Änderung der saisonalen Druckverteilung [hPa] im A1B Szenario (2071- 2100) im Vergleich zur KNP (1961-1990) für a) Frühling, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.	95

- Abb. 34: Zeitlicher Verlauf der relativen Änderung der Jahresniederschlagssumme [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange). 96
- Abb. 35: Zeitlicher Verlauf der relativen Änderung der Frühjahrsniederschlagssumme [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange). 96
- Abb. 36: Zeitlicher Verlauf der relativen Änderung der Sommerniederschlagssumme [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange). 97
- Abb. 37: Zeitlicher Verlauf der relativen Änderung der Herbstniederschlagssumme [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange). 97
- Abb. 38: Zeitlicher Verlauf der relativen Änderung der Winterniederschlagssumme [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange). 98
- Abb. 39: Schematische Darstellung der Änderung des Deutschlandsmittels der 2m-Temperatur [°C] zwischen dem Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario 99
- Abb. 40: Schematische Darstellung der Änderung des Deutschlandsmittels der 2m-Temperatur [°C] zwischen dem Zeitraum 2071-2100 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario100
- Abb. 41: Schematische Darstellung der Änderung des Gesamtniederschlags [%] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario ...101

- Abb. 42: Schematische Darstellung der Änderung des Gesamtniederschlages [%] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2071-2100 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario ...102
- Abb. 43: Kartendarstellung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Klimanormalperiode (KNP) von 1961-1990 für den Kontrolllauf. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....103
- Abb. 44: Kartendarstellung der saisonalen Mittel der 2m-Temperatur [°C] für die Klimanormalperiode (KNP) von 1961-1990 für den Kontrolllauf. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.104
- Abb. 45: Kartendarstellung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A1B Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....105
- Abb. 46: Kartendarstellung der saisonalen Mittel der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A1B Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....106
- Abb. 47: Kartendarstellung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das B1 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....107
- Abb. 48: Kartendarstellung der saisonalen Mittel der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das B1 Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.108
- Abb. 49: Kartendarstellung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....109
- Abb. 50: Kartendarstellung der saisonalen Mittel der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A2 Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.110
- Abb. 51: Kartendarstellung der Änderung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für

a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....	111
Abb. 52: Kartendarstellung der Änderung des Frühjahrsmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....	112
Abb. 53: Kartendarstellung der Änderung des Sommermittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....	113
Abb. 54: Kartendarstellung der Änderung des Herbstmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....	114
Abb. 55: Kartendarstellung der Änderung des Wintermittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....	115
Abb. 56: Kartendarstellung der mittleren Jahresniederschlagssummen [mm/Jahr] für die KNP von 1961-1990. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....	116
Abb. 57: Kartendarstellung der mittleren saisonalen Niederschlagssummen [mm/Saison] für die KNP von 1961-1990. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.	117
Abb. 58: Kartendarstellung der mittleren Jahresniederschlagssummen [mm/Jahr] für die Zukunftsperiodeperiode von 2071-2100 für das A1B Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....	118
Abb. 59: Kartendarstellung der mittleren saisonalen Niederschlagssummen [mm/Saison] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A1B Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.	119

- Abb. 60: Kartendarstellung der mittleren Jahresniederschlagssummen [mm/Jahr] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das B1 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....120
- Abb. 61: Kartendarstellung der mittleren saisonalen Niederschlagssummen [mm/Saison] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das B1 Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.121
- Abb. 62: Kartendarstellung der mittleren Jahresniederschlagssummen [mm/Jahr] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....122
- Abb. 63: Kartendarstellung der mittleren saisonalen Niederschlagssummen [mm/Saison] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A2 Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.123
- Abb. 64: Kartendarstellung der mittleren relativen Jahresniederschlagsänderung [%] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....124
- Abb. 65: Kartendarstellung der mittleren relativen Niederschlagsänderung [%] im Frühjahr für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....125
- Abb. 66: Kartendarstellung der mittleren relativen Niederschlagsänderung [%] im Sommer für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....126
- Abb. 67: Kartendarstellung der mittleren relativen Niederschlagsänderung [%] im Herbst für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....127
- Abb. 68: Kartendarstellung der mittleren relativen Niederschlagsänderung [%] im Winter für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-

1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....	128
Abb. 69: Kartendarstellung der Anzahl der Tage pro Jahr mit Schneebedeckung für den Zeitraum 1961-1990 (KNP) (a), sowie die Änderung dieser Größe für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für b) das A1B Szenario, c) das B1 Szenario und d) das A2 Szenario. Gitterboxen mit einem Wasseranteil über 50 % sind grau ausmaskiert. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....	129
Abb. 70: Kartendarstellung der Länge der längsten Trockenperiode je Jahr (Anzahl der Tage) für den Zeitraum 1961-1990 (KNP) (a), sowie die Änderung dieser Größe für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für b) das A1B Szenario, c) das B1 Szenario und d) das A2 Szenario. Gitterboxen mit einem Wasseranteil über 50 % sind grau ausmaskiert. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.....	130
Abb. 71: Kartendarstellung der Anzahl der „Nassen Tage“ pro Jahr für den Zeitraum 1961-1990 (KNP) (a), sowie die Änderung dieser Größe für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für b) das A1B Szenario, c) das B1 Szenario und d) das A2 Szenario. Gitterboxen mit einem Wasseranteil über 50 % sind grau ausmaskiert. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.	131
Abb. 72: Gesamtzahl der nassen Tage (Modellgebietsmittel) pro 30 Jahre für den Zeitraum 1961-1990 (blau) und für den Zeitraum 2021-2050 des A1B (hellblau), A2 (gelb) und B1-Szenarios (braun). links: Sommer (JJA), mitte: Winter (DJF) und rechts: Jahr.....	132
Abb. 73: Anzahl der nassen Tage (Modellgebietsmittel) pro 30 Jahre für den Zeitraum 1961-1990 (blau) und für den Zeitraum 2071-2100 des A1B (hellblau), A2 (gelb) und B1-Szenarios (braun). links: Sommer, mitte: Winter und rechts: Jahr	133
Abb. 74: Kartendarstellung der Gradtagszahl für den Zeitraum 1961-1990 (KNP) (a), sowie die Änderung dieser Größe für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für b) das A1B Szenario, c) das B1 Szenario und d) das A2 Szenario. Gitterboxen mit einem Wasseranteil über 50 % sind grau ausmaskiert.	134

- Abb. 75: Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Sommertage pro Jahr für den Kontrolllauf und die 3 verschiedenen Szenarien (A1B, B1, A2). Dargestellt ist jeweils das Modellgebietsmittel als 10-jähriges gleitendes Mittel.....135
- Abb. 76: Zeitlicher Verlauf der Anzahl der heißen Tage pro Jahr für den Kontrolllauf und die 3 verschiedenen Szenarien (A1B, B1, A2). Dargestellt ist jeweils das Modellgebietsmittel als 10-jähriges gleitendes Mittel.....135
- Abb. 77: Schematische Darstellung der Änderung des Winds [m/s] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario136
- Abb. 78: Schematische Darstellung der Änderung des Winds [m/s] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2071-2100 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario137
- Abb. 79: Schematische Darstellung der Änderung der Wolkenbedeckung [%] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario ...138
- Abb. 80: Schematische Darstellung der Änderung der Wolkenbedeckung [%] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2071-2100 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario ...139

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Emissionen von Kohlendioxid (CO ₂) und Schwefeldioxid (SO ₂) auf Grund der Nutzung fossiler Brennstoffe, industrieller Aktivitäten und Landnutzungsänderungen in den IPCC Szenarien A2, A1B und B1 (Nakicenovic et al. 2000).	21
Tabelle 2: Übersicht über die durchgeführten REMO-Modellläufe.....	25
Tabelle 3: Übersicht der Zeiträume mit kurzem und langen Zeitschritt (DT).....	30
Tabelle 4: Minimale und Maximale relative Niederschlagsänderung der drei Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2021-2050 verglichen zur KNP 1961-1990 für die Bundesländer	45
Tabelle 5: Minimale und Maximale relative Niederschlagsänderung der drei Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2071-2100 verglichen zur KNP 1961-1990 für die Bundesländer	45
Tabelle 6: Minimale und Maximale Temperaturänderung der drei Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2021-2050 verglichen zur KNP 1961-1990 für die Bundesländer	46
Tabelle 7: Minimale und Maximale Temperaturänderung der drei Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2021-2050 verglichen zur KNP 1961-1990 für die Bundesländer	46
Tabelle 8: Vergleich der REMO Ergebnisse des Kontrolllaufs von 1961-1990 gegenüber Stationsdaten des DWD im Elbeeinzugsgebiet für die Extremwerte heiße Tage, Sommertage, tropische Nächte, Frost- und Eistage.....	56
Tabelle 9: Mittlere jährliche Kennzahlen des Kontrolllaufs (C20) für 1961-1990 und die Änderung zum Kontrolllauf (2071-2100 minus 1961-1990) für alle 3 Szenarien (Modellgebietsmittel)	58

1. Einführung

Es ist unumstritten, dass sich das Klima der Erde in den letzten Dekaden gewandelt hat, wie zahlreiche Aufzeichnungen meteorologischer und hydrologischer Dienste weltweit zeigen (Climate Change, 2007). Von besonderem Interesse ist hierbei die Frage, ob und wenn ja wie sich extreme bzw. seltene Ereignisse (Starkniederschläge, Hitzewellen, Überschwemmungen, usw.) verändert haben und gegebenenfalls verändern werden. Für derartige Aussagen wurden globale Klimamodelle entwickelt, die zusammen mit verschiedenen Annahmen über die Treibhausgasentwicklung in der Atmosphäre mögliche Entwicklungen des Klimas in den nächsten 100 Jahren berechnen. Diese Computermodele können als mathematische Abbilder des Erdsystems gesehen werden, da sie die physikalischen Prozesse im Erdsystem numerisch beschreiben und so real wie möglich berechnen. Um die Güte der Klimamodelle einschätzen zu können, werden sie zunächst für die Berechnung vergangener Zeiten eingesetzt. Bevorzugt wird hierzu eine Zeitperiode gewählt, in der zahlreiche Beobachtungen weltweit vorliegen.

In den letzten Jahrzehnten wuchs in der internationalen Gemeinschaft der Klimaforscher die Sorge, dass menschliche Aktivitäten negative Einflüsse auf das Klima der Erde ausüben könnten. Bereits in einem frühen Stadium der Forschung waren die Wissenschaftler überzeugt, dass der menschliche Einfluss auf das Klima genauer analysiert werden müsse, um die wissenschaftlichen Grundlagen für politische Entscheidungsträger zu schaffen. Dies wurde Ziel des „Zwischenstaatlichen Ausschusses zum Klimawandel“ (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC), der 1988 unter Federführung zweier UN-Organisationen, UNEP (United Nations Environment Program) und WMO (World Meteorological Organization) gegründet wurde. Das IPCC erstellt regelmäßige Zusammenfassungen der aktuellen Forschungsergebnisse, um die Formulierung von Zielen für die globale Umweltpolitik, wie z. B. das Kyoto-Protokoll, zu unterstützen. Dazu gehören auch Projektionen von möglichen zukünftigen Klimaentwicklungen mit Hilfe detaillierter Klimamodelle, gestützt auf vorgegebene Szenarien zum Ausstoß von CO₂ und anderen Treibhausgasen.

In 2007 wurde der 4. Sachstandsbericht des IPCC (Climate Change, 2007) veröffentlicht. Der Bericht der Arbeitsgruppe I des IPCC ist der erste von insgesamt 3 Teilbänden des 4. Sachstandsberichtes (AR4). Er stellt den aktuellen Kenntnisstand zu den wissenschaftlichen Grundlagen der Klimaänderung dar. Seit dem 3. Sachstandsbericht des IPCC (TAR, Houghton et al. 2001) hat die Forschung wesentliche Fortschritte beim Verständnis der aktuellen Klimaänderungen erzielt: Die räumliche und zeitliche Datengrundlage wurde erweitert, die Datenanalysen verbessert, die Erde geografisch breiter erfasst und bisherige Unsicherheitsfaktoren besser verstanden und hinsichtlich ihrer Klimawirksamkeit eingegrenzt. Insbesondere wurden auch mehr und bessere Modelle verwendet. Der 4. Sachstandsbericht bestätigt, bekräftigt oder präzisiert zentrale Aussagen des 3. Sachstandsberichts. Einige seiner Kernaussagen seien im Folgenden aufgelistet (aus IPCC WG1 Bericht, Kurzzusammenfassung vom BMBF, Februar 2007):

- Beobachtungen und Messungen lassen keinen Zweifel, dass das Klima sich ändert: Die globale Erwärmung und der Meeresspiegelanstieg haben sich beschleunigt, ebenso das Abschmelzen der Gletscher und Eiskappen. In den letzten 100 Jahren hat sich die Erde im Mittel um 0,74 °C erwärmt. Elf der letzten 12 Jahre (1995-2006) waren unter den 12 wärmsten Jahren seit Beginn der Beobachtungen.
- Es gilt als „gesicherte Erkenntnis“, dass im weltweiten Durchschnitt menschliches Handeln seit 1750 das Klima erwärmt hat – vorrangig durch den fossilen Brennstoffverbrauch, die Landwirtschaft und eine geänderte Landnutzung. Das heutige Niveau der Treibhausgase (THG) liegt deutlich höher als das natürliche Niveau in den letzten 650.000 Jahren.
- Regionale Klimamuster ändern sich: Viele langfristigen Veränderungen wurden beobachtet, etwa bei Temperatur und Eis in der Arktis, Niederschlägen, Salzgehalt im Ozean und Winden.
- Extreme Wetterereignisse wie Hitzewellen, Dürren, heftige Niederschläge sind häufiger geworden und die Intensität tropischer Stürme hat sich erhöht.

- Werden die Treibhausgaskonzentrationen auf dem heutigen Stand gehalten, ist eine Temperaturzunahme von 0,1 °C pro Dekade für die nächsten 20 Jahre sehr wahrscheinlich. Werden Treibhausgase weiter im aktuellen Ausmaß oder in noch höheren Mengen freigesetzt, wird eine weitere Erderwärmung verursacht. Es würden dann im Verlauf des 21. Jahrhunderts Änderungen im globalen Klimasystem eintreten, die sehr wahrscheinlich die im 20. Jahrhundert übertreffen.
- Selbst wenn die Treibhausgas-Konzentrationen bis 2100 stabilisiert werden sollten: Das Klima wird sich über das 21. Jahrhundert hinaus ändern und insbesondere der Meeresspiegel weiter steigen.

Die bis heute neueste Serie von IPCC- Szenarien (Hauptszenarien A1, B1, A2, B2) folgt abgestimmten möglichen Entwicklungslinien, so genannten *Storylines*, die unterschiedlichen Entwicklungen der Weltwirtschaft, des Bevölkerungswachstums und anderer Faktoren folgen (Nakicenovic et al. 2000). Die zugehörigen Emissionsentwicklungen für CO₂ und SO₂ von 2000 bis 2100 unterscheiden sich in ihrer Stärke ebenso wie in ihrem zeitlichen Verlauf. Diese Emissionen werden in die globalen und regionalen Klimamodelle eingespeist und bewirken durch zahlreiche nicht-lineare Wechselwirkungen Veränderungen des globalen und regionalen Klimas.

Um die Auswirkungen globaler Klimaänderungen auf Regionen in Europa, wie z. B. Deutschland zu untersuchen, wird ein regionales Klimamodell in das globale Klimamodell eingebettet. So ist es möglich, wie mit einer Lupe eine spezielle Region viel detaillierter zu untersuchen und eine Brücke zwischen globalen Klimaänderungen und lokalen Konsequenzen zu schlagen.

Für die in diesem Bericht dargestellten Studien wurde die am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) entwickelte Modellkette ECHAM5/MPI-OM und REMO verwendet, so dass mit REMO ein regionales Klima unter Berücksichtigung der globalen Informationen und der lokalen und regionalen Gegebenheiten ausgerechnet wird.

2. Zielstellung

Die Ziele dieses Projektes gliedern sich wie folgt:

- dynamische Erstellung von 3 regionalen hoch aufgelösten IPCC-Klimaszenarien (horizontale Auslösung 0.088° , d. h. ca. 10 km) für Deutschland zur Untersuchung möglicher Klimaänderungen
- Qualitätskontrolle und erste Auswertungen
- Archivierung der Daten in der CERA- Datenbank
- Ableitung benötigter Parameter aus diesen Szenarienrechnungen zur Erarbeitung geeigneter Anpassungsstrategien
- Bereitstellung aller Daten

Der vorliegende Abschlussbericht ist in 3 Abschnitte unterteilt:

Die Kapitel 3 und 4 geben einen Überblick über die genutzte Methode zur Erstellung regionaler Klimaprojektionen.

Der zweite Teil konzentriert sich auf die Analyse mittlerer Größen für Temperatur und Niederschlagsmengen, sowohl für die Güteermittlung (Kapitel 5) als auch bei der Darstellung möglicher Klimaänderungen (Kapitel 6).

Ab Kapitel 7 folgt eine Kurzdarstellung abgeleiteter Größen und Aussagen zu Extremwerten.

3. Methodik

Um regionale Klimaprojektionen für Deutschland zu erstellen, wurde das am Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) entwickelte regionale Modell REMO (Jacob, 2001; Jacob et al., 2007) in das globale Klimamodell ECHAM5/MPI-OM (Roeckner et al., 2003; Marsland et al., 2003; Jungclaus et al., 2006) des MPI-M integriert. D. h. an den seitlichen Rändern des Untersuchungsgebietes strömen Luftmassen, wie sie im Globalmodell berechnet wurden, in das Berechnungsgebiet des regionalen Modells hinein. In REMO wird dann ein regionales Klima unter Berücksichtigung der globalen Informationen und der lokalen und regionalen Gegebenheiten ausgerechnet.

Die verwendete Methode des dynamischen Regionalisierens besteht aus mehreren Schritten, sowohl für das globale als auch für das regionale Klimamodell.

Globale Modellierung

Mit dem globalen IPCC-Modell ECHAM5/MPI-OM wurde eine Simulation über 500 Jahre mit konstanten vorindustriellen Konzentrationen von CO₂ und anderen Treibhausgasen durchgeführt. Erwartet wird unter diesen Bedingungen ein nahezu trendfreier Klimazustand. Tatsächlich steigt z. B. die global und jährlich gemittelte Lufttemperatur in Erdbodennähe nur unwesentlich an, und zwar um etwa 0.03 Grad pro Jahrhundert. Diese lange Simulation des vorindustriellen Klimas liefert die Anfangswerte für die Simulationen des Klimas des 20. Jahrhunderts und die anschließenden Szenarienrechnungen für das 21. Jahrhundert.

Ein weiterer Standardtest besteht darin, zu untersuchen, ob das Modell in der Lage ist, bei beobachtetem externen Antrieb (Treibhausgase, Aerosole, Sonneneinstrahlung, vulkanische Aktivitäten) den beobachteten Klimatrend des 20. Jahrhunderts zu reproduzieren. Dabei ist zu beachten, dass die Temperaturschwankungen von Jahr zu Jahr natürlichen Ursprungs sind und überwiegend durch El Niño / La Niña Oszillationen erklärt werden können. Diese natürlichen Oszillationen können prinzipiell nur in ihrer statistischen Gesamtheit (Häufigkeit, Amplituden etc.), nicht aber in der beobachteten Abfolge reproduziert werden. Prinzipiell reproduzierbar sind dagegen längerfristige Trends infolge der Änderungen im externen Antrieb (z. B. CO₂-Anstieg), aber auch kurzfristige

Temperaturänderungen nach starken Vulkanausbrüchen. ECHAM5/MPI-OM ist in der Lage, die beobachteten längerfristigen Temperaturtrends im 20. Jahrhundert zu reproduzieren. (Diese Simulation wird *globaler Kontrolllauf* genannt.) Allerdings wird die Klimaabkühlung nach größeren Vulkanausbrüchen, vor allem nach dem Ausbruch des Krakatau im Jahre 1883, überschätzt. Hauptursache ist vermutlich eine unzureichende Kenntnis der emittierten Schwefelmengen. Weitere Ausführungen folgen in Roeckner et al. (2006).

Um Klimaprojektionen für die Zukunft rechnen zu können, müssen Annahmen über die möglichen Veränderungen der Zusammensetzung der Atmosphäre, die durch ihre Strahlungseigenschaften klimawirksam ist, gemacht werden. Dazu sind im Rahmen des IPCC Prozesses Zukunftsszenarien für den Zeitraum 2001 bis 2100 basierend auf unterschiedlichen Annahmen über den demographischen, gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und technologischen Wandel entwickelt worden. Den für den 4. Sachstandsbericht des IPCC ausgewählten Emissionsszenarien A2, A1B und B1 liegen folgende sozioökonomische Annahmen zugrunde:

Die Szenarienfamilie **A2** beschreibt eine sehr heterogene Welt. Die Grundannahmen sind Autarkie und die Bewahrung von lokalen Identitäten. Die Geburtenraten der verschiedenen Regionen nähern sich nur langsam an, was zu einem kontinuierlichen Wachstum der Weltbevölkerung führt. Wirtschaftliches Wachstum ist vor allem regional orientiert, und das wirtschaftliche Pro-Kopf-Wachstum und der technologische Wandel verändern sich fragmentierter und langsamer als in anderen Szenarienfamilien.

Die Szenarienfamilie **A1** beschreibt eine künftige Welt mit sehr raschem wirtschaftlichem Wachstum, einer Weltbevölkerung, die Mitte des 21. Jahrhunderts zahlenmäßig ihren Höhepunkt erreicht und danach abnimmt, und der raschen Einführung von neuen und effizienteren Technologien. Die wichtigsten Grundannahmen sind die Annäherung der Regionen, der weltweite Aufbau von erforderlichem Know-How und zunehmende kulturelle und soziale Interaktionen, mit einer erheblichen Verminderung der regionalen Differenzen im Pro-Kopf-Einkommen. Die drei A1-Gruppen unterscheiden sich durch ihren jeweiligen technologischen

Methodik

Schwerpunkt: intensive Nutzung fossiler Brennstoffe (A1FI), nicht-fossiler Energiequellen (A1T) oder Ausgeglichenheit über alle Energieträger hinweg (**A1B**).

Die Szenarienfamilie **B1** beschreibt eine konvergierende Welt mit der gleichen globalen Bevölkerung wie im A1 Szenario, aber mit raschen Veränderungen in den wirtschaftlichen Strukturen hin zu einer Dienstleistungs- und Informationswirtschaft, mit deutlich geringerer Materialintensität und Einführung von emissionsarmen und ressourcenschonenden Technologien. Das Schwergewicht liegt auf globalen Lösungen in Richtung wirtschaftlicher, sozialer und ökologischer Nachhaltigkeit, einschließlich verbesserter Gerechtigkeit aber ohne zusätzliche Klimaschutzinitiativen.

Nach diesen Vorgaben wurden von einer IPCC Arbeitsgruppe Emissionsszenarien für die wichtigsten klimawirksamen Gase und Aerosole erstellt (Beispiele in Tabelle 1) und daraus mit Hilfe von biogeochemischen Modellen der zeitliche Verlauf der atmosphärischen Konzentrationen als Input für Klimamodelle berechnet. Abb. 1 zeigt am Beispiel von Kohlendioxid (CO_2) den zeitlichen Verlauf der Konzentration, wie sie für den Zeitraum 1860-2000 (beobachtet) und 2001-2100 (Szenarien A2, A1B, B1) im Klimamodell vorgeschrieben wurde. Neben CO_2 wurden auch Methan (CH_4), Distickstoffoxid (N_2O), Ozon (O_3), die wichtigsten chlorierten Fluorkohlenwasserstoffe (CFCs) sowie Sulfataerosole (SO_4) berücksichtigt, das in der Atmosphäre durch Oxidation des emittierten Schwefeldioxids (SO_2) entsteht.

Dann folgen *globale Klimaszenarienrechnungen*, in denen die Zunahme der Treibhausgase (Abb. 1) und Änderungen der Schwefelemissionen (Tabelle 1) zu einer globalen Erwärmung führt, die im Jahr 2100 Werte zwischen 2.5 °C (B1) und 4.1 °C (A2) erreicht, bezogen auf das Mittel der Jahre 1961-1990 (Abb. 2). Gemessen an den unterschiedlichen CO_2 Konzentrationen in A2 und A1B sind die Erwärmungsraten unerwartet ähnlich (3.7 °C in A1B). Die Ursache liegt darin, dass sich die abkühlende Wirkung der Schwefelaerosole in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts in A1B deutlich schneller verringert als in A2 (Tabelle 1). Damit ist die durch Abnahme der Schwefelemissionen bedingte Erwärmung in A1B größer als in A2 und kompensiert zum Teil den schwächeren CO_2 Anstieg in A1B (Abb. 1).

Tabelle 1: Emissionen von Kohlendioxid (CO₂) und Schwefeldioxid (SO₂) auf Grund der Nutzung fossiler Brennstoffe, industrieller Aktivitäten und Landnutzungsänderungen in den IPCC Szenarien A2, A1B und B1 (Nakicenovic et al. 2000).

Jahr	CO ₂ Emissionen (Pg ¹ C/Jahr)			SO ₂ Emissionen (Tg ² S/Jahr)		
	A2	A1B	B1	A2	A1B	B1
2000	8	8	8	69	69	69
2020	12	13	11	100	100	75
2040	16	15	12	109	69	79
2060	19	16	10	90	47	56
2080	23	15	7	65	31	36
2100	29	13	4	60	28	25

Regionale Modellierung

Grundsätzlich müssen auch die regionalen Simulationen erst auf ihre Güte überprüft werden, bevor Klimaänderungsszenarien gerechnet werden können. Hierfür wurde zunächst mit REMO ein *Validierungslauf* für den Zeitraum 1979-2003 durchgeführt, bei dem für die notwendigen Anfangs- und Randwerte von REMO die (Re-)Analysen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage (EZMW) verwendet worden sind (Gibson et al., 1997). Diese (Re-)Analysen beschreiben so realitätsnah wie möglich die real beobachteten Wetterabläufe der betrachteten Zeitperiode, da sie alle verfügbaren Beobachtungsdaten nach einer Qualitätskontrolle mittels Datenassimilation in das (Re-)Analysemodell aufnehmen. Das (Re-)Analysemodell erstellt dann auf dem Modellgitter einen in Zeit und Raum konsistenten Datensatz, der als beobachtungsnahe Klimatologie angesehen werden kann.

¹ Petagramm Kohlenstoff (PgC) = 10¹⁵ g

² Teragramm Schwefel (TgS) = 10¹² g

Die Ergebnisse des regionalen Validierungslaufs können dann mit unabhängigen Beobachtungen, wie z. B. den Messungen des Deutschen Wetterdienstes, verglichen werden, um etwaige systematische Abweichungen festzustellen.

Dann folgt der *regionale Kontrolllauf*, der das heutige Klima im Simulationsgebiet beschreibt. Wiederum können die Modellergebnisse mit gemessenen Klimatologien oder auch den Ergebnissen des regionalen Validierungslaufs verglichen werden, um auch die Repräsentativität des berechneten Kontrollklimas einschätzen zu können. Abschließend werden die *regionalen Klimaszenarien* gerechnet.

Für den Kontrolllauf und die 3 Szenarienläufe mit REMO wurden als Anfangs- und Randwerte Ergebnisse des globalen gekoppelten Ozean-Atmosphärenmodells ECHAM5/MPI-OM verwendet.

3.1. Das regionale Klimamodell REMO

Das dreidimensionale hydrostatische regionale Klimamodell REMO (**R**egional **M**odell) ist ein atmosphärisches Zirkulationsmodell, das die relevanten physikalischen Prozesse dynamisch berechnet (Jacob, 1997; Jacob 2001; Jacob et al., 2001; Jacob et al., 2007). Hierdurch werden insbesondere nicht-lineare Zusammenhänge berücksichtigt. Subskalige, das heißt nicht vom Modell auflösbare physikalische Prozesse wie z. B. Konvektionsbildung, werden durch sog. physikalische Parametrisierungen berechnet.

REMO ist aus dem Europa-Modell des Deutschen Wetterdienstes (DWD) hervorgegangen (Majewski, 1991; Majewski et al., 1995). Die prognostischen Variablen des Modells sind die horizontalen Windkomponenten, der Bodendruck, Temperatur, spezifische Feuchte sowie Flüssigwassergehalt. Es kann alternativ mit den physikalischen Parametrisierungen des Europa-Modells des DWD und mit denen des globalen Klimamodells ECHAM 4 (Roeckner et al.; 1996) betrieben werden. Für die hier vorliegenden Untersuchungen wurde REMO mit den physikalischen Parametrisierungen aus ECHAM 4 verwendet, da diese auf Klimasimulationen abgestimmt sind und so außerdem eine möglichst große Konsistenz mit dem antreibenden Globalmodell erreicht wird.

Die zeitliche Integration der Modellgleichungen in REMO beruht auf dem sog. Leap-Frog Schema mit semi-implizierter Korrektur und Zeitfilterung nach Asselin (1972). In der vertikalen Dimension wird ein hybrides Koordinatensystem mit geländefolgenden Modellflächen verwendet. Die horizontale Diskretisierung beruht auf einem sog. Arakawa-C-Gitter, in dem alle Variablenwerte (außer der Windkomponenten) für das Zentrum der jeweiligen Gitterbox gültig sind. Die Gitterboxzentren wiederum sind auf einem rotierten sphärischen System definiert mit einheitlichem Abstand in x- und y-Richtung (je nach gewählter horizontaler Auflösung z. B. 0.5° , 0.22° oder 0.088°).

REMO kann wahlweise mit (Re-)Analysedaten oder mit Informationen aus globalen Klimamodellen betrieben werden, d. h. REMO wird einmal im Simulationsgebiet mit globalen Daten initialisiert und dann während der Modellrechnung an den seitlichen Rändern mit sich kontinuierlich ändernden globalen Daten angetrieben. Am Rand werden nur Temperaturen, Druck, Winde und Luftfeuchtigkeit vorgegeben. Alle anderen Größen werden dort und im Modellgebietsinneren von REMO direkt berechnet.

Der Erdboden bzw. die Meeresoberfläche stellen den unteren Rand des Modells dar. Die Landflächen werden durch ihre Höhe über NN, ihre Oberflächenbeschaffenheit, Rauigkeit und Bodenbeschaffenheit beschrieben, wobei zu jedem Modellzeitschritt in REMO Bodentemperaturen für 5 Erdbodenschichten bis zu einer Tiefe von 10 m berechnet werden, ebenso wie eine repräsentative Bodenfeuchte.

REMO ist ein Gitterpunktsmodell und liefert somit Ergebnisse auf einem Raster für das gesamte Simulationsgebiet. In einer Gitterzelle kann sich anteilig Wasser oder Land befinden, wobei ein Teil der Wasserfläche zusätzlich von Meereis bedeckt sein kann (Abb. 3). Auf den Landflächen wird zwischen nacktem Boden und vegetationsbedeckten Flächen unterschieden. Der Boden kann hierbei auch teilweise oder ganz schneebedeckt sein.

Zu den berechneten Ausgabegrößen gehören die prognostischen Variablen (s.o.) ebenso wie eine Vielzahl von weiteren Größen, die z. B. die Bodentemperaturen in 5 Schichten beschreiben, oder die Bodenfeuchte, die Windverhältnisse in

Bodennähe und den Wolkenbedeckungsgrad. Eine Liste der Ausgabegrößen befindet sich im Anhang 2.

Zusätzlich zu den im Anhang angegebenen Variablen des Datenstromes 1, die in Stundenintervallen und Monatsintervallen ausgegeben werden, liegen die folgenden Größen im 6 Stundenintervall vor:

- U, V und W Komponente des Windes in jeder Atmosphärenschiicht
- Temperatur in jeder Atmosphärenschiicht
- Wasserdampfgehalt und Flüssigwasser in jeder Atmosphärenschiicht
- Geopotential der vertikalen Schichten
- Wolkenbedeckung für jede Atmosphärenschiicht
- Turbulente Kinetische Energie in jeder Atmosphärenschiicht

Diese Größen stehen nicht in der CERA-Datenbank (siehe Anhang 2).

3.2. Doppelnestung / Modellgebiete

Alle Experimente wurden nach der Methode der Doppelnestung durchgeführt:

- zunächst wurden die Ergebnisse des Globalmodells ECHAM5/MPI-OM (bzw. der (Re-)Analysen des EZMW³ für den Validierungslauf) als Anfangs- und Randwerte für REMO-Simulationen mit einer horizontalen Auflösung von 0.44° (~50 km) verwendet. Das Modellgebiet umfasst hierbei ganz Europa (Abb. 4).
- Die Ergebnisse dieser 0.44° -REMO-Experimente wurden dann wiederum genutzt, um sie als Anfangs- und Randwerte für die REMO-Simulationen mit einer horizontalen Auflösung von 0.088° (~10 km) zu verwenden. Das Innere des Modellgebiets (ohne Rand) umfasst hierbei Deutschland, Österreich und die Schweiz (Abb. 5). Ferner sind die kompletten Einzugsgebiete von Rhein und Elbe im Modellgebietsinneren enthalten.

³ Re-/Analysen des Europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersage sind numerische Analysen des Wetters auf Grundlage von Beobachtungen.

Validierungslauf

Das Ziel der Doppelnestungsstrategie ist es, keinen zu großen Skalensprung zwischen der Horizontalauflösung des antreibenden Globalmodells (T63; ~200km) und der Horizontalauflösung des Zielexperimentes (0.088°; ~10 km) zu verwenden.

Tabelle 2: Übersicht über die durchgeführten REMO-Modellläufe

REMO-Version	horizontale Auflösung	Beschreibung	Zeitraum
5.8	0.44°	Validierungslauf	1979-2003
5.8	0.088°	Validierungslauf	1979-2003
5.8	0.44°	Kontrolllauf	1950-2000
5.8	0.088°	Kontrolllauf	1950-2000
5.8	0.44°	A1B-Szenario	2001-2100
5.8	0.088°	A1B-Szenario	2001-2100
5.8	0.44°	A2-Szenario	2001-2100
5.8	0.088°	A2-Szenario	2001-2100
5.8	0.44°	B1-Szenario	2001-2100
5.8	0.088°	B1-Szenario	2001-2100

3.3. Validierungslauf

Um die Qualität des REMO-Modells in der beschriebenen Konfiguration zu überprüfen, wurde zunächst ein Experiment für den Zeitraum 1979-2003 durchgeführt. Als REMO-Randwerte wurden für den Zeitraum 1979-1993 die Daten aus dem Reanalyseprojekt ERA15 des EZMW, und für den Zeitraum 1994-2003 die operationellen Analysen des EZMW verwendet. Die genannten Datensätze repräsentieren die bestmögliche Abschätzung der realen großskaligen atmosphärischen Verhältnisse in den entsprechenden Zeiträumen (*perfect boundary conditions*). Unterschiede zwischen den Ergebnissen des REMO Validierungslaufes und Beobachtungsdatensätzen sind aus diesem Grund mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Defizite in der Modellformulierung bzw. in der Nestungsstrategie begründet, weniger in unrealistischen großskaligen Strömungsverhältnissen als Antrieb für das Regionalmodell (wie es z. B. beim ECHAM5-angetriebenen REMO Kontrolllauf der Fall sein kann; s. u.).

3.4. Kontroll- und Szenarien-Modellläufe

Für die Projektion möglicher Klimazustände im 21. Jahrhundert wurden die SRES-Emissionsszenarien A1B, B1 und A2 (s. Kapitel 3) zugrunde gelegt.

Als Ausgangsdaten für das dynamische Regionalisieren mit REMO lagen die Ergebnisse des gekoppelten Atmosphären-Ozean Zirkulationsmodells ECHAM5/MPI-OM mit einer T63 Horizontalauflösung vor, und zwar sowohl für den Kontrolllauf (1950-2000) als auch für die 3 Szenarien (jeweils 2001-2100).

Im Kontrolllauf entsprechen die relevanten globalen Treibhausgaskonzentrationen den in diesem Zeitraum beobachteten Verhältnissen. In den Szenarien entsprechen sie sowohl für die globalen als auch für regionalen Simulationen den Vorgaben der SRES-Emissionsszenarien (siehe Tabelle 1).

4. Aktualisierung der Modellrechnungen

Während der Modellsimulationen wurde der interne Rechenzeitschritt des REMO-Modells verlängert, um Rechenzeit zu sparen. Warum konnte man den Zeitschritt nicht ändern, obwohl viele Modelle mit einem variablen Zeitschritt rechnen?

Alle Formulierungen im Modell sind so aufgebaut, dass sie, so lange sie das Stabilitätskriterium von Courant-Friedrich-Levy nicht verletzen, von der Zeitschrittlänge unabhängig sind. So verlagert sich eine Front gleich weit, egal ob REMO eine Stunde in 10 oder 20 Zeitschritten berechnet. Dies stimmt auch so in REMO bis auf die Formulierung der Horizontaldiffusion. In REMO ist die Horizontaldiffusion (linear, 4. Ordnung) so implementiert, dass eine 2-Delta-x-Welle in 2 Zeitschritten auf $1/e$ in der Amplitude verringert wird. Dies führt dazu, dass der Diffusionskoeffizient proportional zu $1/dt$ wird, so dass die Horizontaldiffusion bei einem kleineren Zeitschritt stärker wirkt als bei einem längeren.

Durch die Umstellung wurden also in den laufenden Simulationen bestimmte Zeiträume mit einem Zeitschritt von 50 s und andere mit 30 s gerechnet. Dies hatte Einfluss auf die Horizontaldiffusion, was sich im Niederschlagsmuster in stark gegliedertem Gelände bemerkbar machte. Hier wurde mit kleinem Zeitschritt mehr Feuchte auf die Berge transportiert und somit mehr Niederschlag generiert.

Vergleicht man nun die Niederschläge in Zeiträumen, die mit unterschiedlichen Zeitschritten berechnet wurden, so taucht ein Schachbrettmuster auf. Vergleicht man dieselben Zeiträume, wenn sie mit einem unveränderten Zeitschritt gerechnet wurden, so entsteht kein Muster.

In den Darstellungen der Niederschlagssignale (Abb. 6) ist dieser Unterschied zu erkennen: Bei beiden sieht man das gleiche Klimasignal – es wird im Winter feuchter, jedoch ist in der Abbildung links in den Alpen ein deutliches Schachbrettmuster zu erkennen.

4.1. Vergleich mit Beobachtungen

Um den Einfluss der unterschiedlichen Zeitschrittlängen auf die Gebietsmittel der Niederschläge in Deutschland zu analysieren, wurden die Differenzen der in den 2 REMO Rechnungen mit unterschiedlichen Zeitschritten berechneten Niederschläge, mit Differenzen von Beobachtungsklimatologien verglichen (Abb. 7). Die gemittelten REMO-Ergebnisse unterscheiden sich kaum. Der Unterschied ist geringer als die Differenzen, die zwischen verschiedenen Beobachtungsdatensätzen existieren (ca. 2 bis 5 %, siehe Abb. 7). Regional kann es natürlich zu größeren Unterschieden kommen.

Es ist also schwierig zu entscheiden, welcher Zeitschritt bessere Ergebnisse liefert. Der mit (Re-)Analysen angetriebene Validierungslauf wurde mit 30 s gerechnet. Der Vergleich der auf diese Weise berechneten Niederschläge im Alpenraum mit Beobachtungen, der von der BfG und Ing.-Büro Ludwig durchgeführt wurde, zeigte sehr gute Ergebnisse, mit einer Unterschätzung der Sommerniederschläge in höher gelegenen Einzugsgebieten des Rheins. Durch die höhere Diffusion in den Läufen mit 30 s wurde mehr Feuchte und damit auch mehr Niederschlag auf die Berggipfel transportiert. Da im Report der BfG (Richter, 2005) im Validierungslauf eine Unterschätzung der Niederschläge in Höhenlagen dokumentiert wurde, wurden die Simulationen mit 30 s konsistent fortgesetzt, indem die mit 50 s Zeitschritt berechneten Zeiträume mit 30 s Zeitschritt nachgerechnet wurden.

4.2. Vergleiche zwischen Validierungs- und Kontrollläufen

Eine genauere Analyse wurde für die Gebietsniederschläge in den Einzugsgebieten von Rhein, Neckar, Main und Elbe für 1979-1999 durchgeführt. Hierbei wurden die für die Einzugsgebiete berechneten Niederschlagsklimatologien des Validierungslaufs mit den berechneten Klimatologien des im Zeitschritt inkonsistenten und des konsistenten Kontrolllaufs verglichen. Die Ergebnisse beider Kontrollläufe sind sehr ähnlich und wesentlich geringer als die Standardabweichungen.

In den Abb. 8 bis Abb. 11 sind die langjährigen mittleren monatlichen Gesamtniederschläge, wie sie in den einzelnen Simulationen von REMO berechnet

Einfluss auf das Klimaänderungssignal

wurden, dargestellt. Abgesehen von den geringen Unterschieden der beiden Kontrollläufe, sind deutliche Abweichungen zu den berechneten Niederschlagsmengen des Validierungslaufs zu finden. Unabhängig von der Inkonsistenz werden im Validierungslauf durchweg etwas geringere Niederschlagsmengen berechnet als in den Kontrollläufen. Besonders deutlich wird dies im November und Dezember im Rheineinzugsgebiet, für das in den mittleren November- und Dezembermonaten je etwa 30 mm mehr berechnet werden. Auslöser für diese Unterschiede sind vermutlich ausgeprägte Westwindwetterlagen, die im Vergleich zu der Simulation mit quasi realen Randbedingungen, d. h. (Re-)Analysen bei der Verwendung von Randinformationen aus ECHAM5/MPI-OM im Kontrollklima mehr Feuchtigkeit in das Modellgebiet hineintransportieren, als im Validierungslauf.

Im Elbeeinzugsgebiet ist dieser Unterschied nicht vorhanden, jedoch wird in den Kontrollläufen etwas mehr Sommerniederschlag (Juni und Juli) berechnet. Generell ist die in den Kontrollläufen simulierte Niederschlagsmenge etwas größer als die im Validierungslauf berechnete. Dies deutet darauf hin, dass das Kontrollklima in ECHAM5/MPI-OM etwas feuchter ist, sodass etwas mehr Niederschlag erzeugt werden kann.

In allen Simulationen ist der Verlauf des Jahresgangs der Niederschlagsmengen sehr ähnlich.

4.3. Einfluss auf das Klimaänderungssignal

Das Klimaänderungssignal ist für die unterschiedlichen Zeitschritte sehr stabil, da auch für kurze Zeiträume gleiche Signale errechnet werden. Beispielhaft zeigt Abb. 12 das Klimasignal in der relativen Niederschlagsänderung im Winter für den 8 Jahreszeitraum von 2071 bis 2078 im Vergleich zu 1990 bis 1999. Die Muster sind in allen Regionen des Modellgebietes sehr ähnlich.

Auch die zeitlichen Verläufe der relativen saisonalen Niederschlags- und Temperaturänderungen (Abb. 13 und Abb. 14) sind sehr ähnlich. Die Temperatur zeigt einen gleichmäßigen Trend mit einer stärkeren Erwärmung in den Wintermonaten (DJF), insbesondere zum Ende dieses Jahrhunderts, der in beiden

Nachrechnungen

Szenarien (also bei 30 s und 50 s Zeitschritt) gleich berechnet wird. Der Trend ist in den Sommermonaten etwas geringer, als in den Wintermonaten und noch etwas geringer in den Szenarien mit 50 s.

Die Zeitreihen der jahreszeitlichen Niederschlagsänderungen zeigen in beiden Simulationen (mit 30 s und 50 s) eine Zunahme der Winterniederschläge und eine Abnahme der Sommerniederschläge in der letzten Hälfte dieses Jahrhunderts, und eine sehr starke multi-dekadische Variabilität.

Jedoch erscheint das A1B Szenario bei einem Zeitschritt von 50 s etwas nasser zu sein. Dies erklärt auch den etwas geringeren Temperaturanstieg von etwa 0.2 °C im Sommer.

4.4. Nachrechnungen

Wie oben beschrieben führt die Inkonsistenz im Zeitschritt nur zu sehr kleinen Unterschieden in den Berechnungsergebnissen und hat auch nur Auswirkungen auf wenige Variablen. Trotzdem soll ein in sich vollständig konsistenter Datensatz für Klimafolgenstudien zur Verfügung gestellt werden, so dass entschieden wurde einige Simulationsjahre nachzurechnen.

Aus der Tabelle 3 ist zu entnehmen, welche Zeiten ursprünglich mit welchem Zeitschritt gerechnet wurden.

Tabelle 3: Übersicht der Zeiträume mit kurzem und langen Zeitschritt (DT)

Experiment	Zeiträume mit langem DT	Zeiträume mit kurzem DT
Kontrolllauf	1990 – 2000	1950 – 1989
A1B	2035 – 2054	2001 – 2034
	2071 – 2100	2050/4 – 2070
B1	2025 – 2054	2001 – 2024
	2070 – 2100	2050/4 – 2069
A2	2029 – 2055	2001 – 2028
	2070 – 2100	2050/4 – 2069

Nachrechnungen

Um die Inkonsistenz in den Zeitschritten zu beheben, wurden alle Jahre, die vorher mit 50 s gerechnet wurden, nochmal mit 30 s nachgerechnet.

In den folgenden Abschnitten werden ausschließlich Ergebnisse der konsistenten, mit durchgängigem 30 s-Zeitschritt berechneten Simulationen gezeigt. Alle in der CERA Datenbank enthaltenen Daten entsprechen den Ergebnissen mit durchgängigem 30 s-Zeitschritt.

5. Validierung der Modellergebnisse

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, wurde zunächst ein Validierungslauf durchgeführt, dessen Ergebnisse möglichst gut die beobachteten Klimatologien wiedergeben sollen, und somit Aussagen über die Güte und Belastbarkeit der REMO-Simulation erlauben bzw. systematische Abweichungen aufdecken.

Im Folgenden werden die von REMO berechneten Niederschlagsmengen (d. h. Summen aus Schnee- und Regenmengen) und die Lufttemperaturen in 2 m Höhe über Grund für den Zeitraum 1979 bis 2003 mit verschiedenen Beobachtungsdatensätzen verglichen. Dabei werden sowohl Gebietsmittel für Deutschland und einige Flusseinzugsgebiete betrachtet als auch die räumliche Verteilung der Temperaturen und Niederschläge. Für die Darstellung der räumlichen Verteilung wurden die Daten vorher mit einem 9 Punktefilter geglättet. Dies ist notwendig, da dynamische Modelle eine Genauigkeit von $2 * dx$ aufweisen (siehe Hinweise für Datennutzer http://www.mpimet.mpg.de/fileadmin/staff/pfeifersusanne/REMO_UBA/REMO-UBA-Hinweise.pdf). Daher sollten für Vergleiche mit Beobachtungen sowie zur Interpretation der Szenariendaten keine einzelnen Gitterpunktwerte sondern nur Mittel von mindestens 4 bis 9 Gitterboxen genutzt werden.

5.1. Verwendete Datensätze

Zur Validierung werden verschiedene Datensätze herangezogen, die alle auf Messungen verschiedener Wetterdienste beruhen und als Klimatologie zum Vergleich mit Ergebnissen von Klimamodellen dienen. Alle Klimatologien liegen auf Gittern vor, und sind somit ideal für einen Vergleich zu berechneten Gittergrößen geeignet. Alle beobachteten Gitterdatensätze wurden ohne weitere Qualitätskontrollen verwendet. Es handelt sich im Einzelnen um folgende Datensätze:

ERA40:

Das ERA-40 Reanalyse-Produkt (Uppala et al., 2005) basiert auf meteorologischen Beobachtungen aus unterschiedlichen Quellen (seit den 1970er Jahren auch Satellitendaten) für den Zeitraum September 1957 bis August 2002 sowie einem

Verwendete Datensätze

Assimilations- und Vorhersagemodell. Die resultierenden globalen Verteilungen verschiedener atmosphärischer und Landoberflächenparameter sind in einer Auflösung von 2.5° frei erhältlich.

CRU:

Die verwendeten CRU-Datensätze (*Climate Research Unit, University of East Anglia; Mitchell et al., submitted*) enthalten monatliche Felder verschiedener atmosphärischer Parameter (u. a. Niederschlag, Lufttemperatur, Wolkenbedeckungsgrad) für den Zeitraum 1901-2000 auf einem globalen 0.5°-Gitter (CRU TS 2.1) bzw. auf einem europaweiten 1/6°-Gitter (CRU TS 1.2).

GPCP:

Das *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) ist Bestandteil des *Global Energy and Water Cycle Experiments* (GEWEX) und stellt monatliche Niederschlagssummen für den Zeitraum seit 1979 auf einem globalen 2.5°-Gitter zur Verfügung (Huffman et al., 1997). Grundlage sind direkte Niederschlagsmessungen sowie aus Satellitendaten abgeleitete Niederschlagsinformationen.

GPCC:

Die globalen Datensätze des *Global Precipitation Climatology Centers* (GPCC) beruhen auf direkten Stationsmessungen und stellen monatliche Niederschlagssummen für den Zeitraum 1951-2004 in Auflösungen von 0.5°, 1° und 2.5° zur Verfügung (Fuchs et al., 2007). Im Unterschied zum GPCP-Datensatz (s.o.) sind jedoch nur Landflächen abgedeckt.

ETH:

Dieser hochaufgelöste Niederschlagsdatensatz für den Alpenraum für die Periode 1971-1990 basiert auf täglichen Niederschlagsmessungen an über 9000 Stationen (Schwarb, 2000; Schwarb et al., 2001). Er liegt in einer Auflösung von 1.5' (ca. 2 km) vor.

BfG (Teileinzugsgebiete):

Dieser einzugsgebietsbezogene Datensatz basiert auf Niederschlagsmessungen der verschiedenen nationalen Wetterdienste (Deutschland, Schweiz, Frankreich). Er

enthält tägliche Gebietsniederschläge für 134 Teileinzugsgebiete des Rheins für den Zeitraum 1960 bis 1999 und wurde von der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Koblenz (BfG) zur Verfügung gestellt (Richter, 2005).

DWD - REGNIE:

Der REGNIE-Datensatz stellt tägliche Niederschlagsmengen auf einem deutschlandweiten 1 x 1 km²-Gitter für den Zeitraum 1961-2004 zur Verfügung (http://www.dwd.de/de/wir/Geschaeftsfelder/Hydrometeorologie/a_href_pages/regnie_methode.htm). Er basiert auf dem dichten Niederschlagsmessnetz des Deutschen Wetterdienstes und dem Regionalisierungsverfahren *REGNIE* (Regionalisierung räumlicher Niederschlagsverteilungen).

5.2. Räumliche Muster

Die berechneten Jahresmittel der simulierten Lufttemperatur in 2 m Höhe über Grund sind für den Zeitraum 1979 bis 2000 in Abb. 15 (oben) im Vergleich zu den CRU-Daten dargestellt. Das im Validierungslauf wiedergegebenen Temperaturniveau entspricht im gesamten Modellgebiet dem im Jahresmittel beobachteten Temperaturniveau, so dass REMO diese Klimavariablen zufriedenstellend wiedergibt. In weiten Teilen Deutschlands herrscht im langjährigen Mittel eine Temperatur von 9 bis 10 °C, im Westen des Modellgebietes ist es im Jahresmittel etwas wärmer (10 bis 11 °C) und der Alpenraum ist deutlich kühler, mit Jahresmitteltemperaturen von um und unter 0 °C. Allerdings wird sofort ein Problem des Vergleichs dieser Art deutlich: das Gitter der CRU-Klimatologie hat eine deutlich geringere horizontale Auflösung und liefert somit wesentlich weniger Details in den räumlichen Mustern. Im Oberrheingraben werden von CRU Jahresmitteltemperaturen von etwa 10 bis 11 °C angegeben, wohingegen REMO höhere Temperaturen von 11 bis 12°C simuliert. Dies ist zumindest teilweise eine Folge der unterschiedlichen räumlichen Auflösungen: In der feiner aufgelösten REMO-Topographie haben die zentralen Teile des Oberrheingrabens eine geringere orographische Höhe und weisen allein aus diesem Grund schon eine etwas höhere Lufttemperatur auf (negativer Höhengradient der Lufttemperatur). Diese Inkonsistenzen durch unterschiedliche räumliche Auflösungen der verglichenen Datensätze ließen sich prinzipiell durch Verwendung der höher aufgelösten CRU 1/6° Klimatologie (CRU TS 1.2) als Referenzdatensatz vermindern. Bei entsprechenden Vergleichen zeigt sich jedoch, dass die räumliche

Variation (insbesondere der Niederschlagsfelder) in der 1/6°-Klimatologie sehr ähnlich zu derjenigen in der 1/2°-Klimatologie ist. Dies ist eine direkte Folge der fast identischen Datenbasis beider Datensätze (es werden im Wesentlichen dieselben Beobachtungsstationen verwendet, das räumliche Interpolationsverfahren wird lediglich auf eine höhere Zielauflösung angewendet).

Das für den Fall der Lufttemperatur beschriebene Phänomen der höheren räumlichen Variabilität der REMO-Ergebnisse im Vergleich zum 1/2°-CRU-Datensatz wird beim Vergleich der Niederschlagsmuster umso deutlicher (Abb. 15, mitte). Die jährliche Niederschlagssumme in REMO zeigt wesentlich mehr horizontale Variabilität als die Niederschlagssummen der CRU-Klimatologie. Für alle Abbildungen gilt: geringe Niederschlagssummen sind in rot dargestellt und hohe Niederschlagssummen in blau.

In weiten Teilen des Modellgebietes stimmen die berechneten und gemessenen Niederschlagssummen gut überein, allerdings berechnet REMO mehr Niederschlag entlang der Nordseeküste und der polnischen Ostseeküste.

Insbesondere spiegelt das REMO Niederschlagsmuster auch kleinräumig das Geländere relief im Modellgebiet wieder, wobei allerdings eine systematische Verschiebung um 1 bis 2 Gitterboxen in Hauptanströmrichtung zu erkennen ist. Für einen kleinräumigeren Vergleich in stark strukturierten Gelände, in dem die CRU-Klimatologie zu grob ist, wurde ein Datensatz der ETH Zürich (Schwarb, 2000) herangezogen. In Abb. 15 (unten) ist die hoch aufgelöste Klimatologie jährlicher Niederschlagssummen im Alpenraum für die Jahre 1971 bis 1990 dargestellt. Deutlich sind die hohen Jahresniederschlagssummen auf den Höhenrücken der Gebirge zu erkennen, wie z. B. in den Vogesen und im Schwarzwald, oder auch die Hochgebirgsszüge der Alpen. Ebenso klar zeigt sich der inneralpine Trockenbereich in der Klimatologie. Erst mit einer Gitterweite von 10 km werden diese detaillierten Muster in den modellierten Ergebnissen sichtbar. Abb. 15 (Mitte, links) zeigt die von REMO berechneten Jahresniederschläge für 1979 bis 2000. Auch hier sind die Höhenrücken mit den hohen Niederschlagssummen erkennbar, jedoch bei weitem noch nicht so klar wie in den Beobachtungen. Erstmals tauchen regionale Niederschlagsmuster in den Modellergebnissen auf, die auch kleinräumige Details

sichtbar werden lassen, und somit das große Potential zeigen, das in regionalen Klimasimulationen mit hohen Auflösungen liegt. Jedoch ist z. B. die inneralpine Trockenregion nur leicht angedeutet und durch eine Überschätzung der simulierten Niederschlagsmengen nicht stark genug erkennbar.

Abschließend lässt sich sagen, dass die horizontalen Muster der Jahresmittel von Temperatur und Niederschlägen in weiten Teilen des Modellgebietes von REMO zufriedenstellend berechnet werden.

5.3. Zeitlicher Verlauf

Für die Einzugsgebiete von Elbe und Rhein sowie für ganz Deutschland wurden Gebietsmittel erstellt, um simulierte Monatsmittelwerte und mittlere Jahresgänge mit denen aus den CRU-Daten vergleichen zu können. Abb. 16 zeigt links den Vergleich der Monatsmittelwerte und rechts den der mittleren Jahresgänge der 2m-Temperatur. Die Übereinstimmung der zeitlichen Verläufe der Monatsmittel ist im wesentlichen zufriedenstellend, jedoch berechnet REMO etwas höhere Sommertemperaturen. Im Vergleich der mittleren Jahresgänge wird dies noch deutlicher: REMO überschätzt die Gebietsmittel der sommerlichen Monatsmitteltemperaturen um 1 bis 2°C und unterschätzt die Wintertemperaturen um etwa 1°C.

Die berechneten Monatsmittelwerte der Gebietsmittel der Gesamtniederschläge stimmen in allen 3 Gebieten sehr gut mit den CRU-Daten überein (Abb. 17). Auch die mittleren Jahresgänge werden für alle 3 Gebiete gut wiedergegeben, wobei REMO die Niederschlagsmengen in der ersten Jahreshälfte etwas höher berechnet als aus den CRU-Daten ermittelt und die Monatssummen im September und Oktober eher unterschätzt. Die Überschätzung des Niederschlags durch REMO insbesondere in den Wintermonaten ist zum Teil in der Verwendung unkorrigierter Beobachtungsdaten begründet. Der CRU-Datensatz berücksichtigt nicht den systematischen Fehler der Niederschlagsmessung durch Einfluss von Wind, Benetzung des Messgerätes, Verdunstungsverlusten etc. Die daraus resultierende Unterschätzung der wahren Niederschlagsmenge kann insbesondere in den Wintermonaten (Verdriftung von Schnee) und bei hohen Windgeschwindigkeiten mehr als 20 % betragen (z. B. Sevruk, 1982). Insgesamt betragen die Abweichungen der simulierten langjährigen Monatsmittel von den Beobachtungen maximal ca.

20 %, so dass die Berechnung der Niederschlagsmengen im Validierungslauf durchaus als zufriedenstellend einzustufen ist.

5.4. Niederschlagsmengen in verschiedenen Höhenstufen

Die Verteilung der Niederschlagsmengen in verschiedenen Höhenstufen ist besonders wichtig, um die Güte der Simulationsergebnisse in Gebirgsregionen einzuschätzen. In den Abb. 18 bis Abb. 22 sind Jahresmittel und jahreszeitliche Flächenmittel des Gesamtniederschlags für Deutschland, aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen, aus den Ergebnissen des Validierungslaufs und aus Beobachtungen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) dargestellt. Das Flächenmittel des Jahresgesamtniederschlags in Deutschland summiert über alle Höhenstufen wird insgesamt leicht unterschätzt (Abb. 22). Dieses resultiert besonders aus einer generellen Unterschätzung der Winter- und Herbstniederschläge (Abb. 18 und Abb. 21). In den Frühjahrs- und Sommermonaten kommt es zu einem kompensierenden Effekt bei dem die Niederschläge unterhalb 200 m überschätzt und oberhalb 600 m unterschätzt werden (Abb. 19 und Abb. 20). In der Summe über das Gesamtgebiet ergeben sich bei diesen Jahreszeiten sehr gute Übereinstimmungen. In den Sommermonaten liegen die Abweichungen in den Höhenstufen bis 600 m um ± 10 %, über 600 m wird die Niederschlagsmenge allerdings unterschätzt, besonders deutlich in den wenigen Gitterboxen (ca. 1 % des Gesamtgebiets) mit Geländehöhen zwischen 1000 und 3000 m ü. NN. Dieses Verhalten tritt auch in den anderen Jahreszeiten auf, wenn auch weniger stark ausgeprägt. Die Unterschätzung insbesondere der sommerlichen Niederschlagsmengen in hochgelegenen Gebieten Mitteleuropas ist ein Phänomen, das sich generell nicht nur in REMO sondern auch in anderen regionalen Klimamodellen zeigt (z. B. Frei et al., 2003).

5.5. Analyse der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Lufttemperatur

Neben dem räumlichen und zeitlichen Vergleich der Lufttemperaturen mit Beobachtungen ist auch ein Vergleich der Häufigkeitsverteilungen notwendig, um bei Extremwertanalysen einschätzen zu können, wie die Verteilungen im Modell wiedergegeben werden. Die Analyse für Deutschland (nicht dargestellt) zeigt eine leichte Überschätzung der Temperaturklassen über 15° und eine leichte

Unterschätzung unter 15° . Eine deutliche Diskrepanz tritt bei 0° auf, wo das Modell die Häufigkeit gegenüber den Beobachtungen deutlich überschätzt. Die Überschätzung resultiert aus der modellierten Berücksichtigung der Schmelz- und Gefrierprozesse im Boden. Solange das Wasser in der obersten Modellbodenschicht (Dicke 6,5 cm) nicht vollständig gefroren bzw. aufgetaut ist, bleibt die berechnete Oberflächentemperatur konstant bei 0° . In der Realität finden ebenfalls Schmelz- und Gefrierprozesse statt, die die Temperaturvariabilität um 0° einschränkt, jedoch ist die beeinflussende Oberflächenschicht des Erdbodens sehr dünn während sie in REMO 6.5 cm dick ist, wodurch die Häufung bei 0° stärker ausfällt. Die höhere Intensität bei 0° in REMO führt bei Gefrierprozessen zu einer Verringerung der Intensität zwischen etwa -7°C und 0°C sowie bei Schmelzprozessen zu einer Verringerung zwischen etwa 0°C und 10°C . Ein Vergleich mit im Modell abgeschalteten Schmelz- und Gefrierprozessen⁴ zeigt, dass die Monatsmitteltemperatur sehr ähnlich ist. Das generelle Abschalten der Schmelz- und Gefrierprozesse erhöht die Tagestemperaturvariabilität im Winter und reduziert die Anzahl der Schneetage. Beides ist unrealistisch, weshalb die Schmelz- und Gefrierprozesse zwingend notwendig sind. Derzeit werden mehrere Methoden von Schmelz- und Gefrieralgorithmen in REMO implementiert, um die Vorteile der Berücksichtigung zu behalten aber das Null-Grad-Problem zu lösen. Auf unserer Homepage (<http://www.mpimet.mpg.de>) werden wir über den aktuellen Stand informieren.

5.6. Zusätzliche Validierung des Kontrolllaufs

In Kapitel 3 wird die allgemeine Vorgehensweise für Klimaänderungsszenarien beschrieben, zu der die Durchführung eines Validierungslaufs und der Vergleich seiner Ergebnisse mit Beobachtungen gehört, um die Modellgüte in der gewählten Konfiguration zu ermitteln und Vertrauen in die Modellergebnisse aufzubauen. Der nächste Schritt ist dann die Erstellung eines regionalen Kontrolllaufs, für den ebenfalls ein Vergleich der berechneten Klimavariablen mit Beobachtungen und den Ergebnissen des Validierungslaufs notwendig wird. Diese Analyse bildet die Basis für die Klimaänderungssignale, so dass es wünschenswert ist, dass das berechnete Kontrollklima so gut wie möglich das heutige, beobachtete Klima beschreibt. Dies hängt jedoch nicht nur von der Güte des regionalen Klimamodells ab, sondern ganz

⁴ Hier tritt keine Überschätzung der Häufigkeit bei Null Grad auf.

wesentlich von der Qualität des im globalen Klimamodell berechneten Kontrollklimas. Der Einfluss der Globalmodellergebnisse auf die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle wird in vielen Projekten untersucht und ist ein ständiges Forschungsthema (Prudence special issue, prudence.dmi.dk, www.ensembles-eu.org).

Exemplarisch dargestellt werden in den Abb. 23 bis Abb. 26 die zeitlichen Verläufe und mittleren Jahresgänge der Gebietsmittel der 2m Temperaturen und des Gesamtniederschlags für Deutschland, wie sie im Validierungslauf, im Kontrolllauf und mit den CRU-, ERA40-, GPCC- und GPCP- Daten berechnet werden. Die zeitlichen Verläufe des Gebietsmittels der berechneten Temperaturen für Deutschland zeigen im Zeitraum von 1960 bis 2000 keine klaren Trends und verlaufen ähnlich, wie der durch ERA40 und CRU- Datensätze aufgespannte Temperaturbereich der Beobachtungen (Abb. 23). Allerdings sind die im Validierungslauf berechneten Temperaturen im langjährigem Deutschlandmittel etwa 0.5 °C wärmer als in CRU. Die im Kontrolllauf berechneten Temperaturen sind etwas kühler und liegen in manchen Jahren mehr als 1 °C unter den Temperaturen aus dem Validierungslauf. Die inter-annualen Variabilitäten erscheinen ähnlich.

Die zeitlichen Verläufe der Gebietsmittel der Gesamtniederschlagsmengen für Deutschland im Zeitraum 1960 bis 2000 sind in Abb. 24 dargestellt. Der graue Bereich wird durch drei verschiedene Beobachtungsdatensätze aufgespannt. Dieser Bereich umfasst zeitweise eine Spanne von etwa 200 mm pro Jahr bei Gesamtmengen zwischen 800 und 1000 mm. Dies zeigt die hohe Unsicherheit in den Niederschlagsklimatologien, die im wesentlichen auf die starke lokale Variabilität im Niederschlag zurückzuführen ist. Die berechneten Niederschlagsmengen aus dem Validierungslauf liegen innerhalb des durch Beobachtungen aufgespannten Bereichs und dabei in vielen Jahren in der untern Hälfte. Im Kontrolllauf werden im Vergleich zum Validierungslauf höhere Gebietsmittel des Gesamtniederschlags berechnet, die aber meist auch noch innerhalb des Beobachtungsbereichs liegen - diesmal jedoch am oberen Rand. Im Vergleich der Ergebnisse aus dem Kontrolllauf mit CRU- Daten zeigt, dass im berechneten Kontrollklima kontinuierlich etwa 100 bis 200 mm mehr Niederschlag pro Jahr erzeugt werden. Wie in Kapitel 5.3 bereits beschrieben, kann

Zusätzliche Validierung des Kontrolllaufs

dieser Sachverhalt z. T. auf die Verwendung unkorrigierter Niederschlagsdatensätze zurückgeführt werden.

Die mittleren Jahresgänge von 1979 bis 2000 der Gebietsmittel der Temperaturen für Deutschland (Abb. 25) zeigen, dass die berechneten Temperaturen des Validierungslaufs von Mai bis Oktober 1 bis 3 °C wärmer sind als die Temperaturen aus dem Kontrolllauf oder den Beobachtungen. In den Wintermonaten stimmen die Temperaturen im Validierungslauf gut mit den Beobachtungen überein, wohingegen die Temperaturen des Kontrolllaufs eher zu kühl sind. Im Rest des Jahres stimmen die Temperaturen aus dem Kontrolllauf sehr gut mit den Beobachtungen überein.

Durch die verschiedenen Niederschlagsklimatologien wird ein recht breiter Bereich der monatlichen Gebietsmittel für Deutschland aufgespannt, der in den Wintermonaten ca. 30 mm für mittlere Monatssummen von 50 bis 80 mm umschließt und in den Sommermonaten auf 10 bis 15 mm schrumpft (Abb. 26). Der mittlere Jahresgang zeigt zwei Maxima, Dezember/Januar und Juni/Juli. Dies gilt für die Beobachtungen ebenso wie für die berechneten Niederschläge beider Simulationen. Im Validierungslauf werden monatliche Gebietsmittel des Gesamtniederschlags berechnet, die im Bereich der Beobachtungen liegen, in der zweiten Jahreshälfte jedoch eher am unteren Rand. Im Kontrolllauf werden insbesondere von Mai bis August höhere Niederschlagsmengen berechnet als beobachtet, die winterlichen Mengen werden recht gut getroffen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Vergleich zu Beobachtungen das im Validierungslauf berechnete Klima im Sommerhalbjahr eher etwas wärmer ist, die Niederschlagsmengen aber recht gut reproduziert werden. Demgegenüber stehen zu hohe sommerliche Niederschläge im Kontrollklima, welches allerdings die beobachteten Temperaturen gut wiedergibt.

6. Ergebnisse der Klimaszenarien für Monatsmittelwerte von Niederschlag und Temperatur

Es wurden drei hoch aufgelöste Klimaänderungsszenarien (IPCC SRES B1, A1B, A2) mit der Modellkette ECHAM5/MPI-OM und REMO auf einem Gitter von 10km x 10km erstellt (siehe Kapitel 3). Das Modellgebiet erstreckt sich über Deutschland, Österreich und die Schweiz für den Zeitraum von 1950 bis 2100. Die vergleichende Darstellung der Ergebnisse gliedert sich in die Präsentation zeitlicher Änderungen (Kapitel 6.1) und räumlicher Muster (Kapitel 6.2). Es werden sowohl absolute Größen als auch Differenzen (Kapitel 6.2) für individuelle Zeiträume betrachtet.

6.1. Zeitlicher Verlauf

Temperaturen

Die Entwicklung der Änderungen der Jahresmitteltemperaturen für den Zeitraum 1950 bis 2100 im Vergleich zur Klimanormalperiode (1961 bis 1990) in allen drei Szenarien ist in Abb. 27 dargestellt. In allen Szenarien wird ein Erwärmungstrend für das Gebietsmittel der Temperatur für Deutschland mit einer leichten multi-dekadischen Variabilität simuliert. Dieser Trend ist unterschiedlich stark ausgeprägt, so dass je nach Szenario die Jahresmitteltemperatur in Deutschland zwischen ca. 2.5 °C und 3.5 °C ansteigen kann. Der Anstieg der Temperatur wird für das B1 Szenario am schwächsten berechnet. Die möglichen Temperaturänderungen in A2 und A1B verhalten sich sehr ähnlich mit einem Anstieg um bis zu 3.5 °C.

Gemessen an den unterschiedlichen CO₂ Konzentrationen in A2 und A1B sind die Erwärmungsraten unerwartet ähnlich, wie auch schon in Kapitel 3 für die globalen IPCC Szenarien erläutert. Die Ursache liegt darin, dass sich die abkühlende Wirkung der Schwefelaerosole in der 2. Hälfte des 21. Jahrhunderts in A1B deutlich schneller verringert als in A2 (Tabelle 1). Damit ist die durch Abnahme der Schwefelemissionen bedingte Erwärmung in A1B größer als in A2 und kompensiert zum Teil den schwächeren CO₂ Anstieg in A1B (Abb. 27).

Ganz ähnlich sehen die zeitlichen Verläufe der saisonalen Temperaturentwicklungen aus, wie in Abb. 28 bis Abb. 31 dargestellt. In allen Jahreszeiten ist der berechnete

Trend im B1 Szenario am geringsten, das heißt unter diesen Emissionsbedingungen würde die Temperatur in Deutschland am wenigsten ansteigen. Für das B1 Szenario wird berechnet, dass die Frühjahrstemperatur nur um etwa 1.5°C bis zum Ende dieses Jahrhunderts ansteigt, während in allen anderen Jahreszeiten der Anstieg etwa bei 3°C liegt (2.5°C im Herbst). Insbesondere im A1B Szenario wird deutlich, dass der Anstieg der Wintertemperaturen am stärksten sein kann, mehr als 4°C im Deutschlandmittel. Diese Erwärmung in den Wintermonaten lässt sich teilweise durch Schnee-Albedo-Wechselwirkungen erklären: Die wärmere Luft führt zu einer geringeren Schneefallmenge (Niederschlag fällt häufiger als Regen) sowie zu einem schnelleren Abschmelzen von Schnee. Infolgedessen absorbiert der dunklere, schneefreie Erdboden eine höhere Strahlungsmenge und erwärmt sich stärker (bzw. kühlt langsamer aus). Weiterhin kommt es in den Wintermonaten zu einer Intensivierung der westlichen zonalen Anströmung und somit zu weniger Kaltlufteinbrüchen aus Skandinavien und Sibirien. Dies ist außerdem mit einer verringerten Temperaturvariabilität verbunden.

Wie bereits erwähnt, sind die berechneten geringen Erwärmungen in den Frühjahrsmonaten zunächst überraschend. Sie lassen sich allerdings durch Veränderungen in den saisonalen Druckverteilungen (Abb. 32 und Abb. 33) erklären. Die schwache westliche zonale Anströmung wechselt zum Ende des A1B Szenarios zu einer leicht meridionalen Anströmung von Norden, so dass verstärkt relativ kühle Luftmassen aus Norden nach Deutschland geleitet werden. Die Erwärmung wird somit durch das Heranführen von kalten Luftmassen teilweise kompensiert.

Niederschläge

Anders als bei den möglichen Temperaturentwicklungen wird im Falle der Jahresniederschläge kein Trend berechnet (Abb. 34). Die Jahresniederschlagsmenge scheint in allen drei Szenarien im Deutschlandmittel etwa konstant zu bleiben. Die Niederschlagsentwicklung in den Szenarien A1B und A2 ist dabei recht unterschiedlich, im Gegensatz zur Entwicklung der Temperatur. Allerdings werden starke multi-dekadische Schwankungen simuliert, die in der Darstellung der saisonalen Niederschlagsänderungen (siehe Abb. 35 bis Abb. 38) besonders deutlich werden und durchaus mehr als 20% betragen können. Die Multi-dekadische Variabilität ist stark von natürlichen Prozessen im Klimasystem mit ihrem

z. T. stark nicht-linearen Charakter geprägt. Nur weil eine Realisation z. B. eines A1B Szenarios für den Zeitraum 2040 bis 2060 eine niederschlagsintensive Phase simuliert, heißt dies nicht, dass diese Dekaden auch tatsächlich feuchter sein wird als heute. Die in allen Szenarien simulierten multi-dekadischen Variabilitäten zeigen, dass es genau wie unter heutigen Klimabedingungen in der Zukunft nicht nur starke Jahr zu Jahr Schwankungen geben kann, sondern durchaus auch mehrere feuchte oder nasse Jahre hintereinander auftreten können. Nur eine Vielzahl von Realisationen der einzelnen IPCC Szenarien kann hierbei zu stärker abgesicherten Trendaussagen führen (Ensemble-Kalkulationen).

Die Analyse der Niederschlagsänderungen in den einzelnen Jahreszeiten zeigt, dass im Gebietsmittel für Deutschland die Niederschläge in allen Szenarien im Frühjahr und Herbst um ca. 10 % im Mittel ansteigen können. Für die Sommermonate wird eine Niederschlagsabnahme um bis zu 20 % berechnet, die sich ab etwa Mitte dieses Jahrhunderts bemerkbar machen kann. In den Wintermonaten kann der Niederschlag um mehr als 20 % zunehmen. Diese prognostizierte Zunahme der Winterniederschläge bedeutet jedoch nicht automatisch auch eine Zunahme der winterlichen Schneefallmenge. Durch das allgemein höhere Temperaturniveau fällt in den Klimaszenarien nämlich ein größerer Anteil des Gesamtniederschlags in Form von Regen - der Schneefallanteil geht zurück. Eine Analyse für den Alpenraum (hier nicht gezeigt) ergibt, dass der Anteil von Schneefall an der jährlichen Gesamtniederschlagsmenge von 30% im Kontrollexperiment auf 15-20% gegen Ende des 21. Jahrhunderts zurückgeht. Dies führt effektiv zu einer insgesamt geringeren Schneefallmenge, selbst unter Berücksichtigung des oben beschriebenen leichten Anstiegs der winterlichen Gesamtniederschlagsmenge. Zusätzlich kommt es, ebenfalls bedingt durch das höhere Temperaturniveau in den Szenarien, zu einem schnelleren Abschmelzen der Schneedecke in den Frühjahrsmonaten. Insgesamt führen beide Prozesse zu deutlich reduzierten mittleren Schneehöhen und zu einer deutlichen Abnahme der Anzahl von Schneetagen (Tage, an denen die dem Erdboden aufliegende Schneedecke eine bestimmte Mächtigkeit überschreitet; siehe Kapitel 7.1).

Ringdiagramme für Temperaturen und Niederschläge

Eine Zusammenfassung der möglichen Veränderungen der Gebietsmittel für Deutschland liefern die Ringdiagramme in Abb. 39 bis Abb. 42, die jeweils die Änderungen in den Zeiträumen 2021 bis 2050 und 2071 bis 2100 gegenüber der Klimanormalperiode (1961 bis 1990) beinhalten. Der äußere Ring gibt die Änderungen auf monatlicher Basis wieder, der mittlere Ring zeigt die jahreszeitlichen Veränderungen und im zentralen Zwölfeck befindet sich die Änderung der Jahresmittel.

Die Abb. 39 und Abb. 40 zeigen die schematischen Darstellungen der Änderungen der Mitteltemperaturen für Deutschland für alle drei Szenarien. In diesen Abbildungen wird noch einmal deutlich, dass im B1 Szenario (jeweils Mitte der Abbildung) die mögliche Erwärmung bis zur Mitte des Jahrhunderts und auch bis zum Ende am geringsten ausfallen könnte (Ausnahme: Februar bis 2021/2050). Außerdem fällt zur Mitte des Jahrhunderts die vergleichsweise geringe Erwärmung im Frühjahr in allen drei Szenarien auf, wobei im B1 und A2 Szenario die mittleren Temperaturen im Monat März im Vergleich zur Kontrollsimulation sogar leicht zurückgehen (Abb. 37, blaue Farben in den beiden unteren Grafiken). Hierbei muss aber auf die Skala der Temperaturänderungen hingewiesen werden, die sehr kleine Unterteilungen enthält und auch von der Skala der Temperaturänderungen zum Ende des Jahrhunderts in Abb. 40 abweicht. Erst bei den Betrachtungen der A2 und A1B Szenario Ergebnisse bis zum Ende dieses Jahrhunderts scheinen sich alle Jahreszeiten um mehr als 3°C im Deutschlandmittel zu erwärmen (Abb. 40). Eine Ausnahme bilden wiederum die Frühjahrsmonate, in denen die Erwärmung deutlich geringer ausfällt. In Abb. 40 fällt generell die möglicherweise deutlich geringere Erwärmung im B1 Szenario durch die dominante blaue Farbe heraus.

In den Ringdiagrammen der relativen Änderungen [%] der Mittelwerte der Niederschläge (Abb. 41 und Abb. 42) überwiegt der Blauton, der hier eine mögliche Zunahme der Niederschläge in der jeweils betrachteten Zeitspanne aufzeigt. Schon bis ca. 2050 wird eine Zunahme der Niederschläge in den Herbst-, Winter- und Frühjahrsmonaten berechnet. Dies setzt sich in allen Szenarien bis zum Ende des Jahrhunderts fort. Zusätzlich erscheinen in den Ergebnissen Niederschlagsabnahmen von z.T. über 30% in den Sommermonaten.

Temperatur- und Niederschlagsänderungen auf Bundeslandebene

Die folgenden Tabellen geben eine zusammenfassende Übersicht der Temperatur- und Niederschlagsänderungen bis 2021/2050 bzw. 2071/2100 relativ zur Kontrollperiode 1961-1990 für die einzelnen Bundesländer. Gemittelt für jedes Bundesland und jede Jahreszeit sind die minimale und die maximale Veränderung aus den drei Emissionsszenarien (A1B, B1 und A2) für Niederschlag und Temperatur angegeben. Zum Beispiel weist ein Szenario für den Großraum Berlin eine Niederschlagsabnahme zur Mitte des 21. Jahrhunderts (2021-2050 zu 1961-1990) im Winter von 2 % auf während ein anderes Szenario eine Niederschlagszunahme von 10 % prognostiziert.

Tabelle 4: Minimale und Maximale relative Niederschlagsänderung der drei Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2021-2050 verglichen zur KNP 1961-1990 für die Bundesländer

relative Aenderung	Niederschlag 2021-2050				
	Winter	Fruehjahr	Sommer	Herbst	Jahr
Bayern	3% / 15%	10% / 14%	-4% / 1%	0% / 17%	2% / 8%
Berlin	-2% / 10%	1% / 8%	-7% / 4%	-5% / 10%	-2% / 6%
Brandenburg	0% / 9%	3% / 8%	-9% / 7%	-3% / 10%	-3% / 7%
Bremen	1% / 14%	-2% / 3%	1% / 10%	-1% / 17%	0% / 9%
Hamburg	4% / 12%	1% / 5%	-7% / 8%	7% / 20%	4% / 8%
Hessen	-2% / 11%	7% / 9%	-5% / 8%	7% / 16%	2% / 10%
Mecklenburg Vorpommern	0% / 12%	3% / 13%	-8% / 4%	1% / 11%	-2% / 7%
Niedersachsen	1% / 12%	1% / 3%	-2% / 8%	1% / 17%	1% / 8%
Nordrhein Westfalen	0% / 11%	6% / 8%	-2% / 7%	2% / 14%	2% / 9%
Rheinland Pfalz	-2% / 12%	7% / 12%	-6% / 9%	7% / 14%	3% / 11%
Saarland	-5% / 17%	3% / 12%	-9% / 7%	-1% / 12%	-1% / 11%
Sachsen	3% / 11%	5% / 15%	-8% / 6%	1% / 16%	1% / 9%
Sachsen Anhalt	2% / 12%	6% / 9%	-3% / 9%	3% / 17%	2% / 11%
Schleswig Holstein	7% / 15%	-3% / 6%	-11% / 6%	7% / 12%	2% / 8%
Thueringen	1% / 12%	8% / 9%	-8% / 1%	5% / 18%	0% / 8%
Baden-Wuerttemberg	-3% / 16%	8% / 13%	-5% / 2%	-1% / 12%	1% / 8%

Tabelle 5: Minimale und Maximale relative Niederschlagsänderung der drei Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2071-2100 verglichen zur KNP 1961-1990 für die Bundesländer

relative Aenderung	Niederschlag 2071-2100				
	Winter	Fruehjahr	Sommer	Herbst	Jahr
Bayern	7% / 19%	12% / 26%	-23% / -12%	-2% / 11%	-2% / 6%
Berlin	10% / 13%	9% / 19%	-14% / 0%	0% / 11%	1% / 7%
Brandenburg	9% / 14%	7% / 15%	-17% / -9%	-2% / 9%	-2% / 3%
Bremen	12% / 18%	1% / 9%	-18% / -12%	3% / 18%	-1% / 4%
Hamburg	19% / 23%	5% / 14%	-13% / -11%	14% / 20%	6% / 9%
Hessen	10% / 20%	8% / 13%	-19% / -16%	2% / 15%	1% / 4%
Mecklenburg Vorpommern	17% / 18%	8% / 17%	-19% / -12%	6% / 16%	0% / 6%
Niedersachsen	11% / 19%	6% / 10%	-19% / -12%	5% / 16%	1% / 4%
Nordrhein Westfalen	7% / 19%	9% / 13%	-20% / -14%	2% / 12%	0% / 6%
Rheinland Pfalz	11% / 21%	10% / 16%	-21% / -17%	3% / 15%	2% / 4%
Saarland	11% / 20%	4% / 10%	-28% / -24%	-7% / 10%	-3% / 1%
Sachsen	8% / 15%	10% / 23%	-15% / -6%	3% / 14%	0% / 6%
Sachsen Anhalt	10% / 18%	8% / 11%	-13% / -6%	8% / 21%	3% / 6%
Schleswig Holstein	22% / 27%	7% / 15%	-18% / -13%	9% / 14%	4% / 7%
Thueringen	10% / 18%	7% / 14%	-17% / -15%	7% / 20%	1% / 4%
Baden-Wuerttemberg	8% / 20%	9% / 19%	-29% / -19%	-4% / 8%	-4% / 2%

Tabelle 6: Minimale und Maximale Temperaturänderung der drei Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2021-2050 verglichen zur KNP 1961-1990 für die Bundesländer

absolute Aenderung [°C]	Temperatur 2021-2050				
	Winter	Fruehjahr	Sommer	Herbst	Jahr
Bayern	1.1 / 1.9	-0.2 / 1.1	0.7 / 1.7	0.9 / 1.7	0.6 / 1.6
Berlin	1.0 / 1.8	-0.1 / 0.9	0.6 / 1.4	0.8 / 1.8	0.6 / 1.5
Brandenburg	1.0 / 1.9	-0.1 / 0.9	0.6 / 1.4	0.8 / 1.9	0.6 / 1.5
Bremen	0.9 / 1.8	0.0 / 0.9	0.6 / 1.4	0.6 / 1.7	0.5 / 1.4
Hamburg	0.9 / 1.8	0.0 / 1.0	0.7 / 1.4	0.6 / 1.7	0.6 / 1.5
Hessen	1.0 / 1.8	-0.2 / 0.9	0.6 / 1.7	0.7 / 1.7	0.5 / 1.5
Mecklenburg Vorpommern	0.9 / 1.8	0.0 / 1.1	0.7 / 1.4	0.8 / 1.8	0.6 / 1.5
Niedersachsen	0.9 / 1.8	-0.1 / 0.9	0.7 / 1.4	0.6 / 1.7	0.5 / 1.4
Nordrhein Westfalen	0.9 / 1.7	-0.1 / 0.9	0.7 / 1.5	0.6 / 1.7	0.5 / 1.4
Rheinland Pfalz	1.0 / 1.8	-0.1 / 1.1	0.6 / 1.7	0.7 / 1.7	0.6 / 1.6
Saarland	1.1 / 1.8	0.0 / 1.2	0.7 / 1.8	0.7 / 1.7	0.6 / 1.6
Sachsen	1.0 / 1.9	-0.2 / 0.8	0.6 / 1.4	0.8 / 1.8	0.5 / 1.5
Sachsen Anhalt	1.0 / 1.8	-0.2 / 0.9	0.6 / 1.4	0.7 / 1.8	0.5 / 1.5
Schleswig Holstein	0.8 / 1.8	0.1 / 1.1	0.7 / 1.4	0.7 / 1.7	0.6 / 1.5
Thueringen	1.0 / 1.8	-0.2 / 0.9	0.7 / 1.6	0.7 / 1.8	0.6 / 1.5
Baden-Wuerttemberg	1.1 / 1.9	-0.2 / 1.2	0.7 / 1.8	0.8 / 1.7	0.6 / 1.6

Tabelle 7: Minimale und Maximale Temperaturänderung der drei Szenarien A1B, A2 und B1 für den Zeitraum 2021-2050 verglichen zur KNP 1961-1990 für die Bundesländer

absolute Aenderung [°C]	Temperatur 2071-2100				
	Winter	Fruehjahr	Sommer	Herbst	Jahr
Bayern	2.6 / 4.2	1.3 / 2.0	2.5 / 4.0	2.6 / 3.9	2.2 / 3.5
Berlin	2.6 / 3.9	1.3 / 2.0	1.8 / 3.0	2.3 / 3.4	2.0 / 3.0
Brandenburg	2.7 / 3.9	1.3 / 2.0	1.9 / 2.9	2.4 / 3.4	2.0 / 3.1
Bremen	2.5 / 3.6	1.2 / 2.0	1.9 / 3.0	2.1 / 3.2	1.9 / 2.9
Hamburg	2.5 / 3.6	1.2 / 2.1	1.8 / 2.9	2.1 / 3.1	1.9 / 2.9
Hessen	2.5 / 3.8	1.0 / 1.8	2.4 / 3.6	2.3 / 3.6	2.1 / 3.2
Mecklenburg Vorpommern	2.6 / 3.7	1.5 / 2.2	1.9 / 2.8	2.3 / 3.2	2.0 / 3.0
Niedersachsen	2.5 / 3.6	1.2 / 1.9	1.9 / 3.0	2.1 / 3.2	1.9 / 2.9
Nordrhein Westfalen	2.3 / 3.5	1.1 / 1.8	2.2 / 3.3	2.2 / 3.4	1.9 / 3.0
Rheinland Pfalz	2.4 / 3.7	1.1 / 1.9	2.5 / 3.7	2.4 / 3.7	2.1 / 3.3
Saarland	2.4 / 3.8	1.1 / 2.0	2.7 / 4.0	2.4 / 3.9	2.2 / 3.4
Sachsen	2.7 / 4.0	1.2 / 1.8	2.1 / 3.2	2.4 / 3.6	2.1 / 3.2
Sachsen Anhalt	2.6 / 3.9	1.2 / 1.9	2.0 / 3.1	2.3 / 3.4	2.0 / 3.1
Schleswig Holstein	2.5 / 3.5	1.4 / 2.2	1.8 / 2.7	2.1 / 3.0	1.9 / 2.9
Thueringen	2.6 / 3.9	1.1 / 1.9	2.3 / 3.4	2.4 / 3.6	2.1 / 3.2
Baden-Wuerttemberg	2.5 / 4.1	1.2 / 2.0	2.7 / 4.1	2.6 / 4.0	2.2 / 3.6

Zusätzlich zu den minimalen und maximalen prognostizierten Änderungen in der Temperatur und den Niederschlägen, gemittelt auf Bundeslandebene, können auf Anfrage (remo-daten@dkrz.de) Animationen über flächige Temperatur- und Niederschlagsänderungen des A1B-Szenarios für einzelne Bundesländer zur Verfügung gestellt werden.

6.2. Räumliche Muster

Ein wesentlicher Vorteil hoch aufgelöster Klimaszenarien liegt in der besseren Darstellung regionaler Details durch Raster mit kürzeren Kantenlängen. Dies erlaubt eine detaillierte Analyse der Muster möglicher regionaler Klimaänderungen. Die vorliegenden Daten zeigen das Potential hoch aufgelöster regionaler Klimaszenarien, und beim Vergleich der räumlichen Änderungen in allen drei Simulationen werden auch orographisch dominierte Muster deutlich. Allerdings ist zu beachten, dass es ähnlich wie bei der multi-dekadischen Variabilität auch bei den räumlichen Mustern

natürliche Unsicherheiten und Schwankungen gibt, die unter anderem durch Variabilitäten in der NAO bedingt sind. Erst durch eine Vielzahl von Simulationen können die Variabilitäten quantifiziert werden. Die Analyse der Robustheit der vorliegenden räumlichen Muster ist also noch nicht abgeschlossen und wird weitere Forschungsarbeiten benötigen.

Temperaturen

In diesem Kapitel sind die horizontalen Verteilungen der Jahresmittel und der saisonalen Mittel der Temperatur für die Klimanormalperiode aus dem Kontrolllauf (Abb. 43 und Abb. 44) sowie für die Zukunftsperiode 2071-2100 für das A1B-Szenario in Abb. 45 und Abb. 46, für das B1-Szenario in Abb. 47 und Abb. 48, und für das A2-Szenario in den Abb. 49 und Abb. 50 dargestellt.

Die Jahresmitteltemperaturen, sowohl für die Klimanormalperiode als auch für den Zeitraum 2071 bis 2100, erscheinen großräumig homogen, und weisen nur wenige kleinräumige Strukturen wie z. B. in den Mittelgebirgen auf. Die berechnete Erwärmung findet im gesamten Modellgebiet statt, und ist für das B1 Szenario am schwächsten mit Jahresmitteln zwischen 9 °C und 13 °C (Abb. 47). Für das A1B und das A2 Szenario werden regionale mittlere Jahrestemperaturen von bis zu 15 °C im Südwesten, entlang des Rheingrabens und im Südosten berechnet (Abb. 45 und Abb. 49).

Die räumlichen Muster der saisonalen Mitteltemperaturen (Abb. 44, Abb. 46, Abb. 48 und Abb. 50) zeigen, dass sich das Frühjahr insbesondere an den norddeutschen Küsten am langsamsten erwärmen kann (KNP: ca. 7-9 °C gegenüber 9-11 °C in den Szenarien). Auch in den saisonalen Mitteln sind räumliche Muster entlang der deutschen Mittelgebirge zu erkennen, ebenso wie eine vergleichsweise starke Erwärmung im Oberrheingraben.

Temperaturdifferenzen 2071-2100 minus 1961-1990

In den Abb. 51 bis Abb. 55 sind die Jahresmittel und die saisonalen Mittel der Temperaturänderungen für die Zukunftsperiode 2071 bis 2100 gegenüber der KNP 1961 bis 1990 für alle drei Szenarien dargestellt. Das Signal ist in den einzelnen Jahreszeiten unterschiedlich stark ausgeprägt, mit einem Maximum im Winter (DJF)

und einem Minimum im Frühjahr (MAM), das besonders im A2 Szenario deutlich wird (Abb. 52 und Abb. 55). In den Abb. 53 und Abb. 54 der Temperaturänderungen in Sommer und Herbst zeigt sich, dass die Erwärmung im Süden des Modellgebiets mit über 4 °C bis Ende des 21. Jahrhunderts stärker ausfällt als in Norddeutschland. Dies wird besonders deutlich im A2 Szenario. Am stärksten können sich jedoch die Wintermitteltemperaturen im A1B Szenario ändern und zu einer großflächigen Erwärmung um über 4°C führen.

Niederschläge

Schon in Kapitel 6.1 wurde dargestellt, dass sich die mittleren Jahresniederschlagssummen auch zum Ende dieses Jahrhunderts nicht stark verändern. Dies wird auch in den Kartendarstellungen der mittleren Jahresniederschlagssummen deutlich (Abb. 56, Abb. 58, Abb. 60 und Abb. 62), die für alle drei Szenarien beim Vergleich der Zeitperioden 2071 bis 2100 zu 1961 bis 1990 weitgehend ähnliche Muster zeigen. Auch der Vergleich der mittleren saisonalen Niederschlagssummen in den Abb. 57, Abb. 59, Abb. 61 und Abb. 63 liefert großflächig ähnliche Ergebnisse. Interessant sind die regionalen, eher kleinräumigen Muster entlang ausgeprägter orographischer Strukturen, die zu allen Jahreszeiten auftauchen wobei höhere Niederschlagsmengen in Höhenlagen auftreten. Diese Muster erscheinen sehr robust.

Niederschlagsdifferenzen 2071-2100 minus 1961-1990

Ganz anders stellt sich die Situation im Vergleich der Niederschlagssignale dar. Abb. 64 zeigt die Flächendarstellung der mittleren prozentualen Jahresniederschlagsänderungen für die Zukunftsperiode von 2071 bis 2100 gegenüber der Klimanormalperiode von 1961 bis 1990 für alle Szenarien. Im A1B Szenario wird großflächig fast keine Veränderung der Jahresniederschläge berechnet (+/- 5%), wie die weißen Flächen zeigen. Im B1 Szenario werden für einige Regionen in Schleswig-Holstein, rund um den Harz und entlang der Elbe mögliche Zunahmen der Niederschläge zwischen 5 und 10 % errechnet. Dieses Muster erscheint im A2 Szenario noch deutlicher ausgeprägt mit prozentualen Zunahmen bis zu 20 % in Österreich und Tschechien, sowie einigen bayrischen Gebieten in Deutschland.

Die möglichen mittleren prozentualen Niederschlagsänderungen in den einzelnen Jahreszeiten werden in den Abb. 65 bis Abb. 68 gezeigt. In Herbst, Winter und Frühjahr dominieren in allen 3 Simulationen Niederschlagszunahmen, während für die Sommermonate deutliche Abnahmen berechnet werden. Hier zeigen sich auch regionale Unterschiede: die stärksten Abnahmen werden im A1B Szenario für Bayern und Baden-Württemberg mit 20 bis 30 % berechnet, kleinräumig sogar bis zu 40 %. Die restlichen Regionen könnten auch Niederschlagsrückgänge um die 20 % erfahren. Sehr ähnlich sieht das Muster der regionalen Niederschlagsänderungen im A2 Szenario aus, jedoch sind für Bayern die berechneten Abnahmen nicht so stark (< 20 %). Noch geringere sommerliche Niederschlagsabnahmen werden im B1 Szenario für Deutschland berechnet, nämlich 10 bis 20 %, mit Ausnahmen in Baden-Württemberg. Dort könnte die Niederschlagsmenge um mehr als 20 % zurückgehen. Entlang der Elbe in Sachsen und Sachsen-Anhalt werden sogar nur Niederschlagsabnahmen von unter 10 % berechnet.

Für die Herbstmonate wird eine Zunahme der mittleren Niederschlagsmengen zwischen 5 und 30 % simuliert, die im A1B Szenario recht schwach ist (5 bis 10 %) und nur die Höhenlagen der Mittelgebirge und Teile Norddeutschlands betrifft. Dieses Muster wird im A2 Szenario verstärkt. Eine Niederschlagszunahme in fast ganz Deutschland wird im B1 Szenario berechnet mit großflächigen Zunahmen zwischen 10 und 20 % und bis zu 30 % in den Mittelgebirgen.

Alle drei Szenarien zeigen deutlich höhere Niederschlagsmengen in den Wintermonaten für fast alle Regionen Deutschlands. Am stärksten fällt diese Erhöhung im A2 Szenario mit mehr als 20% in den Höhenlagen und an den Küsten und sonst mindestens 10% aus. Auch im A1B Szenario fällt an der Nordseeküste im Winter etwa 20 % mehr Niederschlag. Im B1 Szenario werden diese starken Änderungen nur für sehr kleine Regionen in Schleswig-Holstein und im Harz berechnet.

Auch die Frühjahrsmonate können feuchter sein als heute. Besonders im A2 Szenario wird eine starke Niederschlagszunahme von mehr als 20 % für Bayern berechnet.

7. Abgeleitete Größen und Extremwerte

Veränderungen des Klimas äußern sich nicht nur in Verschiebungen der mittleren Klimaparameter wie Temperatur und Niederschlag, sondern auch in vielen anderen Größen.

Zusätzlich zu der Auswertung möglicher Temperatur- und Niederschlagsänderungen, können also noch viele weitere Klimavariablen, die von REMO berechnet werden, analysiert werden. Hierzu gehören z. B. auch Windverhältnisse und Wolkenbedeckungsgrade, die hier nicht im Einzelnen aufgeführt sind. Außerdem ist es nicht nur möglich Veränderungen mittlerer Größen zu betrachten, wie in den vorangegangenen Kapitel, sondern auch Extremwerte. Die Analyse möglicher Veränderungen der Extremwerte ist sehr aufwendig und kann nach vielen verschiedenen Methoden durchgeführt werden, was über den Umfang dieses Auftrags weit hinausgeht.

Unabhängig von diesem Auftrag werden momentan tägliche Niederschlagsmengen untersucht und es wird der Frage nachgegangen, ob es einen Trend bezüglich der Stärke und Häufigkeit von extremen Ereignissen wie z. B. Starkniederschlägen gibt. Beobachtungsdaten (REGNIE Daten des DWD) sowie Validierungs- und Szenarienläufe mit dem regionalen Klimamodell REMO werden dafür analysiert. Hierfür werden verschiedene Methoden der Extremwertstatistik wie Peaks-Over-Threshold-Methoden, Markov Ketten und Monte Carlo Methoden angewendet. In dieser Studie erfolgt eine robuste Extremwertuntersuchung durch Analyse von Über-/Unterschreitungen von Schwellenwerten, wie sie auch in internationalen Projekten wie MICE und STARDEX Anwendung finden.

Im Folgenden werden exemplarisch einige Extremwerte und abgeleitete Größen aus Modellergebnissen ausgewertet.

7.1. Räumliche Muster

Anzahl der Tage mit Schneebedeckung

Wie bereits erläutert (Kapitel 6.1), ist durch das steigende Temperaturniveau im Laufe des 21. Jahrhunderts mit einer Abnahme des Schneefallanteils am Gesamtniederschlag sowie mit einem schnelleren Abschmelzen einer evtl. vorhanden Schneedecke zu rechnen. Beide Prozesse führen (unter der Annahme von sich nur geringfügig ändernden Gesamtniederschlagsmengen) zu einer Abnahme der mittleren Schneehöhe und zu einer Reduktion der Anzahl von Schneetagen. In Abb. 69 ist hierzu die räumliche Verteilung der Anzahl der Tage pro Jahr mit Schneebedeckung, d.h. Tage mit einer Schneebedeckung von mindestens 3 cm Wasseräquivalent, für den Zeitraum 1961-1990 (KNP) dargestellt. Um die 40 Schneetage pro Jahr gibt es in dieser Periode außer im Alpenraum noch im Harz, im Thüringer Wald, im Bayrischen Wald und auch im Erzgebirge. Bis zum Ende dieses Jahrhunderts kann durch die Erwärmung der Lufttemperaturen in diesen Regionen die Zahl der Schneetage pro Jahr um 20 bis mehr als 40 Tage abnehmen (Abb. 69). Die stärksten Abnahmen werden für das A1B Szenario berechnet und die schwächsten für B1, was konsistent ist mit den Erwärmungsraten in den jeweiligen Szenarien. In den flacheren Regionen Deutschlands sinkt die mittlere Anzahl der Schneetage pro Jahr durchaus auch auf Werte nahe Null. Da es aber auch in der Zukunft starke Schwankungen von Jahr zu Jahr geben kann (siehe Kapitel 5.3), können auch weiterhin einzelne schneereiche Winter auftreten.

Trockenperiodenlängen

Die räumliche Analyse hinsichtlich der Länge der längsten Trockenperioden pro Jahr, d. h. zusammenhängende Tage mit Niederschlagsmengen < 0.1 mm/Tag, zeigt eine mittlere Länge von 10 Tagen in Norddeutschland und von ca. 20 Tagen in Baden-Württemberg im Kontrollzeitraum von 1961 bis 1990 (Abb. 70; Mittel der längsten Trockenperioden pro Jahr über den 30-jährigen Auswertezeitraum).

Im A1B Szenario nimmt diese Länge nur vereinzelt in ganz Deutschland ab (Abb. 70), während für B1 und A2 in bayrischen und sächsischen Regionen eine geringe Verkürzung um 2 bis 4 Tage berechnet wird. Insgesamt werden für die mittleren Längen der längsten Trockenperioden keine wesentlichen Änderungen berechnet.

Bezüglich der Beurteilung von Änderungen der Auftrittswahrscheinlichkeit langer Trockenperioden sind allerdings detailliertere Analysen notwendig, die u. a. das gesamte Längenspektrum der simulierten Periodenlängen berücksichtigen (sowohl kurze, häufige Trockenperioden als auch selten auftretende lange Perioden). Derartige Untersuchungen sind in naher Zukunft geplant.

Nasse Tage

In Abb. 71 sind die Anzahl der nassen Tage pro Jahr in der KNP dargestellt. Nasse Tage sind hier als Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag definiert. In ganz Deutschland werden für den Zeitraum von 1961 bis 1990 ca. 5 bis 10 Tage pro Jahr berechnet. Allerdings werden diese Zahlen im Harz, im Sauerland, im Schwarzwald, in den Vogesen und im Alpenraum deutlich überschritten.

Alle drei Szenarien zeigen keine starken Veränderungen in der Anzahl der nassen Tage. Im B1 Szenario treten vereinzelt sehr kleinräumige Regionen in den Mittelgebirgen und entlang der Nordseeküste auf, für die eine leichte Zunahme um 2 Tage simuliert wird (Abb. 71). Etwas stärker (2 bis 5 Tage) und in mehr Regionen, wiederum angelehnt an das Geländere Relief, wird die Zunahmen von nassen Tagen in den Szenarien A1B und A2 berechnet (Abb. 71).

Eine zusammenfassende Darstellung der Änderung der Auftrittshäufigkeit nasser Tage in den Sommer- (JJA) und Wintermonaten (DJF) sowie im gesamten Jahr (jeweils als Modellgebietsmittel) geben die Abb. 72 und Abb. 73. Durch die integrative Betrachtung über das Modellgebiet werden lokal sowohl höhere als auch geringere Änderungen herausgemittelt (vergl. Abb. 71). Eine leichte Häufigkeitszunahme um ca. 10-20 Tage pro 30-jährigem Betrachtungszeitraum (d. h. im Schnitt weniger als ein Tag pro Jahr) ist bereits bis zur Mitte des Jahrhunderts in allen drei Szenarien feststellbar (Abb. 72). Dieser leichte Anstieg ist fast ausschliesslich auf die Wintermonate zurückzuführen. Ein etwas deutlicheres, jedoch in seiner Größenordnung immer noch recht schwaches Signal ergibt sich dann gegen Ende des 21. Jahrhunderts mit Häufigkeitszunahmen zwischen 20 und 30 Tagen pro 30-Jahres-Zeitraum (Abb. 73). Auch hier ist die Zunahme der

Auftrittshäufigkeit nasser Tage in erster Linie auf die Wintermonate zurückzuführen. Während des Sommers kommt es nur zu sehr geringfügigen Änderungen.

Diese Resultate deuten darauf hin, dass unter den Annahmen der Szenarien eine deutliche Änderung der Frequenz von extremen Niederschlagsereignissen (hier als Überschreitung von 25 mm/d) nicht zu erwarten ist. Genauere statistische Analysen unter Berücksichtigung verschiedener Niederschlagsschwellenwerte und deren Überschreitungswahrscheinlichkeiten sind hier notwendig und werden in nachfolgenden Studien durchgeführt.

Gradtagszahlen

Die Gradtagzahl (GTZ) ist nach VDI Richtlinie 2067 ein Maß für den Wärmebedarf eines Gebäudes während der Heizperiode. Die GTZ wird gemessen, sobald die Außentemperatur unter 15 °C, der so genannten Heizgrenze liegt. Sie ist die Summe aus der Differenz einer angenommenen Rauminnentemperatur von 20 °C und der jeweiligen Tagesmitteltemperatur. Als energetisch relevante Größe kann die GTZ zum Wärmebedarf von Gebäuden genutzt werden, wobei eine kleine GTZ auf einen geringen Wärmebedarf hindeutet. Abb. 74a zeigt die flächenhafte Verteilung der Gradtagszahl für die Klimanormalperiode. Ebenso wie die Temperatur sieht diese Verteilung großräumig homogen aus. Sie liegt in weiten Teilen Deutschland zwischen 3000 und 4000. Nur in den Höhenlagen der Mittelgebirge steigt sie auf Werte zwischen 4000 und 5000. In den Alpen werden jedoch noch höhere Werte von bis zu 7000 erreicht. Dies bedeutet in erster Näherung für die Gradtagszahl: je kälter die Tagesmitteltemperatur, desto größer die Gradtagszahl.

Für alle Szenarien werden zum Ende dieses Jahrhunderts negative Differenzen modelliert, d. h. durch die simulierte Erwärmung nimmt die Gradtagszahl ab: in B1 um etwa 700, in A1B und A2 um ca. 1000 im Flächenmittel. Noch stärkere Abnahmen in den Gradtagszahlen treten in der Alpenregion auf. Eine direkte Folge ist, dass der Heizbedarf durch die projizierte Erwärmung zurück gehen könnte.

7.2. Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Sommertage und der heißen Tage

Sommertage sind definiert als Tage, an denen die maximale Temperatur 25 °C und heiße Tagen an denen die maximale Temperatur 30 °C überschreitet. Die Anzahl der Sommertage bzw. heißen Tage kann als Maß für die Frequenz von Temperatur-Extremereignissen gewertet werden.

In Abb. 75 ist der zeitliche Verlauf der Sommertage pro Jahr für den Kontrolllauf und die drei verschiedenen Szenarien (A1B, B1, A2) dargestellt. Die Zeitreihen für alle Szenarien zeigen einen stark ansteigenden Trend mit starken multi-dekadischen Schwankungen. Im A1B Szenario kann sich bis Mitte des 21. Jahrhunderts die Zahl der Sommertage auf ca. 40 verdoppeln, dies wird im B1 Szenario erst für den Zeitraum 2060 bis 2080 berechnet. Zum Ende dieses Jahrhunderts werden sogar über 50 Sommertage im A1B Szenario simuliert.

Ähnlich verhalten sich die zeitlichen Verläufe der heißen Tage pro Jahr für den Kontrolllauf und die verschiedenen Szenarien (A1B, B1, A2). Im Modellgebietsmittel gibt es unter heutigen Klimabedingungen ca. 4 bis 5 heiße Tage pro Jahr (Abb. 76). Ebenso wie bei der Zahl der Sommertage nimmt die Häufigkeit der heißen Tage im A1B Szenario am stärksten zu (auf bis zu ca. 18 Tagen pro Jahr), gefolgt vom A2 Szenario. Aber auch im B1 Szenario wird bis ca. 2100 eine Verdreifachung berechnet (Abb. 76). Dies zeigt, dass in Zukunft mit einer deutlichen Zunahme der Häufigkeit von Temperatur-Extremereignissen zu rechnen ist, wobei die prozentuale Zunahme von heißen Tagen stärker ist als die von Sommertagen.

Bei der Analyse der zeitlichen Verläufe ist zu beachten, dass jeweils das Flächenmittel des Modellgebiets als 10-jähriges gleitendes Mittel dargestellt ist. Hierdurch können lokal sowohl höhere als auch geringere Änderungen in den Sommertagen und heißen Tagen auftreten.

Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Sommertage und der heißen Tage

Validierung des Kontrolllaufes mit Beobachtungsdaten sowie Darstellung abgeleiteter Größen und Extremwertindizes

In diesem Kapitel befindet sich eine tabellarische Aufstellung einiger Extremwertindizes, die für Klimafolgestudien und Risikobewertungen von besonderem Interesse sind. Exemplarisch werden die folgenden Indizes behandelt:

Index	Kurzdefinition
Abs. Temperaturmaximum	absolutes jährliches Temperaturmaximum
Sommertage	Ein Sommertag liegt dann vor, wenn die Temperatur mind. einmal am Tag 25 °C übersteigt
Heiße Tage	Beim heißen Tag steigt die Temperatur mind. einmal am Tag über 30 °C
Tropische Nächte	Bei Tropischen Nächten liegt die Temperatur immer über 20 °C.
Frosttage	Frosttage sind Tage, an denen das Minimum der Tagestemperatur kleiner gleich 0 °C war.
Eistage	Eistage sind Tage, an denen das Maximum der Tagestemperatur kleiner gleich 0 °C war.
Nasse Tage	Nasse Tage sind Tage mit mehr als 25 mm Niederschlag pro Tag
Max. 1 Tagesniederschlag/Jahr	Absolutes jährliches Maximum der Tagesniederschläge
Max. 5 Tagesniederschlag/Jahr	Absolutes jährliches Maximum der 5 Tagesniederschläge
HumIndex	Der HumIndex ist ein Maß für die gefühlte Temperatur. Hierbei wird neben der Lufttemperatur auch die Luftfeuchte berücksichtigt.
Gradtagzahl	Die GTZ ist die Summe pro Jahr aus der Differenz von 20 °C (Heiztemperatur) und der Tagesmitteltemperatur für Tage mit einer Tagesmitteltemperatur unter 15 °C.

Zunächst werden in Tabelle 8 die simulierten Extremwertindizes von REMO für den Zeitraum von 1961 bis 1990 des Kontrolllaufes mit denen im Einzugsgebiet der Elbe

Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Sommertage und der heißen Tage

beobachteten Extremwertindizes (Sommertage, heiße Tage und tropische Nächte) verglichen. Der Vergleich zeigt die Güte der Simulation einiger Extreme mit dem Klimamodell REMO. Der Vergleich zwischen Punktmessungen und gerasterten Klimasimulationsdaten erfolgte über eine bilineare Interpolation der REMO Daten auf die DWD-Stationen. Eine Höhenkorrektur wurde nicht vorgenommen, wodurch sich die Differenzen in den orographisch strukturierten Gebieten teilweise erklären.

Tabelle 8: Vergleich der REMO Ergebnisse des Kontrolllaufs von 1961-1990 gegenüber Stationsdaten des DWD im Elbeinzugsgebiet für die Extremwerte heiße Tage, Sommertage, tropische Nächte, Frost- und Eistage

	DWD - Beobachtungsdaten					REMO Kontrolllauf				
	heiße Tage	tropische Nächte	Sommer-tage	Frosttage	Eistage	heiße Tage	tropische Nächte	Sommer-tage	Frosttage	Eistage
Magdeburg	7.0	0.1	36.5	82.6	24.0	6.3	1.4	31.0	48.1	14.8
Potsdam	8.3	0.2	38.1	92.5	27.0	2.2	1.0	19.3	46.2	14.7
Berlin-Dahlem	5.6	0.2	33.1	83.3	25.3	7.8	2.1	34.3	49.8	15.9
Zendenk	6.4	0.1	35.3	95.1	26.1	2.9	0.5	20.2	52.1	16.8
Berlin-Tempelhof	6.8	1.0	34.3	80.3	25.4	8.3	2.2	34.3	49.9	16.1
Berlin-Schönefeld	7.4	0.2	38.0	96.4	26.1	4.6	1.4	27.0	49.1	15.6
Lindenberg	7.0	0.7	37.6	90.8	28.9	3.3	1.4	22.6	51.6	16.2
Muencheberg	5.7	0.3	33.3	91.2	30.9	3.7	1.2	23.5	54.5	18.6
Manschnow	5.9	0.2	35.1	91.0	29.0	4.2	1.4	24.8	51.3	16.7
Eschwege	6.0	0.0	33.8	80.2	20.4	3.1	0.6	22.0	42.7	11.7
Leinefeld	1.5	0.0	17.8	97.5	36.4	1.9	0.5	17.9	57.2	20.4
Sachsa-Bad	2.5	0.0	24.0	100.4	29.8	1.5	0.4	16.7	57.6	18.6
Grund-Bad	2.6	0.0	21.4	101.5	29.9	1.1	0.5	14.7	57.8	19.7
Braunlage	0.2	0.0	7.5	128.8	50.0	0.5	0.0	9.7	83.5	35.7
Schierke	0.1	0.1	6.9	140.3	35.8	0.4	0.0	8.6	88.5	39.9
Claustal	0.1	0.1	8.0	123.4	48.1	0.4	0.2	9.5	74.1	30.1
Brocken	0.0	0.0	0.1	170.5	99.9	0.4	0.0	9.2	78.6	34.1
Wernigerode	2.5	0.2	22.2	87.1	27.3	2.7	1.0	19.3	48.3	16.4
Gernrode	3.5	0.3	26.1	88.6	24.6	3.0	0.7	21.7	48.7	17.2
Harzgerode	1.0	0.0	15.5	112.1	36.1	2.4	0.4	19.6	56.3	21.0
Helmstedt	3.7	0.3	26.4	82.2	27.6	3.9	0.6	22.5	47.4	16.3
Harzburg-Bad	2.8	0.4	24.6	79.7	26.1	0.9	0.7	14.3	51.1	19.7
Artern	6.2	0.1	34.8	85.9	29.3	4.4	1.0	26.6	41.8	12.0
Eisleben-Helfta	8.0	0.1	40.2	87.9	21.6	3.7	0.8	24.5	47.7	16.5
Halle-Krollwitz	6.1	0.3	34.4	75.8	25.7	6.5	1.3	32.5	49.0	14.7
Lauchstaedt-Bad	7.7	0.2	39.1	83.9	23.2	5.6	1.2	30.3	47.8	14.7
Leipzig-Holzhausen	7.7	0.3	39.4	76.9	23.2	9.6	1.7	38.5	47.7	14.3
Wittenberg	8.5	0.2	40.0	88.4	26.8	5.5	1.3	29.2	48.8	14.7
Torgau	7.8	0.3	38.6	86.3	25.5	5.4	1.3	29.4	46.7	14.2
Dresden-Arpt	5.3	0.8	33.1	83.4	31.0	6.2	1.2	30.8	49.0	16.5
Doberlug-Kirchhain	6.8	0.1	37.2	93.2	26.1	5.3	1.4	28.5	49.8	15.3
Cottbus	9.4	0.5	45.4	89.0	24.4	6.6	1.7	33.1	46.9	15.0
Goerlitz	4.2	0.4	31.2	94.5	31.2	5.0	1.6	29.5	53.6	19.5
Wasserkuppe	0.0	0.0	3.0	145.4	72.7	0.6	0.1	11.0	83.1	35.2
Kaltennordheim	0.8	0.0	14.2	119.8	37.0	1.5	0.3	17.5	64.8	24.1
Erfurt	3.5	0.1	26.2	112.1	33.5	4.7	1.2	28.0	47.0	14.9
Weimar	5.9	0.0	33.0	92.5	27.7	4.7	1.2	28.0	47.0	14.9
Gera	3.6	0.0	28.5	100.4	30.7	4.1	0.8	26.8	48.9	15.8
Jena	10.4	0.0	45.8	82.3	19.8	2.2	0.5	21.1	58.9	18.6
Plauen	3.2	0.0	26.1	103.5	34.1	2.1	0.5	21.2	58.7	18.6
Fichtelberg	0.0	0.0	1.6	173.3	101.1	0.6	0.0	10.2	107.0	51.7

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass REMO die Hitzetage, Sommertage und Tropennächte für das Elbeinzugsgebiet gut simuliert, während die Anzahl der Frost- und Eistage um bis zu 50 % unterschätzt⁵ werden. Dies muss bei der

⁵ Ob die Unterschätzung der Frost- und Eistage mit der Null-Grad-Problematik zusammenhängen (siehe Kapitel 5.5) kann derzeit nicht bestimmt werden. Wir sind bei der Analyse des Problems und stellen neue Informationen auf unserer Homepage (<http://www.mpimet.mpg.de/>).

Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Sommertage und der heißen Tage

Interpretation von projizierten Häufigkeiten für Frost- und Eistage in Klimafolgestudien berücksichtigt werden.

In Tabelle 9 sind die Werte des Kontrolllaufs und die Differenzen jedes Szenarios zum Kontrolllauf für das Modellgebietsmittel für die Zeiten 1961-1990 und 2071-2100 für sechs der oben genannten Indizes aufgelistet.

Das absolute Temperaturmaximum nimmt in allen drei Simulationen zu, um 3.2 °C in B1 und sogar um 6.5 °C in A2. Die Zahl der Froststage nimmt entsprechend der allgemeinen Erwärmung ab. Der HumIndex, der die Feuchte mit berücksichtigt, zeigt in den Klimaszenarien A1B, A2 und B1 eine geringere Zunahme als bei der LuftTemperatur. Dies weist darauf hin, dass die relative Feuchte im Sommer tendenziell abnimmt. Diese Abnahme korreliert mit der Abnahme der Sommerniederschläge. Da der HumIndex als gefühlte Temperatur weniger stark zunimmt als die LuftTemperatur, könnte der Hitzestress etwas geringer ausfallen, als durch den Anstieg der 2m–Temperatur zu erwarten wäre. Zusätzlich zum HumIndex existieren noch andere Indizes, die die gefühlte Temperatur beschreiben und andere Parameter wie die Windgeschwindigkeit sowie die solare Einstrahlung berücksichtigen. Daher müsste für detailliertere Untersuchung der Hitzebelastung die zeitliche Entwicklung dieser Parameter ebenfalls berücksichtigt werden.

Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Sommertage und der heißen Tage

Die Niederschlagsindizes sind ein Maß für Starkniederschläge. Die Gebietsmittel der absoluten Häufigkeit von Ein- bzw. Fünf-Tages-Niederschlagssummen nehmen für alle möglichen Zukunftsentwicklungen zu. Generell können Indizes, die auf größte Niederschlagssummen Bezug nehmen, als Maß für die Intensität von Starkniederschlägen betrachtet werden. Durch das räumliche Mittel können lokal sowohl höhere als auch geringere Änderungen in den Niederschlagssummen auftreten.

Tabelle 9: Mittlere jährliche Kennzahlen des Kontrolllaufs (C20) für 1961-1990 und die Änderung zum Kontrolllauf (2071-2100 minus 1961-1990) für alle 3 Szenarien (Modellgebietsmittel)

	C20	A1B - C20	B1 - C20	A2 - C20
Absolutes Temperaturmaximum	36,3	4,0	3,2	6,5
Hunmindex (Sommer; JJA)	26,6	2,3	1,6	2,3
Frosttage/Jahr	45,3	-33,1	-24,9	-32,0
Gradtagszahl	3788,0	-1068,3	-727,37	-1026,6
Maximale 5-Tages-Niederschlagssumme / Jahr	73,8	5,8	4,5	5,8
Maximale 1-Tages-Niederschlagssumme / Jahr	40,1	7,7	5,6	7,0

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass REMO Temperatur-Extremwertindizes wie Sommertage und heiße Tage gut simuliert. Die Szenarien zeigen eine deutliche Zunahme sowohl der Intensität als auch der Häufigkeit, wobei prozentual die heißen Tage den stärkeren Zuwachs aufweisen. Die Simulation von Niederschlagsextremen wurde bis jetzt noch nicht systematisch mit Messdaten verglichen. Eine deutliche Änderung der absoluten Häufigkeit eines Gebietsniederschlags über 25 mm/d ist nicht zu erwarten.. Die Intensität der Starkniederschläge (maximale Eintages- oder Fünfftages-Niederschlagssumme) könnten jedoch zunehmen.

7.3. Änderung weiterer Indizes

Erste Analysen der Häufigkeitsänderung von Sturmtagen (z. B. Anzahl der Tage mit einer mittleren Windgeschwindigkeit > 10 m/s) ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen der Kontrollsimulation und den drei Klimaszenarien.

Auch bei der Betrachtung der Deutschlandmittel der Windgeschwindigkeiten in 10 m Höhe für die Klimanormalperiode, bis zur Mitte dieses Jahrhunderts (Abb. 77) und bis 2100 (Abb. 78) zeigen sich nur geringe Änderungen. Bis 2050 wird in allen drei Szenarien eine leichte Zunahme in einzelnen Monaten um bis zu 0.3 m/s berechnet. Im B1 Szenario zeigt sich eine höhere mittlere monatliche Windgeschwindigkeit für den Oktober und im A1B Lauf für den März (+ 0.3 bis 0.4 m/s). Allerdings sieht dies zum Ende des Jahrhunderts schon wieder anders aus. Bis dahin werden leichte Zunahme in den Wintermonaten und Abnahmen in einzelnen Sommermonaten berechnet, so dass sich die Jahresmittel nicht verändern.

Mögliche Änderungen der Sonnenscheindauer sind stark mit den Änderungen der Bedeckungsgrade verknüpft. Da die Sonnenscheindauer keine direkte Modellausgabegröße ist, der Bedeckungsgrad aber schon, werden seine Veränderungen untersucht. Die Abb. 79 und Abb. 80 enthalten eine schematische Darstellung der Änderungen des Deutschlandmittels. Bis 2050 wird für A2 in den meisten Monaten eine leichte Abnahme der Wolkenbedeckung von 2 bis 7 % berechnet, wohingegen im B1 Szenario sogar Monate mit einer Zunahme der Bewölkung um bis zu 5 % simuliert werden. Zum Ende des Jahrhunderts zeigen die Ergebnisse aller drei Szenarien eine Abnahme der Bewölkung in den Sommermonaten und eine mögliche Zunahme in vielen Wintermonaten, so dass es im Jahresmittel kaum zu Veränderungen kommt.

8. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des hier vorgestellten Forschungsvorhabens des Umweltbundesamtes wurden mit dem regionalen Klimamodell REMO regionale Klimaszenarien für Deutschland erarbeitet und analysiert. Zur weiteren Verwendung wurden aus den Modellausgabegrößen weitere Parameter abgeleitet (siehe Anhang REMO Datenstrom 3) und ebenso wie die Originaldaten bereitgestellt.

Während der Projektlaufzeit wurden erste Ergebnisse bereits auf zahlreichen Veranstaltungen vorgestellt und diskutiert.

Die Arbeit war in drei große Abschnitte gegliedert, deren wesentliche Merkmale hier noch einmal zusammenfassend aufgeführt werden. Abschnitt 1 stellte die Methodik zur Generierung von Klimaprojektion dar. Abschnitt 2 behandelt die Güte des REMO Modells und Abschnitt 3 die Ergebnisse der Klimaszenarien. Zusätzlich findet im Folgenden eine qualitative Diskussion einiger weiterer Klimaparameter statt, bevor abschließend ein Ausblick gegeben wird.

Heutiges Klima

Bei dem Vergleich von REMO Ergebnissen des Validierungslaufs mit Messdaten der Temperatur und des Niederschlags ergab sich Folgendes:

Die horizontalen Muster der Jahresmittel von Temperatur und Niederschlag werden von REMO in weiten Teilen des Modellgebietes zufriedenstellend berechnet. Allerdings zeigen die REMO Ergebnisse mehr regionale Details als die verwendeten Beobachtungsdatensätze. So spiegelt das Niederschlagsmuster auch kleinräumig das Geländere relief im Modellgebiet wider.

Das berechnete Jahresmittel der Temperatur entspricht im gesamten Modellgebiet etwa dem beobachteten Temperaturniveau. Auch stimmen in weiten Teilen des Modellgebietes die berechneten und gemessenen Niederschlagssummen gut überein. Allerdings berechnet REMO mehr Niederschlag entlang der Nordseeküste und der polnischen Ostseeküste.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Jahresgang der Lufttemperatur wird in REMO zufriedenstellend modelliert jedoch überschätzt REMO leicht die Sommertemperaturen.

Die berechneten Monatsmittelwerte und mittleren Jahresgänge der Gebietsmittel des Niederschlags stimmen in den drei Untersuchungsgebieten sehr gut mit den Beobachtungsdaten (CRU) überein.

Das Flächenmittel der Jahressumme des Niederschlags in Deutschland summiert über alle Höhenstufen wird insgesamt leicht unterschätzt. Insbesondere unterschätzt REMO die sommerlichen Niederschlagsmengen in sehr hochgelegenen Gebieten Mitteleuropas. Dies ist ein Phänomen, das sich generell nicht nur in REMO sondern auch in anderen regionalen Klimamodellen zeigt.

Unterschiede zwischen den Ergebnissen des REMO Validierungslaufs und Beobachtungsdatensätzen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Defizite in der Modellformulierung bzw. in der Nestungsstrategie begründet und weniger durch unrealistische Strömungsverhältnisse im Antrieb für das Regionalmodell, da in den EZMW Re-/Analysen Beobachtungen assimiliert sind. Beim Kontrolllauf dagegen, in dem das Regionalmodell mit einem globalen Klimamodell z.B. ECHAM5/MPI-OM angetrieben wird, können die Unterschiede auch durch unrealistische Strömungsverhältnisse im Antrieb hervorgerufen werden (s.u.).

Um Aussagen über die Repräsentativität des regionalen Kontrolllaufs bei der Simulation des heutigen Klimas machen zu können, wurden die im Kontrolllauf berechneten Klimatologien ebenfalls mit Messdaten verglichen. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass im Vergleich zu Beobachtungen das im Kontrolllauf berechnete Klima im Sommerhalbjahr besser übereinstimmt als im Validierungslauf. Im Winterhalbjahr dagegen ist das berechnete Klima im Kontrolllauf zu kühl. Demgegenüber stehen zu hohe sommerliche Niederschläge jedoch eine korrekte Wiedergabe der winterlichen Niederschläge im Kontrolllauf.

Zukünftiges Klima

Bis zum Jahre 2100 wurden mit REMO Simulationen für die drei Szenarien B1, A1B und A2 durchgeführt, die grob als Szenarien mit eher niedrigen, mittleren und hohen

Zusammenfassung und Ausblick

Emissionsraten von Treibhausgasen kategorisiert werden können. Die Ergebnisse dieser Klimasimulationen lassen sich auf folgende Aussagen verdichten:

Je nach angenommenem Anstieg der Treibhausgaskonzentrationen könnten bis zum Ende des Jahrhunderts die Temperaturen in Deutschland — vor allem im Süden und Südosten — um mehr als 4 °C im Vergleich zu den letzten 50 Jahren steigen. Im Sommer kann es in weiten Teilen Deutschlands weniger Niederschläge geben. Im Winter könnten im Süden und Südosten mehr Niederschläge fallen, wobei allerdings wegen der gestiegenen Temperaturen weniger Schnee fallen kann.

Die Ergebnisse im Detail:

Steigende atmosphärische Treibhausgaskonzentrationen führen in Deutschland zu einer mittleren Erwärmung, die im Jahr 2100 — abhängig von der Höhe zukünftiger Treibhausgasemissionen — zwischen 2,5 °C und 3,5 °C liegt. Diese Erwärmung wird sich saisonal und regional unterschiedlich stark ausprägen. Am stärksten dürften sich der Süden und Südosten Deutschlands im Winter erwärmen. Bis zum Jahr 2100 könnten die Winter hier um mehr als 4 °C wärmer werden als im Zeitraum 1961 bis 1990.

Gleichzeitig könnten in Zukunft — im Vergleich zum Zeitraum 1961 bis 1990 — die sommerlichen Niederschläge großflächig abnehmen. Besonders stark gehen in den Simulationen die Sommerniederschläge in Süd- und Südwest-Deutschland sowie in Nordost-Deutschland zurück. Hier könnte es bis zum Ende dieses Jahrhunderts im Vergleich zu heute ein Minus von bis zu 30 Prozent bei den Sommerniederschlägen geben. Im Gegensatz hierzu könnte im Winter ganz Deutschland feuchter werden. Vor allem in den Mittelgebirgen Süd- und Südwest-Deutschlands ist über ein Drittel mehr Niederschlag zu erwarten als heute.

Wegen gleichzeitig steigender Wintertemperaturen in den Alpen — bis zum Ende des Jahrhunderts könnten es mehr als 4 °C sein — wird der Niederschlag häufiger als Regen denn als Schnee fallen. Fiel in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts dort im Jahr etwa ein Drittel des Gesamtniederschlags als Schnee, könnte es bis Ende des 21. Jahrhunderts nur noch ein Sechstel sein. Diese Veränderungen haben zur Folge, dass sich die Zahl der Tage mit mehr als 3 cm WEQ Schneehöhe pro Jahr

Zusammenfassung und Ausblick

reduziert, und zwar stärker in niedrigen Regionen der Alpen wie um Garmisch-Partenkirchen und Mittenwald, für die eine Abnahme der Schneetage um deutlich mehr als die Hälfte möglich ist. In den höheren Regionen wie um Zermatt und St. Moritz wird jedoch nur eine Reduktion um ca. ein Drittel berechnet.

Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts könnten die schneebedeckten Flächen im Alpenraum sehr stark schrumpfen, wenn die Erwärmung stark zunimmt ($> 4\text{ °C}$). Doch schon bei einer Temperaturzunahme von 3 °C verschwinden sehr große schneebedeckte Flächen, die heute noch als schneesicher gelten (vergl. Abb. 51a und Abb. 69c).

Blickt man zum deutschen Küstenraum, so fällt auf, dass bis zum Jahr 2100 die Erwärmung der Ostseeküste mit $2,8\text{ °C}$ etwas stärker sein könnte als die der Nordseeküste ($2,5\text{ °C}$). Obwohl sich an beiden Küsten die jährliche Niederschlagsmenge nicht ändert, könnte die Tourismusbranche davon profitieren, dass es im Sommer bis zu 25 Prozent weniger regnen könnte. Im Winter gibt es jedoch bis zu 30 Prozent mehr Niederschlag.

Diese schnellen und tiefgreifenden Veränderungen des Klimas in Deutschland können gravierende Folgen für die Menschen und die Umwelt haben. Die Schadenspotentiale extremer Wetterereignisse wie Hitzewellen, Starkniederschläge und Stürme sind oftmals noch wesentlich größer als jene der schleichenden Klimaänderungen. Deswegen sind zurzeit am MPI-M detaillierte Analysen der Klimaszenarien in Arbeit, um Aussagen zur Häufigkeit und Stärke künftiger Extremereignisse machen zu können. Zu diesen gehören auch die Analysen möglicher Verschiebungen der Häufigkeitsverteilungen von Monats- oder Tagesmitteltemperaturen, Niederschlagsmengen oder Windgeschwindigkeiten.

Mit der Erstellung und der Validierung der regionalen Klimasimulationen auf einem Raster von $10\text{ km} \times 10\text{ km}$ ist es erstmalig gelungen, zeitlich und räumlich sehr hoch aufgelöste Klimaänderungsinformationen zu erzeugen und bereitzustellen.

Dies ist ein wesentlicher Meilenstein in der Klimaforschung und im Bereich der Klimafolgenforschung. Die REMO Ergebnisse eröffnen die Möglichkeit, lokale

Implikationen von Klimaänderungen zu studieren. Dazu gehören Änderungen in Verteilungsfunktionen von Klimaparametern (einschließlich Mittelwerte und Extreme). Regionale Studien zu möglichen Folgen der Klimaänderungen in unterschiedlichen Regionen haben hohen Wert für die Bewertung von Risiken und ggf. auch Chancen, wie in der Agrar- und Forstwirtschaft, dem Tourismus, der Infrastruktur und dem Wassermanagement (z. B. beim Hochwassermanagement und der Anpassung an mögliche Niedrigwasserphasen).

Allerdings ist es absolut notwendig, die berechneten regionalen Muster der Klimasignale auf ihre Robustheit zu analysieren. Schon in den vorliegenden Auswertungen wird deutlich, wie variabel die Klimasignale in den verschiedenen Regionen sind und wie unterschiedlich sie in den drei Emissionsszenarien berechnet werden. Dafür ist die strukturierte Erfassung möglicher Unsicherheiten in der gesamten Modellkette notwendig. Dies beginnt schon bei der Auswahl des Szenarios. Es ist nicht bekannt wie sich der Ausstoß der Treibhausgase und Aerosole in Zukunft entwickeln wird. Derzeit sind lediglich mehr oder weniger grobe Abschätzungen möglich.

Zusätzlich müssen mögliche Landnutzungsänderungen mit in die globalen und regionalen Klimaszenarien aufgenommen werden. Hierfür liegen bis heute nur wenige Landnutzungsszenarien vor, und sind in den meisten globalen und regionalen Klimasimulationen bisher nicht ausreichend berücksichtigt.

Regionale Klimasignale hängen auch von den globalen Klimamodellen ab, in die sie eingebettet werden. Eine umfassende Studie zum Einfluss verschiedener Randantriebe, also dem Einfluss des verwendeten globalen Klimamodells, wird zur Zeit im EU Projekt ENSEMBLES (www.ensembles-eu.org) durchgeführt. Dies wird die Erfahrungen, die im EU Projekt PRUDENCE gemacht wurden, komplettieren. Dort wurden verschiedene regionale Klimamodelle mit ein und demselben globalen Antrieb betrieben, um zu analysieren, wie stark die Schwankungsbreite ist, die durch die Verwendung verschiedener regionaler Klimamodelle entsteht (PRUDENCE, special issue, 2007).

Zusammenfassung und Ausblick

Letztlich sind die Simulationsergebnisse der Modellketten auch durch die natürliche Variabilität beeinflusst. Um abzuschätzen wie groß die natürliche Variabilität in einzelnen, möglicherweise sehr kleinen Regionen ist, müssen viele vergleichbare Simulationen durchgeführt werden. Dies gilt sowohl für die Kontrollläufe als auch für Klimaszenarien. Nur dann ist es möglich herauszufiltern, ob eventuell in einzelnen Regionen das Klimasignal von der natürlichen Variabilität maskiert wird.

In der Zukunft müssen alle diese Faktoren zusammen erfasst werden, um dann stärker abgesicherte Aussagen über mögliche Entwicklungskorridore einzelner Klimaparameter anzugeben und um zu beurteilen, mit welchen Wahrscheinlichkeiten mögliche Veränderungen verknüpft sind.

Danksagung

Danksagung

Wir bedanken uns für die viele Unterstützung bei der Erstellung des Berichts bei Katharina Bülow, Constantin Gerster, Marcel Gördel, Stefan Hagemann, Katharina Klehmet, Lennart Marien, Susanne Pfeifer, Lorenzo Tomassini sowie beim Deutschen Klimarechenzentrum für die zur Verfügung gestellte Rechenzeit.

Literaturverzeichnis

- Asselin, R. (1972): Frequency filter for time integrations. *Monthly Weather Review*, 100, 487-490.
- Climate Change (2007): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Frei C., J.H. Christensen, M. Deque, D. Jacob, R.G. Jones, P.L. Vidale (2003): Daily precipitation statistics in regional climate models: Evaluation and intercomparison for the European Alps, *J. Geophys. Res.* 108 (D3), 4124, doi:10.1029/2002JD002287.
- Fuchs, T., U. Schneider, B. Rudolf (2007): Global Precipitation Analysis Products of the GPCC. Global Precipitation Climatology Centre (GPCC), DWD, Internet publication, 1-10.
- Gibson, J. K., P. Kallberg, S. Uppala, A. Noumura, A. Hernandez, E. Serrano (1997): ERA Description. *ECMWF Re-Analysis Project Report Series*, 1. ECMWF, Reading, UK, 77 pp.
- Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, D. Xiaosu (2001): Climate Change (2001): The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Governmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press
- Huffman, G.J., R.F. Adler, A. Arkin, A. Chang, R. Ferraro, A. Gruber, J. Janowiak, R.J. Joyce, A. McNab, B. Rudolf, U. Schneider, P. Xie (1997): The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) combined precipitation data set, *Bulletin Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 5–20
- Jacob, D. und R. Podzun (1997): Sensitivity studies with the regional climate model REMO, *Meteorological Atmospheric Physics*, 63, 119-129.
- Jacob, D. (2001): A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin, *Meteorological Atmospheric Physics*, 77, 61-73.

- Jacob, D., B. van den Hurk, U. Andr  , G. Elgered, C. Fortelius, L.P. Graham, S.D. Jackson, U. Karstens, C. Koepken, R. Lindau, R. Podzun, B. Roeckel, F. Rubel, B.H. Sass, R.N.B. Smith, X. Yang (2001) : A comprehensive model intercomparison study investigating the water budget during the BALTEX PIDCAP period, *Meteorological Atmospheric Physics*, 77, 19-43.
- Jacob, D., L. B  rring, O.B. Christensen, J.H. Christensen, S. Hagemann, M. Hirschi, E. Kjellstr  m, G. Lenderink, B. Rockel, C. Sch  r, S.I. Seneviratne, S. Somot, A. van Ulden, B. van den Hurk (2007): An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance, PRUDENCE Special Issue, *Climatic Change*, Vol.81, Supplement 1, May 2007
- Jungclaus, J. H., M. Botzet, H. Haak, N. Keenlyside, J.-J. Luo, M. Latif, J. Marotzke, U. Mikolajewicz, E. Roeckner (2006): Ocean circulation and tropical variability in the coupled model ECHAM5/MPI-OM, *Journal of Climate*, 19, 3952-3972
- Majewski, D. (1991): The Europa-Modell of the Deutscher Wetterdienst. *ECMWF Seminar on Numerical Methods in Atmospheric Models*, 2, 147-191.
- Majewski, D., G. Doms, W. Edelmann, M. Gertz, T. Hanisch, E. Heise, A. Link, P. Prohl, U. Schaettler, B. Ritter (1995): Dokumentation des EM/DM-Systems. Abteilung Forschung, Deutscher Wetterdienst, Offenbach.
- Marsland, S.J., H. Haak, J.H. Jungclaus, M. Latif und F. R  ske (2003): The Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates, *Ocean Modelling*, 5, 91-127.
- Mitchell, T. D., T. R. Carter, P. D. Jones, M. Hulme, M. New (submitted): A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). *Journal of Climate*.
- Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenhann, J., Gaffin, S., Gregory, K., Gr  bler, A., Jung, T.Y., Kram, T., La Rovere, E.L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Raihi, K., Roehrl, A., Rogner, H.-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Smith, S., Swart, R., van Rooijen, S., Victor, N., and Dadi, Z. (2000):, IPCC Special Report on

- Emissions Scenarios, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Richter, K.-G. (2005): Validierung der Niederschlagssimulation des Klimamodells MPI-REMO, Erläuterungsbericht, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Karlsruhe
- Roeckner, E., K. Arpe, L. Bengtsson, M. Christoph, M. Claussen, L. Duemenil, M. Esch, M. Giorgetta, U. Schlese, U. Schulzweida (1996): The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate, Report Nr. 218, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg
- Roeckner, E., G. Bäuml, L. Bonaventura, R. Brokopf, M. Esch, M. Giorgetta, S. Hagemann, I. Kirchner, L. Kornblueh, E. Manzini, A. Rhodin, U. Schlese, U. Schulzweida, A. Tompkins (2003): The atmospheric general circulation model ECHAM5: Part I: Model description. Report Nr. 349, Max Planck Institut für Meteorology, Hamburg, 127pp.
- Roeckner, E., G.P. Brasseur, M. Giorgetta, D. Jacob, J. Jungclaus, C. Reick, J. Sillmann (2006): Klimaprojektionen für das 21. Jahrhundert, Max-Planck-Institut für Meteorologie, 28pp.
- Schwarb, M. (2000): The Alpine Precipitation Climate - Evaluation of a high-resolution analysis scheme using comprehensive rain-gauge data. Dissertation, Schweizer Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich.
- Schwarb, M., C. Daly, C. Frei and C. Schär (2001): Mean annual and seasonal precipitation throughout the European Alps 1971-1990, *Hydrologischer Atlas der Schweiz*, Blätter 2.6 and 2.7.
- Sevruk, B. (1982): Methods of correction for systematic error in point precipitation measurement for operational use, *Oper. Hydrol. Rep.* 21 Publ. 589, 91 pp.
- Uppala, S. M., P. W. Kallberg, A. J. Simmons, U. Andrae, V. da Costa Bechtold, M. Fiorino, J. K. Gibson, J. Haseler, A. Hernandez, G. A. Kelly, X. Li, K. Onogi, S. Saarinen, N. Sokka, R. P. Allan, E. Andersson, K. Arpe, M. A. Balmaseda, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, S. Caires, F. Chevallier, A. Dethof, M. Dragosavac, M. Fisher, M. Fuentes, S. Hagemann, E. Holm, B. J. Hoskins, L. Isaksen, P. A. E. M. Janssen, R. Jenne, A. P.

McNally, J.-F. Mahfouf, J.-J. Morcrette, N. A. Rayner, R. W. Saunders, P. Simon, A. Sterl, K. E. Trenberth, A. Untch, D. Vasiljevic, P. Viterbo and J. Woollen (2005): The ERA-40 re-analysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131, 2961-3012.

Anhang

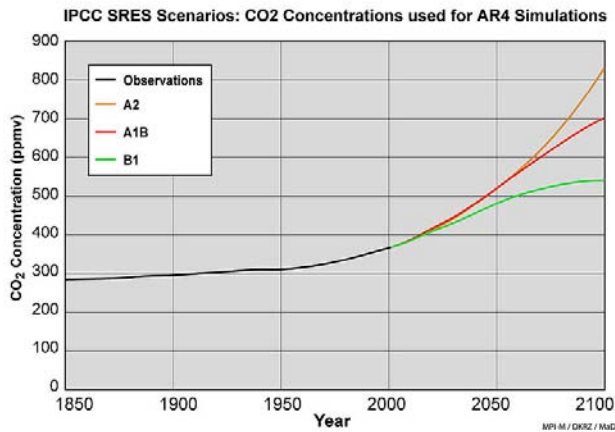


Abb. 1: Zeitliche Entwicklung der CO₂ Konzentrationen gemäß Beobachtungen (1850-2000) sowie in den IPCC Szenarien A2, A1B und B1.

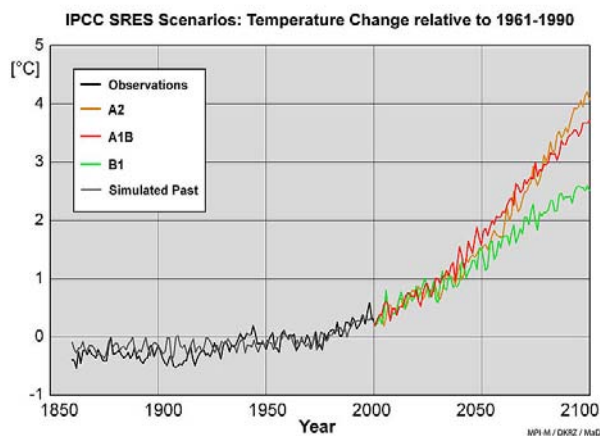


Abb. 2: Zeitliche Entwicklung der global und jährlich gemittelten Temperaturänderungen in Erdbodennähe gegenüber dem Mittelwert der Jahre 1961-1990. Im Zeitraum 1860-2000 sind die natürlichen Antriebsfunktionen (wie z. B. Vulkanismus, Änderungen der Sonneneinstrahlung) nicht berücksichtigt worden. Dargestellt ist das Ensemblemittel aus 3 Realisierungen mit ECHAM5/MPI-OM.

Repräsentation der Gitterbox

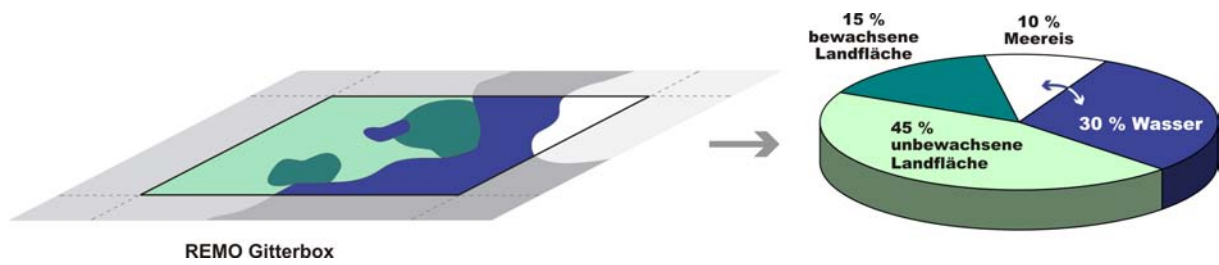


Abb. 3: Konzept der fraktionellen Oberflächenbedeckung in REMO (Beispiel für eine Gitterbox mit 30% Wasseranteil, 10% Meereisanteil, 45% unbewachsener Landfläche und 15% bewachsener Landfläche).

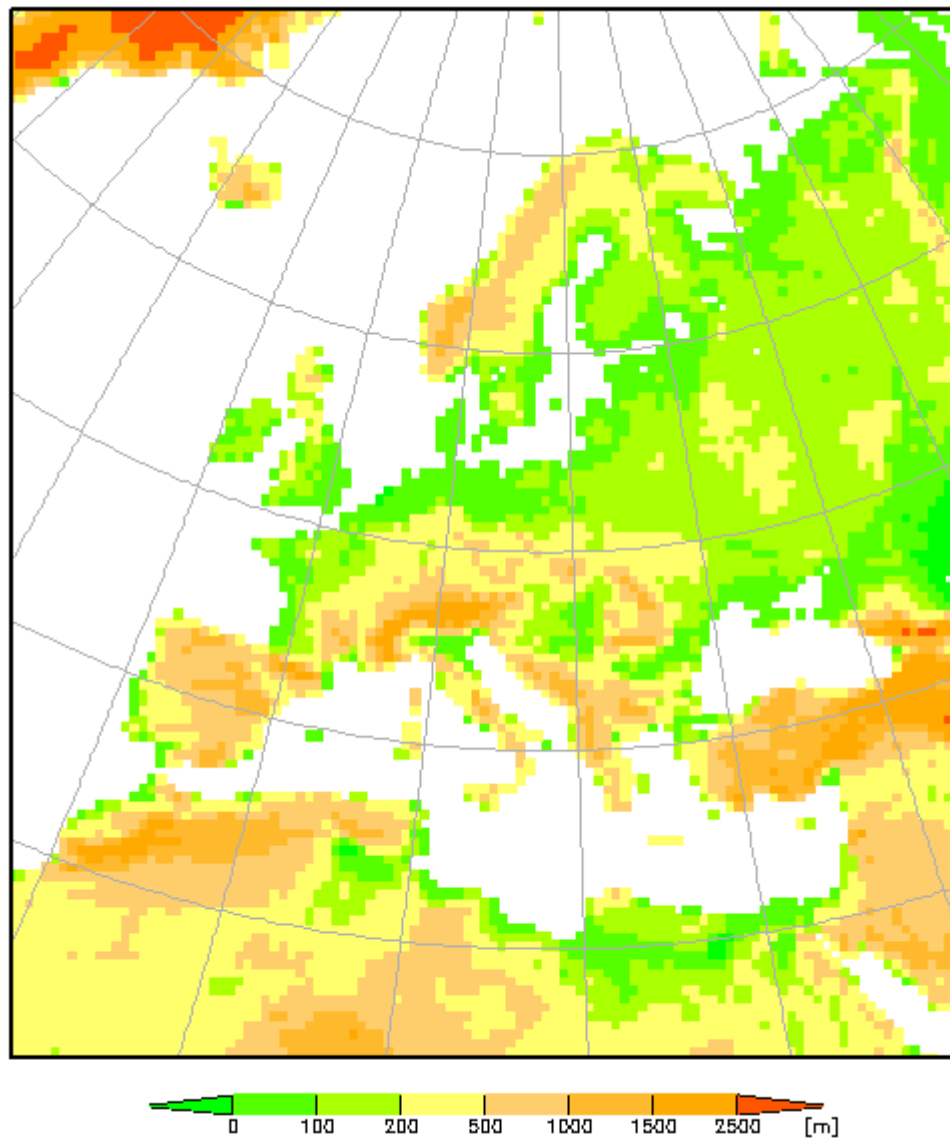


Abb. 4: Modellgebiet, das in der ersten Stufe des Doppelnestungsverfahrens genutzt worden ist (0.44° , ~ 50 km), mit eingezeichneter Topographie [m].

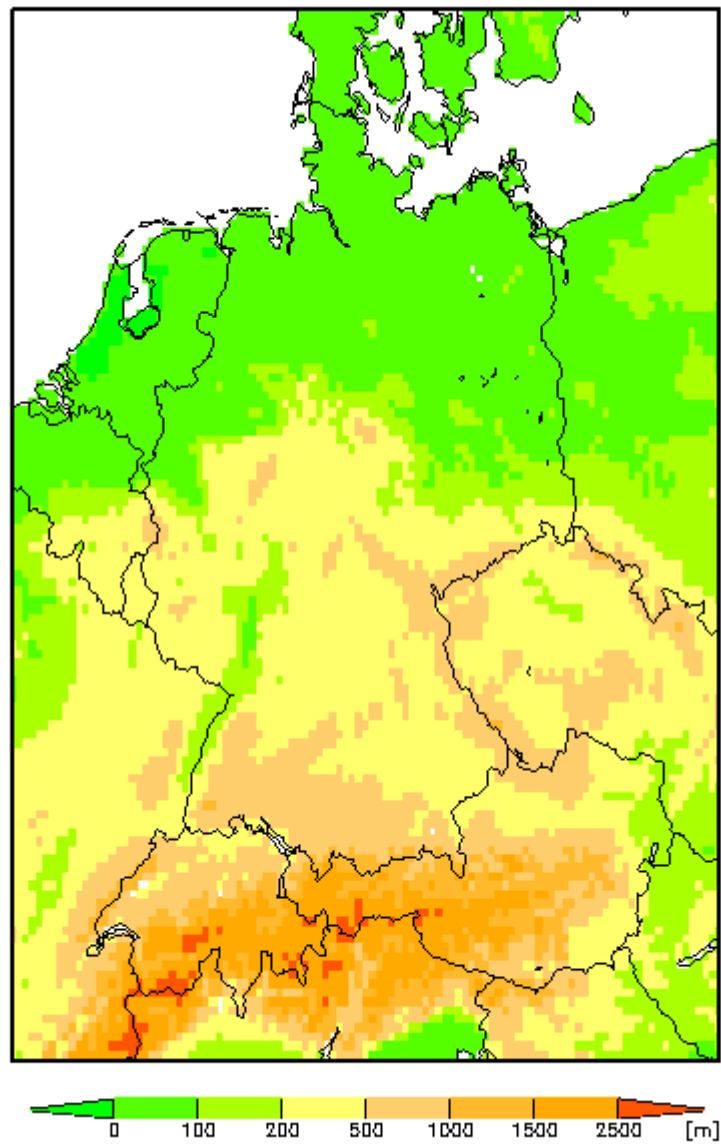


Abb. 5: Modellgebiet der zweiten Stufe des Doppelnestungsverfahrens (0.088° , ~ 10 km) mit eingezeichneter Topographie [m].

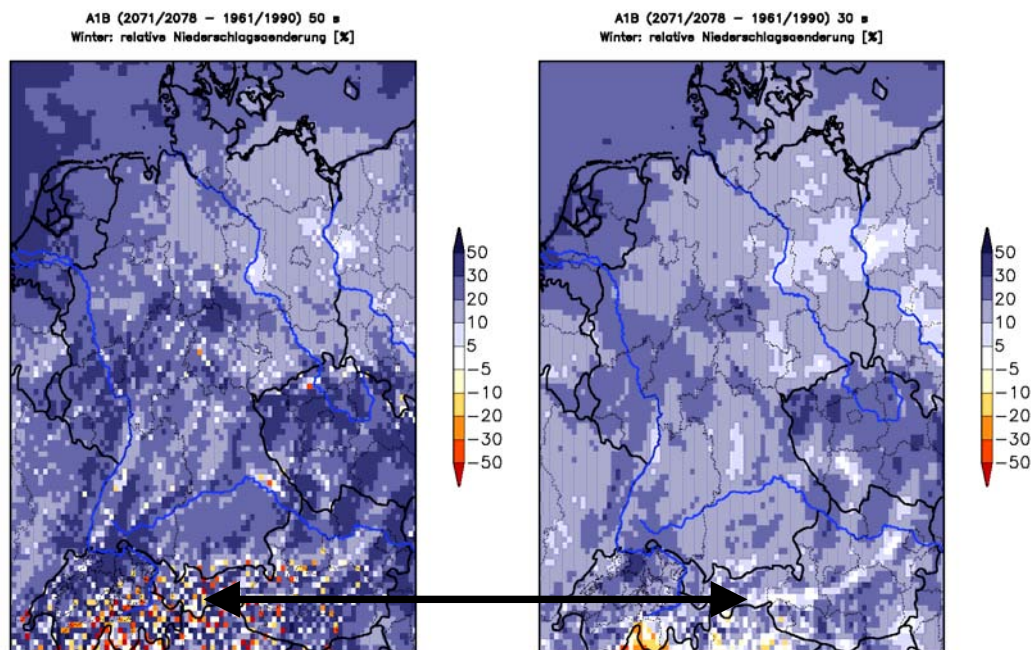


Abb. 6: Relatives Niederschlagsänderungssignal [%] des Zeitraums 2071-2078 in Bezug auf den Referenzzeitraum 1961-1990: links REMO Simulation mit einem Zeitschritt von 50 s für 2071-2078, rechts mit einem Zeitschritt von 30 s. Der Referenzzeitraum (1961-1990) wurde jeweils mit einem Zeitschritt von 30 s gerechnet.

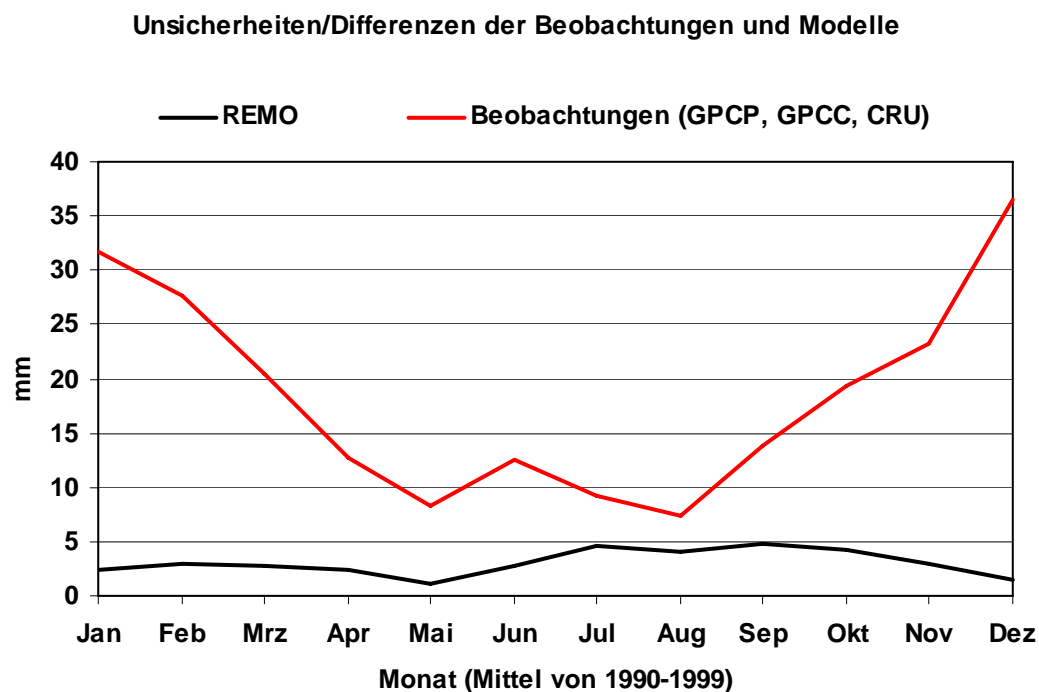


Abb. 7: Differenzen [mm/Monat] des Gebietsmittels des Gesamtniederschlages für Deutschland zwischen den zwei REMO Rechnungen mit unterschiedlichen Zeitschritten (schwarze Linie); max. Differenzen der Beobachtungsklimatologien GPCP, GPCC und CRU (rot).

Rhein

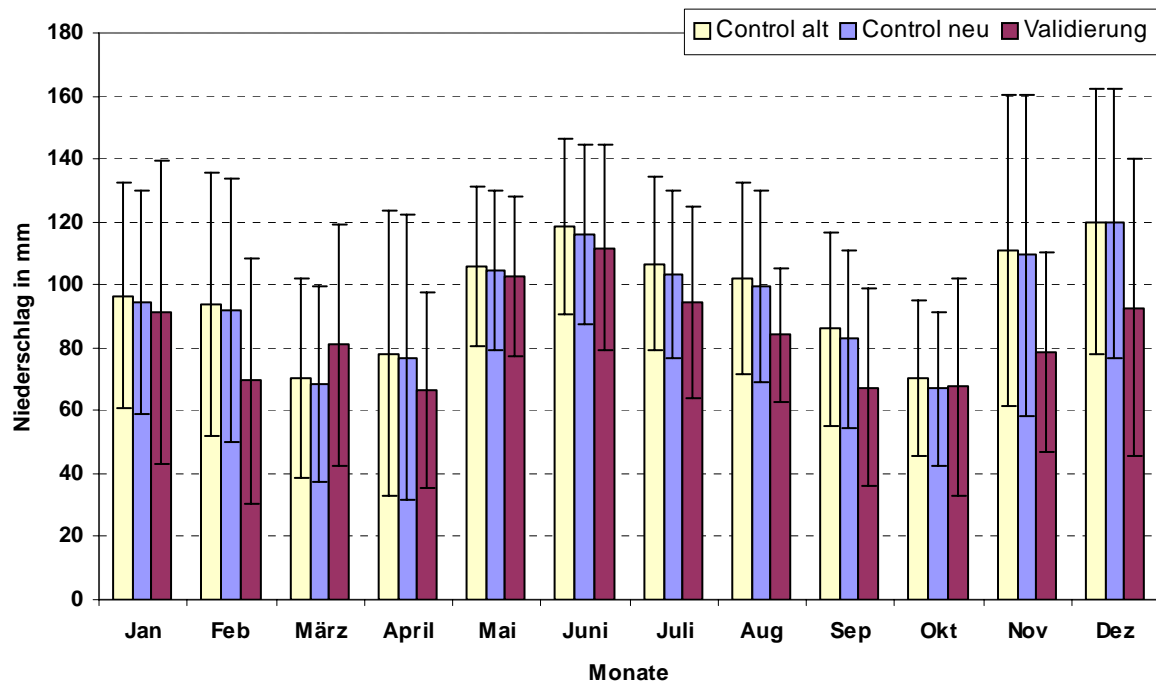


Abb. 8: Mittlerer monatlicher Gesamtniederschlag im Rheineinzugsgebiet [mm/Monat] für den inkonsistenten Kontrolllauf (gelb), den konsistenten mit 30 s-Zeitschritt durchgeführten Kontrolllauf (blau), sowie für den Validierungslauf (rot).

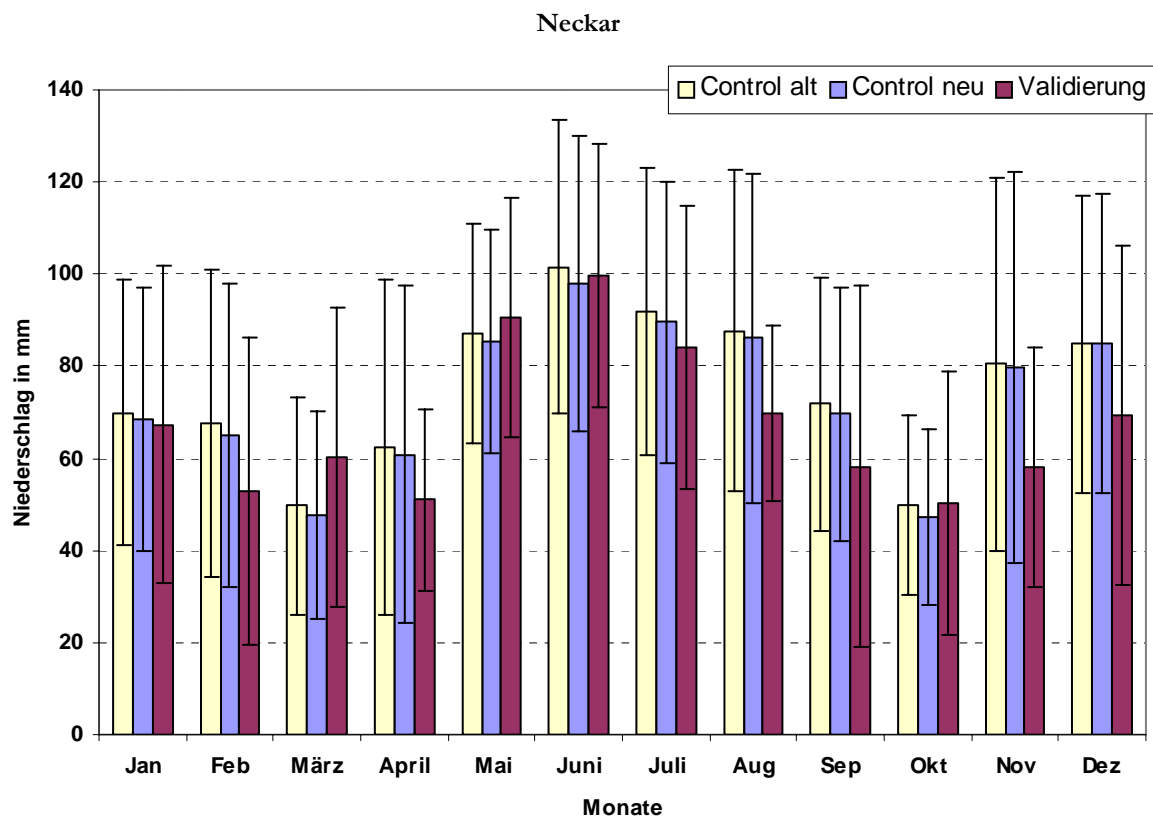


Abb. 9: Wie Abb. 8, aber für das Neckareinzugsgebiet

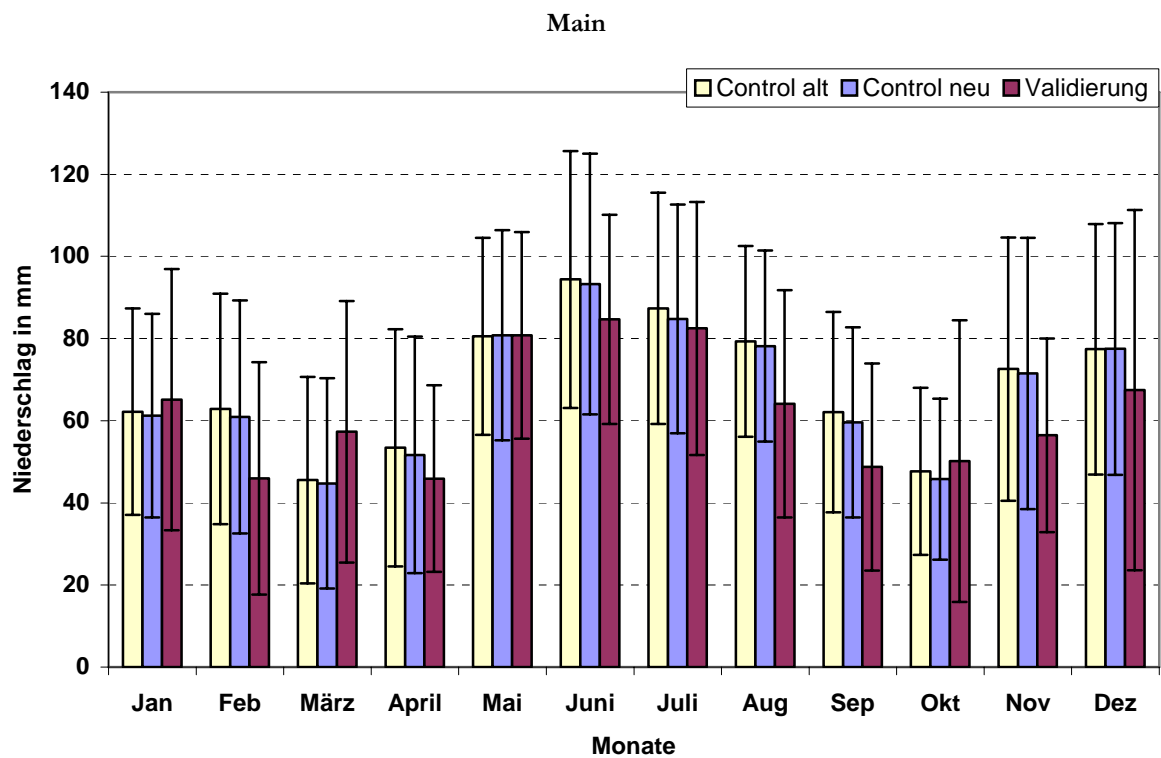


Abb. 10: Wie Abb. 8, aber für das Main Einzugsgebiet

Zeitschrittabhängigkeit

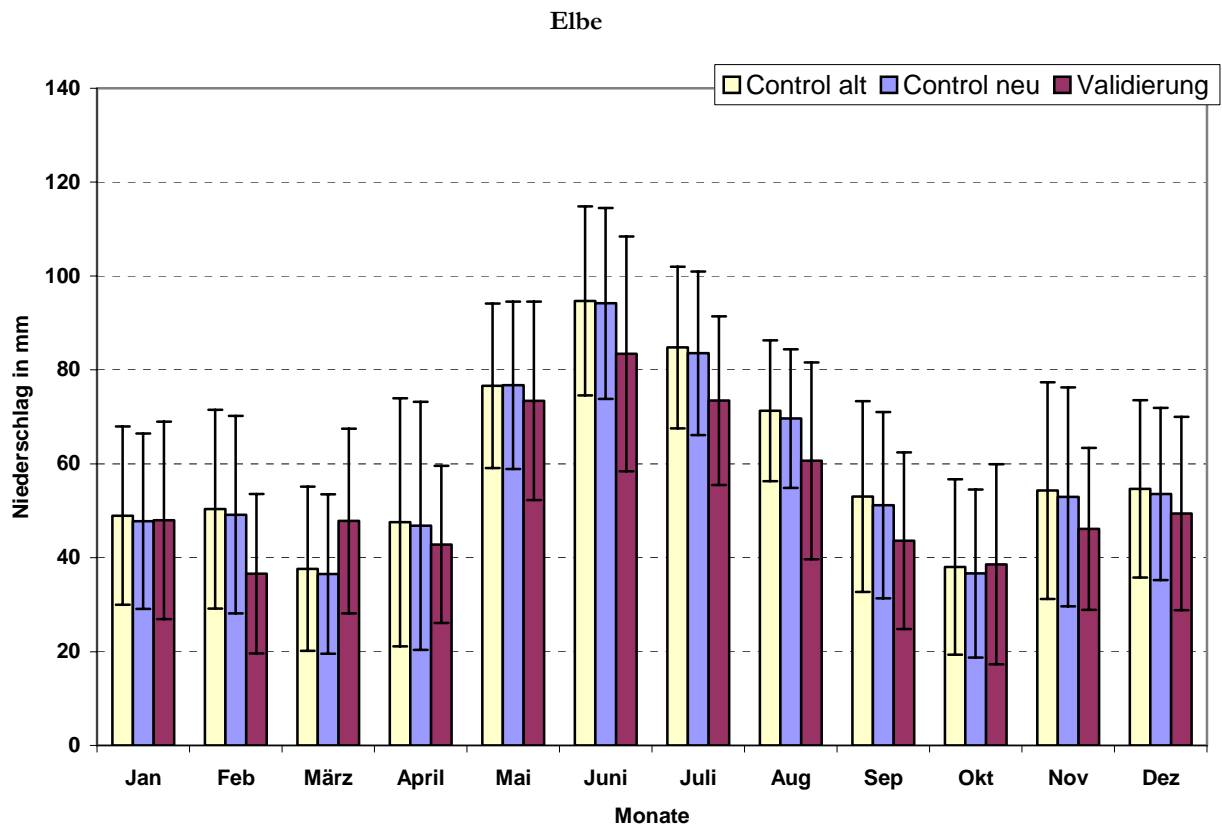


Abb. 11: Wie Abb. 8, aber für das Elbeinzugsgebiet

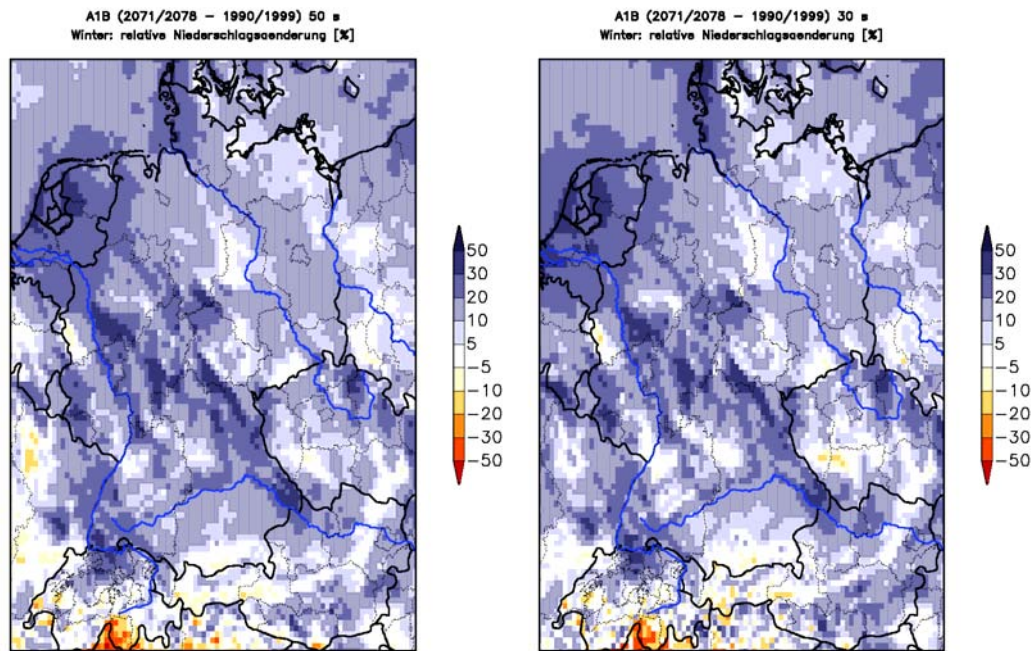


Abb. 12: Klimasignal. Relative Niederschlagsänderung [%] im Winter (DJF) für den 8 Jahreszeitraum 2071-2078 zu 1990-1999: links Simulationen mit einem Zeitschritt von 50 s für beide Zeiträume, rechts mit einem Zeitschritt von 30 s für beide Zeiträume.

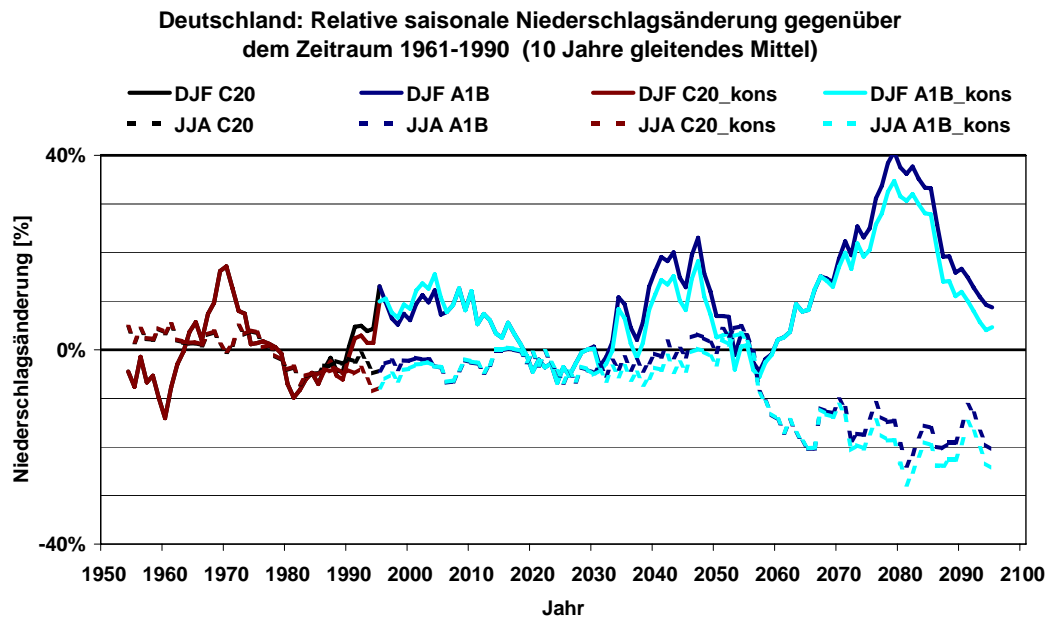


Abb. 13: Zeitlicher Verlauf des relativen saisonalen Niederschlagsänderungssignals [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf den Referenzzeitraum 1961-1990 für Winter (DJF; durchgezogene Linien) und Sommer (JJA; gestrichelte Linien). Dargestellt sind die inkonsistenten Rechnungen mit teilweise 50 s-Zeitschritt (schwarz für den Kontrolllauf bzw. dunkelblau für das A1B-Szenario), sowie die konsistenten Rechnungen mit durchgängigem 30 s-Zeitschritt (braun für den Kontrolllauf bzw. hellblau für das A1B-Szenario).

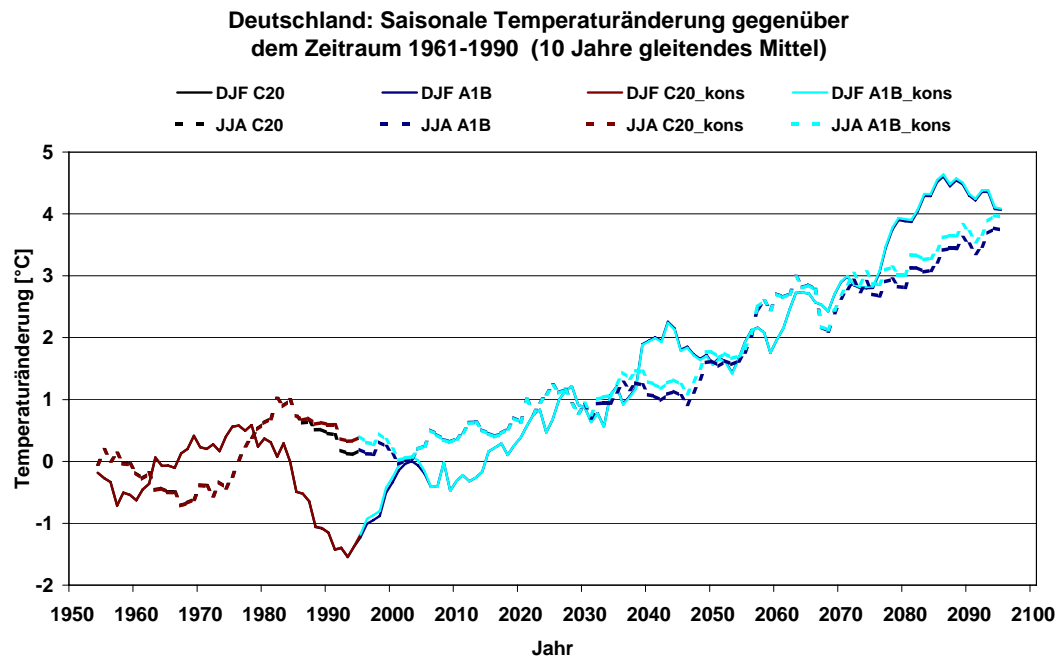
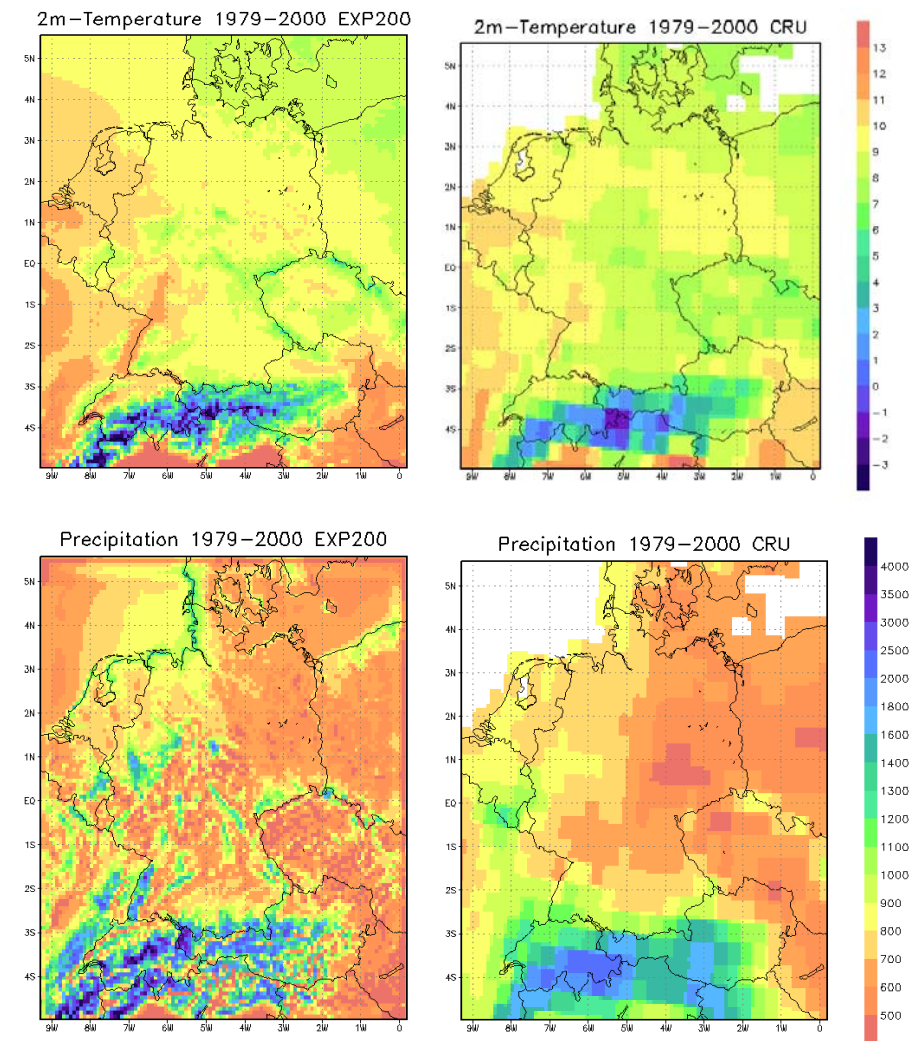


Abb. 14: Zeitlicher Verlauf des saisonalen 2m-Temperaturänderungssignals [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf den Referenzzeitraum 1961-1990 für Winter (DJF; durchgezogene Linien) und Sommer (JJA; gestrichelte Linien). Dargestellt sind die inkonsistenten Rechnungen mit teilweise 50 s-Zeitschritt (schwarz für den Kontrolllauf bzw. dunkelblau für das A1B-Szenario), sowie die konsistenten Rechnungen mit durchgängigem 30 s-Zeitschritt (braun für den Kontrolllauf bzw. hellblau für das A1B-Szenario).



ETH 1971-1990

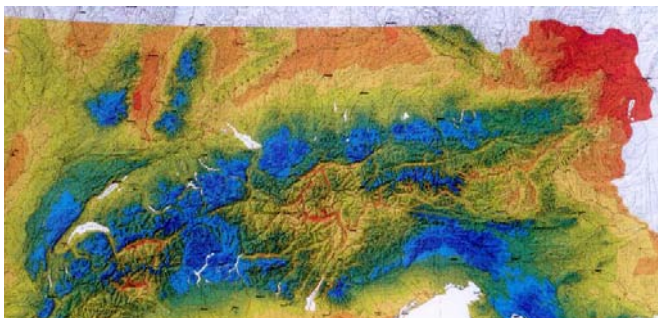


Abb. 15: Jahresmittel der 2-Meter Temperatur [°C] (oben) und der mittleren jährlichen Niederschlagssumme[mm] (mitte) simuliert von REMO (links) bzw. beobachtet (CRU-Datensatz; rechts) für den Zeitraum 1979-2000. Unten ist ferner eine hochaufgelöste Klimatologie von jährlichen Niederschlagssummen im Alpenraum für die Jahre 1971-1990 gezeigt (Quelle: Schwarb et al., 2001).

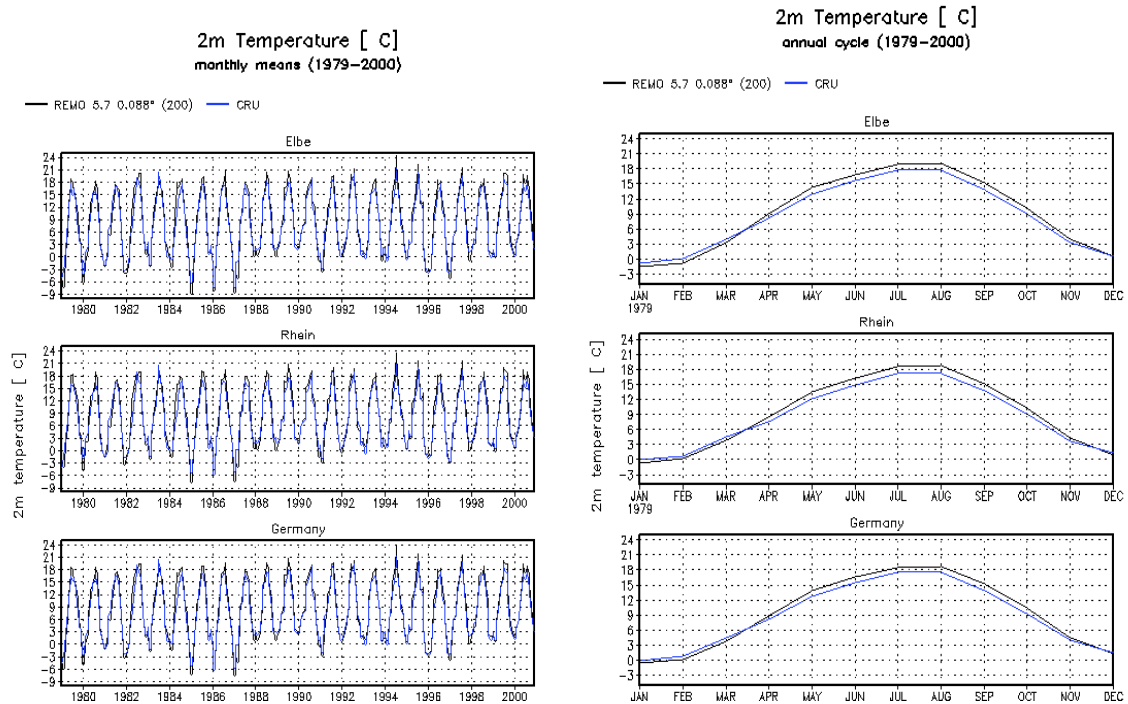


Abb. 16: Monatsmittelwerte (links) sowie mittlerer Jahresgang (rechts) von Gebietsmitteln der 2m-Temperatur [°C] für den Zeitraum 1979-2000. Dargestellt sind jeweils die Gebietsmittel des Einzugsgebietes der Elbe (oben), des Einzugsgebietes des Rheins (mitte) sowie von Deutschland (unten).

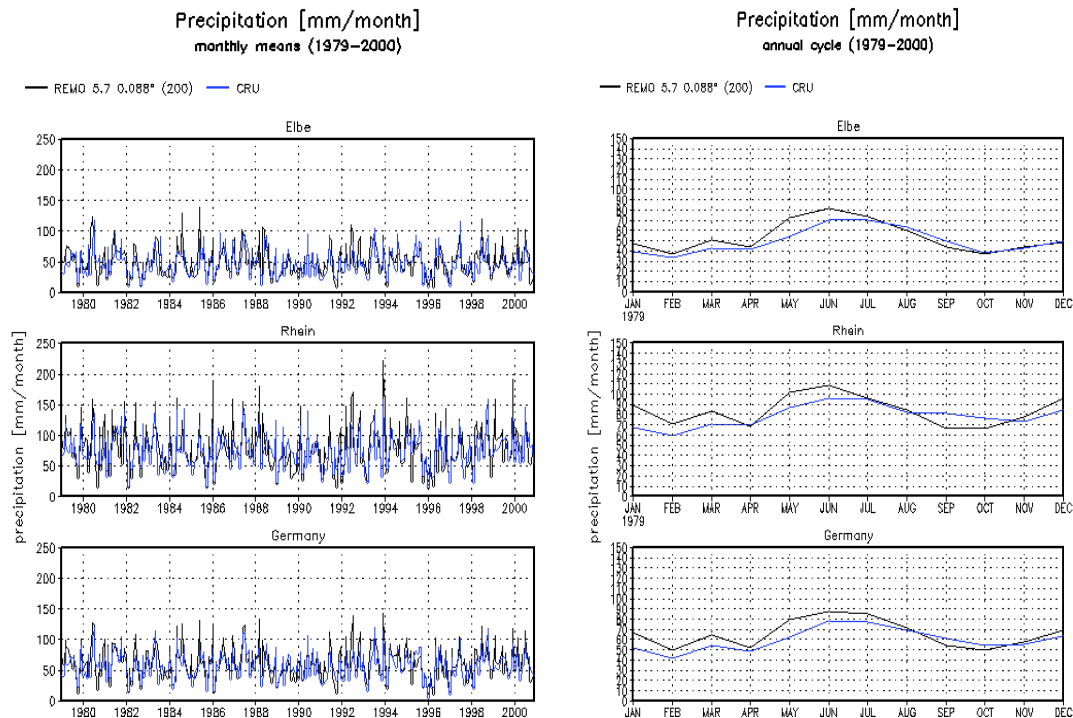


Abb. 17: Monatsmittelwerte (links) sowie mittlerer Jahresgang (rechts) von Gebietsmitteln des Gesamtniederschlags [mm/Monat] für den Zeitraum 1979-2000. Dargestellt sind jeweils die Gebietsmittel des Einzugsgebietes der Elbe (oben), des Einzugsgebietes des Rheins (mitte) sowie von Deutschland (unten).

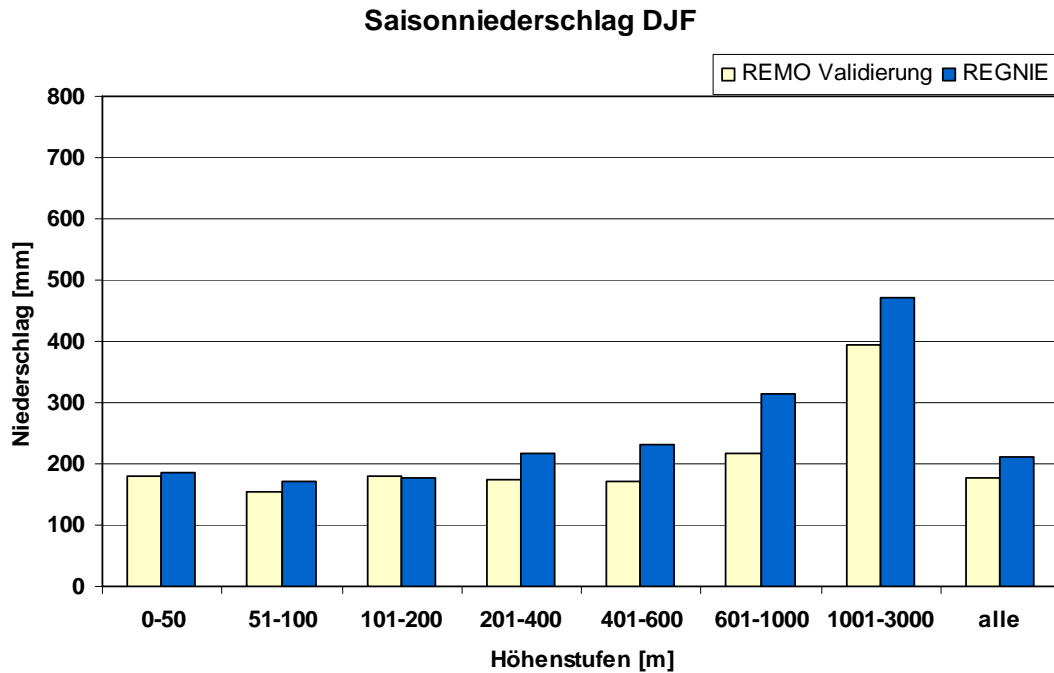


Abb. 18: Saisonales Flächenmittel von 1980-2000 (Winter, DJF) des Gesamtniederschlages [mm/Saison] für Deutschland aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen aus dem Validierungslauf (blau) im Vergleich zu Beobachtungen vom DWD (REGNIE Datensatz)

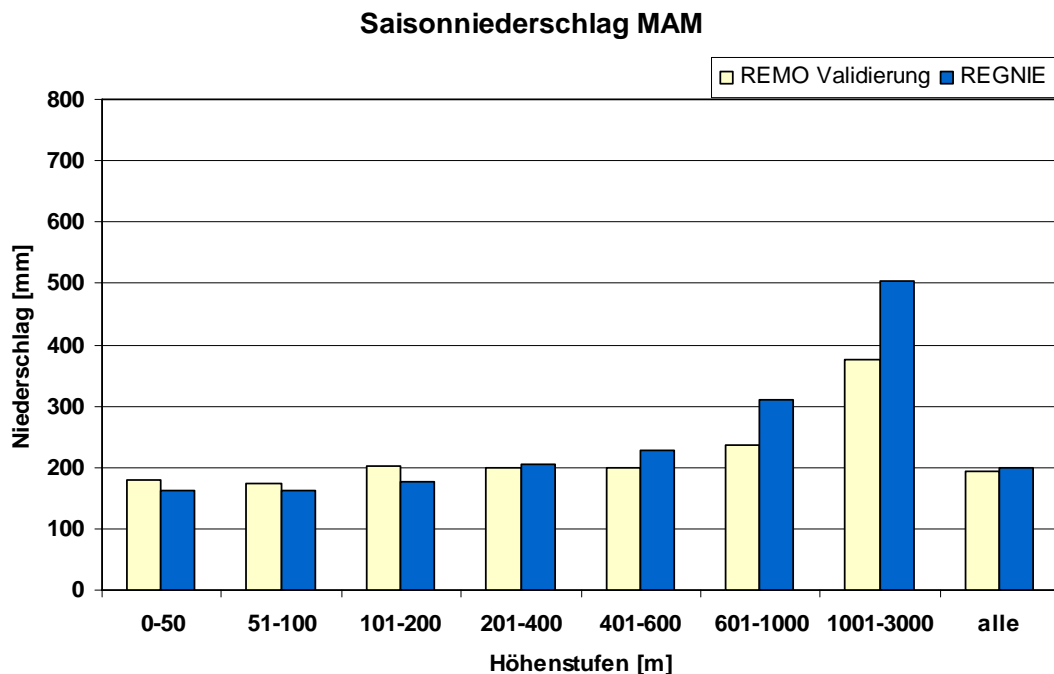


Abb. 19: Saisonales Flächenmittel von 1980-2000 (Frühjahr, MAM) des Gesamtniederschlages für Deutschland [mm/Saison] aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen aus dem Validierungslauf (blau) im Vergleich zu Beobachtungen vom DWD (REGNIE Datensatz)

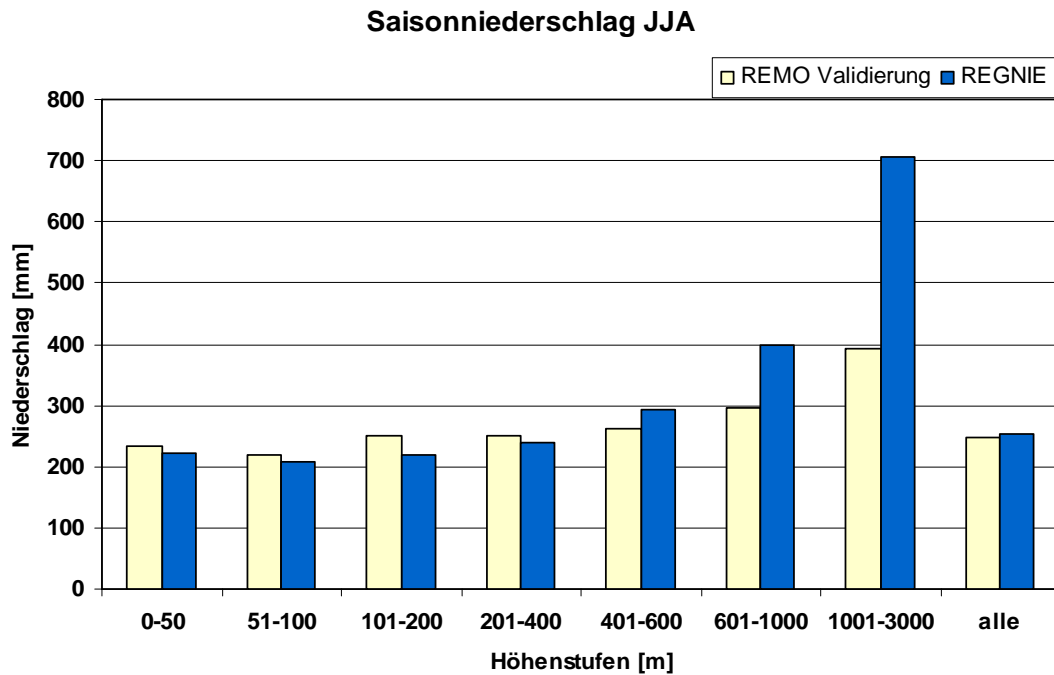


Abb. 20: Saisonales Flächenmittel von 1980-2000 (Sommer, JJA) des Gesamtniederschlages [mm/Saison] für Deutschland aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen aus dem Validierungslauf (blau) im Vergleich zu Beobachtungen vom DWD (REGNIE Datensatz)

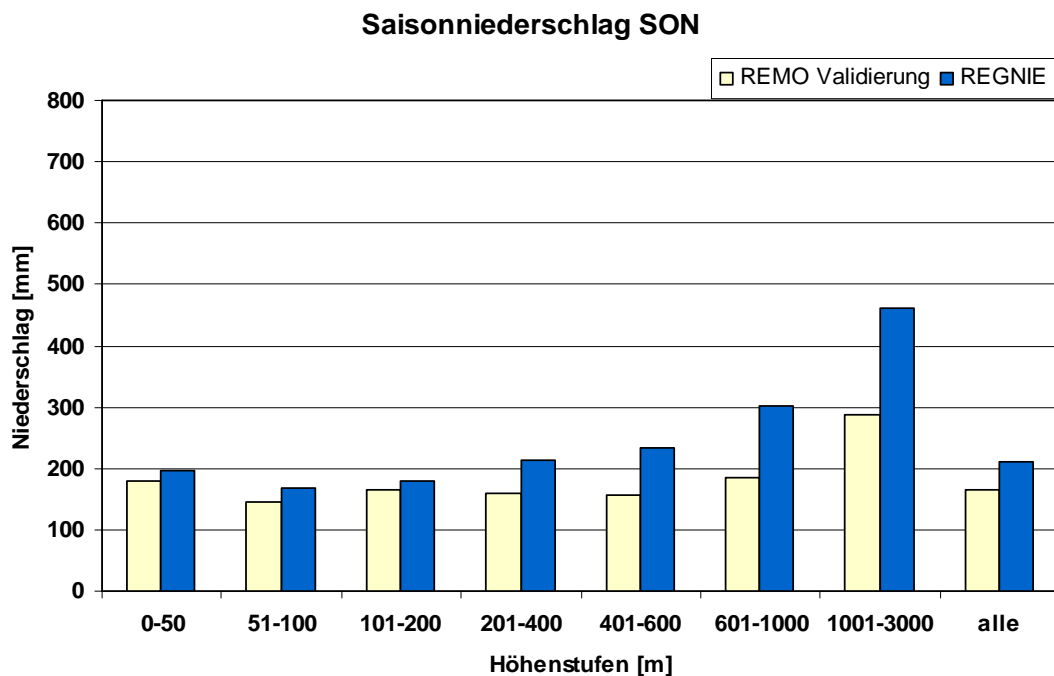


Abb. 21: Saisonales Flächenmittel von 1980-2000 (Herbst, SON) des Gesamtniederschlages [mm/Saison] für Deutschland aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen aus dem Validierungslauf (blau) im Vergleich zu Beobachtungen vom DWD (REGNIE Datensatz)

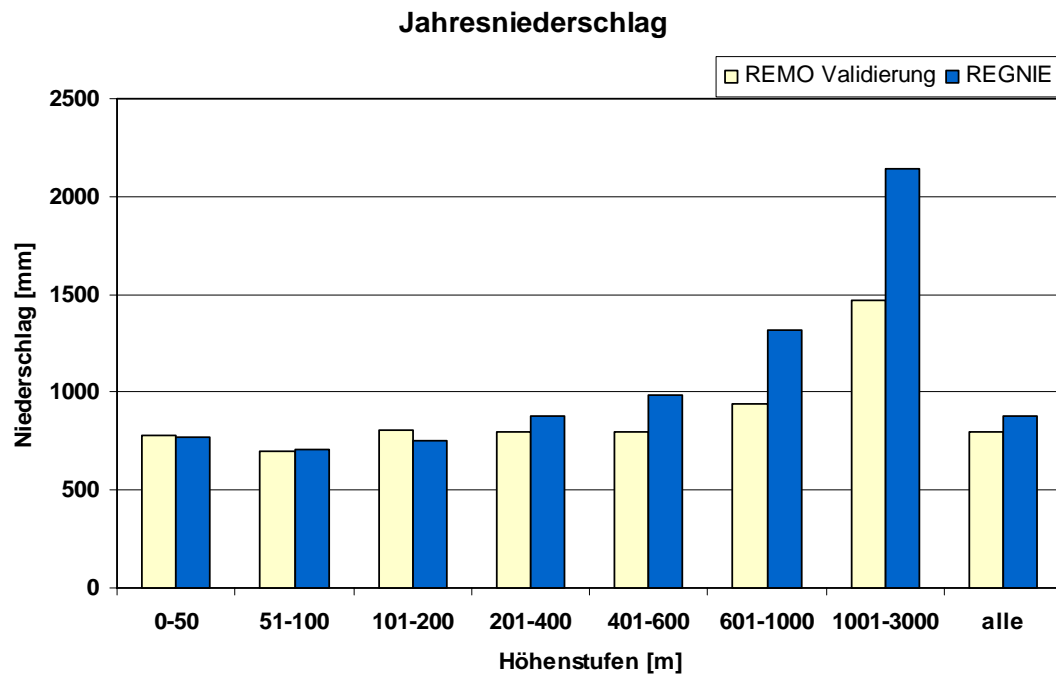


Abb. 22: Flächenmittel des Jahresgesamtniederschlages von 1980-2000 [mm/Jahr] für Deutschland aufgeteilt auf verschiedene Höhenstufen aus dem Validierungslauf (blau) im Vergleich zu Beobachtungen vom DWD (REGNIE Datensatz)

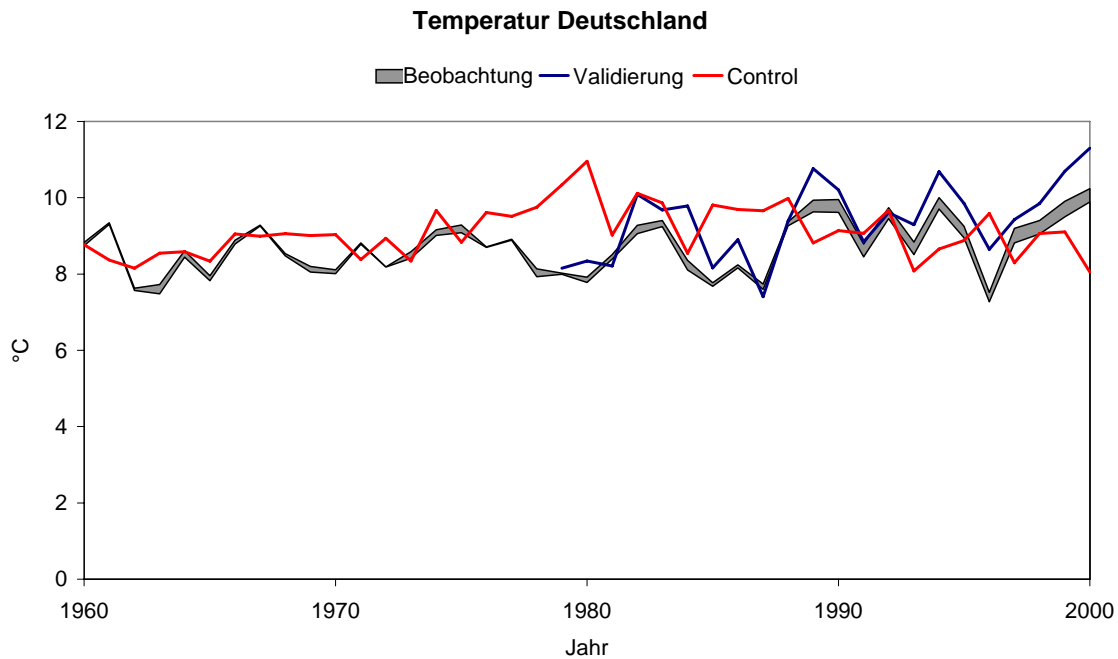


Abb. 23: Zeitlicher Verlauf des Gebietsmittels der 2m-Temperatur für Deutschland [°C] aus dem Validierungslauf (blau) sowie dem Kontrolllauf (rot) im Vergleich zu Beobachtungen (grauer Bereich – von CRU und ERA40 aufgespannter Bereich).

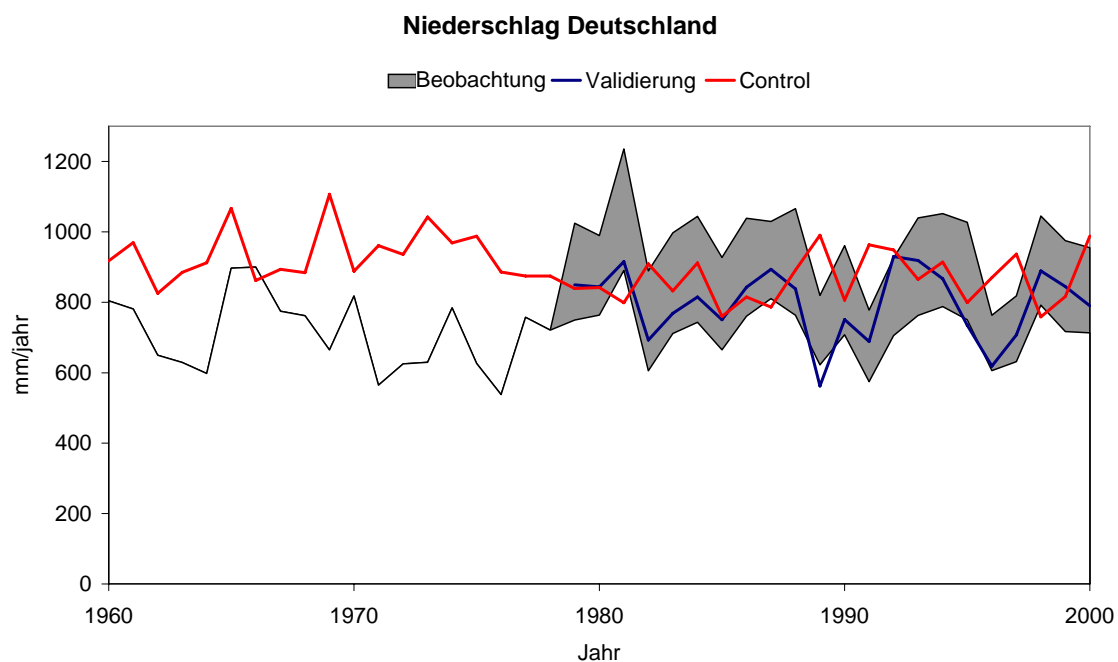


Abb. 24: Zeitlicher Verlauf des Gebietsmittels des Gesamtniederschlages für Deutschland [mm/Jahr] aus dem Validierungslauf (blau) sowie dem Kontrolllauf (rot) im Vergleich zu Beobachtungen (schwarz – CRU; grauer Bereich – von CRU, GPCP und GPCC aufgespannter Bereich).

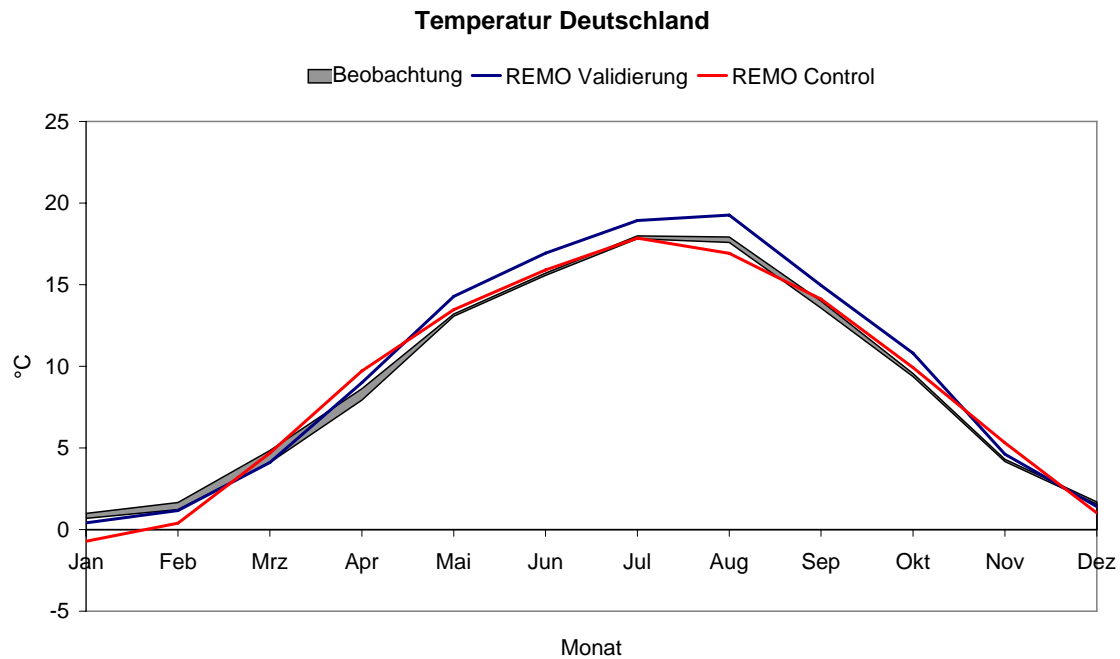


Abb. 25: Mittlerer Jahresgang des Gebietsmittels der 2m-Temperatur für Deutschland [°C] aus dem Validierungslauf (blau) sowie dem Kontrolllauf (rot) im Vergleich zu Beobachtungen (grauer Bereich – von CRU und ERA40 aufgespannter Bereich) für den Zeitraum 1960 - 2000.

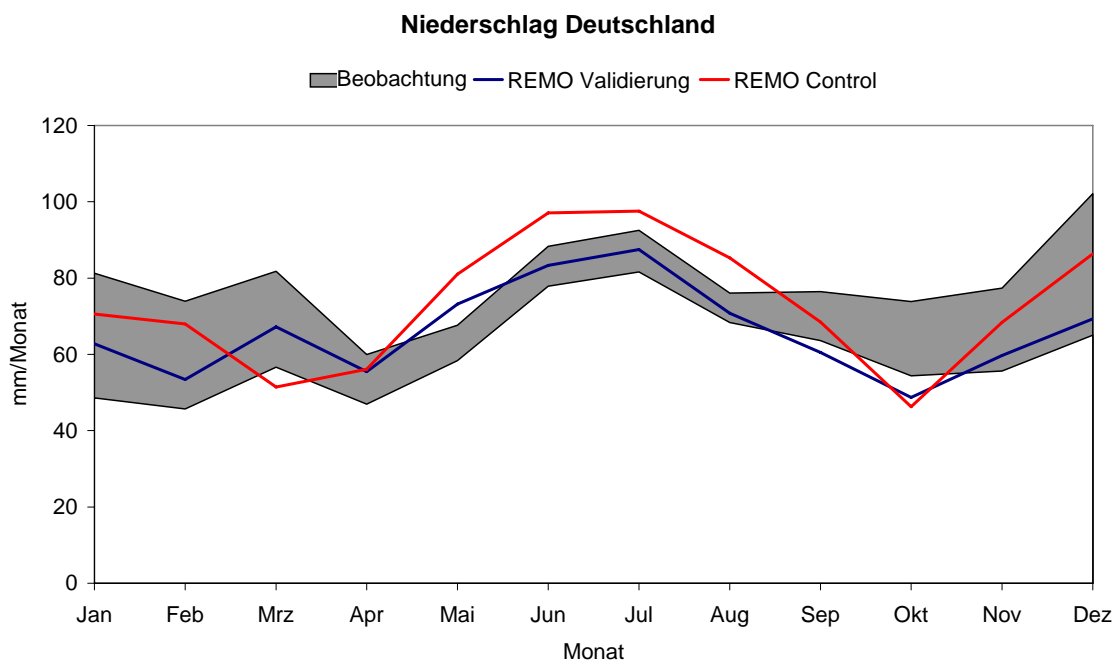


Abb. 26: Mittlerer Jahresgang des Gebietsmittels des Gesamtniederschlages für Deutschland [mm/Jahr] aus dem Validierungslauf (blau) sowie dem Kontrolllauf (rot) im Vergleich zu Beobachtungen (grauer Bereich – von CRU, GPCP und GPCC aufgespannter Bereich) für den Zeitraum 1960 - 2000.

Temperaturverlauf in Deutschland

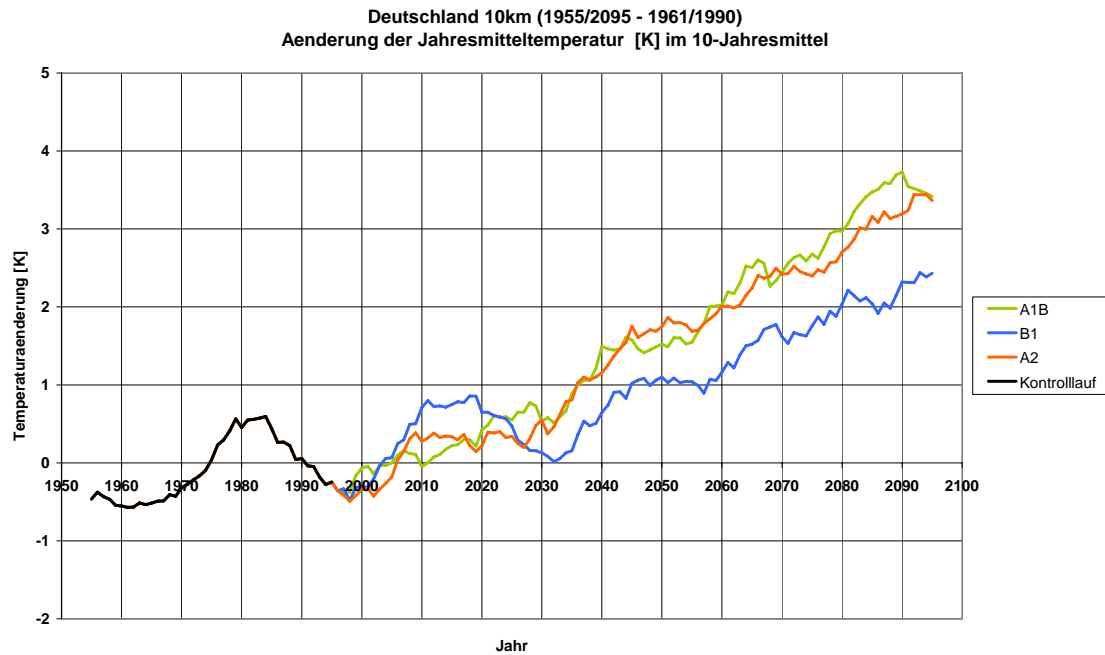


Abb. 27: Zeitlicher Verlauf der Änderung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).

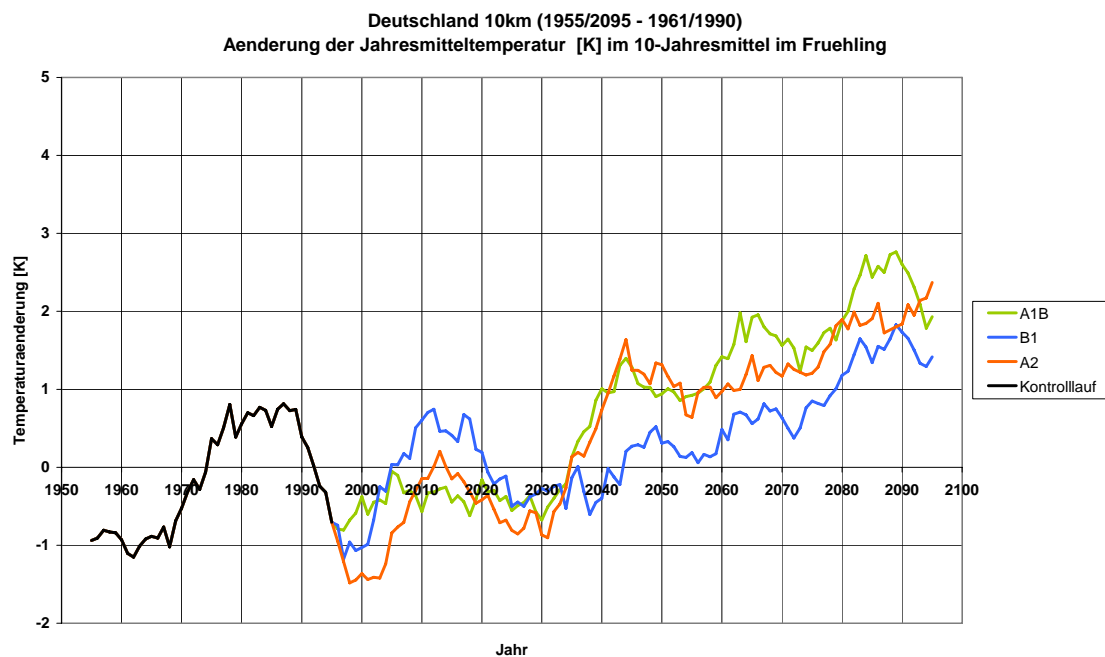


Abb. 28: Zeitlicher Verlauf der Änderung des Frühjahrsmittels der 2m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).

Temperaturverlauf in Deutschland

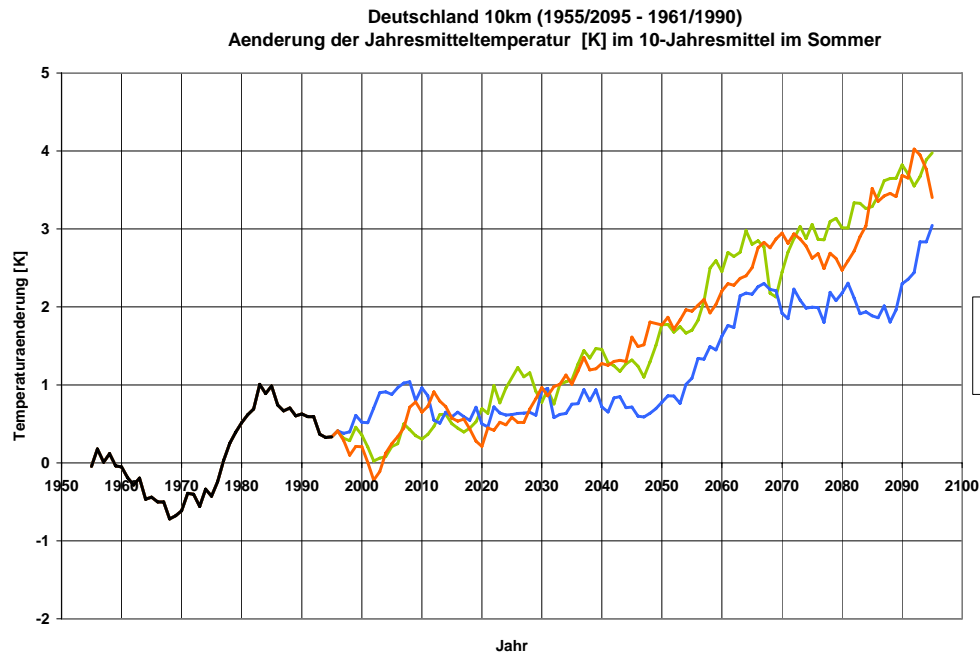


Abb. 29: Zeitlicher Verlauf der Änderung des Sommermittels der 2m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).

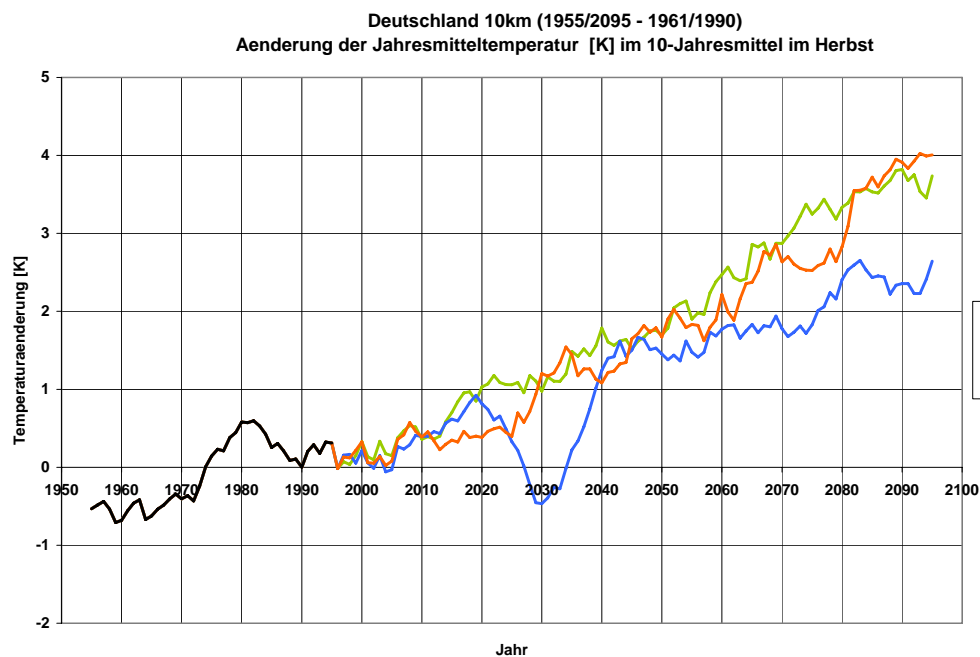


Abb. 30: Zeitlicher Verlauf der Änderung des Herbstmittels der 2m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).

Temperaturverlauf in Deutschland

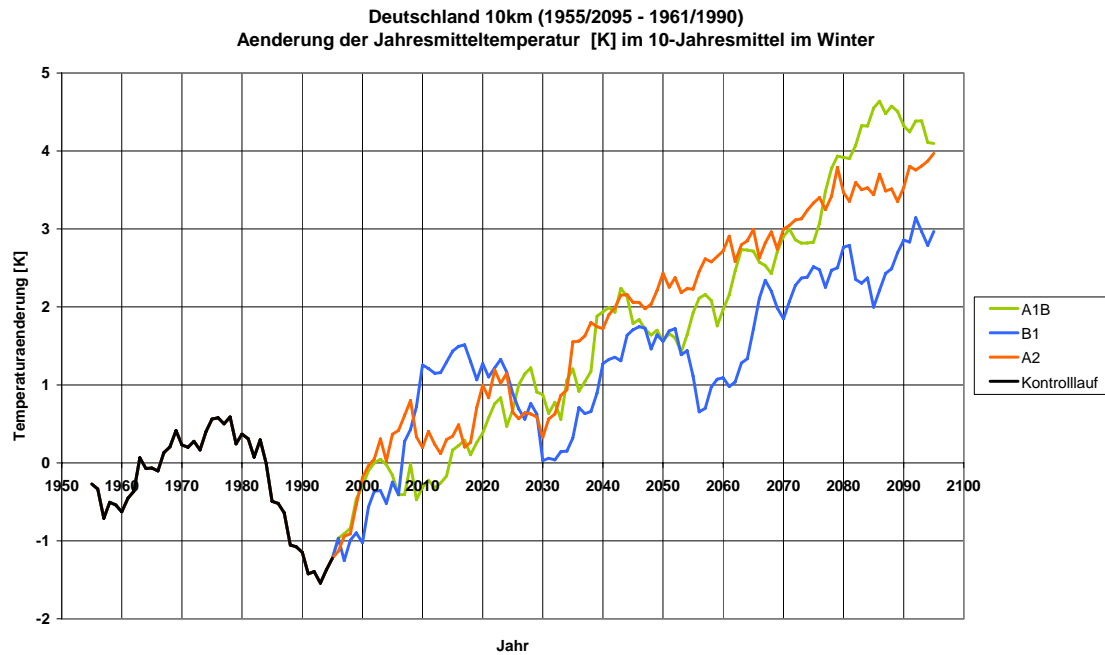


Abb. 31: Zeitlicher Verlauf der Änderung des Wintermittels der 2m-Temperatur [°C] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).

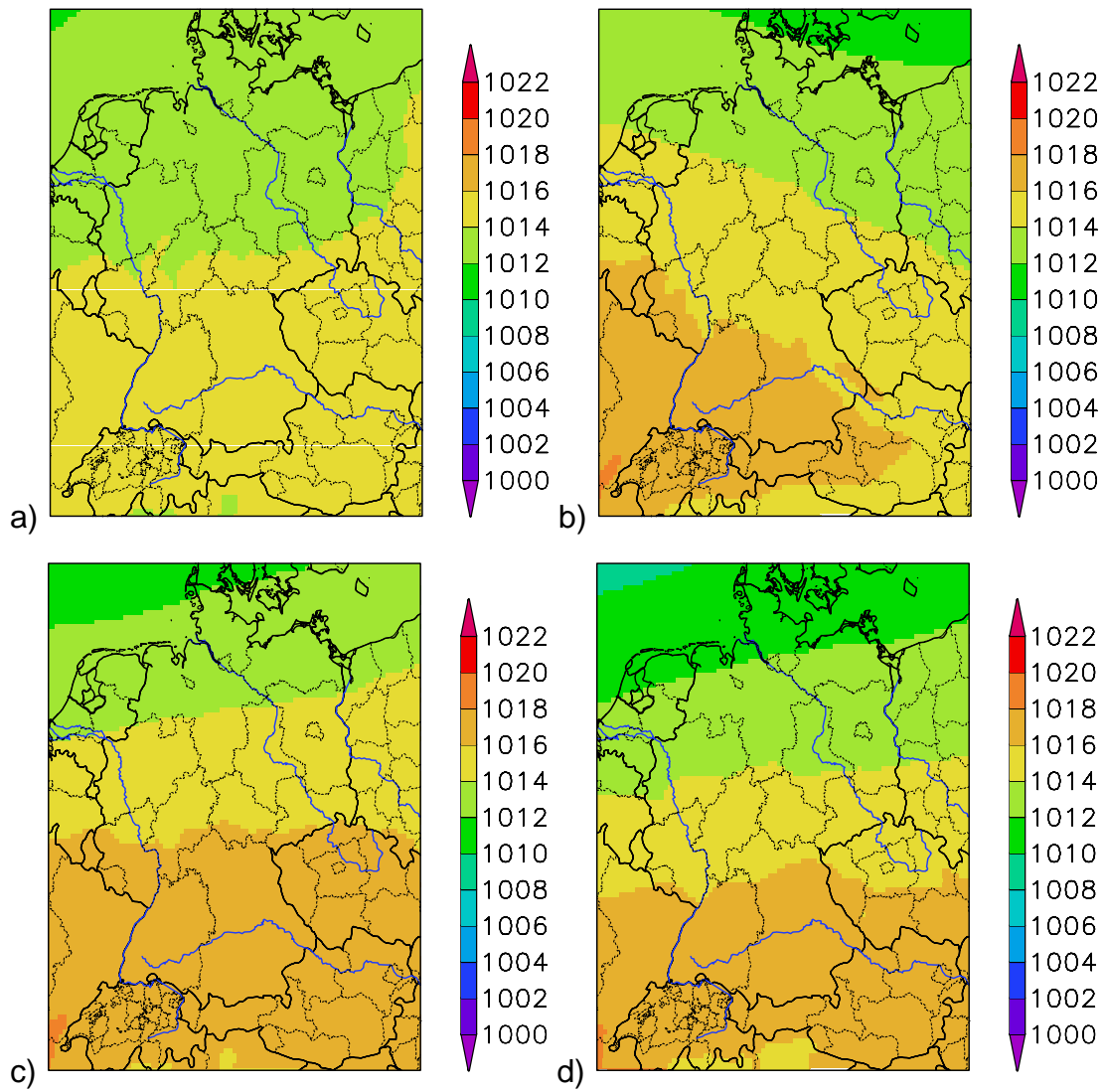


Abb. 32: Saisonale Druckverteilung [hPa] in der KNP (1961-1990) f r a) Fr hling, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

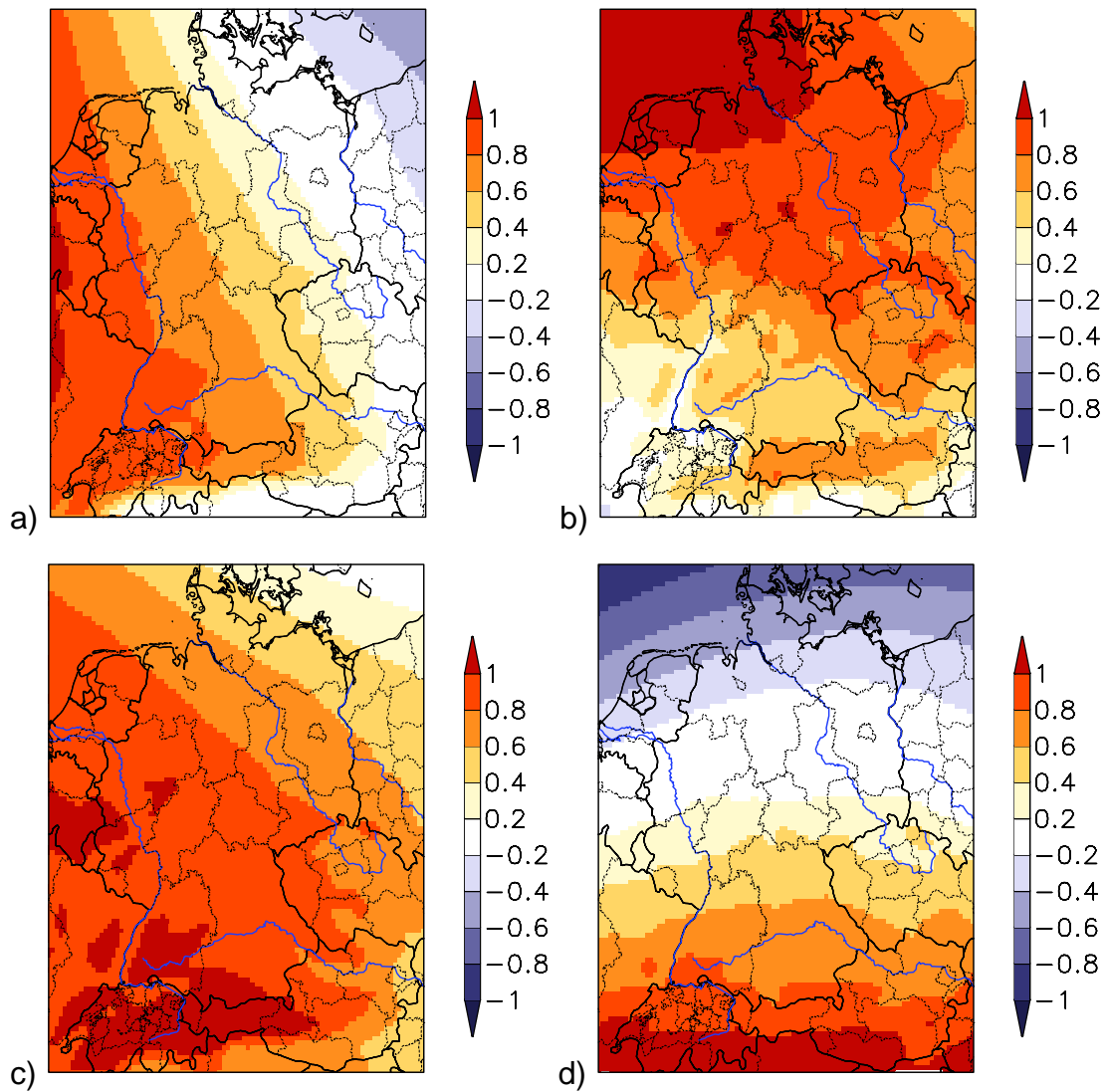


Abb. 33: Änderung der saisonalen Druckverteilung [hPa] im A1B Szenario (2071-2100) im Vergleich zur KNP (1961-1990) für a) Frühling, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

Niederschlagsverlauf in Deutschland

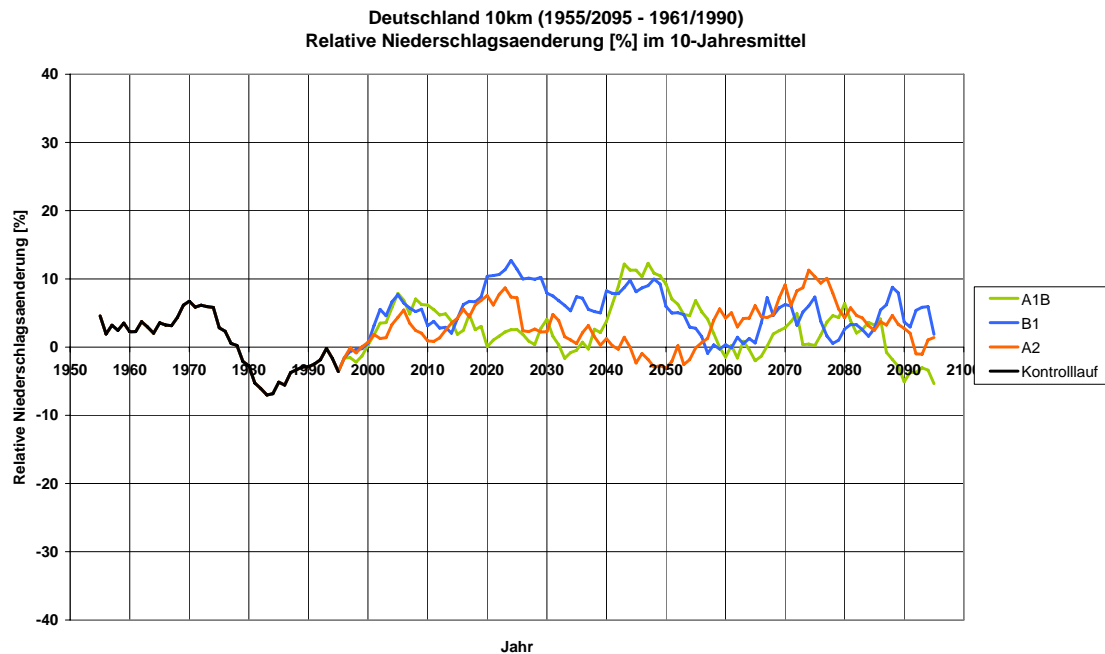


Abb. 34: Zeitlicher Verlauf der relativen Änderung der Jahresniederschlagssumme [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).

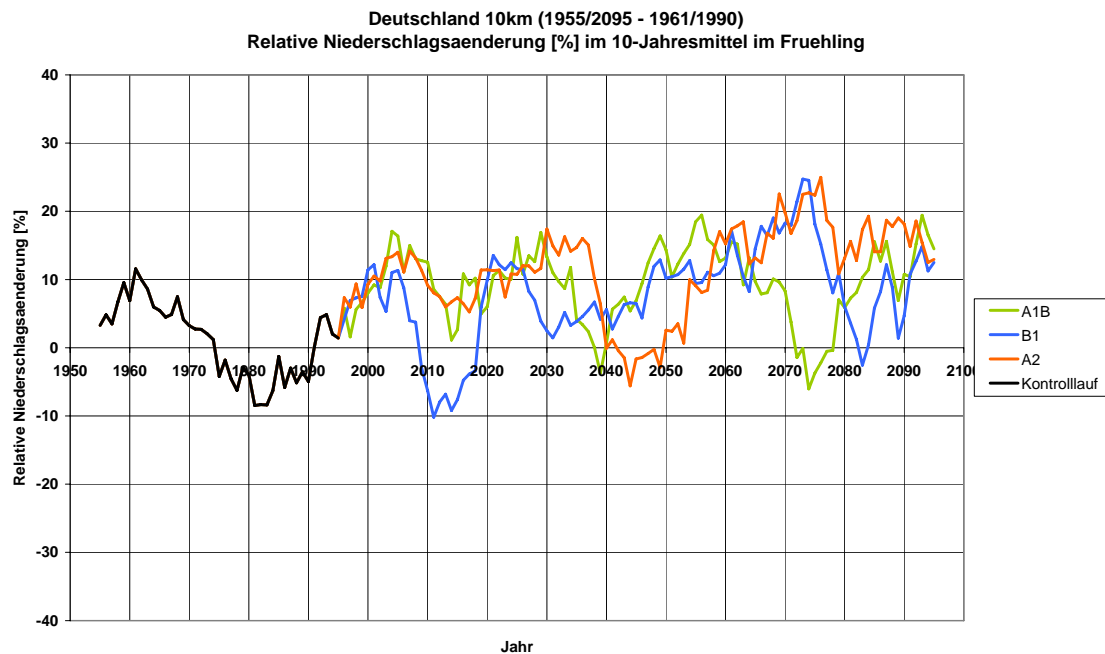


Abb. 35: Zeitlicher Verlauf der relativen Änderung der Frühjahrsniederschlagssumme [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).

Niederschlagsverlauf in Deutschland

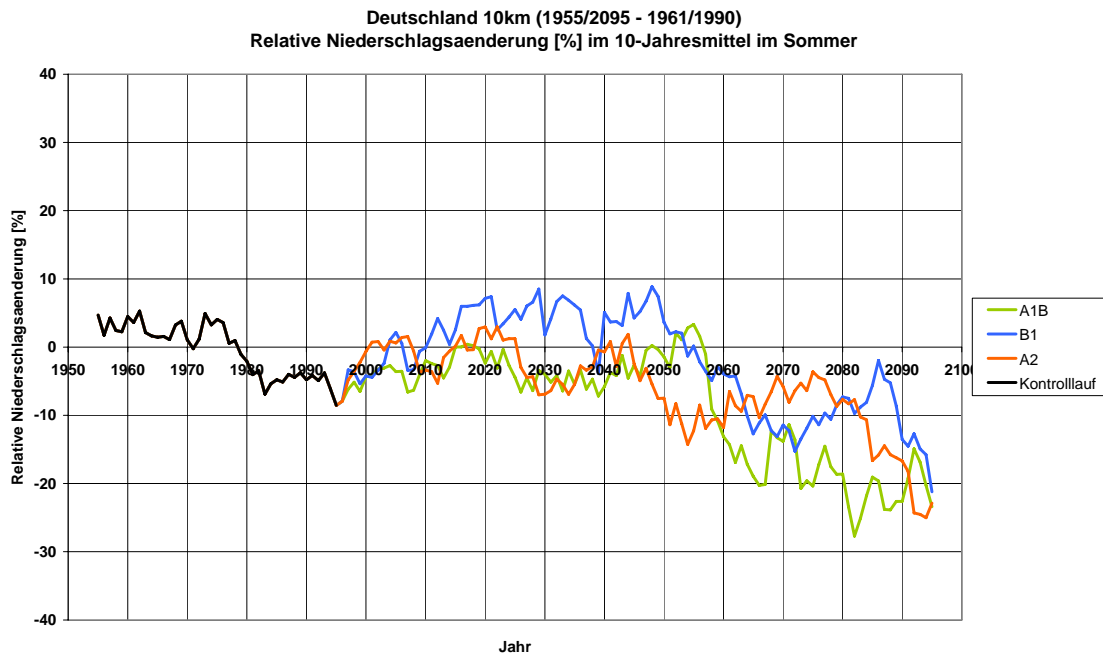


Abb. 36: Zeitlicher Verlauf der relativen Änderung der Sommerniederschlagssumme [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).

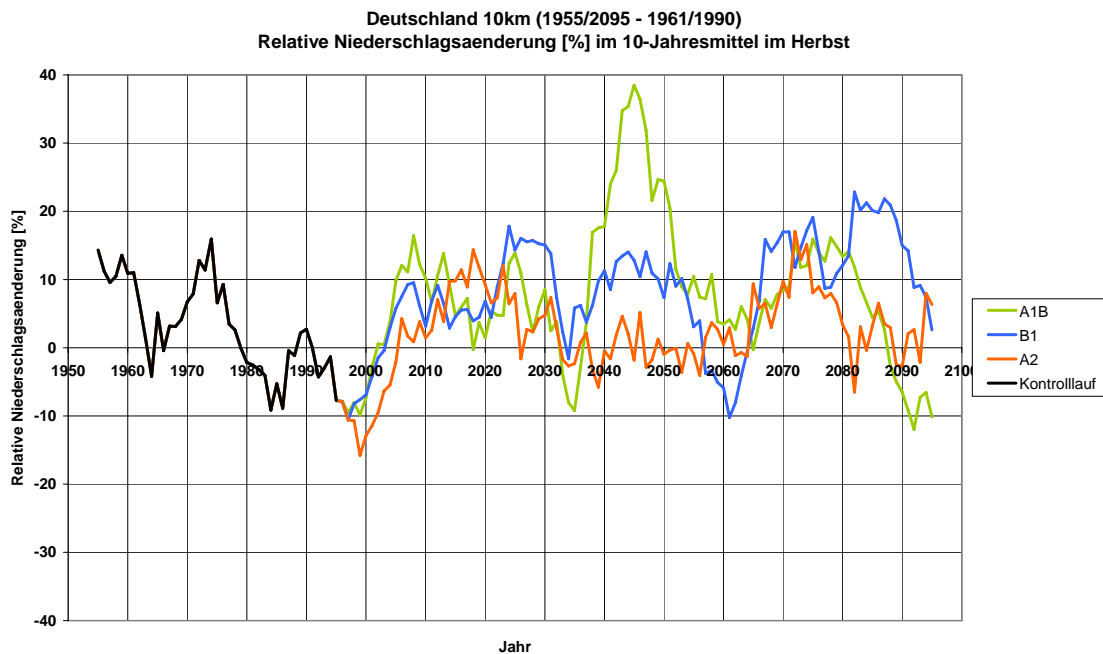


Abb. 37: Zeitlicher Verlauf der relativen Änderung der Herbstniederschlagssumme [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).

Niederschlagsverlauf in Deutschland

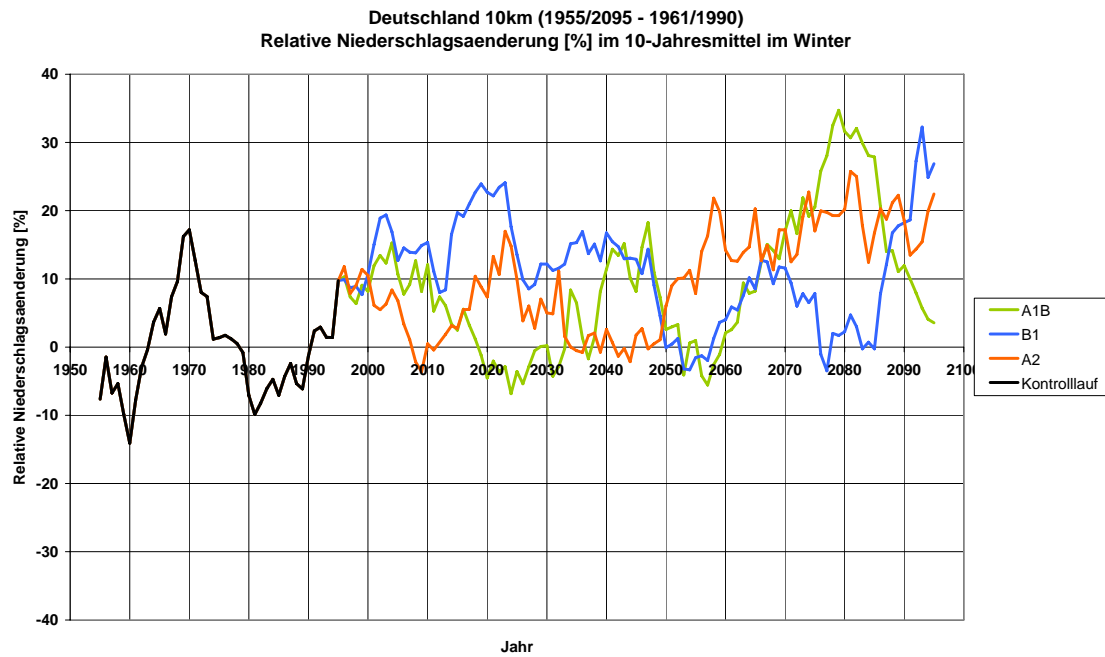
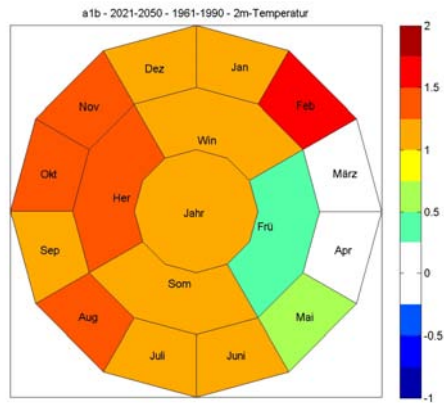
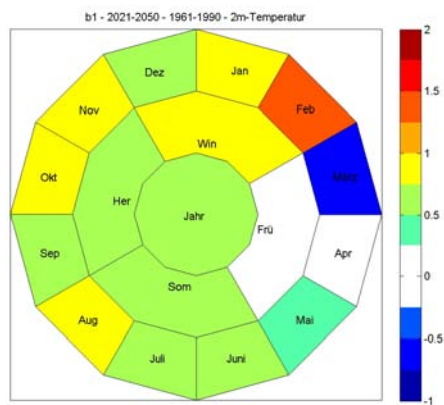


Abb. 38: Zeitlicher Verlauf der relativen Änderung der Winterniederschlagssumme [%] (Gebietsmittel Deutschland, gleitendes 10-Jahresmittel) in Bezug auf die KNP (1961-1990) für den Kontrolllauf (schwarz), sowie die Szenarien A1B (grün), B1 (blau), und A2 (orange).

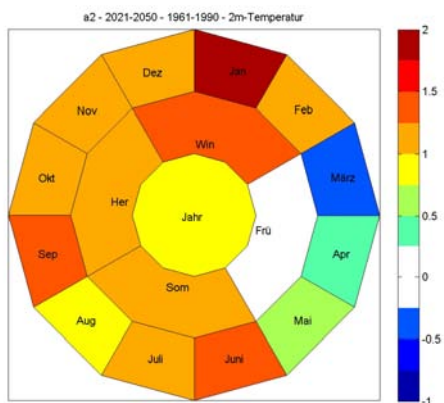
Ringdiagramme



a)



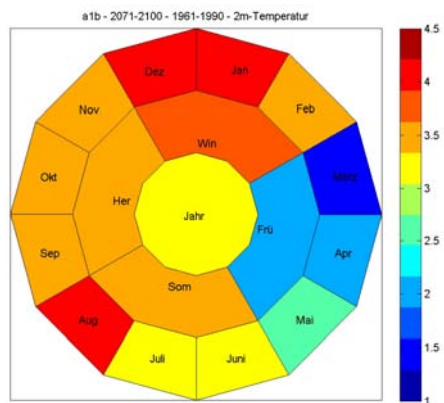
b)



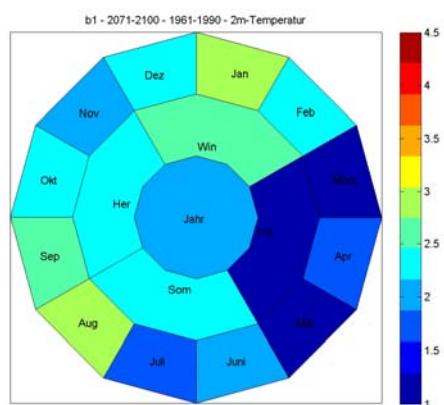
c)

Abb. 39: Schematische Darstellung der Änderung des Deutschlandsmittels der 2m-Temperatur [°C] zwischen dem Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario

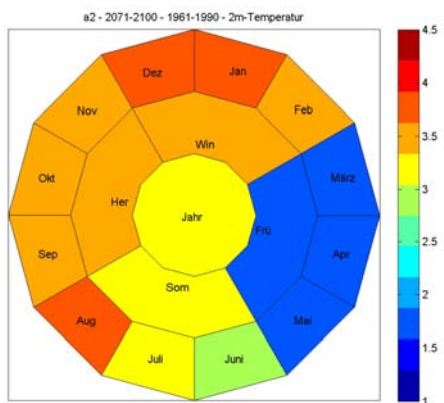
Ringdiagramme



a)



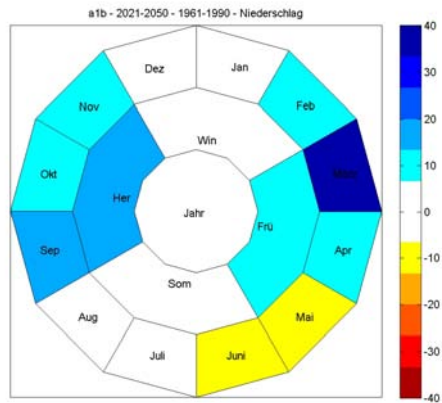
b)



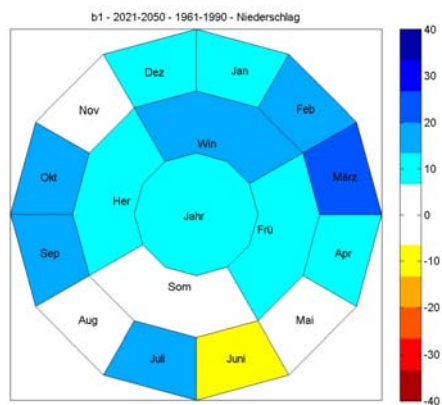
c)

Abb. 40: Schematische Darstellung der Änderung des Deutschlandsmittels der 2m-Temperatur [°C] zwischen dem Zeitraum 2071-2100 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario

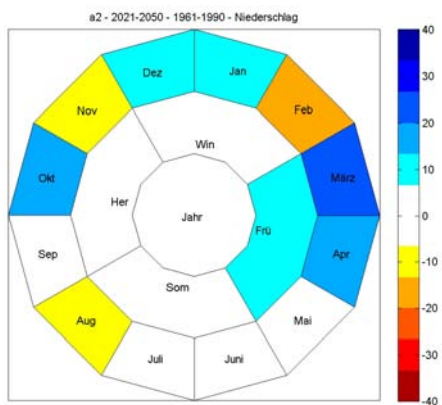
Ringdiagramme



a)



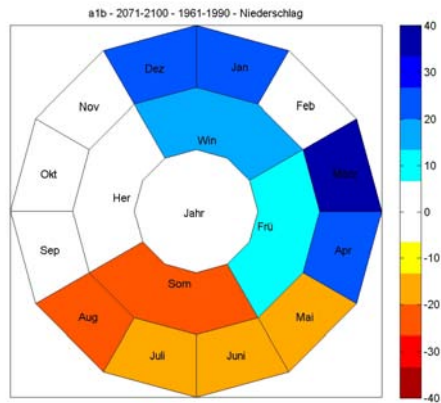
b)



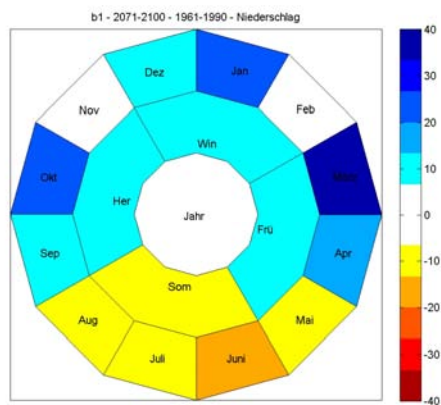
c)

Abb. 41: Schematische Darstellung der Änderung des Gesamtniederschlages [%] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario

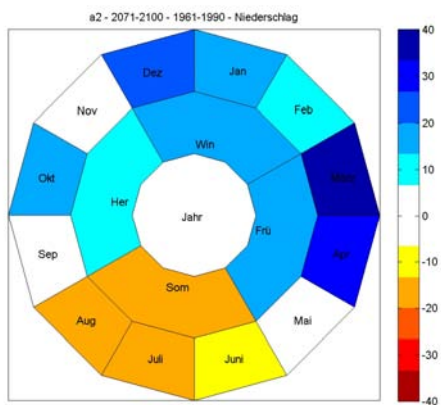
Ringdiagramme



a)



b)



c)

Abb. 42: Schematische Darstellung der Änderung des Gesamtniederschlages [%] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2071-2100 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario

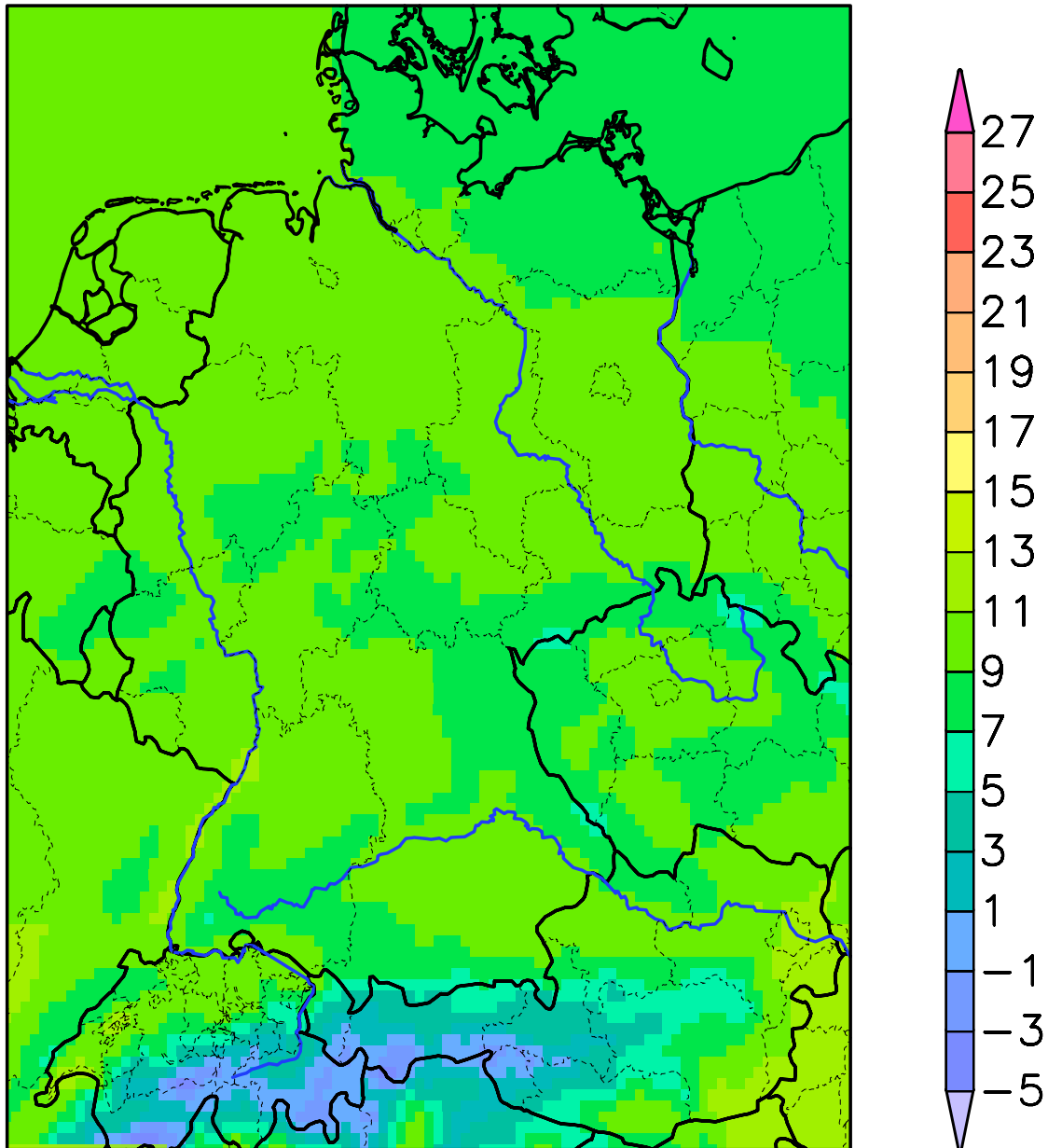


Abb. 43: Kartendarstellung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Klimanormalperiode (KNP) von 1961-1990 für den Kontrolllauf. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

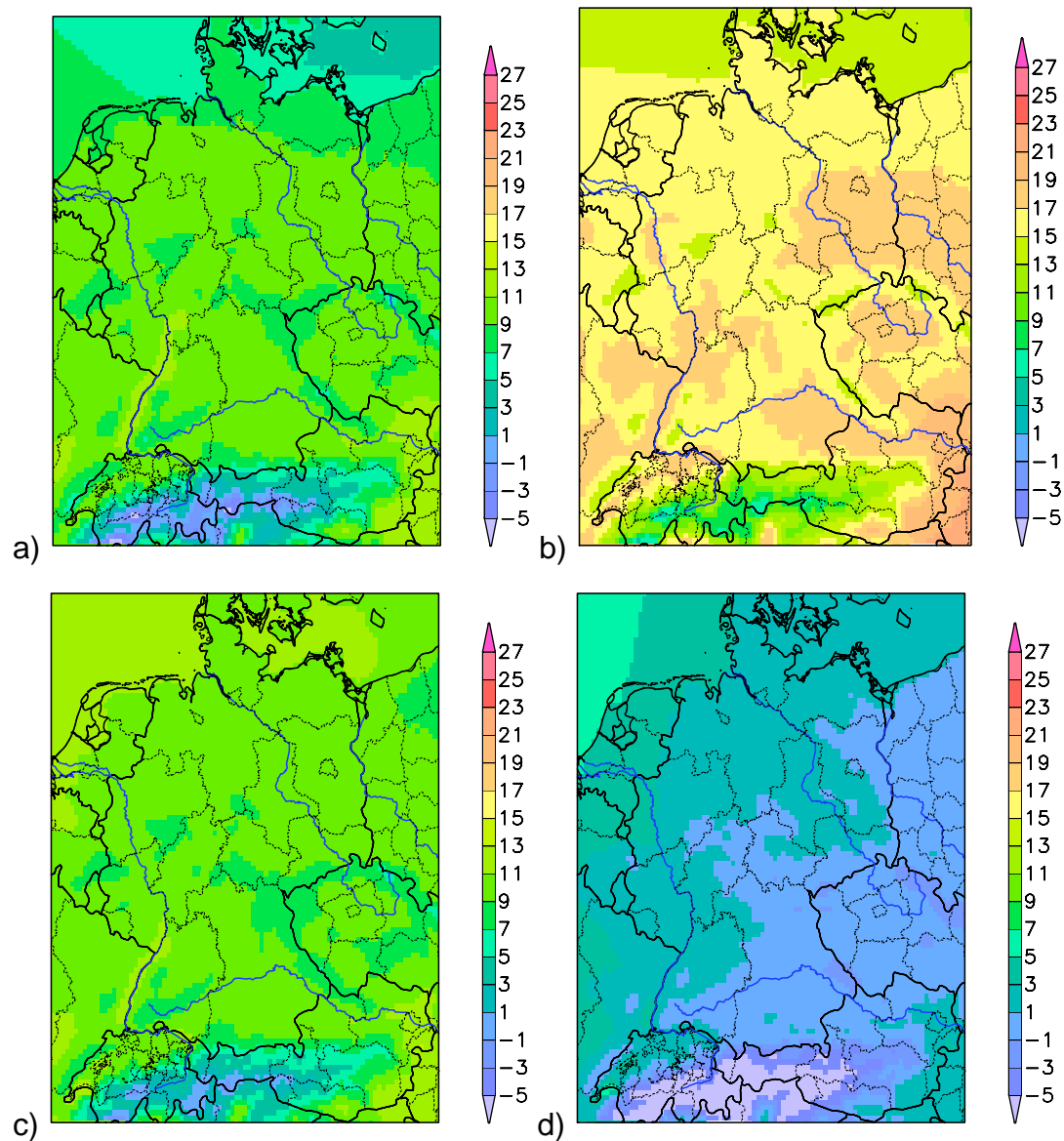


Abb. 44: Kartendarstellung der saisonalen Mittel der 2m-Temperatur [°C] für die Klimanormalperiode (KNP) von 1961-1990 für den Kontrolllauf. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

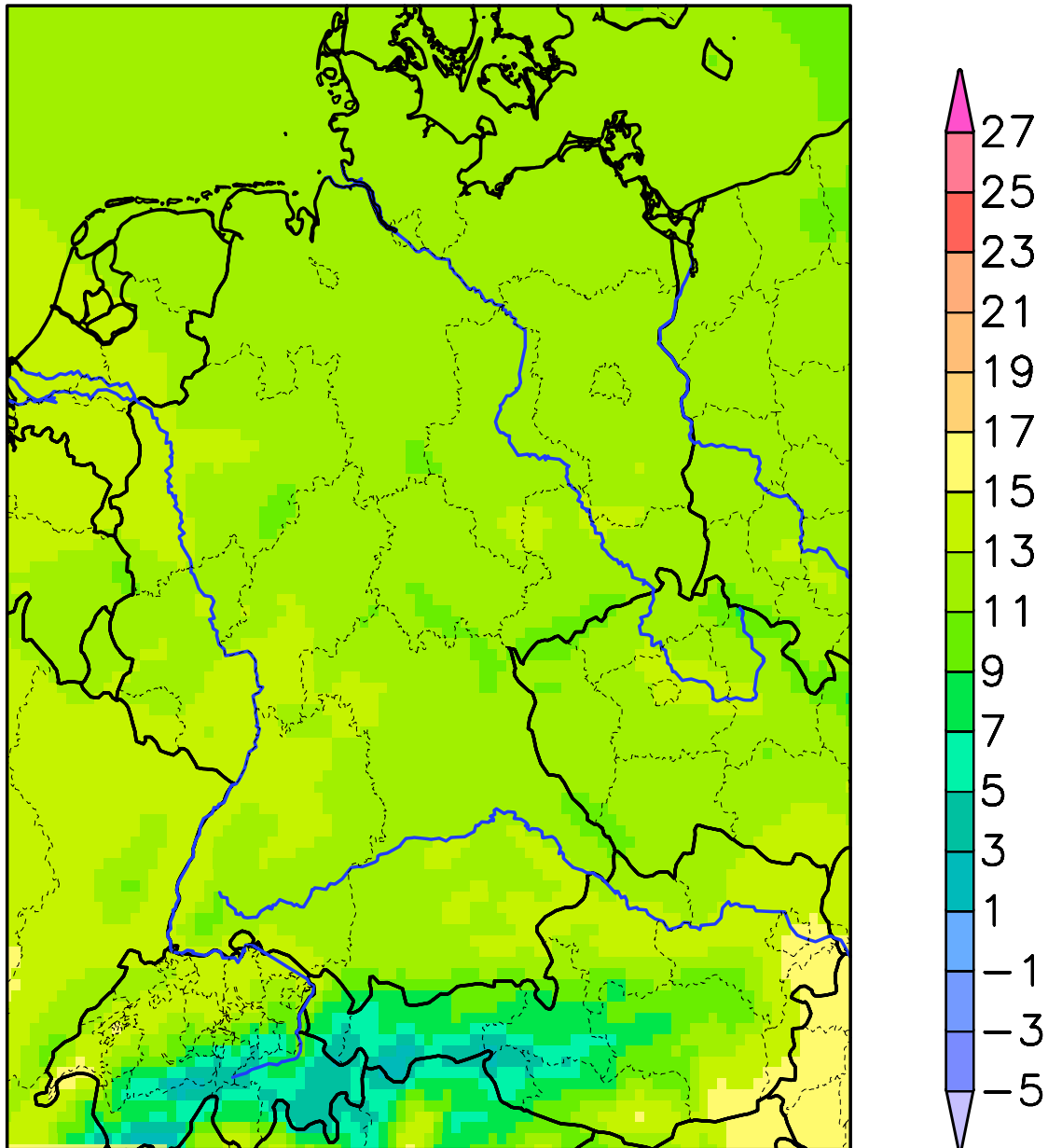


Abb. 45: Kartendarstellung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A1B Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

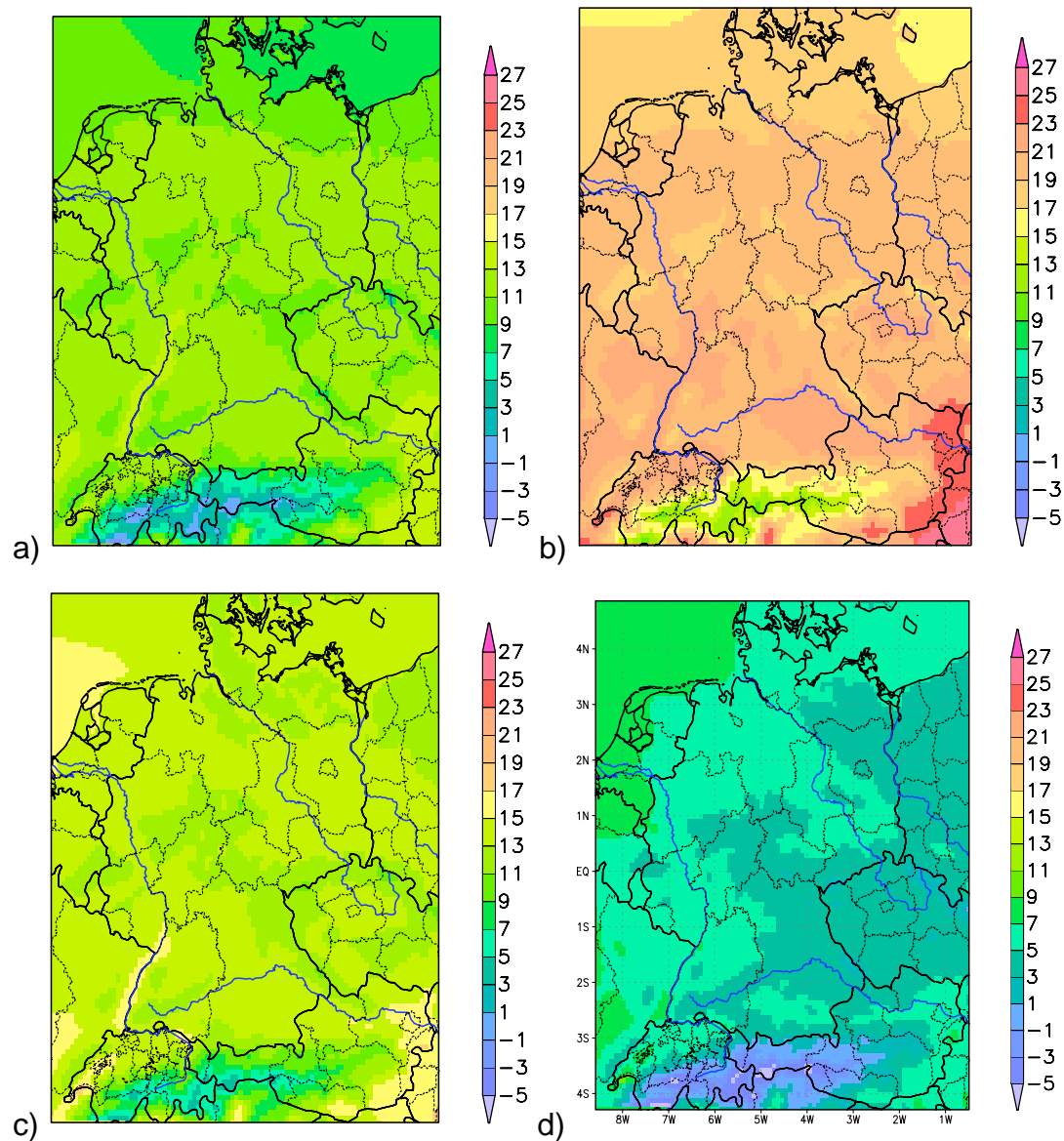


Abb. 46: Kartendarstellung der saisonalen Mittel der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A1B Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

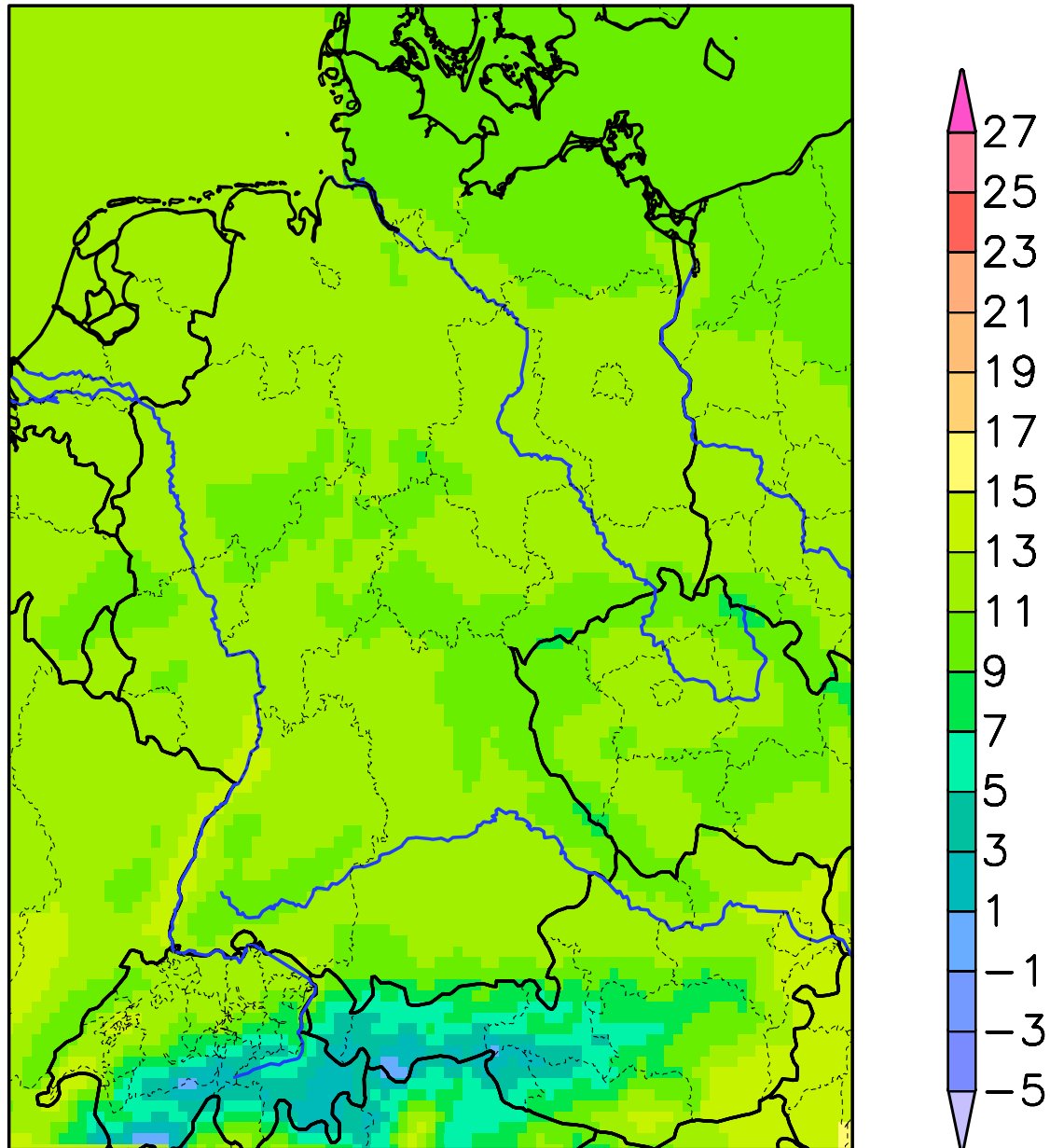


Abb. 47: Kartendarstellung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das B1 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

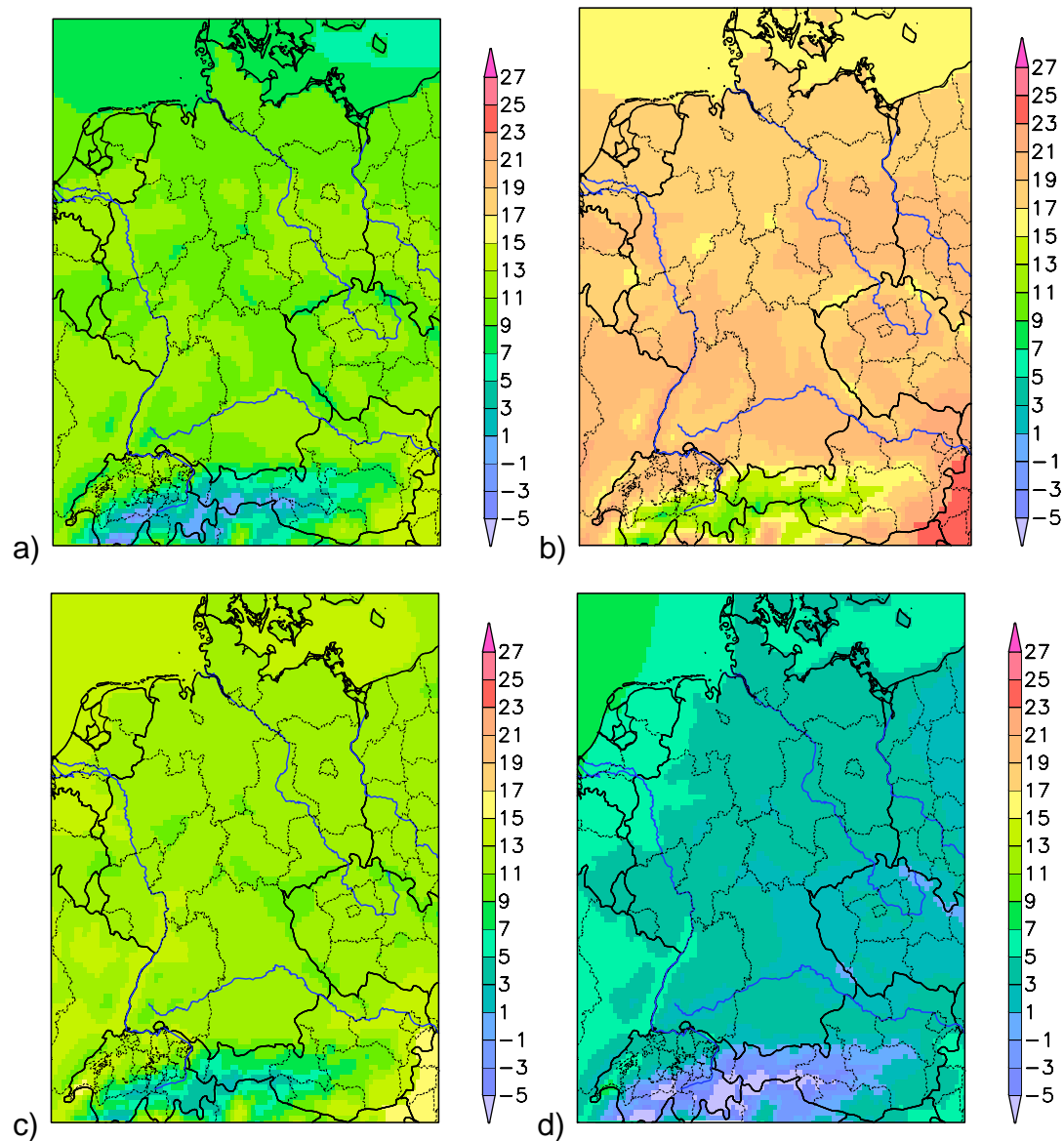


Abb. 48: Kartendarstellung der saisonalen Mittel der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das B1 Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

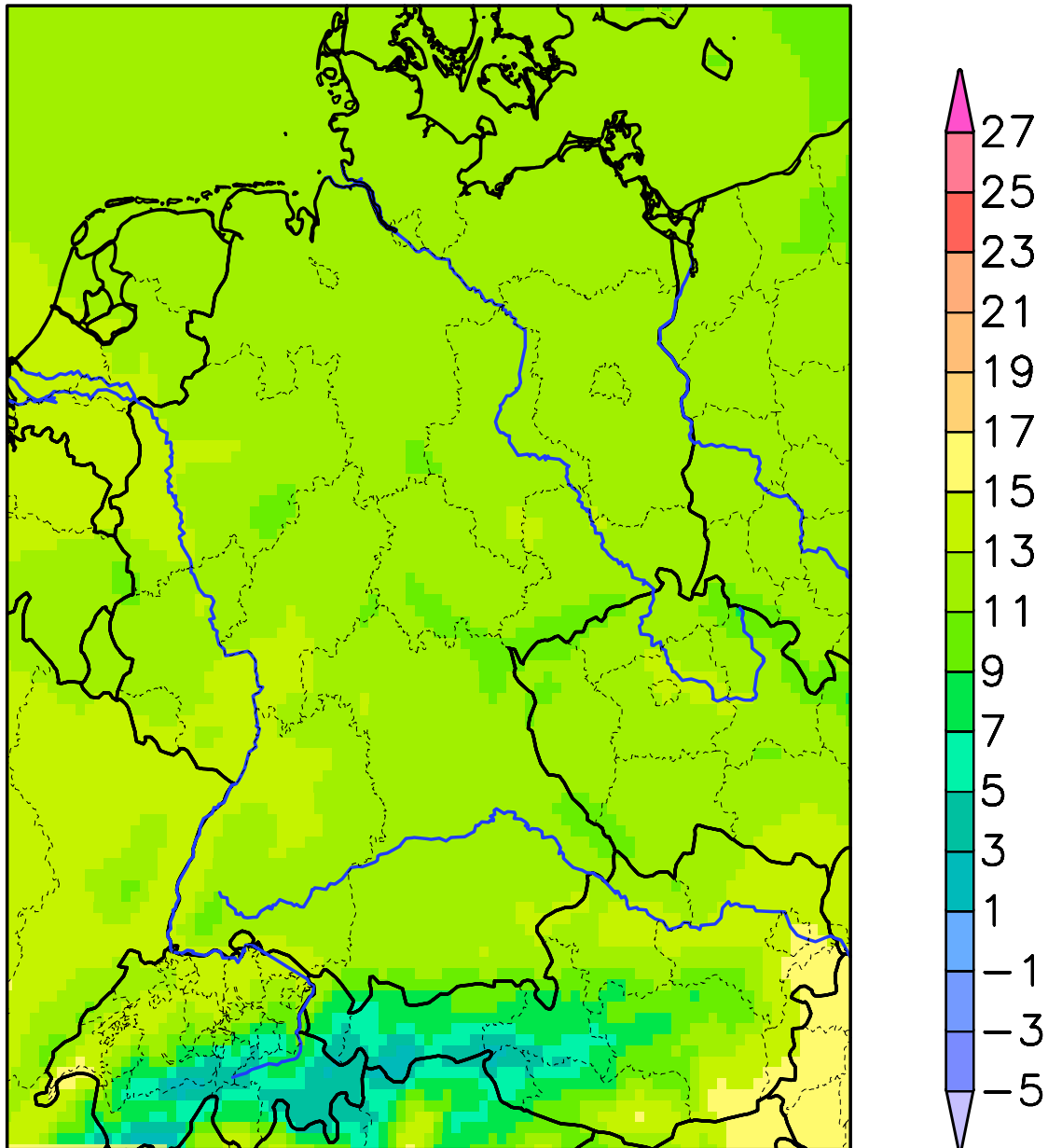


Abb. 49: Kartendarstellung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

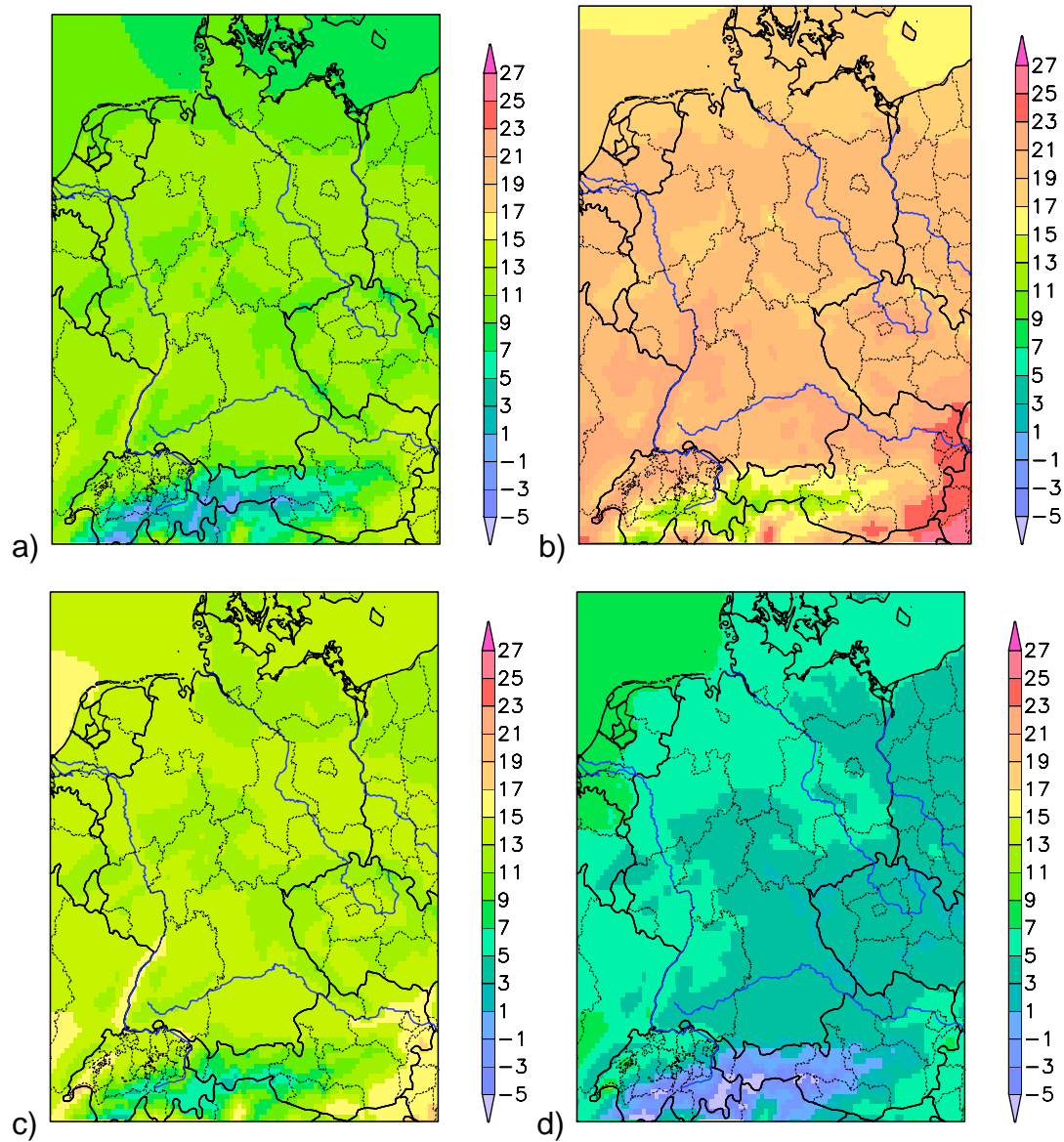


Abb. 50: Kartendarstellung der saisonalen Mittel der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A2 Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

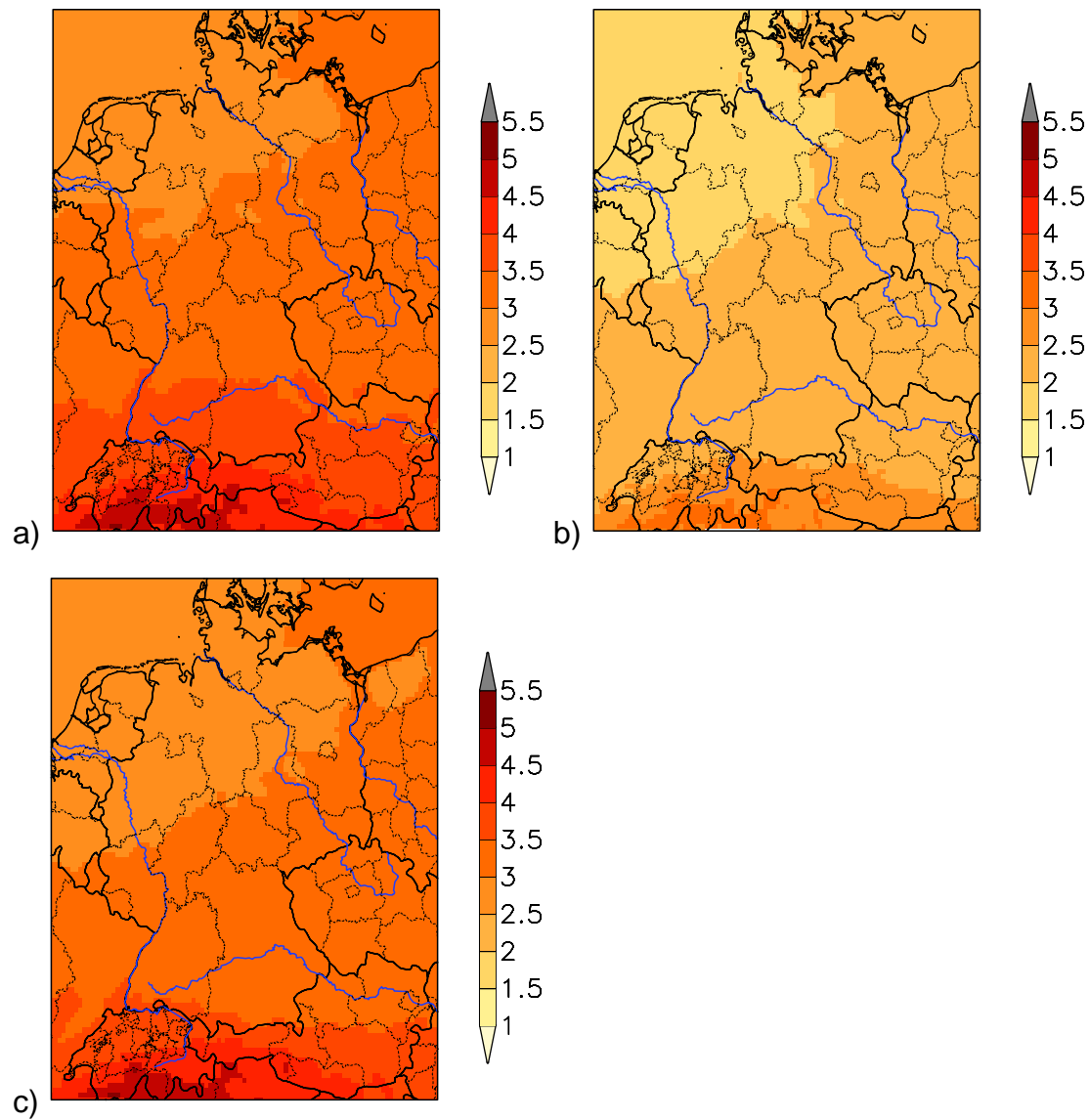


Abb. 51: Kartendarstellung der Änderung des Jahresmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

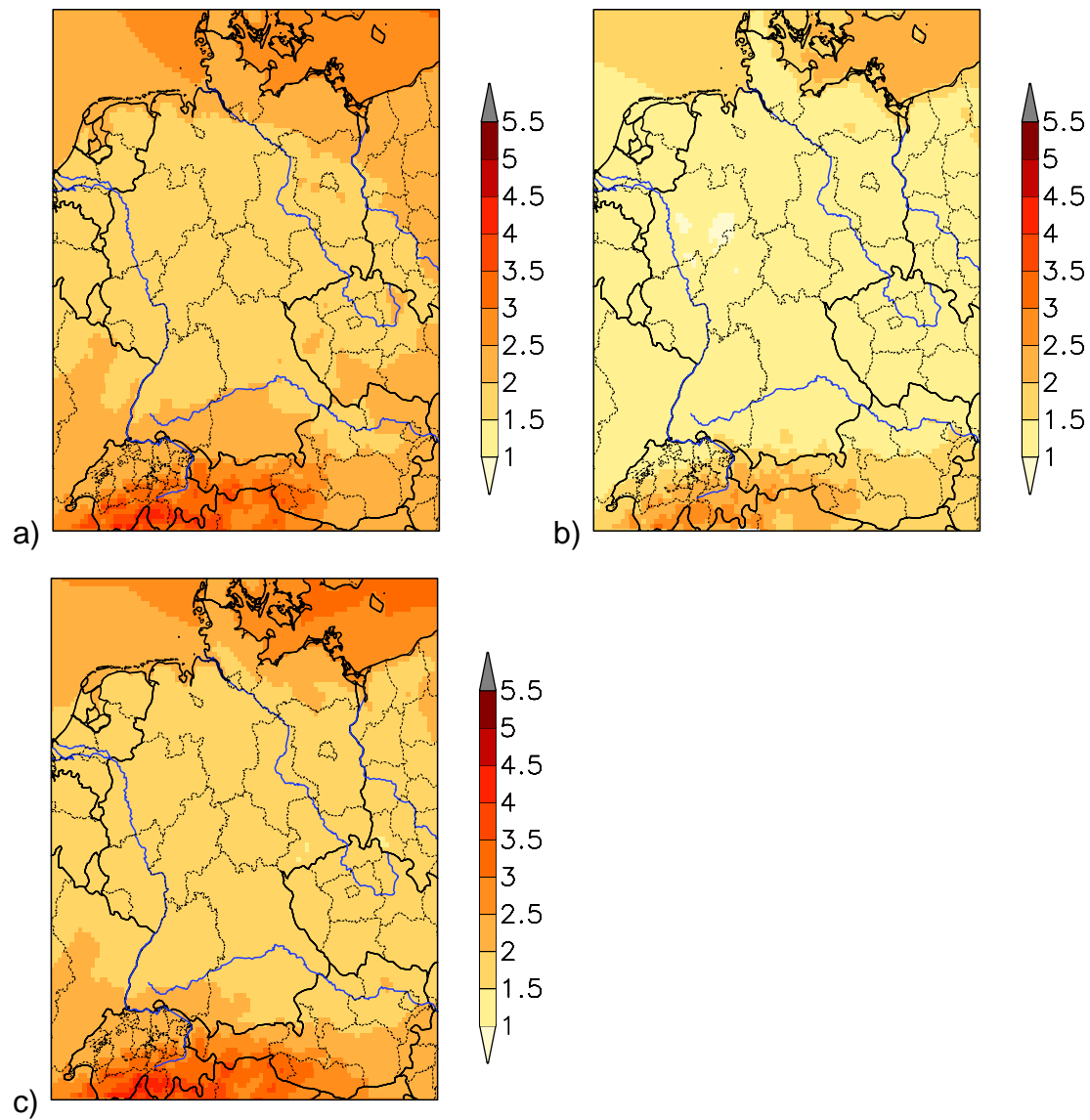


Abb. 52: Kartendarstellung der Änderung des Frühjahrsmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

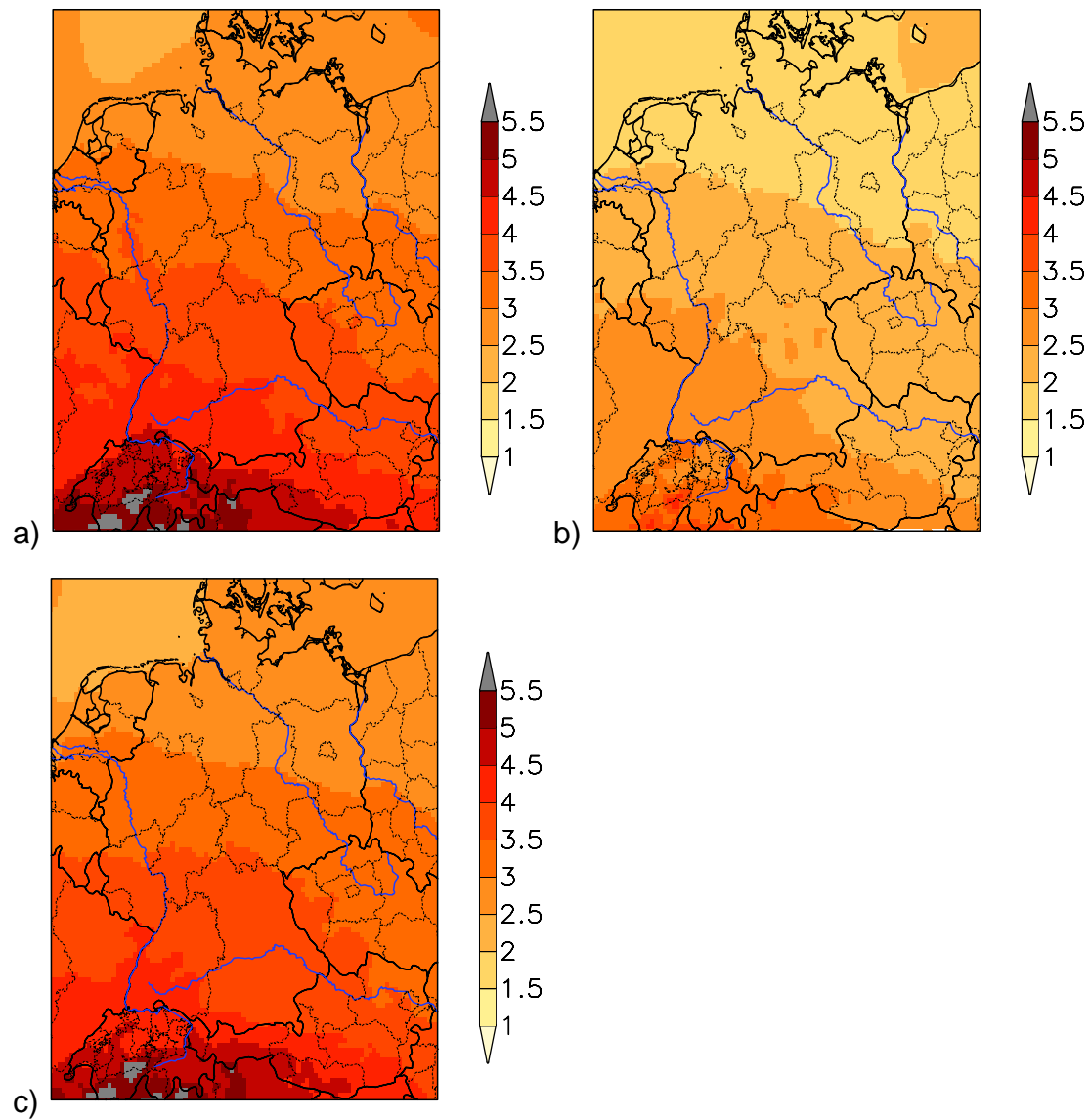


Abb. 53: Kartendarstellung der Änderung des Sommermittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

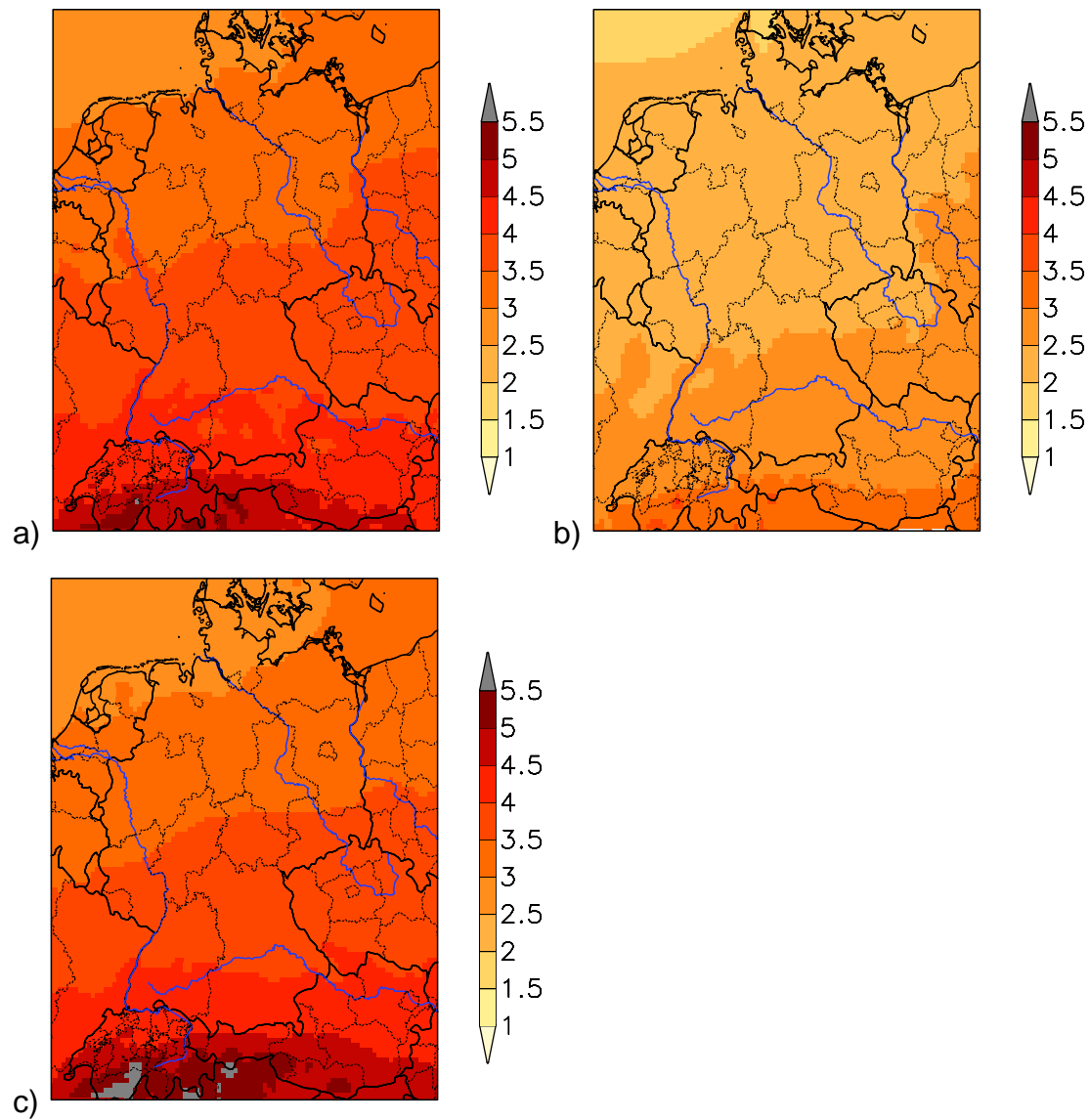


Abb. 54: Kartendarstellung der Änderung des Herbstmittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

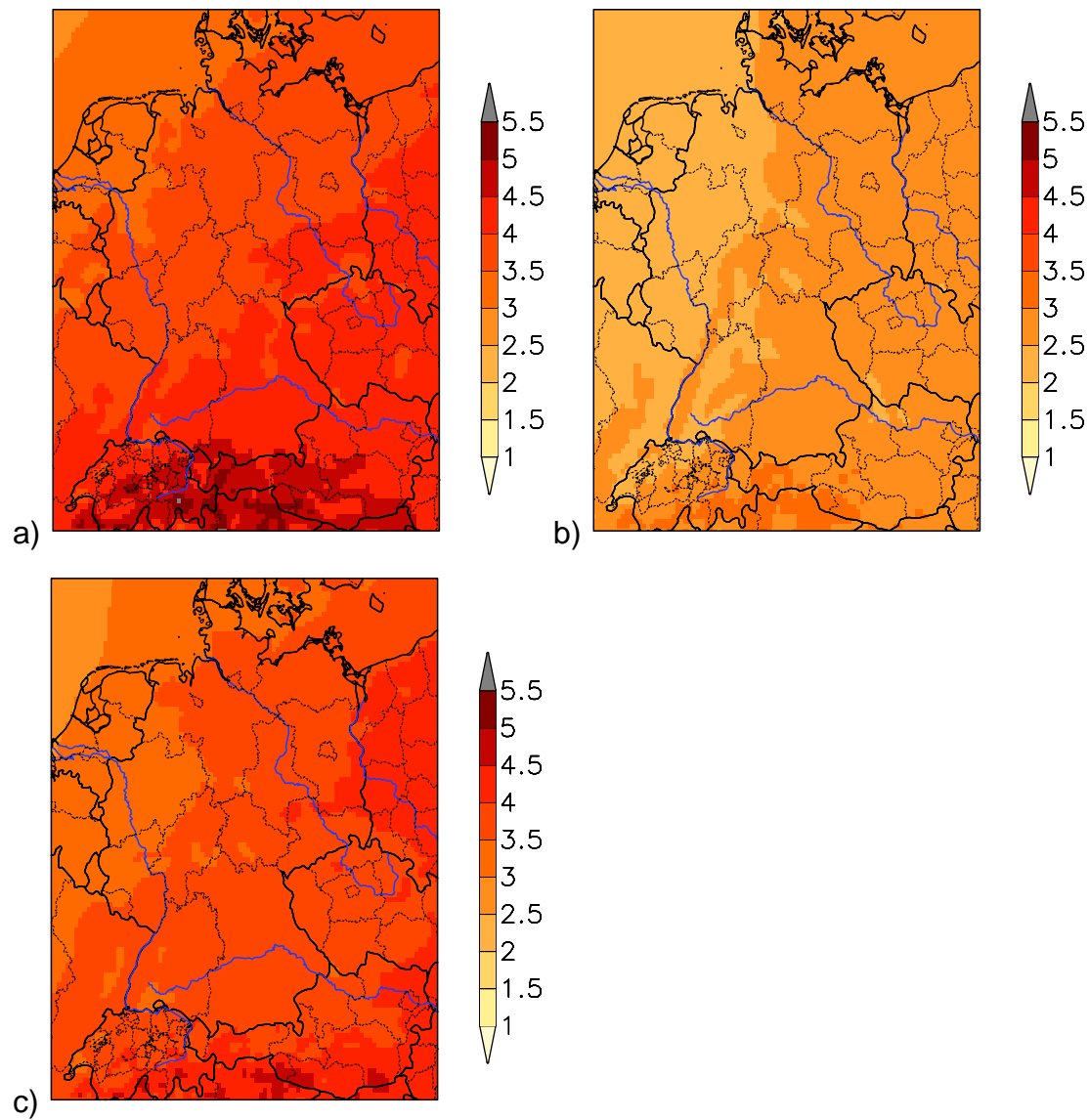


Abb. 55: Kartendarstellung der Änderung des Wintermittels der 2m-Temperatur [°C] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

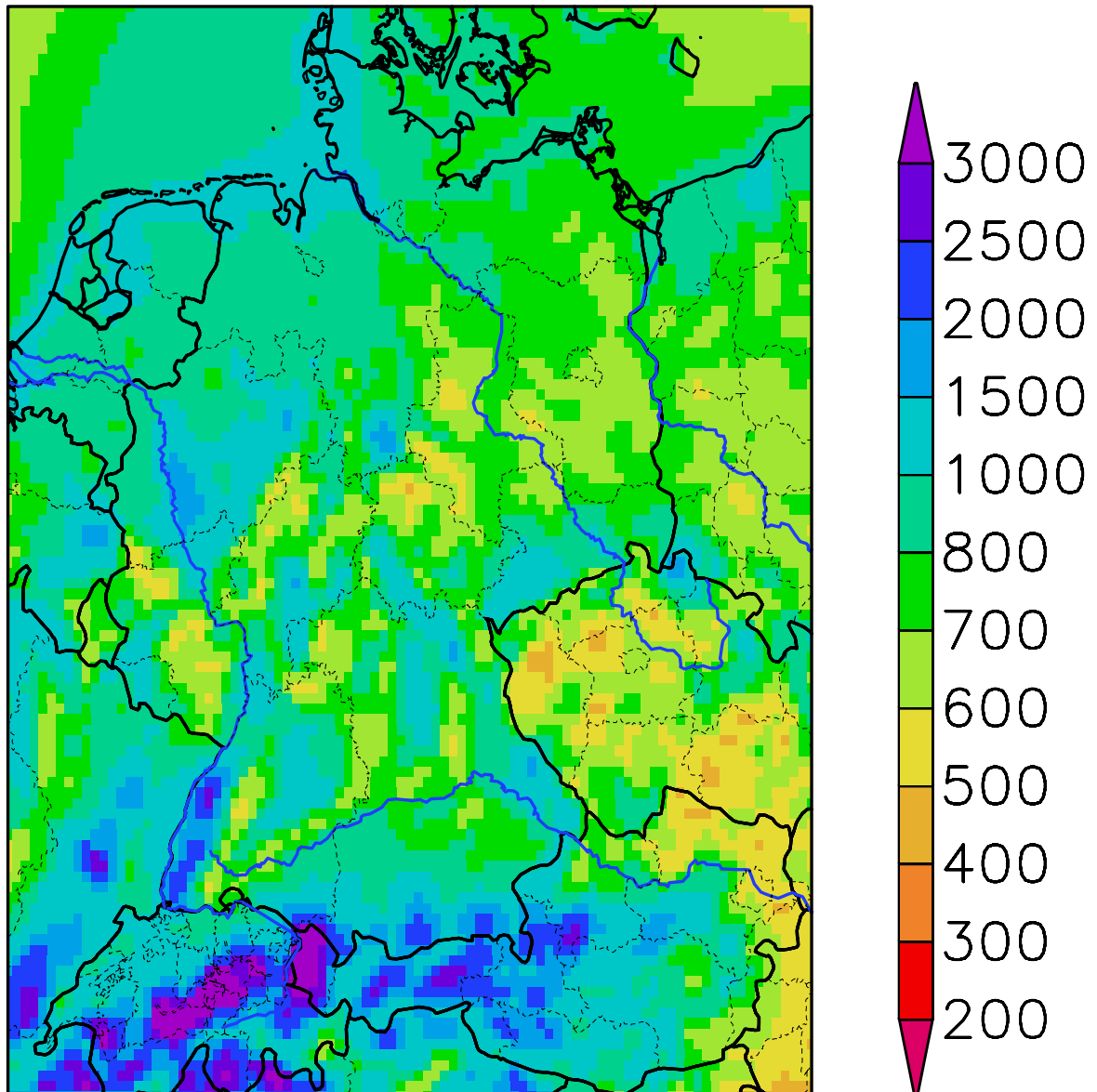


Abb. 56: Kartendarstellung der mittleren Jahresniederschlagssummen [mm/Jahr] für die KNP von 1961-1990. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

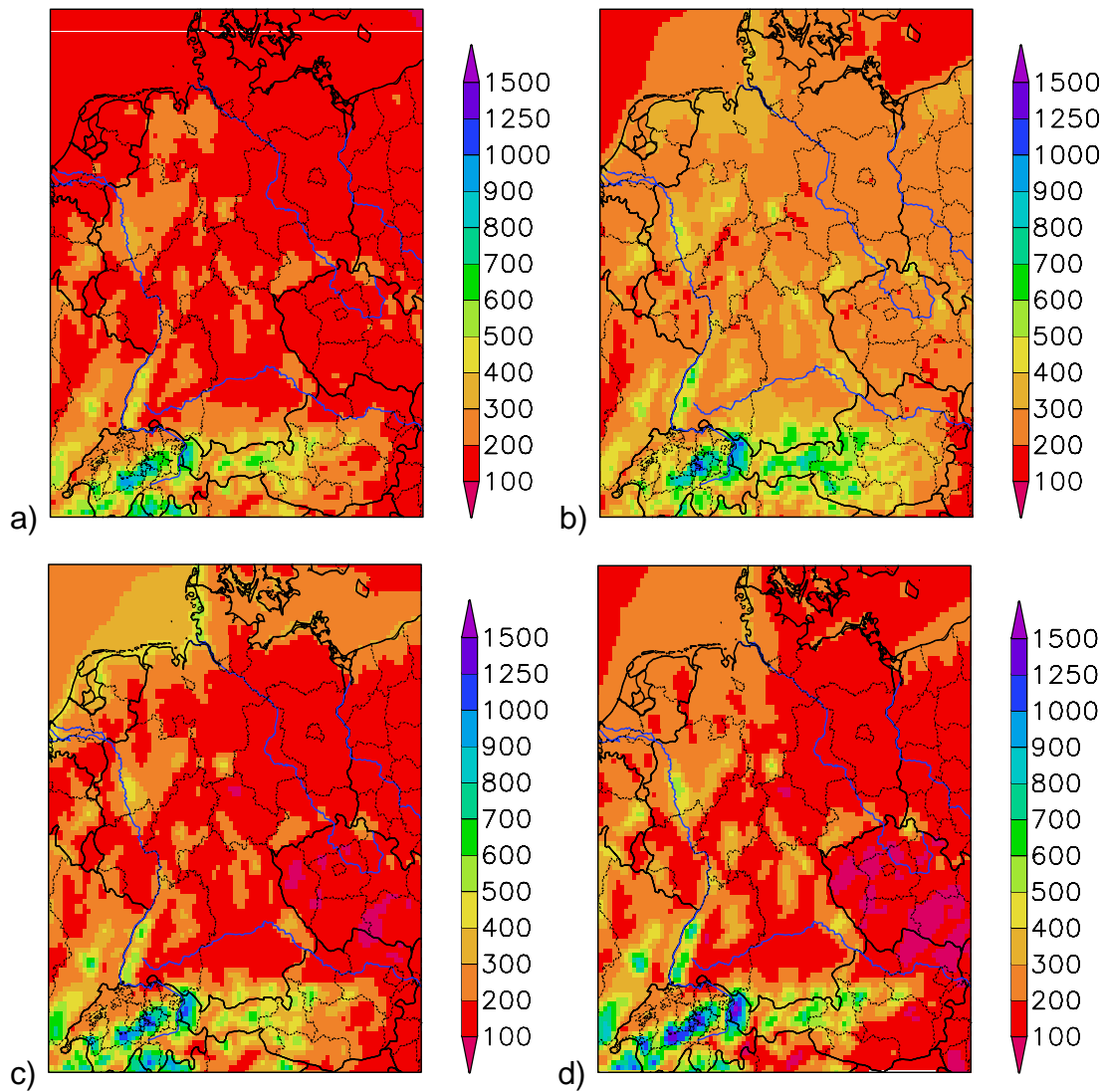


Abb. 57: Kartendarstellung der mittleren saisonalen Niederschlagssummen [mm/Saison] für die KNP von 1961-1990. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

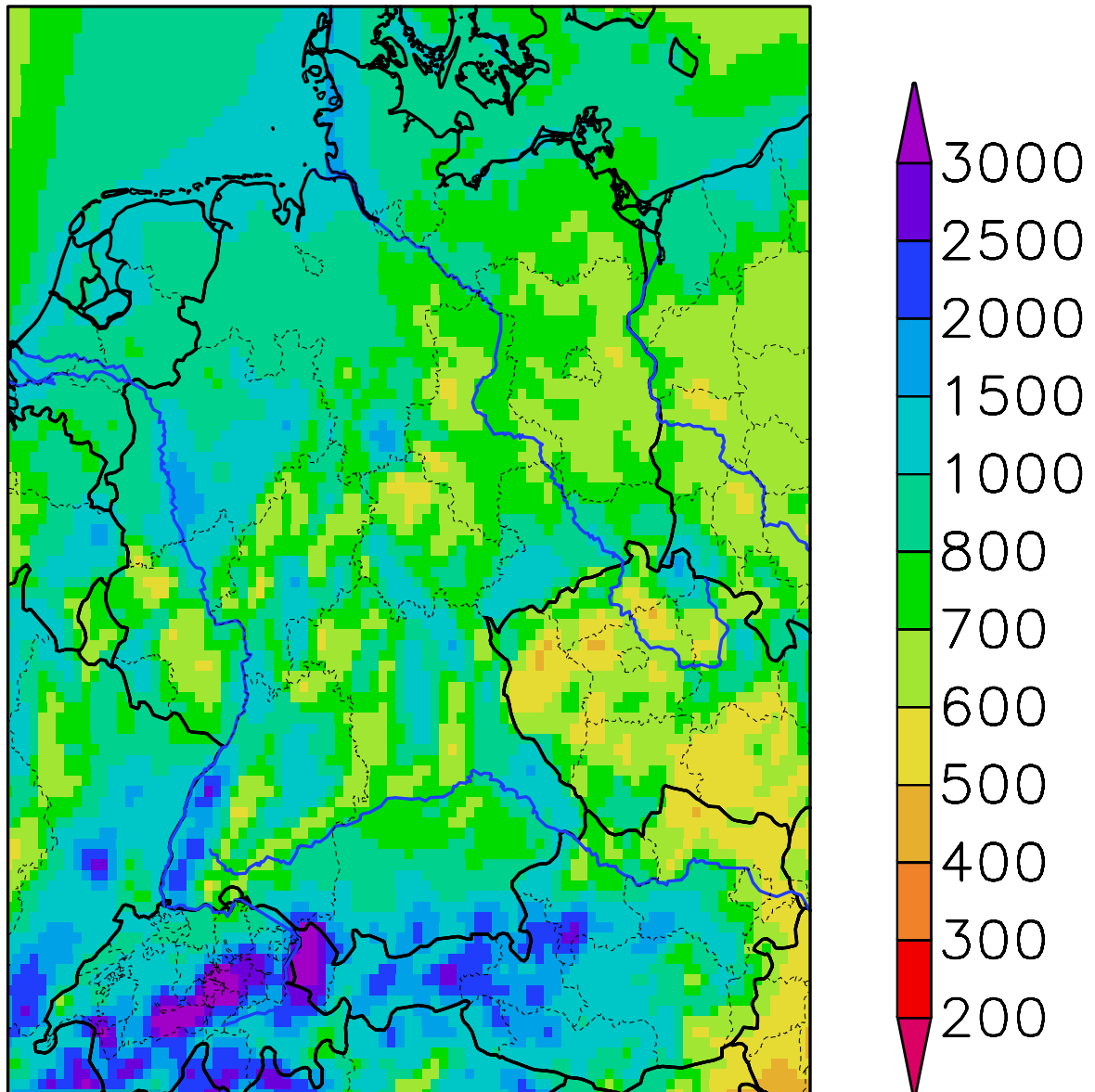


Abb. 58: Kartendarstellung der mittleren Jahresniederschlagssummen [mm/Jahr] für die Zukunftsperiodeperiode von 2071-2100 für das A1B Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

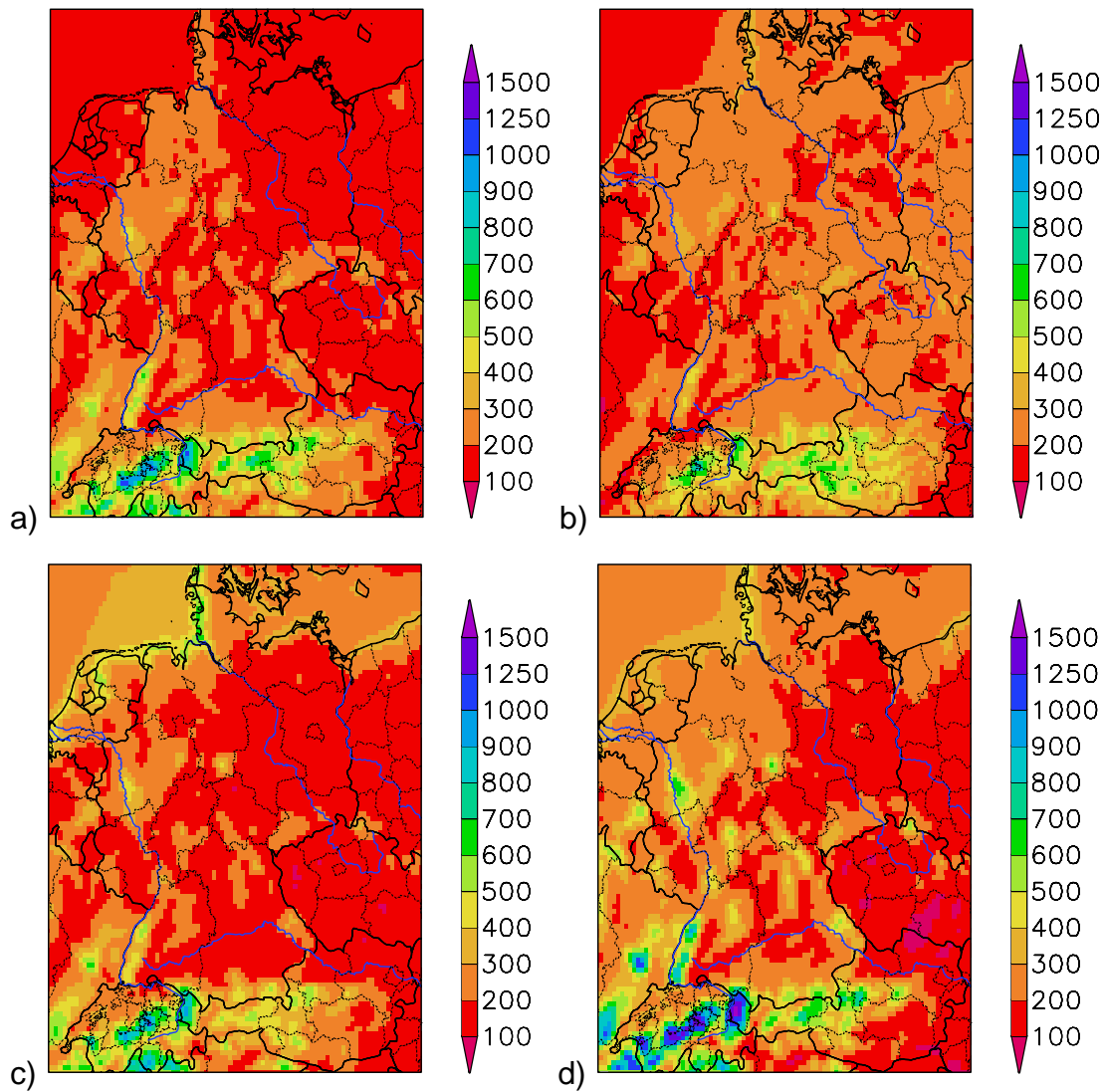


Abb. 59: Kartendarstellung der mittleren saisonalen Niederschlagssummen [mm/Saison] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A1B Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

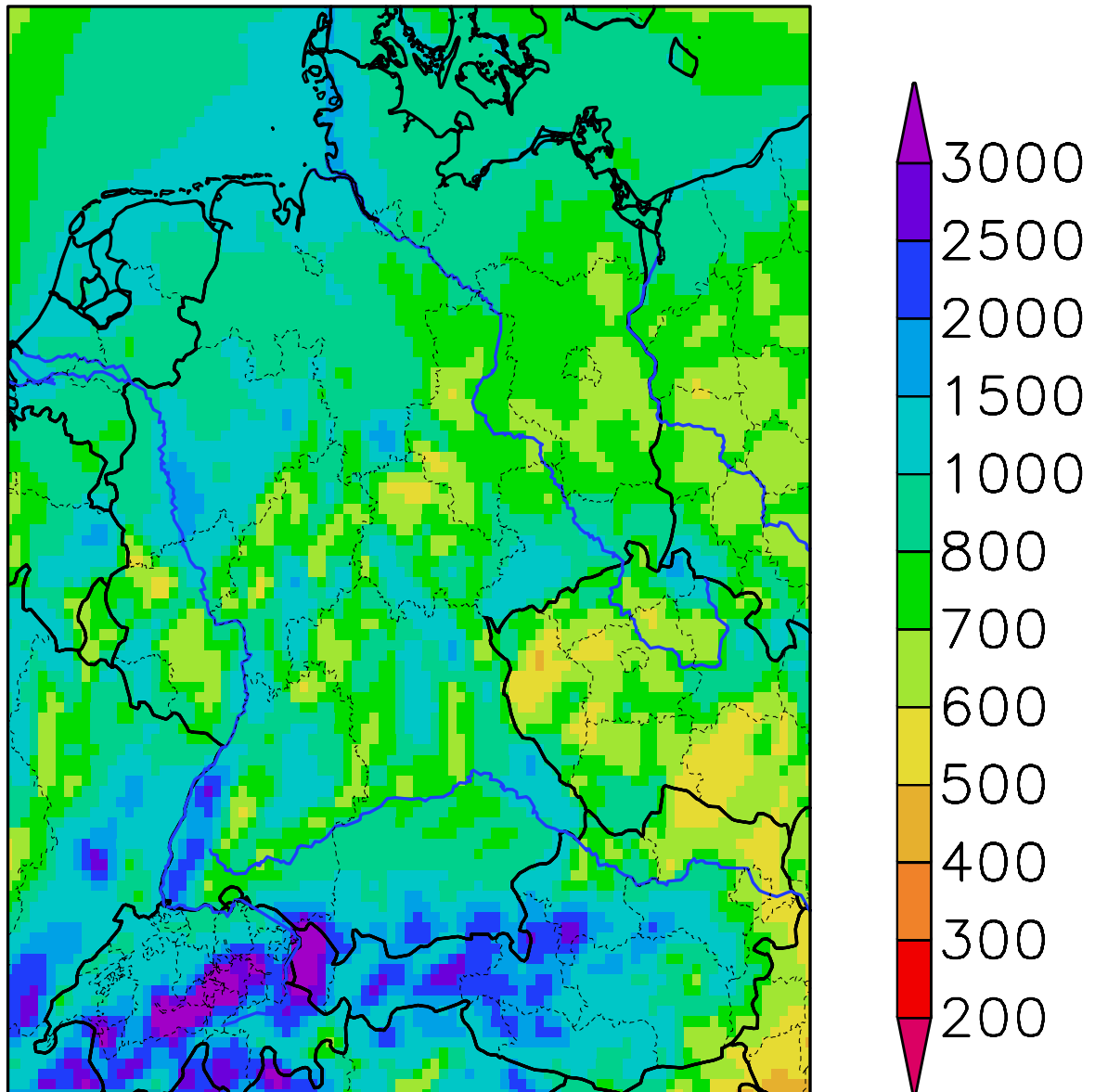


Abb. 60: Kartendarstellung der mittleren Jahresniederschlagssummen [mm/Jahr] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das B1 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

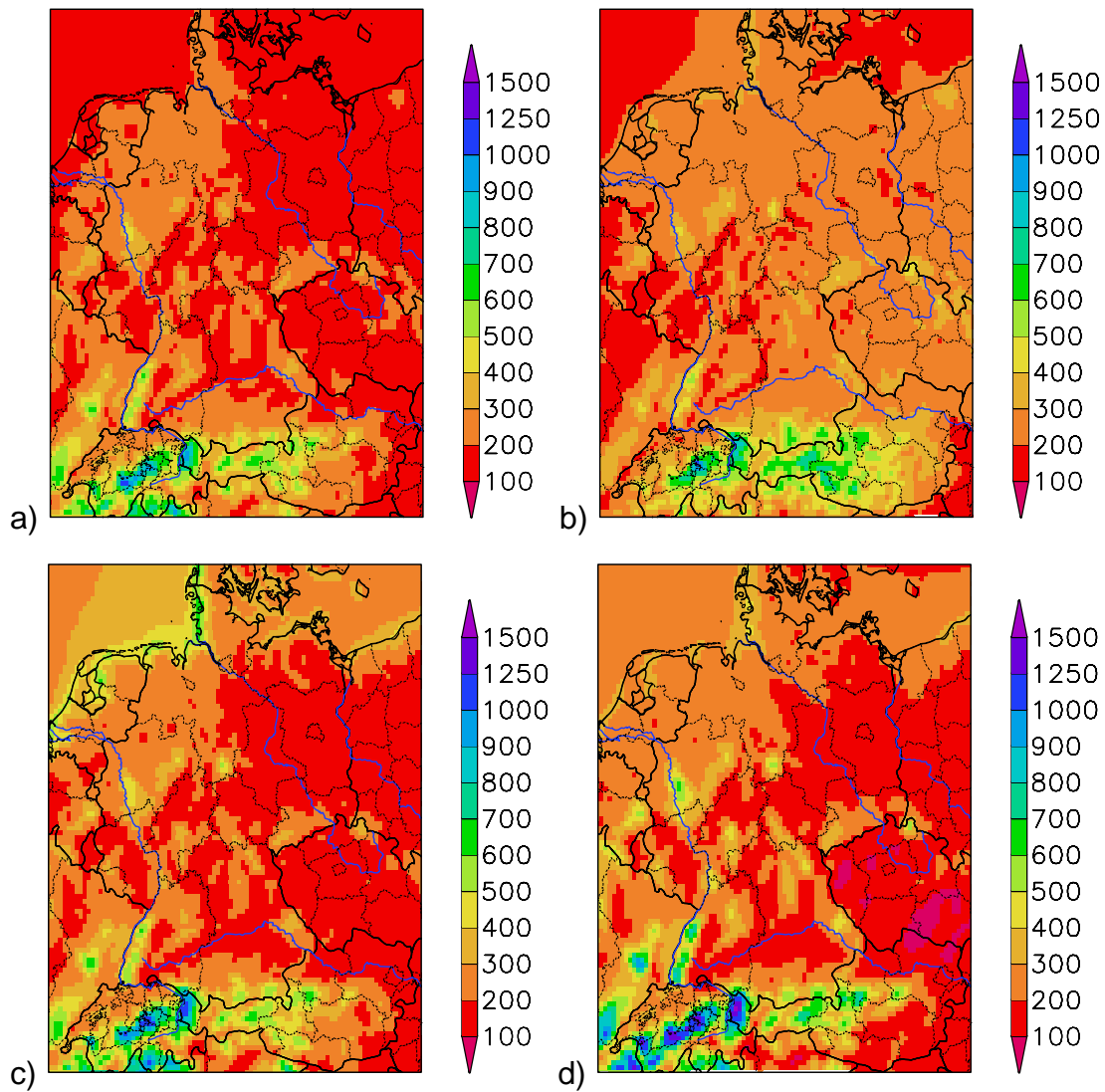


Abb. 61: Kartendarstellung der mittleren saisonalen Niederschlagssummen [mm/Saison] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das B1 Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

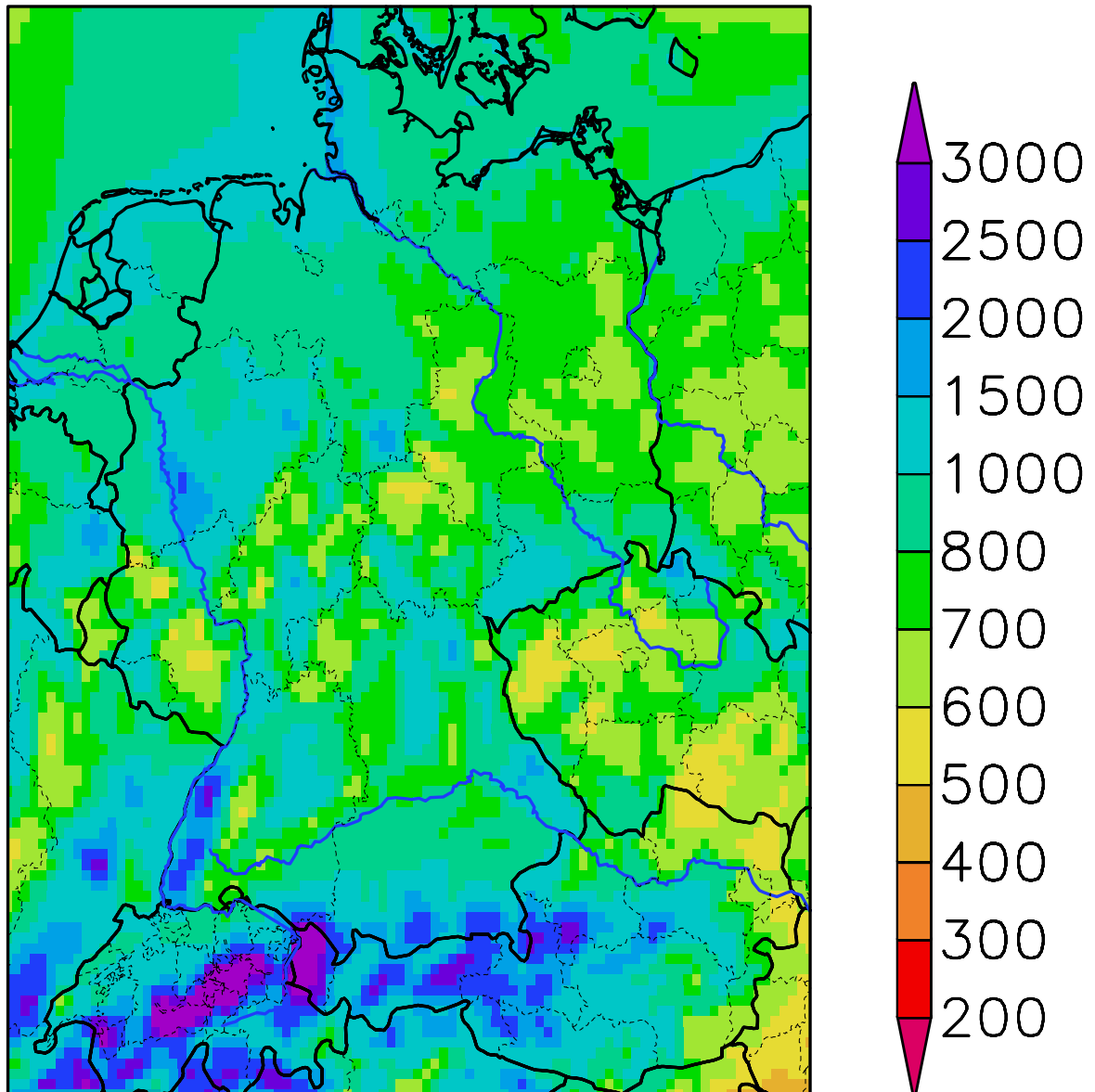


Abb. 62: Kartendarstellung der mittleren Jahresniederschlagssummen [mm/Jahr] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

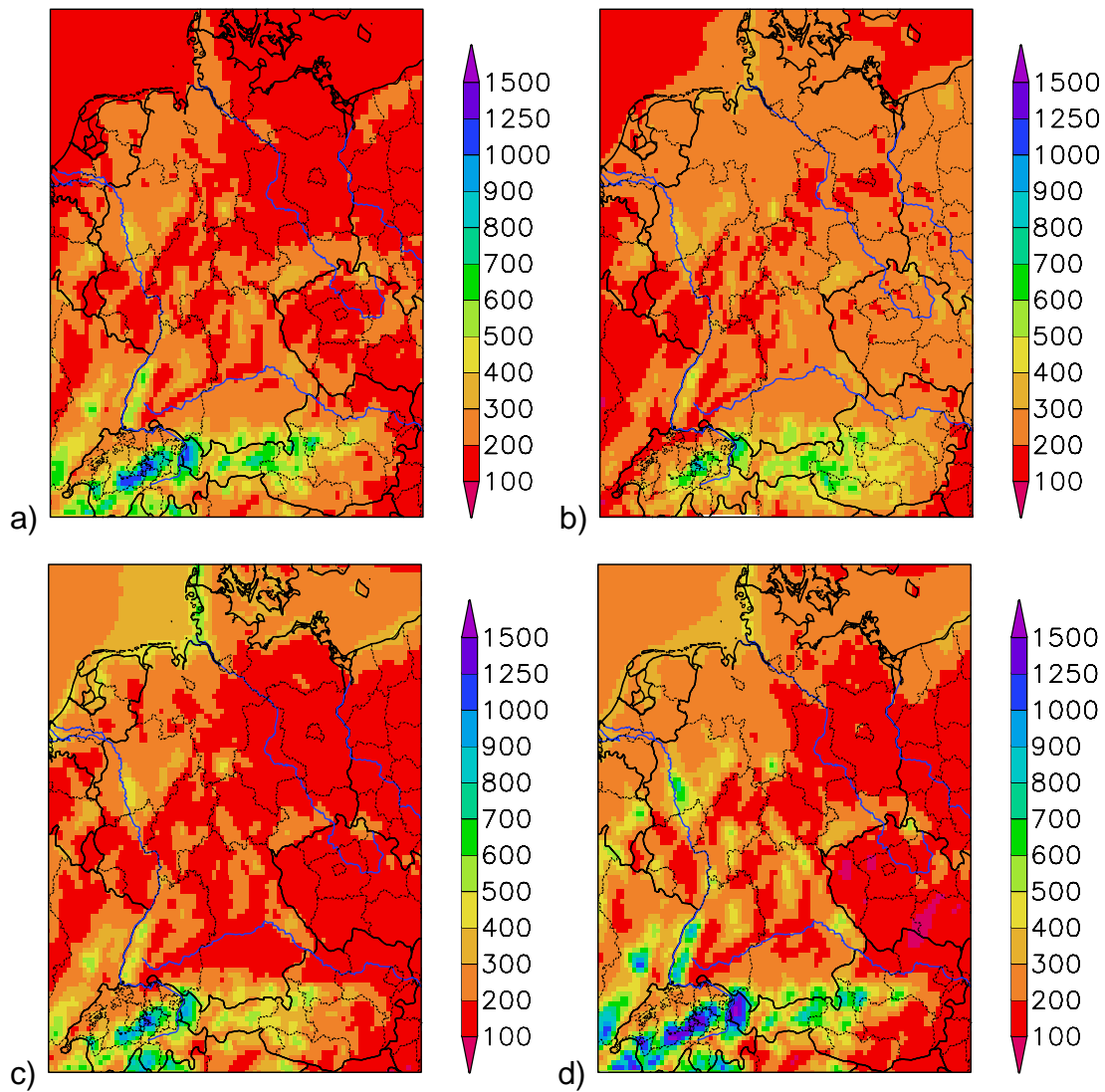


Abb. 63: Kartendarstellung der mittleren saisonalen Niederschlagssummen [mm/Saison] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 für das A2 Szenario. a) Frühjahr, b) Sommer, c) Herbst, d) Winter. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

Prozentuale Niederschlagsänderung

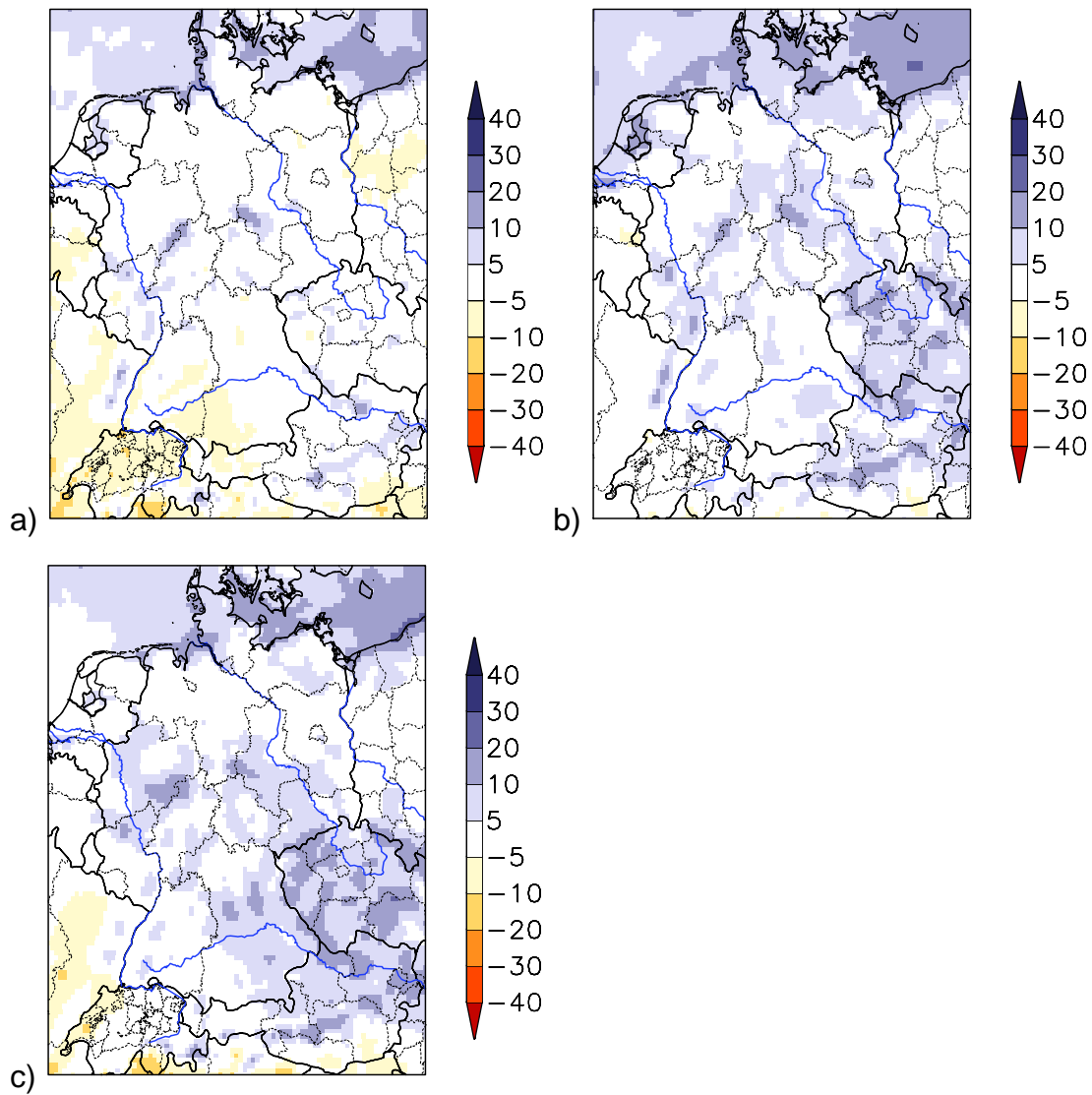


Abb. 64: Kartendarstellung der mittleren relativen Jahresniederschlagsänderung [%] für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

Prozentuale Niederschlagsänderung

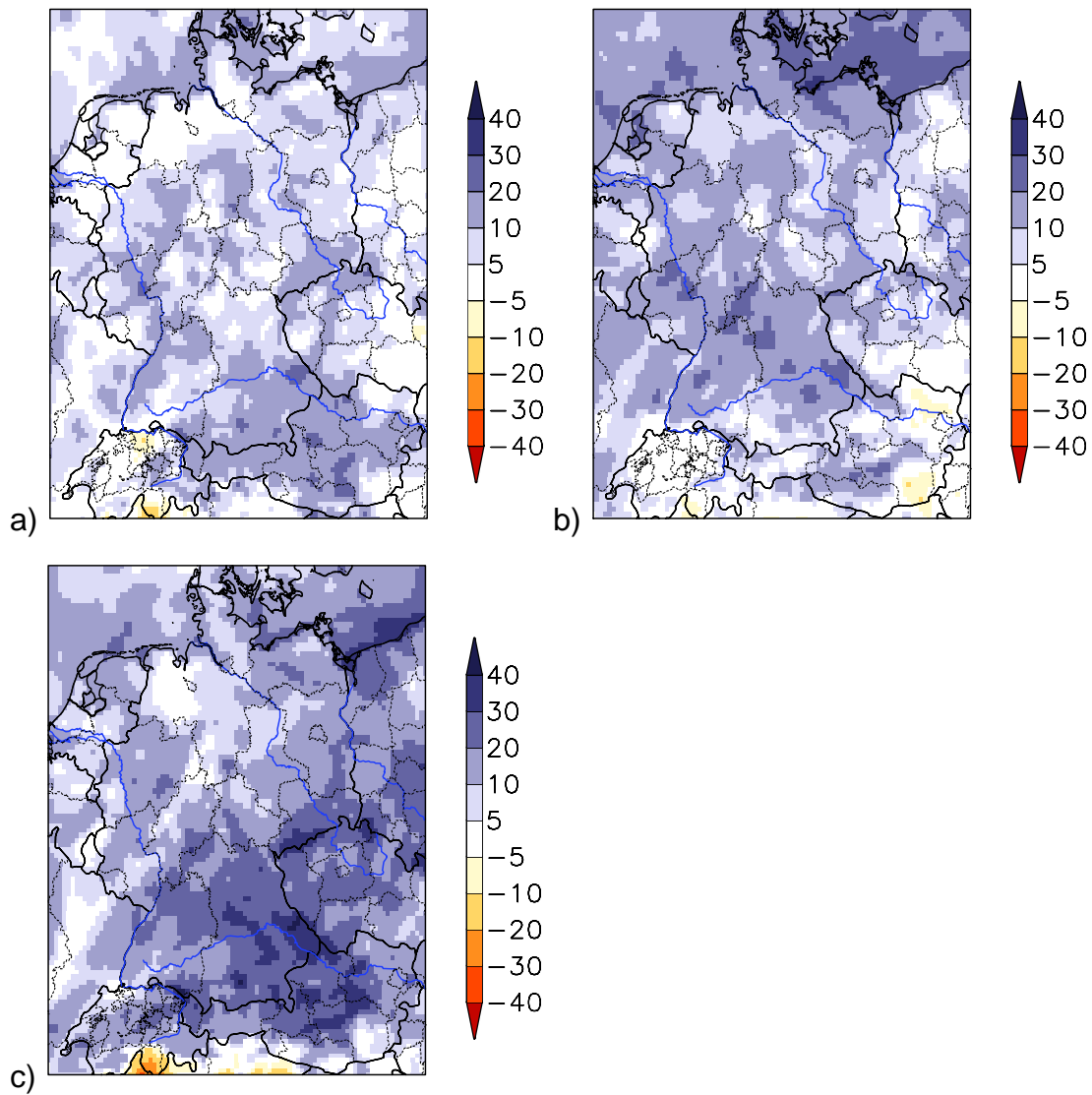


Abb. 65: Kartendarstellung der mittleren relativen Niederschlagsänderung [%] im Frühjahr für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

Prozentuale Niederschlagsänderung

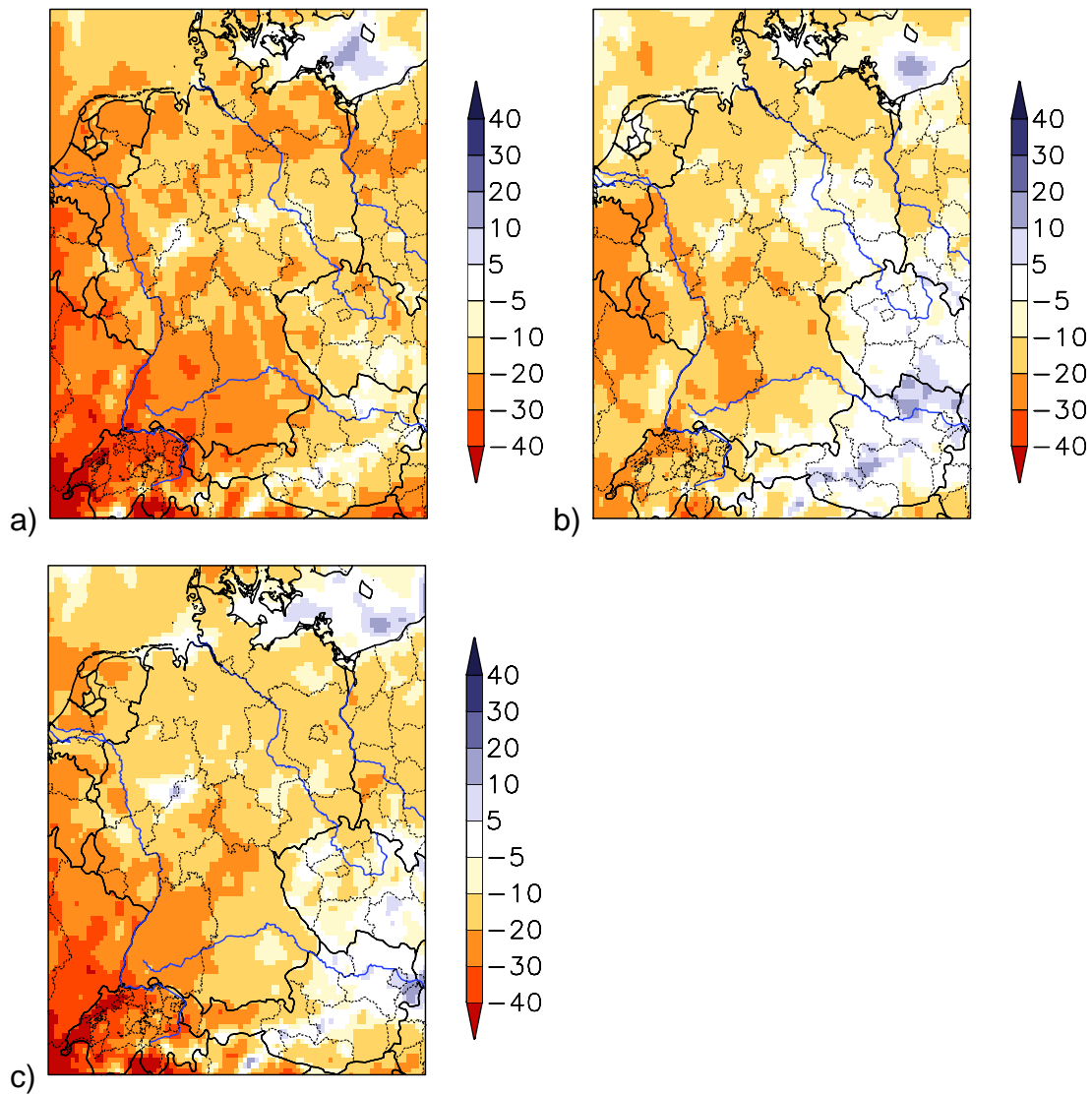


Abb. 66: Kartendarstellung der mittleren relativen Niederschlagsänderung [%] im Sommer für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

Prozentuale Niederschlagsänderung

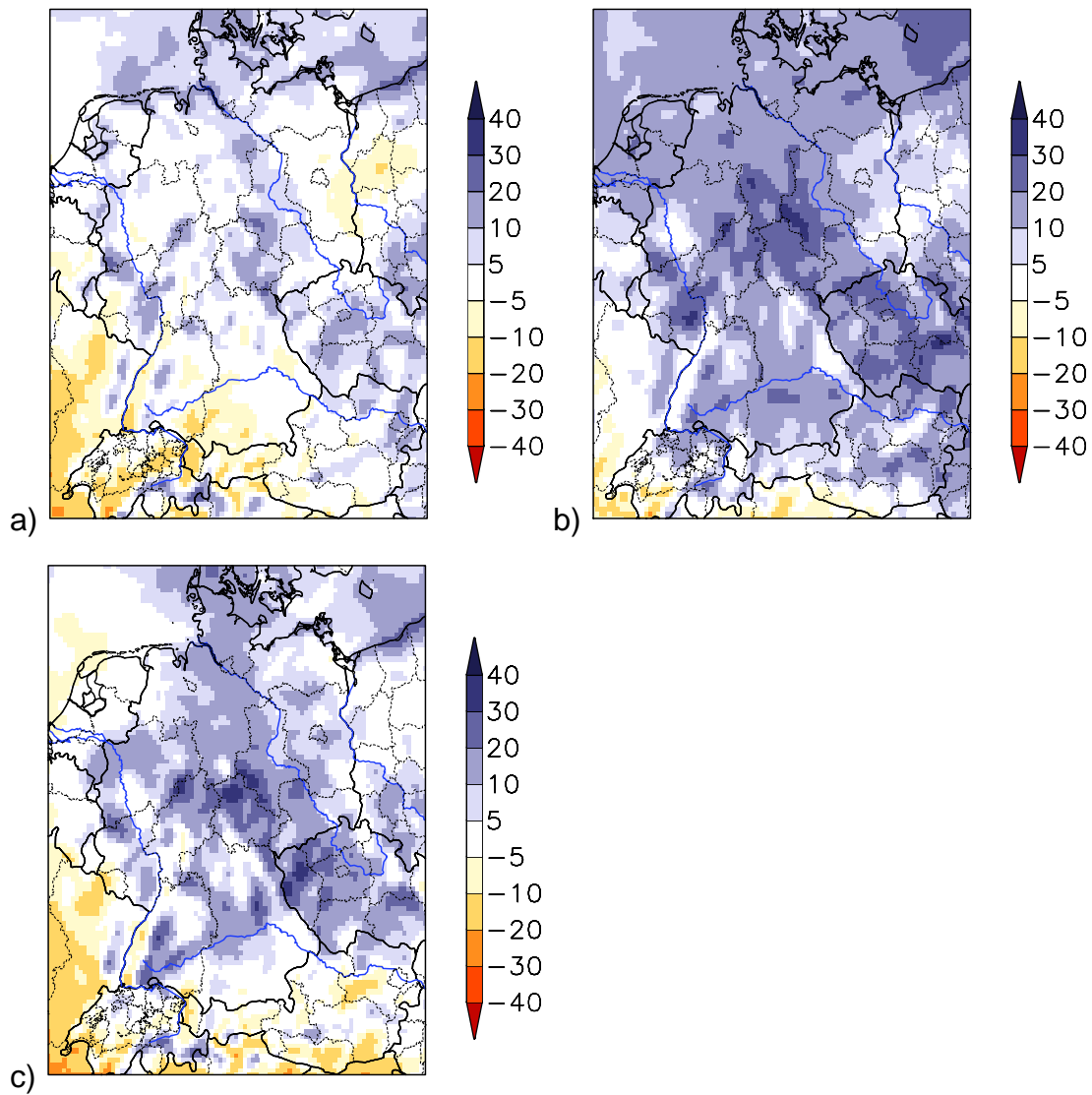


Abb. 67: Kartendarstellung der mittleren relativen Niederschlagsänderung [%] im Herbst für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

Prozentuale Niederschlagsänderung

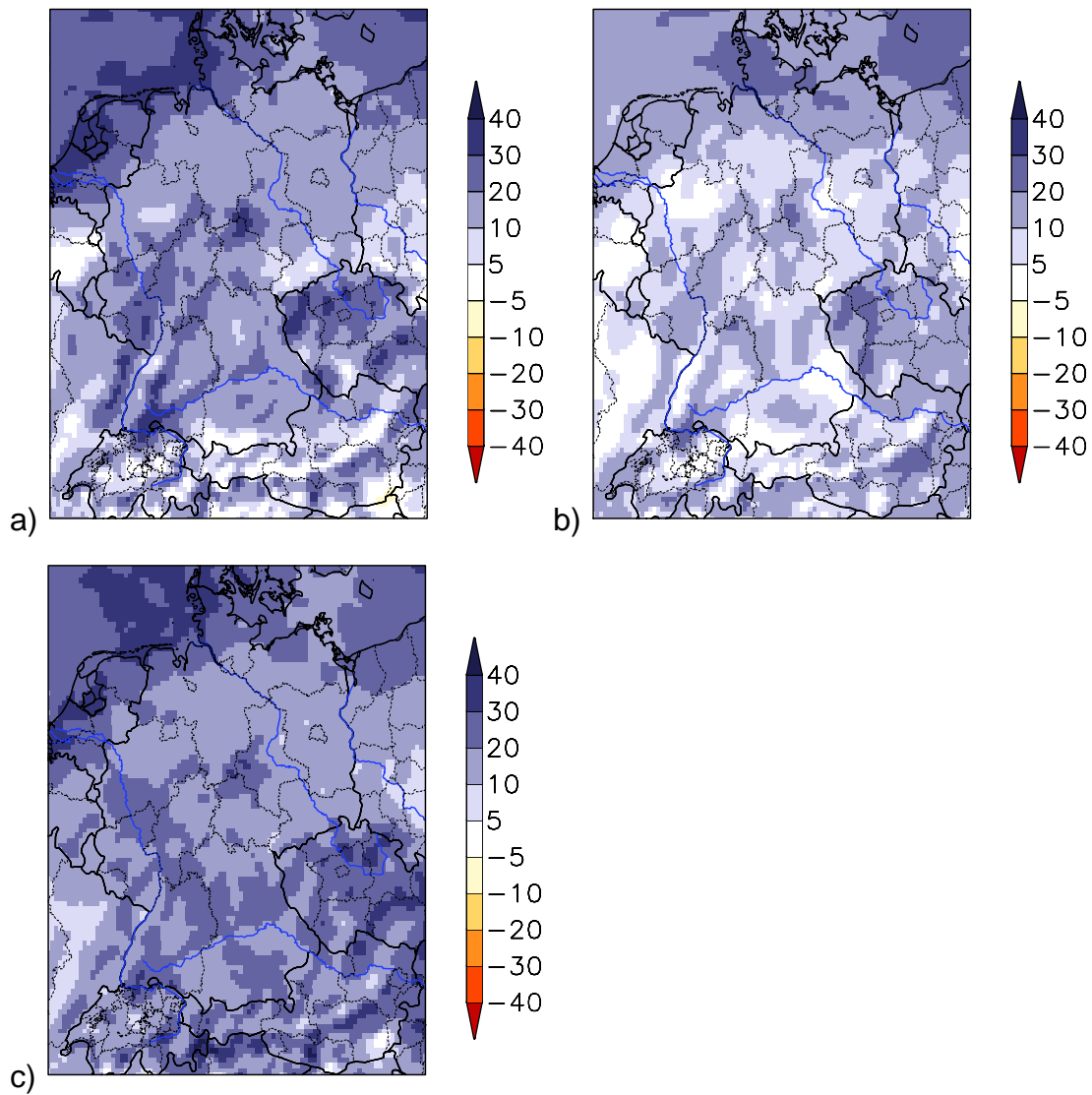


Abb. 68: Kartendarstellung der mittleren relativen Niederschlagsänderung [%] im Winter für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

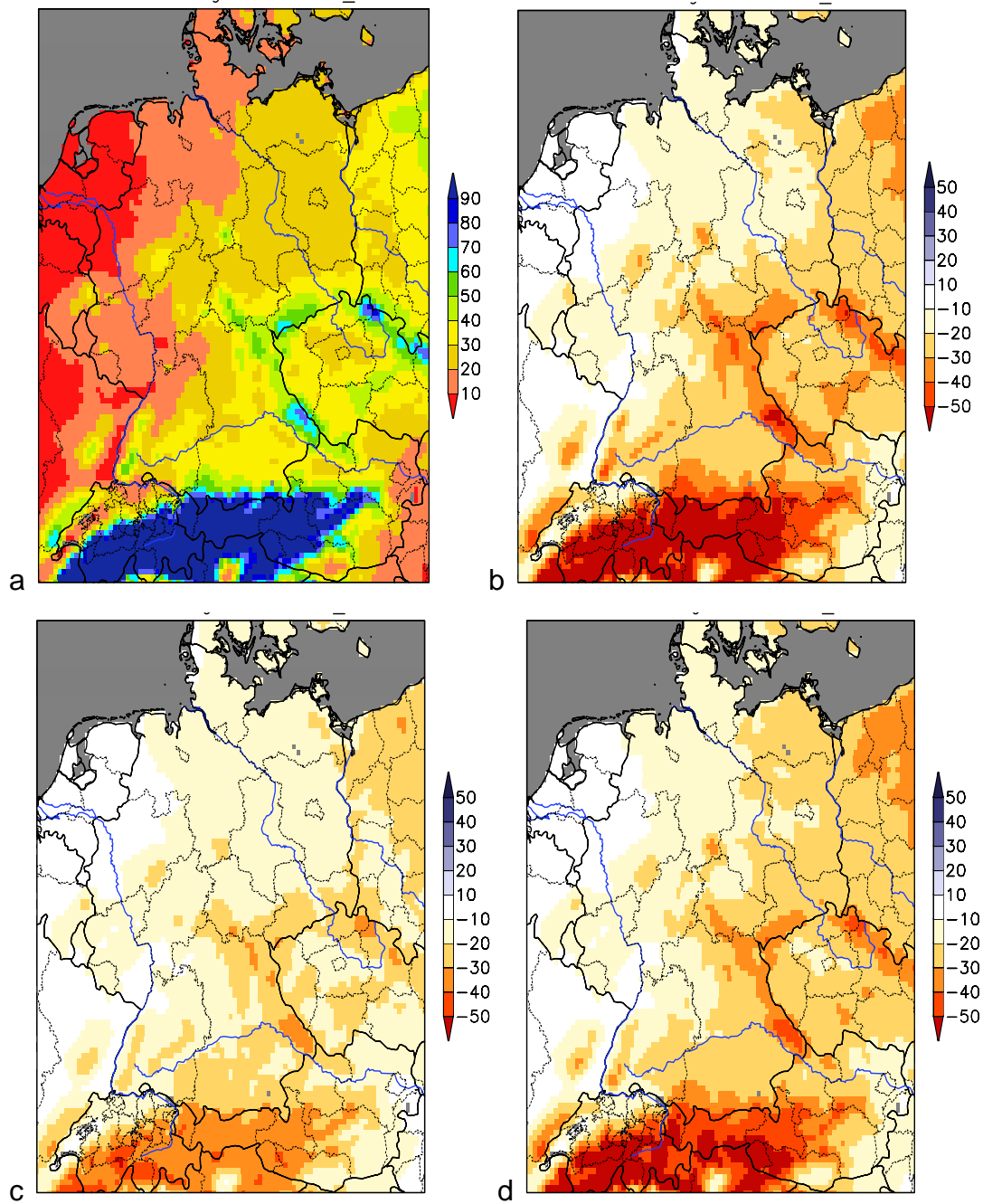


Abb. 69: Kartendarstellung der Anzahl der Tage pro Jahr mit Schneebedeckung für den Zeitraum 1961-1990 (KNP) (a), sowie die Änderung dieser Größe für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für b) das A1B Szenario, c) das B1 Szenario und d) das A2 Szenario. Gitterboxen mit einem Wasseranteil über 50 % sind grau ausmaskiert. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

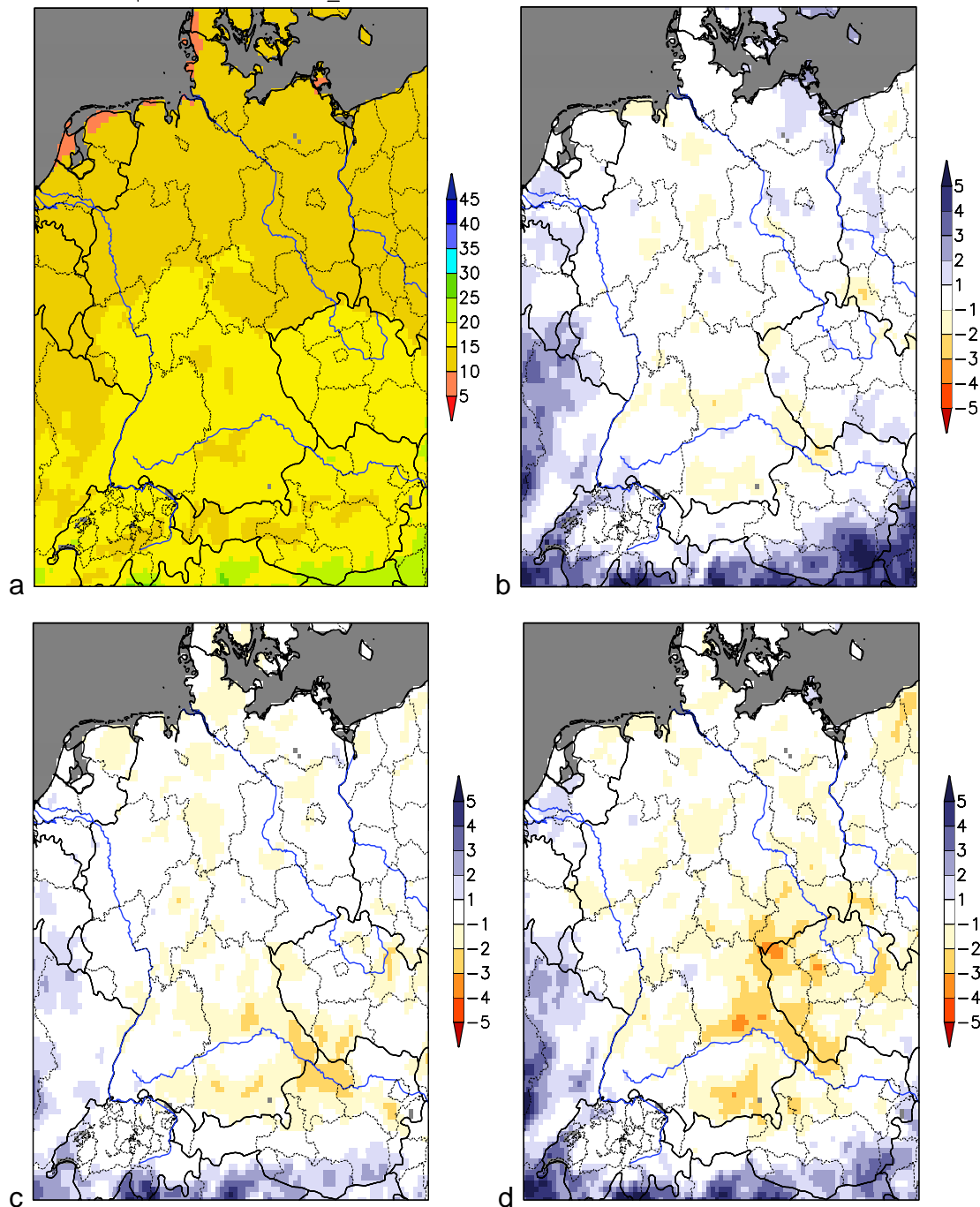


Abb. 70: Kartendarstellung der Länge der längsten Trockenperiode⁶ je Jahr (Anzahl der Tage) für den Zeitraum 1961-1990 (KNP) (a), sowie die Änderung dieser Größe für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für b) das A1B Szenario, c) das B1 Szenario und d) das A2 Szenario. Gitterboxen mit einem Wasseranteil über 50 % sind grau ausmaskiert. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

⁶ Zusammenhängende Anzahl von Tagen mit Niederschlagsschwellwert < 0.1 mm/Tag

Indizes: Nasse Tage

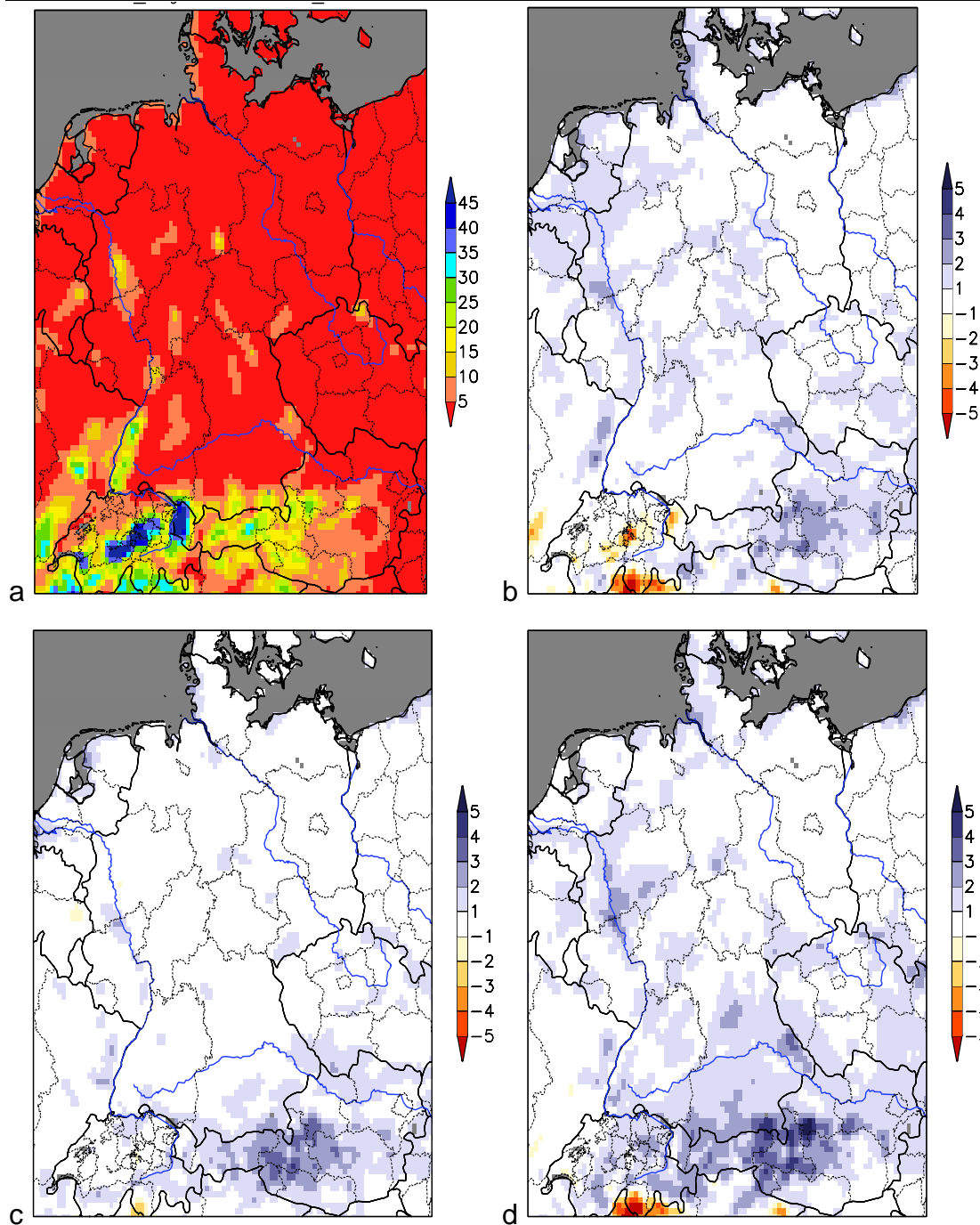


Abb. 71: Kartendarstellung der Anzahl der „Nassen Tage“⁷ pro Jahr für den Zeitraum 1961-1990 (KNP) (a), sowie die Änderung dieser Größe für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für b) das A1B Szenario, c) das B1 Szenario und d) das A2 Szenario. Gitterboxen mit einem Wasseranteil über 50 % sind grau ausmaskiert. Die Darstellung erfolgte mit einem 9-Punktefilter.

⁷ Anzahl Tage/Jahr mit Niederschlagsschwellwert > 25 mm/Tag

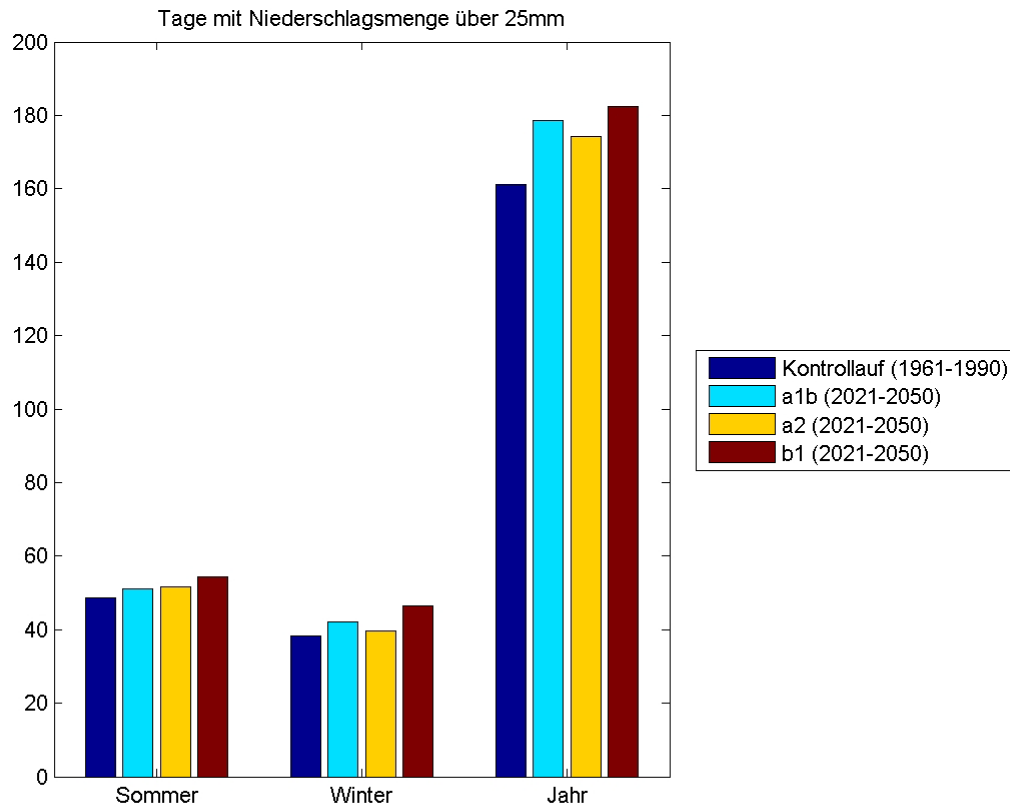


Abb. 72: Gesamtzahl der nassen Tage (Modellgebietsmittel) pro 30 Jahre für den Zeitraum 1961-1990 (blau) und für den Zeitraum 2021-2050 des A1B (hellblau), A2 (gelb) und B1-Szenarios (braun). links: Sommer (JJA), mitte: Winter (DJF) und rechts: Jahr

Indizes: Nasse Tage

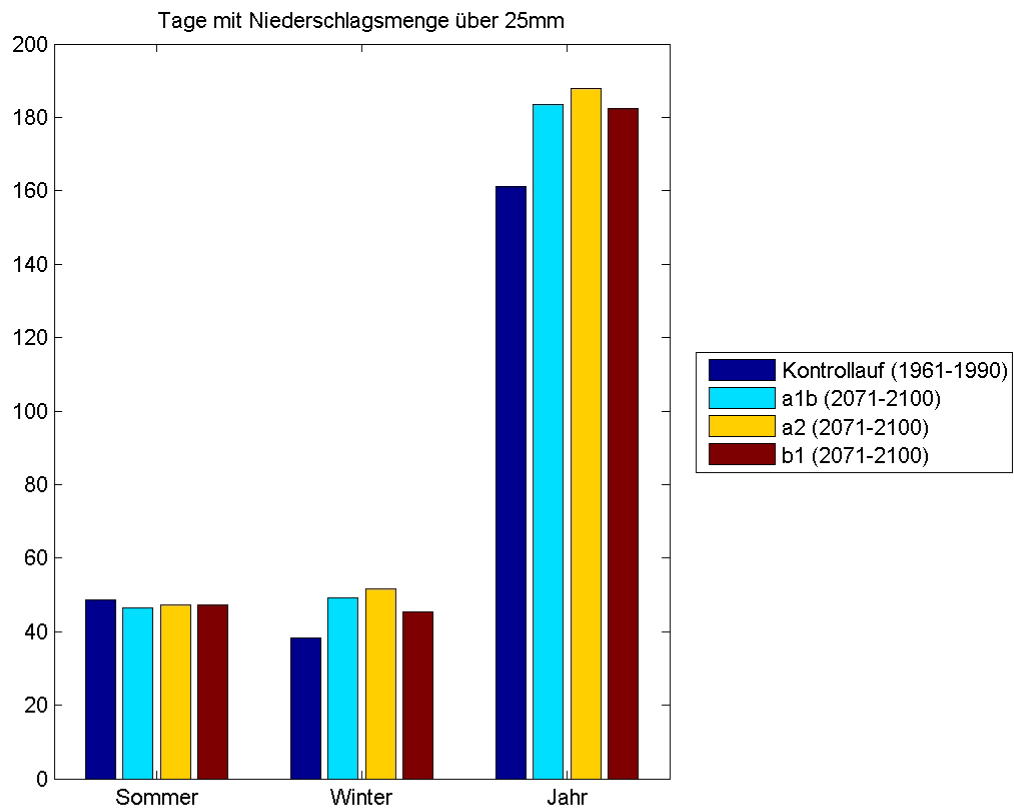


Abb. 73: Anzahl der nassen Tage (Modellgebietsmittel) pro 30 Jahre für den Zeitraum 1961-1990 (blau) und für den Zeitraum 2071-2100 des A1B (hellblau), A2 (gelb) und B1-Szenarios (braun). links: Sommer, mitte: Winter und rechts: Jahr

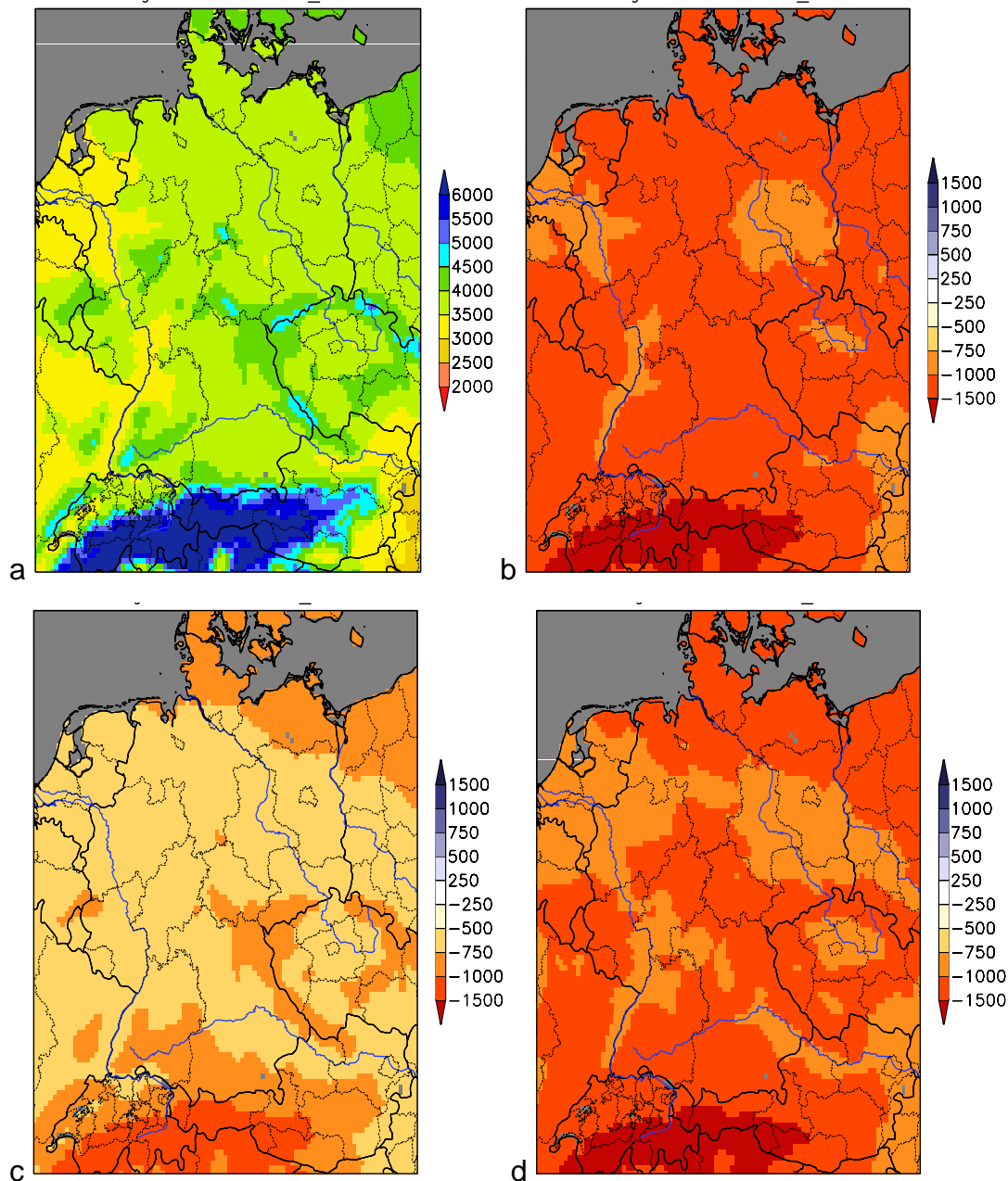


Abb. 74: Kartendarstellung der Gradtagszahl⁸ für den Zeitraum 1961-1990 (KNP) (a), sowie die Änderung dieser Größe für die Zukunftsperiode von 2071-2100 gegenüber der KNP von 1961-1990 für b) das A1B Szenario, c) das B1 Szenario und d) das A2 Szenario. Gitterboxen mit einem Wasseranteil über 50 % sind grau ausmaskiert.

⁸ $\sum_{t_a} 20^{\circ}\text{C} - t_a \forall t_a < 15^{\circ}\text{C}$, t_a Außentemperatur

Indizes: Sommer- und heiße Tage

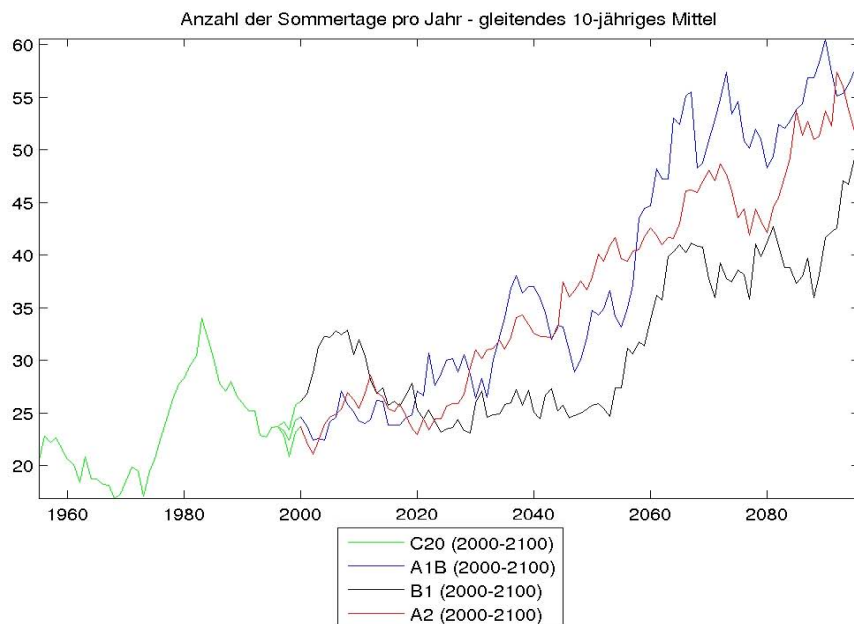


Abb. 75: Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Sommertage⁹ pro Jahr für den Kontrolllauf und die 3 verschiedenen Szenarien (A1B, B1, A2). Dargestellt ist jeweils das Modellgebietsmittel als 10-jähriges gleitendes Mittel.

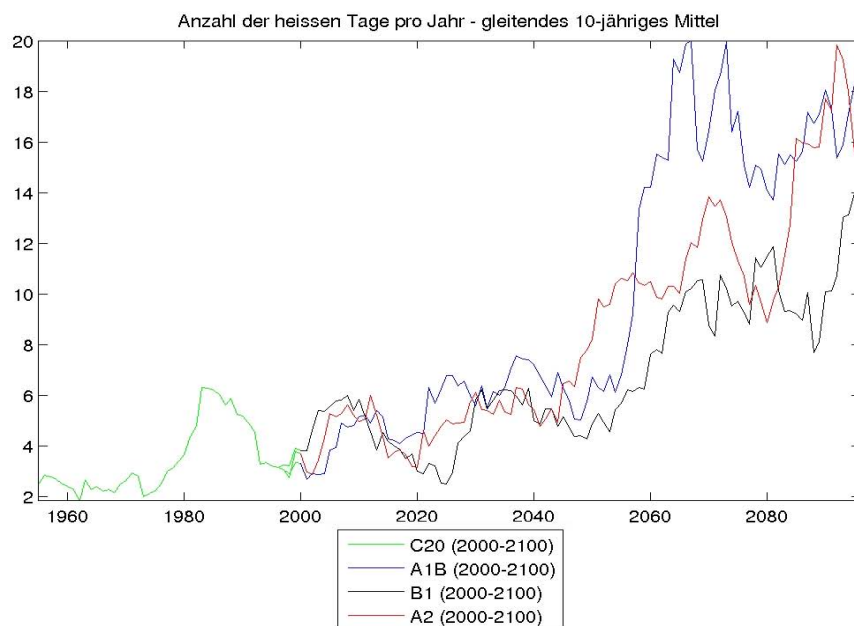
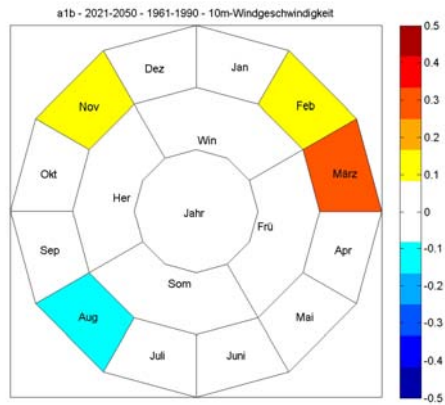


Abb. 76: Zeitlicher Verlauf der Anzahl der heißen Tage¹⁰ pro Jahr für den Kontrolllauf und die 3 verschiedenen Szenarien (A1B, B1, A2). Dargestellt ist jeweils das Modellgebietsmittel als 10-jähriges gleitendes Mittel.

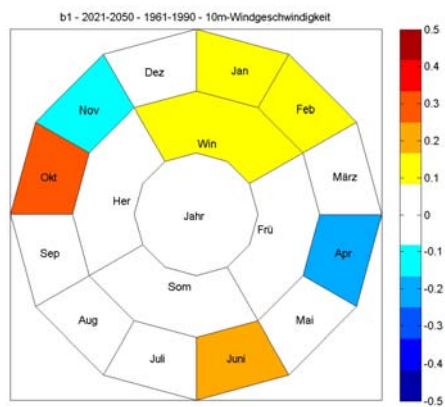
⁹ Tagesmaximumtemperatur > 25° C

¹⁰ Tagesmaximumtemperatur > 30° C

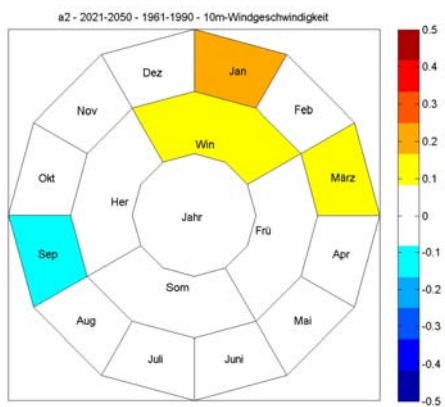
Ringdiagramme



a)



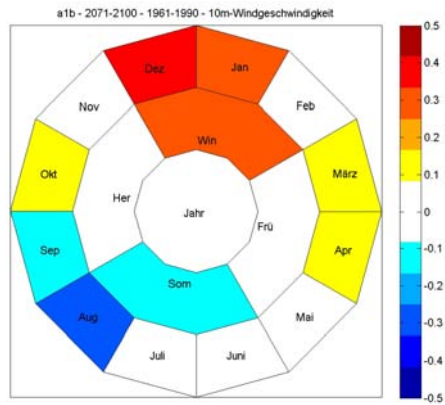
b)



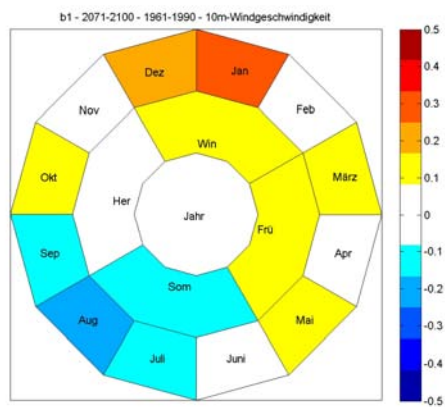
c)

Abb. 77: Schematische Darstellung der Änderung des Winds [m/s] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario

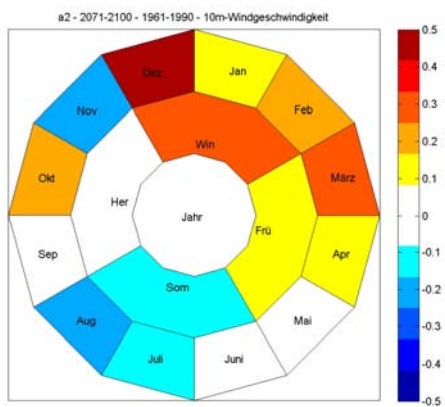
Ringdiagramme



a)



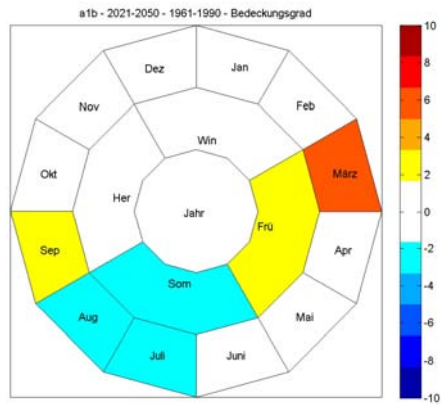
b)



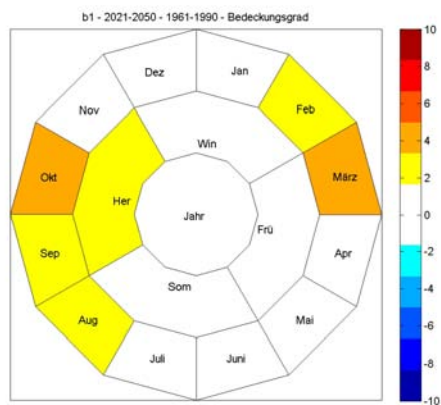
c)

Abb. 78: Schematische Darstellung der Änderung des Winds [m/s] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2071-2100 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario

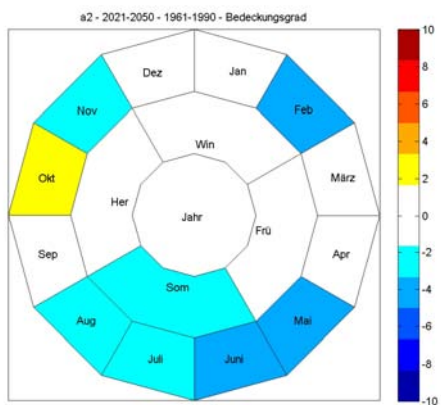
Ringdiagramme



a)



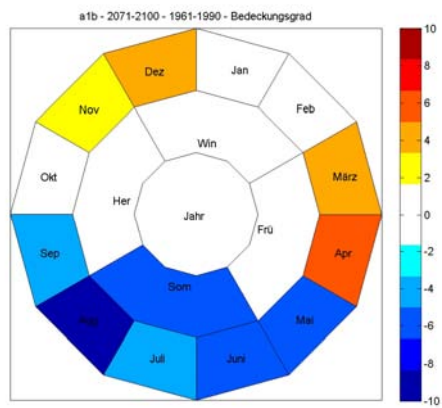
b)



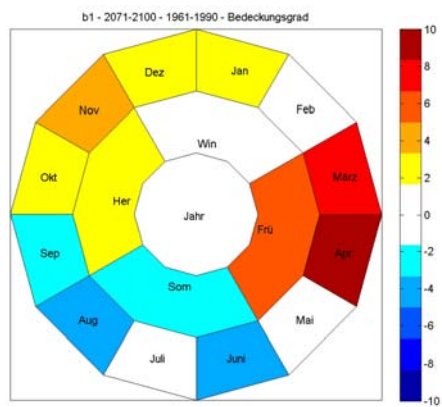
c)

Abb. 79: Schematische Darstellung der Änderung der Wolkenbedeckung [%] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2021-2050 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario

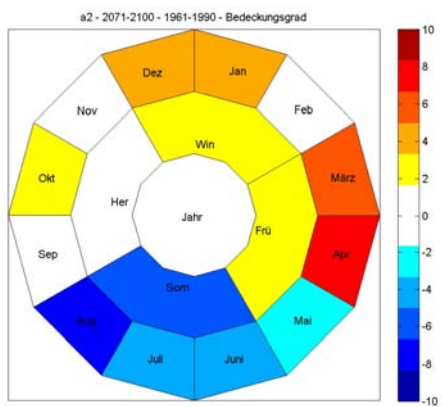
Ringdiagramme



a)



b)



c)

Abb. 80: Schematische Darstellung der Änderung der Wolkenbedeckung [%] (Gebietsmittel über Deutschland) zwischen dem Zeitraum 2071-2100 gegenüber der Klimanormalperiode 1961-1990 auf jährlicher, saisonaler und monatlicher Basis für a) das A1B Szenario, b) das B1 Szenario und c) das A2 Szenario

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Die im Rahmen dieses Projektes entstandenen Daten stehen interessierten Nutzern nach Unterzeichnung einer Nutzungsvereinbarung kostenlos in Form verschiedener Datensätze online in der CERA-Datenbank zur Verfügung. Die Metadaten für diese Datensätze können auf dem Onlinezugang zur CERA-Datenbank unter <http://cera-www.dkrz.de> eingesehen werden. Der Zugang zu den Daten selbst kann mit einer e-mail an remo-daten@dkrz.de beantragt werden. Alle Datenzugangsanfragen werden am World Data Center for Climate (WDCC) gebündelt. Anfragen an das Umweltbundesamt (UBA) und an das Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) werden an das WDCC weitergeleitet. Das WDCC informiert über das weitere Zugangsverfahren.

Die Eigenschaften der verschiedenen Datensätze werden im Folgenden kurz beschrieben. Eine Auflistung der in den jeweiligen Datensätzen enthaltenen Variablen folgt im nächsten Abschnitt in den Codelisten:

Die **REMO-UBA Datenstrom 1 Daten** liegen auf dem Modellgitter (rotiertes Koordinatensystem) vor und enthalten die vom Modell erzeugten 2-dimensionalen Ergebnisdateien in stündlicher Auflösung als monatliche Zeitreihen sowie als Monatsmittel.

Der **REMO-UBA Datenstrom 2 Datensatz** enthält zusätzlich abgeleitete Größen aus dem Datenstrom 1, wie Kennzahlen, Extremwerte und Indizes. Die abgeleiteten Größen sind wiederum auf dem Modellgitter in der Datenbank gespeichert. Die zeitliche Auflösung ist variablenabhängig.

In **REMO-UBA Datenstrom 3** wurden die Daten von der Service-Gruppe Anpassung (SGA) auf ein reguläres geographisches Gitter interpoliert („entrotiert“). Enthalten sind Teile der REMO-Ausgabevariablen sowie zusätzlich abgeleitete Größen. Die zeitliche Auflösung ist variablenabhängig.

Die technischen Eigenschaften der verschiedenen Datensätze werden in der folgenden Tabelle zusammengefaßt:

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Datensatz	Zeitliche Auflösung		Projektion	Format
REMO-UBA Datenstrom 1	1-stündlich monatsmittel	und	Modellgitter Gitter in einem rotierten Koordinatensystem)	(0.088° IEG
REMO-UBA Datenstrom 2	1-stündlich jährlich (variablenabhängig)	bis	Modellgitter Gitter in einem rotierten Koordinatensystem)	(0.088° IEG
REMO-UBA Datenstrom 3	1-stündlich jährlich (variablenabhängig)	bis	Interpoliert reguläres 0.1° Gitter	auf ein Netcdf

Die folgenden Codelisten enthalten Informationen über die verschiedenen in den jeweiligen Datensätzen enthaltenen Variablen.

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Remo Datenstrom 1:

Acronym	Beschreibung	Einheit
ACLCOV	total cloud cover	fraction
ACLCV	total cloud cover	fraction
AHFICE	sea-ice: conductive heat	W/m
AHFL	surface latent heat flux	W/m**2
AHFS	surface sensible heat flux	W/m**2
ALB	background albedo	fraction
ALBEDO	surface albedo	fraction
ALSOI	surface albedo (ice)	fraction
ALSOL	surface albedo (land)	fraction
ALSOW	surface albedo (water)	fraction
ALWCVI	vertically integrated liquid water cont.	kg/m**2
APRC	convective precipitation	kg/m**2
APRL	large scale precipitation	kg/m**2
APRS	snow fall	kg/m**2
APS	surface pressure	Pa
AZ0	surface roughness length	m
AZ0I	surface roughness length (ice)	m
AZ0L	surface roughness length (land)	m
AZ0W	surface roughness length (water)	m
BETA	Beta-Parameter due to subgrid capacity distribution	not filled
BFLHS	surface sensible heat flux	W/m**2
BFLHSI	surface sensible heat flux (ice)	W/m**2
BFLHSL	surface sensible heat flux (land)	W/m**2
BFLHSW	surface sensible heat flux (water)	W/m**2
BFLQDS	surface latent heat flux	W/m**2
BFLQDSI	surface latent heat flux (ice)	W/m**2
BFLQDSL	surface latent heat flux (land)	W/m**2
BFLQDSW	surface latent heat flux (water)	W/m**2
DEW2	2m dew point temperature	K
DLAMBDA	parameter for increasing the heat conductivity of the soil due to soil moisture (TLAMBDA+DLAMBDA gives the heat conductivity of saturated soil)	not filled
DRAIN	drainage (as part of runoff)	kg/m**2/h
DSNAC	snow depth change	kg/m**2
EKBOXS	horizontal transport of kinetic energy	3600*J/m**2

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Acronym	Beschreibung	Einheit
EVAP	surface evaporation	kg/m**2
EVAPI	surface evaporation (ice)	kg/m**2
EVAPL	surface evaporation (land)	kg/m**2
EVAPW	surface evaporation (water)	kg/m**2
FAO	FAO data set (soil data flags)	No.
FHBOXS	horizontal transport of sensible heat	3600*J/m**2
FIBOXS	horizontal transport of potential energy	3600*J/m**2
FOREST	vegetation type	dimensionless
GEOSP	surface geopotential (orography)	m
		m**2 second**-
GHPBL	(boundary layer depth [m**2/s**2] (gpm))	2
GLAC	glacier mask	No.
GPH	geopotential height	gpm
PHI	latitude of each gridpoint	degree
PORVOL	pore volume	fraction
PSRED	mean sea level pressure	Pa
Q	specific humidity	kg/kg
QDB	specific humidity at surface	kg/kg
QDBI	specific humidity surface (ice)	kg/kg
QDBL	specific humidity surface (land)	kg/kg
QDBOXS	horizontal transport of water vapour	kg/m**2
QDBW	specific humidity surface (water)	kg/kg
QRES	residual heat flux for melting sea ice	W/m**2
QVI	vertically integrated specific humidity	kg/m**2
QWBOXS	horizontal transport of cloud water	kg/m**2
		Joule m**-3
RGCGN	heat capacity of soil	K**-1
RLA	longitude of each gridpoint	degree
RUNOFF	surface runoff	kg/m**2
SEAICE	sea ice cover	fraction
SICED	sea ice depth	m
SLM	land sea mask	fraction
SN	snow depth	m
SNMEL	snow melt	kg/m**2
SRAD0	net top solar radiation	W/m**2
SRAD0U	top solar radiation upward	W/m**2
SRADS	net surface solar radiation	W/m**2
SRADSU	surface solar radiation upward	W/m**2

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Acronym	Beschreibung	Einheit
STP	temperature	K
SX	liquid water content	kg/kg
T2MAX	maximum 2m-temperature	K
T2MIN	minimum 2m-temperature	K
TCLF0	top thermal cloud forcing	W/m**2
TCLFS	surface thermal cloud forcing	W/m**2
TD	deep soil temperature	K
TD3	soil temperature	K
TD4	soil temperature	K
TD5	soil temperature	K
TDCL	soil temperature	K
TEFF	(effective) sea-ice skin temperature	K
TEMP2	2m temperature	K
		Watt K**-1 m**-
TLAMBDA	heat conductivity of dry soil	1
TOPMAX	maximum height of convective cloud tops	Pa
TRAD0	top thermal radiation (OLR)	W/m**2
TRADS	net surface thermal radiation	W/m**2
TRADSU	surface thermal radiation upward	W/m**2
TRAF0	net top thermal radiation (clear sky)	W/m**2
TRAFS	net surf. thermal radiation (clear sky)	W/m**2
TS	surface temperature	K
TSI	surface temperature (ice)	K
TSL	surface temperature (land)	K
TSLIN	land: residual surface heat budget, sea-ice: conductive heat flux	W/m**2
TSMAX	maximum surface temperature	K
TSMIN	minimum surface temperature	K
TSN	snow temperature	K
TSURF	surface temperature	K
TSW	surface temperature (water)	K
U	u-velocity	m/s
U10ER	10m u-velocity, wind coponents are -de-rotated- comparable to observations	m/s
U10M	10m u-velocity, wind coponents are -rotated-, not directly comparable with observations	m/s
USTAR3	ustar**3	m**3/s**3
USTR	surface u-stress	Pa
USTRI	surface u-stress (ice)	Pa

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Acronym	Beschreibung	Einheit
USTRL	surface u-stress (land)	Pa
USTRW	surface u-stress (water)	Pa
V	v-velocity	m/s
V10ER	10m v-velocity, wind coponents are -de-rotated- comparable to observations	m/s
V10M	10m v-velocity, wind coponents are -rotated-, not directly comparable with observations	m/s
VAROR	orographic variance (for surface runoff)	gpm**2
VBM10M	(peak gust [m/s])	m/s
VDIS	boundary layer dissipation	W/m**2
VGRAT	vegetation ratio	0-1
VLT	leaf area index	dimensionless
VSTR	surface v-stress	Pa
VSTRI	surface v-stress (ice)	Pa
VSTRL	surface v-stress (land)	Pa
VSTRW	surface v-stress (water)	Pa
W	vertical velocity	Pa/s
WI	fraction of frozen soil	fraction
WI3	fraction of frozen soil	fraction
WI4	fraction of frozen soil	fraction
WI5	fraction of frozen soil	fraction
WICL	fraction of frozen soil	fraction
WIMAX	maximum 10m-wind speed	m/s
WIND10	10m windspeed	m/s
WL	skin reservoir content	m
WMAXLOK	subgrid maximum water holding capacity	m
WMINLOK	subgrid minimum water holding capacity	m
WS	soil wetness; amount of water in the root zone	m
WSMX	field capacity of soil	m

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Remo Datenstrom 2:

Paramter	Abgeleiteter Parameter
Niederschlag	1-stuendige Summe
Niederschlag	3-stuendige Summe
Niederschlag	6-stuendige Summe
Niederschlag	12-stuendige Summe
Niederschlag	taegliche Summe
Niederschlag	monatliche Summe
Niederschlag	jaehrliche Summe
Niederschlag	Summe ueber meteorologische Jahreszeiten
Niederschlag	Summe ueber hydrologischen Sommer und Winter
Niederschlag	Vegetationsperiode
Niederschlag	Tagesgang pro Jahr
Niederschlag	Jahresgang pro Dekade
Niederschlag	Tage pro Monat mit $p > 0.1\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Monat mit $p > 1\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Monat mit $p > 10\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Monat mit $p > 20\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Monat mit $p > 25\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Monat mit $p < 0.1$
Niederschlag	Tage pro Monat mit $p < 1\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Jahr mit $p > 0.1\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Jahr mit $p > 1\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Jahr mit $p > 10\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Jahr mit $p > 20\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Jahr mit $p > 25\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Jahr mit $p < 0.1$
Niederschlag	Tage pro Jahr mit $p < 1\text{mm}$
Niederschlag	Tage pro Jahr mit Ueberschreitung von 5mm/h
Niederschlag	Tage pro Jahr mit Ueberschreitung von 10mm/h
Niederschlag	Tage pro Jahr mit Ueberschreitung von 20mm/h
Niederschlag	Tage pro met. Jahreszeit mit Ueberschreitung von 5mm/h
Niederschlag	Tage pro met. Jahreszeit mit Ueberschreitung von 10mm/h
Niederschlag	Tage pro met. Jahreszeit mit Ueberschreitung von 20mm/h
Niederschlag	Haeufigkeit der Ueberschreitung von 5 zusammenhaengenden Tagen pro Jahr mit weniger als 0.1mm Niederschlag
Niederschlag	Haeufigkeit der Ueberschreitung von 10 zusammenhaengenden Tagen pro Jahr mit weniger als 0.1mm Niederschlag
Niederschlag	Haeufigkeit der Ueberschreitung von 13 zusammenhaengenden Tagen pro Jahr mit weniger als 0.1mm Niederschlag

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Paramter	Abgeleiteter Parameter
Niederschlag	Haeufigkeit der Ueberschreitung von 20 zusammenhaengenden Tagen pro Jahr mit weniger als 0.1mm Niederschlag
Niederschlag	Haeufigkeit der Ueberschreitung von 5 zusammenhaengenden Tagen pro Jahr mit weniger als 1mm Niederschlag
Niederschlag	Haeufigkeit der Ueberschreitung von 10 zusammenhaengenden Tagen pro Jahr mit weniger als 1mm Niederschlag
Niederschlag	Haeufigkeit der Ueberschreitung von 13 zusammenhaengenden Tagen pro Jahr mit weniger als 1mm Niederschlag
Niederschlag	Haeufigkeit der Ueberschreitung von 20 zusammenhaengenden Tagen pro Jahr mit weniger als 1mm Niederschlag
Niederschlag	durchschnittlicher Niederschlag an Regentagen mit mehr als 1mm Niederschlag pro Monat
Niederschlag	durchschnittlicher Niederschlag an Regentagen mit mehr als 1mm Niederschlag pro Jahr
Niederschlag	maximaler stuetndlicher Niederschlag pro Jahr
Niederschlag	maximale Tagessumme pro Jahr
Niederschlag	groesste 5-Tages Niederschlagssumme pro Jahr
Abfluss	1-stuetndige Summe
Abfluss	Tagessumme
Abfluss	Jahresgang pro Dekade
Abfluss	Summe ueber met. Jahreszeiten
Abfluss	Summe ueber hydrologisches Sommer- und Winterhalbjahr
Abfluss	Vegetationsperiode
Schnee	1-stuetndige Summe des Schneefalls
Schnee	Tagessumme des Schneefalls
Schnee	monatliche Summe des Schneefalls
Schnee	Jahressumme des Schneefalls
Schnee	mittlerer Jahresgang des Schneefalls pro Dekade
Schnee	1-stuetndiges Mittel der Schneetiefe
Schnee	Tagesmittel der Schneetiefe
Schnee	Monatsmittel der Schneetiefe
Schnee	Jahresmittel der Schneetiefe
Schnee	mittlerer Jahresgang der Schneetiefe pro Dekade
Schnee	Anzahl der Tage pro Jahr mit Schneebedeckung (> 0.5cm)
Schnee	Anzahl der Tage pro Monat mit mehr als 10cm Schneefall in 6h
Schnee	Anzahl der Tage pro Monat mit mehr als 15cm Schneefall in 12h
Schnee	Anzahl der Tage pro Monat mit mehr als 25cm Schneefall in 12h
Schnee	Anzahl der Tage pro Jahr mit mehr als 10cm Schneefall in 6h
Schnee	Anzahl der Tage pro Jahr mit mehr als 15cm Schneefall in 12h

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Paramter	Abgeleiteter Parameter
Schnee	Anzahl der Tage pro Jahr mit mehr als 25cm Schneefall in 12h
Temperatur	1-stuendiges Mittel
Temperatur	taegliches Mittel
Temperatur	monatliches Mittel
Temperatur	jaehrliches Mittel
Temperatur	Tagesgang pro Jahr
Temperatur	Jahresgang pro Dekade
Temperatur	Mittel ueber meteorologische Jahreszeiten
Temperatur	Mittel ueber hydrologischen Sommer und Winter
Temperatur	Vegetationsperiode
Temperatur	zeitliches Mittel von Tagesminimum pro Monat
Temperatur	zeitliches Mittel von Tagesminimum pro Jahr
Temperatur	mittlerer Jahresgang des Tagesminimums pro Dekade
Temperatur	zeitliches Mittel von Tagesmaximum pro Monat
Temperatur	zeitliches Mittel von Tagesmaximum pro Jahr
Temperatur	mittlerer Jahresgang des Tagesmaximums pro Dekade
Temperatur	1-stuendiges Maximum der Temperatur
Temperatur	Tagesmaximum der Temperatur
Temperatur	1-monatliches Maximum der Temperatur
Temperatur	1-jaehrliches Maximum der Temperatur
Temperatur	Jahresgang der Maximaltemperatur pro Dekade
Temperatur	1-stuendiges Minimum der Temperatur
Temperatur	TagesMinimum der Temperatur
Temperatur	1-monatliches Minimum der Temperatur
Temperatur	1-jaehrliches Minimum der Temperatur
Temperatur	Jahresgang der Minimaltemperatur pro Dekade
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmittel > 5°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmittel > 10°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmittel <= 0°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmittel < -5°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmittel < -10°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmittel < -15°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmax < -5°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmax < 0°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmax > 5°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmax > 25°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmax > 30°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmax > 35°
Temperatur	Tage pro Monat mit Tmin < 0°

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Paramter	Abgeleiteter Parameter
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmittel > 5°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmittel > 10°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmittel ≤ 0°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmittel < -5°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmittel < -10°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmittel < -15°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmax < -5°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmax < 0°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmax > 5°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmax > 25°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmax > 30°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmax > 35°
Temperatur	Tage pro Jahr mit Tmin < 0°
Temperatur	tropische Naechte pro Monat
Temperatur	tropische Naechte pro Jahr
Temperatur	laengste zusammenhaengende Anzahl an Tagen mit Tmean > 5°
Temperatur	laengste zusammenhaengende Anzahl an Tagen mit Tmean > 10°
Temperatur	laengste zusammenhaengende Anzahl an Tagen mit Tmean < -5°
Temperatur	laengste zusammenhaengende Anzahl an Tagen mit Tmean < -10°
Temperatur	laengste zusammenhaengende Anzahl an Tagen mit Tmax > 5°
Temperatur	laengste zusammenhaengende Anzahl an Tagen mit Tmax > 25°
Temperatur	laengste zusammenhaengende Anzahl an Tagen mit Tmax > 30°
Temperatur	laengste zusammenhaengende Anzahl an Tagen mit Tmax > 35°
Temperatur	laengste zusammenhaengende Anzahl an Tagen mit Tmax > Jahresmittel
Temperatur	laengste zusammenhaengende Anzahl an Tagen mit Tmin < 0°
Temperatur	Kahlfrosttage bis -5° pro Winter
Temperatur	Kahlfrosttage bis -10° pro Winter
Temperatur	Kahlfrosttage bis -15° pro Winter
Temperatur	Kahlfrosttage bis -20° pro Winter
Temperatur	1-stuendliche Bodentemperatur (verschiedene Modelltiefen)
Temperatur	monatliches Temperaturminimum an der Oberflaeche
Temperatur	Temperaturdifferenz zwischen Monatsmitteln Januar und Juli
Temperatur	Differenz zwischen hoechster und niedrigster Temperatur eines Jahres
Temperatur	1-stuendliche Windchill-Temperatur
Temperatur	1-stuendlicher Humindex
Temperatur	GradTagZahl pro Jahr
Wind	1-stuendliche 10m-Windgeschwindigkeit
Wind	maximale Boeen 10m ueber Grund
Feuchte	1-stuendliche relative Feuchte in 2m Hoehe

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Paramter	Abgeleiteter Parameter
Feuchte	Tagesmittel relative Feuchte in 2m Hoehe
Feuchte	Monatsmittel relative Feuchte in 2m Hoehe
Feuchte	mittlere relative Feuchte um 14h pro Monat in 2m Hoehe
Feuchte	1-stuendliche absolute Feuchte in 2m Hoehe
Feuchte	Tagesmittel absolute Feuchte in 2m Hoehe
Feuchte	Monatsmittel absolute Feuchte in 2m Hoehe
Feuchte	zeitliches Mittel des Tagesminimums der relativen Feuchte pro Monat
Feuchte	zeitliches Mittel des Tagesmaximums der relativen Feuchte pro Monat
Feuchte	Tagesminimum der relativen Feuchte
Feuchte	Tagesmaximum der relativen Feuchte
Feuchte	Stunden pro Tag mit Unterschreitung von 30% RF
Feuchte	Stunden pro Tag mit Ueberschreitung von 90% RF
Verdunstung	1-stuendliche Verdunstung
Verdunstung	Tagessumme der Verdunstung
Verdunstung	Monatssumme der Verdunstung
Verdunstung	Jahressumme der Verdunstung
Verdunstung	Jahresgang pro Dekade
Verdunstung	Summe der met. Jahreszeiten
Verdunstung	Summe der hydrologischen Halbjahre
Verdunstung	Vegetationsperiode
Verdunstung	Evaporation offener Wasserflaechen
Verdunstung	monatliche Klimatische Wasserbilanz
Verdunstung	jaehrliche Klimatische Wasserbilanz
Verdunstung	dekadischer Jahresgang
Verdunstung	Summe der met. Jahreszeiten
Verdunstung	Summe der hydrologischen Halbjahre
Verdunstung	Vegetationsperiode
Druck	1-stuendlicher Luftdruck reduziert auf NN
Druck	3-stuendlicher Luftdruck reduziert auf NN
Druck	Tagesmittel Luftdruck reduziert auf NN
Druck	Tagesminimum Luftdruck reduziert auf NN
Druck	Tagesmaximum Luftdruck reduziert auf NN
Druck	Monatsmittel Luftdruck reduziert auf NN
Strahlung	1-stuendige kurzwellige Strahlung
Strahlung	3-stuendige kurzwellige Strahlung
Strahlung	Tagesmittel kurzwellige Strahlung
Strahlung	Monatsmittel kurzwellige Strahlung
Strahlung	Tagessumme kurzwellige Strahlung
Strahlung	August/September-Summe der kurzwelligen Strahlung

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Paramter	Abgeleiteter Parameter
Strahlung	langwellige atmosphärische Gegenstrahlung
Strahlung	langwellige Ausstrahlung des Untergrundes
Wolken	Wolkenbedeckungsgrad

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Remo Datenstrom 3:

Acronym	Beschreibung	Einheit
ACLCV	total cloud cover	fraction
ALB	surface background albedo	fraction
ALBEDO	surface albedo	fraction
APRC	convective rainfall (mm ---> kg/m**2)	kg/m**2
APRL	large scale rainfall (mm ---> kg/m**2)	kg/m**2
APRS	Diagnosed part of the precipitation which is snow.	kg/m**2
AZ0	surface roughness length (m--> m**2/s**2) ²	m**2/s**2
BFLHS	surface sensible heat flux	W/m**2
BFLQDS	surface latent heat flux	W/m**2
BLA	land-sea fraction	fraction
BOX_AREA	area of gridbox	m**2
DEW2	2m dew point temperature	K
DRAIN	subsurface runoff amount (drainage) (mm --> kg/m**2)	kg/m**2
DSNAC	snow depth change (mm --> kg/m**2)	kg/m**2
DURSUN	sunshine duration ??	No./h
EVAP	evaporation (mm --> kg/m**2)	kg/m**2
FAO	soil type (FAO)	fraction
FD	No. of days with tmin_2m below 0 °C	No.
FI	geopotential height	m
FIB	surface height	m
FOREST	forest area fraction	fraction
ID	No. of days with tmax_2m below 0 °C	No.
LAT_BNDS	latitude of the bounds	degree
LON_BNDS	longitude of the bounds	degree
PHI	latitude	degree
PRECIP_TOT	Post processed value of convective and grid scale precipitation, sum over time interval	kg/m**2
PS	surface pressure	Pa
PSRED	mean sea level pressure	Pa
QD	specific humidity	kg/kg
QDB	surface specific humidity	kg/kg
R10MM	No. of days with total precipitation at least 10 kg/m2	No.
R20MM	No. of days with total precipitation at least 20 kg/m2	No.
REL_HUM	relative humidity	%
REL_HUM	relative humidity	fraction
RLA	longitude	degree

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Acronym	Beschreibung	Einheit
RR1MM	No. of days with total precipitation at least 1kg/m2	No.
RUNOFF_S	surface runoff (calculated as a difference from code 160 and code 53, 160-53)	kg/m**2
SEAICE	sea ice cover	fraction
SN	snow depth	m
SNOW_COV	No. of days with snowcover	No.
SNOW_DAYS	No. of days with snowfall	No.
SRAD0	net shortwave radiation (at model top)	W/m**2
SRADS	surface net shortwave radiation	W/m**2
SRADSU	surface solar radiation upward	W/m**2
SU	No. of days with tmax_2m above 25 °C	No.
T	temperature	K
T2MAX	2m maximum temperature	K
T2MIN	2m minimum temperature	K
TD	soil temperature (4.layer)	K
TD3	soil temperature (1.layer)	K
TD4	soil temperature (2.layer)	K
TD5	soil temperature (3.layer)	K
TDCL	soil temperature (5.layer)	K
TEMP2	2m temperature	K
TR	No. of days with tmin_2m above 20 °C	No.
TRAD0	outgoing longwave radiation (at model top)	W/m**2
TRADS	surface net longwave radiation	W/m**2
TRADSU	surface thermal radiation upward	W/m**2
TS	surface temperature	K
TSMAX	2m maximum temperature	K
TSMIN	2m minimum temperature	K
TSN	snow temperature	K
U	u-component of wind	m/s
U10	u-component of 10m wind	m/s
V	v-component of wind	m/s
V10	v-component of 10m wind	m/s
VBM10M	maximum of the expected gust velocity near the surface	m/s
VGRAT	vegetation area fraction	fraction
VLT	leaf area index	fraction
W_ICE_DAYS	No. of days with frozen soil	No.
WI3	fraction of frozen soil	fraction

Anhang 2 - Ergebnisse in der CERA Datenbank

Acronym	Beschreibung	Einheit
WIMAX	maximum 10m wind speed	m/s
WIND_DIR	wind direction	degree
WIND_SPEED	wind speed	m/s
WL	skin reservoir content	m
WS	soil water content	m
WSMX	field capacity of soil	m