Atmosphärische Zirkulationsmuster sowie Trocken- und Nassphasen in regionalen Klimaprojektionen

Produkt 2.1b

Version: 1.0
Status: Freigabe
Datum: 28.01.2012

TP 2.1 – Regionalisierte Projektion von Klimakenngrößen

TP-Leiter: Prof. Dr. Christian Bernhofer
TU Dresden

Bearbeiter: Dr. Stephanie Hänsel, Andreas Hoy
TU Bergakademie Freiberg

Kontakt: Dr. Stephanie Hänsel
TU Bergakademie Freiberg
Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum
Brennhausgasse 14
Tel.: 03731 39-3533
Fax: 03731 39-4060
E-Mail: stephanie.haensel@ioez.tu-freiberg.de

REGKLAM
Entwicklung und Erprobung eines Integrierten Regionalen Klimaanpassungsprogramms für die Modellregion Dresden

Gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung
Förderkennzeichen: 01 LR 0802

Koordination: Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR)
Weberplatz 1, 01217 Dresden
Projektleiter: Prof. Dr. Dr. h.c. Bernhard Müller

www.regklam.de

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis 5
Abbildungsverzeichnis 7
Tabellenverzeichnis 13

1. Einleitung 15

2. Bisherige Erkenntnisse 17
2.1 Überblick über bisherige Ergebnisberichte und Veröffentlichungen 17
2.2 Klimadiagnose 21
2.3 Klimaprojektionen 23

3. Atmosphärische Zirkulation 25
3.1 Verwendete Klassifikationen 25
3.1.1 Grosswetterlagenklassifikation (GWLk, 1881–2010) 25
3.1.2 Automatisierte Grosswetterlagenklassifikation nach James (SVG, 1871–2010) 26
3.1.3 Objektive Wetterlagenklassifikation des DWD (oWLK, 1961–2100) 27
3.2 Räumlicher Vergleich der Klassifikationen 30
3.2.1 Daten und Methoden 30
3.2.2 Räumliche Vergleichbarkeit der Klassifikationen 30
3.3 Beobachtete Wetterlagenhäufigkeit (1901–2010) 34
3.3.1 Vergleich der Häufigkeit verschiedener GWL-Klassen 34
3.3.2 Beobachtete Trends in den GWL-Klassenhäufigkeiten 36
3.3.3 Vergleich von Häufigkeiten und Trends zwischen GWLk, SVG und oWLK 38
3.4 Projizierte Wetterlagenhäufigkeit (1961–2100) 39
3.5 Veränderungen in der Häufigkeit von Westwetterlagen (1871–2100) 43

4. Trockenheit und Nassphasen 49
4.1 Einleitung 49
4.2 Datengrundlage und Methoden 50
4.2.1 Regionale Klimaprojektionen 50
4.2.2 Korrektur von Niederschlagsfehlern in Beobachtungen und Modellen 51
4.2.3 Verwendete Realisierungen der statistischen Modelle 52
4.2.4 „Einordnung" des Globalmodells ECHAM5 55
4.3 Niederschlagsanomalien 57
4.3.1 Mittlere Niederschlagsentwicklung 57
4.3.2 Häufigkeitsverteilung 62
4.3.3 Räumliche Variabilität der Trends 66
4.3.4 Vergleich der beiden Indikatoren SPI und RAI 71
4.3.5 Veränderung auf langfristigen Zeitskalen 74

4.4 TROCKENTAGE UND TROCKENPHASEN 76
4.4.1 Veränderungen in der Zahl trockener Tage (ohne WETTREG 2010) 76
4.4.2 Häufigkeit und Dauer von Trockenphasen 80
4.4.3 Meteorologische Trockenperioden 93
4.5 RAUM-ZEIT-CHARAKTERISTIKA LANGER TROCKEN-UND NASSPHASEN 97
4.6 ZUSAMMENFASSENDE BETRACHTUNG 102

5. Zusammenhang zwischen atmosphärischer Zirkulation und regionalen Klimakenngrößen 105
5.1 EINFLUSS DER WETTERLAGEN AUF TEMPERATUR UND NIEDERSCHLAG (1961–2100) 105
5.1.1 Methodik 105
5.1.2 Temperatur 106
5.1.3 Niederschlag 109
5.2 TROCKEN- UND NASSPERIODEN UND ATMOSPHÄRISCHE ZIRKULATION 112

6. Zusammenfassende Betrachtung 115

7. Literatur 119

8. Anhang 121

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
ASR	Anströmrichtung
BfG	Bundesanstalt für Gewässerkunde
DWD	Deutscher Wetterdienst
ENSEMBLES	EU-Projekt "*ENSEMBLE*-based Predictions of Climate Changes and their Impacts"
ERA40	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 40 Year Re-analysis dataset
FB2010	Fortschrittsbericht Teilprojekt 2.1b, veröffentlicht im Dezember 2010
GWL	Großwetterlage
GWLk	manuelle Großwetterlagenklassifikation
GWT	Großwettertyp
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
K	Kelvin
KLIWAS	Projekt „Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen in Deutschland"
NAO	Nordatlantische Oszillation (North Atlantic Oscillation)
NAM	Northern Annual Mode
NO/NE	Nordost(en)
NW	Nordwest(en)
oWLK	objektive Wetterlagenklassifikation des Deutschen Wetterdienstes
RAI	Rainfall Anomaly Index (Niederschlagsanomalien-Indikator)
RMR	REGKLAM-Modellregion
SHJ	Sommerhalbjahr (April bis September)
SO/SE	Südost(en)
SPI	Standardized Precipitation Index
SVG	SynopVis Grosswetterlagen (Automatisierte GWL nach James)
SW	Südwest(en)
TP	Trockenperiode
TP X.Y	Teilprojekt X.Y innerhalb von REGKLAM
WHJ	Winterhalbjahr (Oktober bis März des Folgejahres)
ZB2009	Zwischenbericht des Teilprojektes 2.1b, veröffentlicht im September 2009

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht der für die oWLK benötigten Eingangsgrößen (Krahe et al. 2010) 28

Abbildung 2: Definition des oWLK-Gitters für das gewählte Untersuchungsgebiet (Mitteleuropa). Die Zahlen bezeichnen eine dreifache, zweifache bzw. einfache Gewichtung der Gitterpunkte (gelb). Außerhalb des rot gekennzeichneten Gebietes gelegene Punkte wurden nicht berücksichtigt (Krahe et al. 2010) 28

Abbildung 3: Systematik der 40 Wetterlagen der oWLK (aus DWD 2010b) 29

Abbildung 4: weltweite Korrelation zwischen Bodenluftdruck und Wetterlagen des Westsektors (W+) und Ostsektors (O+) von GWLk (links) und SVG (rechts) in Winter- und Sommerhalbjahr für 1901–2010); rote Flächen zeigen positive (Hochdruckgebiete), blaue Flächen negative (Tiefdruckgebiete) Korrelationen.....31

Abbildung 5: Komposit der Korrelation zwischen Bodenluftdruck und Wetterlagenhäufigkeit des West- (W+) und Ostsektors (O+) von GWLk für 1901–2010 und 1961–2000 sowie von SVG und oWLK für 1961–2000 in Winter- und Sommerhalbjahr darstellt für die Nordhemisphäre von 60°W bis 60°O; rote Flächen zeigen positive (Hochdruckgebiete), blaue negative (Tiefdruckgebiete) Korrelationen 32

Abbildung 6: Mittlere jährliche Lage der steuernden Druckzentren und Anströmung in die RMR gemittelt über alle drei Klassifikationen (GWLk, SVG und oWLK) während West- (W+, links) und Ostlagen (O+, rechts); voll umrandete (nördliche) Symbole zeigen ganzjährig vorhandene Druckzentren, gestrichelte Umrandungen indizieren saisonal (v.a. im WHJ) ausgeprägte Druckzentren. 32

Abbildung 7: wie Abbildung 6, jedoch für (von links nach rechts): 1) Südwest- (SW*), 2) Nordwest- (NW*), 3) Nordost- (NO*) und 4) Südostlagen (SO*).....33

Abbildung 8: Abweichung der Modellergebnisse im Kontrollzeitraum 1961–1990 von den ERA40 Reanalysedaten im Winter- (oben) und Sommerhalbjahr (unten) für 1) alle Anströmrichtungen (links) sowie 2) West (W+)- und Ostsektor (O+), trockene (Tr) sowie antizyklonale Wetterlagen in 950 hPa (A950) und 500 hPa (A500) (rechts) 40

Abbildung 9: wie Abbildung 8, jedoch für Abweichung der Modellergebnisse in den Projektionszeiträumen 2021–2050 und 2071–2100 von den Ergebnissen im Kontrollzeitraum 1961–1990; Werte von Tr im Zeitraum 2071–2100 nur unzureichend dargestellt, da fehlerbehaftet (siehe Text) 41

Abbildung 10: 11-jährig gleitend gemittelte Häufigkeiten von W+ für SVG (1871–2010), GWLk (1881–2010) und oWLK (1961–2000).....44

Abbildung 11: *„Westerly Index"* der Häufigkeit von Westwetterlagen in den mittleren europäischen Breiten; Alvarez-Castro et al. (2011).....45

Abbildung 12: 11jährig gemittelte Häufigkeiten von W+ für oWLK Beobachtungs- und Projektionsdaten; die Projektionsdaten enthalten die in Tabelle 8 enthaltenen Modelle im Szenario A1B; dünne Linien zeigen Verlauf und Variabilität der enthaltenen Modellläufe für rot: 3 Läufe von MPEH5 und grau: weitere Modelle, dicke Linien die jeweiligen Mittelwerte der einzelnen Modellläufe 45

Abbildung 13: 31-jährig gemittelte Häufigkeiten von W+ für 1) Beobachtungs- und 2) Projektionsdaten: zu 1) zählen die Zeitreihen von SVG (1871–2010), GWLk (1881–2010) und oWLK (1961–2000), zu 2) zählen die Modelldaten (Szenario A1B) unterschiedlicher Globalmodelle: dünne Linien zeigen Verlauf und Variabilität der enthaltenen Modellläufe für rot: 3 Läufe von MPEH5 und grau: weitere Modelle, dicke Linien die jeweiligen Mittelwert der Modellläufe; alle Angaben relativ zum Bezugszeitraum 1961–1990 46

Abbildung 14: analog Abbildung 13, jedoch für das WHJ 47

Abbildung 15: Zeitreihe des NAO-Index (räumlich flexibler, *„pattern-based"* Ansatz; 30-jähriges Gleitmittel) im Vergleich der Beobachtungswerte (schwarze Linie; 1873–2001) und verschiedener Modellläufe (bunte Linien; verschiedene Zeiträume); Osborn (2004) 47

Abbildung 16: analog Abbildung 13, jedoch für das SHJ 48

Abbildung 17: Höheninformation (Tiefland: ≤ 150 m, Hügelland: >150 m … ≤ 350 m, Bergland: >350 m … ≤ 650 m, Kammlagen: > 650 m) der verwendeten Datenpunkten bzw. Rasterzellen (dargestellt als Gitterpunkt) für die erweiterte REGKLAM-Modellregion 51

Abbildung 18: Verlauf der Tagesniederschlagshöhen [mm] an neun ausgewählten Daten punkten im Januar 1961 in der Modellrealisierung WEREX IV A1B „normal" 53

Abbildung 19: Matrix der Pearson-Korrelationskoeffizienten für die RAI-Halbjahreswerte (WHJ: oberhalb der Diagonalen, SHJ: unterhalb der Diagonalen) aller WEREX IV Datenpunktpaare der Realisierung „trocken" unter Szenario A1B für 1961–2100; die Grautöne symbolisieren die Größe des Korrelationskoeffizienten (schwarz: r=±1; dunkelgrau: r>0,7 / r<-0,7; mittelgrau: r>0,5 / r<-0,5; hellgrau: r>0,3 / r<-0,3; weiß: r<0,3 / r>-0,3) 54

Abbildung 20: Änderungssignale der Temperatur [K] und des Niederschlags [%] für den Sommer (links) und den Winter (rechts) in den Zeitscheiben 2021–2050 (blaue Quadrate) und 2071–2100 (orange Punkte) von 20 Globalmodellen für drei SRES-Szenarien (B1: dunkle, A1B: mittlere und A2: helle Farbschattierung; die dem Modell ECHAM5 entsprechenden Punkte wurden hervorgehoben (verändert nach Feske et al. 2010). 55

Abbildung 21: Verlauf (11-jähriges gleitendes Mittel) des mittleren RAI der RMR (Mittel über die Daten- bzw. Gitterpunkte) in den vier Jahreszeiten für die Beobachtungen (1951–2010) und fünf regionale Klimamodelle (CLM, REMO, WEREX IV, WETTREG 2006 und 2010; 1961–2100) unter dem Szenario A1B 58

Abbildung 22: Mittlere jahreszeitliche Niederschlagsanomalie (11-jähriges gleitendes Mittel) für die drei Szenarios A1B (19 Realisierungen), B1 (18 Realisierungen; ohne REMO) und A2 (16 Realisierungen; ohne REMO und CLM) im Zeitraum 1961–2100; zusätzlich ist jeweils die Klimaprojektion mit dem minimalen und den maximalen Änderungssignal (linearer Trend für 2001–2100) dargestellt..... 59

Abbildung 23: Prozentualer Anteil der Daten- bzw. Gitterpunkte (GP) innerhalb der RMR mit positiven bzw. negativen linearen Trends für den Zeitraum 2001–2100; Szenario A1B 60

Abbildung 24: Jahresgang der Änderungssignale der monatlichen RAI-Mittelwerte für die RMR in den zwei Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990 61

Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der jahreszeitlichen Niederschlagsanomaliewerte (RAI) für den Zeitraum 1961–1990; ermittelt aus den individuellen Häufigkeitsverteilungen aller Daten- bzw. Gitterpunkte der REGKLAM-Modellregion..... 62

Abbildung 26: Änderungssignale von 19 regionalen Klimaprojektionen (fünf Modelle) unter dem Szenario A1B für die neun RAI-Klassen der Zeitscheiben 2021–2050 (oben) und 2071–2100 (unten) gegenüber 1961–1990 für die RMR, ermittelt aus den individuellen Änderungssignalen aller Daten- bzw. Gitterpunkte 63

Abbildung 27: wie Abbildung 26 jedoch Vergleich der Mittelwerte von drei Emissionsszenarios (A1B – 19 Realisierungen, B1 – 18 Realisierungen [ohne REMO], A2 – 16 Realisierungen [ohne REMO und CLM]) inklusive Darstellung des maximalen und minimalen Änderungssignal aller 53 Realisierungen 65

Abbildung 28: Räumliche Variabilität (Standardabweichung) des Niederschlags innerhalb der RMR für 19 regionale Klimaprojektionen im Referenzzeitraum 1961–1990 (links) sowie Änderungssignale unter dem Szenario A1B in den Zeitscheiben 2021–2050 (Mitte) und 2071–2100 (rechts) 67

Abbildung 29: Jahreszeitliche Unterschreitungshäufigkeiten eines RAI von -2 (trockene Bedingungen; oben) und Überschreitungshäufigkeiten eines RAI von +2 (nasse Bedingungen; unten) gemittelt über die RMR sowie für vier Höhenstufen des erweiterten Datengebietes im Validierungszeitraum 1961–2000 67

Abbildung 30: Verlauf (11-jähriges gleitendes Mittel) der jahreszeitlichen Niederschlagsanomalien (RAI) für die Beobachtungsdaten (1951–2010) sowie für fünf regionale Klimamodelle (19 Realisierungen, 2001–2100) unter Szenario A1B..... 68

Abbildung 31: Verlauf (11-jähriges gleitendes Mittel) der mittleren jahreszeitlichen Niederschlagsanomalien (RAI) für vier Höhenstufen (Tiefland, Hügelland, Bergland und Kammlagen) in den Beobachtungsdaten (fette Linien) und in den Klimaprojektionen unter Szenario A1B (dünne Linien) 69

Abbildung 32: Zeitscheibendifferenzen der Über- bzw. Unterschreitungshäufigkeiten eines RAI von ±2 in der REGKLAM-Modellregion sowie vier Höhenstufen des erweiterten Datengebietes für 2071–2100 gegenüber 1961–1990 70

Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung des monatlichen Niederschlags im Januar (oben) und Juli (unten) anhand der zwei Niederschlagsanomalienindikatoren RAI (links) und SPI (rechts) in den Beobachtungsdaten sowie 19 regionalen Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B gemittelt über die REGKLAM-Modellregion für den Validierungszeitraum 1961–2000 71

Abbildung 34: Änderungssignale der Niederschlagsverteilung anhand der Indikatoren RAI (links) und SPI (rechts) von 19 regionalen Klimaprojektionen (fünf Modelle) unter dem Szenario A1B für 2071–2100 gegenüber 1961–1990 für die REGKLAM-Modellregion, ermittelt aus den individuellen Änderungssignalen aller Daten- bzw. Gitterpunkte 72

Abbildung 35: Häufigkeitsverteilung der SPI-Klassen gemittelt für alle 12-Monats-SPI der REGKLAM-Modellregion im Validierungszeitraum (1961–2000; links) sowie deren Änderungssignale in den Zeitscheiben 2021–2050 (Mitte) und 2071–2100 (rechts) im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990 74

Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf (11-jähriges gleitendes Mittel) des 12-Monats-SPI (gemittelt über alle 12-Monatszeiträume und die REGKLAM-Modellregion) für die Beobachtungsdaten (1951–2010) und 19 regionale Klimaprojektionen (1961–2100) unter dem Szenario A1B 75

Abbildung 37: Mittlere Zahl an Trockentagen in der REGKLAM-Modellregion für das Jahr die Halbjahre und die Jahreszeiten, Referenzzeitraum 1961–1990 76

Abbildung 38: Kartendarstellung der mittleren Zahl an Trockentagen pro Jahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe; Referenzzeitraum 1961–1990 77

Abbildung 39: Mittlere (für die drei Szenarien) sowie minimale und maximale (aus allen Modellläufen und Szenarien) Änderungssignale der Trockentagshäufigkeit in den Jahreszeiten und Halbjahren für die Zeitscheiben 2021–2050 (links) und 2071–2100 (rechts) 78

Abbildung 40: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der mittleren Zahl an Trockentagen im Sommer- und Winterhalbjahr für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modelle) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien 79

Abbildung 41: Mittlere Zahl an Trockenphasen in der REGKLAM-Modellregion für das Jahr die Halbjahre und die Jahreszeiten, Referenzzeitraum 1961–1990 81

Abbildung 42: Mittlere (links) und maximale (rechts) Länge von Trockenphasen in der REGKLAM-Modellregion für das Jahr die Halbjahre und die Jahreszeiten, Referenzzeitraum 1961–1990 81

Abbildung 43: Kumulative Häufigkeitsverteilung der jährlichen Andauer von Trockenphasen, Referenzzeitraum 1961–1990 82

Abbildung 44: Kartendarstellung der mittleren Zahl an Trockenphasen pro Jahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe; Referenzzeitraum 1961–1990 83

Abbildung 45: wie Abbildung 44, jedoch für die mittlere Länge von Trockenphasen 84

Abbildung 46: wie Abbildung 44, jedoch für die maximale Länge von Trockenphasen 85

Abbildung 47: Mittlere (für die drei Szenarien) sowie minimale und maximale (aus allen Modellen und Szenarien) Änderungssignale der Häufigkeit von Trockenphasen (oben) sowie ihrer mittleren (Mitte) und maximalen (unten) Andauer in den Jahreszeiten und Halbjahren für die Zeitscheiben 2021–2050 (links) und 2071–2100 (rechts) 87

Abbildung 48: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der mittleren Zahl an Trockenphasen im Sommer- und Winterhalbjahr für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modelle) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien 88

Abbildung 49: wie Abbildung 48 jedoch für die mittlere Länge von Trockenphasen 89

Abbildung 50: wie Abbildung 48 jedoch für die maximale Länge von Trockenphasen 90

Abbildung 51: wie Abbildung 47, jedoch für die Häufigkeit von unterschiedlich langen Trockenphasen im Jahr (links) und den Halbjahren (Mitte: SHJ, rechts: WHJ) 91

Abbildung 52: (Halb)Jährliche Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden sowie mindestens zwei bzw. drei Wochen andauernder Trockenperioden in den Beobachtungen und Modellläufen gemittelt für die REGKLAM-Modellregion (links), untergliedert nach Höhenstufen in den Beobachtungen (Mitte) sowie in den Modellen (rechts, dargestellt ist der Mittelwert aus allen Modellen und Szenarios sowie die gesamte Schwankungsbreite der Werte); Referenzzeitraum 1961–1990 94

Abbildung 53: Mittlere (für die drei Szenarien) sowie minimale und maximale (aus allen Modellen und Szenarien) Änderungssignale (Mittelwert der REGKLAM-Modellregion) der Häufigkeit von unterschiedlich langer meteorologischer Trockenperioden im Jahr (links) und den Halbjahren (Mitte: SHJ, rechts: WHJ) für die Zeitscheiben 2021–2050 (oben) und 2071–2100 (unten) 95

Abbildung 54: Veränderungen in der (halb)jährlichen Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden sowie mindestens zwei bzw. drei Wochen andauernder Trockenperioden in der erweiterten REGKLAM-Modellregion untergliedert nach Höhenstufen (dargestellt ist der Mittelwert aus allen Modellen und Szenarios sowie die gesamte Schwankungsbreite der Werte) für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961–1990 96

Abbildung 55: Auftreten von Dezil-Trocken- (orange) und Nassphasen (Blau) in der REGKLAM-Modellregion für die Beobachtungs- (1951–2010) und ausgewählte Projektionsdaten (1961–2100) angetrieben durch den ersten Lauf von ECHAM5 unter dem Szenario A1B; grau: keine Niederschlagsdaten vorhanden 98

Abbildung 56: Anteil von Datenpunkten in der REGKLAM-Modellregion, die von einer Dezil-Trockenphase (TP) oder Nassphase (NP) betroffen sind für den Validierungs-zeitraum 1961–2000 (links) sowie Änderungssignale von 18 regionalen Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B in den Zeitscheiben 1991–2020, 2021–2050 und 2071–2100 (rechts) 99

Abbildung 57: Dekadische Mittelwerte der räumlichen Ausdehnung von Dezil-Trockenphasen (links) und Nassphasen (rechts) in der REGKLAM-Modellregion für Beobach-tungsdaten und 18 regionale Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B; 1961–2100 99

Abbildung 58: Häufigkeit innerhalb von zehn Jahren (oben) sowie mittlere (Mitte) und maximale (unten) Länge von Dezil-Trockenphasen (TP) und Nassphasen (NP) in der REGKLAM-Modellregion (jeweils regionaler Mittelwert) im Referenz-zeitraum 1961–1990 (links) sowie Änderungssignale von 18 regionalen Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B in den Zeitscheiben 1991–2020, 2021–2050 und 2071–2100 (rechts) 100

Abbildung 59: Definition der vier Sektoren (NW, NO, SW und SO) für die Betrachtung von Gebietsmitteln der mittleren täglichen Lufttemperatur in 2 m Höhe und des mittleren täglichen Niederschlags. Die Werte an den Gitterpunkten innerhalb der definierten Teilgebiete gehen in einfacher Gewichtung in die Berechnung der Gebietsmittel ein (aus Krahe et al. 2010) 105

Abbildung 60: Mittlere Temperatur je Sektor im Zeitraum 1961–1990 (oben) sowie Temperaturänderung je Sektor im Zeitraum 2021–2050 (oben) und 2071–2100 (unten) gegenüber 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5, vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2) im Szenario A1B, von MPEH5 Lauf 1 und 3 in den Szenarios A2 und B1 sowie des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals aller verwendeten Modellläufe und der Reanalysewerte (ERA40) 106

Abbildung 61: Mittlere Temperaturabweichung je Sektor während Westlagen (W+, oben) sowie der Ostlagen (O+, unten) im Zeitraum 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5, vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2), des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals und der Reanalysewerte (ERA40) 107

Abbildung 62: Temperaturänderung je Sektor während Westlagen (W+, oben) sowie der Ostlagen (O+, unten) im Zeitraum 2071–2100 gegenüber 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5 und vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2) im Szenario A1B, von MPEH5 Lauf 1 und 3 in den Szenarios A2 und B1 sowie des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals aller verwendeten Modellläufe 108

Abbildung 63: Mittlerer Niederschlag je Sektor im Zeitraum 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5 (MPEH), der weiteren vier Modellläufe (Andere, vgl. Tabelle 2), des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals und der Reanalysewerte (ERA40) 109

Abbildung 64: Veränderung des mittleren täglichen Niederschlags je Sektor im Zeitraum 2021–2050 (oben) und 2071–2100 (unten) gegenüber 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5 und vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2) im Szenario A1B, von MPEH5 Lauf 1 und 3 in den Szenarios A2 und B1 sowie des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals aller verwendeten Modellläufe 109

Abbildung 65: Veränderung des mittleren täglichen Niederschlags je Sektor während Westlagen (W+; oben) und Ostlagen (O+, unten) im Zeitraum 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5, vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2), des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals und der Reanalysewerte (ERA40) 110

Abbildung 66: Veränderung des mittleren täglichen Niederschlags je Sektor während Westlagen (W+, oben) bzw. Ostlagen (O+, unten) im Zeitraum 2071–2050 gegenüber 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5 und vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2) im Szenario A1B, von MPEH5 Lauf 1 und 3 in den Szenarios A2 und B1 sowie des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals aller verwendeten Modellläufe 111

Abbildung 67: Durchschnittliche Abweichung des mittleren Auftretens [Tage] von GWL während der zehn trockensten monatlichen, jahreszeitlichen, halbjährlichen und jährlichen Perioden im Zeitraum 1951–2005; Anomalien größer als ein Tag sind mit heller, größer als drei Tage mit dunkler Hintergrundfarbe markiert (blau: negative, rot: positive Anomalie); die Zeile P-A zeigt die durchschnittliche Niederschlagsanomalie der zehn trockensten Perioden (Abweichung von 1961–1990) 113

Abbildung 68: Durchschnittliche Häufigkeitsanomalien verschiedener Zirkulationsmuster während der zehn höchsten (Ho) bzw. niedrigsten (Ni) Zeitreihenwerte fünf verschiedener Klimaelemente in Potsdam (1901–2009) für das WHJ 114

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Haupt- und Nebenklassen der Großwetterklassifikation (GWLk), erweitert nach Werner u. Gerstengarbe (2010): 29 Grosswetterlagen (GWL), 10 Grosswetter-typen (GWT), 4 Anströmrichtungen, 3 Zirkulationsformen, 2 Zyklonalitätsformen; der Westsektor W+ setzt sich aus den Anströmrichtungen SW* und NW*, der Ostsektor O+ aus den Anströmrichtungen NO* und SO* zusammen. 26

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Modellläufe und Reanalysedaten 27

Tabelle 3: Durchschnittliche Häufigkeit [%] der GWLk-Klassen (vgl. Tabelle 1) für 1901–2010 34

Tabelle 4: Durchschnittliche Häufigkeit [%] der SVG-Klassen (vgl. Tabelle 1) für 1901–2010 35

Tabelle 5: Lineare Trends der Auftrittshäufigkeit [in Tagen] der GWLk-Klassen (vgl. Tabelle 1) und deren Signifikanz (Farbcode siehe untenstehende Legende) für 1901–2010; graue Schrift: nicht auf Signifikanz geprüft, da Auftreten in < 10% aller Jahre 36

Tabelle 6: wie Tabelle 5, jedoch für SVG 37

Tabelle 7: Mittlere Auftrittshäufigkeit und lineare Trends [in Tagen] inkl. Signifikanz (eingefärbt, zur Erklärung vgl. Tabelle 5) in der Periode 1961–2000; Vergleich von Sektoren und Anströmrichtungen von GWLk, SVG und oWLK 38

Tabelle 8: Farbcodes der verwendeten Modellläufe und Szenarien (vgl. Tabelle 2) 39

Tabelle 9: Einteilung der Häufigkeitsklassen des SPI und RAI nach den Originalautoren im Vergleich zur in diesem Bericht verwendeten Einteilung 72

Tabelle 10: Vergleich der jahreszeitlichen Änderungssignale der mittels zweier verschiedener Indikatoren (RAI: Rainfall Anomaly Index, SPI: Standardized Precipitation Index) beschriebenen Veränderungen in den Niederschlagsanomalien in der Zeitscheibe 2071–2100 im Vergleich zu 1961–1990 für 19 regionale Klimaprojektionen; Mittelwerte der REGKLAM-Modellregion werden über eine Farbskala von Rot (starker Niederschlagsrückgang) über Weiß (keine Veränderung) zu Blau (deutlicher Niederschlagsanstieg) illustriert 73

Tabelle 11: Zusammenfassende Darstellung der jahreszeitlichen Änderungssignale (Abkürzungen in folgender Reihenfolge: J=Jahr, Halbjahre: S=SHJ und W=WHJ, Jahreszeiten: F=Frühjahr, S=Sommer, H=Herbst, W=Winter) von vier auf Tageswerten beruhenden Trockenheitsindikatoren (Zahl der Trockentage, Zahl der Trockenperioden, mittlere und maximale Länge der Trockenperioden) in den Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 für einen Ausschnitt der verwendeten regionale Klimaprojektionen (9 unter A1B, 8 unter B1 und 6 unter A2; ohne WETTREG 2010). 102

Tabelle 12: Zusammenfassende Darstellung der jahreszeitlichen Änderungssignale des Niederschlagsanomalien-Indikators RAI in den Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 für sämtliche verwendete regionale Klimaprojektionen (19 unter A1B, 18 unter B1 und 16 unter A2; Farbcode der Modelle: orange – REMO, blau – CLM, rot – WEREX IV, grün – WETTREG 2006 und violett – WETTREG 2010) für sechs verschiedene RAI-Kenngrößen (Mittelwert: über die RMR gemittelter RAI, Unter-/Überschreitung RAI < -2/ > +2: Häufigkeit deutlich zu trockener/nasser Ereignisse, Sdv. – räumlich: Variabilität der RAI-Werte innerhalb der RMR, 10%/90%-Perzentil: Änderung in der Größe besonders trockener bzw. nasser Ereignisse). 103

Tabelle 13: Charakteristische Wetterlagen (GWLk: GWL, Zyklonalität, ASR, Sektoren) zu Beginn/Ende von Trockenperioden (TP) und Nassperioden (NP); mindestens 3% Abweichung relativer Häufigkeit der Wetterlagen 112

1. Einleitung

Das Klima der Erde oder bestimmter Regionen ist nicht konstant, sondern fortwährenden Veränderungen unterworfen (IPCC 2007). Das Verständnis für Klimaänderungen, insbesondere (jedoch nicht allein) vor dem Hintergrund des anthropogenen Klimawandels, ist von hoher sozialer und wirtschaftlicher Relevanz. Forschungsprojekte beschäftigen sich intensiv mit klimatischen Veränderungen und deren Folgen auf globaler, kontinentaler und regionaler Ebene (IPCC 2007). In Deutschland zählen dazu die vom BMBF geförderten Klimazwei- und KLIMZUG-Projekte. Im Mittelpunkt des Forschungsinteresses stehen dabei meist Untersuchungen zu Veränderungen in Mittel- und Extremwerten bodennaher Klimaelemente wie Temperatur und Niederschlag. Darauf aufbauend können komplexere, von einer Vielzahl von Klimaelementen beeinflusste Zusammenhänge, wie Veränderungen des Wasserhaushaltes, betrachtet werden. Dazu zählen auch Verschiebungen in Häufigkeit, Intensität, Andauer und räumlicher Ausdehnung von Trockenphasen. In Deutschland zeichnet sich eine innerjährliche Umverteilung der Niederschläge mit deutlich trockeneren Verhältnissen im Sommerhalbjahr ab. Entsprechende Veränderungen erzeugen einen hohen Anpassungsdruck in verschiedenen Wirtschaftssektoren, wie Wasserver- und -Entsorgung, Land- und Forstwirtschaft, sowie weiteren wassersensitiven Gewerben. Sie betreffen jedoch auch Bereiche wie Umweltschutz und Luftreinhaltung.

Als Grundlage für die innerhalb des KLIMZUG-Projektes REGKLAM zu entwickelnden Anpassungsoptionen in verschiedenen Wirtschaftssektoren werden in diesem Bericht die Ergebnisse regionaler Klimaprojektionen hinsichtlich der Veränderungen in der Niederschlagsverteilung mit besonderem Fokus auf die Nass- und Trockenphasen dargestellt. Je nach Anwendungszweck gibt es zahlreiche Indikatoren zur Beschreibung der Intensität und Andauer besonders trockener oder nasser Zustände. Grundsätzlich wird zwischen meteorologischen, hydrologischen, land- und forstwirtschaftlichen sowie sozioökonomischen Dürren unterschieden. Alle Dürren beginnen zunächst mit einem Niederschlagsdefizit und können dann durch weitere Faktoren klimatischer oder sozioökonomischer Art intensiviert werden. Um den Einfluss sich verändernder sozioökonomischer Randbedingungen klar von klimatologischen Veränderungen abzugrenzen, konzentriert sich dieser Bericht auf rein meteorologische Trockenheitsindikatoren. Der Begriff Dürre wird in diesem Bericht nicht verwendet, da er im deutschen Sprachgebrauch zumeist wirkungsbezogen verwendet wird und die hier untersuchten Indikatoren nicht zwangsläufig an Auswirkungen gekoppelt sein müssen. Mehr Informationen zur Definition von Dürre/Trockenheit sowie den verwendeten Indikatoren sind im Zwischenbericht des TP 2.1 (ZB2009; Hoy u. Hänsel 2009) nachzulesen.

Die natürliche Klimavariabilität der mittleren Breiten der Nordhemisphäre wird zu großen Teilen durch Fluktuationen der atmosphärischen Zirkulation verursacht. Folglich trägt deren Analyse auch für die REGKLAM-Modellregion Dresden (RMR) zu einem besseren Verständnis ihrer Wechselwirkungen mit bodennahen Klimaelementen, z.B. Niederschlags- und Dürreereignissen, und möglichen anthropogen bedingten Klimaveränderungen in diesem Jahrhundert bei. Die atmosphärische Zirkulation ist durch komplexe räumliche und zeitliche Strukturen geprägt. Zu deren Vereinfachung werden charakteristische Zirkulationsmuster definiert und zu einer bestimmten Anzahl an Zirkulationsformen, z.B. Großwetterlagen, zusammengefasst (Barry u. Perry 1973; Yarnal 1993). Diese bilden die Grundlage für weitere Analysen, z.B. von Zeitreihen bodennaher Klimaelemente oder Aerosolgenese und -transport (TP 2.2). Die Methoden zur Klassifizierung atmosphärischer Zirkulation lassen sich zu drei Gruppen zusammenfassen: 1) „objektive" bzw. „automatisierte", 2) „gemischte" bzw. „hybride"[1] und 3) „subjektive" bzw. „manuelle" Klassifizierungsmethoden[2] (Yarnal 1993; Huth

[1] Gemischte oder hybride Klassifizierung kombiniert Elemente empirischer und automatisierter Klassifikationen. Sie ist ohne großen Zeitaufwand durchführbar und ermöglicht die Erzeugung leicht reproduzierbarer und interpretierbarer Resultate (Enke et al. 2005)

[2] Beispiele sind für 1) die objektive Wetterlagenklassifikation des Deutschen Wetterdienstes (oWLK) und objektivierte Zeitreihen der Großwetterlagenklassifikation, für 2) die Temperatur- und Niederschlagszeitreihen von WETTREG und WEREX und für 3) die originale Großwetterlagenklassifikation (GWLk) oder die Lamb-Wettertypen für die Britischen Inseln.

et al. 2008). Mit dem EU-Projekt COST733[3] stieg die Anzahl der in Europa verfügbaren Klassifikationen atmosphärischer Zirkulation stark an. Mit diesem Projekt sind vor allem Analysen automatisierter Klassifikationen verbunden, die sich aufgrund der verwendeten Eingangsdaten überwiegend auf einen Zeitraum von reichlich 40 Jahren (1958–2001) beziehen (Philipp et al. 2010). Für die Untersuchung klimatischer Variabilität sind jedoch möglichst lange Zeitreihen von Vorteil, um die Robustheit von Aussagen zu mittleren Eigenschaften, Schwankungs- und Trendverhalten und zu Zusammenhängen mit bodennahen Klimaelementen zu erhöhen. Entsprechend lange Zeitreihen von z.T. >100 Jahren lagen bislang nur für manuelle Klassifikationen vor. Für Deutschland bezieht sich diese Aussage vor allem auf die Klassifikation der Großwetterlagen Europas (GWLk), die daher auch im Fokus des Projektantrages von TP 2.1b stand. Zusätzlich werden in diesem Bericht zwei weitere Klassifikationen verwendet: eine objektivierte Version der GWLk und die objektive Wetterlagenklassifikation des Deutschen Wetterdienstes (oWLK). Die Wetterlagen werden auf beobachtete Veränderungen ihrer Häufigkeit und zukünftige, projizierte Entwicklungen untersucht. Letztere Untersuchungen werden anhand verschiedener Globalmodelle vorgenommen, da großräumige Aussagen zu Veränderungen atmosphärischer Zirkulation mittels von Regionalmodellen aufgrund deren geringen räumlichen Abdeckungen nicht möglich sind.

Dieser Bericht ist in vier Hauptabschnitte gegliedert. Nach einem kurzen Überblick über die bereits innerhalb von REGKLAM erzielten Erkenntnisse (Kapitel 2), widmet sich Kapitel 3 – *Atmosphärische Zirkulation* – der Untersuchung von beobachteten und projizierten Veränderungen der Häufigkeit relevanter Wetterlagen und Anströmrichtungen. Kapitel 4 – *Trockenheit und Nassphasen* – stellt die durch regionale Klimamodelle für das 21. Jahrhundert projizierten Veränderungen hinsichtlich des Auftretens von Trockenheit dar. Der Fokus liegt dabei auf den Veränderungen in Häufigkeit, Dauer und Intensität der Ereignisse. Neben auf Tagesniederschlagsdaten basierenden Indikatoren werden auch auf Monats- und Jahreszeitenebene aggregierte Daten untersucht und hinsichtlich der erwarteten Veränderungen bewertet. Anhand einiger Indikatoren werden auch Veränderungen in den besonders nassen Bedingungen untersucht. Kapitel 5 – *Zusammenhang zwischen atmosphärischer Zirkulation und regionalen Klimakenngrößen*" – führt die Ergebnisse aus den beiden vorhergehenden Kapiteln zusammen und ermöglicht eine Bewertung ihrer Plausibilität. Eine zusammenfassende Diskussion und Bewertung aller erzielten Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6 – *Zusammenfassende Betrachtung*.

[3] „Harmonisation and Applications of Weather Types Classifications for European Regions" (Harmonisierung und Anwendungen von Wettertypenklassifikationen in europäischen Regionen)

2. Bisherige Erkenntnisse

2.1 Überblick über bisherige Ergebnisberichte und Veröffentlichungen

In verschiedenen REGKLAM-Publikationen und Zwischenberichten wurden schon diverse Ergebnisse des TP 2.1b zu beobachteten und projizierten Veränderungen in

1) Häufigkeit, Andauer, Intensität und räumlichen Eigenschaften von Nass- und Trockenphasen
2) der atmosphärischen Zirkulation und zu
3) möglichen Zusammenhängen zwischen beiden

veröffentlicht.

Die Klimadiagnose stand im Fokus des *Zwischenberichtes von TP2.1b* (ZB2009; Hoy u. Hänsel 2009). Jener Bericht besteht aus den drei Hauptkapiteln:

- Analyse und Trends ausgewählter Dürreindikatoren,
- Retrospektive Veränderungen im Auftreten der Großwetterlagen nach Hess u. Brezowsky,
- Einfluss der Großwettertypen auf das Niederschlags- und Temperaturregime.

Weitere Ergebnisse zu beobachteten Niederschlags- und Zirkulationsveränderungen sind im ersten Band der REGKLAM-Publikationsreihe „Das Klima der Modellregion Dresden (Bernhofer et al. 2009) veröffentlicht:

- 3.3.2 Zeitliche Variabilität des Niederschlags – Niederschlagsanomalien,
- 3.8.2 Meteorologische Trockenheit,
- 3.9 Klimatologie der Großwettertypen.

Aussagen zu zukünftig möglichen Veränderungen unter Nutzung globaler und regionaler Klimamodelldaten sowie intensiven Literaturrecherchen wurden u.a. im Fortschrittsbericht des TP2.1b (FB2010, Hoy 2010) sowie im zweiten Heft der REGKLAM-Publikationsreihe (Bernhofer et al. 2011) dargestellt. Der FB2010 enthält fünf fachliche Hauptkapitel:

- Allgemeine Aussagen zu Klimaänderungen und deren Unsicherheiten in der RMR,
- Klassifikationen atmosphärischer Zirkulation,
- Spezielle Untersuchungen der atmosphärischen Zirkulation für Sachsen,
- Nordatlantische Oszillation (Sommer- und Winter-NAO),
- Northern Annual Mode (NAM)/ Arktische Oszillation (AO).

Beiträge zum REGKLAM Heft 2 „Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden“ (Bernhofer et al. 2011) lieferte das TP 2.1b in folgenden Kapiteln:

- 3.3 Niederschlag,
- 3.7 Extremwertbetrachtungen (u.a. Aussagen zu Starkniederschlag und Trockenheit),
- 3.8 Wetterlagenklimatologie der Modelle WEREX IV und WETTREG 2006.

Nachfolgend sind die innerhalb der REGKLAM-Laufzeit bisher erstellten Publikationen, Konferenzbeiträge und Poster sowie die über RGEKLAM-relevante Inhalte gehaltenen Vorträge aufgelistet.

Begutachtete wissenschaftliche Artikel:

- Hoy A, Jaagus J, Sepp M, Matschullat J (2012a) Spatial response of two European atmospheric circulation classifications (data from 1901 to 2010). Theor Appl Climatol. doi: 10.1007/s00704-012-0707-x
- Hoy A, Sepp M, Matschullat J (2012b) Atmospheric circulation variability in Europe and northern Asia (1901 to 2010). Theor Appl Climatol. doi: 10.1007/s00704-012-0770-3
- Hoy A, Sepp M, Matschullat J (2012c) Large scale atmospheric circulation forms and their impact on air temperature in Europe and northern Asia. Theor Appl Climatol (accepted)

Proceedings/Konferenzartikel (z.T. begutachtet)

- Hänsel S, Matschullat J (2009) Changes in the characteristics of dry and wet spells in Central Eastern Germany. In: Pribullová, Bičárová (eds) Sustainable Development and Bioclimate. Reviewed Conference Proceedings: 16-17; Stará Lesna
- Hänsel S, Matschullat J (2009) Changes in precipitation characteristics in Central Eastern Germany – Trends of extreme precipitation and drought. In: Pribullová, Bičárová (eds) Sustainable Development and Bioclimate. Reviewed Conference Proceedings: 22-23; Stará Lesna
- Hänsel S, Matschullat J (2009) Monthly trends of daily heavy precipitation indicators from lowland to mountainous regions in Saxony, Germany. In: Pribullová, Bičárová (eds) Sustainable Development and Bioclimate. Proceedings: 18-19; Stará Lesna
- Hoy A, Matschullat J (2009) Changes in the frequency of Grosswetterlagen and their characteristics in Saxony. In: Sustainable development and bioclimate. Proceedings: xx-xx; Stará Lesna
- Hoy A, Matschullat J (2009) Changes in Atmospheric Circulation and Drought Events in Central Eastern Germany. In: Pribullová, Bičárová (eds) Sustainable development and bioclimate. Reviewed Conference Proceedings: xx-xx; Stará Lesna

Vorträge auf internationalen Konferenzen

- Hänsel S, Matschullat J (2012) How to use regional climate projections in climate change adaptation? 12th EMS Annual Meeting & 9th European Conference on Applied Climatology, 10.–14. September 2012, Lodz, Polen
- Hoy A, Sepp M, Matschullat J (2011) Spatial relevance and temporal development (1901–2010) of two manual atmospheric circulation classifications in Europe. European Conference on Applications of Meteorology, Berlin, Germany, 15.09.2011
- Hänsel S (2010) Abschätzung der Häufigkeit und Intensität von Trockenphasen im 21. Jahrhundert am Beispiel der REGKLAM-Modellregion Dresden. DACH2010 Meteorologentagung, 20.-24. September 2010, Bonn
- Hänsel S, Matschullat J (2009) Changes in precipitation characteristics in Central Eastern Germany – Trends of extreme precipitation and drought. Conference on sustainable development and bioclimate, 5th to 8th October 2009, Stará Lesna, Slowakei
- Hänsel S, Łupikasza E, Matschullat J (2008): Changes in Drought Characteristics and Patterns in South-Eastern Germany and Southern Poland for 1951—2006, 8th Conference on Applied Climatology (ECAC), Amsterdam, The Netherlands, 29.09.–03.10.2008

Weitere Vorträge (z.B. Workshops)

- Hänsel S, Matschullat J (2012) Regional climate change – trends, impacts and adaptation. Workshop „Einfluss des Klimawandels auf Umwelt und Erdbauwerke I", 7. Dezember 2012, Hochschule Zittau Görlitz (invited keynote lecture)
- Hänsel S (2012) Beispiele für den Umgang mit Klimamodelldaten in der Landwirtschaft. CSC-Workshop 'Statistische Verfahren in der Auswertung von Klimamodell- und Impaktmodelldaten', 5./6. November 2012, Hamburg

- Hänsel S, Matschullat J (2011) Analyse regionaler Niederschlagsextreme. Experten-Workshop "Entwicklung von Extremereignissen". 15./16. Dezember 2011, Dresden
- Hänsel S (2011) Trockenheitstrends in regionalen Klimaprojektionen am Beispiel der REGKLAM-Modellregion Dresden. Kolloquium der DMG, 23. Februar 2011, Offen-bach/Main
- Hänsel S (2011) Climate change, its impacts and response strategies in Saxony. Europaweites Netzwerktreffen für Multiplikatoren in der Jugend- und Umweltbildungsarbeit, Solaris Förderzentrum für Jugend und Umwelt gGmbH Sachsen, 26.01.2011, Chemnitz
- Hänsel S (2011) Trockenheit in Klimaprojektionen. TP 2.1 Workshop, 28.03.2011, Tharandt
- Hoy A (2011) Projizierte Zirkulationsveränderungen – Literaturrecherche für Mitteleuropa und die REGKLAM Modellregion. TP 2.1 Workshop, 28.03.2011, Tharandt
- Hänsel S (2010) Niederschlagsvariabilität in Sachsen. Klimatisch des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 20.01.2010
- Hänsel S (2010) Umgang mit Klimaprojektionen im KLIMZUG-Projekt REGKLAM. Meteorologisches Kolloquium, Institut für Meteorologie, Fachbereich Geowissenschaften, Freie Universität Berlin gemeinsam mit dem Zweigverein Berlin und Brandenburg der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft e.V., 28.06.2010

Posterbeiträge

- Hänsel S (2012) Regional Drought Projections. 12th EMS Annual Meeting & 9th European Conference on Applied Climatology, 10.–14. September 2012, Lodz, Polen
- Hänsel S (2012) Projizierte Veränderungen in der Dauer und Häufigkeit von Trockenperioden. REGKLAM Regionalforum, 14.11.2012, Dresden
- Hänsel S (2012) Regional Drought Projections. Annaberger Klimatage 2012, 9./10. Mai 2012, Annaberg-Buchholz
- Miketta W., Hänsel S, Matschullat J (2012) Linking European long-term dry and wet periods with atmospheric circulation patterns. Annaberger Klimatage 2012, 9./10. Mai 2012, Annaberg-Buchholz
- Hänsel S (2011) Regional Drought Projections. 10th International NCCR Climate Summer School, 4–9. September 2011. Grindelwald, Schweiz
- Hänsel S (2011) Häufigkeit und Dauer von Trockenphasen in regionalen Klimaprojektionen. Fachsymposium Wasserbezogene Anpassungsmaßnahmen an den Landschafts- und Klimawandel in Deutschland, 22–24. Juni, 2011. Großräschen/Lausitz
- Hänsel S, Matschullat J (2010) Dezil-Dürre- und Nassperioden im 21. Jahrhundert am Beispiel der REGKLAM-Modellregion Dresden, DACH2010 Meteorologentagung, 20–24. September 2010, Bonn
- Surke S, Hänsel S (2010) Anwendung eines automatisierten Dürre-Analyse-Verfahrens für die REGKLAM-Modellregion Dresden. DACH2010 Meteorologentagung, 20–24. September 2010, Bonn
- Hänsel S (2010) Changes in drought frequency, severity and duration in the 21st century, model region Dresden, REGKLAM project. WCRP-UNESCO Workshop on metrics and methodologies of estimation of extreme climate events, 27–29. September 2010,UNESCO headquarters, Paris, France
- Hänsel S, Surke M (2010) Veränderungen in der Trockenzeitenhäufigkeit und –intensität. 7. Annaberger Klimatage: Komplexe Erkenntnis – Robustes Handeln, 5./6.05.2010, Annaberg
- Hoy A, Matschullat J (2010) Markante Anomalien klimatischer Parameter an der Säkularstation Potsdam 1901–2009 – Zusammenhänge mit der atmosphärischen Zirkulation, DACH Meteorologentagung, Bonn, 2010
- Hoy A, Jaagus J, Matschullat J (2010) Extremes in Surface Climate Parameters and Atmospheric Circulation Patterns in Eastern Germany and Estonia, Cost733 Final Conference (Cost733: Harmonisation and Applications of Weather Type Classifications for European regions), Wien, 2010

- Lehmann S, Hänsel S (2010) Eigenschaften und Trends der bodennahen Luftfeuchtigkeit. 7. Annaberger Klimatage: Komplexe Erkenntnis – Robustes Handeln, 5./6.05.2010, Annaberg
- Hänsel S, Matschullat J (2009) Monthly trends of daily heavy precipitation indicators from lowland to mountainous regions in Saxony, Germany. Conference on sustainable development and bioclimate, 5–8. Oktober 2009, Stará Lesna, Slowakei.
- Hänsel S, Matschullat J (2009) Changes in the characteristics of dry and wet spells in Central Eastern Germany. Conference on sustainable development and bioclimate, 5–8. Oktober 2009, Stará Lesna, Slowakei.
- Hänsel S, Matschullat J (2009) Changes in the frequency of Grosswetterlagen and their characteristics in Saxony. Conference on sustainable development and bioclimate, 5–8. Oktober 2009, Stará Lesna, Slowakei.
- Hoy A, Matschullat J (2009) Changes in Atmospheric Circulation and Drought Events in Central Eastern Germany. Conference on sustainable development and bioclimate, 5–8. Oktober, Stará Lesna, Slowakei

In den beiden folgenden Abschnitten werden kurz die wichtigsten Erkenntnisse diesen Publikationen und Berichte hinsichtlich der Veränderungen von Trockenheit, Nassphasen, atmosphärischer Zirkulation und ihren Zusammenhängen dargestellt.

2.2 Klimadiagnose

Trockenheitsindikatoren: Über das gesamte Jahr betrachtet wurden im Zeitraum 1951–2005 anhand verschiedener Trockenheitsindikatoren in der RMR nur recht geringe Änderungen beobachtet; konsistent mit den geringen Veränderungen im Jahresniederschlag. Die beobachtete Umverteilung der Niederschläge innerhalb des Jahres spiegelt sich auch in den Trockenheitsindikatoren wieder. Die Intensität und Häufigkeit trockener Niederschlagsanomalien hat im Sommerhalbjahr (SHJ) zu- und im Winterhalbjahr (WHJ) abgenommen. Obwohl in beiden Halbjahren in der Referenzperiode 1961–1990 Trockentage ähnlich häufig auftraten, ordneten sich diese im Winterhalbjahr häufiger zu mindestens elf Tage andauernden meteorologischen Trockenperioden an als im Sommerhalbjahr. Dies ist durch das stärker konvektiv beeinflusste Niederschlagsregime im Sommer zu erklären, welches das Potential für die Unterbrechung von Trockenphasen durch Starkniederschlagsereignisse im Vergleich zum Winter erhöht. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhundert zeigt sich jedoch ein Trend zu einer Verlängerung der sommerlichen Trockenperioden, während im Winter entgegengesetzte Tendenzen auftraten. Anscheinend hat während des Sommerhalbjahres das Potential zur Ausbildung stabiler, mit trockenen Bedingungen einhergehenden Zirkulationsverhältnissen zugenommen. Nichtsdestotrotz sind auch Tendenzen zum gehäuften Auftreten von Starkniederschlagsereignissen in den Sommermonaten beobachtet wurden. Daraus lässt sich schließen, dass mittlere Niederschläge zu Gunsten der extremeren Bereiche der Niederschlagsverteilung abgenommen haben, sich also die Variabilität des Niederschlags erhöht hat. Über den Dezil-Indikator betrachtete lange (mind. drei Monate andauernde) Trockenphasen treten in der RMR und Umgebung häufig zur gleichen Zeit an einer Vielzahl von Stationen auf. Sie zeigen zudem in einigen (aufeinanderfolgenden) Jahren ein gehäuftes Auftreten. Dies zeigt die Bedeutung großräumiger Zirkulationsverhältnisse für das Niederschlagsverhalten. Veränderungen in der Häufigkeit und Andauer solch langer Trockenphasen sind – aufgrund ihrer im Vergleich zur Länge des Untersuchungszeitraumes langen Andauer und der Höhe der natürlichen zeitlichen Niederschlagsvariabilität – nicht robust bestimmbar.

Großwetterlagen: Im ZW2009 (Hoy u. Hänsel 2009) wurden Entwicklungen der Häufigkeit von atmosphärischen Zirkulationsmustern, speziell von Großwetterlagen (GWL) und Großwettertypen (GWT), untersucht. Die linearen Trends der monatlichen, saisonalen und jährlichen Auftrittshäufigkeiten von GWL/GWT wurden für den Zeitraum 1901–2007 analysiert. Einige Wetterlagen wiesen in diesem Zeitraum ganzjährig ähnliche Trendrichtungen (bspw. deutliche Zunahme der Südwest- und markante Abnahme der Nordostlagen) auf, während bei anderen ausgeprägte jahreszeitliche Unterschiede auftraten. Die festgestellten linearen Trends waren jedoch nur in wenigen Fällen über den Gesamtzeitraum stabil. Variable Trendanalysen (nach Rapp 2000) zeigten, dass Trendrichtung und -stärke der Wetterlagenfrequenz abhängig von der Länge sowie dem Start- und Enddatum der Untersuchung waren. Dennoch eigneten sich die ermittelten linearen Trendwerte für eine übersichtliche, vergleichende Darstellung von Veränderungen in der Wetterlagenhäufigkeit. In Abschnitt 3.2 dieses Berichtes werden die Ergebnisse daher auf den Zeitraum 1901–2010 aktualisiert sowie weitere Zirkulationstypen und die Ergebnisse der Halbjahre eingeschlossen. Zusätzlich wird die GWLk mit den Zeitreihen der neu vorliegenden, bisher unveröffentlichten (experimentellen) automatisierten GWLk-Version (Version 2011) von Paul James (persönliche Kommunikation; Wissenschaftler beim DWD Offenbach) für den gleichen Zeitraum verglichen. Diese aktualisierte und erweiterte Darstellung ist wichtig, um Anwendern der GWLk innerhalb von REGKLAM (wie TP 2.2) einen aktuellen und repräsentativen Datensatz zur Verfügung stellen zu können.

Zusammenhänge zwischen Zirkulation und Klimakenngrößen: Anhaltspunkte für zirkulationsbedingte Veränderungen im Temperatur- und Niederschlagsregime und den Dürrecharakteristika lieferten Betrachtungen anhand von monatlichen Temperatur- und Niederschlagsdaten. Diese wurden sowohl im ZB2009 als auch in Heft 1 der REGKLAM Publikationsreihe, *„Das Klima in der REGKLAM-Modellregion Dresden*" (Bernhofer et al. 2009) publiziert. Der Einfluss der GWT auf das Niederschlags- und Temperaturverhalten der RMR wurde anhand der beiden einzigen innerhalb der RMR gelegenen hauptamtlichen Wetterstationen (Dresden-Klotzsche und Zinnwald-Georgenfeld)

dargestellt. Die Gegenüberstellung der 20- bzw. 15-jährigen Zeiträume 1971–1990 und 1991–2005 ergab für fast alle Wetterlagen eine z. T. signifikante Erwärmung. An beiden Stationen stieg der erwärmende Einfluss der Westlagen besonders stark, während die Nordlagen (bei ähnlicher Häufigkeit) trotz vergleichsweise leichter Temperaturerhöhung die Mitteltemperatur weiterhin am deutlichsten absenkten. Veränderungen im Niederschlagsregime gestalteten sich weniger uniform; es konnten jedoch eine markante Niederschlagsabnahme bei Westlagen sowie deutlich höhere Niederschläge während Südwest-, Nordwest- und Nordlagen festgestellt werden. Eine zukünftige flächenhafte Untersuchung anhand von Rasterdaten (z.B. RAKLIDA) bietet sich an, um repräsentativere Ergebnisse für das Untersuchungsgebiet zu erzielen.

2.3 Klimaprojektionen

Niederschlag mit Fokus auf Trockenheit und Starkniederschlag: Die durch die Ergebnisse der vier regionalen Klimamodelle (CLM, REMO, WETTREG 2006 und WEREX IV) unter der Annahme der drei SRES-Emissionsszenarios (A1B, B1 und A2) projizierten Niederschlagsveränderungen sind im REGKLAM-Heft 2 (Bernhofer et al. 2011) ausführlich dargelegt. Es zeigt sich, dass der Globalmodellantrieb sowie das gewählte Regionalisierungsverfahren einen größeren Einfluss auf die projizierten Niederschlagsveränderungen haben als das Emissionsszenario.

In der Modellvalidierung[4] zeigen die Modelldaten zumindest auf der zeitlich aggregierten Ebene von (Halb)Jahresniederschlägen eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen. Einzig das Modell REMO überschätzt trotz der vorgenommenen Driftkorrektur die Niederschläge deutlich – insbesondere im Sommer. Auch die anderen Modelle haben im Sommer die größten Schwierigkeiten die beobachtete Niederschlagscharakteristik wiederzugeben. Dies ist durch den größeren Anteil konvektiver Niederschläge am Gesamtniederschlag im Sommer zu erklären. Zur Erfassung konvektiver Niederschlagsprozesse ist die räumliche Auflösung der Modelle zu grob, weshalb diese Prozesse im Modell parametrisiert werden. Durch dieses Vorgehen und die Unsicherheit darüber, ob die aus der Vergangenheit abgeleiteten Parametrisierungen auf die zukünftigen Verhältnisse übertragbar sind, lassen die Modelldaten nur eingeschränkte Aussagen zu häufig mit konvektiven Ereignissen verbundenen Starkniederschlägen und deren Veränderungen zu.

Hinsichtlich der projizierten Niederschlagsveränderungen zeigen die beiden verwendeten Modellklassen (dynamisch: REMO, CLM; statistisch: WETTREG 2006, WEREX IV) deutliche Unterschiede. Die dynamischen Modelle simulieren eher Niederschlagszunahmen (Jahr, Frühjahr, Herbst, Winter), die statistischen eher Niederschlagsabnahmen (Jahr, Sommer, Herbst). Modellübergreifend wird der Sommer im 21. Jahrhundert trockener. Diese Tendenz zeigt sich auch in den Trockenheitsindikatoren. Trockentage nehmen v.a. im Sommer zu; während Niederschlagstage abnehmen. Die bereits in den Beobachtungsdaten sichtbare Tendenz zu einer Verlängerung der Trockenphasen setzt sich in den Projektionen fort. Dabei sind die Veränderungen zur Mitte des 21. Jahrhunderts noch recht moderat; während sich die beschriebenen Tendenzen zum Ende des 21. Jahrhunderts hin verstärken. Im Allgemeinen sind die Trockenheitstrends im Tiefland etwas stärker ausgeprägt als im Bergland. Die projizierten geringen Niederschlagszunahmen des Winterhalbjahres gehen mit häufigeren kleinen und mittleren Tagesniederschlägen einher. Eine Tendenz in Richtung häufigerer Starkniederschläge zeigen insbesondere die dynamischen Modelle für das Winterhalbjahr. Grundsätzlich sind die beschriebenen Änderungssignale klein im Vergleich zur dekadischen Niederschlagsvariabilität. Sie sind somit als weniger robust als die Temperaturänderungssignale einzuschätzen.

Atmosphärische Zirkulation: Als Vorbereitung auf die in diesem Abschlussbericht enthaltenen Untersuchungen zu projizierten Veränderungen atmosphärischer Zirkulation und deren Auswirkungen auf die RMR wurde im *Fortschrittsbericht von TP2.1b* (FB2010 vom Dezember 2010; *Hoy 2010*) eine entsprechende Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wurde die forschungsrelevante Literatur (insbesondere) der vergangenen zehn Jahre auf für Mitteleuropa/die RMR relevante Ergebnisse untersucht. Dies umfasste 1) spezifische Studien zu Zirkulationsveränderungen in Sachsen, 2) Literatur zu Nordatlantischer Oszillation (NAO) und Northern Annual Mode (NAM) sowie 3) Studien, in denen Veränderungen in der Häufigkeit von Wetterlagen anhand von automatisierten Klassifikationen atmosphärischer Zirkulation analysiert wurden. Die genannte Auswahl steht im Einklang mit den im Projektantrag benannten Kenngrößen atmosphärischer Zirkulation und geht über diese hinaus. Sofern möglich, wurde vor allem auf die Ergebnisse von Studien unter Einbeziehung (möglichst vieler) Globalmodelle Bezug genommen. 1) In Sachsen wurde in zwei bereits durchgeführten Projekten (BLOCKWETT I & II; Enke et al. 2007; Spekat et al. 2008) die zukünftige Entwicklung von „Blocking"-Situationen[5] und Veränderungen in der Zugbahn von Tiefdruckgebieten anhand eines Klimamodells (ECHAM5) analysiert. Die Projektionen zeigten, bis auf wenige Ausnahmen,

[4] Vergleich von Beobachtungs- und Modelldaten für den Kontrollzeitraum 1961–2000

[5] Definition Blocking (Enke et al. 2007): am regulären West-Ost-Verlauf gehinderte Strömung durch a) langlebige, quasi-ortsfeste Hochdruckzellen oder b) Antizyklone-Zyklone-Wirbelpaare

keine ausgeprägten Veränderungen dieser Parameter, was von den Autoren auch auf analytische Schwierigkeiten zurückgeführt wurde. Eine Erweiterung dieser Untersuchungen, basierend auf neuen Analyseansätzen, sowie eine Ausweitung auf zusätzliche Globalmodelle wäre wünschenswert. 2) Projektionen von NAO/NAM auf Basis verschiedener Globalmodelle lassen eine (geringe) winterliche Intensivierung beider Oszillationen erwarten. Diese Projektionen sind jedoch mit großen Unsicherheiten verbunden. Für die RMR hätte diese Entwicklung höhere Wintertemperaturen zur Folge; ein signifikanter Einfluss auf den Niederschlag ist aufgrund der orographischen Gegebenheiten in der RMR jedoch fraglich. Aussagen zum Sommerhalbjahr sind aufgrund der Lage der RMR zwischen projizierten Niederschlagszunahmen in Nord- und projizierten Niederschlagsabnahmen in Südeuropa anhand von NAO/NAM nicht möglich. 3) Auf der Grundlage von Klassifikationen atmosphärischer Zirkulation wurden für Mitteleuropa bislang nur wenige Untersuchungen durchgeführt. James (2006, 2007) nutzte eine automatisierte Version der GWLk, während Demuzere et al. (2009) die Lamb-Wettertypen verwendeten. Konkrete Aussagen zu zukünftigen Veränderungen lassen sich für die RMR aufgrund der geringen Anzahl verfügbarer Untersuchungen und verwendeten Modelle daraus nicht ableiten, da auch die in den verfügbaren Analysen enthaltenen Unsicherheiten zu groß sind. Auf Grundlage dieser Erkenntnis wurde die Durchführung der in Abschnitt 3.4 dargestellten Untersuchungen zu projizierten Zirkulationsveränderungen anhand der oWLK beschlossen.

Wetterlagenstatistik: Auf der Statistik des beobachteten Wetters basierende Modelle geben Auskunft über projizierte zukünftige Änderungen im Klimaregime, indem Klassen von z.B. Temperatur und Niederschlag typische Zirkulationsmuster zugeordnet und auf Häufigkeitsveränderungen untersucht werden. Im zweiten Heft der REGKLAM Publikationsreihe *„Klimaprojektionen für die Modellregion Dresden*" (*Bernhofer et al. 2011*) wurde die projizierte Entwicklung der Häufigkeiten von Temperatur- und Niederschlagsklassen zweier statistischen Regionalmodelle (WEREX IV, Spekat et al. 2006 und WETTREG 2006, Spekat et al. 2007) für den Kontrollzeitraum 1961–1990 evaluiert und für die Projektionszeiträume 2021–2050 und 2071–2100 dargestellt. Die Verteilung der Temperaturklassen entspricht im Jahresgang annähernd einer Normalverteilung mit häufig auftretenden „moderaten" und seltenen „extremen" Temperaturverhältnissen. Diese Verteilung wird im Kontrolllauf realitätsnah wiedergegeben. Im Verlauf des 21. Jahrhunderts verschiebt sie sich jedoch erwartungsgemäß deutlich in Richtung der warmen Wetterlagen, während kalte Extreme nur noch selten auftreten. Beim Niederschlag dominieren die Wetterlagen mit geringer Niederschlagsneigung. Klassen mit starken Niederschlägen treten selten auf, sind jedoch für die Niederschlagsbilanz bedeutsam. Der Kontrolllauf bildet diese Verhältnisse wirklichkeitsnah ab, überschätzt allerdings die hohen Niederschlagsklassen. Während bis Mitte des 21. Jahrhunderts nur geringe Veränderungen projiziert werden, nimmt die trockenste Niederschlagsklasse gegen Ende des 21. Jahrhunderts im Sommer und bei WEREX IV auch im Winter deutlich zulasten der anderen Klassen zu. Die bei WEREX durch diese Entwicklung im Winter zu erwartende Niederschlagsabnahme wird möglicherweise durch die Zunahme der Klassen mit starken Niederschlägen kompensiert, so dass von den Modellen für diese Jahreszeit insgesamt nur geringe Änderungen der Gesamtniederschlagsmenge projiziert werden.

3. Atmosphärische Zirkulation

3.1 Verwendete Klassifikationen

3.1.1 Grosswetterlagenklassifikation (GWLk, 1881–2010)

Der erste Kalender europäischer Großwetterlagen wurde von Baur et al. (1944) veröffentlicht und umfasst 21 vorrangig über die Verteilung des Bodenluftdrucks bestimmte synoptische Formen, bezeichnet als Großwetterlagen (GWL). Eine methodologische Aktualisierung auf 25 GWL erfolgte drei Jahre später (Baur 1947). Hess u. Brezowsky (1952) überarbeiteten die Baur´sche Methodik und passten die Grundlagen der Klassifikation stärker den Höhendruckverhältnissen an. Die seit 1952 unter dem Namen „Katalog der Großwetterlagen Europas" erschienenen sieben Veröffentlichungen umfassen 29 GWL[6] (Hess u. Brezowsky 1952, 1969, 1977; Gerstengarbe u. Werner 1993, 1999, 2005; Werner u. Gerstengarbe 2010). Die in diesem Bericht verwendeten Daten stammen aus der aktuellsten, 2010 erschienenen Ausgabe und umfassen den Zeitraum 1881 bis 2009. Die Daten für 2010 wurden dem monatlich erscheinenden „Witterungsreport" des DWD entnommen (DWD 2010a).

Die GWLk wurde für Mitteleuropa entwickelt, lässt sich aber erfolgreich auf einen deutlich größeren Raum anwenden (James 2007; Huth 2010; Hoy et al. 2012a, b, c). Die im Katalog enthaltenen GWL werden vorrangig anhand der Lage der im europäisch-nordatlantischen Raum dominierenden Druckzentren in der mittleren Troposphäre (500 hPa-Fläche, ca. 5.500 m) bestimmt, z.B. zyklonal/antizyklonal geprägten Trögen/Rücken, abgeschlossenen Hoch- und Tiefdruckgebieten und dem Strahlstrom über Europa. Dennoch spielen die Luftdruckverhältnisse in Bodennähe weiterhin eine wichtige Rolle im Konzept der GWLk, da in Europa bis 1938 (und einem längeren Zeitraum im nordöstlichen Atlantik) nur Bodenluftdruckkarten vorlagen. Anders als in den meisten anderen Konzepten zur Klassifikation atmosphärischer Zirkulation müssen die in der GWLk enthaltenen synoptischen Typen (GWL) mindestens drei Tage andauern, um die Darstellung (eher) stabiler Wetterregime anstelle täglich unabhängiger Wetterzustände zu ermöglichen. Wenn der Übergang von einer zur anderen GWL länger als einen Tag andauert, werden diese Tage der vorhergehenden oder nachfolgenden GWL-Sequenz zugeordnet, je nachdem, welche eher kompatibel ist. Ist keine Zuordnung möglich, können ein oder (in Ausnahmefällen) zwei unbestimmte Tage auftreten (James 2007; Werner u. Gerstengarbe 2010). Da den unbestimmten Tagen keine spezifischen Eigenschaften zugeordnet werden können, werden sie in diesem Bericht nicht verwendet.

Zirkulationsformen: Tabelle 1 zeigt das System der Haupt- und Unterklassen der GWLk. In den entsprechenden Katalogen werden die GWL in 1) zyklonale und antizyklone GWL sowie 2) zehn Großwettertypen (GWT) unterteilt, die sich aus acht Anströmrichtungen und zwei direkt über Mitteleuropa gelegenen Klassen zusammensetzen. Die GWT können ihrerseits zu 3) drei Zirkulationsformen zusammengefasst werden. Diese Unterteilung kann aufgrund der hohen Kompression zirkulationsbezogener Informationen z.B. für Untersuchungen von bodennahmen Klimaparametern im Großraum Europa nützlich sein, wo die kleinteilige Unterteilung in GWL und z.T. auch GWT aufgrund deren räumlich unterschiedlicher Eigenschaften nur schwer anwendbar ist. So lässt sich bspw. die in Deutschland antizyklonal geprägte „Hochdruckbrücke über Mitteleuropa" (BM) im Norden Europas eher als Westlage klassifizieren, die mit einer Nordwärtsverschiebung des Strahlstroms einhergeht. Dennoch lassen sich zonale Westwetterlagen über die dreiteilige Unterteilung in Zirkulationsformen europaweit recht gut von eher meridional orientierten GWL abgrenzen. Letztere sowie die gemischte Zirkulationsform sind jedoch aus Luftmassen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften zusammengesetzt. Daher (und auch auf ausdrücklichen Wunsch von TP2.2) wird in diesem Bericht eine weitere Einteilung verwendet, die auf der Zuordnung zu vier Anströmrichtungen (ASR) fußt: **Südwest** (**SW***), **Nordwest** (**NW***), **Nordost** (**NO***) und **Südost** (**SO***). Diese Ein-

[6] Die ersten zwei Kataloge enthielten 28 GWL, wurden jedoch 1977 um die GWL „Nordost, zyklonal" (NEZ) ergänzt (Hess u. Brezowsky 1977)

teilung deckt sich mit den vier in der objektiven Wetterlagenklassifikation des DWD (oWLK) verwendeten ASR und stellt eine Vergleichbarkeit der in diesem Bericht verwendeten Analysen mit dieser Klassifizierungsmethode her. Die vier ASR können zu zwei Sektoren komprimiert werden: **Westsektor** (**W+**; SW* & NW*) und **Ostsektor** (**O+**; NO* & SO*). Diese Sektoreneinteilung orientiert sich an den in TP2.2 durchzuführenden Evaluierungen gegenwärtiger und zukünftiger Aerosolkonzentrationen. Alle ASR beinhalten die der Benennung zugrunde liegenden GWT sowie den hälftigen Anteil der GWT benannt nach den Haupthimmelsrichtungen (W, N, E, S). Beispielsweise wird der GWT „West" zu gleichen Teilen den ASR SW* und NW* zugeordnet.

Tabelle 1: Haupt- und Nebenklassen der Großwetterklassifikation (GWLk), erweitert nach Werner u. Gerstengarbe (2010): 29 Grosswetterlagen (GWL), 10 Grosswettertypen (GWT), 4 Anströmrichtungen, 3 Zirkulationsformen, 2 Zyklonalitätsformen; der Westsektor W+ setzt sich aus den Anströmrichtungen SW* und NW*, der Ostsektor O+ aus den Anströmrichtungen NO* und SO* zusammen.

Großwetterlagen (GWL)	Großwettertypen (GWT)	Anströmung (Gewicht)	Zirkulationsform	Zyklonalitätsform
WA Westlage, antizyklonal **WZ** Westlage, zyklonal **WS** Südliche Westlage **WW** Winkelförmige Westlage	**W** West	**SW*, NW*** (Halb)	**Zonal**	**A** Antizyklonal **Z** Zyklonal **Z** Zyklonal **Z** Zyklonal
SWA Südwestlage, antizyklonal **SWZ** Südwestlage, zyklonal	**SW** Südwest	**SW*** (Voll)	**Gemischt**	**A** Antizyklonal **Z** Zyklonal
NWA Nordwestlage, antizyklonal **NWZ** Nordwestlage, zyklonal	**NW** Nordwest	**NW*** (Voll)		**A** Antizyklonal **Z** Zyklonal
HM Hoch Mitteleuropa **BM** Hochdruckbrücke Mitteleuropa	**HME** Hoch Mitteleuropa	-		**A** Antizyklonal **A** Antizyklonal
TM Tief Mitteleuropa	**TME** Tief Mitteleuropa			**Z** Zyklonal
NA Nordlage, antizyklonal **NZ** Nordlage, zyklonal **HNA** Hoch Nordmeer, antizyklonal **HNZ** Hoch Nordmeer, zyklonal **HB** Hoch Britische Inseln **TRM** Trog Mitteleuropa	**N** Nord	**NW*, NO*** (Halb)	**Meridional**	**A** Antizyklonal **Z** Zyklonal **A** Antizyklonal **Z** Zyklonal **A** Antizyklonal **Z** Zyklonal
NEA Nordostlage, antizyklonal **NEZ** Nordostlage, zyklonal	**NO** Nordost	**NO*** (Voll)		**A** Antizyklonal **Z** Zyklonal
HFA Hoch Fennoskandien, antizyklonal **HFZ** Hoch Fennoskandien, zyklonal **HNFA** Hoch Nordmeer-FS, antizyklonal **HNFZ** Hoch Nordmeer-FS, zyklonal	**O** Ost	**NO*, SO*** (Halb)		**A** Antizyklonal **Z** Zyklonal **A** Antizyklonal **Z** Zyklonal
SEA Südostlage, antizyklonal **SEZ** Südostlage, zyklonal	**SO** Südost	**SO*** (Voll)		**A** Antizyklonal **Z** Zyklonal
SA Südlage, antizyklonal **SZ** Südlage, zyklonal **TB** Tief Britische Inseln **TRW** Trog Westeuropa	**S** Süd	**SO*, SW*** (Halb)		**A** Antizyklonal **Z** Zyklonal **Z** Zyklonal **Z** Zyklonal
U Unbestimmt				

3.1.2 Automatisierte Grosswetterlagenklassifikation nach James (SVG, 1871–2010)

Zur Erzielung jederzeit eindeutig reproduzierbarer Ergebnisse und der Anwendung auf Klimamodelle ist die Verwendung automatisierter Zeitreihen atmosphärischer Zirkulation sinnvoll. Für die GWLk liegen bereits mehrere entsprechende Ansätze, z.B. durch Krüger (2002), Kreienkamp (unveröff.) und James (2007) vor, die aufgrund der notwendigen Datengrundlagen bislang erst nach dem zweiten Weltkrieg beginnen und (bis auf letzteren Ansatz) auf die Mindestdauer von drei Tagen je GWL verzichten. Paul James entwickelte im Sommer 2011 auf Basis eines Reanalysedatensatzes eine neue, bis 1871(!) zurückreichende automatisierte GWLk-Zeitreihe (pers. Mitteilung, bislang unveröff.). Diese Klassifikation trägt den Namen „SynopVis Grosswetterlagen" (SVG) und orientiert sich stark am Aufbau der originalen GWLk. Sie basiert auf Korrelationen zwischen mittlerem Bodendruck, dem 500hPa Geopotential sowie der Schichtdicke zwischen den Geopotentialfeldern 500 hPa und 1000 hPa. Genutzt wird das „20th Century reanalysis dataset" der NOAA (1871–2008; „http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/20thC_Rean/"), welches um NCEP Reanalysen des Zeitraumes 2009–2011 ergänzt wurde. Die Klasseneinteilung in GWL und weitere Hauptklassen entspricht der in Tabelle 1 dargestellten Systematik der originalen GWLk. Die Zuordnung zu den einzelnen GWL ist jedoch gegenüber der GWLk insofern modifiziert, dass eine stärkere Gleichverteilung der Häufigkeiten der GWL erreicht werden soll. Zusätzliche Informationen zur SVG finden sich in Hoy et al. (2012b).

3.1.3 Objektive Wetterlagenklassifikation des DWD (oWLK, 1961–2100)

Daten: Der DWD verwendet derzeit hauptsächlich zwei Klassifizierungsverfahren atmosphärischer Zirkulation – die manuelle GWLk zur Abdeckung des mitteleuropäischen und (mit Einschränkungen) gesamteuropäischen Raums sowie eine eigens entwickelte automatisierte Klassifikation, die sog. „objektive Wetterlagenklassifikation" (oWLK; Dittmann et al. 1995; Bissoli u. Dittmann 2001), die für Deutschland und (mit Einschränkungen) Mitteleuropa relevant ist. Die vom DWD berechnete oWLK-Zeitreihe beginnt 1979 und wird fortlaufend aktualisiert. Die oWLK kann aufgrund ihrer Reproduzierbarkeit auf Klimaprojektionen angewandt werden, während dies für manuelle Klassifikationen aufgrund des damit verbundenen Klassifizierungsaufwandes quasi unmöglich ist. Von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) wurde der methodische Ansatz der oWLK im Rahmen des abgeschlossenen Projektes ClimChAlp (*Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the Alpine Space*; Krahe et al. 2008) erfolgreich auf Reanalyse- und Projektionsdaten des Klimamodells ECHAM5/MPI-OM (Roeckner et al. 2003) angewandt. Eine Erweiterung um zusätzliche Klimamodelle erfolgte im Rahmen des Projektes KLIWAS (*Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen in Deutschland*; Krahe et al. 2010). Hier wurden Zeitreihen der oWLK für zwölf verschiedene Läufe globaler Klimamodelle zur Verfügung gestellt (Krahe et al. 2010). Alle Modellläufe entstammen dem EU-Projekt ENSEMBLES (Royer et al. 2009). Dieser Datensatz wird im vorliegenden Bericht verwendet.

Die in der Datenbank verfügbaren und in diesem Bericht genutzten Modelldaten sind in Tabelle 2 dargestellt. Deutlich erkennbar ist die überproportionale Verfügbarkeit der Läufe des am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg entwickelten Klimamodells ECHAM5/MPI-OM, welchem mehr als die Hälfte der verwendeten Zeitreihen zuzuordnen sind. Diese Übergewichtung erfolgte bewusst, um die Einschätzung modellinterner Klimavariabilität unter Nutzung gleicher Emissionsszenarien (z.B. A1B) anhand unterschiedlicher Modellläufe zu ermöglichen. Mit dem Modell EGMAM wurde zusätzlich ein Klimamodell, basierend auf einer früheren Modellgeneration (wie ECHAM4), integriert (Krahe et al. 2010). Eine Bereitstellung zusätzlicher Zeitreihen, basierend auf weiteren europäischen Klimamodellen, ist durch die BfG angekündigt; entsprechende Daten sind bislang jedoch nicht verfügbar. Zur Validierung der Modellergebnisse liegen auf Beobachtungsdaten basierende Reanalysedaten von ERA40 (Uppala et al. 2005) für den Zeitraum 1961–2000 vor.

Tabelle 2: Übersicht der verwendeten Modellläufe und Reanalysedaten

Modell	**Herkunft**	**Lauf**	**Szenario**			**Datenverfügbarkeit**	
			A1B	**A2**	**B1**	**Reanalyse**	**Projektion**
BCM2	Norwegen	1	x			1950–1999	2001–2099
CNCM3	Frankreich	1	x	x		1950–2000	2001–2100
DMIEH5	Dänemark	4	x			1950–2000	2001–2100
EGMAM	*FU Berlin*	3	x			1950–1999	2001–2099
MPEH5	*MPI Hamburg*	1	x	x	x	1950–2000	2001–2100
		2	x			1950–2000	2001–2100
		3	x	x	x	1950–2000	2001–2100
ERA40		Reanalyse				1961–2000	–

Methodik (nach Krahe et al. 2010): Die zur Erstellung von oWLK-Datensätzen erforderlichen Eingangsdaten sind in Abbildung 1 dargestellt. Neben einer zonalen/meridionalen Windkomponente in ca. 3.000 m Höhe sind die Werte von geopotentieller Höhe, Lufttemperatur und relativer Feuchte von fünf Höhenniveaus für den Zeitpunkt 0 Uhr UTC (EGMAM4: 12 Uhr UTC) erforderlich. Diese Daten liegen je Modell, Lauf und Szenario für die in Abbildung 2 dargestellten, unterschiedlich gewichteten Gitterpunkte des Untersuchungsgebietes vor und bilden die Grundlage für die Ableitung von insgesamt 40 Wetterlagenklassen.

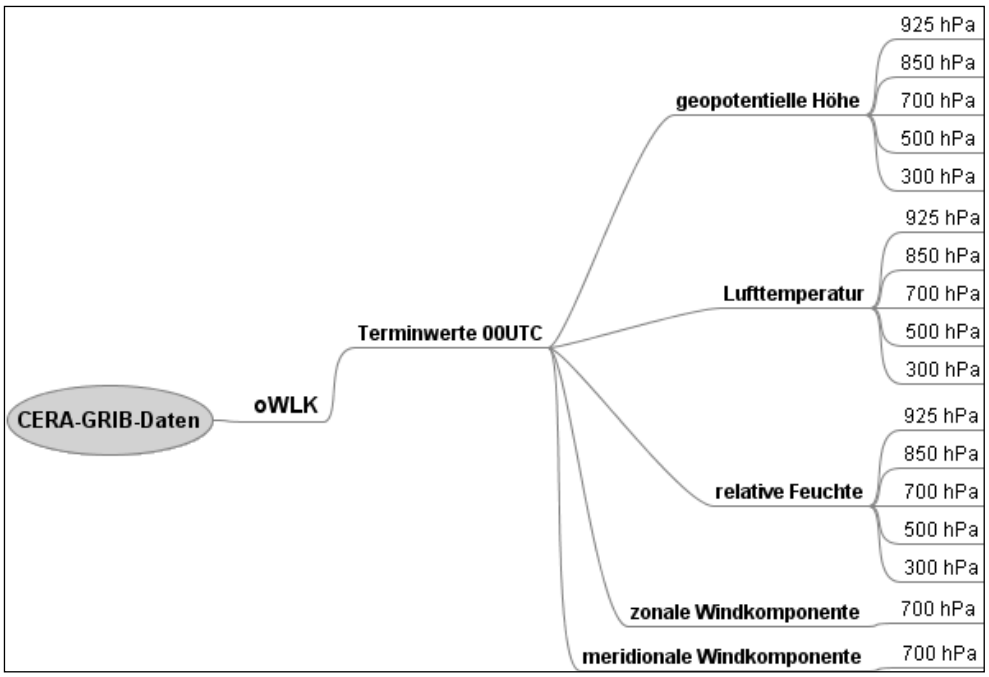


Abbildung 1: Übersicht der für die oWLK benötigten Eingangsgrößen (aus Krahe et al. 2010)

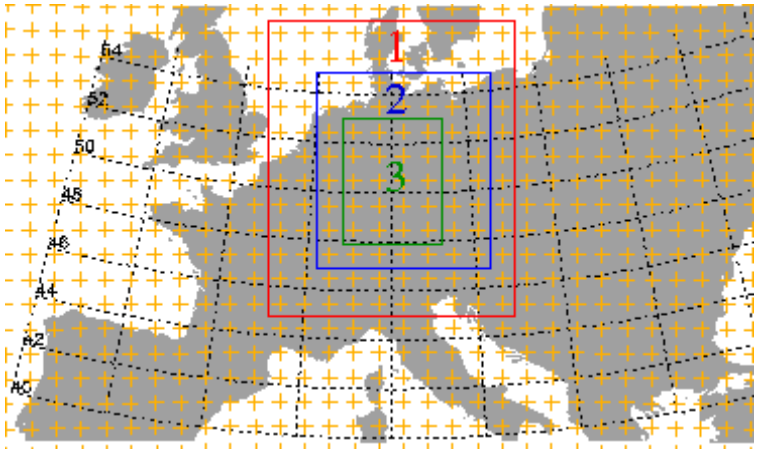


Abbildung 2: Definition des oWLK-Gitters für das gewählte Untersuchungsgebiet (Mitteleuropa). Die Zahlen bezeichnen eine dreifache, zweifache bzw. einfache Gewichtung der Gitterpunkte (gelb). Außerhalb des rot gekennzeichneten Gebietes gelegene Punkte wurden nicht berücksichtigt (aus Krahe et al. 2010)

Die Eigenschaften der Wetterlagenklassen basieren auf der unterschiedlichen Kombination von vier Eingangsgrößen (Abbildung 3): fünf Anströmrichtungen (aa), Zykonalität/Antizyklonalität in 500 hPa (z_{500}) und 950 hPa (z_{950}) sowie der Charakterisierung der Luftmasse als trocken oder feucht (Feuchte, f). Die Anströmrichtung ergibt sich aus der vorherrschenden Windrichtung in der freien Atmosphäre (700 hPa), sofern sich mehr als 2/3 der Windvektoren einem der vier 90°-Sektoren (NO, SO, SW, NW) zuordnen lassen. Ist dieses Kriterium nicht erfüllt, wird keine Zuordnung vorgenommen und die Kennung „XX" vergeben. Die Zyklonalität wird über die Krümmung des Geopotentials in Bodennähe (950 hPa) und der mittleren Troposphäre (500 hPa) ermittelt. Der Feuchteindex ergibt sich aus dem Vergleich des jeweiligen täglichen Niederschlagspotentials (Gebietsmittel des maximal möglichen Niederschlags) mit seinem langjährigen Mittelwert für genau diesen Tag des Jahres. Dieser Mittelwert ist frei definierbar und wurde in Krahe et al. (2010) für den Zeitraum 1961–2000 anhand von ERA40-Daten berechnet und sowohl auf den Reanalyse- als auch den Projektionszeitraum angewandt. Liegt der tägliche Wert oberhalb des Mittelwertes, so wird der Tag als „feucht", sonst als „trocken" klassifiziert.

Jede Wetterlagenklasse wird mit einer fünfstelligen Buchstabenkennung abgekürzt, und zwar in folgender Anordnung:

aa z_{950} z_{500} f mit:

aa =:	**Anströmrichtung:**	**XX = keine vorherrschende Richtung, NO = Nordost, SO = Südost, SW = Südwest, NW = Nordwest;**
z_{950} z_{500} =:	**Zyklonalität in 950 bzw. 500 hPa:**	**Z = zyklonal, A = antizyklonal;**
f =:	**Feuchte**	**F = feucht, T = trocken.**

Beispiel:
NOAZT = Nordost, antizyklonal in 950 hPa, zyklonal in 500 hPa, trocken.

Abbildung 3: Systematik der 40 Wetterlagen der oWLK (aus DWD 2010b)

3.2 Räumlicher Vergleich der Klassifikationen

3.2.1 Daten und Methoden

Typen atmosphärischer Zirkulation, z.B. GWL, liegen definierte strukturelle Eigenschaften zugrunde, die sie von anderen Zirkulationstypen der gleichen Klassifikation abgrenzen. Die Korrelation monatlicher Zeitreihen a) atmosphärischer Zirkulation und b) mittlerem Bodenluftdrucks erlaubt die **Verifikation der räumlichen Muster von Zirkulationstypen** und der mit diesen Mustern verbundenen Einflüsse auf bestimmte Gebiete (wie der RMR) anhand klimahistorischer Daten. Die erzeugten Korrelationskarten können dabei so interpretiert werden, dass positive Korrelationen Gebiete hohen Luftdrucks, negative niedrigen Luftdrucks kennzeichnen. Ähnliche Zirkulationstypen der drei vorgestellten Klassifikationen werden nachfolgend miteinander verglichen, um die Vergleichbarkeit dieser Typen als Grundlage der in den folgenden Abschnitten durchzuführenden Auswertungen zu verifizieren. Die Untersuchungen werden beispielhaft für den **West- (W+) und Ostsektor (O+)** aller drei Klassifikationen dargestellt.

Die Luftdruckdaten liegen als Rasterdatensatz in 5 x 5° globaler Auflösung im Zeitraum 1901–2010 vor wurden durch das britische "Hadley Centre" bereitgestellt (HadSLP2/HadSLP2r; Datensatz: http://hadobs.metoffice.com/hadslp2/data/download.html; Allan u. Ansell 2006). Die monatlichen Mittelwerte können laut den Autoren als homogen angesehen werden. Die Korrelationskarten wurden anhand der „Natural Neighbour"-Interpolationsmethode mit dem Programm Surfer, Version 9.2.397 erzeugt. Der lineare Trend für den jeweiligen Gesamtzeitraum wurde in allen Zeitreihen entfernt, um eine Beeinflussung der Ergebnisse durch ähnliches, aber nicht-kausales Trendverhalten zu reduzieren. Gebiete mit den Korrelationskoeffizienten $r \geq 0{,}3/\ r \leq -0{,}3$ (entspricht einer erklärten Varianz von $r^2 \geq 9\%$) sind in kräftigen roten/blauen Farben dargestellt und zeigen positive/ negative Korrelationswerte an. Diese Grenzwerte stellen einen guten Kompromiss zwischen einer möglichst umfassenden Reduktion signifikanter, aber nicht-kausaler Korrelationen und der möglichst deutlichen Darstellung der Zirkulationsmuster dar. Gebiete mit Werten von $r \geq 0{,}2/\ r \leq -0{,}2$ werden durch hellrote/hellblaue Farben gekennzeichnet; stellen jedoch nur Tendenzen von eingeschränkter Signifikanz dar. Aufgrund der vorliegenden langen Klassifikationszeitreihen wurden GWLk und SVG im Zeitraum 1901–2010 verglichen, während ein Vergleich mit der oWLK aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit des ERA40 Reanalysedatensatzes nur für 1961–2000 erfolgen konnte. Der Grenzwert von $r \geq 0{,}3/\ r \leq -0{,}3$ ist für 110 Jahre hochsignifikant ($p = 0{,}001$), beträgt für 40 Jahre jedoch nur $p = 0{,}04$.

3.2.2 Räumliche Vergleichbarkeit der Klassifikationen

1901–2010 Vergleich von GWLk und SVG

Abbildung 4 zeigt eine sehr hohe Übereinstimmung der räumlichen Muster von manueller GWLk und der methodisch ähnlichen automatisierten SVG. W+ sind durch tiefen Luftdruck im Norden Europas und hohen im Mittelmeerraum und weiter südlich gekennzeichnet, was eine Zufuhr maritimer westlicher Luftmassen in die RMR zur Folge hat. O+ zeigen eine umgekehrte Verteilung der Druckzentren – hoher Luftdruck im skandinavisch/arktischen Raum und tiefer im Süden Europas/Norden Afrikas, zu kontinentaler Luftmassenzufuhr aus östlicher Richtung in die RMR führend. Die geringere Atmosphärendynamik im SHJ gegenüber dem WHJ äußert sich in einer deutlich reduzierten Ausdehnung der Muster, wobei das südliche der beiden Druckzentren im SHJ kaum in Erscheinung tritt. Die Erkenntnisse lassen auf eine gute Vergleichbarkeit beider Klassifikationen bei der Nutzung für weiterführende Auswertungen schließen.

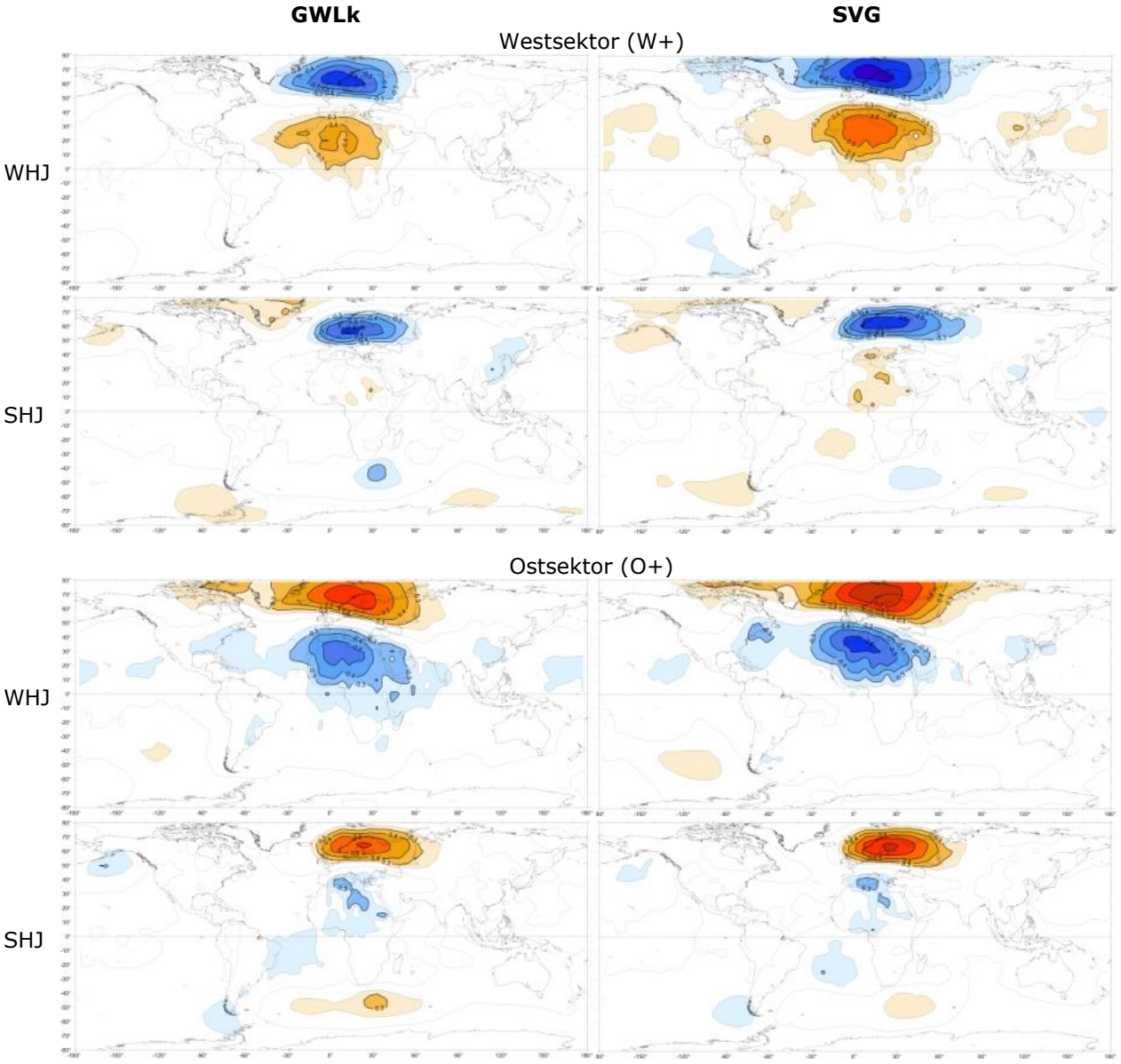


Abbildung 4: weltweite Korrelation zwischen Bodenluftdruck und Wetterlagen des Westsektors (W+) und Ostsektors (O+) von GWLk (links) und SVG (rechts) in Winter- und Sommerhalbjahr für 1901–2010); rote Flächen zeigen positive (Hochdruckgebiete), blaue Flächen negative (Tiefdruckgebiete) Korrelationen

1961–2000 (GWLk, SVG, oWLK)

Analog zu den vorherigen Ausführungen zeigt Abbildung 5 die durchschnittliche Verteilung der Position von Hoch- und Tiefdruckgebieten – hier jedoch auf den nordhemisphärischen Bereich von 60°W bis 60°O beschränkt. Der Vergleich des 110- und 40-jährigen Zeitraums anhand der GWLk (links in Abbildung 5) offenbart für den gewählten Ausschnitt eine gute Wiedergabe von Position, Stärke und Ausdehnung der jeweiligen Muster. Deutlichster Unterschied ist eine Aufrechterhaltung der Dipolstruktur im SHJ für den Zeitraum 1961–2000, auch wenn das südliche Feld weiterhin deutlich kleinräumiger und schwächer ausgeprägt ist als im WHJ. Der Vergleich der drei Klassifikationen zeigt eine grundlegende räumliche Übereinstimmung der erkennbaren Muster. Im WHJ und bei O+ fällt eine konzeptuell bedingte geringere räumliche Ausdehnung der oWLK-Muster gegenüber GWLk und SVG auf. Dies ist damit zu erklären, dass sich die oWLK auf Eingangsdaten eines deutlich kleineren Gebietes (Mitteleuropa) im Vergleich zu GWLk/SVG (Europa und Nordatlantik) stützt. Insgesamt zeigen alle drei Klassifikationen für beide Sektoren jeweils ähnliche Anströmungen in die RMR, die für W+ ausgeprägter als für O+ ist.

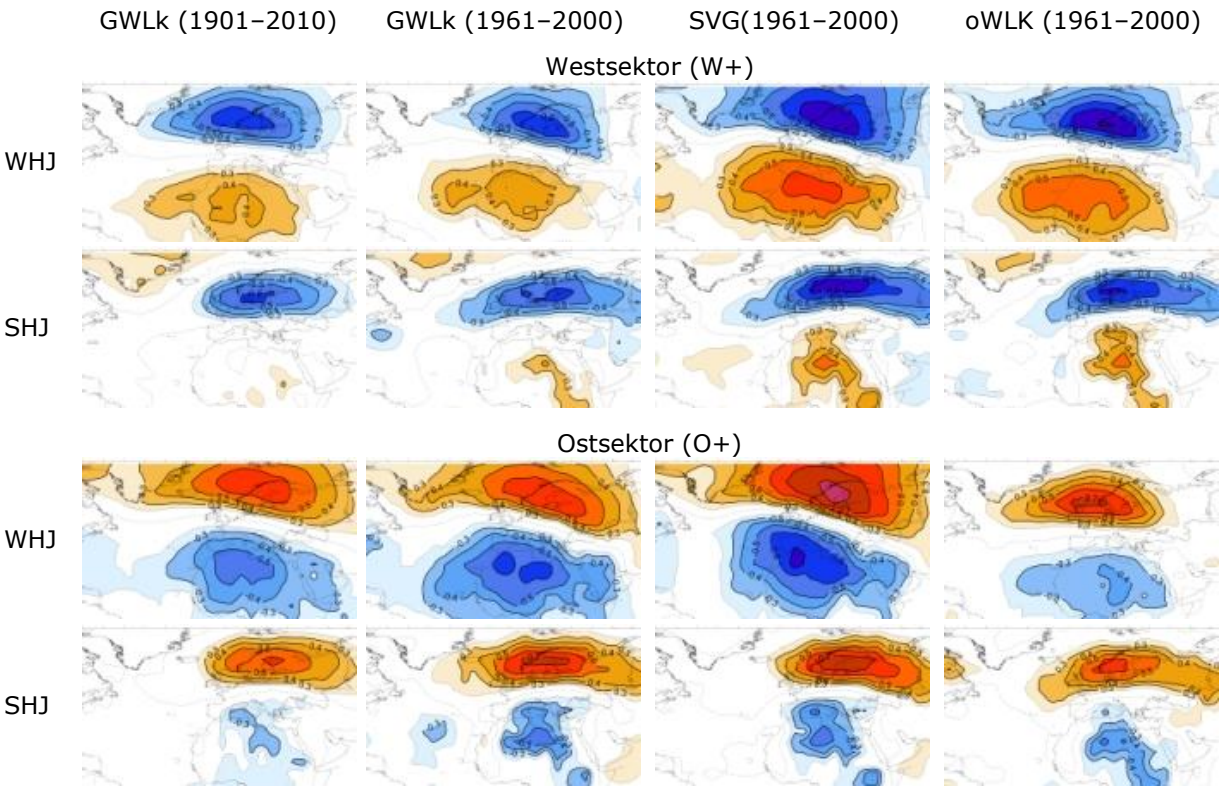


Abbildung 5: Komposit der Korrelation zwischen Bodenluftdruck und Wetterlagenhäufigkeit des West- (W+) und Ostsektors (O+) von GWLk für 1901–2010 und 1961–2000 sowie von SVG und oWLK für 1961–2000 in Winter- und Sommerhalbjahr darstellt für die Nordhemisphäre von 60°W bis 60°O; rote Flächen zeigen positive (Hochdruckgebiete), blaue negative (Tiefdruckgebiete) Korrelationen

In Abbildung 6 sind die beschriebenen Hauptcharakteristika der jeweiligen Sektoren schematisch auf Jahresbasis zusammengefasst: die Karten enthalten die durchschnittliche Position der steuernden Druckzentren und die sich daraus ergebende mittlere Anströmrichtung in der RMR. Die Abbildungen bilden dabei die Essenz aller zugrunde liegenden monatlichen, saisonalen und halbjährlichen Karten. Wie bereits beschrieben, sind jeweils zwei gegensätzlich rotierende Druckzentren vorhanden, die für beide Sektoren genau gegensätzlich positioniert und im WHJ stärker als im SHJ ausgeprägt sind. Das nördliche ist dabei in den meisten Monaten stärker als das südliche Steuerungszentrum ausgeprägt und übt den dominierenden Einfluss auf die Anströmung in die RMR aus, die jeweils etwas nach Nord (für W+) bzw. Süd (für O+) abgelenkt ist. Die Lage der Druckzentren ist über das Jahr hinweg recht stabil und fluktuiert nur im SHJ bei den schwach ausgeprägten südlichen Zentren in stärkerem Maße.

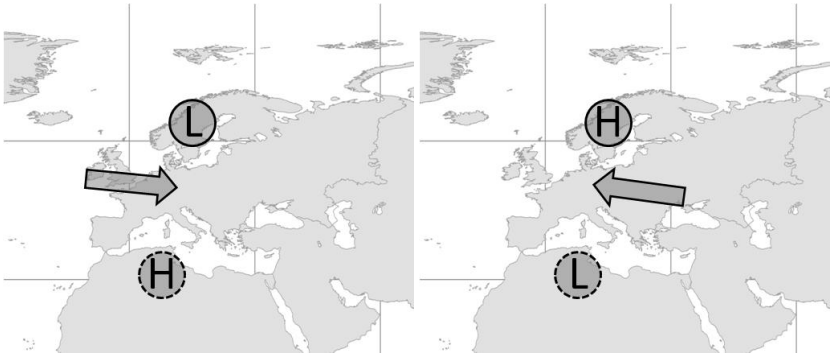


Abbildung 6: Mittlere jährliche Lage der steuernden Druckzentren und Anströmung in die RMR gemittelt über alle drei Klassifikationen (GWLk, SVG und oWLK) während West- (W+, links) und Ostlagen (O+, rechts); voll umrandete (nördliche) Symbole zeigen ganzjährig vorhandene Druckzentren, gestrichelte Umrandungen indizieren saisonal (v.a. im WHJ) ausgeprägte Druckzentren.

In Abbildung 7 werden nach gleicher Methode erstellte schematische Karten zusätzlich für die weiteren vier in diesem Bericht verwendeten Anströmrichtungen gezeigt. Auch hier ist das nördliche Steuerungszentrum stabiler gegenüber dem südlichen. Südwestliche und nordöstliche Anströmungen sind deutlich in Richtung der Haupthimmelsrichtungen West und Ost abgelenkt, während dies für Nordwest- und Südostlagen nicht der Fall ist.

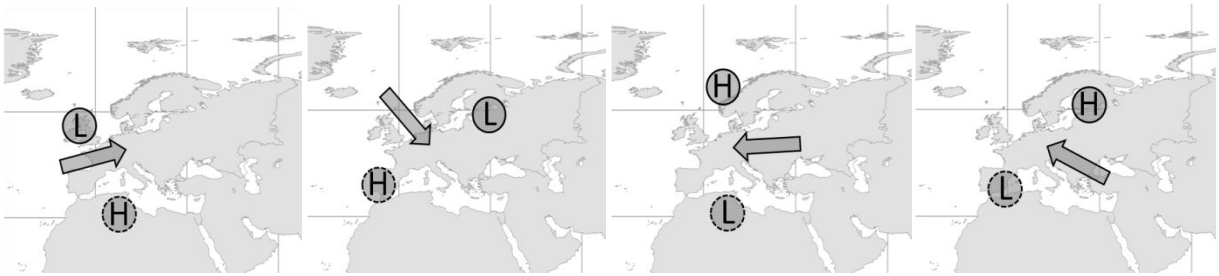


Abbildung 7: wie Abbildung 6, jedoch für (von links nach rechts): 1) Südwest- (SW*), 2) Nordwest- (NW*), 3) Nordost- (NO*) und 4) Südostlagen (SO*)

3.3 Beobachtete Wetterlagenhäufigkeit (1901–2010)

Die zeitliche Variabilität der GWLk-Klassen wurde anhand der jährlichen und innerjährlichen Entwicklungen der GWT in ZB2009 (Abschnitt 3.2) dargestellt. Dabei wurden Trendrichtung, -stärke, -signifikanz und –variabilität ausführlich für den Zeitraum 1901–2007 diskutiert. Unter Verzicht auf eine erneute umfassende Diskussion werden hier 1) die mittleren Häufigkeiten in einer im Vergleich zum ZB2009 modifizierten und um drei Jahre erweiterten Tabelle sowie 2) die linearen Trends der betrachteten Klassen für 1901–2010 dargestellt. Zusätzlich zu den im ZB2009 dargestellten Ergebnissen zu GWL und GWT werden zusätzlich die Werte weiterer, in Tabelle 1 dargestellten Hauptgruppen gezeigt. Anschließend wird der „manuellen" GWLk die „automatisierte" Version der GWLk (SVG) gegenübergestellt und Gemeinsamkeiten und Unterschiede in kurzer Form verglichen.

3.3.1 Vergleich der Häufigkeit verschiedener GWL-Klassen

Tabelle 3 zeigt die mittleren Häufigkeiten der GWLk-Klassen in monatlicher, saisonaler, halbjährlicher und jährlicher Auflösung. Generell treten zyklonal geprägte Wetterlagen (Z) mit Ausnahme der ersten zwei Herbstmonate häufiger auf als antizyklonale (A). Die häufigsten GWL sind WZ (16%) sowie HM und BM (zusammen ebenfalls 16%). Letztere GWL bezeichnen windschwache

Tabelle 3: Durchschnittliche Häufigkeit [%] der GWLk-Klassen (vgl. Tabelle 1) für 1901–2010

		Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Win	Frü	Som	Her	WHJ	SHJ	Jahr
Sektoren	W+	57	51	50	47	43	50	57	56	51	52	56	59	56	47	55	53	54	51	53
	O+	25	29	31	34	39	28	24	23	25	25	25	22	25	35	25	25	26	29	28
ASR	SW*	26	21	21	19	19	19	22	25	22	27	27	27	25	20	22	25	25	21	23
	NW*	31	29	29	28	24	31	35	31	28	25	29	32	31	27	33	28	29	30	29
	NO*	12	15	16	20	24	20	16	15	15	11	11	12	13	20	17	12	13	18	16
	SO*	13	14	15	14	15	8	8	8	10	14	14	10	12	15	8	13	13	11	12
ZY	Z	56	56	53	57	52	51	53	52	46	46	58	58	56	54	52	50	54	52	53
	A	44	44	46	42	46	48	46	48	53	53	41	42	43	45	47	49	45	47	46
ZON	ZON	31	27	26	18	17	25	28	33	25	27	27	34	31	20	29	27	29	24	26
	MIX	34	32	32	30	26	30	35	33	36	35	34	33	33	29	33	35	33	32	33
	MER	34	40	42	51	55	43	36	34	38	36	38	32	35	49	38	37	37	43	40
GWT	W	31.4	26.9	25.7	17.6	17.2	25.3	27.9	32.5	25.1	27.3	27.1	33.5	31.0	20.2	28.6	26.5	29.0	24.3	26.5
	SW	7.6	4.3	4.6	4.5	4.9	3.4	3.5	4.3	5.0	8.4	6.8	6.5	6.1	4.7	3.7	6.8	6.3	4.3	5.3
	NW	8.8	8.0	8.7	7.5	5.1	8.7	13.0	8.6	8.2	5.2	9.1	8.5	8.5	7.1	10.1	7.5	8.1	8.5	8.3
	HME	16.2	17.7	15.6	14.4	13.3	16.2	16.2	17.6	21.1	20.2	15.2	16.9	17.0	14.4	16.7	18.9	17.0	16.4	16.7
	TME	1.3	2.3	2.7	4.1	3.0	1.9	2.1	2.2	2.1	1.6	2.5	1.4	1.7	3.3	2.1	2.1	2.0	2.6	2.3
	N	12.3	15.8	15.1	22.8	21.2	21.8	15.8	12.1	15.4	12.3	13.3	13.0	13.5	19.7	16.5	13.6	13.5	18.1	15.9
	NO	1.8	2.4	3.7	4.3	6.9	6.7	5.2	5.6	4.1	1.6	1.1	2.0	2.1	5.0	5.8	2.2	2.1	5.5	3.8
	O	8.8	9.0	9.6	9.1	12.3	6.0	6.3	6.9	6.4	6.6	6.1	6.6	8.1	10.4	6.4	6.3	7.7	7.9	7.8
	SO	5.0	5.8	6.7	3.5	3.6	1.2	0.5	0.4	2.2	5.8	4.7	3.2	4.6	4.6	0.7	4.2	5.2	1.9	3.5
	S	6.2	6.8	6.5	10.9	11.4	7.5	8.5	9.0	9.5	10.1	12.9	7.7	6.9	9.6	8.3	10.8	8.3	9.5	8.9
GWL	WA	6.0	3.4	4.6	2.9	3.4	5.4	7.7	8.9	7.4	7.0	4.6	4.5	4.8	3.6	7.3	6.4	5.1	6.0	5.5
	WZ	17.1	16.3	14.3	10.7	11.6	15.2	17.9	19.8	14.8	14.8	15.7	18.3	17.4	12.2	17.7	15.1	16.2	15.0	15.6
	WS	4.5	5.0	4.4	2.0	1.4	2.5	1.0	1.7	0.9	3.6	3.0	7.2	5.6	2.6	1.7	2.5	4.6	1.6	3.1
	WW	3.8	2.2	2.4	2.1	0.7	2.2	1.4	2.1	2.0	1.8	3.7	3.5	3.2	1.7	1.9	2.5	3.0	1.8	2.3
	SWA	3.1	1.8	2.6	2.0	1.7	1.6	0.9	2.3	2.3	3.4	2.5	3.3	2.8	2.1	1.6	2.7	2.8	1.8	2.3
	SWZ	4.5	2.5	2.1	2.5	3.2	1.8	2.6	2.0	2.7	5.0	4.3	3.1	3.3	2.6	2.1	4.0	3.5	2.4	3.0
	NWA	2.8	2.8	3.0	2.7	2.1	4.8	6.7	4.4	4.1	2.0	4.3	2.4	2.6	2.6	5.3	3.5	2.9	4.1	3.5
	NWZ	6.0	5.2	5.7	4.8	3.0	4.0	6.3	4.2	4.0	3.2	4.8	6.2	5.8	4.5	4.8	4.0	5.2	4.4	4.8
	HM	10.0	10.8	8.5	5.3	7.0	8.5	7.9	6.9	10.8	10.4	4.9	7.7	9.4	6.9	7.7	8.7	8.7	7.7	8.2
	BM	6.2	7.0	7.1	9.1	6.3	7.7	8.3	10.7	10.3	9.8	10.4	9.2	7.5	7.5	8.9	10.1	8.3	8.7	8.5
	TM	1.3	2.3	2.7	4.1	3.0	1.9	2.1	2.2	2.1	1.6	2.5	1.4	1.7	3.3	2.1	2.1	2.0	2.6	2.3
	NA	0.4	0.2	0.9	0.7	2.1	1.6	1.0	1.1	0.5	0.1	0.5	0.5	0.3	1.2	1.2	0.4	0.4	1.2	0.8
	NZ	2.4	2.8	2.9	4.4	4.3	4.0	1.9	2.3	2.3	1.8	2.4	2.1	2.4	3.9	2.7	2.1	2.4	3.2	2.8
	HNA	1.6	2.5	2.3	4.3	4.8	5.5	2.9	2.4	3.6	2.6	1.1	2.0	2.0	3.8	3.6	2.4	2.0	3.9	3.0
	HNZ	1.3	1.4	1.7	2.0	3.5	2.0	1.7	0.8	0.5	1.3	0.5	0.6	1.1	2.4	1.5	0.8	1.2	1.7	1.5
	HB	2.3	4.4	3.3	4.9	3.0	4.4	2.8	1.9	3.8	3.1	2.3	2.7	3.1	3.7	3.0	3.1	3.0	3.5	3.2
	TRM	4.4	4.6	4.0	6.4	3.5	4.4	5.5	3.6	4.6	3.4	6.4	4.9	4.6	4.6	4.5	4.8	4.5	4.7	4.6
	NEA	0.8	1.5	2.7	1.8	3.7	3.8	3.3	3.3	1.8	0.9	0.4	0.6	1.0	2.7	3.5	1.0	1.1	3.0	2.0
	NEZ	1.1	1.0	1.1	2.5	3.3	2.9	1.9	2.3	2.3	0.8	0.7	1.3	1.1	2.3	2.4	1.2	1.0	2.5	1.8
	HFA	4.5	3.6	4.5	2.9	3.9	2.1	2.8	4.0	3.7	4.1	2.2	4.0	4.0	3.8	3.0	3.3	3.8	3.2	3.5
	HFZ	1.1	1.3	1.0	1.4	1.2	0.8	1.0	1.1	0.8	0.9	1.5	1.2	1.2	1.2	0.9	1.1	1.1	1.0	1.1
	HNFA	0.9	2.1	1.1	1.6	5.0	1.2	1.4	0.8	0.8	1.1	0.5	0.7	1.2	2.6	1.1	0.8	1.1	1.8	1.4
	HNFZ	2.3	2.1	3.1	3.2	2.2	2.0	1.2	1.0	1.0	0.5	1.8	0.6	1.7	2.8	1.4	1.1	1.7	1.8	1.8
	SEA	2.5	2.0	3.5	2.1	2.5	0.9	0.5	0.3	1.5	4.7	3.3	1.8	2.1	2.7	0.6	3.2	3.0	1.3	2.1
	SEZ	2.5	3.8	3.2	1.4	1.1	0.3	0.0	0.1	0.8	1.1	1.4	1.4	2.5	1.9	0.1	1.1	2.2	0.6	1.4
	SA	2.9	1.5	1.9	1.8	1.1	0.4	0.1	0.6	2.7	3.9	4.0	2.1	2.2	1.6	0.4	3.5	2.7	1.1	1.9
	SZ	1.2	2.0	0.7	0.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.4	1.4	1.9	1.7	1.6	0.4	0.0	1.3	1.5	0.2	0.8
	TB	0.9	1.4	1.3	2.7	4.4	1.8	3.3	4.1	1.9	1.8	2.0	2.0	1.4	2.8	3.1	1.9	1.6	3.0	2.3
	TRW	1.2	1.9	2.6	5.9	5.9	5.1	5.1	4.4	4.5	2.9	5.0	1.9	1.7	4.8	4.9	4.1	2.5	5.2	3.9
	U	0.4	0.7	1.1	1.2	1.1	1.2	1.0	0.8	1.0	1.1	1.2	0.7	0.6	1.1	1.0	1.1	0.9	1.0	1.0

Hochdruckgebiete über Mitteleuropa, die keinem Anströmsektor zugeordnet werden können. GWL mit Anströmung aus dem westlicher Sektor (W+) beeinflussen unser Wettergeschehen an durchschnittlich mehr als jedem zweiten Tag, während Luftmassen aus östlicher Richtung (O+) im Mittel nur alle vier Tage auftreten. W+ dominiert in Hochsommer und –winter, während O+ im Frühjahr deutlich häufiger als im restlichen Jahr vorkommt. Die Anströmung innerhalb der Sektoren wird deutlich häufiger in nördliche als in südliche Richtungen abgelenkt.

Die Verteilung der Häufigkeiten der SVG-Klassen zeigt im Vergleich zur GWLk z.T. deutliche Abweichungen (Tabelle 4). Das Vorkommen der 29 GWL ist in allen Perioden (konzeptionell bedingt) deutlich gleichmäßiger, das Auftreten der in der GWLk ein Drittel aller Tage umfassenden drei häufigsten Wetterlagen ist deutlich reduziert. Häufigste GWL ist nun die WA (6,6%), knapp gefolgt von der WZ (6,4%). HME treten nur noch an 6,9% aller Tage auf, was sich in einer erhöhten Frequenz von O+ widerspiegelt. W+ zeigt im Vergleich zur GWLk ein ähnliches Vorkommen bei einem stärker ausgeprägten Jahresgang. Gleiches trifft auf die Verteilung von zyklonalen und antizyklonalen GWL zu. Nord- und Südanströmungen sind in der SVG deutlich gleichmäßiger verteilt.

Tabelle 4: Durchschnittliche Häufigkeit [%] der SVG-Klassen (vgl. Tabelle 1) für 1901–2010

		Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Win	Frü	Som	Her	WHJ	SHJ	Jahr
Sektoren	**W+**	59	53	50	43	39	53	60	60	57	56	57	58	57	44	58	56	55	52	54
	O+	31	37	40	47	50	38	32	30	34	34	33	31	33	46	33	34	34	38	36
ASR	**SW***	29	25	26	21	22	25	26	29	29	31	28	29	28	23	27	29	28	26	27
	NW*	30	28	25	21	16	27	33	31	28	25	28	29	29	21	31	27	27	26	27
	NO*	15	19	17	22	22	23	20	18	16	13	14	15	16	20	20	14	16	20	18
	SO*	15	18	23	25	28	15	12	13	18	21	19	16	16	25	13	19	19	18	19
ZY	**Z**	49	46	52	61	61	57	63	60	47	50	57	52	51	59	61	53	52	59	56
	A	49	43	47	35	38	39	37	40	50	49	39	46	48	40	39	47	46	40	43
ZON	**ZON**	22	19	19	14	11	18	26	26	20	18	19	21	22	14	24	19	20	19	20
	MIX	34	25	27	21	21	25	28	30	29	32	29	33	32	23	28	31	30	26	28
	MER	42	46	54	62	68	53	46	44	47	49	48	45	45	62	48	49	48	54	51
GWT	**W**	22.2	18.9	18.6	13.7	10.5	18.4	25.8	26.0	20.3	18.2	18.5	21.5	21.7	14.4	23.7	19.4	20.1	19.4	19.7
	SW	12.8	8.2	8.9	5.5	7.4	9.1	8.9	10.7	10.9	13.1	9.3	11.2	11.1	7.3	9.7	11.3	10.8	8.9	9.8
	NW	12.9	9.5	8.8	5.9	3.2	7.1	10.6	9.7	9.8	9.1	11.1	11.4	11.6	6.0	9.2	10.2	10.7	7.9	9.3
	HME	7.9	5.8	7.0	6.2	5.2	5.3	6.5	7.5	7.3	7.8	6.0	8.7	7.7	6.2	6.5	7.2	7.3	6.4	6.9
	TME	0.7	1.6	1.9	3.0	5.0	3.3	1.7	1.6	1.5	1.8	2.5	1.3	1.2	3.3	2.2	2.0	1.7	2.7	2.2
	N	11.3	12.9	13.0	15.7	15.5	20.4	19.9	16.8	14.5	13.1	13.9	14.2	13.1	14.9	19.2	14.1	13.2	17.4	15.4
	NO	4.4	5.9	4.2	6.4	5.7	6.7	5.7	5.3	4.7	2.3	2.9	4.0	4.9	5.5	6.0	3.4	4.1	5.8	4.9
	O	10.9	9.8	13.2	13.4	17.0	9.7	9.3	8.2	7.4	8.6	7.4	7.4	9.7	14.7	9.2	8.0	9.7	11.0	10.4
	SO	4.3	6.3	8.8	9.6	9.9	4.0	2.4	3.0	6.4	7.7	6.1	5.2	5.4	9.5	3.1	6.9	6.6	6.0	6.3
	S	10.8	10.6	14.9	16.5	19.6	12.0	9.2	11.2	13.9	17.7	17.9	13.9	12.0	17.2	10.9	16.9	14.6	14.0	14.3
GWL	**WA**	7.8	7.3	7.4	3.9	3.1	5.7	5.1	6.7	8.7	8.1	6.2	7.3	7.8	4.9	5.9	7.8	7.6	5.6	6.6
	WZ	6.8	4.3	4.2	4.7	2.7	6.7	10.1	10.2	7.1	6.2	6.7	6.3	6.0	3.9	9.1	6.8	5.8	7.0	6.4
	WS	1.6	1.8	2.3	1.1	1.0	1.4	4.3	2.6	0.9	1.6	1.1	2.1	2.0	1.5	2.8	1.2	1.8	1.9	1.9
	WW	6.0	5.5	4.7	3.9	3.7	4.5	6.2	6.5	3.5	2.4	4.6	5.7	5.9	4.2	5.8	3.6	4.9	4.8	4.9
	SWA	6.3	3.7	4.2	2.8	3.1	5.3	4.1	4.8	6.5	7.0	4.6	5.5	5.4	3.4	4.8	6.2	5.3	4.5	4.9
	SWZ	6.5	4.5	4.7	2.8	4.2	3.8	4.7	5.9	4.4	6.0	4.7	5.6	5.7	3.9	4.9	5.2	5.5	4.4	4.9
	NWA	5.7	4.6	3.9	2.7	1.6	2.4	3.2	3.9	5.4	4.4	5.3	5.7	5.5	2.8	3.2	5.1	5.0	3.3	4.1
	NWZ	7.2	4.8	4.8	3.2	1.6	4.7	7.4	5.8	4.4	4.7	5.7	5.8	6.1	3.3	6.0	5.0	5.6	4.6	5.1
	HM	4.1	3.5	3.1	2.1	1.7	2.0	2.3	3.1	3.0	3.2	2.0	4.0	4.0	2.3	2.5	2.8	3.4	2.4	2.9
	BM	3.8	2.3	3.9	4.1	3.5	3.3	4.1	4.4	4.3	4.6	4.0	4.6	3.7	3.9	4.0	4.4	4.0	4.0	4.0
	TM	0.7	1.6	1.9	3.0	5.0	3.3	1.7	1.6	1.5	1.8	2.5	1.3	1.2	3.3	2.2	2.0	1.7	2.7	2.2
	NA	1.9	2.7	2.5	1.7	2.1	3.9	4.9	3.3	2.3	1.9	1.6	2.0	2.2	2.1	4.1	2.0	2.1	3.1	2.6
	NZ	1.8	2.6	2.1	3.0	2.6	3.3	3.0	2.6	2.4	1.6	3.1	2.8	2.4	2.6	3.0	2.4	2.3	2.9	2.6
	HNA	2.3	2.3	2.4	2.5	3.8	2.8	2.2	1.6	2.1	3.0	1.2	2.9	2.6	2.9	2.2	2.1	2.4	2.5	2.5
	HNZ	0.8	1.2	1.6	1.3	3.4	2.8	1.1	1.6	1.5	1.5	1.3	1.4	1.2	2.1	1.9	1.5	1.3	2.0	1.7
	HB	2.8	2.6	2.6	2.8	1.9	2.8	2.3	2.3	3.4	2.6	3.7	2.8	2.8	2.5	2.5	3.3	2.9	2.6	2.8
	TRM	1.6	1.4	1.8	4.4	1.7	4.9	6.3	5.5	2.7	2.6	3.0	2.3	1.8	2.7	5.6	2.8	2.1	4.3	3.2
	NEA	2.3	2.6	1.9	1.6	2.8	1.8	1.6	2.6	1.9	0.9	0.6	2.2	2.4	2.1	2.0	1.2	1.8	2.1	1.9
	NEZ	2.1	3.3	2.2	4.7	2.9	4.9	4.1	2.7	2.8	1.5	2.3	1.8	2.5	3.3	3.9	2.2	2.3	3.7	3.0
	HFA	4.1	4.0	3.8	1.8	3.3	2.3	3.4	2.9	1.9	3.1	2.5	1.5	3.3	3.0	2.9	2.6	3.3	2.6	2.9
	HFZ	3.3	3.0	4.2	4.0	5.7	4.0	3.8	3.1	2.8	2.5	2.3	2.9	3.2	4.7	3.7	2.6	3.1	4.0	3.5
	HNFA	1.8	0.9	2.0	1.8	2.9	1.6	0.5	0.8	1.1	1.2	1.0	1.7	1.5	2.3	1.0	1.1	1.5	1.5	1.5
	HNFZ	1.6	2.0	3.2	5.7	5.1	1.7	1.6	1.3	1.6	1.8	1.6	1.2	1.6	4.7	1.6	1.7	1.9	2.9	2.4
	SEA	3.2	3.9	5.1	4.8	4.7	2.1	1.1	1.2	3.9	4.3	3.5	2.9	3.4	4.9	1.5	4.0	3.9	3.0	3.4
	SEZ	1.1	2.4	3.7	4.8	5.2	1.9	1.3	1.8	2.5	3.5	2.6	2.3	2.0	4.6	1.7	2.9	2.7	3.0	2.8
	SA	2.8	2.7	3.9	2.3	3.5	2.7	1.9	2.7	5.4	4.7	2.4	3.1	3.0	3.3	2.5	4.3	3.3	3.1	3.2
	SZ	3.7	3.0	3.8	5.0	6.3	2.7	3.0	3.0	2.6	5.3	4.8	3.7	3.6	5.1	2.9	4.3	4.1	3.8	4.0
	TB	2.1	3.5	4.0	4.5	4.3	2.3	1.3	1.5	1.5	3.5	4.6	3.0	2.9	4.3	1.7	3.3	3.5	2.6	3.1
	TRW	2.3	1.3	3.2	4.7	5.6	4.2	2.9	4.1	4.5	4.1	6.1	4.0	2.6	4.5	3.8	5.0	3.6	4.4	4.0
	U	1.8	1.6	0.9	0.9	1.1	0.7	0.1	0.1	0.1	0.6	1.1	1.3	1.6	1.0	0.3	0.6	1.2	0.5	0.9

3.3.2 Beobachtete Trends in den GWL-Klassenhäufigkeiten

Tabelle 5 zeigt die gegenüber ZB2009 erweiterte Darstellung der linearen Trends innerhalb der GWLk. Trendwerte und -signifikanzen (Student t-Test) von GWL und GWT ändern sich durch die Erweiterung des Betrachtungszeitraums nur geringfügig. Zyklonale GWL zeigen ganzjährig starke Zu-, antizyklonale GWL Abnahmen in gleicher Größenordnung. Die Zunahmen für W+ und Abnahmen für O+ sind zumeist statistisch nicht signifikant. Auf der Ebene der vier Anströmrichtungen treten deutlich stärkere Entwicklungen v.a. für das SHJ zutage. Im SHJ nahmen nördliche deutlich zugunsten südlicher Anströmungen ab.

Trends der SVG unterscheiden sich sehr deutlich von denen der GWLk. Deutlichstes Merkmal ist die weitaus geringere Zahl signifikanter und insbesondere hochsignifikanter Trends (Tabelle 6). Zudem verlaufen die hochsignifikanten Trends von Z/A in den beiden Klassifikationen genau entgegengesetzt. Anstelle einer Zu- wird in der SVG eine Abnahme zyklonaler zugunsten von antizyklonalen GWL verzeichnet. Ebenso wie in der GWLk ist diese Entwicklung ganzjährig weitgehend stabil.

Tabelle 5: Lineare Trends der Auftrittshäufigkeit [in Tagen] der GWLk-Klassen (vgl. Tabelle 1) und deren Signifikanz (Farbcode siehe untenstehende Legende) für 1901–2010; graue Schrift: nicht auf Signifikanz geprüft, da Auftreten in < 10% aller Jahre

		Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Win	Frü	Som	Her	WHJ	SHJ	Jahr
Sektoren	W+	3.2	3.4	5.0	-1.4	0.4	0.2	-2.5	-6.8	4.6	4.4	3.4	1.4	7.5	4.0	-9.1	12.4	19.9	-5.5	15.3
	O+	-1.5	-1.3	-3.9	-1.4	-1.2	-1.7	1.6	4.1	-3.1	-1.9	-0.6	-1.3	-3.9	-6.6	4.0	-5.7	-10.9	-1.8	-12.4
ASR	SW*	2.1	0.7	2.1	1.9	4.4	5.0	3.4	-0.4	4.4	5.3	2.5	0.1	2.6	8.4	8.1	12.2	12.3	18.8	31.6
	NW*	1.1	2.7	2.8	-3.3	-4.0	-4.8	-5.9	-6.5	0.2	-0.9	0.9	1.3	4.9	-4.4	-17.2	0.2	7.6	-24.2	-16.4
	NO*	-0.8	-0.7	-2.4	-1.9	-3.5	-3.4	-1.1	1.8	-3.4	-1.7	0.8	1.6	0.0	-7.8	-2.7	-4.3	-3.7	-11.5	-14.8
	SO*	-0.7	-0.6	-1.5	0.5	2.3	1.7	2.7	2.3	0.3	-0.2	-1.5	-2.9	-3.9	1.2	6.7	-1.4	-7.2	9.8	2.4
ZY	Z	5.3	3.9	2.3	2.1	5.2	4.6	4.6	0.1	6.3	3.1	6.9	2.8	11.8	9.5	9.4	16.3	22.6	22.9	47.2
	A	-5.5	-3.9	-2.2	-1.9	-5.3	-4.2	-4.7	-0.3	-6.4	-3.1	-7.0	-3.2	-12.3	-9.4	-9.2	-16.5	-23.0	-22.8	-47.7
ZON	ZON	3.2	1.3	-0.1	-3.1	-3.1	1.5	-1.7	-6.9	0.3	-0.8	0.6	-0.2	4.0	-6.4	-7.1	0.1	2.8	-13.0	-9.0
	MIX	-2.0	0.3	4.0	3.1	3.6	1.2	-0.5	1.8	1.9	2.4	-0.2	0.2	-1.3	10.7	2.4	4.1	6.6	11.0	15.7
	MER	-1.4	-1.5	-3.8	0.3	-0.6	-2.2	2.1	5.0	-2.4	-1.7	-0.5	-0.5	-3.2	-4.1	4.8	-4.5	-9.7	2.1	-7.2
GWT	W	3.2	1.3	-0.1	-3.1	-3.1	1.5	-1.7	-6.9	0.3	-0.8	0.6	-0.2	4.0	-6.4	-7.1	0.1	2.8	-13.0	-9.0
	SW	1.0	0.8	2.2	2.1	3.8	3.2	3.7	3.0	3.0	5.0	2.4	1.2	2.8	8.0	9.8	10.3	12.6	18.6	31.2
	NW	-1.1	1.5	2.8	-2.0	-0.8	-3.9	-5.0	-3.8	0.6	-0.2	0.3	-0.6	0.1	0.0	-12.7	0.7	3.4	-14.9	-12.1
	HME	-0.6	-2.2	0.6	3.1	0.5	2.0	1.9	1.3	-2.1	-2.2	-1.7	-0.4	-3.0	4.2	5.2	-6.1	-5.4	6.7	0.2
	TME	-1.3	0.1	-1.6	-0.2	0.2	-0.2	-1.1	1.3	0.5	-0.2	-1.2	0.0	-1.1	-1.6	0.1	-0.9	-4.0	0.6	-3.5
	N	1.1	1.2	0.1	0.6	-3.1	-3.4	-0.1	1.6	-1.1	-0.8	0.7	3.8	5.7	-2.4	-1.9	-1.2	5.7	-5.5	0.5
	NO	-0.7	-1.7	-2.2	-1.9	-1.7	-2.0	-2.4	-0.9	-2.4	-0.9	0.2	0.5	-1.8	-5.8	-5.3	-3.0	-5.0	-11.3	-16.0
	O	-1.3	0.8	-0.4	-0.7	-0.4	0.7	2.7	3.8	-1.0	-0.9	0.5	-1.7	-2.1	-1.6	7.1	-1.3	-3.2	5.0	2.0
	SO	0.4	-0.2	-1.3	-0.6	0.3	0.3	0.7	0.3	-0.5	-0.5	-1.5	-1.0	-0.7	-1.6	1.4	-2.5	-3.9	0.6	-3.6
	S	-1.0	-1.5	0.0	2.8	4.3	2.2	1.2	0.2	2.5	1.4	-0.3	-2.0	-4.2	7.2	3.6	3.6	-3.4	13.3	9.9
GWL	WA	-0.9	-0.5	0.3	-0.7	-2.1	0.4	-1.0	-1.1	0.8	0.3	-1.9	0.8	-0.9	-2.5	-1.7	-0.8	-2.2	-3.6	-5.6
	WZ	3.4	1.7	2.1	-1.8	-1.6	1.3	-0.1	-4.2	0.2	0.3	2.4	1.2	6.1	-1.3	-3.0	2.9	10.1	-6.2	4.8
	WS	0.4	-0.6	-2.0	-0.4	0.3	0.2	-0.6	-0.4	-0.5	-1.5	-0.4	-2.0	-2.1	-2.1	-0.9	-2.4	-6.0	-1.4	-7.6
	WW	0.3	0.7	-0.4	-0.3	0.2	-0.4	0.0	-1.1	-0.2	0.2	0.4	-0.1	0.9	-0.5	-1.5	0.4	0.9	-1.9	-0.7
	SWA	1.0	-0.2	0.7	0.4	1.1	1.2	0.4	1.0	1.0	1.4	1.1	0.0	0.9	2.2	2.6	3.5	4.3	5.0	9.1
	SWZ	0.0	1.0	1.4	1.7	2.7	1.9	3.3	2.0	2.0	3.5	1.3	1.2	1.9	5.8	7.2	6.8	8.3	13.6	22.1
	NWA	-2.0	-1.2	-1.2	-1.5	-0.9	-3.1	-4.6	-2.8	0.2	0.1	-0.2	-0.9	-4.0	-3.6	-10.5	0.1	-5.3	-12.7	-18.1
	NWZ	1.0	2.6	4.0	-0.5	0.1	-0.8	-0.4	-1.0	0.4	-0.3	0.5	0.3	4.1	3.6	-2.2	0.6	8.7	-2.3	5.9
	HM	-3.9	-4.2	-3.9	-0.1	-2.5	-1.0	-2.6	-2.5	-4.9	-2.0	-0.3	-0.5	-8.5	-6.4	-6.1	-7.2	-14.1	-13.6	-28.4
	BM	3.3	2.0	4.5	3.2	3.0	3.0	4.5	3.8	2.8	-0.3	-1.4	0.1	5.5	10.7	11.3	1.1	8.7	20.3	28.6
	TM	-1.3	0.1	-1.6	-0.2	0.2	-0.2	-1.1	1.3	0.5	-0.2	-1.2	0.0	-1.1	-1.6	0.1	-0.9	-4.0	0.6	-3.5
	NA	0.3	0.2	0.2	0.2	-1.0	-0.1	-0.7	-0.5	-0.4	-0.1	-0.3	0.2	0.4	-0.6	-1.3	-0.8	0.2	-2.5	-2.1
	NZ	0.6	0.1	-1.2	-1.0	-2.1	-3.5	-1.4	0.5	-1.3	-0.4	1.2	0.5	0.9	-4.3	-4.4	-0.5	0.7	-8.8	-8.1
	HNA	0.1	-0.1	-0.8	0.0	-1.5	-2.6	-1.8	-0.4	-1.0	-1.3	-0.7	-0.3	-0.3	-2.3	-4.8	-3.0	-3.4	-7.2	-10.5
	HNZ	0.0	0.8	0.2	0.1	1.6	-0.2	0.5	0.3	0.0	-0.2	-0.4	0.3	1.1	2.0	0.7	-0.5	0.9	2.5	3.2
	HB	0.1	0.4	0.4	0.3	-0.6	0.3	1.3	-0.5	-0.4	0.5	0.1	0.6	1.1	0.1	1.2	0.1	2.3	0.5	2.5
	TRM	0.2	-0.2	1.3	1.0	0.4	2.7	2.0	2.1	2.0	0.6	0.9	2.6	2.4	2.8	6.7	3.5	5.0	10.1	15.4
	NEA	-0.6	-0.7	-1.7	-0.6	-0.7	-1.7	-2.4	-0.2	-1.6	-0.8	-0.1	0.5	-0.8	-2.9	-4.3	-2.5	-3.3	-7.2	-10.5
	NEZ	-0.1	-1.0	-0.5	-1.3	-1.1	-0.3	0.0	-0.7	-0.8	-0.1	0.3	0.1	-1.0	-2.9	-1.0	-0.6	-1.6	-4.1	-5.5
	HFA	-2.8	0.1	0.7	-1.9	-0.6	-0.8	0.3	2.6	-1.4	-2.3	0.0	-1.7	-4.3	-1.8	2.1	-3.7	-5.8	-1.9	-7.8
	HFZ	-0.4	0.4	0.1	1.0	0.5	0.2	0.7	0.7	0.0	0.5	0.4	0.0	0.1	1.7	1.7	0.9	0.7	3.2	4.3
	HNFA	-0.2	-0.2	0.7	-0.6	0.5	-0.3	1.1	0.2	-0.5	0.8	-0.1	-0.2	-0.6	0.7	1.0	0.2	0.8	0.5	1.3
	HNFZ	2.0	0.5	-2.0	0.7	-0.9	1.5	0.5	0.4	0.9	0.1	0.2	0.2	2.7	-2.1	2.4	1.2	1.0	3.1	4.3
	SEA	1.4	0.7	-1.1	-0.3	-0.1	0.0	0.7	0.1	-0.5	-0.3	-0.8	-0.8	1.4	-1.5	0.8	-1.6	-0.6	-0.2	-1.1
	SEZ	-1.0	-1.0	-0.2	-0.3	0.4	0.3	0.0	0.2	0.1	-0.2	-0.7	-0.2	-2.1	0.0	0.6	-0.9	-3.4	0.8	-2.5
	SA	-1.2	-0.2	-0.9	-0.4	0.0	0.3	0.0	0.1	-0.5	0.7	-2.3	-0.9	-2.2	-1.3	0.5	-2.0	-4.7	-0.3	-5.1
	SZ	0.2	-0.8	-0.2	-0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	-0.4	0.6	-0.6	-1.2	-0.4	0.1	0.3	-1.1	0.0	-1.3
	TB	-0.2	-0.5	0.3	-0.4	0.2	-0.4	0.1	-1.3	1.1	0.0	-0.5	-0.9	-1.5	0.1	-1.6	0.6	-1.5	-0.7	-2.4
	TRW	0.2	0.0	0.9	3.7	4.2	2.2	1.0	1.4	1.8	1.1	1.8	0.4	0.6	8.7	4.6	4.7	4.0	14.3	18.7
	U	0.2	0.0	-0.1	-0.2	0.1	-0.4	0.1	0.1	0.2	0.0	0.1	0.4	0.5	-0.2	-0.2	0.2	0.4	-0.1	0.5

positiver Trend mit α=0,05 (signifikant)
positiver Trend mit α=0,001 (hochsignifikant)
negativer Trend mit α=0,05 (signifikant)
negativer Trend mit α=0,001 (hochsignifikant)

Die Zunahme von W+ zulasten von O+ deckt sich mit der GWLk, wobei die dramatischen Veränderungen im SHJ auf der Ebene der vier Anströmrichtung in der SVG nicht sichtbar sind. Die für die GWLk charakteristische Abnahme von nördlicher zugunsten südlicher Anströmung ist ebenfalls nicht erkennbar, tendenziell ist eher die umgekehrte Entwicklung zu beobachten.

Über die Ursachen der beschriebenen Unterschiede kann aufgrund der bisher nur unzureichend vorliegenden Methodenbeschreibung der SVG und mangels alternativer Veröffentlichungen zu diesem Thema bisher nur spekuliert werden. Der Begründer der SVG, Paul James (DWD, pers. Mitteilung) führt dazu aus, dass einige der unterschiedlichen Entwicklungen wahrscheinlich auf zeitliche Inhomogenitäten in der manuellen Klassifikation zurückzuführen sind. Aufgrund der nicht deckungsgleichen Konzepte beider Klassifikationen wiederlegen die in der SVG gefundenen Entwicklungen jedoch nicht zwangsläufig diejenigen der GWLk. Die im Vergleich beider Klassifikationen großen Unterschiede in der Häufigkeit der einzelnen GWL sind methodisch bedingt. Zum einen wurde in der SVG eine gleichmäßigere Verteilung der GWL angestrebt. Zum anderen bringen automatisierte Verfahren eine (verglichen mit manuellen Verfahren) „objektivere" Typenzuordnung mit sich. So sind beispielsweise die in der GWLk – als statistisch hochsignifikant bewerteten – gegen-

Tabelle 6: wie Tabelle 5, aber für SVG

		Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez	Win	Frü	Som	Her	WHJ	SHJ	Jahr
Sektoren	W+	1.1	0.5	4.2	-1.1	3.5	3.5	2.4	-2.8	3.6	4.3	3.5	0.6	2.0	6.6	3.2	11.4	14.2	9.2	23.3
	O+	0.0	0.6	-3.7	-0.2	-2.7	-4.0	-1.8	2.1	-4.9	-3.6	-1.9	0.1	0.6	-6.6	-3.6	-10.5	-9.3	-11.4	-20.1
ASR	SW*	2.0	-0.4	1.2	-0.6	2.3	1.8	1.3	-1.3	2.3	2.5	2.1	-1.5	-0.1	2.9	1.8	6.9	5.8	5.7	11.6
	NW*	-0.9	0.9	3.0	-0.5	1.2	1.7	1.1	-1.4	1.4	1.8	1.4	2.1	2.1	3.7	1.4	4.5	8.4	3.4	11.7
	NO*	0.8	1.2	-0.8	1.0	0.3	-2.2	-0.5	1.3	-2.8	-1.0	-0.4	1.6	3.7	0.5	-1.4	-4.2	1.2	-2.9	-1.5
	SO*	-0.8	-0.7	-2.9	-1.2	-3.0	-1.8	-1.3	0.8	-2.1	-2.6	-1.6	-1.5	-3.0	-7.1	-2.3	-6.2	-10.6	-8.5	-18.6
ZY	Z	0.0	-1.9	-2.7	-5.2	-0.7	-2.8	-3.4	-4.7	-2.5	-5.2	-0.4	-4.7	-6.7	-8.6	-10.9	-8.2	-16.8	-19.2	-34.2
	A	0.2	2.0	2.6	5.1	0.8	2.7	3.5	4.7	2.5	5.3	0.2	4.5	6.8	8.5	10.8	8.1	16.6	19.3	34.1
ZON	ZON	2.1	1.3	3.9	-1.9	-0.5	-0.2	0.4	-0.8	2.7	0.7	1.9	1.5	4.4	1.5	-0.6	5.3	11.3	-0.3	11.1
	MIX	-2.7	-1.6	1.5	0.8	2.9	4.8	2.6	0.4	3.6	1.9	0.0	-1.3	-5.0	5.3	7.8	5.5	-1.0	15.1	13.0
	MER	0.8	0.4	-5.5	1.0	-2.3	-4.7	-2.9	0.4	-6.3	-2.6	-2.1	-0.5	0.7	-6.8	-7.2	-10.9	-10.4	-14.8	-24.2
GWT	W	2.1	1.3	3.9	-1.9	-0.5	-0.2	0.4	-0.8	2.7	0.7	1.9	1.5	4.4	1.5	-0.6	5.3	11.3	-0.3	11.1
	SW	1.0	-0.4	0.9	-0.2	3.0	2.3	1.9	0.2	1.5	1.8	1.7	-0.7	-0.1	3.6	4.4	5.0	4.5	8.7	12.9
	NW	-2.8	-0.2	1.3	-0.2	0.5	2.1	1.3	-0.5	0.8	0.7	0.1	0.3	-2.5	1.6	3.0	1.5	-0.5	4.1	3.4
	HME	-0.2	-1.0	0.7	1.3	0.0	1.4	0.6	0.6	1.1	-0.1	-1.5	-1.1	-2.0	2.1	2.6	-0.5	-2.4	5.0	1.9
	TME	-0.6	0.0	-1.3	-0.1	-0.7	-1.0	-1.2	0.1	0.3	-0.5	-0.3	0.2	-0.5	-2.1	-2.2	-0.5	-2.6	-2.7	-5.2
	N	1.8	1.0	-0.4	1.2	1.8	-0.7	-0.7	-1.1	-1.5	1.4	0.8	2.1	4.7	2.6	-2.5	0.7	6.4	-1.0	5.6
	NO	0.0	0.2	0.5	0.0	-0.3	-0.8	0.6	1.1	-0.9	-0.4	-0.2	0.5	0.8	0.2	1.0	-1.5	0.6	-0.2	0.3
	O	-0.1	1.0	-2.1	0.9	-0.8	-2.2	-1.6	1.6	-2.4	-2.6	-1.1	0.2	1.0	-2.0	-2.2	-6.1	-5.1	-4.5	-9.2
	SO	-0.7	-0.5	-0.3	-2.2	-2.1	-0.3	0.3	1.1	-0.3	-1.7	-0.5	0.0	-1.2	-4.6	1.2	-2.4	-3.7	-3.5	-7.1
	S	-0.1	-1.3	-3.2	1.2	-1.0	-0.8	-1.5	-2.3	-1.2	0.8	-1.1	-3.3	-4.5	-3.0	-4.6	-1.5	-8.6	-5.7	-13.8
GWL	WA	1.6	0.8	1.1	0.1	-0.3	0.7	0.1	-0.1	1.6	1.6	1.5	1.9	4.0	0.9	0.8	4.7	8.4	2.2	10.7
	WZ	2.0	0.6	1.5	-1.2	0.7	-0.8	0.3	-0.1	-0.4	0.8	0.2	-0.4	2.0	1.0	-0.7	0.6	4.2	-1.5	3.0
	WS	-0.5	0.4	-0.1	-0.7	-0.3	-0.1	-0.3	-0.4	0.0	-0.8	-0.6	0.5	0.2	-1.1	-0.8	-1.4	-1.3	-1.8	-2.8
	WW	-1.0	-0.5	1.4	-0.2	-0.6	0.0	0.3	-0.2	1.4	-0.8	0.8	-0.5	-1.7	0.6	0.1	1.4	-0.1	0.7	0.2
	SWA	0.0	0.5	0.5	-0.2	0.9	1.0	1.3	1.3	1.1	1.3	0.9	0.5	0.9	1.2	3.6	3.3	3.7	5.3	9.0
	SWZ	1.0	-1.0	0.4	0.0	2.1	1.3	0.5	-1.0	0.5	0.4	0.8	-1.1	-0.9	2.5	0.8	1.7	0.7	3.4	3.9
	NWA	-0.8	-0.9	-0.2	1.0	0.3	-0.4	-0.2	0.2	0.8	0.4	0.1	1.0	-0.6	1.1	-0.4	1.3	0.0	1.7	1.3
	NWZ	-2.1	0.7	1.5	-1.2	0.3	2.5	1.5	-0.7	0.0	0.3	0.0	-0.7	-1.9	0.6	3.4	0.3	-0.5	2.5	2.1
	HM	-0.1	-0.5	0.4	0.7	-0.2	1.1	0.3	0.1	-0.2	0.9	-0.2	-0.2	-0.7	0.9	1.5	0.6	0.6	1.8	2.2
	BM	-0.1	-0.5	0.3	0.6	0.2	0.2	0.4	0.5	1.2	-1.0	-1.3	-0.8	-1.3	1.1	1.1	-1.1	-3.0	3.1	-0.3
	TM	-0.6	0.0	-1.3	-0.1	-0.7	-1.0	-1.2	0.1	0.3	-0.5	-0.3	0.2	-0.5	-2.1	-2.2	-0.5	-2.6	-2.7	-5.2
	NA	0.8	1.5	0.3	1.2	0.3	1.1	-1.3	-0.6	1.1	0.2	0.9	-0.2	1.9	1.8	-0.8	2.3	3.4	1.8	5.3
	NZ	0.8	0.1	-0.1	-0.4	-0.1	-0.8	-0.8	0.1	0.0	-0.1	0.4	0.2	1.1	-0.6	-1.6	0.3	1.1	-2.1	-0.7
	HNA	0.3	0.0	0.0	0.7	0.2	-0.7	0.7	0.1	0.3	0.6	-0.2	0.0	0.4	0.9	0.1	0.6	0.7	1.2	1.9
	HNZ	0.1	0.0	-0.6	0.0	0.5	0.0	0.1	-0.2	-1.0	-0.5	-0.5	0.7	0.6	-0.2	-0.1	-2.0	-0.9	-0.6	-1.5
	HB	0.7	-0.3	0.2	-0.3	0.4	0.6	0.3	0.0	-1.0	0.5	0.0	0.9	1.4	0.2	0.9	-0.5	2.3	0.0	2.0
	TRM	-0.8	-0.4	-0.2	0.0	0.5	-0.7	0.4	-0.6	-1.0	0.6	0.3	0.5	-0.7	0.3	-0.9	0.0	-0.1	-1.3	-1.4
	NEA	-0.6	0.2	0.2	0.6	0.0	-0.3	0.3	0.6	0.0	-0.1	-0.2	0.8	0.5	0.8	0.6	-0.3	0.5	1.2	1.6
	NEZ	0.6	0.0	0.2	-0.6	-0.3	-0.5	0.3	0.5	-0.9	-0.3	0.0	-0.3	0.3	-0.6	0.3	-1.2	0.1	-1.4	-1.3
	HFA	-0.6	0.9	-0.5	0.2	-0.2	-0.3	1.0	0.9	-0.6	-0.3	-0.5	0.3	0.6	-0.5	1.7	-1.4	-0.8	1.1	0.3
	HFZ	0.2	-0.5	-0.6	0.8	-1.3	-1.3	-1.6	0.8	-0.5	-0.7	0.6	-0.1	-0.5	-1.1	-2.0	-0.6	-1.3	-3.0	-4.1
	HNFA	-0.3	-0.2	-0.3	0.3	0.6	0.0	-0.3	-0.2	-0.8	-0.6	-0.6	-0.2	-0.7	0.6	-0.5	-2.1	-2.1	-0.4	-2.7
	HNFZ	0.6	0.8	-0.7	-0.5	0.2	-0.7	-0.7	0.0	-0.5	-0.9	-0.6	0.3	1.6	-1.0	-1.3	-2.0	-0.9	-2.2	-2.7
	SEA	-0.2	-0.1	0.9	-1.1	-0.9	0.1	1.0	1.0	0.0	-0.4	0.3	0.9	0.6	-1.1	2.0	-0.1	1.4	0.1	1.5
	SEZ	-0.5	-0.4	-1.2	-1.1	-1.2	-0.3	-0.7	0.1	-0.3	-1.3	-0.7	-0.9	-1.8	-3.5	-0.9	-2.3	-5.1	-3.5	-8.6
	SA	-0.4	0.4	-0.3	1.1	-0.5	-0.5	0.0	0.9	-1.0	2.1	-0.3	-0.2	-0.1	0.4	0.4	0.8	1.5	0.0	1.3
	SZ	0.2	-1.2	-0.6	0.5	0.9	-0.3	-1.2	-1.2	0.1	-0.7	-0.3	-1.5	-2.4	0.8	-2.7	-0.9	-4.3	-1.2	-5.3
	TB	-0.4	-0.5	-1.6	-0.3	-0.9	-0.2	0.0	-0.5	0.7	0.4	-1.3	-0.8	-2.0	-2.8	-0.6	-0.2	-4.4	-1.2	-5.4
	TRW	0.5	0.0	-0.7	-0.1	-0.5	0.2	-0.4	-1.5	-1.0	-1.1	0.8	-0.6	0.0	-1.3	-1.6	-1.3	-1.5	-3.3	-4.3
	U	-0.2	0.0	0.1	0.1	-0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	-0.1	0.2	0.2	-0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0	0.1

positiver Trend mit α=0,05 (signifikant)
positiver Trend mit α=0,001 (hochsignifikant)
negativer Trend mit α=0,05 (signifikant)
negativer Trend mit α=0,001 (hochsignifikant)

sätzlichen Entwicklungen der beiden in der HME enthaltenen GWL (HM und BM) recht wahrscheinlich auf subjektive Entscheidungen unterschiedlicher Bearbeiter zurückzuführen. Im Gegensatz zur GWLk zeigen sie in der SVG nahezu keinerlei signifikanten Trends (vgl. auch Diskussion in ZB2009).

3.3.3 Vergleich von Häufigkeiten und Trends zwischen GWLk, SVG und oWLK

Häufigkeiten und Trends der vier in der oWLK enthaltenen Anströmrichtung wurden für 1961–2000 berechnet und werden mit den Entwicklungen in GWLk und SVG in gleichem Zeitraum verglichen. Zeitliche Veränderungen in GWLk und SVG lassen sich bei Betrachtung der Halbjahre gut erkennen, daher beschränken sich die nachfolgenden Auswertungen aus Übersichtsgründen auf WHJ und SHJ. Analog zum 110-jährigen Zeitraum ist die Frequenz von W+ zwischen GWLk und SVG ungefähr gleich, während O+ in der SVG deutlich häufiger auftritt. In der oWLK tritt W+ deutlich häufiger zulasten von O+ auf. Die Trends im 40-jährigen Zeitraum unterscheiden sich erwartungsgemäß von denen der längeren Periode. Recht ähnliche (signifikante) Trends treten im WHJ bei W+ (Anstieg) und O+ (Rückgang) auf, während die Entwicklungen im SHJ nicht signifikant sind. Interessant ist, dass der Anstieg von W+ im WHJ bei GWLk und oWLK weitgehend auf nordwestliche, bei SVG jedoch südwestliche Anströmung zurückzuführen ist. Die Ergebnisse zeigen, dass grundlegende Entwicklungen innerhalb der drei Klassifikationen durchaus vergleichbar sind, während eine klimatologische und methodische Bewertung der Unterschiede schwierig ist. In Abschnitt 3.5 werden die zeitlichen Entwicklungen für den Westsektor detaillierter verglichen.

Tabelle 7: Mittlere Auftrittshäufigkeit und lineare Trends [in Tagen] incl. Signifikanz (eingefärbt, zur Erklärung vgl. Tabelle 5) in der Periode 1961–2000; Vergleich von Sektoren und Anströmrichtungen von GWLk, SVG und oWLK

		Winterhalbjahr						Sommerhalbjahr					
		Mittlere Häufigkeit			Lineare Trends			Mittlere Häufigkeit			Lineare Trends		
		GWLk	SVG	oWLK	GWLk	SVG	oWLK	GWLk	SVG	oWLK	GWLk	SVG	oWLK
Sektoren	W+	54	55	66	21,3	21,8	18,7	51	52	67	-6,6	-10,5	1,6
	E+	26	34	15	-14,8	-23,0	-12,5	29	38	12	-4,9	0,9	-0,8
ASR	SW*	25	28	31	6,2	14,9	2,2	21	26	35	-0,9	-9,0	-1,2
	NW*	29	27	35	15,1	6,9	16,4	30	26	32	-5,8	-1,5	2,8
	NE*	13	16	9	-7,9	-13,3	-7,5	18	20	7	-4,5	-0,1	-2,0
	SE*	13	19	6	-6,9	-9,7	-5,0	11	18	5	-0,4	0,9	1,2

3.4 Projizierte Wetterlagenhäufigkeit (1961–2100)

Die rezenten sowie die für das 21. Jahrhundert erwarteten Veränderungen des globalen Klimas sind regional unterschiedlich ausgeprägt. Für den mitteldeutschen Raum projizieren die globalen Klimamodelle einen z.T. deutlichen Anstieg der Temperatur, während die projizierte Bandbreite möglicher Entwicklungen bei den Niederschlägen deutlich größer ist. Aufgrund der Lage der Modellregion im Übergangsbereich zwischen den für Nordeuropa projizierten markanten Zunahmen und den für Südeuropa bzw. den mediterranen Raum simulierten Abnahmen des Jahresniederschlags sind für die RMR nur geringe Veränderungen in den jährlichen Niederschlagsmengen wahrscheinlich. Deutliche Zu- oder Abnahmen sind jedoch ebenfalls nicht auszuschließen, da sich die Modelle hinsichtlich des räumlichen Verlaufs dieser Grenze entgegen gerichteter Niederschlagstrends uneins sind. Erwartet wird jedoch eine Niederschlagsumverteilung: für den Sommer werden allgemein sinkende und für den Winter eher steigende Niederschlagsmengen erwartet, während die Übergangsjahreszeiten uneinheitliche Tendenzen aufweisen. Diese regional unterschiedlichen Entwicklungen sind auf Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation zurückzuführen (LfULG 2009). Daher sind die in globalen und regionalen Klimamodellen enthaltenen Änderungssignale von Zirkulationsmustern über Europa und dem Nordatlantik wichtige Bausteine, um kleinräumige Spezifika großflächiger Klimaänderungen und damit auch projizierte Veränderungen im Klimaregime der RMR besser beschreiben zu können. Automatisierte Klassifikationen atmosphärischer Zirkulation (wie SVG und oWLK) können aufgrund ihrer Reproduzierbarkeit auf Klimaprojektionen angewandt werden, während dies für manuelle Klassifikationen wie die GWLk aufgrund des damit verbundenen Klassifizierungsaufwandes nicht möglich ist.

In diesem Kapitel werden die in der oWLK enthaltenen Komponenten (Anströmung, Feuchtigkeit, Zyklonalität) auf Änderungssignale untersucht. Da trockene/feuchte sowie zyklonale/antizyklonale Wetterlagen zusammen jeweils 100% ergeben, wird jeweils nur eine Komponente (trockene bzw. antizykonale Wetterlage) dargestellt. Insbesondere mit der Untersuchung der Häufigkeitsveränderungen der Sektoren und Anströmrichtungen wird eine wichtige Zuarbeit für die in TP2.2 angestrebte Projektion zukünftiger Aerosolkonzentrationen in der RMR geschaffen. Die Modellvalidierung erfolgt im Zeitraum 1961–1990 anhand von ERA40; für den Projektionszeitraum werden die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 betrachtet. Tabelle 8 zeigt die Farbcodes der in den Abbildungen dieses Kapitels mit verschiedenen IPCC-Szenarien kombinierten Klimamodellläufe.

Tabelle 8: Farbcodes der verwendeten Modellläufe und Szenarien (vgl. Tabelle 2)

MPEH5_1_A1B	MPEH5_1_A2	MPEH5_1_B1	MPEH5_2_A1B
MPEH5_3_A1B	MPEH5_3_A2	MPEH5_3_B1	DMIEH5_4_A1B
BCM2_1_A1B	CNCM3_1_A1B	CNCM3_1_A2	EGMAM_3_A1B

Vergleich zwischen Beobachtungs- und Modelldaten für den Kontrollzeitraum 1961–90

Der Vergleich von Modell- mit Reanalysedaten (ERA40) erlaubt eine Beurteilung, wie realistisch die verwendeten Klimamodelle gegenwärtige Klimabedingungen wiedergeben können. Abbildung 8 zeigt eindrucksvoll, dass Westlagen (W+) von den globalen Klimamodellen deutlich über- und insbesondere unbestimmte Lagen (XX) deutlich unterschätzt werden. Die nach der oWLK-Methodik ohnehin seltenen Ostlagen (O+) werden von den meisten Modellen ebenfalls unterschätzt. Die Verteilung trockener/feuchter Wetterlagen wird methodisch bedingt (da an den Werten der relativen Feuchtigkeit von ERA40 im Zeitraum 1961–2000 ausgerichtet) sehr gut wiedergegeben, während das Auftreten antizyklonaler Wetterlagen (insbesondere in A500) z.T. deutlich zugunsten zyklonaler Verhältnisse unterschätzt wird. Generell, insbesondere im WHJ, weisen die drei MPEH5-Läufe sowie DMIEH5 für Anströmrichtungen und Zyklonalität geringere systematische Fehler (Bias) auf, als die anderen drei Modelle. Die Modelle bilden also klimatische Bedingungen ab, die im Gegensatz zur Realität eine deutlich stärkere Prägung des mitteleuropäischen Klimas durch zyklonal geprägte, maritime Westwetterlagen beinhalten. Damit verbunden werden die sächsischen Winter in den Globalmodellen also eher feuchter und milder, die sächsischen Sommer etwas wechselhafter abgebildet. Aufgrund der orographischen Spezifika der RMR wären mit überschätzter südwestlicher

Anströmung (mit Ausnahme des nördlichen Teils) geringere, mit überschätzter nordwestlicher Anströmung höhere Niederschlagsmengen verbunden. Durch die geringe Auflösung der Globalmodelle können diese regionalspezifischen Komponenten jedoch nur – wenn überhaupt – in Ansätzen wiedergegeben werden. Feiner aufgelöste Regionalmodelle – insbesondere statistische Downscalingverfahren (z.B. WETTREG, WEREX) – könnten diese Lücke schließen.

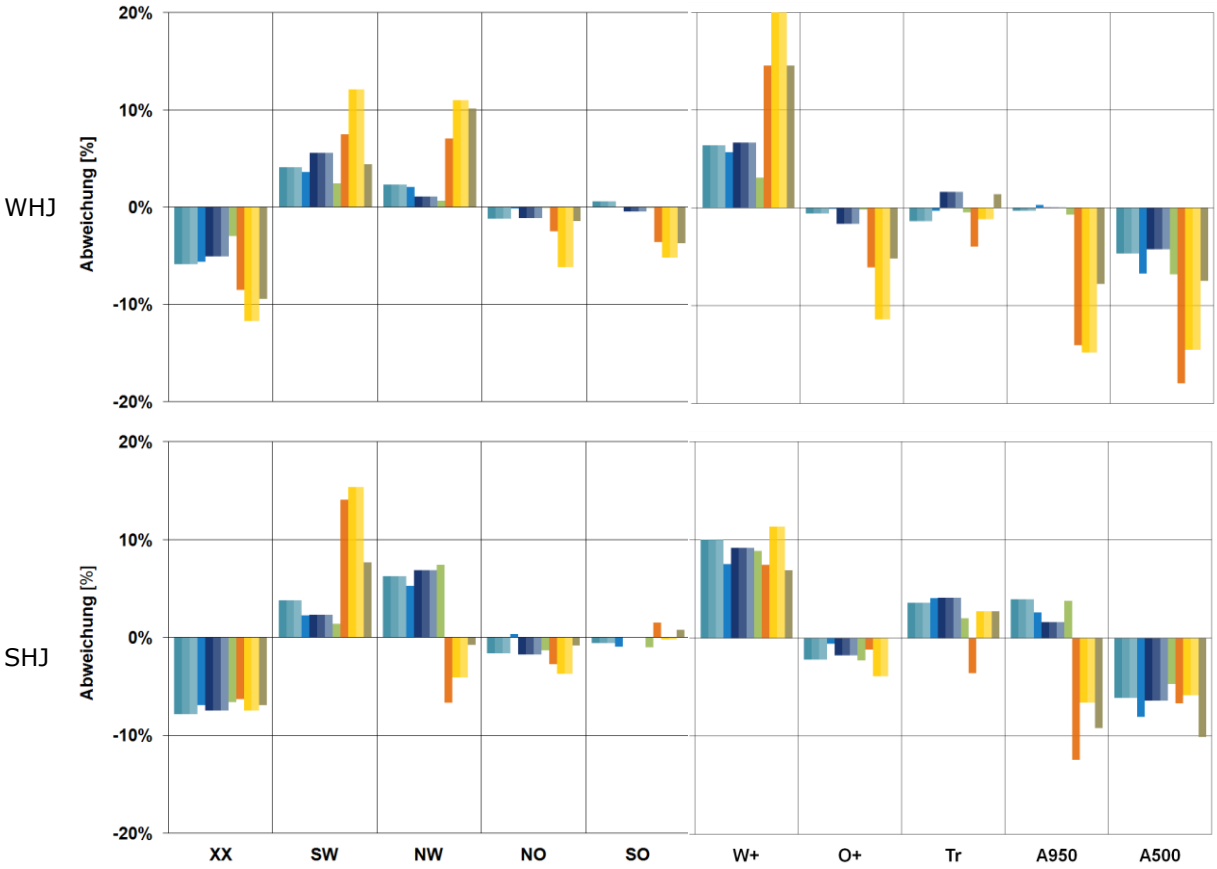


Abbildung 8: Abweichung der Modellergebnisse im Kontrollzeitraum 1961–1990 von den ERA40 Reanalysedaten im Winter- (oben) und Sommerhalbjahr (unten) für 1) alle Anströmrichtungen (links) sowie 2) West (W+)- und Ostsektor (O+), trockene (Tr) sowie antizyklonale Wetterlagen in 950 hPa (A950) und 500 hPa (A500) (rechts)

Projizierte Klimaänderungssignale im 21. Jahrhundert

Der Vergleich von Projektionsdaten mit solchen aus dem Kontrollzeitraum ermöglicht die Evaluierung der Änderungssignale vor dem Hintergrund des modellierten Ist-Zustandes. Dabei ist zu prüfen, ob und wie stark sich die Signale vom im Kontrollzeitraum dargestellten Modellfehler abheben. Abbildung 9 lässt für die Zeitscheibe 2021–2050 nur geringe und uneinheitliche Veränderungen erkennen, die vor dem Hintergrund der festgestellten Modellfehler irrelevant sind. Dies deckt sich mit der generellen Erkenntnis von Pielke Sr. et al. (2011), dass robuste (anthropogen bedingte) Signale in Klimamodellen innerhalb der von Entscheidungsträgern gewünschten Zeitspanne von Jahren oder wenigen Dekaden nur selten erkannt werden können. Der starke Rückgang trockener zugunsten feuchter Wetterlagen hat rein methodische Ursachen. Deren Zuordnung erfolgt auf Basis des Niederschlagspotentials für 1961–2000. Die mit dem erwarteten Temperaturanstieg verbundene Feuchteaufnahmekapazität führt daher zu einem künstlichen Anstieg feuchter Wetterlagen.

Zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) sind stärkere Signale zu erkennen, welche die Abweichungen der Modelle vom Istzustand im Kontrollzeitraum jedoch zumeist nicht übersteigen. In Abbildung 9 ist eine schwache Tendenz zu mehr West- (W+) zulasten von Ostlagen (O+) zu erkennen, die im WHJ durch ein vermehrtes Auftreten von Südwest-, im SHJ durch zunehmende

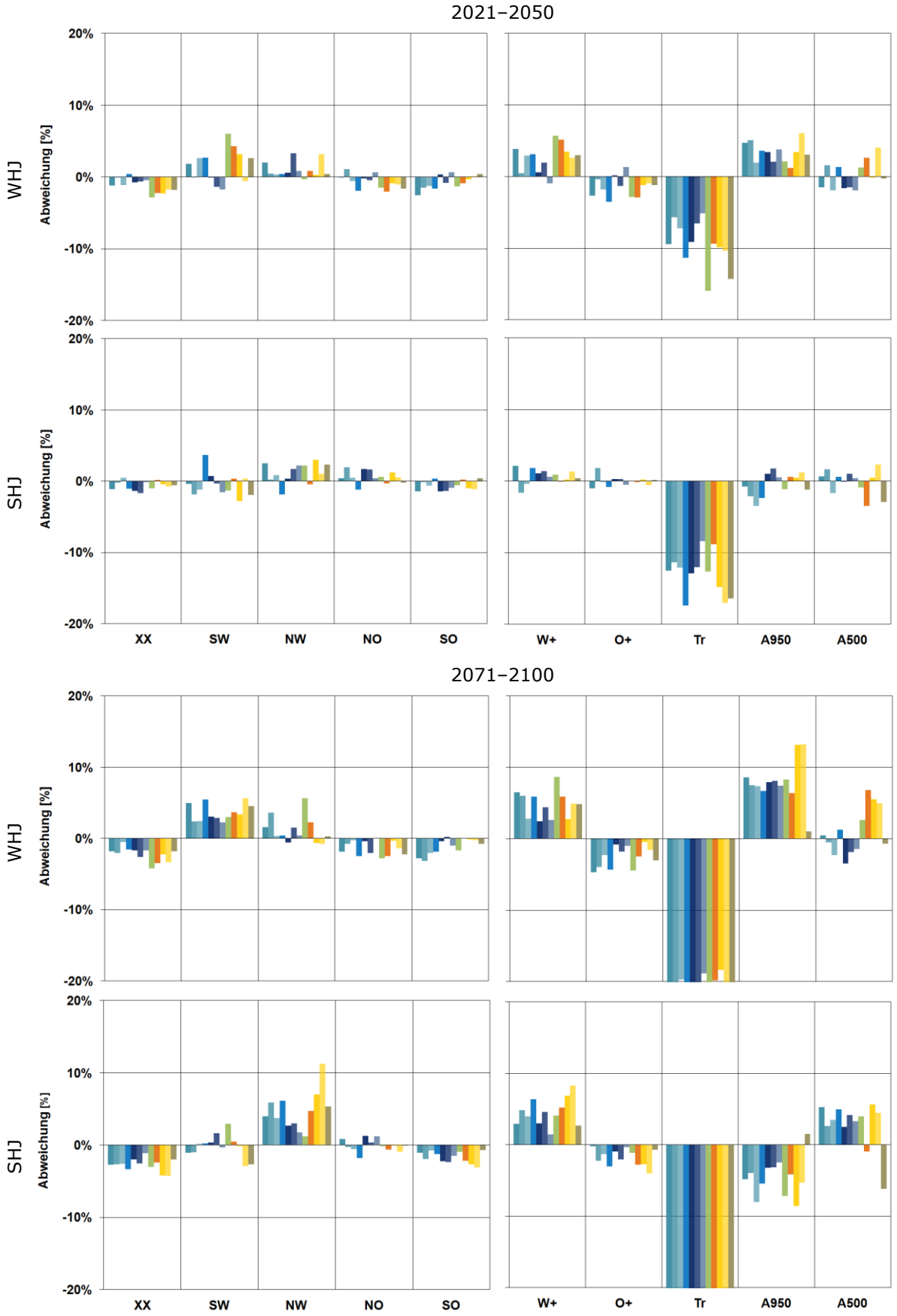


Abbildung 9: wie Abbildung 8, aber für Abweichung der Modellergebnisse in den Projektionszeiträumen 2021–2050 und 2071–2100 von den Ergebnissen im Kontrollzeitraum 1961–1990; Werte von Tr im Zeitraum 2071–2100 nur unzureichend dargestellt, da fehlerbehaftet (siehe Text)

Nordwestlagen zu erklären ist. Bodennah werden im WHJ mehr, im SHJ weniger antizykonale Wetterlagen projiziert – eine Interpretation dafür kann bisher nicht gegeben werden. Die starke Abnahme trockener zugunsten feuchter Wetterlagen ist ein Artefakt und basiert auf der Zugrundelegung von Mittelwerten des niederschlagsfähigen Wassergehaltes im Zeitraum 1961–2000. Eine Erwärmung bringt bei gleichem atmosphärischem Wassergehalt zwangsläufig eine Absenkung der relativen Luftfeuchte mit sich. Insgesamt sind die festgestellten Änderungssignale nicht robust und deuten auf eine recht schwache Sensitivität der oWLK gegenüber dem Treibhaussignal hin.

Aufgrund der nur schwachen Signale können auf der Basis der hier erkennbaren Zirkulationsveränderungen keine Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von Niederschlags- oder Dürreereignissen in der RMR getroffen werden. Die von den Modellen projizierten deutlichen Niederschlagsabnahmen in der RMR im Sommer lassen sich jedenfalls über die dargestellten, nur schwach ausgeprägten Zirkulationsveränderungen nicht erklären. Die angedeutete Stärkung nordwestlicher Anströmung im SHJ würde rein aus Wetterlagensicht im Gegenteil eher höhere Sommerniederschläge bedeuten, während die angedeutete Zunahme von Südwestlagen im WHJ aufgrund von Föhneffekten eher geringere Niederschläge zur Folge hätte. Die in den Modellen dargestellten Niederschlagsveränderungen und deren Nichtabbildung in veränderten Zirkulationsmustern lassen sich daher entweder durch 1) eine Nichteignung von Untersuchungen anhand von Globalmodellen oder 2) eine Nichteignung bestimmter Wetterlagenklassifizierungen, in diesem Falle der oWLK, für diese Analysen erklären. These 1 ist unplausibel, da die anhand der Modelle erkennbaren unterschiedlichen räumlichen Änderungssignale verschiedener Klimaparameter zu großen Teilen durch Zirkulationsänderungen erklärbar sein sollten. Da die gewählte Klassifizierungsmethode (also die oWLK) die gewünschten Erklärungen offensichtlich nicht liefern kann (dies steht im Einklang mit Kreienkamp/CEC Potsdam (2011, mündliche Aussage), sollten zukünftige Untersuchungen mittels einer anderen Klassifikation durchgeführt werden. Im Rahmen des vom LfULG geplanten Projektes KLIWES ist durch die Firma CEC Potsdam geplant, Veränderungen klimatischer Parameter anhand einer neuen objektivierten Version der GWLk durchzuführen, evtl. auch unter Einbeziehung der SVG. Dieser Ansatz ist in Bezug auf die in Abschnitt 5.2 vorgestellten Ergebnisse hinsichtlich von Aussagen zukünftiger Veränderungen von Dürreereignissen in der RMR/Sachsen vielversprechend.

3.5 Veränderungen in der Häufigkeit von Westwetterlagen (1871–2100)

In diesem Abschnitt wird die beobachtete und projizierte Entwicklung der Häufigkeit von Westwetterlagen (W+) für einen 230jährigen Zeitraum atmosphärischer Zirkulation für Mitteleuropa untersucht. Innovativ gegenüber früheren Forschungsansätzen ist die Verwendung verschiedener Klassifikationen unter Verknüpfung eines sehr langen Diagnosezeitraumes von deutlich über 100 Jahren (SVG, GWLk) mit einem 100jährigen Projektionszeitraum (oWLK). Gemeinsamkeiten/Unterschiede zwischen vergangener und von Klimamodellen projizierter Klimavariabilität sowie beobachtete und projizierte Trends werden anhand eines 31jährig gleitenden Mittels analysiert. Die Ergebnisse dieser Analyse unterstützen die geplanten Untersuchungen zu Veränderungen von Aerosolkonzentration und -zusammensetzung in der RMR (TP2.2).

In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits eine Validierung von a) räumlichen Mustern und b) Auftrittshäufigkeiten der Anströmrichtungen und Sektoren der drei Klassifikationen GWLk, SVG und oWLK im Zeitraum 1961–2000 vorgenommen. Während im 40-jährigen Validierungszeitraum für die häufig auftretenden Westlagen (W+) vor allem im WHJ recht deutliche Übereinstimmungen in Häufigkeit, Trend und räumlichen Mustern festgestellt wurden, treten für die selteneren Ostlagen (O+) größere Unterschiede zwischen den Klassifizierungsmethoden auf. Dies bestätigt sich auch in der Korrelation der Zeitreihen von oWLK mit den beiden Großwetterlagenklassifikationen. Die jährlichen Werte für W+ (GWLk: r=0,81; SVG: r=0,72) liegen deutlich höher als für O+ (GWLk: r=0,52; SVG: r=0,64). Aufgrund der für O+ daher zu erwartenden größeren Unsicherheit, ihres selteneren Auftretens sowie der im Vergleich zu W+ gegensätzlichen räumlichen Muster und zu erwartenden Trendentwicklungen wird dieser Sektor in die nachfolgenden Auswertungen nicht mit einbezogen.

Projizierte Veränderungen atmosphärischer Zirkulation unter Einbeziehung der Häufigkeit von Wetterlagen wurden bisher nur in wenigen (Mitteleuropa betreffenden) Untersuchungen analysiert. Die realistische Wiedergabe der Häufigkeiten von Zirkulationsmustern in Klimamodellen sowie deren Einfluss auf klimatologische Parameter (z.B. Temperatur, Niederschlag) in Europa und dem nordöstlichen Atlantik wurde z.B. von James (2006) getestet. Dazu verwendete er eine automatisierte Version der GWLk[7] und untersuchte Veränderungen in der Häufigkeit der GWL anhand verschiedener Simulationsläufe (Ensembles) des britischen HadGEM1-Modells. Simulationen anhand eines verdoppelten atmosphärischen CO_2-Gehaltes zeigten keine signifikanten Veränderungen, wobei aufgrund der deutlichen innerjährlichen Fluktuationen keine robusten Angaben möglich waren. In einer Studie von Demuzere et al. (2009) wurden Häufigkeitsveränderungen der Lamb-Wettertypen anhand einer automatisierten und über Belgien zentrierten Version im Zeitraum 1860 bis 2100 auf Basis des mittleren Luftdrucks auf Meeresniveau analysiert. Diese wurden für ein West- und Mitteleuropa umfassendes Gebiet verwendet und auf das deutsche ECHAM5-MPI/OM Modell angewendet. Aufgrund der schlechten Reproduktion der gegenwärtigen Verhältnisse im Kontrollzeitraum (1961–2000) durch das Modell im Sommer beschränkten sich die Auswertungen auf die erweiterte Winterperiode Oktober bis April, da das Modell die Häufigkeit der Westlagen (zulasten der Ostlagen) deutlich überschätzt. Für die IPCC-Szenarien A1B, B1 und A2 wurden lineare Trends des 240-jährigen Zeitraumes 1860–2100 berechnet. Alle Szenarien gelangen zu ähnlichen Ergebnissen sowohl für Größe und Richtung der Trends in der Veränderung der Häufigkeit der Wettertypen. Westliche Anströmrichtungen in Mitteleuropa nehmen danach im erweiterten Winterzeitraum am deutlichsten zu (Signifikanz von $p \geq 0,95$ im Mann-Kendall Trendtest; bspw. 73 Tage im Szenario A1B von 1861–2100), während für die Ostlagen die größte und ebenfalls signifikante ($p \geq 0,95$) Häufigkeitsabnahme festgestellt wird. Die Autoren schließen daraus, dass Westlagen von Oktober bis April zukünftig einen größeren Einfluss auf das mitteleuropäische Klima haben werden. Die enthaltenen Unsicherheiten sind aufgrund der limitierten Wiedergabe der gegenwärtigen Bedingungen in den Modellen jedoch groß.

Die in diesem Bericht bisher durchgeführten Auswertungen ergeben ebenfalls eine deutliche Überschätzung westlicher zulasten östlicher Anströmrichtungen durch die Modelle, die im SHJ im Be-

[7] Es handelt sich hierbei um eine Vorgängerversion der in diesem Bericht verwendeten SVG

reich von 10% liegt, während im WHJ deutliche Unterschiede zwischen den Modellen zu beobachten sind (ECHAM 7%, CNCM3 23%). Die Schlussfolgerung einer besseren Wiedergabe im Winter als im Sommer kann für das vorliegende Modellensemble also nicht gegeben werden.

In Abbildung 10 ist die jährliche (11-jährig gleitend gemittelte) Häufigkeit der drei Klassifikationen dargestellt. Während W+ in GWLk und SVG ähnlich häufig auftreten, sind sie in der oWLK deutlich stärker vertreten. Im Zeitraum 1961–2000 verläuft die Zeitreihe aller Klassifikationen ähnlich. FürGWLk und SVG trifft diese Aussage vor allem ab den 1950er Jahren zu, während zuvor unterschiedliche Trends deutlich werden. Insgesamt nimmt die Häufigkeit der W+ seit Ende des 19. Jahrhunderts unter Schwankungen tendenziell zu. Diese Erkenntnis steht im Einklang mit dem für die mittleren europäischen Breiten ermittelten *„Westerly Index*"(Alvarez-Castro et al. 2011). Dieser wurde anhand von Logbuchdaten von den Ärmelkanal durchquerenden Schiffen für jährliche Daten im Zeitraum von 1685 bis 2008 erstellt und beinhaltet eine ebenfalls ansteigende Frequenz von Westwetterlagen ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts (Abbildung 11).

Die Unterschiede im Verlauf von GWLk und SVG bis in die 1940er Jahre sind vermutlich auf Inhomogenitäten sowohl in den Eingangsdaten der SVG als auch der GWLk (Einbeziehung von Höheninformationen nach dem 2. Weltkrieg) zurückzuführen. Um alle drei Klassifikationen unabhängig von ihren z.T. unterschiedlichen Häufigkeiten auf Häufigkeitsveränderungen der W+ überprüfen zu können, werden nachfolgend normierte Daten verwendet. Für die gegenwärtig von der WMO verwendete Klimanormalperiode 1961–1990 wurde ein Wert von „100%" festgelegt – ein verstärktes oder geringeres Vorkommen drückt sich in einem höheren oder niedrigeren Prozentwert aus.

In Abbildung 12 wird ein weiteres Problem bei der Verwendung nicht normierter Werte deutlich. Wie die Ausführungen in Kapitel 3.4 bereits verdeutlichen, wird die Häufigkeit der W+ von den Modellen deutlich überschätzt. Um die Variabilität der auf Beobachtungswerten basierenden oWLK-Reihe im Vergleich zu derjenigen der Modellläufe jedoch, unabhängig der unterschiedlichen Anfangshäufigkeit, besser beurteilen zu können, bietet sich auch hier eine Normierung auf den Zeitraum 1961–1990 an. Dies ermöglicht eine Fokussierung nachfolgender Auswertungen auf Änderungssignale unabhängig der tatsächlich sehr unterschiedlichen Häufigkeit der W+ in den Zeitreihen.

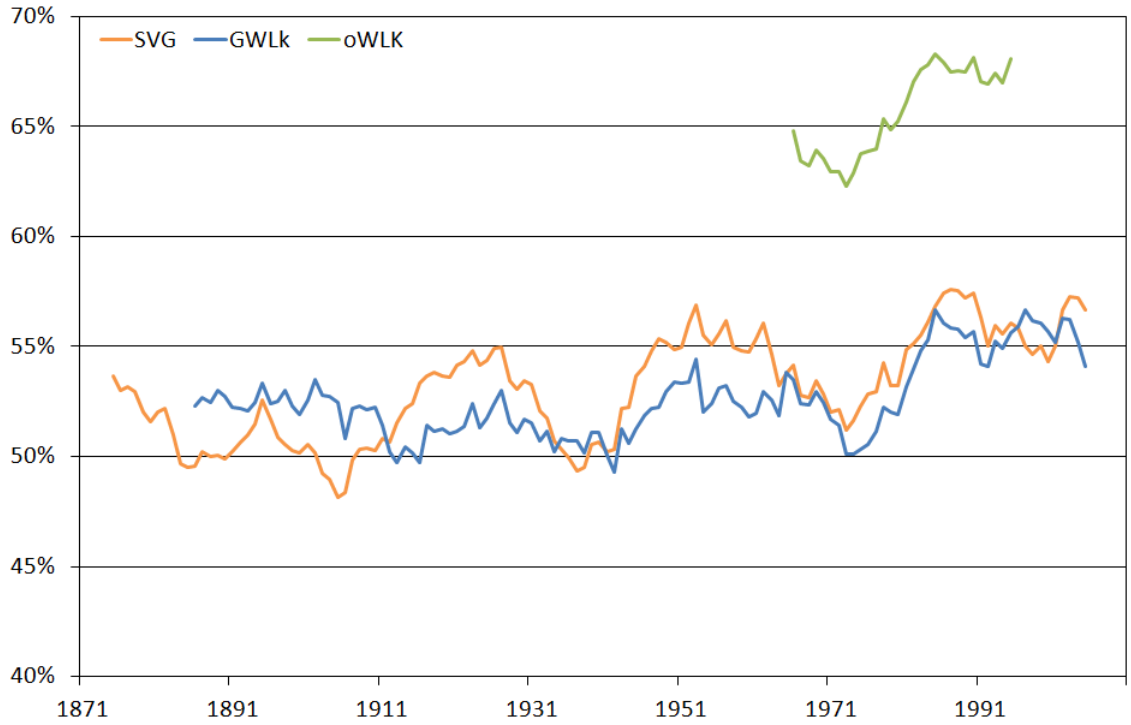


Abbildung 10: 11-jährig gleitend gemittelte Häufigkeiten von W+ für SVG (1871–2010), GWLk (1881–2010) und oWLK (1961–2000)

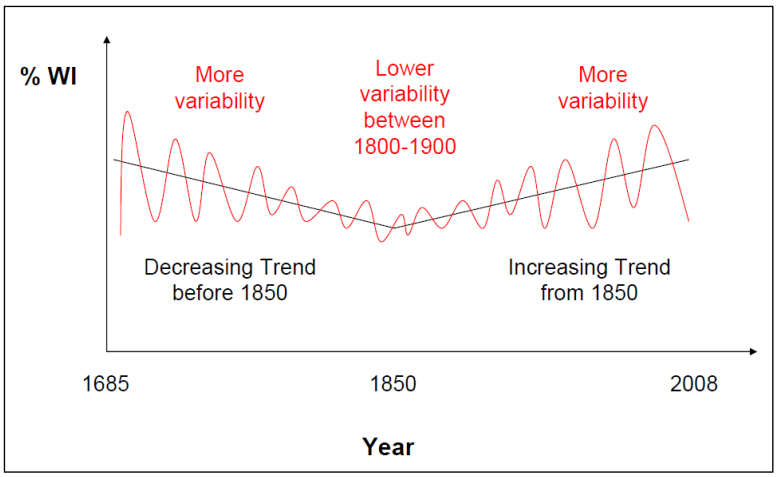


Abbildung 11: *„Westerly Index"* der Häufigkeit von Westwetterlagen in den mittleren europäischen Breiten; Alvarez-Castro et al. (2011)

Abbildung 13 stellt die zeitliche Entwicklung der Häufigkeit von W+ von Ende des 19. Jahrhunderts bis zum Jahr 2010 (Beobachtungswerte) und von 1961 bis Ende dieses Jahrhunderts (Projektionswerte) auf jährlicher Basis dar. Alle Modelle projizieren ansteigende Häufigkeiten von W+. Die 31jährige Glättung ermöglicht die Detektion eines in den meisten Modellläufen relativ linear ansteigenden Signals. Bis zum Ende des Jahrhunderts wird ein Anstieg von W+ um ca. 4 bis 8% relativ zu 1961–1990 projiziert. Verglichen mit der beobachteten Zunahme von ca. 8% seit den 1930er Jahren, ist das Signal für die kommenden 90 Jahre etwas geringer, jedoch deutlich. Allerdings ist die Relevanz dieses Signals durch die deutliche Überschätzung der W+ im Kontrollzeitraum 1961–2000 gegenüber den Beobachtungswerten deutlich eingeschränkt (vgl. Abbildung 12). Der Anstieg erfolgt vor dem Hintergrund einer massiven Überschätzung der W+ in der oWLK, die im Mittel der Modelle bei 10% relativer Häufigkeit und insgesamt zwischen 5 und fast 20% liegt – deutlich geringer als das den Modellen inhärente Änderungssignal der W+. Trotz der modellübergreifend

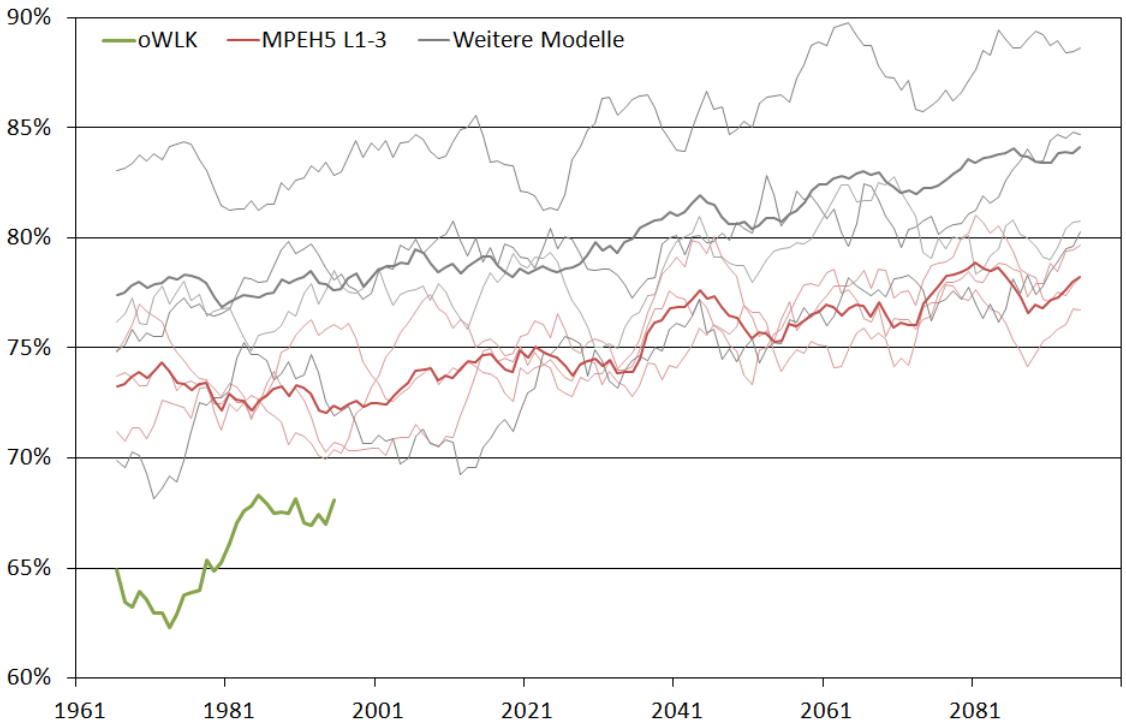


Abbildung 12: 11jährig gemittelte Häufigkeiten von W+ für oWLK Beobachtungs- und Projektionsdaten; die Projektionsdaten enthalten die in Tabelle 8 enthalten Modelle im Szenario A1B; dünne Linien zeigen Verlauf und Variabilität der enthaltenen Modellläufe für rot: 3 Läufe von MPEH5 und grau: weitere Modelle, dicke Linien die jeweiligen Mittelwerte der einzelnen Modellläufe

klaren Trendrichtung ist dieses Signal daher als nicht robust anzusehen. Diese Erkenntnis steht im Einklang mit den Aussagen anderer Multimodellstudien, welche zwar Veränderungen atmosphärischer Zirkulation erkennen, die sich jedoch häufig als schwach und nicht robust herausstellen. Beispiele sind Studien von Stephenson et al. (2006) und Osbourn (2004) zur Veränderung der Winter-NAO sowie Demuzere et al. (2009) zu Veränderungen der Lamb´schen Wetterlagenstatistik. Pielke Sr. et al. (2012) kritisieren die Wiedergabequalität atmosphärischer Zirkulation in globalen Klimamodellen: *„They are unable to skillfully simulate major atmospheric circulation features"*. Gleichzeitig sprechen sie auch den höher aufgelösten dynamischen oder statistischen Regionalisierungsverfahren die Fähigkeit ab, diese Probleme in den Griff zu bekommen: *„large-scale climate errors in the global models are retained and could even be amplified by the higher spatial resolution regional models"*.

Wesentliche Unterschiede in der zeitlichen Entwicklung der Häufigkeit der W+ werden in den Halbjahren deutlich, insbesondere im Beobachtungszeitraum bis 2010. W+ nehmen im WHJ seit den 1950er Jahren deutlich zu (Abbildung 14). Gegenüber dem Referenzzeitraum 1961–1990 traten sie 15 Jahre früher mit einer um ca. 10% geringeren Häufigkeit auf. Dieser Anstieg setzte sich in den vergangenen Jahren fort, so dass für 1981–2010 bereits wieder ein zusätzlicher Anstieg von ca. 7% registriert wurde. Der in den vergangenen 20 Jahren registrierte Anstieg ist damit bereits (geringfügig) höher als die im Mittel der Modelle bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erwartete Zunahme. Vor diesem Hintergrund ist es fraglich, ob die den Modellläufen inhärenten kontinuierlichen Anstiege noch von praktischer Relevanz sind, oder ob der erwartete Anstieg bereits vorweggenommen wurde. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Ergebnissen von Osborn (2004) für den winterlichen NAO-Index (Abbildung 15). Im Vergleich verschiedener Modelle ist ebenfalls ersichtlich, dass mit der deutlichen Zunahme der positiven Phase der NAO bereits ein höherer Wert des NAO-Index als von den meisten Modellen für das Ende dieses Jahrhunderts projiziert erreicht wurde. Wie sich die Häufigkeit zonaler Westwetterlagen im 21. Jahrhundert im WHJ weiterentwickelt kann daher anhand der gegenwärtigen Erkenntnisse nicht beantwortet werden.

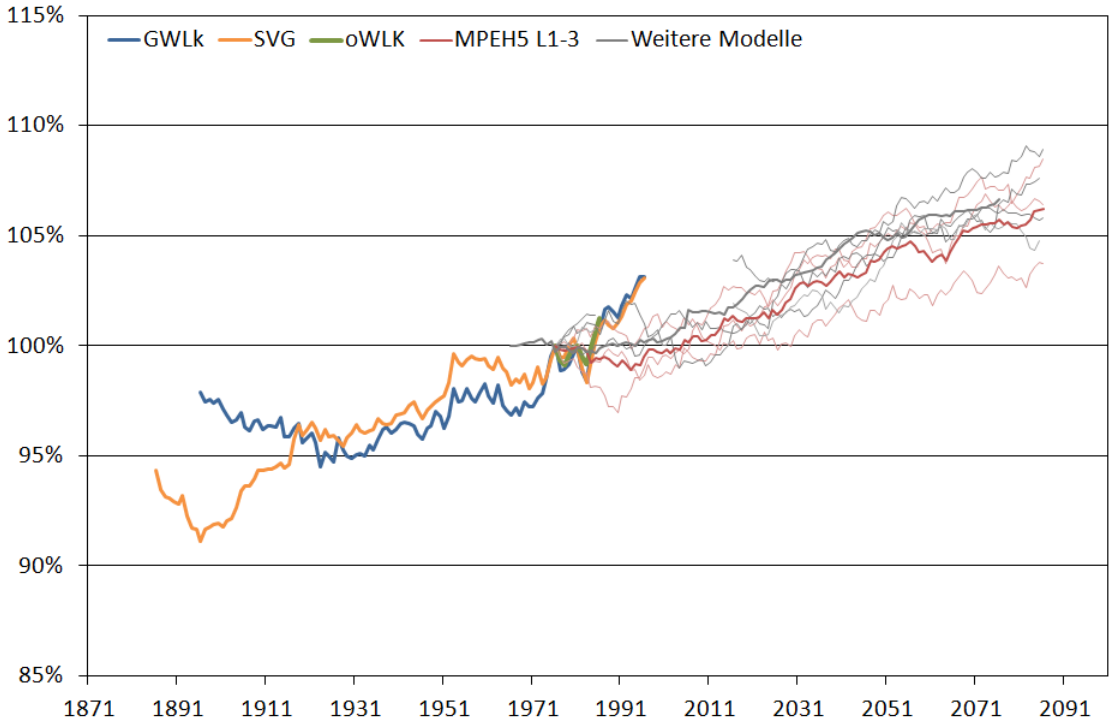


Abbildung 13: 31-jährig gemittelte Häufigkeiten von W+ für 1) Beobachtungs- und 2) Projektionsdaten: zu 1) zählen die Zeitreihen von SVG (1871–2010), GWLk (1881–2010) und oWLK (1961–2000), zu 2) zählen die Modelldaten (Szenario A1B) unterschiedlicher Globalmodelle: dünne Linien zeigen Verlauf und Variabilität der enthaltenen Modellläufe für rot: 3 Läufe von MPEH5 und grau: weitere Modelle, dicke Linien die jeweiligen Mittelwert der Modellläufe; alle Angaben relativ zum Bezugszeitraum 1961–1990

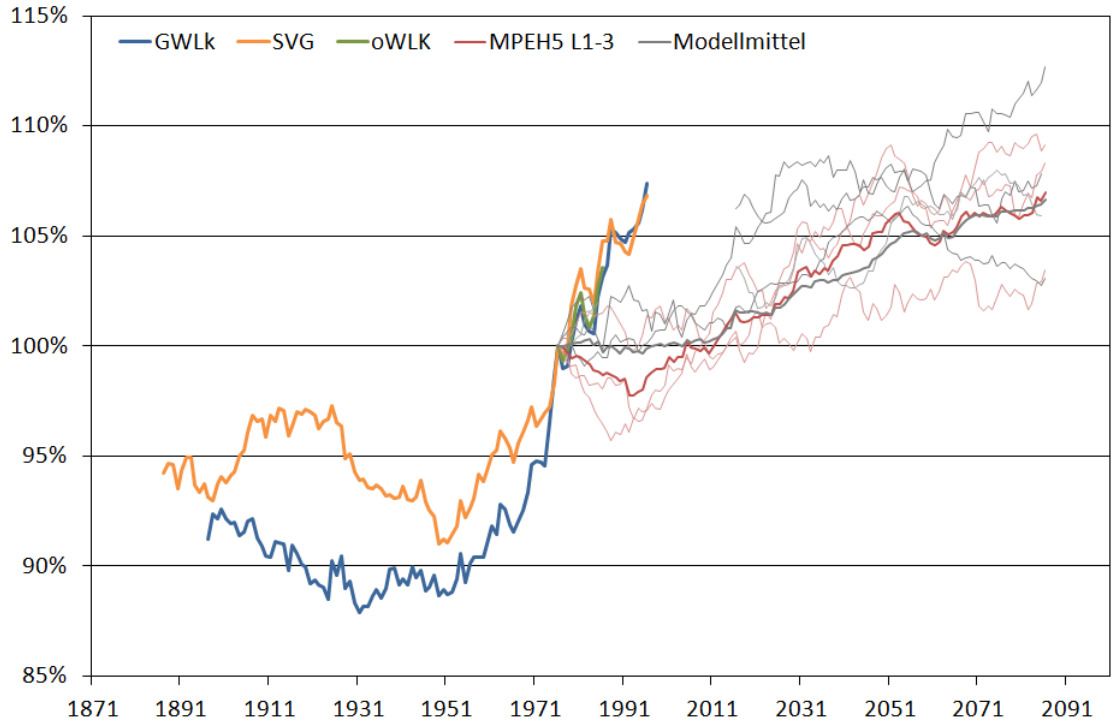


Abbildung 14: analog Abbildung 13, jedoch für das WHJ

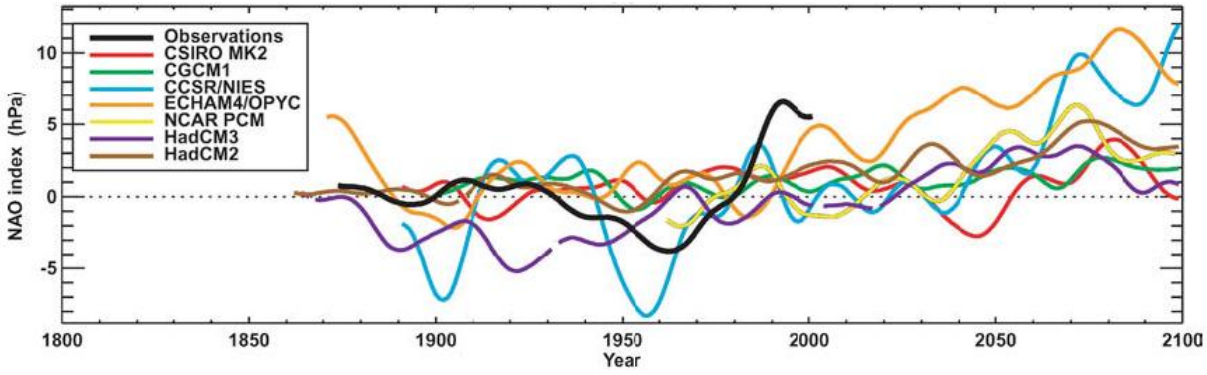


Abbildung 15: Zeitreihe des NAO-Index (räumlich flexibler, *„pattern-based"* Ansatz; 30-jähriges Gleitmittel) im Vergleich der Beobachtungswerte (schwarze Linie; 1873–2001) und verschiedener Modellläufe (bunte Linien; verschiedene Zeiträume); Osborn (2004)

Der von den Modellen für das WHJ (im Projektionszeitraum) projizierte Anstiegstrend ist im SHJ ebenfalls sichtbar (Abbildung 16). Die Beobachtungswerte sind erneut durch eine deutlich höhere Variabilität gekennzeichnet. Die Entwicklung von SVG und GWLk unterscheiden sich bis in die 1940er Jahre stark voneinander. Ab den 1950er Jahren ist ein deutlicher Rückgang der W+ zu beobachten, der erst in den vergangenen 10 Jahren durch eine leichte Erholung der Häufigkeit der W+ abgelöst wurde. Die für das Ende des Jahrhunderts projizierten Häufigkeiten der W+ entsprechen im Mittel denen der späten 1940er Jahre. Es ist zu bedenken, dass eine Verstärkung der per se maritimen W+ erwartete Klimafolgen wie verstärkte Dürre und deutlich ansteigende Temperaturen u.U. abschwächen könnte, zumal laut Abschnitt 3.4 vor allem die in Sachsen überdurchschnittlich feuchten NW-Lagen zunehmen. Entweder passen die zukünftige Entwicklung der ASR und die Projektionen zukünftiger Veränderungen im Niederschlagsregime der RMR nicht zusammen, oder die oWLK ist für die gezeigten Auswertungen ungeeignet.

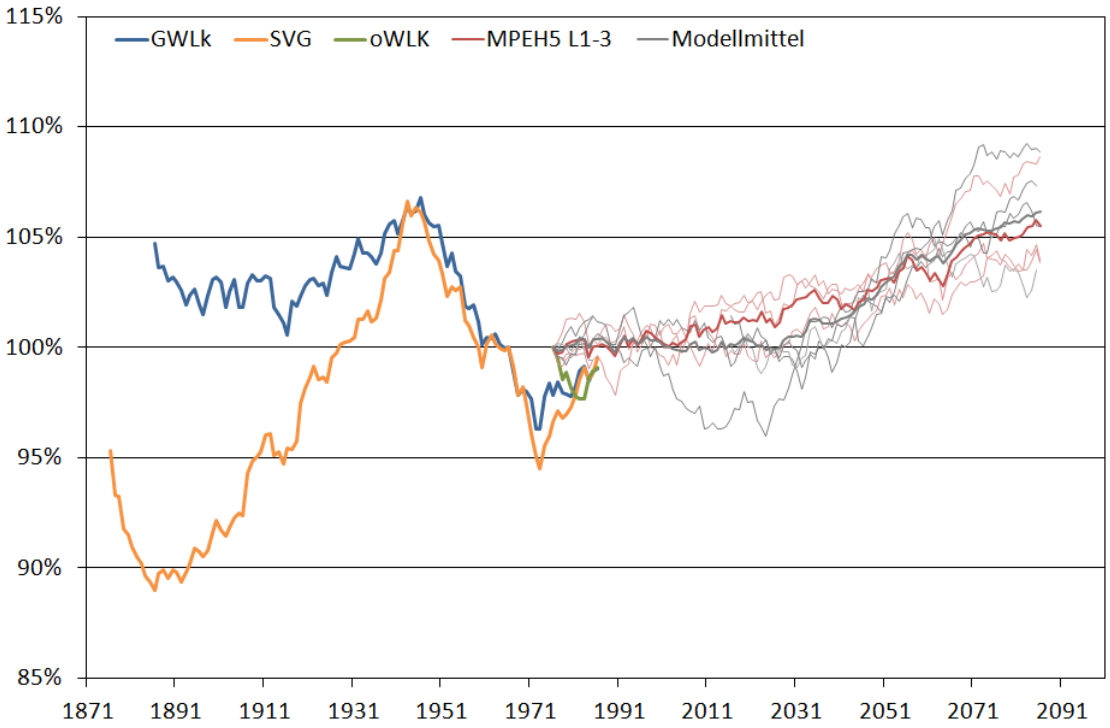


Abbildung 16: analog Abbildung 13, jedoch für das SHJ

4. Trockenheit und Nassphasen

4.1 Einleitung

Trockenheit kann je nach Zeitskala und Anwendungsgebiet durch verschiedenste Indikatoren beschrieben werden. Dabei können einige Trockenheitsindikatoren auch für die Beschreibung nasser Zustände verwendet werden. Um ein kompletteres Bild zu den projizierten Veränderungen in der Niederschlagsverteilung zu erlangen, werden in diesem Bericht nicht nur die trockenen Zustände betrachtet, sondern auch die auf Zeitskalen ab einem Monat markant zu nassen Verhältnisse. Starkniederschläge auf der Grundlage von Tagesniederschlagshöhen oder zeitlich noch höher aufgelöster Datengrundlage werden hier nicht thematisiert. Eine Zusammenstellung zu den erwarteten Veränderungen in der Häufigkeit und Intensität extrem hoher Niederschlagsereignisse ist im REGKLAM-Heft 2 „Klimaprojektionen für die REGKLAM-Modellregion Dresden" (Bernhofer et al. 2011) im Kapitel 3.7 „Extremwertbetrachtungen" zu finden. Dort sind auch grundlegende Ergebnisse zu Veränderungen bei den Trockentagen und meteorologischen Trockenperioden anhand dreier Beispielstationen für die beiden Halbjahre dargelegt. Diese drei Stationen repräsentieren das Tiefland (Doberlug-Kirchhain), das Hügelland (Dresden-Klotzsche) und das Bergland (Zinnwald-Georgenfeld). In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse für einzelne Jahreszeiten räumlich aggregiert als mittlere Signale für die REGKLAM-Modellregion dargestellt. Des Weiteren zeigen Kartendarstellungen die Grenzen der Interpretierbarkeit räumlicher Unterschiede in den Trends regionaler Klimamodellläufe auf. Somit ergänzen die nachfolgenden Betrachtungen die im REGKLAM-Heft 2 (Bernhofer et al. 2011) dargelegten Aussagen.

Die Analysen werden für ein Ensemble aus 53 regionalen Klimaprojektionen erstellt. Dabei werden die Simulationsergebnisse von fünf regionalen Klimamodellen (zwei physikalisch-dynamische: CLM und REMO sowie drei statistisch-dynamische Modelle: WEREX IV, WETTREG 2006 und 2010) für drei SRES-Emissionsszenarios (A1B, A2, B1) verwendet. Nicht jedes Modell wurde für alle Szenarios gerechnet bzw. es liegen uns nicht alle vorhandenen Rechnungen vor. Einige Modelle sind für ein Szenario mehrfach gelaufen (Realisierungen). Alle Modelle beruhen auf dem vom Max-Planck Institut für Meteorologie in Hamburg betriebenen Globalmodell ECHAM5/MPI-OM T63L31 (Roeckner et al., 2003, 2006). Für genauere Informationen zu den Modellen, Szenarien, der grundsätzlichen methodischen Herangehensweise und dem Umgang mit Unsicherheiten siehe das REGKLAM-Heft 2 (Bernhofer et al. 2011).

Im Abschnitt 4.2 werden die diesem Bericht zugrunde liegende Datengrundlage und einige damit zusammenhängende methodische Vorgehensweisen dargestellt. Abschnitt 4.3 widmet sich den hinsichtlich der zukünftigen Entwicklung trockener Tage erzielten Ergebnissen. Inwieweit sich Veränderungen in der Zahl von Trockentagen auf die Persistenz trockener Zustände auswirken – sprich sich Andauer und/oder Häufigkeit von Trockenperioden ändern – wird in Abschnitt 4.4 untersucht. Während diese Analysen auf Tagesniederschlagsdaten beruhen, stellt Abschnitt 4.5 die projizierten Veränderungen für auf Monatsdaten basierenden Niederschlagsanomalien dar. Dazu werden der Rainfall Anomaly Index (RAI) und der Standardized Precipitation Index (SPI) verwendet und hinsichtlich ihrer Ergebnisse verglichen. Veränderungen in langandauernden (mehrere Monate bis mehrere Jahre) Trocken- und Nassphasen werden mittels des Dezil-Indikators in Abschnitt 4.6 betrachtet. Abschnitt 4.7 führt die Ergebnisse der vorhergehenden Abschnitte zusammen und bewertet die für das 21. Jahrhundert anhand der Klimaprojektionen zu erwartenden Veränderungen.

4.2 Datengrundlage und Methoden

4.2.1 Regionale Klimaprojektionen

Soweit in den nachfolgenden Kapiteln nicht anders beschrieben, wurden die Analysen zur zukünftigen Entwicklung von Trocken- und Nassphasen anhand der Simulationen von fünf regionalen Klimamodellen durchgeführt. Grundsätzlich sind zwei Modellklassen zu unterscheiden: 1) die physikalisch basierten dynamischen Downscalingverfahren (REMO und CLM) sowie 2) die statistisch basierten Downscalingverfahren (WEREX IV, WETTREG 2006 und 2010). Dabei liegen die Daten der dynamischen Modelle als Flächendaten (Raster in unterschiedlicher räumlicher Auflösung) und die der statistischen Modelle als Punktdaten (Stationen entsprechend der Beobachtungsdaten) vor.

Die Lage der innerhalb der REGKLAM-Modellregion liegenden Stationen – nachfolgend Datenpunkt genannt – bzw. Modell-Gitterpunkte (als Mittelpunkt der Rasterzelle) ist in Abbildung 17 für vier Regionalmodelle dargestellt. Für WETTREG 2010 ist die Darstellung ähnlich der von WEREX IV; jedoch kommen eine Reihe von Datenpunkten hinzu und einige wenige fallen weg. In diesem Bericht werden die Ergebnisse der Regionalmodelle stets durch die gleichen Farben symbolisiert, um eine einfache Zuordnung der jeweiligen Ergebnisse zu erleichtern. REMO wird orange, CLM blau, WEREX IV rot, WETTREG 2006 grün und WETTREG 2010 violett dargestellt.

Durch die unterschiedliche räumliche Auflösung der Modelle wird die Topographie des Untersuchungsgebietes unterschiedlich gut wiedergegeben. Dies wird in Abbildung 17 durch die Darstellung von vier Höhenstufen verdeutlicht. Probleme hinsichtlich einer Unterschätzung der Höhenlage treten insbesondere im Süden der Modellregion im Erzgebirge auf. Besonders kritisch ist die Wiedergabe der Höheninformation in den Modellen CLM (Gitterauflösung ca. 18 km) und WETTREG 2006 (weniger Datenpunkte als WEREX IV). Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse für die einzelnen Höhenstufen zu berücksichtigen

Auswertungen für die Modellregion beziehen sich auf die innerhalb der RMR liegenden Datenpunkte bzw. jene Gitterzellen, die Anteil an der RMR haben. Für einige Auswertungen wurden zusätzlich Daten im Umland der Modellregion einbezogen (erweiterte REGKLAM-Modellregion), wobei insbesondere die Höhenstufenabhängigkeit der Ergebnisse im Vordergrund stand. Die Analyse der verschiedenen Trockenheitsindices erfolgte dabei für jeden Gitterpunkt bzw. jeden Datenpunkt einzeln; anschließend wurden die erhaltenen Änderungssignale über die Region gemittelt. Eine Berechnung der Indices für den regional gemittelten Niederschlag erscheint wenig sinnvoll, da durch diese räumliche Mittelung die Niederschlagsverteilung stark geglättet und eine realistische Erfassung der Niederschlagsextreme somit unmöglich wird. Dieser Bericht fokussiert nicht auf die mittleren Niederschlagsveränderungen (siehe dazu Bernhofer et al. 2011), sondern auf die Veränderungen in den seltenen Ereignissen besonders hoher bzw. langanhaltend geringer Niederschläge.

Der regional gemittelte Trend wurde für die stationsbasierten Modelle vereinfachend über die Mittelung aller Datenpunkte innerhalb der Modellregion berechnet. Vergleichende Analysen der aus den gerasterten Beobachtungsdaten (RaKliDa) ermittelten Niederschlagssummen mit den aus den betrachteten Stationen ermittelten, zeigen gute Übereinstimmungen in Höhe und Trends. Beim Vergleich der Simulationen der dynamisch-physikalischen Modelle mit denen der statistischen ist immer deren unterschiedliche Skaligkeit mitzudenken. REMO und CLM liefern Niederschlagswerte für eine Fläche (ca. 100–300 km²), während WEREX und WETTREG – so wie die Beobachtungsdaten – Punktniederschläge simulieren. Damit ist automatisch eine unterschiedliche Größe der Ereignisse verbunden, auch die zeitliche und räumliche Variabilität des Niederschlags ist beeinflusst. Bei der Validierung der physikalischen Modelle festgestellte Abweichungen zu den stationsbasierten Beobachtungsdaten sind demnach nicht über zu interpretieren. Die Interpolation der Beobachtungsdaten sowie der Simulationsergebnisse der statistischen Modelle und die Umprojektion aller Datensätze auf das gleiche Raster würde einen exakteren Vergleich der verschiedenen Modelle ermöglichen, jedoch geht dieses Vorgehen mit einer Reihe von mit den Interpolationsmethoden verbundenen Fehlern einher. Daher wird im Rahmen dieser Untersuchung darauf verzichtet. Abweichungen der Modelldaten von den Beobachtungen werden unter dem geschilderten Vorbehalt dokumentiert und die Änderungssignale der Zukunftszeitscheiben werden nicht als absolute Signale, sondern als relative Signale zur jeweiligen Modellreferenz (1961–1990) dargestellt.

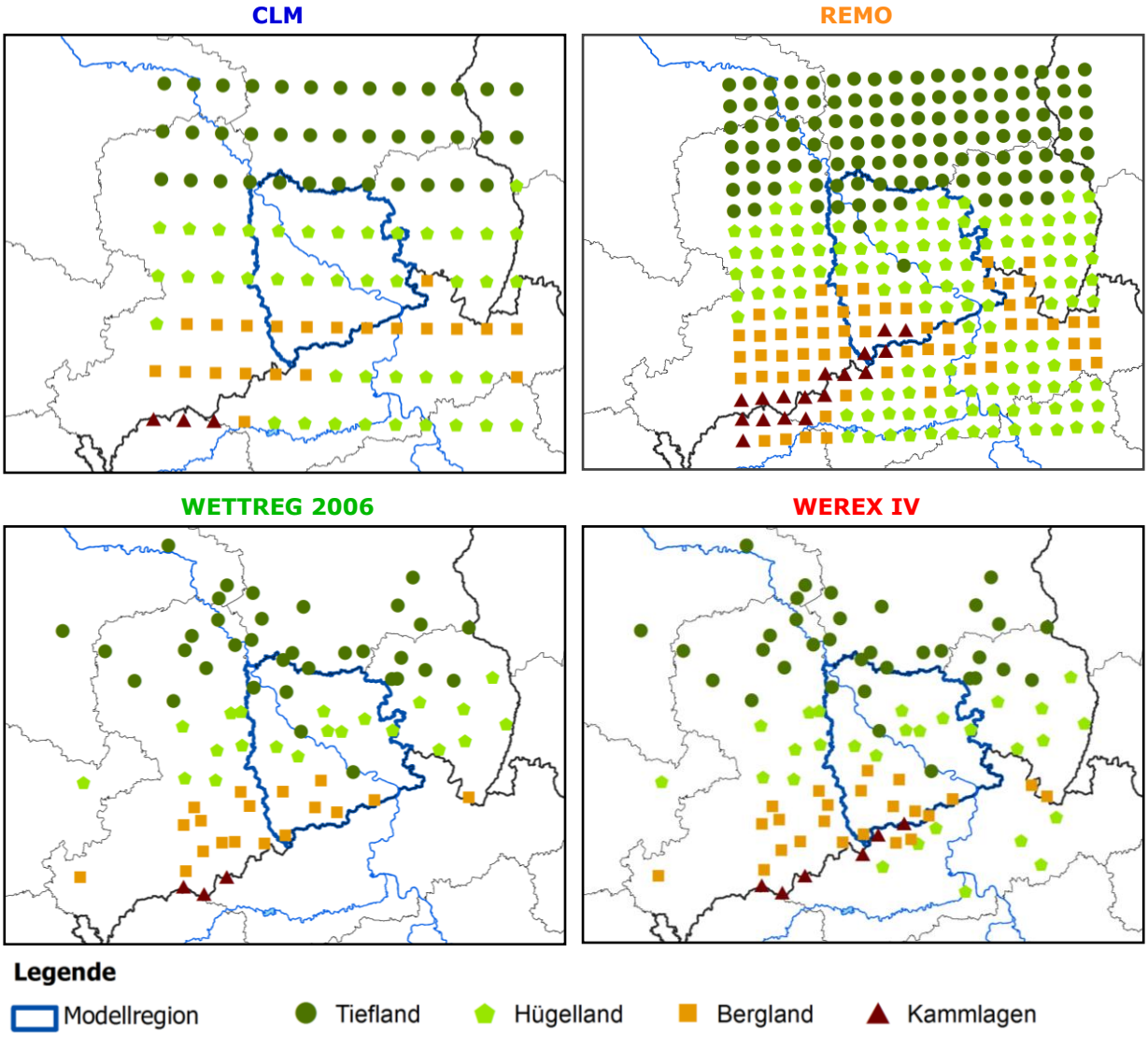


Abbildung 17: Höheninformation (Tiefland: ≤ 150 m, Hügelland: >150 m … ≤ 350 m, Bergland: >350 m … ≤ 650 m, Kammlagen: > 650 m) der verwendeten Datenpunkten bzw. Rasterzellen (dargestellt als Gitterpunkt) für die erweiterte REGKLAM-Modellregion

4.2.2 Korrektur von Niederschlagsfehlern in Beobachtungen und Modellen

Gemessene Niederschlagshöhen sind durch systematische Windfehler sowie Benetzungs- und Verdunstungsverluste des Niederschlagsmessers immer etwas geringer als die tatsächlichen Niederschlagshöhen, wie sie auch von einem physikalischen Klimamodell simuliert werden. Eine Korrektur der gemessenen und der mit den statistischen Modellen simulierten Niederschlagshöhen wurde jedoch für die vorliegenden Analysen nicht vorgenommen. Damit werden die tatsächlichen Niederschlagshöhen leicht unterschätzt (im jährlichen Mittel in unserer Region um ca. 10%). Hier steht jedoch nicht die Gesamtniederschlagsbilanz im Fokus, sondern Veränderungen bei den Minima. Für diese geringen Niederschläge hat das Korrekturverfahren nach Richter (1995) bzw. dessen Weiterentwicklung durch Erbe (2002) kaum Auswirkungen auf die tatsächliche Niederschlagshöhe. Zudem würde das Korrekturverfahren eine weitere Quelle von Unsicherheit und potentiellen Fehlern in die Analysen hineinbringen. Eine Vergleichbarkeit der beobachteten und statistisch simulierten Niederschläge mit den Flächendaten der physikalischen Regionalmodelle wäre immer noch nicht gegeben. Dieses Vorgehen ist konsistent zu den bisher in den beiden REGKLAM-Heften (Bernhofer et al. 2009, 2011) dargestellten Analysen zu Veränderungen in den Trockenphasen.

Die Überschätzung der tatsächlichen Niederschläge durch die physikalisch-dynamischen Modelle wurde korrigiert, da ansonsten die hier interessierenden Trockenheitsereignisse nicht wiedergege-

ben werden können. Aufgrund der im Vergleich zu den relevanten atmosphärischen Prozessen der Niederschlagsbildung recht groben Auflösung der Modelle, können diese die relevanten Prozesse nicht physikalisch begründet simulieren. Stattdessen werden Parametrisierungen verwendet, die den Niederschlag aus anderen Größen ableiten. Dabei kommt es zu systematischen Abweichungen (Bias) zwischen Beobachtung und Simulation. Mittels Biaskorrekturverfahren versucht man diese Abweichungen statistisch zu korrigieren, wobei unter Umständen neue systematische Fehler in die Datenreihen hineingebracht werden. Bernhofer et al. (2011) beschreibt unter 2.4 „Verwendete Daten und Methoden" die für CLM und REMO innerhalb von REGKLAM verwendeten Biaskorrekturverfahren. Für den vorliegenden Bericht wurden ausschließlich diese korrigierten Niederschläge ausgewertet, wobei nicht auszuschließen ist, dass durch diese Verfahren weitere systematische Fehler in die Datenreihen hineingebracht wurden. Dies ist z.B. bei einem nichtstationären Verhalten des Modellbias zu befürchten.

4.2.3 Verwendete Realisierungen der statistischen Modelle

Für die statistischen Modelle liegen jeweils zehn Simulationen vor. Aus diesen wurden für WEREX IV und WETTREG 2006 drei Klimaverläufe isoliert – ein mittlerer (normal), ein niederschlagsarmer (trocken) und ein nasser (feucht) Verlauf (Spekat et al. 2007). Innerhalb von REGKLAM werden im Normalfall nur diese drei anstelle aller zehn Läufe verwendet. Dieses Vorgehen der Erzeugung einer „künstlichen" Reihe aus den jeweils trockensten bzw. nassesten Dekaden aller zehn Realisierungen führt zu – im Hinblick auf Wasserbilanzen – unrealistisch trockenen bzw. nassen Gegebenheiten. Kritisch ist auch die Benennung „trocken" und „feucht", welche das Vorliegen von besonders starken Trends in Richtung Trockenheit bzw. Niederschlagszunahme nahelegt. Da jedoch auch während des Validierungszeitraumes die jeweils trockensten bzw. nassesten Dekaden der zehn Realisierungen selektiert wurden, sind schon die Ausgangsbedingungen – denen gegenüber die Veränderungen im 21. Jahrhundert dargestellt werden – verzerrt. Es gibt nicht eine, sondern drei sich deutlich unterscheidende Referenzreihen des Niederschlags. So liegt z.B. im Zeitraum 1961–2000 die von WEREX IV simulierte mittlere Jahresniederschlagssumme (unkorrigierter Niederschlag gemittelt aus Datenpunkten!) im „trockenen" Lauf bei ca. 645 mm, im „normalen" bei ca. 690 mm und im „feuchten bei ca. 720 mm. Der „trockene" Lauf startet also schon bei trockeneren Bedingungen, als die anderen Läufe und der „feuchte" bei nasseren. Daher kann es vorkommen, dass der „feuchte" Lauf aufgrund seines höheren Ausgangsniveaus den größten Trockenheitstrend aufweist. Die Ergebnisse dieser drei synthetischen Reihen sind demnach mit Vorsicht zu interpretieren.

Bei der Synthese der drei Realisierungen „normal", „trocken" und „feucht" ist es durch eine spätere Überarbeitung einiger Datenreihen durch den Ersteller des Modells (CEC Potsdam) zu Inkonsistenzen in der Auswahl der trockensten, mittleren und nassesten Dekade aus den zehn Realisierungen gekommen. Für einige Datenpunkte (Görlitz, Fichtelberg, Tharandt-Grillenburg und Zinnwald-Georgenfeld) unterscheiden sich die Klimazeitreihen deutlich von denen anderer Datenpunkte – sie stammen anscheinend aus einer anderen Modellrealisierung. Während die klimatischen Mittelwerte aller simulierten Datenreihen keine Auffälligkeiten zeigen, scheint der simulierte Wetterverlauf an vier Datenpunkten anders zu verlaufen als bei den restlichen. Abbildung 18 zeigt dies für die vier betroffenen und fünf weitere Vergleichsdatenpunkte am Beispiel des Niederschlags im Januar 1961. Während fast alle simulierten Datenreihen innerhalb des erweiterten Modellgebietes zur Monatsmitte hohe Niederschläge von mehr als 10 mm und z.T. sogar mehr als 20 mm aufweisen, ist dies für vier Datenpunkte nicht der Fall. Über den gesamten Januar 1961 gemittelt, wurden von WEREX IV für die betrachteten Datenpunkte im Osterzgebirge (Lauenstein, Altenberg-Kipsdorf, Cesky-Jiretin-Flaje und Neuhausen) Niederschläge von z.T. deutlich über 100 mm simuliert, während die Datenreihe Zinnwald-Georgenfeld eine deutlich geringere Niederschlagssumme von unter 30 mm aufweist. Auch der Datenpunkt Fichtelberg bleibt mit reichlich 30 mm deutlich hinter dem regionalen Mittel zurück. Stattdessen verhalten sich diese beiden Datenreihen ähnlich wie die der viel weiter entfernten Tharandt-Grillenburg und Görlitz repräsentierenden Datenpunkte.

Die Ähnlichkeit in den Niederschlagssummen wird mittels von Korrelationsanalysen verdeutlicht. Abbildung 19 illustriert die Größe der Pearson-Korrelationskoeffizienten aller möglichen Paare an Datenpunkten innerhalb des Modells WEREX IV „normal" unter dem Szenario A1B. Die Korrelatio-

nen wurden getrennt für das Sommer- und das Winterhalbjahr für die ermittelten Niederschlagsanomalien (RAI-Werte) berechnet. Neben den zu erwartenden Unterschieden in der Größe der Korrelationen für das Sommer- und das Winterhalbjahr – die geringeren Korrelationen des Sommerhalbjahres sind durch die mit den höheren Temperaturen verbundene größere Atmosphärendynamik zu erklären – wird deutlich, dass die Görlitz, Fichtelberg, Tharandt-Grillenburg und Zinnwald-Georgenfeld repräsentierenden Simulationen sich selbst auf der zeitlich aggregierten Ebene von Halbjahren deutlich von den anderen Datenpunkten unterscheiden (sämtliche Korrelationen < 0.3), während sie untereinander ähnlich sind. Aggregiert man die Daten noch stärker z.B. über die 40 Jahre des Validierungszeitraums 1961–2000, so verblassen diese Unterschiede. Die Daten des Regionalmodels WEREX IV können also nicht für Analysen verwendet werden, denen tägliche oder monatliche Felder (interpolierter) Daten zugrunde liegen. So erscheint z.B. die Untersuchung der Veränderung in der räumlichen Variabilität der Niederschläge, wenig sinnvoll, da etwaige zeitliche Veränderungen durch die starken Unterschiede zwischen den inkonsistent abgeleiteten Datenreihen überdeckt werden. Das in diesem Bericht angewandte Verfahren, erst die Trends für jede Datenreihe einzeln zu untersuchen und am Ende die gefundenen Veränderungen zu mitteln, ist gegenüber den geschilderten Inkonsistenzen wenig anfällig. Die Daten von WEREX IV werden also trotz der geschilderten Probleme mit in die Analysen einbezogen.

Da auch für WETTREG 2006 – nach der gleichen Methodik wie für WEREX IV bereits geschildert – die drei Realisierungen „normal", „trocken" und „feucht" abgeleitet wurden, sind ähnliche Probleme bei der Synthese der Reihen nicht auszuschließen. Analoge Untersuchungen zu den für WEREX IV dargestellten, zeigten keine Auffälligkeiten. Dennoch ist es sicherer diese Daten nicht für Analysen zu verwenden, die räumlich konsistente Felder voraussetzen.

Für WETTREG 2010 wurde die Synthese eines mittleren und zweier extremer Läufe aus den zehn Simulationen nicht vorgenommen. Stattdessen werden alle zehn Läufe ausgewertet. Bei Bedarf kann dann das mittlere Änderungssignal sowie die Variabilität aus allen Läufen ausgewertet werden. Für die nachfolgenden Impaktmodellierungen ist es nicht in jedem Fall möglich alle Realisierungen zu rechnen. Dann können einzelne Läufe anhand ihrer Dekadencharakteristik ausgewählt werden – genaueres dazu ist im von Majana Heidenreich erstellten Informationsblatt vom 26.10.2012 nachzulesen. So ist der Lauf 99 unter dem Szenario A1B (über alle in der REGKLAM-Datenbank vorliegenden Datenreihen gemittelt) im Vergleich zu anderen Realisierungen durch geringe Niederschläge im Winterhalbjahr und hohe Niederschläge im Sommerhalbjahr gekennzeichnet. Über das gesamte Jahr betrachtet erscheint Lauf 44 am trockensten.

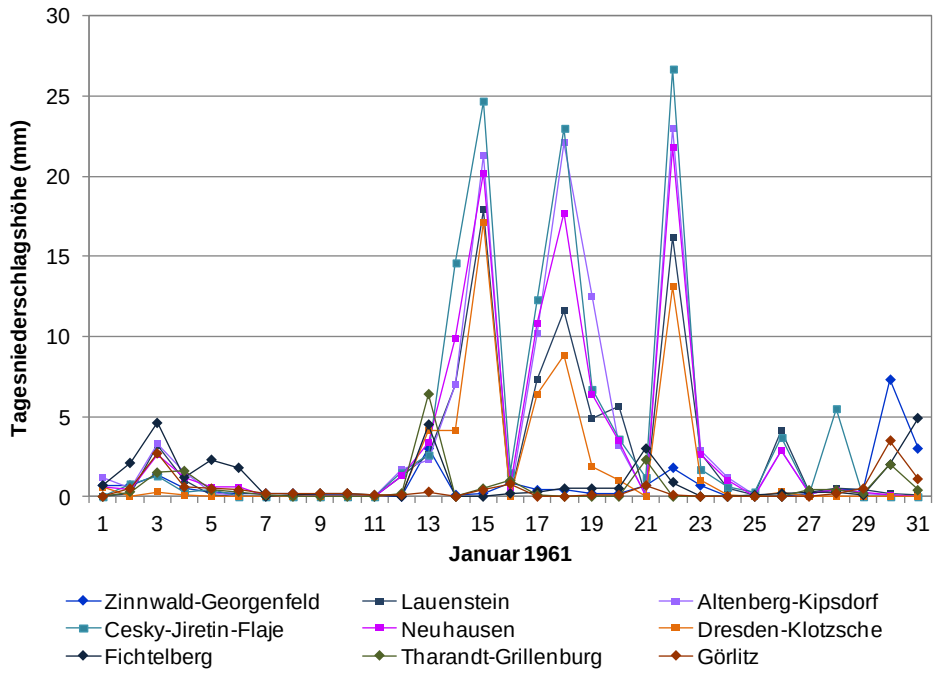


Abbildung 18: Verlauf der Tagesniederschlagshöhen [mm] an neun ausgewählten Datenpunkten im Januar 1961 in der Modellrealisierung WEREX IV A1B „normal"

Abbildung 19: Matrix der Pearson-Korrelationskoeffizienten für die RAI-Halbjahreswerte (WHJ: oberhalb der Diagonalen, SHJ: unterhalb der Diagonalen) aller WEREX IV Datenpunktpaare der Realisierung „trocken" unter Szenario A1B für 1961–2100; die Grautöne symbolisieren die Größe des Korrelationskoeffizienten (schwarz: r=±1; dunkelgrau: r>0,7 / r<-0,7; mittelgrau: r>0,5 / r<-0,5; hellgrau: r>0,3 / r<-0,3; weiß: r<0,3 / r>-0,3)

Bei Analysen von WETTREG 2010-Daten unter den Szenarios B1 und A2 ist zu beachten, dass einige Datenpunkte ab 2001 – also für den Projektionszeitraum – keine Daten aufweisen. Dies betrifft beim Niederschlag die Datenpunkte Bahnsdorf, Gollmitz, Hartha-Fördergersdorf (RMR), Klettwitz, Löhsten, Sebnitz (RMR), Sonnewalde und Tettau. Es erscheint unplausibel, dass die Daten eines statistischen Modelles nur für den Kontrollzeitraum und nicht für den Projektionszeitraum vorliegen. Es sind Probleme bei der Erstellung der Modelldaten, beim Abspeichern oder beim Datentransfer zu vermuten. Um Verzerrungen zu vermeiden, die aus einem unterschiedlichen Datenkollektiv in Projektions- und Referenzzeitraum herrühren könnten, wurden diese Datenpunkt nicht in die Analyse einbezogen.

4.2.4 „Einordnung" des Globalmodells ECHAM5

Alle regionalen Klimamodellrechnungen basieren auf dem ersten Lauf (in Einzelfällen auch dem zweiten Lauf) des globalen Zirkulationsmodells ECHAM5/MPI-OM T63L31. Damit ist die Abschätzung der natürlichen Klimavariabilität – repräsentiert durch unterschiedliche Läufe des gleichen Modells unter gleichen Randbedingungen – auf der Grundlage des Globalmodells nur eingeschränkt möglich. Verschiedene globale Klimamodelle geben zudem den räumlichen Verlauf der planetaren Frontalzone unterschiedlich wieder und simulieren damit auch unterschiedliche zeitliche Verschiebungen in deren Verlauf. Der Verlauf der Frontalzone – also die Ausprägung der Westwinddrift – ist wichtig für Betrachtungen des Niederschlags, da in den mittleren Breiten die Niederschläge weitgehend (v.a. im Winterhalbjahr) an Frontensysteme gebunden sind. Zur Einordnung des verwendeten Globalmodells ECHAM5 ist der Vergleich zum Output anderer Globalmodellen für „unsere Region" notwendig.

Für mittlere Verhältnisse der Temperatur und des Niederschlags wurden bereits von Feske et al. (2010) 20 Globalmodelle untersucht. Die Ergebnisse sind in dem Bericht des TP 2.1c „Klimaprojektionen für REGKLAM – Leitfaden und nutzerorientierter Ergebniskatalog für die Verwendung und Interpretation von Klimaprojektionsdaten" nachzulesen.

Die Abbildung 20 zeigt eine Illustration aus diesem Bericht, welche die Temperatur- und Niederschlagstrends von 20 Globalmodellen in den Zeitscheiben 2021–2050 und 2171–2100 gegenüberstellt. In dieser Abbildung wurde zusätzlich das für die REGKLAM-Regionalisierungen verwendete Modell ECHAM5 hervorgehoben. Es ist zu erkennen, dass ECHAM5 hinsichtlich der Temperaturtrends im 21. Jahrhundert im Mittelfeld der Globalmodelle liegt, während die simulierten Niederschläge etwas stärker zurückgehen, als bei den meisten anderen Modellen (insbesondere im Sommer). Derzeit werden noch detailliertere Analysen der durch die Globalmodelle projizierten Niederschlagsveränderungen vorgenommen. Für neun Globalmodelle werden die täglichen simulierten Niederschläge hinsichtlich der Veränderungen verschiedener Starkniederschlags- und Trockenheitsindikatoren im 21. Jahrhundert ausgewertet. Die Ergebnisse werden in einem gesonderten Bericht (Mehler u. Hänsel 2013) im ersten Quartal des Jahres 2013 veröffentlicht werden.

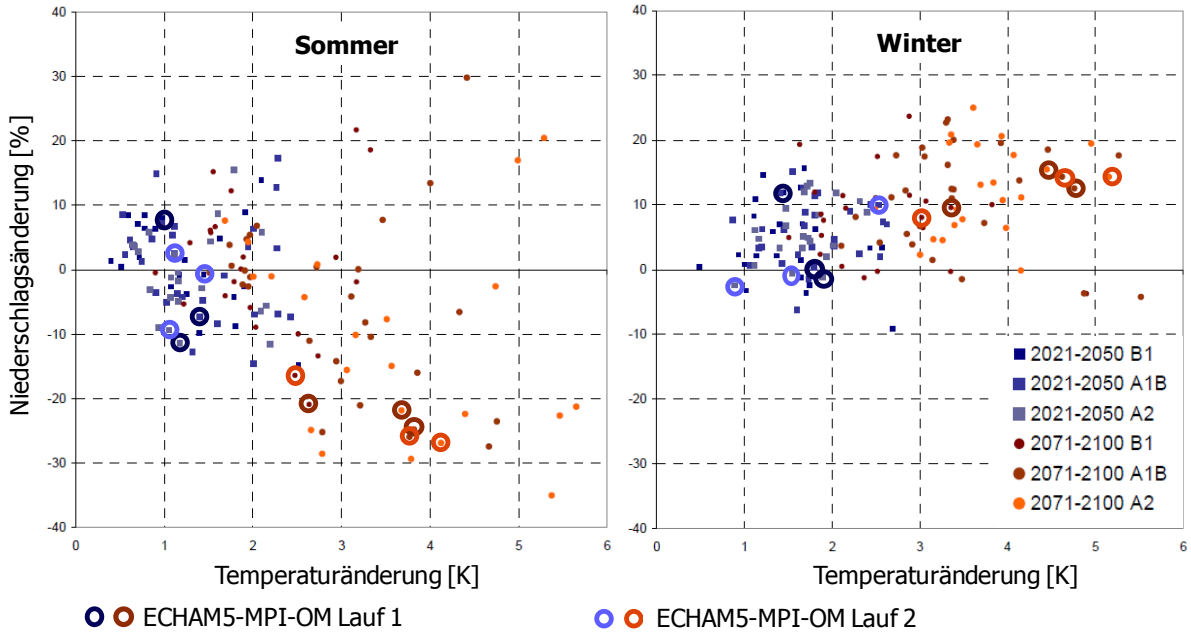


Abbildung 20: Änderungssignale der Temperatur [K] und des Niederschlags [%] für den Sommer (links) und den Winter (rechts) in den Zeitscheiben 2021–2050 (blaue Quadrate) und 2071–2100 (orange Punkte) von 20 Globalmodellen für drei SRES-Szenarien (B1: dunkle, A1B: mittlere und A2: helle Farbschattierung; die dem Modell ECHAM5 entsprechenden Punkte wurden hervorgehoben. (verändert nach Feske et al. 2010).

Die Modelle wurden unter der Annahme verschiedener SRES-Emissionsszenarios (A1B, B1, A2) gerechnet. Dabei liegen Rechnungen unter dem Szenario A1B für alle Regionalmodelle vor, während Modellläufe unter Annahme des Szenarios A2 auf regionaler Ebene derzeit nur für die statistischen Modelle vorliegen. Weitergehende Informationen, zu den verwendeten Modellen, den Emissionsszenarios, dem Umgang mit Unsicherheiten in Klimaprojektionen sowie den verwendeten Daten und Methoden, sind im Kapitel 2 des REGKLAM-Heftes 2 (Bernhofer et al. 2011) nachzulesen.

Der Vergleich der Ergebnisse der verschiedenen Szenarios wird durch die unterschiedliche Zahl vorliegender Modelltypen und Realisierungen erschwert. Um einen realistischen Mittelwert für das jeweilige Szenario zu ermitteln, ist es wichtig zunächst die Realisierungen eines Modells zu mitteln und anschließend den Durchschnitt aller zur Verfügung stehenden Modelle zu berechnen. Ansonsten würden die Modelle, für welche viele Realisierungen betrachtet wurden – die statistischen Modelle im Allgemeinen und WETTREG 2010 im Besonderen – überrepräsentiert. Fallen für ein Szenario ganze Modelle bzw. Modellfamilien weg – für B1 liegen z.B. keine dynamischen Regionalisierungen mehr vor – bietet sich der Vergleich zu dem für das gleiche Modellkollektiv berechneten Mittelwert des Szenarios A1B an.

4.3 Niederschlagsanomalien

Veränderungen in der Niederschlagsverteilung kann man neben der Betrachtung von Niederschlagssummen auch über die Analyse von Niederschlagsanomalien darstellen. Dabei lassen sich die Niederschlagsanomalien-Indikatoren klassifizieren, so dass Veränderungen in verschiedenen Niederschlagsklassen von extrem trocken bis extrem feucht untersucht werden können. In diesem Bericht werden zwei Niederschlagsanomalien-Indikatoren verwendet und zwar der international häufig verwendete SPI (Standardized Precipitation Index) und der einfach zu berechnende, international jedoch bisher kaum verwendete RAI (Rainfall Anomaly Index). Beide Indikatoren nehmen eine Normierung der Niederschlagsverteilung vor, die beim SPI deutlich komplexer ausfällt als beim RAI. Die Methodik der Berechnung beider Indikatoren wurde im ZB2009 ausführlich beschrieben und wird daher hier nicht noch einmal dargestellt. In den folgenden Abschnitten werden die mittlere Veränderung des Niederschlags (4.3.1), die Verschiebungen in der Häufigkeitsverteilung (4.3.2) sowie die Veränderungen in der räumlichen Variabilität des Niederschlags (4.3.3) dargestellt und diskutiert. Dabei werden insbesondere die Ergebnisse für den RAI vorgestellt. Der SPI wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit analysiert. Die Ergebnisse sind in Hänig (2012) nachzulesen. Prinzipiell ähneln sich die Trends der beiden Indikatoren sehr stark vergleichend in die Analysen einbezogen. Eine Bewertung, inwieweit im Fall der umfangreichen Szenarienanalysen der einfacher zu implementierende Indikator RAI ausreichend robuste Ergebnisse gegenüber dem rechenaufwendigeren SPI liefert, erfolgt in Abschnitt 4.3.4. Aussagen für längere Zeitskalen (sechs, zwölf und 24 Monate) als die monatliche werden für den SPI in Abschnitt 4.3.5 beschrieben. Eine zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse im Vergleich zu den auf Tageswertbasis erzielten Ergebnissen folgt in Abschnitt 4.6.

4.3.1 Mittlere Niederschlagsentwicklung

Vergleich zwischen Beobachtungs- und Modelldaten für den Kontrollzeitraum 1961–2000

Da die Niederschlagsanomalien für den Kontrollzeitraum 1961–2000 standardisiert wurden, ist der Mittelwert der Niederschlagsanomalien für diesen Zeitraum für alle Modelle Null – also gleich dem Mittelwert für diesen Zeitraum. Eine Darstellung der Modellvalidierungsergebnisse erübrigt sich somit. Stattdessen werden bei der Darstellung der Ergebnisse der regionalen Klimaprojektionen die Beobachtungsdaten mit dargestellt, um einen Vergleich des generellen Verlaufs der Niederschlagsentwicklung zwischen Modellen und Beobachtung zu ermöglichen Durch die Verwendung des Konzeptes von Niederschlagsanomalien können auch Modelle mit unterschiedlichem Bias zu den Beobachtungsdaten miteinander verglichen werden.

Projizierte Klimaänderungssignale im 21. Jahrhundert

Veränderungen in den Niederschlagssummen wurden bereits im REGKLAM-Heft 2 (Bernhofer et al. 2011) für vier regionale Klimamodelle ausführlich dargestellt (CLM, REMO, WEREX IV und WETTREG 2006). In diesem Bericht werden zusätzlich die zehn Realisierungen von WETTREG 2010 in die Analysen einbezogen. Aufgrund der von Bernhofer et al. (2011) beschriebenen, unterschiedlichen Entwicklung des Niederschlags in den Halbjahren bzw. Jahreszeiten, konzentriert sich dieser Bericht auf die Darstellung jahreszeitlicher Ergebnisse. Die Jahrestrends sind zumeist über die verschiedenen regionalen Klimaprojektionen hinweg deutlich uneinheitlicher und können bei Bedarf aus den jahreszeitlichen Entwicklungen abgeleitet werden.

Abbildung 21 zeigt die über die REGKLAM-Modellregion gemittelten (Mittelwert der Daten- bzw. Gitterpunkte) jahreszeitlichen Niederschlagsanomalien (mittels des RAI) der Beobachtungsdaten und von 19 regionalen Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B. Die deutlichsten und über alle Projektionen hinweg einheitlichsten Entwicklungen sind für den Sommer sichtbar. Ab der Mitte des 21. Jahrhunderts liegen die gefilterten RAI-Werte (11-jähriges gleitendes Mittel) nahezu aller Modellrealisierungen permanent unterhalb der Nulllinie – also im Bereich trockener Bedingungen. Für das Frühjahr zeigt sich eine klare Zweiteilung der Ergebnisse in Bezug auf die Modellklassen: die beiden physikalischen Modelle (CLM und REMO) simulieren einen geringen Trend in Richtung nasserer Bedingungen, während die statistischen Modelle (WEREX und WETTREG) negative Trends aufweisen. Diese sind jedoch nicht so stark ausgeprägt wie für den Sommer.

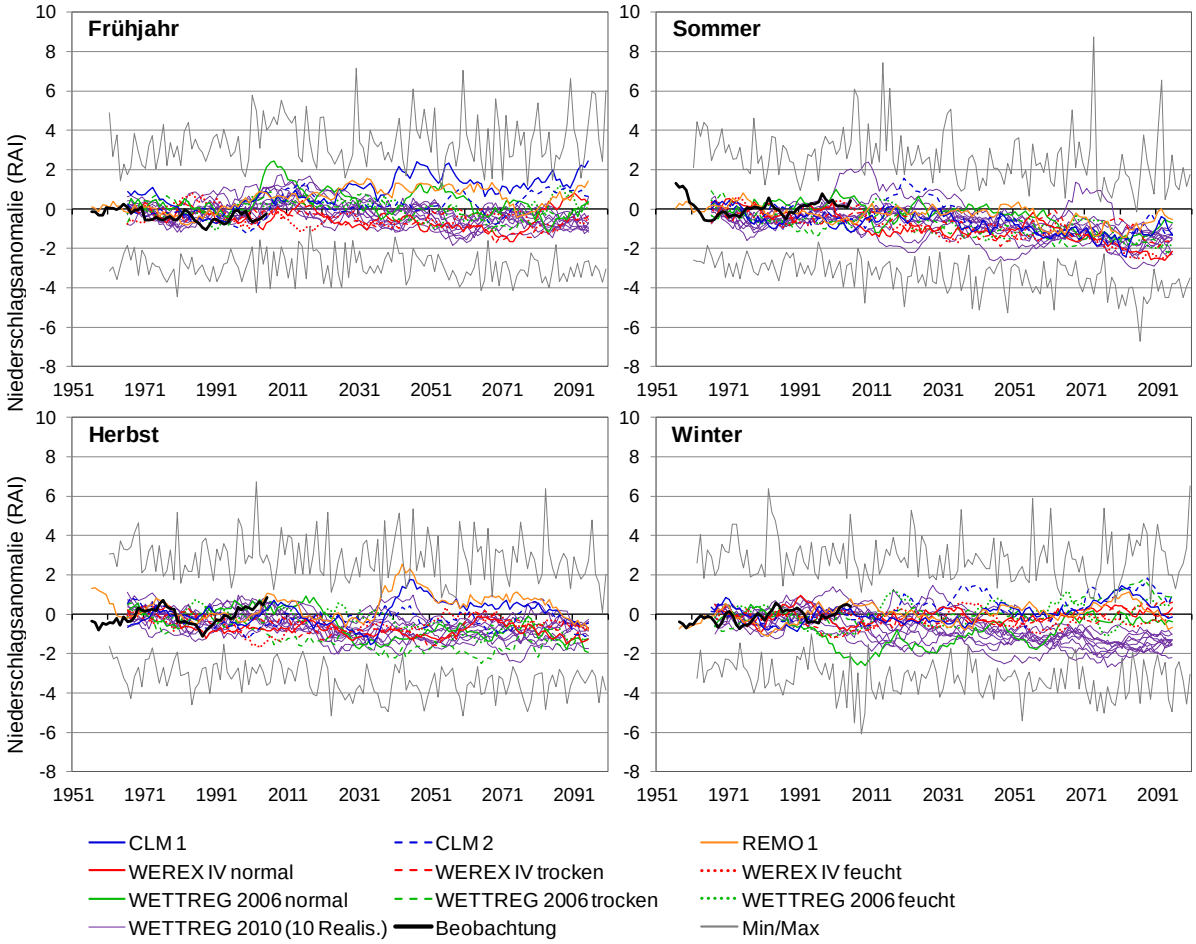


Abbildung 21: Verlauf (11-jähriges gleitendes Mittel) des mittleren RAI der REGKLAM-Modellregion (Mittel über die Daten- bzw. Gitterpunkte) in den vier Jahreszeiten für die Beobachtungen (1951–2010) und fünf regionale Klimamodelle (CLM, REMO, WEREX IV, WETTREG 2006 und 2010; 1961–2100) unter dem Szenario A1B

Die Ergebnisse für den Herbst sind ähnlich denen des Frühjahrs, jedoch ist der Trend zur Trockenheit in den meisten Modellen etwas stärker ausgeprägt als im Frühjahr. Die Ergebnisse für den Winter unterscheiden sich für das „neu hinzugekommene" Modell WETTREG 2010 deutlich von den anderen Projektionen. Während die meisten Modelle zum Ende des 21. Jahrhunderts hin leicht ansteigende bzw. nahezu gleichbleibende Niederschlagssummen projizieren, liegen die WETTREG 2010 Realisierungen deutlich im Bereich trockener Niederschlagsbedingungen. Dabei ist die Größe des durch WETTREG 2010 simulieren Niederschlagsrückgangs im Winter mindestens ebenso groß und teilweise sogar etwas größer als für den Sommer. Das hat starke Auswirkungen auf die Jahresniederschlagssummen und somit den Wasserhaushalt. Während die meisten Modelle geringe Veränderungen bzw. leichte Rückgänge des Jahresniederschlags simulieren, projiziert WETTREG 2010 einen dramatischen Rückgang im Wasserdargebot.

Abbildung 22 stellt die mittleren Entwicklungen für die drei Emissionsszenarios A1B, B1 und A2 gegenüber. Zu beachten ist dabei die unterschiedliche Zahl an Klimaprojektionen, die pro Modell vorliegen und die letztendlich in die jeweiligen Szenariomittelwerte eingegangen sind. Die Zahl der berücksichtigten Klimaprojektionen liegt dabei zwischen 16 für das Szenario A2 und 19 für das Szenario A1B. Auch wenn diese Unterschiede auf den ersten Blick klein erscheinen mögen, so sind sie doch von großer Bedeutung, da ganze Modelle bzw. Modellfamilien aus der Analyse „herausfallen". So liegen für das Szenario A2 nur noch statistische Klimaprojektionen vor. Da die statistischen und physikalischen Modelle zum Teil unterschiedliche Zukunftstrends simulieren, kann es durch die Nichtberücksichtigung einer der beiden Modellfamilien zu einer Über- oder Unterschätzung der Entwicklungen kommen. Um dennoch einen Vergleich der Szenarios zu ermöglichen, wurde für das Szenario A1B zusätzlich ein zweites Mittel dargestellt, welches aus den gleichen Projektionen be-

rechnet wurde wie auch Szenario A2. Um eine Überbewertung der Modelle mit vielen Realisierungen zu vermeiden, wurde bei der Berechnung des Szenariomittels zunächst ein Mittelwert für jedes Modell (aus den 1–10 Realisierungen) ermittelt. Diese Modellmittelwerte wurden anschließend zu dem Szenariomittelwert zusammengerechnet. Das in Abbildung 22 dargestellte Szenariomittel ist also eine stark aggregierte Größe, was ihre geringe zeitliche Variabilität erklärt. Insgesamt sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Emissionsszenarios im Vergleich zu den bereits in Abbildung 21 beschriebenen Modellunterschieden gering. Zumindest beim Blick auf das Ende des 21. Jahrhunderts liegt das Szenario B1 oft näher an den normalen Bedingungen – also Null – als die beiden anderen Szenarios. Dieses Verhalten zeigt sich jedoch nicht über die gesamte Zeitreihe hinweg und könnte auch zufallsbedingt sein. Werden für die Szenarios A2 und A1B die gleichen Modellrealisierungen (nur statistische Modelle) einbezogen, so liegen die Reihen deutlich näher zusammen, als wenn A1B unter Einbeziehung der physikalischen Modelle dargestellt wird. Die oft größeren Änderungssignale des Szenarios A2 im Vergleich zu A1B sind also wahrscheinlich auf die ausschließliche Betrachtung statistischer Modelle zurückzuführen, während die physikalischen Modelle unter A1B die Trends mit ihren zum Teil gegenläufigen Entwicklungen abmildern. Im Winter liegen die Szenariomittelwerte besonders eng zusammen. Durch die Einbeziehung von WETTREG 2010 liegen alle geglätteten Szenariomittelwertreihen des Winters während des 21. Jahrhunderts tendenziell im Bereich trockener Bedingungen. Im Frühjahr und Herbst zeigt Szenario A1B unter Einbeziehung aller Projektionen nur geringe Änderungssignale (ähnlich wie B1), während die Betrachtung rein statistisch basierter Projektionen deutliche Niederschlagsrückgänge (ähnlich wie A2) liefert. Die Unterschiede in den dargestellten Szenariomittelwerten sind also wahrscheinlich eher auf das unterschiedliche Kollektiv an in den Mittelwert einbezogenen Klimaprojektionen zurückzuführen, als auf tatsächliche Unterschiede der Emissionsszenarios.

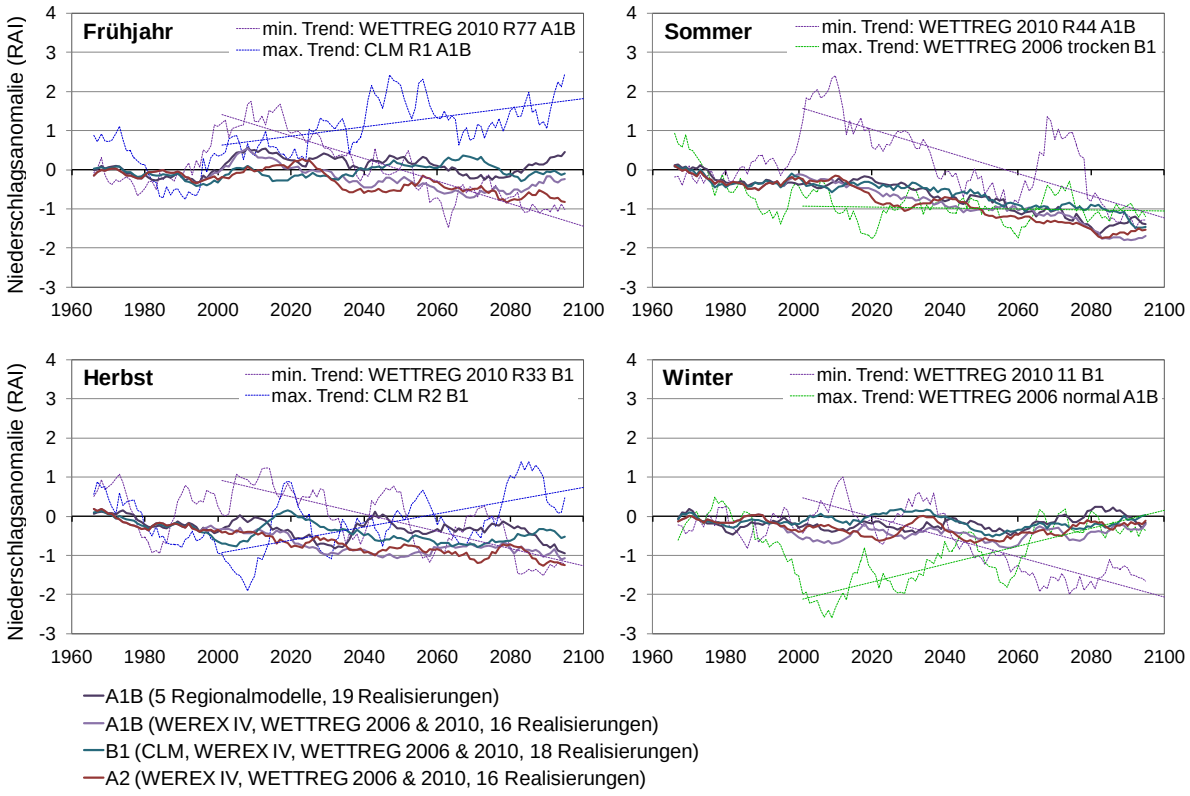


Abbildung 22: Mittlere jahreszeitliche Niederschlagsanomalie (11-jähriges gleitendes Mittel) für die drei Szenarios A1B (19 Realisierungen), B1 (18 Realisierungen; ohne REMO) und A2 (16 Realisierungen; ohne REMO und CLM) im Zeitraum 1961–2100; zusätzlich ist jeweils die Klimaprojektion mit dem minimalen und den maximalen Änderungssignal (linearer Trend für 2001–2100) dargestellt

Zusätzlich zu den Szenariomittelwerten sind auch die Zeitreihen von zwei Modellrealisierungen (ebenfalls über 11 Jahre gleitend gemittelt) inklusive ihres linearen Trends für den Zeitraum 2001–2100 abgebildet. Ausgewählt wurden diese beiden Realisierungen nach der Größe ihres Trends im 21. Jahrhundert. Sie stellen den für die jeweilige Jahreszeit berechneten minimalen und den maximalen Trend dar und verdeutlichen somit die Bandbreite der Änderungssignale. Für alle Jahreszeiten außer dem Sommer treten in einzelnen Modellrealisierungen ähnliche große Änderungssignale in Richtung trockener sowie nasser Bedingungen auf. Dagegen ist der größte Sommertrend gleich Null – also keine Veränderung. Die betreffende Modellrealisierung (WETTREG 2006, trocken, B1) weist jedoch während des 20. Jahrhunderts einen ausgeprägten Trend zu Trockenheit auf, wodurch das Ausgangsniveau für die Berechnung des Trends für das 21. Jahrhundert schon im Bereich deutlich zu geringer Niederschlagssummen liegt.

Während Abbildung 21 und 22 mittlere Entwicklungen der Niederschlagsanomalien für die gesamte REGKLAM-Modellregion aufzeigen, illustriert Abbildung 23, inwieweit die Entwicklungen innerhalb eines Modelles einheitlich verlaufen oder es kleinregionale Unterschiede in der Trendrichtung gibt. Im Allgemeinen ist weist ein Großteil der Daten- bzw. Gitterpunkte Trends in die gleiche Richtung auf. Dies ist im Sommer besonders deutlich. Zu beachten ist, dass diese Abbildung nur die Trendrichtung und nicht die Größe der Trends einbezieht. Selbst wenn alle Datenpunkte einen Trend zu trockeneren oder nasseren Bedingungen anzeigen, kann das absolute Änderungssignal gering sein. Bei nur sehr kleinen Änderungssignalen steigt jedoch die Wahrscheinlichkeit, dass einzelne Daten- bzw. Gitterpunkte zufällig einen gegenläufigen Trend aufweisen.

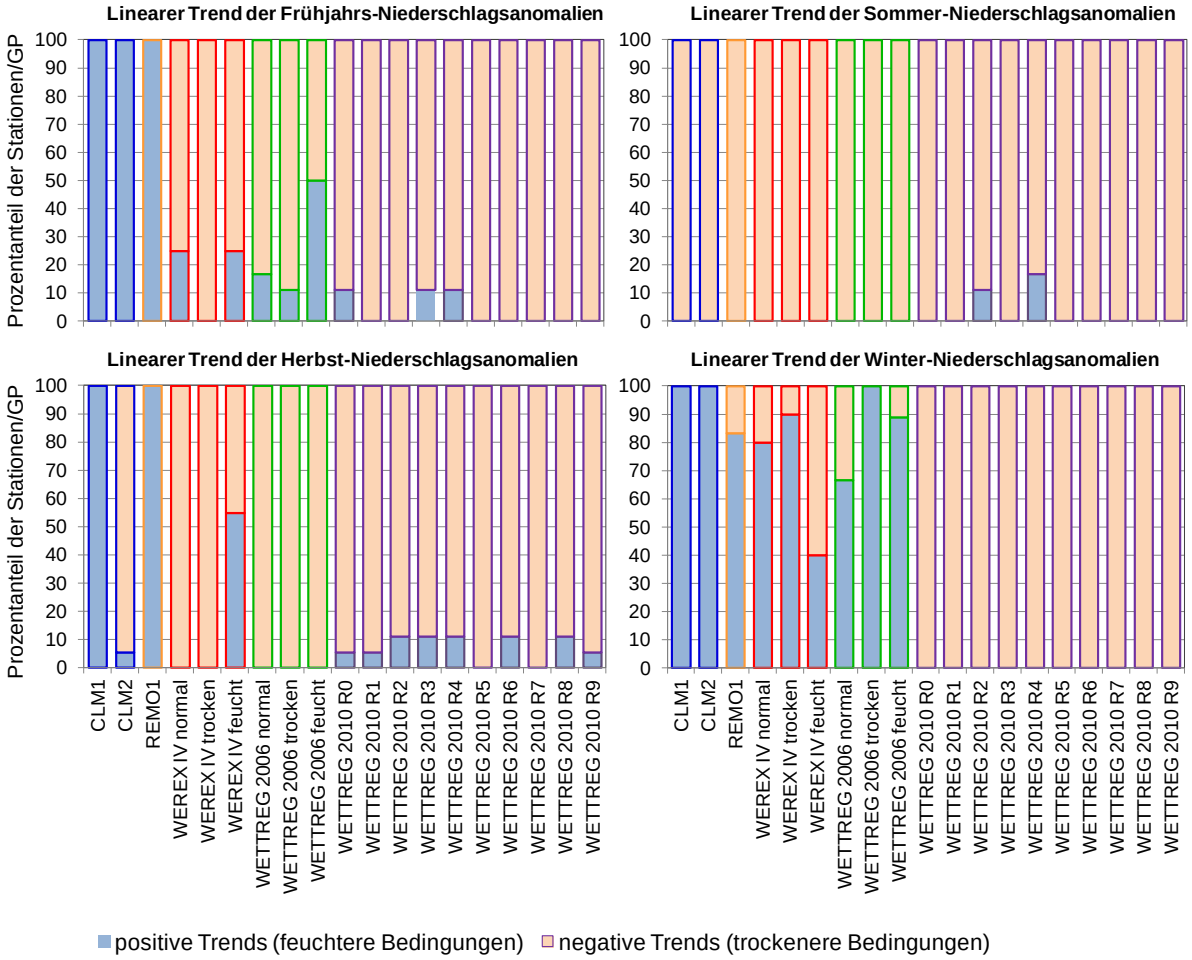


Abbildung 23: Prozentualer Anteil der Daten- bzw. Gitterpunkte (GP) innerhalb der RMR mit positiven bzw. negativen linearen Trends für den Zeitraum 2001–2100; Szenario A1B

Der für das 21. Jahrhundert berechnete lineare Trend kann in Einzelfällen auch irreführend sein, wie das Beispiel des trockenen Laufs WETTREG 2006 unter Szenario B1 im Sommer zeigt (Abbildung 22) zeigt. Eine Über- sowie Unterschätzung der tatsächlichen Entwicklung oder gar eine Trendumkehr ist möglich, wenn die Simulationen schon während des 20. Jahrhunderts große Veränderungen aufweisen (die oft nicht den tatsächlich beobachteten Entwicklungen entsprechen) und sich diese Veränderungen im 21. Jahrhundert nicht in dem Ausmaß fortsetzen. Abhilfe kann hier die zusätzliche Betrachtung von Trends für den gesamten simulierten Zeitraum 1961–2100 (Validierungs- und Projektionszeitraum) schaffen.

Abbildung 24 stellt die für die RMR gemittelten monatlichen Änderungssignale der Niederschlagsanomalien für 19 regionale Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990 dar. Bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts weist der Großteil der Projektionen auf abnehmende Niederschläge in den Monaten Juni bis November hin. Am einheitlichsten ist dabei die Entwicklung im September, in dem nur das Modell REMO einen Niederschlagsanstieg simuliert. Dagegen sind die Entwicklungen in den verschiedenen Klimaprojektionen für die Monate Februar bis Mai sehr unterschiedlich, so dass keine klare Tendenz zu einem Anstieg oder Rückgang der Niederschläge sichtbar wird. Zum Ende des 21. Jahrhunderts hin nehmen die negativen Trends weiter zu. In den Monaten Juli bis September sind nun alle Änderungssignale negativ, so dass anhand des vorliegenden Szenarios recht robust von einem Niederschlagsrückgang in diesen Monaten ausgegangen werden kann. In den angrenzenden Monaten Juni und Oktober sind zudem nur sehr wenige positive Trends sichtbar, so dass für den Zeitraum von Juni bis Oktober zum Ende des 21. Jahrhunderts wahrscheinlich mit deutlichen Niederschlagsrückgängen zu rechnen ist. Abbildung 24 zeigt auch, dass WETTREG 2010 in einigen Monaten – insbesondere den Wintermonaten – eine andere Richtung der Niederschlagsentwicklung – trockener anstelle von nasser – simuliert als die anderen vier Regionalmodelle.

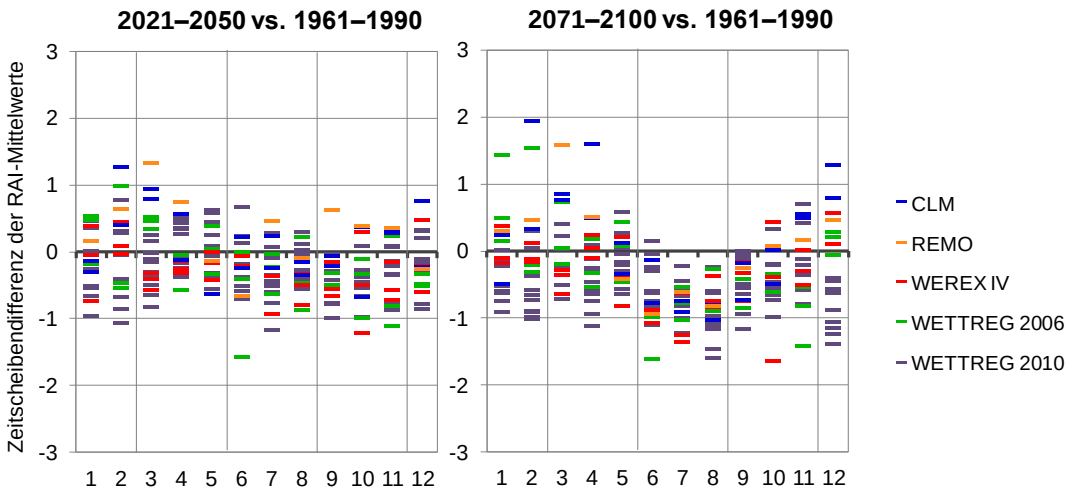


Abbildung 24: Jahresgang der Änderungssignale der monatlichen RAI-Mittelwerte für die RMR in den zwei Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990

Zusammenfassung

Durch die Verwendung eines Niederschlagsanomalienindikators fallen mittlere Abweichungen der durch die Regionalmodelle simulierten Niederschläge von den beobachteten (Bias) weniger ins Gewicht, als wenn mit den absoluten Niederschlagswerten gerechnet wird. Dies ermöglicht eine von unterschiedlichen Modell-Bias unabhängige Untersuchung von Änderungssignalen in den simulierten Niederschlägen. Da viele Impaktmodelle jedoch „tatsächliche" Niederschlagswerte benötigen, bleiben die zum Teil erheblichen Abweichungen der Modelle – vor allem der physikalischen Modelle – von den Beobachtungen von großer praktischer Relevanz.

Die Trends des Niederschlags hängen stark vom gewählten Regionalmodell ab. Die Wahl des Emissionsszenarios spielt dagegen eher eine untergeordnete Rolle. Trockenere Verhältnisse in den Sommer- bis Herbstmonaten deuten sich bereits zur Mitte des 21. Jahrhunderts an und sind zum Ende des 21. Jahrhunderts deutlich stärker ausgeprägt. Dagegen ist die Entwicklung während des

Frühjahrs und Winters in den verschiedenen Projektionen deutlich uneinheitlicher. Während im Frühjahr vor allem die physikalischen Modelle zu- und die statistischen abnehmende Niederschläge simulieren, unterscheidet sich im Winter das Modell WETTREG 2010 – mit seinen zum Teil erheblichen Niederschlagsabnahmen – deutlich von den anderen Modellen. Die beschriebene mittlere Veränderung in der REGKLAM-Modellregion ist größtenteils recht einheitlich (hinsichtlich der generellen Trendrichtung) über die einzelnen Daten- bzw. Gitterpunkte hinweg.

Inwieweit die Trends durch den Globalmodellantrieb beeinflusst werden, wurde für ausgewählte Globalmodelle und weitere Regionalmodelle aus dem ENSEMBLES-Projekt untersucht. Diese Ergebnisse sind in dem Zusatzproduktbericht *Analyse extremer Niederschlagsereignisse auf Basis von globalen und regionalen Klimaprojektionen – Ensemble-Simulationen für die REGKLAM-Modellregion* (Mehler u. Hänsel 2013) nachzulesen.

4.3.2 Häufigkeitsverteilung

Nach der Beschreibung der mittleren Niederschlagsveränderungen sollen nun Veränderungen in der Häufigkeitsverteilung des Niederschlags untersucht werden. Dazu werden die Niederschlagsanomalien entsprechend ihrer Größe in neun Niederschlagsklassen (von 1 – „extrem feucht" über 5 – „normal" bis 9 – „extrem trocken") eingeteilt. Für die zwei Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 werden die Änderungen gegenüber der Referenzzeitscheibe 1961–1990 untersucht. Die Häufigkeiten und deren Änderungen werden dabei für alle Daten- bzw. Gitterpunkte der REGKLAM-Modellregion berechnet und die individuellen Häufigkeitsverteilungen zu einem regionalen Mittel zusammengefasst.

Vergleich zwischen Beobachtungs- und Modelldaten für den Kontrollzeitraum 1961–2000

Die beobachtete Verteilung der Niederschlagsanomalien in den Klassen von extrem feucht bis extrem trocken wird von den meisten Modellen annähernd wiedergegeben. Da nachfolgend die Änderungssignale gegenüber dem Referenzzeitraum 1961–1990 dargestellt werden, illustriert Abbildung 25 die Häufigkeitsverteilung für diesen Zeitraum. Die Häufigkeitsverteilung innerhalb des zehn Jahre längeren Validierungszeitraums ist der dargestellten sehr ähnlich.

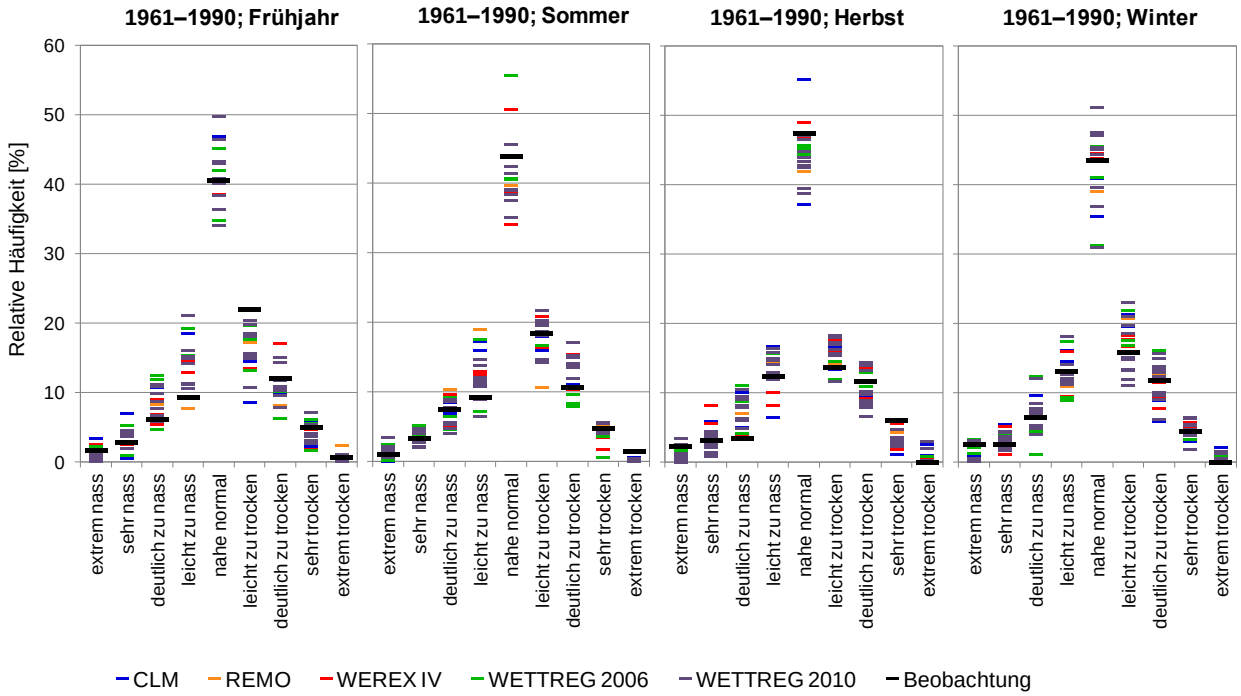


Abbildung 25: Häufigkeitsverteilung der jahreszeitlichen Niederschlagsanomaliewerte (RAI) für den Zeitraum 1961–1990; ermittelt aus den individuellen Häufigkeitsverteilungen aller Daten- bzw. Gitterpunkte der REGKLAM-Modellregion

Circa 40 bis 50 Prozent der Daten in 1961–1990 werden unabhängig von der Jahreszeit der Klasse „normale Niederschlagsbedingungen" (-1 ≤ RAI ≤ +1). Auffällig ist die leichte Schiefe der Verteilung hin zu trockeneren Bedingungen – die vier „trockenen Klassen" (RAI < -1) haben mit reichlich 30% eine erheblich größere Häufigkeit als die vier „nassen Klassen" (RAI > 1, ca. 25%). Extrem nasse Verhältnisse (RAI > 4) sind nach dem RAI jedoch etwas häufiger als extrem trockene (RAI < -4) – treten jedoch zumeist nur in unter 2% der Fälle auf. Sehr nasse (3 < RAI ≤ 4) bzw. trockene (-3 > RAI ≥ -4) Verhältnisse sind etwa doppelt so häufig. Die im Rahmen der RAI-Berechnung vorgenommene Normalisierung ist nicht „perfekt", wird jedoch für die nachfolgenden Analysen der Änderungssignale als ausreichend bewertet.

Projizierte Klimaänderungssignale im 21. Jahrhundert

Die Änderungen der Häufigkeitsverteilung des Niederschlags werden anhand von zwei Zeitscheiben (2021–2050 und 2071–2100) beschrieben (Abbildung 26). Dargestellt sind jeweils die absoluten Änderungen in der relativen Klassenhäufigkeit – eine Änderung von 10% in der Klasse extrem trockener bzw. nasser Bedingungen, die im Referenzzeitraum nur in ca. 0,5 bis 2 Prozent der Fälle auftraten, entspricht demnach einem riesigen Änderungssignal (mehr als ein Verfünffachen der Ausgangshäufigkeit).

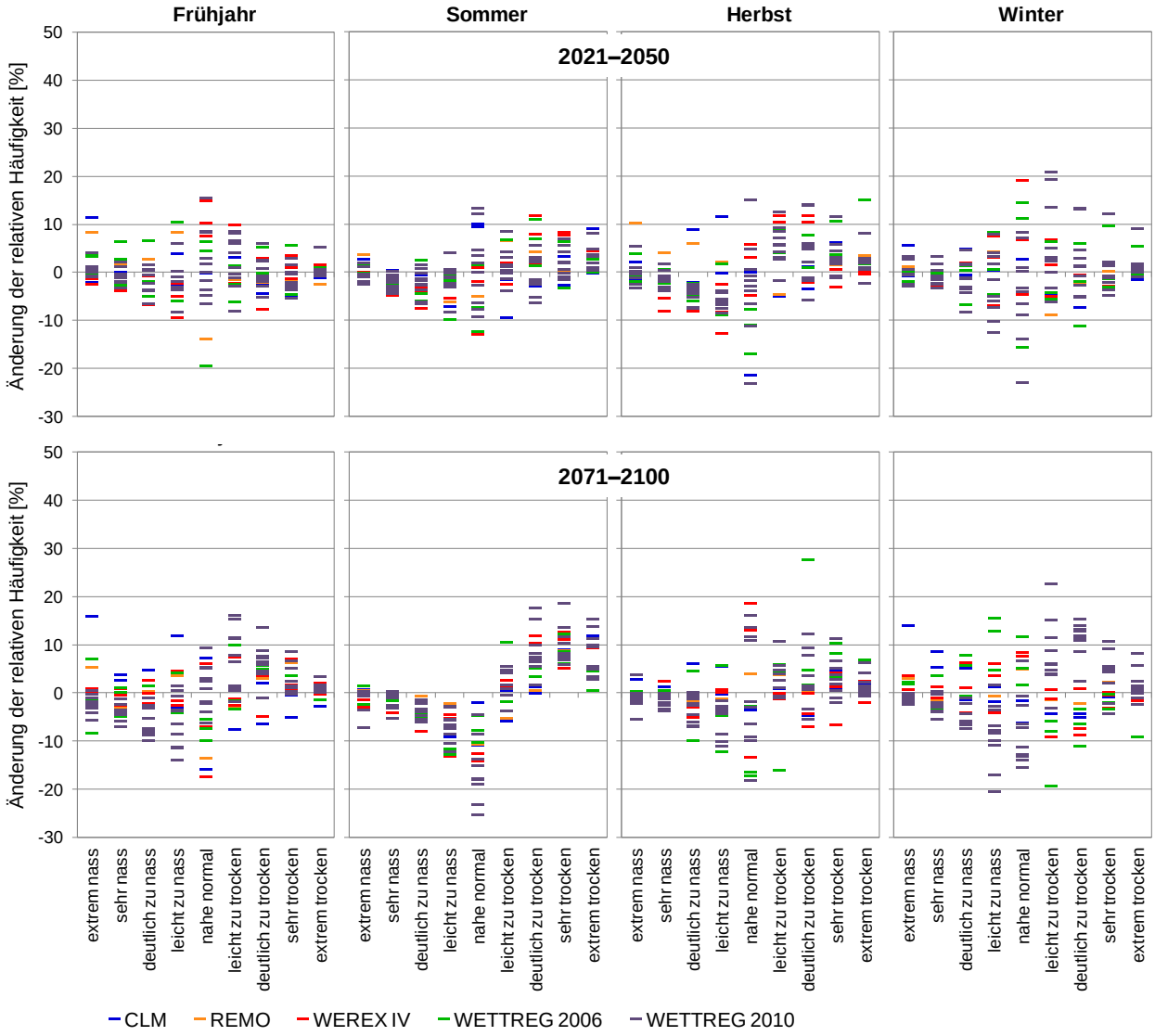


Abbildung 26: Änderungssignale von 19 regionalen Klimaprojektionen (fünf Modelle) unter dem Szenario A1B für die neun RAI-Klassen der Zeitscheiben 2021–2050 (oben) und 2071–2100 (unten) gegenüber 1961–1990 für die REGKLAM-Modellregion, ermittelt aus den individuellen Änderungssignalen aller Daten- bzw. Gitterpunkte

Die Änderungssignale der Modelle für das Frühjahr und den Winter in der Zeitscheibe 2021–2050 sind nahezu symmetrisch um Null verteilt. Obwohl einzelne Modellprojektionen durchaus erheblich große Änderungssignale in einzelnen Häufigkeitsklassen simulieren, kann für diesen Zeitraum keine robuste (im Sinne von in den Modellrealisierungen in der Trendrichtung einheitliche) Änderung festgestellt werden. Zum Ende des 21. Jahrhunderts hin verschieben sich in einigen Häufigkeitsklassen die Änderungssignale der regionalen Klimaprojektionen v.a. im Frühjahr stärker in eine einheitliche Richtung. Dies betrifft z.B. die Klassen „deutlich zu trocken" ($-2 > RAI \geq -3$) und „sehr trocken" während des Frühjahrs, die tendenziell häufiger auftreten, während für sämtliche „nassen" Klassen ($RAI > 1$) mehr Ab- als Zunahmen der Auftrittshäufigkeit simuliert werden. Für den Winter wird wieder die Sonderstellung von WETTREG 2010 deutlich. Während vier der fünf Modelle überwiegend Zunahmen in den Klassen von „normal" bis „extrem nass" verzeichnen und für die trockenen Klassen zum Teil erhebliche Rückgänge projizieren, zeigen die WETTREG 2010 Realisierungen in allen Häufigkeitsklassen ein entgegengesetztes Verhalten.

Für den Sommer und den Herbst zeigen sich zur Mitte des 21. Jahrhunderts Tendenzen zu einer Häufung trockener Ereignisse, während die Häufigkeit in den nassen Klassen – insbesondere von „leicht zu nass" ($1 < RAI \leq 2$) bis „sehr nass" ($3 < RAI \leq 4$) – tendenziell abnimmt. Diese Entwicklung intensiviert sich zum Ende des 21. Jahrhunderts hin und ist im Sommer deutlich stärker ausgeprägt als im Herbst. „Sehr trockene" und „extrem trockene" Bedingungen können um ca. 20% zunehmen, während sie in der Vergangenheit nur ca. 5% der Fälle ausmachte. Der Rückgang bei den „nassen" Klassen ist weniger stark ausgeprägt – die Häufigkeit „sehr nasser" und „extrem nasser" Verhältnisse nimmt nur um ca. 5–10% ab. Stattdessen ist auch in der Klasse „normaler Niederschlagsbedingungen" ($-1 \leq RAI \leq +1$) in allen Projektionen ein zum Teil erheblicher Rückgang der Häufigkeiten zu verzeichnen.

Nach der Betrachtung der modellbedingten Variabilität der Änderungssignale (Abbildung 26) wird in Abbildung 27 die szenariobedingte Variabilität der Änderungssignale dargestellt. Zusätzlich zu den aus den verfügbaren Modellmittelwerten berechneten Szenariomittelwerten werden auch das minimale und das maximale Änderungssignal über alle regionalen Klimaprojektionen und Szenarios hinweg dargestellt. Sämtliche Szenarienmittelwerte sind aufgrund der großen Bandbreite der Signale einzelner Klimaprojektion im Vergleich zu diesen Signalen (zumeist ca. ±10%, vereinzelt auch ±20%) klein – alle sind <±10% und die meisten sogar <±5% Veränderung in der relativen Klassenhäufigkeit. Die größten Änderungssignale über alle Szenarios hinweg treten dabei in der Zeitscheibe 2071–2100 für die drei „trockensten Klassen" ($RAI < -2$) des Sommers auf. Deren Häufigkeit steigt in Abhängigkeit des Szenarios bzw. der einfließenden Modelle zwischen 12,5% (B1; ohne REMO) und 23,2% (A1B, nur statistische Modelle), was zum Teil mehr als einer Verdoppelung der ursprünglichen Häufigkeit (ca. 15%) entspricht.

Die Szenariomittel liegen zumeist sehr dicht zusammen, wobei oft das Änderungssignal für Szenario B1 tendenziell am kleinsten und dasjenige für A2 am größten ist. Dies kann jedoch auch auf die unterschiedliche Zahl an in die Szenariomittelwertbildung eingeflossenen Modellen bzw. Modellklassen (statistisch vs. physikalisch) zurückzuführen sein. Dafür spricht, dass die Werte für A1B und A2, welche für das gleiche Kollektiv an Klimaprojektionen (ausschließlich statistische) berechnet wurden, oft sehr dicht zusammen liegen. Dies trifft jedoch nicht immer zu, teilweise liegen auch die beiden verschieden berechneten A1B-Mittelwerte dichter zusammen, während das A2-Mittel kleinere oder größere Änderungssignale aufweist.

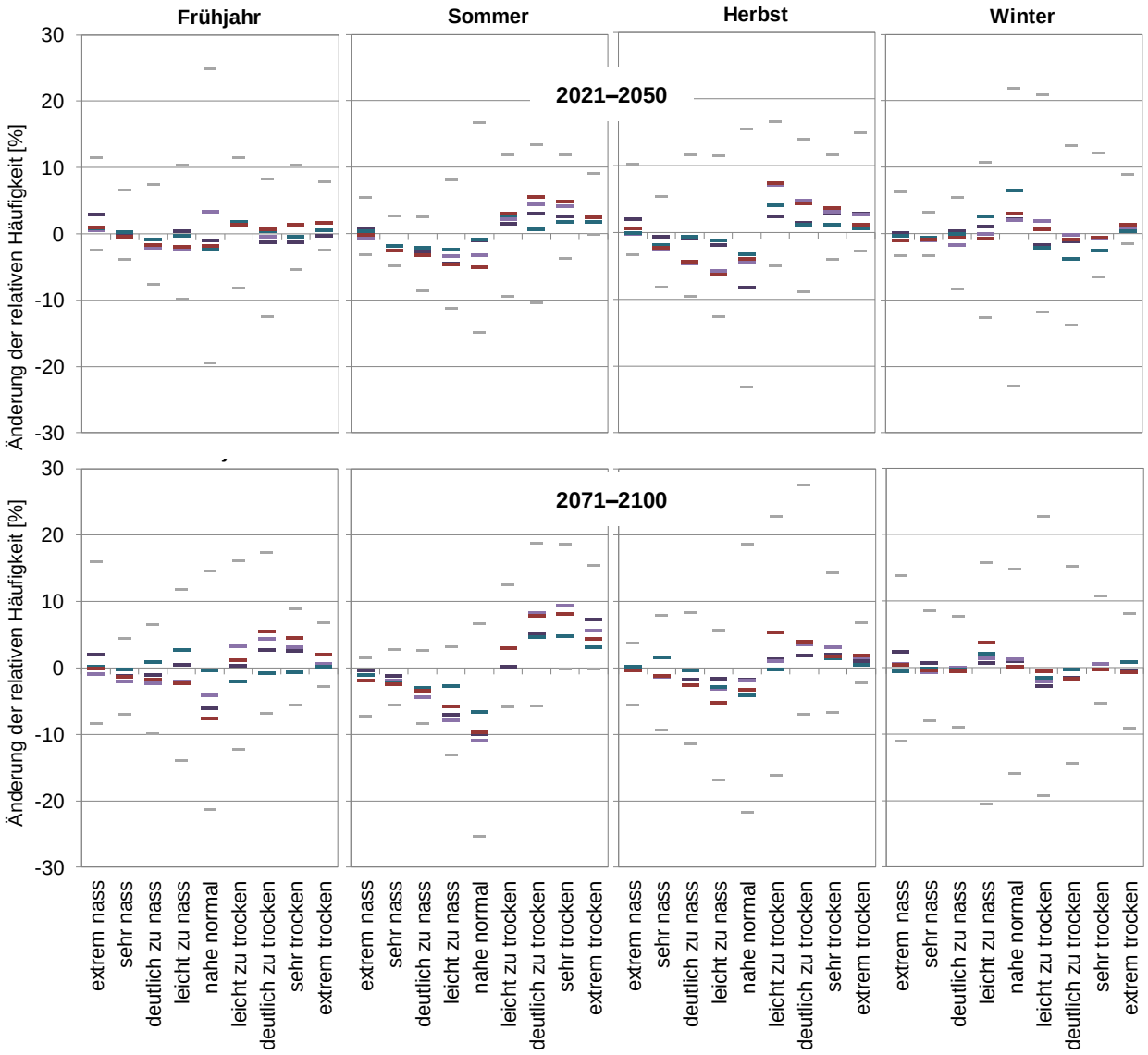


Abbildung 27: wie Abbildung 26 jedoch Vergleich der Mittelwerte von drei Emissionsszenarios (A1B – 19 Realisierungen, B1 – 18 Realisierungen [ohne REMO], A2 – 16 Realisierungen [ohne REMO und CLM]) inklusive Darstellung des maximalen und minimalen Änderungssignal aller 53 Realisierungen

Zusammenfassung

Die deutlichsten Veränderungen in der Häufigkeitsverteilung des Niederschlags werden für den Sommer simuliert. Hier wird insbesondere für die Trockenheitsklassen „deutlich zu trocken" bis „extrem trocken", welche in der Vergangenheit eine Häufigkeit von ca. 15% hatten, im Mittel mehr als eine Verdoppelung der Häufigkeit bis zum Ende des 21. Jahrhunderts projiziert. Dagegen nehmen „normale" bis „sehr nasse" Verhältnisse deutlich ab. Im Mittel die geringsten Änderungssignale treten für den Winter auf, was auf den unterschiedlichen Charakter der Modelle zurückzuführen ist. Während der Großteil der Modelle in der Zeitscheibe 2071–2100 leichte Abnahmen „trockener" sowie Zunahmen „normaler" bis „nasser" Klassen projiziert, sind die von WETTREG 2010 simulierten Entwicklungen dem entgegengesetzt. Frühjahr und Herbst zeigen eine Tendenz zur Zunahme „trockener" Klassen, jedoch sind die Änderungssignale deutlich kleiner und über die verschiedenen Projektionen hinweg heterogener. Die Betrachtung verschiedener Emissionsszenarios zeigt, dass B1 oftmals geringere Änderungssignale als A1B und A2 aufweist. Die Unterschiede sind jedoch im Vergleich zur modellinternen Variabilität (verschiedene Modellrealisierungen) sowie der Variabilität zwischen verschiedenen Modellen gering.

4.3.3 Räumliche Variabilität der Trends

Bisher wurden überwiegend für die REGKLAM-Modellregion gemittelte Änderungssignale dargestellt und diskutiert. In diesem Abschnitt wird untersucht, inwieweit es innerhalb des Untersuchungsgebietes kleinregionale Unterschiede in den Trends gibt, z.B. in Abhängigkeit von den Höhenstufen. Außerdem wird die Standardabweichung der Niederschlagsanomalien innerhalb der REGKLAM-Modellregion als Maß für die räumliche Variabilität herangezogen.

Vergleich zwischen Beobachtungs- und Modelldaten für den Kontrollzeitraum 1961–2000

Die räumliche Standardabweichung der Niederschlagsanomalien ist mit ca. 0.65 deutlich kleiner als die zeitliche Standardabweichung (Variabilität der RAI-Werte innerhalb von 30 Jahren), welche bei ca. 1,6 liegt. Die räumliche Variabilität des Niederschlags ist prinzipiell im Sommer höher als im Winter, was auch durch die Standardabweichung der Modell-RAI-Wert tendenziell wiedergegeben wird (Abbildung 28). REMO zeigt – wohl aufgrund der höchsten Anzahl an einbezogenen Datenpunkten (76 Gitterpunkte) – im Jahr, Sommerhalbjahr und Sommer die größten räumlichen Standardabweichungen, während für CLM– das Modell mit der geringsten Zahl an Datenpunkten (18 Gitterpunkte) – v.a. im Sommer eher geringere Standardabweichungen berechnet werden. Generell liegt die räumliche Variabilität der simulierten Daten recht nahe an der beobachteten.

Während also die Mittelwerte der Standardabweichung für 30-Jahres-Perioden von den Modellen recht gut wiedergegeben werden, kann der zeitliche Verlauf der für verschiedene Höhenstufen berechneten Niederschlagsanomalien durch die Modelle nicht nachgebildet werden (Abbildung 31). Für das erweiterte Datengebiet wurden die Niederschlagsanomalien aller verfügbaren Datenpunkte für jede Höhenstufe gemittelt und in Abbildung 31 als 11-jähriges gleitendes Mittel für die Beobachtungen im Vergleich zu den über alle Modelle unter dem Szenario A1B gemittelten RAI-Werten dargestellt. Der deutlich „glattere" Verlauf der modellierten Niederschlagsanomalien im Vergleich zu den beobachteten resultiert aus der starken Aggregation des Modellmittels über fünf Modelle mit insgesamt 19 Realisierungen hinweg. Die Linien für die vier Höhenstufen liegen für das Modellmittel zum Teil deutlich näher zusammen als für die Beobachtungsdaten, was jedoch auch durch die im Zeitverlauf schwankende Datenverfügbarkeit der Beobachtungsdaten zu erklären ist.

Zusätzlich zur Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der höhenstufenabhängigen mittleren Niederschlagsanomalien werden auch Höhenstufenabhängigkeiten der Häufigkeit besonders trockener (Unterschreitungshäufigkeit von RAI < -2) und nasser (Überschreitungshäufigkeit von RAI > 2) in den vier Jahreszeiten betrachtet (Abbildung 32). In den Beobachtungsdaten scheint für den Kontrollzeitraum für das Frühjahr und den Winter bereits eine Abhängigkeit der Häufigkeit „deutlich zu trockener" Verhältnisse vorhanden zu sein mit einer Zunahme der Häufigkeit trockener Klassen mit zunehmender Höhe über dem Meeresspiegel. Analoges gilt für die Häufigkeit „deutlich zu nasser" Klassen im Winter. Weitere Untersuchungen wären nötig, um festzustellen inwieweit dies realistisch oder zufallsbedingt bzw. auf Änderungen im Datenkollektiv zurückzuführen ist. Die Modelle zeigen im Kontrollzeitraum keine Höhenstufenabhängigkeit der Unter- bzw. Überschreitungshäufigkeiten eines RAI von ±2.

Die Häufigkeit ausgeprägt trockener Verhältnisse (ca. 15–20%) wird im Allgemeinen durch die Modelle annähernd wiedergegeben, v.a. im Sommer neigen die Modelle jedoch für alle Höhenstufen zur Überschätzung der tatsächlichen Häufigkeit, während im Winter Unterschätzungen häufiger auftreten. Die Häufigkeit ausgeprägt nasser Verhältnisse ist mit ca. 10–15% in Beobachtungs- und Modelldaten etwas geringer als die trockener Verhältnisse. Der einfache Berechnungsalgorithmus des *Rainfall Anomaly Index* ist also nicht in der Lage die Schiefe der Niederschlagsverteilung „komplett zu beseitigen". Außer im Sommer tendieren die meisten Modelle zu einer leichten Überschätzung der beobachteten Überschreitungshäufigkeit eines RAI von +2 – im Sommer sind dagegen Unterschätzungen häufiger. Vor allen für die Kammlagen gibt es zum Teil erhebliche Abweichungen zwischen den Modellen und Beobachtungen. Dies ist jedoch weniger auf die Höhenstufe als vielmehr auf die geringe Anzahl am Datenpunkten (sowohl in den Beobachtungen als auch in den meisten Modellen) für die Berechnung des Mittelwertes dieser Höhenstufe zurückzuführen.

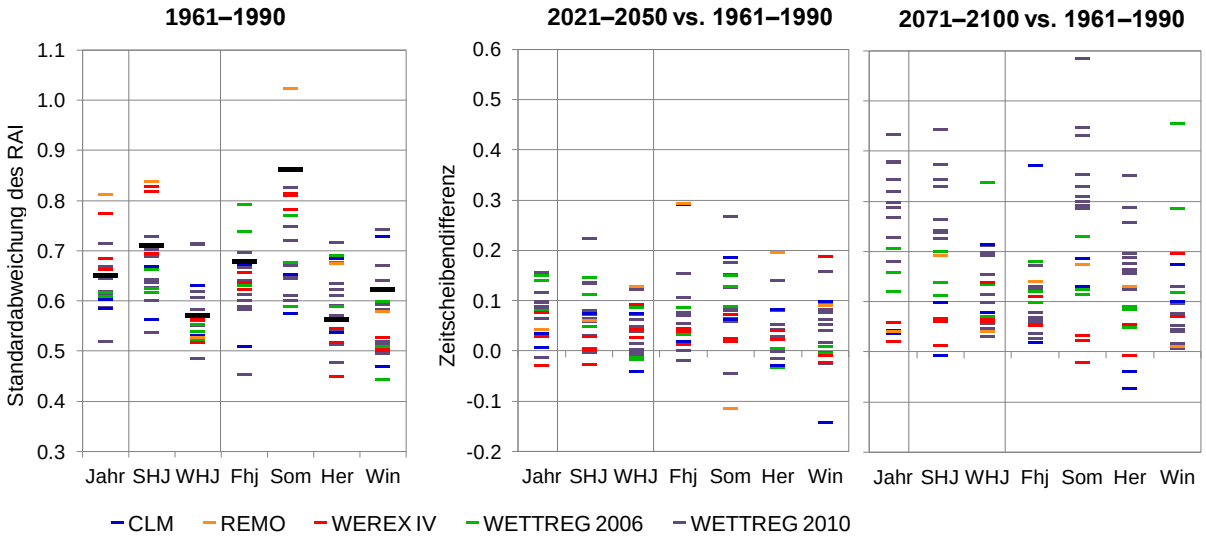


Abbildung 28: Räumliche Variabilität (Standardabweichung) des Niederschlags innerhalb der RMR für 19 regionale Klimaprojektionen im Referenzzeitraum 1961–1990 (links) sowie Änderungssignale unter dem Szenario A1B in den Zeitscheiben 2021–2050 (Mitte) und 2071–2100 (rechts)

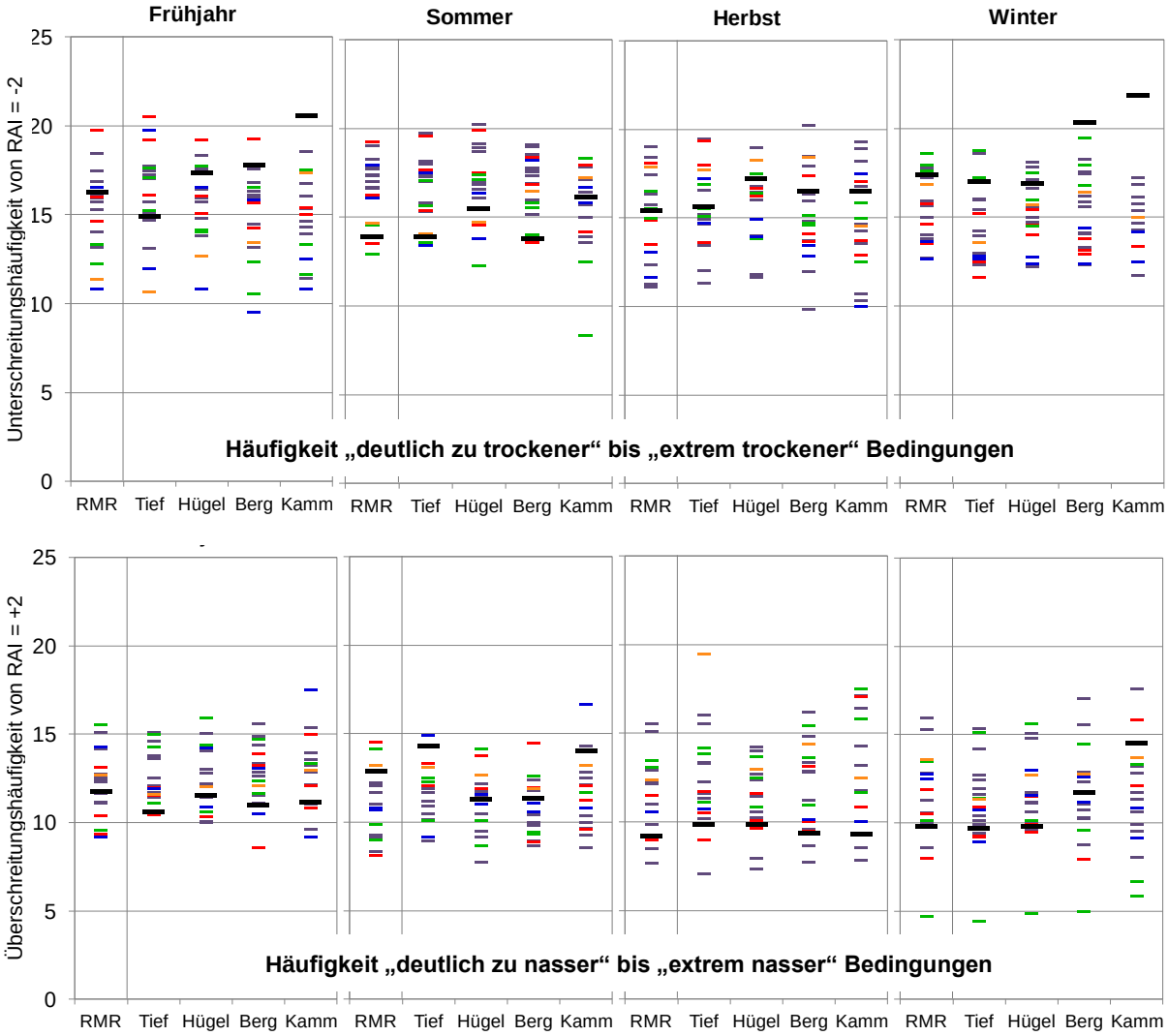


Abbildung 29: Jahreszeitliche Unterschreitungshäufigkeiten eines RAI von -2 (trockene Bedingungen; oben) und Überschreitungshäufigkeiten eines RAI von +2 (nasse Bedingungen; unten) gemittelt über die REGKLAM-Modellregion sowie für vier Höhenstufen des erweiterten Datengebietes im Validierungszeitraum 1961–2000

Projizierte Klimaänderungssignale im 21. Jahrhundert

Für die Zukunft simulieren fast alle betrachteten Klimamodellrealisierungen in allen Jahreszeiten eine zum Teil erhebliche Zunahme der räumlichen Variabilität des Niederschlags (Abbildung 28, Abbildung 30). Zur Mitte des 21. Jahrhunderts ist diese Änderung noch recht gering (meist < 0,1) – zum Ende des 21. Jahrhundert werden v.a. durch WETTREG 2010 erhebliche größere räumliche Standardabweichungen als in der Referenzperiode simuliert. Diese Entwicklung ist im Sommer und Herbst besonders stark ausgeprägt, doch auch in den beiden anderen Jahreszeiten zeigen einzelne Modellrealisierungen starke zeitliche Schwankungen in der räumlichen Variabilität, die zum Ende des 21. Jahrhunderts einen Höhepunkt erreicht.

Besonders auffällig in den Zeitreihen der räumlichen Standardabweichungen für die Klimaprojektionen sind die zum Teil erheblichen Dekadischen Schwankungen in der räumlichen Variabilität, die bei den beiden physikalischen Modellen oft besonders stark ausgeprägt sind (Abbildung 30). Weiterhin fällt auf, dass sich die beiden CLM-Realisierungen sehr unterschiedlich verhalten – insbesondere im Frühjahr und Winter. Dies lässt einen großen Einfluss der natürlichen Klimavariabilität auf die erzielten Ergebnisse vermuten. Besonders starke Zunahmen in der räumlichen Variabilität zeigen die Modellrealisierungen CLM-1 und WETTREG 2006 feucht während des Frühjahrs, WETTREG 2010 44 und REMO während des Sommers, WETTREG 2010 33 während des Herbstes und WETTREG 2006 normal und CLM-2 während des Winters.

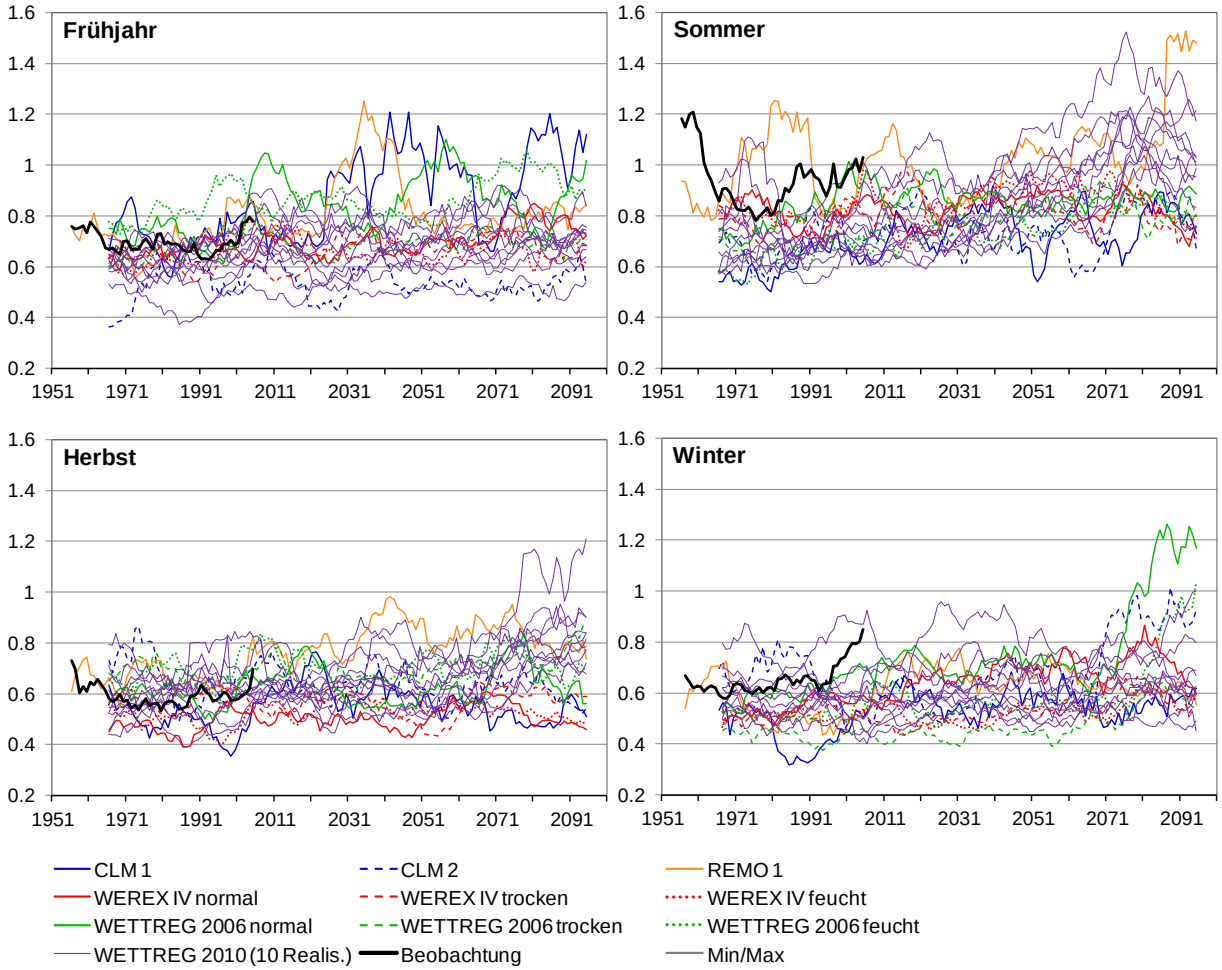


Abbildung 30: Verlauf (11-jähriges gleitendes Mittel) der jahreszeitlichen Niederschlagsanomalien (RAI) für die Beobachtungsdaten (1951–2010) sowie für fünf regionale Klimamodelle (19 Realisierungen, 2001–2100) unter Szenario A1B

Für das Szenario A1B wird der Verlauf der RAI-Mittelwerte für alle 19 Realisierungen für vier Höhenstufen miteinander verglichen (Abbildung 31). Grundsätzlich verlaufen die Kurven der verschiedenen Höhenstufen sehr ähnlich. Nur im Winter ist ab ca. dem Jahr 2040 eine deutliche Differenzierung in Abhängigkeit von den Höhenstufen zu sehen. Für das Tiefland wird im Modellmittel der größte Niederschlagsanstieg simuliert, während sich die Niederschläge in dem Kammlagen kaum verändern. Diese Entwicklung ist hauptsächlich auf das Modell WETTREG 2010 zurückzuführen, welches im Winter große negative Trends für die Kammlagen simuliert (Mittelwert der zehn Realisierungen: -1,99), während die Trends für das Tiefland um Null schwanken (MW: -0,13). Die anderen Modelle zeigen eher einen Anstieg der winterlichen Niederschläge in allen Höhenstufen, wobei dieser Anstieg im Tiefland am größten (MW: +1,29) und in den Kammlagen am geringsten (+0,58) ausfällt. Die unterschiedlichen Ergebnisse der verschiedenen Modelle hinsichtlich der höhenstufenabhängigen Veränderung des Niederschlags erschweren die Interpretation. Betrachtet man die Änderungssignale der Häufigkeit „trockener Bedingungen" (RAI < -2) in den Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 so zeigt sich im Winter wiederum, das schon beschriebene, den anderen Modellen entgegen gerichtete Verhalten von WETTREG 2010 (Abbildung 32). Dagegen zeigt sich im Sommer eine größere Zunahme der Häufigkeit trockener Bedingungen im Tiefland im Vergleich zu den Kammlagen. Im Herbst und Frühjahr ist keine Höhenstufenabhängigkeit der Trocknishäufigkeit sichtbar. Analog zur Betrachtung der Häufigkeit „trockener Bedingungen" kann auch die Häufigkeit „nasser Bedingungen" (RAI > +2) betrachtet werden. Einzig im Winter zeigt sich eine Tendenz zur Höhenstufenabhängigkeit, mit einer größeren Häufigkeitszunahme im Tiefland im Vergleich zu den Kammlagen. Dieses Verhalten zeigt sich v.a. in dem Modellsimulationen von WEREX IV und WETTREG 2010.

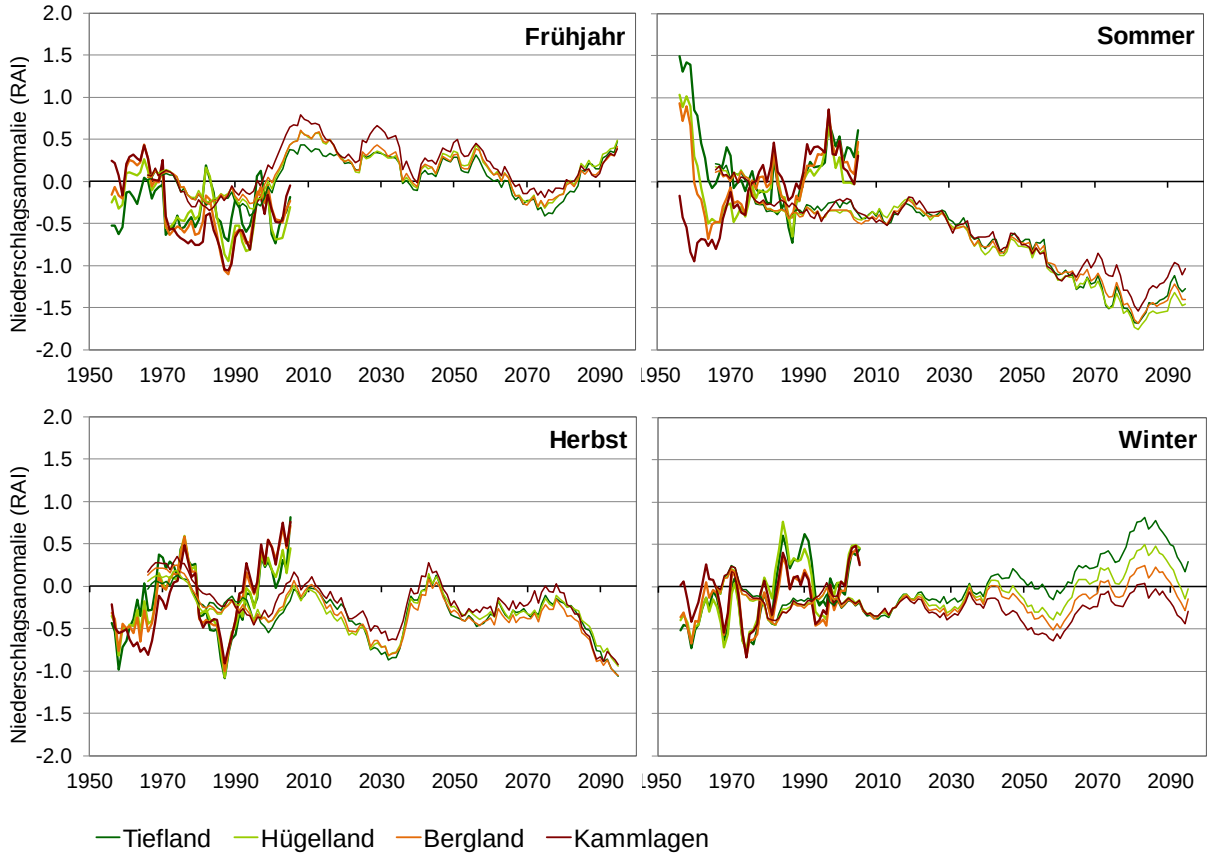


Abbildung 31: Verlauf (11-jähriges gleitendes Mittel) der mittleren jahreszeitlichen Niederschlagsanomalien (RAI) für vier Höhenstufen (Tiefland, Hügelland, Bergland und Kammlagen) in den Beobachtungsdaten (fette Linien) und in den Klimaprojektionen unter Szenario A1B (dünne Linien)

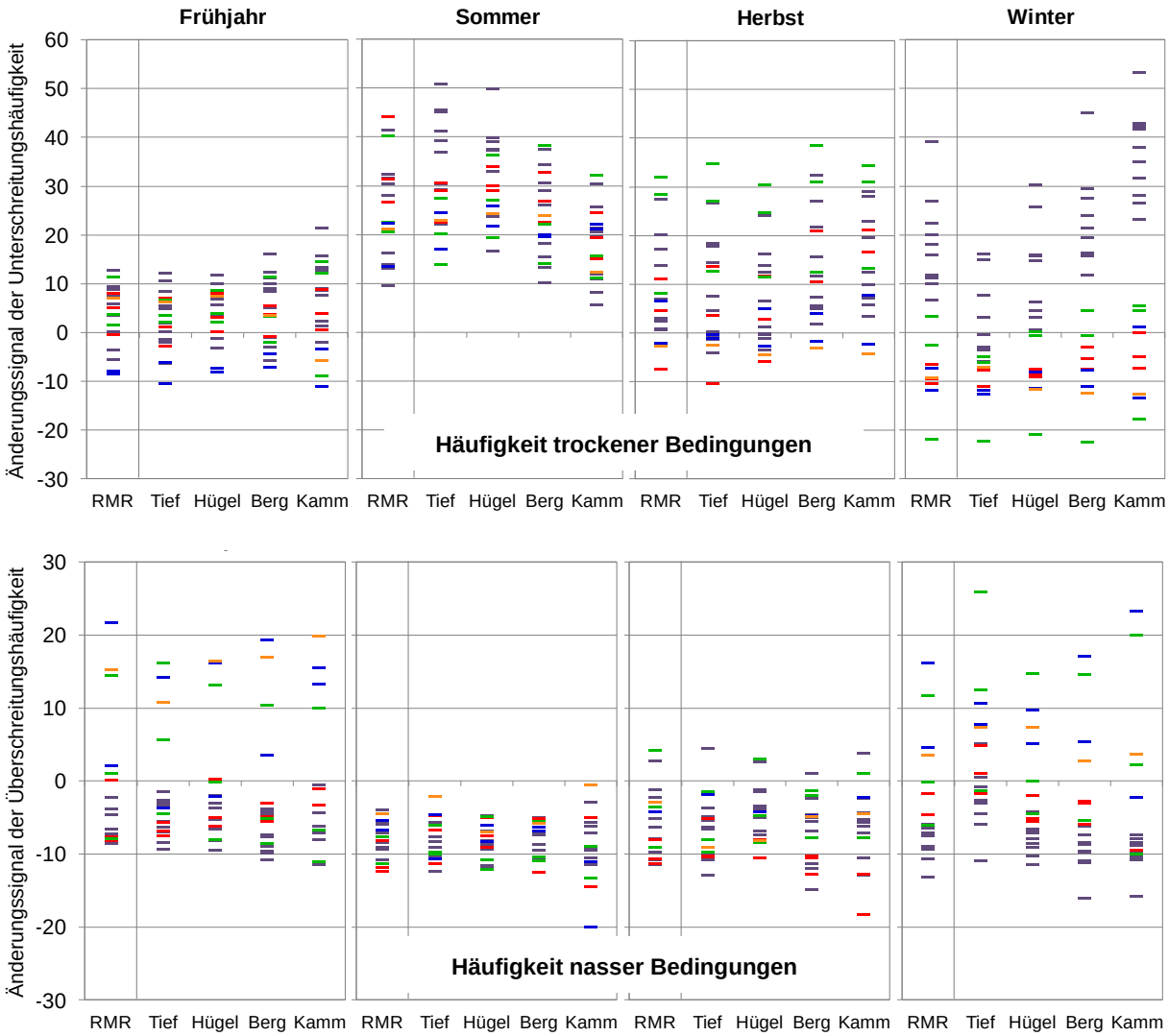


Abbildung 32: Zeitscheibendifferenzen der Über- bzw. Unterschreitungshäufigkeiten eines RAI von ±2 in der REGKLAM-Modellregion sowie vier Höhenstufen des erweiterten Datengebietes für 2071–2100 gegenüber 1961–1990

Zusammenfassung

Die räumliche Variabilität des Niederschlags wird von den Modellen zufriedenstellend wiedergegeben. Sie nimmt in den Modellsimulationen – v.a. in denen von REMO und WETTREG 2010 – im Sommer und Herbst tendenziell zu. Vor allem die deutlich zu trockenen Bedingungen (RAI < -2) nehmen im Sommer im Tiefland etwas stärker zu als im Bergland. Prinzipiell sind die für verschiedene Höhenstufen projizierten Änderungen der mittleren Niederschlags und der Niederschlagsverteilung stark vom gewählten Modell abhängig – v.a. im Winter.

4.3.4 Vergleich der beiden Indikatoren SPI und RAI

Die beiden genutzten Indikatoren zur Beschreibung von Niederschlagsanomalien liefern recht vergleichbare Ergebnisse. Abbildung 33 zeigt die in neun Niederschlagsklassen aufgeteilte Häufigkeitsverteilung beider Indikatoren. McKee et al. (1993), die den SPI erstmalig vorschlugen, verwendeten eine etwas andere – nur auf Dürre fokussierende – Einteilung (Tabelle 9). Auch der RAI war ursprünglich durch Van Rooy (1965) etwas anders klassifiziert worden. Um die Vergleichbarkeit der beiden Indikatoren sicherzustellen, wurden die Klassen des RAI und des SPI gegenüber den ursprünglich vorgeschlagenen Klassifikationen leicht modifiziert. Dabei sind die RAI-Werte in der Regel etwa doppelt so groß wie die SPI-Werte.

Die für den RAI beschriebene leichte Verschiebung der Verteilung hin zu negativen Niederschlagsanomalien – sprich trockenen Verhältnissen – ist für den SPI nicht zu beobachten. Hier zeigt sich, dass das komplexere Verfahren des SPI zur Normalisierung der Niederschlagsverteilung Vorteile gegenüber der einfacheren RAI-Berechnung bringt. Wahrscheinlich könnte man die Häufigkeitsverteilung des RAI noch symmetrischer gestalten, wenn man anstelle des Mittelwertes den Median der Monatsniederschlagssummen bei der Indikatorberechnung verwendet.

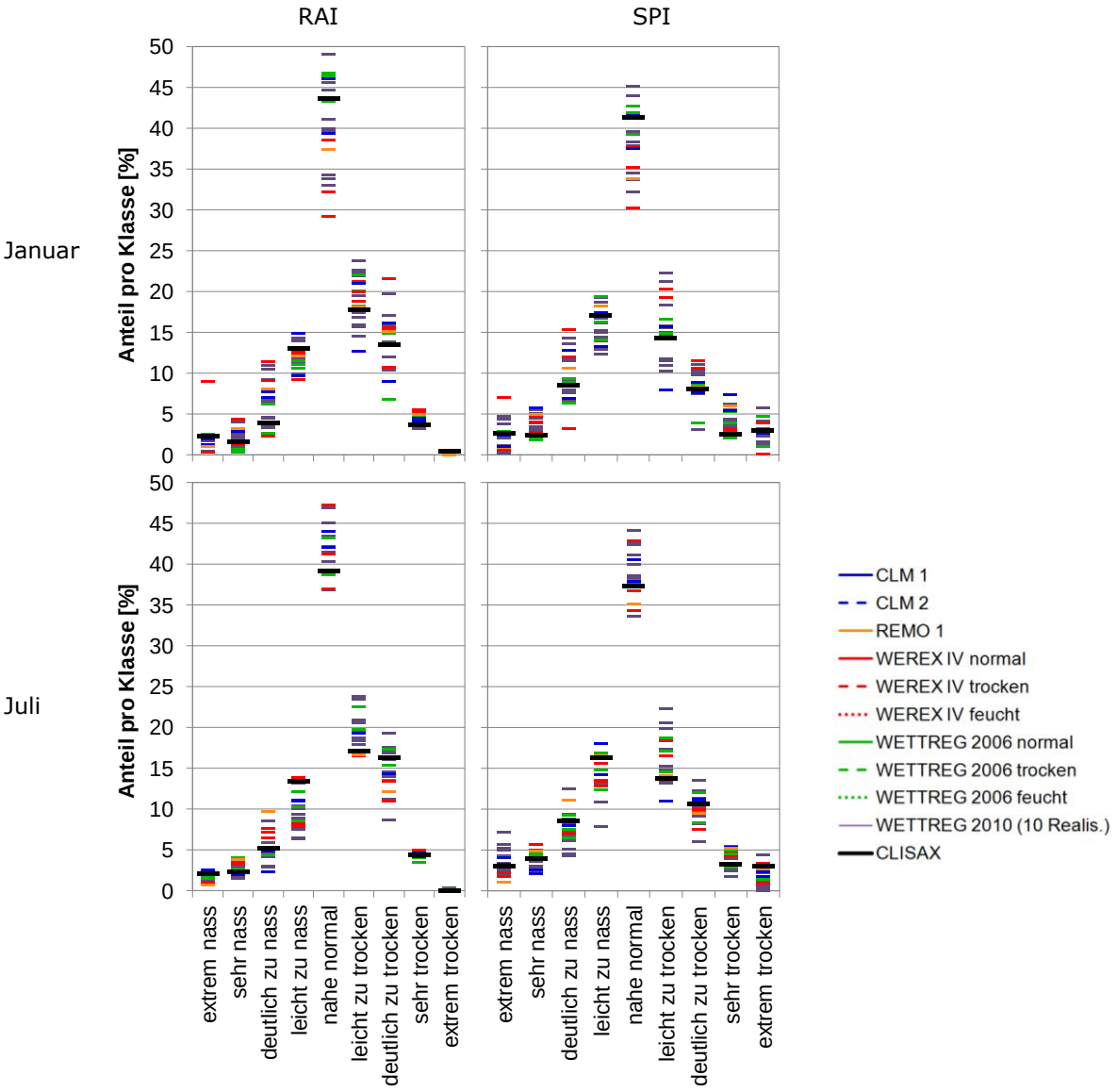


Abbildung 33: Häufigkeitsverteilung des monatlichen Niederschlags im Januar (oben) und Juli (unten) anhand der zwei Niederschlagsanomalienindikatoren RAI (links) und SPI (rechts) in den Beobachtungsdaten sowie 19 regionalen Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B gemittelt über die REGKLAM-Modellregion für den Validierungszeitraum 1961–2000

Tabelle 9: Einteilung der Häufigkeitsklassen des SPI und RAI nach den Originalautoren im Vergleich zur in diesem Bericht verwendeten Einteilung

Originaldefinition (McKee et al. 1993)		Originaldefinition (Van Rooy 1965)		hier verwendete Klasseneinteilung	
SPI-Wert	**Bezeichnung**	**RAI-Wert**	**Bezeichnung**	**SPI**	**RAI**
-		≥ 3,00	Extrem nass	≥ 2,00	≥ 4,00
-		2,00 bis 2,99	Sehr nass	1,50 bis 1,99	3,00 bis 3,99
-		1,00 bis 1,99	Deutlich zu nass	1,00 bis 1,49	2,00 bis 2,99
-		0,50 bis 0,99	Leicht zu nass	0,50 bis 0,99	1,00 bis 1,99
-		-0,49 bis 0,49	Nahe normal	-0,49 bis 0,49	-0,99 bis 0,99
0 bis -0,99	Leichte Dürre	-0,99 bis -0,50	Leicht zu trocken	-0,99 bis -0,50	-1,99 bis -1,00
-1,00 bis -1,49	Mäßige Dürre	-1,99 bis -1,00	Deutlich zu trocken	-1,49 bis -1,00	-2,99 bis -2,00
-1,50 bis -1,99	Starke Dürre	-2,99 bis -2,00	Sehr trocken	-1,99 bis -1,50	-3,99 bis -3,00
≤ -2,00	Extreme Dürre	≤ -3,00	Extrem trocken	≤ -2,00	≤ -4,00

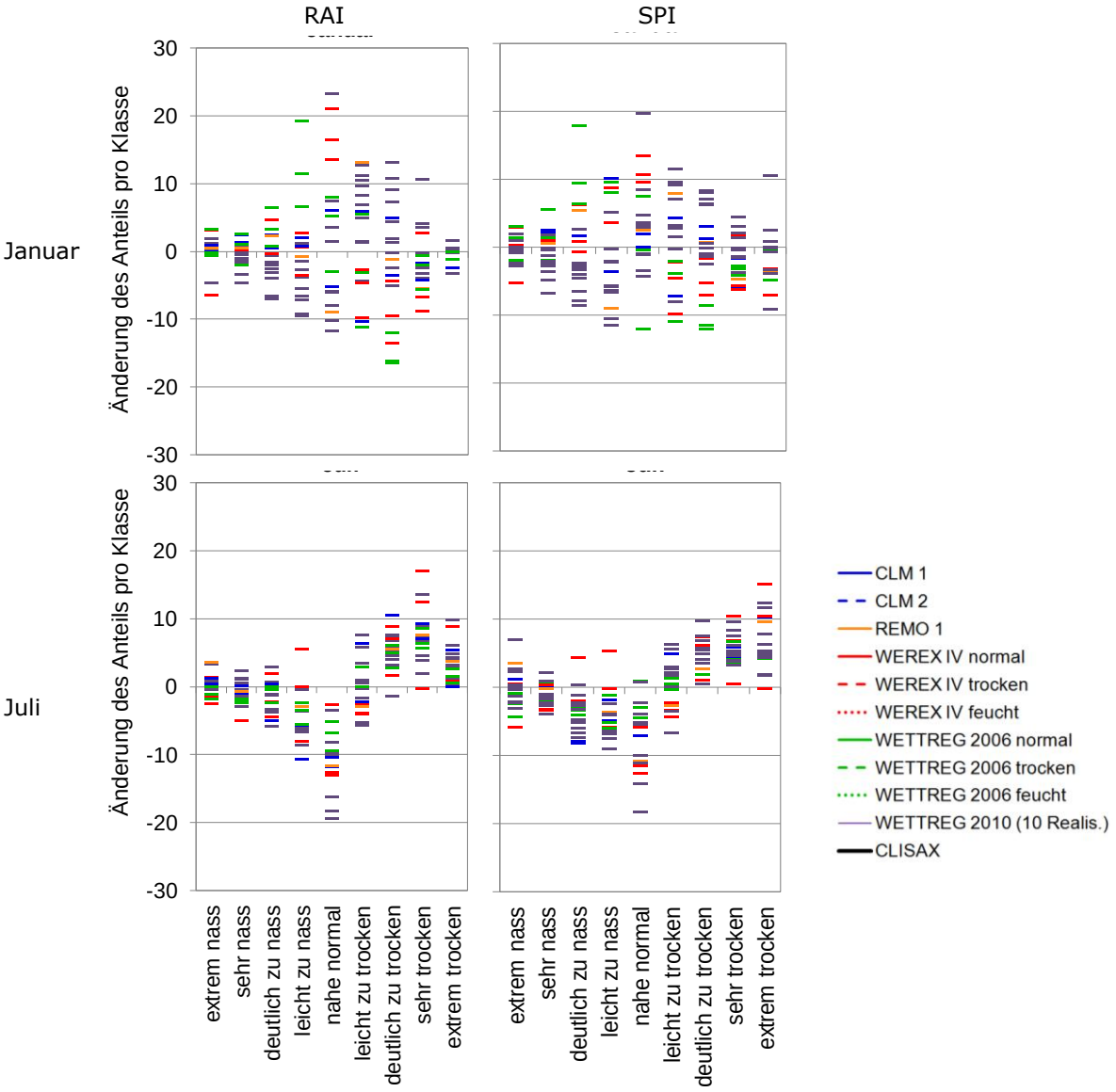


Abbildung 34: Änderungssignale der Niederschlagsverteilung anhand der Indikatoren RAI (links) und SPI (rechts) von 19 regionalen Klimaprojektionen (fünf Modelle) unter dem Szenario A1B für 2071–2100 gegenüber 1961–1990 für die REGKLAM-Modellregion, ermittelt aus den individuellen Änderungssignalen aller Daten- bzw. Gitterpunkte

Trotz der leichten Verschiebungen in den Häufigkeitsklassen im Validierungszeitraum 1961–2000 sind die durch beide Indikatoren projizierten Änderungssignale recht ähnlich (Abbildung 34), so dass man für beide Indikatoren zu nahezu identischen Aussagen kommt. Für den Winter – hier durch den Beispielmonat Januar repräsentiert – sieht man bei beiden Indikatoren hauptsächlich die Unterschiede in den für 2071–2100 projizierten Änderungssignalen zwischen WETTREG 2010 und den anderen Regionalmodellen. Auch für den Sommer – Beispielmonat Juli – sind die Bandbreite der Änderungssignale sowie deren mittlere Größe für die beiden Niederschlagsanomalienindikatoren sehr gut miteinander vergleichbar.

Tabelle 10 zeigt den Vergleich der von 19 regionalen Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B für den SPI und den RAI berechneten jahreszeitlichen Änderungssignale für das Ende des 21. Jahrhunderts. Trotz der unterschiedlichen Skalierung der beiden Indikatoren zeigt sich, dass sie die relative Größe der Änderungssignale vergleichbar wiedergeben. Um das zu illustrieren, wurde eine Farbskala verwendet, die jeweils an das gesamte Kollektiv der Änderungssignale des RAI bzw. des SPI „angepasst" wurde. Das jeweils kleinste Änderungssignal (Trockenheitstrend) wird mit der gleichen dunkelroten Farbe dargestellt, „Weiß" bedeutet für beide Indikatoren keine Veränderung und der dunkelste Blauton entspricht jeweils einem vom Betrag her zu dem größten Trockenheitssignal gleich großen Änderungssignal in Richtung nasser Bedingungen.

Aus diesem Blickwinkel heraus gesehen und unter Beachtung der erheblichen Bandbreite der Änderungssignale einzelner regionaler Klimaprojektionen kann davon ausgegangen werden, dass der RAI ausreichend „robuste" Ergebnisse für die Bewertung zukünftiger Trockenheitstrends liefert. Die deutlich komplexere Berechnung des SPI bringt keine nennenswerten Vorteile.

Tabelle 10: Vergleich der jahreszeitlichen Änderungssignale der mittels zweier verschiedener Indikatoren (RAI: Rainfall Anomaly Index, SPI: Standardized Precipitation Index) beschriebenen Veränderungen in den Niederschlagsanomalien in der Zeitscheibe 2071–2100 im Vergleich zu 1961–1990 für 19 regionale Klimaprojektionen; Mittelwerte der REGKLAM-Modellregion werden über eine Farbskala von Rot (starker Niederschlagsrückgang) über Weiß (keine Veränderung) zu Blau (deutlicher Niederschlagsanstieg) illustriert

		Frühjahr		Sommer		Herbst		Winter	
		RAI	SPI	RAI	SPI	RAI	SPI	RAI	SPI
2071–2100	CLM R1	1.38	0.29	-1.11	-0.46	0.15	0.05	0.67	0.28
	CLM R2	0.67	0.23	-1.33	-0.60	-0.43	-0.19	1.22	0.40
	REMO R1	0.82	0.25	-1.18	-0.56	0.04	-0.02	0.66	0.23
	WEREX IV nor	-0.14	-0.04	-1.60	-0.61	-0.99	-0.36	0.37	0.13
	WEREX IV tro	-0.81	-0.24	-1.27	-0.42	-0.69	-0.22	0.18	0.09
	WEREX IV feu	-0.38	-0.13	-2.00	-0.65	-0.37	-0.09	0.11	0.11
	WETTREG 2006 nor	-0.18	-0.06	-1.11	-0.41	-0.94	-0.34	0.01	0.04
	WETTREG 2006 tro	-0.16	-0.09	-1.82	-0.68	-1.33	-0.45	1.47	0.63
	WETTREG 2006 feu	0.24	0.07	-1.14	-0.49	-0.79	-0.33	0.11	0.02
	WETTREG 2010 R00	-0.34	-0.05	-1.36	-0.48	-0.27	-0.08	-0.73	-0.21
	WETTREG 2010 R11	-0.64	-0.17	-1.46	-0.51	-1.42	-0.36	-0.96	-0.23
	WETTREG 2010 R22	-0.65	-0.20	-0.53	-0.25	-0.54	-0.13	-0.74	-0.03
	WETTREG 2010 R33	-0.10	-0.05	-1.72	-0.68	-0.22	-0.05	-0.97	-0.19
	WETTREG 2010 R44	-0.41	-0.10	-0.68	-0.22	-0.44	-0.15	-1.44	-0.43
	WETTREG 2010 R55	-0.15	-0.07	-0.93	-0.41	-0.93	-0.27	-1.79	-0.40
	WETTREG 2010 R66	-0.87	-0.31	-2.10	-0.77	-0.38	-0.10	-1.32	-0.45
	WETTREG 2010 R77	-0.69	-0.17	-1.08	-0.42	-1.10	-0.31	-0.90	-0.29
	WETTREG 2010 R88	-0.33	-0.03	-1.62	-0.54	-0.26	0.00	-1.02	-0.37
	WETTREG 2010 R99	-0.56	-0.15	-1.40	-0.60	-0.59	-0.14	-1.50	-0.52

4.3.5 Veränderung auf langfristigen Zeitskalen

Veränderungen in den mittleren Niederschlagsverhältnissen sowie Verschiebungen in der Verteilung des Niederschlags auf längeren als monatlichen oder jahreszeitlichen Zeitscheiben können anhand des SPI für längere Perioden untersucht werden. Der SPI wurde nicht nur auf der monatlichen Zeitskala berechnet, sondern auch für 3-, 6-, 9-, 12- und 24-Monatssummen des Niederschlags. Für längere Zeitskalen berechnete Niederschlagsanomalien werden relevant, wenn es um die Auswirkungen eines Niederschlagsdefizites oder Überangebotes für tiefere Wasserspeicher (z.B. Grundwasser) geht. Umfangreiche Auswertungen der projizierten Veränderungen in den SPI-Werte wurden für die Zeitschritte von 1 Monat, 6 Monaten und 12 Monaten durch Anne Hänig im Rahmen ihrer Bachelorarbeit vorgenommen und sind dort (Hänig 2012) nachzulesen. Wie schon im Abschnitt 4.3.4 dargelegt, sind die Ergebnisse des SPI für den Zeitschritt von einem Monat sehr ähnlich denen des RAI, welche in diesem Bericht ausführlich in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.2 beschrieben wurden.

Beispielhaft für die längeren Zeitskalen werden hier ausgewählte Ergebnisse für den SPI mit einem Zeitschritt von zwölf Monaten diskutiert. Der SPI wurde für jede der zwölf möglichen Zwölfmonatszeiträume berechnet. Da jeder dieser zwölf Werte das gesamte Jahr umfasst, sind sich diese untereinander sehr ähnlich. Daher werden die zwölf Werte hier nicht separat dargestellt, sondern nur als Mittelwert aus allen Einzelwerten. Die Häufigkeitsverteilung im Validierungszeitraum ist ähnlich derjenigen für die monatlichen SPI-Werte (Abbildung 35). In den für die Mitte und das Ende des 21. Jahrhunderts projizierten Änderungssignalen spiegelt sich das „Sommersignal" deutlich wieder. Zu nasse bis hin zu normalen Niederschlagsbedingungen nehmen tendenziell ab und die trockenen Klassen zu, wobei die Signale bei den statistischen Modelle deutlich größer ausfallen als für die physikalischen Modelle. Dies spiegelt sich auch in der Zeitreihendarstellung des Verlaufs der SPI-Werte im 21. Jahrhundert wieder (Abbildung 36). Insgesamt sind die Ergebnisse wiederum sehr gut vergleichbar zu denen des auf Jahresbasis berechneten RAI. Da die zusätzliche Berechnung des SPI für verschiedene Zeitskalen wenig neue Informationen bringt, kann auf sie verzichtet werden.

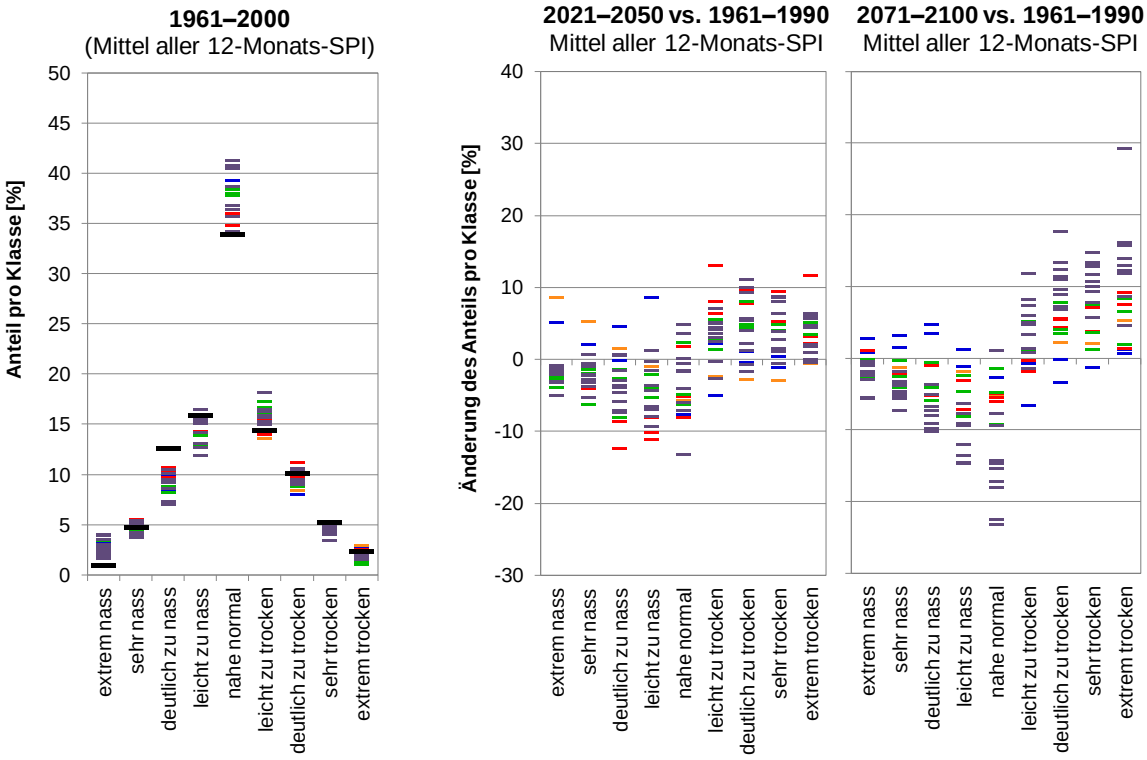


Abbildung 35: Häufigkeitsverteilung der SPI-Klassen gemittelt für alle 12-Monats-SPI der REGKLAM-Modellregion im Validierungszeitraum (1961–2000; links) sowie deren Änderungssignale in den Zeitscheiben 2021–2050 (Mitte) und 2071–2100 (rechts) im Vergleich zur Referenzperiode 1961–1990

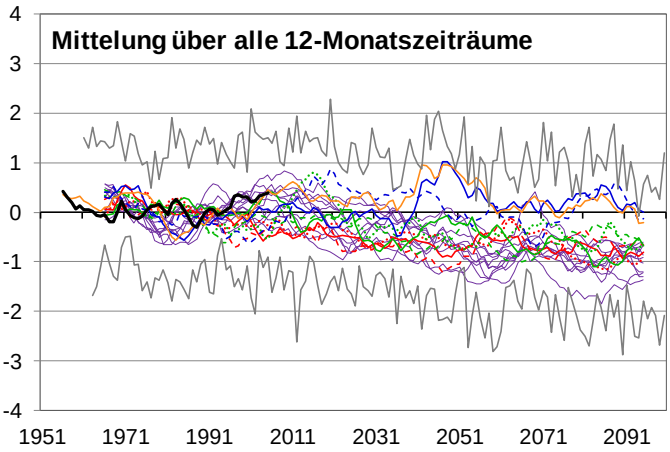


Abbildung 36: Zeitlicher Verlauf (11-jähriges gleitendes Mittel) des 12-Monats-SPI (gemittelt über alle 12-Monatszeiträume und die REGKLAM-Modellregion) für die Beobachtungsdaten (1951–2010) und 19 regionale Klimaprojektionen (1961–2100) unter dem Szenario A1B

4.4 Trockentage und Trockenphasen

In diesem Unterkapitel werden die Ergebnisse aus vier regionalen Klimaprojektionen (CLM, REMO, WEREX IV und WETTREG 2006) zu täglichen Niederschlagswerten hinsichtlich der simulierten Veränderungen in der Häufigkeit von Trockentagen und Trockenphasen sowie der Andauer von trockener Phasen dargestellt.

Trockene Tage sind hier als solche mit weniger als 1 mm Niederschlag definiert. Es wird davon ausgegangen, dass derart geringe Niederschläge aufgrund von Interzeption und Verdunstung nicht abflusswirksam werden. Diese vereinfachte Verstellung ist insbesondere für das Winterhalbjahr kritisch zu hinterfragen. Die Veränderung der Zahl trockener Tage in den Klimaprojektionen wird in Abschnitt 4.4.1 dargestellt.

Unter einer Trockenperiode verstehen wir hier die Aufeinanderfolge trockener Tage. Dabei werden zwei grundlegende Konzepte unterschieden. Zum Einen werden Trockenzeiten ab einer Länge von einem Tag untersucht (nachfolgend als Trockenphase bezeichnet). Dabei wird untersucht, inwieweit Veränderungen in der Persistenz trockener Zustände auftreten, sich also die Häufigkeit verschiedener Trockenphasenandauern verändert (s. Abschnitt 4.4.2). Zum anderen werden Veränderungen in der Häufigkeit Andauer von Trockenzeiten ab einer Dauer von mindestens elf Tagen betrachtet; die sogenannten meteorologischen Trockenperioden (s. Abschnitt 4.4.3).

4.4.1 Veränderungen in der Zahl trockener Tage (ohne WETTREG 2010)

Vergleich zwischen Beobachtungs- und Modelldaten für den Kontrollzeitraum 1961–2000

Wie schon im REGKLAM-Heft 2 (Bernhofer et al. 2011) beschrieben, sind insbesondere die Niederschläge der dynamischen Regionalmodelle nur eingeschränkt mit den auf Stationsbasis vorgenommenen Niederschlagsbeobachtungen zu vergleichen. Grundsätzlich liefern sie höhere Niederschlagswerte als die Beobachtungen, weshalb auf die Modelldaten Biaskorrekturen angewendet wurden (siehe Bernhofer et al. 2011). Trotz der Biaskorrekturen, die v.a. bei CLM auf der aggregierten Ebene von Jahresniederschlägen recht erfolgreich sind, überschätzen die Modelle den Niederschlag vor allen in den Sommermonaten. Damit geht tendenziell eine Unterschätzung der Trockentage einher.

Im Mittel treten in der REGKLAM-Modellregion 244 trockene Tage pro Jahr auf (Abbildung 37). Diese sind in etwa zu gleichen Teilen auf das Sommer- und das Winterhalbjahr verteilt. Am häufigsten sind Trockentage während des Herbstes (ca. 64 d), während sie im Winter die geringste Häufigkeit (ca. 58 d) aufweisen. Grundsätzlich liegen die statistischen Modelle näher an den Beobachtungen als die dynamischen Modelle, welche tendenziell zu wenig trockene Tage generieren. Im Sommer neigen alle Modelle zu einer leichten Unterschätzung der Häufigkeit von Trockentagen.

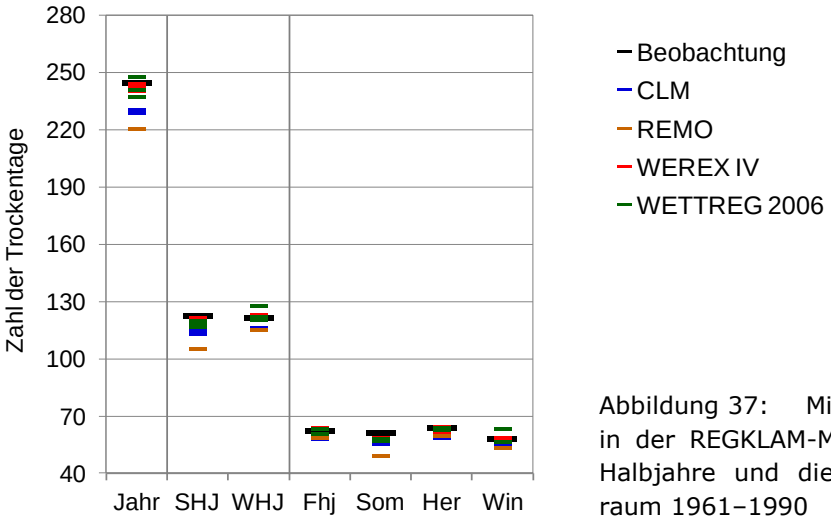


Abbildung 37: Mittlere Zahl an Trockentagen in der REGKLAM-Modellregion für das Jahr die Halbjahre und die Jahreszeiten, Referenzzeitraum 1961–1990

CLISAX (Beobachtung)

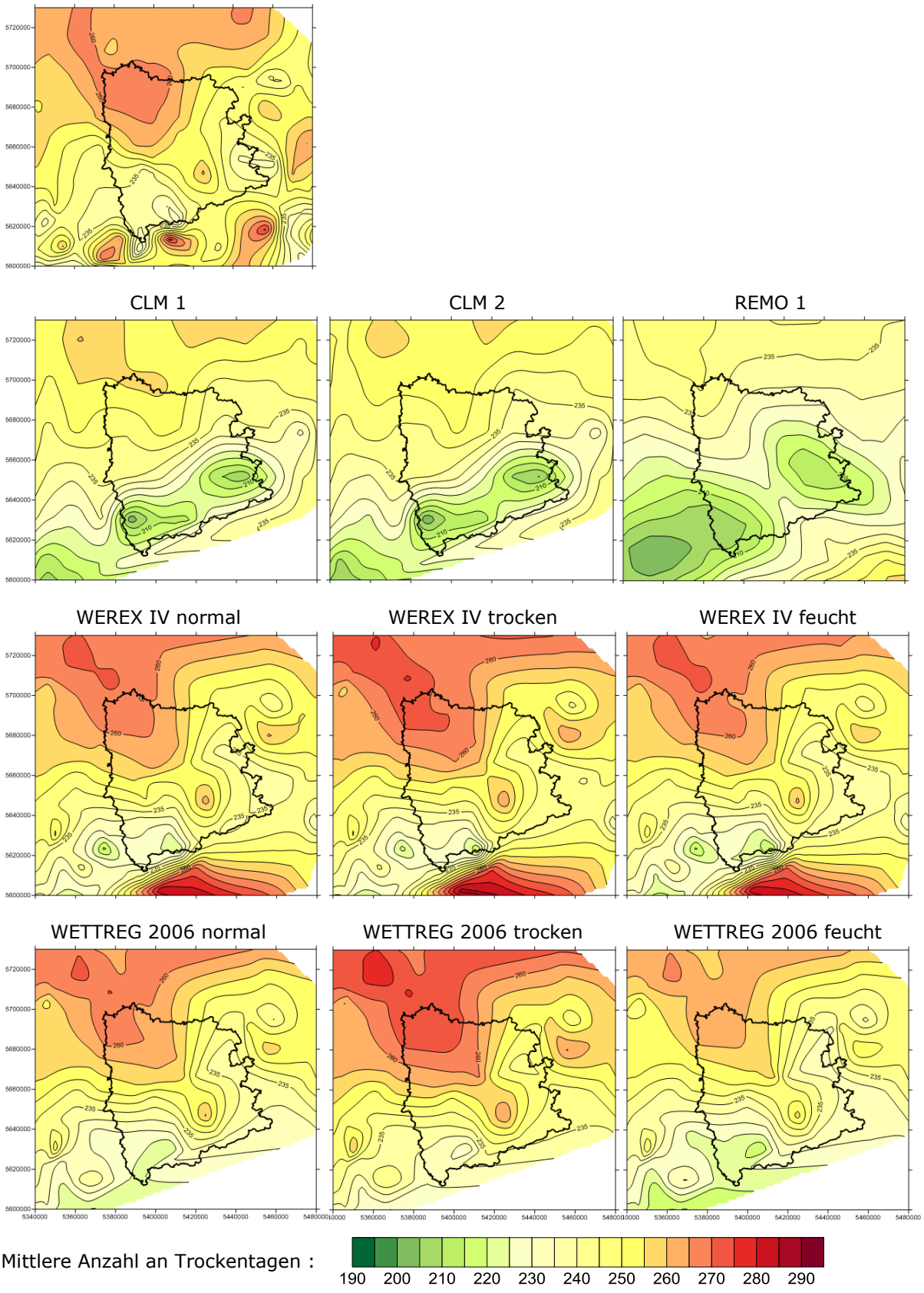


Abbildung 38: Kartendarstellung der mittleren Zahl an Trockentagen pro Jahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe; Referenzzeitraum 1961–1990

Abbildung 38 zeigt mittels des Programms SURFER (Interpolationsmethode: Natural Neighbour) erzeugte Kartendarstellungen der jährlichen Trockentagsanzahl für den Zeitraum 1961–1990. Es ist zu beachten, dass die Ergebnisse der dynamischen Modelle nicht in Form von Rasterdaten dargestellt sind, sondern ebenso wie die Ergebnisse der statistischen Modelle räumlich interpoliert wurden. Weiterhin ist zu beachten, dass das Interpolationsverfahren die wirklichen Verhältnisse und Abhängigkeiten stark vereinfacht (z.B. Höhenabhängigkeit nicht berücksichtigt). Daher sind die Kartendarstellungen als Anhaltspunkt für die räumlichen Charakteristika von Trockentagen zu verstehen. Kleinregionale Besonderheiten sind nicht zu interpretieren. Dies trifft insbesondere auf die Randbereiche zu, wo keine Daten für die Interpolation vorliegen. In der obersten Zeile von Abbildung 38 ist die aus den Beobachtungsdaten abgeleitete Referenz darstellt zu der die Modelläufe in den drei weiteren Zeilen verglichen werden können. Es zeigt sich, dass alle Modelle das grundsätzliche räumliche Muster der Trockentagshäufigkeit mit den meisten Trockentagen (beobachtet: ca. 260 d a^{-1}) im Bereich der Leipziger Tieflandsbucht und den wenigsten Trockentagen (beobachtet: ca. 230 d) im Bereich des Erzgebirges und des Zittauer Gebirges wiedergeben können.

Die dynamischen Modelle REMO und CLM unterschätzen die absolute Zahl der Trockentage deutlich – um bis zu mehr als 20 Tage pro Jahr. Dabei fällt die Unterschätzung im Sommer(halbjahr) zumeist größer aus als im Winterhalbjahr (Abbildung 37; Kartendarstellungen die Halbjahre siehe Anlage 1). Bei den statistischen Modellen erkennt man in der Referenzperiode die der Namensgebung der Läufe entsprechenden Unterschiede zwischen der trockenen, normalen und feuchten Realisierung. Vor allem im Modell WETTREG 2006 fällt der trockene Lauf im Tief- und Hügelland deutlich trockener aus als die Beobachtung. Im feuchten Lauf wird die Trockentagshäufigkeit um ca. 10 Tage unterschätzt. Die normale Realisierung gibt die beobachteten Verhältnisse zumeist recht gut wieder.

Projizierte Klimaänderungssignale im 21. Jahrhundert

Bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts projizieren die Modelle für die REGKLAM-Modellregion (Mittelwert aus den Daten- bzw. Gitterpunkten) leichte Anstiege in der Häufigkeit trockener Tage pro Jahr, die sich zum Ende des 21. Jahrhunderts noch deutlich verstärken (Abbildung 39). Für die Zeitscheibe 2071–2100 liegen die Veränderung im Bereich von ca. +1 bis +6%, was bei einer mittleren Trockentagshäufigkeit von 244 Tagen pro Jahr einer Zunahme von ca. 2 bis 15 Tagen entspricht. Diese Anstiege sind insbesondere auf die Veränderungen innerhalb des Sommerhalbjahres zurückzuführen (ca. +5–11,5%; +5–14 Trockentage) und treten in den Sommermonaten (Juni bis August) am deutlichsten hervor (ca. +10–19%, +6–12 d). Für das Winterhalbjahr sind weder für die Mitte noch für das Ende des 21. Jahrhunderts klare Änderungssignale sichtbar. Die Modelle projizieren für die Zeitscheibe 2071–2100 Änderungssignale im Bereich von etwa -4 bis +2% (ca. -5 bis +3 d). Für den Winter (Dezember bis Februar) simulieren die meisten Modelle einen Rückgang trockener Tage von im Mittel ca. -3% (-2 d) und maximal ca. -13% (-7,5 d). Nur drei Modellläufe (REMO 1, A1B sowie WETTREG 2006 normal, A1B und B1) projizieren

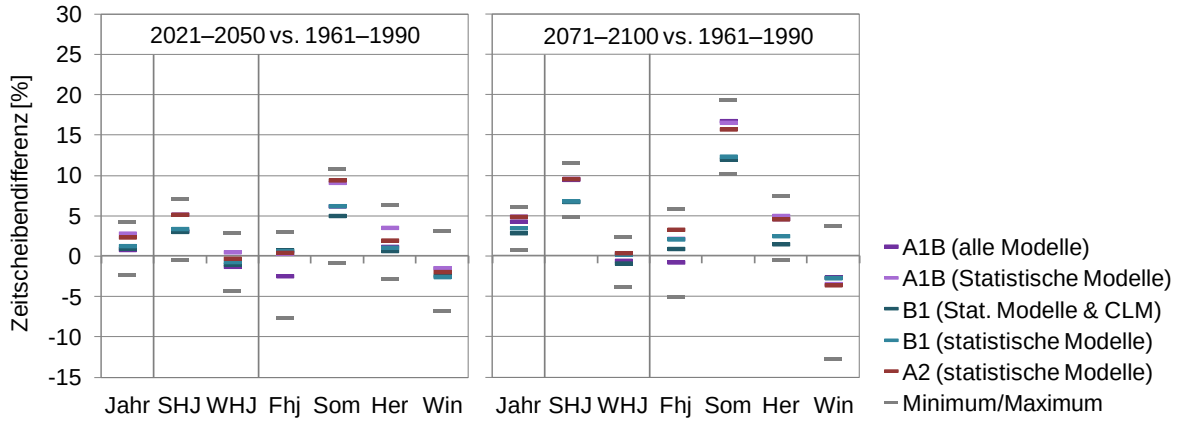


Abbildung 39: Mittlere (für die drei Szenarien) sowie minimale und maximale (aus allen Modellläufen und Szenarien) Änderungssignale der Trockentagshäufigkeit in den Jahreszeiten und Halbjahren für die Zeitscheiben 2021–2050 (links) und 2071–2100 (rechts)

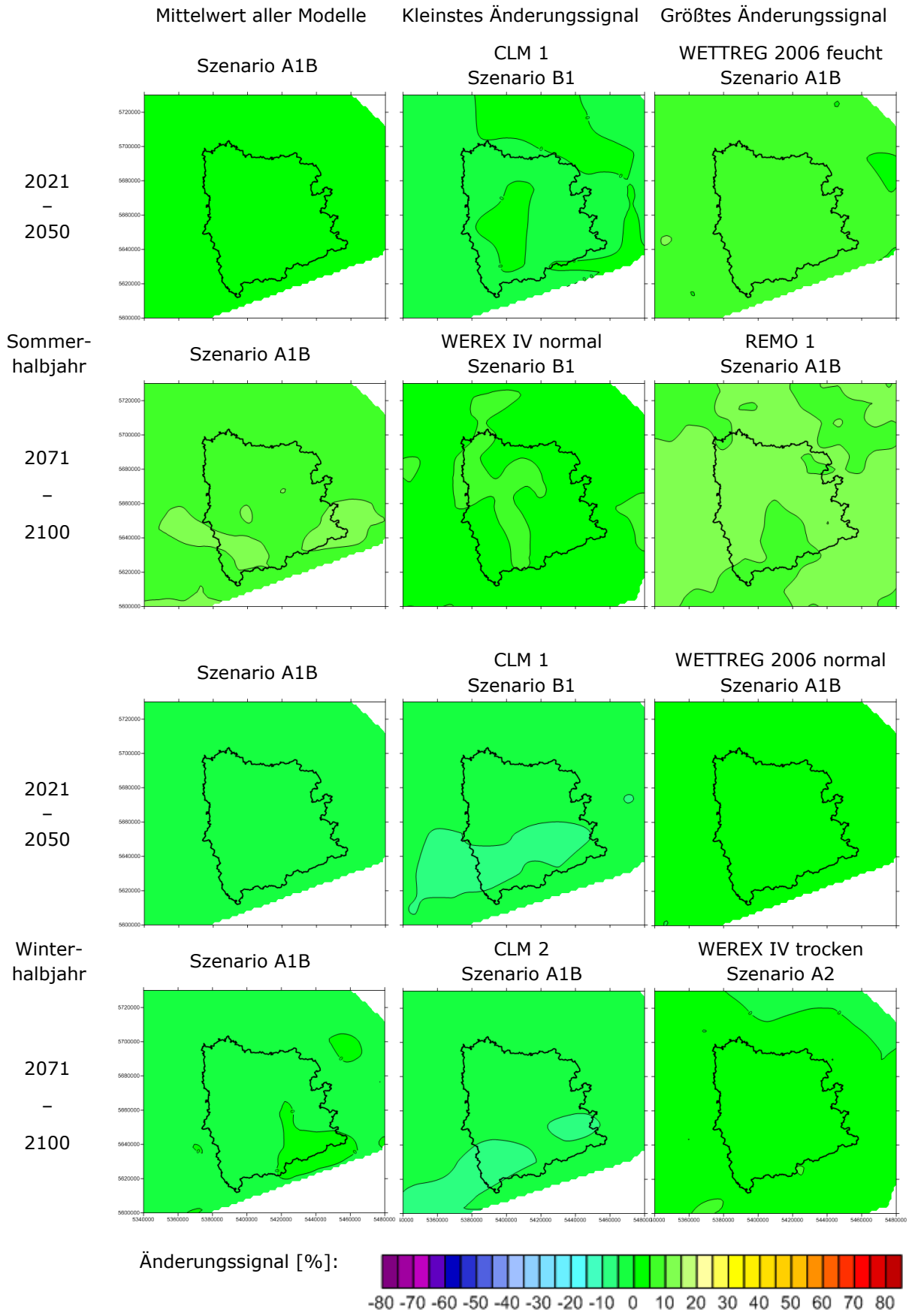


Abbildung 40: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der mittleren Zahl an Trockentagen im Sommer- und Winterhalbjahr für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modelle) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien

Zunahmen von bis zu ca. +4% (+2 d). Der Einfluss der SRES-Emissionsszenarios auf die Größe der Veränderungen ist bei den Trockentagen weniger stark ausgeprägt als bei der Temperatur. Tendenziell nimmt die Häufigkeit trockener Tage unter den Szenarios A1B und A2 etwas stärker zu als unter dem moderateren Szenario B1. Der Einfluss des Emissionsszenarios tritt dabei im zweiten Projektionszeitraum deutlicher zu Tage.

Bisher wurden für die REGKLAM-Modellregion gemittelte Werte dargestellt und diskutiert. Um eventuelle räumliche Differenzierungen in den Trendsignalen zu verdeutlichen wurden mittels des Programms SURFER ähnlich wie für die Modellvalidierung interpolierte Karten erzeugt. Dabei wird jeweils der Mittelwert aus allen Modellmittelwerten für das Szenario A1B sowie das kleinste und größte Änderungssignal aus allen Modellen und Szenarios dargestellt. Für alle Kartendarstellungen in diesem Kapitel wurde die gleiche Farbskala der Trends verwendet. Dabei wurden für Signale im Bereich von ±10% grüne Farbtöne verwendet, die für positive Trends über Gelb und Orange in Rot übergehen und für negative Trends über Blau und Violett ins Pink.

In den Kartendarstellungen für die beiden Halbjahre (Abbildung 40) sowie die Jahreszeiten (Anlage 2) zeigen sich kaum konsistente räumliche Differenzierungen in den Änderungssignalen (bei einer Schrittweite des Änderungssignals von 2,5%). Dies trifft insbesondere für die aus allen Modellen unter dem Szenario A1B gemittelten Änderungssignale zu. Die beobachteten Unterschiede in der Trockentagshäufigkeit zwischen Tiefland und Mittelgebirge bleiben laut der Modelle also auch in Zukunft bestehen. Auffällig in den Kartendarstellungen sind die geringen Unterschiede in der Größe der Änderungssignale für die beiden Zeithorizonte 2021–2050 und 2071–2100 während des Winterhalbjahres. Dagegen wird für das Sommerhalbjahr die schon beschriebene Intensivierung der Zunahme trockener Tage zum Ende des 21. Jahrhunderts hin deutlich.

Zusammenfassung

Die dynamischen Modelle unterschätzten im Referenzzeitraum 1961–1990 die beobachteten Trockentagshäufigkeiten. Am deutlichsten wird dies für das Modell REMO in den Sommermonaten. Auch die anderen Modelle neigen im Sommer eher zur Unterschätzung und im Winter zur leichten Überschätzung der Häufigkeit trockener Tage. Dennoch sind alle Modelle grundsätzlich in der Lage die räumlichen Muster der beobachteten Trockentagsanzahl wiederzugeben. Die Modelle projizieren eine Zunahme von Trockentagen insbesondere im Sommer(halbjahr), die sich von der Mitte zum Ende des 21. Jahrhunderts hin intensiviert. Eine ausgeprägte räumliche Differenzierung der Trends ist nicht sichtbar. Im Winterhalbjahr werden keine konsistenten Veränderungen projiziert. Leichte Rückgänge in der Häufigkeit trockener Tage sind unter den verwendeten Projektionen im Winter am wahrscheinlichsten.

4.4.2 Häufigkeit und Dauer von Trockenphasen

Vergleich zwischen Beobachtungs- und Modelldaten für den Kontrollzeitraum 1961–2000

Die durchschnittlich 244 trockenen Tage pro Jahr ordnen sich in der REGKLAM-Modellregion im Mittel zu 59 Trockenphasen an (Abbildung 41), die im Mittel 4,2 Tage lang sind (Abbildung 42, links). Die maximale Dauer betrug im Zeitraum 1961–1990 im Mittel 21,2 Tage (Abbildung 42, rechts). Erwartungsgemäß werden diese Charakteristika durch die statistischen Modelle besser wiedergegeben als durch die dynamischen. REMO und CLM überschätzen trotz ihrer Unterschätzung der Zahl trockener Tage die Häufigkeit von Trockenphasen. Dies liegt an den deutlich kürzeren Trockenphasen, welche diese Modelle generieren. Im Mittel sind die Trockenphasen pro Jahr in den dynamischen Modellen nur 3,5 bis 3,8 Tage lang (etwa 10–17% Unterschätzung). Hinsichtlich der maximalen Trockenphasenlänge liegen die dynamischen Modelle mit 19 d (CLM 2) bis 21 d (REMO 1) näher an den Beobachtungen (1–10% Unterschätzung). In Form einer kumulativen Häufigkeitsverteilung ist die Häufigkeit von Trockenphasen in Abhängigkeit von ihrer Länge in Abbildung 43 dargestellt. Reichlich 80% aller Trockenphasen sind kürzer als eine Woche und ca. 60% höchstens drei Tage lang. Die größten Abweichungen der Modelle von den beobachteten Häufigkeiten sind für Trockenperiodenlängen zwischen ein und zwölf Tagen sichtbar. CLM und vor allem REMO überschätzen die Trockenphasenhäufigkeit in diesem Bereich deutlich. Abweichungen für die deutlich selteneren längeren Trockenphasen werden im Abschnitt 4.4.3 diskutiert.

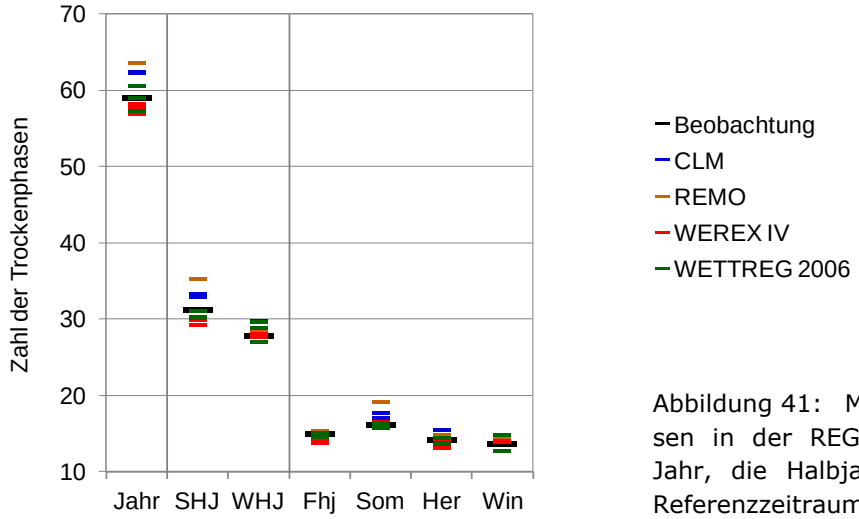


Abbildung 41: Mittlere Zahl an Trockenphasen in der REGKLAM-Modellregion für das Jahr, die Halbjahre und die Jahreszeiten; Referenzzeitraum 1961–1990

Über das Jahr gesehen treten die meisten Trockenphasen im Sommer(halbjahr) auf. Sie sind mit durchschnittlich 3,9 d jedoch deutlich kürzer als im Winter (4,3 d) und den Übergangsjahreszeiten (Frühjahr: 4,4 d; Herbst: 4,8 d). Die längsten Trockenphasen sind während der Herbstmonate zu erwarten (Ø: 16,6 d gegenüber 12,9 d im Sommer). Die maximale Dauer von Trockenphasen im Herbst wird jedoch durch alle Modelle unterschätzt. Grundsätzlich simulieren die Modelle für das Frühjahr, den Herbst und den Winter ähnliche Häufigkeiten und Andauern von Trockenphasen. Nur der Sommer unterscheidet sich mit häufigeren jedoch kürzeren Trockenphasen deutlich vom Rest des Jahres. Wie schon für das gesamte Jahr beschrieben, liegen die statistischen Modelle auch für die Jahreszeiten bzw. Halbjahre im Allgemeinen näher an den Beobachtungen als die dynamischen Modelle. So liegen generell einige der Läufe der statistischen Modelle über dem Beobachtungswert und einige darunter. Auffällig ist, dass alle drei WEREX IV-Läufe die Häufigkeit sowie maximale Länge von Trockenphasen im Frühjahr unterschätzen, während sie deren mittlere Andauer überschätzen. Im Winter tendieren sowohl WEREX IV als auch WETTREG 2006 zu einer Überschätzung der mittleren und maximalen Länge. CLM und REMO unterschätzen die mittlere Trockenphasendauer in allen Jahreszeiten, während sie tendenziell zu viele Trockenphasen generieren. REMO zeigt insbesondere im Sommer große Überschätzungen der Häufigkeit von Trockenphasen gepaart mit einer noch stärkeren Unterschätzung ihrer Andauer.

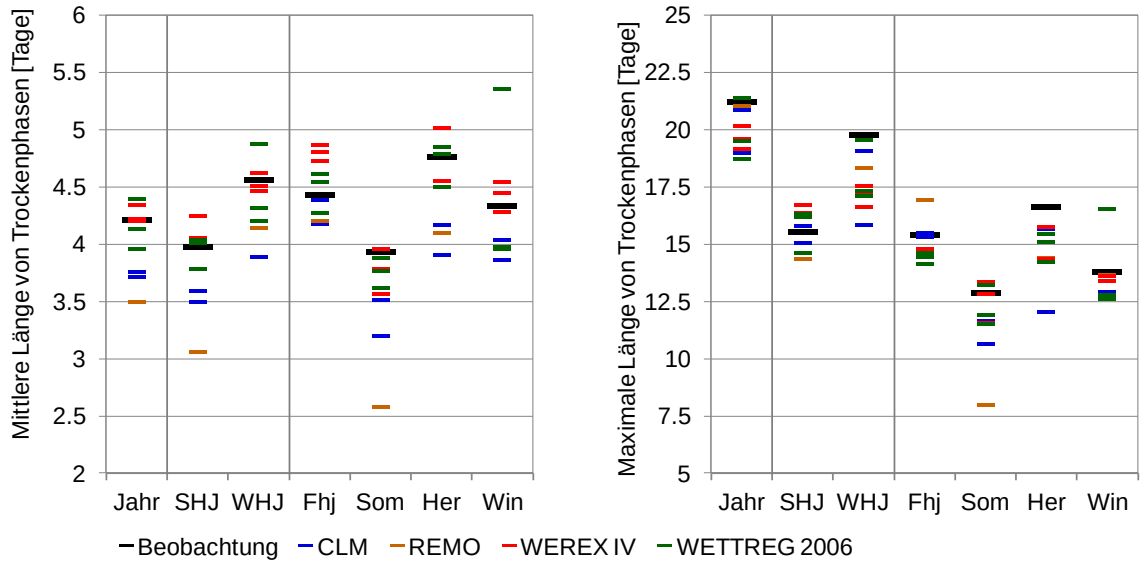


Abbildung 42: Mittlere (links) und maximale (rechts) Länge von Trockenphasen in der REGKLAM-Modellregion für das Jahr die Halbjahre und die Jahreszeiten, Referenzzeitraum 1961–1990

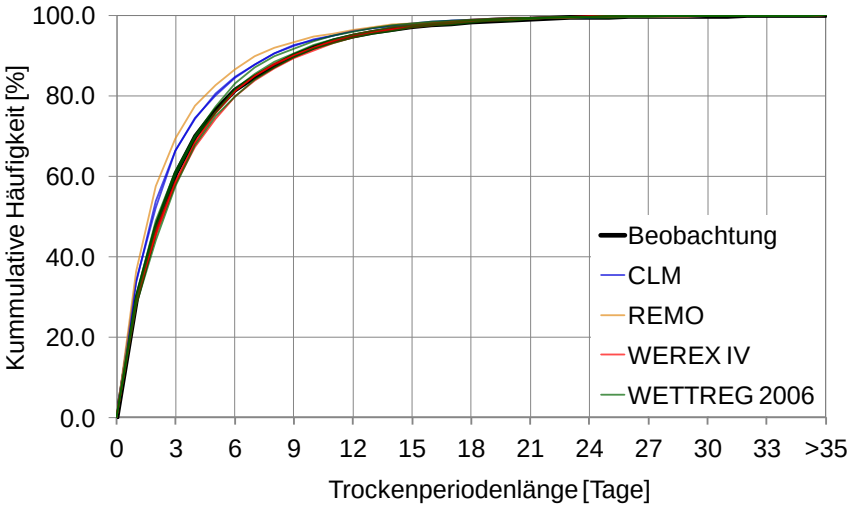


Abbildung 43: Kumulative Häufigkeitsverteilung der jährlichen Andauer von Trockenphasen, Referenzzeitraum 1961–1990

Abbildung 44 bis 46 zeigen Kartendarstellungen der jährlichen Häufigkeit sowie mittleren und maximalen Andauer von Trockenphasen für den Referenzzeitraum 1961–1990 (für mehr Informationen zur Methodik und Interpretierbarkeit der Karten siehe Abschnitt 4.4.1).

Grundsätzlich spiegeln sich die im Tiefland häufigeren Trockentage in längeren Trockenphasen wieder. Die Zunahme der Trockenphasendauer ist dabei überproportional groß, so dass im Tiefland weniger Trockenphasen beobachtet wurden als im Bergland. Dieses Verhalten wird durch alle Modelle in seinen Grundzügen wiedergegeben. Eine Ausnahme davon stellt das Modell REMO dar, welches kein sinnvoll interpretierbares räumliches Muster der Trockenphasenzahl liefert. Für die mittlere (weniger die maximale) Andauer von Trockenperioden simuliert auch REMO die erwarteten höhenlagenbedingten Unterschiede. Auffällig ist, dass REMO trotz seiner im Vergleich zu CLM höheren räumlichen Auflösung geringere räumliche Unterschiede simuliert als CLM.

Die Kartendarstellungen zeigen eine deutliche Unterschätzung der maximalen Trockenperiodenlänge in allen Höhenlagen mit Ausnahme der trockenen Läufe der beiden statistischen Modelle. Die Kartendarstellungen für die Halbjahre ähneln in ihren Aussagen denen für das gesamte Jahr (Anlage 3 bis 5). Auffällig ist für das Modell CLM die stärkere räumliche Differenzierung der Häufigkeit und mittleren Andauer von Trockenphasen innerhalb des Winterhalbjahres im Vergleich zum Sommerhalbjahr.

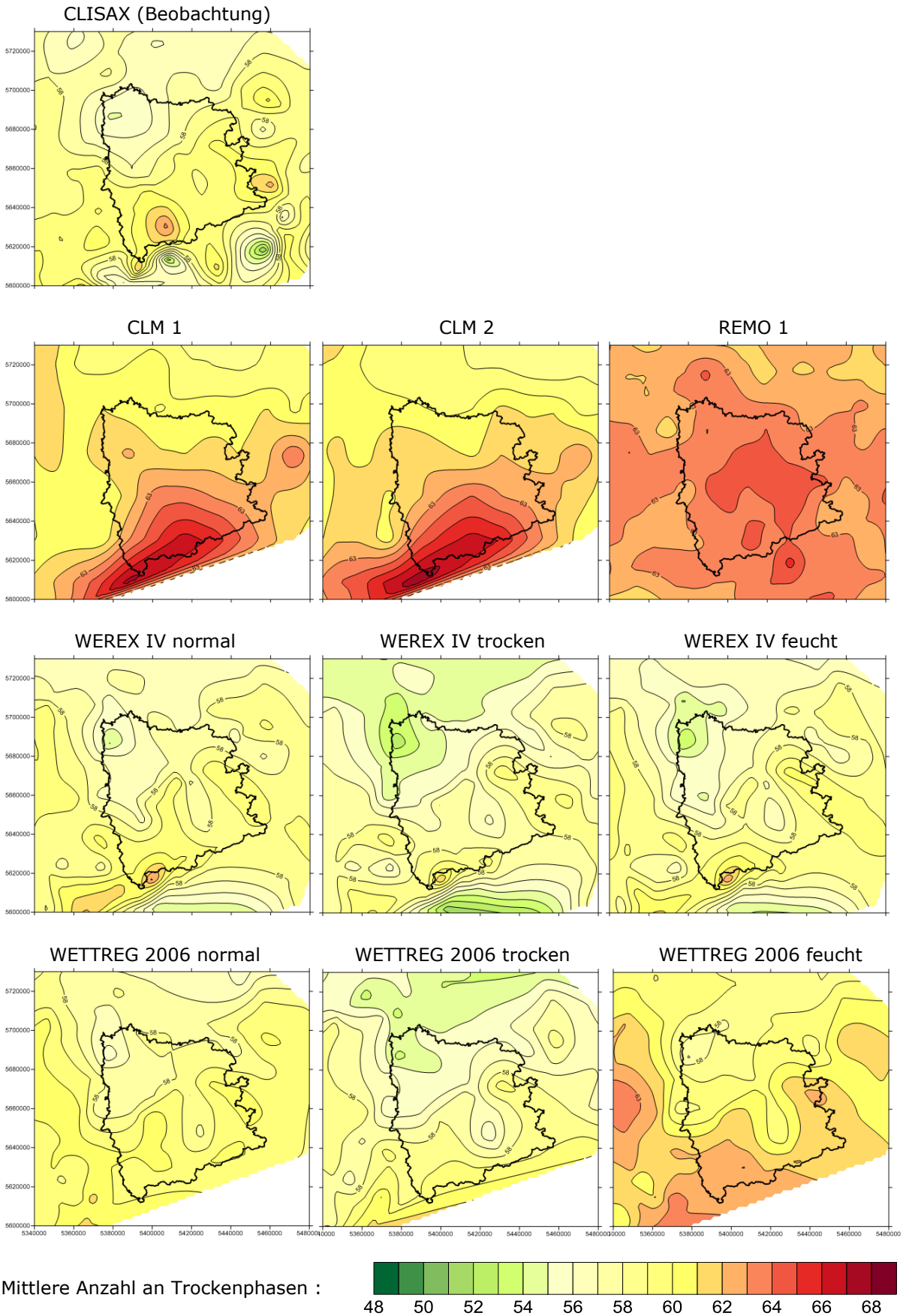


Abbildung 44: Kartendarstellung der mittleren Zahl an Trockenphasen pro Jahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe; Referenzzeitraum 1961–1990

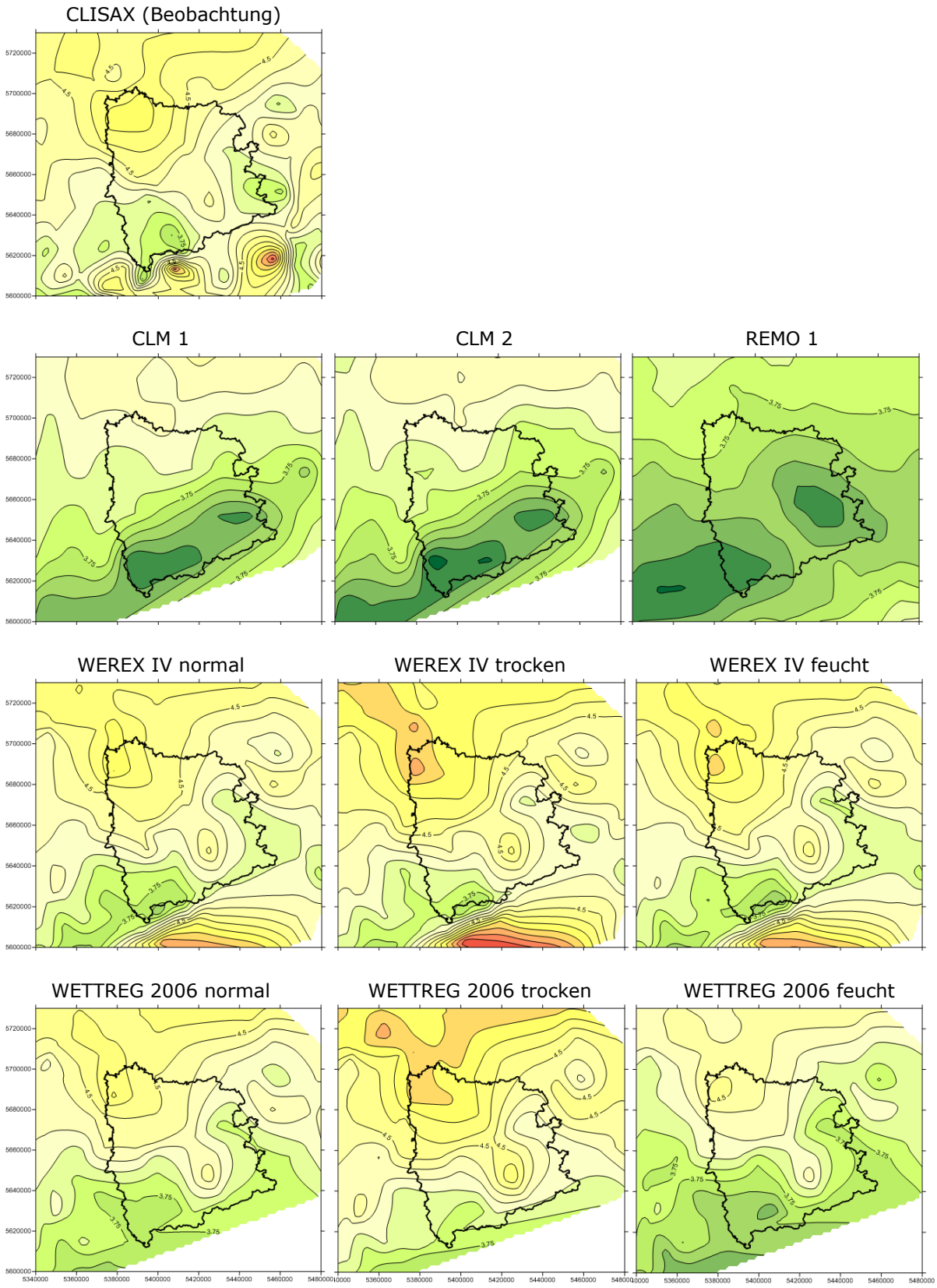


Abbildung 45: wie Abbildung 44, jedoch für die mittlere Länge von Trockenphasen

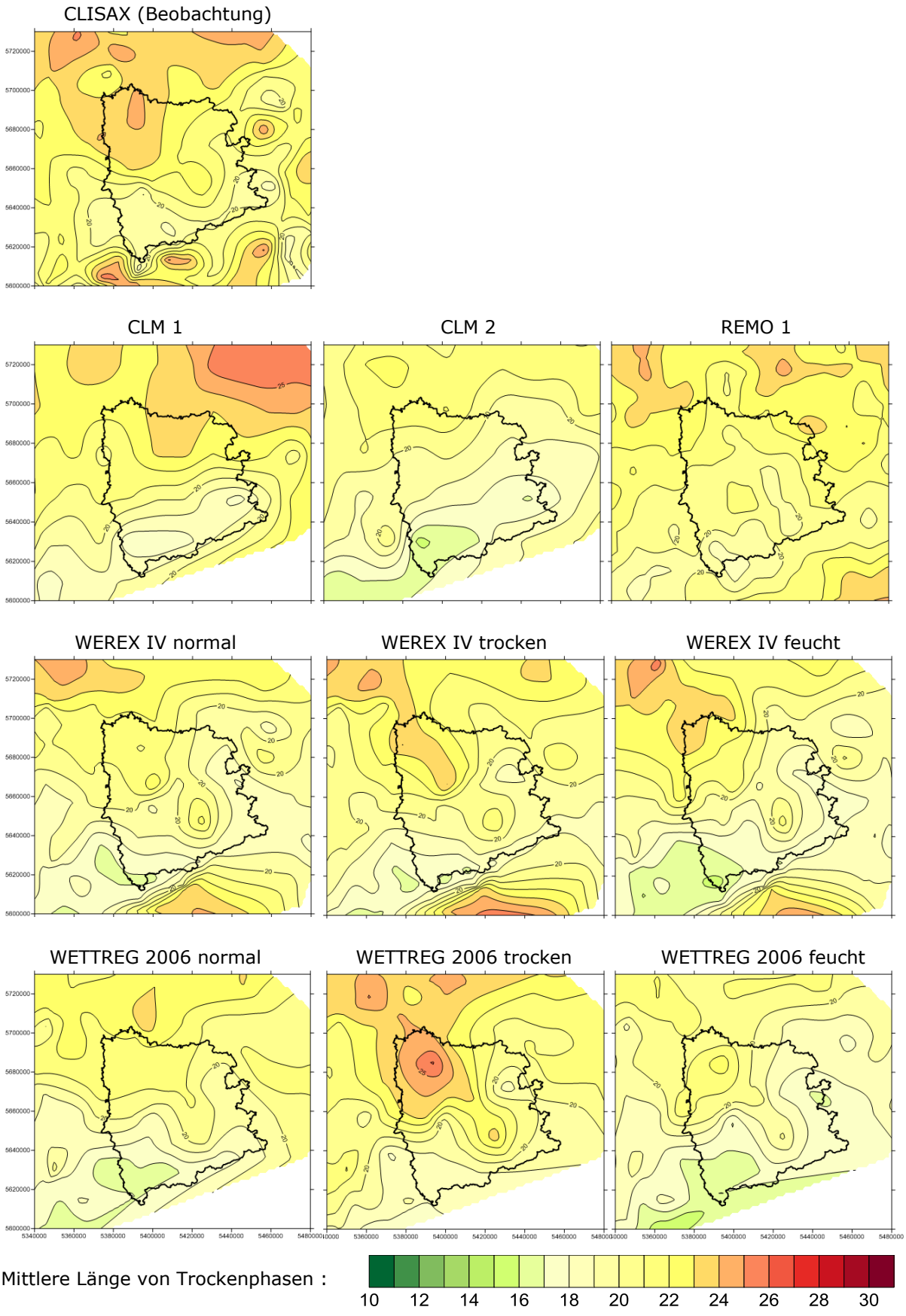


Abbildung 46: wie Abbildung 44, jedoch für die maximale Länge von Trockenphasen

Projizierte Klimaänderungssignale im 21. Jahrhundert

Über das gesamte Jahr betrachtet simulieren die Modelle sowohl für die Mitte als auch das Ende des 21. Jahrhunderts kaum Veränderungen in der Häufigkeit von Trockenphasen (Abbildung 47, oben). Die Änderungssignale sind für die Zeitscheibe 2071–2100 im Bereich von ±4% (etwa ±2,5 Trockenphasen). Auch die Änderungen der mittleren und maximalen Andauer von Trockenphasen sind über das gesamte Jahr gesehen im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961–1990 recht gering. Tendenziell simulieren die Modelle etwas längere Trockenphasen (bis knapp 10%), v.a. zum Ende des 21. Jahrhunderts hin. Es gibt jedoch immer auch Modellläufe, die Rückgänge projizieren.

Betrachtet man die Halbjahre bzw. Jahreszeiten ergibt sich ein deutlich differenzierteres Bild. Während des Sommerhalbjahres und insbesondere in den Sommermonaten nimmt die Häufigkeit trockener Phase in den Projektionen deutlich ab (bis zu -19% bzw. drei Trockenphasen weniger im Sommer für 2071–2100), während im Winter(Halbjahr) Zunahmen überwiegen (bis +29% bzw. vier Trockenphasen mehr im Winter für 2071–2100). Grundsätzlich sind die im Weiteren beschriebenen Veränderungen zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) hin deutlich stärker ausgeprägt, als in der die Mitte des 21. Jahrhunderts charakterisierenden Zeitscheibe 2021–2050.

Da im Sommer(Halbjahr) die Trockentage zunehmen (siehe Abschnitt 4.4.1), muss bei sinkender Zahl an Trockenphasen, deren Länge zunehmen. Insgesamt nimmt also die Persistenz trockener Zustände im Sommer zu. Während die Schwankungsbreite der Änderungssignale in den Projektionen für den Sommer in der Zeitscheibe 2021–2050 noch bei etwa -9% bis +21% liegt, verstärkt sich die Verlängerung von Trockenphasendauern in der zweiten Zeitscheibe 2071–2100 auf 10% bis 46%. Bei einer mittleren Andauer sommerlicher Trockenphasen von 3,9 d entsprechen 10% einem Plus von ca. 0,4 d und 46% einem Plus von 1,8 d. Auch im Herbst nimmt die Anzahl von Trockenphasen tendenziell ab und deren Länge zu. Diese Entwicklungen sind jedoch nicht so stark ausgeprägt wie für den Sommer. So nimmt die Häufigkeit von Trockenphasen im Herbst zum Ende des 21. Jahrhunderts hin um bis zu 9% ab (ca. 1,2 Trockenphasen weniger). Einzelne Projektionen zeigen jedoch auch leichte Anstiege der Trockenphasenhäufigkeit um bis zu ca. 4%. Die mittlere Dauer von Trockenphasen im Herbst nimmt in den Modellen zum Ende des 21. Jahrhunderts hin um 1–18% zu. Im Herbst traten im Referenzzeitraum 1961–1990 die mit durchschnittlich 4,8 Tagen Dauer längsten Trockenphasen auf. Eine Verlängerung um 18% entspricht im Mittel 0,9 d längeren Trockenphasen. Damit könnten die Trockenphasen in der Zeitscheibe 2071–2100 die größte mittlere Andauer im Sommer und nicht mehr im Herbst haben. Für den Winter projizieren die Modelle bei steigender Zahl von Trockenphasen (0% bis +31%) eine Abnahme in ihrer Andauer von bis zu 1,4 Tagen (-33% bis +4% für 2071–2100). Für das Frühjahr lassen die Modelle weder für die Häufigkeit noch für die Länge von Trockenphasen eine eindeutige Richtung erkennen. Die Anzahl von Trockenphasen kann um circa ±9% zu- bzw. abnehmen und ihre mittlere Länge sich um etwa ±14% verändern.

Hinsichtlich der maximalen Andauer von Trockenphasen ist festzustellen, dass die Ergebnisse tendenziell denen für die mittlere Trockenphasenlänge ähneln, jedoch häufig eine größere Bandbreite der Modellergebnisse aufweisen. Auffällig ist, dass trotz der deutlichen Verlängerung der mittleren Andauer von Trockenphasen im Herbst das Signal weniger deutlich ausfällt (für 2071–2100 im Mittel ca. +2%, gesamte Bandbreite: etwa -8% bis +26%). Für den Sommer liegen die Ergebnisse dagegen in einem ähnlichen Bereich wie für die mittlere Dauer von Trockenphasen

In der Zeitscheibe 2021–2050 ist der Einfluss des sozioökonomischen Szenarios auf die Ergebnisse noch recht gering. Zum Ende des 21. Jahrhunderts sind die Änderungssignale für die Szenarien A1B und A2 zumeist größer als für das moderate Szenario B1. Dies trifft insbesondere auf die Jahreszeiten Sommer, Herbst und Winter sowie das Sommerhalbjahr zu. So liegen beispielsweise die mittleren Änderungssignale der B1-Projektionen für die mittlere sommerliche Trockenphasendauer bei ca. +20% und die der A1B-Projektionen bei ca. +35%. Dass die mittleren Änderungen für das Szenario A2 mit ca. +30% etwas unterhalb dener des Szenarios A1B liegen, ist wahrscheinlich teilweise durch die geringere Anzahl vorliegender Projektionen für das Szenario A2 zu erklären. Während A1B Simulationen für alle vier Modelle vorliegen, können für A2 nur die statistischen Modelle einbezogen werden. Die statistischen Modelle weisen für diese Kenngröße jedoch geringere Änderungssignale als die dynamischen Modelle auf. So ist das mittlere Änderungssignal der statistischen Modelle unter dem Szenario A1B kleiner als das mittlere Änderungssignal über alle Modelle.

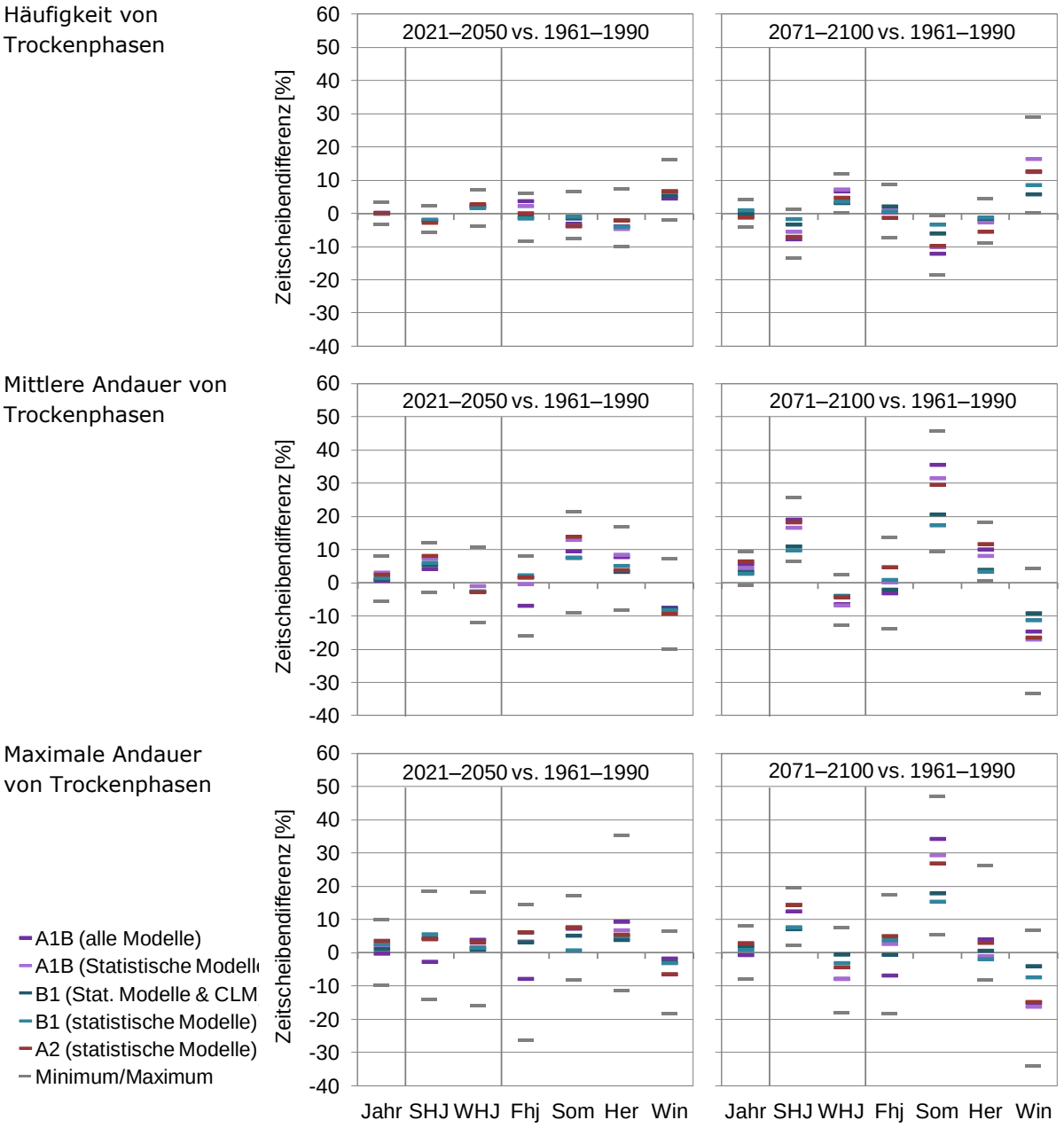


Abbildung 47: Mittlere (für die drei Szenarien) sowie minimale und maximale (aus allen Modellen und Szenarien) Änderungssignale der Häufigkeit von Trockenphasen (oben) sowie ihrer mittleren (Mitte) und maximalen (unten) Andauer in den Jahreszeiten und Halbjahren für die Zeitscheiben 2021–2050 (links) und 2071–2100 (rechts)

Inwieweit innerhalb der REGKLAM-Modellregion räumlich differenzierte Änderungssignale projiziert werden, wird für die Zahl von Trockenphasen in Abbildung 48 (Anlage 6), ihre mittlere Dauer in Abbildung 49 (Anlage 7) und ihre maximale Dauer in Abbildung 50 (Anlage 8) für die Halbjahre (Jahreszeiten) dargestellt. Vor allem für einzelne Projektionen sind die räumlichen Differenzierungen in den Karten kaum sinnvoll zu interpretieren. In einigen für das Szenario A1B aus allen Modellen gemittelten Karten sind v.a. im Sommer(Halbjahr) Differenzierungen in Richtung größerer Zunahme der mittleren Trockenphasenlänge und stärkere Abnahme der Zahl von Trockenphasen in den nördlichen Tieflandsbereichen sichtbar. Es ist also möglich, dass sich der Gradient in der Trockenheitsgefährdung zwischen Tief- und Bergland noch intensiviert. Für die maximale Andauer von Trockenperioden scheint der zufallsbedingte Einfluss einzelner besonders langer Trockenphasen zu groß für eine sinnvoll räumliche Differenzierung der Trends zu sein – hier zeigen sich die auffälligsten kleinräumigen Differenzierungen.

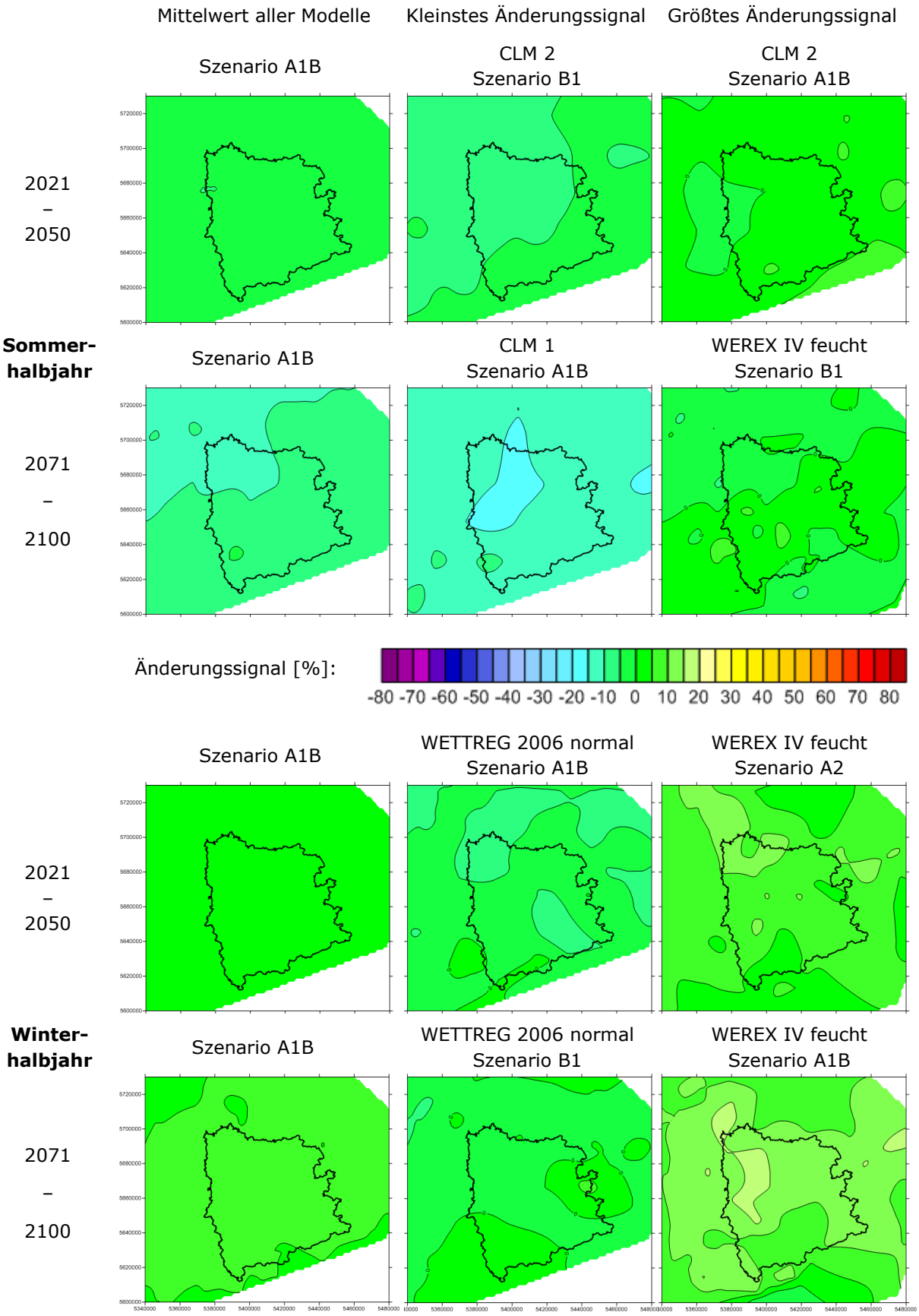


Abbildung 48: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der mittleren Zahl an Trockenphasen im Sommer- und Winterhalbjahr für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modelle) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien

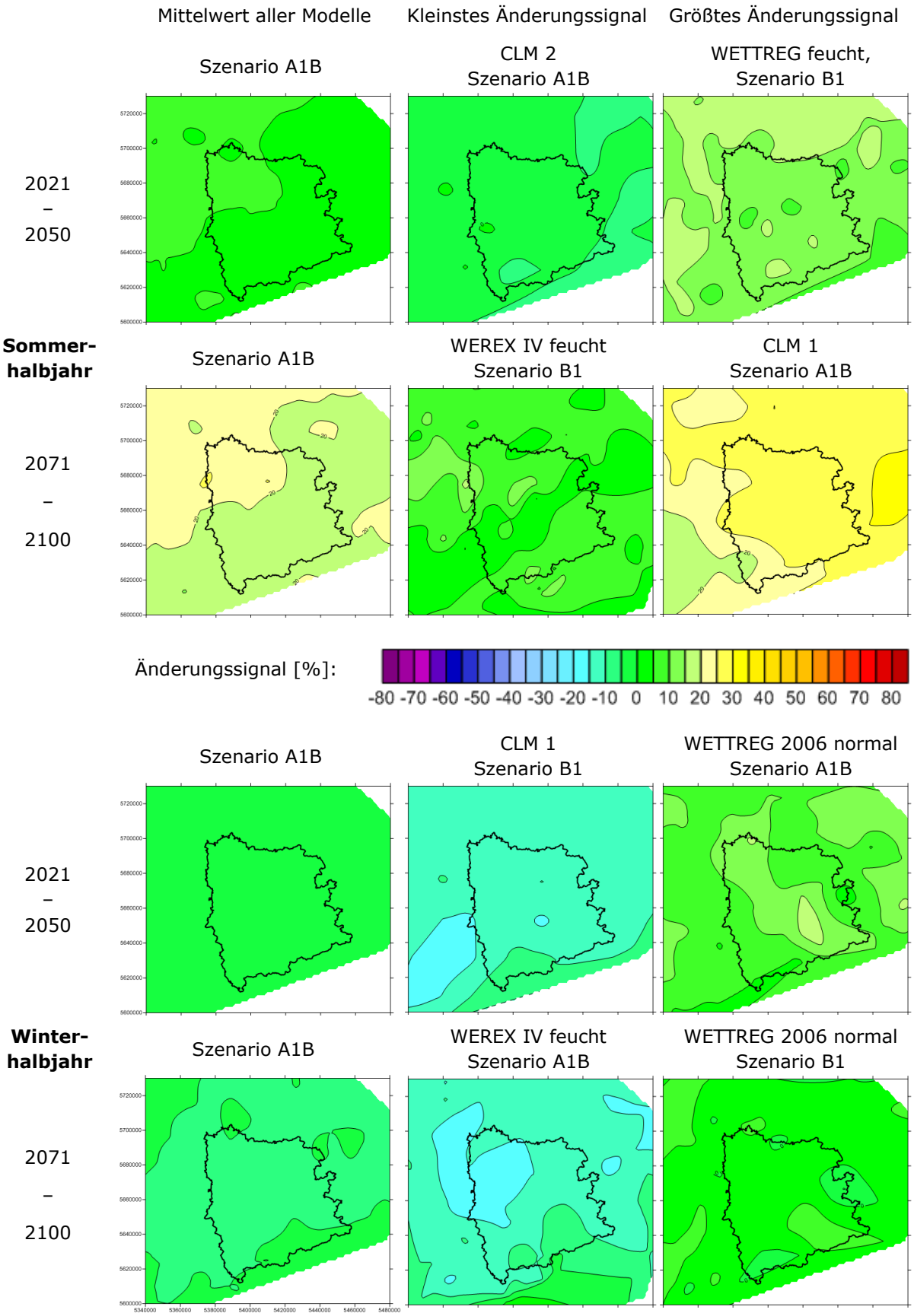


Abbildung 49: wie Abbildung 48 jedoch für die mittlere Länge von Trockenphasen

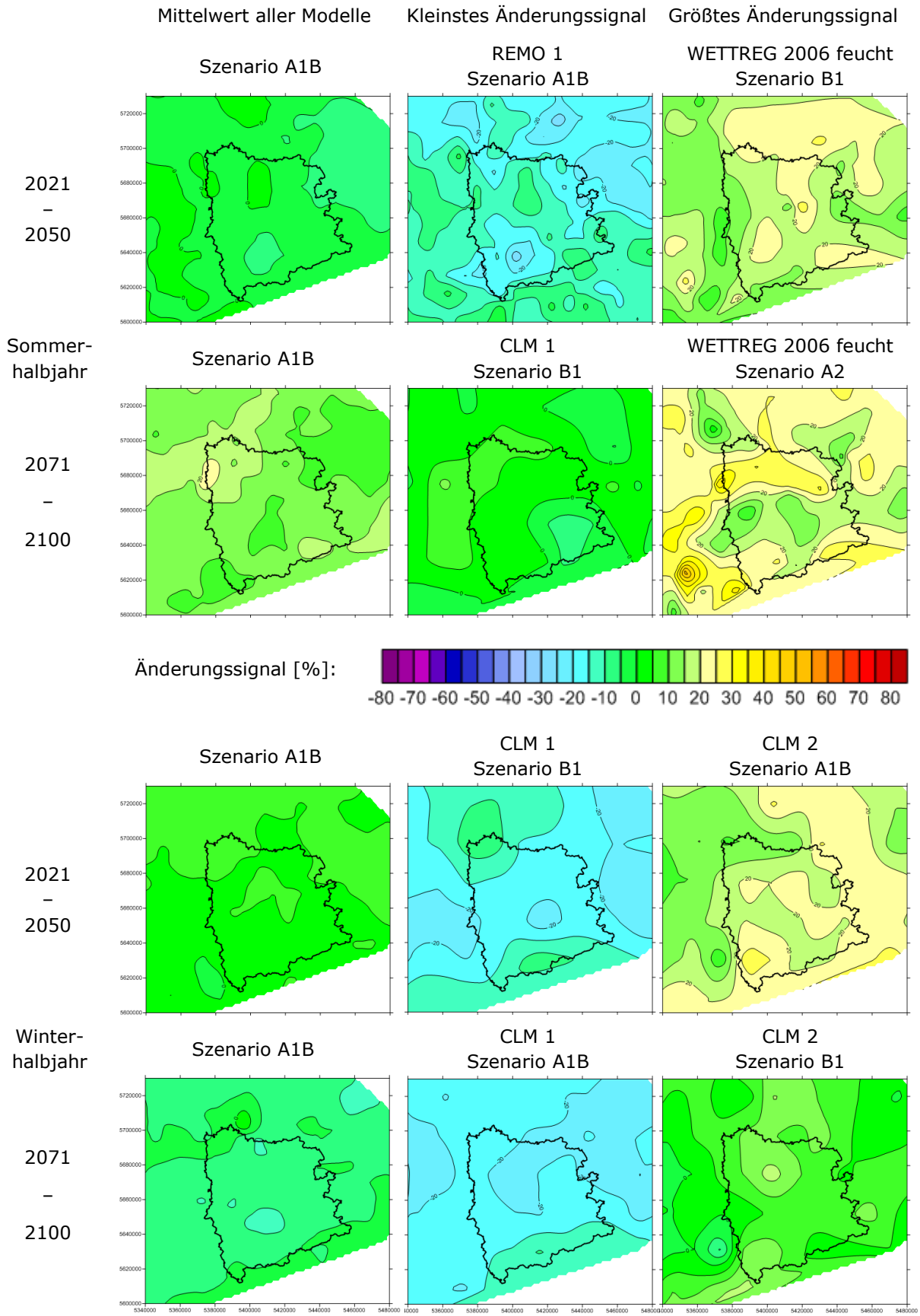


Abbildung 50: wie Abbildung 48 jedoch für die maximale Länge von Trockenphasen

Um zu sehen, für welche Trockenphasenlängen die größten Veränderungen projiziert werden, wurden Verschiebungen in der Häufigkeit verschiedener Trockenphasendauern analysiert. Von besonderem Interesse waren dabei einzelne Trockentage, kurze Trockenphasen von 2–4 Tagen sowie längere Trockenphasen von 5–7 und 8–10 Tagen Dauer. Die Ergebnisse für noch längere Trockenphasen ab 11 Tagen Länge werden im Abschnitt 4.4.3 unter den meteorologischen Trockenperioden diskutiert. Abbildung 51 zeigt die Ergebnisse für das Jahr und die beiden Halbjahre. Dabei sind die Zeitscheibendifferenzen als absolute Änderungssignale dargestellt, da einzelne Klassen langer Trockenphasenandauern in der Referenzperiode nicht belegt waren und somit keine relativen Änderungssignale berechnet werden können. Die prozentualen Änderungssignale sind also immer relativ zur Häufigkeit dieser Klasse im Referenzzeitraum zu sehen.

Knapp 29% der Trockenphasen bestanden im Referenzzeitraum 1961–1990 aus nur einem Trockentag. Dabei gab es kaum Unterschiede zwischen den beiden Halbjahren. Einzelne Trockentage nehmen über das gesamte Jahr gesehen in der Zeitscheibe 2021–2050 um bis zu -3,3% ab, in der Zeitscheibe 2071–2100 sogar um bis zu -4,6% (Abbildung 51). Diese Abnahmen beruhen überwiegend auf Veränderungen während des Sommerhalbjahres. So werden für das SHJ für die Mitte des 21. Jahrhunderts Abnahmen von bis zu -6,2% und für das Ende des 21. Jahrhunderts gar von bis zu -7,5% projiziert. Für das Winterhalbjahr liegen die mittleren Änderungssignale für die drei Szenarios zumeist in positiven Bereich (ca. 0-1%, maximal ca. 4%). Es sind jedoch auch Rückgänge im Bereich von etwa -2,5% möglich.

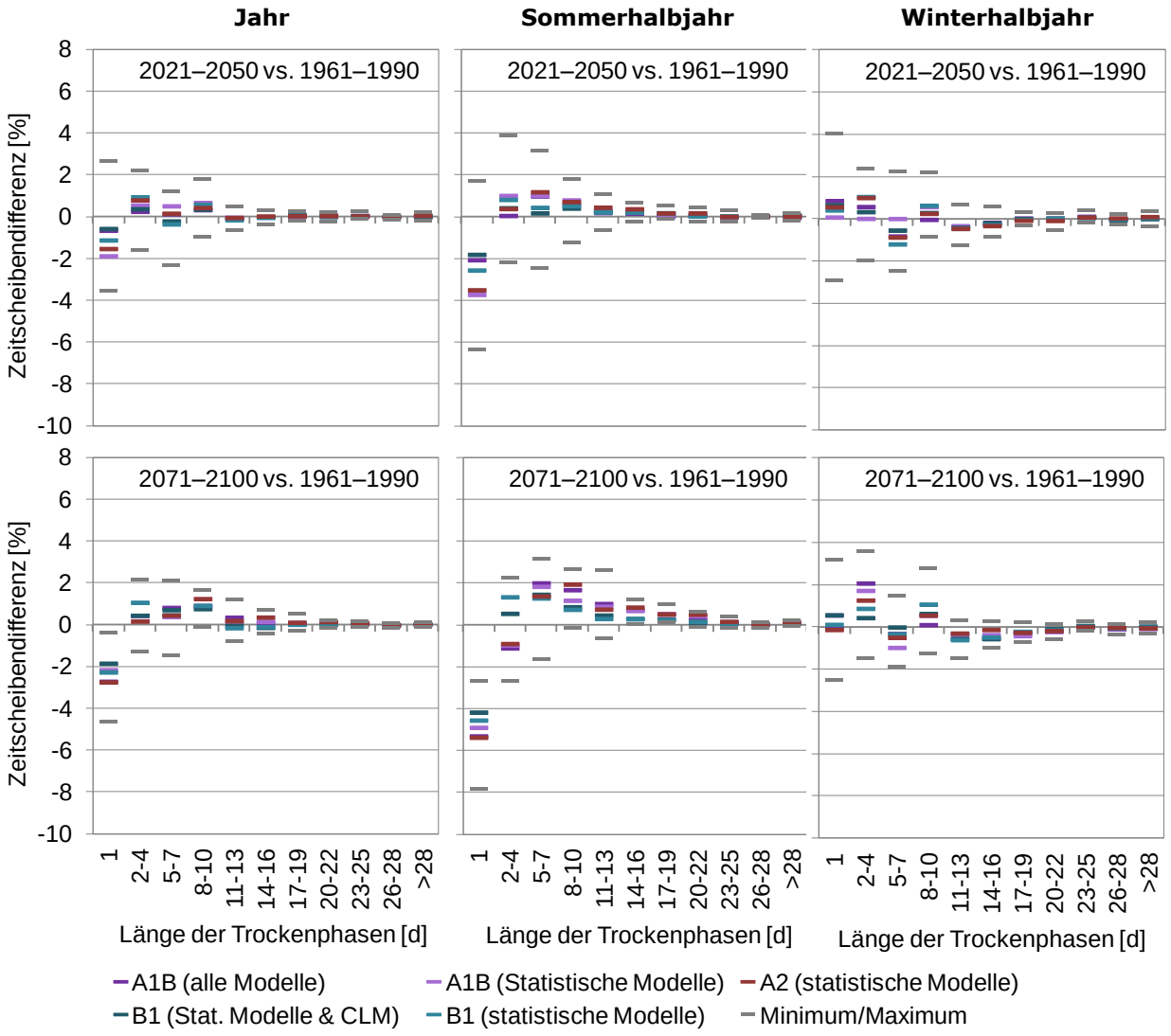


Abbildung 51: wie Abbildung 47, jedoch für die Häufigkeit von unterschiedlich langen Trockenphasen im Jahr (links) und in den Halbjahren (Mitte: SHJ, rechts: WHJ)

Circa 40% der Trockenphasen sind zwischen zwei und vier Tagen lang, wobei dieser Anteil im Sommerhalbjahr etwas höher liegt als im Winterhalbjahr. Die Modelle projizieren tendenziell eine Zunahme solch kurzer Trockenphasen (Jahr: ca. 2%) insbesondere im Winterhalbjahr (bis 2,3% in 2021–2050 und bis 3,5% in 2071–2100). Es gibt jedoch auch einige Modellläufe, die zum Teil deutliche Rückgangstrends simulieren (bis ca. -3% für das SHJ in 2071–2100). Da diese Trockenphasen kürzer sind als der Mittelwert aller Trockenphasen, führt ihre Zunahme eher zu einer Verkürzung der mittleren Trockenphasendauer.

Trockenphasen von fünf bis sieben Tagen Dauer machen ca. 15% aller Trockenphasen aus. Der Anteil ist im Sommerhalbjahr mit knapp 16% größer als im Winterhalbjahr mit ca. 14%. Über das gesamte Jahr betrachtet liefern die Projektionen keine klaren Aussagen. Zu- und Abnahmen im Bereich von reichlich ±2% sind möglich. Im Mittel werden während des SHJs Zunahmen in der Häufigkeit 5–7 Tage andauernder Trockenphasen projiziert (im Bereich von +1%, maximal: +3%). Dennoch simulieren einzelne Modelle Rückgänge von bis zu -3%. Im WHJ überwiegen negative Trends; doch auch hier sind erhebliche positive Trends möglich.

Acht bis zehn Tage andauernde Trockenphasen hatten im Referenzzeitraum 1961–1990 in beiden Halbjahren eine Häufigkeit von ca. 7,5%. In den Klimaprojektionen steigen sie im Jahresmittel um ca. 1% an (für 2021–2050 etwas geringer). Dieser Anstieg ist in beiden Halbjahren sichtbar – im SHJ jedoch etwas stärker ausgeprägt. Auch hier liefern wieder einzelne Projektionen negative Trends. Nur knapp neun Prozent aller Trockenphasen dauern länger als zehn Tage an. Die einzelnen dargestellten Klassen weisen demnach in der Referenzperiode sehr geringe Häufigkeiten auf. Demzufolge sind auch klein erscheinende Trends im Bereich vom 0,5 bis 1% als erheblich einzuschätzen. Während des Sommerhalbjahres nehmen nahezu alle Klassen von Trockenphasenlängen ab 11 Tagen in ihrer Häufigkeit zu, während für das Winterhalbjahr Abnahmen überwiegen. Genauere Untersuchungen dazu erfolgen in Abschnitt 4.4.3.

Zusammenfassung

Grundsätzlich geben die statistischen Modelle die beobachtete Häufigkeit und Andauer von Trockenphasen genauer wieder als die dynamischen Modelle. Die dynamischen Modelle überschätzten im Referenzzeitraum 1961–1990 die beobachtete Häufigkeit von Trockenphasen – insbesondere im Sommer. Speziell die Häufigkeit von Trockenphasen mit nur kurzer bis mittlerer Dauer wird deutlich überschätzt. Dies führt zusammen mit der Unterschätzung in der Trockentagshäufigkeit zu einer deutlichen Unterschätzung der mittleren Länge von Trockenphasen. Dennoch sind alle Modelle grundsätzlich in der Lage die räumlichen Muster der beobachteten Häufigkeit und Länge von Trockenphasen in ihren Grundzügen wiederzugeben.

Die Modelle projizieren eine Zunahme der mittleren und maximalen Länge von Trockenphasen insbesondere im Sommer(Halbjahr), die sich von der Mitte zum Ende des 21. Jahrhunderts hin intensiviert. Tendenziell sind diese Zunahmen im Tiefland stärker ausgeprägt als im Bergland. Die Zunahme in der Länge von Trockenphasen geht mit einer generellen Abnahme ihrer Häufigkeit einher. Einzelne Trockentage nehmen besonders stark ab, während länger andauernder Trockenphasen deutlich häufiger werden. Im Winterhalbjahr nimmt die mittlere und maximale Länge von Trockenphasen tendenziell ab und ihre Häufigkeit zu – insbesondere die kurzer Trockenphasen von 1–4 Tagen Länge. Der Herbst zeigt ein ähnliches Verhalten wie der Sommer, jedoch sind die Zunahmen in der Trockenphasenlänge weniger stark ausgeprägt. Das Frühjahr zeigt keine konsistenten Veränderungssignale.

4.4.3 Meteorologische Trockenperioden

Vergleich zwischen Beobachtungs- und Modelldaten für den Kontrollzeitraum 1961–2000

Von allen in Abschnitt 4.4.2 betrachteten Trockenphasen dauern in der REGKLAM-Modellregion 8% mindestens 11 Tage lang an (Abbildung 52, links). Etwa die Hälfte dieser meteorologischen Trockenperioden hat eine Länge von mindestens zwei Wochen und ca. 15% länger als drei Wochen. Die Abhängigkeit der Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden von der Höhenlage ist in Abbildung 52 (Mitte) dargestellt. Meteorologische Trockenperioden sind im Tiefland deutlich häufiger als im Bergland. Diese Aussage trifft auch für die längeren meteorologischen Trockenperioden zu. Die Modelle geben diesen Höhengradienten in der Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden gut wieder, unterschätzen jedoch für alle Höhenlagen im Mittel (zunächst Mittelung der Läufe eines Modells und danach der Modellmittelwerte) die beobachteten Häufigkeiten. Im Allgemeinen unterschätzten die dynamischen Modelle die Häufigkeit, während die statistischen Modelle zum Teil über und zum Teil unter den Beobachtungen liegen. Die größten Häufigkeiten werden zumeist durch die trockenen Läufe von WEREX IV und WETTREG 2006 simuliert. Dies trifft insbesondere auf das Tief- und Hügelland zu. Für längere Trockenperioden von mindestens zwei oder drei Wochen Dauer überschätzt in den Kammlagen das Modell REMO die beobachteten Häufigkeiten. In den Kammlagen neigen die feuchten Läufe der statistischen Modelle zu den größten Unterschätzungen.

Meteorologische Trockenperioden sind nicht in allen Jahreszeiten gleich wahrscheinlich. Im Sommerhalbjahr sind mit reichlich 6% (entspricht zwei Perioden) etwas weniger Trockenphasen länger als 10 Tage als im Winterhalbjahr, wo fast 10% (entspricht 2,8 Perioden) diese Dauer erreichen. Vor allem für das Winterhalbjahr unterschätzten fast alle Modellläufe die Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden. Nur der trockene Lauf von WETTREG 2006 liegt etwas über der beobachteten Häufigkeit. Im Sommerhalbjahr überschätzen dagegen die statistischen Modelle – mit Ausnahme des feuchten Laufes von WETTREG 2006 – die Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden. Die dynamischen Modelle zeigen in beiden Halbjahren die schon beschriebenen Unterschätzungen. Dabei zeigt für das Sommerhalbjahr REMO die größten Abweichungen zu den Beobachtungen, während im Winterhalbjahr der zweite Lauf von CLM am stärksten abweicht.

Projizierte Klimaänderungssignale im 21. Jahrhundert

Über das gesamte Jahr betrachtet, zeigen die Projektionen keine konsistenten Signale hinsichtlich einer Veränderung in der Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden. In der Zeitscheibe 2071–2100 wird zumindest für die Szenarios A1B und A2 eine leichte Verschiebung in Richtung häufigerer meteorologischer Trockenperioden sichtbar. In den Halbjahren zeigt sich wiederum ein differenzierteres Bild mit überwiegend häufiger werdenden Trockenphasen im Sommerhalbjahr, während im Winterhalbjahr eher Rückgänge überwiegen.

Während für das Sommerhalbjahr die Änderungssignale in der Zeitscheibe 2021–2050 noch im Bereich von -0,7% bis +2,3% (-0,2 bis +0,7 Trockenperioden) liegen, sind sie in der Zeitscheibe 2071–2100 mit 0–5,5% (bis zu 1,7 Perioden) deutlich größer. Auch für die mindestens zwei bzw. drei Wochen andauernden Trockenphasen projizieren die Modelle v.a. zum Ende des 21. Jahrhunderts ein deutlich häufigeres Auftreten. So liegen die Häufigkeitsprojektionen der mindestens zweiwöchigen Trockenperioden für 2071–2100 bei 0,5% bis 2,9%. Bei einer Ausgangshäufigkeit solcher Perioden von 2,4% in 1961–1990 entspräche dieser Anstieg also im Maximalfall mehr als einer Verdopplung. Für die noch selteneren dreiwöchigen Trockenphasen lassen die Projektionen für das Ende des 21. Jahrhunderts sogar nahezu eine Verdreifachung des Ausgangsniveaus (0,5%) als möglich erscheinen.

Die Unterschiede zwischen den Emissionsszenarios sind wiederrum für die Zeitscheibe 2021–2050 recht gering. Für die Zeitscheibe 2071–2100 zeigen die Szenarios A1B und A2 deutlichere Anstiege in der Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden im Sommerhalbjahr, während im Winterhalbjahr die Unterschiede zwischen den Szenarios gering bleiben. Dies trifft auch für die mit zwei bzw. drei Wochen vergleichsweise langen meteorologischen Trockenperioden zu.

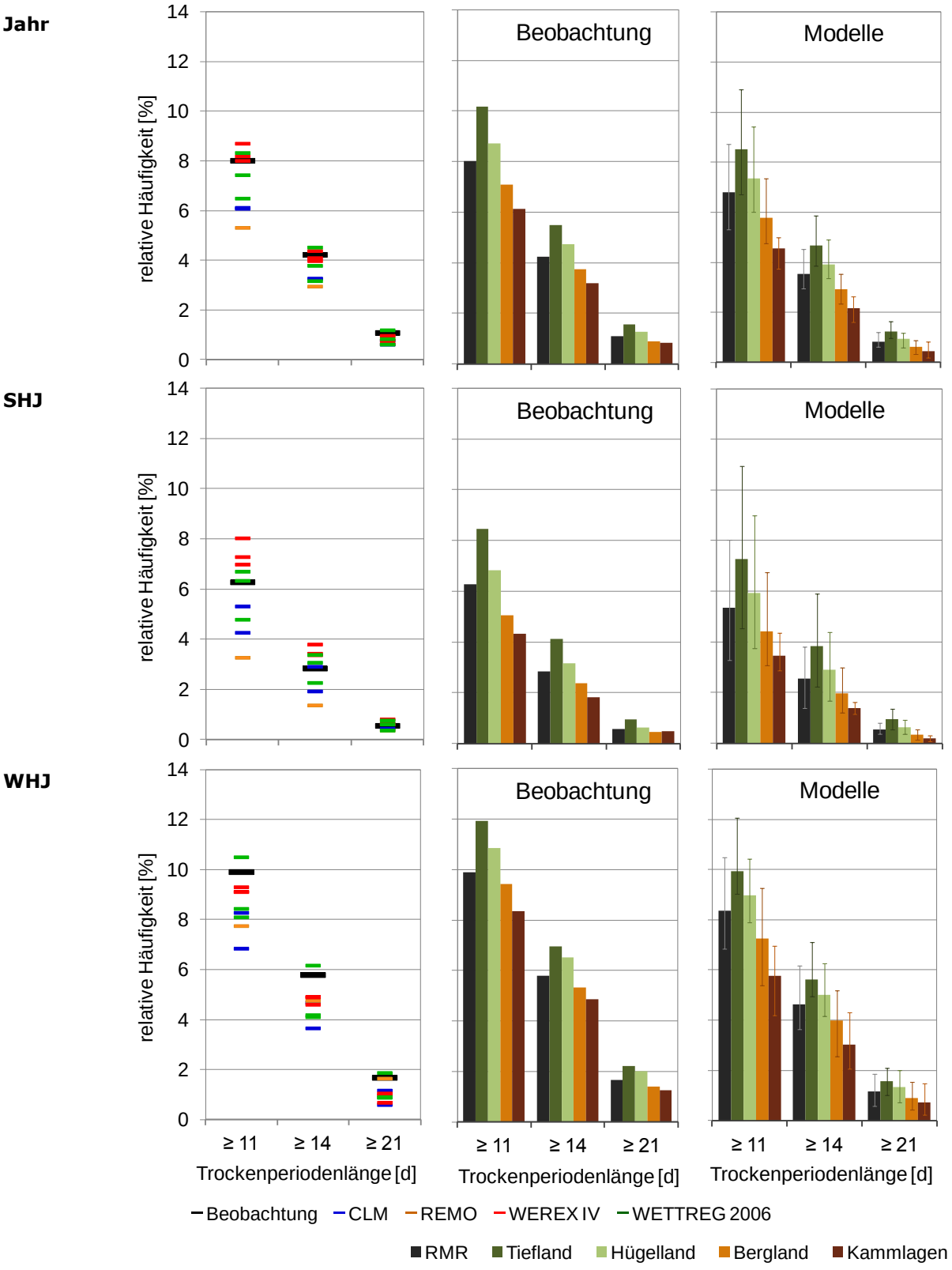


Abbildung 52: (Halb)Jährliche Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden sowie mindestens zwei bzw. drei Wochen andauernder Trockenperioden in den Beobachtungen und Modellläufen gemittelt für die REGKLAM-Modellregion (links), untergliedert nach Höhenstufen in den Beobachtungen (Mitte) sowie in den Modellen (rechts, dargestellt ist der Mittelwert aus allen Modellen und Szenarios sowie die gesamte Schwankungsbreite der Werte); Referenzzeitraum 1961–1990

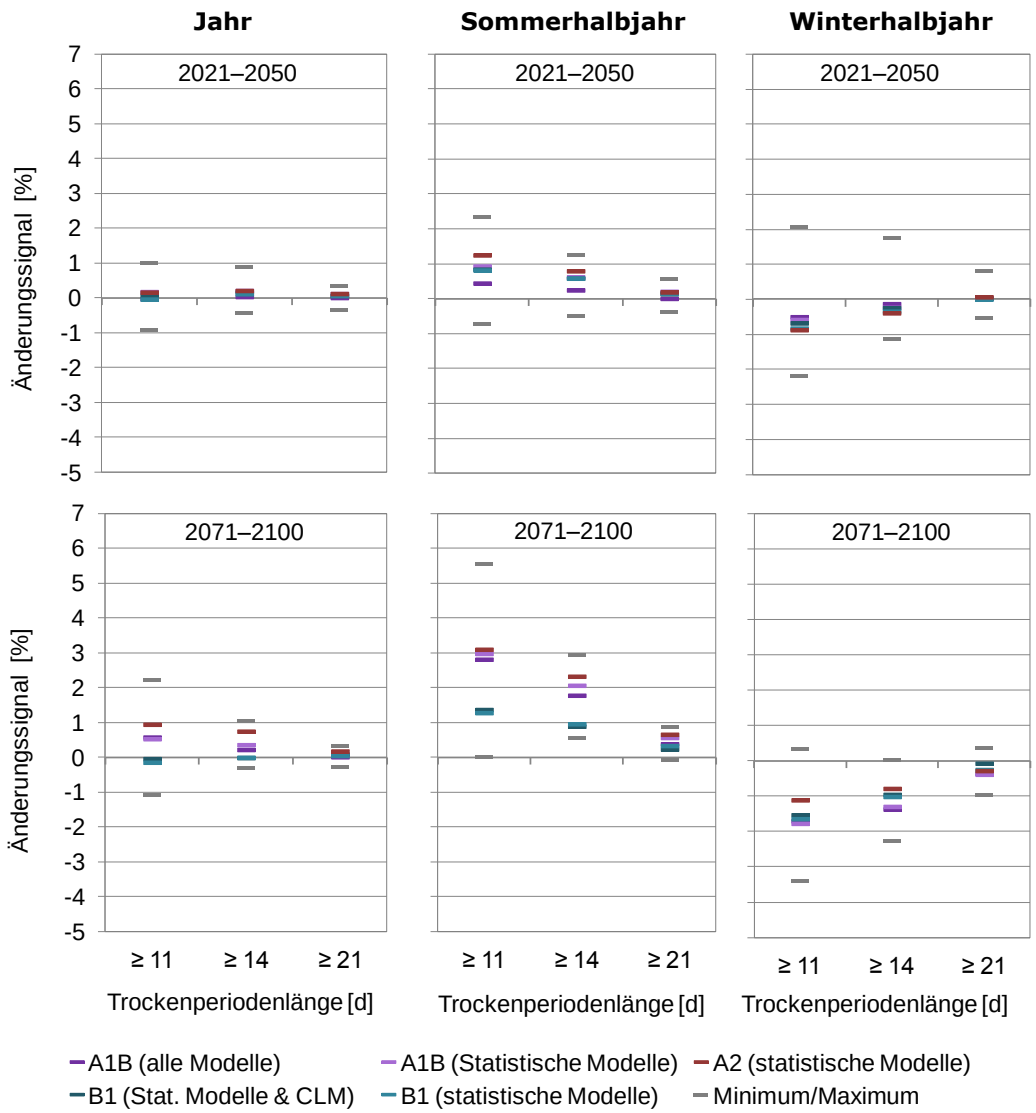


Abbildung 53: Mittlere (für die drei Szenarien) sowie minimale und maximale (aus allen Modellen und Szenarien) Änderungssignale (Mittelwert der REGKLAM-Modellregion) der Häufigkeit von unterschiedlich langer meteorologischer Trockenperioden im Jahr (links) und den Halbjahren (Mitte: SHJ, rechts: WHJ) für die Zeitscheiben 2021–2050 (oben) und 2071–2100 (unten)

Abbildung 54 zeigt die Abhängigkeit der beschriebenen Änderungssignale von der Höhenlage. Abgebildet sind jeweils die mittlere Änderung über alle Szenarios und Modellrealisierungen hinweg sowie die minimalen und maximalen Änderungssignale. Dabei sind insbesondere die Ergebnisse für die Kammlagen nur eingeschränkt interpretierbar, da hier für die Modelle CLM und WETTREG 2006 nur sehr wenige Gitter- bzw. Datenpunkte mit einer Höhenlage >650 m verfügbar sind.

Die für das Jahr projizierten geringen Anstiege in der Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden fallen in der Zeitscheibe 2071–2100 im Tiefland geringfügig höher aus als im Bergland. Der vergleichsweise hohe Anstieg in den Kammlagen ist wahrscheinlich ein Relikt der geringen Datenbelegung dieser Klasse. Auch im Sommerhalbjahr zeigt der Anstieg in der Trockenperiodenhäufigkeit gemittelt über alle Modelle und Szenarios einen Höhengradienten. In den ohnehin schon häufiger von Trockenperioden betroffenen Bereichen des Tief- und Hügellands projizieren die Modelle die größten Anstiege in der Trockenperiodenhäufigkeit. Dies trifft auch für die zwei- bzw. drei Wochen andauernden Trockenphasen zu Der Höhengradient der Trockenperiodenhäufigkeit im Winterhalbjahr ist weniger intensiv ausgeprägt. Tendenziell nimmt die Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden im Tiefland stärker ab als im Bergland.

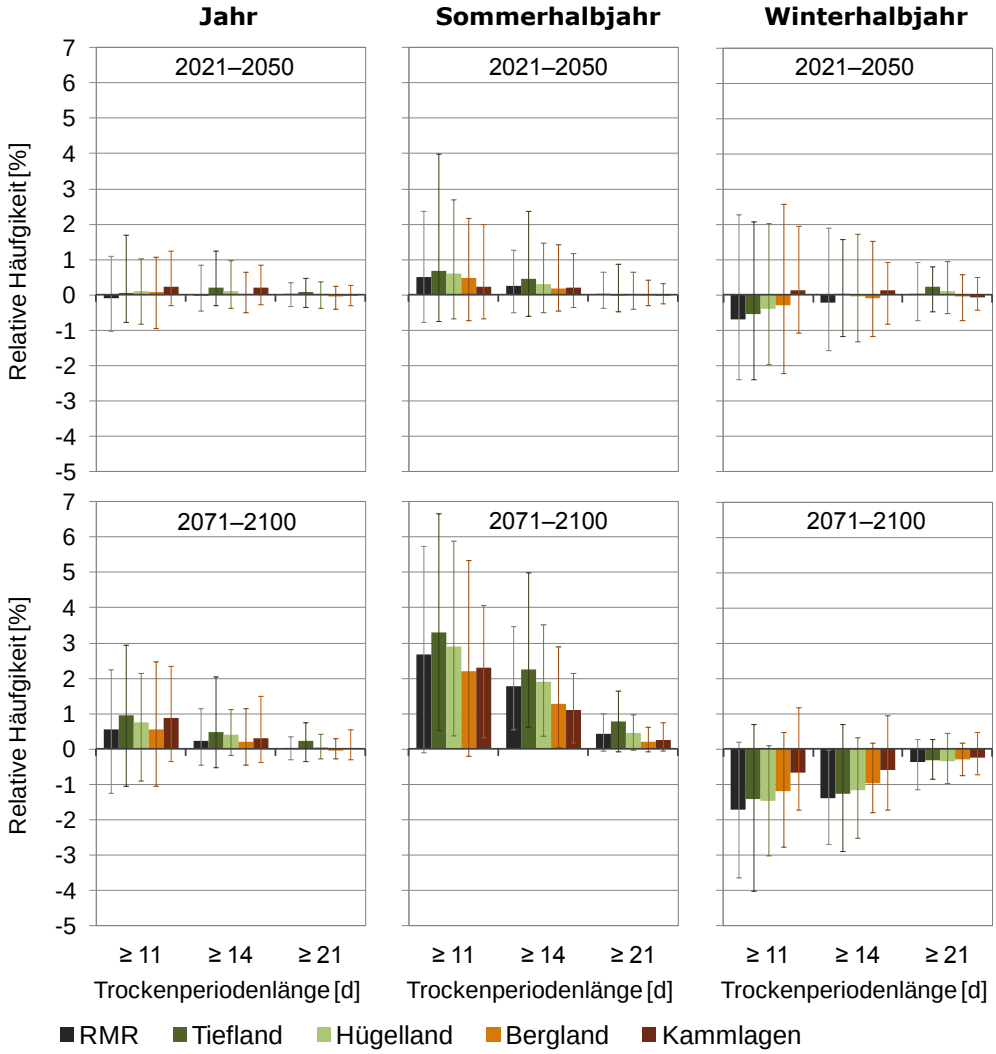


Abbildung 54: Veränderungen in der (halb)jährlichen Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden sowie mindestens zwei bzw. drei Wochen andauernder Trockenperioden in der erweiterten REGKLAM-Modellregion untergliedert nach Höhenstufen (dargestellt ist der Mittelwert aus allen Modellen und Szenarios sowie die gesamte Schwankungsbreite der Werte) für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961–1990

Zusammenfassung

Trotz einer leichten Unterschätzung der Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden vor allem durch die dynamischen Modelle geben alle Modelle den Höhengradienten in (im Tiefland häufigere Trockenperioden als im Bergland) recht gut wieder. Prinzipiell geben die Modelle die größere Häufigkeit meteorologischer Trockenperioden während des WHJ im Vergleich zum SHJ wieder. Sie neigen jedoch im Winter eher zu einer Unterschätzung der beobachteten Häufigkeit als im Sommer, wo v.a. die statistischen Modelle die Häufigkeit eher überschätzen.

In den Projektionen zeigen sich halbjährlich klar differenzierte Trends. Im Sommer überwiegt der Anstieg und im Winterhalbjahr der Rückgang in der Trockenperiodenhäufigkeit. Die Häufigkeit langer Trockenperioden von mindestens zwei oder drei Wochen Andauer nimmt dabei im Sommerhalbjahr bezogen auf das Ausgangsniveau deutlicher zu als kürzere Trockenperioden. Bis zum Ende des 21. Jahrhunderts ist laut der vier Regionalmodelle eine Verdopplung bis Verdreifachung der Häufigkeit möglich. In den Projektionen ist eine Tendenz zu einer Verstärkung des Höhengradienten in der Trockenperiodenhäufigkeit erkennbar. Hinsichtlich der verschiedenen Emissionsszenarios fallen die Unterschiede recht gering aus – nur für das SHJ ist zum Ende des 21. Jahrhunderts unter den Szenarien A1 und A2 mit deutlich häufigeren meteorologischen Trockenperioden zu rechnen als unter dem Szenario B1.

4.5 Raum-Zeit-Charakteristika langer Trocken-und Nassphasen

Langandauernde Trocken- und Nassphasen werden über den Dezil-Indikator berechnet. Dazu werden Dreimonatssummen des Niederschlags gebildet. Die Häufigkeitsverteilung der Dreimonatssummen wird für den Zeitraum 1961–2000 in zehn Teile geteilt – die Dezile. Diese werden als Schwellenwerte für die Festlegung des Beginns und des Endes von Nass- und Trockenphasen genutzt. Dabei werden die Dezile für jeden der 12 möglichen Dreimonatszeiträume separat berechnet, um Verzerrungen durch den Jahresgang des Niederschlags zu vermeiden. Weitere Informationen zur Berechnung der Dezil-Nass und Trockenphasen sind im Zwischenbericht (Hoy u. Hänsel 2009) nachzulesen.

Dezil-Trocken- bzw. Nassphasen beginnen und enden im jeweils letzten Monat des 3-Monatszeitraums, welcher den Schwellenwert für den Beginn (10% kleinste/größte Werte für eine Trocken-/Nassphase) bzw. das Ende (Verlassen des Bereichs normaler Niederschlagsmengen) unter- bzw. überschreitet. Eine Dezil-Phase ist somit mindestens einen Monat lang und kann über mehrere Jahre andauern. Obwohl eine solche Phase mit „moderat extremen" Bedingungen beginnt, ist sie nicht direkt als ein Klimaextrem zu betrachten, da sie auch in den Bereich „normaler Niederschlagsbedingungen" hinein anhält. Dieses Vorgehen zieht die Entleerung tieferliegender Wasserspeicher in Betracht, die eine längere Phase feuchter Bedingungen benötigt, um eine Dürre zu beenden. Gleiches gilt analog für die Nassphasen – erst länger andauernde zu trockene Bedingungen bringen z.B. erhöhte Grundwasserstände wieder auf das Normalniveau zurück.

Vergleich zwischen Beobachtungs- und Modelldaten für den Kontrollzeitraum 1961–2000

Wie schon anhand des Niederschlagsanomalienindikators RAI beschrieben, können die Klimamodelle den beobachteten Verlauf der Niederschlagsvariabilität nicht nachbilden. Sie weisen jedoch ähnlich wie die Beobachtungsdaten Phasen mit häufigeren und/oder längeren Nass- bzw. Trockenphasen auf, während in anderen Zeiträumen weder Nass- noch Trockenphasen auftreten (Abbildung 55). Auffällig ist, dass die regionalen Klimaprojektionen ein recht unterschiedliches langzeitliches Niederschlagsverhalten simulieren, obwohl sie alle von dem gleichen Globalmodelllauf angetrieben werden. Etwas stärkere Gemeinsamkeiten in den raumzeitlichen Mustern des Auftretens von Nass- und Trockenphasen zeigen noch die beiden physikalischen Modelle CLM und REMO. Im Validierungszeitraum 1961–2000 ist in den Beobachtungsdaten der Anteil von Datenpunkten, die durchschnittlich von Dezil-Trocken bzw. Nassphasen betroffen sind, mit reichlich 30% ähnlich groß (Abbildung 56). In den Klimaprojektionen ist tendenziell die mittlere räumliche Ausdehnung von Trockenphasen größer als die von Nassphasen.

Tendenziell überschätzen die regionalen Klimamodelle die Häufigkeit langandauernder Nass- und Trockenphasen, während sie deren Andauer – v.a. die maximale – unterschätzen (Abbildung 58). Anscheinend haben die Klimamodelle Schwierigkeiten, die Persistenz von Abweichungen vom Normalniederschlag realistisch zu simulieren, und schwanken schneller zwischen nassen und trockenen Phasen, als dies in der Vergangenheit beobachtet wurde.

Projizierte Klimaänderungssignale im 21. Jahrhundert

Die von den Modellen projizierten Veränderungen in Häufigkeit, Andauer und räumlicher Ausdehnung von langandauernden Trocken- und Nassphasen hängen sehr stark von der jeweiligen Modellklasse (physikalisch, statistisch) ab. Schon in den beispielhaften Darstellungen des raum-zeitlichen Auftretens von Nass- und Trockenphasen (Abbildung 55) zeigen die physikalischen Modelle (CLM und REMO) häufigere Nassphasen im 21. Jahrhundert, während die statistischen Modelle ein deutliches Übergewicht an Trockenphasen aufweisen.

Der Anteil an von Dezil-Trockenphasen betroffenen Datenpunkten steigt in den meisten (außer REMO und CLM) Projektionen an (Abbildung 56). Für das Szenario A1B beträgt der über die statistischen Modelle gemittelte Anstieg in den Zeitscheiben 2021–2050 sowie 2071–2100 ca. +15%, während die dynamischen Modelle einen Rückgang von durchschnittlich -5% simulieren. Invers dazu verhalten sich die Trends der Dezil-Nassphasen. Während die statistischen Modelle im Mittel einen Rückgang der von Nassphasen betroffenen Datenpunkte um ca. -10% projizieren, tendieren

die physikalischen Modelle zu einem Anstiegstrend in ähnlicher Größenordnung. Betrachtet man die dekadenweise Entwicklung des mittleren Anteils an von Dezil-Trocken- bzw. Nassphasen betroffenen Datenpunkten (Abbildung 57), so zeigt sich, dass die beschriebene Veränderung nicht „linear" erfolgt, sondern sich ca. ab 2031–2040 in einer Verschiebung des mittleren Niveau äußert – sowohl bei den dynamischen als auch den statistischen Modellen. Ab dieser Zeitscheibe sind die Realisierungen der physikalischen und statistischen Modelle zumeist deutlich voneinander separiert. Die physikalischen Modelle simulieren mittlere Trockenphasenerstreckungen von zumeist < 30% und die statistischen von zumeist > 40%, während Nassphasen ab 2031–2040 durchschnittlich an

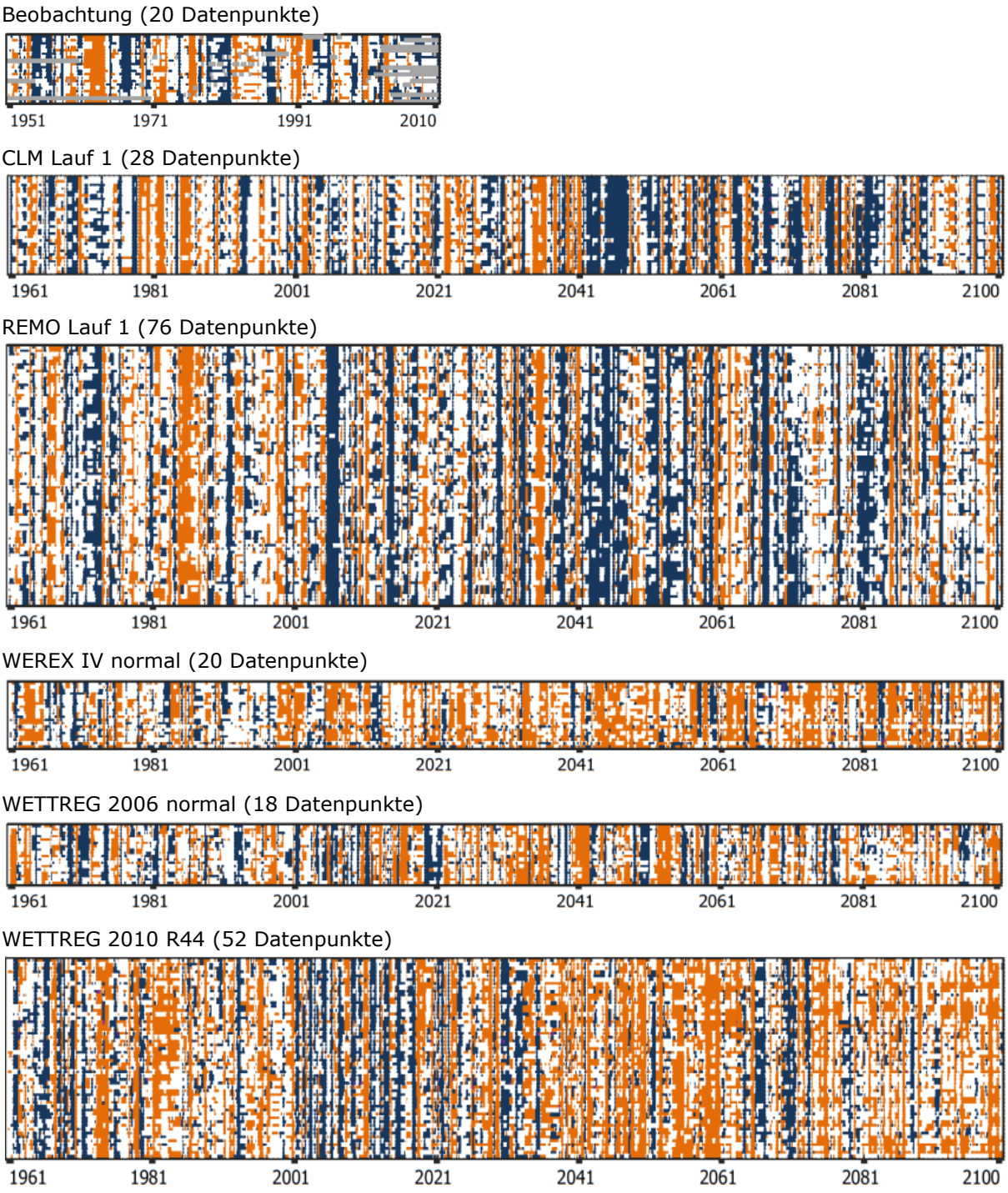


Abbildung 55: Auftreten von Dezil-Trocken- (orange) und Nassphasen (Blau) in der REGKLAM-Modellregion für die Beobachtungs- (1951–2010) und ausgewählte Projektionsdaten (1961–2100) angetrieben durch den ersten Lauf von ECHAM5 unter dem Szenario A1B; grau: keine Niederschlagsdaten vorhanden

> 40% der Gitterpunkte in den physikalischen Projektionen und an < 30% der Datenpunkte in den statistischen Projektionen auftreten. Für einige WETTREG 2010-Läufe sinkt der Anteil der von Langzeitnassphasen betroffenen Datenpunkte Ende des 21. Jahrhunderts sogar auf nur etwa 10%.

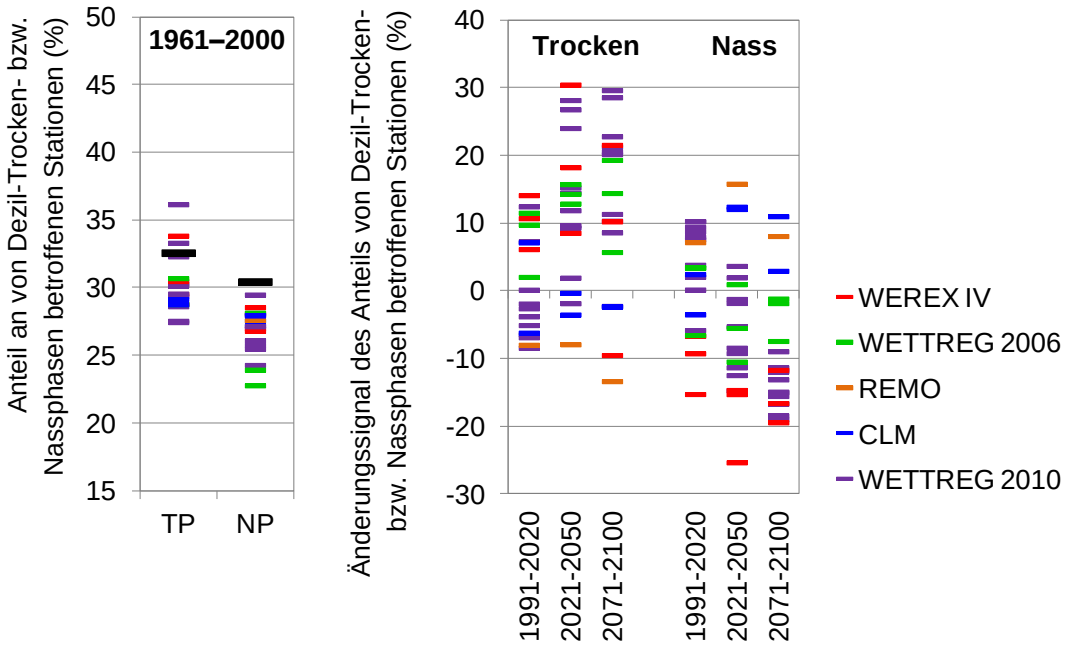


Abbildung 56: Anteil von Datenpunkten in der REGKLAM-Modellregion, die von einer Dezil-Trockenphase (TP) oder Nassphase (NP) betroffen sind für den Validierungszeitraum 1961–2000 (links) sowie Änderungssignale von 18 regionalen Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B in den Zeitscheiben 1991–2020, 2021–2050 und 2071–2100 (rechts)

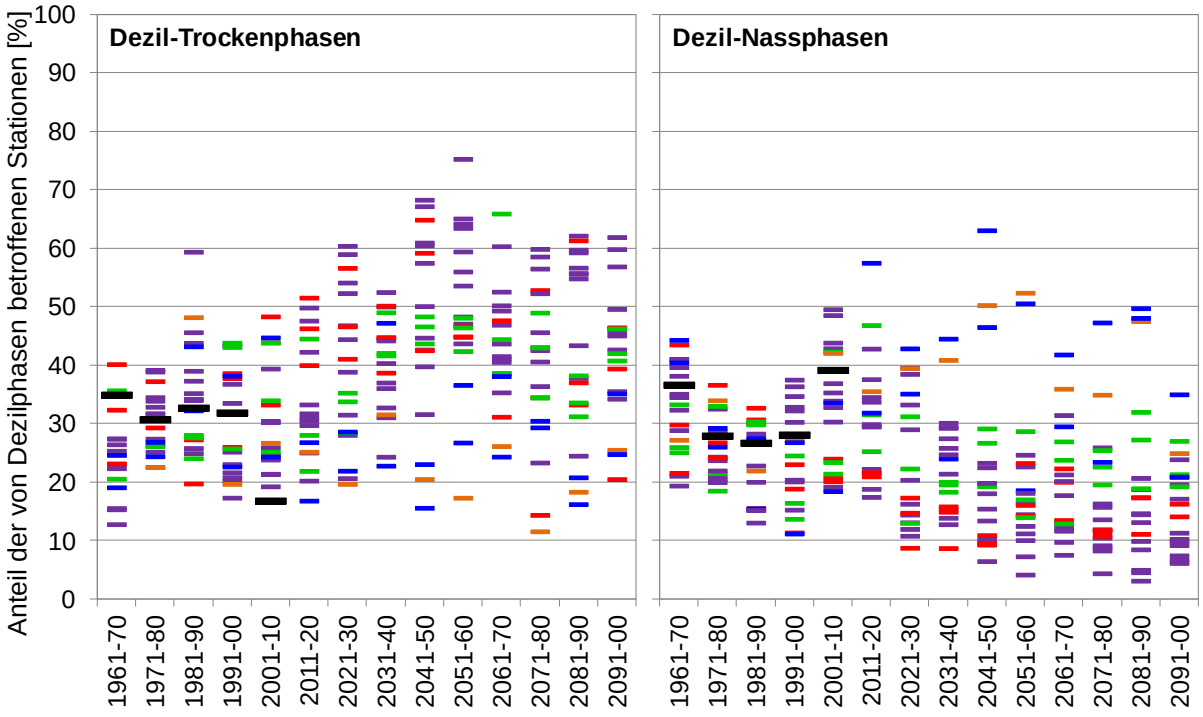


Abbildung 57: Dekadische Mittelwerte der räumlichen Ausdehnung von Dezil-Trockenphasen (links) und Nassphasen (rechts) in der REGKLAM-Modellregion für Beobachtungsdaten und 18 regionale Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B; 1961–2100

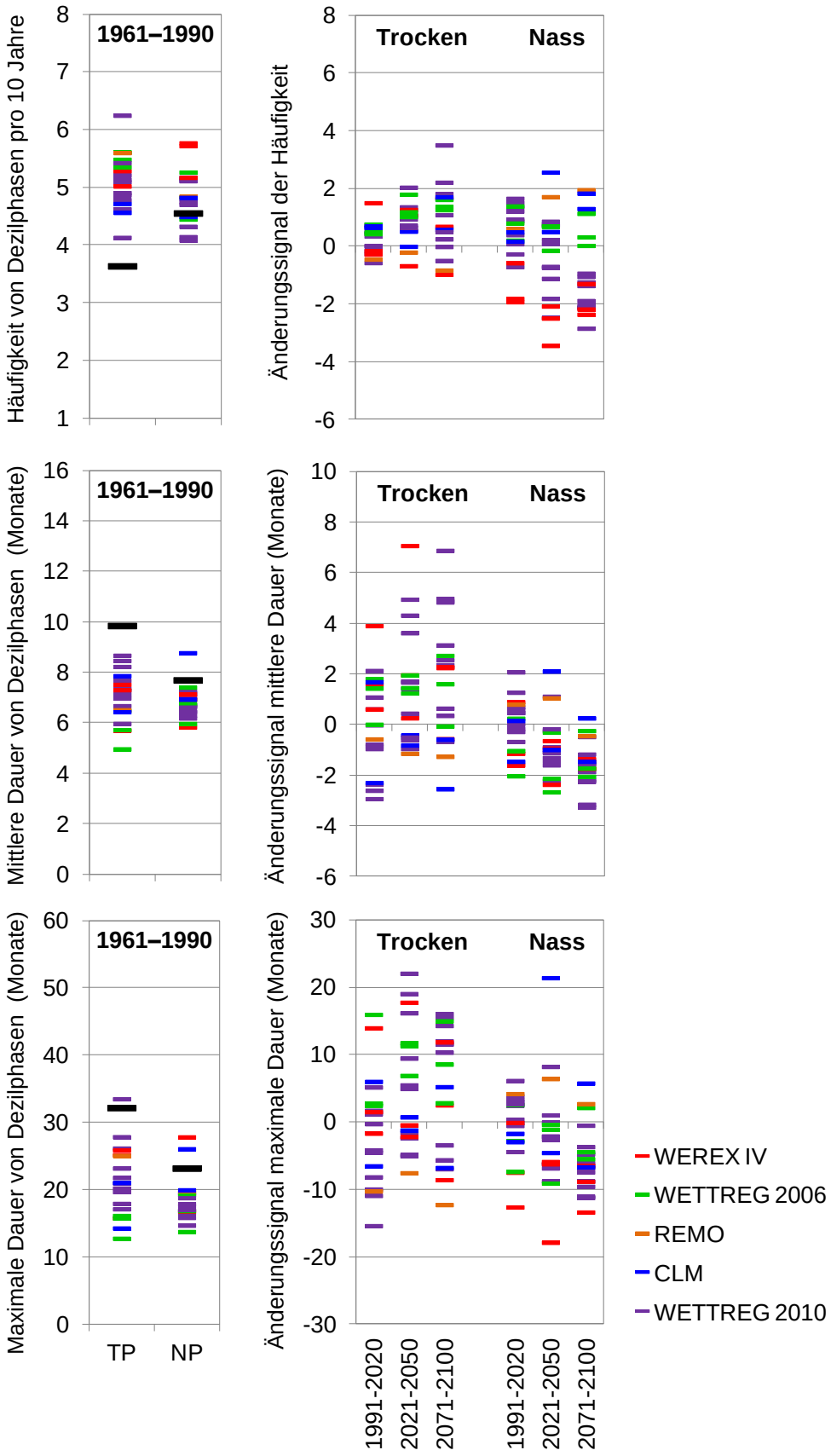


Abbildung 58: Häufigkeit innerhalb von zehn Jahren (oben) sowie mittlere (Mitte) und maximale (unten) Länge von Dezil-Trockenphasen (TP) und Nassphasen (NP) in der REGKLAM-Modellregion (jeweils regionaler Mittelwert) im Referenzzeitraum 1961–1990 (links) sowie Änderungssignale von 18 regionalen Klimaprojektionen unter dem Szenario A1B in den Zeitscheiben 1991–2020, 2021–2050 und 2071–2100 (rechts)

Die beschriebenen Veränderungen äußern sich auch in einer leichten Tendenz zur Zunahme bzw. Abnahme der Häufigkeit von Trockenphasen/Nassphasen in den Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100, wobei hier das unterschiedliche Verhalten der beiden Modellklassen weniger deutlich ausgeprägt ist (Abbildung 58). Die Dezil-Trockenphasen nehmen in den statistischen Projektionen nicht nur in ihrer Häufigkeit (ca. +1 Ereignis in 10 Jahren) sondern auch in ihrer mittleren (ca. +1 Monat) tendenziell zu. Es gibt jedoch immer auch Projektionen, die auch ein entgegen gerichtetes Änderungssignal aufweisen. Während für die Trockenphasen die Bandbreite der Änderungssignale für die Häufigkeit kleiner ist als für die Nassphasen trifft auf die mittlere und maximale Dauer das Gegenteil zu – hier sind die Rückgänge der Nassphasendauer über die verschiedenen Klimaprojektionen etwas „einheitlicher" als die Anstiege der Trockenphasendauer. Dabei ist insbesondere die Spannweite in der Veränderung der maximalen Andauer von Trockenphasen (ca. -10 Monate bis +20 Monate) erheblich groß.

Zusammenfassung

Veränderungen in Häufigkeit und Andauer von über mehrere Monate bis Jahre andauernden Phänomenen in 30-Jahreszeitscheiben zu untersuchen, unterliegt erheblichen statistischen Unsicherheiten, da jeweils nur wenige Ereignisse betrachtet werden können. Tendenziell zeigen sich auch bei diesem Indikator die generellen Niederschlagsentwicklungen im 21. Jahrhundert und v.a. die Unterschiede in den beiden Modellklassen. Die beobachteten Eigenschaften langandauernder Trockenphasen werden von den Modellen annähernd wiedergegeben, wobei eine leichte Unterschätzung der Länge solcher Phasen auffällt.

Für das 21. Jahrhundert sind in den verwendeten Klimaprojektionen keine robusten Veränderungen in der Häufigkeit, Andauer oder räumlichen Erstreckung langandauernder Trocken- bzw. Nassphasen sichtbar. Die durch physikalische Regionalmodelle projizierte leichte Niederschlagszunahme äußert sich in einem höheren Anteil von an Nassphasen betroffenen Datenpunkten sowie etwas häufigeren und längeren Nassphasen, während für die Trockenphasen in diesen Modellen gegenläufige Tendenzen verzeichnet werden. Die zum Teil deutlichen Niederschlagsabnahmen in den statistischen Klimaprojektionen äußern sich dementsprechend in einer Tendenz zur Zunahme von Häufigkeit, Dauer und räumlicher Erstreckung von Trockenphasen. Die von den meisten Modellen beschriebene Umverteilung der Niederschläge innerhalb des Jahres spiegelt sich im Dezilphasen-Indikator nicht wieder.

4.6 Zusammenfassende Betrachtung

Die projizierten Veränderungen in den mittleren Niederschlagssummen spiegeln sich auch in den verschiedenen auf Monats-(Tabelle 12) und Tagessniederschlagssummen (Tabelle 11) basierenden Indikatoren wieder. Überall sind deutliche Abhängigkeiten der Ergebnisse von der Wahl des Modells – v.a. Wahl eines physikalischen bzw. statistischen Modells – sichtbar. Leichte Zunahmen der Jahresniederschläge werden durch die physikalischen Modelle REMO und CLM simuliert, während die statistischen Modelle einen Trend zu trockeneren Bedingungen aufweisen. Diese Eigenschaften der Modelle spiegeln sich auch bei der Untersuchung verschiedener Trockenheitsindikatoren wieder.

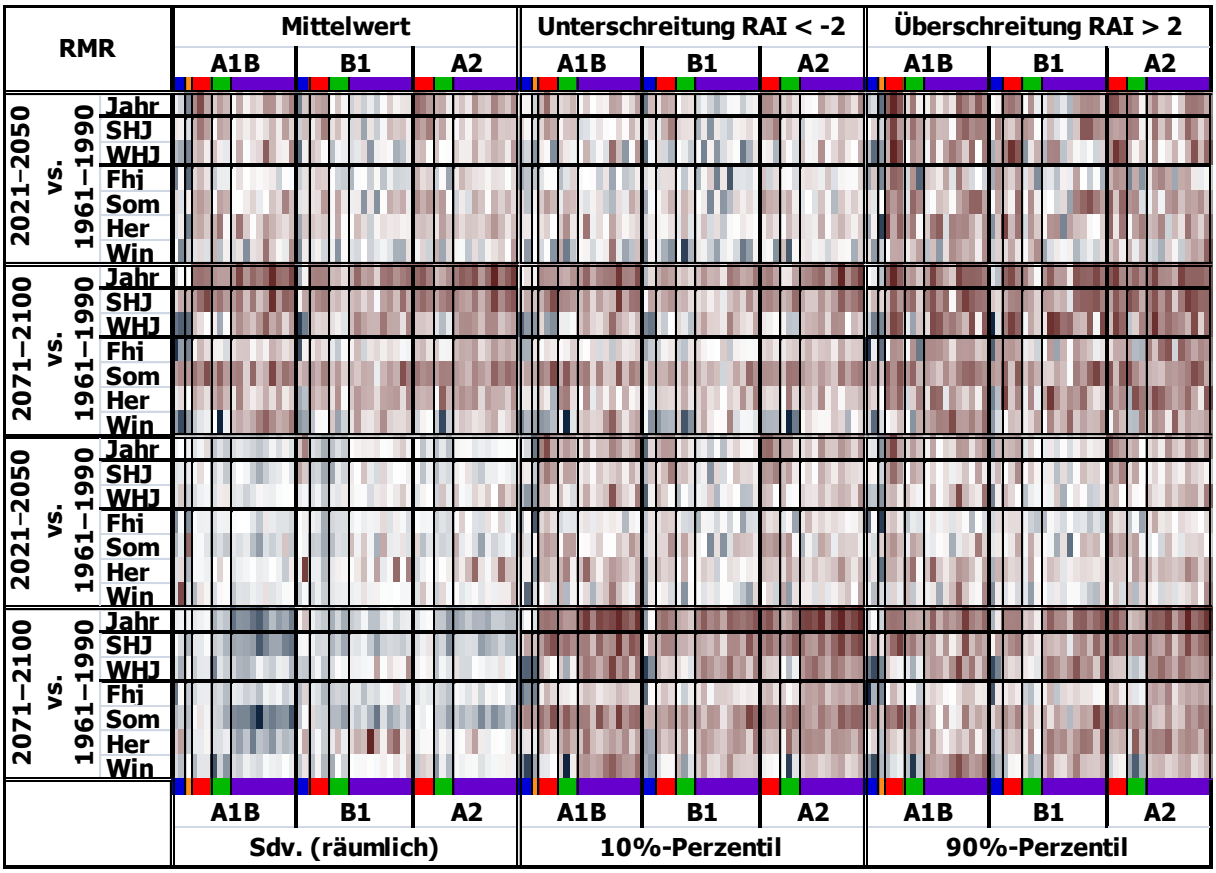
Insbesondere WETTREG 2010 nimmt mit seinen deutlichen Rückgängen des Niederschlags und damit verstärkt trockeneren Zuständen während des Winterhalbjahrs eine Sonderstellung ein. Die anderen Modelle zeigen für den Winter eher eine Tendenz zu nasseren Bedingungen (CLM, REMO) bzw. nahezu gleichbleibenden Niederschlagssummen (WEREX IV und WETTREG 2006), die mit einem Rückgang in der Häufigkeit und Andauer trockener Zustände verknüpft ist. Relativ einig sind sich die Modelle dagegen während des Sommer(halbjahr)s, wo die projizierten Niederschlagsabnahmen mit einer stark ansteigenden Häufigkeit von extrem trockenen Zuständen sowie deutlich längeren Trockenperioden verbunden ist. Dabei lagern sich die häufigeren Trockentage eher zu längeren Trockenphasen zusammen, als das deren Häufigkeit ansteigt. Generell sind die Veränderungen zum Ende des 21. Jahrhundert stärker ausgeprägt als zu dessen Mitte.

Teilweise deuten sich leichte räumliche Abhängigkeiten der Trends, z.B. von der Höhenlage, an. So fallen z.B. die Zunahmen in der Länge von Trockenperioden während des Sommers im Tiefland etwas größer aus als im Bergland. Auch unter Nutzung des RAI zeigt sich zum Ende des 21. Jahrhunderts hin eine leichte Zunahme der räumlichen Variabilität des Niederschlags – insbesondere in den WETTREG 2010-Läufen während des Sommer(halbjahr)s. Dies könnte auf einen in Zukunft anwachsenden Einfluss kleinräumiger konvektiver Niederschlagsereignisse hindeuten. Insgesamt sind diese Veränderungen in der räumlichen Variabilität jedoch als wenig robust zu bewerten und treten hinter der beobachteten zeitlichen Variabilität zurück.

Tabelle 11: Zusammenfassende Darstellung der jahreszeitlichen Änderungssignale (Abkürzungen in folgender Reihenfolge: J=Jahr, Halbjahre: S=SHJ und W=WHJ, Jahreszeiten: F=Frühjahr, S=Sommer, H=Herbst, W=Winter) von vier auf Tageswerten beruhenden Trockenheitsindikatoren (Zahl der Trockentage, Zahl der Trockenperioden, mittlere und maximale Länge der Trockenperioden) in den Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 für einen Ausschnitt der verwendeten regionale Klimaprojektionen (9 unter A1B, 8 unter B1 und 6 unter A2; ohne WETTREG 2010); „Farbcodierung": Separat für jede der vier Kenngrößen angewendet – von Rot (starker Trockenheitstrend) über Weiß (keine Veränderung) zu Blau (starker Trend zu nasseren Bedingungen).

			Zahl der Trockentage							Zahl der Trockenperioden							mittlere Länge							maximale Länge						
		Modell	J	S	W	F	S	H	W	J	S	W	F	S	H	W	J	S	W	F	S	H	W	J	S	W	F	S	H	W
2021-2050 vs. 1961-1990	A1B	CLM																												
		REMO																												
		WEREX IV																												
		WETTREG																												
	B1	CLM																												
		WEREX IV																												
		WETTREG																												
	A2	WEREX IV																												
		WETTREG																												
2071-2100 vs. 1961-1990	A1B	CLM																												
		REMO																												
		WEREX IV																												
		WETTREG																												
	B1	CLM																												
		WEREX IV																												
		WETTREG																												
	A2	WEREX IV																												
		WETTREG																												

Tabelle 12: Zusammenfassende Darstellung der jahreszeitlichen Änderungssignale des Niederschlagsanomalien-Indikators RAI in den Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 für sämtliche verwendete regionale Klimaprojektionen (19 unter A1B, 18 unter B1 und 16 unter A2; Farbcode der Modelle: orange – REMO, blau – CLM, rot – WEREX IV, grün – WETTREG 2006 und violett – WETTREG 2010) für sechs verschiedene RAI-Kenngrößen (Mittelwert: über die RMR gemittelter RAI, Unter-/Überschreitung RAI < -2/ > +2: Häufigkeit deutlich zu trockener/nasser Ereignisse, Sdv. – räumlich: Variabilität der RAI-Werte innerhalb der RMR, 10%/90%-Perzentil: Änderung in der Größe besonders trockener bzw. nasser Ereignisse);
„Farbcodierung": Separat für jede der sechs Kenngrößen angewendet – von Rot (starker Trockenheitstrend bzw. Rückgang in der Variabilität) über Weiß (keine Veränderung) zu Blau (starker Trend zu nasseren Bedingungen bzw. größerer Variabilität).



Veränderungen in den langfristigen Nass- und Trockenphasen, wie sie durch die Dezil-Phasen beschrieben werden, sind statistisch nicht robust zu beschreiben und stark von der natürlichen Klimavariabilität beeinflusst. Tendenziell scheinen Dauer, Häufigkeit und räumliche Erstreckung langandauernder Trockenphasen eher zu- und die zu Nassphasen eher abzunehmen, was mit der generellen Niederschlagsentwicklung in Einklang steht. Trotz dieser Tendenzen zeigen die Klimaprojektionen auch das Potential für langandauernde Nassphasen im 21. Jahrhundert.

5. Zusammenhang zwischen atmosphärischer Zirkulation und regionalen Klimakenngrößen

5.1 Einfluss von Wetterlagen auf Temperatur und Niederschlag (1961–2100)

5.1.1 Methodik

Im letzten Abschnitt dieses Berichts werden am Beispiel der oWLK der Einfluss unterschiedlicher Anströmungen auf das Temperatur- und Niederschlagsregime Mitteleuropas sowie deren projizierte Veränderungen im 21. Jahrhundert analysiert. Den nachfolgenden Auswertungen liegen tägliche Daten zugrunde, die den West- (W+) und Ostsektoren (O+) zugeordnet wurden. Die Ergebnisse werden getrennt nach Halbjahren präsentiert. Temperatur- und Niederschlagsdaten liegen öffentlich zugänglich nur gemittelt für die vier in Abbildung 59 gezeigten Sektoren vor. Der komplette Datensatz der regionalisierten Beobachtungs- und Simulationsdaten wurde vom DWD zwar erzeugt, ist aber noch in der Entwicklungsphase und bisher nicht publiziert, weshalb höher aufgelöste Daten, die eine stärker auf die RMR zugeschnittene Evaluierung erlaubt hätten, gegenwärtig nicht verfügbar sind (Ulf Riediger, DWD, pers. Mitteilung).

Die Lage der RMR innerhalb der vier verfügbaren Sektoren ist denkbar ungünstig: sie liegt ziemlich genau im Übergangsbereich der beiden Sektoren NO und SO – zusätzlich befinden sich die beiden westlichen Sektoren räumlich ebenfalls nicht weit entfernt von der RMR. Eine eindeutige Zuordnung zu einer der Sektoren kann daher nicht erfolgen. Dennoch lassen sich anhand der Eigenschaften des Gesamtgebietes sowie sektorenspezifischer Charakteristiken (wenn auch nur grobe) Aussagen für die RMR ableiten. Generell werden beide Westsektoren deutlich stärker von maritimer atlantischer Luftmassenzufuhr beeinflusst als die stärker von kontinentalen Luftmassen geprägten Ostsektoren – dies trifft insbesondere auf den NW-Sektor zu. Beide nördlichen Sektoren weisen kaum größere Erhebungen auf, während die Alpen die Landschaftsstruktur der südlichen Sektoren deutlich beeinflussen.

Verwendet werden die in Tabelle 2 aufgeführten 12 Modellläufe. Für das Szenario A1B wird sowohl für die drei Läufe von MPEH5 als auch die vier restlichen Modellläufe anderer Globalmodelle ein Mittelwert gebildet. Zur Einschätzung des Einflusses verschiedener Szenarien auf Temperatur und Niederschlagsentwicklung werden für MPEH5 zwei zusätzliche Mittelwerte für die Szenarien A2 und B1 aus den MPEH5-Läufen 1 und 3 gebildet. Außerdem werden der minimale und maximale Modelloutput dargestellt.

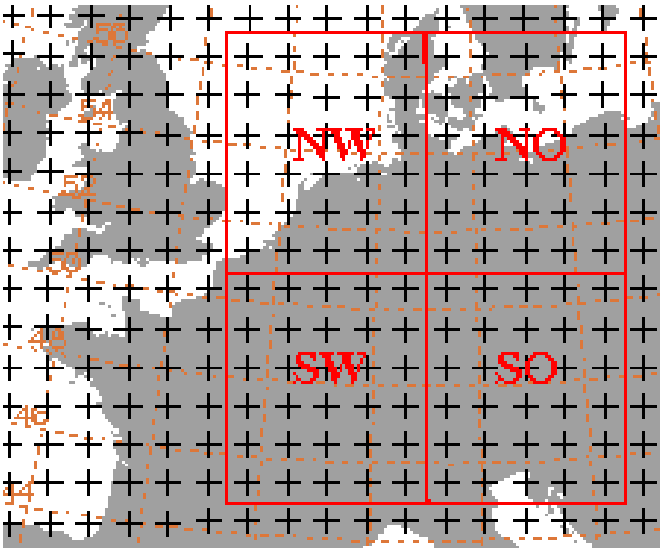


Abbildung 59: Definition der vier Sektoren (NW, NO, SW und SO) für die Betrachtung von Gebietsmitteln der mittleren täglichen Lufttemperatur in 2 m Höhe und des mittleren täglichen Niederschlags. Die Werte an den Gitterpunkten innerhalb der definierten Teilgebiete gehen in einfacher Gewichtung in die Berechnung der Gebietsmittel ein (aus Krahe et al. 2010)

5.1.2 Temperatur

Um eine Einordnung der wetterlagenbezogenen Anomalien vornehmen zu können, werden zunächst die mittleren Temperaturen der vier Sektoren und deren Wiedergabe in den Modellen dargestellt (Abbildung 60, oben). Die mittleren Temperaturen im WHJ sinken von NW nach SO ab, während sie im SHJ recht einheitliche Werte aufweisen. Die in den Süd- gegenüber den Nordsektoren geringeren Temperaturen erklären sich durch den Gebirgseinfluss vor allem der Alpen; während die Abnahme von West nach Ost mit dem Anstieg der Kontinentalität der Gebiete einhergeht. Während die Modelle die realen Bedingungen im WHJ bis auf eine Überschätzung der Temperaturen im NW im Mittel gut wiedergeben, werden die Temperaturen im SHJ vor allem im Norden deutlich unterschätzt. Die Spannweite der Modellfehler ist im WHJ größer als im SHJ und weist im Gegensatz zu diesem keine einheitliche Richtung auf.

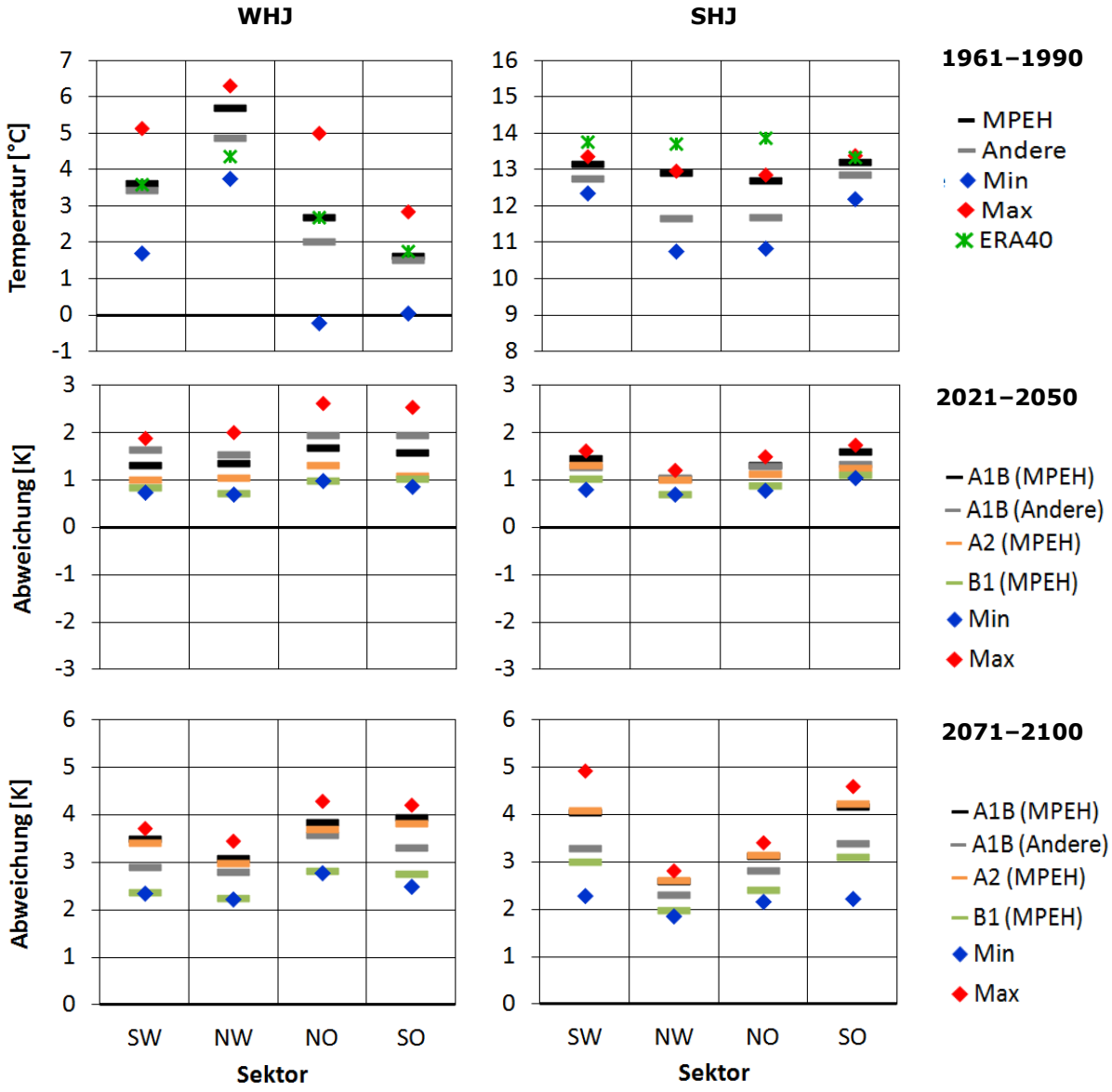


Abbildung 60: Mittlere Temperatur je Sektor im Zeitraum 1961–1990 (oben) sowie Temperaturänderung je Sektor im Zeitraum 2021–2050 (oben) und 2071–2100 (unten) gegenüber 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5, vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2) im Szenario A1B, von MPEH5 Lauf 1 und 3 in den Szenarios A2 und B1 sowie des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals aller verwendeten Modellläufe und der Reanalysewerte (ERA40)

Für die Zeitscheiben 2021–2050 (Abbildung 60, Mitte) und 2071–2100 (Abbildung 60, unten) wird ein Anstieg der Temperaturen projiziert, dessen Signal im WHJ im Osten etwas deutlicher als im Westen ist, während das Signal der südlichen Sektoren insbesondere in 2071–2100 im SHJ markant stärker als das der nördlichen Sektoren ausfällt. Am Ende des 21. Jahrhunderts zeigt sich bei A1B und A2 ein gegenüber dem moderaten Szenario B1 verstärkter Temperaturanstieg.

Die Abweichungen der Temperaturregime der jeweiligen Sektoren von ihren mittleren Zuständen wird in den folgenden Darstellungen für W+ (Abbildung 61, oben) und O+ (Abbildung 61, unten) gezeigt. Im WHJ sind diese Abweichungen bei westlicher (ca. +1 K) deutlich geringer als bei östlicher Anströmung (ca. -3 K). Dieser Effekt dürfte zu großen Teilen auf das gegenüber O+ deutlich höhere Auftreten von W+ zurückzuführen sein, welches die Mitteltemperatur aller Sektoren gegenüber einer imaginären Gleichverteilung von W+ und O+ bereits deutlich erhöht. Im SHJ ist der Einfluss von W+ kaum nachweisbar, während eine östliche Anströmung im Süden weiterhin abkühlend wird, im NW jedoch höhere Temperaturen hervorruft.

Im WHJ unterschätzen die Modelle den Einfluss der W+ auf das Temperaturregime, was vermutlich in der höheren Frequenz dieser begründet ist, welche ihren Einfluss naturgemäß reduziert. Bei einer weit größeren Spannweite der Modellergebnisse wird der Einfluss der O+ eher überschätzt, was ebenfalls in der verschobenen Häufigkeitsverteilung der Wetterlagen begründet sein sollte. Insgesamt wird der Charakter von W+ und O+ von den Modellen erkannt, die Modelle weisen in ihren Ergebnissen untereinander jedoch deutliche Abweichungen auf.

Aussagen zu projizierten Veränderungen im 21. Jahrhundert sind aufgrund der deutlichen Überschätzung der W+/ Unterschätzung von O+ (vgl. Kapitel 3.4 und 3.5) mit hohen Unsicherheiten behaftet. Abbildung 62 (oben; W+) und Abbildung 62 (unten; O+) zeigen die Veränderung des

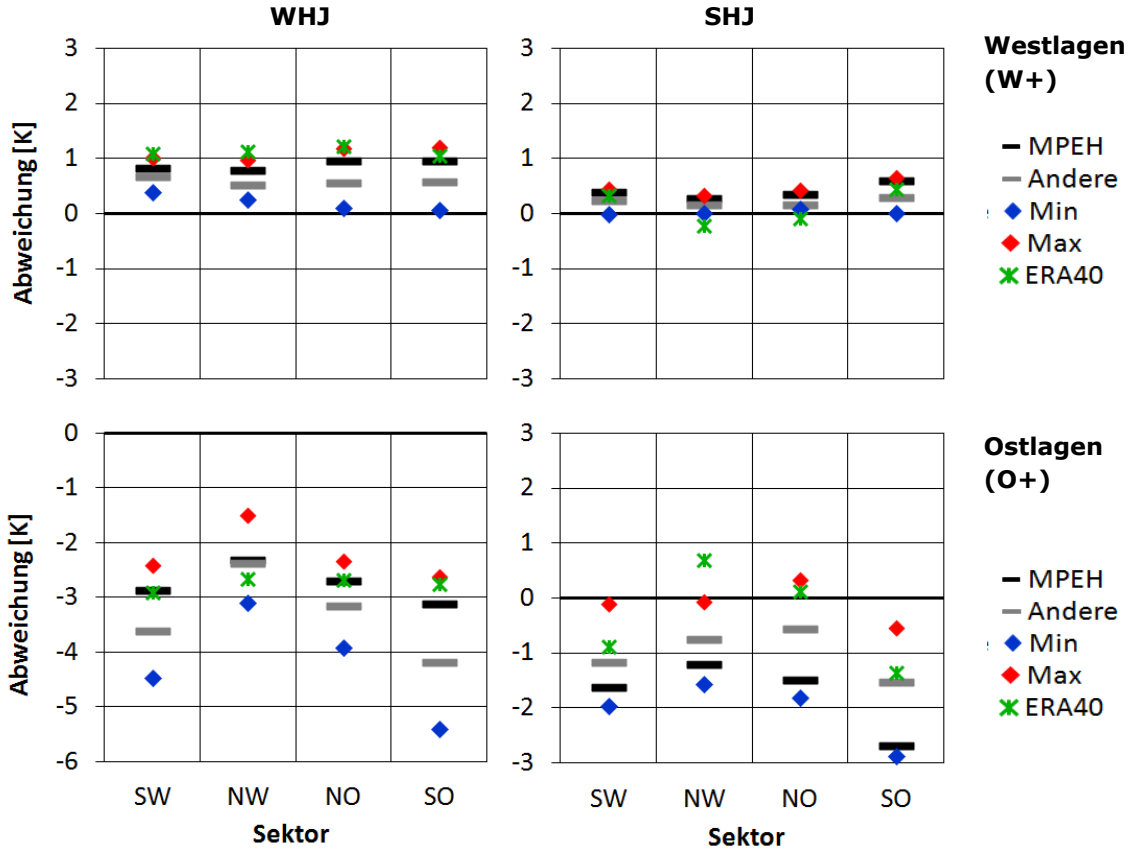


Abbildung 61: Mittlere Temperaturabweichung je Sektor während Westlagen (W+, obere Zeile) sowie der Ostlagen (O+, untere Zeile) im Zeitraum 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5, vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2), des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals und der Reanalysewerte (ERA40)

Charakters westlicher bzw. östlicher Anströmung in 2071–2100 gegenüber 1961–1990. Im WHJ wird eine stärkere Erwärmung der O+ gegenüber W+ projiziert, was u.U. auf ein abnehmendes Kältepotential in Osteuropa/Russland durch eine geringere räumliche Ausdehnung und zeitliche Andauer der winterlichen Schneedecke zurückzuführen sein könnte. Im SHJ sind für W+ und den nördlichen Sektoren für O+ kaum Veränderungen sichtbar. Die südlichen Sektoren lassen eine langsamere Erwärmung der Ost- gegenüber den Westlagen erkennen. Insgesamt sind die Veränderungen der Westlagen gegenüber dem mittleren Temperaturwert klein und das Signal der Ostlagen einer großen Schwankungsbreite zwischen den Modellläufen unterworfen. Aussagen, inwiefern der projizierte Temperaturanstieg in der RMR durch veränderte Anströmverhältnisse deutlich beeinflusst wird, sind daher deutlichen Unsicherheiten unterworfen. Zusätzlich ist aufgrund der sehr groben Einteilung in zwei Sektoren (W+, O+) bzw. 4 Anströmrichtungen eine detailliertere Einschätzung der Einflussnahme von Wetterlagen auf die Temperaturentwicklung in der RMR nur schwer möglich. Für diesbezügliche Aussagen ist die Verwendung einer höher auflösenden Klassifikation, z.B. einer objektivierten Version der GWLk (wie die SVG), sinnvoll.

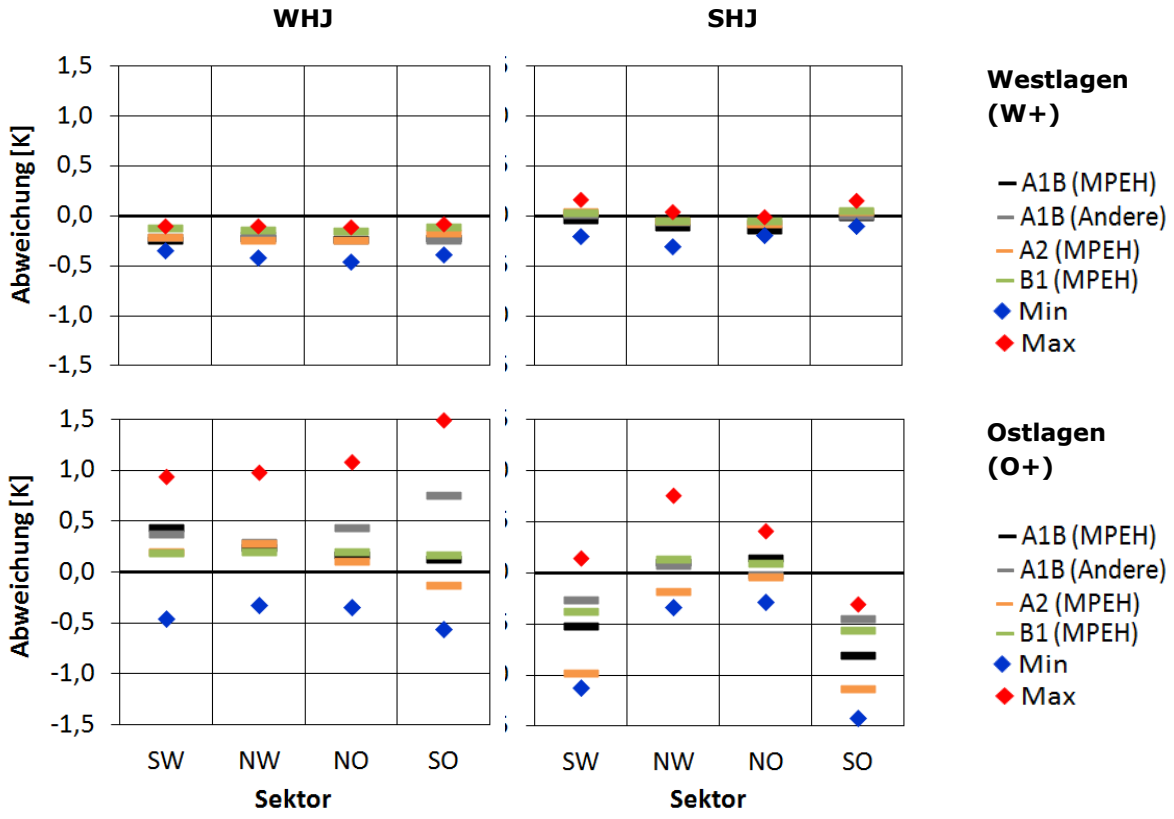


Abbildung 62: Temperaturänderung je Sektor während Westlagen (W+, obere Zeile) sowie der Ostlagen (O+, untere Zeile) im Zeitraum 2071–2100 gegenüber 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5 und vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2) im Szenario A1B, von MPEH5 Lauf 1 und 3 in den Szenarios A2 und B1 sowie des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals aller verwendeten Modellläufe

5.1.3 Niederschlag

Der mittlere tägliche Niederschlag im Referenzzeitraum ist für Reanalyse- (ERA40) und Modelldaten in Abbildung 63 dargestellt. In beiden Halbjahren fallen im NO die wenigsten Niederschläge, während im WHJ im SW, im SHJ im SO der höchsten Niederschlagsmengen registriert werden. Die räumliche Verteilung wird von den Modellen allgemein gut wiedergegeben, während die Mengen im WHJ von allen Modellen zumeist deutlich überschätzt werden.

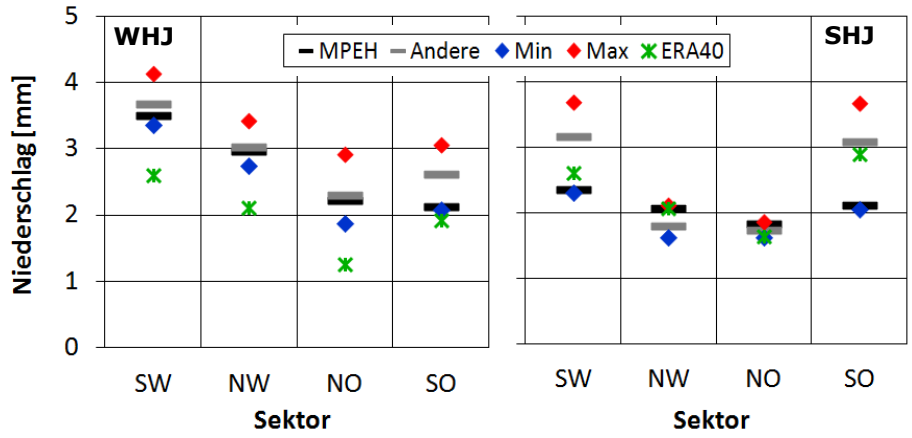


Abbildung 63: Mittlerer Niederschlag je Sektor im Zeitraum 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5 (MPEH), der weiteren vier Modellläufe (Andere, vgl. Tabelle 2), des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals und der Reanalysewerte (ERA40)

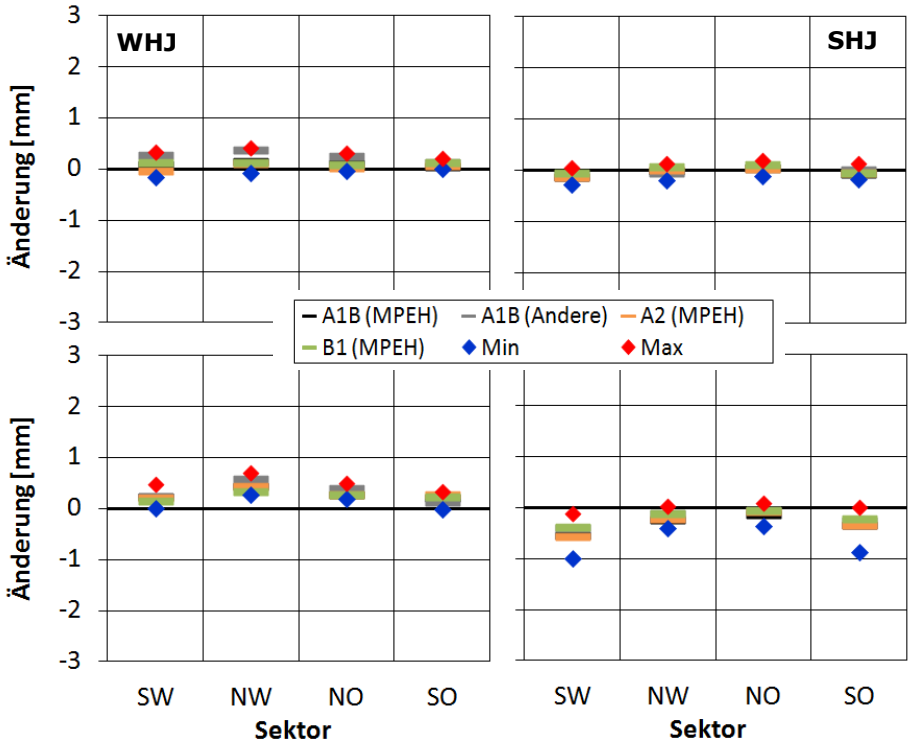


Abbildung 64: Veränderung des mittleren täglichen Niederschlags je Sektor im Zeitraum 2021–2050 (oben) und 2071–2100 (unten) gegenüber 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5 und vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2) im Szenario A1B, von MPEH5 Lauf 1 und 3 in den Szenarios A2 und B1 sowie des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals aller verwendeten Modellläufe

Während für 2021–2050 (Abbildung 64, oben) kaum Veränderungen sichtbar sind, wird für 2071–2100 (Abbildung 64, unten) ein Anstieg der Niederschlagsmengen im WHJ vor allem in den nördlichen Sektoren deutlich, während diese im SHJ vor allem im den südlichen Sektoren zurückgehen.

Die Abweichungen der Niederschlagsregime der jeweiligen Sektoren von ihren mittleren Zuständen wird in den folgenden Darstellungen für W+ (Abbildung 65, oben) und O+ (Abbildung 65, unten) gezeigt. Westlagen bringen im WHJ insbesondere in den Westsektoren höhere Niederschläge, während im SHJ kaum eine Beeinflussung nachweisbar ist. Während Ostlagen fällt insbesondere im WHJ kaum Niederschlag, sie sind ganzjährig trockener als im Mittel. Diese Aussagen bestätigen, dass Dürreereignisse vorrangig mit östlicher Anströmung verknüpft sind. Die Modelle geben die dargestellten Charakteristiken gut wieder und haben nur im Südostsektor diesbezüglich größere Probleme.

Ebenso wie für die Temperatur sind Aussagen zu projizierten Veränderungen der Niederschlagsmengen im 21. Jahrhundert sind aufgrund der deutlichen Überschätzung der W+/ Unterschätzung von O+ mit hohen Unsicherheiten behaftet. Abbildung 66 zeigt die Veränderung des Charakters westlicher bzw. östlicher Anströmung in 2071–2100 gegenüber 1961–1990. Für die Westlagen sind keinerlei Veränderungen feststellbar und die Modellsignale zeigen nur eine geringe Schwankungsbreite. Die Signale der Ostlagen sind deutlich diverser, jedoch von großer Modellunsicherheit geprägt. Eine Veränderung des Charakters von W+ und O+ ist nicht zu erkennen.

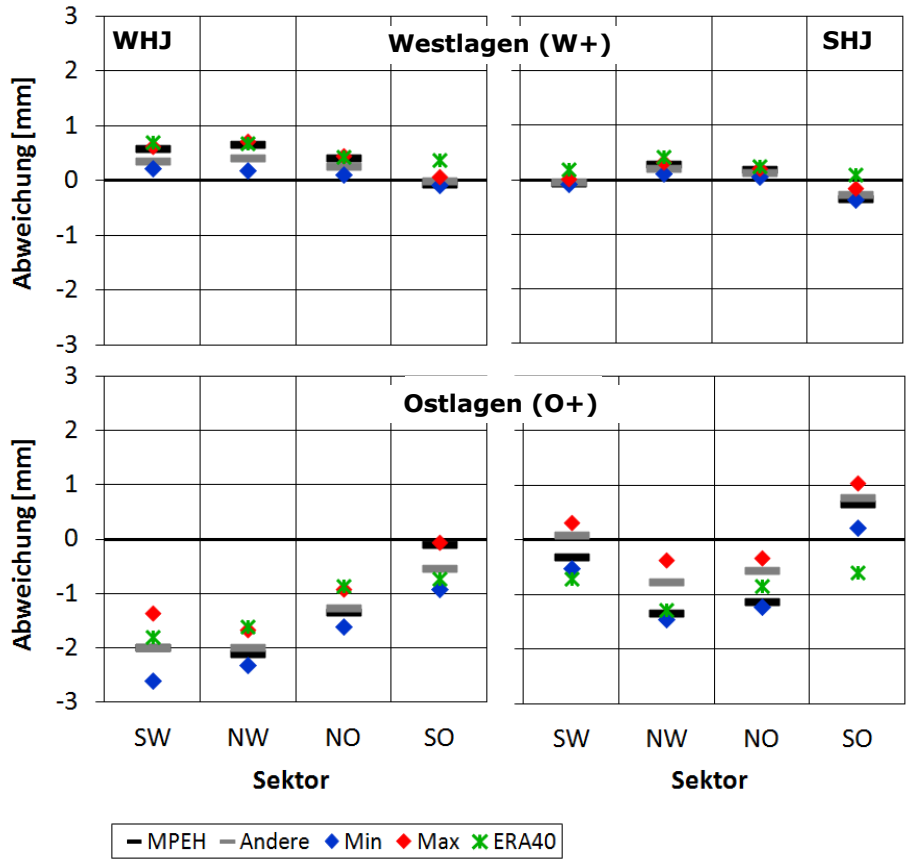


Abbildung 65: Veränderung des mittleren täglichen Niederschlags je Sektor während Westlagen (W+; oben) und Ostlagen (O+, unten) im Zeitraum 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5, vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2), des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals und der Reanalysewerte (ERA40)

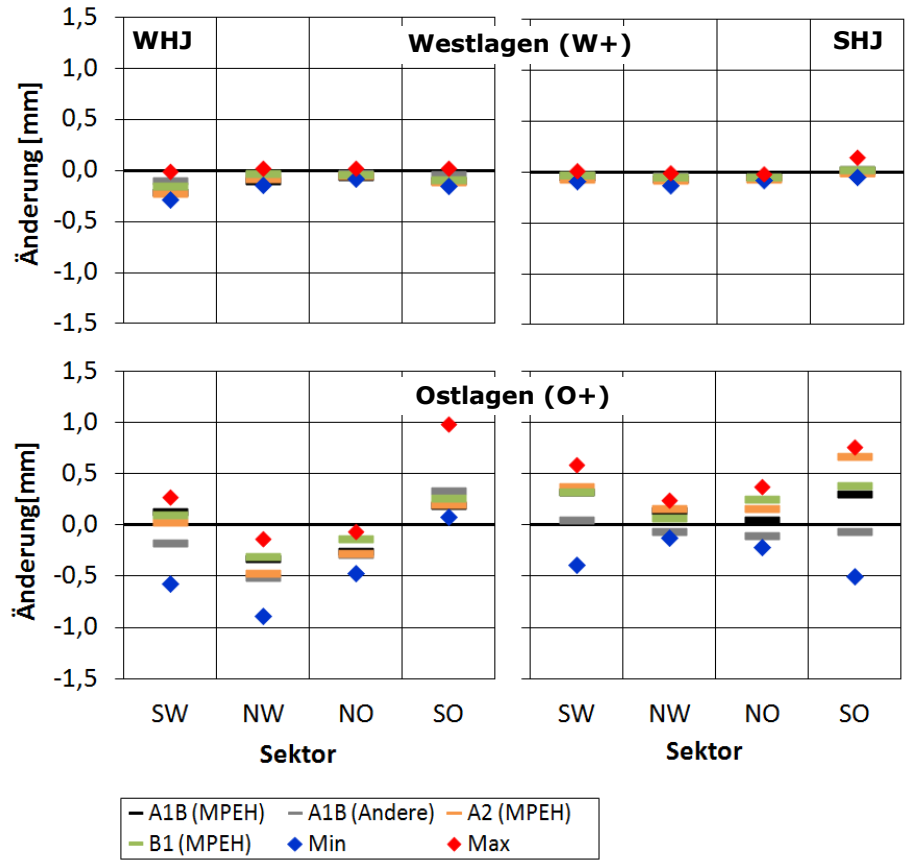


Abbildung 66: Veränderung des mittleren täglichen Niederschlags je Sektor während Westlagen (W+, oben) bzw. Ostlagen (O+, unten) im Zeitraum 2071–2050 gegenüber 1961–1990 im WHJ (links) und SHJ (rechts); Darstellung des mittleren Signals der drei Läufe von MPEH5 und vier weiterer Modellläufe anderer Modelle (Andere, vgl. Tabelle 2) im Szenario A1B, von MPEH5 Lauf 1 und 3 in den Szenarios A2 und B1 sowie des minimalen (Min) und maximalen (Max) Signals aller verwendeten Modellläufe

5.2 Trocken- und Nassperioden und atmosphärische Zirkulation

Untersuchungen der Beeinflussung des Temperatur- und Niederschlagsregimes der RMR durch atmosphärische Zirkulation wurden in ZB2009 durchgeführt. Ergänzend werden an dieser Stelle Zusammenhänge zwischen Trocken- und Nassperioden und atmosphärischer Zirkulation (GWLk) dargestellt.

Zeitlich variable Perioden: Markante Zirkulationsanomalien in den ersten und letzten drei Monaten von Trocken- und Nassperioden wurden im Zeitraum 1901–2005 untersucht. Verwendet werden die zehn intensivsten Trocken[8]- und Nassperioden in der RMR. Diese Auswahl umfasst für eine Länge von 105 Jahren zwar ein relativ kleines Datenkollektiv, beschränkt sich dafür jedoch auf eine sehr charakteristische Masse. Die ausgewählten Perioden konnten aufgrund der innerjährlich z.T. sehr unterschiedlichen Lage nur mit jährlichen Mittelwerten der Wetterlagenhäufigkeit verglichen werden.

Die untersuchten Trockenperioden starten vorrangig im Herbst oder Winter und enden im Winter oder Frühling, während die Nassperioden meist zwischen Frühling und Mittsommer beginnen und im Sommer oder Herbst enden. In Tabelle 13 sind typische Zirkulationsanomalien für Beginn und Ende von Trocken- und Nassperioden aufgeführt. Bezüglich der Anströmung in die RMR eignet sich eine Einteilung in ASR unter Bezugnahme auf die Hauptwindrichtungen (W*, N*, S*, O*) besser für Dürrebetrachtungen als Betrachtungen für Nebenwindrichtungen oder zwei Sektoren, da die Signale dort geringer ausgeprägt sind. Da die letztgenannten zwei Einteilungen jedoch Aussagen über die zukünftige Entwicklung von Dürreereignissen in der RMR auf Basis der oWLK ermöglichen, wird in Tabelle 13 vor allem auf diese Einteilungen Bezug genommen.

Tabelle 13: Charakteristische Wetterlagen (GWLk: GWL, Zyklonalität, ASR, Sektoren) zu Beginn/Ende von Trockenperioden (TP) und Nassperioden (NP); mindestens 3% Abweichung relativer Häufigkeit der Wetterlagen

	Häufiger	Seltener
TP Beginn	HFA, SEA, SA; **A, SO*, O+**	TRM; **Z, NW*, W+**
TP Ende	WA, BM, NEZ; **A, NO***	WZ; **Z, SO***
NP Beginn	NWZ, TRM; **Z, NW*, NO***	HM; **A, SW***
NP Ende	WZ; **Z, SW*, W+**	HM

Trockenphasen beginnen mit einem gehäuften Auftreten von östlichen oder südlichen antizyklonalen, zulasten westlicher und nördlicher, eher zyklonaler, Wetterlagen. Ihr Ende wird durch tendenziell weniger West- und Ostlagen und einem vermehrten Auftreten nördlicher Anströmung eingeleitet. Am Beginn von Nassperioden treten deutlich mehr Troglagen sowie zyklonale Anströmungen aus Nordwest- bis Nord auf, während West- und mitteleuropäische Hochdrucklagen zurückgehen. Vor dem Hintergrund der Eigenschaften der letztgenannten Wetterlagen (feucht) überrascht diese Aufzählung kaum, mit Ausnahme des selteneren Vorkommens der maritim geprägten Westlagen. Letzteres lässt sich jedoch damit erklären, dass die Abweichung des mittleren Tagesniederschlages in der RMR während des GWT West nur gering über dem langjährigen Mittel liegt, Westlagen also im Gegensatz zu Nordwest- und Nordlagen keine „nassen" Wetterlagen sind. Die Signale am Ende der Nassperioden sind schwächer. Westliche und südwestliche Anströmungen nehmen zu, während Hochdrucklagen über Mitteleuropa weiterhin deutlich seltener vorkommen.

[8] für das Ende von Trockenperioden konnten nur sieben charakteristische Perioden gefunden werden

Zeitlich fixierte Perioden: Für Aussagen zu zeitlich fixierten Trocken- und Nassperioden wurden die zehn trockensten und nassesten Monate, Jahreszeiten, Halbjahre und Jahre in der RMR im Zeitraum 1951–2005 identifiziert und auf eine veränderte Häufigkeit von GWL untersucht (Abbildung 67 für Trockenperioden). Erwartungsgemäß sind trockene Bedingungen ganzjährig mit einer deutlich erhöhten Wahrscheinlichkeit von antizyklonalen, nasse Anomalien mit zyklonalen GWL verbunden. Dies tritt besonders deutlich bei den GWT mit Hoch- oder Tiefdruckgebieten direkt über Mitteleuropa (HME/TME) sowie Troglagen über Mittel-, nicht aber Westeuropa (TRM vs. TRW) zutage. Die häufigste GWL, „West, zyklonal" (WZ), sowie zykonale Nordwestwetterlagen (NWZ) treten seltener während trockener und häufiger während nasser Bedingungen auf, insbesondere im WHJ. Im Gegensatz zu zonalen zeigen meridionale Wetterlagen uneinheitliche Ergebnisse mit einer Tendenz zu höherer Frequenz im WHJ und niedrigerer im SHJ während negativer Niederschlagsanomalien (gegenteilig für positive Anomalien).

Periode	P-A	Grosswetterlagen (GWL)																														
		WA	WZ	WS	WW	SWA	SWZ	NWA	NWZ	HM	BM	TM	NA	NZ	HNA	HNZ	HB	TRM	NEA	NEZ	HFA	HFZ	HNFA	HNFZ	SEA	SEZ	SA	SZ	TB	TRW	U
Januar	42	1.2	-2.7	-0.9	-0.2	-0.3	-1.3	0.0	-1.3	2.9	0.2	-0.1	-0.2	-1.1	1.6	-0.3	0.7	-0.7	-0.1	-0.4	0.0	0.2	0.2	0.7	0.7	0.5	0.7	0.0	-0.3	0.6	-0.2
Februar	31	-0.3	-4.3	-0.4	1.0	0.0	-0.2	-0.5	-1.4	2.2	0.6	0.2	-0.1	-0.7	0.0	0.7	-0.5	-0.3	-0.3	0.0	1.9	-0.5	-0.2	-0.2	0.8	1.7	0.7	0.7	0.0	-0.5	0.3
März	49	0.2	-3.5	-0.6	0.9	0.3	-0.1	-0.4	-2.4	0.6	-0.1	-0.6	-0.3	-0.6	0.7	-0.8	1.6	-1.1	0.1	-0.3	3.8	0.4	0.3	0.0	0.7	0.6	0.9	0.2	0.1	-0.1	-0.3
April	39	-0.6	-1.7	0.1	-0.7	0.5	-0.1	-0.3	-1.6	-0.3	3.1	-1.2	-0.4	-1.0	0.4	0.7	0.6	-0.2	0.3	-0.2	0.6	0.3	0.6	0.6	0.1	-0.2	-0.2	-0.1	0.2	0.9	-0.1
Mai	44	-0.6	-0.5	0.3	-0.4	0.2	-0.2	-0.5	0.0	-0.3	2.3	-0.1	-0.1	-0.5	-0.3	0.1	0.5	-0.3	0.1	-0.8	2.3	-0.6	1.0	-0.5	-0.4	-0.3	0.1	0.0	0.4	-0.6	-0.1
Juni	51	2.5	-2.5	-0.9	-0.7	1.4	0.0	0.0	0.6	0.6	2.0	0.1	-0.5	0.2	1.5	0.1	0.9	-1.0	-0.5	-0.9	0.5	-0.5	0.0	-0.5	0.1	-0.2	0.1	-0.1	-0.2	-2.1	-0.1
Juli	46	0.8	-3.4	-0.3	-0.5	0.2	-0.1	0.4	1.1	0.3	2.0	-0.4	-0.1	-0.3	0.8	-0.7	0.9	-1.5	0.1	-0.8	1.3	0.6	1.1	-0.1	-0.2	0.0	0.0	0.0	-0.8	-0.1	-0.1
August	49	1.5	1.0	-0.1	-0.5	-0.6	-0.9	-0.1	-1.0	0.7	-1.6	-0.6	-0.3	-0.4	1.6	-0.1	-0.2	-0.3	0.2	-0.3	1.9	-0.1	1.0	-0.3	-0.1	-0.1	-0.2	0.0	-0.1	-0.1	-0.1
September	40	2.1	-1.2	-0.2	0.1	-0.1	-0.9	1.5	-0.5	1.7	0.1	-0.3	-0.1	-0.3	0.1	-0.2	1.1	-1.1	0.5	0.0	-0.4	-0.3	-0.1	-0.3	-0.4	0.2	0.1	-0.2	-0.6	-0.3	0.0
Oktober	32	-0.1	-1.3	-0.7	-0.4	1.5	-0.4	-0.2	-1.1	0.8	1.3	-0.3	0.0	-0.4	0.3	-0.4	1.1	-1.2	-0.1	0.2	1.6	-0.2	0.0	-0.1	0.7	0.2	0.0	0.1	-0.8	-0.3	0.0
November	42	-0.7	-2.6	-0.8	0.0	1.3	-0.6	0.0	-1.0	1.1	0.7	-0.5	-0.1	-0.5	-0.2	0.0	0.3	0.7	0.2	-0.3	1.0	0.4	-0.2	-0.8	0.0	0.6	0.2	0.5	0.1	1.2	-0.2
Dezember	39	-0.7	-1.8	-1.2	-0.5	1.6	1.1	0.3	-1.3	0.6	1.1	-0.2	-0.2	-0.8	0.3	0.5	-0.2	0.7	-0.1	-0.1	-0.7	0.6	-0.2	0.0	0.2	-0.4	1.4	-0.3	-0.1	0.3	-0.1
Winter	61	-3.4	-7.0	-1.7	-0.9	0.0	-0.3	-0.9	-1.4	4.0	-0.9	0.8	0.1	-1.8	3.4	2.3	-0.4	-1.9	0.2	0.1	2.1	0.4	0.7	-0.5	1.0	3.5	1.5	1.6	0.1	-0.6	0.0
Frühling	68	1.7	-2.6	-0.9	0.7	1.6	-0.6	0.6	-3.1	1.5	3.1	-1.6	-0.8	-0.4	0.0	0.2	0.5	-0.5	0.6	-0.2	0.5	2.5	-1.1	0.8	0.2	0.1	-0.2	0.0	-1.3	-1.3	0.0
Sommer	75	1.6	-3.0	1.0	-0.7	0.9	0.8	1.2	0.6	0.3	6.8	-0.3	-0.5	-0.4	1.1	-1.0	0.9	-2.0	0.8	-2.0	0.0	-1.2	0.4	-0.8	-0.3	-0.3	-0.5	-0.1	-1.6	-1.7	-0.2
Herbst	59	1.5	-1.8	-0.9	-0.8	2.0	-1.0	0.7	0.1	1.7	0.4	-0.6	-0.1	-1.7	-0.9	0.1	0.9	0.4	0.5	-0.1	1.5	-0.5	0.0	-0.7	0.8	0.0	-0.1	-0.1	-1.8	0.2	0.1
WHJ	67	-1.9	-10.2	-0.7	1.1	1.8	-0.7	-1.1	-5.3	6.5	-2.0	-0.9	0.4	-1.7	3.0	2.6	3.5	-3.7	-1.0	0.5	2.8	1.2	1.4	-2.2	3.8	2.2	2.3	0.5	-0.1	-1.6	-0.2
SHJ	74	0.5	0.4	-0.3	-1.7	1.3	0.3	-0.7	-1.2	2.2	9.8	-0.8	-1.5	-0.6	0.5	-0.7	-0.4	-4.0	1.0	-3.2	1.6	-0.8	1.6	0.6	0.0	-0.6	-0.9	-0.4	-2.2	0.8	-0.4
Jahr	77	-1.3	-8.6	-0.6	-0.8	1.1	-3.2	-0.7	-5.7	6.5	5.3	-1.6	-0.6	0.2	2.4	0.6	3.4	-6.3	1.5	3.4	3.2	-0.2	-0.6	-2.0	3.5	2.1	2.4	0.5	-3.4	-0.7	0.1

Abbildung 67: Durchschnittliche Abweichung des mittleren Auftretens [Tage] von GWL während der zehn trockensten monatlichen, jahreszeitlichen, halbjährlichen und jährlichen Perioden im Zeitraum 1951–2005; Anomalien größer als ein Tag sind mit heller, größer als drei Tage mit dunkler Hintergrundfarbe markiert (blau: negative, rot: positive Anomalie); die Zeile P-A zeigt die durchschnittliche Niederschlagsanomalie der zehn trockensten Perioden (Abweichung von 1961–1990)

Um weitere dürrerelevante Parameter einbeziehen zu können, wurde die Untersuchung auf zusätzliche Klimaelemente (Temperatur, Niederschlag, relativer Luftfeuchtigkeit, Luftdruck auf Meereshöhe und Sonnenscheindauer) ausgedehnt. Die Ergebnisse wurden beispielhaft für den Zeitraum 1901–2009 für die Säkularstation Potsdam-Telegrafenberg zusammengefasst – diese Station ist die der RMR/Sachsen nächstgelegene, die aufgrund der Datenlage eine entsprechende Auswertung für einen längeren Zeitraum zulässt. Ihre Messreihen sind weitgehend lückenlos und es wird seit 1893 an gleichem, weitgehend unverändertem Standort unter gleichen Messbedingungen beobachtet. Selektiert wurden markante Perioden an beiden Enden der Wahrscheinlichkeitsverteilung. Unter Nutzung der GWLk wurden für WHJ und SHJ die jeweils markantesten zehn Vertreter jedes Elements auf typische Zirkulationsmuster untersucht (vgl. Abbildung 68 für WHJ; SHJ: nicht abgebildet).

Deutliche Gemeinsamkeiten in typischen Zirkulationsmustern wurden für alle Elemente festgestellt, insbesondere für die Kombination aus geringen Niederschlägen, geringer Luftfeuchtigkeit, hoher Sonnenscheindauer und hohem Luftdruck im SHJ sowie abgeschwächt im WHJ. Diese Kombination beinhaltet eine hohe Dürrerelevanz. Antizyklonale Wetterlagen treten hier deutlich häufiger auf, während Anströmungen aus westlicher und im SHJ nördlicher Richtung markant seltener vorkommen. Die umgekehrte Zusammensetzung, relevant für Nassperioden, offenbart ebenfalls markante, aber etwas geringere Gemeinsamkeiten. Zonale und zyklonale Wetterlagen dominieren zulasten von Hochdruck- und im SHJ Ostlagen. Ähnlichkeiten mit für niedrige bzw. hohe Temperaturabweichungen charakteristischen Zirkulationsmustern finden sich vor allem für den Niederschlag sowie im SHJ für Sonnenschein und Luftdruck. Die Zuordnung variiert dabei zwischen den Jahreszeiten: im WHJ korrelieren positive Temperaturanomalien mit hohen Niederschlägen (und umgekehrt), während im SHJ hohe Temperaturen mit geringen Niederschlägen, hoher Sonnenscheindauer und hohem Luftdruck (und umgekehrt) einhergehen. Die Kombination dieser Klimaelemente kann zu großen Problemen in Land- und Forstwirtschaft führen.

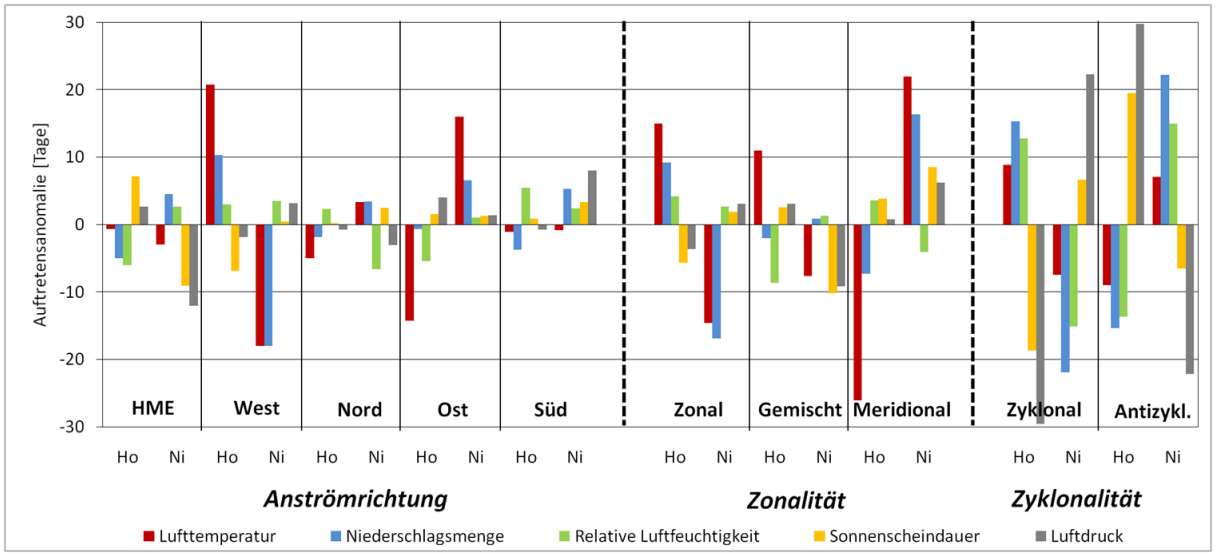


Abbildung 68: Durchschnittliche Häufigkeitsanomalien verschiedener Zirkulationsmuster während der zehn höchsten (Ho) bzw. niedrigsten (Ni) Zeitreihenwerte fünf verschiedener Klimaelemente in Potsdam (1901–2009) für das WHJ

6. Zusammenfassende Betrachtung

Ziel des Teilprojektes 2.1b war es, möglichst robuste Aussagen zu Zirkulationsveränderungen sowie Häufigkeit, Andauer und Intensität zukünftiger Dürreereignisse zu gewinnen. Außerdem wurden Veränderungen atmosphärischer Zirkulation und deren Implikationen für die RMR untersucht. Dürreereignisse gehen einher mit der Veränderung anderer wichtiger Klimaparameter wie Temperatur und Niederschlag – die wenigsten Forschungsarbeiten beschäftigen sich daher ausschließlich mit dem Thema Dürre. Spezifische Auswertungen zur Veränderung der Häufigkeit von Zirkulationsmustern und Anströmrichtungen und daraus resultierenden Veränderungen von Temperatur und Niederschlag in der RMR wurden anhand der in der REGKLAM-Datenbank vorliegenden Klimaprojektionsdaten und ggf. direkt bei den Modellentwicklern oder externen Anwendern erhältlichen Daten vorgenommen. In der REGKLAM-Datenbank sind Modellergebnisse verschiedener für den deutschsprachigen Raum vorliegender Regionalmodelle enthalten, die gegenwärtig durch das deutsche globale Klimamodell ECHAM5 angetrieben werden (Feske et al. 2010). Die Analysen zur zukünftigen Entwicklung von Trockenheit basieren auf diesem Datensatz, während für die Zirkulationsuntersuchungen weitere, großräumigere Datensätze herangezogen wurden.

In Kapitel 2 *Bisherige Erkenntnisse* wurden bisher publizierte Ergebnisse des Teilprojektes vorgestellt. Kapitel 3 *Atmosphärische Zirkulation* untersucht Veränderungen atmosphärischer Zirkulation anhand von Beobachtungs- und Projektionsdaten. Dabei, sowie in Kapitel 5, wurden drei verschiedene Wetterlagenklassifikationen verwendet: 1) die manuelle (Hess/ Brezowsky) Großwetterlagenklassifikation (GWLk), 2) eine automatisierte Version dieser Klassifikation nach James (SVGk) und 3) die objektive Wetterlagenklassifikation des DWD (oWLK). Die beiden ersteren Klassifikationen wurden für Betrachtungen der Vergangenheit (1871/81–2010) verwendet, während die für 1961–2100 vorliegende oWLK auch für Zukunftsbetrachtungen verwendet wurde. Dabei wurden die für zwölf verschiedene Läufe globaler Klimamodelle berechneten Zeitreihen der oWLK benutzt.

Die methodischen Hintergründe der Klassifikationen wurden in den Abschnitten 3.1 und 3.2 vorgestellt, während sich Abschnitt 3.3 deren Trends und Häufigkeiten im Zeitraum 1901–2010 widmet. In Abschnitt 3.4 wurden im Reanalysezeitraum 1961–1990 Modell- mit Reanalysedaten (ERA40) verglichen zur Beurteilung, wie realistisch die verwendeten Klimamodelle gegenwärtige Klimabedingungen wiedergeben können. Im Gegensatz zur Realität beinhalten die Modelle eine deutlich stärkere Prägung des mitteleuropäischen Klimas durch zyklonal geprägte, maritime Westwetterlagen. Die sächsischen Winter werden also eher feuchter und milder, die sächsischen Sommer etwas wechselhafter als in der Realität abgebildet. Der Vergleich von Projektions- mit Daten aus dem Kontrollzeitraum ermöglicht die Evaluierung der Änderungssignale vor dem Hintergrund des modellierten Ist-Zustandes. Dabei ist ebenfalls zu prüfen, ob und wie stark sich die Signale vom im Kontrollzeitraum dargestellten Modellfehler abheben. Die Zeitscheibe 2021–2050 zeigt nur geringe und uneinheitliche Veränderungen. Zum Ende des 21. Jahrhunderts (2071–2100) sind stärkere Signale zu erkennen. Diese übersteigen die Abweichungen der Modelle vom Istzustand im Kontrollzeitraum jedoch zumeist nicht. Es besteht eine schwache Tendenz zu mehr West- (W+) zulasten von Ostlagen (O+). Insgesamt lässt sich feststellen, dass die analysierten Änderungssignale nicht robust sind und auf eine recht schwache Sensitivität der oWLK gegenüber dem Treibhaussignal hindeuten.

Aufgrund der nur schwachen Signale können auf der Basis der hier erkennbaren Zirkulationsveränderungen keine Aussagen zur zukünftigen Entwicklung von Niederschlags- oder Dürreereignissen in der RMR getroffen werden. Ebenfalls lassen sich die von den Modellen projizierten deutlichen Niederschlagsabnahmen in der RMR im Sommer über die dargestellten, nur schwach ausgeprägten Zirkulationsveränderungen nicht erklären. In Kapitel 3.5 wurde die beobachtete und projizierte Entwicklung der Häufigkeit von Wetterlagen mit Anströmung aus westlicher Richtung (W+) für einen 230jährigen Zeitraum atmosphärischer Zirkulation für Mitteleuropa analysiert. Gemeinsamkeiten/Unterschiede zwischen vergangener und von Klimamodellen projizierter Klimavariabilität sowie beobachtete und projizierte Trends wurden anhand eines 31-jährig gleitenden Mittels für die drei Klassifikationen unter Verknüpfung eines sehr langen Diagnosezeitraumes (deutlich über 100 Jahren für SVG und GWLk) mit einem 100jährigen Projektionszeitraum (oWLK) analysiert. Bis

zum Ende des Jahrhunderts wird ein Anstieg von W+ um ca. 4 bis 8% relativ zu 1961–1990 projiziert. Der projizierte Anstieg für die kommenden 90 Jahre ist etwas geringer als die beobachtete Zunahme seit den 1930er Jahren, jedoch deutlich. Die Relevanz des projizierten Anstiegs ist durch die deutliche Überschätzung der W+ im Kontrollzeitraum 1961–2000 gegenüber den Beobachtungswerten allerdings eingeschränkt. Er erfolgt vor dem Hintergrund einer massiven Überschätzung der W+ in der oWLK, deutlich größer als das Änderungssignal der W+. Der in den vergangenen 20 Jahren registrierte Anstieg ist bereits (geringfügig) höher als die im Mittel der Modelle bis zum Ende des 21. Jahrhunderts erwartete Zunahme. Vor diesem Hintergrund ist es fraglich, ob die den Modellläufen inhärenten kontinuierlichen Anstiege noch von praktischer Relevanz sind, oder ob der erwartete Anstieg bereits vorweggenommen wurde.

Kapitel 4 *Trockenheit und Nassphasen* stellt die für das 21. Jahrhundert erwarteten Veränderungen in Häufigkeit, Andauer und räumlichen Charakteristika von Trocken- und Nassphasen dar. Dazu werden verschiedene auf Tages-, Monats- und Jahreszeitenniederschlagssummen basierende Indikatoren verwendet. Dabei spiegeln sich die für die mittleren Niederschlagssummen projizierten Veränderungen auch in den verschiedenen Indikatoren wieder – mit einem Anstieg bei den Trockenheit beschreibenden Kennzahlen während des Sommers und eher abnehmendem Trockenheitsrisiko während des Winters.

Die Bandbreite der Ergebnisse ist in den meisten Fällen erheblich und mögliche Änderungssignale zum Teil schwer von der großen natürlichen Variabilität des Niederschlags zu unterscheiden. Die Wahl des regionalen Downscalingansatzes hat einen großen Einfluss auf die Ergebnisse – größer als die Wahl des Emissionsszenarios. Besonders deutlich wird die Bedeutung der Wahl des Regionalmodells im Vergleich der physikalischen und statistischen Downscalingansätze. Schon hinsichtlich des Bias zu den Beobachtungsdaten im Referenzzeitraum zeigen sich deutliche Unterschiede; was besonders für die Verwendung der Regionalklimamodelle für den Antrieb eines Impaktmodells von Bedeutung ist. Die Zahl trockener Tage und die Länge von Trockenperioden wird durch die physikalischen Modelle v.a. in den Sommermonaten zum Teil erheblich unterschätzt. Durch die Verwendung von Indikatoren, die auf einer Normalisierung der Niederschlagsverteilung beruhen, können die verschiedenen Modelle auch im Referenzzeitraum gut miteinander und mit den Beobachtungen verglichen werden – individuelle Modellbias fallen dann kaum noch ins Gewicht. Die verschiedenen Modellklassen unterscheiden sich nicht nur durch ihre unterschiedlich großen Abweichungen von den Beobachtungen sondern auch in den für die Zukunft simulierten Veränderungen in den Trockenheitsindikatoren. Bedingt durch die von den physikalischen Modellen REMO und CLM projizierten leichten Zunahmen der Jahresniederschläge im 21. Jahrhundert, zeigen die meisten Trockenheitsindikatoren abnehmende Trends, während die statistischen Modelle einen Trend zu trockeneren Bedingungen aufweisen.

Vergleiche der beiden Niederschlagsanomalienindikatoren *Rainfall Anomaly Index* (RAI) und *Standardized Precipitation Index* (SPI) zeigen, dass beide Indikatoren – trotz der für den RAI beobachteten leichten Verschiebungen der Häufigkeitsklassen im Validierungszeitraum 1961–2000 hin zu trockenen Verhältnissen – vergleichbare Änderungssignale im 21. Jahrhundert zeigen. Unter Beachtung der erheblichen Bandbreite der Änderungssignale einzelner regionaler Klimaprojektionen kann daher davon ausgegangen werden, dass der RAI ausreichend „robuste" Ergebnisse für die Bewertung zukünftiger Trockenheitstrends liefert. Die deutlich komplexere Berechnung des SPI bringt keine nennenswerten Vorteile.

Veränderungen in den langfristigen Nass- und Trockenphasen, wie sie durch die Dezil-Phasen beschrieben werden, sind für die zur Verfügung stehenden Zeithorizonte statistisch nicht robust zu beschreiben und stark von der natürlichen Klimavariabilität beeinflusst. Tendenziell scheinen die Dauer, Häufigkeit und räumliche Ausdehnung langandauernder Trockenphasen eher zu- und die der Nassphasen eher abzunehmen.

Aufgrund der bereits in der Vergangenheit beobachteten unterschiedlichen Entwicklung in den einzelnen Jahreszeiten bietet sich eine jahreszeitlich differenzierte Trendanalyse an. Die physikalischen Modelle (CLM, REMO) zeigen für den Winter eine Tendenz zu nasseren Bedingungen, die statistischen Ansätze WEREX IV und WETTREG 2006 nahezu gleichbleibende Niederschlagssummen. Grundsätzlich tendieren diese vier Modelle zu einem Rückgang in der Häufigkeit und Andauer

trockener Zustände, während WETTREG 2010 deutliche Niederschlagsrückgänge und damit verstärkt trockenere Zustände (basierend auf monatlichen Indikatoren) simuliert. Die größte „Einigkeit" in den Modellergebnissen ist während des Sommer(halbjahr)s zu beobachten, wo die projizierten Niederschlagsabnahmen mit einer stark ansteigenden Häufigkeit von extrem trockenen Zuständen sowie deutlich längeren Trockenperioden verbunden ist. In Abhängigkeit von untersuchtem Indikator und der Seltenheit der durch ihn beschriebenen Zustände wird eine Verdopplung bis Verfünffachung extremer Trockenheit simuliert. Dabei lagern sich die häufigeren Trockentage eher zu längeren Trockenphasen zusammen, als dass deren Häufigkeit ansteigt. Auch die Trends für den Herbst sind eher in Richtung trockenerer Verhältnisse gerichtet, während die des Frühjahrs recht inhomogen über die verschiedenen Modellklassen ausfallen. Generell sind die Veränderungen zum Ende des 21. Jahrhundert stärker ausgeprägt als zu dessen Mitte.

Teilweise deuten sich leichte räumliche Abhängigkeiten der Trends, z.B. von der Höhenlage, an. So fallen z.B. die Zunahmen in der Länge von Trockenperioden während des Sommers im Tiefland etwas größer aus als im Bergland. Auch unter Nutzung des RAI zeigt sich zum Ende des 21. Jahrhunderts hin eine leichte Zunahme der räumlichen Variabilität des Niederschlags – insbesondere in den WETTREG 2010-Läufen während des Sommer(halbjahr)s. Dies könnte auf einen in Zukunft anwachsenden Einfluss kleinräumiger konvektiver Niederschlagsereignisse hindeuten. Insgesamt sind diese Veränderungen in der räumlichen Variabilität jedoch als wenig robust zu bewerten und treten hinter der beobachteten zeitlichen Variabilität zurück.

Kapitel 5 *Zusammenhänge zwischen atmosphärischer Zirkulation und regionalen Klimakenngrößen* untersucht, inwieweit Veränderungen im beobachteten und projizierten Niederschlagsregime durch Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation erklärbar sind. In Abschnitt 5.1 wurden am Beispiel der oWLK der Einfluss unterschiedlicher Anströmungen auf das Temperatur- und Niederschlagsregime Mitteleuropas dargestellt. Welche Anströmung bringt eher wärmere/kältere Temperaturen und welche mehr/weniger Niederschlag? Anschließend wurde für das 21. Jahrhundert analysiert, ob und wie sich der klimatische Charakter der untersuchten Anströmrichtungen verändert. Temperaturen sollen sich im WHY bei östlicher überproportional zu westlicher Anströmung erhöhen. Dies könnte u.U. auf ein abnehmendes Kältepotential in Osteuropa/Russland (geringere räumliche Ausdehnung/zeitliche Andauer der winterlichen Schneedecke) zurückzuführen sein. Veränderungen im SHY sind weniger aussagekräftig. Niederschlagssignale zeigen keine eindeutigen Veränderungen. Die Aussagen sowohl zu Temperatur als auch zu Niederschlag sind aufgrund der deutlichen Überschätzung westlicher bzw. Unterschätzung östlicher Anströmung mit hohen Unsicherheiten behaftet.

In Abschnitt 5.2 wurde für die RMR der Zusammenhang zwischen beobachteten Trocken- und Nassperioden und atmosphärischer Zirkulation auf Basis der GWLk analysiert. Dazu wurden markante Zirkulationsanomalien zu Beginn (erste drei Monate) und Ende (letzte drei Monate) dieser Perioden genutzt. In einem weiteren Schritt wurden Zirkulationsanomalien zeitlich fixierter Trocken- und Nassperioden auf Monats-, Jahreszeiten-, Halbjahres- und Jahresbasis untersucht. Diese Analyse wurde in einem weiteren Schritt auf weitere dürrerelevante Klimaparameter ausgedehnt. Die in diesen Untersuchungen erzielten Ergebnisse helfen bei der Ursachenanalyse von Dürre- und Nassereignissen.

Abschließend lässt sich feststellen, dass Niederschlagsveränderungen – insbesondere jene, die extremere Ausprägungen des Niederschlags (Starkniederschlag und Trockenheit) betreffen – für das 21. Jahrhundert nur mit großen Unsicherheiten simuliert werden können. Durch die großen Abweichungen, der durch die Modelle simulierten atmosphärischen Zirkulation von den Beobachtungsdaten, kann die Bandbreite zukünftig zu erwartender Dürretrends über die zusätzliche Analyse von Veränderungen in der atmosphärischen Zirkulation nicht eingeengt werden. Die zum Teil deutlich unterschiedlichen Trends verschiedener Globalmodelle machen jedoch deutlich, dass die auf der Grundlage eines einzigen Globalmodells abgeschätzte Bandbreite der zukünftig zu erwartenden Klimaentwicklung möglicherweise unterschätzt wird. Daher erfolgten genauere Untersuchungen zur Einordnung der in REGKLAM verwendeten regionalen Klimamodelle unter Verwendung verschiedener Globalmodelle und weiterer regionaler Klimaprojektionen aus dem ENSEMBLES-Projekt. Diese sind im Zusatzproduktbericht *Analyse extremer Niederschlagsereignisse auf Basis von globalen und regionalen Klimaprojektionen – Ensemble-Simulationen für die REGKLAM-Modellregion* dargestellt.

7. Literatur

Allan R, Ansell T (2006) A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850–2004. J Climate 19: 5816–5842

Alvarez-Castro MC, Barriopedro D, Gallego D, Garcia-Herrera R, Hernandez E, Peña C, Ribera P, Wheeler D (2011) Westerly Index: A quasi-instrumental climatic index for the North Atlantic westerlies (1685-2008). EMS 2011 Berlin, Präsentation

Barry RG, Perry AH (1973) Synoptic climatology: methods and applications. Methuen & Co., London 555 S.

Baur F, Hess P, Nagel H (1944): Kalender der Großwetterlagen Europas 1881–1939, Forschungsinstitut für langfristige Wettervorhersage, Bad Homburg, 35 S.

Baur F (1947): Musterbeispiele Europäischer Großwetterlagen, Dietrich'sche Verlagsbuchhandlung, Wiesbaden

Bernhofer C, Matschullat J, Bobeth (Hrsg., 2009): Das Klima in der REGKLAM Modellregion Dresden. Rhombos Verlag, Berlin, 128 S. ISBN: 9783941216228

Bernhofer C, Matschullat J, Bobeth (Hrsg., 2011): Klimaprojektionen für die REGKLAM Modellregion Dresden. Rhombos Verlag, Berlin, 112 S.

Bissoli P, Dittmann E (2001) The objective weather type classification of the German Weather Service and its possibilities of application to environmental and meteorological investigations. Met Z 10 (4): 253-260

Demuzere M, Werner M, van Lipzig NPM, Roeckner E (2009): An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns. Int J Climatol 29: 1796-1810

Dittmann E, Barth S, Lang J, Müller-Westermeier G (1995) Objektive Wetterlagenklassifikation. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 197, Offenbach, 44 S.

DWD (2010a): WitterungsReport Express, monatliche Publikation des DWD

DWD (2010b): Klimastatusbericht 2009

Enke W, Spekat A, Kreienkamp F (2007): Untersuchung der Auswirkung der Stationarität globaler atmosphärischer Wellen und Interpretation von Transwetterlagen für Dürre- und Hochwasserereignisse in Sachsen: BLOCKWETT. Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben im Auftrag des Sächsischen Landeamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 75 S.

Erbe S (2002): Untersuchungen zur räumlichen Verteilung und zum Trend korrigierter Niederschläge in Sachsen im Zeitraum 1971–2000. Unveröffentlichte Diplomarbeit, TU Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften, Institut für Geographie, 65 S.

Feske N, Franke J, Heidenreich M, Küchler W, Mellentin U, Bernhofer C (2010) Klimaprojektionen für REGKLAM – Leitfaden und nutzerorientierter Ergebniskatalog für die Verwendung und Interpretation von Klimaprojektionsdaten, REGKLAM

Gerstengarbe FW, Werner PC (1993): Katalog der Großwetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky 1881–1992, 4. Auflage, Berichte des Deutschen Wetterdienstes 113, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Offenbach, 249 S.

Gerstengarbe FW, Werner PC (1999): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–1999) nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky, 5. Auflage, Selbstverlag des Deutschen Wetterdienstes, Potsdam/Offenbach, 138 S.

Gerstengarbe FW, Werner PC (2005): Katalog der Großwetterlagen Europas (1881–2004) nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky, 6. Auflage, PIK-Report 100, Potsdam, 158 S.

Hänig A (2012) SPI-Trends im 21. Jahrhundert für die REGKLAM-Modellregion. Bachelorarbeit, TU Bergakademie Freiberg

Hess P, Brezowsky H (1952) Katalog der Großwetterlagen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone 33. 39 S.

Hess P, Brezowsky H (1969) Katalog der Großwetterlagen Europas. 2. Auflage, Berichte des Deutschen Wetterdienstes 15 (113), Offenbach, 56 S.

Hess P, Brezowski H (1977): Katalog der Großwetterlagen Europas 1881–1976, 3. Auflage, Berichte des Deutschen Wetterdienstes 15 (113), Offenbach, 68 S.

Hoy A, Hänsel S (2009): Entwicklung von Häufigkeit, Intensität, Andauer und räumlicher Ausdehnung von Dürreperioden, Zwischenbericht des REGKLAM-Teilprojektes 2.1b, 92 S.

Hoy A (2010): Literaturrecherche zu Mitteleuropa und die REGKLAM Modellregion betreffenden projizierten Zirkulationsveränderungen, Fortschrittsbericht des REGKLAM-Teilprojektes 2.1b, 42 S.

Hoy A, Jaagus J, Sepp M, Matschullat J (2012a) Spatial response of two European atmospheric circulation classifications (data from 1901 to 2010). Theor Appl Climatol. doi: 10.1007/s00704-012-0707-x

Hoy A, Sepp M, Matschullat J (2012b) Atmospheric circulation variability in Europe and northern Asia (1901 to 2010). Theor Appl Climatol. doi: 10.1007/s00704-012-0770-3

Hoy A, Sepp M, Matschullat J (2012c) Large scale atmospheric circulation forms and their impact on air temperature in Europe and northern Asia. Theor Appl Climatol (accepted)

Huth R, Beck C, Philipp A, Demuzere M, Ustrunul Z, Cahynova M, Kysely J, Tveito OE (2008): Classification of atmospheric circulation patterns – recent advances and applications. In: Trends and directions in climate research. Annals of the New York Academic Society. 1146, 105–152.

Huth R (2010) Synoptic-climatological applicability of circulation classifications from the COST733 collection: First results. Phys Chem Earth 35: 388-394. doi:10.1016/j.pce.2009.11.013.

IPCC (2007): Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge/ New York.

James PM (2006): An assessment of European synoptic variability in Hadley Centre Global Environmental models based on an objective classification of weather regimes. Climate Dynamics, 27, 215-231.

James PM (2007) An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. Theor Appl Climatol 88: 17-42. doi: 10.1007/s00704-006-0239-3.

McKee TB, Doesken NJ, Kleist J (1993) The relationship of drought frequency and duration to time scales In Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology Boston, Massachusetts: American Meteorological Society, p. 179–184.

Krahe P, Korck J, Tomassini L, Gelhardt U, Smiatek G, Formayer H (2008): Global and regional climate projections for the Alpine Space. In: WP5 Climate Change Report. ClimChAlp project.

Krahe P, Nilson E, Gelhardt U, Lang J (2010): Auswertungen ausgewählter globaler Klimamodelle hinsichtlich atmosphärischer Zirkulationsbedingungen im Nordatlantisch-Mitteleuropäischen Sektor (oWLK, NAO). Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 33 S. (unveröff.)

Krüger A (2002) Statistische Regionalisierung des Niederschlags für Nordrhein-Westfalen auf Grundlage von Beobachtungsdaten und Klimaszenarien (Dissertation). Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln: 149

LfULG (2009): Globale Klimamodellsimulationen - Vergleichende Analyse globaler Klimamodellergebnisse für Mitteldeutschland und umliegende Gebiete. Schriftenreihe des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie: Heft 25/2009. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie

Mehler S, Hänsel S (2013) Analyse extremer Niederschlagsereignisse auf Basis von globalen und regionalen Klimaprojektionen – Ensemble-Simulationen für die REGKLAM-Modellregion. REGKLAM-Projektbericht, Zusatzprodukt des TP 2.1

Osborn TJ (2004): Simulating the winter North Atlantic Oscillation: the roles of internal variability and greenhouse gas forcing. Climate Dynamics, 22, 605-623.

Philipp A, Bartholy J, Beck C, Erpicum M, Esteban P, Fettweis X, Huth R, James P, Jourdain S, Kreienkamp F, Krennert T, Lykoudis S, Michalides S, Pianko K, Post P, Rasilla Álvarez D, Schiemann R, Spekat A, Tymvios FS (2010) COST733CAT - a database of weather and circulation type classifications. Phys Chem Earth 35: 360-373. doi: 10.1016/j.pce.2009.12.010.

Pielke RA Sr. Wilby R, Niyogi D, Hossain F, Dairuku K, Adegoke J, Kallos G, Seastedt T, Suding K (2012), Dealing with complexity and extreme events using a bottom-up, resource-based vulnerability perspective, in Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective, Geophys. Monogr. Ser., vol. 196, edited by A. S. Sharma et al. 345–359, AGU, Washington, D. C., doi:10.1029/2011GM001086.

Rapp J (2000): Konzeption, Problematik und Ergebnisse klimatologischer Trendanalysen für Europa und Deutschland. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 212, Eigenverlag Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M Richter (1995)

Richter D (1995): Ergebnisse methodischer Untersuchungen zur Korrektur des systematischen Messfehlers des Hellmann-Niederschlagsmessers. Berichte des Deutschen Wetterdienstes 194, Eigenverlag Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M.

Roeckner E, Baeuml G, Bonaventura L, Brokopf R, Esch M, Giorgetta M, Hagemann S, Kirchner I, Kornblueh L, Manzini E, Rhodin A, Schlese U, Schulzweida U, Tompkins A (2003): The atmoshperic general circulation model ECHAM5. PART I: Model description, report No. 349, Max Planck Institut of Meteorologie, Hamburg.

Royer JF, Roeckner E, Cubasch U et al. (2009) Production of seasonal to decadal hindcasts and climate change scenarios. In: van der Linden P, and Mitchell JFB (eds) ENSEMBLES: Climate change and its impacts: summary of research and results from the ENSEMBLES project. Exeter, UK: Met Office Hadley

Spekat A, Enke W, Kreienkamp F (2007): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit dem Regionalisierungsmodell WETTREG auf der Basis von globalen Klimasimulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63 L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2. Endbericht, Umweltbundesamt

Spekat A, Enke W, Kreienkamp F (2008): Untersuchung der Auswirkung der Stationarität globaler atmosphärischer Wellen und Interpretation von Transwetterlagen für Dürre- und Hochwasserereignisse in Sachsen: BLOCKWETT. Teilprojekt 2: Untersuchung der Zugbahnen barometrischer Minima Abschlussbericht zum FuE-Vorhaben im Auftrag des Sächsischen Landeamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 108 S.

Stephenson DB, Pavan V, Collins M, Junge MM, Quadrelli R (2006): North Atlantic Oscillation response to transient greenhouse gas forcing and the impact on European winter climate: a CMIP2 multi-model assessment, Climate Dynamics, 27, 401-420

Van-Rooy MP (1965) A Rainfall anomaly index (RAI) independent of time and space. Notos 14:43–48

Werner PC, Gerstengarbe FW (2010) Katalog der Großwetterlagen Europas. 7. Auflage. PIK Report 119. 140 S.

Yarnal B (1993) Synoptic climatology in environmental analysis. A primer. Belhaven Press, London. 195 S.

8. Anhang

Anlage 1: Kartendarstellung der mittleren Zahl an Trockentagen pro Halbjahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe, Referenzzeitraum 1961–1990 122

Anlage 2: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der mittleren Zahl an Trockentagen in den Jahreszeiten für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modelle) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien 124

Anlage 3: Kartendarstellung der mittleren Zahl an Trockenphasen pro Halbjahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe, Referenzzeitraum 1961–1990 126

Anlage 4: Kartendarstellung der mittleren Länge von Trockenphasen pro Halbjahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe, Referenzzeitraum 1961–1990 128

Anlage 5: Kartendarstellung der maximalen Länge von Trockenphasen pro Halbjahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe, Referenzzeitraum 1961–1990 130

Anlage 6: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der mittleren Zahl an Trockenphasen in den Jahreszeiten für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modellmittelwerte) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien 132

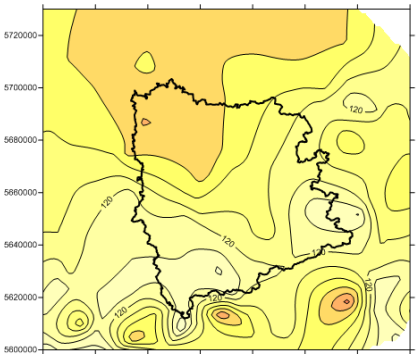
Anlage 7: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der mittleren Länge von Trockenphasen in den Jahreszeiten für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modellmittelwerte) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien 134

Anlage 8: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der maximalen Länge von Trockenphasen in den Jahreszeiten für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modellmittelwerte) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien 136

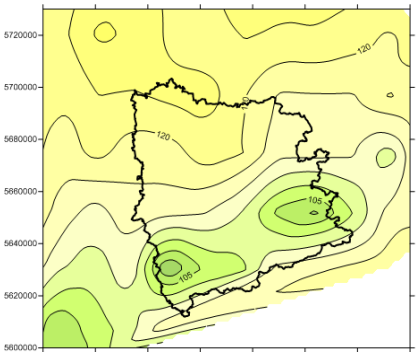
Anlage 1: Kartendarstellung der mittleren Zahl an Trockentagen pro Halbjahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe, Referenzzeitraum 1961–1990

Sommerhalbjahr

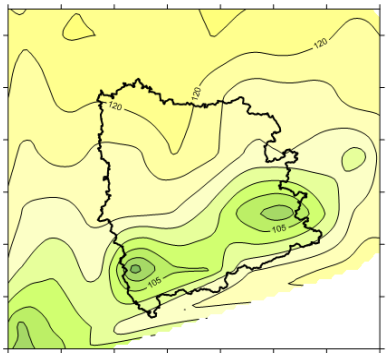
CLISAX (Beobachtung)



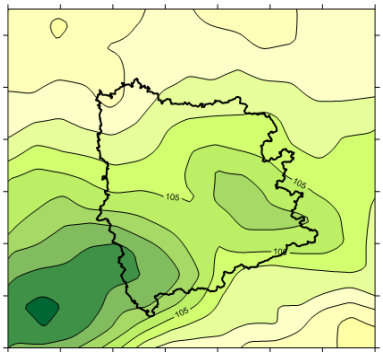
CLM 1



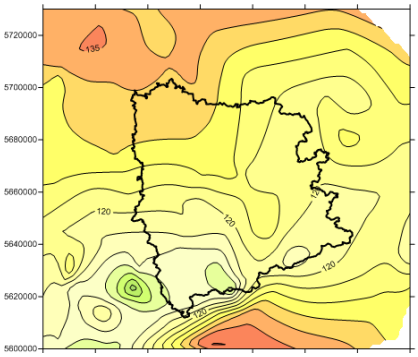
CLM 2



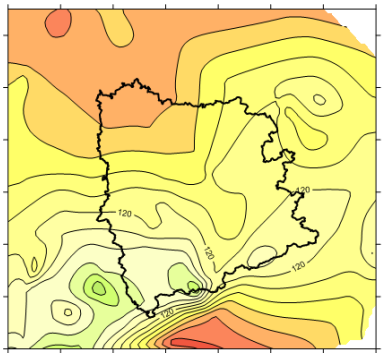
REMO 1



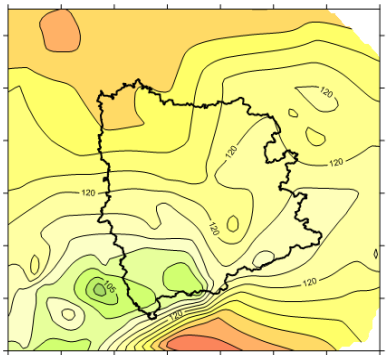
WEREX IV normal



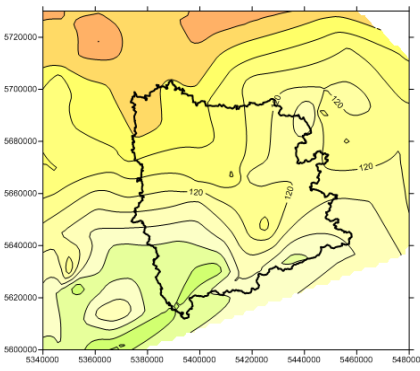
WEREX IV trocken



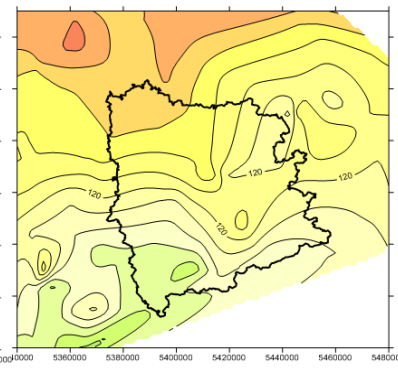
WEREX IV feucht



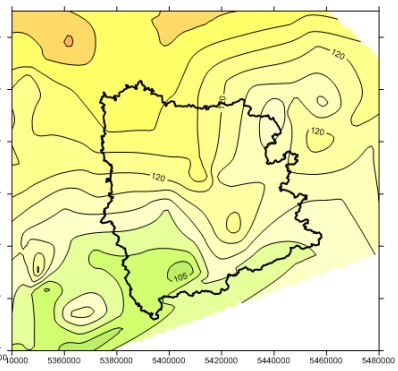
WETTREG 2006 normal



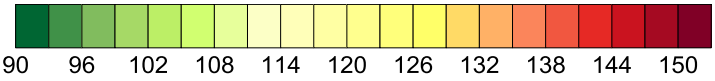
WETTREG 2006 trocken



WETTREG 2006 feucht



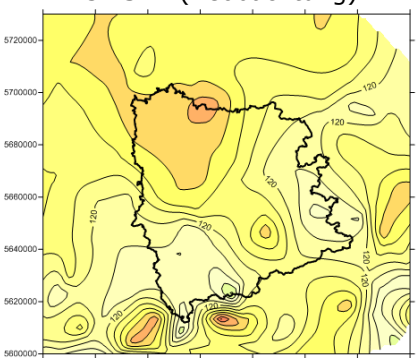
Mittlere Anzahl an Trockentagen :



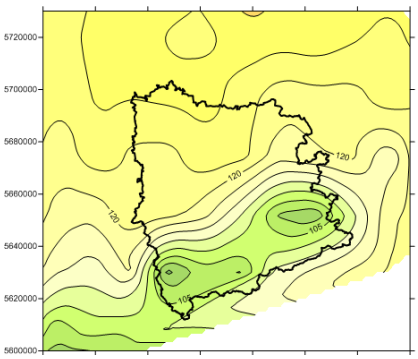
Anlage 1: Fortsetzung (Winterhalbjahr)

Winterhalbjahr

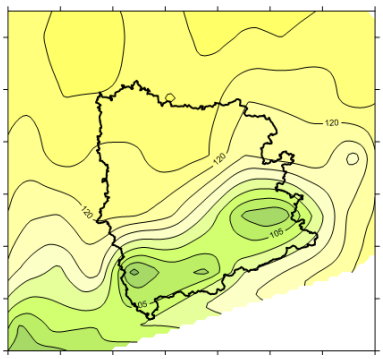
CLISAX (Beobachtung)



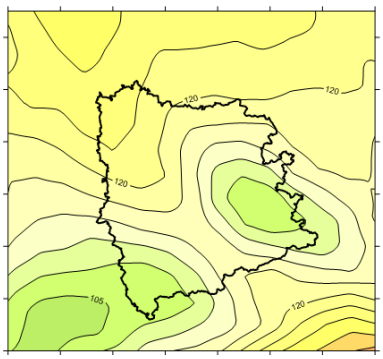
CLM 1



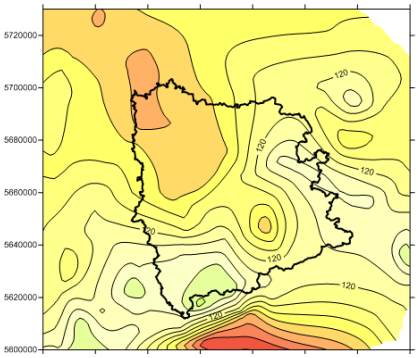
CLM 2



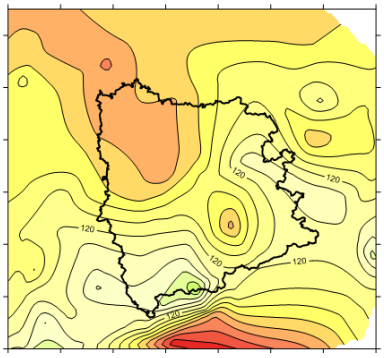
REMO 1



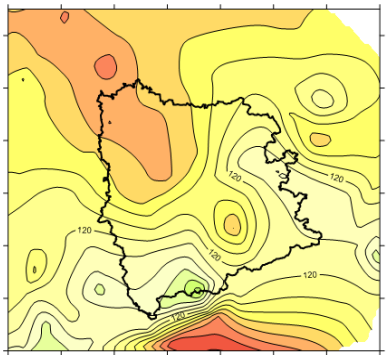
WEREX IV normal



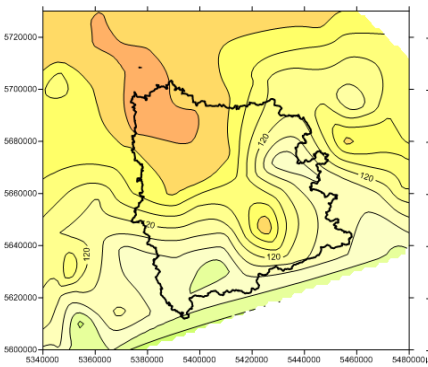
WEREX IV trocken



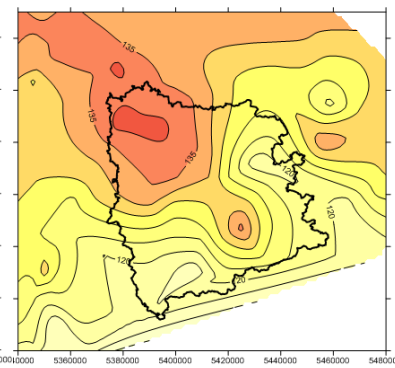
WEREX IV feucht



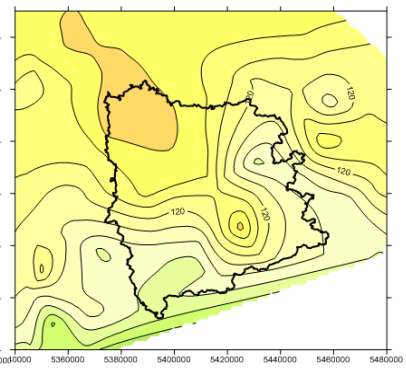
WETTREG 2006 normal



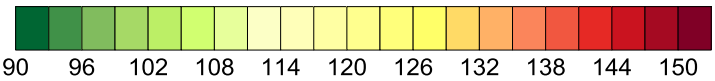
WETTREG 2006 trocken



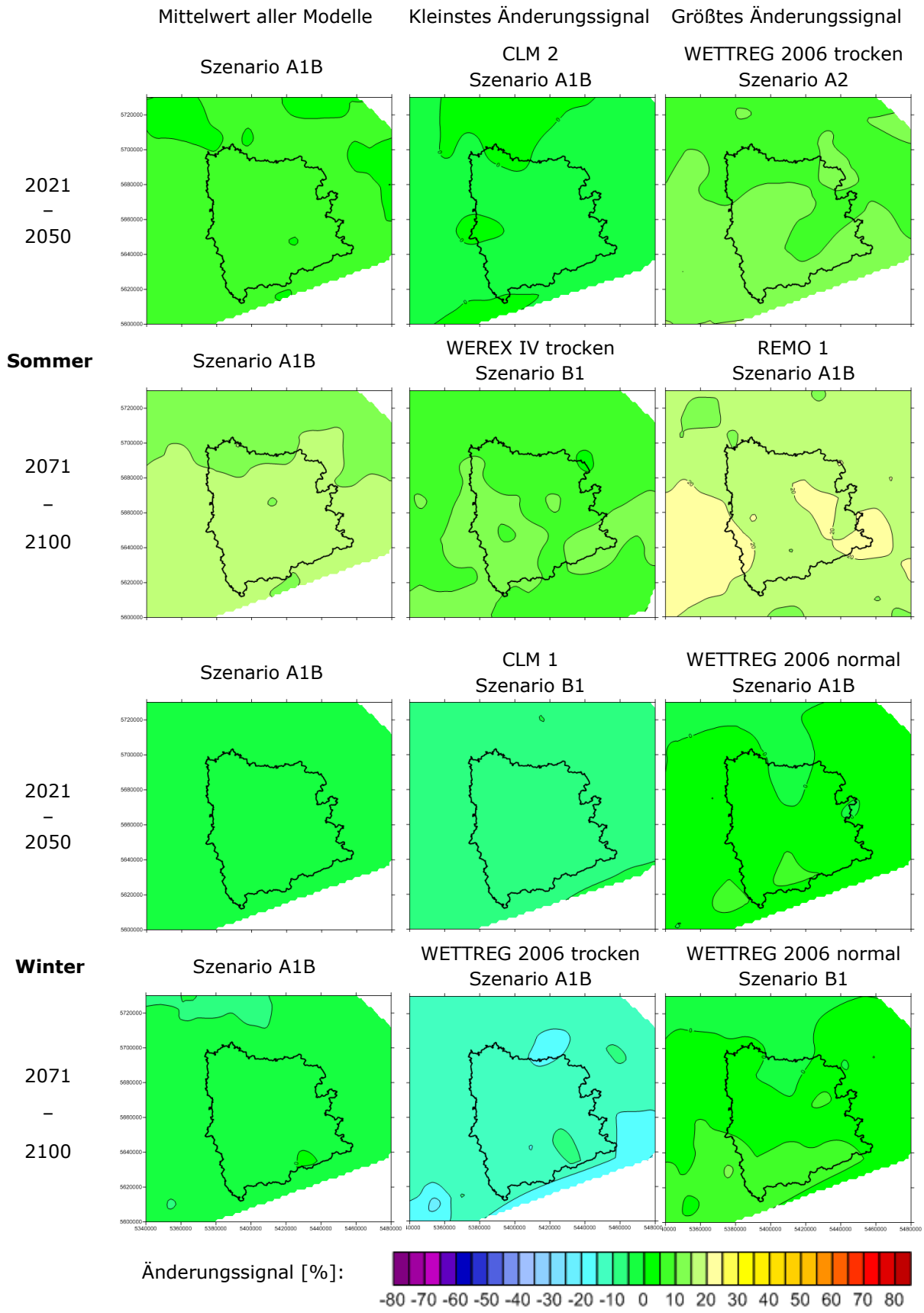
WETTREG 2006 feucht



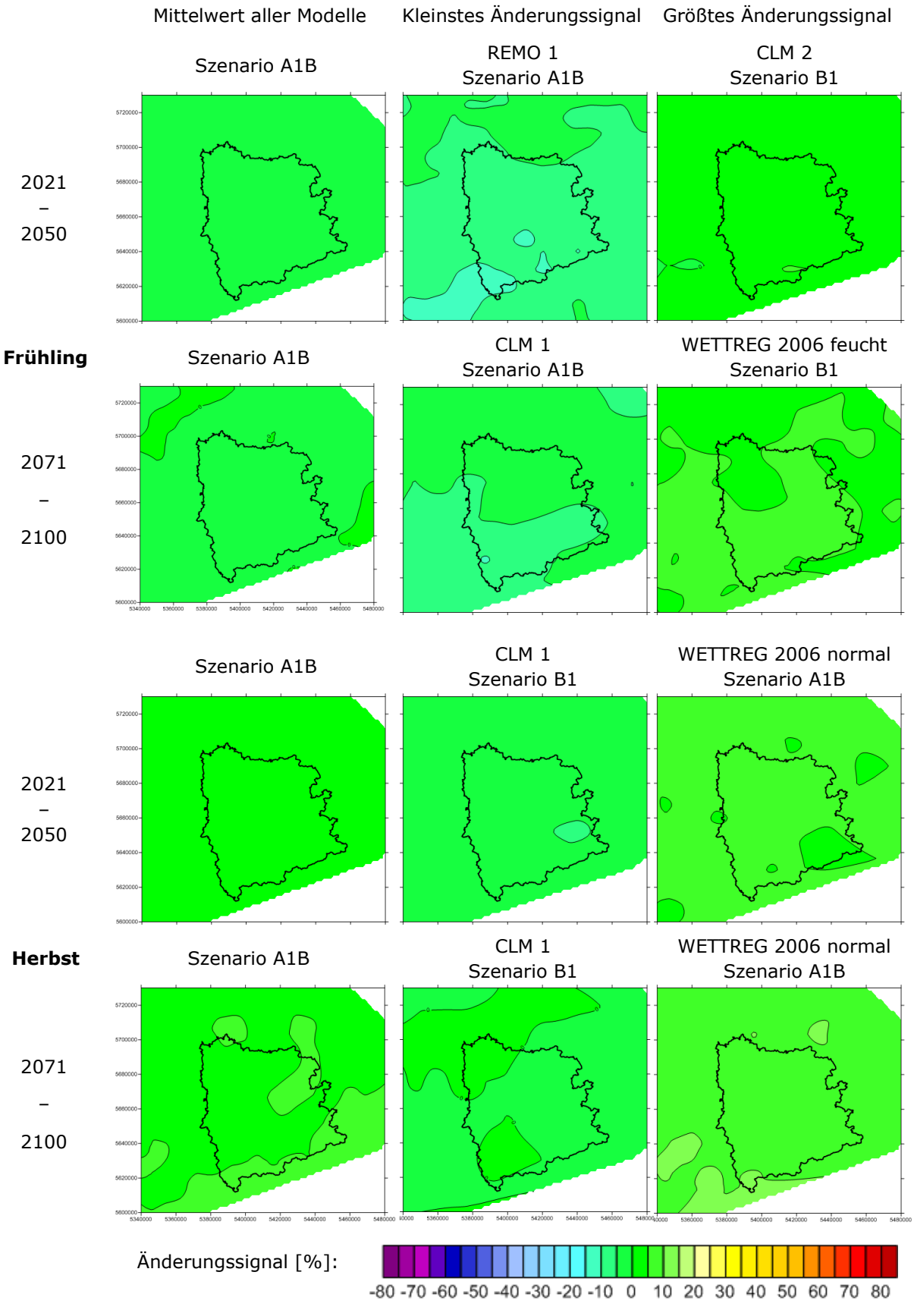
Mittlere Anzahl an Trockentagen :



Anlage 2: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der mittleren Zahl an Trockentagen in den Jahreszeiten für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modelle) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien

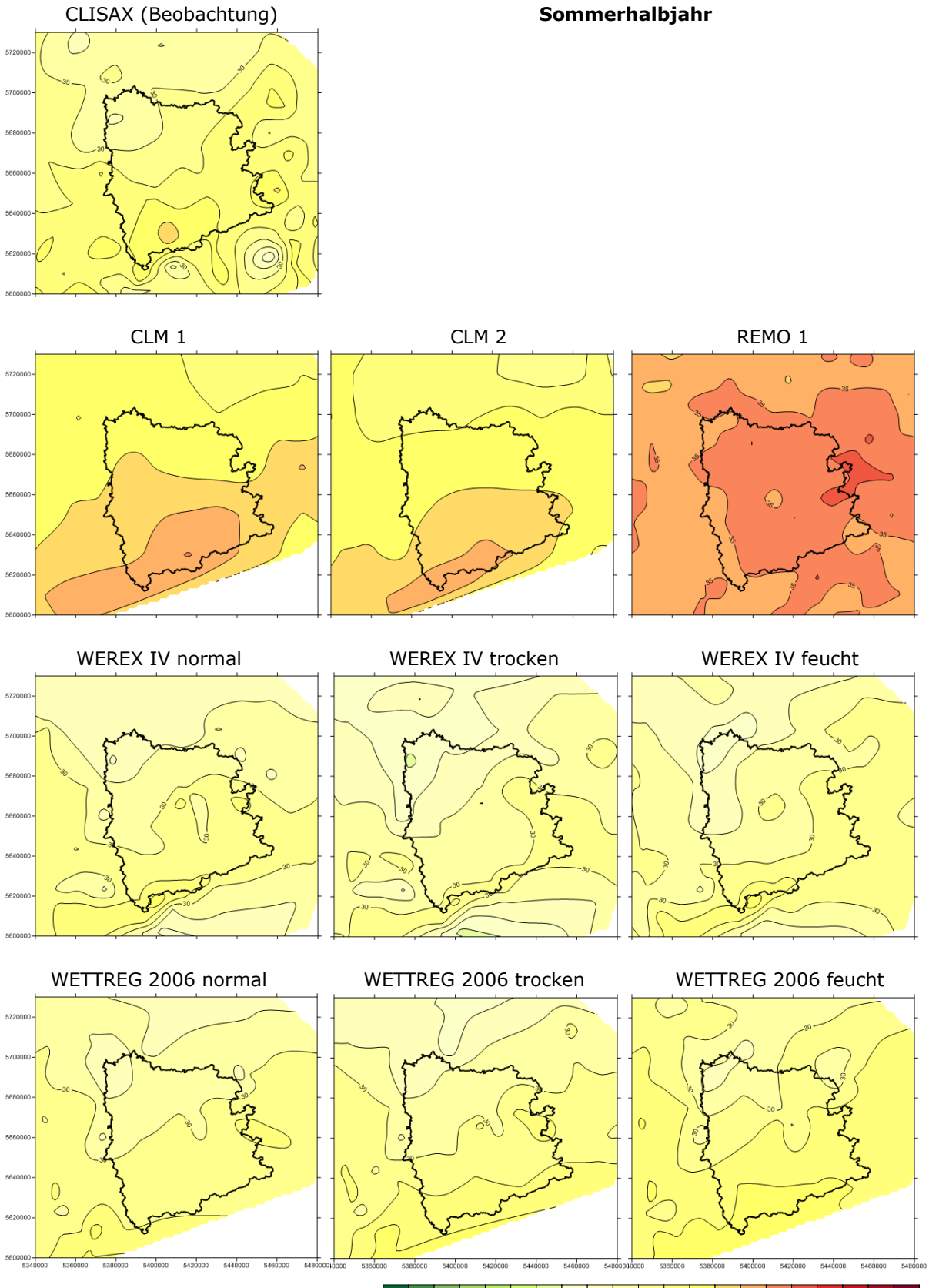


Anlage 2: Fortsetzung

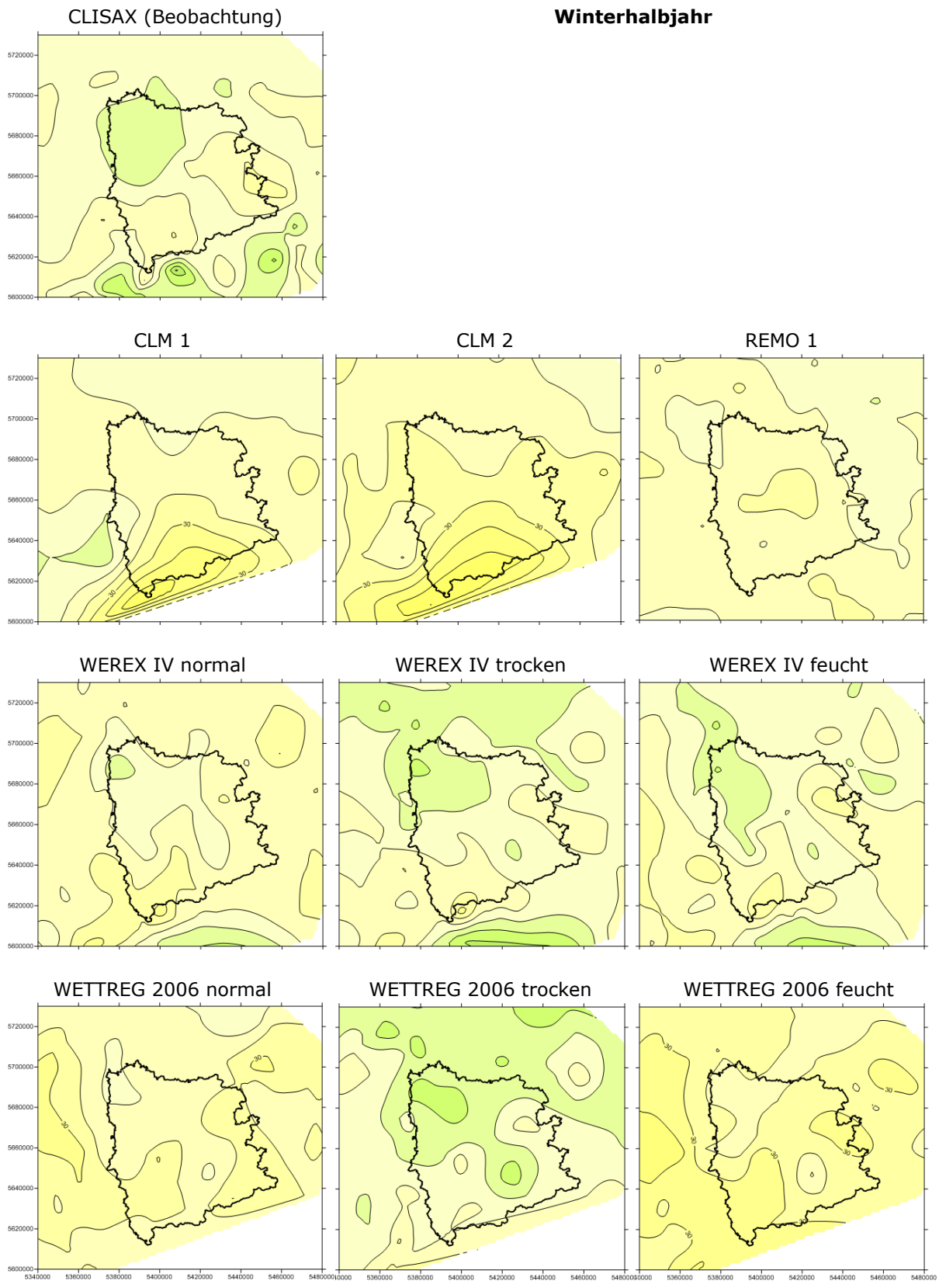


Anlage 3: Kartendarstellung der mittleren Zahl an Trockenphasen pro Halbjahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe, Referenzzeitraum 1961–1990

Sommerhalbjahr



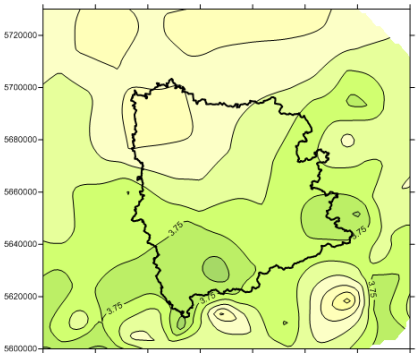
Anlage 3 Fortsetzung



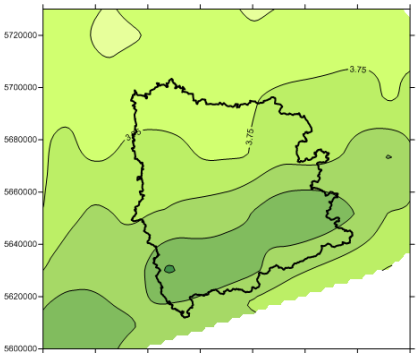
Anlage 4: Kartendarstellung der mittleren Länge von Trockenphasen pro Halbjahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe, Referenzzeitraum 1961–1990

Sommerhalbjahr

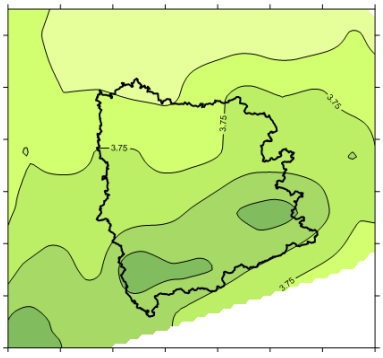
CLISAX (Beobachtung)



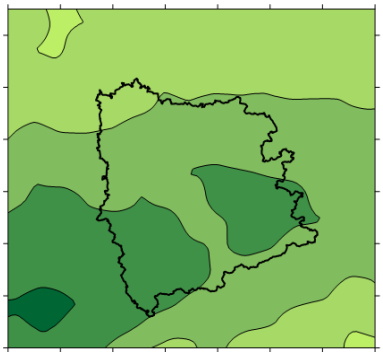
CLM 1



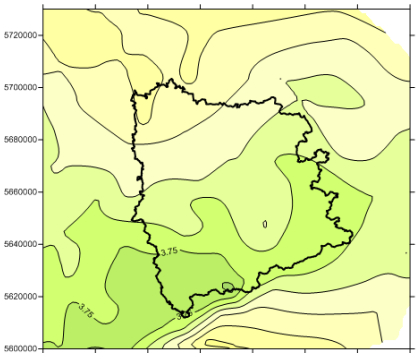
CLM 2



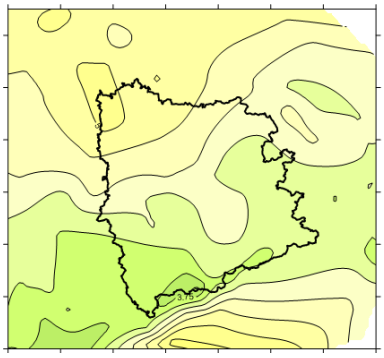
REMO 1



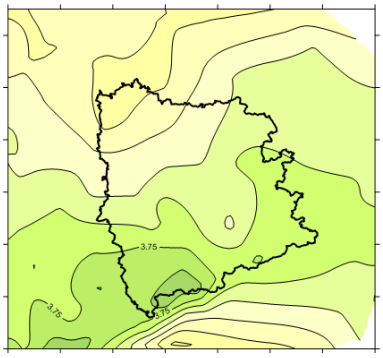
WEREX IV normal



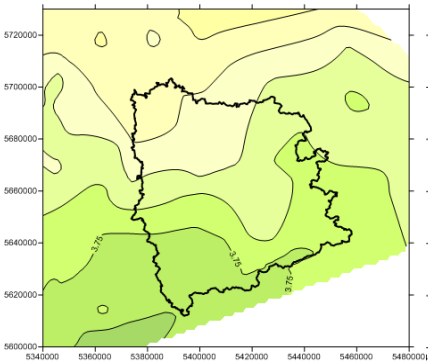
WEREX IV trocken



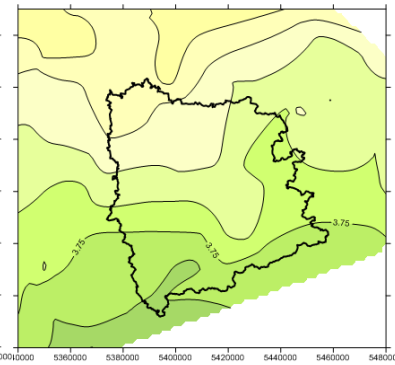
WEREX IV feucht



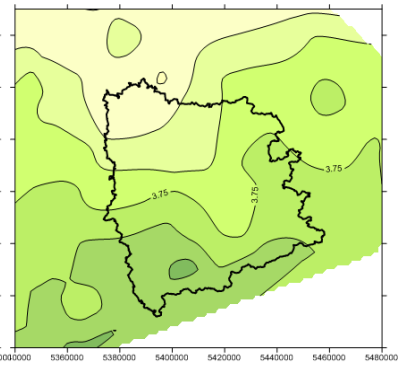
WETTREG 2006 normal



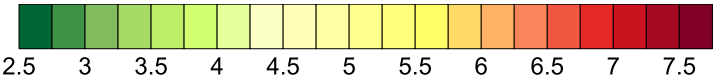
WETTREG 2006 trocken



WETTREG 2006 feucht

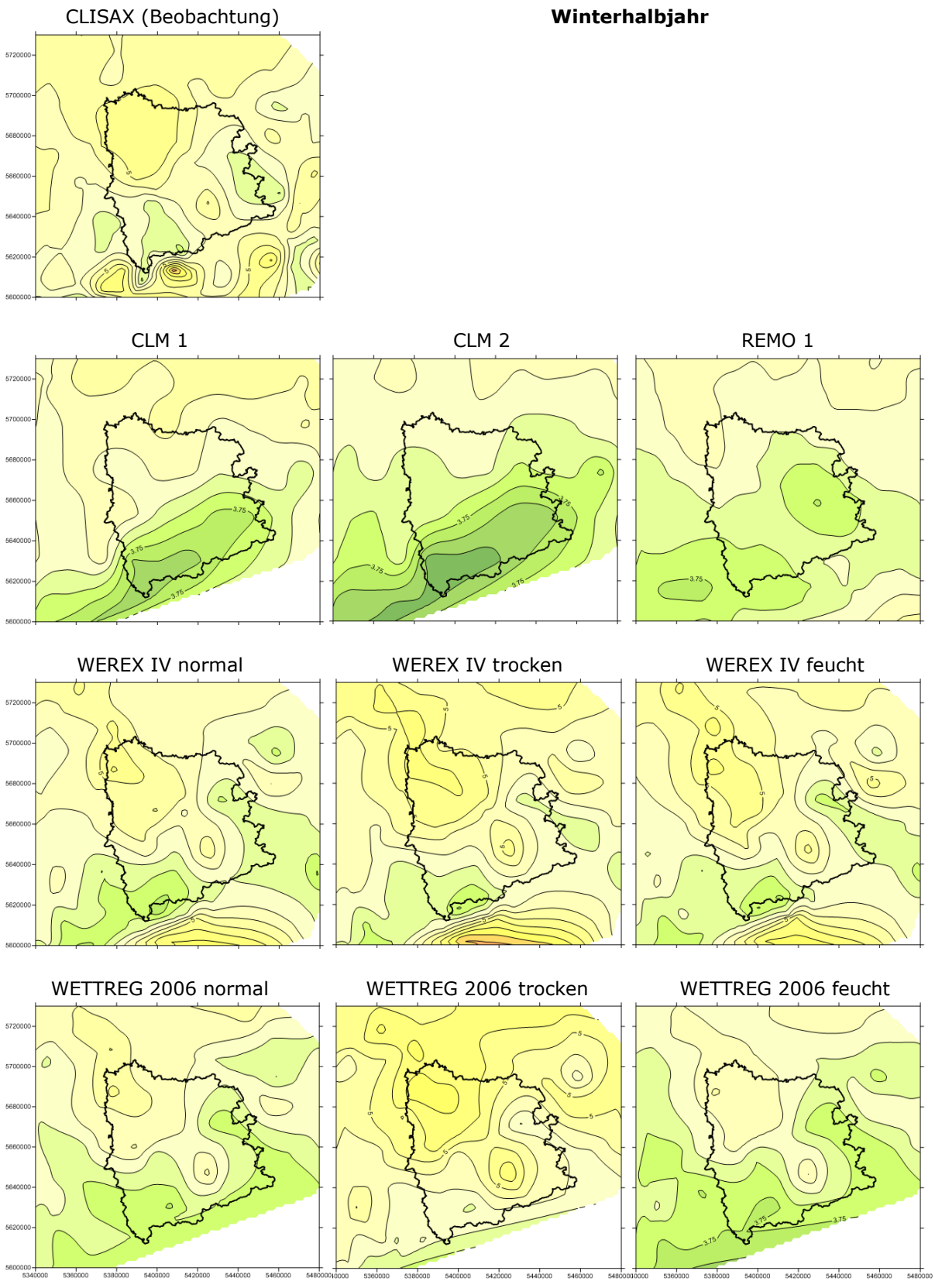


Mittlere Dauer von Trockenphasen:



Anlage 4: Fortsetzung

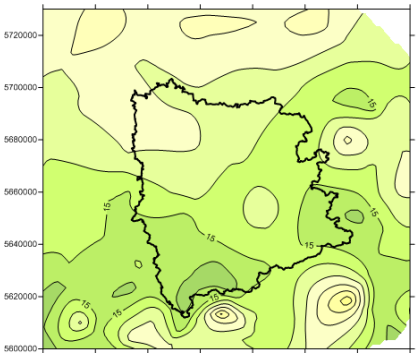
Winterhalbjahr



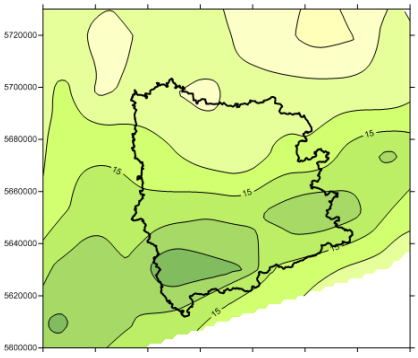
Anlage 5: Kartendarstellung der maximalen Länge von Trockenphasen pro Halbjahr für die Beobachtungsdaten und alle Modellläufe, Referenzzeitraum 1961–1990

Sommerhalbjahr

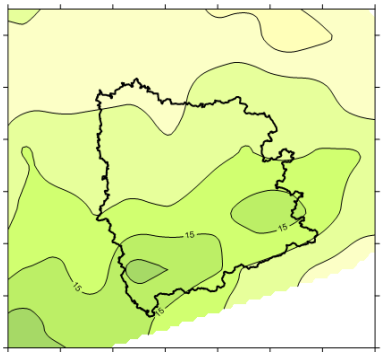
CLISAX (Beobachtung)



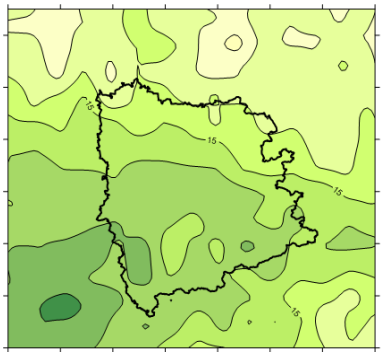
CLM 1



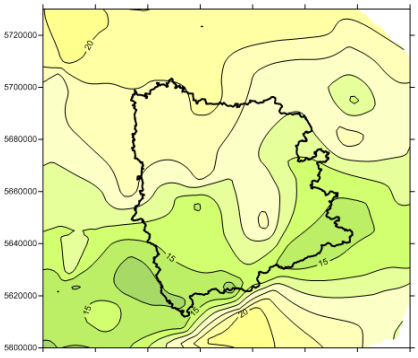
CLM 2



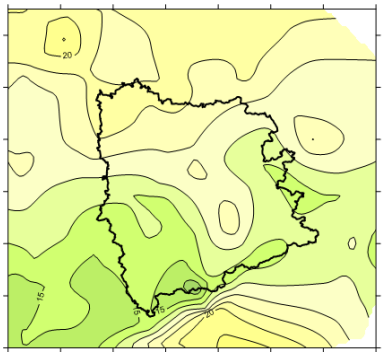
REMO 1



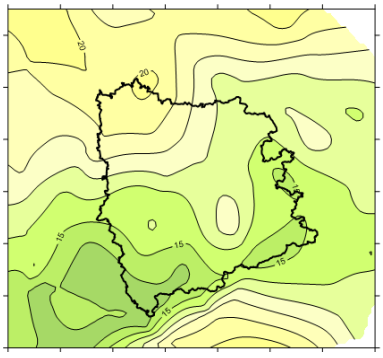
WEREX IV normal



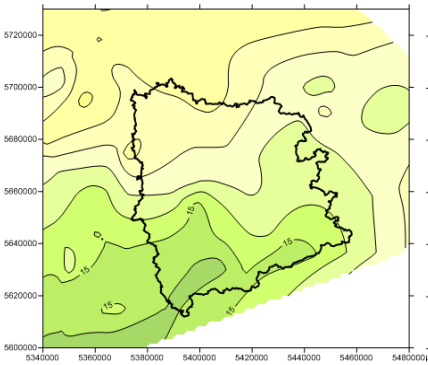
WEREX IV trocken



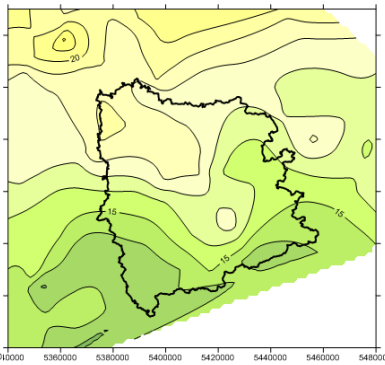
WEREX IV feucht



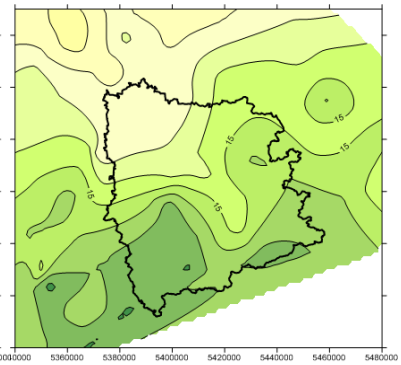
WETTREG 2006 normal



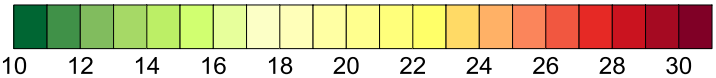
WETTREG 2006 trocken



WETTREG 2006 feucht



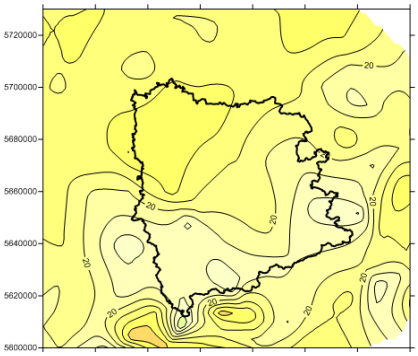
Maximale Dauer von Trockenphasen:



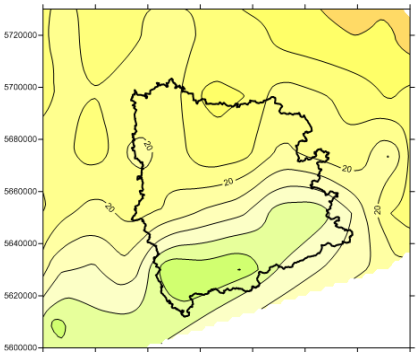
Anlage 5: Fortsetzung

Winterhalbjahr

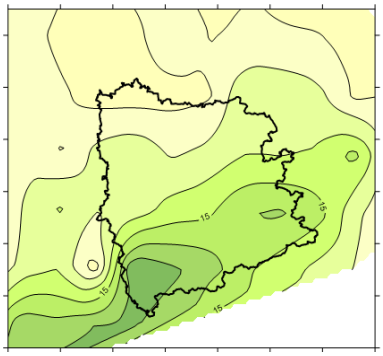
CLISAX (Beobachtung)



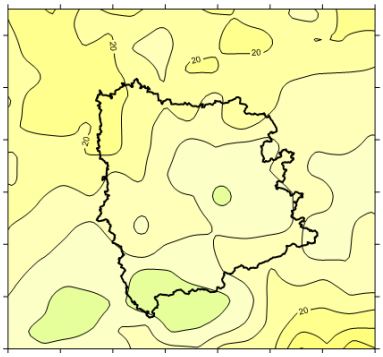
CLM 1



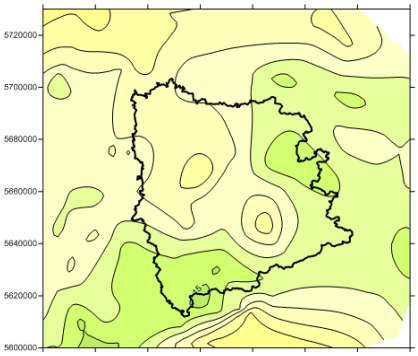
CLM 2



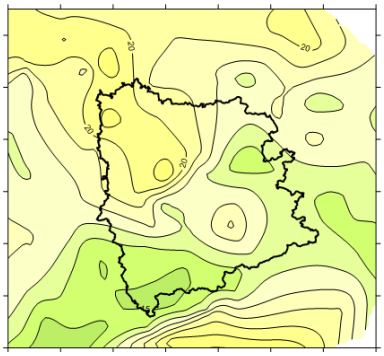
REMO 1



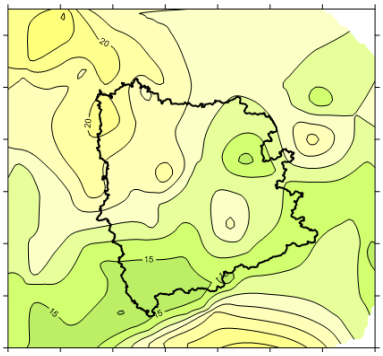
WEREX IV normal



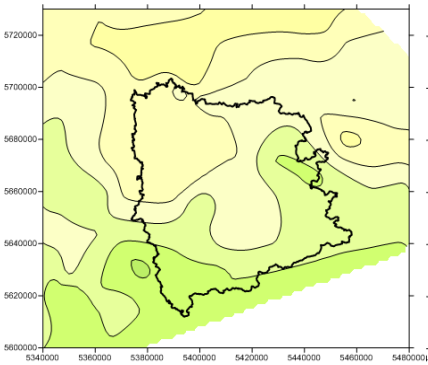
WEREX IV trocken



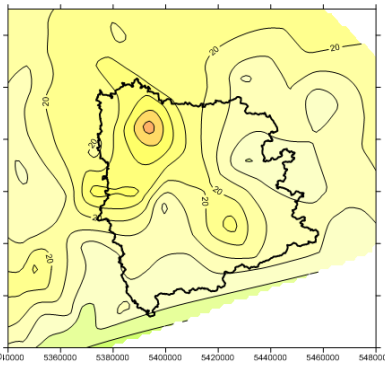
WEREX IV feucht



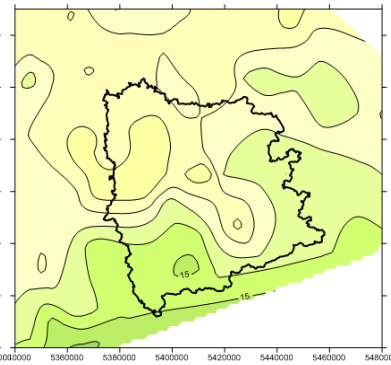
WETTREG 2006 normal



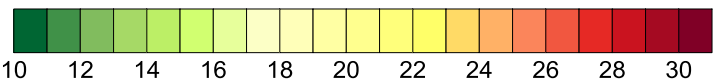
WETTREG 2006 trocken



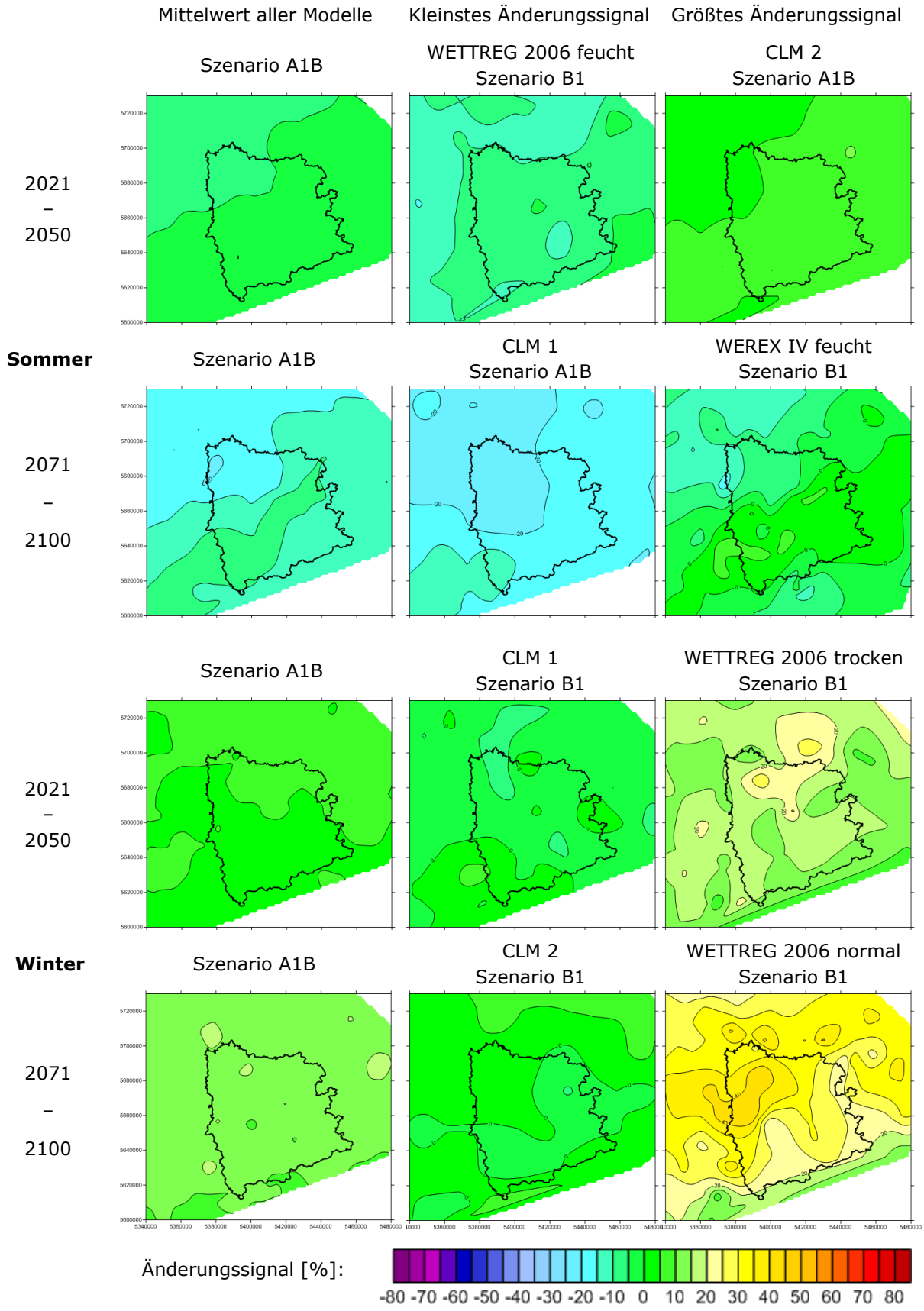
WETTREG 2006 feucht



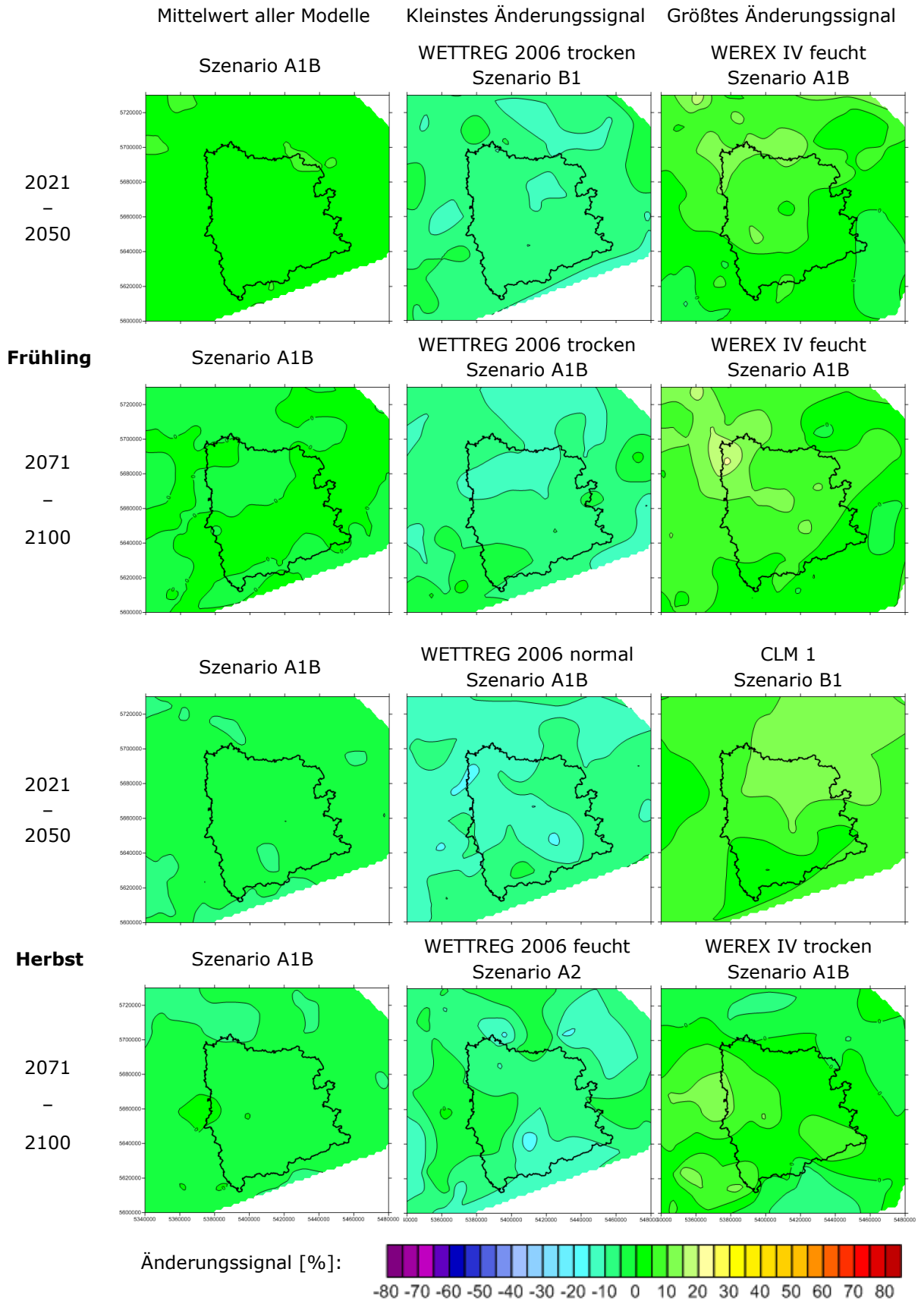
Maximale Dauer von Trockenphasen:



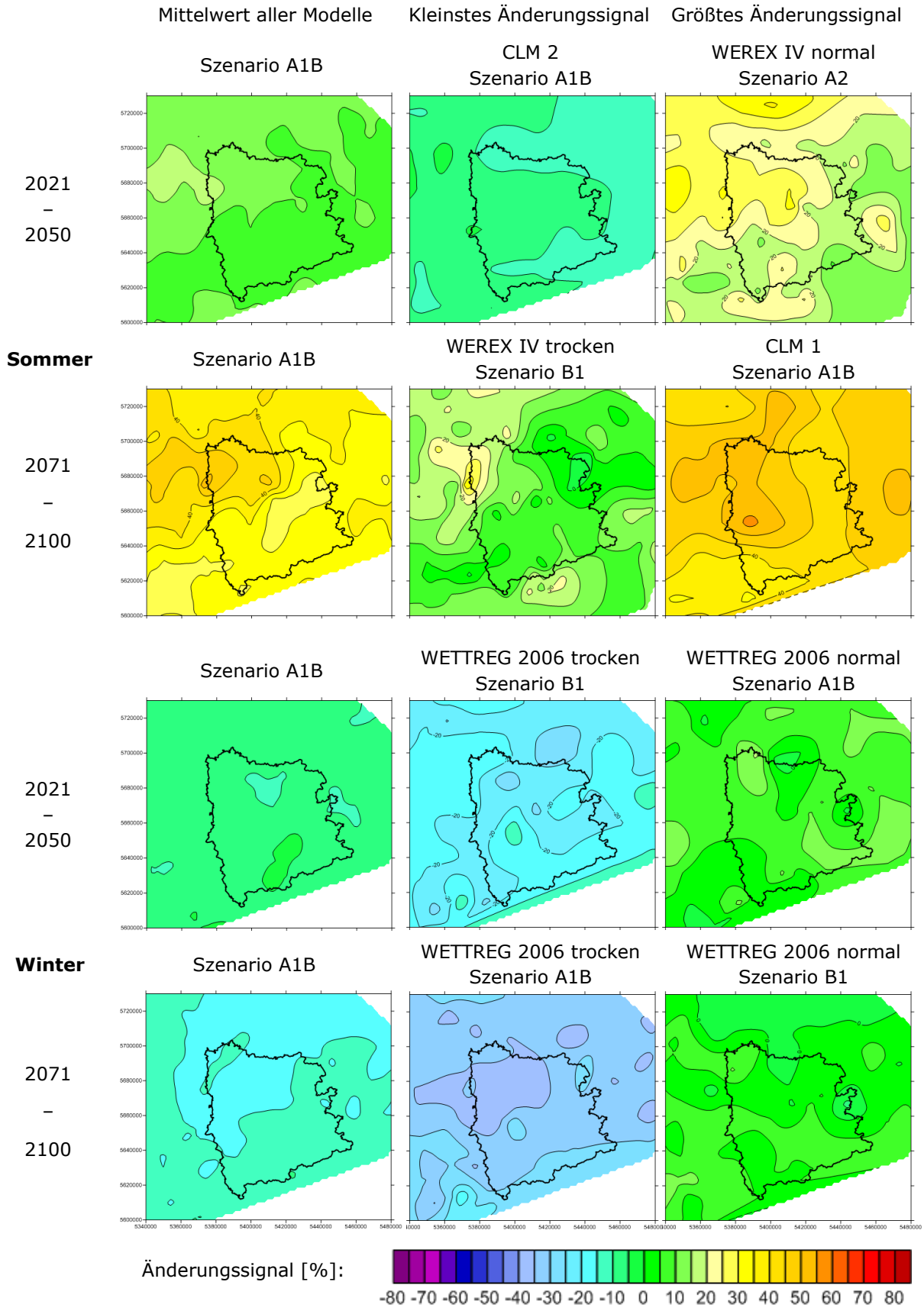
Anlage 6: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der mittleren Zahl an Trockenphasen in den Jahreszeiten für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modellmittelwerte) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien



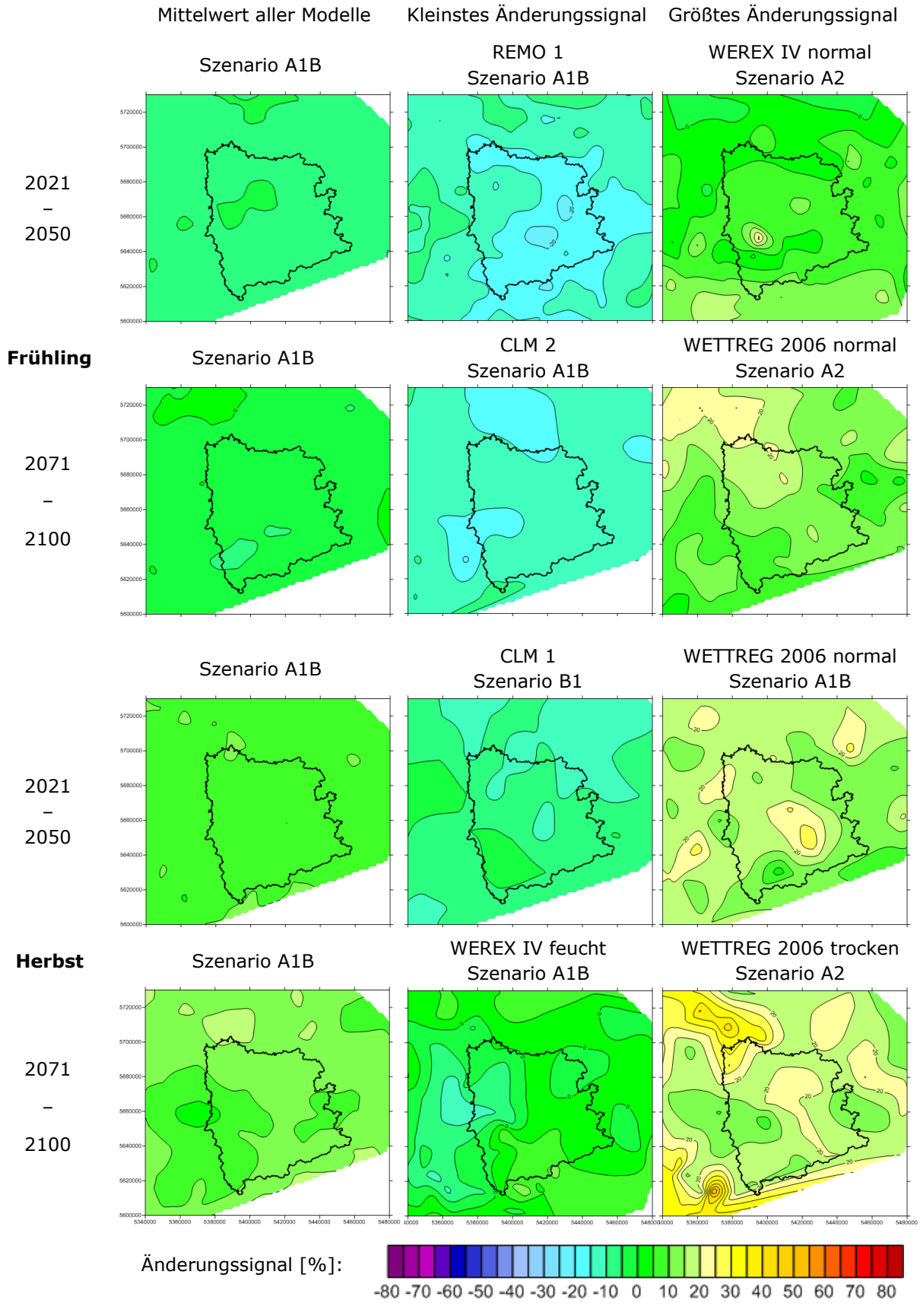
Anlage 6: Fortsetzung



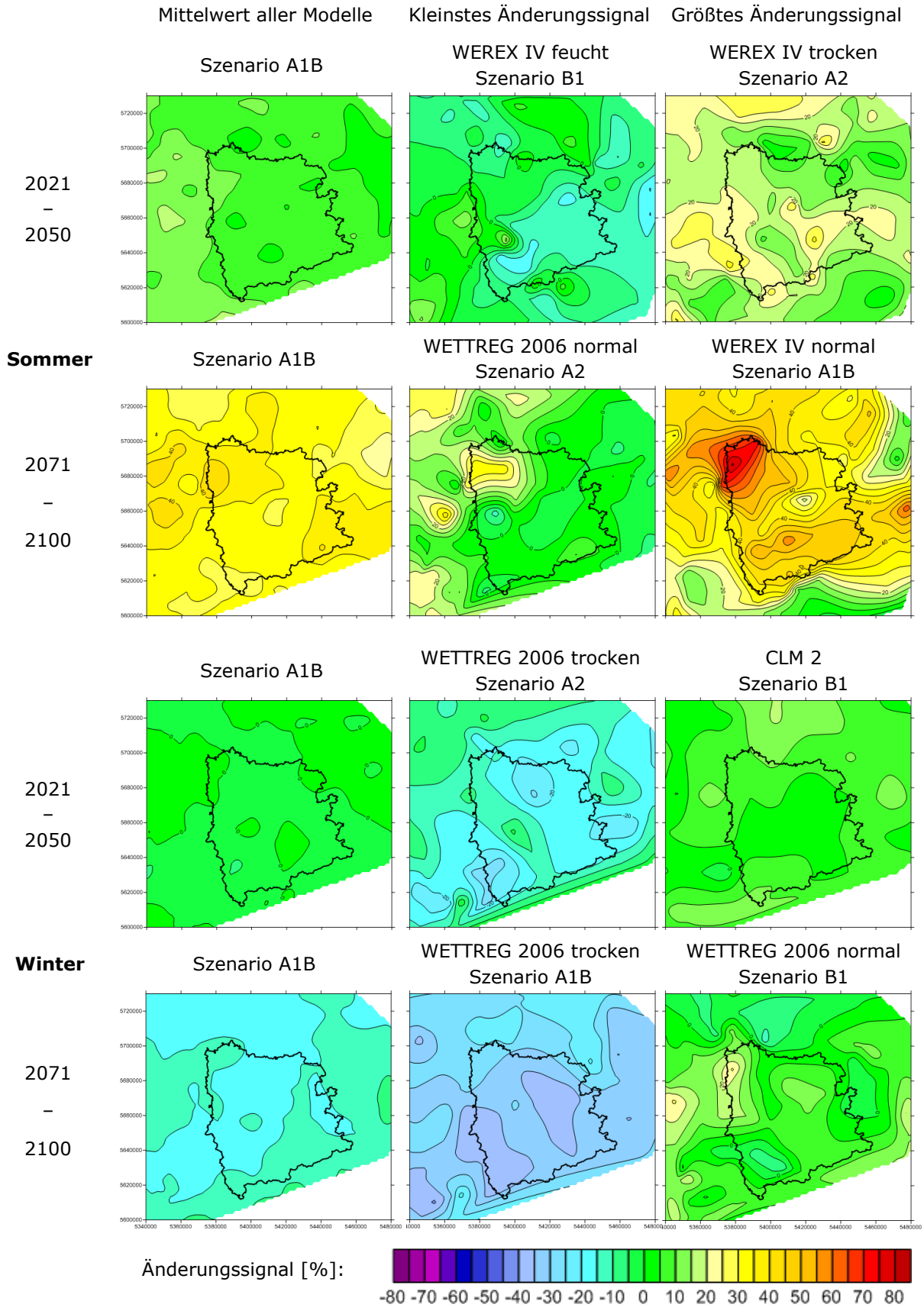
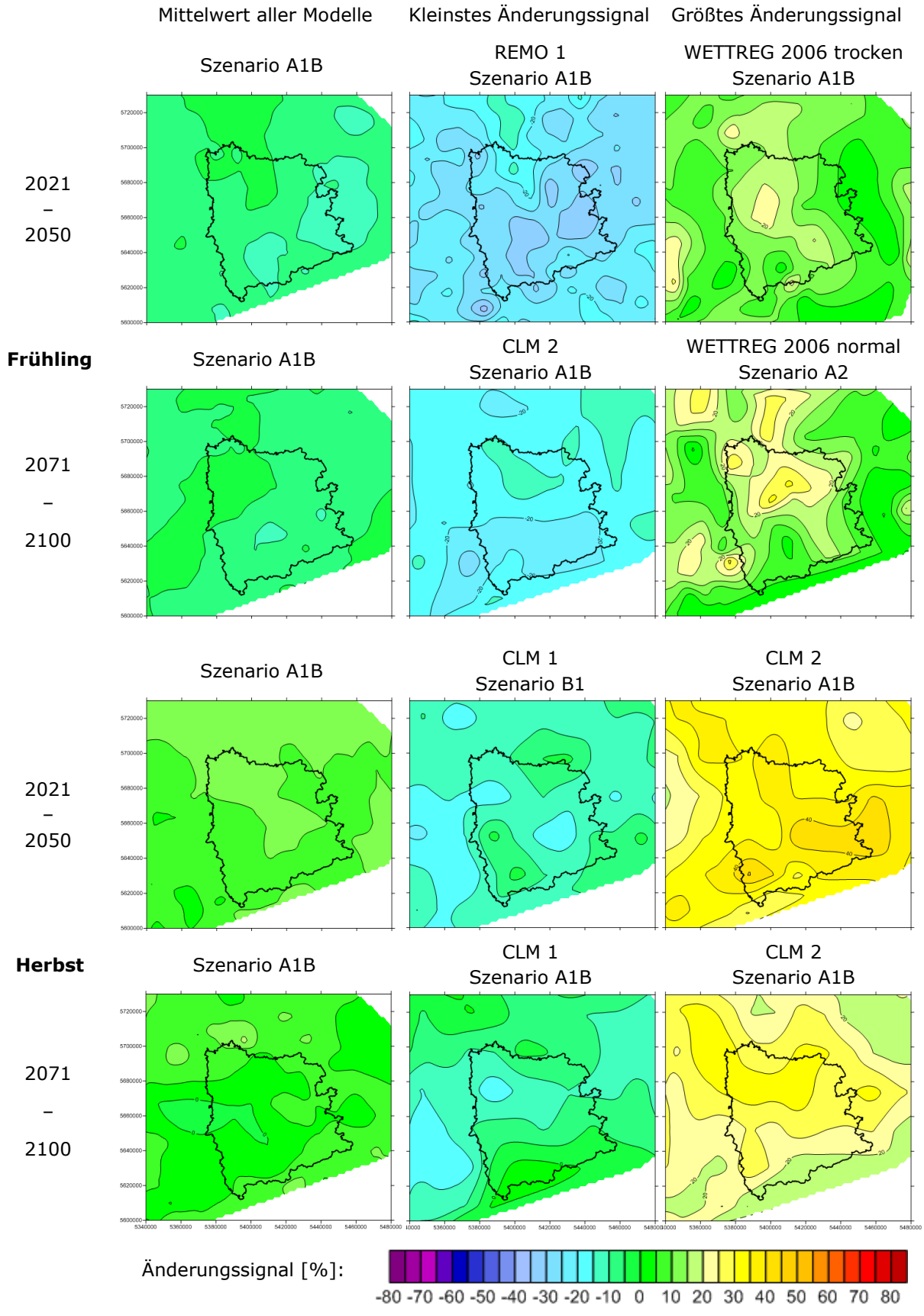
Anlage 7: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der mittleren Länge von Trockenphasen in den Jahreszeiten für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modellmittelwerte) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien



Anlage 7: Fortsetzung



Anlage 8: Kartendarstellung der relativen Änderungssignale (in Prozent) der maximalen Länge von Trockenphasen in den Jahreszeiten für die Zeitscheiben 2021–2050 und 2071–2100 als mittleres Änderungssignal aus allen Modellen (zunächst Mittelung der Modellrealisierungen und danach der Modellmittelwerte) für das Szenario A1B sowie des größten und kleinsten Änderungssignals aus allen Modellen und Szenarien



Anlage 8: Fortsetzung