



# WEREX V: Regionale Klima- projektionen für Sachsen



# WEREX V: Bereitstellung eines Ensembles regionaler Klimaprojektionen für Sachsen

Frank Kreienkamp, Arne Spekat, Wolfgang Enke

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>10</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>10</b>
<b>2 Zum Vorhaben WEREX V</b> .....	<b>11</b>
2.1 Etappe I.....	11
2.2 Etappe II.....	12
2.2.1 Der Kaskadenansatz.....	12
2.2.2 GCMs und RCMs als Antrieb für WEREX V.....	13
<b>3 Datenmaterial</b> .....	<b>13</b>
3.1 Reanalysen.....	13
3.2 Globales Klimamodell.....	14
3.3 Regionales Klimamodell.....	15
3.4 Messdaten.....	15
<b>5 Ergebnisse</b> .....	<b>21</b>
5.1 Validierung.....	21
5.1.1 Temperatur.....	22
5.1.1.1 Vergleichstyp: Kaskade GCM=>ESD – verschiedene GCM als Antrieb von WEREX V.....	22
5.1.1.2 Vergleichstyp: Verschiedene Läufe desselben Globalmodells, ohne Regionalisierung und als Kaskade ECHAM5→WEREX V.....	23
5.1.1.3 Vergleichstyp: Kaskaden GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD mit verschiedenen RCMs.....	25
5.1.1.4 Vergleichstyp: Kaskade ECHAM5=>WEREX V bei unterschiedlichen Stationskatalogen.....	26
5.1.1.5 Zusammenschau: Alle Ergebnisse der Temperatur-Validierung in einer Tabelle.....	27
5.1.2 Niederschlag.....	28
5.1.2.1 Vergleichstyp: Kaskade GCM=>ESD – verschiedene GCM als Antrieb von WEREX V.....	28
5.1.2.2 Vergleichstyp: Verschiedene Läufe desselben Globalmodells, ohne Regionalisierung und als Kaskade ECHAM5=>WEREX V.....	28
5.1.2.3 Vergleichstyp: Kaskaden GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD mit verschiedenen RCMs.....	29
5.1.2.4 Vergleichstyp: Kaskade ECHAM5=>WEREX V bei unterschiedlichen Stationskatalogen.....	31
5.1.2.5 Zusammenschau: Ergebnisse der Niederschlags-Validierung in einer Tabelle.....	32
5.2 Klimasignale.....	33
5.2.1 Temperatur.....	33
5.2.1.1 Vergleichstyp: Verschiedene Szenarios und verschiedene GCMs in GCM=>ESD-Kaskaden.....	33
5.2.1.2 Vergleichstyp: Verschiedene Läufe desselben Globalmodells, ohne Regionalisierung und als Kaskade ECHAM5=>WEREX V.....	37
5.2.1.3 Vergleichstyp: Kaskaden GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD mit verschiedenen RCMs.....	39
5.2.1.4 Vergleichstyp: Kaskade ECHAM5=>WEREX V bei unterschiedlichen Stationskatalogen.....	42
5.2.1.5 Bänderdiagramme des Modellensembles.....	43
5.2.1.6 Zusammenschau der Temperatursignale in einer Tabelle.....	47
5.2.2 Niederschlag.....	48
5.2.2.1 Vergleichstyp: Verschiedene Szenarios und verschiedene GCMs in GCM=>ESD-Kaskaden.....	48
5.2.2.2 Vergleichstyp: Verschiedene Läufe desselben Globalmodells, ohne Regionalisierung und als Kaskade ECHAM5=>WEREX V.....	51
5.2.2.3 Vergleichstyp: Kaskaden GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD mit verschiedenen RCMs.....	54
5.2.2.4 Vergleichstyp: Kaskade ECHAM5=>WEREX V bei unterschiedlichen Stationskatalogen.....	57
5.2.2.5 Bänderdiagramme des Modellensembles.....	58
5.2.2.6 Zusammenschau der Niederschlagssignale in einer Tabelle.....	62
<b>6 Diskussion</b> .....	<b>63</b>
6.1 Was bewirkt die Kaskade GCM=>RCM=>ESD?.....	63
6.2 Könnte die Kaskade GCM=>RCM=>ESD ein Ersatz für die Bias-Korrektur sein?.....	63
6.3 Wie ist die Simulation mit dem Einsatz der Reanalyse als Anfangsbedingung einzuschätzen?.....	63

6.4	Wie sind globale 2-Grad-Szenarienregionalisierungen zu bewerten? .....	64
6.5	Wie ist der schwache Trend im meteorologischen Frühjahr in den ECHAM5-Simulationen in Bezug zu dem starken Trend in den Simulationen von HadCM3C zu bewerten? .....	65
6.6	Welche Gründe kann es für die Unterschiede beim Niederschlagstrend zwischen RCM und ESD-Ergebnissen geben? .....	65
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>65</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>67</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Prinzip des Nestings am Beispiel des Modells REMO (nach JACOB et al. 2007).....	12
Abbildung 2:	Für die zweite Etappe von WEREX V verwendete Klimastationen (links) und Niederschlagsstationen ...	16
Abbildung 3:	Vergleich der Jahresmitteltemperatur in der WEREX-Region, berechnet auf der Basis verschiedener Datensätze .....	17
Abbildung 4:	Vergleich des Jahresniederschlags in der WEREX-Region, berechnet auf der Basis verschiedener Datensätze .....	17
Abbildung 5:	Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 mit der gemessenen für WEREX V, angetrieben mit den Daten GCM → Modellkaskaden .....	23
Abbildung 6:	Illustrierung der räumlichen Temperaturmuster bei Verwendung eines GCM ohne Regionalisierung. Gegenüberstellung der Validierungen von ECHAM5-Lauf 1 Globalmodellen für einen Ausschnitt mit Südost-Deutschland und für die WEREX-Region. Die Kreuze markieren die Lage der ECHAM%-Gitterpunkte. Dargestellt ist der Vergleich der simulierten Mitteltemperatur 1991–2000 mit der gemessenen Temperatur an Stationen, die jeweils in der Nähe der ECHAM5-Gitterpunkte liegen. ....	24
Abbildung 7:	Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit der gemessenen, für ECHAM5-Modellsimulation im Ausschnitt der WEREX-Region – Teilfiguren (a) bis (c) – mit der dazugehörigen Werteskala von -2,7 °C bis +2,7 °C und für die Daten der ECHAM5 → WEREX-Modellkaskaden auf der Basis der drei ECHAM5-Läufe – Teilfiguren (e) bis (g) – mit der dazugehörigen Werteskala von -0,9 °C bis +0,9 °C .....	24
Abbildung 8:	Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit der gemessenen, für verschiedene ECHAM5 → RCM-Modellkaskaden im Ausschnitt der WEREX-Region. Beim Vergleich dieser Abbildung mit Abbildung 9 sind die unterschiedlichen Werteskalen zu beachten.....	25
Abbildung 9:	Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur von 1971–2000 (20C-Daten) mit der gemessenen, für verschiedene ECHAM5 →RCM→ WEREX V-Modellkaskaden im Ausschnitt der WEREX-Region. Beim Vergleich dieser Abbildung mit Abbildung 8 sind die unterschiedlichen Werteskalen zu beachten. ....	26
Abbildung 10:	Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit der gemessenen, für die Kaskade ECHAM5→WEREX V im Ausschnitt der WEREX-Region. Dargestellt ist das Resultat der Nutzung eines Stationskatalogs, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet, wie er in der ersten Etappe des Vorhabens verwendet wurde, gegenüber einem Stationskatalog, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2010 beinhaltet, wodurch die Analysen der zweiten Etappe charakterisiert sind. ....	27
Abbildung 11:	Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 mit dem gemessenen (prozentuale Änderung) für WEREX V, angetrieben mit den Daten GCM→ ESD Modellkaskaden.....	28
Abbildung 12:	Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit dem gemessenen (prozentuale Änderung) für ECHAM5-Modellsimulationen ohne Regionalisierung (a)-(c) und regionalisiert mit WEREX V (d)-(f) (Kaskade ECHAM5→WEREX V) im Ausschnitt der WEREX-Region .....	29
Abbildung 13:	Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit dem gemessenen (prozentuale Änderung) für verschiedene ECHAM5→RCM-Modellkaskaden im Ausschnitt der WEREX-Region .....	30
Abbildung 14:	Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit dem gemessenen (prozentuale Änderung) für verschiedene ECHAM5→RCM→WEREX V-Modellkaskaden im Ausschnitt der WEREX-Region. Beim Vergleich dieser Abbildung mit Abbildung 13 sind die unterschiedlichen Werteskalen zu beachten. ....	31
Abbildung 15:	Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit dem gemessenen (prozentuale Änderung) für die Kaskade ECHAM5→WEREX V im Ausschnitt der WEREX-Region. Dargestellt ist das Resultat der Nutzung eines Stationskatalogs, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet, wie er in der ersten Etappe des Vorhabens verwendet wurde,	

	gegenüber einem Stationskatalog, der Klimareihen aus den Jahren 1971–2010 beinhaltet, wodurch die Analysen dieser zweiten Etappe charakterisiert sind. ....	32
Abbildung 16:	Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 2071–2100 mit derjenigen für die Periode 1971–2000 von WEREX V, angetrieben mit den Daten der Szenarios A1B und E1 für verschiedenen GCMs in GCM→ESD-Modellkaskaden .....	35
Abbildung 17:	Jahresmitteltemperatur im Verlauf 1961–2100 an der Station Dresden und vier Umgebungsstationen, simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 16. Die Punkte zeigen die Werte der Simulation für das jeweilige Jahr an; die durchgezogene Linie gibt den tiefpassgefilterten Verlauf wieder; die gestrichelten Linien zeigen ein Konfidenzintervall an, das sich aus dem Zeitraum 1971–2000 simulierten Werten errechnet. Die Breite des Intervalls ist links unter dem Diagramm angegeben. ....	36
Abbildung 18:	Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit derjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für ECHAM5-Modellsimulationen im Ausschnitt der WEREX-Region – Teilfiguren (a) bis (c) und für die Daten der ECHAM5→WEREX V Modellkaskaden auf der Basis der drei ECHAM5-Läufe – Teilfiguren (d) bis (f) .....	37
Abbildung 19:	Jahresmitteltemperatur im Verlauf 1961–2100 an einem ECHAM5-Gitterpunkt in der Nähe der Station Dresden (a)-(c) bzw. der Station Dresden und vier Umgebungsstationen (d)-(f), simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 18. Die Punkte zeigen die Werte der Simulationen für das jeweilige Jahr an; die durchgezogene Linie gibt den tiefpassgefilterten Verlauf wieder; die gestrichelten Linien zeigen ein Konfidenzintervall an, das sich aus den im Zeitraum 1971–2000 simulierten Werten errechnet. Die Breite des Intervalls ist links hinter dem Diagramm abgebildet.....	38
Abbildung 20:	Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit derjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für verschiedene ECHAM5→RCM-Modellkaskaden im Ausschnitt der WEREX-Region .....	39
Abbildung 21:	Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit derjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für verschiedene ECHAM5→RCM→WEREX V-Modellkaskaden der WEREX-Region .....	40
Abbildung 22:	Jahresmitteltemperatur im Verlauf 1961–2100 an einem CLM-, REMO- bzw. RACMO-Gitterpunkt und 24 Umgebungs-gitterpunkten in der Nähe der Station Dresden (a)-(d) bzw. der Station Dresden und vier Umgebungsstationen (e)-(h), simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 20 und Abbildung 21. Angaben zu den Punkten und den Linien der Diagramme wie bei Abbildung 15. ....	41
Abbildung 23:	Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit derjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für die Kaskade ECHAM5→WEREX V im Ausschnitt der WEREX-Region. Dargestellt ist das Resultat der Nutzung eines Stationskatalogs, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet, wie er in der ersten Etappe des Vorhabens verwendet wurde, gegenüber einem Stationskatalog, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2010 beinhaltet, wodurch die Analysen dieser zweiten Etappe charakterisiert sind. ....	42
Abbildung 24:	Jahresmitteltemperatur im Verlauf 1961–2100 als Mittel aus den Werten der Station Dresden und vier Umgebungsstationen. (a) Kaskade ECHAM5→WEREX V mit einer Stationsliste, die Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet. (b) Kaskade wie (a), aber mit einer Stationsliste für Klimamessreihen 1971–2010. (c) Variante von (a) mit einer alternativen Version von WEREX V, bei der die Häufigkeiten der Zirkulationsmuster aus der Gegenwart extrapoliert werden und für das 21. Jahrhundert ein gradueller Übergang zu den Häufigkeiten der Muster, wie sie von ECHAM5 simuliert werden, erfolgt (ausführliche Beschreibung dieser Alternative in KREIENKAMP et al. 2010c).....	42
Abbildung 25:	Bänderdiagramme für die Signale der Temperatur als Vergleich zwischen 2071–2100 (Szenario) und 1971–2000 (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Simulationen gewählt, bei denen die ESD-Methode (WETTREGxxxx oder WEREXx) direkt auf Basis der GCM-Ergebnisse von SRES A1B-Simulationen eingesetzt wurde. Jedes Band für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16). Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet.	

	Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 75-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zum Extremen. ....	44
Abbildung 26:	Bänderdiagramme für die Signale der Temperatur als Vergleich zwischen 2071–2100 (Szenario) und (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Situationen gewählt, bei denen die ESD-Methode direkt auf Basis der GCM-Ergebnisse von E1-Simulationen eingesetzt wurde. Als Vergleich werden die dazugehörigen A1B-Simulationen aufgezeigt. Jedes Band zeigt für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16). Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 75-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zu den Extremen. ....	45
Abbildung 27:	Bänderdiagramme für die Signale der Temperatur als Vergleich zwischen 1971–2100 (Szenario) und 1971–2000 (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Simulationen gewählt, bei denen die ESD-Methode direkt auf Basis der GCM→RCM Kaskadenergebnisse von A1B-Simulationen eingesetzt wurde. Als Vergleich werden die dazugehörigen A1B-Simulationen der RCMs aufgezeigt. Jedes Band zeigt für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16) Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 50-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zu den Extremen.....	46
Abbildung 28:	Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 2071–2100 mit demjenigen der Periode 1971–2000 von WEREX V (prozentuale Änderung), angetrieben mit den Daten der Szenarios A1B und E1 für verschiedene GCMs in GCM→ESD-Modellkaskaden.....	49
Abbildung 29:	Sommerniederschlag im Verlauf 1961–2100 an der Station Dresden und vier Umgebungsstationen, simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 28. Die Punkte zeigen die Werte der Simulationen für das jeweilige Jahr an; die durchgezogene Linie gibt den tiefpassgefilterten Verlauf wieder; die gestrichelten Linien zeigen ein Konfidenzintervall an, das sich aus dem Zeitraum 1971–2000 simulierten Werten errechnet. Die Breite des Intervalls ist links unter dem Diagramm angegeben. ....	50
Abbildung 30:	Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit demjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für ECHAM5-Modellsimulation (prozentuale Änderungen) im Ausschnitt der WEREX-Region – Teilfiguren (a)-(c) und für die Daten der ECHAM5→WEREX V-Modellkaskaden auf der Basis der drei ECHAM5-Läufe – Teilfiguren (d) bis (f) .....	52
Abbildung 31:	Sommerniederschlag im Verlauf 1961–2100 an einem ECHAM5-Gitterpunkt in der Nähe der Station Dresden (a)-(c) bzw. der Station Dresden und vier Umgebungsstationen (d)-(f), simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 30. Die Punkte zeigen die Werte der Simulationen für das jeweilige Jahr an; die durchgezogene Linie gibt den tiefpassgefilterten Verlauf wieder; die gestrichelten Linien zeigen ein Konfidenzintervall an, das sich aus den im Zeitraum 1971–2000 simulierten Werten errechnet. Die Breite des Intervalls ist links unter dem Diagramm angegeben. ....	53
Abbildung 32:	Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit demjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für verschiedene ECHAM5→RCM-Modellkaskaden (prozentuale Änderung) im Ausschnitt der WEREX-Region .....	54
Abbildung 33:	Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit demjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für verschiedene ECHAM5→RCM→WEREX V-Modellkaskaden (prozentuale Änderung) im Ausschnitt der WEREX-Region.....	55
Abbildung 34:	Sommerniederschlag im Verlauf 1961–2100 an einem CLM-, REMO- bzw. RAMO-Gitterpunkt und 24 Umgebungs-gitterpunkten in der Nähe der Station Dresden (a)-(d) bzw. der Station Dresden und vier Umgebungsstationen (e)-(h) (prozentuale Änderung), simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 32 und 32. Angaben zu den Punkten und den Linien der Diagramme wie bei Abbildung 31.....	56
Abbildung 35:	Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit demjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für die Kaskade ECHAM5→WEREX V (prozentuale Änderung) im Ausschnitt der WEREX-Region. Dargestellt ist das Resultat der Nutzung eines Stationskatalogs, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet, wie er in der ersten Etappe des Vorhabens	

	verwendet wurde, gegenüber einem Stationskatalog, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2010 beinhaltet, wodurch die Analysen der zweiten Etappe charakterisiert sind. ....	57
Abbildung 36:	Sommerniederschlag im Verlauf 1961–2100 als Mittel aus den Werten der Station Dresden und vier Umgebungsstationen. (a) Kaskade ECHAM5→WEREX V mit einer Stationsliste, die Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet. (b) Kaskade wie (a) aber mit einer Stationsliste für Klimamessreihen 1971–2010. (c) Variante von (a) mit einer alternativen Version von WEREX V, bei der die Häufigkeiten der Zirkulationsmuster aus der Gegenwart extrapoliert werden und für das 21. Jahrhundert ein gradueller Übergang zu den Häufigkeiten der Muster, wie sie von ECHAM5 simuliert werden, erfolgt (ausführliche Beschreibung dieser Alternative in KREIENKAMP et al. 2010c). ....	58
Abbildung 37:	Bänderdiagramme für die Signale des Niederschlags als Vergleich zwischen 2071–2100 (Szenario) und 1971–2000 (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Situationen gewählt, bei denen die ESD-Methode (WETTEREGxxx oder WEREX x) direkt auf Basis der GCM-Ergebnisse von SRES A1B-Simulationen eingesetzt wurde. Jedes Band zeigt für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16). Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 75-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zu den Extremen. ....	59
Abbildung 38:	Bänderdiagramme für die Signale des Niederschlags als Vergleich zwischen 2071–2100 (Szenario) und 1971–2000 (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Simulationen gewählt, bei denen die ESD-Methode direkt auf Basis der GCM-Ergebnisse von E1-Simulationen eingesetzt wurde. Als Vergleich werden die dazu gehörigen A1B-Simulationen aufgezeigt. Jedes Band zeigt für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16). Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 75-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zu den Extremen. ....	60
Abbildung 39:	Bänderdiagramme für die Signale des Niederschlags als Vergleich zwischen 2071–2100 (Szenario) und 1971–2000 (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Simulationen gewählt, bei denen die ESD-Methode direkt auf Basis der GCM-RCM Kaskadenergebnisse von A1B-Simulationen eingesetzt wurde. Als Vergleich werden die dazugehörigen A1B-Simulationen der RCMs aufgezeigt. Jedes Band zeigt für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16). Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 75-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zu den Extremen. ....	61

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Charakteristika in den beiden Etappen dieses Vorhabens eingesetzten Modelle ECHAM5C, HadGEM2-AO, Had-CM3C CNRM CM33 und ECHAM5 .....	14
Tabelle 2:	Stationszahl aus den unterschiedlichen Bundesländern/Freistaaten/Staaten in der zweiten Etappe von WEREX V .....	17
Tabelle 3:	Wetterelemente in den bereitgestellten Klimastationszeitreihen .....	18
Tabelle 4:	Modellkaskaden für die Regionalisierung in diesem Vorhaben (ESD ist immer WEREX V) .....	19
Tabelle 5:	Abweichung der simulierten Mitteltemperatur 1971–2000 von der gemessenen für verschiedene Modelle und Modellkaskaden .....	27
Tabelle 6:	Prozentuale Abweichung des simulierten Niederschlags 1971–2000 vom gemessenen für WEREX V, angetrieben mit den Daten verschiedener Modelle .....	32
Tabelle 7:	Mitteltemperatur im Vergleich zwischen 2071–2100 und den entsprechenden 20C-Daten des Zeitraums 1971–2000 für verschiedene Modelle und Modellkaskaden .....	47
Tabelle 8:	Prozentuale Änderung des Niederschlags im Vergleich zwischen 2071–2100 und den entsprechenden 20C-Daten des Zeitraums 1971–2000 für verschiedene Modelle und Modellkaskaden.....	62

# Kurzfassung

WEREX ist eine auf den Freistaat Sachsen fokussierte Fassung der statistischen Methode WETTREG, die mit diesem Vorhaben zur aktualisierten Fassung WEREX V weiterentwickelt wurde. In der ersten Projektphase lag der Fokus auf dem Erstellen der neuen Version. In ihr finden sich methodische Neuerungen, wie etwa die Transwetterlagen, wieder.

Die zweite Etappe des Vorhabens WEREX V, zu der dieser Bericht vorgelegt wurde, zeigt Resultate von WEREX V, angetrieben mit verschiedenen Modellen und Modellkombinationen.

Der Ensemble-Grundgedanke, bereits in der ersten Etappe umgesetzt, wird in der zweiten Projektetappe vertieft. Bereits in der Vorgängerfassung WEREX IV gab es ein Ensemble aus mehreren Läufen und Szenarios eines Globalmodells: ECHAM5. In der ersten Etappe von WEREX V wurde dieser Ansatz auf die Simulationsrechnungen der Modelle HadCM3C und HadGEM2 sowie auf Simulationsrechnungen mit dem neuartigen E1-Szenario, das für Studien im Zusammenhang mit dem Zwei-Grad-Klimaziel entwickelt wurde, ausgeweitet.

In der zweiten Etappe dieses Vorhabens werden Simulationen mit weitere Klimamodellen und Szenario-Rechnungen als Antrieb für WEREX V eingesetzt. Dabei wurden auch zwei neuartige Ansätze vorgestellt, bei denen eine Kaskade aus Global- und Regionalmodellen sowie direkt Reanalysen mit einer graduellen Extrapolation den Antrieb für WEREX V bilden.

## 1 Einleitung

Der Klimawandel, Teil des Globalen Wandels, ist eine der großen Herausforderungen für die Menschheit mit weitreichenden Konsequenzen. Die menschliche Aktivität ist der Hauptauslöser für diesen Wandel, denn sie verändert die Zusammensetzung der Atmosphäre und in der Folge ändert sich das Klima. Die Quantifizierung der Änderungen ist auch weiterhin bedeutendes Forschungsziel, denn die Klimaprozesse, ihre Dynamik und ihre Wechselwirkungen sind noch nicht ausreichend verstanden, um die zukünftige Entwicklung des Klimas präzise darstellen zu können. Diese Resultate werden für umfangreiche Studien zu den Auswirkungen des Klimawandels benötigt, denn auf deren Basis sind Adaptationsmaßnahmen zu konzipieren und umzusetzen. Den Entwicklungsrahmen bietet seit 1990 der IPCC-Prozess mit den Sachstandsberichten als Meilensteine: IPCC (1990), IPCC (1996), IPCC (1998), IPCC (2001) – eine Fortsetzung erfolgte 2007 mit dem vierten IPCC-Sachstandsbericht IPCC (2007). Parallel dazu erfolgte auch eine Weiterentwicklung der globalen Klimamodelle. Diese sind unverzichtbare Basis aller Regionalisierungsstudien, seien es dynamische oder statistische Ansätze. Eine Übersicht des Kenntnisstands findet sich in SALINGER (2005), eine Übersicht zur Vorhersagbarkeit von Klimaänderungen in GIORGI (2005) und ein Vergleich von Klimamodellen, die im IPCC-Bericht 2007 verwendet werden, ist in LUCARINI et al. (2007) publiziert. Dynamische Regionalisierungsmodelle wurden im EU-Projekt PRUDENCE einander gegenübergestellt (PRUDENCE 2005) und im EU-Projekt ENSEMBLES werden Multimodell-Ansätze erarbeitet und umgesetzt. Der Bericht VAN DER LINDEN & MITCHELL (EDS.) (2009) fasst die ENSEMBLES-Ergebnisse zusammen.

Das Vorhaben WEREX V setzt die in den letzten Jahren erzielten Fortschritte bei der Klimamodellierung um. Es ist zudem eingebettet in den Werdegang der Studien, die für den Freistaat Sachsen mit den statistischen Modellen WEREX III (DEUTSCHLÄNDER & ENKE 2004), WEREX IV (SPEKAT et al. 2006a, SPEKAT et al. 2006b)

und ProElbe (SPEKAT et al. 2006c) gefertigt wurden. Bei WEREX handelt es sich um eine auf Sachsen fokussierte Instanz der in vielen Klimastudien auf Bundes- und Landesebene verwendeten WETTREG-Methode. WETTREG wurde im Rahmen einer Mehrländerstudie (KREIENKAMP et al. 2010b) erweitert – u. a. erfolgte die Einführung von so genannten Transwetterlagen – was im Zuge dieses Vorhabens auf WEREX übertragen und in KREIENKAMP et al. (2010c) vorgestellt wurde.

Ein wesentlicher Aspekt ist in diesem Zusammenhang, dass der Ensemble-Gedanke vermehrt Einzug in Regionalstudien findet. So ist es anerkannte Praxis, die Resultate mehrerer Modelle/Szenarios/Modellläufe einander gegenüberzustellen, um die Bandbreite des eintretenden Klimawandels in Abhängigkeit der unterschiedlichen Modellformulierungen besser beurteilen zu können. Eine erste Vergleichsstudie für Sachsen erfolgte im Rahmen des REGKLIM-Vorhabens (KREIENKAMP & SPEKAT 2008). Seinerzeit waren jedoch die Weiterentwicklungen von WETTREG noch nicht verfügbar.

Zudem wurde im Rahmen des EU-ENSEMBLES-Projekts auch ein Szenario eines neuen Typs erarbeitet – E1; eine Beschreibung findet sich in KREIENKAMP et al. (2010c), Abschnitt 1.3.2. Wie in jenem Bericht ausgeführt, wurden erstmals für Sachsen Daten solcher Szenarios verwendet, um die statistische Regionalisierungsmethode WEREX anzutreiben.

## 2 Zum Vorhaben WEREX V

Das Vorhaben WEREX V bestand aus zwei Etappen.

### 2.1 Etappe I

Wie in KREIENKAMP et al. (2010c) aufgeführt, wurden folgende Aspekte dokumentiert:

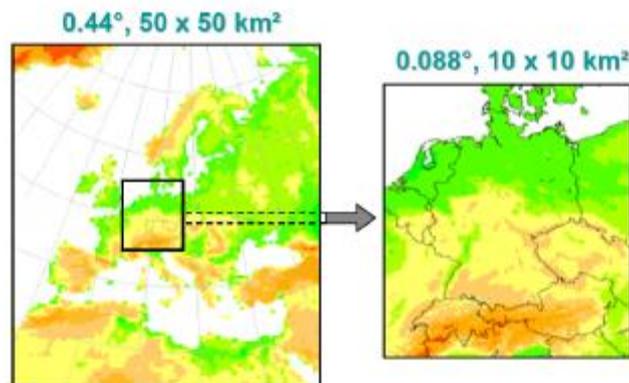
- Neuentwicklung, Dokumentation und Bereitstellung von hoch auflösenden Wetterlagen für den Raum Sachsen, darin enthalten die Aufbereitung von NCAR-Reanalysen und abgestimmte Modellsimulationen für die letzten Dekaden des 20. Jahrhunderts. Vorstellung der neuen WEREX V-Zirkulationsmuster
- Regionalisierungen mit WEREX V und Prüfung der Simulations-Zeitreihen, darin enthalten Simulationen, die mit den Daten aus den ENSEMBLE-Läufen von den Globalmodellen ECHAM5C/MPIOM (Szenario E1), HadCM3C (Szenario E1) und HadGEM2 (Szenario E1) und mit den Daten des auch in WEREX IV verwendeten ECHAM5/MPI-OM T63L31, Szenario A1B angetrieben wurden
- Erprobung eines Ansatzes, bei dem Parameter der Klimaentwicklung in den letzten 30 Jahren des 20. Jahrhunderts auf den Verlauf des Klimas in den ersten Dekaden des 21. Jahrhunderts einwirken. Dies folgt der Idee, dass damit eine bessere Simulation des gegenwärtigen Klimas und desjenigen der nächsten Dekaden möglich ist als dies allein durch Klimaszenarios auf der Basis der Treibhausgas-Emissionen erfolgen kann.

## 2.2 Etappe II

In Etappe II liegt das Hauptaugenmerk auf der Regionalisierung mit dem Antrieb durch weitere Globalmodelle. Außerdem wird ein neuartiger Ansatz verfolgt, der eine Kaskade von Modellen verschiedener Auflösung zur Regionalisierung einsetzt.

### 2.2.1 Der Kaskadenansatz

Weil die Simulationen eines globalen Zirkulationsmodells (Global Circulation Model [GCM]) über ein relativ geringes Aussagevermögen auf der regionalen und lokalen Skala verfügen (Beispiele finden sich in GROUCH & MACCRACKEN 1991; IPCC 1998; FOWLER et al. 2007), ist eine Regionalisierung notwendig. Daher wurde, unter Beibehaltung der Grundprinzipien der numerischen Simulation, der so genannte Nesting-Ansatz entwickelt. Wie in DICKINSON et al. (1989) und GIORGI (1990) beschrieben und in jüngster Zeit von RUMMUKAINEN (2010) aktualisiert, wird dazu in einem begrenzten Areal eine höher aufgelöste Variante des GCMs gerechnet – z. B. mit einem Zehntel der GCM-Maschenweite. Ein solches regionales Zirkulationsmodell (Regional Circulation Model [RCM]) erhält seinerseits den Randantrieb mit der Information über den Atmosphärenzustand außerhalb des begrenzten Areals von einem GCM. Abbildung 1 veranschaulicht das Prinzip, wobei im linken Teil der Abbildung die Werte außerhalb des mit 50 km Auflösung gerechneten Atlantisch-Europäischen Fensters vom GCM stammen und die von REMO in dieser Nesting-Stufe erzeugten Daten als Randantrieb für eine weitere Nesting-Stufe mit 10 km Auflösung für Mitteleuropa eingesetzt werden. In einer symbolischen Schreibweise wäre der Informationsfluss also GCM=>RCM.



**Abbildung 1: Prinzip des Nestings am Beispiel des Modells REMO (nach JACOB et al. 2007)**

Eine alternative Vorgehensweise bei der Regionalisierung ist die Verwendung von statistischen Verfahren (Empirical Statistical Downscaling [ESD]), ausführlich dargestellt in BENESTAD et al. (2008). Diese Verfahren gehen vom Postulat aus, dass die GCM im großräumigen Scale in der Lage sind, die Strukturen der atmosphärischen Zirkulation treffend zu beschreiben, was im Rahmen des EU-Programms PRUDENCE (PRUDENCE 2005) bestätigt wurde. Weil die GCM auch konsistent das Muster der Klimaänderungen wiedergeben, ist es folglich praktikabel, aus deren Resultaten lokale Information zu gewinnen, in symbolischer Schreibweise GCM=>ESD. Das hier benutzte statistische Verfahren WEREX V zählt zu den ESD-Verfahren.

In mehreren Projekten wurden GCM=>RCM und GCM=>ESD-Resultate einander gegenübergestellt (z. B. KREIENKAMP et al. 2009b, a; 2011). Dabei konnte bereits im Rahmen des Projektes PARk (Probabilistische Analyse regionaler Klimaänderungen) (SPEKAT et al. 2008a; KREIENKAMP et al. 2009b) eine erste Teilstudie durchgeführt werden, bei der die RCM-Resultate u. a. auch als Antrieb für ein ESD zum Einsatz kamen. Dort mit dem ESD WETTREG, eine auf die Modellierung des Klimas in Deutschland ausgelegte Variante des auf

Sachsen fokussierten WEREX-Verfahrens. Die RCM-Resultate verfügen allerdings über ein so hohes Maß an räumlichen Details, dass für ein ESD wie WETTREG/WEREX im Zuge der Mustererkennungsphase die „Trennschärfe“ reduziert wird. Eine starke räumliche Glättung reduziert dies zwar, beseitigt aber auch möglicherweise relevante Strukturen.

Im Kaskadenansatz geht es darum, die Bandbreite des Klimawandels in der WEREX-Region (Sachsen und das nordwestliche Tschechien) aufzuzeigen und dabei in den Fokus zu rücken, dass die Resultate auf unterschiedliche Weise – GCM=>RCM, GCM=>ESD und GCM=>RCM=>ESD – entstanden. Dazu kommen sowohl verschiedene GCM als auch verschiedene RCM zum Einsatz. Das ESD ist immer WEREX V.

### 2.2.2 GCMs und RCMs als Antrieb für WEREX V

Neben den GCMs ECHAM5, ECHAM5C, HadGem2 und HadCM3C in der ersten Etappe (KREIENKAMP et al. 2010c) werden im Rahmen dieses Vorhabens für die Kaskade des Typs GCM=>ESD Daten eines französischen GCM (CNRM CM33) verwendet. In Etappe II von WEREX V liegt der Fokus zum Ersten auf den Kaskaden des Typs GCM=>RCM=>ESD. Es werden als RCM die Modelle CLM (zwei Läufe), REMO und RACMO (je ein Lauf) und als GCM das Modell ECHAM5, SRES Szenario A1B, verwendet. Hinzu kommt die Dokumentation einer GCM=>ESD Regionalisierung mit WEREX V unter Verwendung des GCM ECHAM5C, Szenario A1B. Zum Zweiten werden GCM=>ESD analysiert, in denen mehrere Läufe desselben GCMs (hier ECHAM5 MPI-OM Läufe 1–3) zum Einsatz kommen. Zum Dritten wird eine alternative WEREX V-Regionalisierung dokumentiert, die methodisch bereits in KREIENKAMP et al. (2010c) vorgestellt wurde. Dabei erfolgt einer Analyse der Entwicklung von tatsächlich in den letzten Dekaden des 20. Jahrhunderts aufgetretenen Zirkulationsmuster-Häufigkeiten. Daraus erfolgt die Berechnung von Häufigkeits-Trends für die einzelnen Muster. Diese trendhaft fortgeschriebenen Häufigkeiten werden in den ersten Dekaden des 21. Jahrhunderts sukzessive zunehmend mit den Muster-Häufigkeiten, die vom GCM ECHAM5 simuliert werden, überlagert.

Details zu den verwendeten Datenarten werden in Kapitel 3 beschrieben. Eine Übersicht über alle in WEREX V analysierten Kaskaden bildet Tabelle 4 ab.

## 3 Datenmaterial

Für die Anwendung der WEREX-Regionalisierungsmethode sind vier Datenkomponenten notwendig: Reanalysedaten für die Beschreibung des Klimas der Jetztzeit, Ergebnisse von Szenariorechnungen mit einem GCM (alle Kaskadentypen), Ergebnisse von einem RCM (angetrieben mit GCM-Szenarios, Kaskadentypen GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD) und Messdaten von Klimastationen zur Herleitung der statistischen Beziehungen. In den folgenden Unterabschnitten werden diese Datenarten kurz beschrieben.

### 3.1 Reanalysen

Grundgedanke des Reanalyse-Ansatzes ist es, eine Klimatologie der Atmosphäre in drei Dimensionen auf der Basis von Daten hoher Homogenität in Zeit und Raum zu erzeugen. Atmosphärische Messdaten wurden und werden in einer Vielzahl von Verfahren, die sich über die Zeit verändert haben, analysiert, sodass es nicht bruchlos möglich ist, Analysen aus unterschiedlichen Quellen und für unterschiedliche Perioden zu betrachten. Erst durch ihr Re-Analysieren ist ein auf homogenen Daten beruhendes dreidimensionales Bild des Klimas der Jetztzeit möglich. Die Reanalyse-Philosophie und die Entwicklungs-Phasen insbesondere beim

European Center for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) werden in Kapitel 14 (S. 167–182) von WOODS (2006) sehr gut und ausführlich dargestellt. Es gibt zwei Reanalyse-Datensätze, die im Laufe der Zeit auch für WETTREG bzw. WEREX Verwendung fanden: Die NCEP/NCAR Reanalysen (KALNAY et al. 1996) und die ERA40-Reanalysen (UPPALA et al. 2005). Erstere werden stetig aktualisiert, während die Zweitgenannten nur bis 2002 reichen, aber dafür eine höhere räumliche Auflösung bieten. Sowohl NCEP- als auch ERA40-Daten sind in Bereichen mit guter Datenbelegung nur geringfügig unterschiedlich (GREATBATCH & RONG 2006; WANG et al. 2006). Aus den Feldern werden temperatur- und niederschlagsbezogene Zirkulationsmuster bestimmt, deren Kopplung mit dem lokalen Klima ein zentraler Aspekt von WETTREG ist.

## 3.2 Globales Klimamodell

Seit 2005 sind die Szenariorechnungen des Klimamodells ECHAM5/MPI-OM T63L31 (dokumentiert in ROCKNER et al. 2003; 2004) verfügbar. Der Zeithorizont umfasst die Jahre 1961 bis 2100, bis 2000 als 20C-Lauf, danach als Rechnungen für die SRES-Szenarios A1B, A2 und B1. Aus den Feldern werden so genannte potenzielle Prediktoren bestimmt, die Analysen von physikalischen Eigenschaften einer Atmosphäre im Klimawandel ermöglichen. Vergleiche mit regionalisierten Daten anderer Globalmodelle fanden beispielsweise im Rahmen des PArK-Projekts (SPEKAT et al. 2008b; KREIENKAMP et al. 2009b) statt. Inzwischen liegen weitere Läufe verschiedener Modelle vor, die im Rahmen des EU-Projekts ENSEMBLES erstellt und seit 2008 in der CERA-Datenbank beim DKRZ in Hamburg (<http://cera-www.dkrz.de>) verfügbar sind.

In der ersten Projekt-Etappe wurden als Antrieb für WETTREG ein ECHAM5/MPI-OM-Lauf 1, SRES-Szenario A1B und drei E1-Szenario-Läufe unterschiedlicher Modelle (die, anders als ECHAM5/MPIOM, aus den ENSEMBLES-Simulationen stammen) eingesetzt. Letztere sind das ECHAM5C-Modell (Weiterentwicklung von ECHAM5/MPI-OM mit einem Kohlenstoffkreislauf-Modell) und weitere zwei Modelle vom Hadley Centre des Met Office in Exeter, UK, HadCM3C und Had-GEM2 (vgl. KREIENKAMP et al. 2010c), die als WEREX-Antrieb zum Einsatz kamen. In der abschließenden Projektetappe wird dies durch A1B-Simulationen von HadCM3C und HadGEM2 sowie A1BSimulationen eines französischen Modells ergänzt: CNRM-CM33 Lauf 1 (CNRM) vom Centre National de Recherches Météorologiques in Toulouse (Frankreich); eine Beschreibung findet sich in SALAS-MÉLIA et al. (2005). Tabelle 1 beinhaltet die drei in KREIENKAMP et al. (2010c) beschriebenen Modelle, erweitert um Information zu CNRM CM33.

**Tabelle 1: Charakteristika in den beiden Etappen dieses Vorhabens eingesetzten Modelle ECHAM5C, HadGEM2-AO, Had-CM3C CNRM CM33 und ECHAM5**

<i>Modell</i>	<i>CC</i>	<i>AT</i>	<i>LU</i>	<i>Auflösung</i>	<i>Szenario A1B</i>	<i>Szenario E1</i>
<i>ECHAM5C</i>	•		•	T31L19	5 Läufe	5 Läufe
<i>HadCM3C</i>	•	•		N48L38	1 Lauf	1 Lauf
<i>HadGEM2-AO</i>		•	•	N96L38	2 Läufe	2 Läufe
<i>CNRM-CM33</i>			•	T63L31	1 Lauf	3 Läufe
<i>ECHAM5</i>				T63L31	3 Läufe	—

Erläuterung zu den Spalten 2–4:

CC: Kohlenstoffkreislaufkomponente; AT: Aerosole und Transportchemie; LU: Transiente Landnutzungskomponente

Erläuterung zur Spalte 5: N ist die Zahl der darstellbaren Wellen, N96 entspricht am Äquator einer Gitterweite von 1,25° in Nord-Süd-Richtung und 1,875° in Ost-West-Richtung, bei N48 sind es 2,5° in Nord-Süd-Richtung und 3,75° in Ost-West-Richtung, bei T31 sind es in beiden Richtungen 3,9°; L ist die Zahl der Modellflächen. Vgl. Tab. 4.3 in VAN DER LINDEN & MITCHELL (EDS.) (2009).

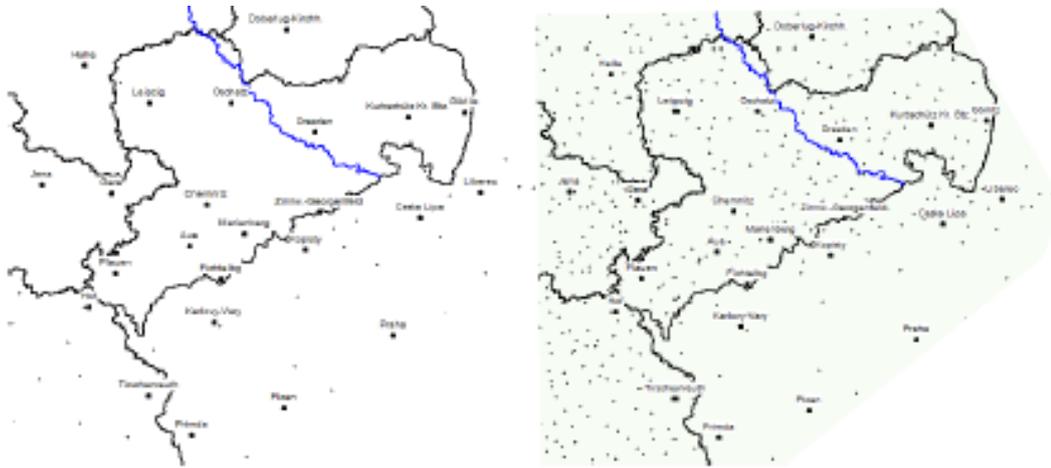
## 3.3 Regionales Klimamodell

Für Kaskaden des Typs GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD sind die Resultate von Läufen mit dynamischen Regionalmodellen erforderlich, die mit Daten eines GCM angetrieben wurden (s. a. Kapitel 2.2). Im Rahmen der zweiten Etappe von WEREX V wird insbesondere auf diesen Aspekt Gewicht gelegt und es kommen drei verschiedenen RCMs bei GCM=>RCM=>ESD zum Einsatz.

- **COSMO-CLM V2.4.11** (CLM) vom der CLM-Community – beschrieben in BÖHM et al. (2006). Die CLM Läufe wurden durchgeführt von der Gruppe Modelle & Daten, angesiedelt am Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg in enger Zusammenarbeit mit den CLM-Entwicklern: Brandenburgische Technische Universität Cottbus (BTU), GKSS Forschungszentrum in Geesthacht und Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Die Finanzierung erfolgte durch das BMBF im Rahmen des Förderschwerpunktes klimazwei (s. a. [sga.wdc-climate.de](http://sga.wdc-climate.de)). Archivierung beim WDC unter [cera.wdc-climate.de](http://cera.wdc-climate.de). Bei diesem Regionalmodell werden zwei Läufe verwendet.
- **REMO V5.7** (REMO) vom Max-Planck-Institut für Meteorologie in Hamburg – beschrieben in JACOB et al. (2007). Die Daten entstammen dem EU-FP6 Projekt ENSEMBLES ([ensemblesrt3.dmi.dk](http://ensemblesrt3.dmi.dk)) Research Theme 2B: Transient experiments 1951–2050 or 1951–2100 driven by global experiments. Das treibende Modell war ECHAM5-MPI OM. Bei diesem Regionalmodell wird ein Lauf verwendet.
- **RACMO V2.1** (RACMO) Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut, De Bilt, Niederlande – beschrieben in LENDERINK et al. (2003). Die Daten entstammen dem EU-FP6 Projekt ENSEMBLES ([ensemblesrt3.dmi.dk](http://ensemblesrt3.dmi.dk)) Research Theme 2B: Transient experiments 1951–2050 or 1951–2100 driven by global experiments. Das treibende Modell war ECHAM5-MPI OM. Bei diesem Regionalmodell wird ein Lauf verwendet.

## 3.4 Messdaten

Es standen 59 Klimastationen (davon 29 aus Tschechien) und 471 Niederschlagsstationen (davon 28 aus Tschechien) – insgesamt 530 Stationen – sowohl aus Sachsen als auch aus Brandenburg, Bayern, Sachsen-Anhalt und Thüringen zur Verfügung (Tabelle 2 und Abbildung 2). Quelle für die Daten aus Deutschland: DWD; Quelle für die Daten aus Tschechien: Czech Hydrometeorological Institute (CHMI), Prag und Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Dresden. Die an den Klimastationen verfügbaren Wetterelemente sind in Tabelle 3 aufgeführt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den Niederschlagsdaten um *unkorrigierte* Werte handelt. Nicht alle Daten sind für die endgültige Simulation genutzt worden.



**Abbildung 2: Für die zweite Etappe von WEREX V verwendete Klimastationen (links) und Niederschlagsstationen**

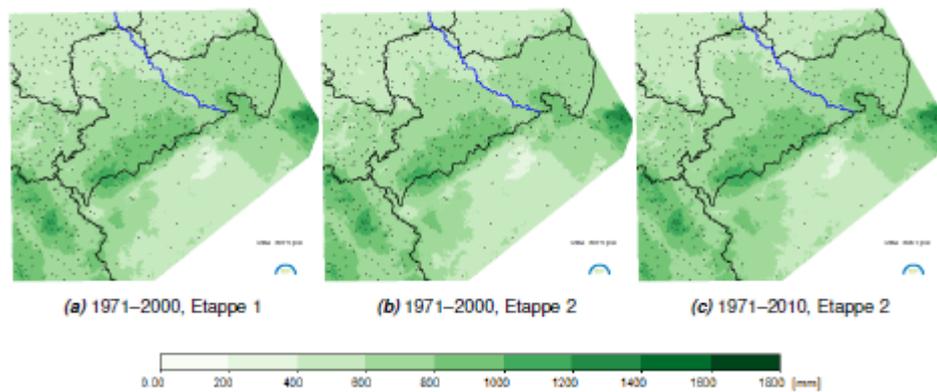
Die Zahl der Stationen unterscheidet sich etwas von der, die bei den Regionalisierungen in KREIENKAMP et al. (2010c) verwendet wurden. Das liegt zum Teil daran, dass die Datenbasis für die Klimastationen in KREIENKAMP et al. (2010c) bis 2000 reichte, während in der zweiten Etappe dieses Vorhabens durch eine Aktualisierung und Ergänzung Klimadaten bis 2010 verwendet werden konnten. Für WEREX V werden Stationen aus mehreren deutschen Bundesländern und aus Tschechien verwendet. Folglich ist es nur sinnvoll, Daten aus Jahren zu verwenden, in denen an möglichst vielen Stationen Messungen vorliegen. Wie in Abbildung 4 von KREIENKAMP et al. (2010c) gezeigt, sind insbesondere bei Stationen aus Tschechien in Einzeljahren nach 2000 große Datenlücken. Als Folge wurde für die gesamten Simulationen der ersten Projektetappe die Datenbasis auf 1971–2000 festgesetzt.

Ein weiterer Grund für die Unterschiede in den verwendeten Stationslisten ist die Tatsache, dass für etliche Stationen keine Messreihen bis 2010 vorliegen und sie daraufhin nicht verwendet werden konnten. Ein dritter Grund ist ein rigoroses Qualitätsprüfverfahren, aufgrund dessen viele Werte verworfen wurden. Daraufhin musste z. B. eine Station in Tschechien (Vysluni) aus der Stationsliste entfernt werden. Es stellte sich im Vergleich mit Umgebungsstationen insbesondere beim Niederschlag heraus, dass dort die Repräsentativität nicht gegeben war, weil überproportional viele Starkregenereignisse auftraten.

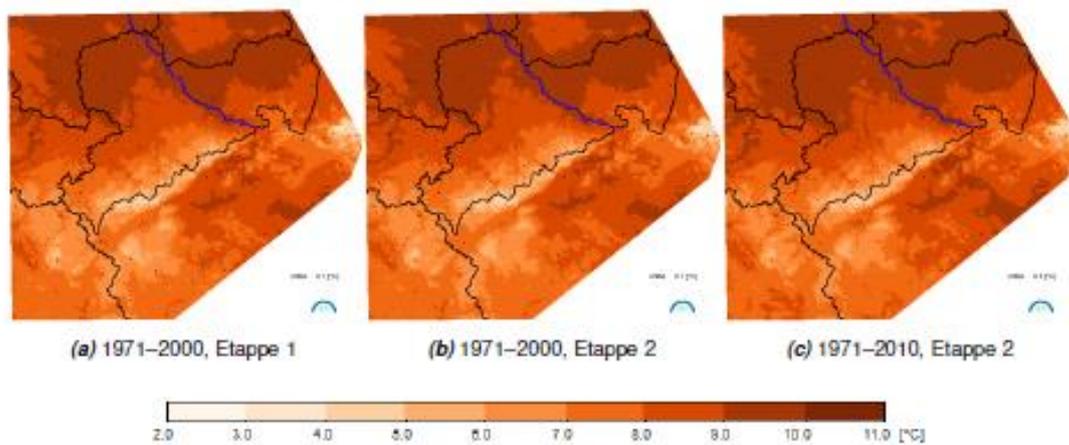
Ein direkter Vergleich, welche Auswirkungen die Verwendung unterschiedlicher Beobachtungszeiträume bewirkt, ist durch die Ergebnisse der Simulationen EH5 L1 A1B und EH5 A1B<sub>2000</sub> möglich. Der erstgenannte Datensatz basiert auf den Beobachtungsdaten 1971–2010, der zweite auf dem Zeitraum 1971–2000. Beide Datensätze basieren auf der gleichen EH5 L1 A1B Simulation. In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind die Unterschiede zwischen den verschiedenen Datensätzen dargestellt. Die Teilfiguren (a) von Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen jeweils das Jahresmittel von Temperatur und Niederschlag für den Zeitraum 1971–2000 bei Verwendung der Stationsliste der ersten WEREX V-Etappe an. In den Teilfiguren (b) ist dies für denselben Zeitraum, aber die in der zweiten WEREX V-Etappe verwendete Stationsliste dargestellt. Teilfiguren (c) schließlich zeigen auf, welche Mittelwerte sich aus einer 40-jährigen Periode 1971–2010 statt einer 30-jährigen 1971–2000 unter Verwendung der Stationsliste der zweiten WEREX V-Etappe ergeben.

Wie in Abbildung 3 und Abbildung 4 klar erkennbar, sind die Unterschiede zwischen den jeweiligen Teilfiguren (a) und (b) marginal; Auswirkungen der zum Einsatz gekommenen etwas anderen Stationsliste in der zweiten WEREX V-Etappe sind äußerst gering – lediglich im Bereich des Tepler Hochlands sind durch den Wegfall

mehrerer Stationen in der zweiten Etappe leichte Verschiebungen erkennbar. Ähnlich verhält es sich auch beim Niederschlag. Eine um 10 Jahre erweiterte Mittelungsperiode, wie in den Teilfiguren (c) gezeigt, führt zu einer geringen, durch die Hinzunahme mehrerer extremer Jahre nach 2001 nachvollziehbaren Erhöhung der Jahresmitteltemperatur und des Jahresniederschlags.



**Abbildung 3: Vergleich der Jahresmitteltemperatur in der WEREX-Region, berechnet auf der Basis verschiedener Datensätze**



**Abbildung 4: Vergleich des Jahresniederschlags in der WEREX-Region, berechnet auf der Basis verschiedener Datensätze**

**Tabelle 2: Stationszahl aus den unterschiedlichen Bundesländern/Freistaaten/Staaten in der zweiten Etappe von WEREX V**

<i>Land/FS/BL</i>	<i>Anzahl Klimastationen</i>	<i>Anzahl Niederschlagsstationen</i>
<i>Bayern</i>	11	83
<i>Brandenburg</i>	2	44
<i>Sachsen</i>	12	160
<i>Sachsen-Anhalt</i>	2	81
<i>Thüringen</i>	3	75
<i>Tschechien</i>	29	28

Für die Simulationen dieses Vorhabens und somit als Eingangsdaten für das Visualisierungsprogramm IDP wurden nur Daten verwendet, die innerhalb des Untersuchungsgebiets liegen. Wenn im Bericht von Messdaten, Klimamessungen oder Beobachtungsdaten die Rede ist, so handelt es sich in allen Fällen um instrumentelle Messungen von Wetterelementen (s. u.) an Boden-Messstationen. Klimadaten aus der freien Atmosphäre entstammen den Reanalysen (s. Kapitel 3.1).

**Tabelle 3: Wetterelemente in den bereitgestellten Klimastationszeitreihen**

<i>Nr.</i>	<i>Wetterelement</i>	<i>Einheit</i>
1	Maximum der Temperatur	[°C]
2	Tagesmittel der Temperatur	[°C]
3	Minimum der Temperatur	[°C]
4	Tagessumme des Niederschlages	[mm]
5	Tagesmittel der relativen Feuchte	[%]
6	Tagesmittel des Luftdrucks	[hPa]
7	Tagesmittel des Dampfdrucks	[hPa]
8	Tagessumme der Sonnenscheindauer	[h]
9	Tagesmittel des Bedeckungsgrades	[octas]
10	Tagesmittel der Windstärke	[m/s]

### 3.5 Verwendete Kaskaden

In der zweiten Projektetappe wird durch die neu ausgewerteten Läufe in zunehmenden Maße ein systematischer Blick auf die Problematik möglich, denn es kommen erstmals Kaskaden von Modellen zur Untersuchung.

Die Idee des Kaskadenansatzes wurde in den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 vorgestellt. In diesem Kapitel sind die verschiedenen in WEREX V eingesetzten Modellkaskaden aufgeführt (Tabelle 4). Die im Endbericht dokumentierten Ergebnisse von Modellen und Modellkaskaden der zweiten WEREX V-Etappe sind dort **fett** hervorgehoben.

Es werden vier Arten von Ergebnissen analysiert:

- Simulationen eines GCM (hier ECHAM5, Szenario A1B) ohne nachgeschaltete Regionalisierung – dafür werden vier relevante ECHAM5-Gitterboxen ausgewählt und auf eine Maske der WEREX-Region zugeschnitten. Dieses Vorgehen gibt keine belastbare regionale Information; es dient lediglich dem groben Überblick, welche Wertenniveaus von einem GCM für diesen Teil der Erde simuliert werden. Sie sind in Tabelle 4 als <GCM>kk aufgeführt, also z. B. EH5 A1 L1kk. kk ist immer die Markierung dafür, dass die Ergebnisse der GCM oder RCM Simulation direkt ausgewertet wurden. Zur vergleichenden Analyse weiterer GCMs für den Raum Sachsen siehe auch FESKE (2009).
- Kaskade GCM=>ESD mit ECHAM5 als GCM und WEREX V als ESD. Dies ist die „klassische“ Kaskade, wie sie beispielsweise auch in WEREX III oder WEREX IV Verwendung fand. Bereits bei WEREX IV erfolgte eine zusätzliche Bandbreitenbetrachtung, indem drei verschiedene ECHAM5-Läufe als Antrieb für WEREX verwendet wurden. Auch bei WEREX V ist diese Bandbreite realisiert, weil WEREX V-Regionalisierungen mit drei Läufen von ECHAM5 durchgeführt wurden. Erweitert wird diese Kaskadenart, indem sowohl weitere GCMs (HadCM3C, HadGEM2, CNRM CM33) als auch für ECHAM5C, HadCM3C und HadGEM2 Ergebnisse der Szenarios A1B und E1 als Antrieb für WEREX V benutzt werden.

- Kaskade GCM=>RCM mit verschiedenen Läufen von ECHAM5 als GCM, die drei RCMs (CCLM, REMO und RACMO) antreiben. Dies ist die „klassische“ Form der dynamischen Regionalisierung. Sie sind in Tabelle 4 als <GCM=><RCM><sub>kk</sub> aufgeführt, also z. B. EH5\_L3\_RACMO<sub>kk</sub>.
- Kaskade GCM=>RCM=>ESD, ebenfalls mit verschiedenen Läufen von ECHAM5 als GCM, die drei RCMs (CCLM, REMO und RACMO) antreiben, bei denen aber auf die RCM-Resultate jeweils WEREX V als ESD aufgesetzt wird. Dies ist eine noch wenig untersuchte Kaskade, in der RCMs auch in ihrer Eigenschaft, atmosphärische Strukturen zu bilden, analysiert werden.

Bei Verwendung mehrerer Globalmodelle (und womöglich mehrerer Szenarios), die eine Vielzahl von Regionalmodellen antreibt (zudem als Kaskaden der Typen GCM=>ESD, GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD – außerdem liegen bei RCMs oftmals Läufe mit verschiedenen Auflösungen vor), lässt die Zahl der Kombinationen stark anschwellen. Weil es zu umfangreich wäre, alle Kombinationen zu rechnen, wurde bereits im Rahmen von ENSEMBLES eine Strategie entwickelt, die aus den dort eingebrachten 16 GCMs und 8 RCMs (128 Kombinationen) ein Ensemble von 25 Kombinationen festlegte (s. Tabelle A2.1 im Anhang von VAN DER LINDEN & MITCHELL [EDS.] 2009). Eine analoge Vorgehensweise ist auch bei diesem Vorhaben notwendig, bzw. durch die verfügbaren Daten vorgegeben.

**Tabelle 4: Modellkaskaden für die Regionalisierung in diesem Vorhaben (ESD ist immer WEREX V)**

<i>Typ</i>	<i>GCM</i>	<i>RCM</i>	<i>Szenario</i>	<i>Lauf</i>	<i>Bezeichnung</i>
<b>GCM</b>	<b>ECHAM5</b>	–	<b>A1B</b>	1	<b>EH5_A1_L1<sub>kk</sub></b>
<b>GCM</b>	<b>ECHAM5</b>	–	<b>A1B</b>	2	<b>EH5_A1_L2<sub>kk</sub></b>
<b>GCM</b>	<b>ECHAM5</b>	–	<b>A1B</b>	3	<b>EH5_A1_L3<sub>kk</sub></b>
GCM=>ESD	ECHAM5	–	A1B	1	EH5_A1
<b>GCM=&gt;ESD</b>	<b>ECHAM5</b>	–	<b>A1B</b>	1	<b>EH5_A1B_L1</b>
<b>GCM=&gt;ESD</b>	<b>ECHAM5</b>	–	<b>A1B</b>	2	<b>EH5_A1B_L2</b>
<b>GCM=&gt;ESD</b>	<b>ECHAM5</b>	–	<b>A1B</b>	3	<b>EH5_A1B_L3</b>
<b>GCM=&gt;ESD</b>	<b>ECHAM5</b>	–	<b>A1B*</b>	1	<b>EH5_A1X</b>
GCM=>ESD	ECHAM5C	–	E1	1	EH5C_E1
<b>GCM=&gt;ESD</b>	<b>ECHAM5C</b>	–	<b>A1B</b>	1	<b>EH5C_A1B</b>
GCM=>ESD	HadCM3C	–	E1	1	HadCM3C_E1
GCM=>ESD	HadGEM	–	E1	1	HadGEM2_E1
<b>GCM=&gt;ESD</b>	<b>HadCM3C</b>	–	<b>A1B</b>	1	<b>HadCM3C_A1B</b>
<b>GCM=&gt;ESD</b>	<b>HadGEM2</b>	–	<b>A1B</b>	1	<b>HadGEM2_A1B</b>
<b>GCM=&gt;ESD</b>	<b>CNRM</b>	–	<b>A1B</b>	1	<b>CNRM_A1B</b>
<b>GCM=&gt;RCM</b>	<b>ECHAM5</b>	<b>CCLM</b>	<b>A1B</b>	1	<b>EH5_L1_CCLM<sub>kk</sub></b>
<b>GCM=&gt;RCM</b>	<b>ECHAM5</b>	<b>CCLM</b>	<b>A1B</b>	2	<b>EH5_L2_CCLM<sub>kk</sub></b>
<b>GCM=&gt;RCM</b>	<b>ECHAM5</b>	<b>REMO</b>	<b>A1B</b>	3	<b>EH5_L3_REMO<sub>kk</sub></b>
<b>GCM=&gt;RCM</b>	<b>ECHAM5</b>	<b>RACMO</b>	<b>A1B</b>	3	<b>EH5_L3_RACMO<sub>kk</sub></b>
<b>GCM=&gt;RCM=&gt;ESD</b>	<b>ECHAM5</b>	<b>CCLM</b>	<b>A1B</b>	1	<b>EH5_L1_CCLM</b>
<b>GCM=&gt;RCM=&gt;ESD</b>	<b>ECHAM5</b>	<b>CCLM</b>	<b>A1B</b>	2	<b>EH5_L2_CCLM</b>
<b>GCM=&gt;RCM=&gt;ESD</b>	<b>ECHAM5</b>	<b>REMO</b>	<b>A1B</b>	3	<b>EH5_L3_REMO</b>
<b>GCM=&gt;RCM=&gt;ESD</b>	<b>ECHAM5</b>	<b>RACMO</b>	<b>A1B</b>	3	<b>EH5_L3_RACMO</b>

Die in diesem Bericht dokumentierten Modelle und Kaskaden sind fett wiedergegeben. \* kennzeichnet eine Modifikation mit Extrapolation der Häufigkeitstrends von Zirkulationsmustern als Steuerparameter für WEREX V, beschrieben in KREIENKAMP et al. (2010c). Index kk kennzeichnet, dass es sich um keine Kaskade mit WEREX handelt, d. h., die Ergebnisse des GCM oder der GCM=>RCM-Kaskade werden direkt und ohne Regionalisierung durch WEREX V verwendet.

# 4 Das Verfahren WETTREG/WEREX

WETTREG ist ein statistisches Verfahren, das die Vorteile der dynamischen Modelle mit den Möglichkeiten eines statistischen Wettergenerators zur Erzeugung von Stationszeitreihen verbindet. Die räumliche Auflösung ist dabei so groß, wie Messreihen von Klima- bzw. Niederschlagsstationen zur Verfügung stehen. WEREX ist, wie oben erwähnt, die auf die Region um den Freistaat Sachsen fokussierte Instanz von WETTREG. Wenn in der Folge von WETTREG die Rede ist, so handelt es sich um Aussagen zu Aspekten, die beiden gemeinsam sind.

Die Strategie von WETTREG beruht auf folgenden Annahmen:

- Globale und regionale Klimamodelle sind in der Lage, das Klima großräumig in hinreichender Qualität zu beschreiben.
- Es gibt semi-stabile Muster in den atmosphärischen Feldgrößen (z. B. Zirkulation, Feuchte, Vorticity), die konsistent eine bestimmte Klasse von lokalen Konsequenzen (hohe/niedrige Temperatur, starker/geringer Niederschlag etc.) hervorrufen.
- Unter dem Antrieb von Szenarios der Emission oder Konzentration von Treibhausgasen verändert sich die Häufigkeitsverteilung der atmosphärischen Muster, wie sie von einem globalen Klimamodell errechnet wird.
- Die Beziehungen der klassenspezifischen lokalen Konsequenzen zu den atmosphärischen Mustern ist auch in der Zukunft den derzeit bestehenden Beziehungen sehr ähnlich.
- Die Repräsentation des sich ändernden Klimas in den von WETTREG erzeugten lokalen Simulationszeitreihen ist statistisch zutreffend, sodass Aussagen über Mittelwerte, Varianz und Extreme von Wetterelementen an den Orten der Klimamessreihen möglich sind; für die Übertragung der Punktwerte in die Fläche wird zur Interpolation das Inverse-Distance-Weighting (IDW)-Verfahren eingesetzt.

Dazu geht WETTREG in drei Stufen vor:

1. Definition von Zirkulationsmustern anhand des Klimas von 1971–2000 (Reanalysen) und Wiedererkennung dieser Muster in den täglichen Realisierungen eines Globalen Zirkulationsmodells (GCM) resp. eines Regionalen Zirkulationsmodells (RCM). Es werden die 20C-Daten für die Resimulation des gegenwärtigen Klimas und Szenariodaten für die Simulation eines zukünftigen Klimas analysiert.
2. Synthetisierung von lokalen Zeitreihen mit einem stochastischen Wettergenerator. Es werden Episoden aus Zeitreihen des gegenwärtigen Klimas ausgewählt und neu zusammengesetzt. Die Häufigkeit der Zirkulationsmuster wird als Randbedingung für Verwendung/Nichtverwendung von Episoden benutzt.
3. Die Häufigkeitsänderungen der Zirkulationsmuster beschreiben nur einen Teil der Signatur einer zukünftigen Klimaänderung. In den Szenariorechnungen des Klimamodells werden zusätzlich mit Hilfe von Regressionen Korrekturfaktoren errechnet und den synthetisierten Zeitreihen als weitere Signatur aufgeprägt.

Ergebnis sind räumlich hochaufgelöste Szenarios, deren Stützstellen die Positionen der Klima- bzw. Niederschlagsstationen darstellen. WETTREG erzeugt für jede Station 10 Zeitreihen mit alternativen, gleich wahrscheinlichen Klimaentwicklungen.

Das bisherige WETTREG-Konzept wurde im Rahmen einer Länderstudie (KREIENKAMP et al. 2010b) zum Transwetterlagenkonzept erweitert, indem nicht mehr nur Muster des gegenwärtigen Klimas, sondern auch solche, die erst in Zukunft auftreten, entwickelt und in das Verfahren implementiert werden. Die hier eingesetzte Version von WETTREG2010, aus der im Zuge der ersten Vorhabens-Etappe die WEREX-Version V erwuchs, berücksichtigt Transwetterlagen.

Die Veränderung der Häufigkeiten der temperatur- und niederschlagsbezogenen Zirkulationsmuster für alle verwendeten GCMs liegt in Form von Tabellen vor.

## 5 Ergebnisse

Die Abbildungen in diesem Kapitel sind vergleichsbezogen, d. h. es werden verschiedene Aspekte des Modell-Ensembles untersucht, wobei hinzuzufügen ist, dass nicht alle Kombinationen im Ensemble realisiert sind. Es handelt sich um folgende Vergleiche:

1. verschiedene Szenarios und verschiedene GCMs in GCM=>ESD-Kaskaden (in dieser Form relevant bei den Klimasignalen und nicht bei der Validierung; das ESD ist immer WEREX V)
2. Kaskade GCM=>ESD – verschiedene GCMs als Antrieb von WEREX V (in dieser Form relevant bei der Validierung; das ESD ist immer WEREX V)
3. verschiedene Läufe desselben Globalmodells, ohne Regionalisierung und als Kaskade ECHAM5=>WEREX V
4. Kaskaden GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD mit verschiedenen RCMs
5. Kaskade ECHAM5=>WEREX V bei unterschiedlichen Stationskatalogen/Referenzperioden und unter Verwendung von extrapolierten Musterhäufigkeiten

Die Vergleiche spiegeln das sich Schritt für Schritt aufbauende WEREX V-Regionalisierungsensemble wider. Die in der ersten Etappe erstellten Validierungen und Darstellungen der Klima- bzw. Niederschlagssignale (s. KREIENKAMP et al. 2010c) sind in den entsprechenden Abbildungen und Tabellen enthalten und werden um die Regionalisierungen der abschließenden zweiten Etappe erweitert. Damit ist das vollständige Bild des WEREX V-Ensembles mit seinen verschiedenen Modellen und Modellkaskaden dokumentiert. Einige Modelle sind mit einer Vielzahl von Varianten im Ensemble vertreten, daher werden in den Abbildungen dieses Kapitels auch einige Karten mehrfach verwendet.

### 5.1 Validierung

In diesem Abschnitt werden die mit WEREX V regionalisierten Resimulationen der Gegenwart (so genannte 20C-Daten) der verschiedenen Modell-Szenarios (s. Kapitel 3.2) den Klimamessungen gegenübergestellt. Grundlage sind die Zirkulationsmuster, wie sie aus den NCAR-Reanalysedaten ermittelt werden – inkl. der beiden Transwetterlagen (KREIENKAMP et al. 2010b). Diese werden im Zuge des WEREX-Verfahrens in den 20C-Daten objektiv wiedererkannt und ihre Häufigkeitsverteilung wird als Steuergröße für die Synthetisierung

von Zeitreihen benutzt. Die Karten werden auf der Basis des Stationskatasters, das in Abbildung 2 gezeigt ist, für Sachsen und Umgebung erstellt. In ihnen finden sich jeweils 30-jährige Mittel der Periode 1971–2000. Wenn ein Modell in der Lage ist, das gegenwärtige Klima zutreffend wiederzugeben, so sollten im Vergleich der regionalisierten 20C-Daten mit den Klimadaten nur Abweichungen der Temperatur bis  $\approx \pm 0,2$  °C und des Niederschlags bis  $\approx \pm 10$  % auftreten.

Wie die nachfolgenden Abbildungen zeigen, finden sich in den WEREX V-Regionalisierungen keine Auffälligkeiten bezüglich ihrer Eigenschaft, das mittlere Klima der Gegenwart wiederzugeben. Dies gilt sowohl für die Jahreszeiten als auch das gesamte Jahr.

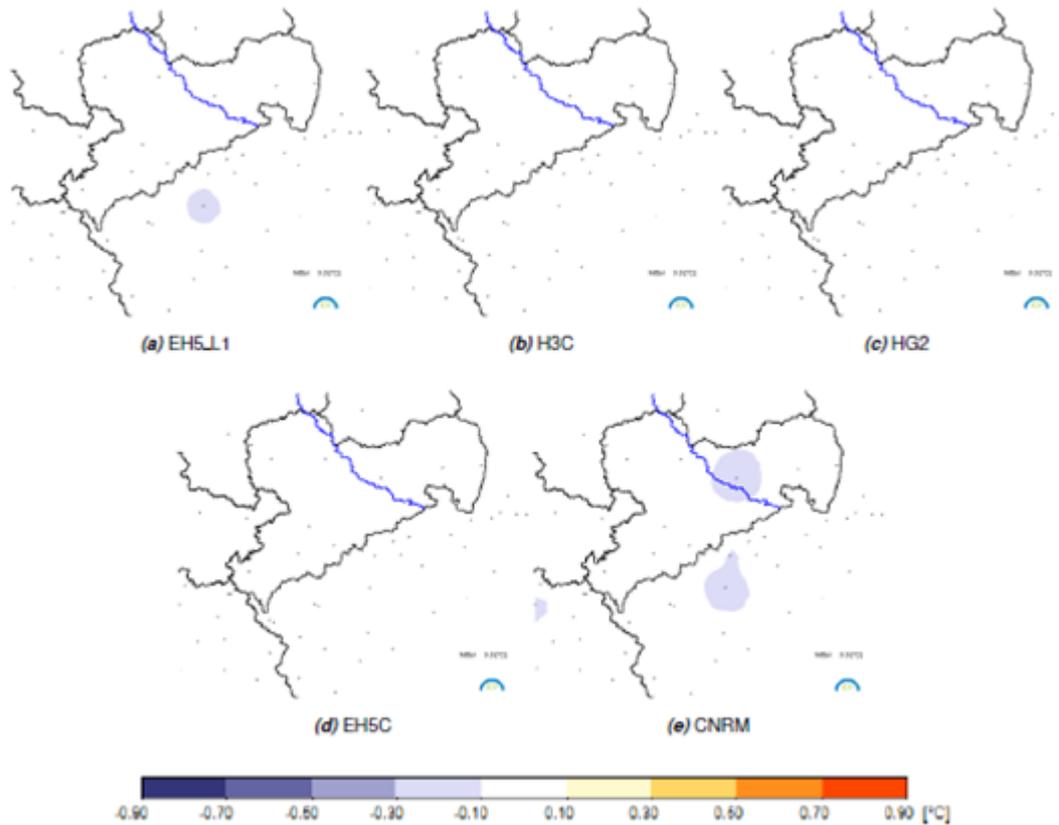
Die Validierung der Temperatur in Abbildung 5 bis Abbildung 10 und Tabelle 5 ergibt, dass im Untersuchungsgebiet von keiner der WEREX V-Regionalisierungen die Schwelle von  $\pm 0,2$  °C erreicht wird. Der Vergleich stellt sich etwas anders dar, wenn GCM-Resultate für Gitterpunkte in der WEREX-Region direkt oder wenn GCM=>RCM-Kaskaden ausgewertet werden. In diesen Fällen wird ein Bias sichtbar und die Abweichungen können bis über 1 °C betragen.

Die Validierung des Niederschlags in Abbildung 11 bis Abbildung 15 und Tabelle 6 zeigt, dass bei allen WEREX V-Regionalisierungen die systematischen Abweichungen im Flächenmittel des Untersuchungsgebietes deutlich unter  $\pm 5$  % liegen. Wenn GCM-Resultate für Gitterpunkte in der WEREX-Region direkt oder GCM=>RCM-Kaskaden ausgewertet werden, treten jedoch systematische Abweichungen auf, die  $\pm 30$  % weit übersteigen können.

## 5.1.1 Temperatur

### 5.1.1.1 Vergleichstyp: Kaskade GCM=>ESD – verschiedene GCM als Antrieb von WEREX V

Bei den in Abbildung 5 dargestellten Karten handelt es sich um die Unterschiede zwischen simulierten und gemessenen Werten im Zeitbereich 1971–2000. WEREX V wird dazu mit Simulationen von ECHAM5, HadCM3C, HadGEM2, ECHAM5C und CNRM angetrieben. Danach erfolgt die Bildung von Differenzen zu Klimadaten (vgl. Kapitel 3.4).



**Abbildung 5: Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 mit der gemessenen für WEREX V, angetrieben mit den Daten GCM → Modellkaskaden**

### 5.1.1.2 Vergleichstyp: Verschiedene Läufe desselben Globalmodells, ohne Regionalisierung und als Kaskade ECHAM5→WEREX V

In Abbildung 6 ist zunächst die besondere Problematik bei der Nutzung des direkten Outputs eines Globalmodells (also ohne jedwede Regionalisierung) gezeigt. Dessen Auflösung ist im Grunde nicht adäquat für regionale Aussagen – dennoch können sie als Indikator für das großräumige, vom GCM simulierte Niveau einer Atmosphärengröße erachtet werden. Für Lauf 1 von ECHAM5 ist in Abbildung 6(a) dargestellt, in welche räumliche Werteverteilung sich der „regionale“ Wert des WEREX-Gebiets einbettet. Die Position der jeweiligen Boxenmitte von ECHAM5 ist gekennzeichnet. Für die Teilfigur (b) wurde zudem eine Maske definiert, die nur die vier ECHAM5-Gitterboxen in der WEREX-Region beinhaltet, wobei die beiden südlichen Boxen angeschnitten sind, damit ein gewisse Vergleichbarkeit zu den Flächenwerten aus den verschiedenen Regionalisierungen möglich ist.

Weil es sich bei Abbildung 6 um eine Validierung handelt, die Simulation und Messung vergleicht, wurde das Mittel für alle Stationen, die innerhalb der definierten WEREX-Region liegen, gebildet.

Zudem ist bei der Validierung von direkten GCM-Resultaten zu beachten, dass die Wertebereiche des gemessenen Klimas in diesem Fall vom Modell weniger gut getroffen werden als bei Modellkaskaden mit WEREX V. Deshalb ist der dargestellte Wertebereich auch größer und reicht von  $-2,7\text{ °C}$  bis  $+2,7\text{ °C}$ , während er bei WEREX V-Regionalisierungen  $\pm 0,9\text{ °C}$  ist.

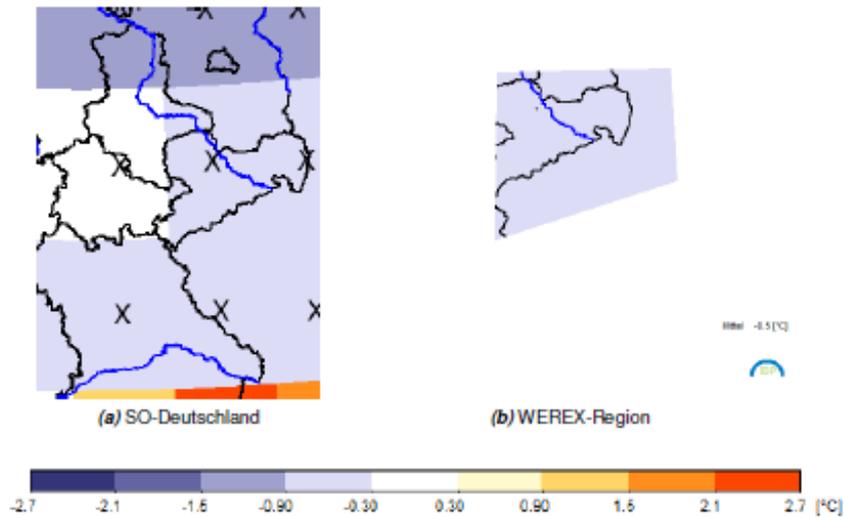


Abbildung 6: Illustration der räumlichen Temperaturmuster bei Verwendung eines GCM ohne Regionalisierung. Gegenüberstellung der Validierungen von ECHAM5-Lauf 1 Globalmodellen für einen Ausschnitt mit Südost-Deutschland und für die WEREX-Region. Die Kreuze markieren die Lage der ECHAM5-Gitterpunkte. Dargestellt ist der Vergleich der simulierten Mitteltemperatur 1991–2000 mit der gemessenen Temperatur an Stationen, die jeweils in der Nähe der ECHAM5-Gitterpunkte liegen.

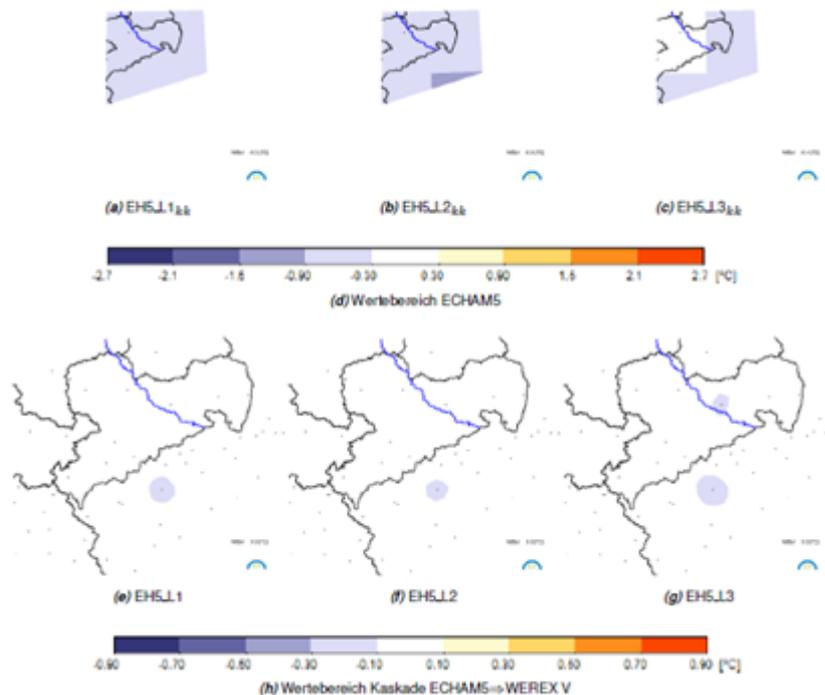
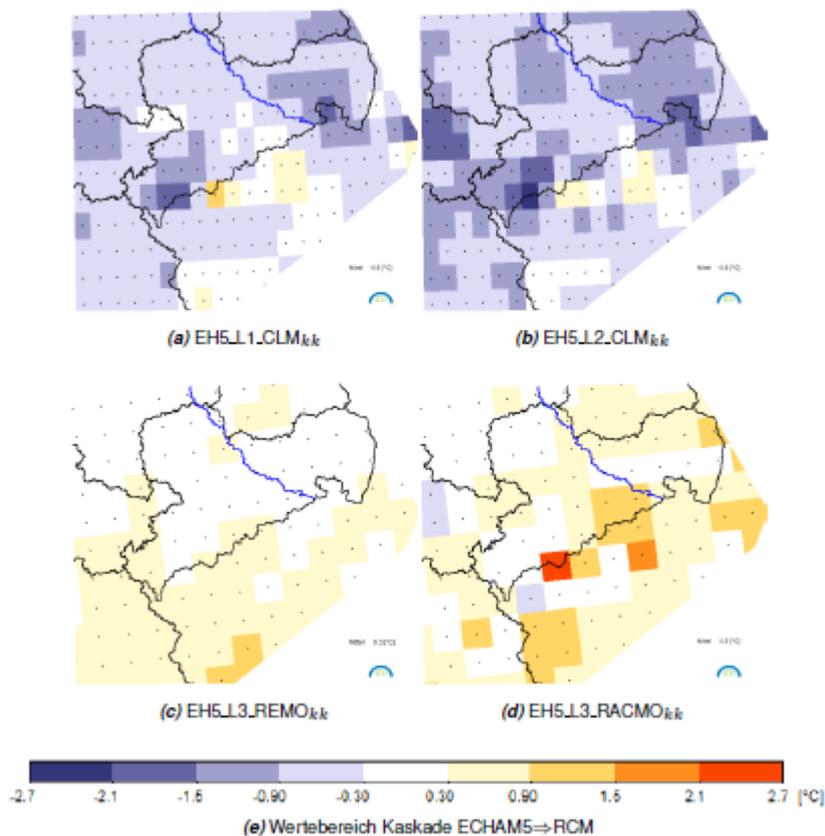


Abbildung 7: Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit der gemessenen, für ECHAM5-Modellsimulation im Ausschnitt der WEREX-Region – Teilfiguren (a) bis (c) – mit der dazugehörigen Werteskala von -2,7 °C bis +2,7 °C und für die Daten der ECHAM5 → WEREX-Modellkaskaden auf der Basis der drei ECHAM5-Läufe – Teilfiguren (e) bis (g) – mit der dazugehörigen Werteskala von -0,9 °C bis +0,9 °C

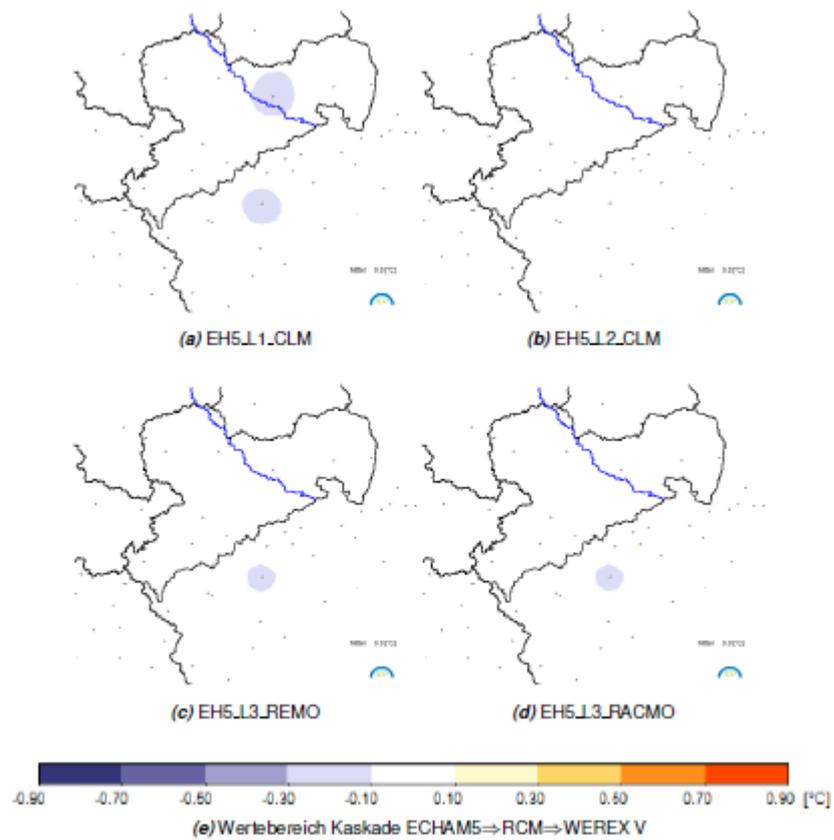
### 5.1.1.3 Vergleichstyp: Kaskaden GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD mit verschiedenen RCMs

In den beiden folgenden Abbildungen sind die Validierungen von Regionalisierungen mit den RCMs CLM (2 Läufe), REMO (1 Lauf) und RACMO (1 Lauf) dargestellt. Abbildung 8 zeigt eine GCM=>RCM-Kaskade. Dort ist einerseits auffällig, dass die Abweichungen der Simulationen von den Klimamessungen relativ groß sind. Andererseits werden Charakteristika der verschiedenen RCMs deutlich. Bei gleichem Antrieb (für alle Regionalmodelle ist ECHAM5 das GCM) besitzt CLM, mit Ausnahme einer schmalen Region auf der tschechischen Seite des Erzgebirges, eine systematische Abweichung zum Kalten hin (auch als cold bias bekannt) während die einander ähnlichen RCMs REMO und RACMO systematisch zu hohe Werte simulieren (warm bias).



**Abbildung 8: Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit der gemessenen, für verschiedene ECHAM5 → RCM-Modellkaskaden im Ausschnitt der WEREX-Region. Beim Vergleich dieser Abbildung mit Abbildung 9 sind die unterschiedlichen Werteskalen zu beachten.**

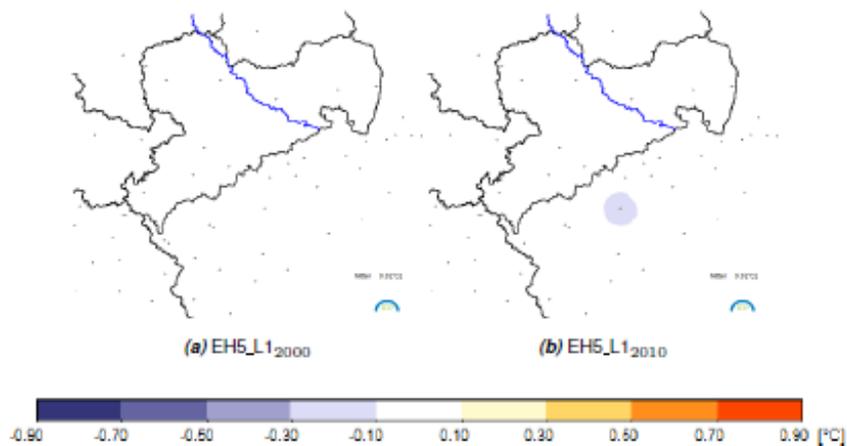
Die dreiteilige ECHAM5=>RCM=>WEREX V-Kaskade, dargestellt in Abbildung 9 für die RCMs CLM, REMO und RACMO, zeigen in der gesamten Region nur sehr schwache Unterschiede zwischen Simulation und Messungen – zu beachten sind die gegenüber Abbildung 8 unterschiedlichen Wertebereiche. Ein Bias von mehr als  $\pm 0,2$  °C ist hier nicht nachweisbar.



**Abbildung 9: Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur von 1971–2000 (20C-Daten) mit der gemessenen, für verschiedene ECHAM5 →RCM→ WEREX V-Modellkaskaden im Ausschnitt der WEREX-Region. Beim Vergleich dieser Abbildung mit Abbildung 8 sind die unterschiedlichen Werteskalen zu beachten.**

#### 5.1.1.4 Vergleichstyp: Kaskade ECHAM5=>WEREX V bei unterschiedlichen Stationskatalogen

In Kapitel 3.4 wurde erörtert, dass es zwischen der ersten und der zweiten Etappe einige Unterschiede im zu Grunde gelegten Stationskatalog gibt. In diesem Kapitel soll nun betrachtet werden, ob es dadurch Auswirkungen bei der Validierung der Temperatur gibt. Es zeigt sich, dass im Detail kleinen Unterschiede sichtbar werden (s. Abbildung 10). Deren Bedeutung ist für die Validierung der Temperatur jedoch so gering, dass die Resultate aus beiden Etappen des Vorhabens zu einem Ensemble zusammengefasst werden können.



**Abbildung 10: Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit der gemessenen, für die Kaskade ECHAM5→WEREX V im Ausschnitt der WEREX-Region. Dargestellt ist das Resultat der Nutzung eines Stationskatalogs, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet, wie er in der ersten Etappe des Vorhabens verwendet wurde, gegenüber einem Stationskatalog, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2010 beinhaltet, wodurch die Analysen der zweiten Etappe charakterisiert sind.**

### 5.1.1.5 Zusammenschau: Alle Ergebnisse der Temperatur-Validierung in einer Tabelle

In Tabelle 5 werden die Flächenmittel für die WEREX-Region dargestellt, wie sie von den Validierungen der unterschiedlichen Modelle und Modellkaskaden bestimmt werden. Während in Abbildung 5 bis Abbildung 10 jeweils die Werte für die Jahrestemperatur dargestellt wurden, enthält Tabelle 5 zusätzlich die entsprechenden Daten für die Jahreszeiten. Sind Zeilen in Tabelle 5 nicht grau unterlegt, so stammen die Ergebnisse nicht aus dem Vorhaben WEREX V.

**Tabelle 5: Abweichung der simulierten Mitteltemperatur 1971–2000 von der gemessenen für verschiedene Modelle und Modellkaskaden**

Modell	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
EH5_L1 <sub>kk</sub>	-0,5	0,2	-0,8	-0,3	-1,0
EH5_L2 <sub>kk</sub>	-0,8	-1,1	-0,8	-0,4	-1,2
EH5_L3 <sub>kk</sub>	-0,4	-0,4	-1,0	0,1	-0,4
EH5_L1_20C	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
EH5_L2_20C	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0
EH5_L3_20C	-0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
EH5C_20C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HadCM3C_20C	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
HadGEM2_20C	0,0	-0,1	0,1	0,0	0,0
CNRM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EH5_L1_CLM <sub>kk</sub>	-0,6	-0,1	-1,0	-0,7	-0,4
EH5_L2_CLM <sub>kk</sub>	-0,8	-1,0	-1,0	-0,8	-0,5
EH5_L3_REMO <sub>kk</sub>	0,3	0,5	-0,4	1,1	0,6
EH5_L3_RACMO <sub>kk</sub>	0,5	0,3	-0,4	0,8	1,1
EH5_L1_CLM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EH5_L2_CIM	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EH5_L3_REMO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
EH5_L3_RACMO	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
EH5 A1B <sub>2000</sub>	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,1

Tabelliert sind die Ergebnisse für das Jahr und die Jahreszeiten (Frühjahr: MAM, Sommer: JJA, Herbst: SON, Winter: DJF). Die Zahlen sind die Mittel für die WEREX-Region [vgl. Abbildung 5 bzw. bei EH5\_L1<sub>kk</sub>, EH5\_L2<sub>kk</sub> und EH5\_L3<sub>kk</sub> Abbildung 7 (a)-(c)]. Ergebnisse aus der ersten Etappe des Vorhabens sind hellgrau unterlegt, Ergebnisse aus der zweiten Etappe mittelgrau. Wenn die Resultate nicht aus Kaskaden mit WEREX V stammen, sind sie mit dem Index *kk* gekennzeichnet.

### 5.1.2 Niederschlag

Die Struktur dieses Kapitels verhält sich analog zur Validierung der Temperatur (Kapitel 5.1.1). Grundsätzlich wurde bei den Abbildungen der Niederschlagsvalidierung nicht der Jahres-, sondern der Sommerwert zum Vergleich verwendet. Dies erfolgt eingedenk des Wissens, dass für viele Modelle und Modellkaskaden die auftretenden Unterschiede, speziell bei den Klimasignalen (s. Kapitel 5.2), im Sommer deutlicher ausgeprägt sind als für das Jahr. In Tabelle 5 sind die Jahreswerte und die Werte aus den einzelnen Jahreszeiten zusammengefasst.

#### 5.1.2.1 Vergleichstyp: Kaskade GCM=>ESD – verschiedene GCM als Antrieb von WEREX V

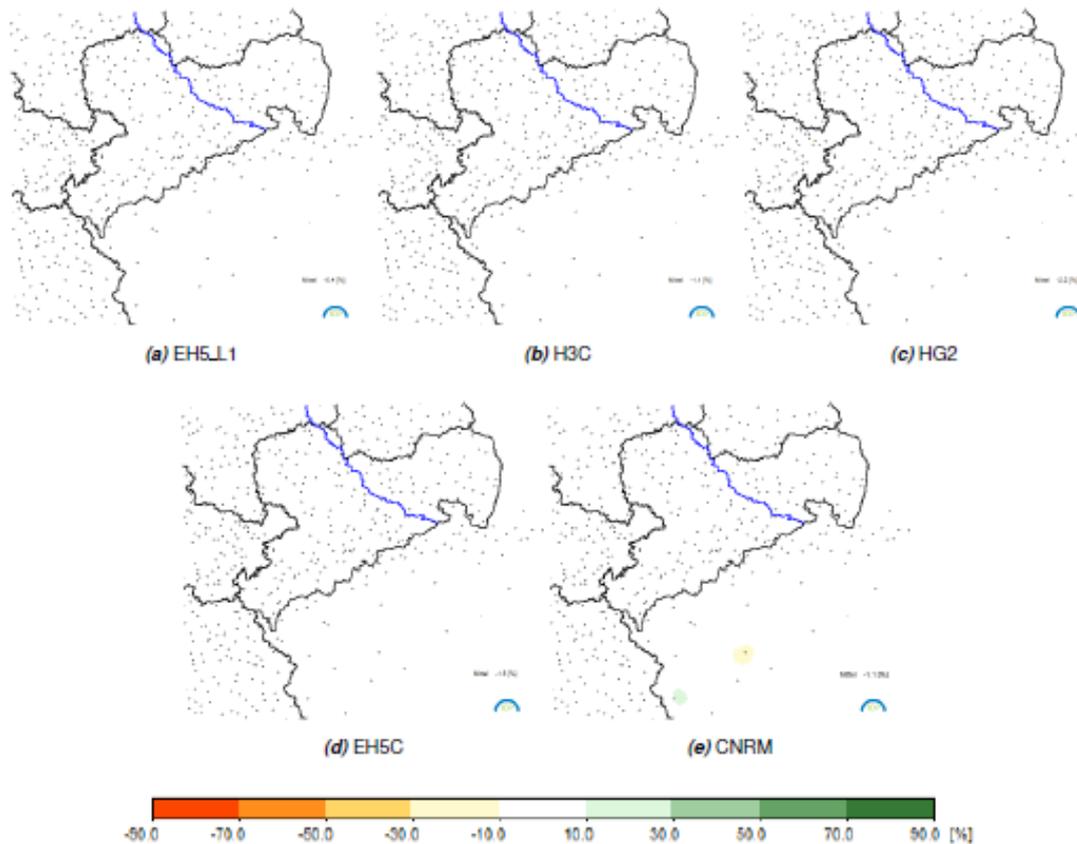
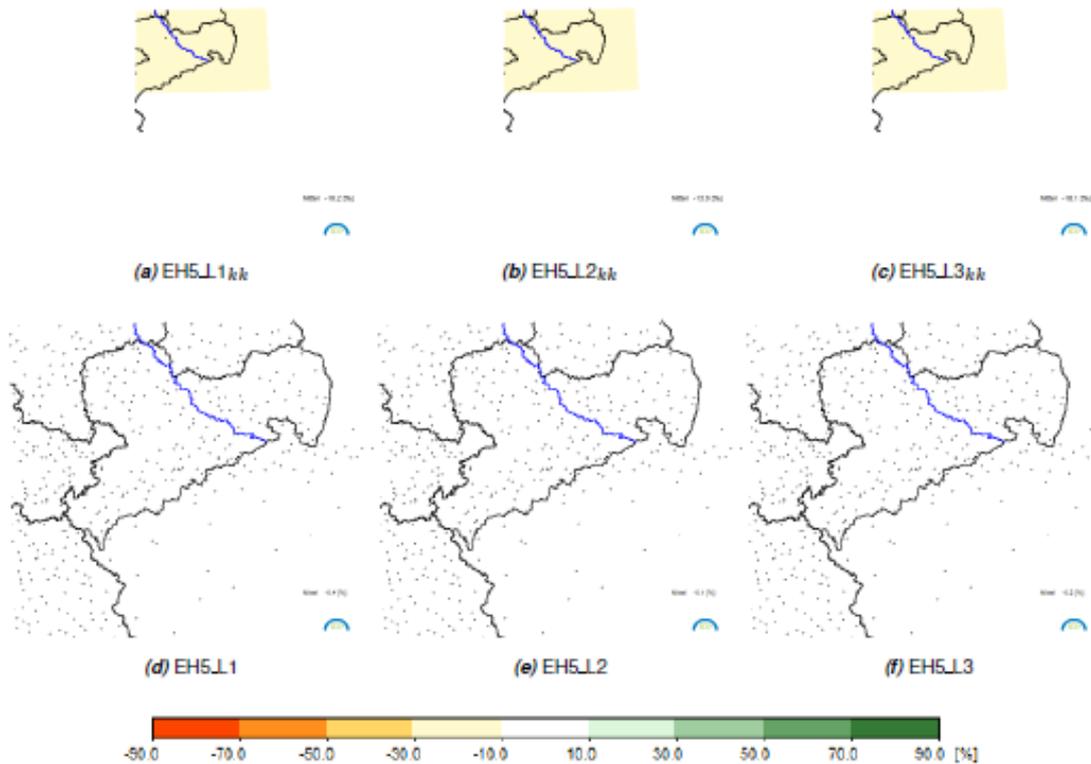


Abbildung 11: Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 mit dem gemessenen (prozentuale Änderung) für WEREX V, angetrieben mit den Daten GCM → ESD Modellkaskaden

#### 5.1.2.2 Vergleichstyp: Verschiedene Läufe desselben Globalmodells, ohne Regionalisierung und als Kaskade ECHAM5=>WEREX V

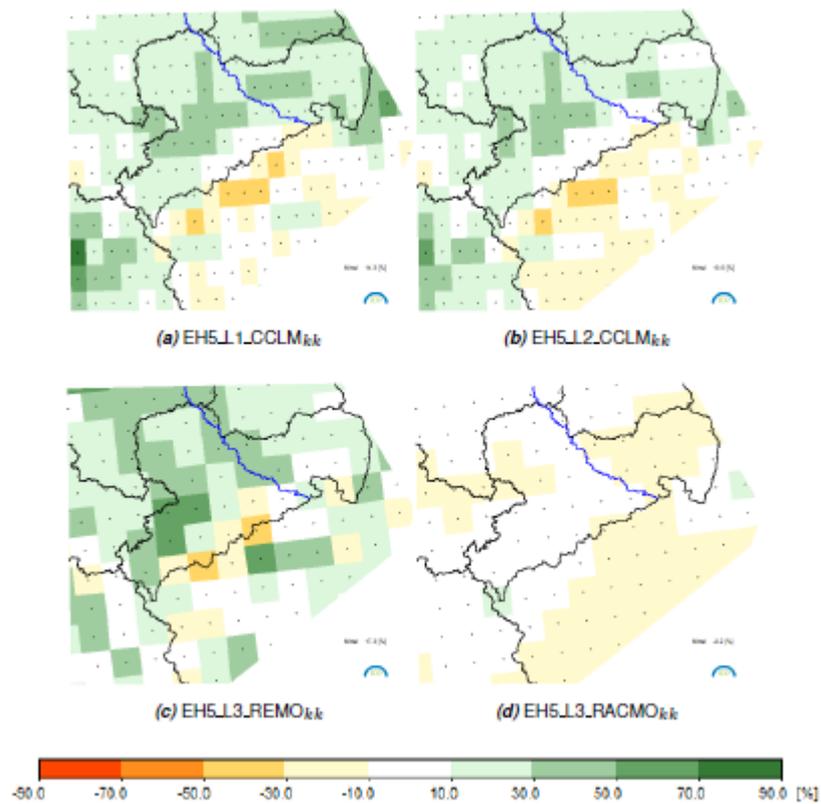
Die besondere Problematik der Nutzung von direktem Modell-Output bei einem GCM wurde für die Temperatur in Abbildung 6 dargestellt. Für den Niederschlag gilt Vergleichbares: Das „regionale“ Signal von ECHAM5 ist in ein großräumiges Muster eingebettet und kann lediglich als grobe Orientierung zum Niveau der Atmosphäregröße dienen. Zudem müsste eigentlich der korrigierte Niederschlag bei Vergleichen mit GCM verwendet werden.



**Abbildung 12: Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit dem gemessenen (prozentuale Änderung) für ECHAM5-Modellsimulationen ohne Regionalisierung (a)-(c) und regionalisiert mit WEREX V (d)-(f) (Kaskade ECHAM5→WEREX V) im Ausschnitt der WEREX-Region**

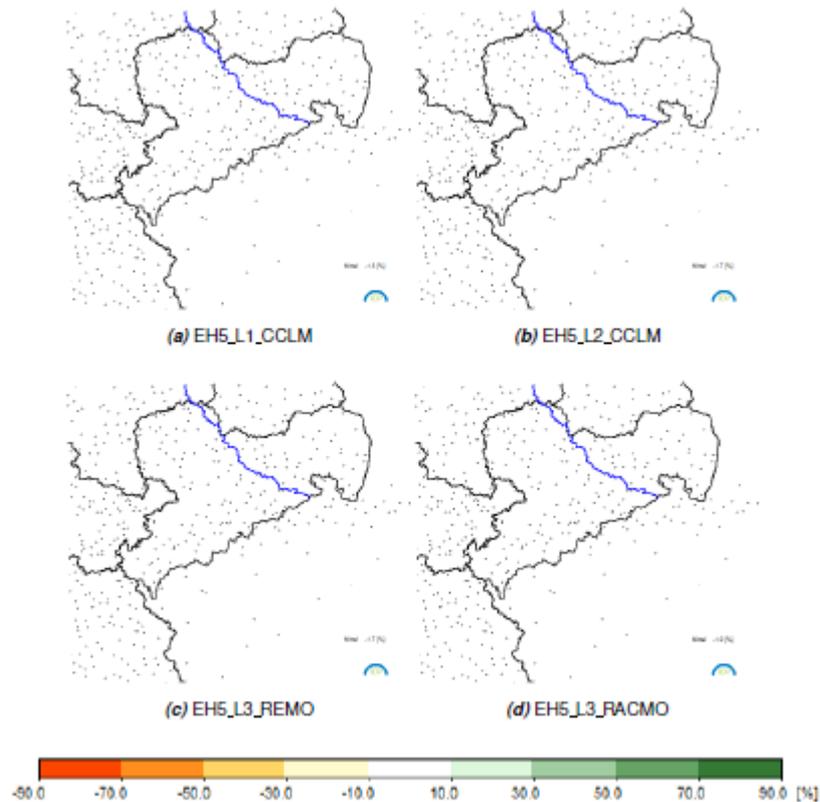
### 5.1.2.3 Vergleichstyp: Kaskaden GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD mit verschiedenen RCMs

In den beiden folgenden Abbildungen sind die Validierungen von Regionalisierungen mit den RCMs CCLM (2 Läufe), REMO (1 Lauf) und RACMO (1 Lauf) dargestellt. Abbildung 13 zeigt eine GCM=>RCM-Kaskade. Dort ist erstens auffällig, dass die Abweichungen der CCLM- und REMO-Simulationen von den Klimamessungen relativ groß sind – sie liegen im Mittel bei 10–15 % und können regional 50 % übersteigen. Anders verhält es sich bei RACMO, wo die Unterschiede tendenziell leicht negativ sind, im Mittel rund –10 % betragen und keine große räumliche Variabilität gefunden wird.



**Abbildung 13: Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit dem gemessenen (prozentuale Änderung) für verschiedene ECHAM5→RCM-Modellkaskaden im Ausschnitt der WEREX-Region**

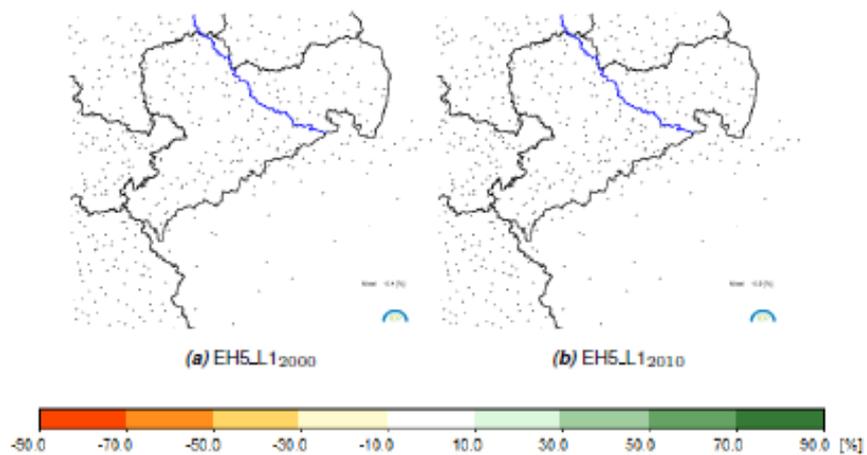
Die dreiteilige ECHAM5=>RCM=>WEREX V-Kaskade, dargestellt in Abbildung 15 für die RCMs CCLM, REMO und RACMO, zeigen in der gesamten Region nur sehr schwache Unterschiede zwischen Simulation und Messungen. Ein Bias von mehr als  $\pm 5$  % ist hier nicht nachweisbar.



**Abbildung 14: Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit dem gemessenen (prozentuale Änderung) für verschiedene ECHAM5→RCM→WEREX V-Modellkaskaden im Ausschnitt der WEREX-Region. Beim Vergleich dieser Abbildung mit Abbildung 13 sind die unterschiedlichen Werteskalen zu beachten.**

#### 5.1.2.4 Vergleichstyp: Kaskade ECHAM5=>WEREX V bei unterschiedlichen Stationskatalogen

In Kapitel 3.4 wurde erörtert, dass es zwischen der ersten und der zweiten Etappe einige Unterschiede im zu Grunde gelegten Stationskatalog gibt. In diesem Unterabschnitt soll betrachtet werden, ob es dadurch Auswirkungen bei der Validierung des Niederschlags gibt. Es zeigt sich, dass im Detail kleine Unterschiede sichtbar werden (s. Abbildung 15). Deren Bedeutung ist für die Niederschlagsvalidierung jedoch so gering, dass, wie bei der Temperatur, die Resultate aus beiden Etappen des Vorhabens zu einem Ensemble zusammengefasst werden können.



**Abbildung 15: Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit dem gemessenen (prozentuale Änderung) für die Kaskade ECHAM5→WEREX V im Ausschnitt der WEREX-Region. Dargestellt ist das Resultat der Nutzung eines Stationskatalogs, der Klimamesssreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet, wie er in der ersten Etappe des Vorhabens verwendet wurde, gegenüber einem Stationskatalog, der Klimareihen aus den Jahren 1971–2010 beinhaltet, wodurch die Analysen dieser zweiten Etappe charakterisiert sind.**

### 5.1.2.5 Zusammenschau: Ergebnisse der Niederschlags-Validierung in einer Tabelle

In Tabelle 6 sind die Flächenmittel für die WEREX-Region zusammengefasst, wie sie von den Validierungen der unterschiedlichen Modelle und Modellkaskaden bestimmt werden. Während in Abbildung 11 bis Abbildung 15 jeweils die Werte für den Sommerniederschlag dargestellt wurden, enthält Tabelle 6 zusätzlich die entsprechenden Daten für die weiteren Jahreszeiten und den Jahresniederschlag. Sind Zeilen in Tabelle 6 nicht grau unterlegt, so stammen die Ergebnisse nicht aus dem Vorhaben WEREX V.

**Tabelle 6: Prozentuale Abweichung des simulierten Niederschlags 1971–2000 vom gemessenen für WEREX V, angetrieben mit den Daten verschiedener Modelle**

Modell	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
EH5.L1 <sub>kk</sub>	6,0	2,9	-10,2	7,1	33,4
EH5.L2 <sub>kk</sub>	8,7	17,4	-12,3	12,1	30,7
EH5.L3 <sub>kk</sub>	8,9	28,2	-18,1	11,6	27,6
EH5.L1.20C	-0,7	-0,4	-0,8	-0,1	-1,6
EH5.L2.20C	0,9	2,1	-0,1	2,2	0,4
EH5.L3.20C	-0,4	-0,7	-0,2	0,2	-0,7
EH5C.20C	-0,9	-1,3	-1,4	-1,5	0,7
HadCM3C.20C	-0,8	-0,7	-1,1	-1,4	-0,1
HadGEM2.20C	-1,6	-1,0	-2,0	-1,2	-2,3
CNRM.20C	0,2	2,0	-1,1	0,7	0,0
EH5.L1.CLM <sub>kk</sub>	24,4	15,3	14,3	33,0	45,6
EH5.L2.CLM <sub>kk</sub>	24,8	25,1	10,0	32,3	44,4
EH5.L3.REMO <sub>kk</sub>	19,0	19,1	17,3	14,4	29,6
EH5.L3.RACMO <sub>kk</sub>	12,5	15,1	-8,2	21,5	35,7
EH5.L1.CLM	-1,4	-2,1	-1,2	-2,3	0,3
EH5.L2.CLM	-0,8	-0,1	-1,7	0,0	-0,5
EH5.L3.REMO	-0,9	-0,8	-1,6	0,2	-0,7
EH5.L3.RACMO	-1,1	0,4	-0,9	-1,0	-2,8
EH5 A1B <sub>2000</sub>	-0,4	-1,5	-1,5	-0,4	-2,2

Tabelliert sind die Ergebnisse für das Jahr und die Jahreszeiten (Frühjahr: MAM, Sommer: JJA, Herbst: SON, Winter: DJF). Die Zahlen sind das Mittel für die WEREX-Region [vgl. Abbildung 11 bzw. bei EH5\_L1<sub>kk</sub>, EH2\_L2<sub>kk</sub> und EH5\_L3<sub>kk</sub> Abbildung 12 (a)-(c)]. Die Ergebnisse aus der ersten Etappe des Vorhabens sind hellgrau unterlegt, Ergebnisse aus dieser zweiten Etappe mittelgrau. Wenn die Resultate nicht aus Kaskaden mit WEREX V stammen, sind sie mit dem Index <sub>kk</sub> gekennzeichnet.

## 5.2 Klimasignale

Zur Dokumentation von Temperatur- und Niederschlagssignalen sind auf den Folgeseiten drei Arten von Abbildungen wiedergegeben:

- Flächendarstellungen des Änderungssignals von WEREX V, angetrieben mit den Daten verschiedener Modelle gegenüber den jeweiligen 20C-Simulationen des Klimas 1971–2000 für den Szenario-Zeithorizont 2071–2100. Zur Darstellung ausgewählt wurden die Signale der Jahrestemperatur und des Niederschlags im Sommer – zur Ergänzung sind die Resultate aller Jahreszeiten außerdem tabelliert.
- Zeitliche Verläufe der Temperatur- bzw. Niederschlagssignale bis zum Ende des 21. Jahrhunderts für eine Beispielstation. Dies ist jeweils die Station Dresden-Klotzsche (Wetterwarte). Um die Flächenrepräsentativität zu erhöhen, wird ein Mittel aus den Werten an der Station Dresden und den vier nächstgelegenen Umgebungsstationen gebildet.
- So genannte Ensemble-Bänderdiagramme, in denen die Wertebereiche der Signale, wie sie unter Antrieb der verschiedenen Modelle von WEREX simuliert werden, einander gegenübergestellt sind.

### 5.2.1 Temperatur

Insbesondere bei den Temperatursignalen lassen sich die Unterschiede zwischen den Modellen gut herausarbeiten. Durch das in der abschließenden zweiten Etappe größer gewordene Ensemble rundet sich das Bild weiter ab. Der Fokus liegt in diesem Abschnitt auf dem Signal der Jahrestemperatur – Tabelle 7 dokumentiert aber auch die Signale in den einzelnen Jahreszeiten. Es zeigte sich schon im Verlauf der ersten Etappe dieses Vorhabens (dargestellt in KREIENKAMP et al. 2010c), dass das Temperatursignal bei WEREX V, angetrieben mit den Daten von ECHAM5 A1B, mit einer Größenordnung von 2,5–4,5 °C relativ stark ist; bisherige Studien mit WEREX IV (SPEKAT et al. 2006a) oder WETTREG2006 (publiziert in SPEKAT et al. 2007), weisen eine Größenordnung des Temperaturanstiegs bis zum Ende des 21. Jahrhunderts von 2 bis 2,5 °C auf. Dies bestätigt Resultate mit dem nicht auf Sachsen fokussierten WETTREG2010-Verfahren (KREIENKAMP et al. 2010a).

Die saisonalen Unterschiede im Temperatursignal (geringer Anstieg im Frühjahr, starker Anstieg im Winter), die zum Teil auf das Verhalten des antreibenden ECHAM-Modells zurückzuführen sind, finden sich in den WEREX-Läufen (Version IV und Version V) ebenfalls wieder.

Im Verlauf dieses Abschnitts werden unterschiedliche Aspekte der Modelle in Vergleichen einander gegenübergestellt. Zum Teil wurde dies bereits bei der Validierung in den Kapiteln 5.1.1 und 5.1.2 umgesetzt. Für die Analyse der Temperatursignale sind weitere Vergleichstypen relevant.

#### 5.2.1.1 Vergleichstyp: Verschiedene Szenarios und verschiedene GCMs in GCM=>ESD-Kaskaden

Mit den Modellen und Modell-Kaskaden sind folgende Betrachtungen möglich:

##### ■ *Verschiedene Versionen von ECHAM5 bei gleichem Szenario:*

Dies ist im WEREX V-Ensemble für die Kaskaden GCM=>ESD mit den GCMs ECHAM5 und ECHAM5C realisiert [Abbildung 16(a) und (d)]. Hierbei ist erkennbar, dass sowohl bezüglich der Signalstärke als auch der räumlichen Verteilung der Temperaturzunahme nur geringe Unterschiede zwischen den beiden ECHAM5-Versionen bestehen.

#### ■ *Verschiedene GCMs bei gleichem Szenario:*

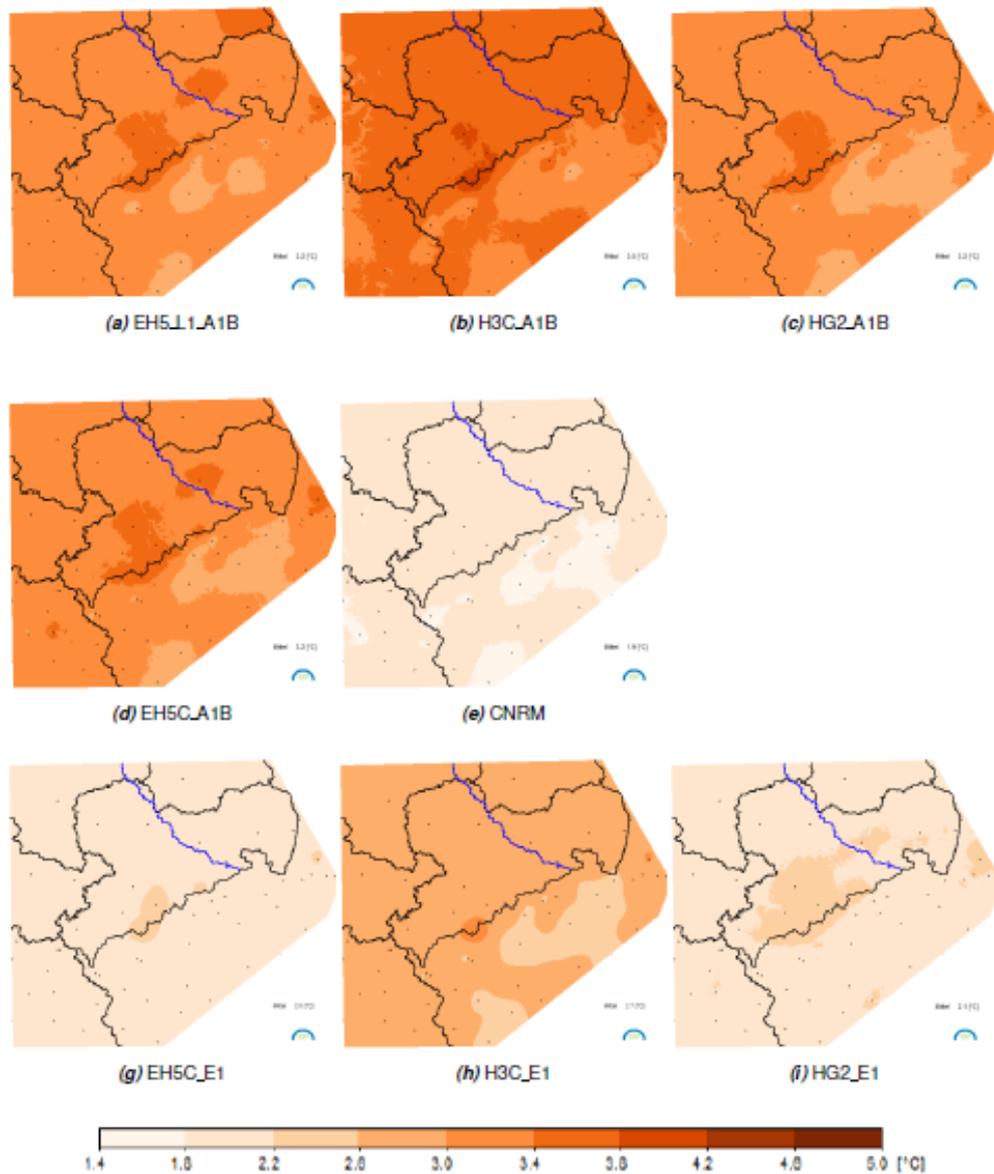
Das Ensemble verfügt über GCM E1=>WEREX V-Simulationen mit den drei GCMs ECHAM5C, HadCM3C und HadGEM2 [Abbildung 16 (g)–(i)] sowie über GCM A1B=>WEREX V-Simulationen mit den fünf GCMs ECHAM5, HadCM3C, HadGEM2, ECHAM5C und CNRM CM33 [Abbildung 16 (a)–(e)].

Bezüglich der Kaskaden mit dem Szenario E1 lässt sich dabei ersehen, dass die Bandbreite des Anstiegs zwischen rund 2 °C (ECHAM5C und HadGEM2) und rund 2,5 °C (HadCM3C) liegt. Die HadCM3C E1-Spezifika bezüglich der Signalstärke sind auch in VAN DER LINDEN & MITCHELL (Eds.) (2009) (dort Abb. 4.6 auf S. 42) erkennbar – unter den dort dargestellten rund 20 Modellläufen rangiert HadCM3C E1 am oberen Ende des Wertebereichs, während ECHAM5C E1 unterhalb des Mittelfelds zu finden ist. Wie bereits in KREIENKAMP et al. (2010c) konstatiert, ist es bemerkenswert, dass E1-Szenarios überhaupt Anstiegsraten über 2 °C erreichen, denn sie orientieren sich am Nichterreichen eines globalen 2 °C-Anstiegs. Das hat aber keineswegs zur Folge, dass nicht lokal höhere Anstiegsraten auftreten. Es sei darauf hingewiesen, dass im Kontext des 2-Grad-Ziels den E1-Signalen rund 0,5 °C hinzuzufügen sind, denn dort ist das tiefer liegende, vorindustrielle Temperaturniveau der Bezugsrahmen.

Wird Tabelle 7 am Ende dieses Abschnitts konsultiert, so ist erkennbar, dass der Jahresgang bei den WEREX V-Simulationen mit ECHAM5C E1 sehr ausgeglichen ist – das relative Minimum im Frühjahr, das die ECHAM5-Läufe 1 und 3 charakterisiert, zeigt sich dort nicht.

Bezüglich der Kaskaden mit dem Szenario A1B zeigt sich, dass sowohl Stärke des Temperatursignals als auch räumliche Variabilität von ECHAM5 und ECHAM5C (s. o.) sowie HadGEM2 sehr ähnlich erfasst werden. Durch ähnliche räumliche Schwerpunktsetzung des Temperatur-Anstiegssignals sind auch HadCM3C und CNRM charakterisiert. Das Anstiegsniveau liegt bei der HadCM3C A1B=>WEREX V-Kaskade aber leicht über dem der Antriebe mit den beiden ECHAM-Versionen und HadGEM2, während es bei der CNRM A1B=>WEREX V-Kaskade erheblich unter den anderen untersuchten A1B-Regionalisierungen liegt und für dieses Modell eine Größenordnung erreicht, die den GCM E1=>WEREX V-Resultaten vergleichbar ist. In Tabelle 7 ist zudem erkennbar, dass im Frühjahr die Unterschiede zwischen den fünf antreibenden Modellen am größten sind (1,6 °C bei CNRM und 2,5 °C bei ECHAM5 Lauf 1 bis 3,7 °C bei HadCM3C). Abgesehen von CNRM, das in allen Jahreszeiten sehr deutlich niedrigere Temperaturanstiegsraten zeitigt, ist die Bandbreite der Anstiegsraten für die Sommermonate vergleichsweise gering (zwischen 3,3 und 3,5 °C).

Einige weitere Details zur Saisonalität der Signale und zum Vergleich der unterschiedlichen Szenarios: In Tabelle 7 ist auch ersichtlich, wie die HadCM3C E1-Simulationen des Frühjahrs (mit 2,9 °C) und Sommers (mit 3,4 °C) sogar die selbe Größenordnung des Anstiegssignals wie bei ECHAM5 A1B erreichen (2,5 bzw. 3,4 °C), während der mit HadCM3C E1 simulierte Temperaturanstieg im Winter mit 2,2 °C deutlich geringer als bei den Simulationen mit ECHAM5 A1B (mit 4,2 °C) ist.



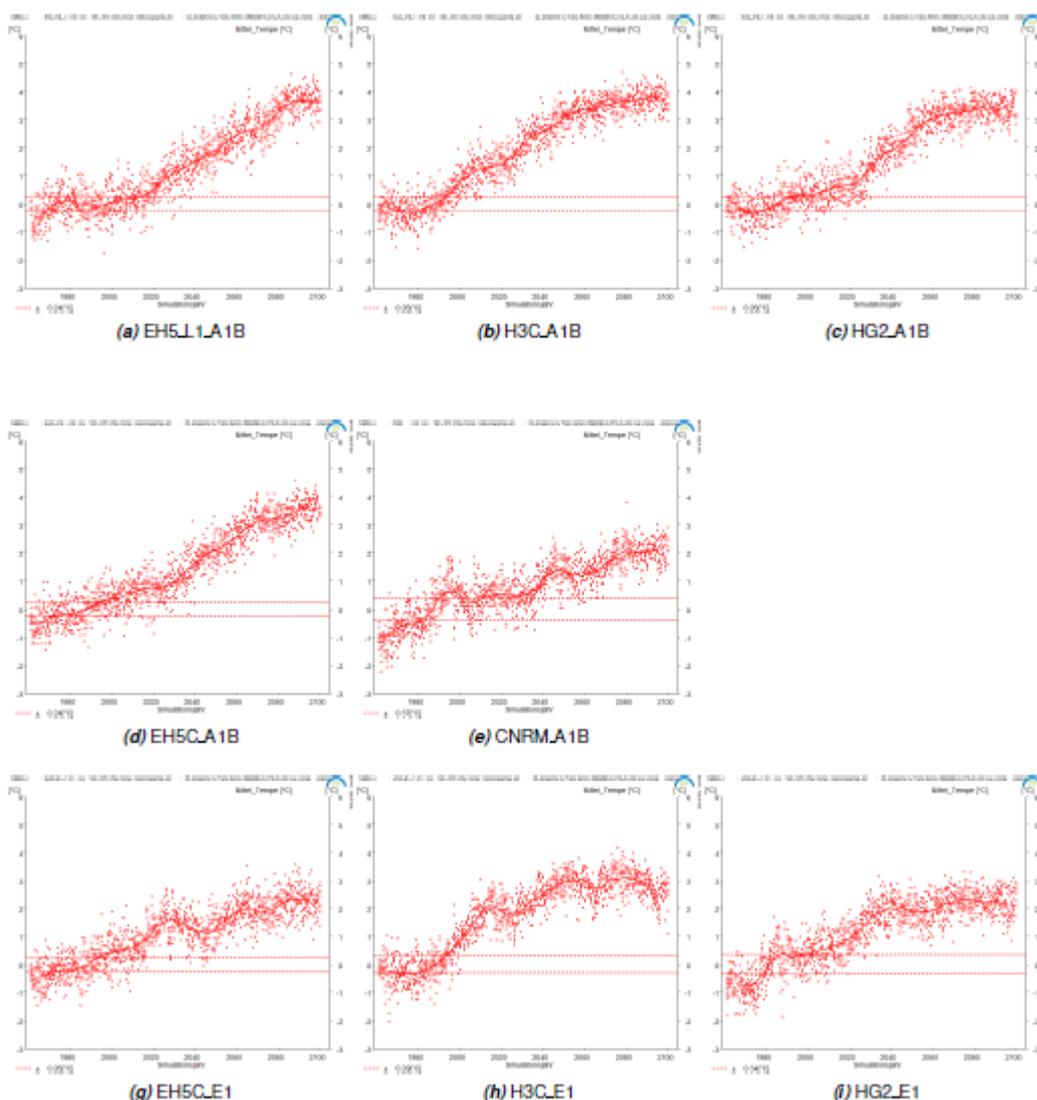
**Abbildung 16: Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 2071–2100 mit derjenigen für die Periode 1971–2000 von WEREX V, angetrieben mit den Daten der Szenarios A1B und E1 für verschiedenen GCMs in GCM→ESD-Modellkaskaden**

■ *Verschiedene Szenarios bei gleichem Modell:*

Dies ist für die Modelle ECHAM5C, HadCM3C und HadGEM2 realisiert, für die sowohl A1B- als auch E1-Regionalisierungen mit WEREX V vorliegen [Abbildung 16(d) und (g) für ECHAM5C, (b) und (h) für HadCM3C und (c) und (i) für HadGEM2]. Das Grundmuster der Unterschiede wurde bereits in der Beschreibung oben angesprochen (A1B mit Jahrestemperatursignalen in der Größenordnung von 3 °C und E1 mit einer Signalgrößenordnung von 2 °C im WEREX-Gebiet). In der Zusammenschau ist auffällig, dass das HadCM3C-Modell sowohl bei Verwendung des Szenarios A1B als auch E1 vergleichsweise hohe Anstiegsraten – innerhalb des WEREX V-Modellensembles – erbringt.

Auch die zeitlichen Verläufe der Jahresmitteltemperatur geben die Unterschiede zwischen den A1B- und den E1-Szenarios wieder. In Abbildung 17 ist der flache Verlauf bei E1, aber auch das relativ hohe Signalniveau bei HadCM3C-E1 [Teilfigur (h)] im Vergleich zu den anderen E1-Regionalisierungen erkennbar. Zudem ist die

durch das Zeitintervall 1971–2000 abgeschätzte Variabilität des modellierten Gegenwartsklimas (gestrichelte Linien) für alle Kaskaden für ECHAM5 und ECHAM5C mit rund  $\pm 0,25$  °C relativ gering, während sie bei den beiden Modellen des Hadley-Centers höher liegt.



**Abbildung 17: Jahresmitteltemperatur im Verlauf 1961–2100 an der Station Dresden und vier Umgebungsstationen, simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 16. Die Punkte zeigen die Werte der Simulation für das jeweilige Jahr an; die durchgezogene Linie gibt den tiefpassgefilterten Verlauf wieder; die gestrichelten Linien zeigen ein Konfidenzintervall an, das sich aus dem Zeitraum 1971–2000 simulierten Werten errechnet. Die Breite des Intervalls ist links unter dem Diagramm angegeben.**

#### Anmerkung zu den Umgebungsstationen

Die zeitlichen Verläufe der Mitteltemperatur stützen sich bei Kaskaden, die WEREX V beinhalten, wie in Abbildung 17, 5.15 (d)–(f), 5.18 (e)–(h) und 5.20 auf eine Zentralstation und vier Umgebungsstationen, um die Flächenrepräsentativität zu erhöhen. Als Zentralstation wurde jeweils Dresden-Klotzsche (Wetterwarte) verwendet. Die Stationslisten der ersten und zweiten Phase des WEREX V-Vorhabens sind zwar nicht deckungsgleich (s. Kapitel 3.4), aber dies hat bei den Klimastationen keine Auswirkungen auf die Zusammensetzung.

zung der Menge der Umgebungsstationen. Folgende vier wurden für die Darstellung der Temperaturentwicklung verwendet:

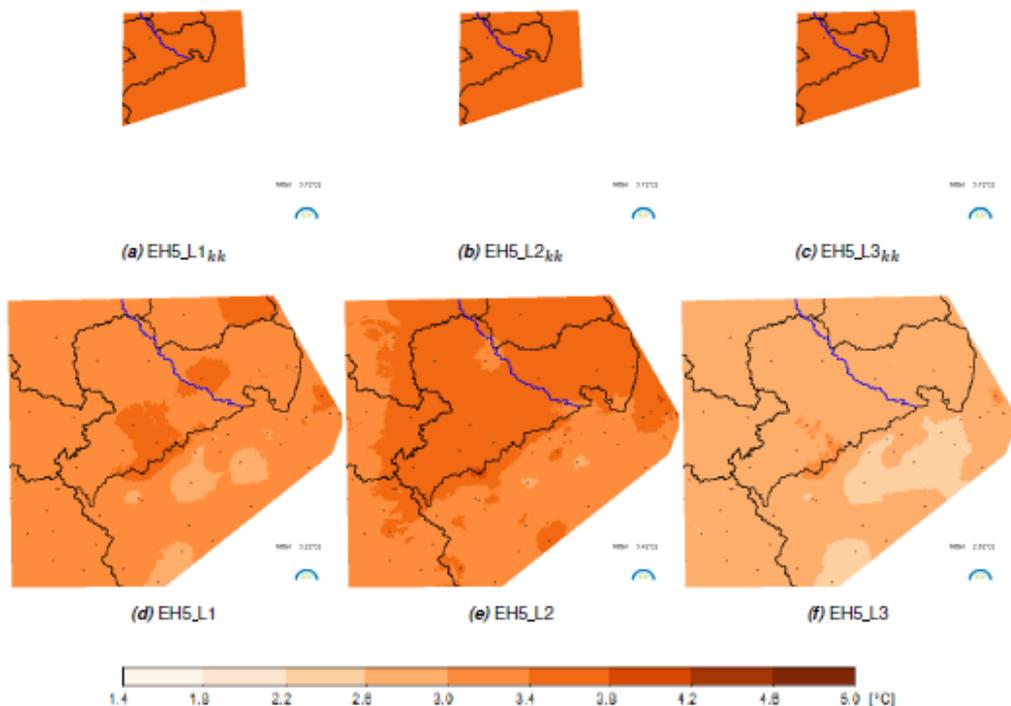
- Nova-Ves-v-Horach
- Oschatz
- Kubschütz
- Zinnwald-Georgenfeld

Bei reinen GCM-Daten [ECHAM5-Daten ohne Kaskade, wie in Abbildung 19 (a)–(c)] werden keine Umgebungsgitterpunkte des GCM, sondern der Dresden am nächsten liegenden ECHAM5-Gitterpunkt verwendet – diese Betrachtungsweise ist lediglich ein Anhaltspunkt für das Niveau der Werte, denn die „Umgebung“ würde aus Gitterpunkten, die sehr weit entfernt wären, bestehen.

Bei GCM=>RCM-Kaskaden [ohne Verwendung von WEREX V, wie in Abbildung 22 (a)–(d)] wird zunächst ein Gitterpunkt möglichst nahe bei Dresden ausgewählt. Die Umgebung besteht, wie von den Modellbetreibern von CCLM, REMO und RACMO empfohlen, aus 24 benachbarten Gitterpunkten.

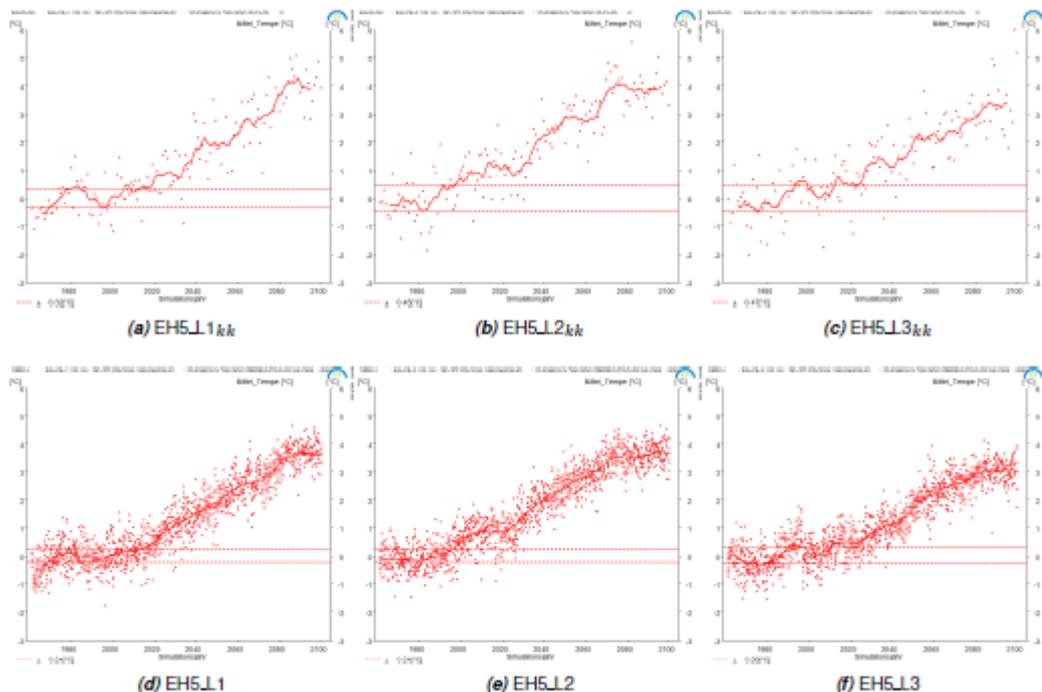
### 5.2.1.2 Vergleichstyp: Verschiedene Läufe desselben Globalmodells, ohne Regionalisierung und als Kaskade ECHAM5=>WEREX V

Auch an dieser Stelle sei auf die besondere Problematik der Nutzung von direktem Modell-Output hingewiesen, wie für die Temperatur in Abbildung 6 dargestellt ist. Für das Temperatursignal gilt Vergleichbares: Das „regionale“ Signal von ECHAM5 ist in ein großräumiges Muster eingebettet und kann lediglich als grobe Orientierung zum Niveau der Atmosphärengröße dienen.



**Abbildung 18:** Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit derjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für ECHAM5-Modellsimulationen im Ausschnitt der WEREX-Region – Teilfiguren (a) bis (c) und für die Daten der ECHAM5→WEREX V Modellkaskaden auf der Basis der drei ECHAM5-Läufe – Teilfiguren (d) bis (f).

Die Unterschiede zwischen den Läufen sind für die Signale der Jahresmitteltemperatur durchaus erkennbar, mit relativ niedrigen Zunahmewerten bei Lauf 3 und relativ hohen bei Lauf 2 (Tabelle 7) zeigt sich, dass die Läufe weitere Spezifika bezüglich der Jahreszeiten besitzen, wie etwa einem schwach ausgeprägten Jahresgang bei Lauf 2 und insbesondere deutlich geringeren Anstiegsraten im Frühjahr bei den Läufen 1 und 3.



**Abbildung 19: Jahresmitteltemperatur im Verlauf 1961–2100 an einem ECHAM5-Gitterpunkt in der Nähe der Station Dresden (a)–(c) bzw. der Station Dresden und vier Umgebungsstationen (d)–(f), simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 18. Die Punkte zeigen die Werte der Simulationen für das jeweilige Jahr an; die durchgezogene Linie gibt den tiefpassgefilterten Verlauf wieder; die gestrichelten Linien zeigen ein Konfidenzintervall an, das sich aus den im Zeitraum 1971–2000 simulierten Werten errechnet. Die Breite des Intervalls ist links hinter dem Diagramm abgebildet.**

Bei den Darstellungen der zeitlichen Verläufe in Abbildung 19 ist zunächst zu beachten, dass der direkte Modell-Output nur in einer Realisierung vorliegt. Daher ist die Punktwolke in den Teilfiguren (a)–(c) von geringerer Dichte als in Teilfiguren (d)–(f) oder Abbildung 17, denn mit WEREX V werden zehn gleichwertige „Varianten“ eines zukünftigen Klimas erzeugt, deren Vielfalt durch die dichte Punktwolke nachvollziehbar wird.

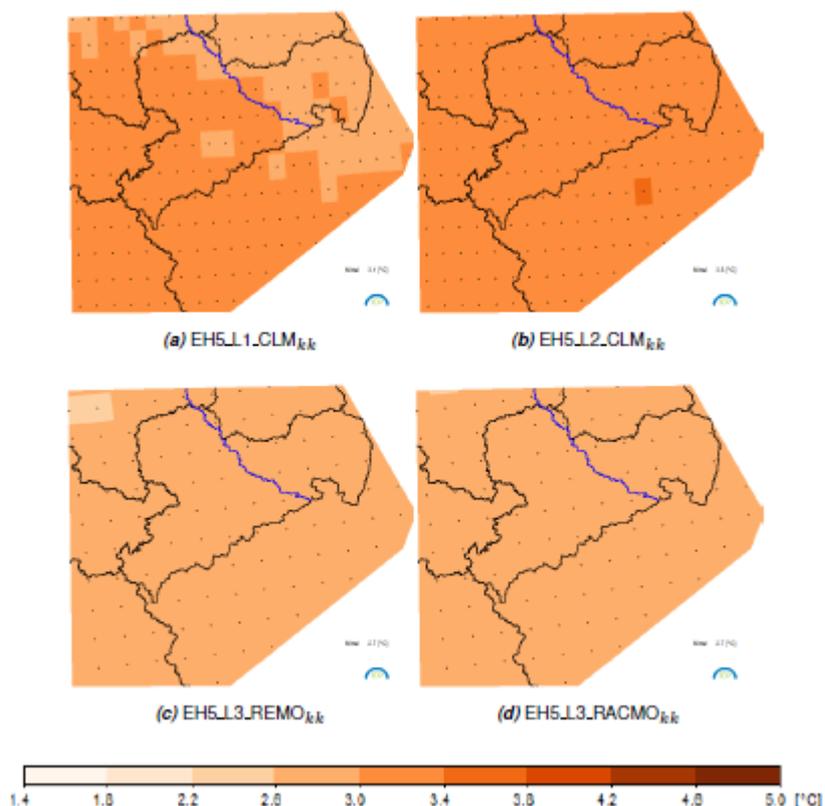
Es ist erkennbar, dass das regionalisierte Signal [Abbildung 19 (d)–(f)] der „Vorgabe“ durch den jeweiligen ECHAM5 Lauf [Abbildung 19 (a)–(c)] in seinem zeitlichen Verlauf gut folgt und auch ein vergleichbares Niveau am Ende des 21. Jahrhunderts erreicht.

Bei den drei ECHAM5-Läufen zeigen sich einige Charakteristika. So ist das Niveau am Ende des 21. Jahrhunderts bei Lauf 1 und 2 jeweils bei etwa 4 °C, während es bei Lauf 3 rund 3,5 °C beträgt. Zudem wird das Klima des Zeitraums 1971–2000 bei Lauf 2 in gleichmäßig ansteigender Folge wiedergegeben, während es in diesem Zeitraum bei Lauf 1 und 3 mehrere Schwingungen gibt.

### 5.2.1.3 Vergleichstyp: Kaskaden GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD mit verschiedenen RCMs

In den beiden folgenden Abbildungen sind die Temperaturanstiegssignale von Regionalisierungen mit den RCMs CLM (2 Läufe), REMO (1 Lauf) und RACMO (1 Lauf) dargestellt. Abbildung 20 zeigt vier verschiedene GCM=>RCM-Kaskaden.

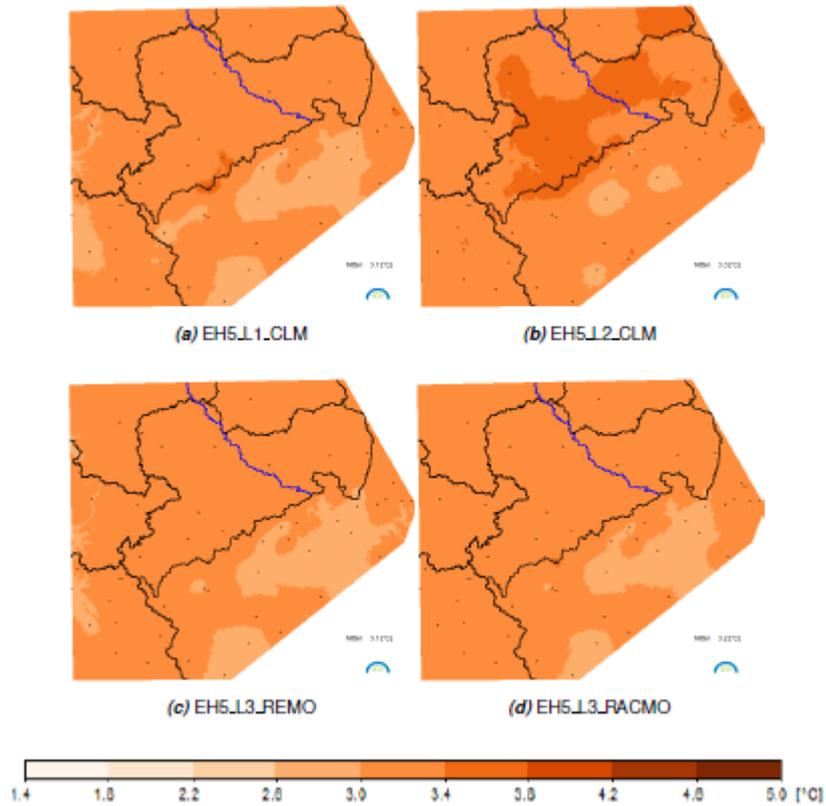
Es ist erkennbar, dass für die WEREX-Region vom Modell CLM in beiden Läufen ein etwas höheres Temperaturanstiegsniveau als bei REMO und RACMO simuliert wird. Zusätzliche regionale Strukturen sind nur schwach ausgeprägt. Vergleiche mit den Einträgen in Tabelle 7 zeigen, dass sich die Charakteristika der ECHAM5-Läufe (1 und 3: relativ geringes Signal im Frühjahr; 2: relativ ausgeglichener Jahresgang) in den ECHAM5=>RCM-Modellkaskaden wiederfinden lassen.



**Abbildung 20: Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit derjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für verschiedene ECHAM5->RCM-Modellkaskaden im Ausschnitt der WEREX-Region**

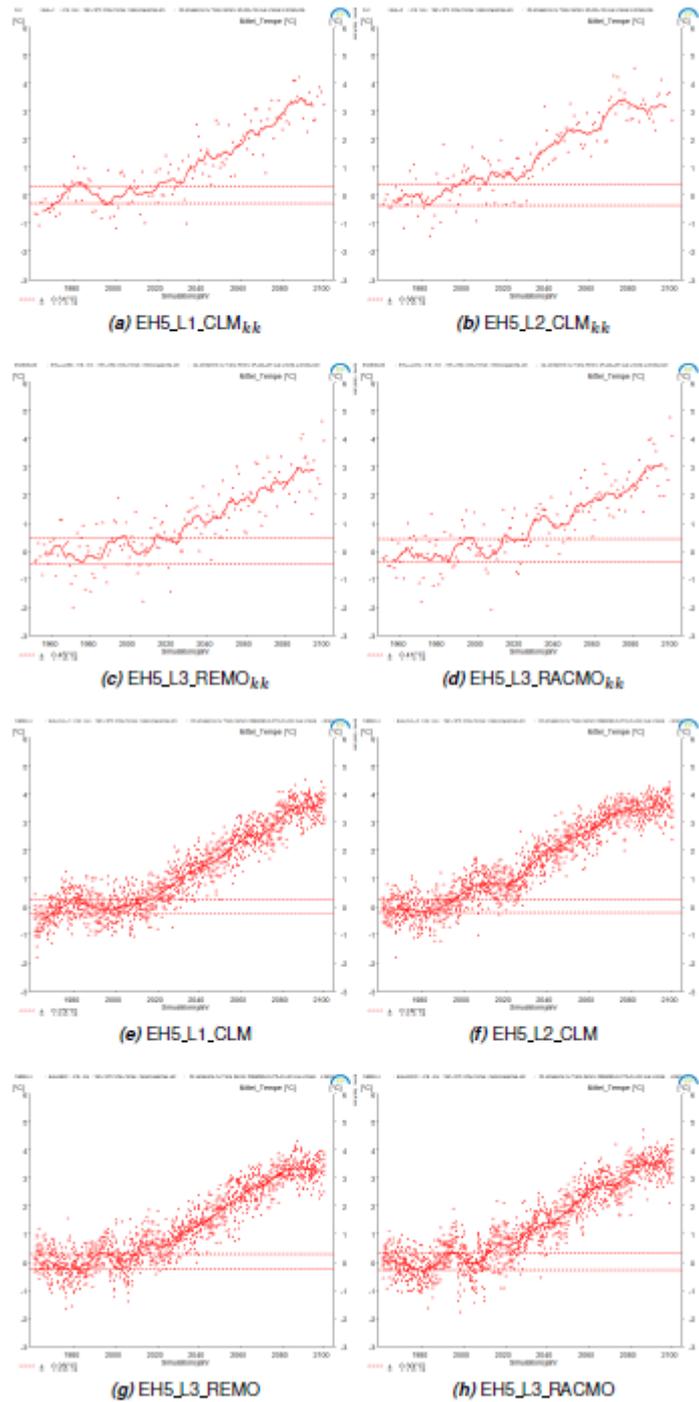
Die Resultate der dreiteiligen ECHAM5=>RCM=>WEREX V-Kaskaden, dargestellt in Abbildung 21 für die RCMs CLM, REMO und RACMO, knüpfen an die Charakteristika der GCM=>RCM-Kaskaden an, d. h. die Signale besitzen für alle vier Kaskaden ähnliche Stärken – ECHAM5\_L2=>CLM=>WEREX V [Abbildung 21(b)] ist durch eine ausgedehnte Region mit einem Anstieg über 3,4 °C etwas hervorgehoben.

Vergleiche mit den Einträgen in Tabelle 7 zeigen zudem, dass, wie bei den ECHAM5=>RCM-Modellkaskaden, sich die Charakteristika der ECHAM5-Läufe (1 und 3: relativ geringes Signal im Frühjahr; 2: relativ ausgeglichener Jahresgang) ebenfalls in den ECHAM5=>RCM-Modellkaskaden wiederfinden lassen.



**Abbildung 21: Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit derjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für verschiedene ECHAM5→RCM→WEREX V-Modellkaskaden der WE-REX-Region**

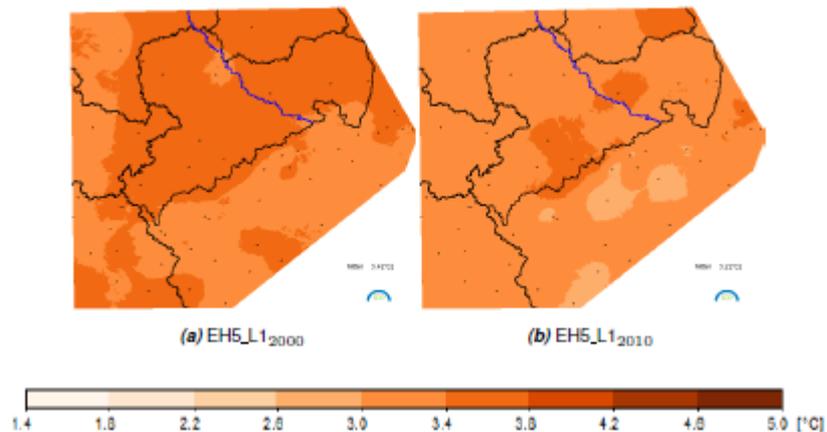
Auch der Quervergleich von Regionalisierungen mit [Abbildung 21(a)] und ohne RCM [Abbildung 18(d)] sowie der ECHAM5\_L1 => CLM => WEREX V-Kaskade [Abbildung 19(a)], die alle auf ECHAM5 Lauf 1 basieren, zeigen eine Reproduktion der Signalgrößenordnung. Die Bedeutung der unterschiedlichen Kaskadentypen wird aber in der saisonalen Betrachtung (Tabelle 7) sichtbar.



**Abbildung 22: Jahresmitteltemperatur im Verlauf 1961–2100 an einem CLM-, REMO- bzw. RACMO-Gitterpunkt und 24 Umgebungsgitterpunkten in der Nähe der Station Dresden (a)-(d) bzw. der Station Dresden und vier Umgebungsstationen (e)-(h), simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 20 und Abbildung 21. Angaben zu den Punkten und den Linien der Diagramme wie bei Abbildung 15.**

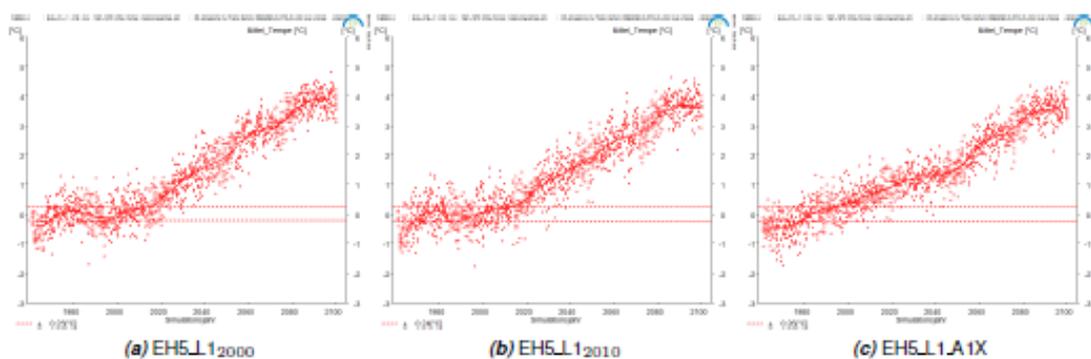
#### 5.2.1.4 Vergleichstyp: Kaskade ECHAM5=>WEREX V bei unterschiedlichen Stationskatalogen

Wie in Kapitel 3.4 erwähnt, gibt es zwischen der ersten und der zweiten Etappe des Vorhabens einige Unterschiede im zu Grunde gelegten Stationskatalog. Welche Auswirkungen hat dies auf das Temperatursignal?



**Abbildung 23:** Vergleich der simulierten Jahresmitteltemperatur 1971–2000 (20C-Daten) mit derjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für die Kaskade ECHAM5→WEREX V im Ausschnitt der WEREX-Region. Dargestellt ist das Resultat der Nutzung eines Stationskatalogs, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet, wie er in der ersten Etappe des Vorhabens verwendet wurde, gegenüber einem Stationskatalog, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2010 beinhaltet, wodurch die Analysen dieser zweiten Etappe charakterisiert sind.

Die ECHAM5=>WEREX V-Kaskade mit Lauf 1 von ECHAM5 wurde in beiden Etappen von WEREX V gerechnet. Es zeigt sich in Abbildung 23, dass die Unterschiede zwar sichtbar sind, es aber nur ein rund 0,2 °C niedrigeres Temperatursignal für die Daten auf der Basis des Stationskatalogs der zweiten Etappe erkennbar ist. Auch die in Abbildung 24 (a) und (b) dargestellten zeitlichen Verläufe für die Station Dresden und vier Umgebungsstationen unterscheiden sich nur minimal.

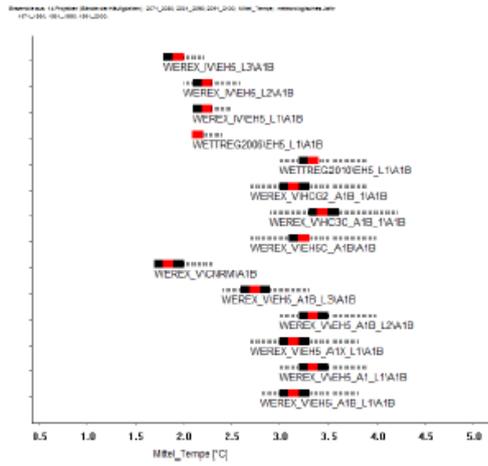


**Abbildung 24:** Jahresmitteltemperatur im Verlauf 1961–2100 als Mittel aus den Werten der Station Dresden und vier Umgebungsstationen. (a) Kaskade ECHAM5→WEREX V mit einer Stationsliste, die Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet. (b) Kaskade wie (a), aber mit einer Stationsliste für Klimamessreihen 1971–2010. (c) Variante von (a) mit einer alternativen Version von WEREX V, bei der die Häufigkeiten der Zirkulationsmuster aus der Gegenwart extrapoliert werden und für das 21. Jahrhundert ein gradueller Übergang zu den Häufigkeiten der Muster, wie sie von ECHAM5 simuliert werden, erfolgt (ausführliche Beschreibung dieser Alternative in KREIENKAMP et al. 2010c).

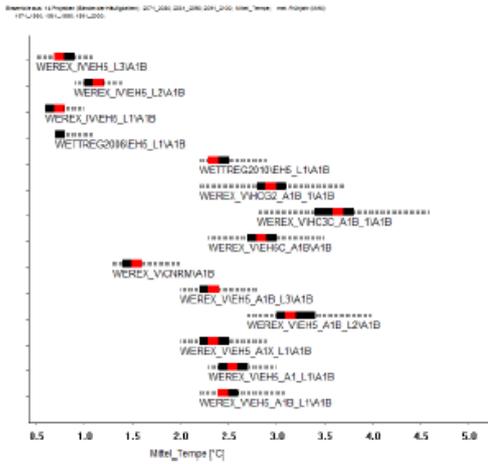
In Abbildung 24 (c) ist eine mit A1X bezeichnete Alternative zum herkömmlichen Herangehen an die Ermittlung von Klimasignalen gezeigt. Anders als beim „Standard-WEREX“ ist die Basis nicht eine 20C-Simulation des GCM, vielmehr werden als Informationsquelle für die Häufigkeit der Zirkulationsmuster Reanalysedaten genutzt. Der gestrichelte Bereich in Abbildung 24 (c) ist also ein Indikator für die tatsächliche Variabilität der Temperatur, während sich dieser Bereich in Abbildung 24 (a) und (b) aus der von ECHAM5 simulierten Variabilität errechnet. In Teilfigur (c) von Abbildung 24 ist auch ein gegenüber den Teilfiguren (b) und (c) anderer zeitlicher Verlauf der Temperatur erkennbar – der Anstieg erfolgte zwischen 1961 und 2000 gleichmäßig; die in (a) und (b) sichtbare Welle mit einem Maximum bei etwa bei 1980 und einem Minimum in den 1990er-Jahren ist der internen Variabilität von ECHAM5 zuzuordnen. Es sei daran erinnert, dass in für die in Abbildung 23 und Abbildung 24 dargestellten Entwicklungen Lauf 1 von ECHAM5 analysiert wurde. Eine Andeutung zur „Individualität“ bei den drei ECHAM5-Läufen ist auch in Abbildung 19 ersichtlich, die für einen ECHAM5-Gitterpunkt in der WEREX-Region die verschiedenen Läufe einander gegenüberstellt. Zudem finden sich Vergleichsmöglichkeiten bei den GCM=>RCM-Kaskaden, wie in Abbildung 22 gezeigt. CCLM wurde mit den Läufen 1 und 2 von ECHAM5 angetrieben, während der Antrieb für REMO und RACMO mit Lauf 3 von ECHAM5 erfolgte. In der Zusammenschau von Abbildung 19 und Abbildung 22 ist die Jahresmitteltemperatur, simuliert von ECHAM5 Lauf 1, durch das o. g. wellige Verhalten zwischen 1961 und 2000 charakterisiert. Lauf 2 simuliert hingegen einen zumeist gleichmäßigen Temperaturanstieg in diesem Zeitraum, besonders deutlich nach 1980. Lauf 3 wiederum trägt die Charakteristika einer Welligkeit, allerdings mit kürzeren Perioden und geringeren Amplituden als Lauf 1, und die eines gleichmäßigen Anstiegs.

#### 5.2.1.5 Bänderdiagramme des Modellensembles

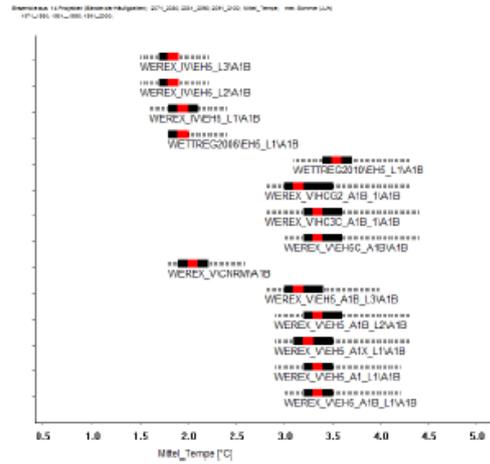
In den Bänderdiagrammen der Abbildung 25 bis Abbildung 27 sind die Temperatursignale der verschiedenen Modelle und Modellkaskaden einander gegenübergestellt. Bei der Interpretation sollte auf die schwarzen Boxen, die den Wertebereich in den Kartendarstellungen zwischen den Perzentilen 25 und 75 anzeigen, geachtet werden. Die gestrichelten Linien markieren zwar den gesamten Wertebereich in der WEREX-Region, repräsentieren aber deutlich weniger Bildpunkte.



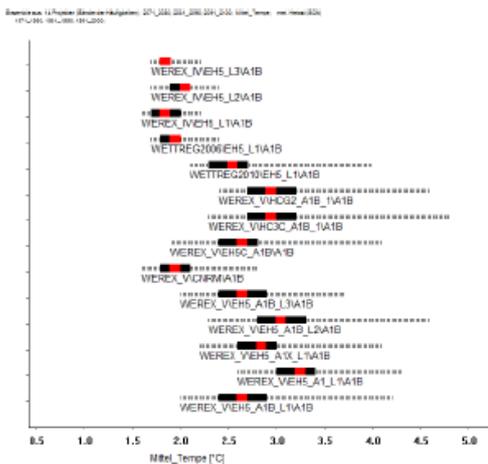
(a) Jahr



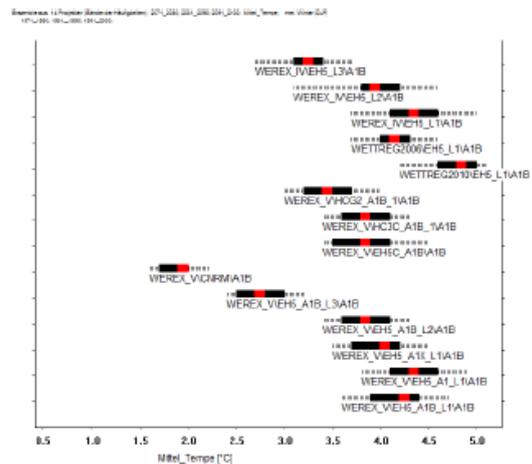
(b) Frühjahr



(c) Sommer

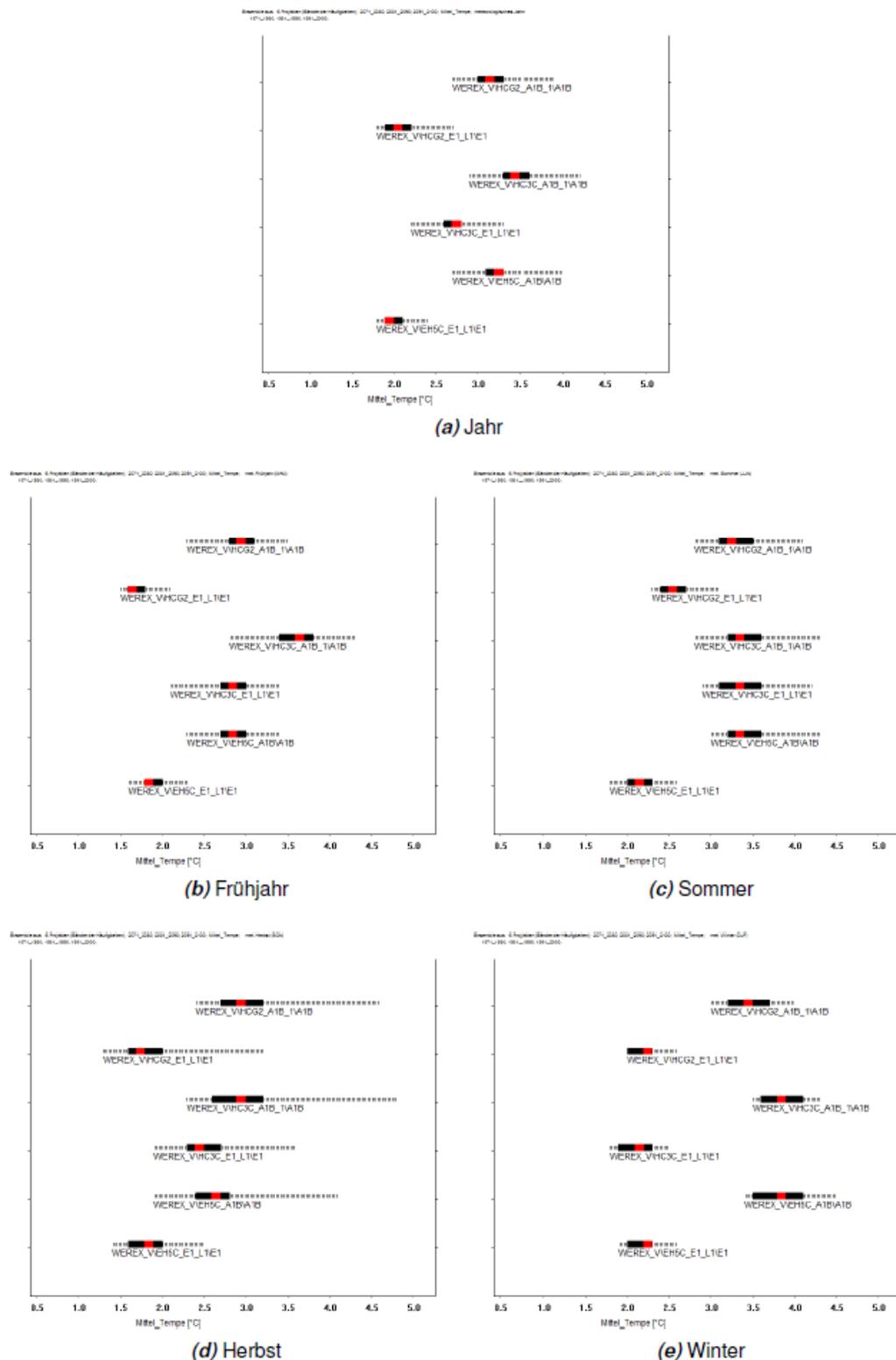


(d) Herbst

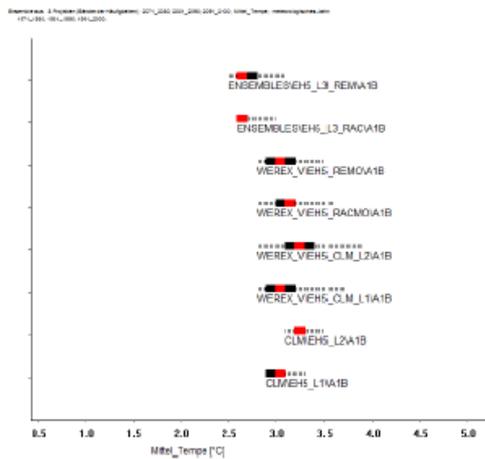


(e) Winter

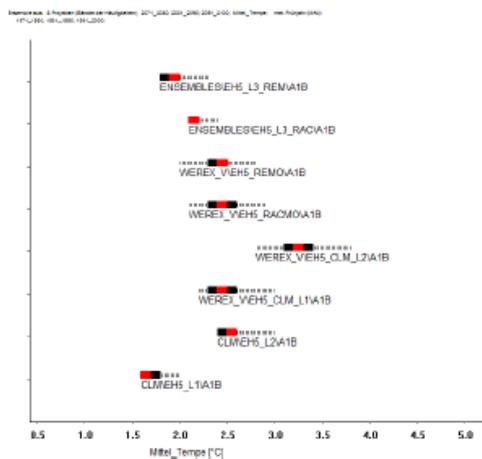
Abbildung 25: Bänderdiagramme für die Signale der Temperatur als Vergleich zwischen 2071–2100 (Szenario) und 1971–2000 (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Simulationen gewählt, bei denen die ESD-Methode (WETTREGxxxx oder WEREXx) direkt auf Basis der GCM-Ergebnisse von SRES A1B-Simulationen eingesetzt wurde. Jedes Band für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16). Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 75-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zum Extremen.



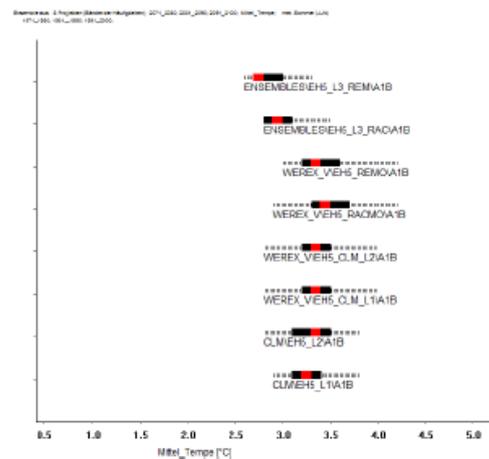
**Abbildung 26: Bänderdiagramme für die Signale der Temperatur als Vergleich zwischen 2071–2100 (Szenario) und (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Situationen gewählt, bei denen die ESD-Methode direkt auf Basis der GCM-Ergebnisse von E1-Simulationen eingesetzt wurde. Als Vergleich werden die dazugehörigen A1B-Simulationen aufgezeigt. Jedes Band zeigt für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16). Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 75-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zu den Extremen.**



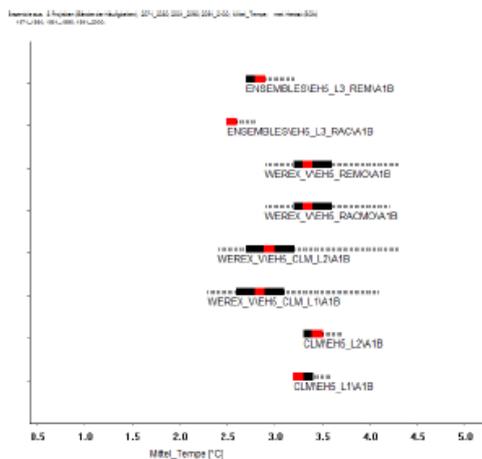
(a) Jahr



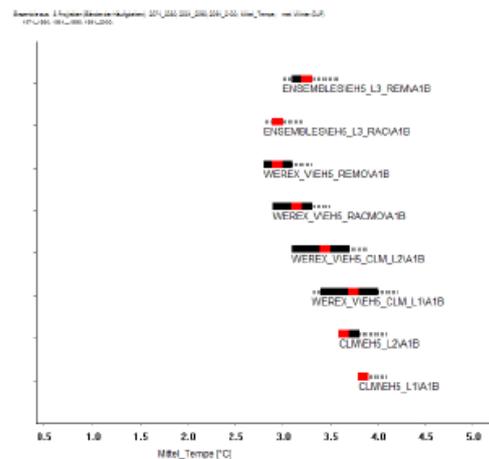
(b) Frühjahr



(c) Sommer



(d) Herbst



(e) Winter

Abbildung 27: Bänderdiagramme für die Signale der Temperatur als Vergleich zwischen 1971–2100 (Szenario) und 1971–2000 (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Simulationen gewählt, bei denen die ESD-Methode direkt auf Basis der GCM→RCM Kaskadenergebnisse von A1B-Simulationen eingesetzt wurde. Als Vergleich werden die dazugehörigen A1B-Simulationen der RCMs aufgezeigt. Jedes Band zeigt für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16) Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 50-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zu den Extremen.

Es zeigen sich beispielsweise die Unterschiede zwischen Regionalisierungen auf der Basis der beiden Szenarios A1B und E1. Am deutlichsten ist dies im Winter erkennbar [Abbildung 26(e)], während in den übrigen Jahreszeiten und für das Signal der Jahresmitteltemperatur zwar für ECHAM5C und HadGEM2 analog aussieht, die Kaskade HadCM3C E1=>WEREX V jedoch ein Niveau aufweist, das zwischen dem von E1- und dem von A1B-Regionalisierungen steht. Zudem ist in mehreren Teilfiguren von Abbildung 25 die Sonderstellung von CNRM CM33 auffällig, dessen A1B-Temperatur-Anstiegssignale die niedrigsten aus den der WEREX V-Regionalisierungen sind. Die Größenordnung der CNRM-Signale ist, abgesehen vom Winter, durchweg derjenigen von früheren Studien mit WEREX IV und WETTREG2006 ähnlich und zudem so niedrig wie diejenigen von Kaskaden anderer Modelle, die E1 verwenden (vgl. Abbildung 26). Bänderdiagramme von Kaskadenergebnissen (Abbildung 27) weisen eine stärkere Differenzierung im Frühjahr und Herbst auf, während in Sommer und Winter die Unterschiede zwischen den Kaskaden-Ergebnissen geringer sind.

### 5.2.1.6 Zusammenschau der Temperatursignale in einer Tabelle

In Tabelle 7 sind die Flächenmittel für die WEREX-Region zusammengefasst, wie sie durch die Berechnung von Temperatursignalen der unterschiedlichen Modelle und Modellkaskaden bestimmt werden. Während in Abbildung 16, Abbildung 18, Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 23 jeweils die Werte für die Jahrestemperatur dargestellt wurden, enthält Tabelle 3 zusätzlich die entsprechenden Daten für die Jahreszeiten.

**Tabelle 7: Mitteltemperatur im Vergleich zwischen 2071–2100 und den entsprechenden 20C-Daten des Zeitraums 1971–2000 für verschiedene Modelle und Modellkaskaden**

Modell	Jahr	Frühjahr	Sommer	Herbst	Winter
EH5_L1 <sub>kk</sub>	3,7	2,1	3,7	4,1	4,9
EH5_L2 <sub>kk</sub>	3,9	3,2	3,7	4,3	4,7
EH5_L3 <sub>kk</sub>	3,2	2,3	3,7	3,4	3,6
EH5_L1_A1B	3,2	2,5	3,4	2,7	4,2
EH5_L1_A1X	3,2	2,4	3,4	2,8	4,0
EH5_L2_A1B	3,4	3,2	3,5	3,1	3,9
EH5_L3_A1B	2,8	2,3	3,3	2,7	2,8
EH5C_E1	2,0	1,9	2,2	1,9	2,2
HadCM3C_E1	2,7	2,9	3,4	2,5	2,2
HadGEM2_E1	2,1	1,7	2,6	1,8	2,2
EH5C_A1B	3,2	2,9	3,5	2,6	3,9
HadCM3C_A1B	3,5	3,7	3,5	3,0	3,9
HadGEM2_A1B	3,2	3,0	3,3	3,0	3,6
CNRM_CM33_A1B	1,9	1,6	2,1	2,0	1,9
EH5_L1_CLM <sub>kk</sub>	3,1	1,7	3,3	3,3	3,9
EH5_L2_CLM <sub>kk</sub>	3,3	2,6	3,4	3,5	3,8
EH5_L3_REMO <sub>kk</sub>	2,7	2,0	2,9	2,9	3,3
EH5_L3_RACMO <sub>kk</sub>	2,7	2,2	3,0	2,6	3,0
EH5_L1_CLM	3,1	2,5	3,4	2,9	3,8
EH5_L2_CLM	3,3	3,3	3,4	3,0	3,5
EH5_L3_REMO	3,1	2,4	3,5	3,4	3,0
EH5_L3_RACM	3,2	2,5	3,5	3,4	3,2
EH5 A1B <sub>2000</sub>	3,4	2,6	3,4	3,3	4,4
EH5_L1_WEREX IV	2,3	0,8	2,0	1,9	4,4
EH5_L2_WEREX IV	2,3	1,2	1,9	2,0	4,0
EH5_L3_WEREX IV	2,0	0,8	1,8	1,9	3,3
EH5_L1_WR2010	(3,4)	(2,5)	(3,6)	(2,7)	(4,9)
EH5_L1_WR2006	(2,2)	(0,7)	(2,0)	(2,0)	(4,2)

Tabelliert sind die Ergebnisse für das Jahr und die Jahreszeiten (Frühjahr: MAM, Sommer: JJA, Herbst: SON, Winter: DJF). Die Zahlen sind die Mittel für die WEREX-region [vgl. Abbildung 11 bzw. bei EH5\_L1<sub>kk</sub>, EH5\_L2<sub>kk</sub> und Eh5\_L3<sub>kk</sub> Abbildung 12 (a)-(c)]. Ergebnisse aus der ersten Etappe sind hellgrau unterlegt, Ergebnisse aus dieser zweiten Etappe mittelgrau. Wenn die Resultate nicht aus Kaskaden mit WEREX V stammen, sind sie mit dem Index kk gekennzeichnet. In den letzten beiden Zeilen wurden die Ergebnisse für die beiden UBA-Stationen (nur Region Sachsen) als Vergleich dargestellt.

Aus Vergleichsgründen wurden auch die Werte von WEREX IV (GCM=>ESD-Kaskade mit SRES-Szenario A1B-Szenario auf der Basis von drei ECHAM5-Läufen) sowie WETTREG2006 und WETTREG2010 tabelliert. Dabei ist zu beachten, dass WETTREG-Resultate für die Fläche Deutschlands bestimmt wurden, wobei für die tabellierten Werte auf die Region Sachsen fokussiert wurde, während alle WEREX-Simulationen die Region Sachsen-Nordtschechien umfassen.

Sind Zeilen in Tabelle 7 nicht grau unterlegt, so stammen die Ergebnisse nicht aus dem Vorhaben WEREX V.

## 5.2.2 Niederschlag

Wie auch bei der Validierung (vgl. Kapitel 5.1.2), wird für das Niederschlagssignal das Hauptaugenmerk bei den Abbildungen auf die Zukunftsentwicklung im Sommer gelegt. Zur Auswertung kommen die jeweiligen Unterschiede zwischen den Perioden 2071–2100 (Szenario-Rechnungen der Modelle bzw. Modellkaskaden) und 1971–2000 (20C-Rechnungen der Modelle bzw. Modellkaskaden). Tabelle 8 zeigt darüber hinaus die Niederschlagssignale in allen Jahreszeiten und für das Jahr.

### 5.2.2.1 Vergleichstyp: Verschiedene Szenarios und verschiedene GCMs in GCM=>ESD-Kaskaden

Mit dem Ensemble von Modellen und Modell-Kaskaden sind folgende Betrachtungen möglich:

#### ■ *Verschiedene Versionen von ECHAM5 bei gleichem Szenario:*

Das Ensemble verfügt über ECHAM5 A1B=>WEREX V und über ECHAM5C A1B=>WEREX V-Simulationen [Abbildung 28 (a) und (d)]. Für das WEREX-Untersuchungsgebiet lässt sich dabei konstatieren, dass die räumliche Variabilität von beiden Modellversionen recht ähnlich erfasst wird. Die Stärke der Abnahme ist bei ECHAM5C (rund -20 %) etwas geringer als bei ECHAM5 (rund -25 %).

#### ■ *Verschiedene GCMs bei gleichem Szenario:*

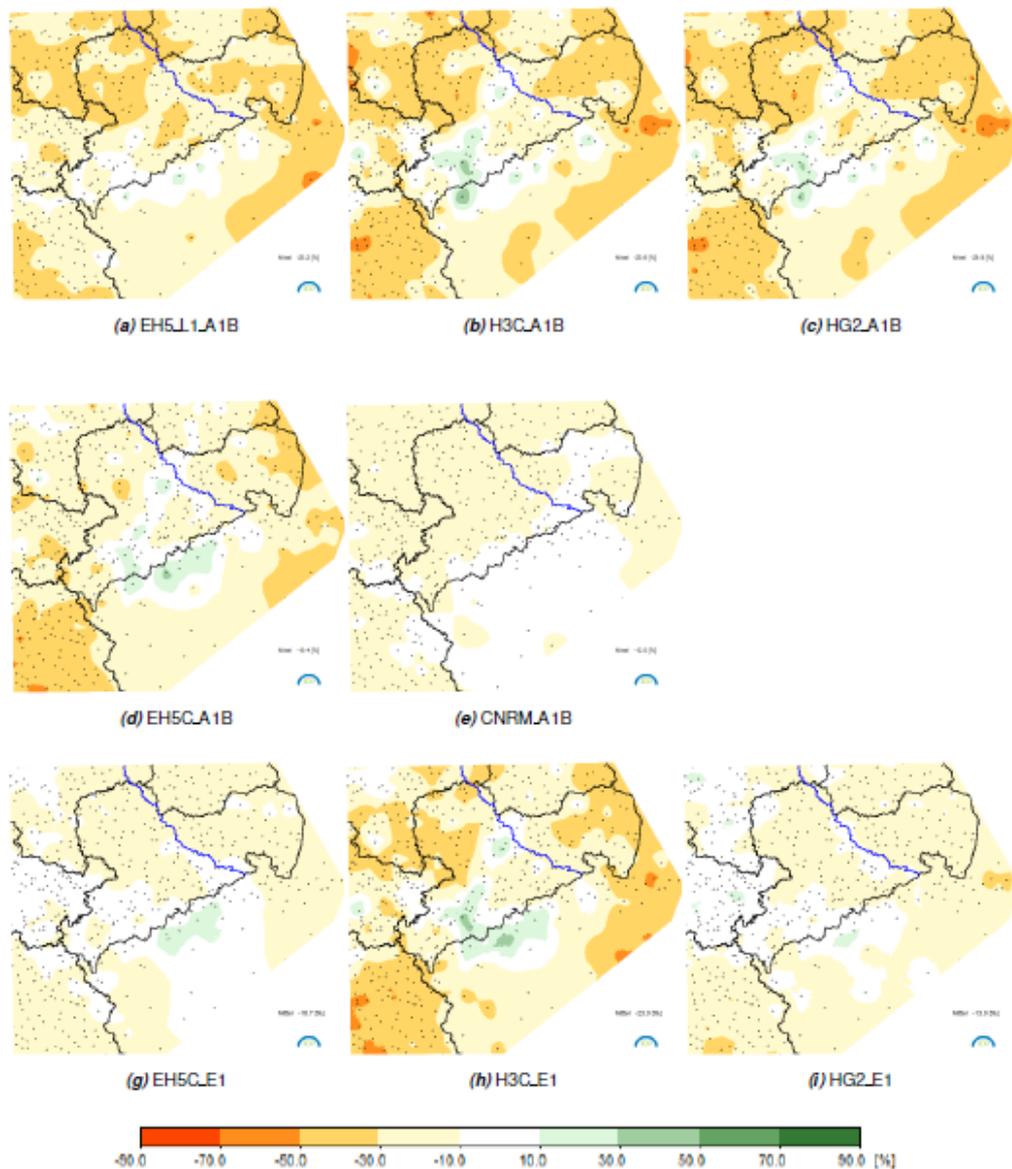
Das Ensemble verfügt über GCM E1=>WEREX V-Simulationen mit den drei GCMs ECHAM5C, HadCM3C und HadGEM2 [Abbildung 28 (g)–(i)] sowie über GCM A1B=>WEREX V-Simulationen mit den fünf GCMs ECHAM5, HadCM3C, HadGEM2, ECHAM5C und CNRM CM33 [Abbildung 28 (a)–(e)]. Das simulierte Sommerniederschlagssignal ist fast in der gesamten WEREX-Region negativ, d. h. es wird ganz überwiegend eine sommerliche Niederschlagsabnahme errechnet.

Bezüglich der Kaskaden mit dem Szenario E1 ist die Bandbreite der Änderung beachtenswert. Sie liegt zwischen rund -10 % (ECHAM5C), -15 % (HadGEM2) und rund -25 % (HadCM3C). Diese Spezifika bezüglich der Signalstärke sind auch in VAN DER LINDEN & MITCHELL (Eds.) (2009) (dort Abb. 4.6 auf S. 43) erkennbar – unter den dort dargestellten rund 20 Modellläufen rangiert HadCM3C E1 am äußeren Ende des Wertebereichs, während das Niederschlagssignal sowohl bei ECHAM5C E1 als auch bei HadGEM2 E1 unterhalb des Mittelfelds zu finden ist. Wenn für diese drei Szenarios die Information zu den übrigen Jahreszeiten und dem Jahr aus Tabelle 8 hinzugezogen wird, so fällt auf, dass die Unterschiede nur im Sommer so deutlich sind, während die Niederschlagssignale ansonsten weder größere Modellspezifika zeigen noch von bedeutender Größenordnung sind (-10 % werden gelegentlich erreicht, zumeist sind die Signalstärken jedoch deutlich darunter).

Bezüglich der Sommer-Niederschlagssignale von A1B-Simulationen wurde oben bereits ein Vergleich der beiden ECHAM5-Versionen beschrieben. Wie bei den Kaskaden, die mit E1-Szenarios angetrieben werden, ist die räumliche Struktur der Signale ähnlich – überwiegend findet sich ein Niederschlagsrückgang, lediglich in der Umgebung des Erzgebirges wird entweder keine Veränderung oder eine leichte Zunahme, gekennzeichnet durch grüne Farbtöne, ermittelt. Die Modelle ECHAM5, ECHAM5C, HadCM3C und HadGEM2 errechnen in der GCM A1B=>WEREX V-Kaskade im Flächenmittel ein Signal der Größenordnung -20 bis -25 %. Die entsprechenden Resultate von CNRM CM33 weichen mit rund -10 % deutlich davon ab.

■ *Verschiedene Szenarios bei gleichem Modell:*

Dies ist für die Modelle ECHAM5C, HadCM3C und HadGEM2 realisiert, für das sowohl A1B- als auch E1-Regionalisierungen in einer GCM=>WEREX V-Kaskade vorliegen [Abbildung 28 (d) und (g) für ECHAM5C, (b) und (h) für HadCM3C sowie (c) und (i) für HadGEM2]. Deutlich erkennbar ist bei ECHAM5C und auch bei HadGEM2 das im Szenario A1B gegenüber E1 stärkere Rückgangssignal des Sommerniederschlags (A1B: rund -20 bis 25 %; E1: rund -10 % bis -15 %). Anders verhält es sich bei HadCM3C, dessen A1B=>WEREX V-Kaskade und E1=>WEREX V-Kaskade beide in der Größenordnung von -25 % liegen.

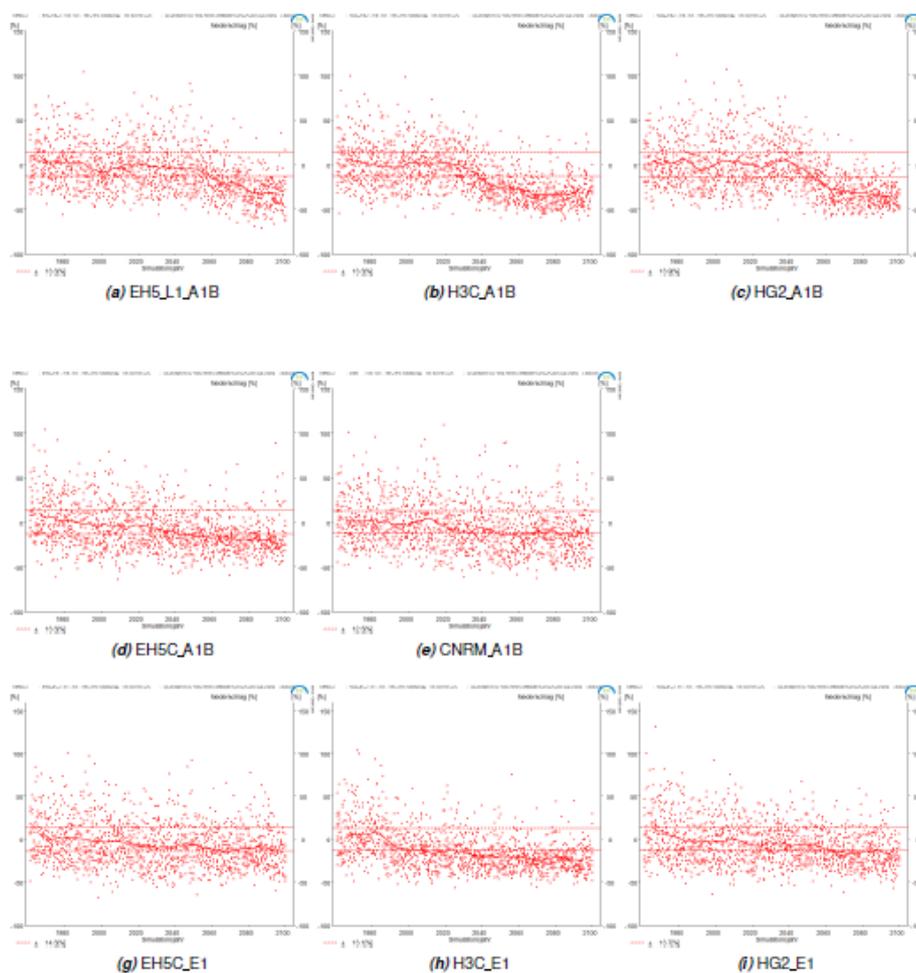


**Abbildung 28: Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 2071–2100 mit demjenigen der Periode 1971–2000 von WEREX V (prozentuale Änderung), angetrieben mit den Daten der Szenarios A1B und E1 für verschiedene GCMs in GCM->ESD-Modellkaskaden**

Auch die zeitlichen Verläufe des Sommerniederschlags (Abbildung 29) geben die Unterschiede und Gemeinsamkeiten bei den A1B- und den E1-Szenarios wieder. Es ist anzumerken, dass der in Abbildung 29 jeweils gestrichelt dargestellte „Korridor“ des Zeitraums 1971–2000, der die Variabilität des Gegenwartsklimas annähert, über den größten Teil des 21. Jahrhunderts nicht verlassen wird. Das heißt, ein Niederschlagssignal mit

deutlichem Abheben vom „Klimarauschen“ ist im Betrachtungszeitraum für die meiste Zeit nicht erkennbar. Bei den übrigen Jahreszeiten und dem Jahresniederschlag (hier nicht wiedergegeben) wird der o. g. Korridor i. d. R. gar nicht verlassen – deshalb wurde auch beim Vergleich der Niederschlagssignale der Sommer ausgewählt, denn in dieser Jahreszeit sind die Signale, wenn auch schwach, so doch relativ deutlich ausgeprägt.

Vergleichsweise gut sichtbar ist das Verlassen des Klimarauschens noch bei GCM=>WEREX V-Kaskaden mit den Szenarios A1B von ECHAM5 [Abbildung 29 (a)] sowie den beiden Modellen des Hadley-Centers [Abbildung 29 (b) und (c)], bei denen etwa nach 2050 ein Abnahmesignal auftritt. Weniger deutlich ist dieses Verlassen des Korridors bei ECHAM5C A1B [Abbildung 29(d)], während für CNRM A1B [Abbildung 29(e)] der Korridor praktisch gar nicht verlassen wird. Dies korrespondiert mit dem in Abbildung 28 (a)–(e) dokumentierten Verhalten der Flächenmittel des Sommer-Niederschlagssignals für die WEREX-Region. Bezüglich der zeitlichen Entwicklung des Signals bei GCM E1=>WEREX V-Kaskaden tritt nur bei HadCM3C E1 [Abbildung 29 (h)] eine Größenordnung auf, die sich vom Rauschen unterscheidet, während sich ECHAM5C E1 und HadGEM2 E1 quasi nicht aus dem Rauschen des Gegenwartsklimas heraus entwickeln.



**Abbildung 29: Sommerniederschlag im Verlauf 1961–2100 an der Station Dresden und vier Umgebungsstationen, simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 28. Die Punkte zeigen die Werte der Simulationen für das jeweilige Jahr an; die durchgezogene Linie gibt den tiefpassgefilterten Verlauf wieder; die gestrichelten Linien zeigen ein Konfidenzintervall an, das sich aus dem Zeitraum 1971–2000 simulierten Werten errechnet. Die Breite des Intervalls ist links unter dem Diagramm angegeben.**

Die Variabilität des Gegenwartsklimas, also die Breite des gestrichelten Korridors in den Teilfiguren von Abbildung 29, wird bei allen in diesem Unterabschnitt verglichenen Modellkaskaden mit knapp  $\pm 15\%$  gut übereinstimmend simuliert.

#### Anmerkung zu den Umgebungsstationen

Die zeitlichen Verläufe des Sommerniederschlags stützen sich bei Kaskaden, die WEREX V beinhalten, wie in Abbildung 29, Abbildung 31(d)–(f), Abbildung 34 (e)–(h) und Abbildung 36 auf eine Zentralstation sowie vier Umgebungsstationen, um die Flächenrepräsentativität zu erhöhen. Als Zentralstation wurde jeweils Dresden-Klotzsche (Wetterwarte) verwendet. Die Stationslisten der ersten und der zweiten Phase des WEREX V-Vorhabens sind nicht deckungsgleich (s. Kapitel 3.4), aber dies hat keine Auswirkungen auf die Zusammensetzung der Menge der Umgebungsstationen, die beim Niederschlag sowohl Klima- als auch Niederschlagsstationen sein können. Diese vier wurden für die Darstellung der Niederschlagsentwicklung verwendet:

- Dresden-Gohlis
- Moritzburg
- Langebrück
- Großröhrsdorf

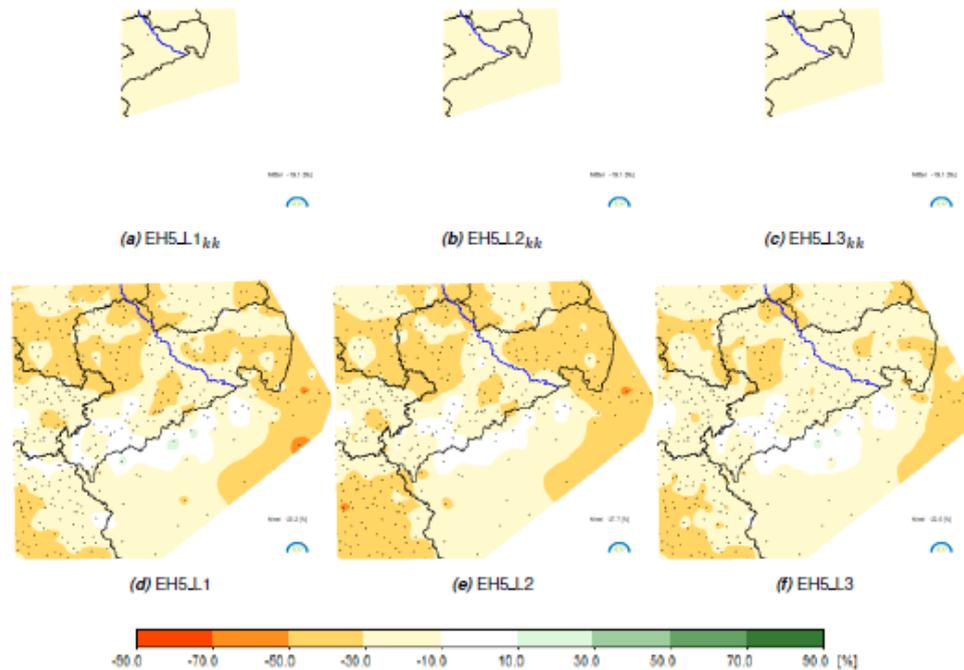
Bei reinen GCM-Daten [ECHAM5-Daten ohne Kaskade, wie in Abbildung 31 (a)–(c)] werden keine Umgebungsgitterpunkte des GCM, sondern der Dresden am nächsten liegende ECHAM5-Gitterpunkt verwendet – diese Betrachtungsweise ist lediglich ein Anhaltspunkt für das Niveau der Werte und die „Umgebung“ würde aus Gitterpunkten, die sehr weit entfernt wären, bestehen.

Bei GCM=>RCM-Kaskaden [ohne Verwendung von WEREX V, wie in Abbildung 34 (a)–(d)] wird zunächst ein Gitterpunkt möglichst nahe bei Dresden ausgewählt. Die Umgebung besteht, wie von den Modellbetreibern von CCLM, REMO und RACMO empfohlen, aus 24 benachbarten Gitterpunkten.

#### 5.2.2.2 Vergleichstyp: Verschiedene Läufe desselben Globalmodells, ohne Regionalisierung und als Kaskade ECHAM5=>WEREX V

Wie auch an anderer Stelle erwähnt, gibt es eine besondere Problematik bei der Nutzung von direktem Modell-Output (vgl. Darstellung für die Temperatur in Abbildung 6). Für das Niederschlagssignal gilt Vergleichbares: Das „regionale“ Signal von ECHAM5 ist in ein großräumiges Muster eingebettet und kann lediglich als grobe Orientierung zum Niveau der Atmosphärengröße dienen.

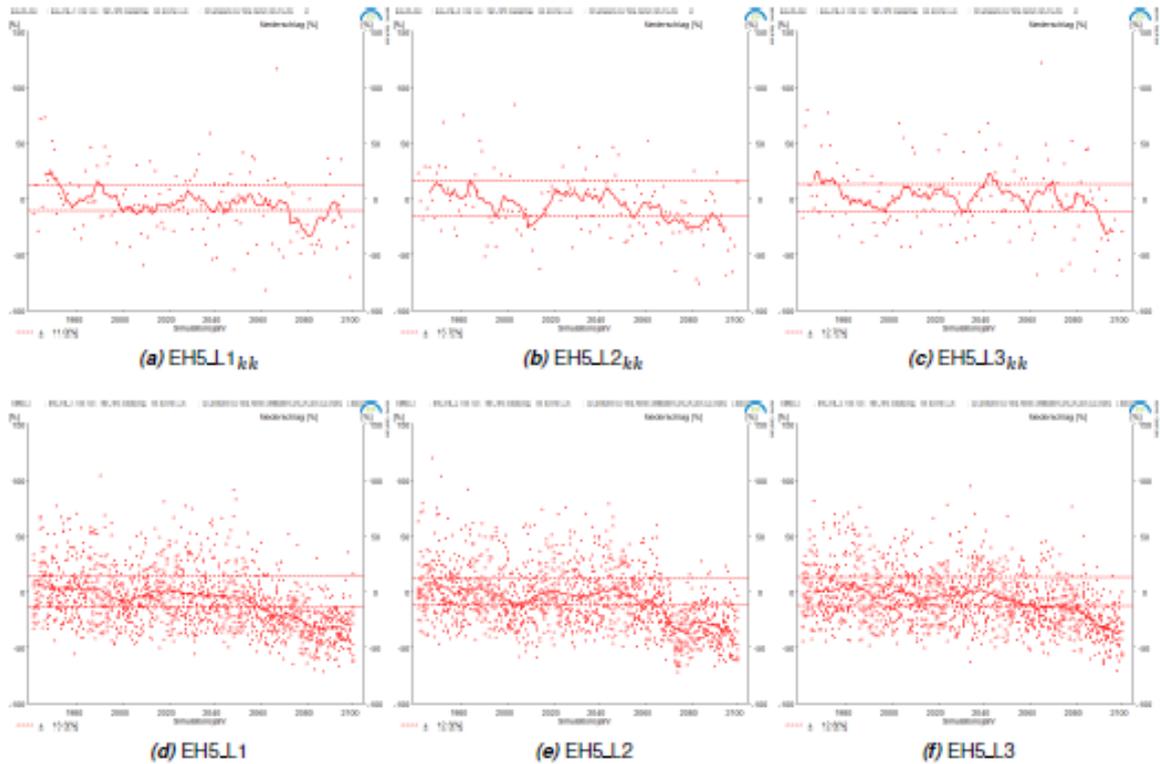
Die Unterschiede zwischen den GCM=>WEREX V-Kaskaden mit den drei ECHAM5-Läufen sind bezüglich des Sommerniederschlags relativ gering, wie in Abbildung 30(d)–(f) erkennbar ist. Tabelle 8 zeigt, dass die Läufe aber durchaus Spezifika in den einzelnen Jahreszeiten besitzen.



**Abbildung 30: Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit demjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für ECHAM5-Modellsimulation (prozentuale Änderungen) im Ausschnitt der WEREX-Region – Teilfiguren (a)–(c) und für die Daten der ECHAM5→WEREX V-Modellkaskaden auf der Basis der drei ECHAM5-Läufe – Teilfiguren (d) bis (f)**

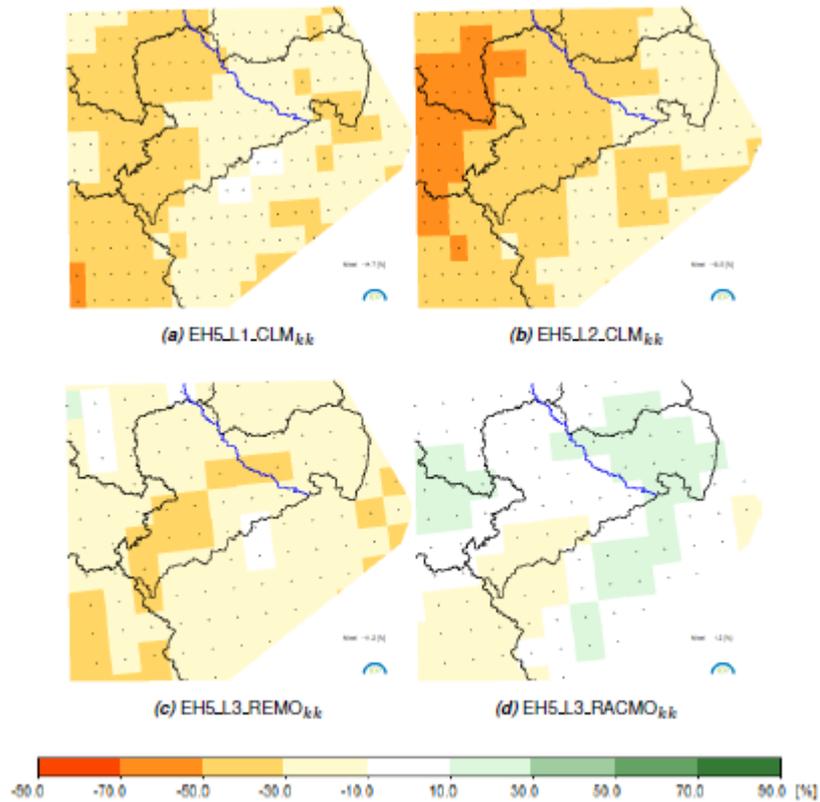
Bei den Darstellungen der zeitlichen Verläufe in Abbildung 31 ist zunächst zu beachten, dass der direkte Modell-Output immer nur in einer Realisierung vorliegt. Daher ist die Punktwolke in den Teilfiguren (a)–(c) von geringerer Dichte als in Teilfiguren (d)–(f) oder Abbildung 29, denn mit WEREX V werden zehn gleichwertige „Varianten“ eines zukünftigen Klimas erzeugt, deren Vielfalt durch die dichte Punktwolke nachvollziehbar wird.

Es zeigt sich, dass das regionalisierte Signal des Sommerniederschlags [Abbildung 31(d)–(f)] der jeweiligen „Vorgabe“ durch den Lauf von ECHAM5 [Abbildung 31 (a)–(c)] in seiner zeitlichen Entwicklung gut folgt. Im gesamten Zeitraum geht der Niederschlag allmählich zurück und verlässt ab etwa 2050 den Korridor des „Klimarauschens“ (definiert durch die Variabilität der Simulation im Zeitraum 1971–2000).



**Abbildung 31: Sommerniederschlag im Verlauf 1961–2100 an einem ECHAM5-Gitterpunkt in der Nähe der Station Dresden (a)-(c) bzw. der Station Dresden und vier Umgebungsstationen (d)-(f), simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 30. Die Punkte zeigen die Werte der Simulationen für das jeweilige Jahr an; die durchgezogene Linie gibt den tiefpassgefilterten Verlauf wieder; die gestrichelten Linien zeigen ein Konfidenzintervall an, das sich aus den im Zeitraum 1971–2000 simulierten Werten errechnet. Die Breite des Intervalls ist links unter dem Diagramm angegeben.**

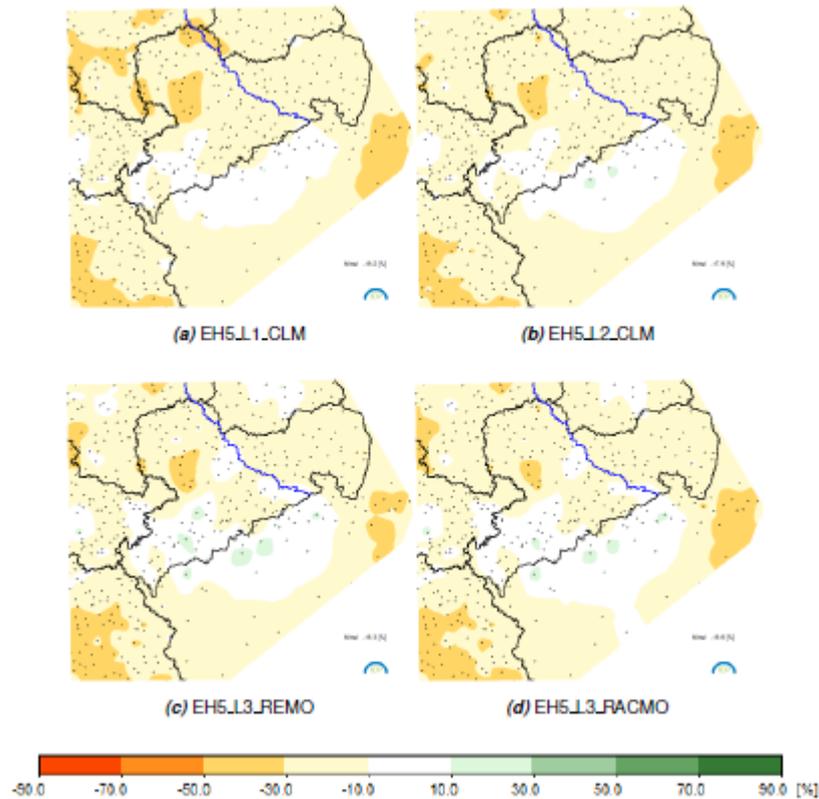
### 5.2.2.3 Vergleichstyp: Kaskaden GCM=>RCM und GCM=>RCM=>ESD mit verschiedenen RCMs



**Abbildung 32: Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit demjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für verschiedene ECHAM5→RCM-Modellkaskaden (prozentuale Änderung) im Ausschnitt der WEREX-Region**

In Abbildung 32 und Abbildung 33 sind die Niederschlags-Änderungssignale von Regionalisierungen mit den RCMs CLM (2 Läufe), REMO (1 Lauf) und RACMO (1 Lauf) dargestellt. Abbildung 32 zeigt vier verschiedene GCM=>RCM-Kaskaden.

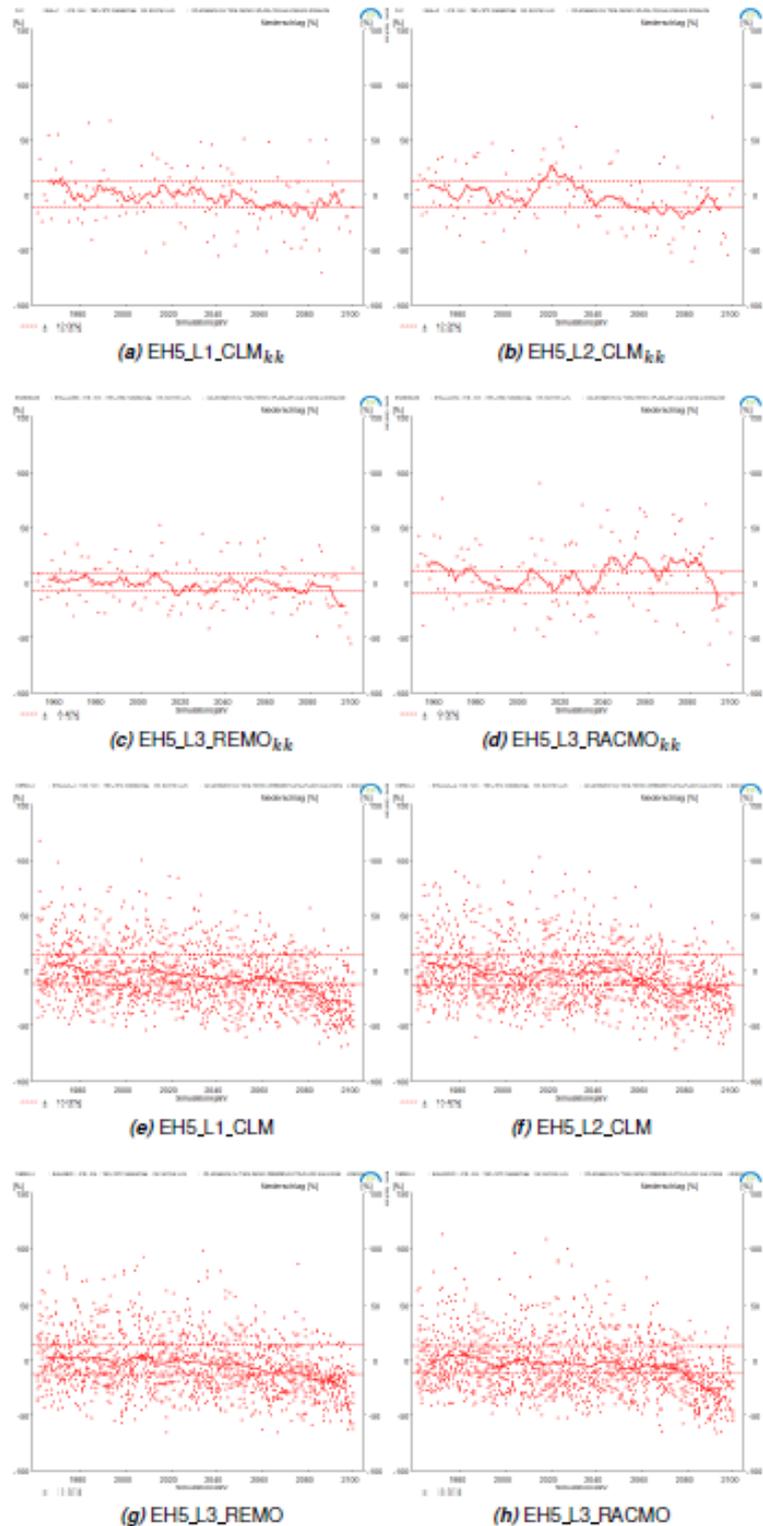
Es ist erkennbar, dass für die WEREX-Region vom Modell CLM in beiden Läufen eine etwas stärkere sommerliche Niederschlagsabnahme als bei REMO simuliert wird. Bei RACMO zeigt sich sogar eine ganz leichte sommerliche Niederschlagszunahme, die allerdings nicht im gesamten WEREX-Gebiet auftritt. Zusätzliche regionale Strukturen sind nur schwach ausgeprägt. Ein Vergleich der in Tabelle 8 zusammengefassten Niederschlagssignale zeigt, dass alle anderen Modelle und Kaskaden zwischen -10 und -25 % Niederschlagsveränderungen im Sommer zeitigen.



**Abbildung 33: Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit demjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für verschiedene ECHAM5→RCM→WEREX V-Modellkaskaden (prozentuale Änderung) im Ausschnitt der WEREX-Region**

Die Resultate der dreiteiligen ECHAM5=>RCM=>WEREX V-Kaskaden, dargestellt in Abbildung 33 für die RCMs CLM, REMO und RACMO, knüpfen zum Teil an die Charakteristika der GCM=>RCM-Kaskaden an, d. h. es überwiegen leichte Abnahmetendenzen. Bei der ECHAM5=>RACMO=>WEREX V-Kaskade [Abbildung 33 (d)] ist das Bild ähnlich zu allen anderen, ein Verhalten, das sich von dem der ECHAM5=>RACMO-Kaskade [Abbildung 32(c)] unterscheidet, die, wie oben beschrieben, durch ein Ausbleiben des Sommerniederschlagssignals charakterisiert ist.

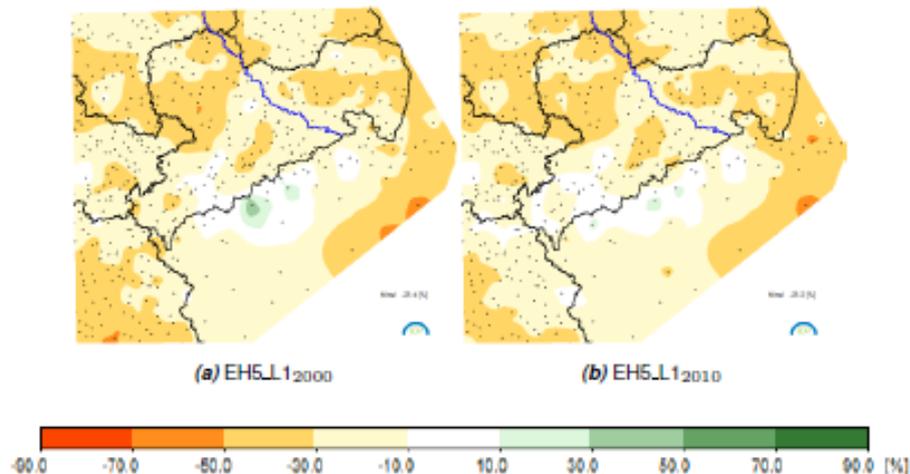
Auch der Quervergleich von Regionalisierungen mit [Abbildung 33(a)] und ohne RCM [Abbildung 30 (d)] sowie der ECHAM5=>CLM L1=>WEREX V-Kaskade [Abbildung 32 (a)], die alle auf ECHAM5 Lauf 1 basieren, zeigen eine Reproduktion der Signalgrößenordnung.



**Abbildung 34: Sommerniederschlag im Verlauf 1961–2100 an einem CLM-, REMO- bzw. RAMO-Gitterpunkt und 24 Umgebungsgitterpunkten in der Nähe der Station Dresden (a)-(d) bzw. der Station Dresden und vier Umgebungsstationen (e)-(h) (prozentuale Änderung), simuliert mit Daten der Modelle und Modellkaskaden analog zu Abbildung 32 und Abbildung 33. Angaben zu den Punkten und den Linien der Diagramme wie bei Abbildung 31.**

#### 5.2.2.4 Vergleichstyp: Kaskade ECHAM5=>WEREX V bei unterschiedlichen Stationskatalogen

Wie in Kapitel 3.4 erwähnt, gibt es zwischen der ersten und der zweiten Etappe des Vorhabens einige Unterschiede im zu Grunde gelegten Stationskatalog. Welche Auswirkungen hat dies auf das Niederschlagssignal?

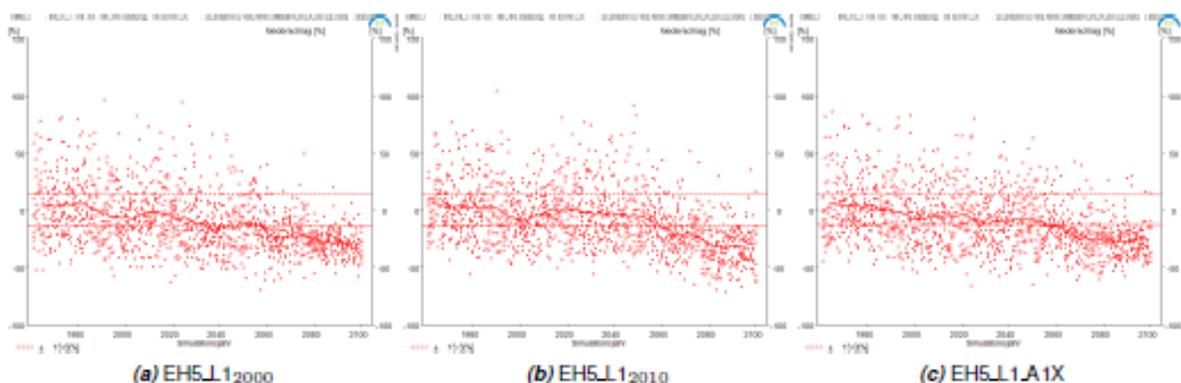


**Abbildung 35: Vergleich des simulierten Sommerniederschlags 1971–2000 (20C-Daten) mit demjenigen von 2071–2100 (Szenario A1B) für die Kaskade ECHAM5→WEREX V (prozentuale Änderung) im Ausschnitt der WEREX-Region. Dargestellt ist das Resultat der Nutzung eines Stationskatalogs, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet, wie er in der ersten Etappe des Vorhabens verwendet wurde, gegenüber einem Stationskatalog, der Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2010 beinhaltet, wodurch die Analysen der zweiten Etappe charakterisiert sind.**

Es ist in Abbildung 35 und Abbildung 36 zu ersehen, dass Unterschiede auf Grund der Datenbasis nur in sehr geringem Umfang auftreten. Wiewohl die Darstellungen in Abbildung 36 immer 1961 beginnen – die zur Berechnung des derzeitigen Klimazustands und der derzeitigen Klimavariabilität zugrunde gelegte Periode beginnt zehn Jahre später. Die Variabilität des simulierten Gegenwartsklimas, somit errechnet in der Periode 1971–2000 und gekennzeichnet durch den gestrichelten Bereich in Abbildung 36, wird in beiden Fällen von den WEREX V-Simulationen, die mit ECHAM5 Lauf 1 angetrieben werden, erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts verlassen. Die Niederschlagssignale im Winter und für das gesamte Jahr (im Bericht nicht dargestellt) verlassen den Schwankungsbereich des Gegenwartsklimas i. d. R. nicht und können folglich nicht als deutliche „Signale“ im Sinne eines Sich-Abhebens vom „Rauschen“ der Klimavariabilität betrachtet werden.

Auch bei den Niederschlagssignalen erfolgte, wie bei den Temperatursignalen, eine zusätzliche Untersuchung, die in Abbildung 36 (c) dargestellt ist. Dies ist die mit A1X bezeichnete Alternative zum herkömmlichen Herangehen an die Ermittlung von Klimasignalen – bei ihr wird das tatsächlich aufgetretene Häufigkeitsverhalten der Zirkulationsmuster in der Periode 1971–2000 identifiziert und die ermittelten Häufigkeitstrends werden in die ersten Dekaden des 21. Jahrhunderts extrapoliert. Im Laufe dieser Dekaden erfolgt dann graduell der Übergang zu den Häufigkeiten, wie sie von der Klimamodell-Simulation bestimmt werden. Der gestrichelte Bereich in Abbildung 36 (c) ist also ein Indikator für die tatsächliche Variabilität des Niederschlags, während sich dieser Bereich in Abbildung 36 (a) und (b) aus der von ECHAM5 Lauf 1 simulierten Variabilität errechnet. Anders als beim Temperatursignal gibt es beim von ECHAM5 simulierten Niederschlag sowohl keine ausgeprägte „Individualität“ der einzelnen antreibenden Modell-Läufe als auch keinen deutlichen Unterschied zum tatsächlichen Niederschlagsverlauf in der A1X-Simulation für den Zeitbereich im 20. Jahrhundert. Bei einer Analyse an der Station Dresden und den vier Nachbarstationen zwischen 1961 und 2000 zeigt sich für alle

drei ECHAM5-Läufe eine leichte Neigung zum sommerlichen Niederschlagsrückgang (vgl. Abbildung 31 und Abbildung 34). Dieses Verhalten charakterisiert auch den tatsächlich eingetretenen Niederschlagsverlauf in den letzten Dekaden des 20. Jahrhunderts.



**Abbildung 36: Sommerniederschlag im Verlauf 1961–2100 als Mittel aus den Werten der Station Dresden und vier Umgebungsstationen. (a) Kaskade ECHAM5→WEREX V mit einer Stationsliste, die Klimamessreihen aus den Jahren 1971–2000 beinhaltet. (b) Kaskade wie (a) aber mit einer Stationsliste für Klimamessreihen 1971–2010. (c) Variante von (a) mit einer alternativen Version von WEREX V, bei der die Häufigkeiten der Zirkulationsmuster aus der Gegenwart extrapoliert werden und für das 21. Jahrhundert ein gradueller Übergang zu den Häufigkeiten der Muster, wie sie von ECHAM5 simuliert werden, erfolgt (ausführliche Beschreibung dieser Alternative in KREIENKAMP et al. 2010c).**

### 5.2.2.5 Bänderdiagramme des Modellensembles

In den Bänderdiagrammen der Abbildung 37 bis Abbildung 39 sind die verschiedenen Niederschlagssignale gegenübergestellt. Dort zeigt sich die Komplexität der Problematik. Kaskaden mit WEREX V haben ein untereinander ähnliches Verhalten. Die Veränderungssignale des Niederschlags in Frühjahr, Herbst, Winter und im Jahr sind nahe der Nachweisgrenze (blau angezeigt), während sie im Sommer zumeist stärker als -10 % sind, d. h. ein modellspezifischer Unterschied ist hier nur wenig ausgeprägt. Kaskaden vom Typ GCM=>RCM (s. Abbildung 37, beide oberen und beide unteren Bänder in den Teilfiguren) hingegen weichen von diesem Verhalten ab, im Winter und Herbst und von der Tendenz her auch im Frühjahr erkennbar, wo die GCM=>RCM-Kaskaden ein Zunahmesignal über +10 % aufweisen.

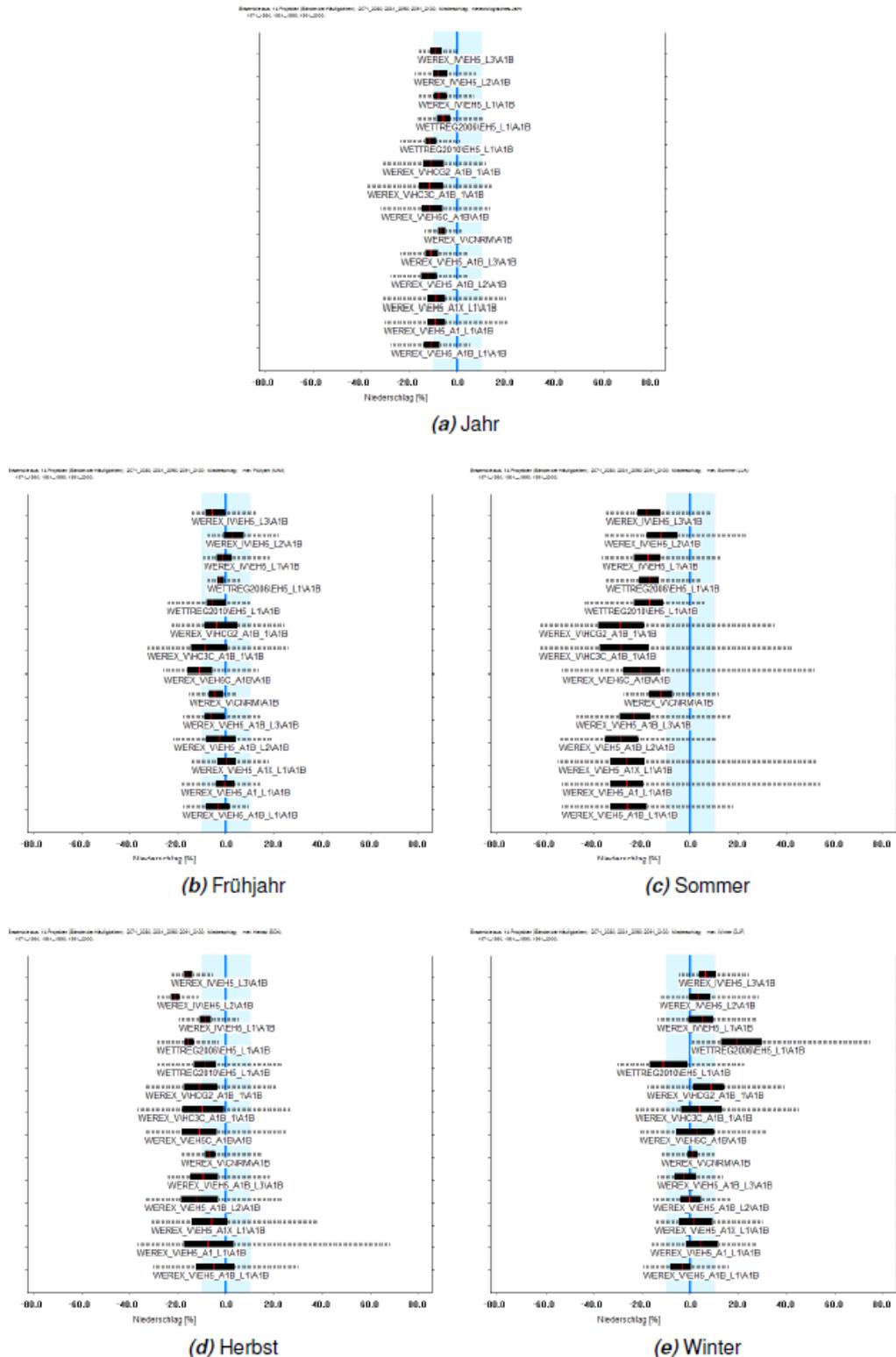


Abbildung 37: Bänderdiagramme für die Signale des Niederschlags als Vergleich zwischen 2071–2100 (Szenario) und 1971–2000 (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Situationen gewählt, bei denen die ESD-Methode (WETTREGxxxx oder WEREX x) direkt auf Basis der GCM-Ergebnisse von SRES A1B-Simulationen eingesetzt wurde. Jedes Band zeigt für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16). Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 75-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zu den Extremen.

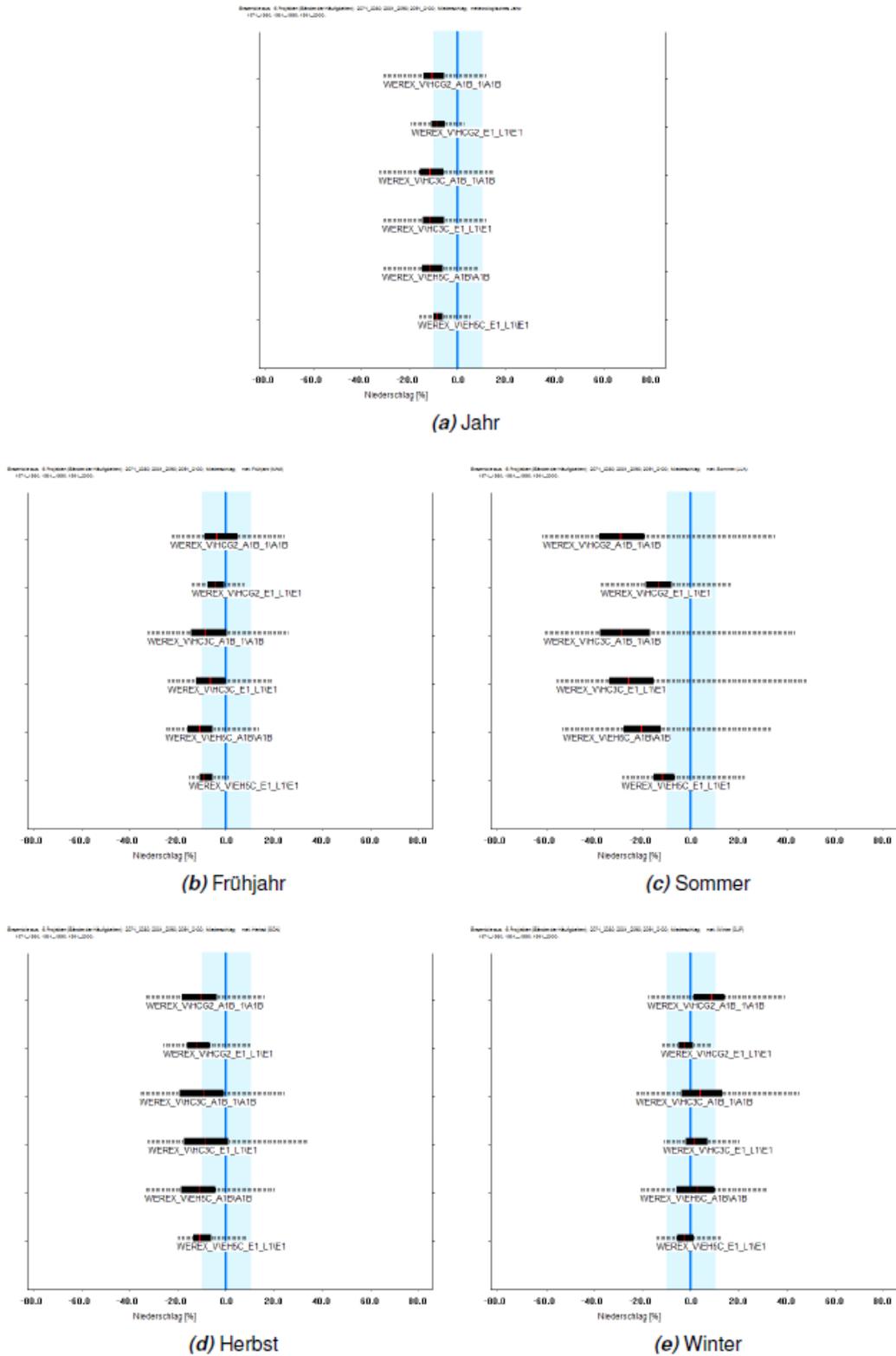
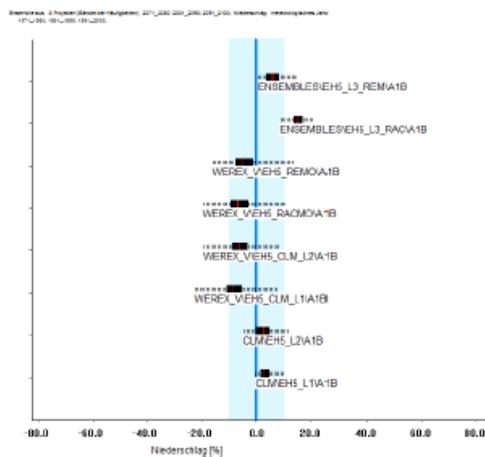
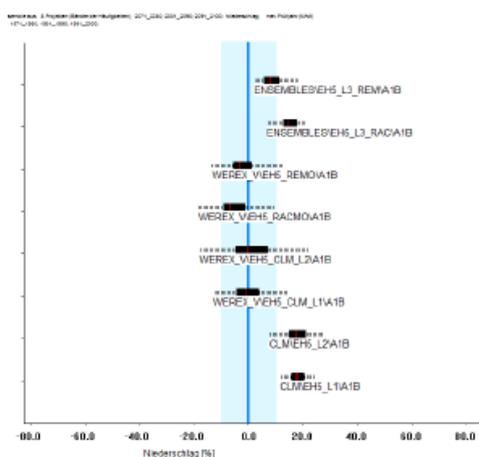


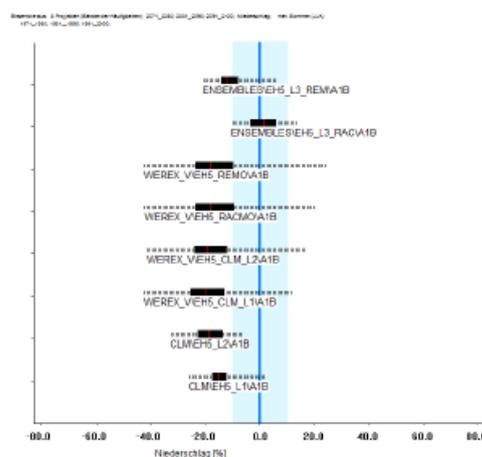
Abbildung 38: Bänderdiagramme für die Signale des Niederschlags als Vergleich zwischen 2071–2100 (Szenario) und 1971–2000 (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Simulationen gewählt, bei denen die ESD-Methode direkt auf Basis der GCM-Ergebnisse von E1-Simulationen eingesetzt wurde. Als Vergleich werden die dazu gehörigen A1B-Simulationen aufgezeigt. Jedes Band zeigt für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16). Der Meridian (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 75-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zu den Extremen.



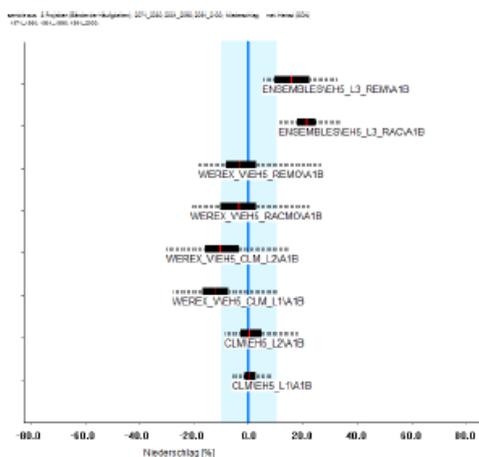
(a) Jahr



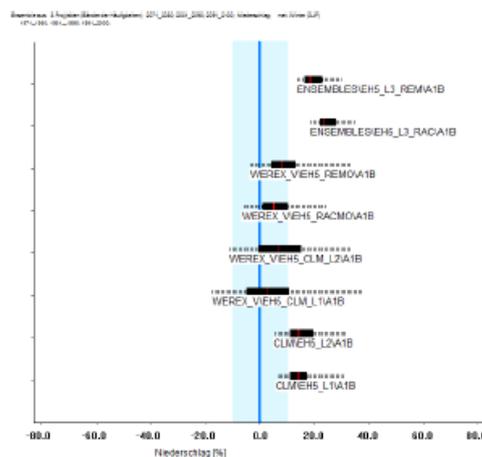
(b) Frühjahr



(c) Sommer



(d) Herbst



(e) Winter

Abbildung 39: Bänderdiagramme für die Signale des Niederschlags als Vergleich zwischen 2071–2100 (Szenario) und 1971–2000 (20C-Daten). In dieser Darstellung wurden alle Simulationen gewählt, bei denen die ESD-Methode direkt auf Basis der GCM-RCM Kaskadenergebnisse von A1B-Simulationen eingesetzt wurde. Als Vergleich werden die dazugehörigen A1B-Simulationen der RCMs aufgezeigt. Jedes Band zeigt für ein Modell den Wertebereich in der WEREX-Region (vgl. Karten z. B. Abbildung 16). Der Median (50-Perzentil) ist mit einem roten Strich gekennzeichnet. Die schwarze Box markiert den Bereich zwischen dem 25- und dem 75-Perzentil. Die gestrichelten Linien markieren den Bereich bis zu den Extremen.

### 5.2.2.6 Zusammenschau der Niederschlagssignale in einer Tabelle

In Tabelle 8 finden sich die Flächenmittel für die WEREX-Region, wie sie durch die Berechnung von Niederschlagssignalen der unterschiedlichen Modelle und Modellkaskaden bestimmt werden. Während in Abbildung 28, Abbildung 30, Abbildung 32, Abbildung 33 und Abbildung 35 jeweils die Werte für den Sommerniederschlag dargestellt wurden, enthält Tabelle 8 zusätzlich die entsprechenden Daten für die Jahreszeiten und den Jahresniederschlag.

Aus Vergleichsgründen wurden auch die Werte von WEREX IV (GCM=>ESD-Kaskade mit SRES-Szenario A1B-Szenario auf der Basis von drei ECHAM5-Läufen) sowie WETTREG2006 und WETTREG2010 tabelliert. Dabei ist zu beachten, dass WETTREG-Resultate für die Fläche Deutschlands bestimmt wurden, wobei für die tabellierten Werte auf die Region Sachsen fokussiert wurde, während alle WEREX-Simulationen die Region Sachsen-Nordtschechien umfassen. Sind Zeilen in Tabelle 8 nicht grau unterlegt, so stammen die Ergebnisse auch nicht aus dem Vorhaben WEREX V.

**Tabelle 8: Prozentuale Änderung des Niederschlags im Vergleich zwischen 2071–2100 und den entsprechenden 20C-Daten des Zeitraums 1971–2000 für verschiedene Modelle und Modellkaskaden**

<i>Modell</i>	<i>Jahr</i>	<i>Frühjahr</i>	<i>Sommer</i>	<i>Herbst</i>	<i>Winter</i>
EH5_L1 <sub>kk</sub>	1,9	18,8	-19,1	- 0,5	12,0
EH5_L2 <sub>kk</sub>	1,2	14,1	-21,9	0,2	13,9
EH5_L3 <sub>kk</sub>	2,9	3,9	-17,0	5,0	19,7
EH5_L1_A1B	-10,6	- 3,1	-24,8	- 4,3	-3,8
EH5_L1_A1X	- 8,8	0,6	-24,8	- 6,1	2,0
EH5_L2_A1B	-11,9	- 2,0	-27,7	-10,8	0,3
EH5_L3_A1B	-10,9	- 4,8	-22,5	- 8,5	-2,0
EH5C_E1	- 8,0	- 8,1	-10,8	- 9,9	-2,2
HadCM3C_E1	-10,2	- 6,0	-23,1	- 7,4	2,4
HadGEM2_E1	- 8,2	- 4,0	-13,1	-11,0	2,4
EH5C_A1B	-10,6	-10,6	-19,4	-10,9	2,2
HadCM3C_A1B	-10,9	- 7,1	-25,6	- 9,2	5,2
HadGEM2_A1B	- 9,9	- 2,4	-26,9	-10,3	8,6
CNRM_CM33_A1B	- 6,3	- 4,2	-12,0	- 6,8	0,5
EH5_L1_CLM <sub>kk</sub>	3,1	18,0	-14,7	0,5	14,9
EH5_L2_CLM <sub>kk</sub>	2,6	17,9	-18,5	1,2	15,2
EH5_L3_REMO <sub>kk</sub>	6,1	8,7	-11,2	16,1	19,8
EH5_L3_RACMO <sub>kk</sub>	15,3	15,1	1,2	21,7	24,8
EH5_L1_CLM	- 8,0	- 0,1	-19,0	-11,9	3,4
EH5_L2_CLM	-11,8	- 2,0	-27,4	-10,7	0,2
EH5_L3_REMO	- 4,3	- 2,2	-16,0	- 2,2	8,9
EH5_L3_RACMO	- 6,1	- 5,6	-16,4	- 3,1	6,0
EH5_A1B <sub>2000</sub>	- 8,9	0,0	-25,4	- 6,6	5,0
EH5_L1_WEREX IV	- 6,8	- 0,5	-17,0	- 8,4	4,6
EH5_L1_WEREX IV	- 6,9	3,5	-11,6	-20,9	4,3
EH5_L1_WEREX IV	- 8,7	- 4,1	-17,5	-15,8	7,2
EH5_L1_WR2010	(-11,9)	(- 6,3)	(-19,1)	(- 6,5)	(-12,7)
EH5_L1_WR2006	(- 6,9)	(- 3,1)	(-18,9)	(-15,2)	(17,9)

Tabelliert sind die Ergebnisse für das Jahr und die Jahreszeiten (Frühjahr: MAM, Sommer: JJA, Herbst: SON, Winter: DJF). Die Zahlen sind die Mittel für die WEREX-Region [vgl. Abbildung 11 bzw. bei EH5\_L1<sub>kk</sub>, EH5\_L2<sub>kk</sub> und EH5\_L3<sub>kk</sub> Abbildung 12 (a)-(c)]. Die Ergebnisse aus der ersten Etappe des Vorhabens sind hellgrau unterlegt, Ergebnisse aus der zweiten Etappe mittelgrau. Wenn die Resultate nicht aus Kaskaden mit WEREX V stammen, sind sie mit dem Index kk gekennzeichnet. In den beiden letzten Zeilen wurden die Ergebnisse für die beiden UBA-Simulationen (nur Region Sachsen) als Vergleich dargestellt.

# 6 Diskussion

## 6.1 Was bewirkt die Kaskade GCM=>RCM=>ESD?

Im Rahmen der Simulationsrechnungen mit einem RCM werden die orografischen Gegebenheiten einer Region feiner aufgelöst. Diese führen in Verbindung mit dem erhöhten Anteil an direkt berechneten (d. h. im Gegensatz zum GCM nicht parametrisierten) Prozessen zu einer besseren Repräsentation der regionalen meteorologischen Erscheinungen. Dazu zählen

- Überströmung bzw. Umströmung von Bergen,
- bessere Erfassung konvektiver Prozesse,
- bessere Erfassung von Prozessen, die durch die Landnutzung geprägt sind,
- viele weitere Prozesse.

Somit ist, methodisch gesehen, der Einsatz einer Kaskade immer der direkten Nutzung von GCM-Ergebnissen vorzuziehen. Es muss aber hinterfragt werden, ob es genügend positive Effekte gibt, die den deutlich erhöhten Rechenaufwand rechtfertigen. Auf Basis der aktuellen (hier aufgezeigten) Ergebnisse sind die Unterschiede gering. Die extrahierte großräumige Information scheint in den RCM-Ergebnissen sehr ähnlich zu den GCM-Ergebnissen zu sein. Untersuchungen im Rahmen einer Dissertationsarbeit (Sonja Baumgart: Weiterentwicklung von WETTREG zur Erstellung von regionalisierten Szenarios auf der Basis der Ergebnisse des ENSEMBLES-Projektes) zeigen Hinweise, dass die aktuell verwendete Methode der Wetterlagenbestimmung in WEREX kleinräumige Unterschiede der Zirkulation zu wenig berücksichtigt. Mit belastbaren Ergebnissen dieser Arbeit ist im Herbst 2012 zu rechnen.

## 6.2 Könnte die Kaskade GCM=>RCM=>ESD ein Ersatz für die Bias-Korrektur sein?

Dies ist nicht der Fall. Der Einsatz von WEREX stellt **nur** einen stochastischen Unterbau zu der jeweiligen RCM-Simulation dar.

## 6.3 Wie ist die Simulation mit dem Einsatz der Reanalyse als Anfangsbedingung einzuschätzen?

Bei dieser im Rahmen von WEREX V praktizierten Variante der Szenario-Bildung (Nomenklatur: A1X) wurde bewusst die Basis der Muster-Wiedererkennung in Szenarios verlassen und ein alternativer Weg eingeschlagen: Die Extrapolation nimmt Signale der unmittelbaren Vergangenheit (seit den 1960er-Jahren) auf und verlängert die in dieser Zeit errechneten Häufigkeitstrends der vorgegebenen Zirkulationsmuster in die nahe Zukunft. Damit werden in den entsprechenden Dekaden alternative Häufigkeitsverteilungen zum Antrieb des WEREX-Verfahrens vorgegeben.

Die Autoren sind sich bewusst, dass dieses Vorgehen nur für einen begrenzten zukünftigen Zeitraum Bedeutung haben kann. Jedoch kann für diesen Zeitraum eine Alternative zu den Simulationen der globalen Modelle

(und den darauf basierenden Regionalisierungen) geboten werden, weil diese insbesondere die rezenten starken Klimaveränderungen nicht überzeugend widerspiegeln.

Es sei darauf hingewiesen, dass diese Vorgehensweise eine echte Alternative zur klassischen Vorgehensweise von WEREX V ist, weil die Klimaentwicklung nicht aus den Häufigkeiten der wiedererkannten Zirkulationsmuster im Szenario hergeleitet wird, sondern, für einen begrenzten Zeitraum, an ihre Stelle die Resultate eines extrapolierten Trends treten. Ein solches Vorgehen kann sich nur auf die Dekaden der nahen Zukunft beziehen – dem wird Rechnung getragen, indem ein sukzessiver Übergang der extrapolierten Häufigkeitsverteilungen zu den vom GCM simulierten erfolgt.

Durch die konkrete Unterteilung der WEREX-Methode in einen Analyseschritt (der Bestimmung der Häufigkeit der Wetterlagen in den jeweiligen Ergebnissen von Szenariorechnungen) und dem Wettergenerator (Erstellung der synthetischen Reihen) besteht kein Problem mit der ‚Modellkonsistenz‘. Die Übergangsphase (basierend auf den Wetterlagenhäufigkeiten) führt zu einem glatten Verlauf zwischen der ‚Welt‘ der Reanalyse und der im Szenariodatensatz.

## 6.4 Wie sind globale 2-Grad-Szenarienregionalisierungen zu bewerten?

Die Simulationen geben Hinweise, dass das politische 2-Grad-Ziel näherungsweise möglich ist. Untersuchungen (z. B. MEINSHAUSEN et al. 2009) zeigen aber auf, dass zur Erreichung dieses Zieles große globale Anstrengungen notwendig sind. RANDALLS (2010) führt in seiner Übersicht aus, dass die Treibfeder für das 2-Grad-Ziel ein wachsendes Bewusstsein dafür ist, dass es eine maximale zulässige Erwärmung gibt, um eine gefährliche anthropogene Einflussnahme auf das Klima zu vermeiden. Wie die regional untersetzten Simulationen mit E1-Szenarios zeigen, erreicht das regionale Klimasignal der Periode 2071–2100 schon in Bezug zur Periode 1971–2000 das Niveau von 2 °C und liegt je nach Modell sogar darüber. Das bedeutet, eine angestrebte Begrenzung des globalen Temperaturanstiegs auf höchstens 2 °C wird wahrscheinlich regional zu einem höheren Temperaturanstieg führen. Dies ist auch eingedenk der Tatsache zu sehen, dass ja für das 2-Grad-Ziel die Klimaänderung im Bezug zum vorindustriellen Niveau angesetzt wird, sodass dem Niveau von 1971–2000 rund 0,5 °C hinzu gerechnet werden müssen.

Zu einem ähnlichen Schluss kommen auch HUEBENER et al. (2010), die zunächst für „herkömmliche“ SRES-Szenarios A1B, A2 und B1 Zeithorizonte bestimmen, zu denen nach den jeweiligen Szenario-Maßgaben ein regionaler Temperaturanstieg von 2 °C auftritt und die je nach Szenario im ersten Drittel bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts liegen. Für Regionalisierungen mit dem E1-Szenario finden sie einen moderaten Temperaturanstieg, der aber zum Ende des 21. Jahrhunderts regional ebenfalls über 2 °C liegt. Diese Erwärmung ist jedoch immer noch rund 1 °C geringer als diejenige, die unter einem Emissionsverhalten liegt wie es z. B. von SRES A1B angenommen wird. Der zentrale Begriff ist die vermiedene Erwärmung in Folge von wirksamen Anpassungsmaßnahmen und die vermiedenen Kosten von schädlichen Klimafolgen.

## 6.5 Wie ist der schwache Trend im meteorologischen Frühjahr in den ECHAM5-Simulationen in Bezug zu dem starken Trend in den Simulationen von HadCM3C zu bewerten?

In Tabelle 7 sind die jahreszeitlichen Temperatursignale, die in Sachsen im Vergleich der Perioden 1971–2000 und 2071–2100 auftreten, einander gegenübergestellt. Die relativ schwachen Signale im Frühjahr treten bei Lauf 1 und 3 von ECHAM5 auf, während Lauf 2 kein solches Verhalten zeigt. Die Läufe sind von den Modellbetreibern als gleichwertig zur Verfügung gestellt worden – saisonal schwache/starke Temperaturtrends sind folglich als eine Konsequenz der modellinternen Variabilität zu sehen.

## 6.6 Welche Gründe kann es für die Unterschiede beim Niederschlagstrend zwischen RCM und ESD-Ergebnissen geben?

Wie in der Abbildung 39 unterscheiden sich die Trends beim Niederschlag zwischen den RCM- und den ESD-Simulationen. Bisherige Untersuchungen zeigen noch keine methodischen Gründe auf. Die Trends der Wetterlagenhäufigkeiten (als gewichteter Mix aus den Temperatur- und Feuchtwetterlagen) geben die Trends für die synthetischen Reihen vor. Die Niederschlagsmenge wird in den RCM-Simulationen aus einem Mix aus physikalisch-gerechneten Bedingungen und Parametrisierungen errechnet. Bei der ESD-Methode wird auf analoge Fälle in der Vergangenheit zurückgegriffen. Weitere Analysen müssen untersuchen, ob die vorausgesetzte Stationarität zwischen der großräumigen Situation und den lokalen Wettergeschehen noch gültig ist oder andere Gründe zu den gegenläufigen Trends führen.

# 7 Zusammenfassung

Mit der abschließenden zweiten Etappe des WEREX V-Vorhabens liegen nunmehr Klima-Regionalisierungen für den Freistaat Sachsen vor, die sowohl auf einer aktualisierten Version V des WEREX-Verfahrens beruhen als auch den neuartigen Kaskaden-Ansatz nutzen. Das WEREX V-Modellensemble, das in der ersten Projektetappe hauptsächlich E1- und A1B-Simulationen einander gegenüberstellte wird nun um GCM=>RCM=>WEREX V-Kaskaden mit verschiedenen RCMs und GCM=>WEREX V-Kaskaden mit (i) mehreren Läufen desselben GCMs und (ii) weiteren A1B-Szenarios vervollständigt. Damit werden umfangreiche Vergleiche möglich.

Die Zusammenschau dieses Ensembles ergibt, dass die Charakteristika der einzelnen Läufe eines Globalmodells und diejenigen unterschiedlicher Globalmodelle, wie etwa Saisonalität, Betrag der simulierten Klimaänderung oder räumliche Verteilung der Signale in der Regel in den unterschiedlichen Kaskaden erhalten bleiben.

Bei der Temperatur und beim Niederschlag werden die Erkenntnisse aus anderen Studien auf eine deutlich breitere Modellbasis gestellt, wobei sich das Bild des projizierten Klimawandels für die Untersuchungsregion festigt:

- Die Änderungen der Jahresmitteltemperatur unter dem Szenario A1B betragen im Vergleich der Zeiträume 1971–2000 und 2071–2100 je nach antreibendem Modell 3–3,5 °C (eine Ausnahme bildet das Modell CNRM CM33, das in der GCM=>WEREX V-Kaskade deutlich niedrigere Anstiegsraten simuliert).
- Die Änderungen der Jahresmitteltemperatur unter dem Szenario E1 für dieselben Zeiträume wurden für ein kleines Teilensemble von drei GCMs mit WEREX V regionalisiert und betragen je nach antreibendem Modell rund 2–2,5 °C (das Modell HadCM3C zeigt dabei in der Regionalisierung etwas höhere Temperaturzunahmen, insbesondere im Sommer).
- Die Saisonalität der Temperaturänderung ist ein Spezifikum des GCMs und des GCM-Laufs. Es gibt Modellläufe, bei deren Antrieb nur geringe saisonale Schwankungen um den Jahreswert auftreten, wie etwa ECHAM5 Lauf 2 oder HadGEM2; es gibt aber auch Läufe mit ausgeprägter Saisonalität, wie Lauf 1 und 3 von ECHAM5. Die modellspezifische Ausprägung der Saisonalität ist auch in GCM=>RCM-Kaskaden sichtbar.
- Bezüglich der projizierten Niederschlagsentwicklung ist das Änderungssignal für den Vergleich der Zeiträume 1971–2000 mit 2071–2100 durch eine sehr leichte Zunahme im Winter, die im Bereich der Variabilität des Gegenwartsklimas liegt und 10 % kaum übersteigt, charakterisiert. Ausgeprägter ist die Abnahme des mittleren Niederschlags im Sommer, wo die Änderungsraten bei A1B-Szenarios eine Größenordnung von rund 20–25 % erreichen und bei E1-Szenarios im Bereich von 10–15 % liegen. Ausnahmen bilden bei den Kaskaden mit dem A1B-Szenario das Modell CNRM CM33, was in den Regionalisierungen deutlich niedrigere Änderungsraten simuliert sowie in den Kaskaden mit dem E1-Szenario das Modell HadCM3C, was in den entsprechenden Regionalisierungen etwas höhere Werte als die übrigen E1-Kaskaden simuliert.

# Literaturverzeichnis

- BENESTAD, R.; HANSEN-BAUER, I.; CHENG, D. (2008): Empirical-statistical Downscaling – World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- BÖHM, U.; KÜCKEN, M.; AHRENS, W.; BLOCK, A.; HAUFFE, D.; KEULER, D.; ROCKEL, B.; WILL, A. (2006): CLM – the climate version of LM: Brief description and long-term applications. – COSMO Newsletter **6**.
- DEUTSCHLÄNDER, T.; ENKE, W. (2004): Ableitung von Wetterlagen aus großräumigen Zirkulationsmustern zur Identifikation von extremen Witterungsperioden mit Schwerpunkt lang anhaltender Trockenheit und deren Projektion in Klimaszenarien (WEREX III) - Abschlussbericht. Technical Report 13-8802.3521/57.
- DICKINSON, R.; ENRICO, R.; GIORGI, F.; BATES, G. (1989): A Regional Climate Model for the Western U.S.. – *Clim. Change* **15**, 383–422.
- FESKE, N. (2009): Globale Klimamodellsimulationen - Vergleichende Analyse für Mitteldeutschland und umliegende Gebiete, Schriftenreihe Heft 25/2009, LfULG, 142 S.  
<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/15013>
- FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDI, C. (2007): Review: Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. – *Int. J. Climatol* **27**, 1547–1578.
- GIORGI, F. (1990): Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. – *J. Climate* **3**, 941–963.
- GIORGI, F. (2005): Climate change prediction. – *Clim. Change* **73**, 239–265.
- GREATBATCH, R.; RONG, P.-P. (2006): Discrepancies between different northern hemisphere summer atmospheric data products. – *J. Climate* **19**, 1261–1273.
- GROTCH, S.; MACCRACKEN, M. (1991): The use of general circulation models to predict regional climatic change. – *J. Climate* **4**, 286–303.
- HUEBENER, H.; BAUMGART, S.; JANSKY, N.; KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; WOLF, H. (2010): Regional Climate Change and Impact Assessment for the Federal State Hesse, Germany, and Implications of the Global 2°C Climate Target, chapter 19, 367–384. InTech Open Access Publishing, Rijeka, Croatia. Booktitle: Climate Change–Socio-Economic Effects, ISBN 978-953-307-411-5.
- IPCC (1990): Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press, Cambridge, Melbourne.
- IPCC (1996): Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Contribution of Working Group I to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press, Cambridge, Oakleigh.
- IPCC (1998): The Regional Impacts of Climate Change - An Assessment of Vulnerability A Special Report of the IPCC Working Group II. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.
- IPCC (2001): Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – Cambridge University Press, Cambridge, U.K. und New York, USA.
- 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 Number ISBN: 978 0521 70596-7. – Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, USA.

- JACOB, D.; GÖTTEL, H.; KOTLARSKI, S.; LORENZ, P.; SIECK, K. (2007): Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland. Phase 1: Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland. Abschlussbericht zum UFOPLAN-Vorhaben 204 41 138. Technical report, Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; COLLINS, W.; DEAVEN, D.; GANDIN, L.; IREDELL, M.; SAHA, S.; WHITE, G.; WOOLLEN, J.; ZHU, Y.; LEETMAA, A.; REYNOLDS, R.; CHELLIAH, M.; EBISUZAKI, W.; HIGGINS, W.; JANOWIAK, J.; MO, K.; ROPELEWSKI, C.; WANG, J.; JENNE, R.; JOSEPH, D. (1996): The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. – *Bull. Amer. Met. Soc.* **77**, 437–471.
- KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A. (2008): Synopse beobachteter und projizierter Klimate für Sachsen auf der Basis deutscher statistischer und dynamischer Regionalmodelle (REGKLIM). Technical report, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie.
- KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2009a): Intercomparison of four regional climate models for the German State of Saxonia. – *EMS Annual Meeting Abstracts* **6**, EMS2009–392.
- KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2009b): Sensitivity studies with a statistical downscaling method – the role of the driving large scale model. – *Meteorol. Z.* **18**, 597–606, <http://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2009/0410>.
- KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2010a): Ergebnisse eines regionalen Szenarienlaufs für Deutschland mit dem statistischen Modell WETTREG2010. Technical report, Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH im Auftrag des Umweltbundesamtes.
- KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2010b): Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen. Technical report, Land Baden-Württemberg, vertreten durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Freistaat Bayern, vertreten durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU-BY), Dienstort München, Freie und Hansestadt Hamburg, vertreten durch die Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, Amt für Natur- und Ressourcenschutz, Energieabteilung, Land Hessen, vertreten durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG), Land Mecklenburg-Vorpommern, vertreten durch das Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus, Land Niedersachsen, vertreten durch den Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN), Land Nordrhein-Westfalen, vertreten durch das Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW (LANUV), Land Rheinland-Pfalz, vertreten durch die Landforsten Rheinland-Pfalz, Zentralstelle für Forstverwaltung, Forschungsanstalt für Wald ökologie und Forstwirtschaft, Land Saarland, vertreten durch das Ministerium für Umwelt, Abteilung D (Natur und Mensch), Freistaat Sachsen, vertreten durch das Sächsische Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG), Land Sachsen-Anhalt, vertreten durch das Landesamt für Umweltschutz, Fachbereich 3: Immissionschutz/Klimaschutz, Land Schleswig-Holstein, vertreten durch das Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume (MLUR), Freistaat Thüringen, endvertreten durch die Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie
- KREIENKAMP, F.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2010c): WEREX V, Zwischenbericht 1. Technical report, Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH, im Auftrag des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- KREIENKAMP, F.; BAUMGART, S.; SPEKAT, A.; ENKE, W. (2011): Regional climate signals and their dependency on the choice of model resolution which derive them. – *Atmosphere* **2**, 129–145, DOI:10.3390/atmos2020129.
- LENDERINK, G.; VAN DEN HURK, B.; VAN MEIJGAARD, E.; VAN ULDEN, A.; CUIJPERS, J. (2003): Simulation of present-day climate in RACMO2: First results and model developments. Technical report, KNMI.
- LUCARINI, V.; CALMANTI, S.; DELL'AQUILA, A.; RUTI, P.; SPERANZA, A. (2007): Intercomparison of the northern hemisphere winter mid-latitude atmospheric variability of the IPCC models. – *Clim. Dyn.* **28**, 829–848.

- MEINSHAUSEN, M.; MEINSHAUSEN, N.; HARE, W.; RAPER, S.; FRIELER, K.; KNUTTI, R.; FRAME, D.; ALLEN, M. (2009): Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. – *Nature* **458**, 1158–1162.
- PRUDENCE (2005): PRUDENCE (prediction of regional scenarios and uncertainties for defining European climate change risks and effects): Final Report. Technical report EU Code EVK2-CT2001-00132.
- RANDALLS, S. (2010): History of the 2degree c climate target. – *WIREs Climate Change* **1**, 598–605, DOI: 10.1002/wcc.62.
- 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 atmospheric general circulation model ECHAM5 - Part 1: Model Description, volume 349 of MPI-Berichte – Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- ROECKNER, E.; BROKOPF, R.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; HAGEMANN, S.; KORNBLUEH, L.; MANZINI, E.; SCHLESE, U.; SCHULZWEIDA, U. (2004): The atmosphere general circulation model ECHAM5. Part 2: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution, volume 354 of MPI-Berichte – Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg.
- RUMMUKAINEN, M. (2010): State-of-the-art with regional climate models. – *WIREs Climate Change* **1**, 82–96.
- SALAS-M'ELIA, D.; CHAUVIN, F.; D'EU'É, M.; DOUVILLE, H.; GUEREMY, J.-F.; CHAUVIN, F.; PLANTON, S.; ROYER, J.-F.; TYTECA, S. (2005): Description and validation of the CNRM-CM3 global coupled model. Technical report, Centre National de Recherches Météorologiques, Toulouse, France.
- SALINGER, M. (2005): Climate variability and change: Past, present and future – an overview. – *Clim. Change* **70**, 9–29.
- SPEKAT, A.; ENKE, W.; KREIENKAMP, F. (2006a): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für den Freistaat Sachsen und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Klimasi-mulationen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die Szenarios B1, A1B und A2 (WEREX IV). Endbericht: Transiente Szenarios. Technical Report Werkvertrag 13-0345.42/237, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- SPEKAT, A.; ENKE, W.; KREIENKAMP, F. (2006b): Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für den Freistaat Sachsen und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von globalen Läufen mit ECHAM5/MPI-OM T63L31 2010 bis 2100 für die Szenarios B1, A1B und A2 (WEREX IV). Endbericht: Szenarios für das Einzugsgebiet der Parthe. Technical Report Werkvertrag 13-0345.42/237, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Dresden.
- SPEKAT, A.; KREIENKAMP, F.; ENKE, W. (2006c): ProElbe. Endbericht zum Vorhaben: Bereitstellung regionaler Klimaszenarios auf der Basis von ECHAM5/MPI-OM T63L31 globalen Klimaszenarios bis 2100 für die Szenarios B1, A1B und A2 für das Elbe-Einzugsgebiet. Technical Report, Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie – AZ 13-8802-3521/65.
- 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 T63L31 2010 bis 2100 für die SRES-Szenarios B1, A1B und A2 (Endbericht). Im Rahmen des Forschungs- und Entwicklungsvorhabens: Klimaauswirkungen und Anpassungen in Deutschland - Phase I: Erstellung regionaler Klimaszenarios für Deutschland des Umweltbundesamtes. Technical Report Förderkennzeichen 204 41 138, Umweltbundesamt, Dessau
- SPEKAT, A.; KREIENKAMP, F.; ENKE, W. (2008a): A hybrid statistical-dynamical method for regional climate sce-narios – sensitivity to the employment of different large-scale models. – *EMS Annual Meeting Abstracts* **5**, A-00403–UC2/NWP4–1TH4O–015.

- SPEKAT, A.; KREIENKAMP, F.; ENKE, W. (2008b): Probabilistische Abschätzung regionaler Klimaänderungen der kommenden Dekaden und ihre Unsicherheiten (PArK): Anwendung von Methoden zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen der kommenden Dekaden, Szenarienrechnungen mit WETTREG. Dritter Zwischenbericht. Technical report, Land Baden-Württemberg, vertreten durch das Umweltministerium (UM), dieses vertreten durch die Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- UPPALA, S.; ALLBERG, P. K.; SIMMONS, A.; ANDRAE, U.; COSTA BECHTOLD, DA V.; FIORINO, M.; HASELER, J. G. J.; HERNANDEZ, A.; KELLY, G.; LI, X.; ONOGI, K.; SAARINEN, S.; SOKKA, N.; ALLAN, R.; ANDERSSON, E.; ARPE, K.; BALMASEDA, M.; BELJAARS, A.; VAN DE BERG, L.; BIDLOT, J.; BORMANN, N.; CAIRES, S.; CHEVALLIER, F.; DETHOF, A.; DRAGOSAVAC, M.; FISHER, M.; FUENTES, M.; HAGEMANN, S.; H'O LM, D.; ISAKSEN, B. H. L.; JANSSEN, P.; JENNE, R.; MCNALLY, A.; MAHFOUF, J.-F.; MORCRETTE, J.-J.; RAYNER, N.; SAUNDERS, R.; SIMON, P.; STERL, A.; TRENBERTH, K.; UNTCH, A.; VASILJEVIC, D.; VITERBO, P.; WOOLLEN, J. (2005): The ERA-40 reanalysis. – *Quart. J. Roy. Met. Soc.* **131**, 2961–3012.
- VAN DER LINDEN, P.; MITCHELL, J. (Eds.) (2009): ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. – Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK.
- WANG, X.; SWAIL, V.; ZWIERS, F. (2006): Climatology and changes of extra-tropical cyclone activity: Comparison of ERA40 with NCEP/NCAR reanalysis for 1958–2001. – *J. Climate* **19**, 3145–3166.
- WOODS, A. (2006): Medium-Range Weather Prediction. The European Approach. The Story of The European Center for Medium-Range Weather Forecasts – Springer, New York.

**Herausgeber:**

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)  
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden  
Telefon: +49 351 2612-0  
Telefax: +49 351 2612-1099  
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de  
www.smul.sachsen.de/lfulg

**Autoren:**

Frank Kreienkamp, Arne Spekat, Wolfgang Enke  
CEC Potsdam GmbH  
David-Gilly-Str. 1, 14469 Potsdam  
Telefon: + 49 331-7452301  
E-Mail: cec@cec-potsdam.de

**Redaktion:**

Dr. Johannes Franke  
LfULG; Abteilung Klima, Luft, Lärm, Strahlen/Referat Klima, Luftqualität  
Söbrigener Str. 3a | 01326 Dresden  
Telefon: + 49 351 2612-5116  
Telefax: + 49 351 2612-5099  
E-Mail: johannes.franke@smul.sachsen.de

**Titelfoto:**

Andreas Hoy

**Redaktionsschluss:**

22.11.2011

**Hinweis:**

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

**Verteilerhinweis**

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben. Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinarbeit des Herausgebers zu Gunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.