



Abschätzung der möglichen klimatischen Gegebenheiten auf der Basis des 2 Grad Ziels für die Region Hessen

Bericht

HLUG-Vertrag 4500417822

Frank Kreienkamp und Arne Spekat

Erweiterte Fassung. Stand: 28. Oktober 2009

Ausführende

Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH
David-Gilly-Straße 1
14469 Potsdam

Disclaimer

Die in diesem Bericht gezeigten Darstellungen beruhen auf Basisdaten, die von Dritten erzeugt wurden (Reanalysen, globale Klimamodell-Szenariorechnungen und Beobachtungsdaten). Die Firma Climate and Environment Consulting Potsdam GmbH übernimmt keine Verantwortung oder Haftung für deren Qualitätskontrolle und geht bei der Anwendung der Regionalisierungsmethode und der Interpretation der Resultate von einer höchstmöglichen Qualität der Basisdaten aus.

Die mit den globalen Klimamodellen errechneten Szenarios basieren ihrerseits auf Szenarios der Entwicklung der Weltbevölkerung, der Wirtschaft und anderer Globalisierungsfaktoren, für deren Richtigkeit oder Eintreffen keine Garantie übernommen werden kann. Diese Annahmen entsprechen aber dem aktuellen Stand der Wissenschaft, so dass eine bestmögliche Eintreffens-Wahrscheinlichkeit angenommen werden kann.

Somit gilt auch für die ausgelieferten Daten, dass deren Aussagekraft in Relation mit der Qualität der Basisdaten zu sehen ist. Die Resultate der statistischen Regionalisierung sind nach bestem Wissen und Gewissen entsprechend dem aktuellen Stand der Wissenschaft gewonnen worden.

Kurzfassung

Die Untersuchung geht der Frage nach, zu welchen Zeithorizonten das globale Zwei-Grad-Ziel in Abhängigkeit von den SRES Szenarios **A1B**, **A2** und **B1** überschritten wird. Die Daten stammen von den Läufen des Klimamodells ECHAM5/MPI-OM T63L31. Zunächst ist aus den 20C-Läufen (Jahre 1860–89) von ECHAM5 das vorindustrielle Niveau der globalen Jahresmitteltemperatur zu bestimmen. Danach werden die drei SRES-Szenarios ausgewertet und dasjenige Jahr bestimmt, zu dem die Global gemittelte Temperaturzunahme 2°C ist. Um diese Jahre werden symmetrisch 30-jährige Perioden festgesetzt, die das Szenariospezifische Klima beim Erreichen des Zwei-Grad-Horizonts definieren. Für **A1B** ist dies 2036–2065, für **A2** ist es 2041–2070 und für **B1** 2051–2080.

Diese Studie zeigt, dass sich Mitteleuropa bisher stärker erwärmt hat als im globalen Mittel. Dieser Effekt setzt sich auch in den Szenarien für die Zukunft fort. Allerdings zeigen die Ergebnisse eine gewisse Skalenabhängigkeit, denn die regionalen Klimamodelle CCLM, REMO und WETTREG weisen nicht so große Unterschiede zum globalen Mittel auf, wie ein regionaler Ausschnitt des Globalmodells, das 12 Gitterpunkte in Mitteleuropa umfasst.

Im Bericht werden an vielen Stellen die Signale mit einer Genauigkeit von 2 Nachkommastellen angegeben. Dieses ist im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchung notwendig. Rundungen könnten hier zu ungewollten Auf- oder Abrundungen führen. Belastbare Aussagen im Rahmen einer Anpassungsstrategie sind mit dieser Genauigkeit aber nicht möglich.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zwei Grad Erwärmung	1
1.2	Zum Vorhaben	3
2	Daten	5
2.1	Globales Klimamodell ECHAM5	5
2.2	Regionales Dynamisches Klimamodell COSMO-CLM	5
2.3	Regionales Dynamisches Klimamodell REMO	6
2.4	Regionales Statistisches Klimamodell WETTREG	6
3	Resultate	9
3.1	Ermittlung des vorindustriellen Temperaturniveaus	9
3.2	Ermittlung des Zwei-Grad-Zeithorizonts	11
3.3	Mitteleuropa im globalen Modell	12
3.4	Hessen in den Regionalmodellen	14
4	Fazit	19
	Literaturverzeichnis	23
	Anhänge	I
I	Anhänge	I
A	Diagramme zu den Regionalmodell-Ergebnissen	III
A.1	CCLM	III
A.2	REMO	XII
A.3	WETTREG-Hessen Transient	XX

Abbildungsverzeichnis

1.1	(nach [Trenberth u. a. 2007], dort Abb. 3.1, S. 242) Jährliche Abweichungen der globalen Lufttemperatur über Landoberflächen [°C], 1850 bis 2005, relativ zum Mittel 1961 bis 1990 für die Daten von CRUTEM3, aktualisiert von [Brohan u. a. 2006]. Die geglätteten Kurven zeigen dekadische Variationen, berechnet nach [Trenberth u. a. 2007], Anhang 3.A. Neben der schwarzen Kurve von CRUTEM3 finden sich diejenigen von NCDC [Smith und Reynolds 2005] (blau), GISS [Hansen u. a. 2001] (rot) und [Lugina u. a. 2005] (grün). Die gelben Linien (nicht in der Abbildung des IPCC-Berichts enthalten) geben das 30-jährige Mittel der Perioden 1860–1889 und 1971–2000) an.	3
3.1	Jahresmittel der globalen Mitteltemperatur aus den drei 20C-Läufen des Modells ECHAM5 zwischen 1860 und 2000 (drei- und viereckige Symbole). Die Linien geben ein 30-jähriges gleitendes Mittel wieder.	9
3.2	Jahresmittel der globalen Mitteltemperatur aus fünf SRES-Szenarioläufen A1B (2 Läufe), A2 (1 Lauf) und B1 (2 Läufe) des Modells ECHAM5 zwischen 2000 und 2100 (drei- und viereckige Symbole). Die Linien geben ein 30-jähriges gleitendes Mittel wieder.	10
3.3	Wie Abb. 3.2, jedoch fokussiert auf den Zeitraum 2041–2080. Der graue Balken gibt den Bereich des Temperaturanstiegs von 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau wieder, die Pfeile markieren, zu welcher Zeit bei den jeweiligen Szenarios das Zwei-Grad-Niveau überschritten wird.	11
3.4	Jahresmittel der Mitteltemperatur für 12 Gitterpunkte Mitteleuropas aus den drei 20C-Läufen des Modells ECHAM5 zwischen 1860 und 2000 (drei- und viereckige Symbole). Die Linien geben ein 30-jähriges gleitendes Mittel wieder.	12
3.5	Jahresmittel der für 12 Gitterpunkte in Mitteleuropa bestimmten 2m-Temperatur aus fünf SRES-Szenarioläufen A1B (2 Läufe), A2 (1 Lauf) und B1 (2 Läufe) des Modells ECHAM5 zwischen 2000 und 2100 (drei- und viereckige Symbole). Die Linien geben ein 30-jähriges gleitendes Mittel wieder.	13

3.6	Lage der Gitterpunkte bzw. Stationen in Hessen bei den verwendeten Regionalmodellen.	15
4.1	Abhängigkeit der Schwankungsbreite bei der Temperaturdifferenz zwischen zwei A1B-Läufen von der Länge des Mittelungszeitraums. Quelle: Vortrag <i>Regionale Klimaprojektionen mit COSMO-CLM</i> von K. Keuler (BTU Cottbus), Annaberger Klimatage, 14.–15.5.2008; http://www.tu-freiberg.de/ze/mz/Annaberg/programm.html	21
4.2	Wie Abb. 4.1, jedoch für den Niederschlag. Quelle: Vortrag <i>Hinweise zur Nutzung von CLM-Ergebnissen</i> von K. Keuler (BTU Cottbus), CLM Workshop, Hamburg, 7.12.2007; http://www.mad.zmaw.de/projects-at-md/sg-adaptation/workshops/clm-workshop-2007/	22
A.1	Verlauf der von CCLM für Hessen simulierten Anstiegs der Jahresmitteltemperatur als Abweichung vom Mittel 1971–2000. Die durchgezogene Linie gibt ein 11-jähriges gleitendes Mittel (Bezugspunkt ± 5 Werte) wieder. Modellantrieb: Lauf 1 und 2 des ECHAM5-Szenarios A1B.	IV
A.2	Wie Abb. A.1 jedoch für CCLM, Lauf 1 und 2 des ECHAM5-Szenarios B1.	V
A.3	Wie Abb. A.1, jedoch für den Jahresniederschlag von CCLM, Lauf 1 und 2 des ECHAM5-Szenarios A1B.	VI
A.4	Wie Abb. A.2, jedoch für den Jahresniederschlag von CCLM, Lauf 1 und 2 des ECHAM5-Szenarios B1.	VII
A.5	Wie Abb. A.3, jedoch für den Sommerniederschlag, A1B.	VIII
A.6	Wie Abb. A.3, jedoch für den Winterniederschlag, A1B.	IX
A.7	Wie Abb. A.4, jedoch für den Sommerniederschlag, B1.	X
A.8	Wie Abb. A.4, jedoch für den Winterniederschlag, B1	XI
A.9	Verlauf der von REMO für Hessen simulierten Anstiegs der Jahresmitteltemperatur als Abweichung vom Mittel 1971–2000. Die durchgezogene Linie gibt ein 11-jähriges gleitendes Mittel (Bezugspunkt ± 5 Werte) wieder. Modellantrieb: Je ein Lauf mit dem ECHAM5-Szenario A1B.	XII
A.10	Fortsetzung von Abb. A.9. Szenarios A2 und B1.	XIII
A.11	Wie Abb. A.9, jedoch für den Jahresniederschlag von REMO, Szenarios A1B und A2.	XIV
A.12	Fortsetzung von Abb. A.9. Szenario B1.	XV
A.13	Wie Abb. A.11, jedoch für den Sommerniederschlag von REMO, Szenarios A1B und A2.	XVI
A.14	Fortsetzung von Abb. A.13. Szenario B1.	XVII
A.15	Wie Abb. A.11, jedoch für den Winterniederschlag von REMO, Szenarios A1B und A2.	XVIII
A.16	Fortsetzung von Abb. A.15. Szenario B1.	XIX

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

A.17 Verlauf des von WETTREG für Hessen simulierten Anstiegs der Jahresmitteltemperatur als Abweichung vom Mittel 1971–2000. Die durchgezogene Linie gibt ein 11-jähriges gleitendes Mittel (Bezugspunkt ± 5 Werte) wieder. Modellantrieb: Je ein Lauf mit dem ECHAM5-Szenario A1B. Rot: Antrieb mit Lauf 1; blau: Antrieb mit Lauf 0.	XX
A.18 Fortsetzung von Abb. A.17. Szenarios A2 und B1.	XXI
A.19 Wie Abb. A.17, jedoch für den Jahresniederschlag von WETTREG, Szenarios A1B und A2.	XXII
A.20 Fortsetzung von Abb. A.19. Szenario B1.	XXIII
A.21 Wie Abb. A.19, jedoch für den Sommerniederschlag von WETTREG, Szenarios A1B und A2.	XXIV
A.22 Fortsetzung von Abb. A.21. Szenario B1.	XXV
A.23 Wie Abb. A.19, jedoch für den Winterniederschlag von WETTREG, Szenarios A1B und A2.	XXVI
A.24 Fortsetzung von Abb. A.23. Szenario B1.	XXVII

Tabellenverzeichnis

3.1	Globale Jahresmitteltemperatur [°C] für verschiedene Zeitbereiche aus den drei 20C-Läufen von ECHAM5.	10
3.2	Jahresmitteltemperatur [°C] errechnet aus 12 Gitterpunkten Mitteleuropas für verschiedene Zeitbereiche aus den drei 20C-Läufen von ECHAM5.	12
3.3	Jahresmitteltemperatur [°C], errechnet aus 12 ECHAM5-Gitterpunkten Mitteleuropas. Die Angaben für das vorindustrielle Niveau sind aus 20C-Läufen, Zeitraum 1860–1889, bestimmt. Zur Orientierung sind zusätzlich die Temperaturniveaus der Periode 1971–2000 sowie die Anstiegsraten der Szenarios bezüglich dieser Periode (letzte Zeile) enthalten. Die Angaben zu den SRES-Szenarios beziehen sich auf Zeitbereiche, die der Betrachtung der Zwei-Grad-Horizonte für die globale Mitteltemperatur entstammen.	14
3.4	Änderung der Jahresmitteltemperatur auf der regionalen Skala (Bezugsregion: Hessen) auf Basis der Regionalmodelle CCLM, REMO und WETTREG. Das Änderungssignal bezieht sich auf den Zeitraum 1971–2000 zum SRES Szenario-spezifischen Zeitbereich in der Zukunft A1B : (2036–2065); A2 : (2041–2070); B1 : (2051–2080)	16
3.5	Wie Tab. 3.4, jedoch für die Änderung der Jahressumme des Niederschlags in Prozent.	17
3.6	Wie Tab. 3.4, jedoch für die Änderung der Sommer-Summe (Juni–Juli–August) des Niederschlags in Prozent.	17
3.7	Wie Tab. 3.4, jedoch für die Änderung der Winter-Summe (Dezember–Januar–Februar) des Niederschlags in Prozent.	17
4.1	Änderung der Jahresmitteltemperatur a) auf der globalen Skala, b) auf der regionalen Skala auf der Basis von 12 Gitterpunkten der Region Mitteleuropa im Globalmodell und c) auf der regionalen Skala (Bezugsregion: Hessen) auf Basis der Regionalmodelle CCLM, REMO und WETTREG. Das Änderungssignal bezieht sich auf die Zeiträume 1860–1889 und 1971–2000, jeweils zum SRES Szenario-spezifischen Zeitbereich in der Zukunft A1B : (2036–2065); A2 : (2041–2070); B1 : (2051–2080)	20

Abschnitt 1

Einleitung

1.1 Zwei Grad Erwärmung

Das politische Zwei-Grad-Ziel ist eine Referenzmarke für diejenige Temperaturerhöhung, die im Zuge des Klimawandels nicht überschritten werden sollte. Sie ist Inhalt zwischenstaatlicher Diskussionen und Vereinbarungen. In der Vergangenheit gab es dazu mehrere EU-Ratsbeschlüsse, wie etwa vom 1939. Ratstreffen in Luxemburg 1996, wo ein Niveau der global gemittelten Erwärmung von 2 Grad *über dem vorindustriellen Niveau* sowie Konzentrationen des CO₂-Äquivalents unter 550 ppm als Richtwert für Begrenzungs- und Reduktionsbemühungen eingestuft wurde. In späteren Jahren wurde diese Einstufung präzisiert und es wurde anerkannt, dass die Treibhausgas-Emissionen, allen voran CO₂, nach einem noch ausstehenden Höhepunkt rasch zurück gehen müssen, damit eine Stabilisierung der Konzentrationen auf einem CO₂-Äquivalent deutlich unter 550 ppm möglich wird. Nur so sei ein Überschreiten der Temperaturschwelle vermeidbar. Auf dem G8-Gipfel 2007 in Heiligendamm erstmals angestrebt, wurde der internationale Zwei-Grad-Konsens beim G8-Gipfel von L'Aquila 2009 deutlich verstärkt.

Warum 2°C? Im Zuge des IPCC-Prozesses wurden im Dritten Sachstandsbericht von der Arbeitsgruppe II (Impacts, Adaptation, Vulnerability) [IPCC 2001] erstmals im Synthesekapitel 19 (S. 913ff., insbes. Abb. 19-7) Anstiegsraten der globalen Mitteltemperatur und Risikoeinschätzungen für relevante Komplexe wie bedrohte Ökosysteme, Klimaextreme oder die Zahl der von negativen Einflüssen betroffenen Menschen miteinander in Verbindung gebracht. Schon dort wurde darauf hingewiesen, dass mehr als ein halbes Grad globaler Temperaturanstieg bereits seit dem Beginn des 20. Jahrhunderts zu verzeichnen sei. Der Wert von 2°C wird als ein Kompromiss zwischen dem Machbaren und dem Fatalen angesehen. Sein deutliches Übertreffen wird im verstärkten Maße für die Menschheit negative Auswirkungen zur Folge haben, die durch ihre Kombination eine zusätzliche Dynamik entwickeln. Es ist dabei wichtig, im Blick zu behalten, dass, auch wenn die Temperaturentwicklung unterhalb einer Zunahme von 2° bleibt, keine Garantie besteht, die negativen Auswirkungen zu verhindern. Allerdings wird die Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieser Auswirkungen in einem solchen Fall geringer. Bevor das Zwei-Grad-Ziel in der Wissenschafts-Community anerkannt

wurde, existierte verbreitet das Gedankenmodell eines Drei-Grad-Anstiegs¹, wie etwa in [Kerr 2004] publiziert.

Der Vierte Sachstandsbericht des IPCC beinhaltet, insbesondere im Beitrag der Arbeitsgruppe II, eine wesentlich detaillierte Fortführung des Zwei-Grad-Ansatzes mit Bezug zu Themenkomplexen wie Biodiversität, Gesundheit, Ernährung, Wasserqualität, Wasserverfügbarkeit und Hochwasser [IPCC 2007a]. Auch dort wurden verschiedene starke Erwärmungsraten mit der zunehmenden Bedrohlichkeit der ausgelösten Impakte in Verbindung gebracht. In jüngster Zeit erschienen zum Thema mehrere wichtige Publikationen, wie etwa [Hare und Meinshausen 2004], [Hansen u. a. 2008], [Meinshausen u. a. 2009] oder [Allen u. a. 2009].

Es ist anerkannte Praxis, Klimasignale als Differenzen von Klimaparametern zwischen zwei Zeitbereichen zu errechnen. Um den Einfluss der dekadischen Variabilität zu reduzieren werden die dazu verwendeten Werte für Zeiträume in der Größenordnung von 30 Jahren erhoben. Für das Klima der Gegenwart wird verbreitet der Zeitraum 1971–2000 benutzt. Die Werte entstammen dabei den 20C-Läufen der Klimamodelle, mit denen das Klimaverhalten des 20. Jahrhunderts simuliert wird².

Das Zwei-Grad-Ziel ist jedoch anders formuliert, denn es bezieht sich nicht auf den zukünftigen Temperaturanstieg im Vergleich zur Gegenwart (etwa 1971–2000) sondern zum *vorindustriellen Niveau*. Laut Roeckner (MPI Hamburg, *pers. comm.*, 2009) sollte das Modell ECHAM5 in seinen 20C-Läufen dieses Niveau gut durch den Zeitabschnitt 1860–89 annähern. Frühe, relativ präzise Aussagen zu den Temperatur-Anstiegsraten gibt es bei [Vinnikov u. a. 1990], wo für beide Hemisphären aus den Daten seit der Mitte des 19. Jahrhunderts ein Temperaturanstieg von $0,5^{\circ}\text{C}$ pro 100 Jahre bestimmt wurden. In [IPCC 2007b], dort besonders in [Trenberth u. a. 2007] finden sich, aus Messungen ermittelt, Anstiegsraten der globalen Mitteltemperatur von rund $0,7^{\circ}\text{C}$ zwischen der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und dem Zeitraum 2001–2005. Werden 30-jährige Zeiträume (1860–89 zu 1971–2000) angesetzt, so liegt der Anstieg bei rund $0,5^{\circ}\text{C}$ (vgl. Abb. 1.1). In der Konsequenz heißt dies in jedem Fall, dass ein Teil des Zwei-Grad-Ziels bereits „aufgebraucht“ ist.

¹Auf dem Stand der Klimamodellierung in den späten 1970ern wurde ein Intervall des wahrscheinlichen Anstiegs der globalen Mitteltemperatur von $1,5$ – $4,5^{\circ}\text{C}$ angenommen, was dem Wertekorridor aus den beiden (!) damals von Manabe bzw. Hansen verfügbaren globalen Klimamodellen entsprach und 3°C liegt in der Mitte dieses Intervalls.

²Würden statt dessen die Messwerte aus diesem Zeitraum verwendet, so besteht die Gefahr, dass systematische Abweichungen (Bias) des Klimamodells bei der Berechnung der Differenzen zum simulierten zukünftigen Klima zu Buche schlagen. Für Betrachtungen des Klimasignals ist es dennoch von großer Bedeutung, einen Eindruck davon zu erhalten, wie realitätsnah die 20C Simulationen das tatsächlich eingetretene Klima reproduzieren. Dies ist sehr umfangreich z.B. in [Randall u. a. 2007] beschrieben.

1.2 Zum Vorhaben

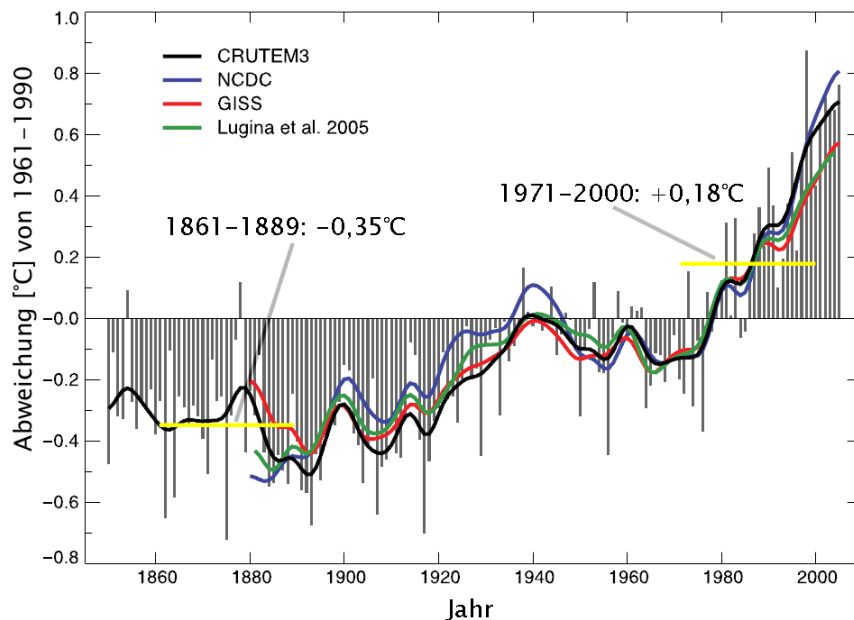


Abbildung 1.1: (nach [Trenberth u. a. 2007], dort Abb. 3.1, S. 242) Jährliche Abweichungen der globalen Lufttemperatur über Landoberflächen [°C], 1850 bis 2005, relativ zum Mittel 1961 bis 1990 für die Daten von CRUTEM3, aktualisiert von [Brohan u. a. 2006]. Die geglätteten Kurven zeigen dekadische Variationen, berechnet nach [Trenberth u. a. 2007], Anhang 3.A. Neben der schwarzen Kurve von CRUTEM3 finden sich diejenigen von NCDC [Smith und Reynolds 2005] (blau), GISS [Hansen u. a. 2001] (rot) und [Lugina u. a. 2005] (grün). Die gelben Linien (nicht in der Abbildung des IPCC-Berichts enthalten) geben das 30-jährige Mittel der Perioden 1860–1889 und 1971–2000) an.

1.2 Zum Vorhaben: Abschätzung der möglichen klimatischen Gegebenheiten auf der Basis des 2 Grad Ziels für die Region Hessen

Es soll, mit Blick auf die Klimafolgen, Hintergrundmaterial zur Gewinnung eines weiter entwickelten Bildes des Klimawandels bereit gestellt werden. Die Leitgröße ist dabei die globale Mitteltemperatur, denn das Zwei-Grad-Ziel orientiert sich daran. Der Ansatz ist wie folgt:

1. Das Temperaturniveau der vorindustriellen Zeit ist zu bestimmen. Dazu wird das globale Klimamodell ECHAM5 hinsichtlich der Jahresmitteltemperatur für die Periode 1860–89 (lt. Roeckner, *pers. comm.*, 2009) ausgewertet.
2. Es wird für die verschiedenen Szenario-Rechnungen von ECHAM5 untersucht, zu welcher Zeit diese das Niveau der globalen Jahrestemperatur der vorindustriellen Zeit plus 2°C erreichen.
3. Für das Land Hessen erfolgen Aussagen bezüglich der dort zu erwartenden

Klimaparameter Temperatur und Niederschlag in den in Schritt 2 bestimmten Zeitbereichen. Dazu werden mehrere Regionalisierungsmodelle angewandt:

- COSMO-CLM
- REMO
- WETTREG (HLUG-Transient).

4. Die Ergebnisse werden grafisch aufbereitet.

Abschnitt 2

Daten

In den verschiedenen Phasen des Vorhabens kommen die nachfolgend kurz beschriebenen Daten zum Einsatz.

2.1 Globales Klimamodell ECHAM5

Die Leitgröße für die Rechnungen ist die globale Mitteltemperatur. Dafür werden zur Bestimmung des vorindustriellen Temperaturniveaus die 20C-Daten des globalen Modells ECHAM5/MPI-OM T63L31 ([Roeckner u. a. 2003] und [Roeckner u. a. 2004]) verwendet. Mit diesem Modell wurden drei 20C-Läufe durchgeführt, die alle in der Untersuchung zum Einsatz kommen.

Aussagen zum zukünftigen Temperaturanstieg werden ebenfalls mit dem Modell ECHAM5/MPI-OM T63L31 gewonnen. Im Rahmen des IPCC-Prozesses im Vorfeld des vierten Sachstandsberichts [IPCC 2007b] erfolgten dazu Rechnungen mit den Treibhausgas-Emissionsszenarios A1B, A2 und B1¹

2.2 Regionales Dynamisches Klimamodell COSMO-CLM

Das Regionalisierungsmodell CLM (jetzt CCLM: COSMO-CLM (**C**onsortium for **S**mall Scale **M**odeling)) bedient sich einer einstufigen Nestungsstrategie in das wesentlich gröber auflösende globale Klimamodell ECHAM5/OM1, d.h. die Anfangs- und Randwerte werden von diesem Modell bezogen. CCLM ist ein nicht-hydrostatisches Modell. Die Beschreibung der sub-skaligen Prozesse entspricht teilweise derjenigen des Lokal-Modells (LM), das beim Deutschen Wetterdienst in Offenbach zur Wettervorhersage entwickelt worden ist.

Eine umfangreiche Dokumentation des Basismodells COSMO-LM (in Englisch) findet sich unter:

<http://www.cosmo-model.org/content/model/documentation/core/default.htm>

¹Die Szenarios sind ausführlich in [Nakićenović u. a. 2000] beschrieben.

Weitere Publikationen zu CCLM sind [Böhm u. a. 2006] sowie [Rockel u. a. 2008a] in [Rockel u. a. 2008b]. CCLM wird im Vorhaben eingesetzt, um für einen Zeitbereich, in dem der Anstieg der globalen Mitteltemperatur die Größenordnung von 2°C erreicht, regionalisierte Klimaaussagen für Hessen zu erhalten.

2.3 Regionales Dynamisches Klimamodell REMO

REMO (**RE**gionales **MO**dell) ist ebenfalls ein hoch aufgelöstes Dynamisches Modell. Es benutzt für seine interne Berechnung die mathematische Repräsentation und die Ansätze zur indirekten Beschreibung von physikalischen Prozessen im Wesentlichen die Algorithmen des globalen Modells ECHAM5. Dabei wird eine nichthydrodynamische Modellierungsstrategie angewandt, d.h. die Atmosphäre wird als im hydrostatischen Gleichgewicht befindlich angesehen. Dies gilt streng genommen nur in Abwesenheit atmosphärischer Vertikalbewegungen; in nichthydrodynamischen Modellen wird eine Größenordnungsabschätzung vorgenommen, derzufolge die horizontale Skala deutlich größer als die vertikale Skala ist.

Die Besonderheit bei REMO ist eine doppelte Nesting-Strategie: Zunächst wird in einem Fenster von Südgrönland bis zum Nahen Osten in einer gegenüber dem antreibenden Modell bereits deutlich höheren Auflösung von 50×50 km ein erstes Nesting vorgenommen. Danach erfolgt ein weiteres Nesting mit einer Gitterweite von 10×10 km in einem Deutschland umschließenden Fenster, das Deutschland und den Alpenraum beinhaltet.

Eine Dokumentation von REMO findet sich in [Jacob und Podzun 1997] und [Jacob u. a. 2008]. REMO wird im Vorhaben eingesetzt, um für einen Zeitbereich, in dem der Anstieg der globalen Mitteltemperatur die Größenordnung von 2°C erreicht, regionalisierte Klimaaussagen für Hessen zu erhalten.

2.4 Regionales Statistisches Klimamodell WETTREG

WETTREG (**WETT**erlagen-basiertes **REG**ressionsmodell) ist ein statistisches Regionalisierungsverfahren. Bei statistischen Szenarios werden in der Regel Beziehungen zwischen Klimaparametern in einer „Lernphase“ der Modellierung entwickelt und dann auf die Zukunft übertragen. Die WETTREG-Methode orientiert sich dabei an dieser Argumentekette: (i) Globale Modelle mögen nicht zureichend bei der kleinräumigen Reproduktion von Klimaparametern sein, aber sie besitzen die Fähigkeit, die großräumige atmosphärische Zirkulation treffend wiederzugeben. (ii) Ähnliche Zirkulationsmuster (Wetterlagen) besitzen auch ähnliche lokale Auswirkungen, beispielsweise bezüglich Temperatur oder Niederschlag. (iii) Die Analyse von zeitlich veränderlichen Klimaentwicklungen ist möglich, da die globalen Klimamodelle dies durch veränderliche Häufigkeit und Ausprägung der Zirkulationsmuster anzeigen.

2.4 Regionales Statistisches Klimamodell WETTREG

Zur Verbindung großräumiger Zirkulationsmuster mit deren regionalen/lokalen Auswirkungen werden die folgenden Datenarten eingesetzt:

- Reanalysen von NCEP/NCAR [Kalnay u. a. 1996] der Jahre 1971/2000 für den Bereich „erweitertes Mitteleuropa“ mit den daraus abgeleiteten Wetterlagen für diese Region. Aus den Feldern wurden außerdem potenzielle Prediktoren bestimmt.
- 20C- sowie Szenariorechnungen des globalen Klimamodells ECHAM5/MPI-OM T63L31 (s.o.). Der Zeithorizont umfasst für die WETTREG-Rechnungen die Jahre 1971 bis 2100, bis 2000 als so genannter 20C-Lauf, danach als Szenariorechnungen für die SRES-Szenarios **A1B**, **A2** und **B1**. Aus den Feldern wurden ebenfalls potenzielle Prediktoren bestimmt.
- Messwerte von Klima- und Niederschlagsstationen.

Eine Dokumentation von WETTREG findet sich in [Enke u. a. 2005a], [Enke u. a. 2005b] und [Spekat u. a. 2007a]. WETTREG wurde in der Vergangenheit vielfach eingesetzt, um regionale Szenarios für Hessen (Berichte erfolgten z.B. in [Enke 2003], [Enke u. a. 2006], [Spekat u. a. 2007b] oder im Rahmen von INKLIM [HLUG 2005]) aber auch andere Bundesländer/Freistaaten sowie das gesamte Bundesgebiet zu gewinnen. Im Vorhaben wird WETTREG in der Version HLUG-Transient, Realisierung 0 und 1 eingesetzt, um für einen Zeitbereich, in dem der Anstieg der globalen Mitteltemperatur die Größenordnung von 2°C erreicht, regionalisierte Klimaaussagen für Hessen zu erhalten.

Abschnitt 3

Resultate

3.1 Ermittlung des vorindustriellen Temperaturniveaus

Es wurde aus den an den ECHAM5-Modellgitterpunkten vorliegenden Daten der 2m-Temperatur globale Mittel und daraus Jahresmittelwerte berechnet. Für die drei 20C-Läufe von ECHAM5 haben diese über den Zeitraum 1860–2000 den in Abb. 3.1 dargestellten Verlauf.

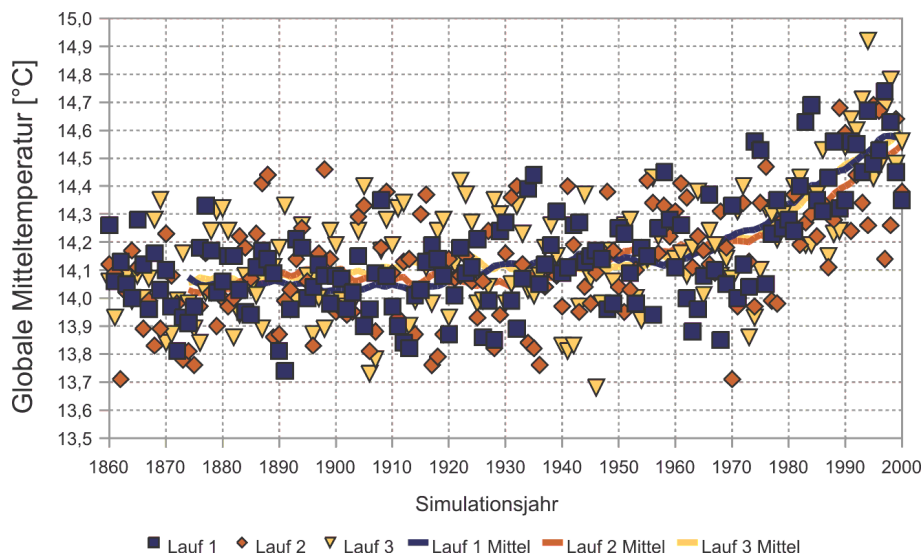


Abbildung 3.1: Jahresmittel der globalen Mitteltemperatur aus den drei 20C-Läufen des Modells ECHAM5 zwischen 1860 und 2000 (drei- und viereckige Symbole). Die Linien geben ein 30-jähriges gleitendes Mittel wieder.

Anmerkung zu den Kurven in Abb. 3.1: Für das 30-jährige gleitende Mittel einer Temperatur des Jahres T_x werden die Temperaturwerte der 14 vorausgehenden und der 15 nachfolgenden Jahreswerte verwendet. Da die ersten 15 Werte bis 1873 nicht über ein derartiges „Vorleben“ verfügen, beginnen die Kurven für

Tabelle 3.1: Globale Jahresmitteltemperatur [°C] für verschiedene Zeitbereiche aus den drei 20C-Läufen von ECHAM5.

<i>Periode</i>	<i>Lauf 1</i>	<i>Lauf 2</i>	<i>Lauf 3</i>
1860–1889	14,07	14,03	14,06
1971–2000	14,40	14,30	14,38
Differenz	0,37	0,27	0,32

die drei 20C-Läufe erst mit dem Jahr 1874. Am Ende von Abb. 3.1 sind die Kurven durchgehend, da die 20C-Läufe von ECHAM5 über den Jahrtausendwechsel hinaus gehen und die Zeitachse der Abbildung im Jahr 2000 abschneidet.

Aus 30 Jahreswerten der globalen Mitteltemperatur, wie sie in den drei 20C-Läufen von ECHAM5 errechnet wurden, entstanden die in Tab. 3.1 aufgeführten Werte. Für die vorindustrielle globale Jahresmitteltemperatur, aus ECHAM5-Daten errechnet, wird damit ein Bereich von 14,0 bis 14,1°C festgesetzt. Die Ansteigeraten bis zum Ende des 20. Jahrhunderts betragen rund 0,3°C, was knapp unter dem in [Trenberth u. a. 2007] publizierten, aus Messungen ermittelten Wert von rund 0,5°C liegt.

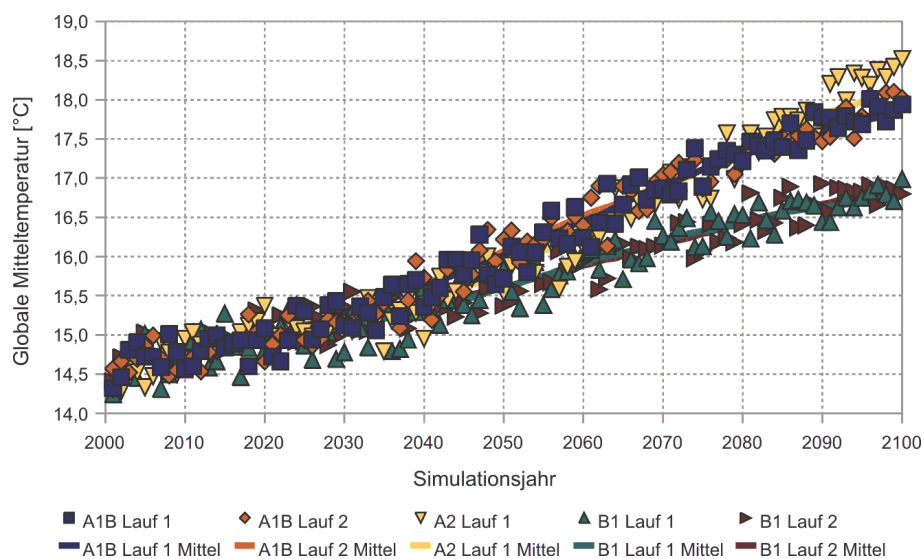


Abbildung 3.2: Jahresmittel der globalen Mitteltemperatur aus fünf SRES-Szenarioläufen **A1B** (2 Läufe), **A2** (1 Lauf) und **B1** (2 Läufe) des Modells ECHAM5 zwischen 2000 und 2100 (drei- und viereckige Symbole). Die Linien geben ein 30-jähriges gleitendes Mittel wieder.

3.2 Ermittlung des Zwei-Grad-Zeithorizonts

Um den Zwei-Grad-Horizont zu ermitteln wird die Jahresmitteltemperatur in den SRES-Szenarioläufen **A1B**, **A2** und **B1** von ECHAM5 ausgewertet. Abb. 3.2 stellt die dazu erforderliche Grundlage für die gewählten 5 Szenarioläufe dar.

Es ist erkennbar, dass die Modellierungen auf der Grundlage von Szenario **A1B** für einen langen Zeitraum des 21. Jahrhunderts die höchste globale Mitteltemperatur errechnen. Szenario **A2**, das von seiner Anlage her das Potenzial zu besonders starken Temperaturtrends besitzt, beginnt in einem etwas niedrigen Wertebereich und erreicht erst zum Ende des 21. Jahrhunderts einen etwas höheren Bereich als **A1B**. Laut Szenario **B1** treten vergleichsweise niedrigere globale Mitteltemperaturwerte auf.

Abb. 3.3 zeigt einen Ausschnitt von 2040 bis 2080 aus den zeitlichen Verläufen der Jahresmitteltemperatur. Basierend auf dem aus ECHAM5-20C-Daten errechneten vorindustriellen globalen Jahresmittel der 2m-Temperatur von $14,0\text{--}14,1^\circ\text{C}$ wird ein Bereich von $16,0\text{--}16,1^\circ\text{C}$ angesetzt, der in Abb. 3.3 grau gekennzeichnet ist.

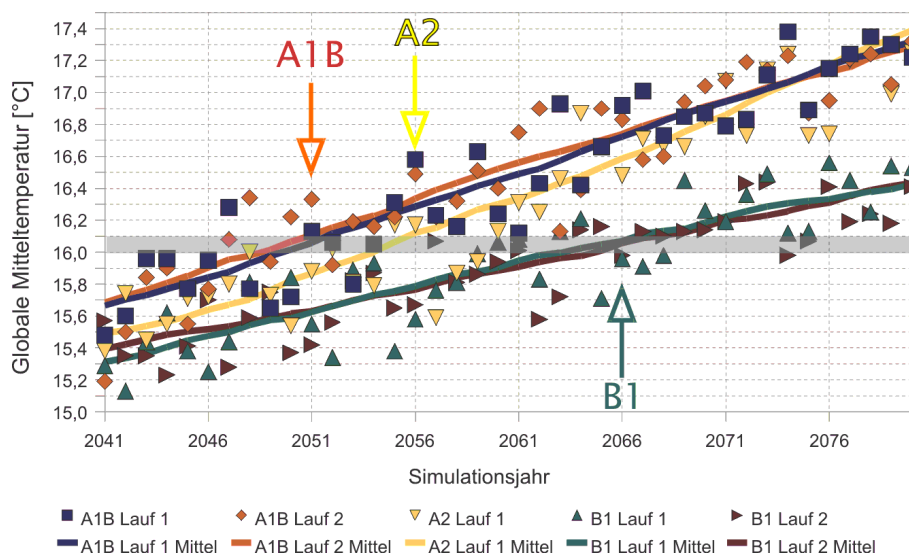


Abbildung 3.3: Wie Abb. 3.2, jedoch fokussiert auf den Zeitraum 2041–2080. Der graue Balken gibt den Bereich des Temperaturanstiegs von 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau wieder, die Pfeile markieren, zu welcher Zeit bei den jeweiligen Szenarios das Zwei-Grad-Niveau überschritten wird.

Somit können diejenigen Zeitbereiche identifiziert werden, zu denen für die drei SRES-Szenarios der Zwei-Grad-Horizont durchstoßen wird.

- **A1B:** ≈ 2050 , d.h. ein Bereich von 2036–2065 wird als repräsentativ angenommen.
- **A2:** ≈ 2055 ; der repräsentative Zeitbereich ist somit 2041–2070.
- **B1:** ≈ 2065 ; das entspricht einem repräsentativen Zeitbereich von 2051–2080.

Was ist die regionale Konsequenz dieser Betrachtung des globalen Temperaturmittels? Darauf gehen die folgenden Abschnitte ein.

3.3 Mitteleuropa im globalen Modell

Als erste Stufe der Regionalbetrachtung wurden die Resultate an 12 Gitterpunkten (49,43°N bis 53,15°N und 7,50°O bis 13,13°O) des globalen Modells ECHAM5 zu einem Mitteleuropawert zusammengefasst. Einen einzelnen Gitterpunkt des Globalmodells auszuwerten würde zu wenig belastbaren Resultaten führen. Der Verlauf von 1860–2000, aus den 20C-Resultaten von ECHAM5 errechnet, findet sich in Abb. 3.4. Tab. 3.2 gibt für den Mitteleuropa-Ausschnitt die Temperaturwerte für die Zeitbereiche 1860–1889 und 1971–2000 an, analog zu den Globalwerten in Tab. 3.1.

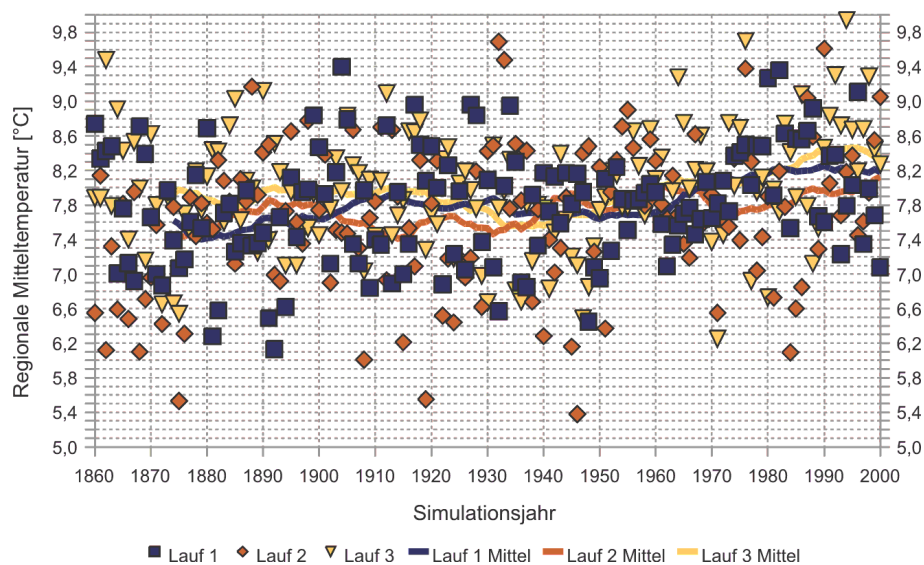


Abbildung 3.4: Jahresmittel der Mitteltemperatur für 12 Gitterpunkte Mitteleuropas aus den drei 20C-Läufen des Modells ECHAM5 zwischen 1860 und 2000 (drei- und viereckige Symbole). Die Linien geben ein 30-jähriges gleitendes Mittel wieder.

Tabelle 3.2: Jahresmitteltemperatur [°C] errechnet aus 12 Gitterpunkten Mitteleuropas für verschiedene Zeitbereiche aus den drei 20C-Läufen von ECHAM5.

<i>Periode</i>	<i>Lauf 1</i>	<i>Lauf 2</i>	<i>Lauf 3</i>
1860–1889	7,62	7,36	7,93
1971–2000	8,19	7,85	8,25
Differenz	0,56	0,49	0,32

3.3 Mitteleuropa im globalen Modell

Es fällt auf, dass gegenüber dem globalen Temperaturmittel bei der Auswertung der 12 Gitterpunkte Mitteleuropas eine stärkere Schwankung von Lauf zu Lauf auftritt. Zudem ist bei der Betrachtung der Mitteleuropa-Gitterpunkte von ECHAM5 der Temperaturanstieg bis zum Ende des 20. Jahrhunderts höher als beim Globalmittel und liegt, je nach Lauf, zwischen rund 0,3 und 0,6°C.

Ausgehend von den Temperaturwerten des Zeitraums 1860–89 ist es möglich, die jeweiligen Werte der Mitteleuropa-Temperatur an den in Abschnitt 3.2 ermittelten (globalen) Zwei-Grad-Zeithorizonten der einzelnen Szenarios zu bestimmen.

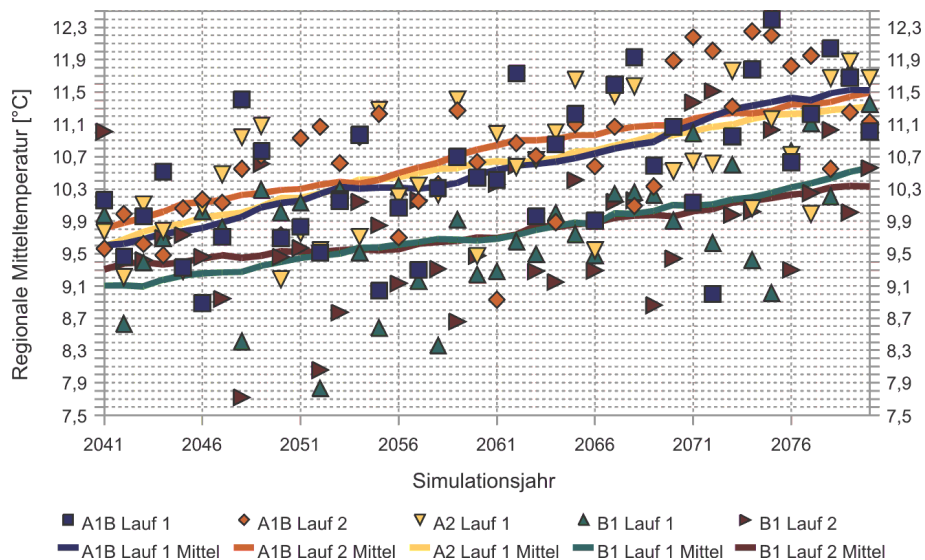


Abbildung 3.5: Jahresmittel der für 12 Gitterpunkte in Mitteleuropa bestimmten 2m-Temperatur aus fünf SRES-Szenarioläufen **A1B** (2 Läufe), **A2** (1 Lauf) und **B1** (2 Läufe) des Modells ECHAM5 zwischen 2000 und 2100 (drei- und viereckige Symbole). Die Linien geben ein 30-jähriges gleitendes Mittel wieder.

Abbildung 3.5 und Tab. 3.3 zeigen, für den Bereich Mitteleuropas errechnet, den zeitlichen Verlauf der Jahresmitteltemperatur zwischen 2041 und 2080 bzw. die Temperatursignale gegenüber dem vorindustriellen Niveau für diesen Bereich.

Die globale Entwicklung der Jahresmitteltemperatur, wie sie von ECHAM5 simuliert wird, verläuft flacher als die regional für Europa bestimmte Temperatur. Sonst würden die Temperaturwerte für die jeweiligen Zeitbereiche ebenfalls 2°C betragen. Sie liegen aber in der regionalen Skala 0,3 bis 0,9°C darüber.

Tabelle 3.3: Jahresmitteltemperatur [°C], errechnet aus 12 ECHAM5-Gitterpunkten Mitteleuropas. Die Angaben für das vorindustrielle Niveau sind aus 20C-Läufen, Zeitraum 1860–1889, bestimmt. Zur Orientierung sind zusätzlich die Temperaturniveaus der Periode 1971–2000 sowie die Anstiegsraten der Szenarios bezüglich dieser Periode (letzte Zeile) enthalten. Die Angaben zu den SRES-Szenarios beziehen sich auf Zeitbereiche, die der Betrachtung der Zwei-Grad-Horizonte für die globale Mitteltemperatur entstammen.

<i>Periode</i>	<i>A1B L1</i>	<i>A1B L2</i>	<i>A2 L1</i>	<i>B1 L1</i>	<i>B1 L2</i>
20C 1860–1889	7,62	7,36	7,62	7,62	7,36
20C 1971–2000	8,19	7,85	8,19	8,19	7,85
A1B 2036–2065	10,13	10,29	—	—	—
A2 2040–2070	—	—	10,42	—	—
B1 2050–2080	—	—	—	9,88	9,86
Δ 1860–1889	2,51	2,93	2,80	2,26	2,50
Δ 1971–2000	1,94	2,44	2,23	1,69	2,01

3.4 Hessen in den Regionalmodellen

Während in Abschnitt 3.3 Daten des *globalen* Modells zur Orientierung herangezogen wurde, und mit jenem keine feinere Auflösung als die Betrachtung Mitteleuropas möglich ist, verfügen *regionale* Modelle über eine Auflösung, die räumlich detaillierte Analysen, beispielsweise für die Fläche Hessens zulässt. Die Lage und Dichte der Gitterpunkte für die Modelle CCLM und REMO sowie die Lage der in WETTREG-HLUG Transient verwendeten Stationen ist in Abb. 3.6 ersichtlich. Analysiert wurden dabei nur diejenigen Gitterpunkte bzw. Stationen, die innerhalb der Grenzen des Bundeslandes Hessen lagen, das sind bei CCLM 67 Gitterpunkte, bei REMO 222 Gitterpunkte und bei WETTREG 30 Klimastationen sowie 296 Niederschlagsstationen.

In Anhang A werden entsprechende Resultate mit den Modellen CCLM, REMO und WETTREG vorgestellt. Dabei stehen Diagramme des zeitlichen Verlaufs des von den Regionalmodellen errechneten Hessen-Mittels für die Temperatur und den Niederschlag für die Szenario-spezifischen, jeweils mit dem Zwei-Grad-Ziel assoziierten Zeitbereiche im Vordergrund.

Die zeitliche Entwicklung der Temperatur ist in den Anhang-Diagrammen A.1, A.2 für CCLM, A.9 für REMO und A.17 für WETTREG aufgeführt. Die Zeitachse ist in diesen Abbildungen jeweils dem 30-jährigen Bereich um den Zeitpunkt, zu dem der globale Zwei-Grad-Horizont für das entsprechende Szenario überschritten wird, angepasst. Allen o.g. Abbildungen ist gemeinsam, dass seit dem Anfang des 21. Jahrhunderts zu Beginn der jeweiligen 30-jährigen Periode

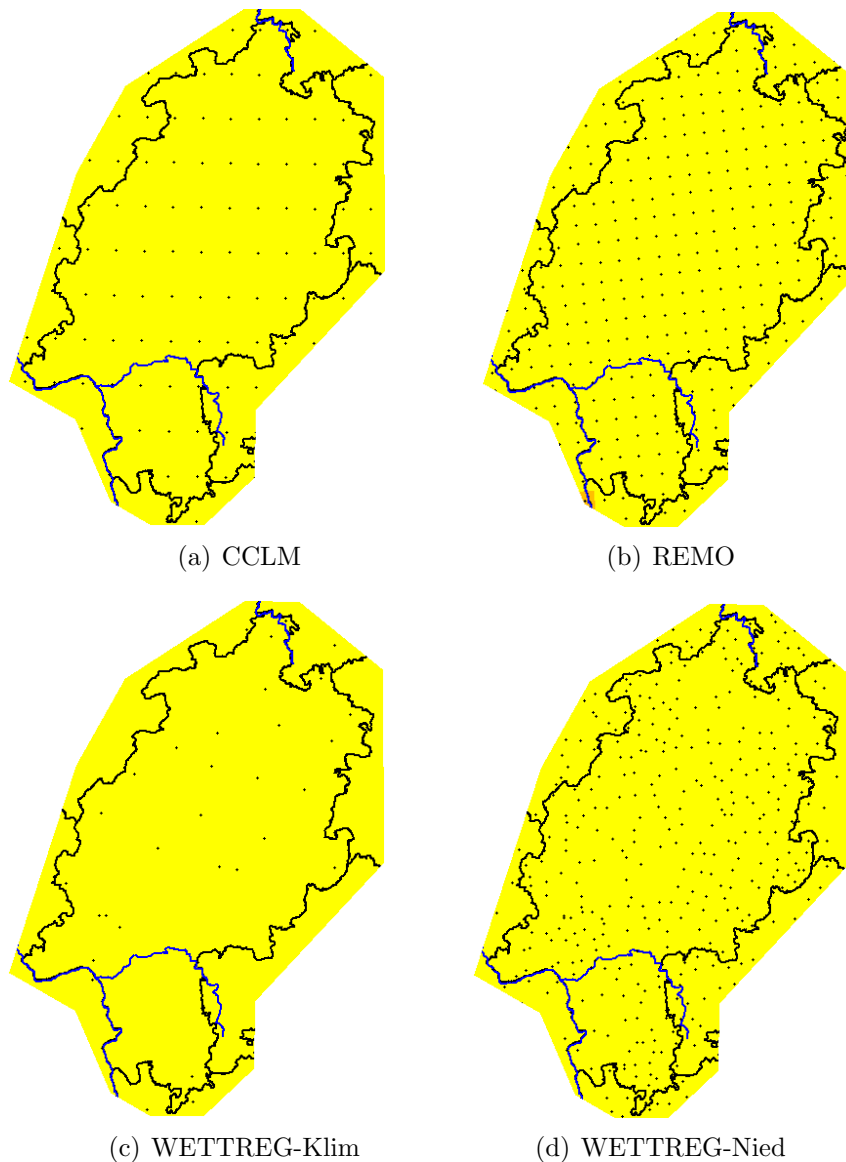


Abbildung 3.6: Lage der Gitterpunkte bzw. Stationen in Hessen bei den verwendeten Regionalmodellen.

ein Temperatursignal – bezogen auf die Periode 1971–2000 – von rund 1°C eingetreten ist. Der Anstieg erfolgt dann je nach Szenario und Modell unterschiedlich, wobei innerhalb der 30-jährigen Periode Endwerte auftreten, die deutlich über 2° liegen [A-Szenarios bei CCLM und REMO, Abb. A.1 und A.9(a) und (b)]. Die Anstiegsraten zum Ende des jeweiligen 30-jährigen Intervalls liegen bei den B-Szenarios niedriger und erreichen zumeist rund 1°C . Für das WETTREG-Modell werden insgesamt etwas flacher verlaufende Entwicklungskurven errechnet.

Die Niederschlagsentwicklung findet sich in den Anhang-Diagrammen A.3–A.8 für CCLM, A.11–A.15 für REMO und A.19–A.23 für WETTREG. Es sei angemerkt, dass dort Niederschlagsmengen dargestellt sind, während sich in

den Tabellen dieses Abschnitt *prozentuale Änderungen* finden. Gesamteindruck der Untersuchung der Niederschlagsentwicklung in den verschiedenen Modellen ist, dass hier deutlich die Variabilität der Niederschlagssimulationen sichtbar wird. Die Verläufe der 11-jährigen gleitenden Mittel in den Abbildungen des Anhangs sind keineswegs gleichmäßig, sondern zeigen bei einigen Szenarios praktisch keine Veränderungen im 30-jährigen Betrachtungszeitraum, bei anderen wiederum sind, zumeist schwach ausgeprägt, Abnahmen erkennbar, wie etwa im Sommer bei REMO in Abb. A.13. Niederschlagszunahmen im Bezugszeitraum finden sich am deutlichsten bei WETTREG im Winter, zu sehen in Abb. A.23.

Einen Überblick der Signale von Temperatur bzw. Niederschlag, wie sie mit den Regionalmodellen CCLM, REMO und WETTREG für Hessen ermittelt wurden, finden sich in Tab. 3.4–3.7.

Tabelle 3.4: Änderung der Jahresmitteltemperatur auf der regionalen Skala (Bezugsregion: Hessen) auf Basis der Regionalmodelle CCLM, REMO und WETTREG. Das Änderungssignal bezieht sich auf den Zeitraum 1971–2000 zum SRES Szenariospezifischen Zeitbereich in der Zukunft **A1B**: (2036–2065); **A2**: (2041–2070); **B1**: (2051–2080)

<i>Modell</i>	<i>A1B L1</i>	<i>A1B L2</i>	<i>A2 L1</i>	<i>B1 L1</i>	<i>B1 L2</i>
CCLM	1,65	1,98	—	1,41	1,61
REMO	1,65	—	1,85	1,38	—
WETTREG	1,34	—	1,64	1,37	—

In diesem Zusammenhang ist es wichtig daran zu erinnern, dass es für die Regionalmodelle keinen direkten Vergleich von 1860–1889 und den SRES-Szenariospezifischen Zeitbereichen geben kann, da Läufe dieser Modelle nicht so weit zurück reichen. Ein grober Anhaltspunkt zur Abschätzung des Anstiegs seit der vorindustriellen Zeit kann aber über die in Tab. 3.3 in den letzten beiden Zeilen für globale Modellrechnungen erstellten Temperaturunterschiede erfolgen. Demnach ist für Vergleiche mit der vorindustriellen Zeit in Tab. 3.4 ein Zuschlag in der Größenordnung von $0,5^{\circ}\text{C}$ notwendig. Zudem ist, wie bei CCLM ersichtlich, ein Unterschied von rund $0,3^{\circ}\text{C}$ im Hessen-Mittel für zwei Läufe des selben Szenarios zu verzeichnen. Zwei der drei Szenarios sind darüber hinaus in allen drei Regionalmodellen verfügbar, wobei innerhalb der **A1B**-Szenarios, ECHAM5 Lauf 1, für den Zeitraum des jeweiligen globalen Zwei-Grad-Horizonts Unterschiede von rund $0,3^{\circ}\text{C}$ zwischen den Modellen auftreten, während die **B1**-Szenarios, mit ECHAM5 Lauf 1 angetrieben, untereinander keine deutlichen Unterschiede aufweisen.

3.4 Hessen in den Regionalmodellen

Bezüglich der Niederschlagsänderungen ist hervorzuheben, dass die drei Regionalmodelle beim Jahresniederschlag relativ große Ähnlichkeit besitzen – alle geben leicht positive Änderungen, die aber wegen der Größenordnung (bezüglich der modellinteren Variabilität) von bis zu 5% keine weitere Interpretation zulassen.

Der Sommerniederschlag wird übereinstimmend als rückgängig modelliert. Am stärksten ist dies in den Simulationen von CCLM erkennbar, wo ein Wertebereich von –10% durchweg unterschritten wird. Der Winterniederschlag wird von den Regionalmodellen als gleichbleibend (CCLM und REMO¹) bis deutlich zunehmend (WETTREG: +25 bis +40%) simuliert.

Tabelle 3.5: Wie Tab. 3.4, jedoch für die Änderung der Jahressumme des Niederschlags in Prozent.

<i>Modell</i>	<i>A1B L1</i>	<i>A1B L2</i>	<i>A2 L1</i>	<i>B1 L1</i>	<i>B1 L2</i>
CCLM	3	4	—	1	2
REMO	5	—	5	5	—
WETTREG	1	—	4	4	—

Tabelle 3.6: Wie Tab. 3.4, jedoch für die Änderung der Sommer-Summe (Juni–Juli–August) des Niederschlags in Prozent.

<i>Modell</i>	<i>A1B L1</i>	<i>A1B L2</i>	<i>A2 L1</i>	<i>B1 L1</i>	<i>B1 L2</i>
CCLM	–11	–12	—	–13	–11
REMO	5	—	5	– 3	—
WETTREG	– 3	—	– 5	– 8	—

Tabelle 3.7: Wie Tab. 3.4, jedoch für die Änderung der Winter-Summe (Dezember–Januar–Februar) des Niederschlags in Prozent.

<i>Periode</i>	<i>A1B L1</i>	<i>A1B L2</i>	<i>A2 L1</i>	<i>B1 L1</i>	<i>B1 L2</i>
CCLM	1	5	—	0	5
REMO	4	—	12	1	—
WETTREG	25	—	40	32	—

¹Ausnahme: REMO, angetrieben mit ECHAM5 Szenario **A2**. Dort wird eine Zunahme über 10% simuliert.

Abschnitt 4

Fazit

Die Herangehensweise an den Vergleich von Klimamodell-Aussagen war bei diesem Vorhaben etwas ungewöhnlich. Zwar erfolgte, um ein Mindestmaß an Belastbarkeit zu erhalten, die Festlegung auf 30-jährige Zeiträume. In der Folge wurden jedoch nicht die gleichen Perioden zum Vergleich herangezogen. Vielmehr definierte der Zeithorizont, zu dem in den SRES-Szenariorechnungen von ECHAM5 das Zwei-Grad-Ziel mit Bezug auf die globale Temperaturentwicklung überschritten wird, welcher konkrete Bereich zu analysieren war.

Ein weiterer wichtiger Schritt, konform mit der Definition des Zwei-Grad-Ziels, war die Bestimmung der globalen Temperaturänderung mit Bezug zum vorindustriellen Niveau. Das vorindustrielle Niveau liegt, den Beobachtungen zu Folge, rund $0,5^{\circ}\text{C}$ unter demjenigen vom Ende des 20. Jahrhunderts. Aktuelle Untersuchungen zum Klimawandel beziehen sich dazu häufig auf den Zeitraum 1961–1990 (dies ist die WMO Klimanormalperiode) oder den Zeitraum 1971–2000¹. In den nachfolgenden Analysen wurden dann sowohl das globale Modell selbst, als auch drei regionale Modelle verwendet, um aufzuzeigen, mit welchen Klimaentwicklungen in Folge des Überschreitens des globalen Zwei-Grad-Horizonts zu rechnen ist. Das globale Modell wurde dabei auf einen Bereich in Mitteleuropa, der sich durch Aggregation von 12 Gitterpunkten bestimmte, fokussiert. Die regionalen Modelle konnten wegen ihrer hohen Auflösung zur direkten Berechnung von Mittelwerten für das Bundesland Hessen herangezogen werden.

Anmerkung: In den Tabellen des Berichts wird verbreitet mit zwei Nachkommastellen zur Berechnung von Temperaturbeträgen und -differenzen gearbeitet. Diese haben als Resultate der Erhebung von 30 bis mehreren 100 Werten ihre (mathematische) Daseinsberechtigung. Wenn es um Aussagen zu Trends von atmosphärischen Größen geht, erfolgen die Betrachtungen bei der Temperatur im Zahlenbereich von Zehnteln und bei den prozentualen Änderungen des Niederschlags im Bereich der ganzen Zahlen.

¹Obwohl der Zeitraum 1971–2000 stärker durch den schon ablaufenden Klimawandel beeinflusst ist, wird dieser häufig als Alternative zur WMO-Klimanormalperiode (1961–1990) genutzt, da für diesen eine größere Anzahl an Beobachtungsstationen mit zusammenhängenden Zeitreihen vorliegen.

Wichtige Erkenntnisse (siehe Tabelle 4.1):

- Bei globale gemittelter Erwärmung von 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau und Ermittlung der Zeithorizonte, zu denen dieser Wert für die unterschiedlichen Szenarios erreicht wird, zeigt der Ausschnitt für die Region Mitteleuropa eine stärkere Erwärmung als im globalen Mittel an. Dies bestätigt die IPCC-Aussagen, dass die Erwärmung regional unterschiedlich und dabei in mittleren und höheren Breiten stärker als im Mittel erfolgt.
- Auf eine Teilregion (Hessen) fokussiert, ermitteln die Regionalmodelle für die Szenario-spezifischen Zeiträume, zu denen das globale Zwei-Grad-Ziel überschritten wird, Temperaturwerte, die leicht unterhalb der Erwärmungsraten der 12 gewählten Mitteleuropagitterpunkte liegen.

Tabelle 4.1: Änderung der Jahresmitteltemperatur a) auf der globalen Skala, b) auf der regionalen Skala auf der Basis von 12 Gitterpunkten der Region Mitteleuropa im Globalmodell und c) auf der regionalen Skala (Bezugsregion: Hessen) auf Basis der Regionalmodelle CCLM, REMO und WETTREG. Das Änderungssignal bezieht sich auf die Zeiträume 1860–1889 und 1971–2000, jeweils zum SRES Szenario-spezifischen Zeitbereich in der Zukunft **A1B**: (2036–2065); **A2**: (2041–2070); **B1**: (2051–2080)

<i>a) auf der globalen Skala</i>					
	<i>A1B L1</i>	<i>A1B L2</i>	<i>A2 L1</i>	<i>B1 L1</i>	<i>B1 L2</i>
zu 1860–1889	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
zu 1971–2000	1,63	1,73	1,63	1,63	1,73
<i>b) auf der regionalen Skala (12 Gitterpunkte Mitteleuropas in ECHAM5)</i>					
	<i>A1B L1</i>	<i>A1B L2</i>	<i>A2 L1</i>	<i>B1 L1</i>	<i>B1 L2</i>
zu 1860–1889	2,51	2,93	2,80	2,26	2,50
zu 1971–2000	1,94	2,44	2,23	1,69	2,01
<i>c) auf der regionalen Skala auf Basis der Regionalmodelle</i>					
<i>Modell</i>	<i>A1B L1</i>	<i>A1B L2</i>	<i>A2 L1</i>	<i>B1 L1</i>	<i>B1 L2</i>
CCLM*	1,65	1,98	—	1,41	1,61
REMO*	1,65	—	1,85	1,38	—
WETTREG*	1,34	—	1,64	1,37	—

* Diese Werte beziehen sich auf 1971–2000, da die Regionalmodelle für den Zeithorizont 1860-1889 nicht gerechnet wurden. Um dennoch bei den Regionalmodellen auf den Temperaturanstieg zum vorindustriellen Niveau schließen zu können, ist ein Zuschlag von rund 0,5°C erforderlich.

Diese Studie zeigt, dass sich Mitteleuropa bisher stärker erwärmt hat als im globalen Mittel. Dieser Effekt setzt sich auch in den Szenarien für die Zukunft fort. Allerdings zeigen die Ergebnisse eine gewisse Skalenabhängigkeit, denn die regionalen Klimamodelle besitzen eine bessere Repräsentation der lokalen Gegebenheiten und weisen nicht so große Unterschiede zum globalen Mittel auf, wie regionale Ausschnitte des Globalmodells für Mitteleuropa.

Es folgen einige Bemerkungen zur dekadischen Variabilität. Wie sicher können wir sein, dass die modellierten Zeiträume korrekt zeitlich zuzuordnen sind? Mit welcher Wahrscheinlichkeit ist etwa das Klima im Modelljahr 2055 auf dieses Jahr fixierbar? In Abb. 4.1 und 4.2 wird dieser Problematik nachgegangen.

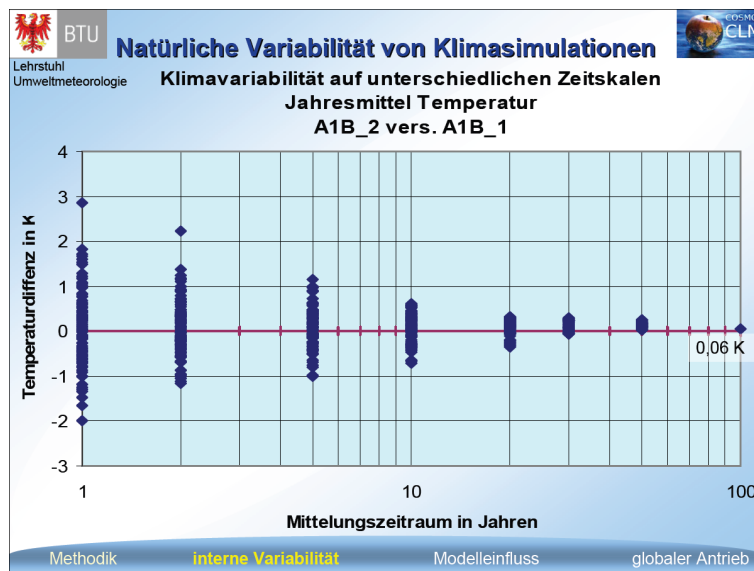


Abbildung 4.1: Abhängigkeit der Schwankungsbreite bei der Temperaturdifferenz zwischen zwei A1B-Läufen von der Länge des Mittelungszeitraums. Quelle: Vortrag *Regionale Klimaprojektionen mit COSMO-CLM* von K. Keuler (BTU Cottbus), Annaberger Klimatage, 14.–15.5.2008; <http://www.tu-freiberg.de/ze/mz/Annaberg/programm.html>.

Die dekadische Variabilität ist in der Tat ein nicht außer Acht zu lassender Faktor. Das für ein Jahr modellierte Klima ist schon deshalb nicht fest diesem Jahr zuzuordnen. Wenn die Aggregation der Klimamodell-Resultate auf Einzeljahre erfolgt, dann sind selbst zwischen zwei Läufen mit gleichen Szenario-Randbedingungen (in den Abbildungen Szenario A1B) Unterschiede von -2°C bis $+3^{\circ}\text{C}$ anzutreffen. Für den Niederschlag liegt dieses Intervall bei Jahresaggregation bei rund ± 400 mm (!). Die Mittelung über 10 Jahre stabilisiert die Dinge etwas, so dass das Temperaturintervall zwischen den beiden Szenario-Realisierungen bei $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ und das Niederschlagsintervall bei gut ± 100 mm liegt. Auch bei 30-jähriger Mittelung sind beide sichtbar unähnlich, was bei der Temperatur aber schon im Bereich von $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ liegt², jedoch ist der Bereich beim Niederschlag immer noch knapp ± 100 mm. Ob also ein sich mit der Zeit verändernder

²Zum Vergleich: In [Carter u. a. 2007] Abb. 2.6 werden für Nordeuropa 95%-

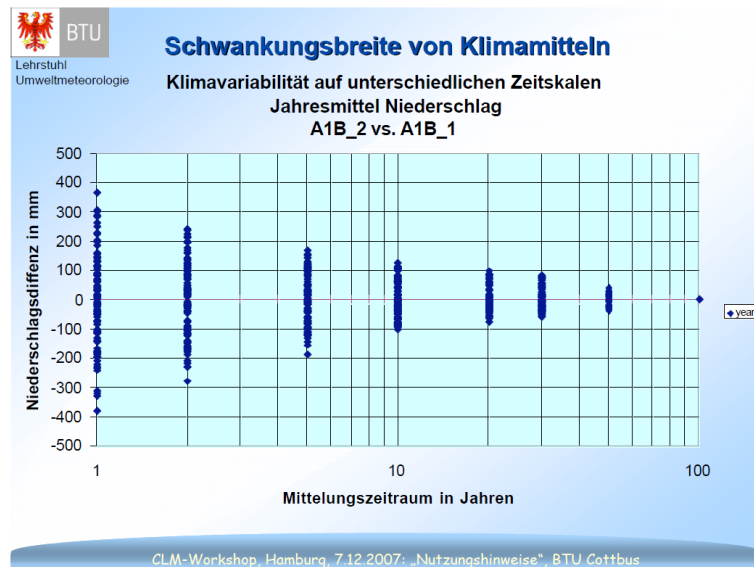


Abbildung 4.2: Wie Abb. 4.1, jedoch für den Niederschlag. Quelle: Vortrag *Hinweise zur Nutzung von CLM-Ergebnissen* von K. Keuler (BTU Cottbus), CLM Workshop, Hamburg, 7.12.2007;
<http://www.mad.zmaw.de/projects-at-md/sg-adaptation/workshops/clm-workshop-2007/>.

Wert zum Zeitpunkt T oder zum Zeitpunkt $T+x$ eintritt, ist auch bei 30-jähriger Mittelung nicht genau bestimmbar.

All dies zeigt, dass die Resultate der Klimamodelle mit Unsicherheiten behaftet sind, die durch die in ihnen realisierte Repräsentanz der Klimaprozesse und des Weiteren durch die interne natürliche Klimavariabilität verursacht werden. Neueste Szenarios – es wird zunehmend der Begriff „Projektionen“ benutzt, wie etwa in [Murphy u. a. 2009] – gehen probabilistisch vor, d.h. es wird beispielsweise für den Wert eines Temperaturanstiegs angegeben, wie wahrscheinlich dieser ist. Die Wahrscheinlichkeiten bestimmen sich aus einem Mehrmodell-Ensemble-Ansatz und ihre Beträge sind nicht mehr fixiert sondern können bei weiterem Kenntnisgewinn, etwa durch verbesserte Modelle oder eine zunehmende Menge an Messungen Änderungen unterliegen.

Konfidenzintervalle aus 30-jährigen Simulationen des gegenwärtigen Klimas für die Temperatur mit rund $0,3^{\circ}\text{C}$ und den Niederschlag mit rund $\pm 10\%$ angegeben.

Literaturverzeichnis

- [Allen u. a. 2009] ALLEN, M.R. ; FRAME, D.J. ; HUNTINGFORD, Ch. ; JONES, Ch.D. ; LOWE, J.A. ; MEINSHAUSEN, M. ; MEINSHAUSEN, N.: Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne. In: *Nature* 458 (2009), S. 1163–1166
- [Böhm u. a. 2006] BÖHM, U. ; KÜCKEN, M. ; AHRENS, W. ; BLOCK, A. ; HAUFFE, D. ; KEULER, D. ; ROCKEL, B. ; WILL, A.: CLM – The Climate Version of LM: Brief description and long-term applications. In: *COSMO Newsletter* 6 (2006)
- [Brohan u. a. 2006] BROHAN, P. ; KENNEDY, J.J. ; HARRIS, I. ; TETT, S.F.B. ; JONES, P.D.: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. In: *J. Geophys. Res.* 111 (2006), S. D12106, doi:10.1029/2005JD006548
- [Carter u. a. 2007] Kap. 2 In: CARTER, T.R. ; JONES, R.N. ; LIU, X. ; BHADWAL, S. ; CONDE, C. ; MEARNS, L.O. ; O’NEILL, B.C. ; ROUNSEVELL, M.D.A. ; ZUREK, M.B.: *New assessment methods and the characterisation of future conditions – M. Parry, O. Canziani, J. Palutikof, P. van den Linden and C. Hanson (Eds.)*. Cambridge University Press, 2007, S. 133–172
- [Enke 2003] ENKE, W.: Anwendung eines statistischen Regionalisierungsmodells auf das Szenario B2 des ECHAM OPYC3 Klima-Simulationslaufes, bis 2050 zur Abschätzung regionaler Klimaänderungen für das Bundesland Hessen / Landesamt für Umwelt und Geologie Hessen, Wiesbaden. 2003 (Werkvertrag 2003/00082). – Forschungsbericht
- [Enke u. a. 2005a] ENKE, W. ; DEUTSCHLÄNDER, Th. ; SCHNEIDER, F. ; KÜCHLER, W.: Results of five regional climate studies applying a weather pattern based downscaling method to ECHAM4 climate simulations. In: *Meteorol. Z.* 14 (2005), S. 247–257
- [Enke u. a. 2005b] ENKE, W. ; SCHNEIDER, F. ; DEUTSCHLÄNDER, Th.: A novel scheme to derive optimized circulation pattern classifications for downscaling and forecast purposes. In: *Theor. Appl. Climatol.* 82 (2005), S. 51–63
- [Enke u. a. 2006] ENKE, W. ; SPEKAT, A. ; KREIENKAMP, F.: Analyse und Projektion extremer Wettererscheinungen mit physikalisch-statistischen Metho-

- den / Abschlussbericht für das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie. 2006 (Werkvertrag Nr. 4500165655). – Forschungsbericht
- [Hansen u. a. 2001] HANSEN, J. ; RUEDY, R. ; SATO, M. ; IMHOFF, M. ; LAWRENCE, W. ; EASTERLING, D. ; PETERSON, T. ; KARL, T.: A closer look at United States and global surface temperature change. In: *J. Geophys. Res.* 106 (2001), S. 23947–23963
- [Hansen u. a. 2008] HANSEN, J. ; SATO, M. ; KHARECHA, P. ; BEERLING, D. ; MASSON-DELMOTTE, V. ; PAGANI, M. ; RAYMO, M. ; ROYER, D.L. ; ZACHOS, J.C.: Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim? In: *Open Atmos. Sci. J.* 2 (2008), S. 217–231. – DOI: 10.2174/1874282300802010217; arXiv: 0804.1126v3 [physics.ao-ph]
- [Hare und Meinshausen 2004] HARE, B. ; MEINSHAUSEN, M.: How much warming are we committed to and how much can be avoided? / PIK-Potsdam, Report 93. 2004. – Forschungsbericht
- [HLUG 2005] HLUG: Integriertes Klimaschutzprogramm Hessen INKLIM 2012. Projektbaustein II: Klimawandel und Klimafolgen in Hessen. Abschlussbericht. / Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie, Wiesbaden. 2005. – Forschungsbericht
- [IPCC 2001] IPCC ; MCCARTHY, J.J. (Hrsg.) ; CANZIANI, O.F. (Hrsg.) ; LEARRY, N.A. (Hrsg.) ; DOKKEN, D.J. (Hrsg.) ; WHITE, K.S. (Hrsg.): *Climate Change 2001. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, New York, Oakleigh, Madrid, Cape Town : Cambridge University Press, 2001
- [IPCC 2007a] IPCC ; PARRY, M. (Hrsg.) ; CANZIANI, O. (Hrsg.) ; PALUTIKOF, J. (Hrsg.) ; LINDEN, P. van d. (Hrsg.) ; HANSON, C. (Hrsg.): *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, 2007a (ISBN 978 0521 70598-1)
- [IPCC 2007b] IPCC ; SOLOMON, S. (Hrsg.) ; QIN, D. (Hrsg.) ; MANNING, M. (Hrsg.) ; CHEN, Z. (Hrsg.) ; MAQUIS, M. (Hrsg.) ; AVERYT, K.B. (Hrsg.) ; TIGNOR, M. (Hrsg.) ; MILLER, H.L. (Hrsg.): *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK and New York, USA : Cambridge University Press, 2007b (ISBN: 978 0521 70596-7)
- [Jacob u. a. 2008] JACOB, D. ; GÖTTEL, H. ; KOTLARSKI, S. ; LORENZ, P. ; SIECK, K.: Klimaauswirkungen und Anpassung in Deutschland - Phase 1:

LITERATURVERZEICHNIS

Erstellung regionaler Klimaszenarien für Deutschland / Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) Hamburg. 2008. – Forschungsbericht

- [Jacob und Podzun 1997] JACOB, D. ; PODZUN, R.: Sensitivity studies with the regional climate model REMO. In: *Meteorol. Atmos. Phys.* 63 (1997), S. 119–129
- [Kalnay u. a. 1996] KALNAY, E. ; KANAMITSU, M. ; KISTLER, R. ; COLLINS, W. ; DEAVEN, D. ; GANDIN, L. ; IREDELL, M. ; SAHA, S. ; WHITEA, G. ; WOOLEN, J. ; ZHU, Y. ; CHELLIAH, M. ; EBISUZAKI, W. ; HIGGINS, W. ; JANOWIAK, J. ; MO, K. ; ROPELEWSKI, C. ; WANG, J. ; LEETMAA, A. ; REYNOLDS, R. ; JENNE, R. ; JOSEPH, D.: The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. In: *Bull. Am. Met. Soc.* 77 (1996), S. 437–471
- [Kerr 2004] KERR, R.A.: Climate change - Three degrees of consensus. In: *Science* 305 (2004), S. 932–934
- [Lugina u. a. 2005] Kap. Monthly Surface Air Temperature Time Series Area-Averaged Over The 30-Degree Latitudinal Belts Of The Globe, 1881-2004. In: LUGINA, K.M. ; GROISMAN, P.Ya. ; VINNIKOV, K.Ya. ; KOKNAEVA, V.V. ; SPERANSKAYA, N.A.: *Trends: A Compendium of Data on Global Change*. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, TN, 2005
- [Meinshausen u. a. 2009] MEINSHAUSEN, M. ; MEINSHAUSEN, N. ; HARE, W. ; RAPER, S.C.B. ; FRIELER, K. ; KNUTTI, R. ; FRAME, D.J. ; ALLEN, M.R.: Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2°C. In: *Nature* 458 (2009), S. 1158–1162
- [Murphy u. a. 2009] MURPHY, J.M. ; SEXTON, D.M.H. ; JENKINS, G.J. ; BOORMAN, P.M. ; BOOTH, B.B.B. ; BROWN, C.C. ; CLARK, R.T. ; COLLINS, M. ; HARRIS, G.R. ; KENDON, E.J. ; BETTS, R.A. ; BROWN, S.J. ; HOWARD, T. P. ; HUMPHREY, K. A. ; MCCARTHY, M. P. ; McDONALD, R. E. ; STEPHENS, A. ; WALLACE, C. ; WARREN, R. ; WILBY, R. ; WOOD, R. A.: UK Climate Projections Science Report: Climate change projections / Met Office Hadley Centre, Exeter. 2009. – Forschungsbericht
- [Nakićenović u. a. 2000] NAKIĆENOVIĆ, N. ; ALCAMO, J. ; VRIES, B. de ; FENHANN, J. ; GAFFIN, S. ; GREGORY, K. ; GRÜBLER, A. ; JUNG, T.Y. ; KRAM, T. ; ROVERE, E.L. L. ; MICHAELIS, L. ; MORI, S. ; MORITA, T. ; PEPPER, W. ; PITCHER, H. ; PRICE, L. ; RAIHI, K. ; ROEHL, A. ; ROGNER, H.-H. ; SANDOVSKI, A. ; SCHLESINGER, M. ; SHUKLA, P. ; SMITH, S. ; SWART, R. ; ROOIJEN, S. van ; VICTOR, N. ; DADI, Z.: *IPCC Special Report on Emission Scenarios*. Cambridge, U.K. und New York, USA : Cambridge University Press, 2000
- [Randall u. a. 2007] Kap. 8 In: RANDALL, D.A. ; WOOD, R.A. ; BONY, S. ; COLMAN, R. ; FICHEFET, T. ; FYFE, J. ; KATTSOV, V. ; PITMAN, A. ; SHUKLA,

- J. ; SRINIVASAN, J. ; STOUFFER, R.J. ; SUMI, A. ; TAYLOR, K.E.: *Climate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.)*. Cambridge, UK and New York, USA : Cambridge University Press, 2007, S. 589–662
- [Rockel u. a. 2008a] ROCKEL, B. ; WILL, A. ; HENSE, A.: The Regional Climate Model COSMO-CLM (CCLM) (Editorial). In: *Meteorol. Z.* 17 (2008), S. 347–348
- [Rockel u. a. 2008b] ROCKEL, B. ; WILL, A. ; HENSE, A.: Special Issue: COSMO-CLM. In: *Meteorologische Zeitschrift, Vol. 17,4, 2008*
- [Roeckner u. a. 2003] 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.: *MPI-Berichte. Bd. 349: The atmospheric general circulation model ECHAM5 - Part 1: Model Description*. Hamburg : Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2003
- [Roeckner u. a. 2004] ROECKNER, E. ; BROKOPF, R. ; ESCH, M. ; GIORGETTA, M. ; HAGEMANN, S. ; KORNBLUEH, L. ; MANZINI, E. ; SCHLESE, U. ; SCHULZWEIDA, U.: *MPI-Berichte. Bd. 354: The atmosphere general circulation model ECHAM5. Part 2: Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution*. Hamburg : Max-Planck-Institut für Meteorologie, 2004
- [Smith und Reynolds 2005] SMITH, T.M. ; REYNOLDS, R.W.: A global merged land and sea surface temperature reconstruction based on historical observations (1880-1997). In: *J. Climate* 18 (2005), S. 2021–2036
- [Spekat u. a. 2007a] SPEKAT, A. ; ENKE, W. ; KREIENKAMP, F.: 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. / Umweltbundsamt. 2007 (Förderkennzeichen 204 41 138). – Forschungsbericht. Available at www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3133.pdf
- [Spekat u. a. 2007b] SPEKAT, A. ; KREIENKAMP, F. ; ENKE, W.: Erstellung von transienten Szenarios für Hessen. Endbericht. / Hessisches Landesamt

LITERATURVERZEICHNIS

für Umwelt und Geologie, Wiesbaden. Werkvertrag 4500272588. 2007. –
Forschungsbericht

[Trenberth u. a. 2007] Kap. 3 In: TRENBERTH, K.E. ; JONES, P.D. ; AMBENJE, P. ; BOJARIU, R. ; EASTERLING, D. ; TANK, A. K. ; PARKER, D. ; RAHIMZADEH, F. ; RENWICK, J.A. ; RUSTICUCCI, M. ; SODEN, B. ; ZHAI, P.: *Observations: Surface and Atmospheric Climate Change. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change – S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.)*. Cambridge, UK and New York, USA : Cambridge University Press, 2007, S. 235–336

[Vinnikov u. a. 1990] VINNIKOV, K.Ya. ; GROISMAN, P.Ya. ; LUGINA, K.M.: Empirical data on contemporary global climate change (temperature and precipitation). In: *J. Climate* 3 (1990), S. 662–677

Teil I
Anhänge

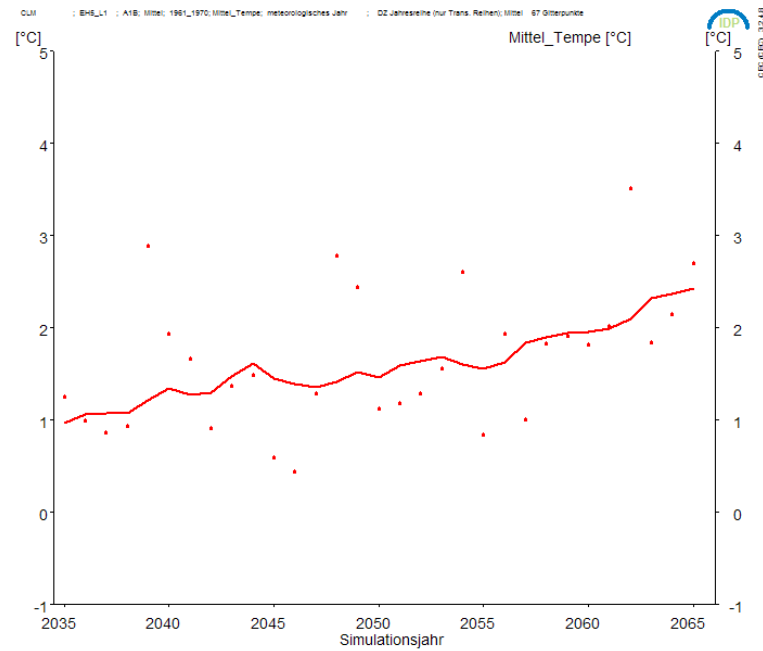
Anhang A

Diagramme zu den Regionalmodell-Ergebnissen

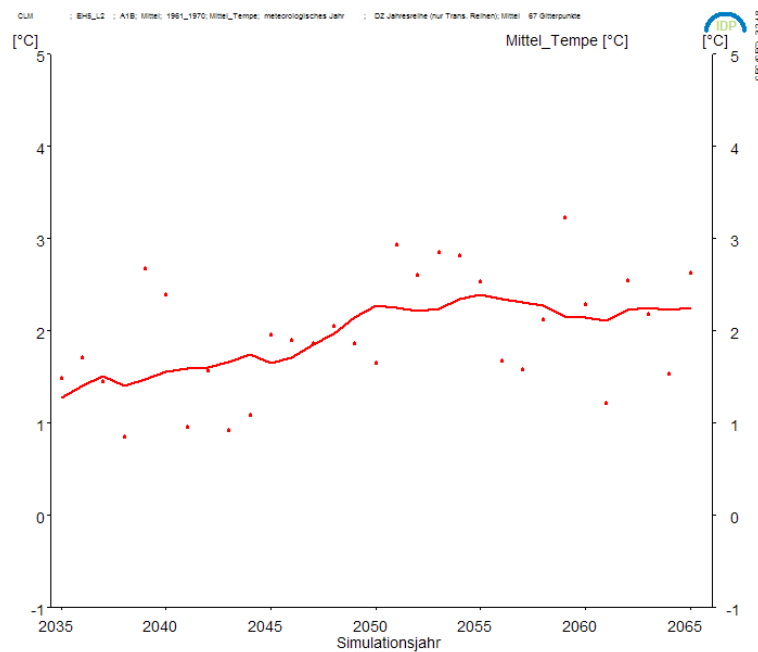
A.1 CCLM

Es wurden 67 CCLM-Gitterpunkte aus einem Höhenbereich von 144 bis 650 m ü. NN zur Bildung eines Hessen-Mittels herangezogen. Es sind je zwei CCLM-Läufe mit dem Antrieb ECHAM5-**A1B** und -**B1** verfügbar.

Temperatur

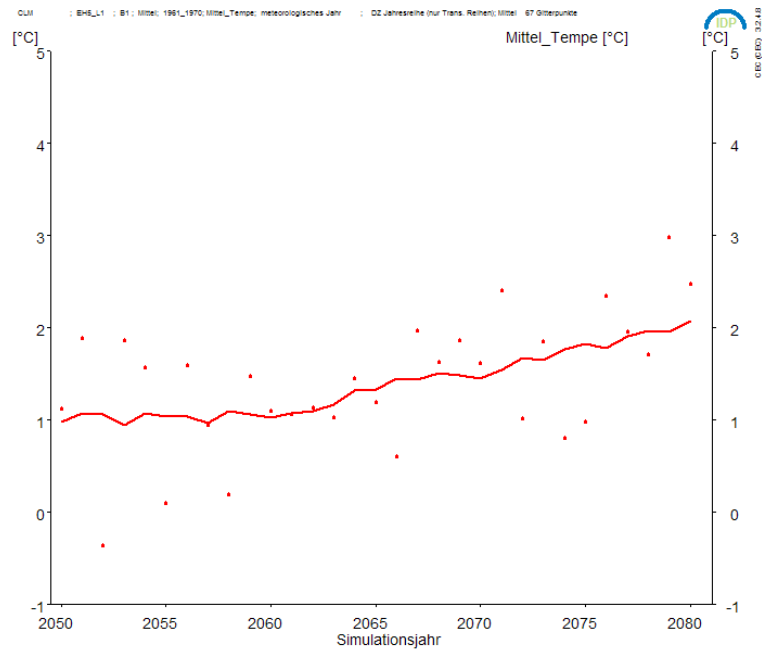


(a) A1B Lauf 1

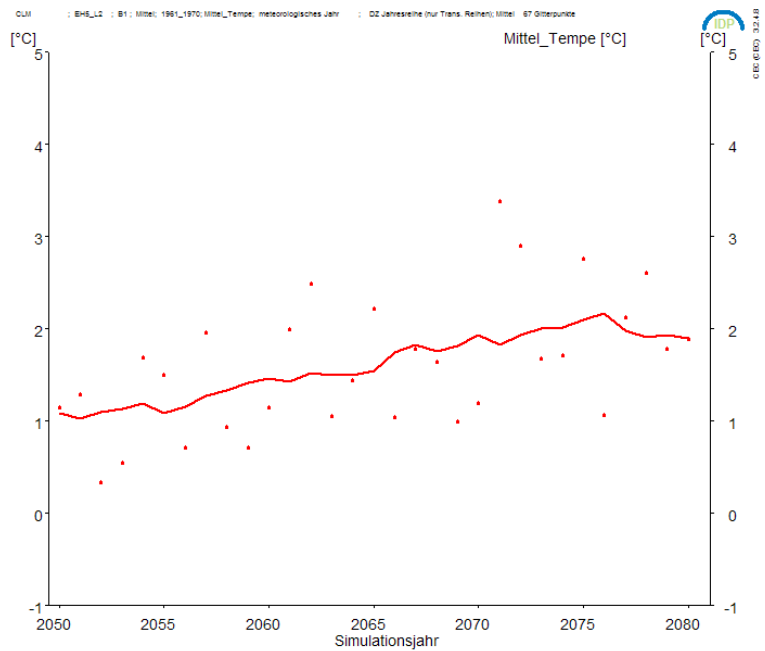


(b) A1B Lauf 2

Abbildung A.1: Verlauf der von CCLM für Hessen simulierte Anstiegs der Jahresmitteltemperatur als Abweichung vom Mittel 1971–2000. Die durchgezogene Linie gibt ein 11-jähriges gleitendes Mittel (Bezugspunkt ± 5 Werte) wieder. Modellantrieb: Lauf 1 und 2 des ECHAM5-Szenarios A1B.



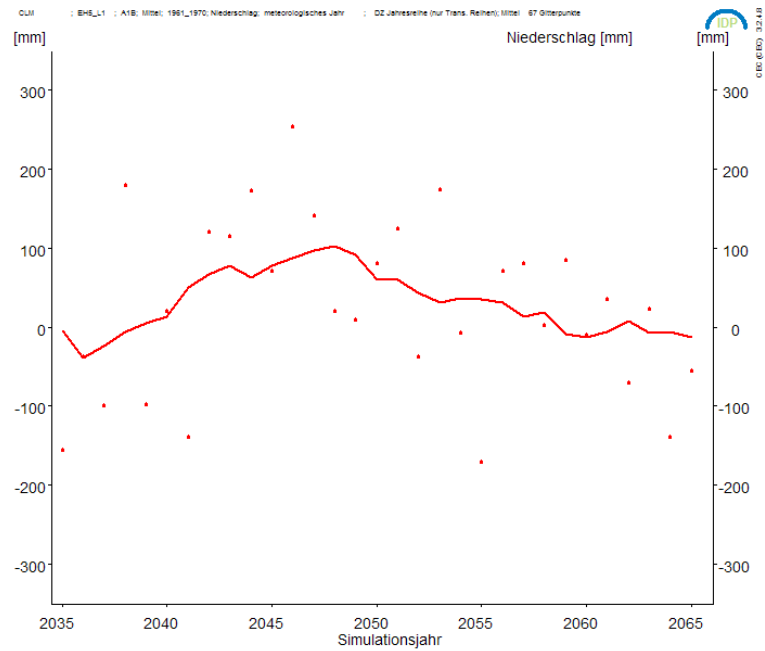
(a) B1 Lauf 1



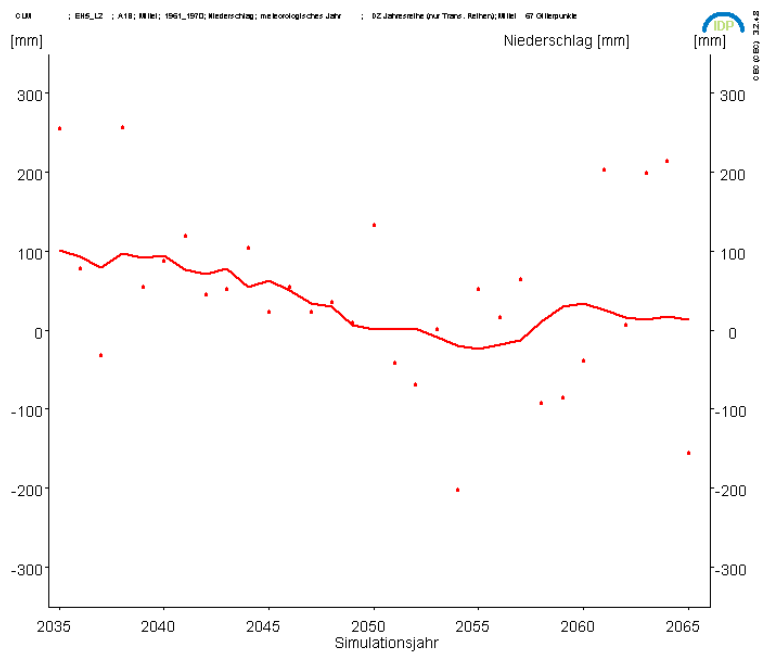
(b) B1 Lauf 2

Abbildung A.2: Wie Abb. A.1 jedoch für CCLM, Lauf 1 und 2 des ECHAM5-Szenarios B1.

Niederschlag – Jahr

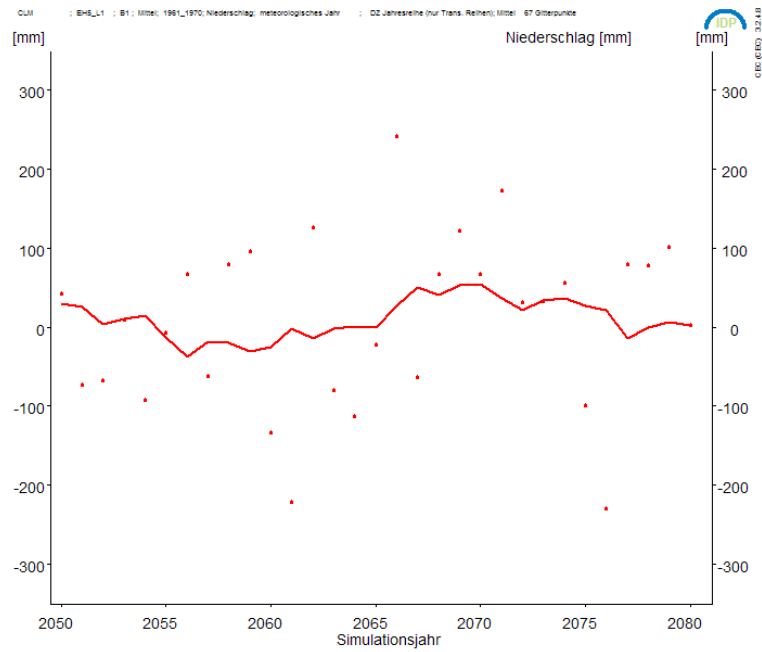


(a) A1B Lauf 1

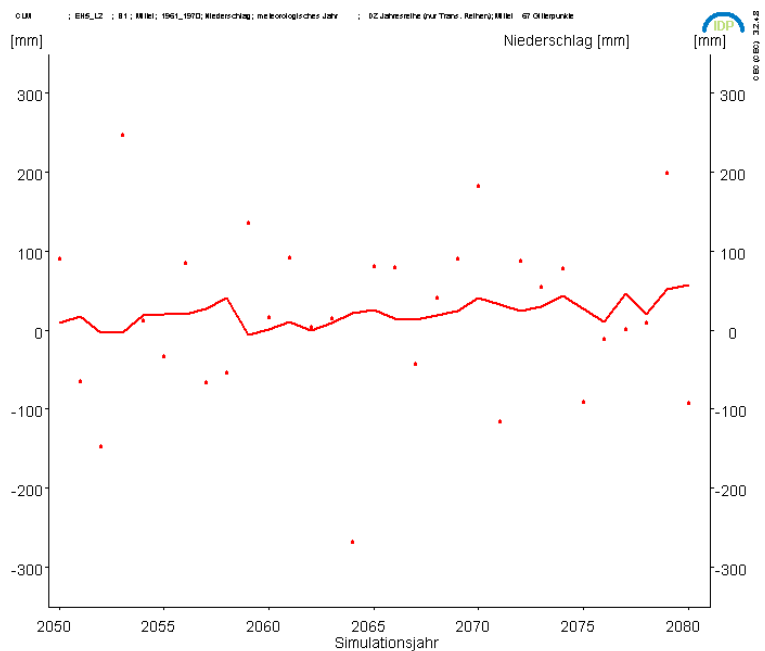


(b) A1B Lauf 2

Abbildung A.3: Wie Abb. A.1, jedoch für den Jahresniederschlag von CCLM, Lauf 1 und 2 des ECHAM5-Szenarios A1B.



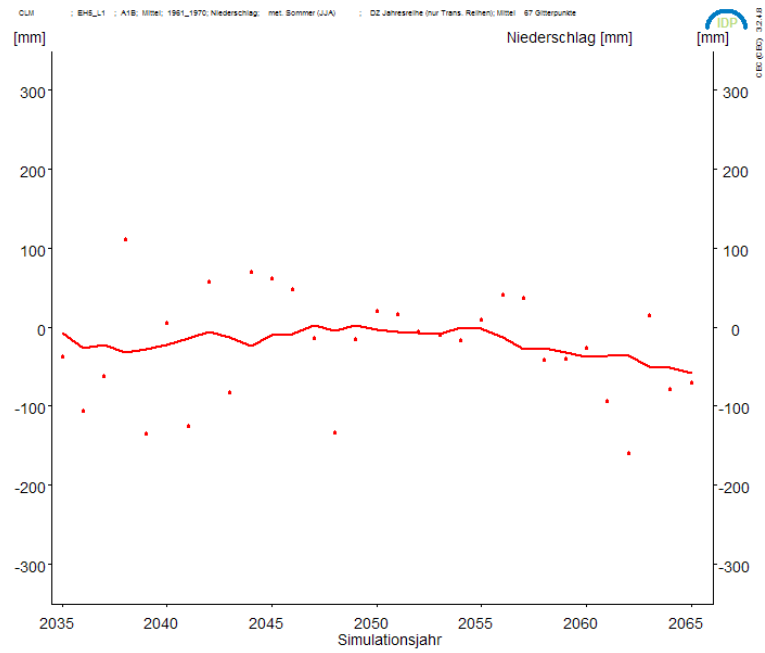
(a) B1 Lauf 1



(b) B1 Lauf 2

Abbildung A.4: Wie Abb. A.2, jedoch für den Jahresniederschlag von CCLM, Lauf 1 und 2 des ECHAM5-Szenarios B1.

Niederschlag – Sommer und Winter

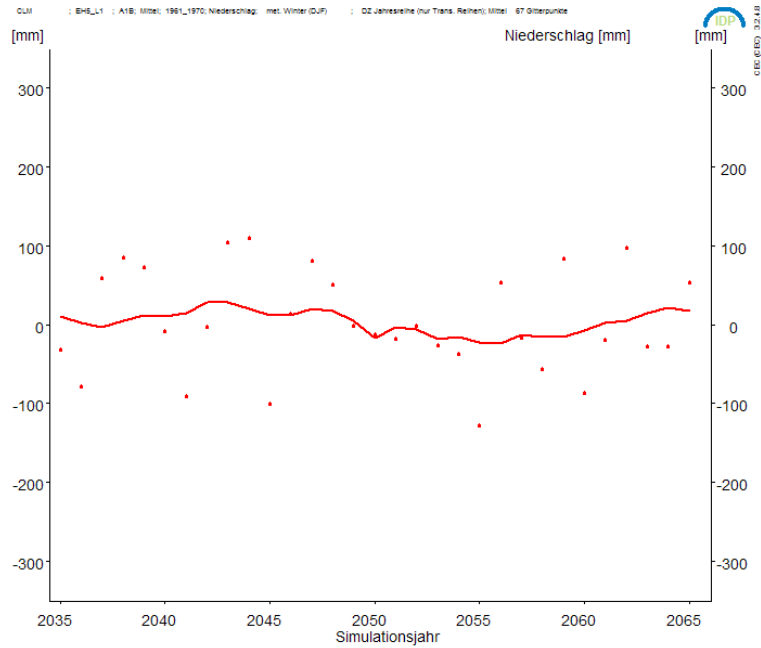


(a) A1B Lauf 1

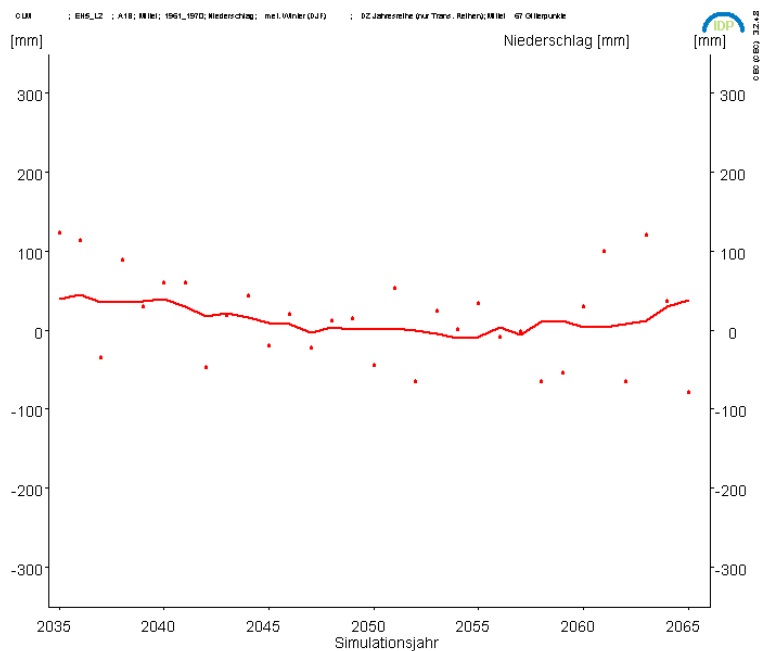


(b) A1B Lauf 2

Abbildung A.5: Wie Abb. A.3, jedoch für den Sommerniederschlag, A1B.

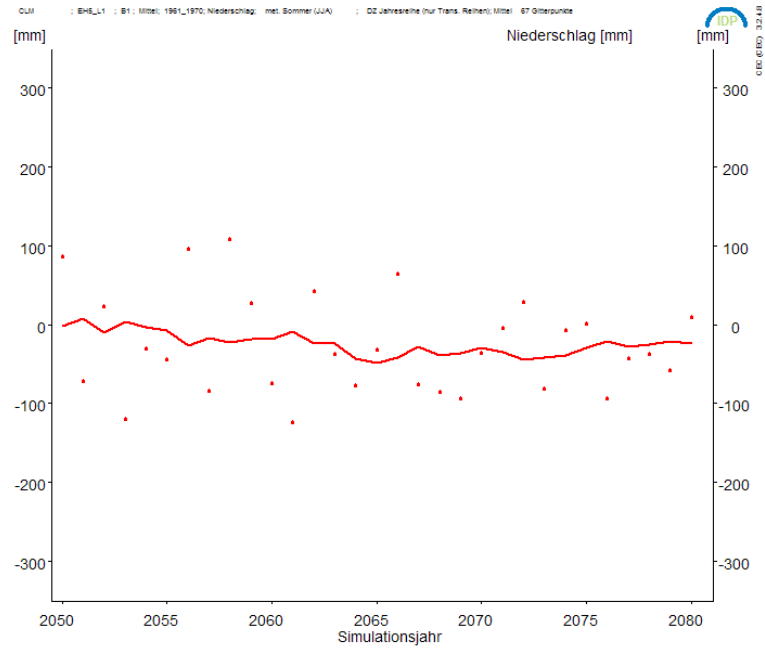


(a) A1B Lauf 1

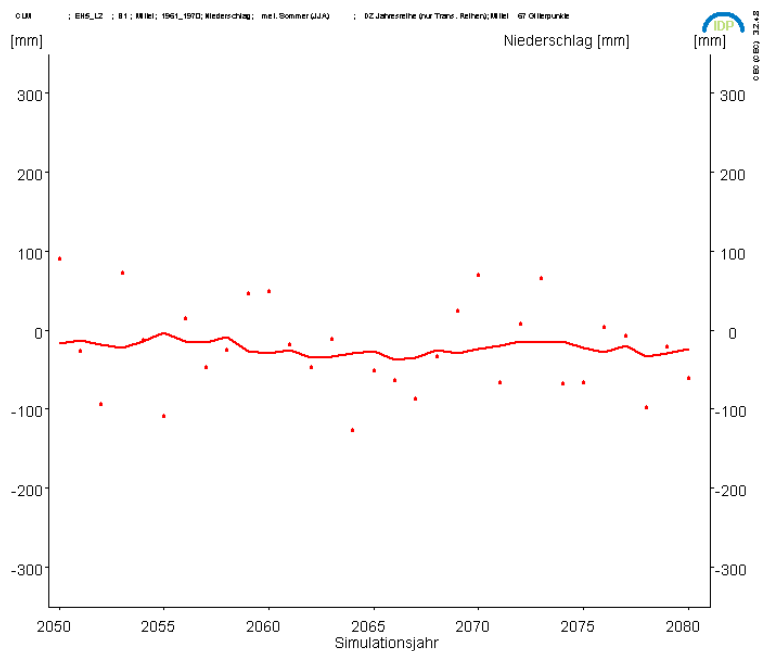


(b) A1B Lauf 2

Abbildung A.6: Wie Abb. A.3, jedoch für den Winterniederschlag, A1B.

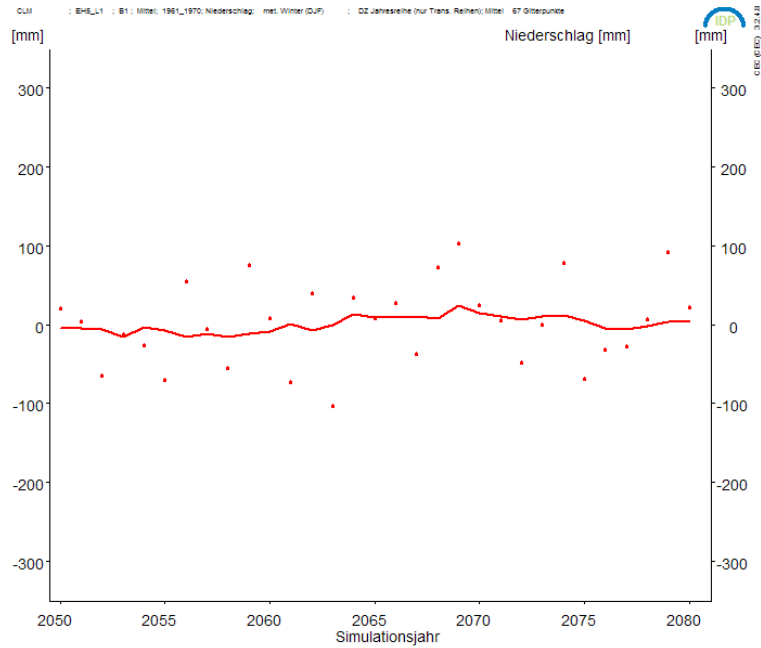


(a) B1 Lauf 1

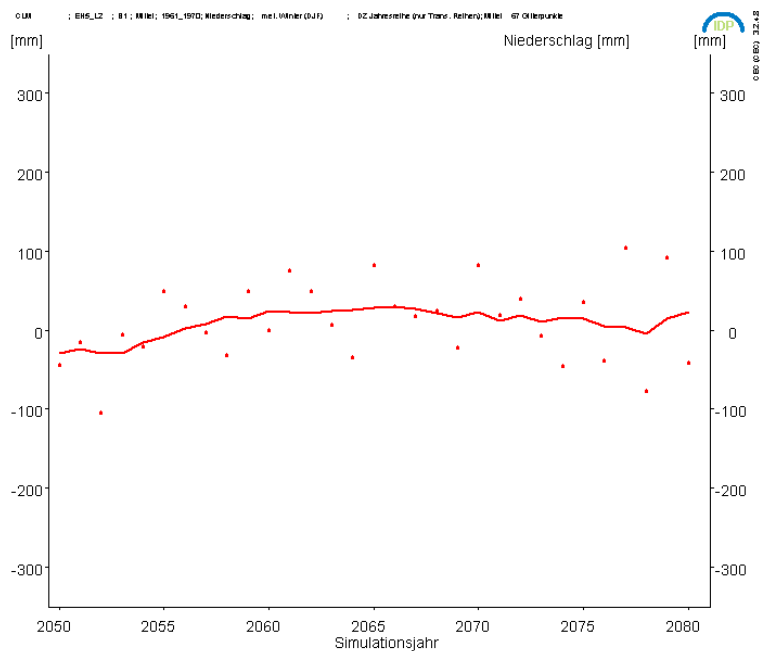


(b) B1 Lauf 2

Abbildung A.7: Wie Abb. A.4, jedoch für den Sommerniederschlag, B1.



(a) B1 Lauf 1



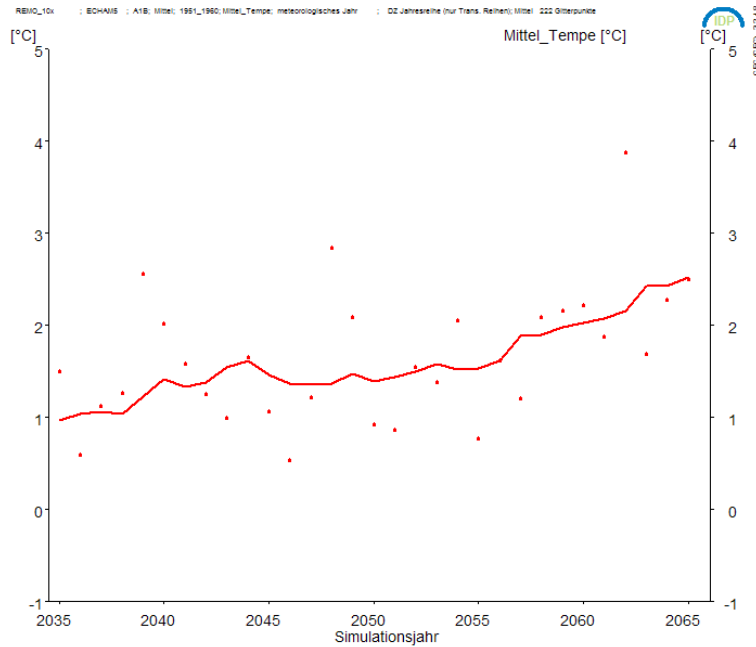
(b) B1 Lauf 2

Abbildung A.8: Wie Abb. A.4, jedoch für den Winterniederschlag, B1

A.2 REMO

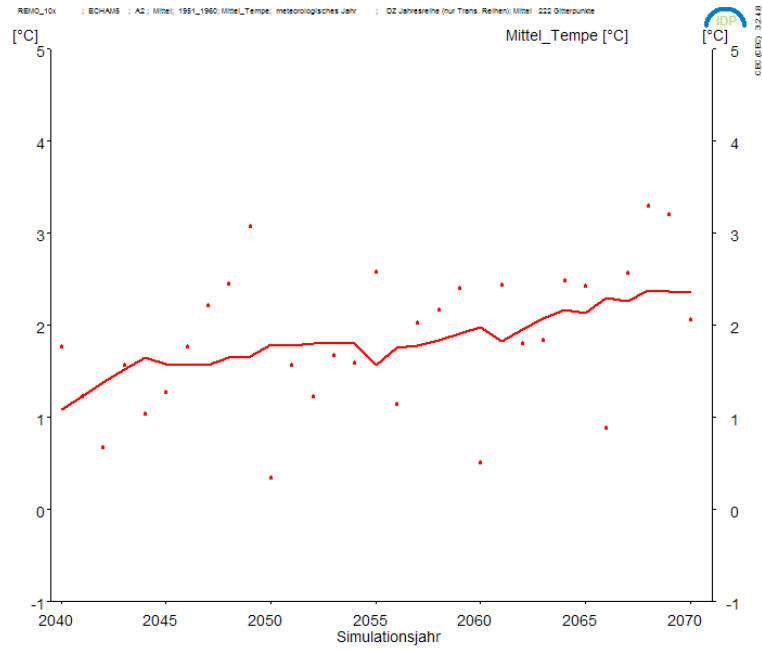
Es wurden 222 REMO-Gitterpunkte aus einem Höhenbereich von 87 bis 720 m ü. NN zur Bildung eines Hessen-Mittels herangezogen.

Temperatur

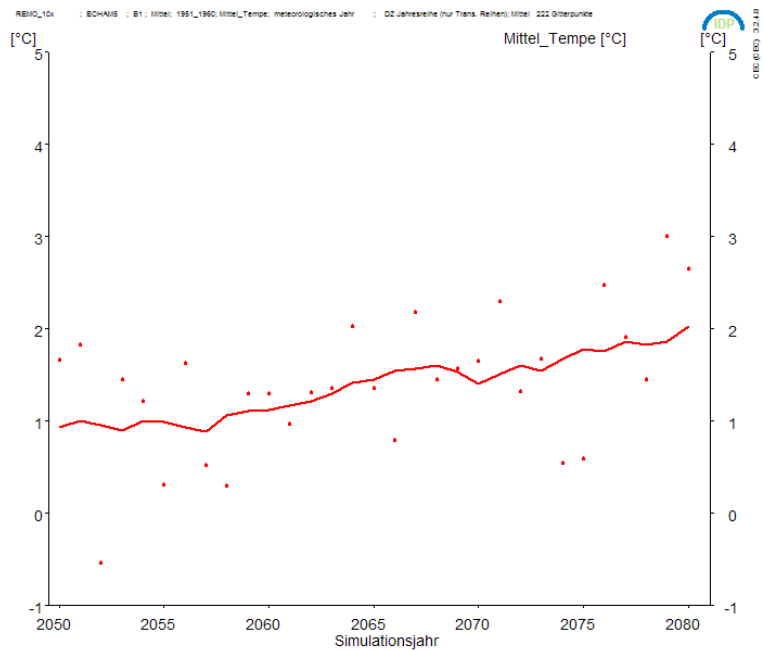


(a) A1B

Abbildung A.9: Verlauf der von REMO für Hessen simulierten Anstiegs der Jahresmitteltemperatur als Abweichung vom Mittel 1971–2000. Die durchgezogene Linie gibt ein 11-jähriges gleitendes Mittel (Bezugspunkt ± 5 Werte) wieder. Modellantrieb: Je ein Lauf mit dem ECHAM5-Szenario A1B.



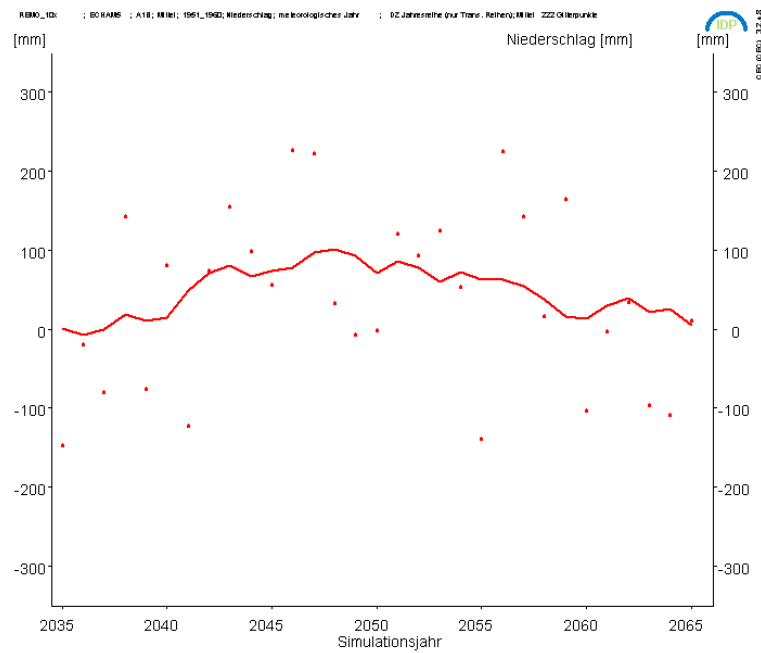
(a) A2



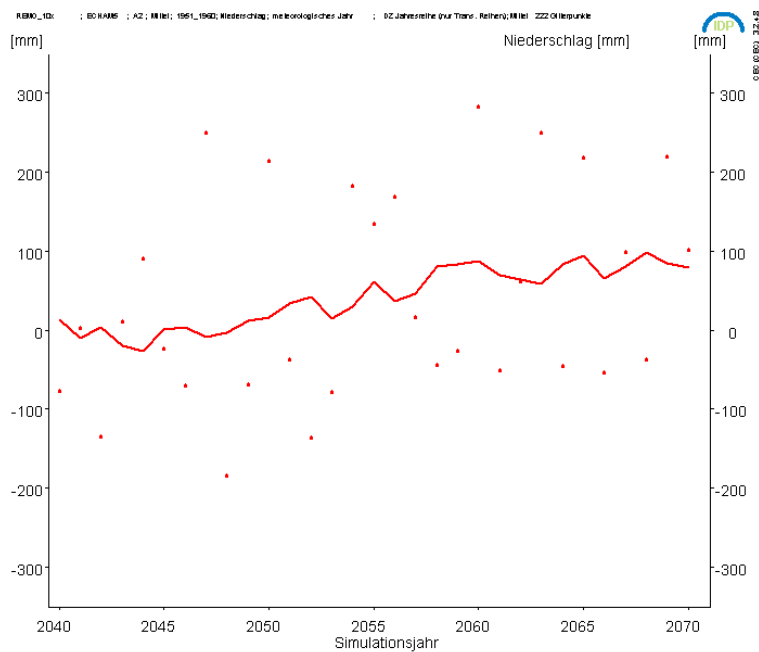
(b) B1

Abbildung A.10: Fortsetzung von Abb. A.9. Szenarios A2 und B1.

Niederschlag – Jahr

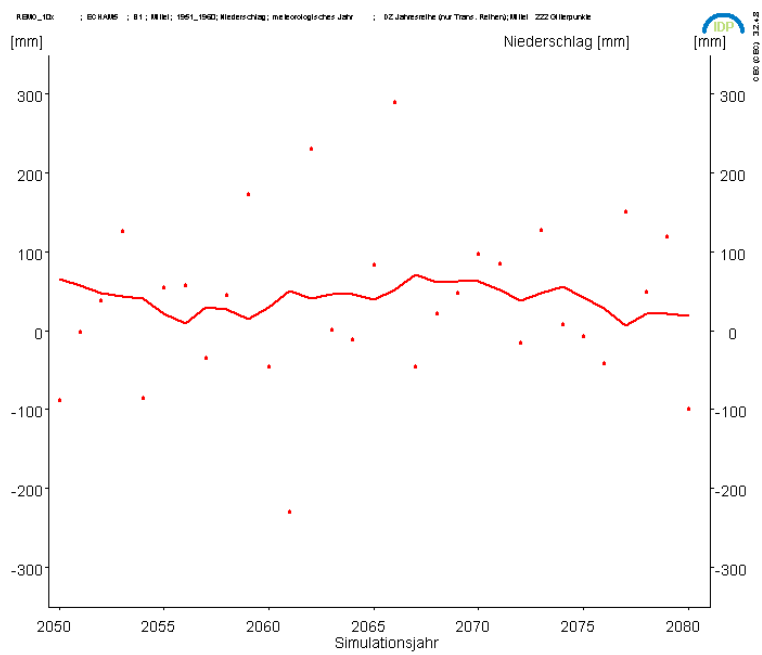


(a) A1B



(b) A2

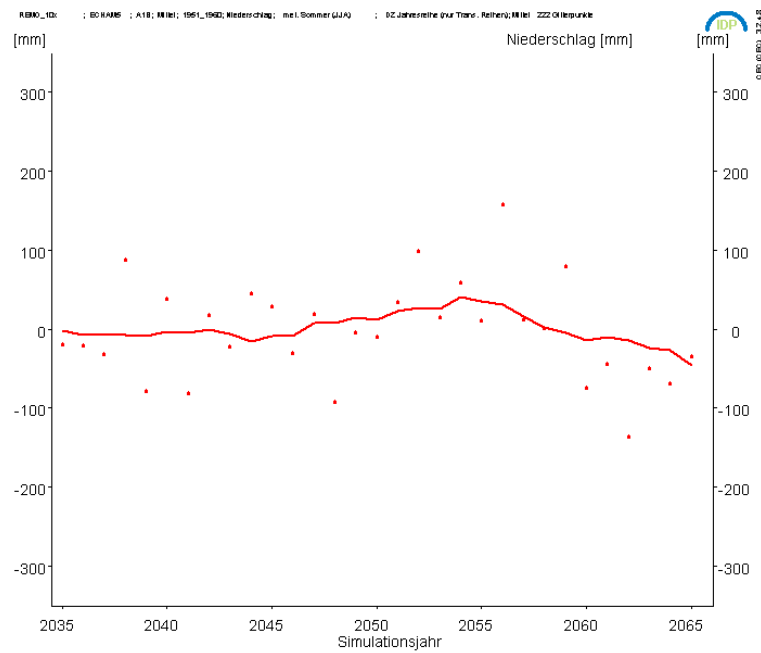
Abbildung A.11: Wie Abb. A.9, jedoch für den Jahresniederschlag von REMO, Szenarios A1B und A2.



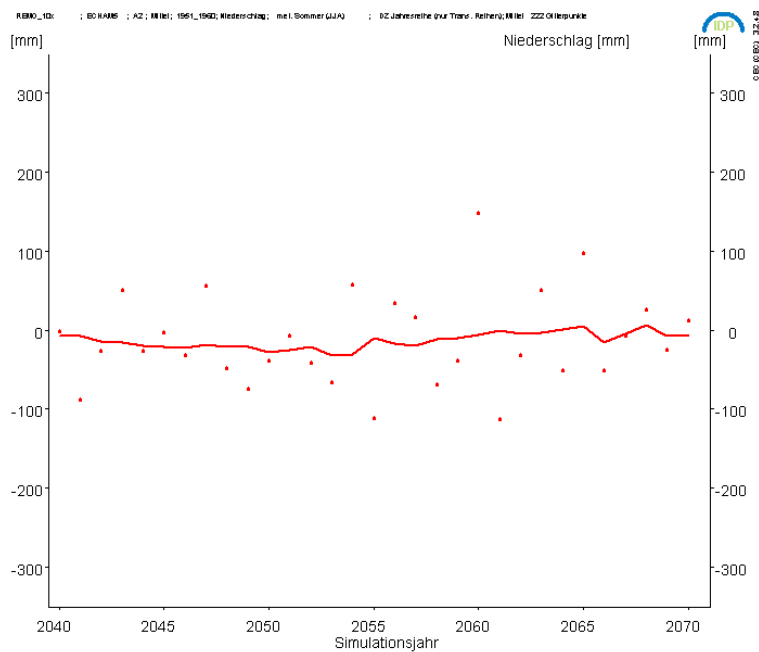
(a) B1

Abbildung A.12: Fortsetzung von Abb. A.9. Szenario B1.

Niederschlag – Sommer und Winter

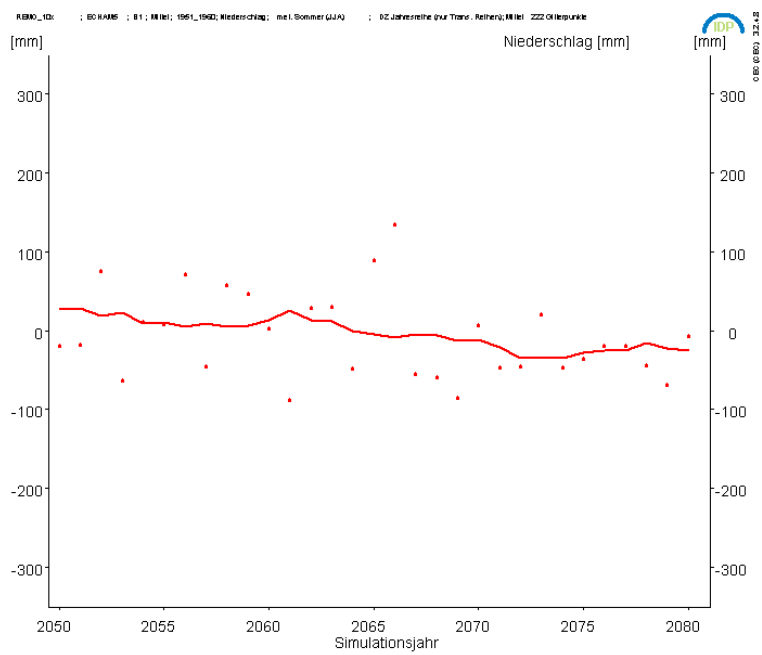


(a) A1B



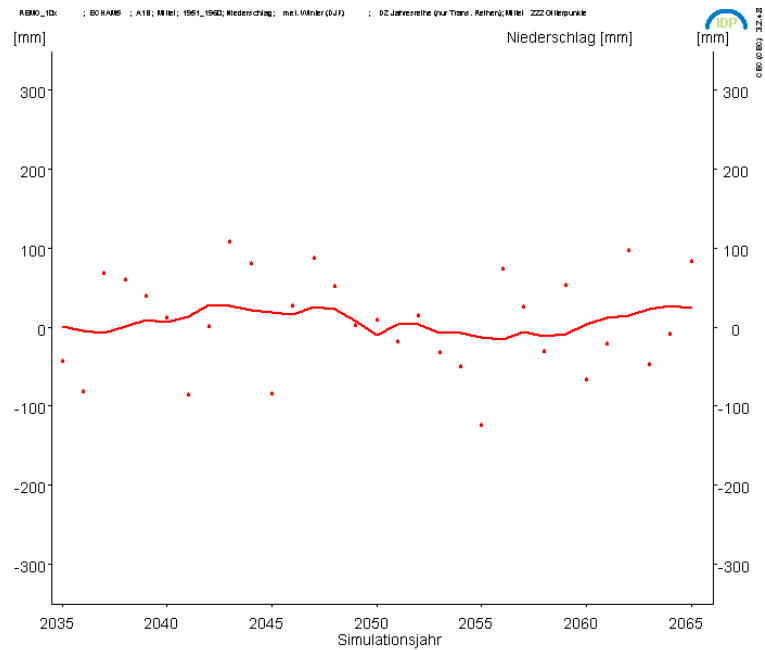
(b) A2

Abbildung A.13: Wie Abb. A.11, jedoch für den Sommerniederschlag von REMO, Szenarios A1B und A2.

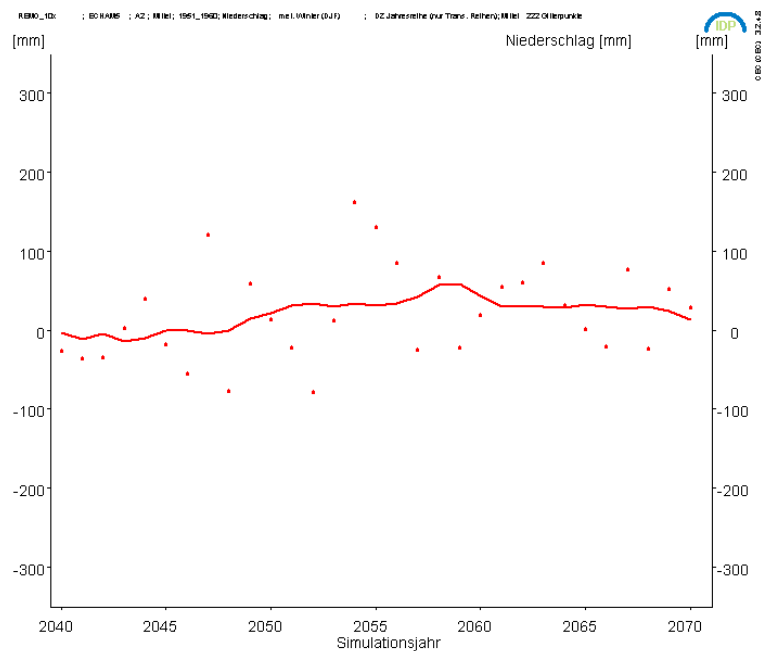


(a) B1

Abbildung A.14: Fortsetzung von Abb. A.13. Szenario B1.

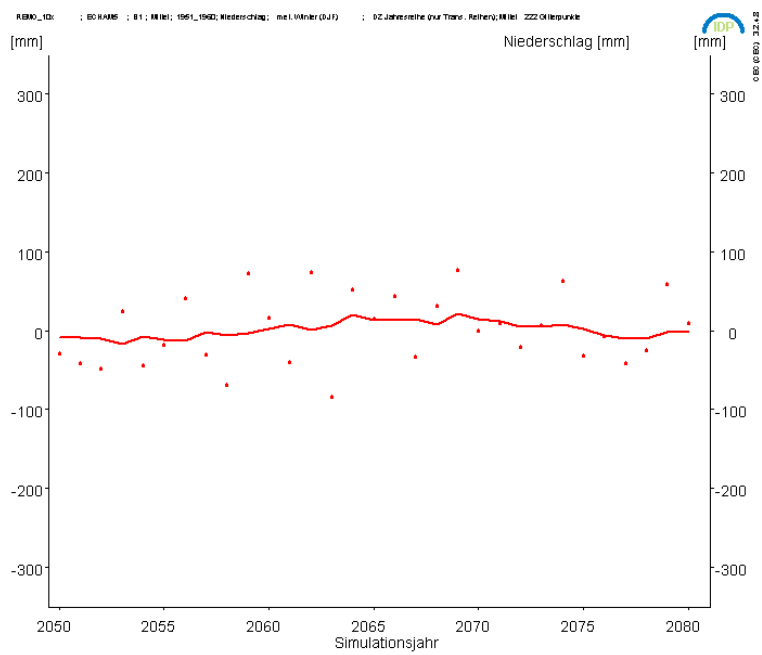


(a) A1B



(b) A2

Abbildung A.15: Wie Abb. A.11, jedoch für den Winterniederschlag von REMO, Szenarios A1B und A2.



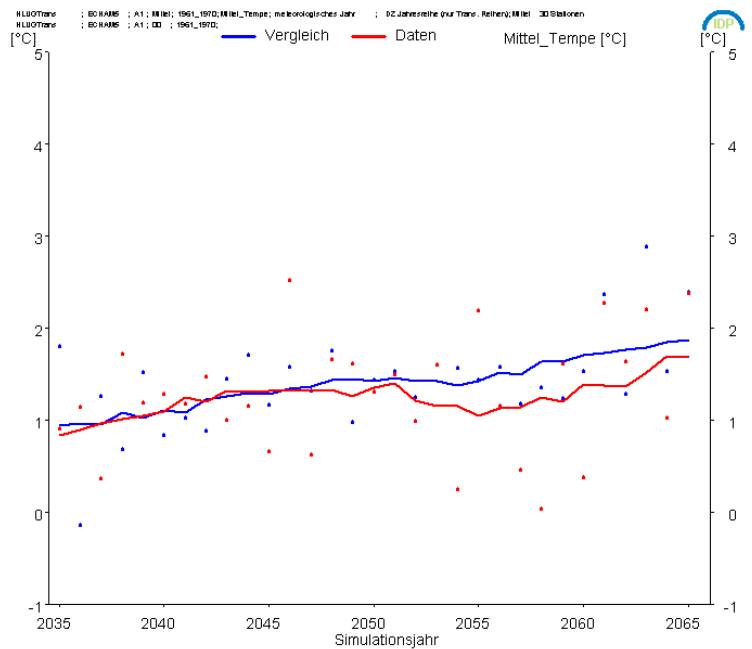
(a) B1

Abbildung A.16: Fortsetzung von Abb. A.15. Szenario B1.

A.3 WETTREG-Hessen Transient

Das statistische Verfahren WETTREG benutzt keine Gitterpunkte sondern synthetisiert Zeitreihen, denen die Signatur des Klimawandels aufgeprägt wurde. Die Stützstellen sind die Positionen von Messstationen. In Hessen wurden 30 Klimastationen und 296 Niederschlagsstationen verwendet.

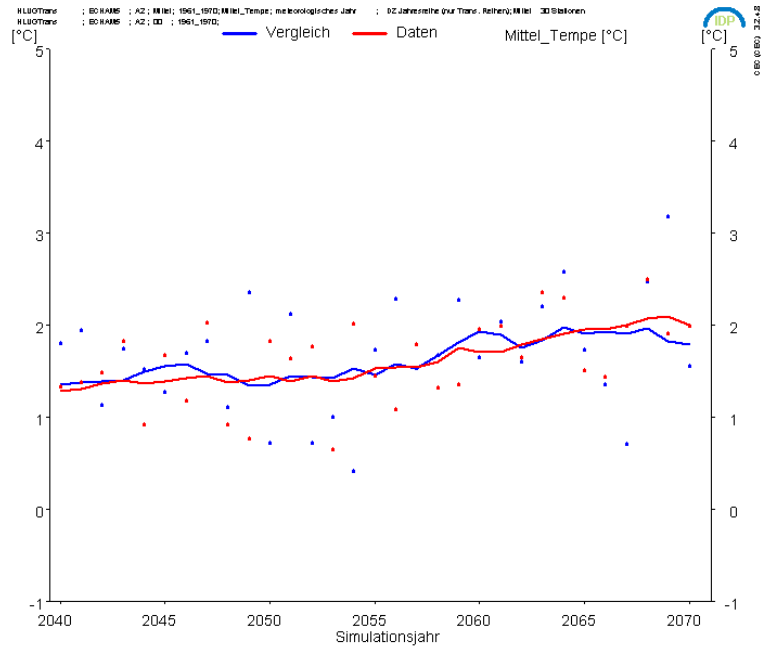
Temperatur



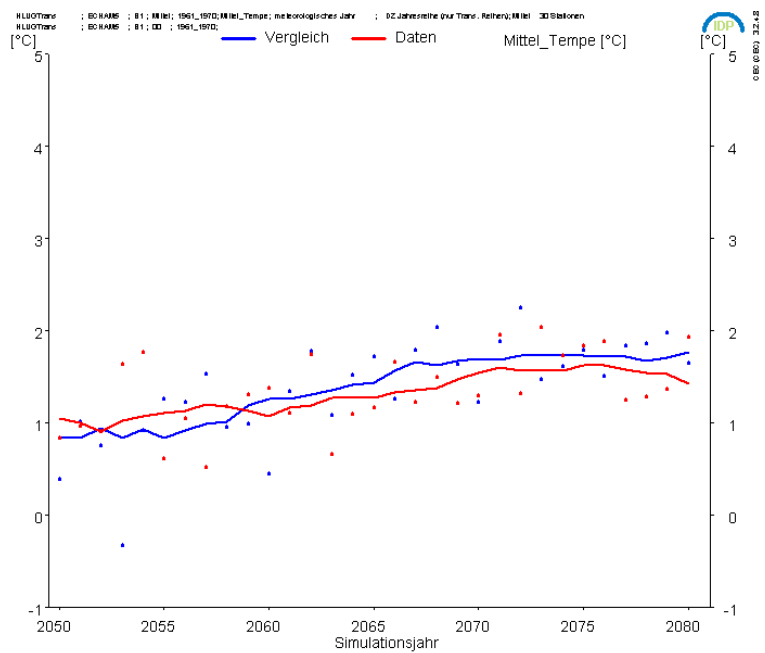
(a) A1B

Abbildung A.17: Verlauf des von WETTREG für Hessen simulierten Anstiegs der Jahresmitteltemperatur als Abweichung vom Mittel 1971–2000. Die durchgezogene Linie gibt ein 11-jähriges gleitendes Mittel (Bezugspunkt ± 5 Werte) wieder. Modellantrieb: Je ein Lauf mit dem ECHAM5-Szenario A1B. Rot: Antrieb mit Lauf 1; blau: Antrieb mit Lauf 0.

A.3 WETTREG-Hessen Transient



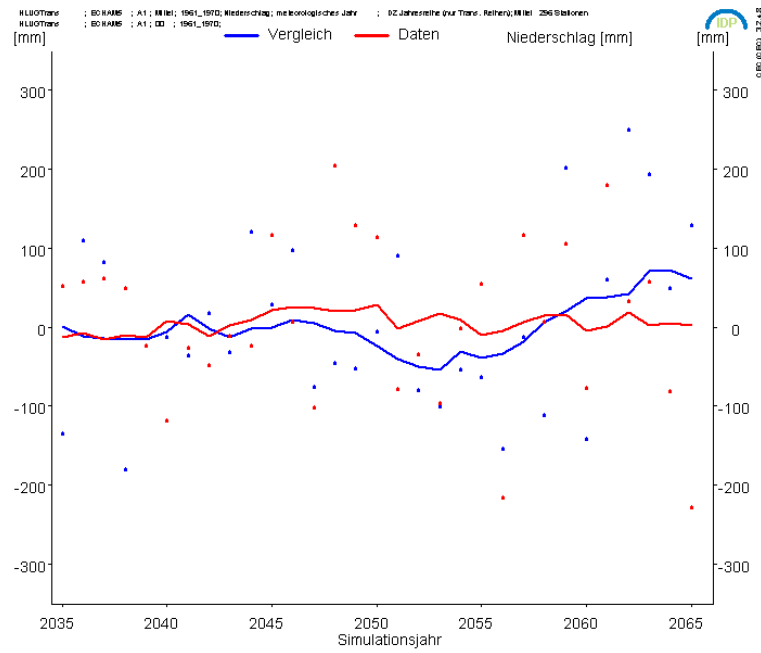
(a) A2



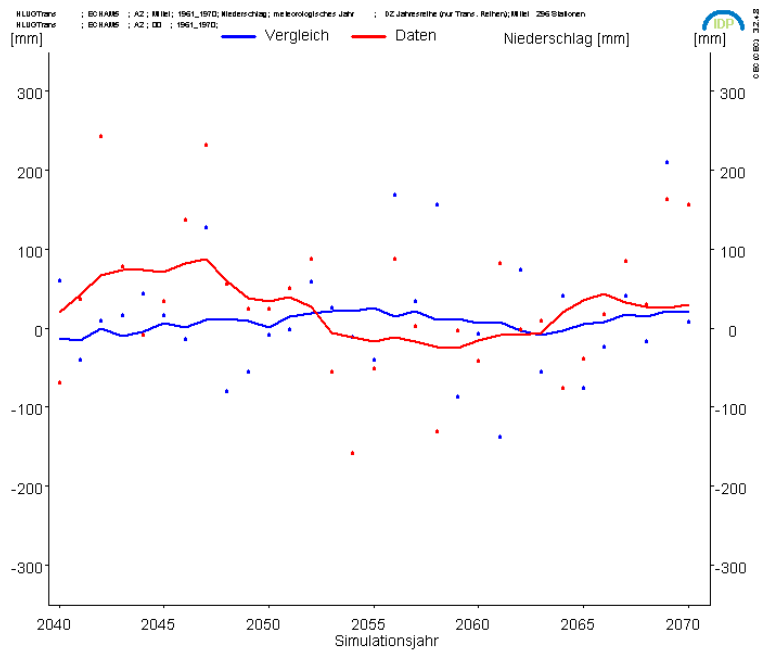
(b) B1

Abbildung A.18: Fortsetzung von Abb. A.17. Szenarios A2 und B1.

Niederschlag – Jahr

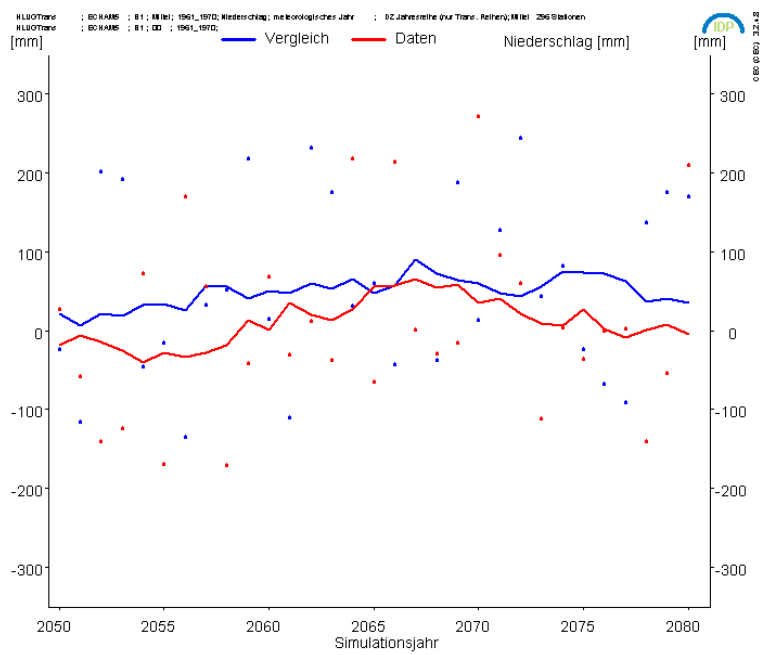


(a) A1B



(b) A2

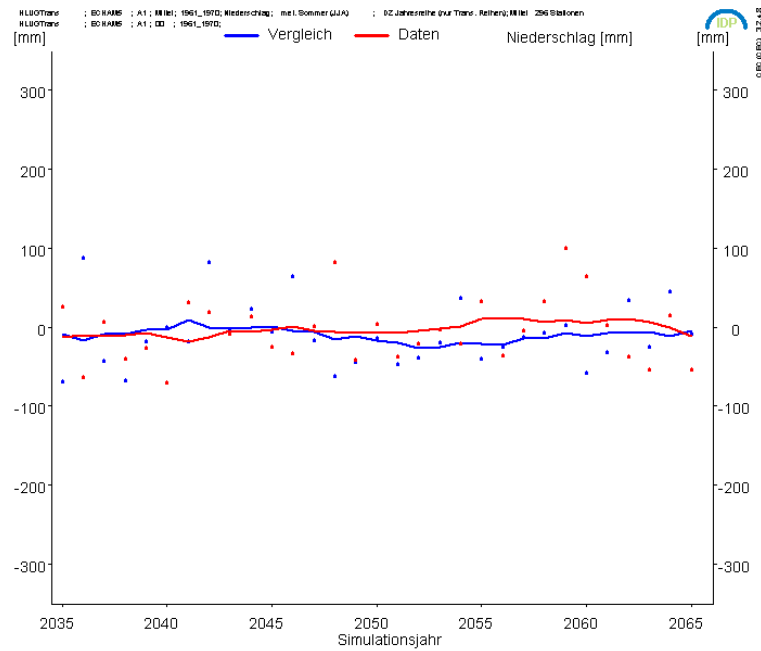
Abbildung A.19: Wie Abb. A.17, jedoch für den Jahresniederschlag von WETTREG, Szenarios A1B und A2.



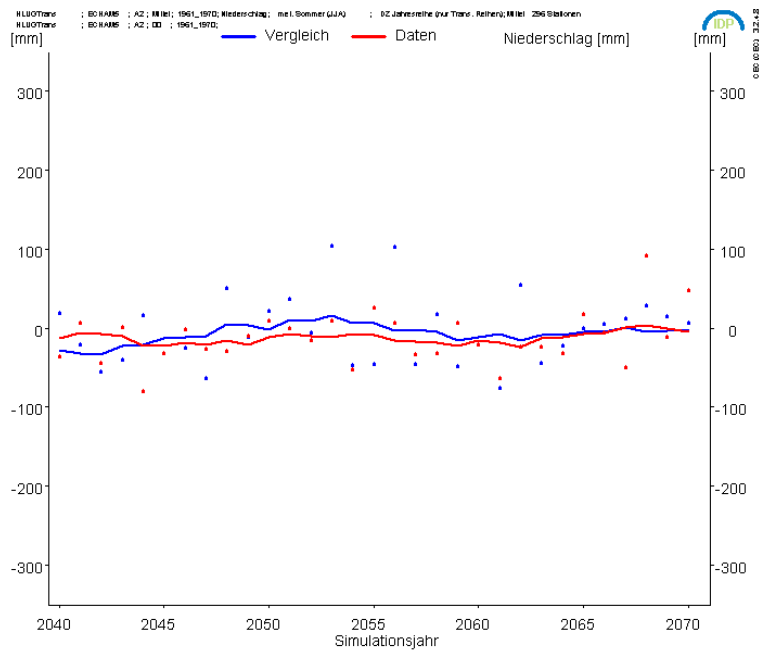
(a) B1

Abbildung A.20: Fortsetzung von Abb. A.19. Szenario B1.

Niederschlag – Sommer und Winter

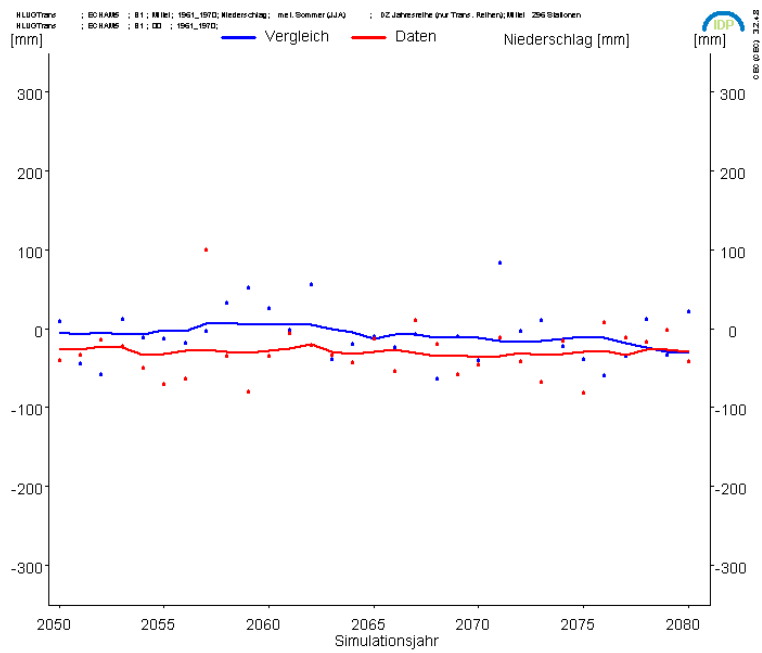


(a) A1B



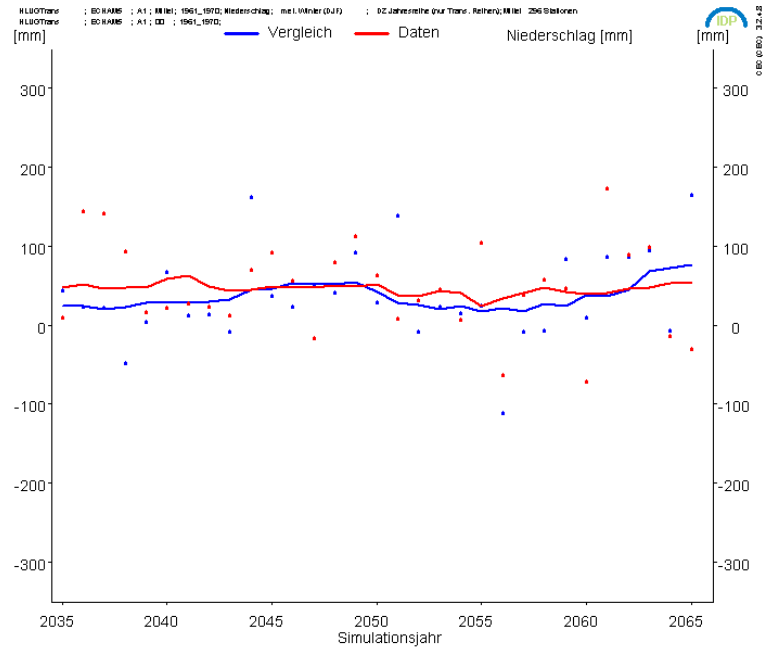
(b) A2

Abbildung A.21: Wie Abb. A.19, jedoch für den Sommerniederschlag von WETT-REG, Szenarios A1B und A2.

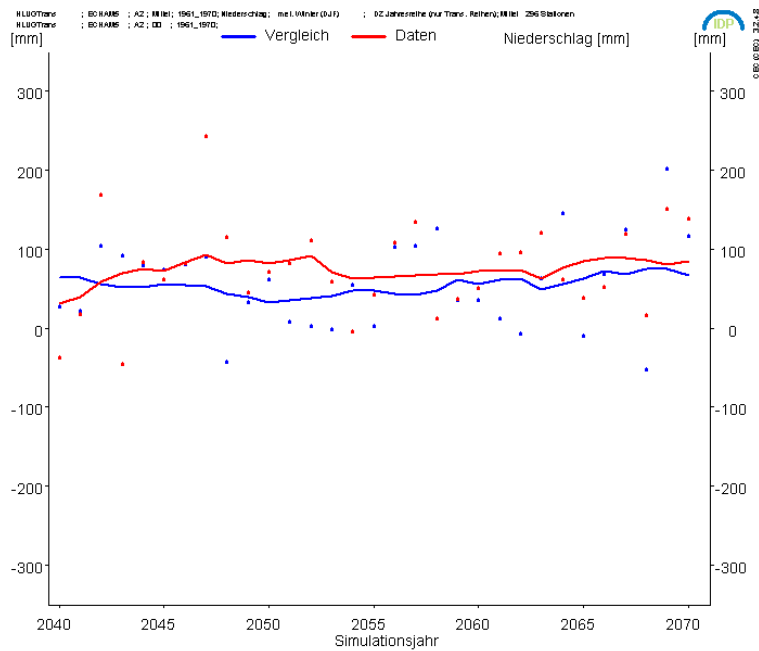


(a) B1

Abbildung A.22: Fortsetzung von Abb. A.21. Szenario B1.

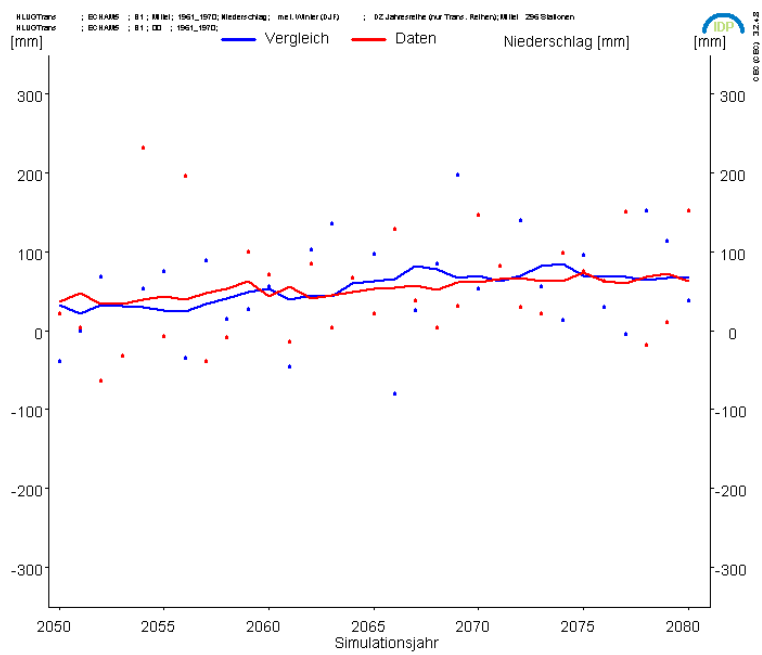


(a) A1B



(b) A2

Abbildung A.23: Wie Abb. A.19, jedoch für den Winterniederschlag von WETTREG, Szenarios A1B und A2.



(a) B1

Abbildung A.24: Fortsetzung von Abb. A.23. Szenario B1.