Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppen
IAG Globaler Wandel – Regionale Entwicklung

berlin-brandenburgische
AKADEMIE DER WISSENSCHAFTEN

Barbara Köstner und Matthias Kuhnert

Die Wirkung zukünftiger Klimaänderungen auf terrestrische Ökosysteme am Beispiel der Uckermark in Brandenburg

DISKUSSIONSPAPIER 14
04/2011

Die Wirkung zukünftiger Klimaänderungen auf terrestrische Ökosysteme am Beispiel der Uckermark in Brandenburg

Barbara Köstner und Matthias Kuhnert

Barbara Köstner und Matthias Kuhnert
Die Wirkung zukünftiger Klimaänderungen auf terrestrische Ökosysteme am Beispiel der Uckermark in Brandenburg
Diskussionspapier 14
04/2011

Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften
Interdisziplinäre Arbeitsgruppe *Globaler Wandel – Regionale Entwicklung*
Jägerstr. 22/23 | 10117 Berlin
Tel.: +49 (0)30 20370-281
Fax: +49 (0)30 20370-214
http://globalerwandel.bbaw.de

© 2011 Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Berlin

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in fremde Sprachen, sind vorbehalten.

Satzvorlage: work*: at:*BOOK / Martin Eberhardt, Berlin
Printed in Germany

Inhalt

Abbildungsverzeichnis **5**

Tabellenverzeichnis **6**

1 Einleitung **7**

2 Nutzung der Wissensplattform LandCaRe-DSS **10**

3 Ergebnisse mit dem LandCaRe-DSS **12**

3.1 Temperatur, Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz 12
3.2 Phänologische Kennwerte der Jahreszeiten 19
3.3 Wasser- und Kohlenstoffflüsse 21
3.3.1 Primärproduktion und Wassernutzungseffizienz von Wald und Grasland 21
3.3.2 Gebietsabfluss 28
3.3.3 Landwirtschaftlicher Ertrag und Pflanzenentwicklung 28
3.3.4 Zusatzwasserbedarf landwirtschaftlicher Fruchtarten 29

4 Betrachtung der Simulationsergebnisse im Kontext vorangegangener Untersuchungen **31**

5 Schlussfolgerungen **33**

Literatur **35**

Autorenhinweis **43**

Anhang **39**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Der Einfluss erhöhter atmosphärischer CO_2-Konzentrationen auf die Vegetation als Beispiel für das Wirkungsgefüge von ökosystemaren Energie- und Stoffflüssen, Schlüsselprozessen und Kenngrößen 7

Abbildung 2: Abfolge von Modellen und Ergebnissen sowie Rückkopplung mit Klimamodellen 8

Abbildung 3: Integrationsebenen und Module des LandCaRe-DSS 10

Abbildung 4: Abfolge von unterschiedlichen Szenariotypen bei der Analyse von Klimawirkungen mit Rückkopplung auf verschiedenen Ebenen der Wirkungsanalyse 11

Abbildung 5: Raum-zeitliche Entwicklung von Klimaelementen in Ostdeutschland von 1951 bis 2000 im Jahr und in den meteorologischen Jahreszeiten mit Kennzeichnung der LandCaRe2020-Untersuchungsbiete 13

Abbildung 6: Trend der klimatischen Wasserbilanz für Berlin und in der Uckermark nach WETTREG- und CLM-Projektion für das Emissionsszenario A1B 14

Abbildung 7: Monatsmitteltemperaturen, monatliche Niederschlagssumme und Ereignistage für die Periode 1981–2010 (=1995) und die Periode 2021–2050 (=2035) an der Station Berlin-Dahlem, Projektion WETTREG, A1B 15

Abbildung 8: Monatsmitteltemperaturen, monatliche Niederschlagssumme und Ereignistage für die Periode 1981–2010 (=1995) und die Periode 2021–2050 (=2035), „Gitterpunkt Berlin“, Projektion CLM, A1B 16

Abbildung 9: Monatsmitteltemperaturen, monatliche Niederschlagssumme und Ereignistage für die Periode 1981–2010 (=1995) und die Periode 2021–2050 (=2035) an der Station Angermünde, Projektion WETTREG, A1B 17

Abbildung 10: Monatsmitteltemperaturen, monatliche Niederschlagssummen und Ereignistage für die Periode 1981–2010 (=1995) und die Periode 2021-2050 (=2035), „Gitterpunkt Uckermark“, Projektion CLM, A1B 18

Abbildung 11: Diagramme der „Phänologischen Uhr“ für die Temperaturdaten der Station Angermünde aus der Projektion WETTREG, A1B und B1bei Vergleich der Klimanormalperioden 1981–2010 (1995) mit 2021–2050 (2035) 19

Abbildung 12: Räumliche Verteilung der Eingangsdaten der CLM-Klimaprojektion, A1B für die mittlere Jahrestemperatur und die mittlere Jahressumme des Niederschlags in der Uckermark 21

Abbildung 13: Räumliche Verteilung der Landnutzung nach CORINE im Untersuchungsgebiet der Uckermark 22

Abbildung 14: Räumliche Verteilung der Bodenarten sowie von Nadel- und Laubwald im Untersuchungsgebiet der Uckermark 23

Abbildung 15: Relative Änderung der Gesamtverdunstung und der Verdunstungskomponenten Transpiration, Interzeption und Bodenevaporation beim Vergleich jeweils zweier Zeiträume für zwei Emissionsszenarien (A1B, B1) 23

Abbildung 16: Relative Änderung der der Bruttoprimärproduktion und der Wassernutzungseffizienz beim Vergleich jeweils zweier Zeiträume für die Emissionsszenarien A1B und B1 24

Abbildung 17: Simulation des Gesamtgebietsabflusses sowie des landwirtschaftlichen Ertrages im Einzugsgebiet der Uecker für den Zeitraum 2021–2050 auf Basis der Klimaprojektion WETTREG, A1B und CLM, A1B. Simulation mit heutigem Fruchtartenspektrum (Uckermark-Standard) und dem Referenz-Anbauverteilungsszenario (baseline) 25

Abbildung 18: Simulation des Eintritts von Entwicklungsstadien landwirtschaftlicher Fruchtarten am Beispiel von Winterweizen und Silomais für die Perioden 1981–2010 und 2021–2050 auf Basis der Klimaprojektion WETTREG, A1B und CLM, A1B 26

Abbildung 19: Simulation des Zusatzwasserbedarfs landwirtschaftlicher Fruchtarten sowie des Grades der Beregnungsbedürftigkeit im Einzugsgebiet der Uecker für den Zeitraum 2021–2050 auf Basis der Klimaprojektion WETTREG, A1B und CLM, A1B. Simulation mit heutigem Fruchtartenspektrum (Uckermark-Standard) und dem Referenz-Anbauverteilungsszenario (baseline). 27

Abbildung 20: Trend der Jahresmitteltemperatur, der Jahresniederschlagssumme und der klimatischen Wasserbilanz an der Station Berlin-Dahlem nach der WETTREG-Projektion für das Emissionsszenario A1B 39

Abbildung 21: Trend der Jahresmitteltemperatur, der Jahresniederschlagssumme und der klimatischen Wasserbilanz am zentralen Gitterpunkt 090_121 der CLM-Projektion im Raum Berlin (Mittelung von insgesamt 9 Gitterpunkten und 2 Realisierungen) für das Emissionsszenario A1B 40

Abbildung 22: Trend der Jahresmitteltemperatur, der Jahresniederschlagssumme und der klimatischen Wasserbilanz an der Station Angermünde nach der WETTREG-Projektion für das Emissionsszenario A1B (Mittelung von 3 Realisierungen) 41

Abbildung 23: Trend der Jahresmitteltemperatur, der Jahresniederschlagssumme und der klimatischen Wasserbilanz am zentralen Gitterpunkt 094_124 der CLM-Projektion im Raum Uckermark (Mittelung von insgesamt 9 Gitterpunkten und 2 Realisierungen) für das Emissionsszenario A1B 42

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eintrittstermine und Schwankungsbreite der phänologischen Phasen entsprechend der Klimaprojektion WETTREG, A1B 20

Tabelle 2: Eintrittstermine und Schwankungsbreite der phänologischen Phasen entsprechend der Klimaprojektion WETTREG, B1 20

Tabelle 3: Simulationsergebnisse für den Gebietsabfluss (Modell BAGLUVA) 28

Tabelle 4: Simulationsergebnisse für den landwirtschaftlichen Ernteertrag (Modell YIELDSTAT) .. 29

Tabelle 5: Simulationsergebnisse für den landwirtschaftlichen Zusatzwasserbedarf (Modell ZUWABE) mit dem Grad der Beregnungsbedürftigkeit in Klammern 30

1 Einleitung

Wenn wir von Ökosystemen sprechen, dann betonen wir damit besonders die Wechselwirkungen der Lebewesen untereinander und mit ihrer abiotischen Umwelt, das Zusammenwirken gestaltender Kompartimente des Systems wie Boden und Vegetation sowie deren Energie- und Stoffströme. Dies ist immer dann wichtig, wenn sich Umweltfaktoren ändern, die viele Komponenten und Prozesse des Systems beeinflussen und zu einer Kette von Folgereaktionen führen. Klimaänderungen gehören zu solchen grundlegenden Änderungen von Rahmenbedingungen, für dessen Einflüsse auf Atmosphäre und Lebewesen wir aus der Vergangenheit zwar Indizien besitzen (sog. Proxydaten, z.B. aus Eisbohrkernen, Sedimenten von Seen, Torfstichen, Baumringen), die aber keine Informationen über Mechanismen liefern. Die sicherste Aussage, die über den gegenwärtigen Klimawandel getroffen werden kann, ist der Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration. Seine Wirkung auf Ökosysteme verbunden mit Klimaänderungen ist jedoch schwer vorherzusehen. Die Schwierigkeit besteht darin, dass eine Vielzahl von Wirkungsorten und Prozessen betroffen ist, die positiv oder negativ rückgekoppelt sein können, so dass für die resultierende Nettobilanz von Energie- und Stoffströmen auf der Ebene des Kompartiments (z. B. Bodenwassergehalt, Pflanzenwachstum) oder des Systems (Grundwasserabfluss, Nettoökosytemproduktion) das Vorzeichen (Zu-/Abnahme) nicht oder nur mit großer Unsicherheit vorhersagbar ist (Abbildung 1). Obwohl Simulationsmodelle laufend weiterentwickelt werden, können diese immer nur eingeschränkt die vielfältigen und räumlich sehr differenzierten Wirkungen abbilden (u.a. Goudriaan et al. 1999).

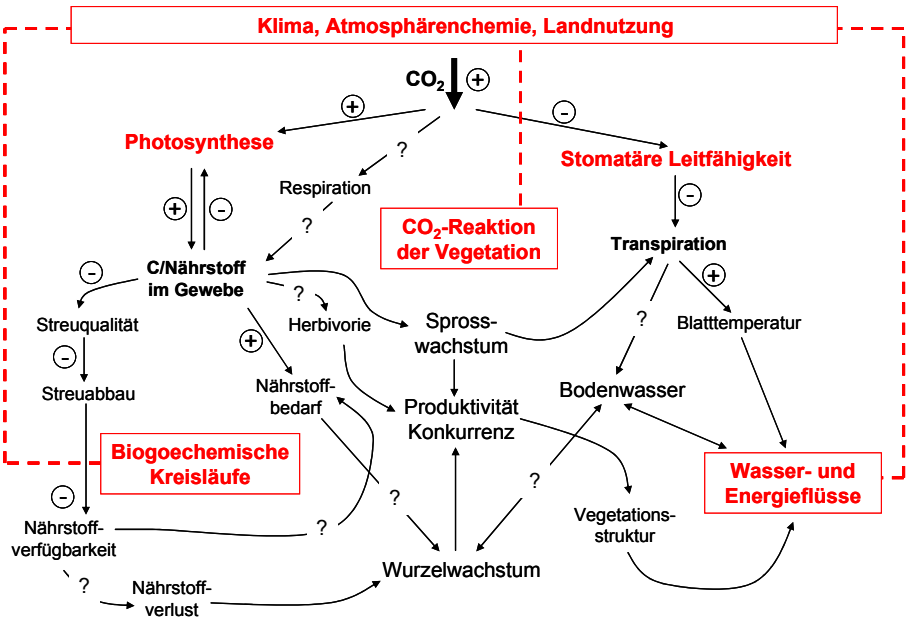


Abbildung 1: Der Einfluss erhöhter atmosphärischer CO_2-Konzentrationen auf die Vegetation als Beispiel für das Wirkungsgefüge von ökosystemaren Energie- und Stoffflüssen, Schlüsselprozessen und Kenngrößen. Verstärkende Wirkungen sind mit „+“, reduzierende mit „-“ gekennzeichnet (nach Mooney 1996, verändert)

Seitens der Landoberfläche gibt es in den Fachgebieten wie der Hydrologie, Bodenkunde oder Pflanzenökologie eine lange Tradition der Darstellung von Energie-, Wasser- und Stoffflüssen mit numerischen Modellen. Sie dienten zunächst vor allem der Prüfung des Prozessverständnisses und der Interpretation von Änderungen an Systemrändern (z.B. Pegelwerte). Mit zunehmendem Interesse an globalen bzw. großflächigen Betrachtungen wurden Modelle für die räumliche und zeitliche Extrapolation, d. h. für die Überbrückung von Skalen eingesetzt (Rosswall et al. 1988, Baldocchi und Amthor 2001, Ehleringer et al. 2003, Kabat et al. 2004). Während früher die zeitliche Extrapolation vor allem in Richtung Vergangenheit geführt wurde, um Beobachtungen anhand von Modellen nachzuvollziehen und die Modelltheorie zu überprüfen, wird heute versucht, zukünftige Klimawirkungen abzuschätzen indem man die Landoberflächenmodelle mit Klimaprojektionen der Zukunft verknüpft (u. a. Gerstengarbe et al. 2003). Zur Unterscheidung von Klimamodellen bezeichnet man die verschiedenen Landoberflächenmodelle auch als Wirk(ungs)modelle (Abbildung 2). Die Ergebnisse werden für die Analyse von Klimafolgen und die Entwicklung von Anpassungen genutzt. Auf größerer räumlicher Skala sollten die Ergebnisse aus Wirkungsmodellen mit Klimamodellen rückgekoppelt werden. So lässt sich in einer Art Entwicklungsspirale das Wissen über zukünftige Klimaänderungen und deren Folgen weiter verbessern.

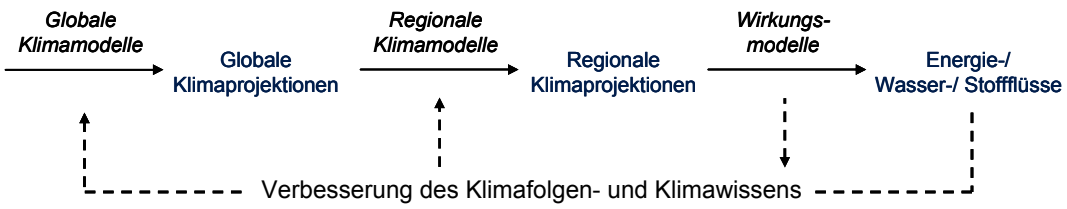


Abbildung 2: Abfolge von Modellen und Ergebnissen sowie Rückkopplung mit Klimamodellen

Für die Verknüpfung von Landoberfläche und Atmosphäre spielen Boden-Vegetation-Atmosphäre-Transfer-Modelle, sog. SVAT (soil-vegetation-atmosphere-transfer)-Modelle eine herausragende Rolle (u. a. Falge et al. 2005). Für die Kopplung mit der Atmosphäre sind besonders die Art und Dynamik der Vegetationsbedeckung, die Vegetationshöhe (Wald, Gras-/Ackerland) sowie der Stickstoffgehalt der Blätter (natürliche Vegetation, gedüngte Agrarökosysteme) von Bedeutung. Große Herausforderungen bestehen im Verständnis und in der modellhaften Beschreibung des Kohlenstoffhaushaltes und seiner Verknüpfung mit dem Energie- und Wasserhaushalt (vgl. Abbildung 1). Bei letzterem ist vor allem die Verdunstung eine nicht einfach zu quantifizierende Größe. Sie setzt sich zusammen aus der Transpiration der Pflanzen, der Verdunstung des Bodens und der Interzeptionsverdunstung von pflanzlichen Oberflächen (s. Köstner und Kuhnert 2011). Die rein physikalisch gesteuerte Verdunstung einer nassen Oberfläche hängt von der verfügbaren Energie, dem Sättigungsdefizit der Luft und der aerodynamischen Leitfähigkeit ab. Bei Boden und Vegetation müssen zusätzliche Widerstände bzw. Leitfähigkeiten berücksichtigt werden. Diese können nur lokal gemessen werden, müssen jedoch räumlich extrapoliert werden, was zu hohen Unsicherheiten führt. Eine weitere Unsicherheit besteht darin, dass der Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration zunehmend die Blattleitfähigkeit reduziert. Es muss daher in Betracht gezogen werden, dass zukünftig, unter hohen atmosphärischen CO_2-Konzentrationen und bei vergleichbarer Vegetationsdecke, die Bedeutung des physikalisch gesteuerten Anteils (Bodenevaporation und Interzeptionsverdunstung) gegenüber dem physiologisch gesteuerten Verdunstungsanteils (Transpiration der Pflanzen) zunimmt. Zudem werden bei Bodentrockenheit Transpiration und Evaporation eingeschränkt (Jung et al. 2010), die Interzeptionsverdunstung nimmt dagegen bei dichter Vegetation und in Abhängigkeit von Häufigkeit und Intensität der Niederschlagsereignisse zu (Köstner und Clausnitzer 2011, Bernhofer et al. 2011). Ein

weiterer Unsicherheitsfaktor ist die zukünftige Entwicklung der Strahlung. Ein Zunahme des diffusen Strahlungsanteils durch Bewölkung und Aerosole kann die terrestrische Ökosystemproduktion erhöhen, eine generelle Abnahme der Strahlungsintensität würde die pflanzliche Produktion andererseits erniedrigen (Gu et al. 2002, Moffat et al. 2010). Ähnlich wie bei der Wirkung der erhöhten atmosphärischen CO_2-Konzentrationen bleibt hier unklar, wie sich verstärkende und reduzierende Effekte in der Bilanz auswirken. Auch in diesem Fall spielen zusätzliche Wechselwirkungen mit Temperatur und Luftfeuchte sowie Bodenwasser- und Nährstoffverfügbarkeit eine ausschlaggebende Rolle.

Um Anpassungen an den Klimawandel entwickeln zu können, sind Kenntnisse bzw. konkretisierte Vorstellungen möglicher regionaler Auswirkungen erforderlich. Diese ließen sich zum einen erschließen, indem man regional oder lokal erfahrene Wirkungen der Vergangenheit rein durch Überlegung in die Zukunft überträgt. Dies hat den Vorteil, dass nicht Klima, sondern reale Witterung oder besondere Wetterereignisse betrachtet werden und ein wichtiges Lernpotenzial darin besteht, welche zusätzlichen besonderen Umstände (zeitliches Zusammentreffen mit anderen Faktoren, schädliche Folgewirkungen, Technikversagen etc.) den Schaden verstärken können. Der Nachteil besteht darin, dass kaum quantitative Aussagen möglich, Erfahrungshorizont und Randbedingungen begrenzt sind und neuartige Umweltfaktoren nicht einbezogen werden. Deshalb müssen theoretisch fundierte, systematische Analysen dazukommen, die umfassendes Wissen aus verschiedenen wissenschaftlichen Bereichen integrieren und durch numerische Modelle Auswirkungen quantifizieren. Im Folgenden wird ein modellbasiertes Entscheidungshilfesystem genutzt, um regionale Klimaprojektionen zu analysieren und zu vergleichen sowie Wirkungen auf Kenngrößen von Landnutzung und Wasserhaushalt am Beispiel der Uckermark mit Hilfe von Modellsimulationen zu untersuchen.

2 Nutzung der Wissensplattform LandCaRe-DSS

In den letzten Jahren wurde das modellbasierte Entscheidungshilfesystem LandCaRe (Land, Climate and Resources)-DSS (Decision Support System) entwickelt (www.landcare-dss.de; Köstner et al. 2009). Es stellt verschiedene Klimaprojektionen und eine Reihe von Wirkungsmodellen zur Verfügung, die auf regionaler Ebene ökologische Folgen (einschließlich Pflanzenproduktion) sowie auf der Ebene landwirtschaftlicher Betriebe auch ökonomische Folgen simulieren. Das Analysesystem beinhaltet zwei räumliche Integrationsebenen (regional, lokal) und zwei zeitliche Ebenen (Messdaten der Vergangenheit, Szenarien). Letztere enthalten Eingangsszenarien für Klima (verschiedene Klimaprojektionen auf Basis der Emissionsszenarien) und Ökonomie (Marktszenarien auf Basis von Annahmen über Preisentwicklungen und Politiken). In Abbildung 3 sind die inhaltlichen Module (Klima, Ökologie, Sozioökonomie) und Analysemöglichkeiten der Modelle mit ihren Verknüpfungen skizziert.

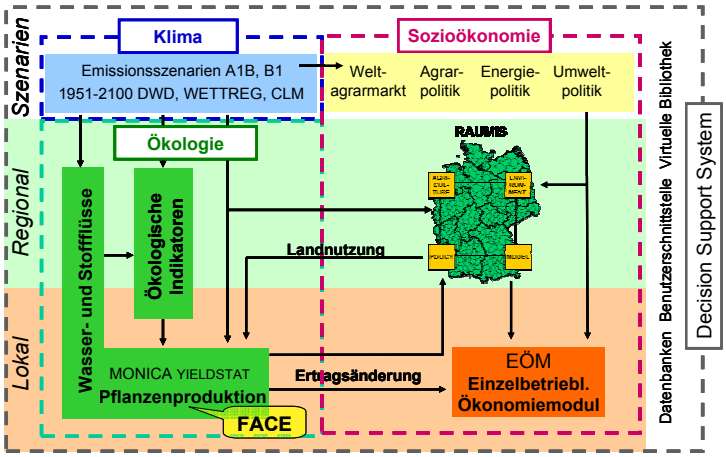


Abbildung 3: Integrationsebenen und Module des LandCaRe-DSS

Als Klimainformation für die Zukunft werden Klimaprojektionen auf Basis statistisch-dynamischer Modelle, z. B. WETTREG (Spekat et al. 2007), oder dynamischer Modelle, z.B. COSMO-CLM bzw. CCLM (im weiteren kurz CLM; Rockel et al. 2008, siehe auch Langer et al. 2010) herangezogen. Für Zeiträume in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts eignen sich vor allem dynamische Modelle, da nicht davon ausgegangen werden kann, dass die aus Wetterlagen der Vergangenheit abgeleiteten statistischen Zusammenhänge in der weiteren Zukunft noch Gültigkeit besitzen. Während frühere Klimaprojektionen eine nur geringe räumliche (Nord-/Südhemisphäre) und zeitliche (Jahre/Jahrzehnte) Differenzierung aufwiesen, konnten inzwischen in der regionalen Klimamodellierung Fortschritte erzielt werden (Christensen et al. 2007). Für Deutschland sind regionale Klimaanalysen mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen vorhanden, die zur Strategieentwicklung von Anpassungen an den Klimawandel herangezogen werden (Übersichten siehe Deutscher Wetterdienst, Klimaatlas Deutschland: www.dwd.de/klimadaten; Umweltbundesamt, KomPass: www.anpassung.net; Climate Service Center, Hamburg: www.climate-service-center.de).

Im LandCaRe-DSS werden stationsbasierte WETTREG-Daten (derzeit Version 2006, Spekat et al. 2007) punktuell oder als Regionalisierung (1x1 km^2, J. Franke, Meteorologie TU Dresden) genutzt. Die CLM-Daten liegen gitterförmig (18x18 km^2) vor, wobei entsprechend der Nutzungsempfehlung der Ziel-Gitterpunkt mit den acht umgebenden Gitterpunkten gemittelt ist. Da die Niederschläge der CLM-Projektionen (Kontrolllauf) gegenüber Messwerten des Deutschen Wetterdienstes überschätzt sind, wurde eine Gitterpunkt-spezifische Niederschlagskorrektur durchgeführt (Lindau und Simmer 2011). Ohne Korrektur hätte eine Kopplung mit Wirkungsmodellen keine sinnvollen Ergebnisse erbracht, da zum Beispiel Verdunstungskomponenten überschätzt und feuchtigkeitsbezogene Schwellenwerte der Pflanzenreaktion nicht unterschritten würden.

Für die räumlich-explizite Simulation von Stoffflüssen sind neben den Klimaszenarien Szenarien über die zukünftige Landnutzung bzw. Anbauverteilung erforderlich. Um zum Beispiel die Pflanzenproduktion einer Region zu simulieren, muss die Landnutzungsverteilung (Aufteilung der Fläche in verschiedene Vegetationstypen wie Nadel- / Laubwald, Gras- / Ackerland) und innerhalb der Ackerflächen die Anbauverteilung bekannt sein. Letztere ergibt sich aus den für die Standortbedingungen und sonstigen regionalen oder wirtschaftlichen Gegebenheiten typischen Fruchtfolgen. Geht man davon aus, dass diese sich unter dem Klimawandel oder sonstigen Einflüssen (Weltmarkt, Energie-, Umweltpolitik) ändern, sind diese Szenarioannahmen vorab bei der Erstellung der Anbauverteilung zu berücksichtigen (Abbildung 3 und 4). Für das LandCaRe-DSS wurden zunächst drei Anbauverteilungen unter Annahme unterschiedlicher zukünftiger Agrarpreisentwicklungen (baseline, optimistisch, pessimistisch) mit Hilfe des landwirtschaftlichen Informationssystems RAUMIS des Instituts für Ländliche Räume am Heinrich von Thünen-Institut in Braunschweig erstellt (Gömann et al. 2011).

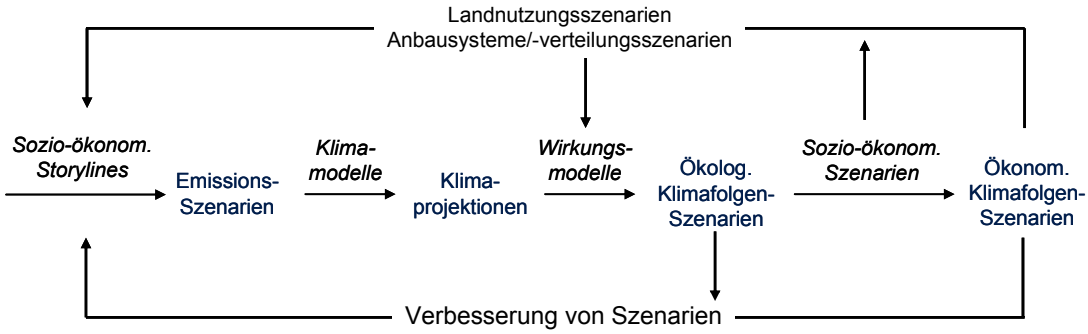


Abbildung 4: Abfolge von unterschiedlichen Szenariotypen bei der Analyse von Klimawirkungen mit Rückkopplung auf verschiedenen Ebenen der Wirkungsanalyse

Für die standortspezifische Analyse von Klimawirkungen müssen Modellparameter entsprechend angepasst und Modellergebnisse mit Beobachtungsdaten geprüft sein. Dies ist folglich nur für die Vergangenheit möglich. Die Extrapolation in die Zukunft geschieht unter Annahme weiterhin gültiger Modelltheorien und -parameter. Simulationen in die Zukunft haben daher hypothetischen Charakter und sind als Szenarien anzusehen. Das LandCaRe-DSS wurde u. a. anhand der Modellregion Uckermark bzw. des Einzugsgebiets der Uecker entwickelt und geprüft. Für das vorliegende Diskussionspapier wurden aktuelle Klimafolgen- bzw. Wirkungsszenarien mit dem Prototyp des DSS bzw. seinen Modellen erstellt.

3 Ergebnisse mit dem LandCaRe-DSS

3.1 Temperatur, Niederschlag und Klimatische Wasserbilanz

Zur Einschätzung aktueller Klimatrends wurden für die Klimadatenbank des LandCaRe-DSS nicht nur Klimaprojektionen der Zukunft ausgewertet, sondern auch die gemessenen Stationsdaten des Deutschen Wetterdienstes seit 1951 aufbereitet und homogenisiert. Die Trends der Beobachtungsdaten und ihre zeitlichen wie räumlichen Muster zeigen nicht nur die Entwicklungen in der Vergangenheit auf, sondern unterstützen die Interpretation der zukünftigen, zeitnahen Klimaprojektionen.

Aus den Trends der Vergangenheit (1951–2000) lässt sich erkennen, dass die Jahresdurchschnittstemperatur landesweit in Brandenburg um etwa 1,0–1,2 K (Kelvin: Standardeinheit für Temperaturdifferenzen; 1 K entspricht 1 °C) zugenommen hat. Die Jahresniederschläge haben vor allem im Westen und Nordosten des Landes zwischen 10 % und 30 % abgenommen. Für die Landnutzung von Bedeutung sind vor allem die Änderungen in den Jahreszeiten. So sind die Temperaturzunahmen am stärksten im Frühjahr und Winter, die Niederschlagsabnahmen besonders im Sommer und Herbst ausgeprägt (Abbildung 5). Die Klimatische Wasserbilanz hat in der Region Uckermark in den letzten Jahrzehnten im Sommerhalbjahr abgenommen, im Winterhalbjahr zugenommen (Köstner et al. 2007).

Um die zukünftigen Trends von Temperatur, Niederschlag und Klimatischer Wasserbilanz aus Klimaprojektionen kennenzulernen, wurden diese mit dem DSS an den langjährigen, meteorologischen Stationen Berlin-Dahlem, stellvertretend für den Raum Berlin, und Station Angermünde, stellvertretend für den Raum Uckermark untersucht. Es wurden jeweils Klimaprojektionen zweier methodisch unterschiedlicher regionaler Klimamodelle (WETTREG: statistisch-dynamisch; CLM: dynamisch) für das Emissionsszenario A1B herangezogen. Für CLM wurde ein Gitterpunkt in der Nähe der Station Angermünde gewählt, dessen Wert aus insgesamt 9 Gitterpunkten (zentraler Gitterpunkt und 8 umgebende Gitterpunkte im Abstand von 18 km) ermittelt wurde. Die Projektionen zeigen einen vergleichbaren, ansteigenden Trend für die Jahresmitteltemperaturen bis 2100. Dagegen weisen Niederschlag und klimatische Wasserbilanz für WETTREG- abnehmende, für CLM-Projektionen keine deutlichen Trends auf (Abbildung 6 und Abbildung 7; Temperatur- und Niederschlagstrend siehe Anhang).

Unterschiede ergeben sich auch, wenn man absolute Werte vergleicht. So beträgt die Klimatische Wasserbilanz im Raum Berlin um das Jahr 2050 bei WETTREG etwa -100 mm/a, bei CLM -40 mm/a, in der Uckermark bei WETTREG -150 mm/a, bei CLM -80 mm/a. Relative räumliche Unterschiede zwischen Berlin und Uckermark werden bei beiden Modelltypen folglich wiedergegeben.

In der folgenden Auswertung werden die saisonalen Abfolgen klimatischer Änderungen als Monatsmittel beim Vergleich zweier Klimanormalperioden (1981-2010 und 2021-2050) dargestellt. Neben den Mittelwerten von Temperatur und Niederschlag sind auch die Standardabweichungen innerhalb der 30-jährigen Perioden angezeigt. In einer Tabelle sind temperaturabhängige Ereignistage für die beiden Klimaperioden im Vergleich angegeben (Abbildung 7 bis Abbildung 10).

Aus den Analysen geht hervor, dass durchweg die Temperaturänderungen im Winterhalbjahr stärker ausgeprägt sind als im Sommerhalbjahr. Die Niederschläge weisen dagegen weniger einheitliche Muster auf mit unverändert hohen Werten im Sommer, was nicht dem derzeit beobachteten abnehmendem Trend der Sommerniederschläge entspricht. Dabei treten relativ zunehmende Monatsniederschläge häufiger bei der CLM-Projektion auf. Die Ereignistage weisen auf Überschreitungen von typischen Temperaturschwellenwerten hin. Übereinstimmend werden für die Periode bis 2050 zum

Beispiel zunehmende Sommertage aufgezeigt, wohingegen die Frosttage im Frühjahr nicht durchweg abnehmen. Heiße Tage (Tmax > 30°C) im Frühsommer können sich besonders negativ auf die Kornentwicklung von Getreide auswirken.

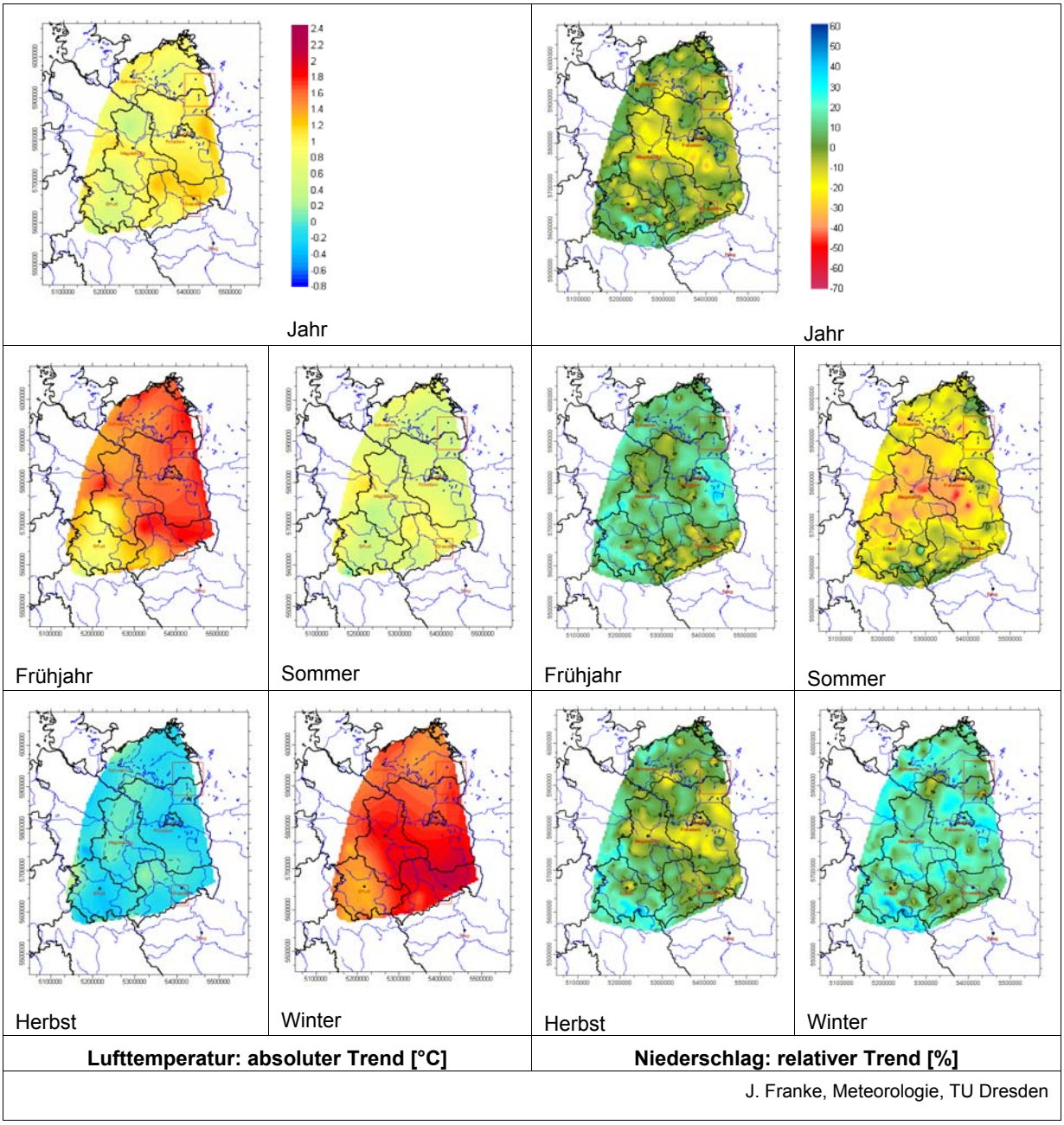


Abbildung 5: Raum-zeitliche Entwicklung von Klimaelementen in Ostdeutschland von 1951 bis 2000 im Jahr und in den meteorologischen Jahreszeiten mit Kennzeichnung der LandCaRe2020-Untersuchungsbiete (Köstner et al. 2011)

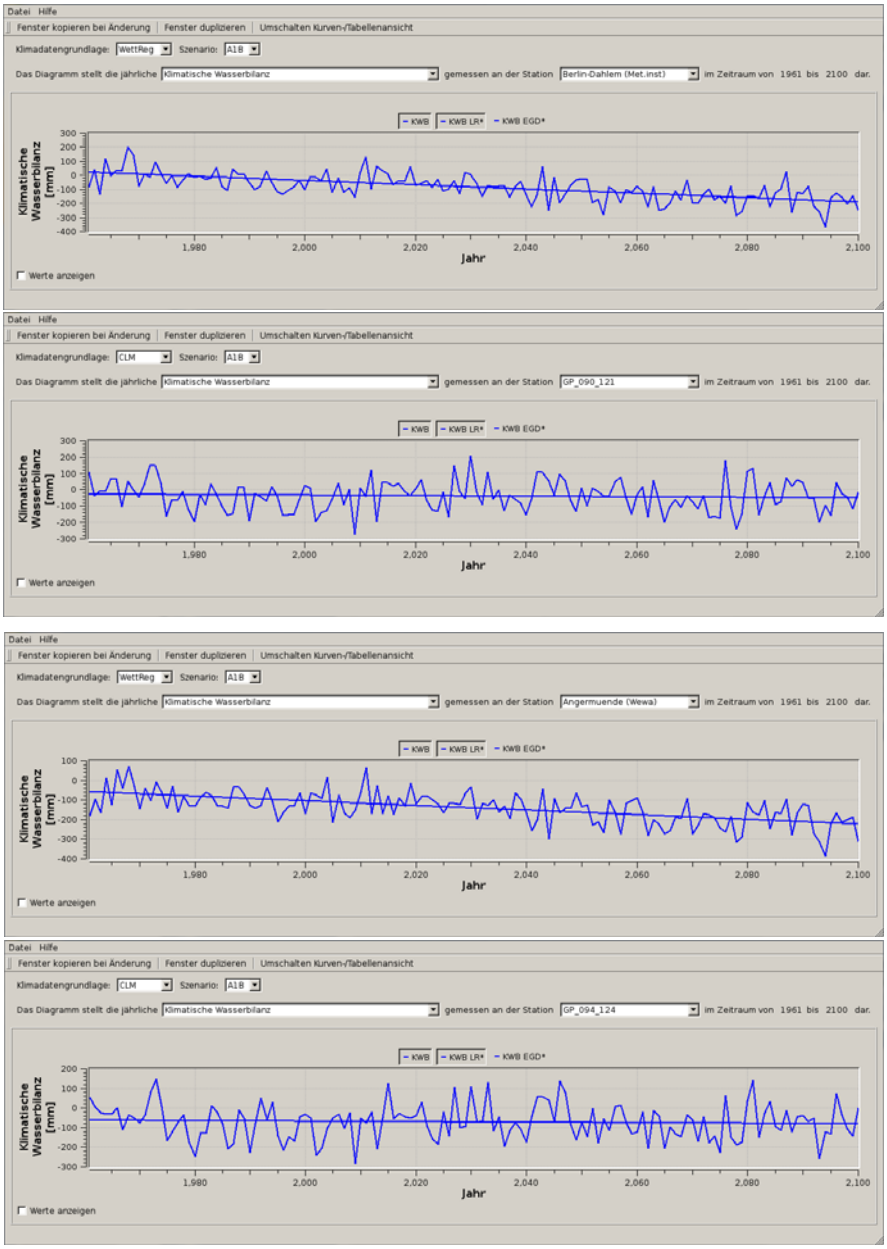
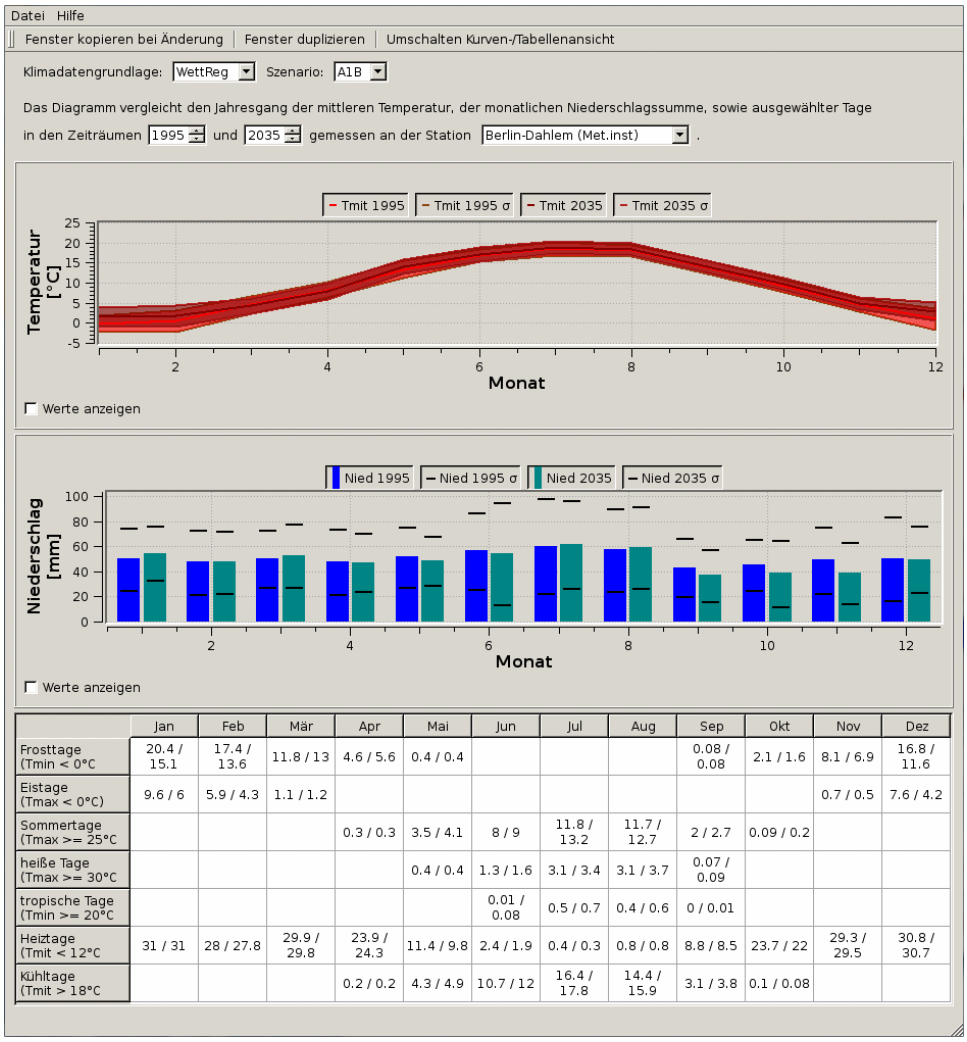


Abbildung 6: Trend der klimatischen Wasserbilanz (KWB= pot. Verdunstung/Jahresniederschlag) für Berlin (oben) und in der Uckermark (unten) nach WETTREG- (obere Trendlinie) und CLM-Projektion (untere Trendlinie) für das Emissionsszenario A1B. CLM repräsentiert das räumliche Mittel von insgesamt 9 Gitterpunkten. Systematische Abweichungen der absoluten Niederschlagswerte in der CLM-Projektion wurden vorab für jeden Gitterpunkt korrigiert

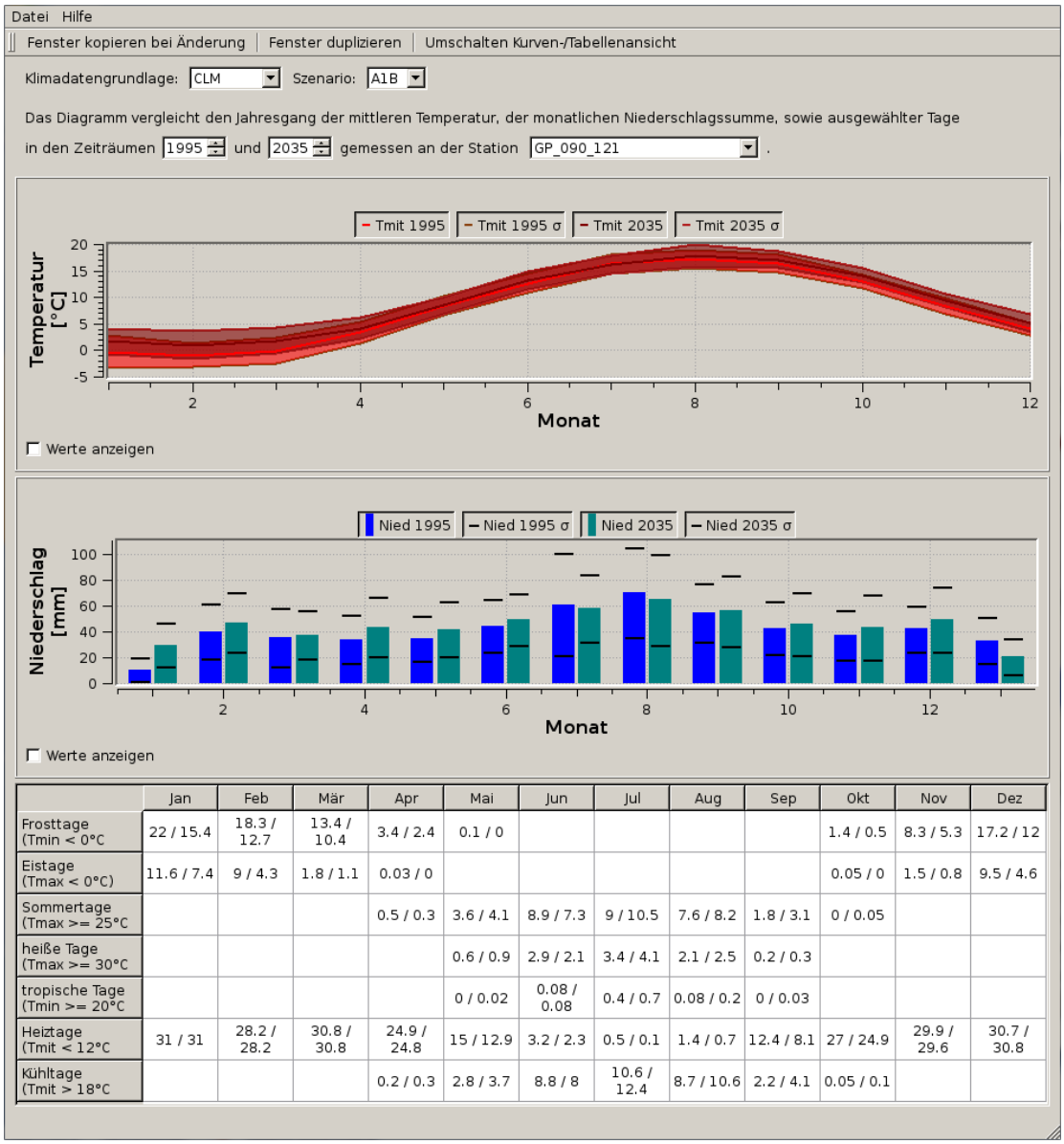
Station Berlin-Dahlem, WETTREG, A1B
Vergleich der Klimanormalperioden 1981–2010 (1995) mit 2021–2050 (2035)



	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Frosttage (Tmin < 0°C	20.4 / 15.1	17.4 / 13.6	11.8 / 13	4.6 / 5.6	0.4 / 0.4				0.08 / 0.08	2.1 / 1.6	8.1 / 6.9	16.8 / 11.6
Eistage (Tmax < 0°C)	9.6 / 6	5.9 / 4.3	1.1 / 1.2								0.7 / 0.5	7.6 / 4.2
Sommertage (Tmax >= 25°C				0.3 / 0.3	3.5 / 4.1	8 / 9	11.8 / 13.2	11.7 / 12.7	2 / 2.7	0.09 / 0.2		
heiße Tage (Tmax >= 30°C					0.4 / 0.4	1.3 / 1.6	3.1 / 3.4	3.1 / 3.7	0.07 / 0.09			
tropische Tage (Tmin >= 20°C						0.01 / 0.08	0.5 / 0.7	0.4 / 0.6	0 / 0.01			
Heiztage (Tmit < 12°C	31 / 31	28 / 27.8	29.9 / 29.8	23.9 / 24.3	11.4 / 9.8	2.4 / 1.9	0.4 / 0.3	0.8 / 0.8	8.8 / 8.5	23.7 / 22	29.3 / 29.5	30.8 / 30.7
Kühltage (Tmit > 18°C				0.2 / 0.2	4.3 / 4.9	10.7 / 12	16.4 / 17.8	14.4 / 15.9	3.1 / 3.8	0.1 / 0.08		

Abbildung 7: Monatsmitteltemperaturen (oben), monatliche Niederschlagssummen (Mitte) und Ereignistage (unten) für die Periode 1981–2010 (=1995) (Werte links) und die Periode 2021–2050 (=2035) (Werte rechts) an der Station Berlin-Dahlem, Projektion WETTREG, A1B

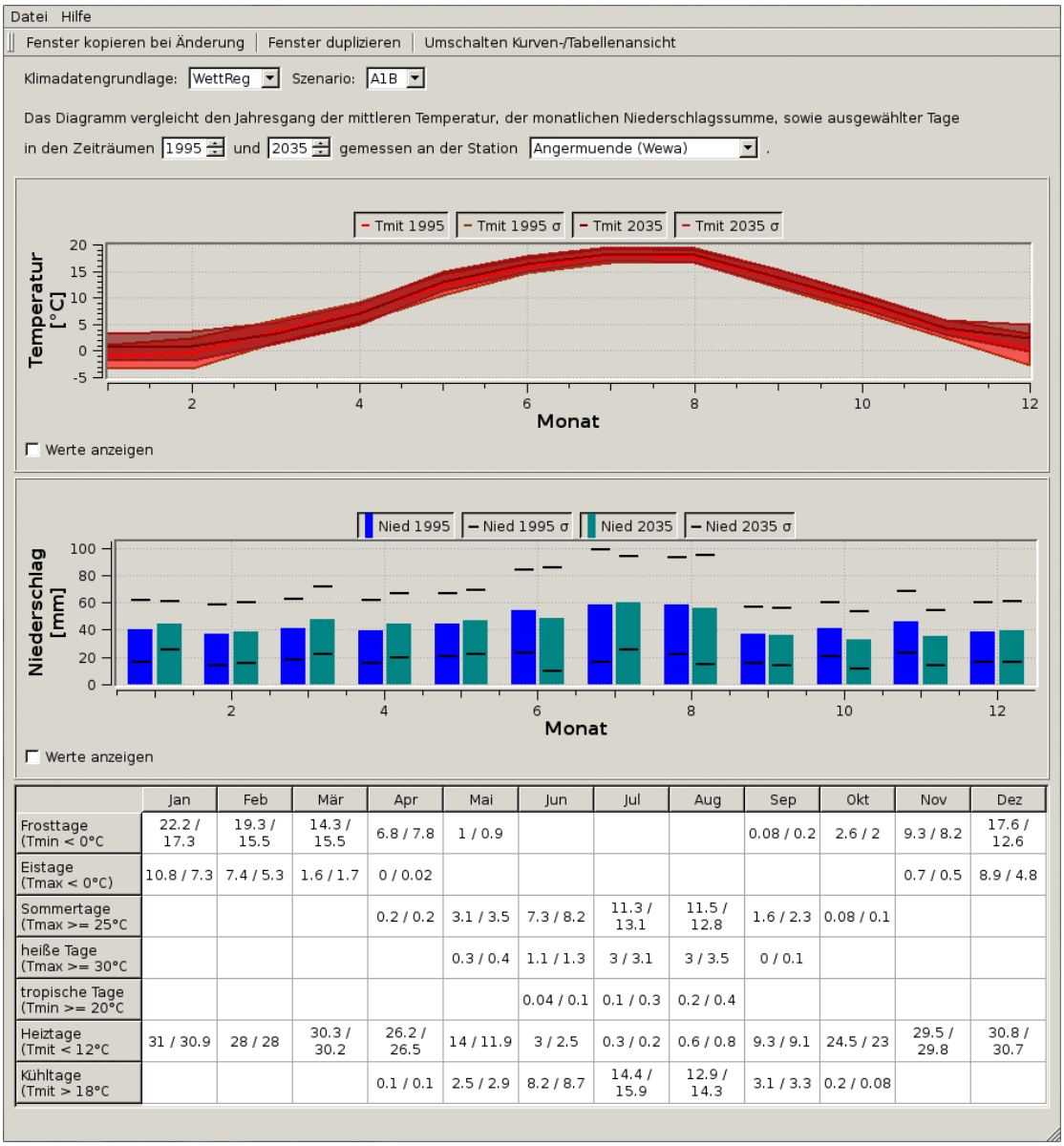
CLM A1B, Gitterpunkt 090_121 (Raum Berlin)
Vergleich der Klimaperioden 1981–2010 (1995) mit 2021–2050 (2035)



	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Frosttage (Tmin < 0°C	22 / 15.4	18.3 / 12.7	13.4 / 10.4	3.4 / 2.4	0.1 / 0					1.4 / 0.5	8.3 / 5.3	17.2 / 12
Eistage (Tmax < 0°C)	11.6 / 7.4	9 / 4.3	1.8 / 1.1	0.03 / 0						0.05 / 0	1.5 / 0.8	9.5 / 4.6
Sommertage (Tmax >= 25°C				0.5 / 0.3	3.6 / 4.1	8.9 / 7.3	9 / 10.5	7.6 / 8.2	1.8 / 3.1	0 / 0.05		
heiße Tage (Tmax >= 30°C					0.6 / 0.9	2.9 / 2.1	3.4 / 4.1	2.1 / 2.5	0.2 / 0.3			
tropische Tage (Tmin >= 20°C					0 / 0.02	0.08 / 0.08	0.4 / 0.7	0.08 / 0.2	0 / 0.03			
Heiztage (Tmit < 12°C	31 / 31	28.2 / 28.2	30.8 / 30.8	24.9 / 24.8	15 / 12.9	3.2 / 2.3	0.5 / 0.1	1.4 / 0.7	12.4 / 8.1	27 / 24.9	29.9 / 29.6	30.7 / 30.8
Kühltage (Tmit > 18°C				0.2 / 0.3	2.8 / 3.7	8.8 / 8	10.6 / 12.4	8.7 / 10.6	2.2 / 4.1	0.05 / 0.1		

Abbildung 8: Monatsmitteltemperaturen (oben), monatliche Niederschlagssummen (Mitte) und Ereignistage (unten) für die Periode 1981–2010 (=1995) (Werte links) und die Periode 2021–2050 (=2035) (Werte rechts) „Gitterpunkt Berlin“, Projektion CLM, A1B

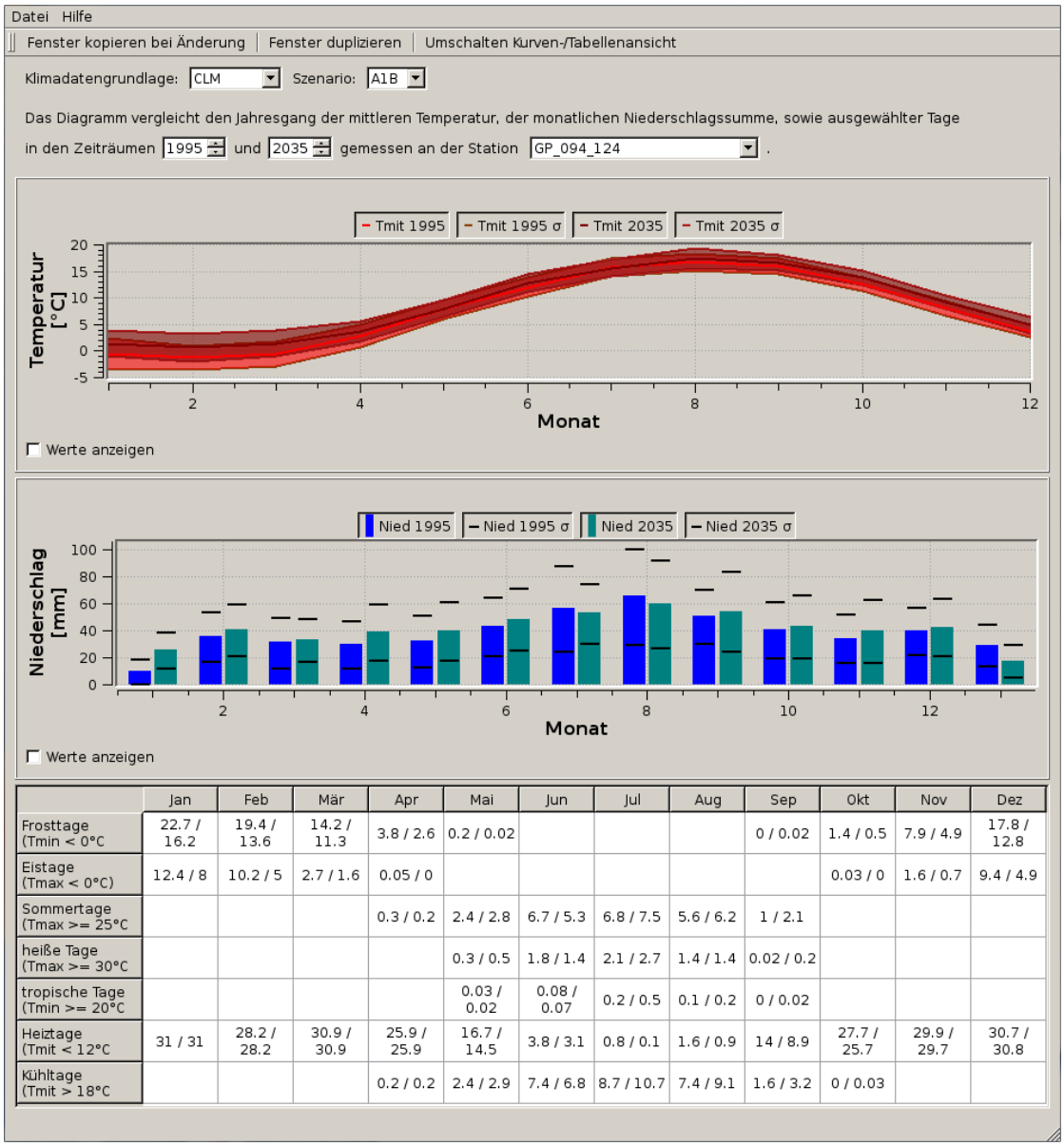
Station Angermünde, WETTREG, A1B
Vergleich der Klimanormalperioden 1981–2010 (1995) mit 2021–2050 (2035)



	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Frosttage (Tmin < 0°C	22.2 / 17.3	19.3 / 15.5	14.3 / 15.5	6.8 / 7.8	1 / 0.9				0.08 / 0.2	2.6 / 2	9.3 / 8.2	17.6 / 12.6
Eistage (Tmax < 0°C)	10.8 / 7.3	7.4 / 5.3	1.6 / 1.7	0 / 0.02							0.7 / 0.5	8.9 / 4.8
Sommertage (Tmax >= 25°C				0.2 / 0.2	3.1 / 3.5	7.3 / 8.2	11.3 / 13.1	11.5 / 12.8	1.6 / 2.3	0.08 / 0.1		
heiße Tage (Tmax >= 30°C					0.3 / 0.4	1.1 / 1.3	3 / 3.1	3 / 3.5	0 / 0.1			
tropische Tage (Tmin >= 20°C						0.04 / 0.1	0.1 / 0.3	0.2 / 0.4				
Heiztage (Tmit < 12°C	31 / 30.9	28 / 28	30.3 / 30.2	26.2 / 26.5	14 / 11.9	3 / 2.5	0.3 / 0.2	0.6 / 0.8	9.3 / 9.1	24.5 / 23	29.5 / 29.8	30.8 / 30.7
Kühltage (Tmit > 18°C				0.1 / 0.1	2.5 / 2.9	8.2 / 8.7	14.4 / 15.9	12.9 / 14.3	3.1 / 3.3	0.2 / 0.08		

Abbildung 9: Monatsmitteltemperaturen (oben), monatliche Niederschlagssummen (Mitte) und Ereignistage (unten) für die Periode 1981–2010 (=1995) (Werte links) und die Periode 2021–2050 (=2035) (Werte rechts) an der Station Angermünde, Projektion WETTREG, A1B

CLM A1B, Gitterpunkt 094_124 (Uckermark)
Vergleich der Klimanormalperioden 1981–2010 (1995) mit 2021–2050 (2035)



	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Frosttage (Tmin < 0°C	22.7 / 16.2	19.4 / 13.6	14.2 / 11.3	3.8 / 2.6	0.2 / 0.02				0 / 0.02	1.4 / 0.5	7.9 / 4.9	17.8 / 12.8
Eistage (Tmax < 0°C)	12.4 / 8	10.2 / 5	2.7 / 1.6	0.05 / 0						0.03 / 0	1.6 / 0.7	9.4 / 4.9
Sommertage (Tmax >= 25°C				0.3 / 0.2	2.4 / 2.8	6.7 / 5.3	6.8 / 7.5	5.6 / 6.2	1 / 2.1			
heiße Tage (Tmax >= 30°C					0.3 / 0.5	1.8 / 1.4	2.1 / 2.7	1.4 / 1.4	0.02 / 0.2			
tropische Tage (Tmin >= 20°C					0.03 / 0.02	0.08 / 0.07	0.2 / 0.5	0.1 / 0.2	0 / 0.02			
Heiztage (Tmit < 12°C	31 / 31	28.2 / 28.2	30.9 / 30.9	25.9 / 25.9	16.7 / 14.5	3.8 / 3.1	0.8 / 0.1	1.6 / 0.9	14 / 8.9	27.7 / 25.7	29.9 / 29.7	30.7 / 30.8
Kühltage (Tmit > 18°C				0.2 / 0.2	2.4 / 2.9	7.4 / 6.8	8.7 / 10.7	7.4 / 9.1	1.6 / 3.2	0 / 0.03		

Abbildung 10: Monatsmitteltemperaturen (oben), monatliche Niederschlagssummen (Mitte) und Ereignistage (unten) für die Periode 1981–2010 (=1995) (Werte links) und die Periode 2021–2050 (=2035) (Werte rechts), „Gitterpunkt Uckermark“, Projektion CLM, A1B

3.2 Phänologische Kennwerte der Jahreszeiten

Die Verschiebung von Eintrittsterminen bestimmter phänologischer Phasen, d. h. beobachtbarer Entwicklungsstadien von Pflanzen, wird als Indikator für Klimaänderungen herangezogen (u.a. Chmielewski 2007).

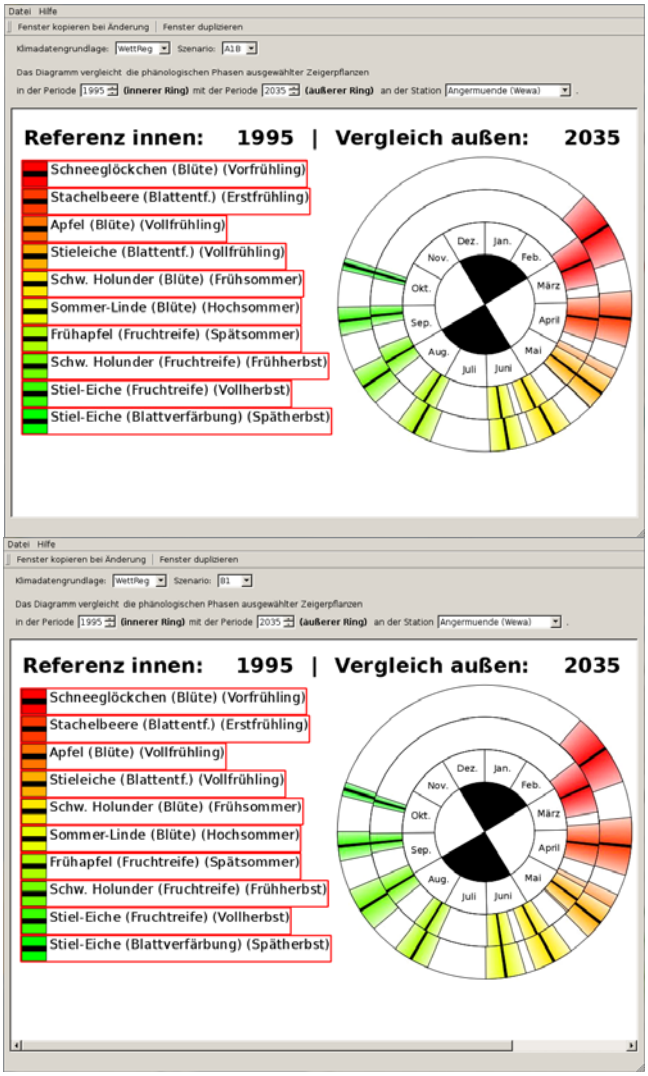


Abbildung 11: Diagramme der „Phänologischen Uhr" für die Temperaturdaten der Station Angermünde aus der Projektion WETTREG, A1B (oben) und B1 (unten) bei Vergleich der Klimanormalperioden 1981–2010 (1995) mit 2021–2050 (2035). Der schwarze Balken gibt jeweils den mittleren Termin, die farbigen Flächen die Schwankungsbreiten an

Die langjährigen Daten ehrenamtlicher Beobachter des Deutschen Wetterdienstes bzw. die Beobachtungsdaten der Internationalen Phänologischen Gärten dienen als Grundlage, um temperaturabhängige phänologische Modelle zu entwickeln. (u. a. Menzel 2007). Entsprechende Modelle wurden im Rahmen der Entwicklung des LandCaRe-DSS an die Region der Uckermark angepasst (Henniges 2008). Die ausgewählten phänologischen Phasen indizieren typischerweise den Beginn der verschiedenen

Jahreszeiten (Abbildung 11). Deutlich wird, dass sich bei beiden Szenarien vor allem der Vorfrühling um ca. 10 Tage verfrüht, während kaum Änderungen bei den anderen Jahreszeiten angezeigt sind (Tabelle 1 und Tabelle 2). Beim Emissionsszenario A1B (stärkerer atmosphärischer CO_2-Anstieg), im Vergleich zum Emissionsszenario B1, ist zudem auch der Sommer um einige Tage verfrüht während keine Veränderung beim Beginn des herbstlichen Laubfalls auftritt.

Tabelle 1: Eintrittstermine und Schwankungsbreite der phänologischen Phasen entsprechend der Klimaprojektion WETTREG, A1B (vgl. Abbildung 11, oben)

	WETTREG A1B	
1995 (Ring innen)	**Phase**	**2035 (Ring außen)**
(-σ) 25.02. | 10.03. | (+σ) 23.03.	**Schneeglöckchen (Blüte) (Vorfrühling)**	(-σ) 13.02. | 28.02. | (+σ) 15.03.
(-σ) 29.03. | 10.04. | (+σ) 22.04.	**Stachelbeere (Blattentf.) (Erstfrühling)**	(-σ) 28.03. | 08.04. | (+σ) 19.04.
(-σ) 28.04. | 08.05. | (+σ) 18.05.	**Apfel (Blüte) (Vollfrühling)**	(-σ) 29.04. | 08.05. | (+σ) 17.05.
(-σ) 03.05. | 10.05. | (+σ) 17.05.	**Stieleiche (Blattentf.) (Vollfrühling)**	(-σ) 03.05. | 10.05. | (+σ) 17.05.
(-σ) 30.05. | 06.06. | (+σ) 13.06.	**Schw. Holunder (Blüte) (Frühsommer)**	(-σ) 27.05. | 04.06. | (+σ) 12.06.
(-σ) 17.06. | 24.06. | (+σ) 01.07.	**Sommer-Linde (Blüte) (Hochsommer)**	(-σ) 16.06. | 23.06. | (+σ) 30.06.
(-σ) 28.07. | 04.08. | (+σ) 11.08.	**Frühapfel (Fruchtreife) (Spätsommer)**	(-σ) 25.07. | 01.08. | (+σ) 08.08.
(-σ) 24.08. | 01.09. | (+σ) 09.09.	**Schw. Holunder (Fruchtreife) (Frühherbst)**	(-σ) 20.08. | 28.08. | (+σ) 05.09.
(-σ) 21.09. | 26.09. | (+σ) 01.10.	**Stieleiche (Fruchtreife) (Vollherbst)**	(-σ) 19.09. | 25.09. | (+σ) 01.10.
(-σ) 15.10. | 18.10. | (+σ) 21.10.	**Stieleiche (Blattverfärbung) (Spätherbst)**	(-σ) 16.10. | 18.10. | (+σ) 20.10.

Tabelle 2: Eintrittstermine und Schwankungsbreite der phänologischen Phasen entsprechend der Klimaprojektion WETTREG, B1 (vgl. Abbildung 11, unten)

	WETTREG B1	
1995 (Ring innen)	**Phase**	**2035 (Ring außen)**
(-σ) 23.02. | 09.03. | (+σ) 23.03.	**Schneeglöckchen (Blüte) (Vorfrühling)**	(-σ) 11.02. | 26.02. | (+σ) 13.03.
(-σ) 29.03. | 09.04. | (+σ) 20.04.	**Stachelbeere (Blattentf.) (Erstfrühling)**	(-σ) 27.03. | 08.04. | (+σ) 20.04.
(-σ) 29.04. | 08.05. | (+σ) 17.05.	**Apfel (Blüte) (Vollfrühling)**	(-σ) 28.04. | 08.05. | (+σ) 18.05.
(-σ) 02.05. | 09.05. | (+σ) 16.05.	**Stieleiche (Blattentf.) (Vollfrühling)**	(-σ) 04.05. | 11.05. | (+σ) 18.05.
(-σ) 29.05. | 05.06. | (+σ) 12.06.	**Schw. Holunder (Blüte) (Frühsommer)**	(-σ) 27.05. | 04.06. | (+σ) 12.06.
(-σ) 17.06. | 24.06. | (+σ) 01.07.	**Sommer-Linde (Blüte) (Hochsommer)**	(-σ) 16.06. | 24.06. | (+σ) 02.07.
(-σ) 27.07. | 03.08. | (+σ) 10.08.	**Frühapfel (Fruchtreife) (Spätsommer)**	(-σ) 26.07. | 02.08. | (+σ) 09.08.
(-σ) 23.08. | 31.08. | (+σ) 08.09.	**Schw. Holunder (Fruchtreife) (Frühherbst)**	(-σ) 21.08. | 30.08. | (+σ) 08.09.
(-σ) 21.09. | 26.09. | (+σ) 01.10.	**Stieleiche (Fruchtreife) (Vollherbst)**	(-σ) 20.09. | 26.09. | (+σ) 02.10.
(-σ) 15.10. | 18.10. | (+σ) 21.10.	**Stieleiche (Blattverfärbung) (Spätherbst)**	(-σ) 16.10. | 19.10. | (+σ) 22.10.

Die Wachstumsperiode verlängert sich demnach im Wesentlichen durch die Verfrühung von Phasen im (Vor-)Frühling, während der Herbst nicht oder kaum zur Verlängerung der Wachstumsperiode beiträgt. Inwiefern das zeitigere Frühjahr für den Pflanzenbau genutzt werden kann, hängt u. a. von den Sorteneigenschaften, dem Auftreten von Frösten und der Bestellbarkeit der Felder (Bodennässe) ab. Die Beobachtungen der letzten Jahrzehnte haben neben Staunässe aber auch Phasen mit ausgeprägter Bodentrockenheit im Frühjahr ergeben, so dass Verzögerungen zwischen Saat und dem Aufgehen der Saat bzw. der weiteren Pflanzenentwicklung eingetreten sind.

3.3 Wasser- und Kohlenstoffflüsse

Mit dem LandCaRe-DSS können auch Modellergebnisse dargestellt werden, die Auswirkungen der Klimaprojektionen auf Wasser- und Stoffflüsse einschließlich Ernteerträge simulieren. Beispielhaft werden Ergebnisse für Verdunstungskomponenten und Primärproduktion von Wald- und Grasland, landwirtschaftliche Erträge, den Zusatzwasserbedarf für Beregnung und den Grundwasserabfluss vorgestellt.

3.3.1 Primärproduktion und Wassernutzungseffizienz von Wald und Grasland

Die Untersuchungen erfolgten mit dem Modell SVAT-CN (Falge et al. 2005) für Laub- und Nadelwald, wobei vereinfachend für Laubwald die Eiche und für Nadelwald die Kiefer angenommen wurde. Darüber hinaus wurden Standorte mit natürlichem Grasland betrachtet. Saisonale Verschiebungen der Wachstumsperiode der Bäume im Simulationszeitraum sind durch ein gekoppeltes Phänologiemodell berücksichtigt.

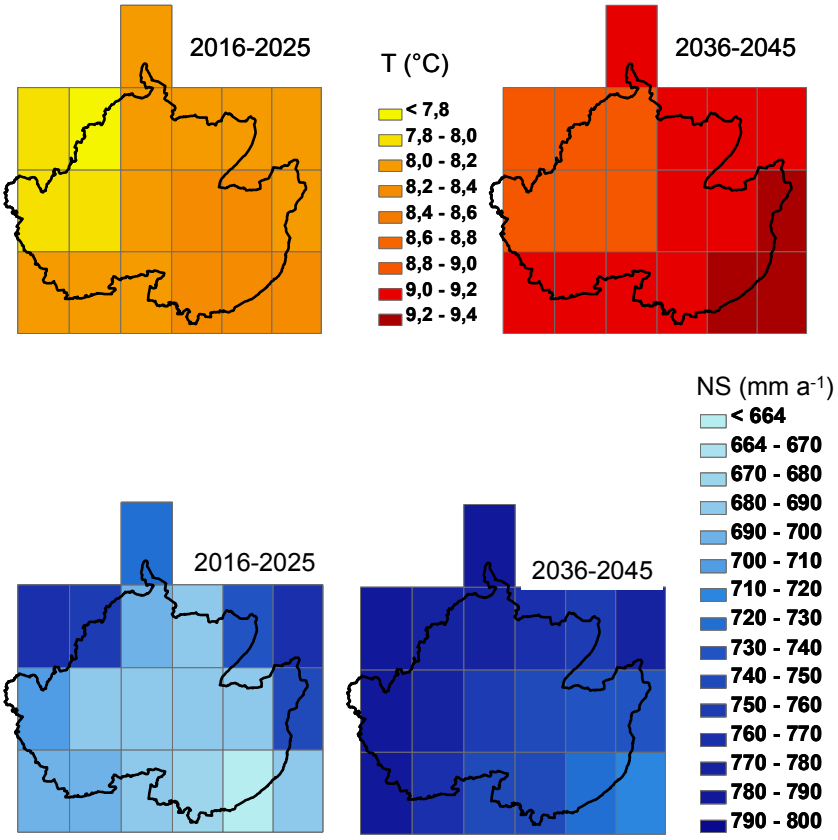


Abbildung 12: Räumliche Verteilung der Eingangsdaten der CLM-Klimaprojektion, A1B für die mittlere Jahrestemperatur (oben) und die mittlere Jahressumme des Niederschlags (unten) in der Uckermark

Die Simulationen erfolgten für jeweils drei Dekaden um 1994 (1990–1999), 2020 (2016–2025) und 2040 (2036–2045) mit den Daten der CLM-Klimaprojektion im 18x18 km^2-Gitter für die Emissionsszenarien A1B und B1 (vgl. Köstner und Kuhnert 2011). Bei den Eingangsdaten der Klimaprojektion liegen wie erwartet die mittleren Temperaturen in der Dekade um 2040 höher als um 2020 (Abbil-

dung 12). Aber auch die Niederschläge nehmen beim Szenario A1B im späteren Zeitraum zu. Dies hat entscheidenden Einfluss auf die simulierten Wirkungen. Weitere räumliche Eingangsdaten bestanden aus der Landnutzungsverteilung (CORINE; Abbildung 13) und der Bodenkarte (mittelmaßstäbige Standortkartierung, Gitter 100 x 100 $m^{2;}$; Abbildung 14).

Neben den verschiedenen Ergebnissen für Eiche und Kiefer aufgrund artspezifischer Unterschiede von physiologischen Parametern, der Kronendachschichtung und des Blattflächenindex (Köstner und Kuhnert 2011) zeigen sich Unterschiede aufgrund der Emissionsszenarien (A1B, B1). Die Verdunstungskomponenten Evapotranspiration (ET), Transpiration (T) sowie Interzeption (I) und Bodenevaporation (E) sind beim A1B-Szenario gegenüber dem B1-Szenario durch die höheren Temperaturen, aber vor allem auch durch die höheren Niederschläge bei Vergleich beider Perioden, 1994/2020 und 2040/2020, erhöht (Abbildung 15). Innerhalb des B1-Szenarios ist die Transpiration im späteren Zeitraum relativ erniedrigt oder gleichbleibend, während die Interzeption und Bodenevaporation leicht ansteigen. Absolut dominiert jedoch das Verhalten der Transpiration die Verdunstung. Die Transpiration nimmt je nach Bodenwasserverfügbarkeit zu oder ab. Da die Transpirationseinschränkung der Baumarten von der Unterschreitung spezifischer Schwellenwerte abhängig ist (Köstner und Clausnitzer 2011), variiert dies räumlich und zeitlich je nach Standortbedingungen und Vegetationstyp. Generell verstärkt wird die Reduktion der Transpiration jedoch durch die Zunahme der atmosphärischen CO_2-Konzentration. Weiterhin Forschungsbedarf besteht bei der validen Simulierung der Transpirationseinschränkung unter Bodentrockenheit. Häufig überschätzen die SVAT-Modelle die Verdunstung bei Bodentrockenheit bzw. können die Dynamik der Pflanzenreaktion nicht nachvollziehen. (Falge et al. 2005, Schwärzel et al. 2007). Zunehmende Verdunstungsraten sind bei Eiche vor allem auf die Transpiration, bei Kiefer auf die Interzeption zurückzuführen. Um einseitige Ressourcennutzung zu vermeiden und um auf ein breites Spektrum von Umweltbedingungen reagieren zu können, ist nicht nur auf die Baumartenzusammensetzung, sondern auch auf die Vielfalt der Bestandesstruktur (Dichte, Schichtung, immergrün / laubabwerfend, Art der Waldbodenvegetation) zu achten.

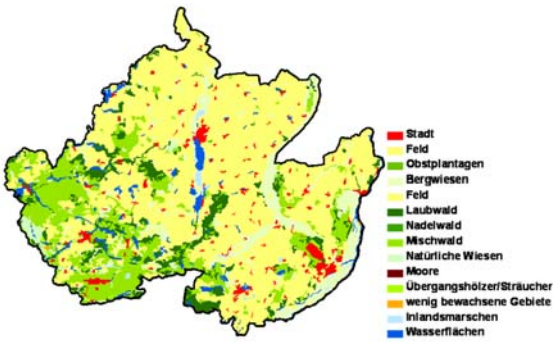


Abbildung 13: Räumliche Verteilung der Landnutzung nach CORINE im Untersuchungsgebiet der Uckermark

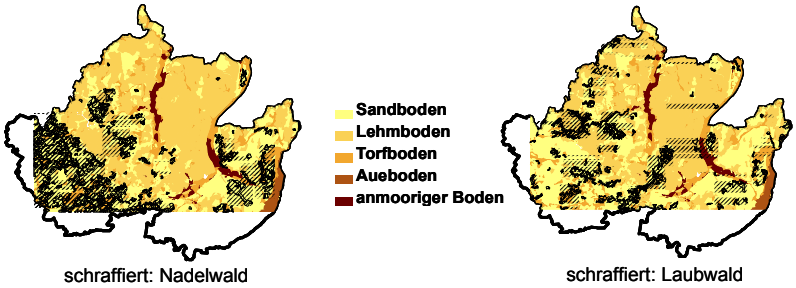


Abbildung 14: Räumliche Verteilung der Bodenarten sowie von Nadel- und Laubwald im Untersuchungsgebiet der Uckermark

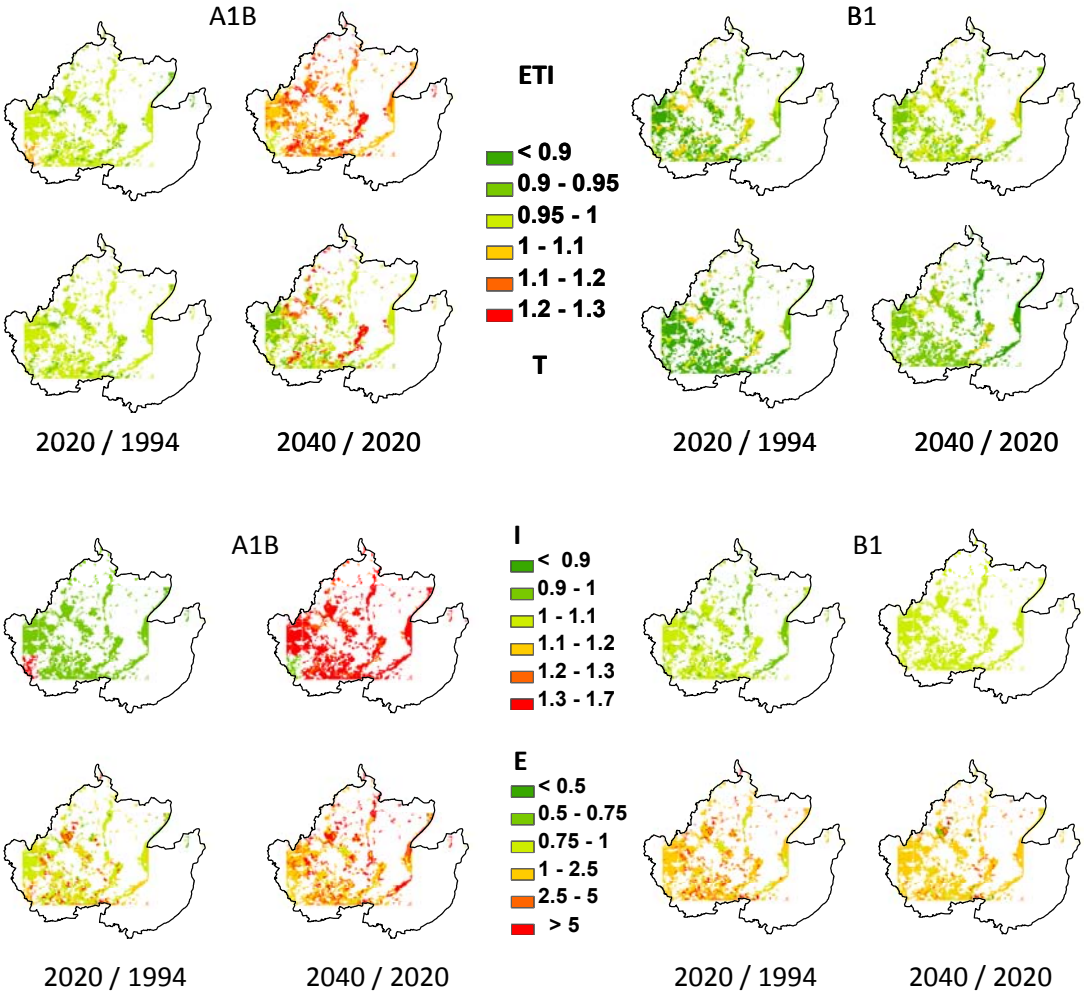


Abbildung 15: Relative Änderung der Gesamtverdunstung (ETI) und der Verdunstungskomponenten Transpiration (T), Interzeption (I) und Bodenevaporation (E) beim Vergleich jeweils zweier Zeiträume für zwei Emissionsszenarien (A1B, B1)

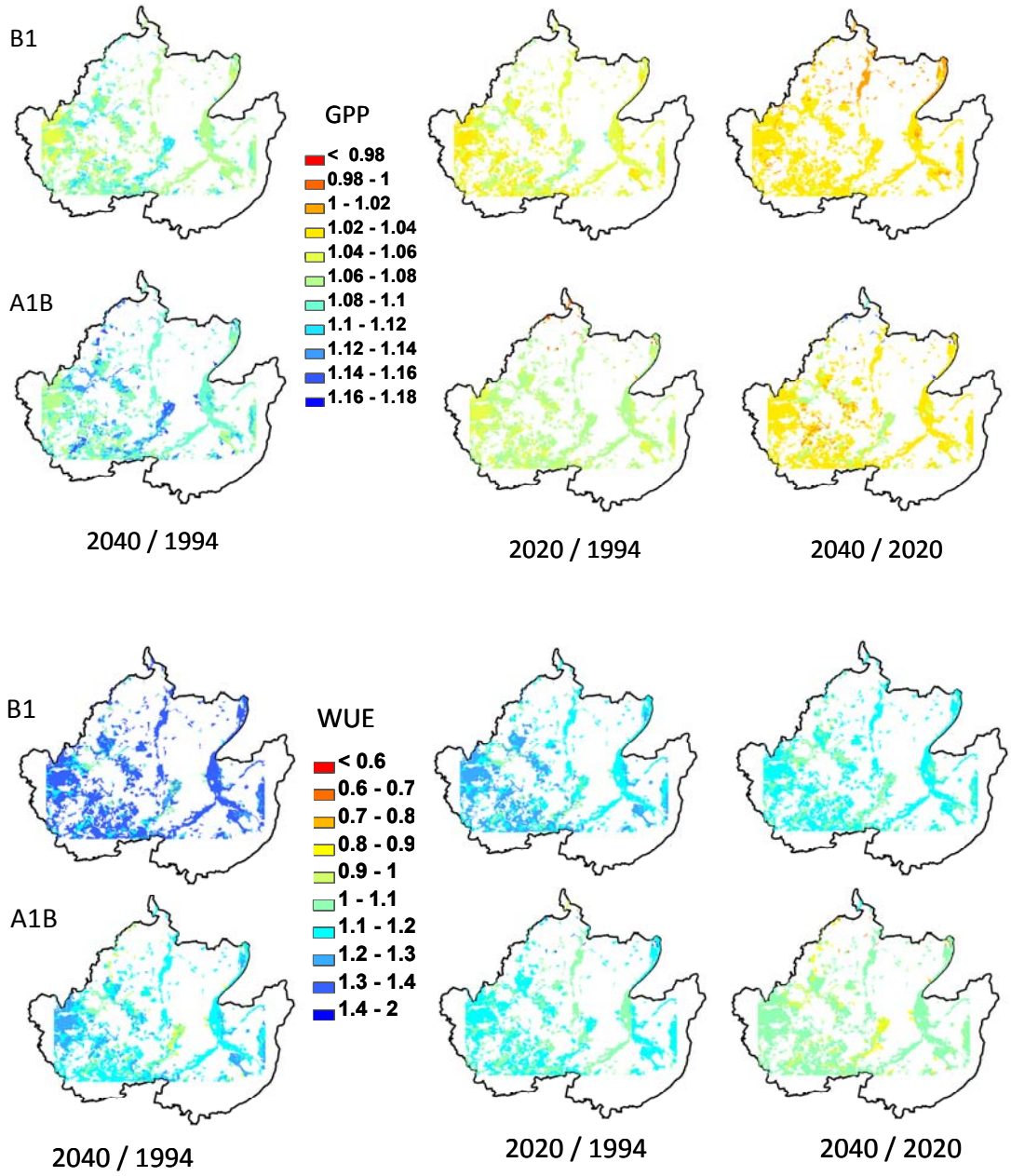


Abbildung 16: Relative Änderung der der Bruttoprimärproduktion (GPP, oben) und der Wassernutzungseffizienz (WUE = GPP/T, unten) beim Vergleich jeweils zweier Zeiträume für die Emissionsszenarien A1B und B1

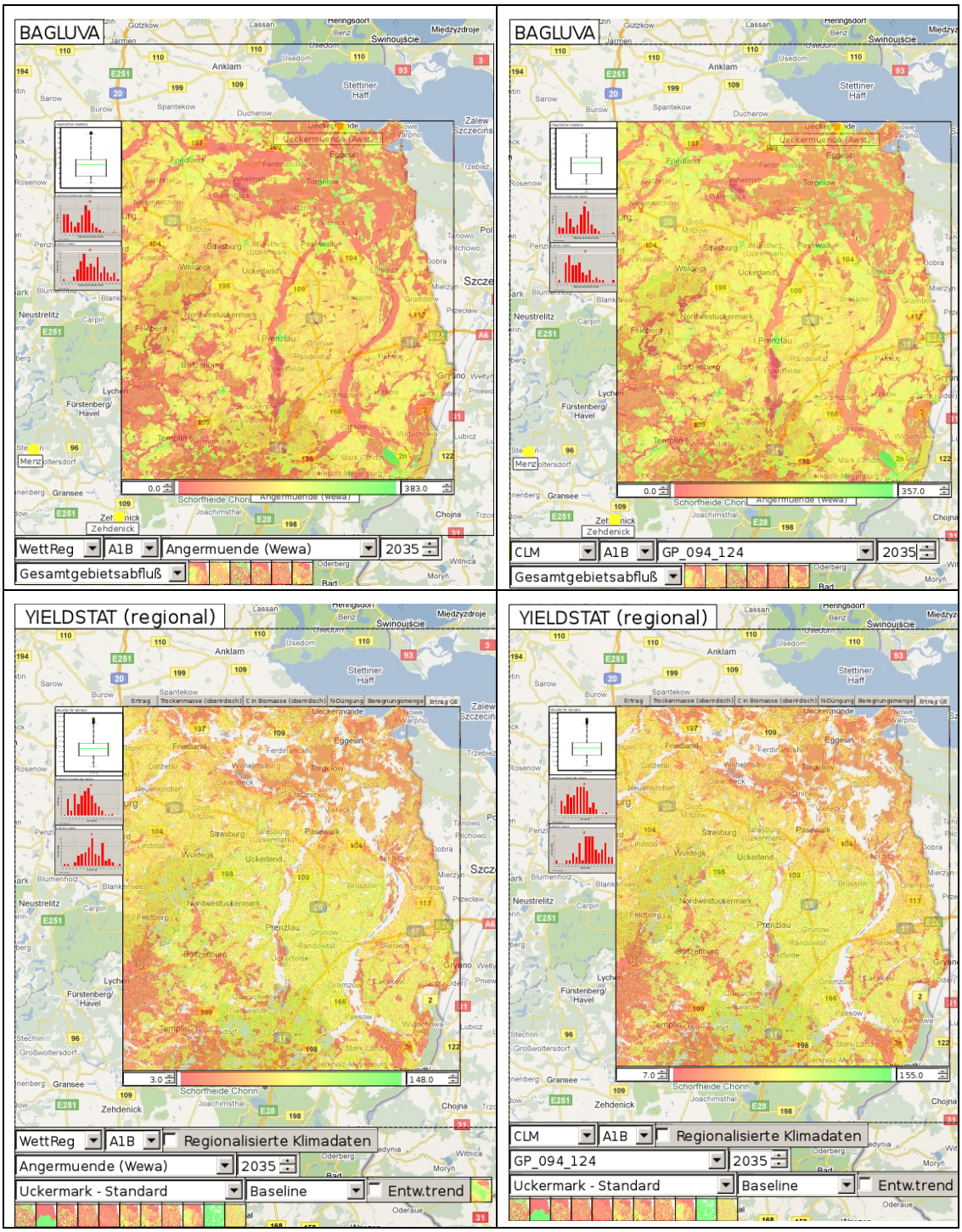


Abbildung 17: Simulation des Gesamtgebietsabflusses (oben) sowie des landwirtschaftlichen Ertrages (unten) im Einzugsgebiet der Uecker für den Zeitraum 2021–2050 auf Basis der Klimaprojektion WETTREG, A1B (Mittelwert aus drei Realisierungen) und CLM, A1B (Mittelwert aus zwei Realisierungen). Simulation mit heutigem Fruchtartenspektrum (Uckermark-Standard) und dem Referenz-Anbauverteilungsszenario (baseline)

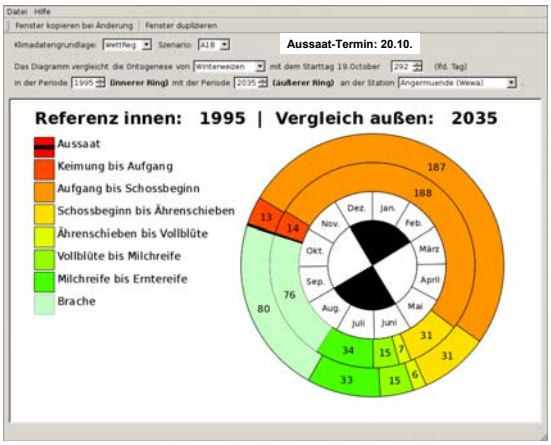
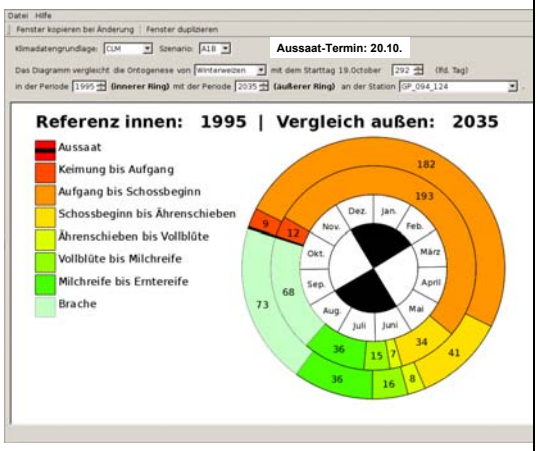
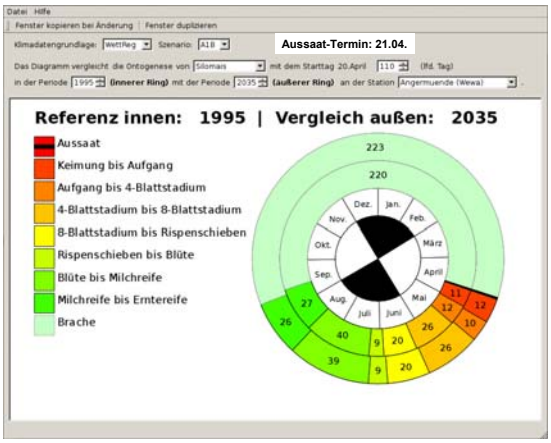
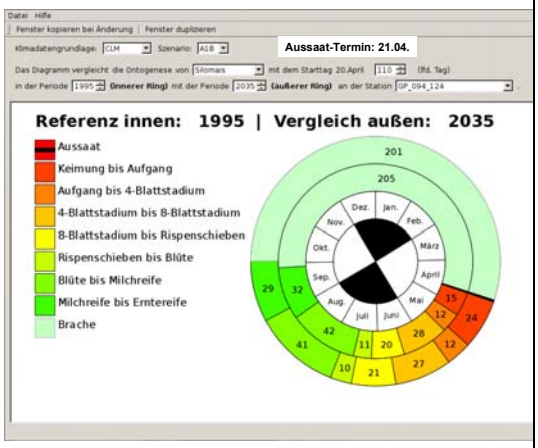
WETTREG, A1B, Station Angermünde 1981-2010 (1995) und 2021-2050 (2035) **Winterweizen**	CLM, A1B, Gitterpunkt 094_124 1981-2010 (1995) und 2021-2050 (2035) **Winterweizen**
	
1995: 289 d, 2035: 285 d; Differenz: -4 d	1995: 297 d, 2035: 292 d; Differenz: -5 d
Silomais	**Silomais**
	
1995: 145 d, 2035: 142 d; Differenz: -3 d	1995: 160 d, 2035: 164 d; Differenz: +4 d

Abbildung 18: Simulation des Eintritts und der Dauer (d = Tage) von Entwicklungsstadien und –zyklus landwirtschaftlicher Fruchtarten am Beispiel von Winterweizen (oben) und Silomais (unten) für die Perioden 1981–2010 und 2021–2050 auf Basis der Klimaprojektion WETTREG, A1B (Mittelwert aus drei Realisierungen) und CLM, A1B (Mittelwert aus zwei Realisierungen).

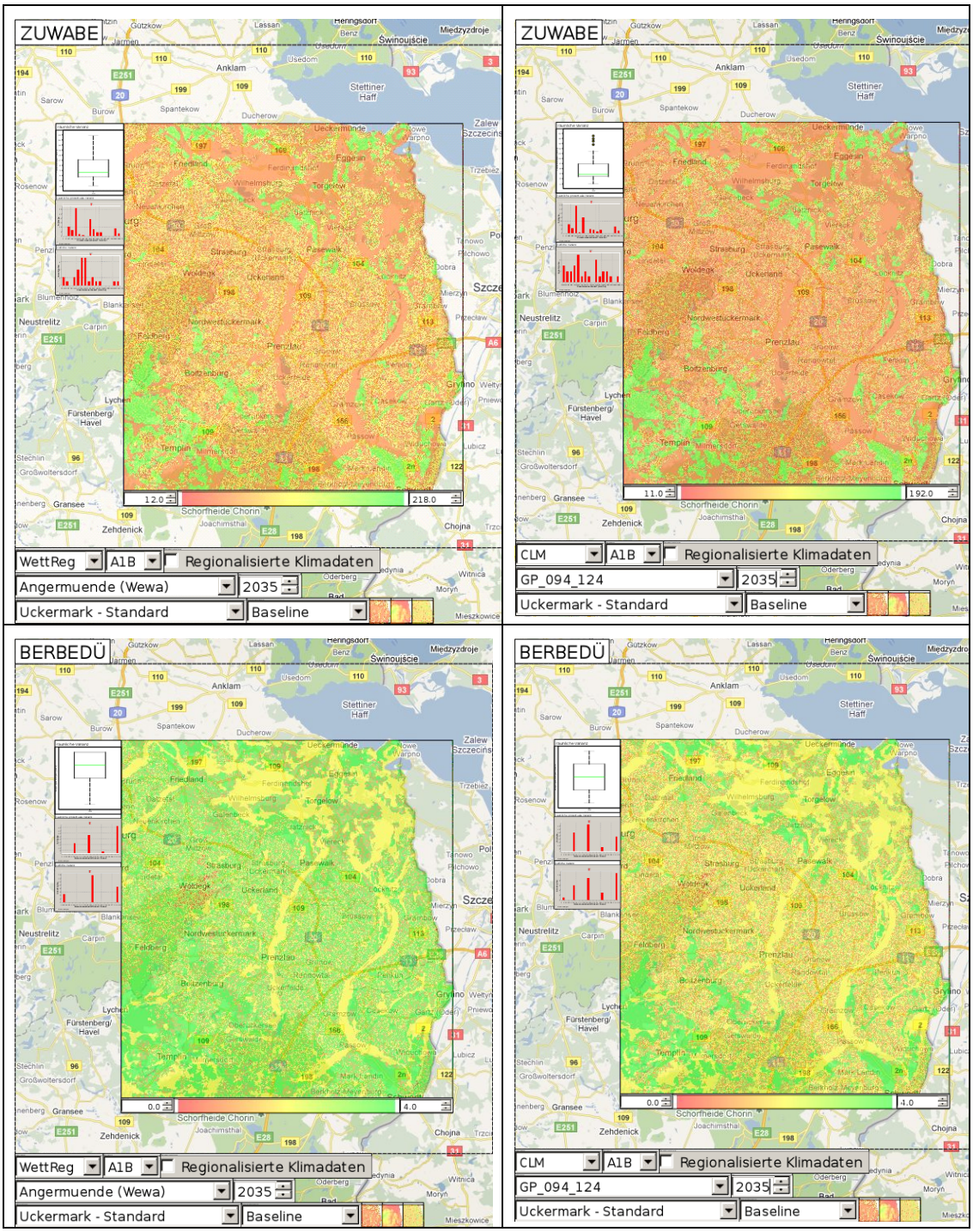


Abbildung 19: Simulation des Zusatzwasserbedarfs landwirtschaftlicher Fruchtarten (oben) sowie des Grades der Beregnungsbedürftigkeit (unten) im Einzugsgebiet der Uecker für den Zeitraum 2021–2050 auf Basis der Klimaprojektion WETTREG, A1B (Mittelwert aus drei Realisierungen) und CLM, A1B (Mittelwert aus zwei Realisierungen). Simulation mit heutigem Fruchtartenspektrum (Uckermark-Standard) und dem Referenz-Anbauverteilungsszenario (baseline).

Die Bruttoprimärproduktion nimmt bei den zugrunde gelegten CLM-Klimaprojektionen in der Zukunft durchweg zu mit einem stärkeren Anstieg in der Periode 1994–2020 im Vergleich zu 2020–2040 (Abbildung 16 oben). Die Kohlenstoffaufnahme ist für Eiche am höchsten, gefolgt von Grasland und Kiefer. Ein ähnliches Bild ergibt sich für die oberirdische Nettoprimärproduktion (ohne Abbildung), wobei auch hier die Produktion von Kiefer und teils von Grasland stagniert bzw. kaum eine Änderungen beim Vergleich von 2040 zu 2020 zeigt.

Die Wassernutzungseffizienz (WUE), d. h. das Verhältnis von Kohlenstoffaufnahme zur Transpiration, nimmt über den gesamten Zeitraum betrachtet zu, wie bei der Produktion ebenfalls mit der stärkeren Zunahme im ersten Zeitraum (1994-2020) (Abbildung 16 unten). Der Anstieg von WUE ist unter dem B1-Szenario deutlicher als unter A1B, allerdings liegt die absolute Primärproduktion unter A1B höher. Obwohl hinsichtlich der Wirkungen erhöhter atmosphärischer CO_2-Konzentrationen auf Ökosysteme noch viele Fragen offen sind, ergab sich unter experimentellen Bedingungen als durchgängigster Befund eine Erhöhung von WUE. Dies wurde sowohl für Agrarökosysteme (Manderscheid et al. 2009) als auch für Bäume (Leuzinger und Körner 2007) unter Freilandbedingungen nachgewiesen.

3.3.2 Gebietsabfluss

Bestandteil des LandCaRe-DSS ist das Modell BAGLUVA, mit dem die Gebietsverdunstung und der Gebietsabfluss simuliert werden können (Glugla et al. 2003). Das Modell BAGLUVA wurde auch zur Darstellung der zukünftigen Wasserflüsse bei einer Ensemble-Simluation im Havel-Spree-Gebiet eingesetzt (Horsten et al. 2010). Der Gebietsabfluss setzt sich zusammen aus Grundwasserneubildung und Oberflächenabfluss. Hinsichtlich der räumlichen Verteilung der Werte ergeben sich vergleichbare Muster bei WETTREG- und CLM-Projektion (Abbildung 17, oben). Obwohl in Tabelle 3 absolute Ergebnisse und Spannweiten aufgeführt sind, sollten diese aufgrund der großen Unsicherheiten nicht tiefer interpretiert, sondern vielmehr die Änderungssignale beim Vergleich zweier Perioden gewertet werden. Die Ergebnisse dienen daher zur Einschätzung des Trends, aber auch der Interpretation der unterschiedlichen Klimaprojektionen. Demnach würde die WETTREG-Projektion auf eine leichte Abnahme, die CLM-Projektion auf eine Zunahme des Gebietsabflusses bis 2050 hindeuten. Die Zunahme ist auf höhere Niederschläge und auf den insgesamt fehlenden abnehmenden Trend der Niederschläge (s. Anhang) bei der CLM-Projektion zurückzuführen.

Tabelle 3: Simulationsergebnisse für den Gebietsabfluss (Modell BAGLUVA)

Szenario A1B	**Periode**	**Median** (mm/a)	**Abweichung** Quartile (mm)	**Änderung 2./1. Periode**
WETTREG	1. 1981–2010	146	59–186	
WETTREG	2. 2021–2050	138	51–177	0,95
CLM	1. 1981–2010	137	56–174	
CLM	2. 2021–2050	162	79–203	1,18

3.3.3 Landwirtschaftlicher Ertrag und Pflanzenentwicklung

Auch bei der Simulation landwirtschaftlicher Ernteerträge mit dem statistisch-basierten Modell YIELDSTAT (Mirschel und Wenkel 2007, Mirschel et al. 2009,) zeigen sich übereinstimmende räumliche Muster der Erträge, die wesentlich von den Bodeneigenschaften geprägt sind (Abbildung 17, unten). In diesem Fall ergibt sich für beide Klimaprojektionstypen ein positives Änderungssignal,

wobei die mittleren Erträge besonders bei der CLM-Projektion in der Zukunft zunehmen (Tabelle 4). So bestätigt sich auch hier der entscheidende Einfluss der Niederschlagsentwicklung. Wesentlich für die Ertragsbildung ist auch der von der Temperatur gesteuerte Ablauf der Pflanzenentwicklung. Daher beinhalten landwirtschaftliche Ertragsmodelle Teilmodelle, die die Abfolge der Entwicklungsstadien (Ontogenese) beschreiben. Die Ergebnisse des separaten Ontogenesemodells (ONTO) im LandCaRe-DSS sind in Form einer phänologischen Uhr dargestellt (Abbildung 18).

Tabelle 4: Simulationsergebnisse für den landwirtschaftlichen Ernteertrag (Modell YIELDSTAT)

Szenario A1B	**Periode**	**Median** (dt/ha)	**Abweichung** Quartile (mm)	**Änderung 2./1. Periode**
WETTREG	1. 1981–2010	56	36–72	
WETTREG	2. 2021–2050	58	36–74	1,04
CLM	1. 1981–2010	56	36–72	
CLM	2. 2021–2050	63	41–80	1,13

Vergleichweise übereinstimmende Ergebnisse zwischen der WETTREG- und CLM-Projektion sind bei der Entwicklung von Winterweizen festzustellen mit einem früheren Schoßbeginn bei der CLM-Projektion und einer Verkürzung des Anbauzyklus um insgesamt 4 (WETTREG) bzw. 5 Tage (CLM) (Abbildung 19). Ganz anders verhält es sich beim Silomais, dessen Zyklus relativ spät im Jahr beginnt. Hier verkürzt sich zukünftig die gesamte Entwicklungszeit im Mittel um 3 Tage bei der WETTREG-Projektion, während sie sich bei der entsprechenden CLM-Projektion um 4 Tage verlängert. Dies ist auf die deutlich niedrigeren Temperaturen der CLM-Projektion im April/Mai zurückzuführen, die die Blattentwicklung verzögern. Aus den Simulationsergebnissen lässt sich schließen, dass unterschiedliche Klimaprojektionen einerseits zu ähnlichen Wirkungen hinsichtlich der Pflanzenentwicklung führen können, andererseits Temperaturunterschiede in sensiblen Phasen der Entwicklung (Blattaustrieb, Schossen) überproportional das Gesamtergebnis der Wirkung beeinflussen können.

3.3.4 Zusatzwasserbedarf landwirtschaftlicher Fruchtarten

Sowohl für den landwirtschaftlichen Ertrag als auch für die Bewirtschaftung der Wasserresourcen von Interesse ist der durch die Klimaänderungen bedingte Zusatzwasserbedarf landwirtschaftlicher Fruchtarten (vgl. Drastig et al. 2010). Bereits heute besteht in der Uckermark ein deutlicher Beregnungsbedarf, dem steht jedoch eine geringe Beregnungswürdigkeit (Kosten-Nutzen-Analyse) des Getreides gegenüber (Anter et al. 2009). Bei steigenden Getreidepreisen könnte sich dies jedoch in Zukunft ändern. Die Räumliche Verteilung von Zusatzwasserbedarf und Beregnungsbedürftigkeit spiegelt zum einen die Bodenverhältnisse und kleinräumig die Verteilung der Fruchtarten wider (Abbildung 19). Es wird deutlich, dass der Zusatzwasserbedarf bei der CLM-Projektion niedriger liegt, bei beiden Projektionen kommen im Einzelfall jedoch alle Grade der Beregnungsbedürftigkeit (0=keine bis 4=sehr hoch) vor. Während die Beregnungsbedürftigkeit bei der WETTREG-Projektion in der zweiten Vergleichsperiode ansteigt, nimmt diese bei der CLM-Projektion ab (Tabelle 5). Auch aus diesem Beispiel wird deutlich, dass sich derzeit allein auf Basis der Klimafolgenszenarien mit teils entgegengerichteten Ergebnissen keine eindeutigen Anpassungsmaßnahmen ableiten lassen. Vielmehr müssen die Szenarienergebnisse mit den Erfahrungen der letzten Jahrzehnte an den jeweiligen Standorten zusammen betrachtet werden.

Tabelle 5: Simulationsergebnisse für den landwirtschaftlichen Zusatzwasserbedarf (Modell ZUWABE) mit dem Grad der Beregnungsbedürftigkeit in Klammern

Szenario A1B	**Periode**	**Median (mm)**	**Abweichung** (Quartile)(mm)	**Änderung 2./1. Periode**
WETTREG	1981–2010	61 (mittel)	34 (gering) – 117 (sehr hoch)	
WETTREG	2021–2050	67 (hoch)	49 (mittel) – 119 (sehr hoch)	1,10
CLM	1981–2010	56 (mittel)	31 (gering) – 102 (sehr hoch)	
CLM	2021–2050	47 (mittel)	38 (gering) – 86 (hoch)	0,84

4 Betrachtung der Simulationsergebnisse im Kontext vorangegangener Untersuchungen

Die ersten Studien über mögliche Auswirkungen von Klimaänderungen auf das Land Brandenburg liegen inzwischen 16 Jahre zurück (Stock und Tóth 1996, zitiert in Gerstengarbe et al 2003) und wurden später durch methodisch verbesserte, ausführliche Studien aktualisiert (Gerstengarbe et al. 2003). Die verwendeten Klimaprojektionen basieren auf dem, am Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) entwickelten, statistischen Modell STAR. Klimaprojektionen von anderen regionalen Klimamodellen lagen noch nicht vor. Weitere Arbeiten auf der Basis von STAR zur Region Märkisch-Oderland im Osten des Landes (Wiggering et al. 2005), zu Perspektiven für den Weinbau (Stock et al. 2007), zur zukünftigen Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen (Wechsung et al. 2008) sowie zur Region Havelland-Fläming im Westen von Brandenburg (Lüttger et al. 2011) folgten.

Hinsichtlich des Wasserhaushaltes wurden für Brandenburg in den vorangegangenen Studien dramatischere Auswirkungen aufgezeigt, als sie mit den neuen Klimaprojektionen in der vorliegenden Studie ermittelt werden. So wurde zum Beispiel eine deutliche Abnahme des Gebietsabflusses für die Periode 2001–2055 gegenüber dem Referenzszenario (1951–2000) ermittelt, mit Änderungen um etwa -50 mm in der Uckermark (Gerstengarbe et al. 2003). Auch wenn die untersuchten Zeiträume nicht direkt vergleichbar sind, ergaben sich in der vorliegenden Studie vergleichsweise geringe Änderungen bis 2050 (bei der CLM-Projektion Zunahme des Gebietsabflusses!) bei absolut höheren Abflussraten.

Unter Verwendung der selben STAR-Klimaprojektion zeigte sich, dass die Ergebnisse für Verdunstung und pflanzliche Produktion stark von der Genauigkeit und räumlichen Auflösung der Bodeninformationen abhängen. So ist zum Beispiel die zukünftige Weizenproduktion im Märkisch-Oderland bis 2050 auf tiefgründigen Böden bei Mirschel et al. (2005) weniger dramatisch reduziert (im Mittel -5%) als dies bei Gerstengarbe et al. (2003) aufgezeigt wurde (ca. -30%). Beide Angaben beziehen sich auf Simulationen unter Vernachlässigung des CO_2-Düngeeffektes. Unter Berücksichtigung des CO_2-Düngeeffektes ist die zukünftige mittlere Weizenproduktion im Märkisch-Oderland nicht reduziert (im Mittel ergab sich ein leichter Anstieg um +0,5 %). Auch die damaligen Ergebnisse für die Uckermark, mit Ertragseinbußen für Winterweizen von -15 bis -25 % (ohne CO_2-Düngeeffekt) bzw. -10% (mit CO_2-Düngeeffekt) beim Vergleich der Perioden 1980–1990 mit 2040–2050 (Gerstengarbe et al. 2003), lassen sich anhand der vorliegenden Studie mit den Klimaprojektionen WETTREG und CLM nicht nachvollziehen. Jüngere Studien mit STAR-Klimaprojektionen (STAR II) sehen die Entwicklungen und Wirkungen auf Agrar- und Forstsysteme im Westen Brandenburgs weniger pessimistisch (Lüttger et al. 2011). Zukünftig sollten stets hoch auflösende Bodeninformationen verwendet sowie der CO_2-Düngeeffekt bei der Pflanzenproduktion berücksichtigt werden. Es sollten mehrere Typen von Klimaprojektionen genutzt werden, um den Unsicherheitsbereich ihrer Klimafolgen aufzuzeigen. Andererseits zeigt dieser Vergleich von Studien, dass Wissensfortschritte erzielt wurden und heute der CO_2-Düngeeffekt bei der Ertragsschätzung besser berücksichtigt werden kann. Allerdings gibt es auch Hinweise aus den FACE-Experimenten, dass der CO_2-Düngeeffekt die Qualität des Kornertrages mindert (reduzierte Rohproteingehalte; Erbs et al. 2010), so dass auch bei längerfristig stabilem Ertrag ökonomische Einbußen möglich wären. Abgesehen davon ist das landwirtschaftliche Einkommen allgemein den Schwankungen der Weltmarktpreise unterworfen. Ebenso muss bedacht werden, dass reale Erträge vom Anbausystem und Management beeinflusst werden und die Erträge durch das (zufällige) Zusammentreffen verschiedener Faktoren stark schwanken können, was durch die Modelle kaum abgebildet wird. Die Erfahrung der letzten Jahrzehnte zeigt, dass gerade das flexib-

le und umsichtige Management (vernässte Boden / Frühjahrstrockenheit, Starkniederschläge / Sommertrockenheit) immer mehr gefordert ist.

Seit den ersten Klimaprojektionen und Klimafolgenszenarien für Brandenburg sind weitere Klimaprojektionen auf der Basis methodisch unterschiedlicher Regionalmodelle entstanden. Allgemein zur Nutzung stehen die Projektionen der dynamischen Modelle REMO (Jacob et al. 2007) und (COSMO-) CLM (Rockel et al. 2008) und des statistisch-dynamischen Modells WETTREG (Version 2006; Spekat et al. 2007) bereit. Inzwischen wurden neue Projektionen des Modells WETTREG (WETTREG-2010, Kreienkamp et al. 2010) für das Emissionsszenario A1B mit insgesamt 10 Realisierungen erstellt. Die Projektionen unterscheiden sich zusätzlich nach den zugrunde liegenden Emissionsszenarien (z.B. A1B, B1, A2) und verschiedenen Realisierungen (unterschiedliche Modelläufe, Witterungsverläufe) der Klimainformation. Auch seitens der Wirkungsmodelle gibt es verschiedene Modelle für dieselbe zu untersuchende Größe (z. B. verschiedene Wasserhaushaltsmodelle oder statistisch- und prozess-basierte Ertragsmodelle). Zukünftig wird man daher bestrebt sein, ein Wirkungsmodell mit verschiedenen Klimaprojektionen zu verknüpfen wie auch mehrere Wirkungsmodelle mit mehreren Klimaprojektionen (einfacher / mehrfacher Multi-Modell-Ansatz). Für solche Multi-Modell-Ansätze sind Modellplattformen erforderlich, die Klimadatenbanken mit Modelldatenbanken und Geodatenbanken verknüpfen. Das LandCaRe-DSS stellt einen ersten Schritt dazu dar, wobei hier nicht die Expertenanalyse, sondern die nutzerfreundliche Bedienbarkeit als interaktive Entscheidungshilfe, die Geschwindigkeit der Rechenprozesse und die Visualisierung bei der Entwicklung im Vordergrund stand (Wieland et al. 2007). Es ist das erste allgemein nutzbare System, das mehrere Klimaprojektionen mit verschiedenen Wirkungsmodellen verknüpfen kann. Die offene Struktur seiner Datenbanken lässt Aktualisierungen hinsichtlich der Klimaprojektionen als auch der Wirkungsmodelle und ihrer Parameter zu. Erst weitere Erfahrungen mit dem Multi-Modell-Ansatz werden jedoch die gesamte Spannweite der Unsicherheit von Klimafolgenszenarien aufzeigen. Die Erstellung von Klimafolgenszenarien ist daher auch nicht als eine einmal abgeschlossene Aufgabe anzusehen, sondern als ein beständiger Prozess. Für die nahe gelegene Zukunft, die für die Entwicklung von Handlungsmaßnahmen besonders relevant ist, sind modellbasierte Klimafolgenszenarien stets mit Trends abzugleichen, die aus Beobachtungen gewonnen werden.

5 Schlussfolgerungen

Der Klimawandel und seine Wirkungen sind bereits heute erfahrbar. Dieses Erfahrungswissen ist gesichert und daher besonders wertvoll. Die Beobachtungen sollten daher weiter standardisiert, fachlich integriert und ausgebaut werden.

Aus dem neuen Erfahrungswissen verbunden mit langjährigem Fachwissen lassen sich direkt Handlungsorientierungen zur Anpassung an den Klimawandel ableiten. Diese sind jedoch, aufgrund neu hinzukommender Faktoren (z. B. Anstieg der atmosphärischen CO_2-Konzentration), der Vielfalt von Wechselwirkungen und des notwendigen Blicks weiter in die Zukunft, nicht ausreichend.

Das bestehende Wissen muss durch Modelle ergänzt werden, die das wesentliche Systemverständnis beinhalten und dieses räumlich und zeitlich explizit extrapolieren können. Als virtuelle Systeme können Modelle durch Variation von Modellannahmen (Prozessverständnis) und Variation des Modellinputs (Klima-, Geo-, Landnutzungsdaten) Klimaprojektionen interpretieren, ein breites Spektrum von Zukunftsszenarien aufzeigen und damit auch Unsicherheiten quantifizieren.

Vereinfachungen der Prozesswiedergabe in Modellen, wie z. B. Verzicht auf die Berücksichtigung des CO_2-Düngeeffektes, haben starken Einfluss auf das Ergebnis bzw. können das Vorzeichen einer prognostizierten Änderung umkehren. Solche Vereinfachungen sind zu vermeiden.

Zu grobe Bodeninformationen in Modellen in Bezug auf horizontale Auflösung und Bodenprofil sind für regionale / lokale Wirkungssimulationen ungeeignet und können zu Fehleinschätzungen anhand der Modellergebnisse führen.

Bisherige Simulationen von zukünftigen Klimawirkungen beschränkten sich weitgehend auf Klimaprojektionen aus statistischen / statistisch-dynamischen Klimamodellen kombiniert mit einem Wirkungsmodell. Das zunehmende Angebot an regionalen Klimaprojektionen verschiedener Klimamodelltypen und Wirkungsmodellen macht neue, softwaretechnische Analysewerkzeuge erforderlich, die den Umgang mit Daten, Modellen und die Interpretation von Klimaprojektionen und Klimafolgenszenarien erleichtern.

Klimaanalysen mit dem LandCaRe-DSS haben gezeigt, dass der Temperaturverlauf von Klimaprojektionen im Frühjahr zu unterschiedlichen phänologischen Reaktionen führt. Dies beeinflusst die Pflanzenproduktion im weiteren Jahresverlauf. Klimaprojektionen und ihre Realisierungen sollten daher nicht nur nach ihrer generellen Klimastatistik, sondern auch nach sensiblen Phasen bewertet werden, die die Ökosystemreaktion besonders beeinflussen.

Forschungsbedarf besteht zu systematischen Abweichungen von Klimadaten aus dynamischen Klimamodellen und ihren Korrekturen. Trotz Niederschlagskorrektur bleiben signifikante Unterschiede in den zukünftigen Niederschlagstrends regionaler Klimamodelle (statistisch-dynamisches Klimamodell WETTREG: negativer Trend; dynamisches Klimamodell, CLM: ohne Trend). Diese Unterschiede erhöhen die Spannbreite und damit die Unsicherheit möglicher zukünftiger Auswirkungen.

Die unterschiedlichen Niederschlagstrends der Klimamodelle führten bei Simulation des Gebietsabflusses in der Uckermark (Vergleich der Perioden 1981–2010 mit 2021–2050) zu gegenläufigen Reaktionen (WETTREG: Abnahme, CLM: Zunahme der Gebietsabflusses). Allein auf Basis der Klimafolgenszenarien lassen sich diesbezüglich keine eindeutigen Anpassungsmaßnahmen ableiten. Vielmehr müssen die Szenarienergebnisse mit den Erfahrungen der letzten Jahrzehnte an den jeweiligen Standorten zusammen betrachtet werden.

Die zukünftige Verdunstung und Primärproduktion von Wald- und Graslandökosystemen in der Uckermark zeigt in Abhängigkeit von Vegetation und Bodeninformationen positive wie negative Tendenzen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit räumlich-differenzierter und artspezifischer Daten für die Modellierung, um Unsicherheiten bei der räumlichen Bilanzierung zu reduzieren.

Im Gegensatz zu früheren Klimafolgenszenarien wurden in der vorliegenden Studie weder mit den WETTREG- noch mit den CLM-Projektionen Reduktionen des zukünftigen mittleren Ernteertrages (2021–2050) simuliert. Dies wird u. a. auf verbesserte Modelle bzw. Modellparameter (CO_2-Düngeeffekt) und feinskaligere Eingangsdaten zurückgeführt.

Bereits heute könnten Erträge durch zusätzliche Beregnung in der Uckermark gesteigert werden. Es wäre daher zu überlegen und nachzuforschen, inwiefern mit standörtlich differenzierten Zusatzwassergaben zukünftig nicht nur Risiken, sondern auch Chancen verbunden werden könnten.

Forschungsbedarf besteht darin, wie negative Einflüsse extremer Ereignisse und die Häufung ungünstiger Faktoren in den Modellen besser berücksichtigt bzw. nachträglich auf das Ergebnis „addiert“ werden könnten. Hier ist das bisherige Erfahrungswissen stärker einzubeziehen. Ebenso besteht Unsicherheit darüber, wie der züchterisch-technische Fortschritt und eine aufgrund politischer und ökonomischer Einflüsse veränderte Landnutzung / Anbauverteilung in die Agrarmodelle einzubeziehen ist.

Das Klima- und Klimafolgenwissen hat in den letzten Jahrzehnten erhebliche Fortschritte gemacht. Mit dem neuen, vielfältigeren Wissen entstand weiterer Forschungs-, aber auch Ordnungsbedarf. Multimodell-Ansätze und Modelplattformen mit definierten Analysewerkzeugen und geprüften Datenbanken können in Zukunft zu einer besseren Vergleichbarkeit von Simulationsergebnissen, Vereinheitlichung von Aus- und Bewertungen und Kontrolle des Erkenntnisfortschritts führen.

Literatur

Anter J, Gömann H, Kreins P, Richmann A (2009) Einfluss sich wandelnder ökonomischer Rahmenbedingungen auf die Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen in Deutschland, Landbauforschung Sonderheft 328 - Wasser im Gartenbau S. 21-28

Baldocchi DD, Amthor JS (2001) Canopy photosynthesis: history, measurements, and models. In: Roy J, Saugier B, Mooney HA (eds) Terrestrial global productivity. Academic Press, San Diego, pp 9-31

Bernhofer, C., Spank, U., Clausnitzer, F., Köstner, B., Menzer, A., Feger, K.H., Schwärzel, K. (2011) Mikrometeorologische, pflanzenphysiologische und bodenhydrologische Messungen in Buchen- und Fichtenbeständen des Tharandter Waldes. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz, im Druck

Chmielewski F-M (2007) Phänologie – ein Indikator zur Beurteilung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Biosphäre. Promet 33(1/2), 28-35

Christensen JH et al. (16 Co-Autoren) (2007) Regional Climate Projections. 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 [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Drastig K, Annette Prochnow A, Reiner Brunsch R (2010) Wassermanagement in der Landwirtschaft. Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Interdisziplinäre Arbeitsgruppe Globaler Wandel – Regionale Entwicklung. Diskussionspapier 3, 02/2010

Ehleringer JR, Field CB, Roy J (eds) (1993) Scaling Physiological Processes: Leaf to Globe. Academic Press Inc., San Diego

Erbs M, Manderscheid R, Jansen G, Seddig Sylvia, Pacholski A, Weigel H- J (2010). Effects of free-air CO_2 enrichment and nitrogen supply on grain quality parameters and elemental composition of wheat and barley grown in a crop rotation. Agric. Ecosyst. Environ. 136, 59-68

Gerstengarbe F-W, Badeck F, Hattemann F, Krysanova V, Lahmer W, Lasch P, Stock M, Suckow F, Wechsung F, Werner, PC (2003) Studie zur klimatischen Entwicklung im Land Brandenburg bis 2005 und deren Auswirkungen auf den Wasserhaushalt, die Forst- und Landwirtschaft sowie die Ableitung erster Perspektiven. PIK-Report 83, 394 S

Glugla G, Jankiewicz P, Rachimow C, Lojek K, Richter K, Fürtig G, Krahe P (2003) Wasserhaushaltsverfahren zur Berechnung vieljähriger Mittelwerte der tatsächlichen Verdunstung und des Gesamtabflusses. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, BfG-Bericht Nr. 1342, 120 S.

Gömann H, Anter J, Stonner R (2011) Quantifizierung regionaler Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Bewertung von Anpassungsstrategien mit dem regiona-lisierten Agrar- und Umweltinformationssystem RAUMIS. LandCaRe – Sozioökonomische Analysen. Teilprojekt 5. Schlussbericht, BMBF klimazwei, FKZ PT-DLR 01 LS 05108

Goudriaan J, Shugart HH, Bugmann H, Cramer W, Bondeau A, Gardner RH, Hunt LA, Lauenroth WK, Landsberg JJ, Linder S, Noble IR, Parton WJ, Pitelka LF, Stafford Smith M, Sutherst RW, Va-lentin C, Woodward FI (1999) Use of models in global change studies. In: Walker B, Steffen W, Ca-nadell J, Ingram J (eds) The Terrestrial Biosphere and Global Change. Implications for natural and managed ecosystems. Synthesis Volume. International Geosphere-Biosphere Programme Book Series 4. Cambridge, p 106-140

Gu LH, Baldocchi D, Verma SB, Black TA, Vesala T, Falge EM, Dowty PR (2002) Advantages of diffuse radiation for terrestrial ecosystem productivity. Journal of Geophysical Research - Atmosphe-res, 107, D6, 4050, doi: 10.1029/2001JD001242

Henniges Y (2008) Entwicklung phänologischer Modelle für ausgewählte Pflanzen für die Naturräume 74 (Quillow-Einzugsgebiet) und 42 (Weißeritzkreis), Humboldt Universität Berlin, 9 S.

Horsten T, Krahe P, Nilson E, Oppermann R (2010) Modellgestützte Analyse der Variabilität des Wasserhaushaltes im Havel-Spree-Gebiet. In: Kaiser K, Libra J, Merz B, Bens O, Hüttl RF (Hrsg) Aktuelle Probleme im Wasserhaushalt von Nordddeutschand. Trends, Ursachen Lösungen. GFZ-Postdam, Scientific Technical Report STR10/10, 77-81

Jacob D, Bärring L, Christensen OB, Christensen JH, Hagemann S, Hirschi M, Kjellström E, Lenderink G, Rockel B, Schär C, Seneviratne SI, Somot S, van Ulden A, van den Hurk B (2007) An inter-comparison of regional climate models for Europe: Design of the experiments and model performance. Climatic Change 81, 31-52. DOI 10.1007/s10584-006-9213-4

Jung M et al. (33 Ko-Autoren) 2010: Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. Nature 467, 954-951

Kabat P, Claussen M, Dirmeyer PA, De Guenni LB, Meybeck M, Pielke Sr RA, Vörösmarty CJ, Hut-jes RWA, Lütkemeyer S (eds) 2004: Vegetation, Water, Humans and the Climate. A new perspective on an interactive system. The IGBP Series. Springer, Berlin, 566 p

Köstner B, Bernhofer Ch, Anter J, Berg M, Franke J, Gömann H, Kersebaum KC, Kreins P, Kuhnert M, Lindau R, Manderscheid R, Mengelkamp H-T, Mirschel W., Nendel C, Nozinski E, Richwien M, Pätzold A, Simmer C, Stonner R, Weigel H-J, Wenkel K-O, Wieland R (2009) Anpassung ländlicher Räume an regionale Klimaänderungen – die Wissensplattform LandCaRe-DSS. In: M Mahammadza-deh, H Biebeler und H Bardt (Hrsg.): Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen - Strategien, Maßnahmen und Anwendungsbeispiele. Köln, 295-301

Köstner B, Bernhofer Ch, Münch T, Franke J, Kuhnert M (2011) Vorsorge und Gestaltungspotenziale in ländlichen Räumen unter regionalen Wetter- und Klimaänderungen (LandCaRe 2020). Abschlussbericht, BMBF, klimazwei, Fkz PT-DLR 01LS05104

Köstner B, Clausnitzer F (2011) Die Transpiration eines Fichten- und Buchenbestandes unter Bodentrockenheit im Tharandter Wald. Waldökologie, Landschaftsforschung und Naturschutz, im Druck

Köstner B, Kuhnert M (2011) Simulation von Wasserhaushaltskomponenten unter dem Wandel des regionalen Klimas. In: Hüttl RF, Emmermann R, Germer S, Naumann M, Bens O (Hrsg) Globaler Wandel und regionale Entwicklung. Anpassungsstrategien in der Region Berlin-Brandenburg. Springer, Berlin, ISBN 978-3-642-19477-1, im Druck

Köstner B, Surke M, Bernhofer Ch (2007) Klimadiagnose der Region Berlin / Barnim / Uckermark / Uecker-Randow für den Zeitraum 1951 bis 2006. Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppe „Zukunftsorientierte Nutzung ländlicher Räume (LandInnovation) der Berlin-Brandenburgischen Aka-demie der Wissenschaften, Bd. 18

Kreienkamp F, Spekat A, Enke W (2010) Weiterentwicklung von WETTREG bezüglich neuartiger Wetterlagen. Climate & Environment Consulting (CEC) Potsdam GmbH, Bericht. 60 S.

Langer I, Schartner Th, Billing H, Cubasch U (2010) Vegetationsänderung in Berlin-Brandenburg. Ein Vergleich von Satellitendaten und einem regionalen Klimamodell. Diskussionspapier 9, Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppen, BBAW

Leuzinger S, Körner C (2007) Water savings in mature deciduous trees under elevated CO_2. Global Change Biology 13, 2498-2508

Lindau R, Simmer C, (2011) Vorsorge und Gestaltungspotenziale in ländlichen Räumen unter regiona-len Wetter- und Klimaänderungen (LandCaRe 2020) Dynamische Regionalisierung. Teilprojekt 2.3. Schlussbericht, BMBF klimazwei, FKZ PT-DLR 01 LS 05107

Lüttger A, Gerstengarbe F-W, Gutsch M, Suckow F, Werner PC (2011) Klimawandel in der Region Havelland-Fläming. Potsdam Institute for Climate Impact Research, PIK Report No. 121

Manderscheid R, Erbs M, Nozinski E, Weigel H-J (2009) Wechselwirkung zukünftiger atmosphärischer CO_2-Konzentrationen und unterschiedlicher Wasserversorgung auf das Wachstum eines Maisbestandes: Effekte auf Wasser- und Strahlungsausnutzungseffizienz. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 21, 53-54

Menzel A (2007) Phänologische Modelle. Promet 33(1/2), 20-27

Mirschel W, Eulenstein F, Wenkel K-O, Wieland R, Müller L, Willms M, Schindler U, Fischer A (2005) Regionale Ertragsschätzung für wichtige Fruchtarten auf repräsentativen Ackerstandorten in Märkisch-Oderland mit Hilfe von SAMT*– 2000 versus 2050. In: Wiggering H, Eulenstein F, Augustin J (Hrsg) Entwicklung eines integrierten Klimaschutzmanagements für Brandenburg. Handlungsfeld Landwirtschaft (DS 3/6821-B). Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V., Müncheberg., Kap. 6

Mirschel W, Wenkel K-O (2007) Modelling soil-crop interactions with AGROSIM model family. In: Kersebaum KC, Hecker J-M, Mirschel W, Wegehenkel M (eds) Modelling water and nutrient dynam-ics in soil-crop systems. Springer, Dordrecht, 59-73

Mirschel W, Wenkel K-O, Wieland R, Luzi K, Albert E, Köstner B (2009) Klimawandel und Ertragsleistung : Auswirkungen des Klimawandels auf die Ertragsleistung ausgewählter landwirtschaftlicher Fruchtarten im Freistaat Sachsen -eine landesweite regionaldifferenzierte Abschätzung. In: Sächsisches Landesamt für Land-

wirtschaft, Umwelt und Geologie (Hrsg) Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG Sachsen), Heft 28/2009, 61 S.

Moffat AM, Beckstein C, Churkina G, Mund M (2010) Characterization of ecosystem responses to climatic controls using artificial neural networks. Global Change Biology 16, 2737–2749, doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02171.x

Mooney HA (1996) Ecosystem physiology: overview and synthesis. In: Walker B, Steffen W (eds) Global Change and Terrestrial Ecosystems. International Geosphere-Biosphere Programme Book Series 2. Cambridge, p 13-19

Rockel B, Will A, Hense A (eds.) (2008) Regional climate modelling with COSMO-CLM (CCLM), Meteorologische Zeitschrift, Vol. 17, Special Issue

Rosswall T, Woodmansee RG, Rissser PG (eds) (1988) SCOPE 35. Scales and Global Change – spatial and temporal variability in biospheric and geospheric processes. Scientific Committee on the Problems of the Environment (SCOPE)

Schwärzel K, Häntzschel J, Grünwald T, Köstner B, Bernhofer C, Feger KH (2007) Fundamentals of the spatially distributed simulation of the water balance of forest sites in a low-range mountain area. Adv Geosci 11, 43-47

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, A2. Publikationen des Umweltbundesamtes.

Stock M, Badeck F, Gerstengarbe F-W, Hoppmann D, Kartschall T, Österle H, Werner PC, Wodinski M (2007) Perspektiven der Klimaänderung bis 2050 für den Weinbau in Deutschland (Klima 2050). Potsdam Institute for Climate Impact Research, PIK Report No. 116

Wechsung F, Gerstengarbe F-W, Lasch P, Lüttger A (Hrsg) (2008) Die Ertragsfähigkeit ostdeutscher Ackerflächen unter Klimawandel. Potsdam Institute for Climate Impact Research, PIK Report No. 112

Wieland, R.; Wenkel, K.-O.; Mirschel, W.; Berg, M. (2007): A decision support system for foresight and potentials in rural areas under regional climate change. In: MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation. Proceedings, 525-531

Wiggering H, Eulenstein F, Augustin J (Hrsg) 2005: Entwicklung eines integrierten Klimaschutzmanagements für Brandenburg. Handlungsfeld Landwirtschaft (DS 3/6821-B). Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V., Müncheberg

Anhang

WETTREG A1B, Station Berlin-Dahlem

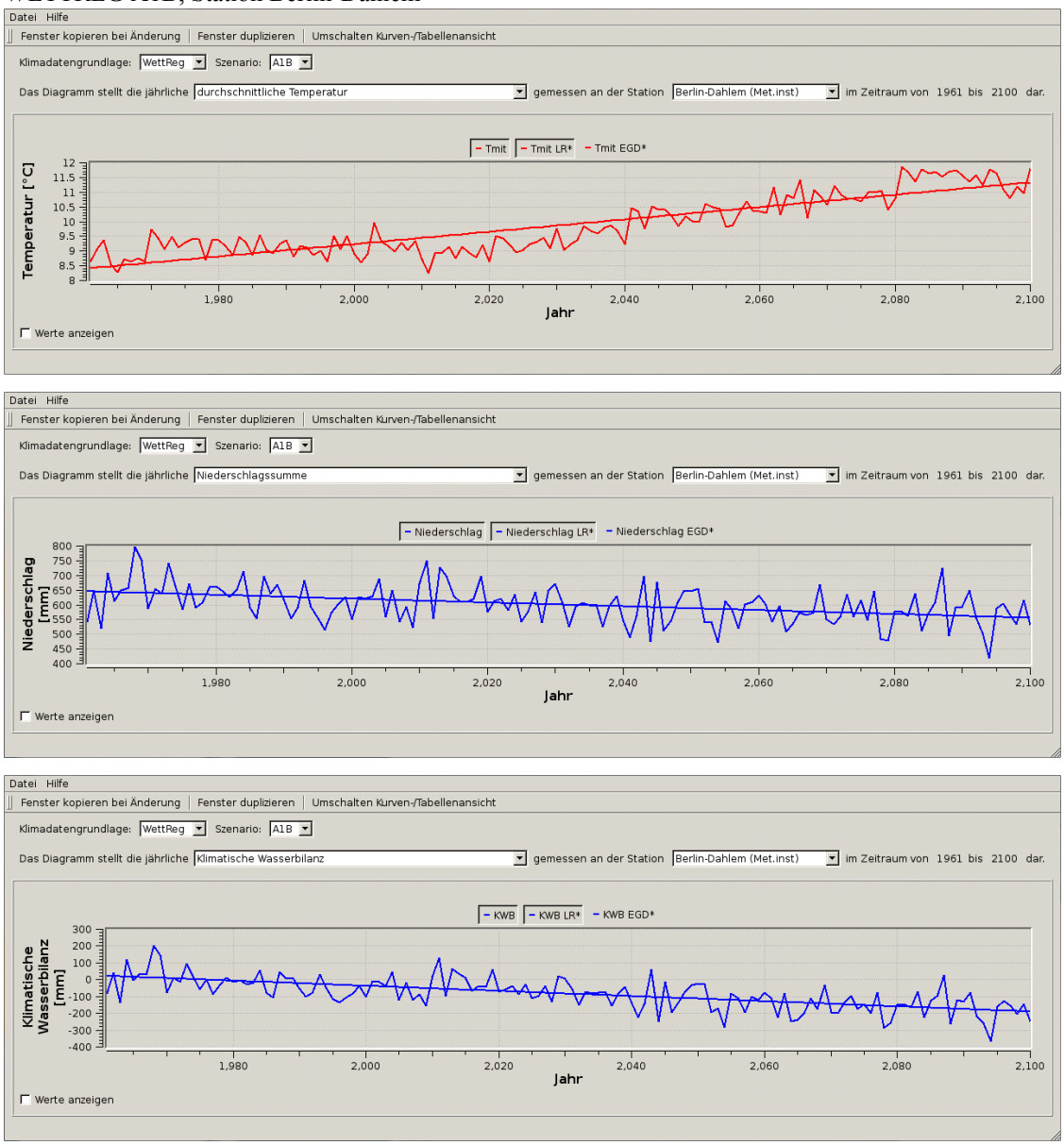


Abbildung 20: Trend der Jahresmitteltemperatur, der Jahresniederschlagssumme und der klimatischen Wasserbilanz an der Station Berlin-Dahlem nach der WETTREG-Projektion für das Emissionsszenario A1B (Mittelung von 3 Realisierungen)

CLM A1B, Gitterpunkt 090_121 (Raum Berlin)

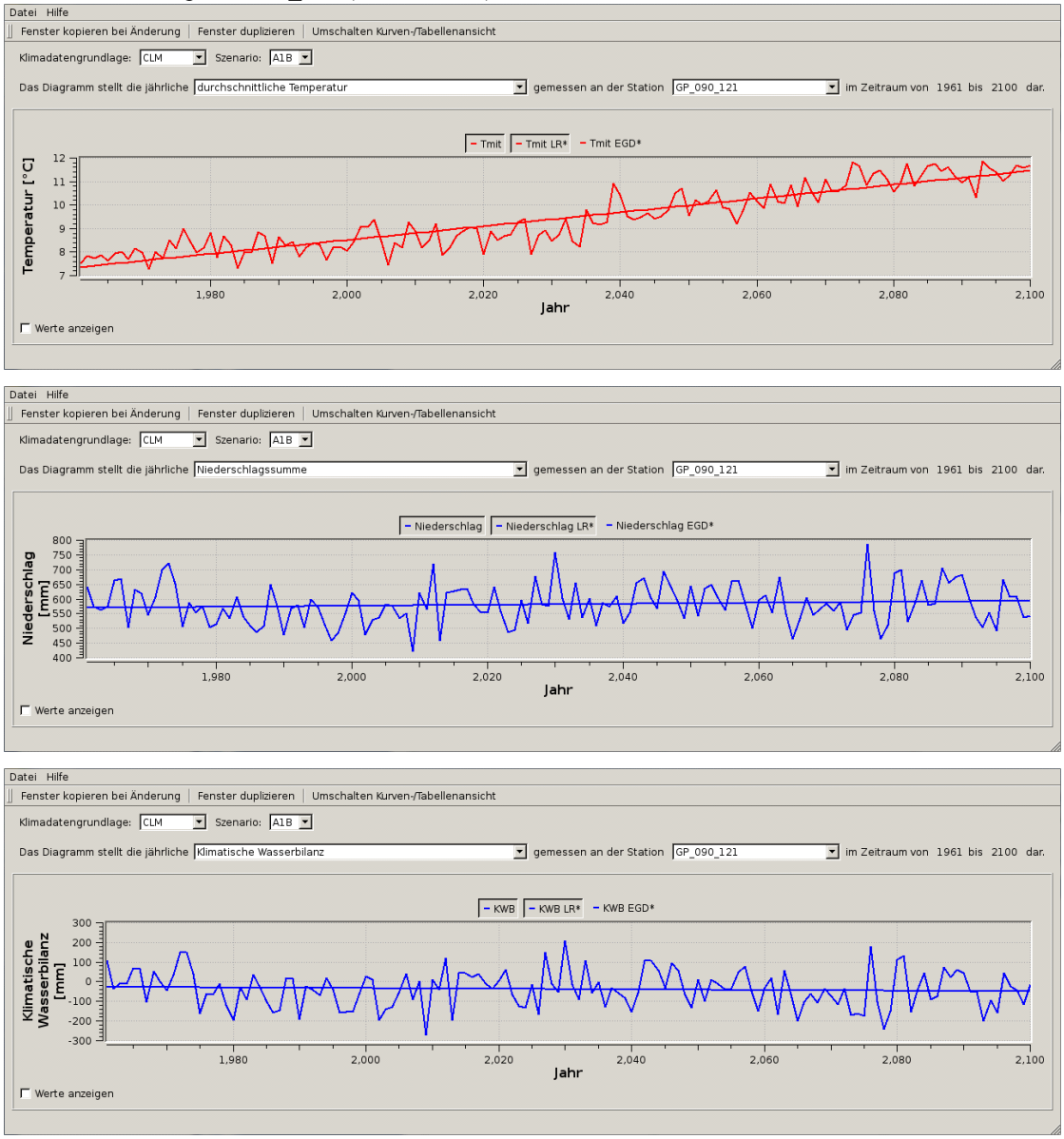
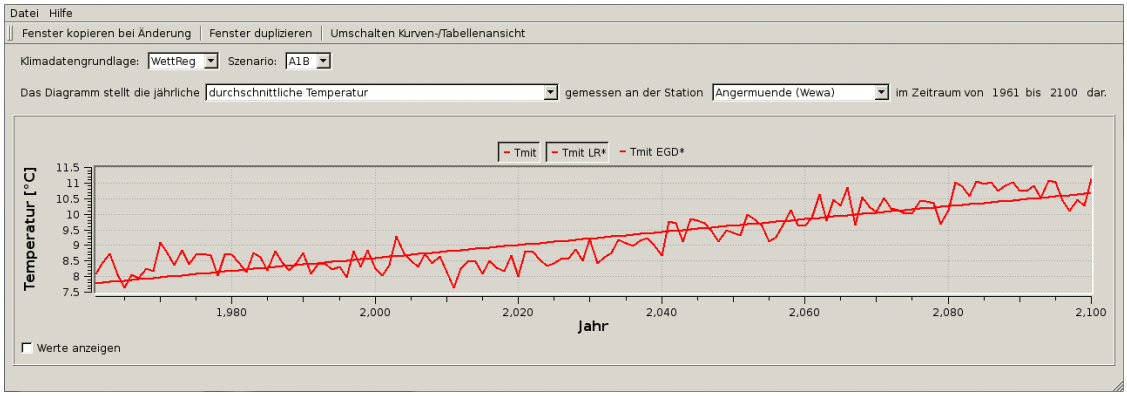
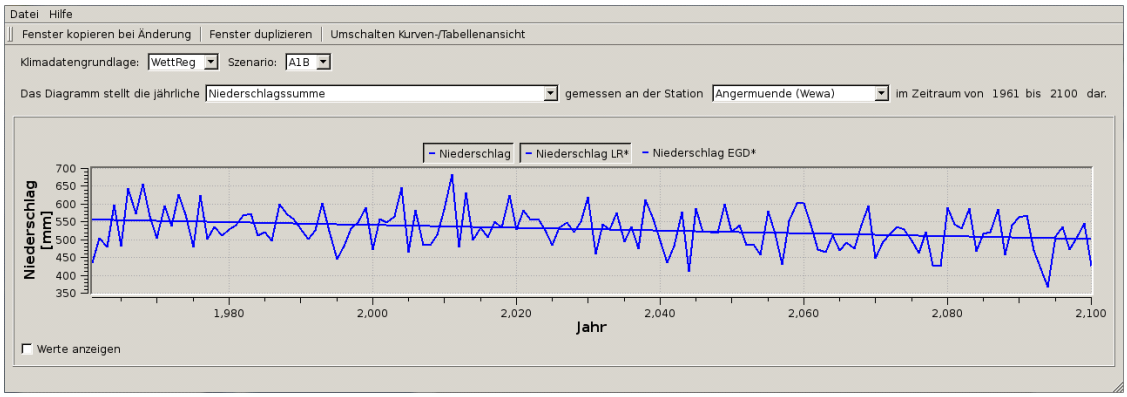


Abbildung 21: Trend der Jahresmitteltemperatur, der Jahresniederschlagssumme und der klimatischen Wasserbilanz am zentralen Gitterpunkt 090_121 der CLM-Projektion im Raum Berlin (Mittelung von insgesamt 9 Gitterpunkten und 2 Realisierungen) für das Emissionsszenario A1B. Systematische Abweichungen der absoluten Niederschlagswerte der CLM-Projektion wurden vorab für jeden Gitterpunkt korrigiert.

WETTREG A1B, Station Angermünde





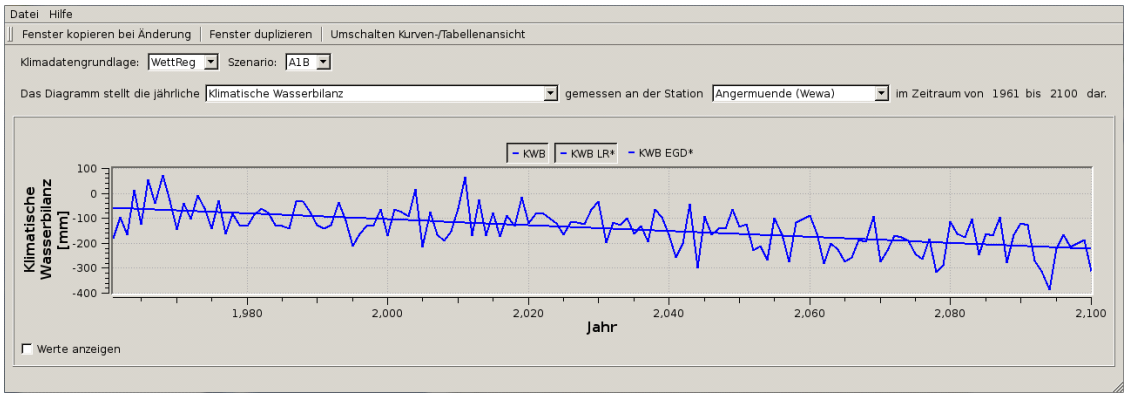


Abbildung 22: Trend der Jahresmitteltemperatur, der Jahresniederschlagssumme und der klimatischen Wasserbilanz an der Station Angermünde nach der WETTREG-Projektion für das Emissionsszenario A1B (Mittelung von 3 Realisierungen)

CLM A1B, Gitterpunkt 094_124 (Raum Uckermark)

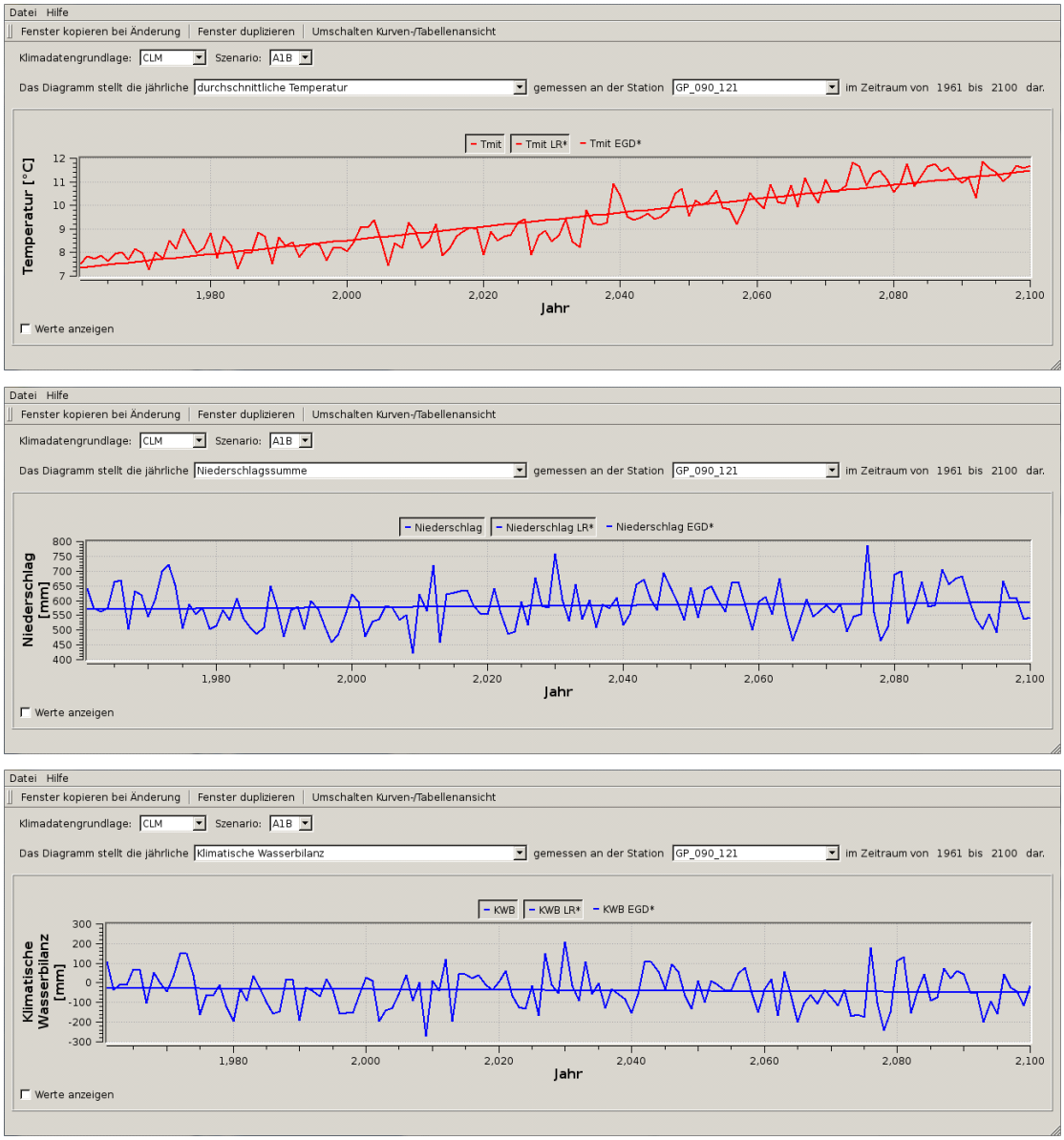


Abbildung 23: Trend der Jahresmitteltemperatur, der Jahresniederschlagssumme und der klimatischen Wasserbilanz am zentralen Gitterpunkt 094_124 der CLM-Projektion im Raum Uckermark (Mittelung von insgesamt 9 Gitterpunkten und 2 Realisierungen) für das Emissionsszenario A1B. Systematische Abweichungen der absoluten Niederschlagswerte der CLM-Projektion wurden vorab für jeden Gitterpunkt korrigiert

Autorenhinweis

PD. Dr. Barbara Köster
Professur für Meteorologie
Institut für Hydrologie und Meteorologie
Technische Universität Dresden
01062 Dresden
Telefon: 0351 463-39100
barbara.koestner@tu-dresden.de

Dr. Matthias Kuhnert
Institute of Biological and Environmental Sciences
School of Biological Science
University of Aberdeen
Aberdeen, Schottland
E-Mail: matthias.kuhnert@abdn.ac.uk

Materialien der Interdisziplinären Arbeitsgruppen
IAG Globaler Wandel – Regionale Entwicklung

Bisherige Diskussionspapiere

Diskussionspapier 1 01/2009	Karl-Dieter Keim: Spacing-Konzepte und Brückenprinzipien zur Formulierung von Handlungsvorschlägen
Diskussionspapier 2 01/2010	Gunnar Lischeid: Landschaftswasserhaushalt in der Region Berlin-Brandenburg
Diskussionspapier 3 02/2010	Katrin Drastig, Annette Prochnow & Reiner Brunsch: Wassermanagement in der Landwirtschaft
Diskussionspapier 4 03/2010	Timothy Moss & Frank Hüesker: Wasserinfrastrukturen als Gemeinwohlträger zwischen globalem Wandel und regionaler Entwicklung – institutionelle Erwiderungen in Berlin-Brandenburg
Diskussionspapier 5 04/2010	Erik Swyngedouw: Place, Nature and the Question of Scale: Interrogating the Production of Nature
Diskussionspapier 6 05/2010	Elke Rohmann & Hans-Werner Bierhoff: Wahrnehmungen, Einstellungs- und Verhaltensänderungen in Bezug auf Global Change-Prozesse. Eine Analyse aus sozialpsychologischer Sicht
Diskussionspapier 7 06/2010	Uwe Grünewald: Wasserbilanzen der Region Berlin-Brandenburg
Diskussionspapier 8 07/2010	ARL-Arbeitskreis *Klimawandel und Raumplanung*: Planungs- und Steuerungsinstrumente zum Umgang mit dem Klimawandel
Diskussionspapier 9 08/2010	Ines Langer, Thomas Schartner, Heiner Billing & Ulrich Cubasch: Vegetationsänderung in Berlin-Brandenburg. Ein Vergleich von Satellitendaten und einem regionalen Klimamodell
Diskussionspapier 10 09/2010	Hans Kögl: Potenziale der Vermarktung von landwirtschaftlichen Produkten aus Brandenburg in Berlin
Diskussionspapier 11 01/2011	Michael Hupfer & Brigitte Nixdorf: Zustand und Entwicklung von Seen in Berlin und Brandenburg
Diskussionspapier 12 02/2011	Franziska Schaft, Christoph Sahrbacher & Alfons Balmann: Möglichkeiten und Restriktionen von ostdeutschen Agrarbetrieben
Diskussionspapier 13 03/2011	Konrad Hagedorn: Die Landwirtschaft in Brandenburg unter dem Einfluss der Globalisierung
Diskussionspapier 14 04/2011	Barbara Köstner & Matthias Kuhnert: Die Wirkung zukünftiger Klimaänderungen auf terrestrische Ökosysteme am Beispiel der Uckermark in Brandenburg

Der aktuelle Stand der Reihe ist im Internet unter http://globalerwandel.bbaw.de einsehbar. Alle Texte sind frei verfügbar. An gleicher Stelle sind auch Hinweise auf weitere Publikationen und auf Veranstaltungen im Rahmen der IAG *Globaler Wandel – Regionale Entwicklung* zu finden.

Die Interdisziplinäre Arbeitsgruppe *Globaler Wandel – Regionale Entwicklung* geht Auswirkungen des globalen Wandels auf etablierte räumliche Ordnungsmuster nach. Das Anliegen der Arbeitsgruppe ist es, die Wechselwirkungen zwischen globalem Wandel und regionaler Entwicklung zu verstehen und daraus neue Handlungsorientierungen zu gewinnen.