

Barbara Köstner

## Regionaler Klimawandel in ländlichen Räumen – Modellgestützte Werkzeuge zur Ableitung von Anpassungsmaßnahmen

### 1 Einleitung

Die Entwicklung ländlicher Räume hat in den letzten Jahren verstärkte Aufmerksamkeit erfahren. Zwar wird die Landwirtschaft weiterhin als zentrale Komponente des ländlichen Raumes betrachtet, gefordert ist jedoch eine integrierte Sichtweise, die die Multifunktionalität der Kulturlandschaft herausstellt [13, 31]. Dies wird untermauert durch die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) der Europäischen Union, deren Agrarförderung über die sogenannte „Zweite Säule“ der Entwicklung ländlicher Räume zugute kommen soll. Die Landwirtschaft selbst übernimmt ökonomische, ökologische und soziale Funktionen. Eine nachhaltige Entwicklung des ländlichen Raumes ist an die zukünftige Existenzfähigkeit der Landwirtschaft gekoppelt. Klimaänderungen beeinflussen zunehmend die Rahmenbedingungen für die Landwirtschaft und erfordern neben konsequentem Klimaschutz geeignete Anpassungsmaßnahmen [14, 30].

Wirkungen von Klimaänderungen auf die Pflanzenproduktion und Landnutzung können nicht isoliert vom Landschaftssystem betrachtet werden, wenn die Nachhaltigkeit von Maßnahmen gewährleistet werden soll. Dies betrifft den Erhalt von Ökosystem(dienst)leistungen („ecosystem services“) [5, 17], die sich zum Beispiel auf den Wasser- und Stoffhaushalt, die Biodiversität oder Erholungsfunktionen einer Landschaft beziehen. Gerade wenn unter dem Einfluss von Klimaänderungen in einigen Regionen die landwirtschaftliche Produktion nicht in bisheriger Weise aufrechterhalten werden kann, treten andere Werte der Landschaft und ihre Anerkennung als Ökosystemdienstleistungen in den Vordergrund.

Die notwendige integrale Sicht der Aufgaben- und Problemfelder im ländlichen Raum, die eine Verknüpfung von Wissen aus verschiedenen Disziplinen und aus der Praxis erfordert, die Sicht in die Zukunft, die nur durch klimasensitive Simulationsmodelle quantifiziert werden kann, und die für Anpassungsmaßnahmen erforderliche räumlich-explizite Beschreibung von regionalen Klimawirkungen sind nur durch modellgestützte Informations- und Entscheidungshilfesysteme zu erreichen. Sie bilden eine wesentliche Grundlage, um die Spannweite regionaler Klimawirkungen und die damit verbundene Unsicherheit abschätzen und Anpassungsmaßnahmen entwickeln zu können. Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Verbundprojekt LandCaRe (*Land, Climate and Resources*) 2020 hat zum Ziel, die modellbasierte Wissensplattform LandCaRe-DSS (DSS = decision support system) bereitzustellen, um strategische Planungsprozesse der Landwirtschaft, ihrer vor- und nachgelagerten Wirtschaftsbereiche und weiterer Akteure im ländlichen Raum bei der Anpassung an regionale Klimaänderungen zu unterstützen [14, 16]. Eine Standardisierung solcher räumlichen Informationssysteme für Anwendungen unter regionalem Klimawandel wird derzeit angestrebt.

### 2 Klimawandel und ländliche Räume

Die in Deutschland beobachteten Klimaänderungen äußern sich im Einzelnen sehr vielfältig, weil sich nicht nur Langfristrends, Fluktuationen und relativ kurzfristige Anomalien sowie Extremereignisse über

*Anpassung an den Klimawandel erfordert Wissen über die potenziellen regionalen und lokalen Wirkungen von Klima und Wetterextremen. Auswirkungen des Klimawandels können die Landwirtschaft, abhängig von Witterung, Standortqualität, Landnutzung und -management, sowohl positiv als auch negativ beeinflussen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Klimawandel sich einerseits direkt auf Funktionen von Agrarökosystemen auswirkt, andererseits aber auch Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft Ökosystemdienstleistungen im ländlichen Raum beeinträchtigen können. Gefordert ist daher eine integrative Sicht der Wechselwirkungen. Aufgrund der komplexen Zusammenhänge muss die Bewertung zukünftiger Entwicklungen durch Simulationsmodelle unterstützt werden. Der Beitrag fasst Kenntnisse über den Einfluss des Klimawandels auf die Landwirtschaft zusammen und stellt beispielhaft modellgestützte Werkzeuge vor, die Auswirkungen des Klimawandels auf Agrarökosysteme simulieren und derzeit durch das Verbundvorhaben LandCaRe (*Land, Climate and Resources*) 2020 entwickelt werden.*

*Adaptation to climate change requires knowledge of the potential regional and local impact of climate and weather extremes. The effects of climate change on agriculture may be positive or negative, depending on weather conditions, site quality, land use and management. It must be considered that, on the one hand, climate change will directly affect functions of agro-ecosystems, while on the other hand, adaptation measures in agriculture may influence ecosystem services in rural areas. Therefore, an integrative view of possible interactions is necessary. Given the complex interdependencies, the evaluation of future developments must be supported by simulation models. The paper summarises current knowledge on the influence of climate change on agriculture and presents the model-based instruments which being currently developed by the joint project "LandCaRe (*Land, Climate and Resources*) 2020" to simulate the impact of climate change on agro-ecosystems.*

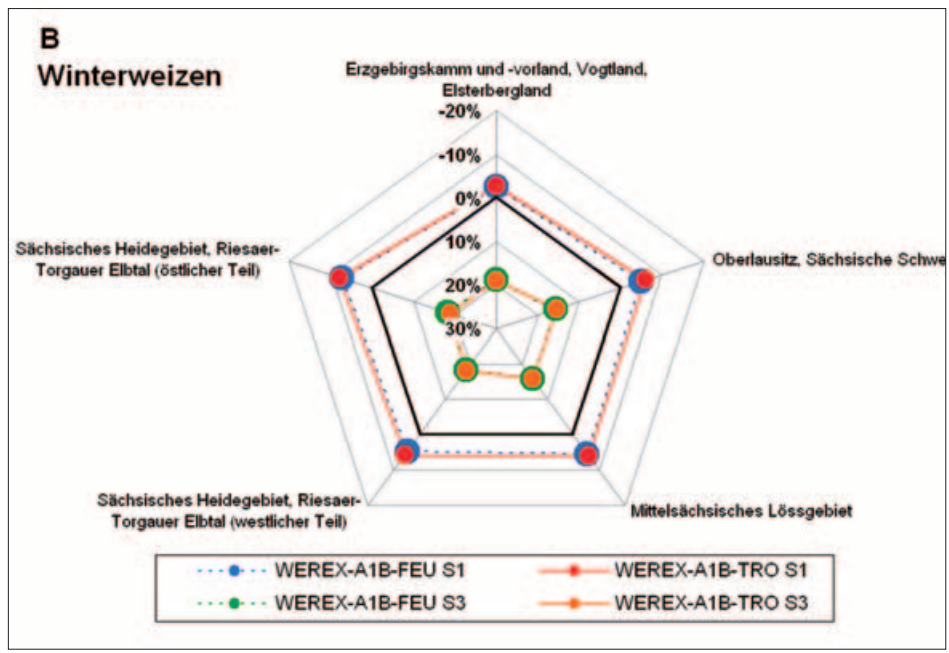
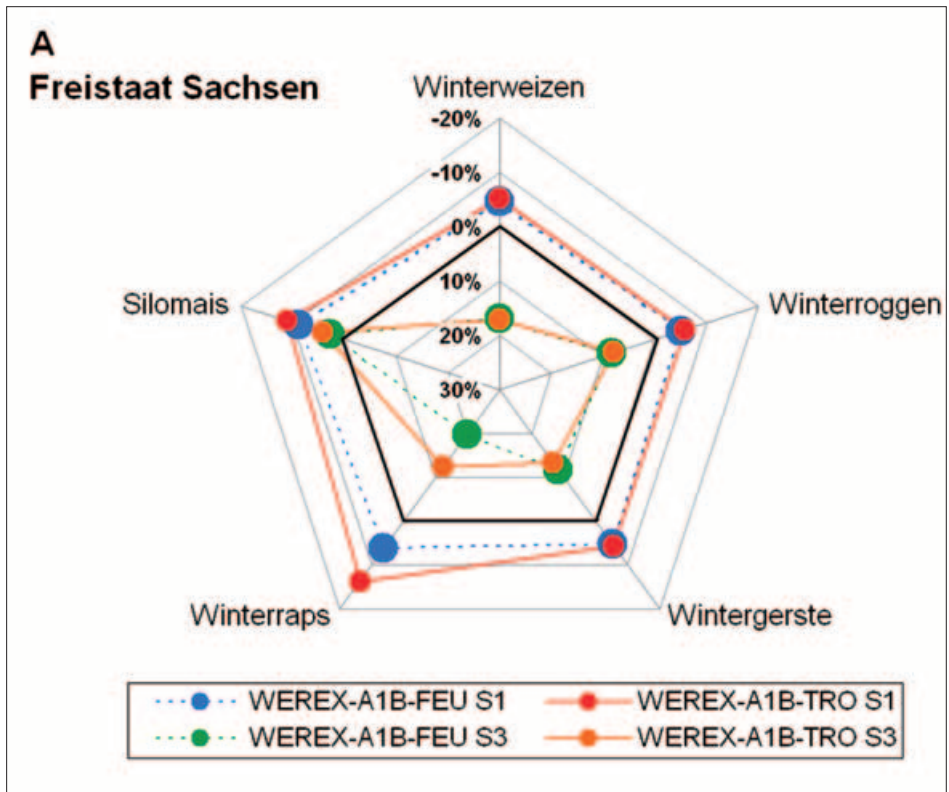


Bild 1. Entwicklung der Ernteerträge ausgewählter landwirtschaftlicher Fruchtarten für Sachsen (A) und für Winterweizen in sächsischen Anbauregionen (B), simuliert mit dem Ertragsmodell YIELDSTAT für die Klimaprojektion WEREX IV, Emissionsszenario A1B (Realisierung „trocken“ = TRO und „feucht“ = FEU). Dargestellt sind die relativen Änderungen (%) beim Vergleich des Zeitraumes 1976 bis 2005 mit dem Zeitraum 2021 bis 2050 für ein sehr pessimistisches Szenario (S1: kein CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt und kein technologischer Fortschritt) und ein optimistisches Szenario (S3: mit CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt und technologischem Fortschritt) [18, 22].

lagern, sondern auch ausgeprägte regional-jahreszeitliche Besonderheiten auftreten [4]. Diese Besonderheiten sind auf die geographische Lage, orographische Effekte und die jeweils für die Region relevanten Änderungen von Zugbahnen und Wetterlagen zurückzuführen. So zeigt zum Beispiel die Klimadiagnose für Sachsen [26] gegenläufige Trends innerhalb des Bundeslandes, aber auch unterschiedlich starke und gegenläufige Trends zwischen den Jahreszeiten. Ähnliche Klimatrends können durch ganz unterschiedliche Witterungsverläufe verursacht sein. Für die Beurteilung der Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Landnutzung müssen Klimaszenarien hinreichend zeitlich (Extremereignisse) und räumlich (regional/lokal) differenziert werden (Klimaprojektionen). Unterschiede in den

Emissionsszenarien, den globalen Zirkulationsmodellen und den Regionalisierungsmethoden können die Spannbreiten von Vorhersagen aufzeigen. Die Spannweite dieser Unsicherheiten muss bei der Analyse von Auswirkungen auf die Landnutzung berücksichtigt werden. Das heißt, es müssen regionale Klimaprojektionen zum Vergleich verfügbar sein, die den Einfluss unterschiedlicher sozioökonomischer Entwicklungen auf die Treibhausgasemissionen (Emissionsszenarien) sowie den Stand des wissenschaftlichen Prozessverständnisses, der durch verschiedene Modelle zum Ausdruck kommt, deutlich machen. Regionale Klimaprojektionen und daran gekoppelte Wirkungsmodelle stehen noch relativ am Anfang ihrer Entwicklung. Hierzu lassen sich keine abschließenden Aussagen treffen. Grundsätzlich

kann jedoch davon ausgegangen werden, dass durch die höhere Differenzierung bezüglich Topographie, Landnutzung, biosphärischer Prozesse usw. ein größerer Erkenntnisgewinn möglich wird.

Hinsichtlich der landwirtschaftlichen Produktion sind in Abhängigkeit von regionalen Klimatrends, Naturraum und den sozio-ökonomischen Rahmenbedingungen positive wie negative Auswirkungen zu erwarten. Beim Grünland ist zum Beispiel mit höheren Produktionsschwankungen zu rechnen, wobei für (sub-)montane Lagen Ertragssteigerungen möglich sind [8, 12]. Größte Einbußen werden beim intensiv genutzten Ackerland erwartet, die jedoch durch Sortenumstellung und technischen Fortschritt (über)kompensiert werden könnten [7, 29]. Folgende allgemeine Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft werden unter anderem diskutiert [32]: Anpassung von Saatterminen, Wahl geeigneter Sorten und Zucht neuer Sorten (z. B. frühblühender Weizen), Änderung von Fruchtfolgen, Fruchtarten, Bodenbearbeitung und Bewässerung, Anpassung von Düngung und Pflanzenschutz (z. B. an anderes Verhalten oder neues Auftreten von Schädlingen und Pflanzenkrankheiten). Trotz der bereits heute verfügbaren allgemeinen Kenntnisse über die Wirkung von Klimaänderungen auf die deutsche Land- und Forstwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung [25], wird in den derzeitigen Nutzungskonzepten der Klimawandel nicht berücksichtigt, da die lokalen Auswirkungen kaum quantifiziert sind.

Der Freistaat Sachsen hat sich relativ früh mit möglichen Klimawirkungen auf die sächsische Landwirtschaft befasst und hierzu eine neue, umfassende Studie veröffentlicht [18, 27]. Im Rahmen dieser Studie wurden regional differenziert Ernteerträge der landwirtschaftlichen Hauptfruchtarten bis zum Jahr 2050 auf Basis der Klimaprojektion nach der Methode WEREX IV [18, 28] (Emissionsszenario A1B, Realisierungen der Witterung „trocken“ und „feucht“) simuliert [22]. Wesentliche Ergebnisse waren, dass die jeweiligen Annahmen zur Entwicklung des züchterischen und technologischen Fortschritts in den nächsten 40 Jahren und zum Einfluss des CO<sub>2</sub>-Düngeeffektes (siehe unten) darüber entscheiden können, ob der mittlere Ernteertrag bis 2050 noch zunimmt oder bereits abnimmt. So ergäben sich unter sehr pessimistischen Annahmen (Szenario S1: kein technologischer Fortschritt und kein CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt) mittlere Ertragseinbußen um ca. -10 %. Unter optimistischen Annahmen (Szenario S3: mit technologischem Fortschritt und CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt) sind bei allen Hauptfruchtarten außer beim Silomais bis 2050 noch Ertragszunahmen zu erwarten. Unterschiede zwischen den Witterungsrealisierungen „trocken“ und „feucht“ werden nur beim Winterraps deutlich (Bild 1A). Die generellen Ertragseinbußen beim Silomais sind vor allem als Reaktion auf Trockenheit zu werten. Da bereits heute beim Mais keine Ertragszunahmen in Sachsen zu verzeichnen sind [27], ist anzunehmen, dass die verwendeten Sorten nicht an zukünftiges Klima angepasst sind. Beim Vergleich der sächsischen Anbauregionen zeigt sich am Beispiel des Winterweizens, dass geringste Ertragseinbußen bzw. größte -zunahmen im Bereich des Erzgebirges, größte Einbußen im sächsischen Heidegebiet zu erwarten sind (Bild 1B). Bei der Interpretation dieser Simulationsergebnisse ist jedoch generell zu beachten, dass es sich um mittlere Trends über 30 Jahre handelt, d. h. hohe Schwankungen zwischen einzelnen Jahren auftreten können und Unsicherheiten über die Entwicklung von Wetterextremen und Pflanzenschädlingen nicht einbezogen sind. Ferner wurde bisher nur eine Klimaprojektion mit zwei Witterungsvarianten („trocken“, „feucht“) beruhend auf einer Regio-

nalisierungsmethode und einem Emissionsszenario (A1B) getestet. Weitere Klimaprojektionen und Wirkungsmodelle müssen zum Vergleich hinzukommen, um Spannbreiten möglicher Entwicklungen abschätzen zu können.

Der CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt besteht darin, dass Pflanzen, für die CO<sub>2</sub> ein Nährstoff ist, unter erhöhter atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration verstärktes Wachstum aufweisen. Dies ist meist mit einem geringeren Wasserverbrauch der Pflanzen verbunden. In sogenannten FACE (free air carbon dioxide enrichment) Experimenten wird das Verhalten von Pflanzenbeständen unter hoher atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentration untersucht [20]. Ergebnisse aus dem LandCaRe-Projekt haben gezeigt, dass selbst bei Mais, bei dem aufgrund eines anderen Photosyntheseweges (C<sub>4</sub>-Pflanze) kein CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt zu erwarten ist, Wachstumsverluste aufgrund von Trockenheit durch den geringeren Wasserverbrauch unter FACE-Bedingungen nahezu vollständig kompensiert werden [19]. Der CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt kann folglich bei der Simulation des zukünftigen Pflanzenwachstums über Zu- und Abnahme der Produktion entscheiden und muss möglichst spezifisch berücksichtigt werden. Des Weiteren ist es für Simulationen der Pflanzenproduktion unter zukünftigen Klimabedingungen erforderlich, dass Änderungen der Anbauverfahren, Sorteneigenschaften und Produktionstechnologien so weit wie möglich in die Modellsimulationen einbezogen werden.

### 3 Ökosystemdienstleistungen

Der Begriff „Ökosystemdienstleistungen“ geht auf die 1970er-Jahre zurück, als globale Ausmaße der Umweltzerstörung und Beeinträchtigungen der Funktion von Ökosystemen immer stärker ins Bewusstsein traten [10]. Zunächst auf die Leistungen natürlicher Ökosysteme beschränkt, wird der Begriff heute auch auf vom Menschen dominierte Ökosysteme angewandt [3]. Damit ergeben sich Parallelen zu Begriffen wie „nicht-marktfähige Güter“ („non-commodities“) [24] und dem in der Ökonomie verwendeten Begriff des „Naturkapitals“ [9]. Seit der umfassenden Bewertung globaler Ökosysteme im „Millennium Ecosystem Assessment“ [17], unterscheidet man (1) versorgende, (2) regulierende, (3) kulturelle und (4) unterstützende Dienstleistungen von Ökosystemen. Um zumindest eine Auswahl dieser vielfältigen Leistungen in einer Landschaft darstellbar, quantifizierbar und bewertbar zu machen, werden derzeit räumlich-explizite Modelle entwickelt [6, 23]. Dieser Ansatz sollte mit dem Konzept der räumlichen „Decision Support Systems“ vereint werden und gleichzeitig Optionen bieten, mögliche Veränderungen von Ökosystemdienstleistungen unter Klimawandel zu untersuchen. Das LandCaRe-DSS kann zu einer Reihe von Ökosystemleistungen einer Region Wissen beitragen (Bild 2). Die Leistungen sind mit unterschiedlichen Ökosystemfunktionen verbunden, die durch Modelle beschrieben werden. Ergebnisse der Modelle sind in Form von Indikatoren vom Nutzer des DSS abrufbar. Die Möglichkeit, diese Indikatoren für unterschiedliche Zeiträume (Vergangenheit/Zukunft) räumlich explizit darzustellen, zu verrechnen und mit anderen Regionen oder Konstellationen von Faktoren zu vergleichen, stellt ein hilfreiches Instrument für Planung und Landmanagement sowie für den Erhalt und die Bewertung der ökosystemaren Leistungen dar.

Defizite regionaler Klimamodelle sowie darauf aufbauender Wirkungsmodelle (z. B. Wasser-, Stoffhaushalts- oder Ertragsmodelle) bestehen darin, dass in den

Versorgende Leistungen (Provisioning Services)	Regulierende Leistungen (Regulating Services)	Kulturelle Leistungen (Cultural Services)
Nahrung, Futter Pflanzenrohstoffe Bioenergie Süßwasser Arten, genet. Diversität	Wasserqualität Bodenschutz C-Sequestrierung Treibhausgasbilanz Biotische Schädlinge	Erholung (Bioklima) Tourismus (Klimaregion) Landschaftsaspekt Management von Stoff- und Energieströmen
Unterstützende Leistungen (Supporting Services)		
Primärproduktion, Stickstoffkreislauf, Habitatfunktion		

Bild 2. Auswahl von Ökosystemdienstleistungen, zu deren regionaler Quantifizierung und Bewertung das LandCaRe-DSS potenziell beitragen kann.

Klimaprojektionen extreme Wettersituationen nicht hinreichend abgebildet werden. So müssen zum Beispiel für die Simulation der zukünftigen Bodenerosion zusätzliche Annahmen über die Intensität der Starkniederschläge getroffen werden [21]. Erhöhte Bodenerosion unter Klimawandel könnte sich wiederum negativ auf die Pflanzenproduktion auswirken und bedarf entsprechender Anpassungsmaßnahmen der Anbausysteme (z.B. Fruchtfolgen) und Bearbeitungsverfahren (z.B. konservierende Bodenbearbeitung). Diese beeinflussen wiederum die Treibhausgasbilanz [12]. Neben der Abschätzung der direkten Wirkung des Klimawandels auf die Pflanzenproduktion ist es daher erforderlich, indirekte Einflüsse über Veränderungen von Ökosystemdienstleistungen mit einzubeziehen.

#### 4 Die Wissensplattform LandCaRe-DSS

Das LandCaRe-DSS spricht Nutzer an, die im Zusammenhang mit ländlichen Räumen in verschiedenen Bereichen von Politik, Wirtschaft und Verwaltung wirken und mit ganz unterschiedlichen Aufgaben betraut sein können. Die Anforderungen potenzieller Nutzer wurden im Rahmen von Stakeholder-Workshops ermittelt und werden soweit wie möglich bei der Ausgestaltung des DSS berücksichtigt. Die Wissensplattform kann als Teil des Wissensmanagements eines Unternehmens oder einer Organisation aufgefasst werden, durch die komplexes, oft sektoral getrenntes Wissen verfügbar und mit dem eigenen Wissen bzw. Wissensbedarf verknüpfbar gemacht wird. Des Weiteren kann das DSS für

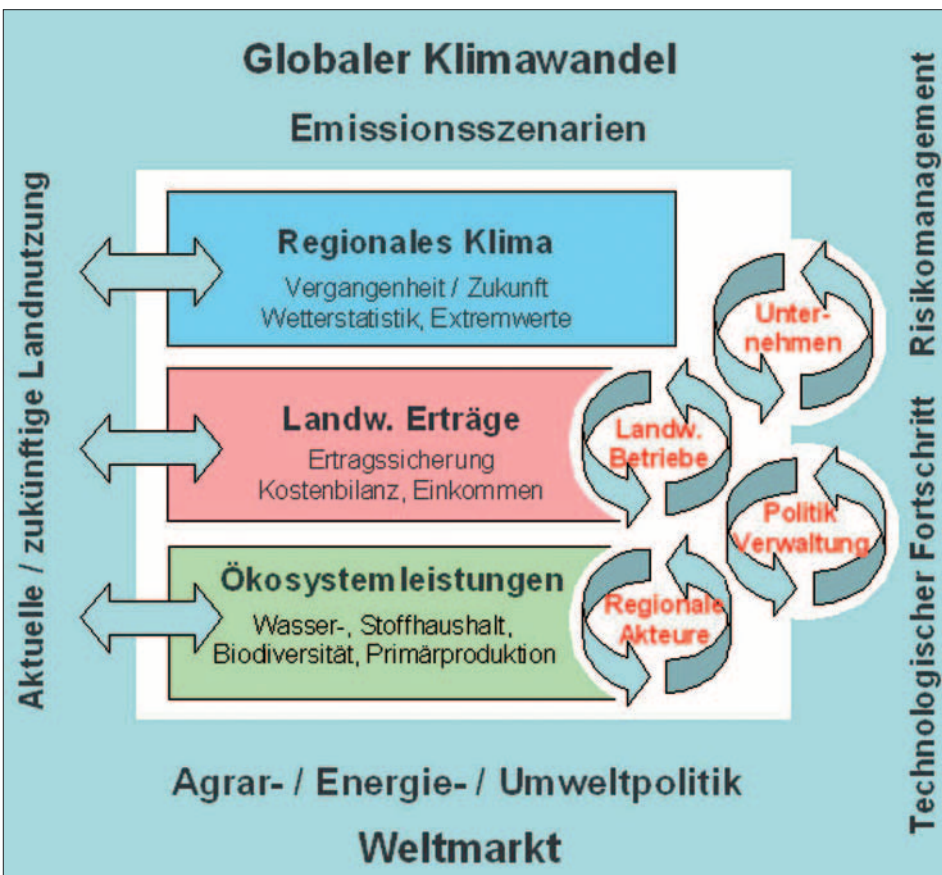


Bild 3. Übersicht zu den Kernthemen, Rahmenbedingungen und Akteursgruppen des LandCaRe-DSS

die Aus- und Weiterbildung genutzt werden. Die zentral bereitgestellten Daten sind von Fachleuten geprüft und ausgewählt und sollen die vielfältigen Informationen zum Klimawandel in ländlichen Räumen handhabbar bzw. für Anpassungsmaßnahmen nutzbar machen. Beispielhaft wird das DSS anhand der Regionen Uckermark in Brandenburg und Weißeritzkreis im Osterzgebirge entwickelt und steht für weitere räumliche Übertragungen bereit. Da sich nie vollständig voraussagen lässt, welche Fragen für potenzielle Nutzer des DSS in Zukunft relevant sein werden, können vom Nutzer selbst die jeweiligen Bedingungen gewählt werden, um eigene Simulationen durchzuführen. Es handelt sich folglich um ein sogenanntes dynamisches DSS [2].

Das LandCaRe-DSS will zu drei Kernthemen Aussagen treffen, die durch den Klimawandel bzw. Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft betroffen sein können (Bild 3):

- regionales Klima
- landwirtschaftliche Erträge
- Ökosystemleistungen.

In dieser Reihenfolge wurden die Prioritäten bei potenziellen Nutzern gesetzt.

Um Aussagen in diesen Bereichen treffen zu können, sind verschiedene Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Der globale Klimawandel und seine von sozioökonomischen Szenarien [15] abhängige, zukünftige Entwicklung stellen die entscheidende Ausgangslage dar. Davon werden die im DSS verfügbaren regionalen Klimaprojektionen abgeleitet. Die zurzeit vorgesehenen Klimaprojektionen beziehen sich auf die Emissionsszenarien A1B und B1 [15] und sind mit statistisch-dynamischen [28] und dynamischen Regionalisierungsverfahren [11] erzeugt. Dem gegenüber stehen als weitere Rahmenbedingungen der Weltmarkt für Agrarprodukte sowie auf verschiedenen Ebenen steuernd eingreifende, politische Vorgaben und Maßnahmen wie zum Beispiel GAP oder das Erneuerbare-Energien-Gesetz. Vom Zusammenspiel sozioökonomischer Rahmenbedingungen und landwirtschaftlicher Erträge hängt die agrarische Landnutzung ab. Die entsprechenden Daten zu den sozioökonomischen Szenarien sowie zur aktuellen und möglichen zukünftigen Landnutzung werden aus dem landwirtschaftlichen Informationssystem RAUMIS (vTI, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Braunschweig) in das DSS als Randbedingung eingebracht. Szenarien zur Veränderung der Landnutzung werden derzeit vor allem in Bezug auf die Verteilung von Nahrungs- und Energiepflanzenanbau sowie von Beregnungsanbau erstellt [1].

Technologischer Fortschritt und Risikomanagement stellen Rahmenbedingungen dar, die negative Folgen des Klimawandels abmildern können. Es soll daher möglich sein, die Wirkung geänderter Technologien in Bezug auf Bodenbearbeitung und Bewässerung sowie den Wechsel von Kulturarten zu testen. Die entsprechenden Kostenfaktoren dafür können durch ein einzelbetriebliches Ökonomiemodul im DSS abgeschätzt werden. Es ist geplant, die komplette web-basierte Version des LandCaRe-DSS erstmals Ende 2009 zu präsentieren.

## 5 Schlussfolgerungen

Im Hinblick auf Anpassungen an den Klimawandel in ländlichen Räumen lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Anpassungen an den Klimawandel in ländlichen Räumen finden regional bzw. lokal statt. Es besteht

daher großer Bedarf an der Regionalisierung von Klimadaten sowie ihrer Wirkung auf Landnutzung und Ökosystemfunktionen. Die entsprechenden Modelle und ihre Parameter müssen auf die jeweiligen Skalen abgestimmt sein.

- In Anbetracht der hohen Unsicherheiten der zukünftigen Klimaentwicklung, die von der Treibhausgasemission und dem Entwicklungsstand der Simulationsmodelle abhängen, sind für regionale Bewertungen jeweils auch die beobachteten Veränderungen in der Vergangenheit hinzuzuziehen, um Trends in Vergangenheit und Zukunft vergleichen zu können.
- Wirkungsmodelle müssen weitmöglichst das aktuelle Prozessverständnis, zum Beispiel den CO<sub>2</sub>-Düngeeffekt auf Pflanzenarten, wiedergeben. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der Langzeiteffekte unter Freilandbedingungen und der Parametrisierung von Modellen für alle relevanten Pflanzenarten und -sorten.
- Weitere Unsicherheit besteht darin, inwiefern der bisherige positive Trend des züchterischen und technologischen Fortschritts bei der Pflanzenproduktion auch in Zukunft erhalten bleibt. Es gilt, die jeweils aktuellen Entwicklungen zu verfolgen und einzubeziehen.
- Für die Bewertung von Klimawirkungen und für die Ableitung von Anpassungsmaßnahmen ist eine integrative Sicht der Ökosystemprozesse erforderlich. Es muss darauf hingearbeitet werden, dass eine klimabedingt rückläufige Pflanzenproduktion in den betreffenden Gebieten durch die Förderung anderer Ökosystemdienstleistungen ausgeglichen werden kann.
- Neue modellgestützte Werkzeuge erlauben eine Verschneidung der vielfältigen Faktoren und Daten und stellen somit selbst eine anpassungsfähige Plattform dar. Diese kann genutzt werden, um Daten und Informationen aus einer Region bereitzustellen, Auswirkungen unter verschiedenen Rahmenbedingungen zu testen und Strategien für die Anpassung an den regionalen Klimawandel zu entwickeln.

## Literatur

- [1] Anter, J.; Gömann, H.; Kreins, P.; Richmann, A.: Einfluss sich wandelnder ökonomischer Rahmenbedingungen auf die Beregnung landwirtschaftlicher Kulturen in Deutschland. In: *Landbauforschung – Wasser im Gartenbau. Sonderheft 328* (2009), S. 21 – 28
- [2] Berg, M.; Wieland, R.; Wenkel, K.-O.: LandCaRe-DSS – ein interaktives, modellgestütztes Wissens- und Entscheidungsunterstützungssystem für die Klimaanpassung der Landwirtschaft. In: *Lecture Notes in Informatics 142* (2009), S. 25 – 28
- [3] Costanza, R.; d'Arge, R.; de Groot, R.; Farber, S.; Grasso, M.; Hannon, B.; Limburg, K.; Naeem, S.; O'Neil, R. V.; Paruelo, J.; Raskin, R. G.; Sutton, P.; van den Belt, M.: The value of the world's ecosystem services and natural capital. In: *Nature 387* (1997), S. 253 – 260
- [4] DMG: Klimastatement der Deutschen Meteorologischen Gesellschaft. Berlin, 2003
- [5] Daily, G. C.; Alexander, S.; Ehrlich, P. R.; Goulder, L.; Lubchenco, J.; Matson, P. A.; Mooney, H. A.; Postel, S.; Schneider, S. H.; Tilman, D.; Woodwell, G. M.: Ecosystem Services: Benefits supplied to human societies by natural ecosystems. In: *Issues in Ecology 2* (1997), S. 1 – 16
- [6] Daily, G. C.; Polasky, S.; Goldstein, J.; Kareiva, P. M.; Mooney, H. A.; Pejchar, L.; Ricketts, T. H.; Salzman, J.; Shallenberger, R.: Ecosystem services in decision making: time to deliver. In: *Frontiers in Ecology and the Environment 7* (2009), S. 21 – 28
- [7] Flückiger, S.; Rieder, P.: Klimaänderung und Landwirtschaft. Schlussbericht NFP 31. ETH Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 1997
- [8] Fuhrer, J. (Hrsg.): Klimaänderung und Grünland. Schlussbericht NFP 31. ETH Zürich: vdf Hochschulverlag AG, 1997
- [9] Held, M.; Nuttinger, H. G.: Nachhaltiges Naturkapital – Perspektive für die Ökonomie. In: Held, M.; Nuttinger, H. G. (Hrsg.): *Nachhaltiges Naturkapital. Ökonomie und zukünftige Entwicklung*. Frankfurt am Main: Campus, 2001. S. 11 – 49
- [10] Holdren, J. P.; Ehrlich, P. R.: Human population and the global environment. In: *American Scientist 62* (1974), S. 282 – 292

- [11] *Hollweg, H.-D.; Böhm, U.; Fast, I.; Hennemuth, B.; Keuler, K.; Keup-Thiel, E.; Lautenschlager, M.; Legutke, S.; Radtke, K.; Rockel, B.; Schubert, M.; Will, A.; Woldt, M.; Wunram, C.*: Ensemble Simulations over Europe with the Regional Climate Model CLM forced with IPCC AR4 Global Scenarios. Modelle & Daten (M & D) Technical Report No. 3. Hamburg: MPI Meteorologie, 2008
- [12] *Hopkins, A.; Del Prado, A.*: Implications of climate change for grassland in Europe: impacts, adaptations and mitigation options: a review. In: *Grass and forage science* **62** (2007), S. 118 – 126
- [13] *Hüttl, R. F.; Bens, O.; Plieninger, T. (Hrsg.)*: Zur Zukunft ländlicher Räume. Entwicklung und Innovationen in peripheren Regionen Nordostdeutschlands. Berlin: Akademie-Verlag, 2008
- [14] *Institut der deutschen Wirtschaft (Hrsg.)*: Klimaschutz und Anpassung. Ergebnisse des klimazwei-Förderschwerpunktes. Köln: klimazwei, 2009
- [15] *IPCC*: Special Report Emissions Scenarios (SRES). A special report of IPCC Working Group III. Genf: IPCC, 2000
- [16] *Köstner, B.; Berg, M.; Bernhofer, Ch.; Franke, J.; Gömann, H.; Kersebaum, K. C.; Kuhnert, M.; Lindau, R.; Manderscheid, R.; Mengelkamp, H.-T.; Mirschel, W.; Nendel, C.; Nozinski, E.; Pätzold, A.; Simmer, C.; Stonner, R.; Weigel, H.-J.; Wenkel, K.-O.; Wieland, R.*: Land, Climate and Resources (LandCaRe) 2020 – Foresight and Potentials in Rural Areas under Regional Climate Change. In: *Italian Journal of Agronomy/Rivista di Agronomia* **3** (2008) 3, Suppl., S. 743 – 744
- [17] *Millennium Ecosystem Assessment*: Ecosystems and Human Well-being. Synthesis. Washington: Island Press, 2005
- [18] *LfULG (Hrsg.)*: Klimawandel und Landwirtschaft. Fachliche Grundlage für die Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel. Dresden: Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, 2008
- [19] *Manderscheid, R.; Erbs, M.; Nozinski, E.; Weigel, H.-J.*: Freilanduntersuchungen (FACE) zur Wechselwirkung zukünftiger atmosphärischer CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und Sommertrockenheit auf Maisbestände. In: *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften* **20** (2008), S. 15 – 16
- [20] *Manderscheid, R.; Pacholski, A.; Frühauf, C.; Weigel, H.-J.*: Effects of free air carbon dioxide enrichment and nitrogen supply on growth and yield of winter barley cultivated in a crop rotation. In: *Field Crop Research* **110** (2009), S. 185 – 196
- [21] *Michael, A.; Schmidt, J.; Enke, W.; Deutschländer, Th.; Malitz, G.*: Impact of expected increase in precipitation intensities on soil loss – results of comparative model simulations. In: *Catena* **61** (2005), S. 155 – 164
- [22] *Mirschel, W.; Wenkel, K.-O.; Wieland, R.; Köstner, B.; Albert, E.; Luzzi, K.*: Raum-zeitliche Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen auf landwirtschaftliche Erträge, dargestellt am Beispiel des Freistaates Sachsen. In: *Lecture Notes in Informatics* **142** (2009), S. 105 – 108
- [23] *Nelson, E.; Mendoza, G.; Regetz, J.; Polasky, S.; Tallis, H.; Cameron, R. D.; MA Chan, K.; Daily, G. C.; Goldstein, J.; Kareiva, P. M.; Lonsdorf, E.; Naidoo, R.; Ricketts, T. H.; Shaw, M. R.*: Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales. In: *Frontiers in Ecology and the Environment* **7** (2009), S. 4 – 11
- [24] *OECD (Hrsg.)*: Multifunctionality. Towards an analytical framework. Paris: Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, 2001
- [25] *Schaller, M.; Weigel, H.-J.*: Analyse des Sachstands zu Auswirkungen von Klimaveränderungen auf die deutsche Landwirtschaft und Maßnahmen zur Anpassung. In: *Landbauforschung Völkenrode* **57** (2007) Sonderheft 316
- [26] *SMUL (Hrsg.)*: Sachsen im Klimawandel. Eine Analyse. Dresden: Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, 2008
- [27] *SMUL (Hrsg.)*: Klimawandel und Landwirtschaft. Strategie zur Anpassung der sächsischen Landwirtschaft an den Klimawandel. Dresden: Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft, 2009
- [28] *Spekat, A.; Enke, W.; Kreienkamp, F.*: Neuentwicklung von regional hoch aufgelösten Wetterlagen für Deutschland und Bereitstellung regionaler Klimaszenarios 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 zum FuE-Vorhaben FZ: 20441138 des Umweltbundesamtes. Dessau: Umweltbundesamt, 2007
- [29] *Tubiello, F. N.; Soussana J.-F.; Howden, S. M.*: Crop and pasture response to climate change. In: *PNAS* **104** (2007), S. 19686 – 19690
- [30] *UBA (Hrsg.)*: Klimawandel in Deutschland. Vulnerabilität und Anpassungsstrategien klimasensitiver Systeme. Climate Change 08/05. Dessau: Umweltbundesamt, 2005
- [31] *Wüstemann, H.; Mann, S.; Müller, K. (Hrsg.)*: Multifunktionalität. Von der Wohlfahrtsökonomie zu neuen Ufern. München: Oekom, 2008
- [32] Umweltbundesamt, [www.anpassung.net](http://www.anpassung.net) (abgerufen am 29.7.2009)

Manuskripteingang: 8.7.2009  
 Angenommen am: 28.7.2009



**Köstner, Barbara**

PD Dr. rer. nat. habil.

Studium Biologie und Geographie an der Bayerischen Julius-Maximilians-Universität Würzburg ♦ 1989 Promotion zur Dr. rer. nat. ♦ 1999 Habilitation zur Dr. rer. nat. habil. ♦ seit 2001 wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Hydrologie und Meteorologie, Fakultät Forst, Geo- und Hydrowissenschaften der TU Dresden