

Auswirkungen von Landnutzung und Klimawandel auf den Landschaftswasserhaushalt und Stoffflüsse

Pia Gottschalk & Frank Wechsung

Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK)

Motivation

Dieser Teilbereich von CC-LandStraD beschäftigt sich mit der mechanistischen Modellierung der biophysikalischen Auswirkungen von Landnutzungs- und Klimawandel auf den Landschaftswasserhaushalt und die Stoffflüsse von Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N). Beim letzteren geht es um die Veränderungen der C und N Vorräte in der Landschaft und weniger um die Treibhausgasemissionen, die in einem anderen Teilprojekt bearbeitet werden. Mit der Modellierung können Zielkonflikte zwischen Ökosystemdienstleistungen, wie sie unter verschiedenen Management- und Klimaszenarien entstehen können, quantitative analysiert werden. Beispielsweise kann die Frage beantwortet werden, wie sich der verstärkte Anbau von Silagemais zur Bioenergieproduktion sowohl auf die Bodenkohlenstoffsequestrierung als auch auf die Grundwasserneubildung auswirken. Zur Beantwortung solcher Fragen verwenden wir das öko-hydrologische Model SWIM. Das Model wird räumlich für Gesamt-Deutschland und unter verschiedenen Kombinationen von Klima- und Managementszenarien angewendet. Die bundesweiten Ergebnisse werden daraufhin untersucht, wie Management und Klimawandel interagieren und welche (biophysikalischen) Ökosystemdienstleistungen profitieren bzw. welche negative Entwicklungen aufzeigen. **(Folie 2)**

Methodik

SWIM steht für „Soil and Water Integrated Model“ (Krysanova et al., 1998), was „Boden und Wasser Integriertes Modell“ bedeutet. Es ist ein sogenanntes „semi-verteiltes“ Modell. Das bedeutet, dass die Modellprozesse auf räumlich homogenen Einheiten ablaufen und nicht komplett 3-dimensional abgebildet werden. Die räumlichen Einheiten sind hydrologisch homogen und haben eine variable Größe von ein bis mehreren Hektar. Die zeitliche Auflösung des Modells ist täglich. **(Folie 3)**

Tägliche Triebkräfte für die öko-hydrologischen Prozesse sind die Temperatur (mittlere, minimale und maximale Tagestemperatur), Niederschlag, Globalstrahlung und die relative Luftfeuchte. Die simulierten hydrologischen Prozesse umfassen den Oberflächen- und Zwischenabfluss, die Bodenwasserversickerung und kapillaren -aufstieg, die Grundwasserneubildung, die Evapotranspiration (Evaporation (Boden) + Transpiration (Pflanzen)). Oberflächen-, Zwischenabfluss, und das Grundwasser wird entlang der Hangneigungen in die Oberflächengewässer geleitet. Der Boden besteht aus einer

variablen Anzahl von Schichten, die jeweils individuelle Charakteristika wie Dichte, Textur, gesättigte Leitfähigkeit etc. besitzen. **(Folie 4)**

Das Modell bildet 15 Landnutzungstypen ab, die Landwirtschaft, Grünland, Wald/Forst, Wasser und Siedlungsflächen umfassen. Diesen Landnutzungstypen werden jeweils verschiedene Pflanzenarten zugewiesen, wobei ca. 76 Standardparameterisierungen dafür vorliegen. „Standardparameterisierung“ bedeutet in diesem Zusammenhang, dass spezifische, räumlich ausgeprägte Pflanzencharakteristika nicht einzeln erfasst sind, sondern ein Parametersatz für das gesamte Untersuchungsgebiet gilt. Der Begriff „Pflanzenarten“ umfasst hier verschiedene landwirtschaftliche Kulturen, Zwischenfrüchte, unterschiedliche Waldtypen (Nadel-, Laub-, Mischwald) und verschiedene Grünlandnutzungen (intensiv, extensiv). Im Pflanzenmodul werden die Entwicklung von ober- und unterirdischer Biomasse sowie des Blattflächenindex durch den Temperatursummen-Ansatz abgebildet. Die täglichen Biomassezuwächse werden über einen pflanzenspezifischen Parameter bestimmt, der die Umwandlung von photosynthetisch aktiver Strahlung in Biomasse beschreibt. Landwirtschaftliche Erträge werden über das Stroh-Korn-Verhältnis (Ernte-Index) berechnet. **(Folie 5)**

Kohlenstoff (C) wird vom Ökosystem durch photosynthetische Assimilation von CO₂ durch die Pflanzen aufgenommen. Durch die Bodenatmung verliert das System C in Form von CO₂. Stickstoff (N) wird von den Pflanzen aus dem Boden aufgenommen. Die Bodenatmung reagiert sensitiv auf Temperatur, Bodenfeuchte und pH. C und N gelangt durch abgestorbene Pflanzenteile wie Blätter, Äste oder Ernterückstände sowie durch abgestorbene Wurzeln in den Boden. Dabei hat jede Fraktion einen individuellen Umsatzkoeffizienten. Im Boden wird das Pflanzenmaterial zu Humus und CO₂ abgebaut. Auch Humus besitzt einen eigenen Umsatzkoeffizienten. Der Abbau des organischen Materials folgt einem Abbauprozess erster Ordnung. Mineralischer N in Form von Ammonium wird nitrifiziert (zu Nitrat umgesetzt), während Nitrat wiederum denitrifiziert wird bzw. ausgewaschen werden kann. **(Folie 6)**

Um Austauschprozesse von C und Wasser zwischen Atmosphäre und Ökosystem zu analysieren, werden sogenannte „eddy-flux-tower“ aufgestellt. Diese messen den netto C-Austausch zwischen Atmosphäre und Ökosystem sowie die aktuelle Verdunstung. Diese Daten liegen dann in hoher zeitlicher Auflösung vor (1/2-stündlich) und eignen sich sehr gut, die Verflechtung des Kohlenstoff- und Wasserhaushaltes aufzuzeigen sowie die entsprechenden Modellprozesse zu evaluieren. Zurzeit stehen solche Daten von einem landwirtschaftlichen Standort in Nord-Thüringen „Gebesee“ zur Verfügung. **(Folie 6)**

In den folgenden Folien wird an einem Beispieldatensatz die Aufbereitung der Modelleingangsdaten demonstriert. Das Ziel ist die Generierung der hydrologisch-homogenen räumlichen Einheiten. Dafür werden die Landnutzungskarte mit einer Bodenkarte und einer Teileinzugsgebietskarte verschnitten. Das Höhenmodell dient zur

Ableitung der Wasserführungsprozesse durch die Landschaft entlang von Höhengradienten. Tägliche Klimadaten stehen durch die Klimastationen des DWD für Deutschland zur Verfügung. **(Folien 7-13)**

Um die Heterogenität der landwirtschaftlichen Fruchtfolgen abzubilden, wurde ein „Fruchtfolgen-Generator“ entwickelt. Um diesen zu erklären, sind zwei Begriffe zu definieren: die Sequenz und die Rotation. Unter Sequenz versteht man hier die zeitliche Abfolge einzelner Fruchtarten, während unter Rotation die räumliche Verteilung der Fruchtarten verstanden wird. Für die räumlichen Simulationen fehlen die feldgenauen Angaben zu Fruchtfolgen. Allerdings liegen statistische Daten zum räumlichen Auftreten der Fruchtarten vor. Diese, z.B. vorhandenen Informationen zur Verteilungen von Fruchtarten auf Landkreisebene, werden mit Hilfe eines Optimierungsalgorithmus und vordefinierten plausiblen Fruchtfolgen, so umgesetzt, dass für jede landwirtschaftlich genutzte Modelleinheit eine Fruchtfolge so gewählt wird, dass über einen längeren Zeitraum gemittelt, die beobachteten Fruchtartenverteilungen wiedergegeben werden. Dafür muss die Annahme gelten, dass, wenn alle Felder einer Fruchtfolge folgen, der zeitliche Anteil einer Fruchtart in der Fruchtfolge dem räumlichen Anteil entspricht. **(Folien 14-15)** Auf der folgenden Folie wird ein vorläufiges Ergebnis des beschriebenen Prozesses für die Altmark über 5 Jahre visualisiert. **(Folie 16)**

Erste Model-Evaluierungs-Ergebnisse

Bevor Klima- und Managementszenarien gerechnet werden können, muss das Modell getestet (evaluiert) werden. Hier werden Beispiele zur Modellevaluierung am Standort, auf Kreisebene und deutschlandweit gezeigt. Am Standort Gebesee werden die täglich simulierten Kohlenstoffflüsse mit gemessenen Kohlenstoffflüssen verglichen. Die netto-Kohlenstoffflüsse können auch als Proxy für die Vegetationsentwicklung gesehen werden. In den Zeiten der netto-Aufnahme von Kohlenstoff durch das Ökosystem wachsen die Pflanzen. Überwiegt die Abgabe von Kohlenstoff an die Atmosphäre, stagniert das Wachstum. In unserem Beispiel gibt das Modell die zeitliche Dynamik des netto-Kohlenstoffaustausches gut wieder. Allerdings gibt es Diskrepanzen in den absoluten Werten, die vom Modell überschätzt werden. Dies wiederum deutet auf eine Überschätzung des Pflanzenwachstums hin. Mögliche Erklärungen sind reale Frostschäden, schlechte Auflaufbedingungen oder Krankheitsbefall, die vom Modell nicht erfasst werden und in der Realität aber das Wachstum negativ beeinflusst. **(Folie 18)**

Die enge Verzahnung zwischen Kohlenstoff- und Wasserflüssen wird anhand der nächsten Folie deutlich, auf der die tägliche aktuelle Evapotranspiration, simuliert und gemessen, dargestellt ist. Man sieht deutlich den Jahresverlauf mit hohen Evapotranspirationsraten im Sommer, wenn die Pflanze wächst (und Kohlenstoff assimiliert), und niedrigen im Winter. Da in diesem Fall die Modellergebnisse gut mit den

gemessenen Daten übereinstimmen, kann man schlussfolgern, dass diese Komponente des Wasserhaushaltes gut simuliert wird. **(Folie 19)**

Ausgiebig haben wir uns mit der Evaluierung der Ertragssimulationen beschäftigt, weil Erträge Schlüsselgröße für den Wasser- und Stoffhaushalt der Landschaft darstellen. Die Größe „Ertrag“ kann stellvertretend für die Biomasseentwicklung gesehen werden. Während die Biomasse die Verbindung zwischen Wasser- und Kohlenstoffhaushalt über die Stomata (Photosynthese: Assimilation von Kohlenstoff, Transpiration: Wasserabgabe) darstellt. Weiterhin dienen die Erträge als Proxy für die Menge an organischem Material, welches nach der Ernte auf dem Feld verbleibt (Kohlenstoff und Stickstoff) und im Boden zu Humus, CO₂ und mineralischen Stickstoffverbindungen umgesetzt wird. Diese Mengen sind ausschlaggebend für den Kohlenstoff- und Stickstoffhaushalt (z.B. Sequestrierung) der Landschaft. **(Folie 20)**

Die eigentliche Evaluierung, also der Vergleich zwischen beobachteten und simulierten Ertragsdaten, findet unter zwei Gesichtspunkten statt. Zum einen betrachten wir die interannuellen Schwankungen der Erträge (pro Landkreis, Bundesland oder Einzugsgebiet), zum anderen wird die räumliche Verteilung (im Mittel und Einzeljahren) innerhalb Deutschlands und eines Jahres bzw. im Mittel untersucht. **Folie 21** stellt beispielhaft die Ergebnisse der interannuellen Schwankungen der Winterweizenerträge von 1991 bis 2006 in zwei Landkreisen der Altmark dar, wobei die schwarze Linie die beobachteten Daten darstellt und die rote Linie die simulierten Werte. In diesen Beispielkreisen bildet das Model die beobachteten Erträge (aus den Ertragsstatistiken der Bundesländer) gut ab. Auf **Folie 22** ist die räumliche Verteilung der Winterweizenerträge für das Jahr 2003 im Elbe-Einzugsgebiet dargestellt. Man sieht deutlich den Gradienten zwischen Schleswig-Holstein, Brandenburg und der Magdeburger Börde, der auch vom Model gut wiedergegeben wird. Gesamtdeutsche Ergebnisse werden in naher Zukunft zur Verfügung stehen, wobei hier auch nochmal auf eine gewisse Vorläufigkeit der Ergebnisse hingewiesen sei. Da das Model einem ständigen Verbesserungsprozess unterliegt, wird sich das auch immer auf die gerade aktuellen Ergebnisse beziehen.

Szenario-Beispiel

Um anhand eines Beispiels die anfangs formulierten Fragestellungen zu bearbeiten, haben wir ein Szenario (2011-2060) gerechnet, in dem wir flächendeckend Silagemais anbauen. Diese Szenarioannahme soll nur als Extrembeispiel die Auswirkungen möglicher Ausweitung der Biomasseproduktion für Bioenergieproduktion darstellen. Das gewählte Klimaszenario bildet einen Temperaturtrend von +2°C in 2060 gegenüber ca. 2000. Es wurde mit den regionalen statistischen Klimamodel STAR (Orlowsky et al., 2008) erzeugt. Beispielhaft werden die Ergebnisse für die Grundwasserneubildungsraten in der Altmark auf Folie 24 dargestellt. Hier sei darauf hingewiesen, dass im Laufe des

Projektes noch weitere Klimaszenarien simuliert werden, um die Unsicherheiten in den möglichen Entwicklungen abzubilden.

Auf **Folie 24** wird als Referenzkarte (links oben) die Veränderung der Grundwasserneubildung zwischen der Referenzperiode 1960-1990 und der Zukunftsperiode 2025-2030 unter kontinuierlicher (aktueller) Fruchtfolge gezeigt. Man sieht in weiten Bereichen negative Trends, welche in diesem Fall ausschließlich auf eine Veränderung des Klimas zurückzuführen wären. Dieser Trend verstärkt sich allerdings, wenn ab 2013 flächendeckend Silagemais angebaut wird (Karte rechts unten).

Die Tabelle auf **Folie 25** stellt die Auswirkungen des Klimaszenarios in 2025-2030 gegenüber 1960-1990 auf die Erträge ausgewählter Fruchtarten in der Altmark dar. Diese Ergebnisse sind sehr vorläufig und bedürfen weiterer Prüfung und Überarbeitung.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass das öko-hydrologische Model SWIM geeignet ist, Ökosystemdienstleistungen abzubilden und die Auswirkungen von Management- sowie Klimaszenarien zu integrieren und plausible Ergebnisse zu produzieren. Allerdings wurde hier nur der Zwischenstand des laufenden Modellierungsprozesses vorgestellt und die Ergebnisse werden zukünftig weiter überarbeitet. Grundsätzlich kann man aber sagen, dass sich der mögliche Klimawandel negativ sowohl auf die Grundwasserneubildung als auch auf die landwirtschaftlichen Erträge auswirkt. Im Laufe des Projektes werden die Analysen auf die Stoffflusskomponenten Kohlenstoff und Stickstoff ausgeweitet. (**Folie 26**)

Kontakt: Pia Gottschalk (Ph.D.) gottschalk@pik.de

Referenzen

Krysanova, V., Müller-Wohlfeil, D.-I., Becker, A., 1998. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. *Ecological Modelling* 106, 261-289.

Orlowsky, B., Gerstengarbe, F.-W., Werner, P.C., 2008, A resampling scheme for regional climate simulations and its performance compared to a dynamical RCM. *Theor. Appl. Climatol.* 92, 3-4, 209-223, DOI: 10.100/s00704-007-0352-y