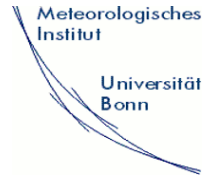




Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt e.V.  
Projekträger im DLR



# Verbundprojekt: Entwicklung eines Modellreduktionsverfahrens (MCRA, Model Complexity Reduction Approach)

## Schlussbericht

*Stefan Kollet, Heye Bogena, Victor Venema, Clemens Simmer, Zhufeng Fang  
Alessandra Trevisan, Ehsan Khorsandi*

**Meteorologisches Institut**

**Universität Bonn**

**Agrosphere Institute (IBG-3)**

**Forschungszentrum Jülich GmbH**



Dieses Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung Forschung unter der Projektnummer 01LP1167A und 01LP1167B gefördert. Die Dauer des Projekts mit dem Titel "Entwicklung eines Modellreduktionsverfahrens (MCRA, Model Complexity Reduction Approach), Teilprojekt 1" betrug 3,5 Jahre.



---

I.	Kurzdarstellung der Rahmenbedingungen.....	7
I.1.	Aufgabenstellung .....	7
I.2.	Voraussetzungen .....	7
I.3.	Planung und Ablauf .....	8
I.4.	Wissenschaftlicher und technischer Stand .....	9
II.	Eingehende Darstellung .....	10
II.1.	Einführung.....	10
II.2.	Technische Entwicklungen und Modellgebiete .....	10
II.3.	Das Wüstebach Observatorium.....	14
II.4.	Ergebnisse .....	15
II.5.	Schlussfolgerung und Ausblick.....	26
III.	Erfolgskontrollbericht .....	29
III.1.	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen .....	29
III.2.	Wissenschaftlich-technische Ergebnisse .....	29
III.3.	Fortschreibung des Verwertungsplanes.....	30
III.4.	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben.....	30
III.5.	Präsentationsmöglichkeiten für Nutzer.....	30
III.6.	Einhaltung der Zeit- und Kostenplanung .....	30
IV.	Berichtsblatt.....	30
V.	Literatur .....	30



---

# I. Kurzdarstellung der Rahmenbedingungen

## ***I.1. Aufgabenstellung***

Das Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines Modellreduktionsverfahrens, das es erlaubt den Einfluss der Hydrodynamik und des Energietransports des tieferen Untergrundes in MiKlips Klimasimulationen im dekadischen Zeitmaßstab zu berücksichtigen. Vorarbeiten haben gezeigt, dass beide Prozesse die Massen- und Energiebilanz der Landoberfläche und der Atmosphäre über Zeiträume von 10 Jahren aufgrund des starken Gedächtniseffekts des Untergrundes beeinflussen. In derzeitigen Klimamodellen sind diese Prozesse vernachlässigt, was zu Fehlern in den Vorhersagen führt. Da es berechnungstechnisch nicht möglich ist, diese Prozesse explizit in Klimamodelle zu integrieren, wird ein Verfahren entwickelt, das es erlaubt die Modellkomplexität in Klimamodellen zu reduzieren und den Einfluss beider Prozesse über eine online Korrektur während der durchgeführten Simulationen zu berücksichtigen.

In dem Verfahren werden hoch aufgelöste, physikalisch basierte Modelle (*Landcplx*) mit vollständiger Hydrodynamik und Energietransport des Untergrundes über ausgewählten Modellgebieten gerechnet. Die Ergebnisse der Simulationen mit *Landcplx* werden benutzt, um Korrekturfunktionen zu entwickeln, die in einem *Updater* implementiert werden, der online mit dem parametrisierten Klimamodell (*Landparm*) integriert ist und die Prognose laufend korrigiert. Die Korrekturfunktionen basieren dabei z.B. auf Korrelationen der Grundwasserdynamik mit der Topographie und Bodenparametern.

Die konkrete Aufgabenstellung des Teilprojektes (Teilprojekt 1) an der Universität Bonn ist die Entwicklung eines Oberflächenmodell, das in Klimamodellen angewendet werden kann basierend auf dem Komplexitätsreduzierungsansatz (*Complexity Reduction Approach*). Das Modellsystem soll es ermöglichen, durch verbesserte hydrologische Parametrisierung physikalisch realistische Modellläufe der Qualität von *Landcplx* durchzuführen, die jedoch mit wesentlich geringerem Rechenaufwand verbunden sind.

Die konkrete Aufgabenstellung des Jülicher Teilprojekts (Teilprojekt 2) beinhaltet die Validierung des prozess-basierten Modells (*Landcplx*) und es zu entwickelnden Modellsystems (*Landparm*) wird mit historischen Daten und räumlich und zeitlich hochauflösenden Zeitreihen aus ausgewählten Observatorien. Diese Observatorien sind Wassereinzugsgebiete, im Rahmen der HGF-Initiative TERENO mit umfangreichen Messinstrumentarien ausgestattet wurden (z.B. Abflussmessstationen, Bodenfeuchtemessnetzwerke, Eddy-Kovarianz-Messsystem zu Messung der Verdunstungsflüsse) und bilden daher eine hervorragende Grundlage für die Validierung von Wasserhaushalts- und Wassertransportmodellen.

## ***I.2. Voraussetzungen***

Das Teilprojekt 1 (Uni Bonn) begann ca. 0.5 bis 1 Jahr nach dem Start von MiKlip. Im Rahmen dieses Teilprojekts 1 (Uni Bonn) sollte das Modellsystem entwickelt werden, für welches in Teilprojekt 2 die Modellvalidierungen durchgeführt werden sollte. Eine Voraussetzung für Modellentwicklung war die Bereitstellung von Computerressourcen und technischer Unterstützung, die von der Uni Bonn und dem Kompetenzzentrum für

Wissenschaftliches Hochleistungsrechnen in Terrestrischen Systemen des Geoverbund ABC/J ([www.hpsc-tersys.de](http://www.hpsc-tersys.de)) bereitgestellt wurde. Eine weitere Voraussetzung für die Entwicklung war das Boden-Vegetation-Atmosphären Modellsystem TerrSysMP, das im Rahmen des Transregio 32 entwickelt worden ist.

Das Teilprojekt 2 (FZ Jülich) begann ca. 1 Jahr nach dem Start von MiKlip. Im Rahmen dieses Teilprojekts 1 (Uni Bonn) sollte das Modellsystem entwickelt werden, für welches in diesem Teilprojekt die Modellvalidierungen durchgeführt werden sollte. Eine Voraussetzung für Modellvalidierung war die Bereitstellung der umfangreichen TERENO-Daten aus ausgewählten Einzugsgebieten des TERENO Observatorium Eifel-Niederrheinische Bucht. Alle verwendeten Daten wurden über das Datenportal TEODOOR ([www.tereno.net](http://www.tereno.net)) bereitgestellt.

### ***1.3. Planung und Ablauf***

Der geplante und auch durchgeführte Ablauf des Projektes ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1. Arbeitsschritte für das Verbundprojekt MCRA.

<b>Zeitplan: Landcplx</b>	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr	4. Jahr
Implementierung von CLM3.5 in ParFlow einschl. 3D Grundwasserdynamik	█	█		
3D Energietransport im Untergrund einschl. Konduktion und Konvektion		█	█	
Variables Gitter		█	█	
Aufbau eines Modellgebietes und MCRA-Simulationen auf der dekadischen Zeitskala		█	█	█
<b>Zeitplan: Landparm</b>				
Überarbeitung der hydrologischen Parametrisierung	█	█		
Implementierung des Regionalmodells		█	█	
Downscaling des atmosphärischen Antriebs für Landcplx		█	█	
MCRA Simulationen auf der dekadischen Zeitskala		█	█	█
<b>Zeitplan: Updater</b>				
Entwicklung des adaptiven Schemas		█	█	
Optimierung der Similaritätsindexe; Validierung/Vergleich mit Modelloutput		█	█	
<b>Zeitplan: Validation</b>				
Entwicklung der Validierungsmethodik	█	█	█	
Bereitstellung und Aufarbeitung der Validierungsdaten		█	█	
Validierung des Modellsystems			█	█



---

## ***1.4. Wissenschaftlicher und technischer Stand***

Genauere Wetter und Klimamodelle die in der Lage sind den Transport von Wasser, Energie und CO<sub>2</sub> vorherzusagen sind notwendig um das Management der natürlichen Ressourcen zu verbessern. Der Transport ist durch viele nicht-linear Interaktionen und komplexe Prozesse gekennzeichnet, die über die Kompartimente des terrestrischen Systems (Untergrund, Landoberfläche, Atmosphäre) hinweg auf verschiedenen Raum- und Zeitskalen ablaufen [Prein et al., 2015]. In den üblicherweise verwendeten Klimamodellen wird die Grundwasserdynamik im Untergrund generell vernachlässigt, da sie schwierig zu berechnen ist und stark durch die Heterogenität des Untergrundes beeinflusst wird, über die nur unzureichende Daten vorliegen [Krakauer et al., 2014]. Jedoch wurde in zahlreichen Modellstudien und Beobachtungen gezeigt, dass die Dynamik eines flachen, freien Grundwasserleiters erheblichen Einfluss auf die Wasser- und Energieflüsse an der Landoberfläche und auch in der Atmosphäre haben kann [z.B. Anyah et al., 2008; Rahman et al., 2014; Szilagyi et al., 2013]. Des Weiteren wird der Energietransport in den Modellen nur sehr vereinfacht abgebildet und es werden ungenaue Randbedingungen verwendet [z.B. Kollet et al., 2009]. Aufgrund der benötigten Computerressourcen ist es nicht möglich alle genannten Prozesse in Klimasimulationen zu berücksichtigen. Deshalb muss ein Weg gefunden werden, die Transportprozesse in Klimamodellen zu parametrisieren.

Für die Verbesserung und Validierung solcher Modelle ist ein verbessertes Verständnis der Prozesse und Abhängigkeiten innerhalb und zwischen den Umweltkompartimenten Boden, Vegetation und Atmosphäre notwendig. Bodenfeuchte spielt im Boden-Vegetation-Atmosphäre Kontinuum eine wichtige Rolle beim Austausch von Wasser und Energie. Schnelle laterale Wasserflüsse (Interflow) ermöglichen eine schnelle Umverteilung von Bodenwasser nach Starkregenereignissen, z.B. Hopp et al. (2011), Zhang et al. (2011). Bis heute ist der Interflow unzureichend untersucht worden, z.B. Weiler und McDonnell (2007), Bachmair und Weiler (2012), obwohl dieser Prozess sehr wichtig zum Verständnis der zeitlich-räumlichen Variabilität von biogeochemischen Flüssen und Treibhausgasemissionen ist, z.B. Groffman et al. (2009), Tang et al. (2014). Bisherige Modellstudien haben gezeigt, dass der Prozess des Interflows durch bestimmte Gebietseigenschaften bestimmt wird, z.B. Bodenmächtigkeit und Konnektivität von Fließwegen, z.B. Tromp-van Meerveld und McDonnell (2006), Weiler und McDonnell (2007), Bachmair und Weiler (2012).

### **Zusammenarbeit mit Dritten**

Prof. Reed Maxwell

Department of Geology and Geological Engineering

Colorado School of Mines, USA

Kompetenzzentrum für Wissenschaftliches Hochleistungsrechnen in Terrestrischen Systemen des Geoverbundes ABC/J ([www.hpssc-terrsys.de](http://www.hpssc-terrsys.de))

Dr. Mauro Sulis

Meteorologisches Institute

Universität Bonn

## II. Eingehende Darstellung

### II.1. Einführung

Das von der Uni Bonn durchgeführte Teilprojekt 1 des Verbundprojekts „Entwicklung eines Modellreduktionsverfahrens (MCRA, Model Complexity Reduction Approach)“ hatte zur Aufgabe, das Modellsystem zu entwickeln. Technische Entwicklungen umfassten die Kopplung von ParFlow mit CLM3.5, die Implementierung von Energietransport im Untergrund, die Weiterentwicklung eines vertikalen adaptiven Gitters basierend auf [Maxwell, 2013] und ein Regressionsverfahren für den Updater. Es wurden verschiedene Modellgebiete auf der regionalen bis kontinentalen Skala aufgebaut mit einem Fokus auf das Rur-Einzugsgebiet, das gleichzeitig den Schwerpunkt des SFB/TR32 and der Uni Bonn und TERENO darstellt. Die Modelle wurden zu umfangreichen Simulationsstudien über verschiedenen Zeitskalen verwendet ( $10^0$  bis  $10^1$  Jahre). Im Weiteren werden die Ergebnisse von Teilprojekt 1 näher erläutert.

Das vom Forschungszentrum Jülich durchgeführte Teilprojekt 2 des Verbundprojekts „Entwicklung eines Modellreduktionsverfahrens (MCRA, Model Complexity Reduction Approach)“ hatte zur Aufgabe, das existierende Prozessmodell Parflow-CLM (Landcplx) und das zu entwickelnde Modellsystem (Landparm) mittels umfangreicher Datensätze der TERENO Observatorien in Deutschland zu validieren. Aufgrund der überragenden Datengrundlage des TERENO Observatoriums Wüstebach konzentrieren sich die Aktivitäten dieses Teilprojekts auf dieses Gebiet. Im Folgenden werden zunächst das Observatorium Wüstebach und die verwendeten Messdaten vorgestellt. Im Weiteren werden die Ergebnisse der Modellvalidierung näher erläutert.

### II.2. Technische Entwicklungen und Modellgebiete

In einem ersten Schritt wurde CLM3.5. mit ParFlow in Zusammenarbeit mit Dr. Mauro Sulis (SFB/TR32) gekoppelt. Dabei wurde der Koppler OASIS3 verwendet, der eine externe Kopplung erlaubt und somit minimal-invasiv und modular ist. Das heißt, dass neue Versionen beider Modelle und andere Modellkomponenten in einer „steckerfertigen“ Weise eingebaut werden können. In OASIS3 wurde auch direkt der atmosphärische Downscaling-Algorithmus von Schomburg *et al.* [2010] implementiert, der es erlaubt on-line (also während der Simulation) groben atmosphärischen Antrieb auf das feine räumliche Gitter des gekoppelten Landoberflächenmodelle zu bringen. Auch können beide Modelle allein-simulierend verwendet werden. In diesem Zusammenhang sollte erwähnt werden, dass ParFlow-CLM3.5 Teil der Terrestrial Systems Modeling Platform (TerrSysMP) ist, die auch das Atmosphärenmodell COSMO des Deutschen Wetterdienstes beinhaltet und damit die technische Implementierung zu sehr konstruktiven Synergien geführt hat [Shrestha *et al.*, 2014]. TerrSysMP stellt hier *Landcplx* dar.

In einer weiteren Entwicklungsstufe wurde ParFlow mit 3D Energietransport einschließlich Konduktion und Konvektion erweitert basierend auf den Arbeiten von *Kollet et al.* [2009]. Das erweiterte Modell wird im Folgenden ParFlowE genannt.

Dieser Ansatz bietet sich an, da die Wärmetransportgleichung

$$\theta\phi\varphi_w C \frac{\partial T}{\partial t} + (1 - \phi)C_r \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ K_{ct} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + qC \frac{\partial T}{\partial x} \quad (1)$$

strukturell sehr ähnlich ist wie die Richards-Gleichung (Fluss-Gleichung):

$$S \frac{\partial p}{\partial t} + \phi \frac{\delta\theta}{\delta t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_{zz} k_r(p) \frac{\partial(p-z)}{\partial z} \right] + q_w \quad (2)$$

und dadurch die in ParFlow bereits existierende Löser-Schnittstelle zu Kinsol (SUNDIALS) genutzt werden konnten.

Für diese erste Zwischenversion wurden einige Einschränkungen in Gleichung 1 gemacht, die da sind: konstante Wärmekapazität für die Gesteinsmatrix, konstante Wärmekapazität der flüssigen Phase, Vernachlässigung von Quellen/Senken, und konstante Wasserdichte. Die Entwicklung wurde aufgeteilt in folgende Teilaufgaben mit steigender Komplexität, jeweils begleitet durch Tests und Evaluierung.

In einer ersten Machbarkeitsstudie wurden die rein technische Durchführbarkeit gezeigt. Dafür musste die existierende Infrastruktur in ParFlow erweitert werden, um Parameter einzulesen, Ergebnisse auszugeben und das Löser-Interface so anzupassen, dass zwei Gleichungen im selben Lösungsraum gelöst werden können. Als erste Annäherung zur späteren Umsetzung wurde dafür die Fluss-Gleichung dupliziert und redundant im gleichen Lösungsraum gelöst. Das Ergebnis durfte dadurch nicht beeinflusst werden. Anschließend wurde die Wärmetransportgleichung in Anlehnung an die Fluss-Gleichung implementiert und in das dafür zuvor geschaffene Löser-Interface eingegliedert. Zu diesem Zeitpunkt wurden bereits beide Gleichungen im selben Lösungsraum gelöst, jedoch ohne gegenseitige Rückkopplung (unabhängig voneinander). Daher konnten nach diesem Schritt bereits beide Gleichungen individuell vorläufig validiert werden. Des Weiteren wurde in diesem Schritt auch die Jacobian Matrix für die Wärmetransportgleichung implementiert. Für die Einbeziehung der „convection“ (Flussgeschwindigkeitsterm) wurden zunächst konstante Geschwindigkeitswerte in die Wärmetransportgleichung eingesetzt und validiert. Anschließend wurden die Werte aus der Fluss-Gleichung bezogen. Es findet also eine einseitige Kopplung zwischen Fluss- und Wärmetransportgleichung statt. Diese Ergebnisse wurden erneut mit unterschiedlichen Randbedingungen getestet und validiert. Der Code ist unter <https://github.com/mwtoews/ParFlow> herunterladbar.

Die Implementierung eines variablen numerischen Gitters wurde in der ParFlow-Entwickler-Domäne geleistet *Maxwell* [2013]. Hierbei handelt es sich um ein variables, vertikales Gitter, das es nun erlaubt sehr hochauflösende räumliche Diskretisierung direkt an der modellierten Landoberfläche vorzunehmen. Dies verbessert die Simulation der Energie- und Massenflüsse. Im Zuge dieser Entwicklung wurde auch ein Terrain-Following-Grid eingebaut, wodurch der Untergrund mit einer viel geringeren Anzahl vertikaler Gitterpunkte repräsentiert werden kann. In einem weiteren Schritt wurde das variable Gitter auf die Randbedingungen und Anfangsbedingungen übertragen. Damit ist es nun möglich ohne Pre-Prozessierung basierend auf der variablen Gitterstruktur zeitabhängig Randbedingungen und

Anfangsbedingungen in der Eingabedatenbank zu verwenden. Diese verbesserte Recheneffizienz erlaubt großskalige, lateral hochauflösende Simulationen.

Die hydraulische Parametrisierung in dem in COSMO verwendeten Landoberflächenmodell TerraML wurde von David Wisniowski im Rahmen einer Diplomarbeit (Wisniowski, 2011) durchgeführt. Es wurde der Schluss gezogen, dass die Parametrisierung ausreichende Möglichkeiten bietet über die Implementierung des Updaters die Modellzustände zu korrigieren. So wird zum Beispiel auch eine sehr vereinfacht Wasserspiegel-Parametrisierung in TerraML verwendet.

In Teilprojekt 1 wurden drei Modellgebiete verwendet von denen zwei neu aufgesetzt wurden. Dabei handelt es sich um das Rur-Einzugsgebiet (Abb. 1), das Gebiet über die europäische CORDEX Domäne (Abb. 2), die vom Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX) definiert ist und ein Modellgebiet über Afrika (Abb. 3). Das NRW-Modell wurde hauptsächlich verwendet, um den *Updater* zu entwickeln; das EU-CORDEX-Modell wurde dazu verwendet, ein *Landcplx* auf kontinentaler Skala zu testen, das später zur Validierung verwendet werden kann; und das Afrika-Modell wurde verwendet, um den Einfluss der Parametrisierung des Energietransports des Untergrundes auf die Prozesse der Landoberfläche zu untersuchen.

Bei der Konstruktion des NRW-Modells wurde vom ursprünglichen Design des Arbeitsplanes abgewichen: zu Beginn wurde das komplexe *Landcplx*-Modell und das parametrisierte *Landparm*-Modell über das gleiche Gebiet angewendet, um gute Kovarianzen zu erhalten, die schon im ersten Ansatz zu einem erfolgreichen *Updater* führten.

Allen Modellen gemeinsam ist die Art der benötigten Eingabedaten, die z.B. Landnutzung, Bodentypen, und atmosphärischen Antrieb (Lufttemperatur, Niederschlag, solare Einstrahlung etc.) umfassen.

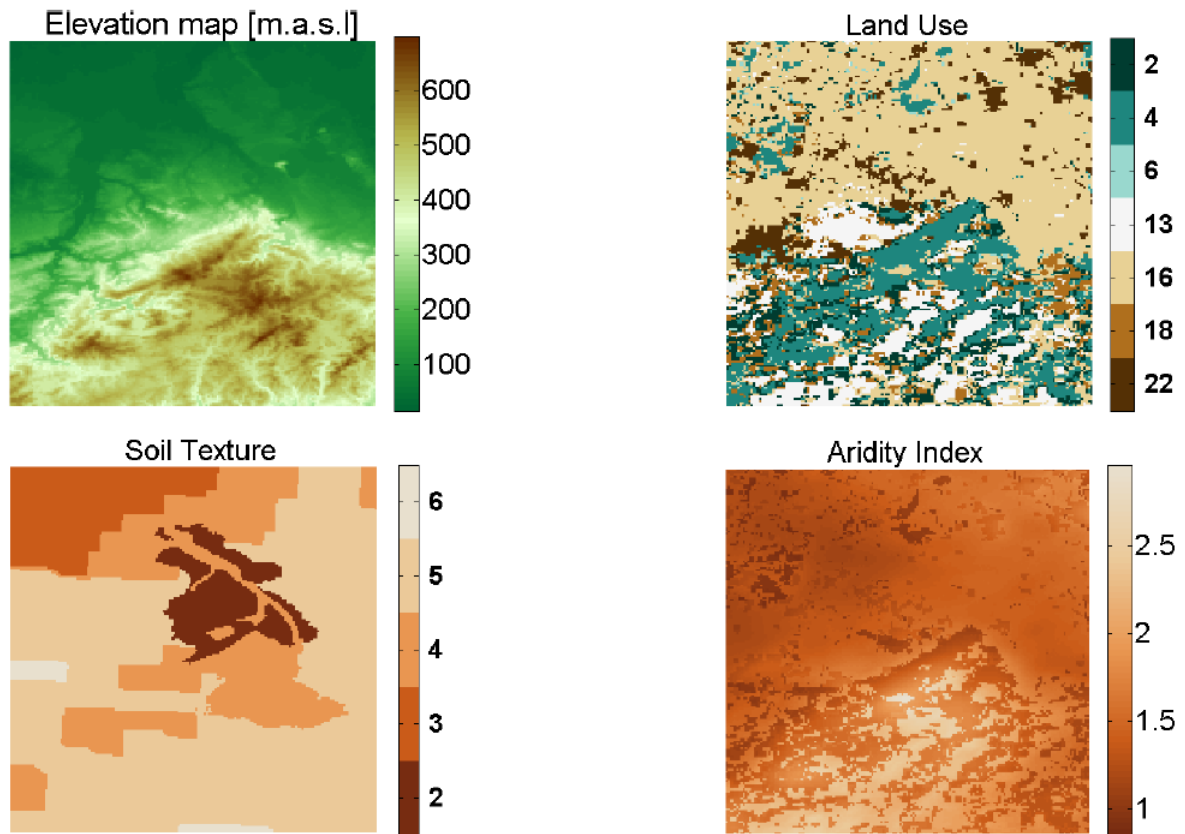


Abbildung 1. Beispiele des Eingabedatensatzes für das Rur-Modell.

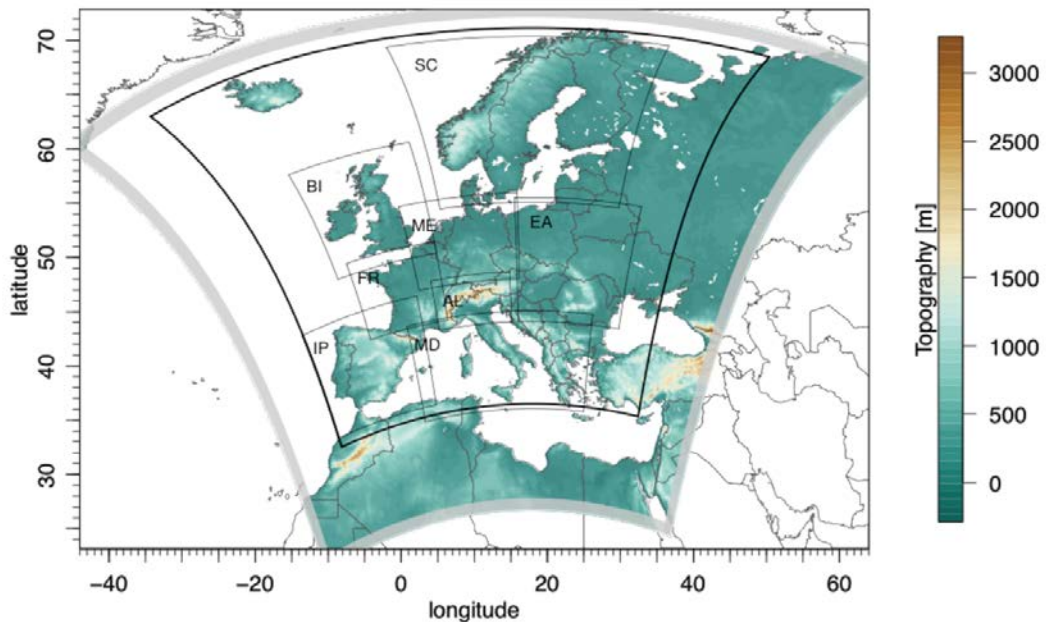


Abbildung 2. Topographie des EU-CORDEX-Modells mit den verschiedenen PRUDENCE-Regionen.

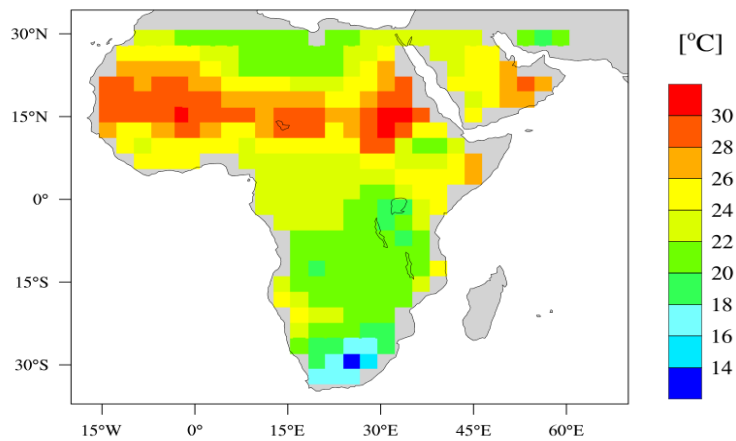


Abbildung 3. Karte der mittleren Lufttemperatur (1951-1960) der verwendeten atmosphärischen Zeitreihe für das Afrika-Modell.

### ***II.3. Das Wüstebach Observatorium***

Das Wüstebach Observatorium ist ein 38 ha großes Teileinzugsgebiet der Rur (Abbildung 4), das hauptsächlich mit Fichte (*picea abies*) bewachsen ist und ein typisches Fichtenwald-Ökosystem der Nordeifel repräsentiert. Es befindet sich im Nationalpark Eifel. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge beträgt 1220 mm. Das Grundgestein besteht aus devonischem Schiefer mit vereinzelt Sandsteineinschlüssen. Die Böden haben sich auf periglazialen Solifluktuationsdecken entwickelt, mit einer durchschnittlichen Mächtigkeit von etwa 1-2 m. An den Hängen liegen vor allem Braunerden vor, während in der Nähe der Flüsse überwiegend Gleyböden und Niedermoore entwickelt sind. Die Bodentextur ist lehmiger Schluff.

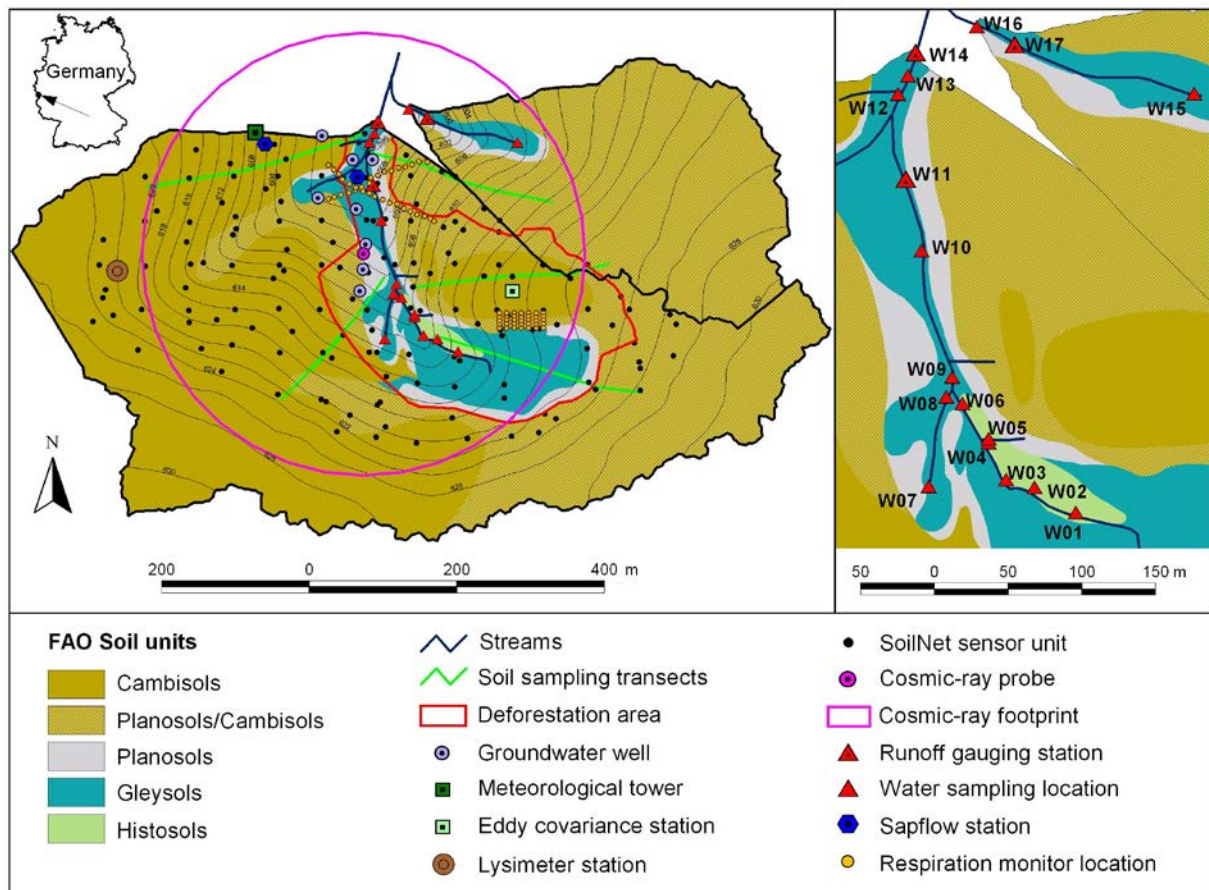


Abbildung 4. Instrumentierung des TERENO Observatoriums Wüstebach

Um den Wasserhaushalt des Waldsystems detailliert untersuchen zu können, wurde der Standort im Rahmen der TERENO Initiative (Bogena et al., 2016) mit einer Vielzahl von Sensoren zur Erfassung von meteorologischen, bodenkundlichen und hydrologischen Messdaten ausgestattet (Bogena et al., 2015). Auf einem Messturm werden in 38 m Höhe Verdunstung und CO<sub>2</sub>-Fluss nach der Eddy-Kovarianz-Methode bestimmt. Neben weiteren vereinzelt Messeinrichtungen (mehrere Abflussmesstationen, Grundwasserpegel etc.) wurde ein Sensornetzwerk (SoilNet) mit ca. 900 in-situ Messsonden zur Bestimmung der Bodenfeuchte und -temperatur eingerichtet. Das Sensornetzwerk besteht aus 150 Messplätzen an welchem die Bodenfeuchte in drei Tiefen gemessen wird (5, 20 und 50 cm).

## II.4. Ergebnisse

### Komplexreduktion und Updater

Als rechnerisch leichte Parametrisierung (*Landparm*) wurde am Ende TerrSysMP mit gesättigtem Boden benutzt. Dadurch braucht man die drei-dimensionalen Hydrologie nicht mehr zu rechnen, weil andererseits viele komplizierte nicht-lineare Austauschprozesse an der Oberfläche von *Landparm* berücksichtigt werden. In diese Kombination muss der statistische *Updater* die Differenz im Bodenwasserpegel und Bodenfeuchte ausgleichen.

Die Differenz zwischen den latenten Wärmeflüssen von *Landcplx* und *Landparm* wird für den Monat Juli beispielhaft in Abbildung 5 dargestellt. Der Einfluss der Orographie ist klar erkennbar.

$\Delta$ Latent Heat flux, [ $\text{W}/\text{m}^2$ ], July

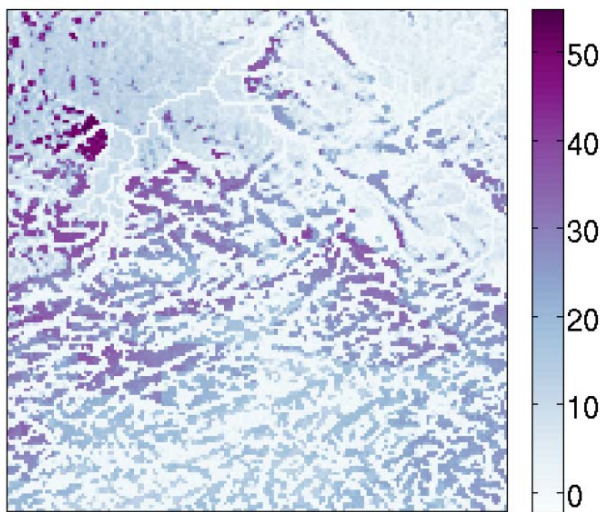


Abbildung 5. Differenz zwischen den latenten Wärme Flüssen der zwei Modelle für den Monat Juli.

Ein viel benutzter Prädiktor für den Einfluss der Orographie auf den Bodenwasserpegel in einem Einzugsgebiet ist der topographische Index (TI). Der ist definiert als

$$TI = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan\beta}\right) \quad (3)$$

$\alpha$  ist das spezifische Einzugsgebiet und  $\beta$  die lokale Neigung eines individuellen Pixels. Ein Pixel mit großem Einzugsgebiet und niedrige Neigung wird im Allgemeinen nasser sein. Abbildung 6 zeigt exemplarische, dass der TI ein Teil den Tagesgang der Differenz zwischen den latenten Wärme Flüssen von *Landcplx* und *Landparm* erklären kann ( $\Delta$ LH).

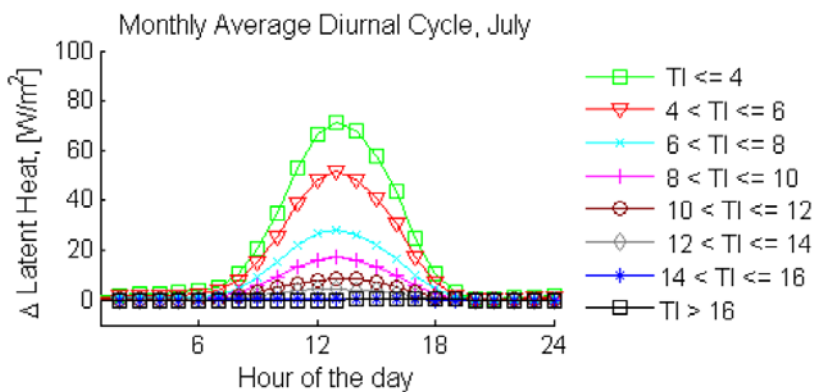


Abbildung 6. Tagesgang der Differenz zwischen den latenten Wärme Flüssen ( $\Delta$ LH) für verschiedene TI Klassen.

Eine alternative Prädiktor, die Depth-to-Water (DTW), ist der Unterschied zwischen der Höhe eines Pixels und der Höhe des nächst gelegenen Vorfluters. Welche Pixel als Fluss definiert werden ist wichtig für diesem Prädiktor. Richtig gewählt kann auch die DTW ein Teil des Tagesganges des Inkrementes  $\Delta$ LH erklären (Abbildung 7).



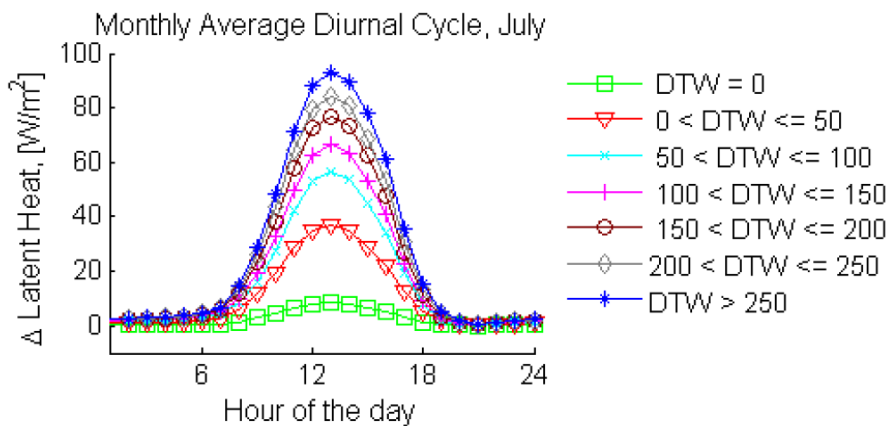


Abbildung 7. Tagesgang der Differenz zwischen den latenten Wärme Flüssen ( $\Delta LH$ ) für verschiedene DTW Klassen.

Auch Landnutzung und Bodentype Klassen sind wichtige Prädiktoren für die  $\Delta LH$ . Für jede Klasse wurde ein statistisches Modell mit TI oder DTW als Prädiktor erstellt wobei der Tagesgang mit einer Gauß-Funktion modelliert wurde.

Das statistische Korrekturmodell (*Updater*) wurde in einer Kreuzvalidierung überprüft. Dafür wurde ein räumliches Schachbrettmuster benutzt. Exemplarisch werden in Abbildung 8 die Ergebnisse für DTW als Hauptprädiktor dargestellt. Die Ergebnisse mit TI als Prädiktor an Stelle von DTW sind ähnlich.

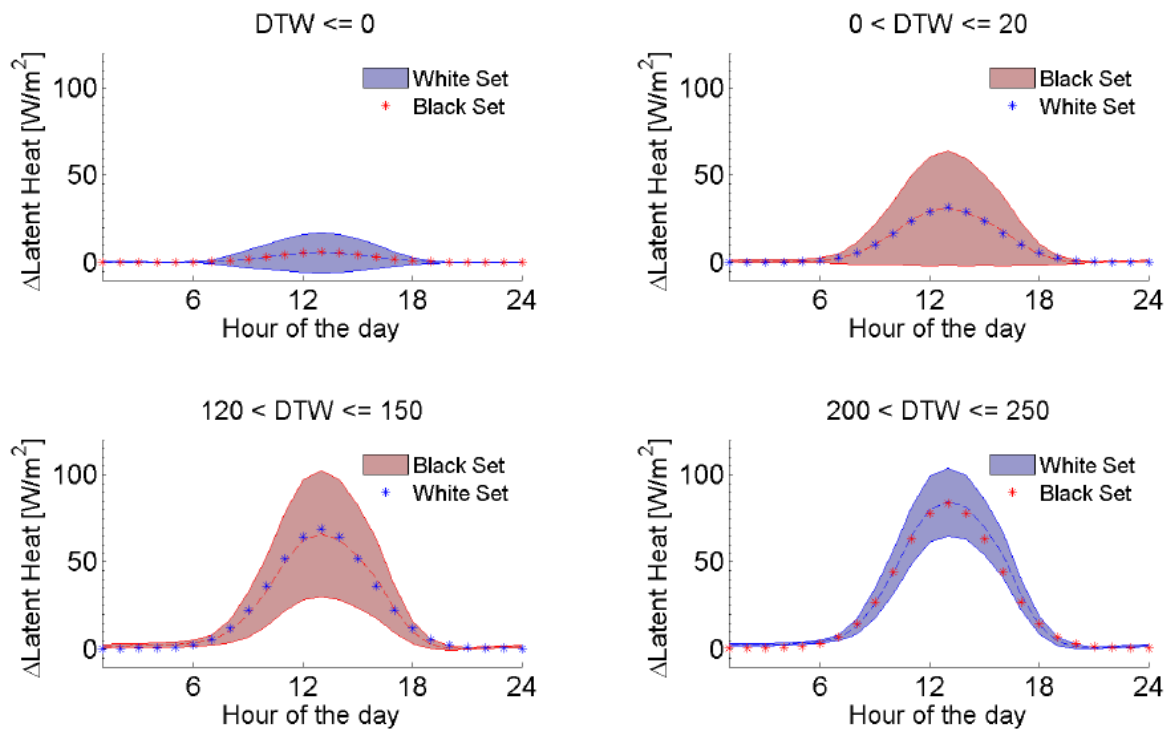


Abbildung 8. Die Tagesgänge der  $\Delta LH$  für vier DTW Bereiche. Die gestrichelte Linie ist das statistische Modell, die Pluszeichen der Mittelwert und der Farbbereich die Streuung

(1 Sigma). *Black Set* und *White Set* stehen jeweils für den Kalibrierungs- und Validierungsdatensatz.

Die Tagesgänge werden im Mittel gut reproduziert und der asymmetrische Fehlerbereich übers Gesamtgebiet ist vernachlässigbar. Aber Abbildung 9 zeigt, dass lokal noch klare asymmetrische Fehlerbereiche erkennbar sind. Es ist leider nicht gelungen diese weiter zu reduzieren. Die lokale Hydrologie ist wahrscheinlich zu komplex und nicht-linear für ein statistisches Modell. Für die Klimamodellierung sind aber die groß-skaligen asymmetrische Fehlerbereiche am wichtigsten, die in dem vorgeschlagen Ansatz gegen Null gehen.

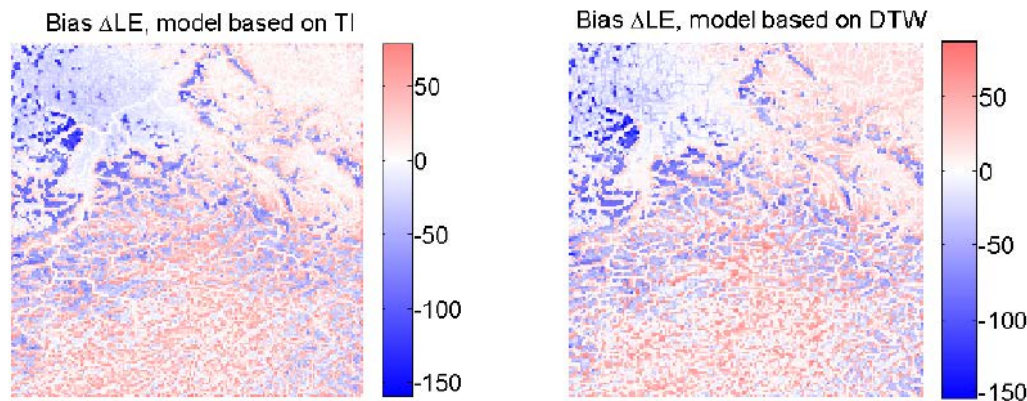


Abbildung 9. Karte der asymmetrischen Fehlerbereiche in  $\Delta LH$  für TI (links) und DTW (rechts) als Hauptprädiktor.

#### *Kontinentale Simulationen, Einfluss der Energietransportes im Untergrund und der Vegetation*

Mit dem EU-CORDEX-Modell wurden umfangreiche hydrologische Simulationen durchgeführt, um das Modell in ein hydrologisches, dynamisches Gleichgewicht zu bringen. Die Begründung hierfür ist folgende: Da die Anfangswerte des z.B. Bodenwassergehaltes generell unbekannt sind, muss das Modell räumlich mit willkürlichen Werten initialisiert werden, die physikalisch inkonsistent sind. Im Folgenden werden Langzeitsimulationen angetrieben von realistischen atmosphärischen Zeitreihen durchgeführt, mit deren Hilfe sich das Modell langsam in einen physikalischen Zustand einschwingt. Dies kann mehrere Jahre Simulationszeit dauern. Das Resultat ist ein Modellzustand in dem alle Wasserflüsse und –zustände einschließlich aller Energievariablen mit dem atmosphärischen Antrieb konsistent sind und damit ein realistisches Bild des terrestrischen Wasser- und Energiekreislaufs auf kontinentaler Skala widerspiegeln. Die Simulationsergebnisse können genutzt werden, um z.B. den explizit simulierten Grundwasserspiegel Abbildung 10 in einem *Landparm*-Modell zu parametrisieren.

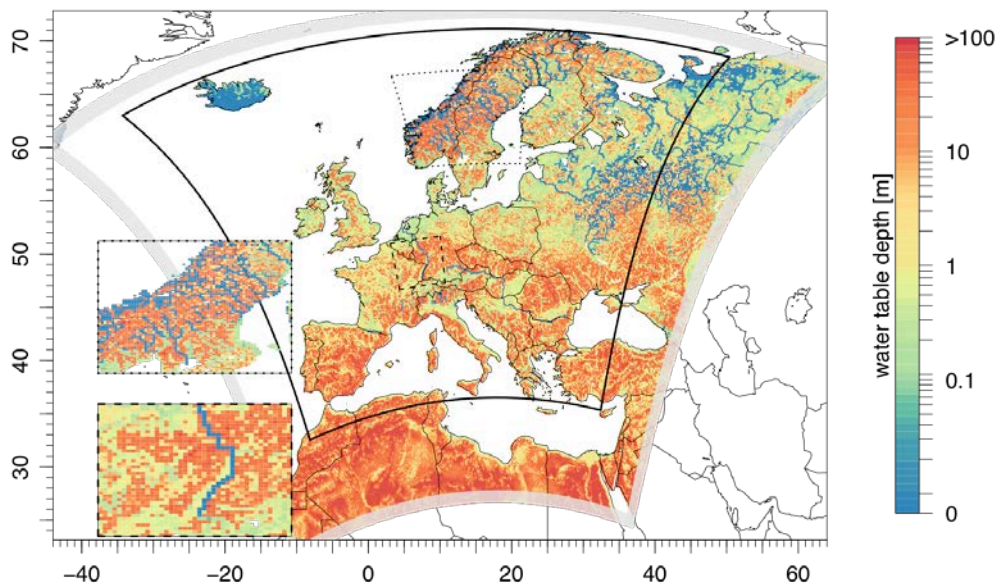


Abbildung 10. Karte des simulierten Grundwasserspiegels über dem EU-CORDEX-Modell.

Um den Einfluss der unteren Randbedingung für den Energietransport im Untergrund zu quantifizieren wurde ParFlowE in numerischen Experimenten eingesetzt und der Abstand des unteren Randes der Bodensäule sukzessive vergrößert. Dadurch ergab sich ein Untergrund der mehr Energie speichern konnte und eine größere Trägheit mit Bezug auf Temperaturschwankungen an der Landoberfläche entwickelte. Abbildung 11 zeigt exemplarisch für das Afrika-Modell wie viel mehr Energie die einzelnen Bodensäulen pro  $1\text{m}^2$  speichern können, wenn der Abstand der unteren Randbedingung von 12 auf 75m vergrößert wird. Gezeigt sind die individuellen Zeitreihen für jedes Pixel des Modellgebietes und die Mittelwerte über das Modellgebiet.

Die lokalen Auswirkungen der unteren Randbedingung sind in Abbildung 12 aufgezeigt. Die Anomalie der Differenzen des Bodenwärmestromes zwischen der Simulation mit kleinem und großen RB-Abstand (75m-12m und 24m-12m) weist generell positive Werte auf, da bei einem größerem Abstand mehr Energie im Untergrund gespeichert werden kann. Gleichzeitig gezeigt ist die Anomalie der Lufttemperatur, die vor allem am Ende der Simulationszeit einen positiven Trend aufweist, der der globalen Erwärmung zuzuordnen ist. Es konnte nicht gezeigt werden, dass die untere Randbedingung einen starken Einfluss auf die Lufttemperatur an der Landoberfläche hat, deshalb muss offensichtlich der Energietransport im Untergrund nicht notwendiger Weise Teil des *Updaters* sein.

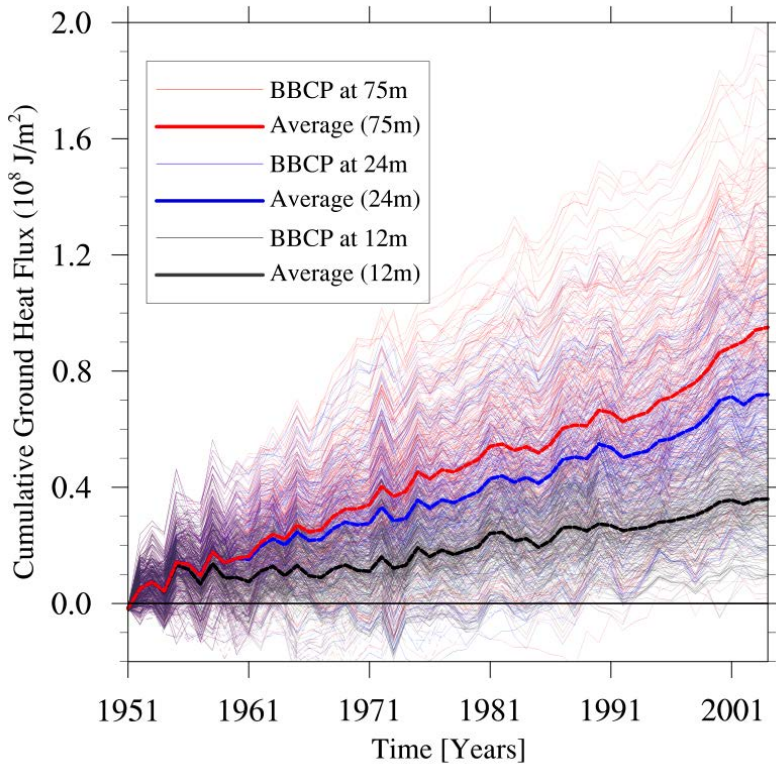


Abbildung 11. Kumulativer Wärmefluss ( $\text{J/m}^2$ ) über einen Simulationszeitraum von 50 Jahren von RB-Abständen (BBCP) von 12, 24, und 75m für das Afrika-Modell.

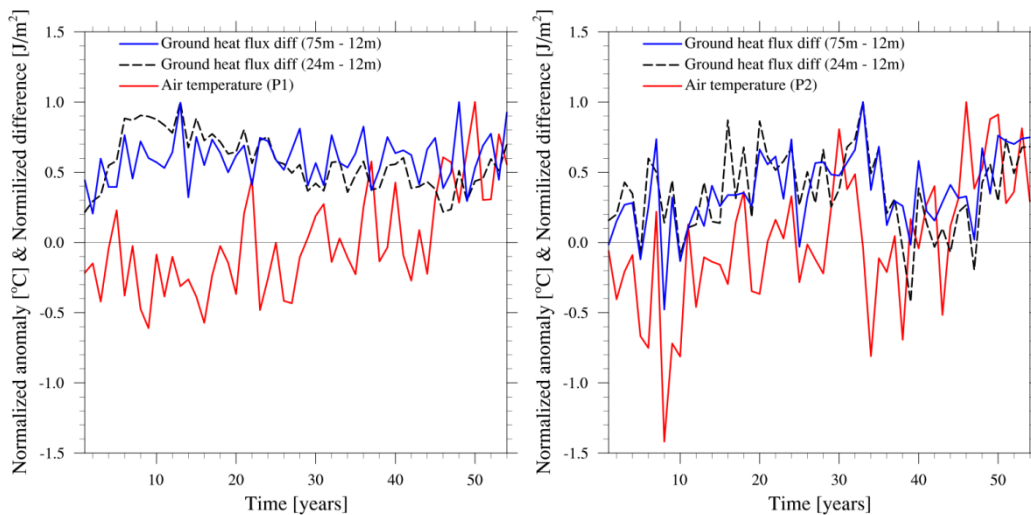


Abbildung 12. Anomalien der Lufttemperatur und die Differenz des Bodenwärmestromes für zwei verschiedene Modellkonfigurationen.

Ein wichtiger Punkt in der Entwicklung weiterer *Updater*, die zusätzliche Prozesse des terrestrischen Systems miteinbeziehen können, ist der Einfluss der Vegetation. In diesem Fall muss zuerst geklärt werden, inwieweit die Bedeckung durch Vegetation über das Grundwasser oder über die Atmosphäre und globale Erwärmung und  $\text{CO}_2$ -Düngung

bestimmt ist. Dazu wurde eine Studie der zeitlichen Trends des Blattflächenindex über Europa durchgeführt als Maß der Pflanzenbedeckung und der Länge der Wachstumsperiode. Es wurde ebenfalls untersucht, ob Brüche in etwaig vorhandenen Trends existieren und welche Prozesse der *Updater* abbilden muss, um diese anzunähern.

Die Auswertung zeigt (Abbildung 13), dass der Blattflächenindex über weite Teile Europas signifikant angestiegen ist. Nur vereinzelt können Regionen identifiziert werden, die eine Reduzierung aufweisen. Die Gegenüberstellung mit dem monatlichen Mittel des Niederschlages und der Temperatur deutet darauf hin, dass vor allem die Temperatur und mit dem mittleren Blattflächenindex korrelieren (Abbildung 14). Jedoch kann es mit Bezug auf den Niederschlag zu zeitlich verzögerten Beziehung kommen, die in dem Streudiagramm nicht sichtbar sind. Ein weiteres interessantes Resultat der Auswertung ist die Veränderung der Wachstumsperiode (Abbildung 15). Es konnte gezeigt werden, dass sich die Wachstumsperiode in weiten Teilen Europas verlängert. Es wurde sichergestellt, dass es sich hierbei nicht um Landnutzungsänderungen handelt sondern um Änderungen des existierenden Pflanzenbestandes. Die Resultate legen nahe, dass langzeitliche Trends der Pflanzenbedeckung hauptsächlich durch die umgebenden atmosphärischen Bedingungen bestimmt sind. Die Hydrologie des Untergrundes einschließlich der Grundwasserdynamik hat hier wahrscheinlich nur einen untergeordneten Einfluss. Jedoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass gerade langzeitliche Vegetationstrends ebenfalls mit dem dynamischen Wasserspeicher des Untergrundes rückkoppeln.

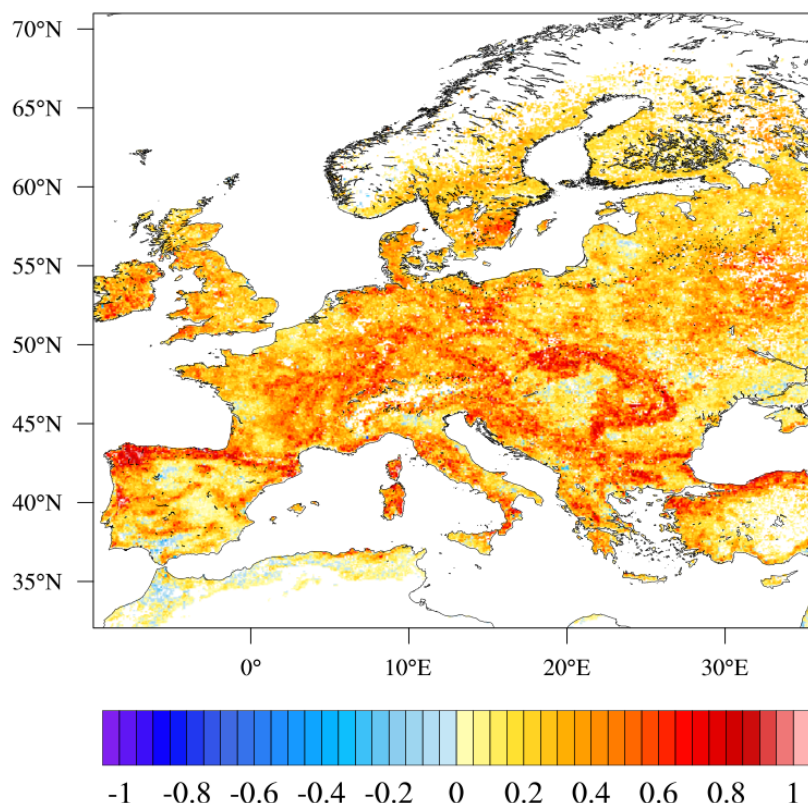


Abbildung 13. Normalisierter Trend des Blattflächenindex über Europa für den Zeitraum 1982 bis 2011.

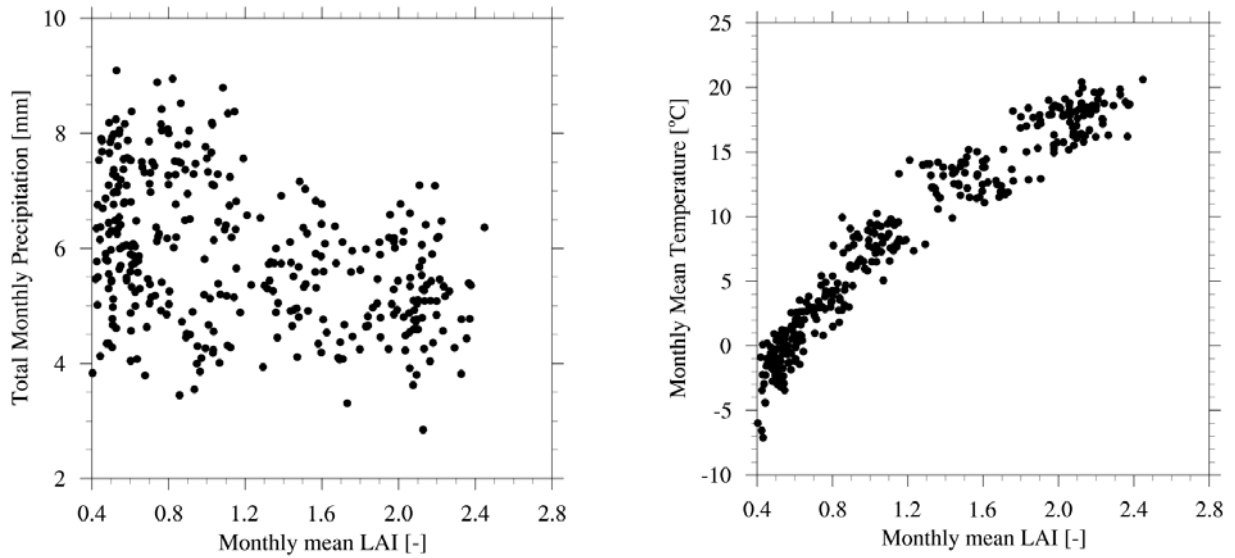


Abbildung 14. Streudiagramm des monatlichen mittleren Niederschlages und der mittleren Temperatur mit dem Blattflächenindex (Leaf Area Index, LAI).

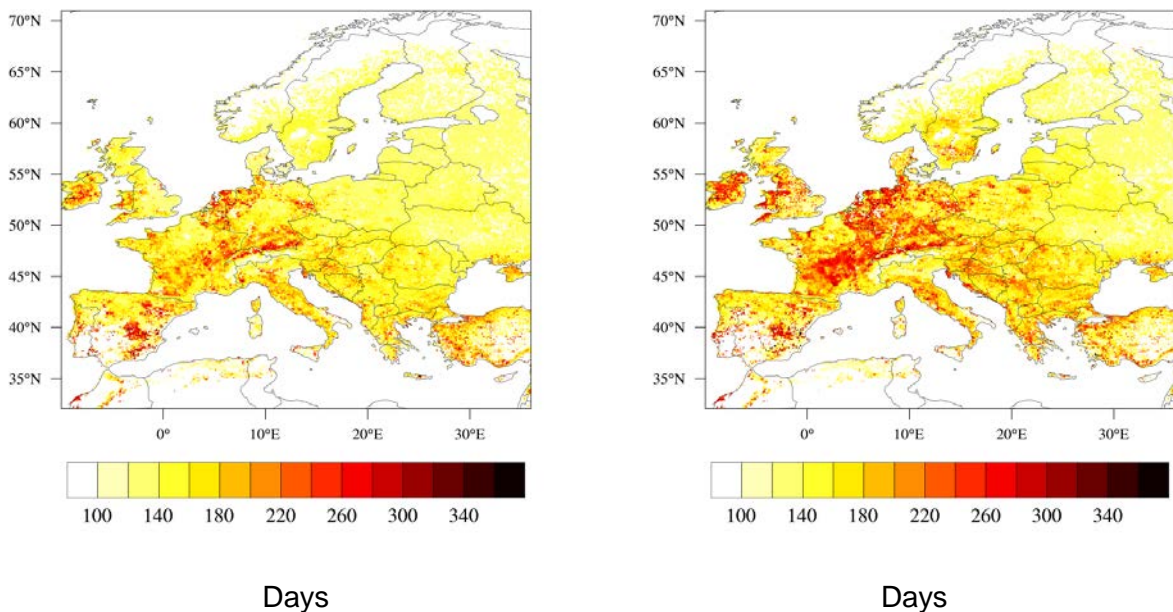


Abbildung 15. Länge der Wachstumsperiode (in Tagen) für die Zeiträume 1982 bis 1991 (links) und 2002 bis 2011 (rechts).

### Validierung

Im Rahmen dieses Teilprojekts 2 wurde ein hoch aufgelöstes, physikalisch basiertes Modell (ParFlow-CLM) mit vollständiger Hydrodynamik und Energietransport des Untergrundes auf das Wüstebach Observatorium angewendet. Als Modelldomain für das Wüstebach Gebiet ist eine 1180 x 740 x 2 m Gitterbox verwendet. Zur Bestimmung der Geometrie und der Fließrichtungen wurde ein hochaufgelöstes digitales Geländemodell mit einer 1 m Auflösung verwendet. Der obere Rand des Parflow-Modells wird über das CLM (Community Land Model) Modell bereitgestellt. CLM wurde angetrieben mit Daten zur Kurz- und Langwelligen

Strahlung, Niederschlag, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Luftfeuchte und Luftdruck. Die seitlichen Ränder und der untere Rand wurden als „no flux boundary“ definiert. Als Simulationsplattform wurde der Hochleistungsrechner JUROPA des Forschungszentrum Jülich verwendet.

Zur Validierung der Modellergebnisse wurde in einem ersten Schritt die gemessene Bodenfeuchte verwendet. Die Daten stammen aus einem umfangreichen funkbasierten Sensornetzwerk (siehe Abbildung 4). Der Simulationszeitraum wird auf 3 Jahre erweitert, um eine bessere Vergleichbarkeit mit den Messdaten zu ermöglichen. Dann wird neben der vertikalen auch eine horizontale Heterogenität der Bodeneigenschaften berücksichtigt. Neben der Bodenfeuchte werden zusätzlich auch gemessene Abflusshöhen und Evapotranspirationsraten zur Modellvalidierung herangezogen. Um den Einfluss der Anisotropie von bodenhydraulischen Eigenschaften auf das Simulationsergebnis zu testen, wurden unterschiedliche Skalierungen der horizontalen gesättigten Leitfähigkeit untersucht Tabelle 2.

Tabelle 2. Varianten für die Bodenparametrisierung (Anisotropie des Ks-Werts)

RMSE	ET	Runoff	$\theta$ 5cm	$\theta$ 20cm	$\theta$ 50cm
Isotropy	0.146	0.330	0.113	0.066	0.078
$10 \times K_{sh}$	0.139	0.204	0.065	0.036	0.041
$20 \times K_{sh}$	0.136	0.170	0.059	0.042	0.027
$40 \times K_{sh}$	0.133	0.162	0.070	0.059	0.028
$80 \times K_{sh}$	0.130	0.159	0.088	0.077	0.043

Die Variante mit einem Skalierungsfaktor von 20 für die Horizontalkomponente des Ks-Werts hat insgesamt die besten Modellergebnisse gebracht und wurde für die folgenden Simulationen zugrunde gelegt. Weiterhin wurde die Auswirkung flächenverteilter Porositäten auf das Modellergebnis untersucht (homogen versus heterogen). Abbildung 16 zeigt die verteilten Porositäten die der Modellierung zugrunde gelegt wurden.

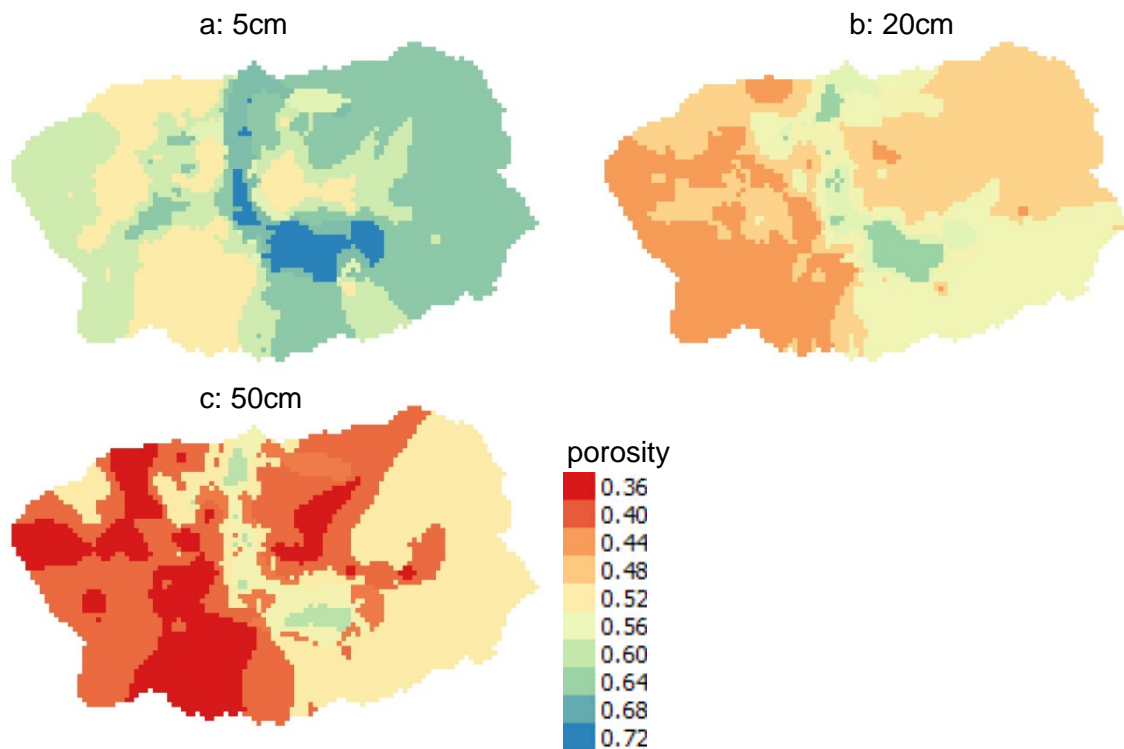


Abbildung 16. Porositätsverteilungen für drei Bodenschichten (0–10, 10–40 und 40–160 cm)

Tabelle 3 und Abbildung 17 zeigen den Vergleich der simulierten mit der gemessenen mittleren Bodenfeuchtedynamik für die Varianten mit homogener Porosität (SH1) und heterogener Porosität (SH2) für die Tiefen 5, 20 und 50 cm.

Tabelle 3. Varianten für die Bodenparametrisierung (Porosität)

	RMSE					NSE				
	ET	Runoff	$\theta$ 5cm	$\theta$ 20cm	$\theta$ 50cm	ET	Runoff	$\theta$ 5cm	$\theta$ 20cm	$\theta$ 50cm
SH1	0.142	0.173	0.064	0.035	0.025	-0.159	0.697	0.087	0.235	0.206
SH2	0.141	0.173	0.052	0.032	0.022	-0.152	0.694	0.388	0.356	0.268

Insbesondere der NSE (Nash-Sutcliff-Koeffizient) für Abfluss und Bodenfeuchtedynamik in den drei Bodentiefen wird in der Variante SH2 deutlich verbessert. Abbildung 18 zeigt den Vergleich der simulierten und gemessenen Bodenfeuchtemuster für die homogene und heterogene Porosität für die Tiefen 5, 20 und 50 cm. Die simulierten Bodenfeuchtemuster zeigen deutlich die Flussaue im zentralen Bereich der Modelldomain. Sie weist deutlich höhere Sättigungsgrade während des gesamten Simulationslaufs im Vergleich zu den trockeneren Hangbereichen. Dies entspricht der tatsächlichen Situation im Einzugsgebiet, was daraufhin deutet, dass das Modell die Wasserflüsse grundsätzlich korrekt simuliert.



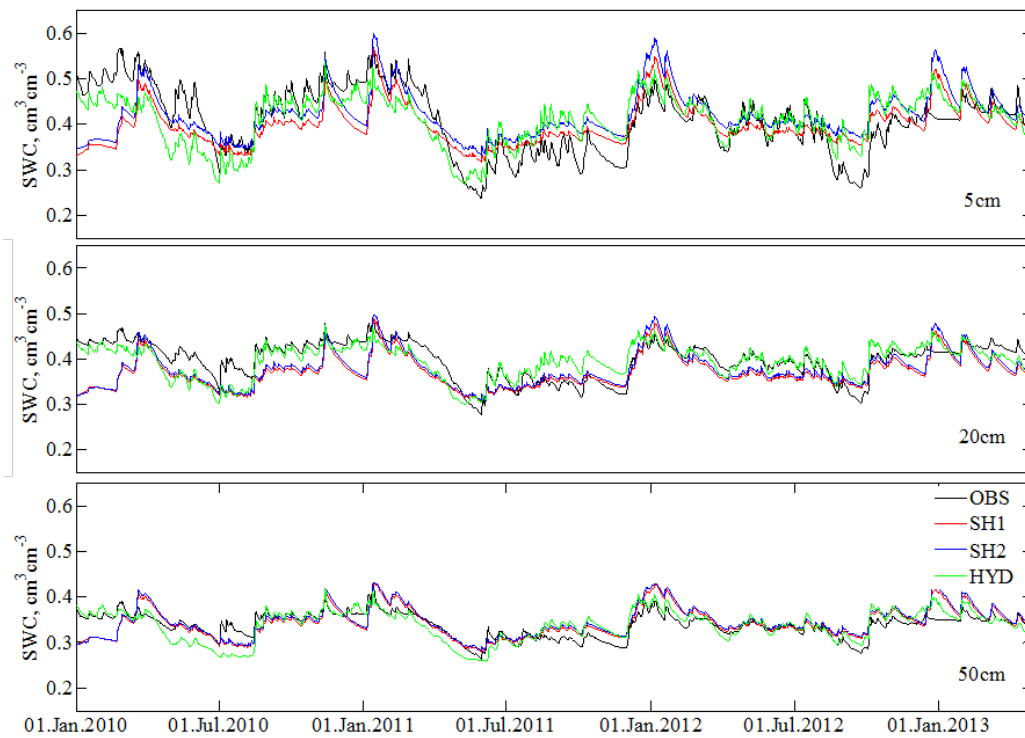


Abbildung 17. Vergleich der simulierten mit der gemessenen mittleren Bodenfeuchtedynamik für die homogene Porosität (rot) und heterogene Porosität (blau) für die Tiefen 5, 20 und 50 cm.

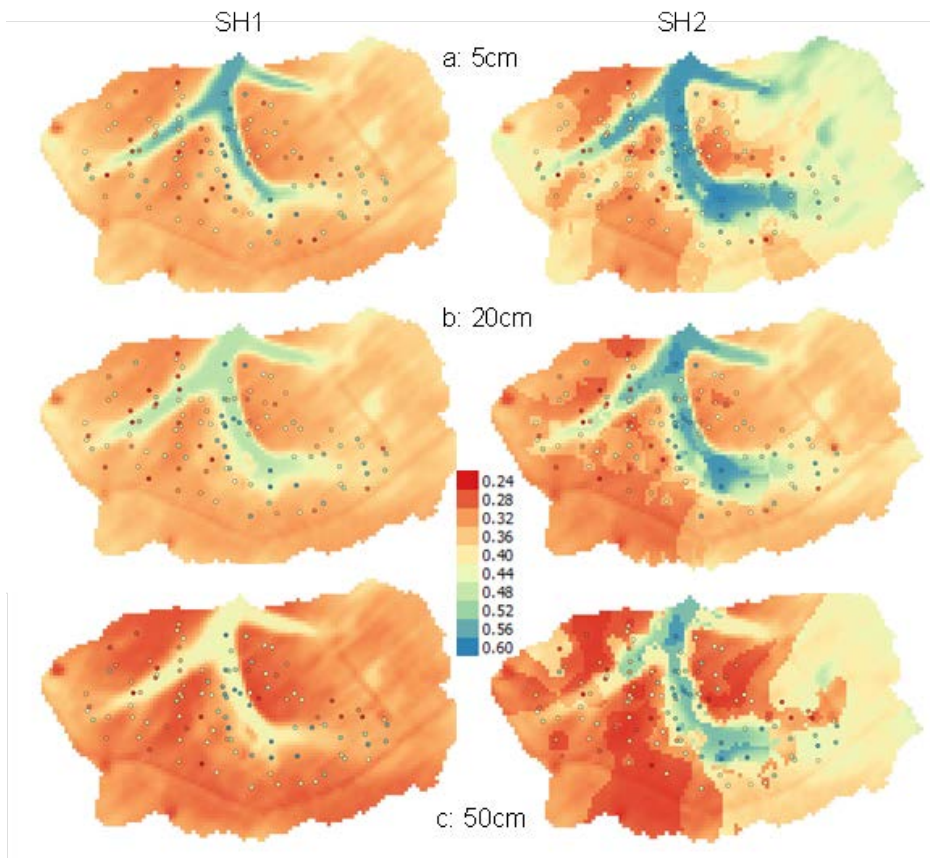


Abbildung 18. Vergleich der simulierten und gemessenen Bodenfeuchtemuster für die homogene Porosität (links) und heterogene Porosität (rechts) für die Tiefen 5, 20 und 50 cm.

Abbildung 19 belegt, dass bei der Verwendung der heterogenen Porositäten eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den gemessenen Bodenfeuchtemustern erzielt werden kann.

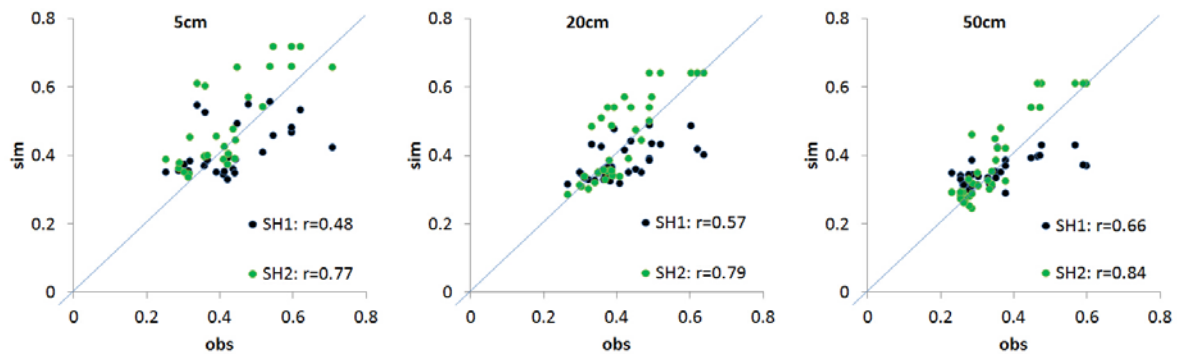


Abbildung 19. Vergleich der simulierten und gemessenen Bodenfeuchte (über 3 Jahre gemittelt) der zwei Heterogenitätsvarianten für die Tiefen 5, 20 und 50 cm.

## II.5. Schlussfolgerung und Ausblick

In MCRA ist es gelungen einen *Updater* zu entwickeln, der die Energieflüsse von *Landparm* statistisch korrigiert. Die korrigierten Felder haben kaum großskalige, asymmetrische Fehlerbereiche verglichen mit *Landcplx*. Des Weiteren wurde die Physik von *Landcplx* weiter verfeinert (Energietransport), um weitere potentiell wichtige Prozesse in den *Updater* zu integrieren.

Es war notwendig ein Modell für jede Landnutzung und Bodentype Klasse zu erstellen. Das führte dazu, *Updater* für alle Klassen entwickeln zu müssen. In einem nächsten Schritt sollte dieser Ansatz für größere Bereiche angewendet werden. Es ist vorgesehen, in diesem Fall nur noch einen kleineren Prozentsatz an *Landcplx* Rechnungen durchzuführen und die Ergebnisse im Anschluss auf das gesamte Modell zu übertragen. Dies ist kompliziert, wenn in jeder Klimazone alle Landnutzung und Bodentype Klasse vertreten sein müssen.

Statt wie in dem gezeigten Beispiel die Komplexitätsreduzierung im Raum zu machen, wäre es auch möglich dies in der Zeit umzusetzen. In diesem Fall würden *Landcplx* und *Landparm* Rechnungen für die ersten Jahren durchgeführt und für den Rest der Klimäläufe nur *Landparm* mithilfe des *Updaters*, der an den ersten Jahren trainiert wurde. Dies hat den Vorteil, dass automatisch alle Landnutzungs- und Bodentypenklassen vertreten sind. Damit dieser Ansatz tatsächlich Rechenzeit spart muss eine Methode entwickelt werden, um die *Spinup*-Zeit von *Landcplx* zu reduzieren.

Das prozessbasierte hydrologische Modell Parflow-CLM (*Landcplx*) wurde auf das TERENO Observatorium Wüstebach angewendet und validiert. Hierbei wurden verschiedene Parametrisierungen bezüglich der Bodeneigenschaften (Anisotropie der gesättigten Leitfähigkeit  $K_s$ , die Heterogenität der Bodenporosität) untersucht. Es zeigte sich, dass ein Skalierungsfaktor von 20 für den horizontalen  $K_s$ -Wert des untersten Bodenhorizonts die

---

beste Modellperformance hinsichtlich Abfluss- und Bodenfeuchtedynamik ergab. Dies deutet daraufhin, dass der Interflow Prozess eine wichtige Rolle bei der Abflussbildung im Wüstebach Observatorium spielt. Weiterhin erhöhte die Verwendung von räumlicher Information zur Bodenporosität die Qualität der Simulation der Bodenfeuchtmuster.

Zukünftige Studien sollten insbesondere die Heterogenität der hydraulischen Eigenschaften berücksichtigen. Mit steigender Rechnerkapazität wird es in der Zukunft auch möglich sein, eine 3-D inverse Kalibration der hydraulischen Parameter mittels der Daten der TERENO Observatorien durchzuführen. Außerdem könnten weitere Modellverbesserungen (z.B. Inkorporierung von präferentiellen Flüssen während des Infiltrationsvorgangs) zu weiteren Verbesserungen der Modellperformance führen.



### **III. Erfolgskontrollbericht**

#### ***III.1. Beitrag zu den förderpolitischen Zielen***

Mit dem Förderprogramm „Umwelt und Nachhaltigkeit“ der Bundesregierung werden Projekte gefördert, deren wesentlicher Bestandteil Untersuchungen von Belastungen in der Atmosphäre und des Treibhauseffekts ist. Erkenntnisse zu den Ursachen des Klimawandels seien entscheidend mitverantwortlich dafür, dass sich Nachhaltigkeit in der Wirtschaft zu einem bedeutenden Wettbewerbsfaktor entwickelt hat.

#### ***III.2. Wissenschaftlich-technische Ergebnisse***

Es konnte gezeigt werden, dass eine Komplexitätsreduzierung möglich ist und großskalige asymmetrische Fehlerbereiche entfernen kann. Dies öffnet den Weg zu der Modellierung des gesamten Boden-Vegetation-Atmosphären Systems. Weil aber alle Landnutzung und Bodentypen Klassen vertreten sein müssen ist die Erweiterung des Systems auf Kontinentalskala immer noch ehrgeizig. Die Komplexitätsreduzierung in der Zeit ist vielleicht erfolversprechender.

Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass das prozessbasierte Modellsystem Parflow-CLM in der Lage ist, den lokalen Wasser- und Energiehaushalt sowie den Wassertransport TERENO Observatorium Wüstebach räumlich differenziert mit hinreichender Genauigkeit zu simulieren. Damit ist es sowohl für wissenschaftliche Zwecke als auch für das Management von Wassereinzugsgebieten in dieser Region einsetzbar. Darüber hinaus lassen sich die wissenschaftlichen Ergebnisse dieses Vorhabens zusätzlich mit Hilfe von Publikationen verdeutlichen, die der internationalen Community zur Verfügung stehen:

Fang, Z., H.R. Bogaen, S. Kollet, J. Koch and H. Vereecken (2015): Spatio-temporal validation of long-term 3D hydrological simulations of a forested catchment using empirical orthogonal functions and wavelet coherence analysis. *J. Hydrol.* 529: 1754-1767, doi:10.1016/j.jhydrol.2015.08.011.

Fang, Z., H.R. Bogaen, S. Kollet, J. Koch and H. Vereecken (2016): Scale dependent parameterization of soil hydraulic conductivity in the 3D simulation of hydrological processes in a forested headwater catchment. *J. Hydrol.*, doi:10.1016/j.jhydrol.2016.03.020

Khorsandi, E., S. Kollet, C. Simmer, 2016, Investigating the effect of bottom boundary condition placement on ground heat storage in climate time scale simulations using ParFlowE, *Hydrologic Processes*, (in Begutachtung).

Koch, J., S. Stisen, Z. Fang, H.R. Bogaen, T. Cornelissen, B. Dieckrüger and S. Kollet (2016): Inter-comparison of three distributed hydrological models with respect to the seasonal variability of soil moisture patterns at a small forested catchment. *J. Hydrol.* 533: 234-249.

### **III.3. Fortschreibung des Verwertungsplanes**

Kurzfristig liegen wissenschaftliche und anwenderbezogene Verwertungen in der Übertragung des *Updaters* in regionale und auch globale Klimamodelle. Jedoch muss vorher geklärt werden über welche Klimazonen hinweg der entwickelte *Updater* gültig ist. Langfristig kann das MCRA-Konzept auf verschiedene Modellkomponenten des Erdsystems angewendet werden in denen komplexe (mikrophysikalische) Prozesse berücksichtigt werden müssen, die zu hohem Rechenaufwand führen.

Des Weiteren liegen die wissenschaftlichen Erfolgsaussichten des Vorhabens in der Qualitätsbeurteilung der Modellergebnisse. Hierbei ist die Kenntnis der Qualität der simulierten Abflüsse und Bodenwassergehälter von großer Wichtigkeit. Langfristig ist es möglich, dass validierte Modellsystem für die makroskalige hydrologische Modellierung sowie in der Klimamodellierung eingesetzt werden und damit die Analyse des menschlichen Einflusses auf den Wasserhaushalt im Kontext von Klimawandel und Vulnerabilität zu unterstützen.

### **III.4. Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Es wurde gezeigt, dass eine Reduzierung der Komplexität von hydrologischen und Landoberflächenmodellen ohne groß-skaligen asymmetrischen Fehlerbereich möglich ist. In der Projektlaufzeit ist es leider nicht gelungen, den Ansatz für ganz Deutschland oder Europa anzuwenden. Im Rahmen des Teilprojekts 2 konnte nur das Modellsystem ParflowCLM (*Landcplx*) erfolgreich validiert werden. Die Validierung des neu zu entwickelnden Modellsystems (*Landparm*) mit Daten weiterer TERENO Observatorien konnte aus zeitlichen Gründen nicht durchgeführt werden, da innerhalb in der Projektlaufzeit keine lauffähige Modellversion von *Landparm* bereitgestellt wurde.

### **III.5. Präsentationsmöglichkeiten für Nutzer**

Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer ergeben sich bei den bekannten internationalen Konferenzen wie z.B. EGU oder AGU, aber auch bei den von Miklip organisierten Konferenzen und Workshops.

### **III.6. Einhaltung der Zeit- und Kostenplanung**

Die geplante Zeit- und Kostenplanung konnte weitestgehend eingehalten werden.

## **IV. Berichtsblatt**

Siehe Anlage.

## **V. Literatur**

Anyah, R. O., C. P. Weaver, G. Miguez-Macho, Y. Fan, and A. Robock (2008), Incorporating water table dynamics in climate modeling: 3. Simulated groundwater influence on coupled land-atmosphere variability, *J Geophys Res-Atmos*, 113(D7).

Bachmair, S., Weiler, M., 2012. Hillslope characteristics as controls of subsurface flow variability. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16, 3699-3715.

- Bogena, H., E. Borg, A. Brauer, et al., 2016. TERENO: German network of terrestrial environmental observatories. *Journal of large-scale research facilities* 2, A52, <http://dx.doi.org/10.17815/jlsrf-2-98>.
- Bogena, H.R., R. Bol, N. Borchard, et al. (2015): A terrestrial observatory approach for the integrated investigation of the effects of deforestation on water, energy, and matter fluxes. *Science China: Earth Sciences* 58(1): 61-75, doi: 10.1007/s11430-014-4911-7.
- Groffman, P.M., Williams, C.O., Pouyat, R.V., Band, L.E., Yesilonis, I., 2009. Nitrate leaching and nitrous oxide flux in urban forests and grasslands. *Journal of Environmental Quality*. 38, 1848-1860.
- Hopp, L., McDonnell, J.J., 2009. Connectivity at the hillslope scale: Identifying interactions between storm size, bedrock permeability, slope angle and soil depth. *Journal of Hydrology*, 376(3–4), 378-391.
- Kollet, S. J., I. Cvijanovic, D. Schuttemeyer, R. M. Maxwell, A. F. Moene, and P. Bayer (2009), The Influence of Rain Sensible Heat and Subsurface Energy Transport on the Energy Balance at the Land Surface, *Vadose Zone J*, 8(4), 846-857.
- Krakauer, N. Y., H. B. Li, and Y. Fan (2014), Groundwater flow across spatial scales: importance for climate modeling, *Environ Res Lett*, 9(3).
- Maxwell, R. M. (2013), A terrain-following grid transform and preconditioner for parallel, large-scale, integrated hydrologic modeling, *Adv Water Resour*, 53, 109-117.
- Prein, A. F., W. Langhans, G. Fosser, A. Ferrone, N. Ban, K. Goergen, M. Keller, M. Tolle, O. Gutjahr, F. Feser, E. Brisson, S. Kollet, J. Schmidli, N. P. M. van Lipzig, and R. Leung (2015), A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges, *Rev Geophys*, 53(2), 323-361.
- Rahman, M., M. Sulis, and S. J. Kollet (2014), The concept of dual-boundary forcing in land surface-subsurface interactions of the terrestrial hydrologic and energy cycles, *Water Resour Res*, 50(11), 8531-8548.
- Schomburg, A., V. Venema, R. Lindau, F. Ament, and C. Simmer (2010), A downscaling scheme for atmospheric variables to drive soil-vegetation-atmosphere transfer models, *Tellus B*, 62(4), 242-258.
- Shrestha, P., M. Sulis, M. Masbou, S. Kollet, and C. Simmer (2014), A Scale-Consistent Terrestrial Systems Modeling Platform Based on COSMO, CLM, and ParFlow, *Mon Weather Rev*, 142(9), 3466-3483.
- Szilagy, J., V. A. Zlotnik, and J. Jozsa (2013), Net Recharge vs. Depth to Groundwater Relationship in the Platte River Valley of Nebraska, United States, *Ground Water*, 51(6), 945-951.
- Tang, K.M., McGinnis, D.F., Frindte, K., Brüchert, V., Grossart, H.P., 2014. Paradox reconsidered: Methane oversaturation in well-oxygenated lake waters. *Limnol. Oceanogr.* 59, 275–284.
- Tromp-van Meerveld, H.J., McDonnell, J.J., 2006. Threshold relations in subsurface stormflow 2: The fill and spill hypothesis. *Water Resources Research* 42, W02411.
- Weiler, M., McDonnell, J.J., 2007. Conceptualizing lateral preferential flow and flow networks and simulating the effects on gauged and ungauged hillslopes. *Water Resources Research*. 43, W03403.

Zhang, B., Tang, J., Gao, C., Zepp, H., 2011. Subsurface lateral flow from hillslope and its contribution to nitrate loading in streams through an agricultural catchment during subtropical rainstorm events. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 3153–3170.