

Institution

Institut für Atmosphäre und Umwelt
Goethe-Universität Frankfurt am Main

Projekttitel

Der Boden im regionalen Klimamodellsystem CCLM - Studien im Main-Einzugsgebiet
- Abschlussbericht -

Laufzeit

Oktober 2009 - Dezember 2012

Projektleitung

Bodo Ahrens

Projektbearbeitung

Jana Schröder, Frank Kalinka, Eva-Maria Gerstner

Auftraggeber

Fachzentrum Klimawandel Hessen
im Hessischen Landesamt für Umwelt und Geologie

Projektbetreuung

Fachzentrum Klimawandel Hessen

Frankfurt, Februar 2013



Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	1
2	Einleitung	2
2.1	Allgemeiner Hintergrund	2
2.2	Zielstellung	2
3	Modellbeschreibung	3
3.1	Beschreibung des Boden-Wasserflusses im Modell und Anpassungen	3
3.2	Beschreibung des Boden-Wärmetransports im Modell	4
3.3	Aufbereitung und Einbindung verbesserter Bodeninformationen	5
4	Validierung an Stationsdaten	7
4.1	Datengrundlage	7
4.2	Modelleinstellungen	9
4.3	Ergebnisse	9
4.3.1	Einfluss der Form der Richards-Gleichung auf den simulierten Wassergehalt	9
4.3.2	Einfluss der Berücksichtigung der Bodenheterogenität auf den simulierten Wassergehalt	9
4.3.3	Simulation der Bodentemperatur	13
4.4	Diskussion	13
5	Sensitivitätsstudien im Main-Einzugsgebiet	19
5.1	Modelleinstellungen	19
5.2	Daten	19
5.3	Ergebnisse	21
5.4	Diskussion	21
6	Ausblick	27

1 Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurde an einer verbesserten Beschreibung der Wasser- und Wärmeflüsse im Boden durch das regionale Klimamodellsystem COSMO-CLM gearbeitet. Dies umfasste einerseits die Generierung und Einbindung qualitativ hochwertiger Bodeninformationen auf der Grundlage aktueller Bodendatensätze, wie z.B. der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland (BÜK 1000 N). Zum anderen war die Modellphysik den neuen Anforderungen anzupassen.

Sensitivitätsexperimente zeigten einen starken Einfluss, sowohl der Beschreibung des Bodenprofils als auch der Bodenphysik, auf die simulierten Wassergehälter im Boden und in einem geringeren Maß auf die simulierten Bodentemperaturen.

Ein neuer Bodenarten-Datensatz wurde in einer Auflösung von 30 Winkelsekunden (≈ 1 km) und 5 cm tiefen Schichten auf Grundlage der Harmonized World Soil Database (HWSD) und BÜK 1000 N erzeugt. Ein deutlicher Einfluss der verbesserten Bodenbeschreibung auf verschiedene simulierte Größen wurde für das Main-Einzugsgebiet gezeigt.

Zukünftig könnte eine effizientere Nutzung der primären Bodeninformation zu einer weiteren Verbesserung der Simulationen beitragen.

2 Einleitung

2.1 Allgemeiner Hintergrund

Zwischen der Atmosphäre und dem Boden bestehen starke Wechselwirkungen in Form des Austauschs von Energie, Wasser und Stoffen. Eine möglichst genaue Beschreibung der Energie- Wasser- und Stoff-Flüsse des Bodens gewährleistet daher auch eine verbesserte Modellierung der atmosphärischen Prozesse. Um die Bodenprozesse bestmöglich abbilden zu können, müssen diese zum einen möglichst genau durch das Modell beschrieben sein (Modell-Physik). Zum anderen ist es aber auch erforderlich, die Bodenbeschaffenheit so genau wie möglich abzubilden (Datengrundlage).

Im Bodenmodell TERRA-ML des regionalen Klimamodellsystems COSMO-CLM (<http://www.clm-community.eu>) wurde der Boden bislang nur als ein vertikal homogenes Profil betrachtet. In der Realität bestehen Böden aber in der Regel aus mehreren Horizonten, die sich hinsichtlich ihrer physikalischen und chemischen Eigenschaften deutlich unterscheiden.

Die Datengrundlage zur Beschreibung der Bodeneigenschaften in TERRA und COSMO-CLM ist der globale „FAO-UNESCO Digital Soil Map of the World“ Datensatz (FAO-Unesco (1974)) in einer räumlichen Auflösung von 5 Bogenminuten (≈ 10 km), wobei die Informationen zur Verbreitung von drei verschiedenen Bodentexturklassen der oberen 30 cm und einzelner Bodeneinheiten verwendet wurden, um die im Modell unterschiedenen fünf Bodenarten und Oberflächenklassen abzuleiten. Inzwischen liegen sowohl global, als auch regional hinsichtlich der räumlichen Auflösung aber auch des Informationsgehaltes verbesserte Datensätze vor.

2.2 Zielstellung

Ziel dieses Projektes ist es, eine verbesserte Abbildung der Bodenprozesse in TERRA-ML zu erreichen. Dafür sollen die detailgetreueren Informationen neuerer Bodendatensätze genutzt werden, wie beispielsweise der nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland (BÜK 1000 N, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe). Die Modellentwicklungen sollen anhand klimarelevanter Simulationen getestet werden.

3 Modellbeschreibung

Im Rahmen des Projektes wurde die entkoppelte Modell-Version 4.13 des Bodenmoduls TERRA-ML als Bestandteil des regionalen Klimamodellsystems COSMO-CLM (<http://www.clm-community.eu>) verwendet. Eine ausführliche Beschreibung der im Modell abgebildeten physikalischen Prozesse findet sich in Doms et al. (2011).

Um die heterogene Beschaffenheit des Bodens in TERRA-ML berücksichtigen zu können, waren verschiedene Anpassungen des Modells notwendig wie z.B. Erweiterungen zum Ein- und Auslesen der Daten sowie Anpassungen von Datenfeldern. Weiterhin musste die bisherige Formulierung des Wasserflusses durch einen allgemeingültigeren Ansatz ersetzt werden. Darüber hinaus waren verschiedene technische Entwicklungen zur Generierung eines verbesserten Bodendatensatzes mithilfe des Präprozessors notwendig. Auf die letzteren beiden Punkte wird im Folgenden genauer eingegangen.

3.1 Beschreibung des Boden-Wasserflusses im Modell und Anpassungen

Die Beschreibung des Wasserflusses in ungesättigten Böden wird allgemein mit der Richards-Gleichung beschrieben (Richards (1931)):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[-K \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] - Q \quad (3.1)$$

wobei θ der Boden-Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$], h das Matrixpotential [m], t die Zeit [s], z die Bodentiefe [m], K die hydraulische Leitfähigkeit [m s^{-1}] und Q ein Quellen- / Senkenterm [-] sind.

In homogenen und ungesättigten Böden kann die θ -Form der Richards-Gleichung verwendet werden (Van Genuchten et al. (1992)):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[-D \frac{\partial \theta}{\partial z} + K \right] - Q \quad (3.2)$$

die sich durch Einführung der Diffusivität D [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$] ($D = -K(\partial h / \partial \theta)$) aus Gleichung 3.1 ableitet. Diese Form der Richards-Gleichung wird in der offiziellen Version von TERRA-ML und COSMO-CLM verwendet. Die hydraulische Diffusivität und Leitfähigkeit werden dabei nach Rijtema (1969) in Abhängigkeit des Boden-Wassergehaltes beschrieben:

$$D(\theta) = D_0 \exp \left[D_1 \frac{(\theta_s - \theta)}{(\theta_s - \theta_r)} \right] \quad (3.3)$$

$$K(\theta) = K_0 \exp \left[K_1 \frac{(\theta_s - \theta)}{(\theta_s - \theta_r)} \right] \quad (3.4)$$

Dabei sind θ_s der gesättigte Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$], θ_r der residuale Wassergehalt [$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$] und D_0 , D_1 , K_0 und K_1 bodenabhängige Konstanten.

Um den Wasserfluss in heterogenen Böden beschreiben zu können, wurde die gemischte Form der Richards-Gleichung (Gleichung 3.1) in TERRA-ML implementiert (Kalinka and Ahrens (2011)). Die Wasserspannungskurve $\theta(h)$ und die hydraulische Leitfähigkeitsfunktion $K(\theta)$ werden in Abhängigkeit des Wassergehalts nach Clapp and Hornberger (1978) beschrieben:

$$h = h_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad (3.5)$$

$$K = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{2b+3} \quad (3.6)$$

mit der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit K_s [m s^{-1}], dem Matrixpotential bei Sättigung h_s [m] und einer Konstante b [-]. Nach (Cosby et al. (1984)) werden die Parameter K_s [inches hour^{-1}], h_s [cm], θ_s [vol%] und b [-] aus den prozentualen Anteilen von Sand (p_{sand}) und Ton (p_{clay}) abgeleitet:

$$K_s = 10^{(0.0153p_{sand}-0.884)} \quad (3.7a)$$

$$h_s = 10^{(-0.0131p_{sand}+1.88)} \quad (3.7b)$$

$$\theta_s = -0.126p_{sand} + 48.9 \quad (3.7c)$$

$$b = 0.159p_{clay} + 2.91 \quad (3.7d)$$

Die Einheiten der Parameter werden zur Einbindung in TERRA entsprechend angepasst. Gleichung 3.7c wird derzeit nicht verwendet. Stattdessen wurden zunächst die Porenvolumina (Porenvolumen = gesättigter Wassergehalt) der einzelnen TERRA-Bodenklassen beibehalten.

Für den Wasserfluss wird der obere Rand durch die Infiltration definiert. Am unteren Rand wird eine Free Drainage-Randbedingung verwendet, d.h. das Wasser fließt aus der untersten Bodenschicht ab, wobei nach oben gerichtete diffusive Flüsse vernachlässigt werden (Grasselt et al. (2008)).

3.2 Beschreibung des Boden-Wärmetransports im Modell

Der Wärmetransport im Boden wird mit der Wärmeleitungsgleichung beschrieben:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (3.8)$$

Dabei sind T [K] die Bodentemperatur, ρc [J m⁻³ K⁻¹] die volumetrische Wärmekapazität und λ die [W K⁻¹ m⁻¹] Wärmeleitfähigkeit. Die volumetrische Wärmekapazität des Bodens ergibt sich aus den Wärmekapazitäten für trockenen Boden ($\rho_0 c_0$), Wasser ($\rho_w c_w$) und Eis ($\rho_{ice} c_{ice}$):

$$\rho c = \rho_0 c_0 + \rho_w c_w \theta_l + \rho_{ice} c_{ice} \theta_{ice} \quad (3.9)$$

mit θ_l und θ_{ice} den volumetrischen Wassergehältern für die flüssige Phase und Eis. Die Wärmeleitfähigkeit hingegen berücksichtigt lediglich den flüssigen Wassergehalt, welcher dzt. zeitlich konstant angenommen ist (θ_m):

$$\lambda = \lambda_0 + \left(0.25 + \frac{0.3\Delta\lambda}{1+0.75\Delta\lambda} \right) \Delta\lambda Min \left(\left[\frac{4\theta_m}{\theta_s} \right]; \left[1 + \left(\frac{4\theta_m}{\theta_s} - 1 \right) \frac{1+0.35\Delta\lambda}{1+1.95\Delta\lambda} \right] \right) \quad (3.10)$$

$$\theta_m = 0.5 (\theta_{FC} + \theta_{PWP}) \quad (3.11)$$

θ_{FC} und θ_{PWP} sind die Wassergehälter bei Feldkapazität und am Permanenten Welkepunkt [m³ m⁻³].

Am unteren Rand wird für den Wärmetransport eine Dirichlet-Randbedingung (konstante Temperatur) angenommen, der obere Rand wird durch die Strahlung sowie latente und sensible Wärmeflüsse beschrieben.

3.3 Aufbereitung und Einbindung verbesserter Bodeninformationen

Als Datengrundlage für Simulationen mit COSMO-CLM und TERRA diene bislang die globale „FAO-UNESCO Digital Soil Map of the World“ (DSMW, FAO-Unesco (1974)). Dieser globale Datensatz besitzt eine horizontale Auflösung von 5 Bogenminuten (≈ 10 km). Auf der Grundlage der Bodentexturklassen der oberen 30 cm des Bodens wurden die TERRA-Bodenarten abgeleitet. In der DSMW werden drei Texturklassen entsprechend verschiedener Feinbodenfraktionenanteile unterschieden (grobe Textur: <18% Ton und >65% Sand; mittlere Textur: <35% Ton und <65% Sand; feine Textur: >35% Ton). Liegen diese Texturklassen in einem überwiegenden Anteil vor, erfolgt die Zuordnung der TERRA-Bodenarten wie folgt: „Sand“ (grobe Textur), „Lehm“ (mittlere Textur), „Ton“ (feine Textur). Liegen grobe und mittlere Textur in etwa gleichen Anteilen vor, wird die Bodenart „Sandiger Lehm“ verwendet, bei etwa gleichen Anteilen der mittleren und feinen Textur die Bodenart „Lehmiger Ton“. Neben den Angaben zur Bodentextur enthält der Datensatz die Information zur Verteilung von 106 Bodeneinheiten. Die Einheiten „Inland-Wasser“ und „Ozean“ werden zur Ableitung der Land-See-Maske herangezogen; „Gletscher/Eis“ definieren die Klasse „Eis“, „Lithosole“ die Klasse „Gestein“, „Histosole“ die

Klasse „Torf“, „Salz“ und „Dünen“ werden als „Sand“ eingestuft (Doms et al. (2011)).

Da in der Zwischenzeit sowohl global als auch regional verbesserte Datensätze zur Verfügung stehen, bestand ein Ziel dieses Projektes darin, diese detaillierteren Informationen für die Modelle nutzbar zu machen. Für das Gebiet von Deutschland wurde der BÜK 1000 N Datensatz (Richter et al. (2007)) herangezogen. Darüber hinaus wurde der globale Datensatz der „Harmonized World Soil Database v1.1“ (HWSD, FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC (2009)) verwendet.

Der HWSD stellt durch Einbindung zusätzlicher Bodendaten in vielen Bereichen der Erde eine Verbesserung gegenüber dem DSMW-Datensatz dar. Er besitzt eine höhere horizontale Auflösung von 30 Bogensekunden (≈ 1 km) und ist vertikal in zwei Schichten unterteilt (0-30 cm, 30-100 cm). Die Ableitung der im Modell unterschiedenen Bodenarten sowie aller weiteren Oberflächenklassen erfolgte analog zum FAO-Datensatz.

Der BÜK 1000 N-Datensatz liegt im Maßstab 1:1.000.000 vor, wobei die Größe der Einzelpolygone mindestens 4 km^2 beträgt. In vertikaler Richtung liegen Informationen bis in eine Tiefe von 4 m vor. Anzahl und Tiefen der einzelnen Bodenschichten sind variabel. Jede Bodenschicht ist unter anderem durch die Feinbodenart nach der Deutschen Bodensystematik (Sponagel (2005)) charakterisiert. Um aus den im BÜK 1000 N Datensatz verfügbaren Feinbodenarten die in TERRA unterschiedenen Bodenarten abzuleiten, wurden zunächst die mittleren Sand-, Schluff- und Tonanteile abgeschätzt. Anhand dieser Anteile wurden die FAO-Texturklassen abgeleitet. Die Ableitung der Land-See-Maske erfolgte anhand der Einheiten Meeresgewässer, Binnengewässer und Flächen in der Gezeitenzone. Für Eis gibt es in den BÜK-Daten keinen Eintrag. Die Klasse Gestein ist in der Nutzungstabelle von BÜK zusammen mit Dünen, offenen Flächen, Stränden und Felsen zusammengefasst, und konnte somit nicht als eigene Klasse separiert werden. Torf wurde aus der Einheit Histosole bestimmt.

BÜK- und HWSD-Datensatz wurden auf einem gemeinsamen Gitter zusammengefügt. Dazu wurden die im Vektorformat vorliegenden BÜK-Daten auf die horizontale Auflösung des globalen Datensatzes der HWSD gerastert (30 Bogensekunden). Vertikal wurde die Bodeninformation auf 30 Schichten verteilt: bis in 1 m Tiefe auf 5 cm mächtige Schichten, von 1 m bis 2 m Tiefe auf 10 cm mächtige Schichten.

Um die 3-dimensionale Bodenartenverteilung auf dem benötigten Modellgitter zu generieren, werden bislang zunächst die einzelnen Schichten mit dem Präprozessor von COSMO-CLM (Extpar) generiert. Anschließend werden die Informationen der einzelnen Schichten zu einem 3D-Feld zusammengefügt und in einer einzelnen Datei im NetCDF-Format zusammengefasst. Zukünftig sollte dieser Arbeitsschritt bereits in Extpar erfolgen.

4 Validierung an Stationsdaten

Um zu testen, ob die neuen Modell-Entwicklungen eine verbesserte Beschreibung beobachteter Bodenwassergehälter und -temperaturen ermöglichen, wurden Simulationsexperimente an zwei verschiedenen Standorten durchgeführt (Lindenberg und Linden, Deutschland).

4.1 Datengrundlage

Lindenberg

Für den Standort Lindenberg wurde eine Beobachtungs-Zeitreihe von Oktober 2002 bis Dezember 2009 für die Station Falkenberg verwendet, die im Rahmen des Projektes CEOP (Coordinated Energy and water cycle Observation Project) zur Verfügung steht. Die Station Falkenberg ist von Grasland umgeben. Daher wurden die Vegetationsparameter auf die mittleren Werte eines Graslandes gesetzt. Der Boden weist sehr hohe Sandgehalte auf und bildet bis in eine Tiefe von 120 cm drei verschiedene Horizonte aus. Eine nähere Charakterisierung der einzelnen Horizonte findet sich in Tabelle 4.1. Als meteorologische Antriebsdaten wurden folgende Größen verwendet: Temperatur (2 m), Niederschlag, Windgeschwindigkeit (10 m), relative Feuchte (2 m), abwärts gerichtete lang- und kurzwellige Strahlung. Fehlwerte (<1%) wurden linear interpoliert. Für die Validierung wurden Messungen des Bodenwassergehaltes und der Bodentemperaturen in verschiedenen Messtiefen verwendet (Wassergehalt: 8 cm, 15 cm, 30 cm, 45 cm, 60 cm, 90 cm; Temperatur: 5 cm, 10 cm, 15 cm, 20 cm, 30 cm, 45 cm, 50 cm, 60 cm, 90 cm, 100 cm, 120 cm, 150 cm). Alle Messdaten lagen in halbstündlicher Auflösung vor. Zur Initialisierung des Modells wurden die gemessenen Wassergehälter und Temperaturen linear auf die einzelnen Modellschichten interpoliert.

Linden

Für den Standort der Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden wurden Daten für den Zeitraum 2004-2007 verwendet. Die meteorologischen Antriebsdaten (siehe Beispiel Lindenberg) lagen in halbstündlicher Auflösung vor. Für die kurzwellige Strahlung traten $\approx 3\%$ Fehlwerte auf. Da die Zeiträume der Datenausfälle zu lang für eine lineare Interpolation waren, wurden die Fehlwerte durch mittlere Werte ersetzt, die für den zur Verfügung stehenden Messzeitraum bestimmt wurden. Die restlichen meteorologischen Datenreihen waren lückenfrei. Messungen für den Bodenwassergehalt erfolgten an Werktagen zu je einem Zeitpunkt in verschiedenen Tiefen (2 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm, 60 cm). Die Bodentemperatur wurde halbstündlich in Tiefen von 5 cm, 10 cm, 20 cm gemessen. Es wurden die Vegetationsparameter eines Graslandes verwendet. Zur Charakterisierung der Bodeneigenschaften wurden die Werte der Bodeneinheit 2 verwendet

Tabelle 4.1: Bodenkennwerte für den Standort Lindenberg

Horizont	Ap	Al	Bt
Tiefe [cm]	0-30 cm	30-60 cm	60-120 cm
Sand [%]	74	74	60
Schluff [%]	22	22	25
Ton [%]	4	4	15
Porenvolumen [%]	37	36	34
Feldkapazität [%]	16	18	24
Permanenter Welkepunkt [%]	4	3	11
Gesättigte Hydraulische Leitfähigkeit [cm/d]	110	80	20
TERRA Bodenart	Sandiger Lehm	Sandiger Lehm	Sandiger Lehm

Tabelle 4.2: Bodenkennwerte für den Standort Linden

Horizont	Ah	M	MSw	II Sw	III Sdl
Tiefe [cm]	0-12 cm	12-20 cm	20-50 cm	50-85 cm	85-110 cm
Sand [%]	10	10	15	27	67
Schluff [%]	58	55	50	36	16
Ton [%]	32	35	35	37	17
Porenvolumen [%]	65	53	46	45	45
TERRA Bodenart	Lehmiger Ton	Lehmiger Ton	Lehmiger Ton	Lehmiger Ton	Sandiger Lehm

(Tabelle 4.2, Kammann et al. (2000)). Der Boden weist bis in eine Tiefe von 110 cm fünf verschiedene Horizonte auf. Die oberen vier Horizonte besitzen einen hohen Tongehalt, der darunter befindliche Horizont ist sehr sandig.

In Abb. 4.1 sind die beobachteten Wassergehälter und das Porenvolumen in den verschiedenen Messtiefen dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Wassergehälter das Porenvolumen zum Teil stark überschreiten. Eine Überschreitung des Porenvolumens durch den Wassergehalt ist nicht realistisch, da der maximale Wassergehalt dem Porenvolumen entspricht (= gesättigter Zustand). Da die Bodeneigenschaften nicht direkt am Messpunkt der Wassergehälter bestimmt wurden, unterliegen die Werte des Porenvolumens einer gewissen Unsicherheit. In sehr tonreichen Böden ist die Porosität zudem aufgrund von Quellungs- und Schrumpfungs- sowie anderen Prozessen variabel (Hillel (2004)). Solche Prozesse sind in TERRA-ML nicht berücksichtigt. Da die Überschreitungen aber sehr groß sind, erscheint es unwahrscheinlich, dass Quellungsprozesse die alleinige Ursache sind. In größeren Tiefen wirkt die Auflast des Bodens der Aufweitung des Porenraums entgegen. Eine weitere

mögliche Ursache der Abweichungen ist eine ungeeignete Kalibrierung der TDR-Sensoren, wie beispielsweise für den Standort Cabauw festgestellt (siehe Experiments Documentation (Version vom 09.02.2011): <http://www.knmi.nl/bosveld/>). Wie auch für den Datensatz in Cabauw empfohlen, werden die gemessenen Wassergehälter daher nur für einen qualitativen Vergleich zu den Modellergebnissen herangezogen.

4.2 Modelleinstellungen

Der Zeitschritt für die Simulationen betrug 1 min. Das Einlesen der Randwerte sowie die Ausgabe der Modellergebnisse erfolgte stündlich. Bis in eine Tiefe von 1.50 m wurde eine Diskretisierung von 1 cm verwendet, anschließend wurden die Standard-Tiefen von TERRA-ML beibehalten.

4.3 Ergebnisse

4.3.1 Einfluss der Form der Richards-Gleichung auf den simulierten Wassergehalt

Um den Einfluss des neuen Ansatzes zur Beschreibung des Wasserflusses im Boden zu untersuchen, wurden zunächst Simulationen für ein homogenes Bodenprofil durchgeführt (Lindenberg: Sandiger Lehm, Linden: Lehmiger Ton). Dabei wurde zum Einen die θ -basierte Richards-Gleichung verwendet und zum Anderen die gemischte Richards-Gleichung. Die Ergebnisse am Standort Lindenberg sind vergleichend zu den beobachteten Wassergehältern in Abb. 4.2 dargestellt. Der neue Ansatz führt in den oberen Bodenschichten zu einer Annäherung an die Beobachtungen, in tieferen Schichten hingegen ist die Abweichung größer. Die Dynamik des Wasserflusses wird weitgehend gut abgebildet. In den Sommermonaten, wo dem Boden durch hohe Verdunstungsraten verstärkt Wasser entzogen wird, werden vor allem in oberflächennahen Schichten sehr niedrige Wassergehälter gemessen. Diese können durch das Modell nicht wiedergegeben werden. Der kleinste simulierte Wassergehalt entspricht dem Permanenten Welkepunkt eines Sandigen Lehms ($0.1 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$). Die niedrigeren Wassergehälter im Winter erklären sich dadurch, dass ein zusätzlicher Teil des Wassers gefroren ist.

Am Standort Linden zeigen sich für diesen Testfall nur geringe Abweichungen der simulierten Wassergehälter (Abb. 4.3). Tendentiell generiert die gemischte Form der Richards-Gleichung etwas niedrigere Wassergehälter als die θ -Form.

4.3.2 Einfluss der Berücksichtigung der Bodenheterogenität auf den simulierten Wassergehalt

Von Interesse war der Einfluss einer detaillierteren Beschreibung der Bodeneigenschaften gegenüber der vereinfachten Betrachtung eines homogenen Bodenprofils. Da am Standort Lindenberg alle drei Horizonte die selbe in TERRA nicht unterschiedene Bodenart aufwiesen (Sandiger Lehm), wurden die hydraulischen und thermischen Parameter soweit

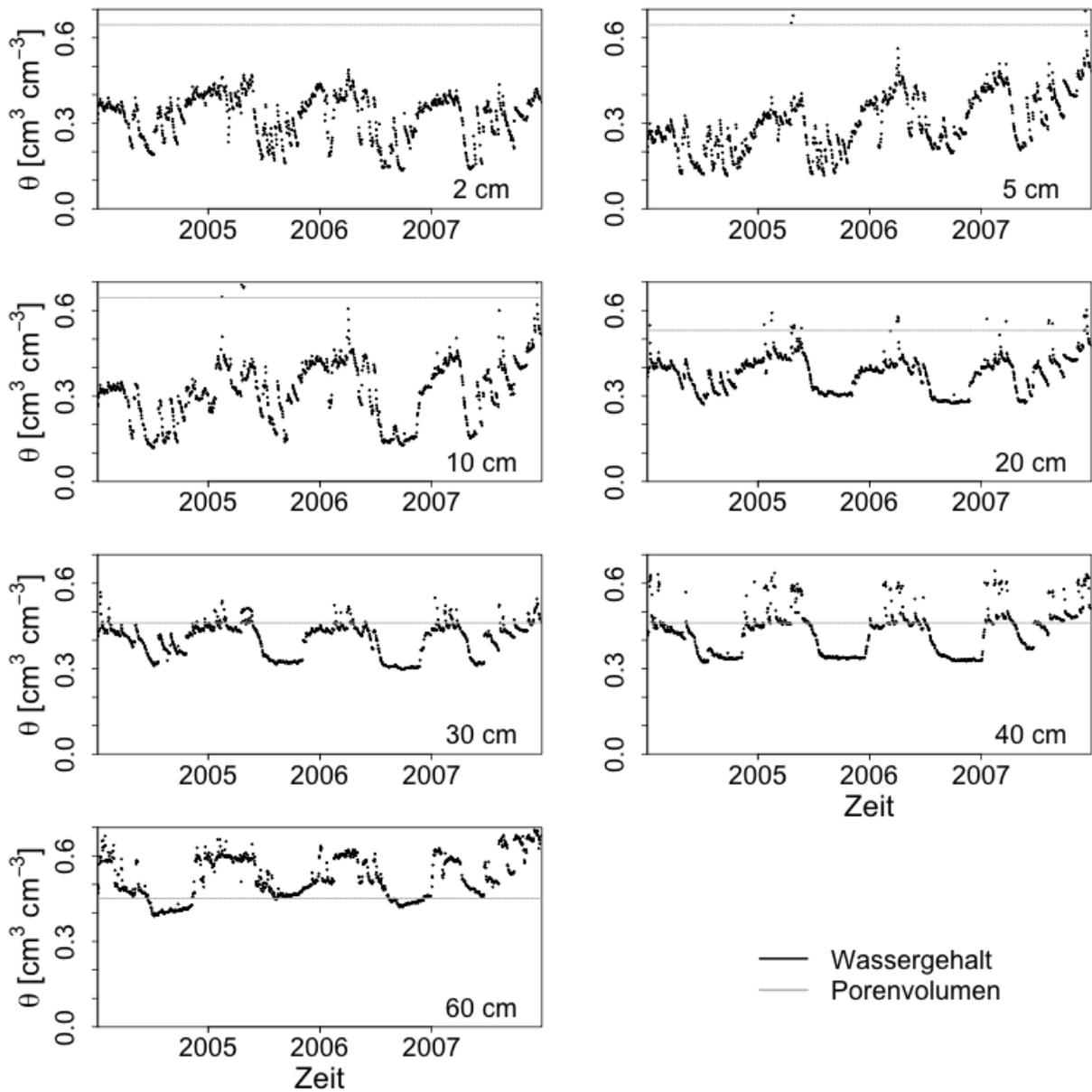


Abbildung 4.1: Beobachtete Wassergehälter und Porenvolumen am Standort Linden

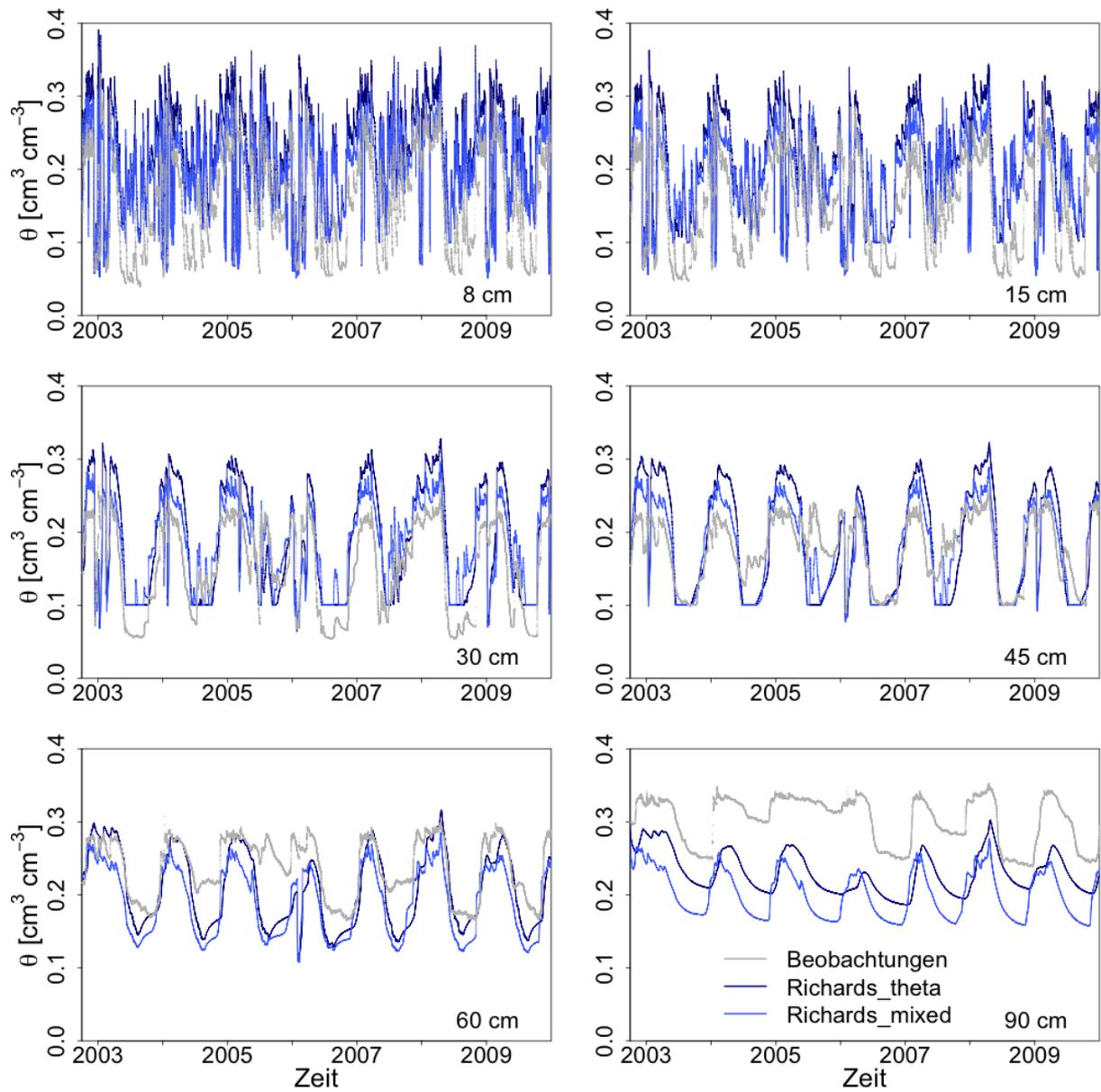


Abbildung 4.2: Simulation des Bodenwasserghaltes mit der θ -basierten und gemischten Richards-Gleichung am Standort Lindenberg

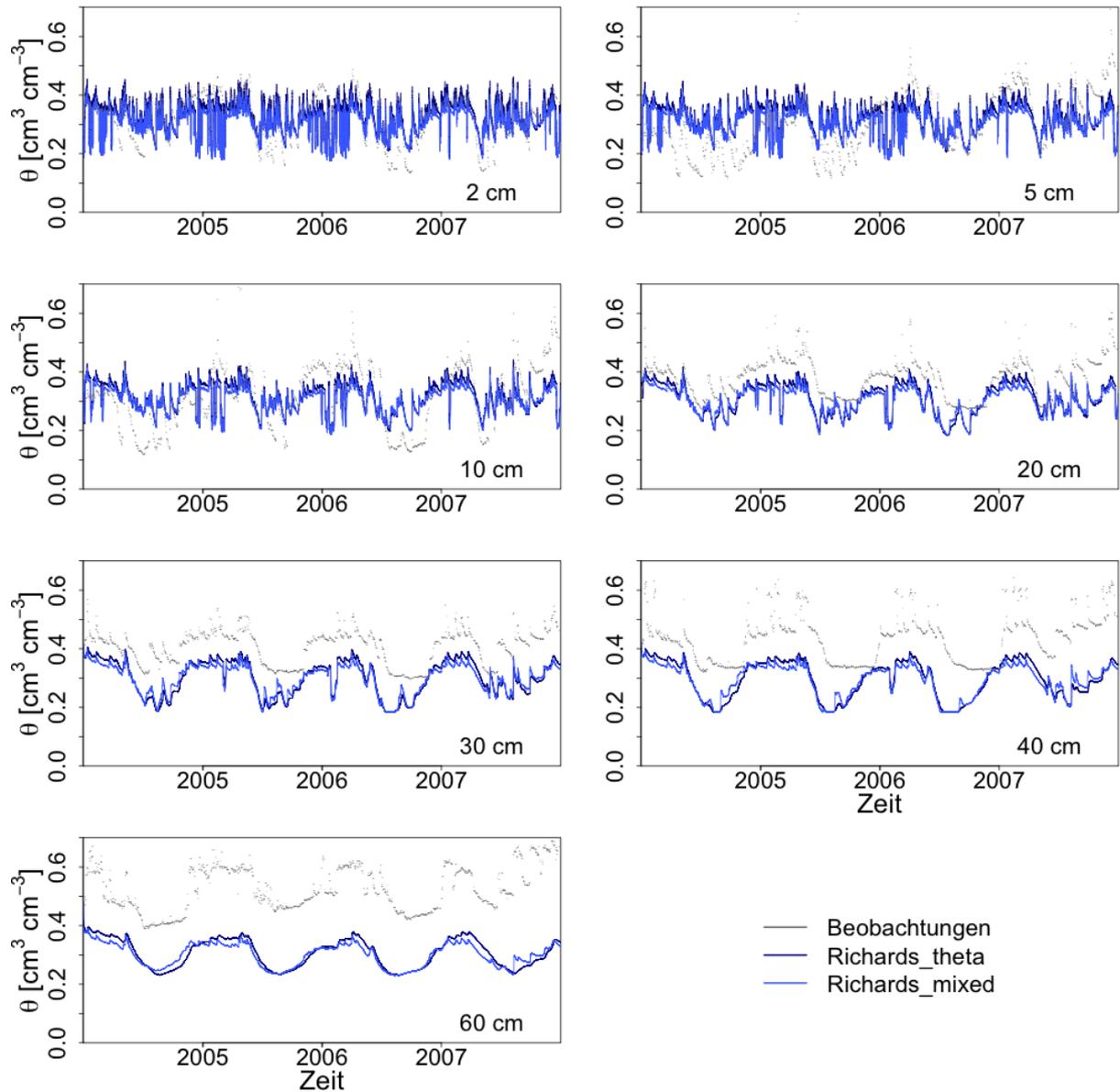


Abbildung 4.3: Simulation des Bodenwassergehaltes mit der θ -basierten und gemischten Richards-Gleichung am Standort Linden

möglich durch die am Standort gemessenen Werte definiert (Tab. 4.1). Parameter, für die keine Messwerte vorlagen, wurden interpoliert. Die Ergebnisse sind in Abb. 4.4 gegenübergestellt. Für das heterogene Bodenprofil werden die Wassergehälter systematisch unterschätzt. Im Gegensatz zum homogenen Boden können durch das heterogene Profil im Sommer aber auch deutlich niedrigere Wassergehälter simuliert werden.

Wie bereits für den Standort Lindenberg kommt es auch in Linden durch die Zuordnung zu den TERRA-Bodenarten zu einer starken „Homogenisierung“ des Bodenprofils. So werden die oberen vier Bodenhorizonte durch die selbe Bodenart (Lehmiger Ton) charakterisiert. Lediglich der untere Horizont weist eine andere Bodenart auf (Sandiger Lehm). Bereits diese grobe Beschreibung der heterogenen Bodenbeschaffenheit wirkt sich aber deutlich auf die simulierten Wassergehälter aus, wobei die Wassergehälter des heterogenen Profils in allen beobachteten Horizonten über denen des homogenen Bodens liegen (Abb. 4.5). Wenn die Eigenschaften der einzelnen Horizonte direkt aus den Messdaten abgeleitet werden und die Heterogenität des Bodenprofils somit stärker berücksichtigt wird, treten deutlich größere Abweichungen auf. In den oberflächennahen Schichten liegen die Wassergehälter des direkt anhand der gemessenen Bodenparameter charakterisierten Bodenprofils deutlich über denen eines homogenen und stark vereinfachten heterogenen Profils (Abb. 4.5). In den unteren Schichten sind die Abweichungen weniger stark ausgeprägt. Die Wassergehälter des stärker heterogenen Profils liegen hier meist unterhalb der Wassergehälter der beiden anderen Profile.

4.3.3 Simulation der Bodentemperatur

Die Simulation der Bodentemperaturen ist mit weniger Unsicherheiten verbunden als die des Wassergehaltes. Insgesamt werden die beobachteten Temperaturverläufe durch das Modell gut beschrieben (Abb. 4.6 und 4.7). Es gibt allerdings auch deutlich erkennbare Modellschwächen. So wird die Dynamik der Bodentemperatur in Winterperioden durch das Modell nicht realistisch wiedergegeben (Abb. 4.8). Der Verlauf folgt deutlich der atmosphärischen Temperatur. Der wärmeisolierende Effekt der Schneedecke sowie weitere thermisch relevante Prozesse werden durch das Modell nicht abgebildet. Der Einfluss verschiedener Bodeneigenschaften auf die Simulation der Bodentemperatur ist wesentlich geringer ausgeprägt als für den Wassergehalt und wird hier nicht näher beschrieben.

4.4 Diskussion

Die verschiedenen Simulationsexperimente haben gezeigt, dass die Berücksichtigung der verschiedenen hydraulischen Eigenschaften innerhalb eines Bodenprofils einen sehr starken Einfluss auf den simulierten Boden-Wassergehalt hat.

Derzeit werden in TERRA nur fünf verschiedene Bodenarten unterschieden. Am Standort Lindenberg konnte der Heterogenität des Bodens durch die Zuordnung der TERRA-Bodenarten zu den einzelnen Horizonten nicht, in Linden nicht in ausreichendem Maße

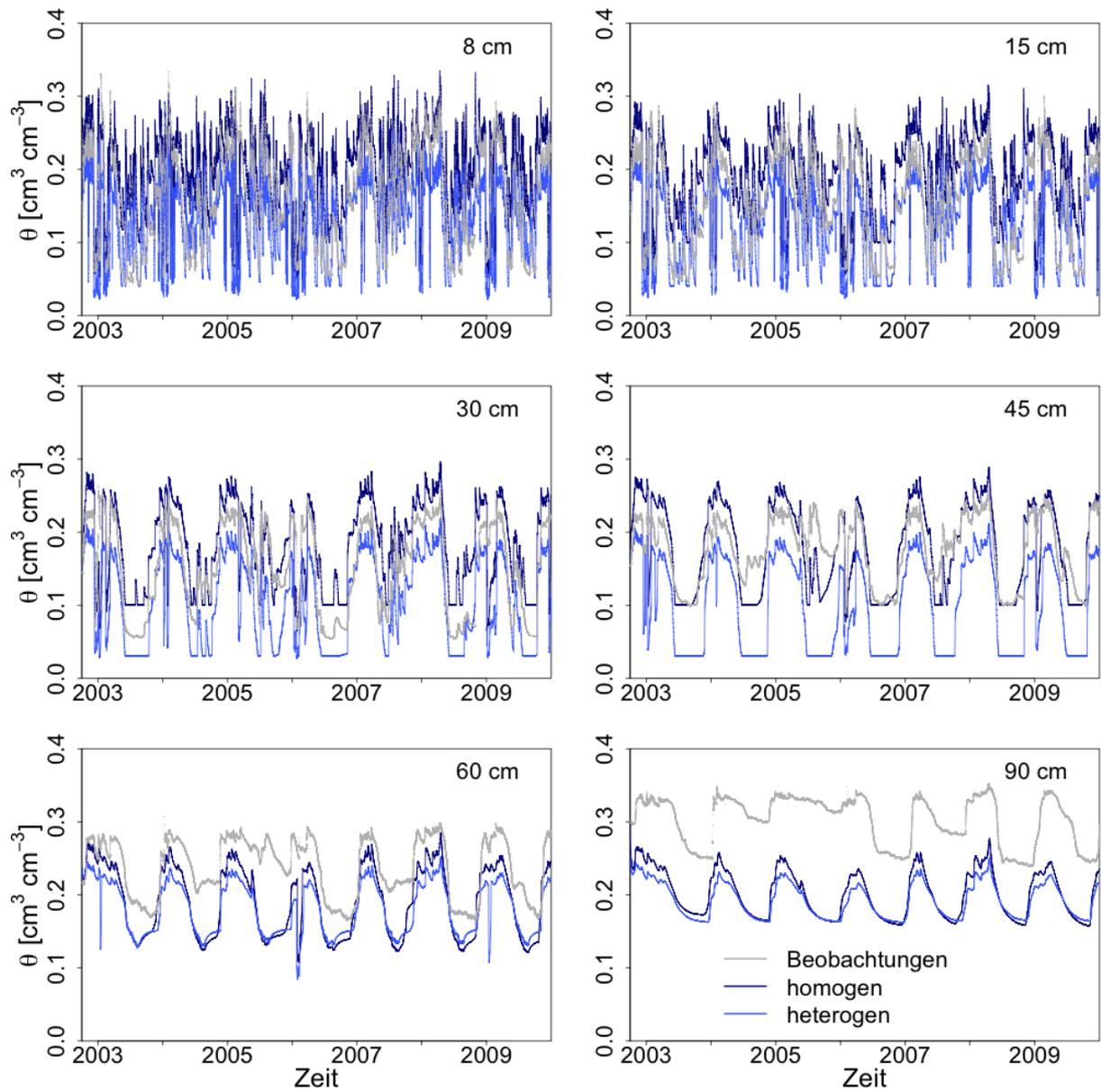


Abbildung 4.4: Simulation des Bodenwassergehaltes für ein homogenes und ein heterogenes Bodenprofil am Standort Lindenberg

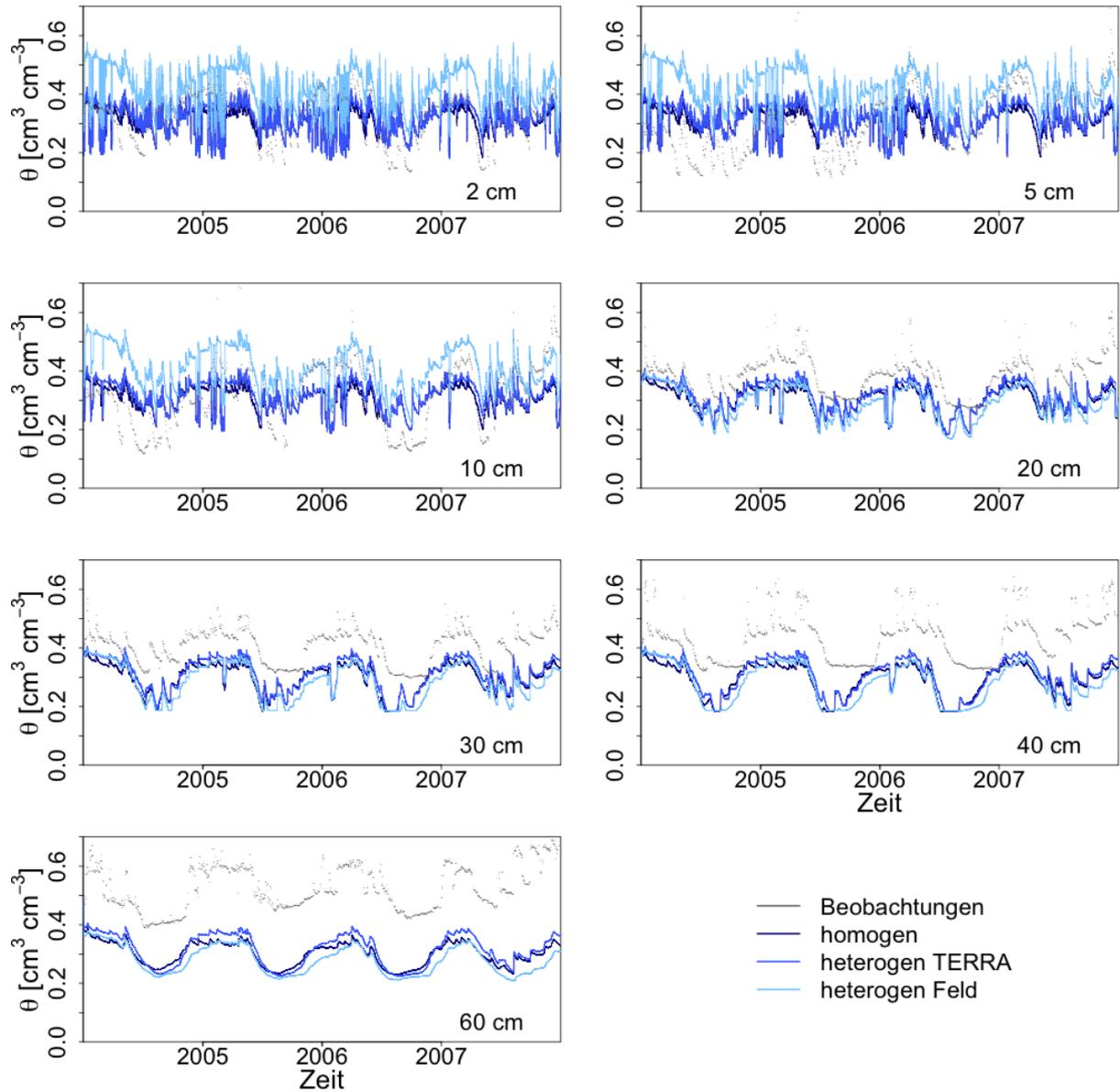


Abbildung 4.5: Simulation des Bodenwassergehaltes für ein homogenes und ein heterogenes Bodenprofil (mit Bodenklassen nach TERRA und standortspezifischer Charakteristik) am Standort Linden

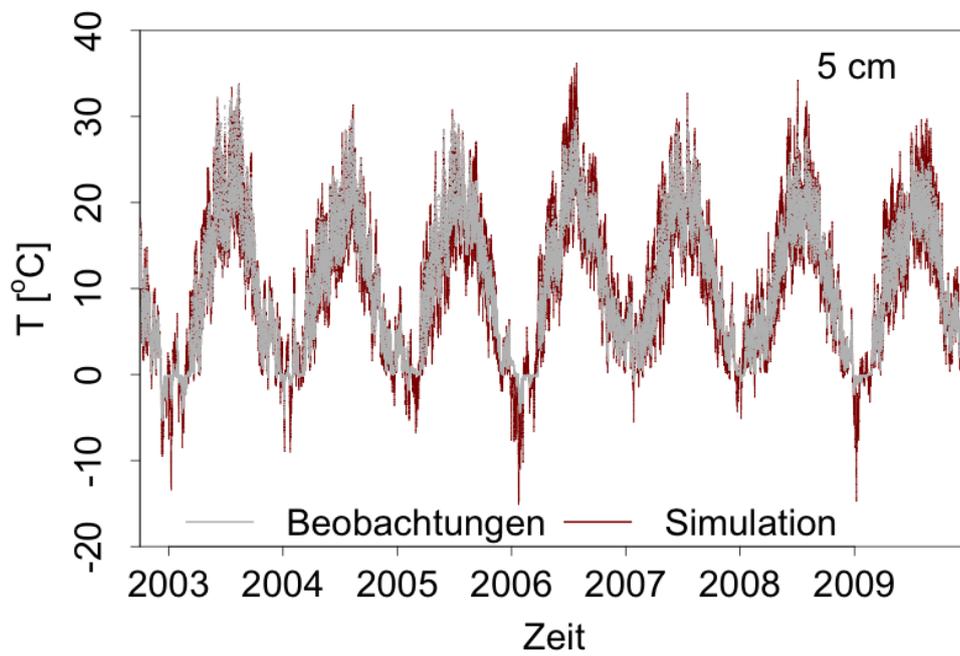


Abbildung 4.6: Simulation der Bodentemperatur am Standort Lindenberg

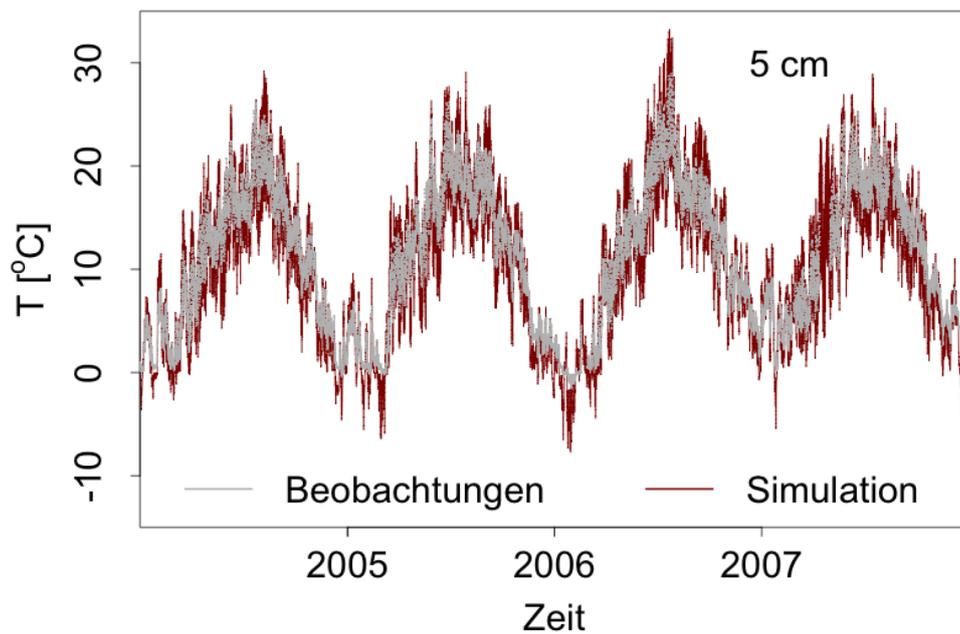


Abbildung 4.7: Simulation der Bodentemperatur am Standort Linden

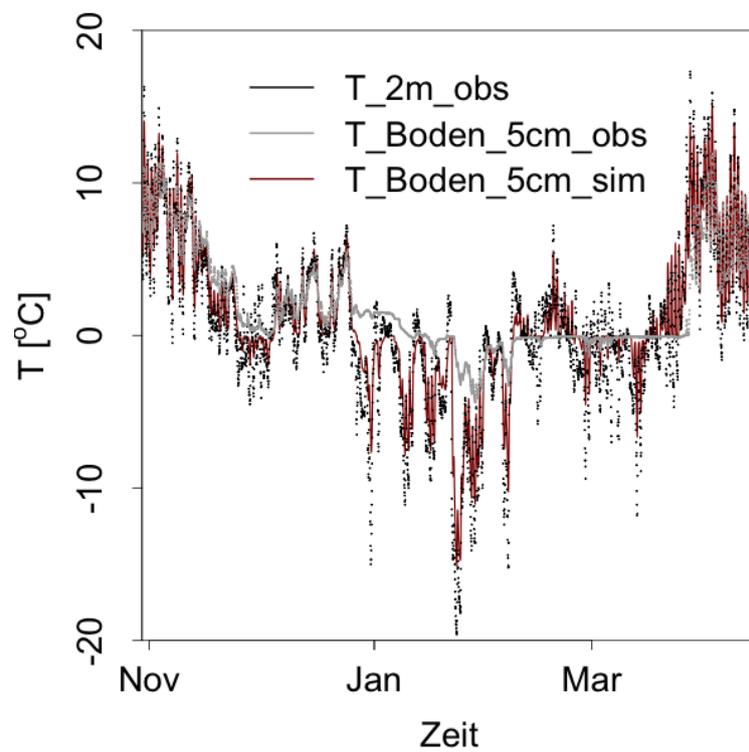


Abbildung 4.8: Simulation der Bodentemperatur (5 cm) am Standort Lindenberg im Vergleich zur beobachteten Bodentemperatur (5 cm) und Atmosphärentemperatur (2 m) im Winter 2005/2006

Rechnung getragen werden. Eine detailliertere Beschreibung auf der Grundlage der im Feld erhobenen Bodenparameter hatte einen starken Einfluss auf die simulierten Wassergehälter. Um realistischere Simulationsergebnisse zu erhalten, sollten die Bodeneigenschaften zukünftig detailgetreuer beschrieben werden. Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben ist die Datengrundlage dafür vorhanden. Im HWSD-Datensatz stehen die prozentualen Anteile von Sand, Schluff und Ton zur Verfügung. Der BÜK-Datensatz enthält Angaben zu den im Rahmen der Deutschen Bodensystematik unterschiedenen Bodenarten („Bodendreieck“, Sponagel (2005)). Auch zusätzliche Parameter, die beispielsweise eine genauere Ableitung hydraulischer Eigenschaften auf der Grundlage von Pedotransferfunktionen ermöglichen, sind in diesen Datensätzen enthalten.

Eine genauere Beschreibung der hydraulischen Eigenschaften des Bodenprofils ist die Grundlage für eine exaktere Simulation des Boden-Wassergehaltes. Der Vergleich simulierter und gemessener Wassergehälter an beiden Standorten zeigt aber, dass die Simulationen unter Berücksichtigung der heterogenen Bodeneigenschaften nicht in allen Fällen näher an den Beobachtungen liegen. Dafür gibt es verschiedene Gründe.

Die Simulation des Wasserflusses wird entscheidend durch die Obere und Untere Randbedingung beeinflusst. Für Validierungsexperimente wäre es am besten, beide Ränder auf Grundlage von Beobachtungsdaten zu definieren. Diese Art der Randbedingung ist in TERRA derzeit nicht implementiert. Eine weitere Einschränkung für diesen Ansatz ist die Datenverfügbarkeit für Feldstudien. Hier könnten Lysimeterexperimente herangezogen werden. Zeng and Decker (2009) diskutieren Defizite der Free-Drainage-Randbedingung und schlagen einen neuen Ansatz vor.

Der Wasserfluss am oberen Rand wird unter anderem stark durch die Vegetation beeinflusst. Derzeit wird im Modell nur ein sehr vereinfachter statischer Vegetationsansatz verwendet. Durch die Integration einer Vegetationsphänologie und einer Dynamischen Vegetation könnten hier Verbesserungen erzielt werden.

Die simulierten Bodentemperaturen stimmen im Allgemeinen gut mit den beobachteten Werten überein. Dennoch zeigten sich bei der Simulation des Wärmetransports noch Defizite des Modells. Schnee hat einen sehr starken Einfluss auf die Bodentemperatur (Zhang (2005)). Die verschiedenen Wirkungen von Schnee auf den Wärmefluss im Boden werden durch das Modell nicht realistisch abgebildet, was sich in starken Abweichungen zur beobachteten Dynamik der Bodentemperatur widerspiegelt. Da in TERRA derzeit ein sehr vereinfachter Ansatz für die Wärmekapazität verwendet wird, der lediglich die Abhängigkeit von einem konstanten Wassergehalt (nur flüssiges Wasser) berücksichtigt, könnte eine realistischere Formulierung zusätzlich zu verbesserten Simulationsergebnissen führen. Auch eine Verbesserung des Bodenwasserflusses würde sich dann positiv auf die Beschreibung des Wärmetransports auswirken.

5 Sensitivitätsstudien im Main-Einzugsgebiet

Um den Einfluss der verbesserten Bodeninformation für das Main-Einzugsgebiet zu testen, wurden fünf verschiedene Szenarien untersucht:

1. homogenes Bodenprofil nach FAO (aus 0-30 cm)
2. homogenes Bodenprofil nach HWSD (aus 0-30 cm)
3. heterogenes Bodenprofil nach HWSD (interpoliert auf TERRA-Standard-Schichten)
4. homogenes Bodenprofil nach BUEK-HWSD (aus 0-5 cm)
5. heterogenes Bodenprofil nach BUEK-HWSD (interpoliert auf TERRA-Standard-Schichten)

Für die Untersuchung wurde der Zeitraum 2001-2010 betrachtet.

5.1 Modelleinstellungen

Das Simulationsgebiet für das Main-Einzugsgebiet ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Es wurde auf einem rotierten Gitter der Gitterweite 0.01° (≈ 1 km) gerechnet. Die Rotation eines lon-lat-Gitters durch eine geeignete Verschiebung der Pole minimiert die aus der zugrundegelegten Kugelform der Erde resultierenden Größenunterschiede der Gitterflächen innerhalb des Simulationsgebietes. Eine vertikale Diskretisierung, welche die verfügbare Bodeninformation vollständig abbildet, war mit den verfügbaren Rechenressourcen nicht umsetzbar. Daher wurden die Standardwerte zur vertikalen Diskretisierung von TERRA verwendet (7 Schichten zunehmender Mächtigkeit + 1 „Klimaschicht“). Der Rechenschritt betrug 5 min. Einlesen und Ausgabe der Daten erfolgten stündlich.

5.2 Daten

Die verwendeten Bodendaten wurden bereits in Kapitel 3.3 beschrieben. In Abb. 5.2 ist die Verteilung der Bodenarten für die jeweils obere Schicht der drei Datensätze innerhalb des Simulationsgebietes dargestellt. Sowohl HWSD als auch BUEK-HWSD weisen eine wesentlich höhere Untergliederung auf. Auch hinsichtlich der Verbreitung einzelner Bodenarten sind deutliche Unterschiede erkennbar.

Für den meteorologischen Antrieb wurden die Reanalysedaten des ERA-Interim-Datensatzes in dreistündlicher zeitlicher und 0.75° räumlicher Auflösung verwendet (Simmons et al. (2006)). Die Werte wurden linear auf einzelne Stunden und mittels „Nearest

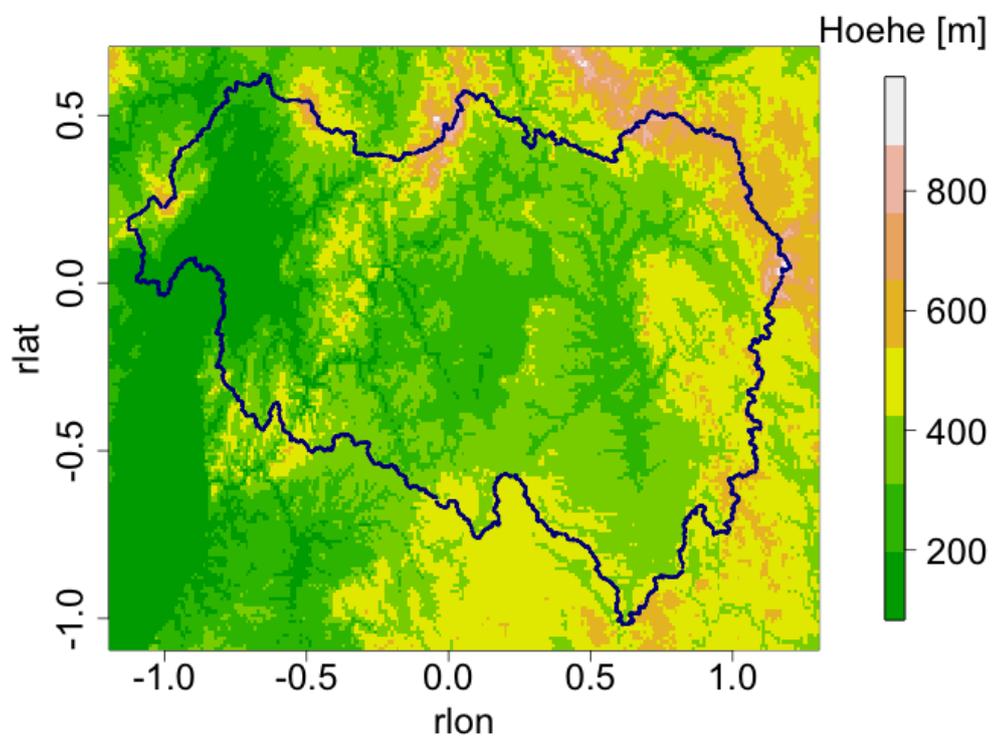


Abbildung 5.1: Modellgebiet mit Main-Einzugsgebiet (blau)

Neighbour“-Verfahren auf das Rechengitter interpoliert. Die Temperatur und der Luftdruck wurden außerdem unter der Annahme einer linearen Abnahme der Temperatur um 0.65 K pro 100 m höhenkorrigiert.

5.3 Ergebnisse

Um den Einfluss der verbesserten Bodendatensätze auf die Simulation des Wasser- und Wärmehaushaltes des Main-Einzugsgebietes aufzuzeigen, wurden die 10-jährigen Mittelwerte verschiedener Variablen analysiert - die Bodentemperatur und der Bodenwassergehalt in der obersten Bodenschicht sowie die latenten und sensiblen Wärmeflüsse. In Abb. 5.3 sind die Differenzen der simulierten Bodenwassergehälter in der obersten Bodenschicht zwischen den verbesserten Bodendatensätzen und dem FAO-Datensatz dargestellt. Für alle Datensätze sind deutliche Abweichungen zur FAO-Simulation erkennbar. Für den homogenen und heterogenen Boden des HWSD-Datensatzes sind kaum Unterschiede erkennbar. Die Ergebnisse des BUEK-HWSD-Datensatzes unterscheiden sich hingegen deutlich für homogene und heterogene Bodenprofile. Gleiches gilt für die Differenzen der simulierten Bodentemperaturen in der obersten Bodenschicht (Abb. 5.4) sowie der latenten (Abb. 5.5) und sensiblen Wärmeflüsse (Abb. 5.6).

5.4 Diskussion

Die neuen Boden-Datensätze enthalten sowohl horizontal als auch vertikal deutlich mehr Informationen zur Bodenbeschaffenheit als der bislang verwendete FAO-Datensatz. Die Nutzung dieser Datensätze hat einen deutlichen Einfluss auf die Simulation des Wasser- und Wärmehaushaltes, wie am Beispiel verschiedener Variablen für das Main-Einzugsgebiet gezeigt wurde. Es wurden deutliche Unterschiede in den simulierten Bodenwassergehältern und -temperaturen sowie in den latenten und sensiblen Wärmeflüssen festgestellt.

Für den HWSD-Datensatz zeigten die Variablen in der obersten Bodenschicht im homogenen und heterogenen Boden nur geringe Unterschiede. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich die beiden Bodenschichten des HWSD-Datensatzes hinsichtlich ihrer Verteilung der TERRA-Bodenklassen im Main-Einzugsgebiet nur sehr geringfügig unterscheiden (nicht gezeigt). Ob sich dieser Umstand bereits aus der Primärinformation des HWSD-Datensatzes ergibt oder aus dem starken Informationsverlust durch die Übersetzung der Korngrößenanteile in die TERRA-Bodenklassen resultiert, wurde bislang nicht analysiert.

Für den BUEK-HWSD-Datensatz wird der Einfluss der vertikalen Heterogenität des Bodens hingegen deutlich sichtbar. Auch in diesem Fall ging ein Teil der primären Bodeninformation verloren, zum einen durch die Ableitung der TERRA-Bodenklassen, zum anderen aber auch durch die relativ grobe vertikale Rechenaufösung des Modells, die aus Rechenzeitgründen erforderlich war. Trotzdem wurde schon ein erheblicher Einfluss festgestellt.

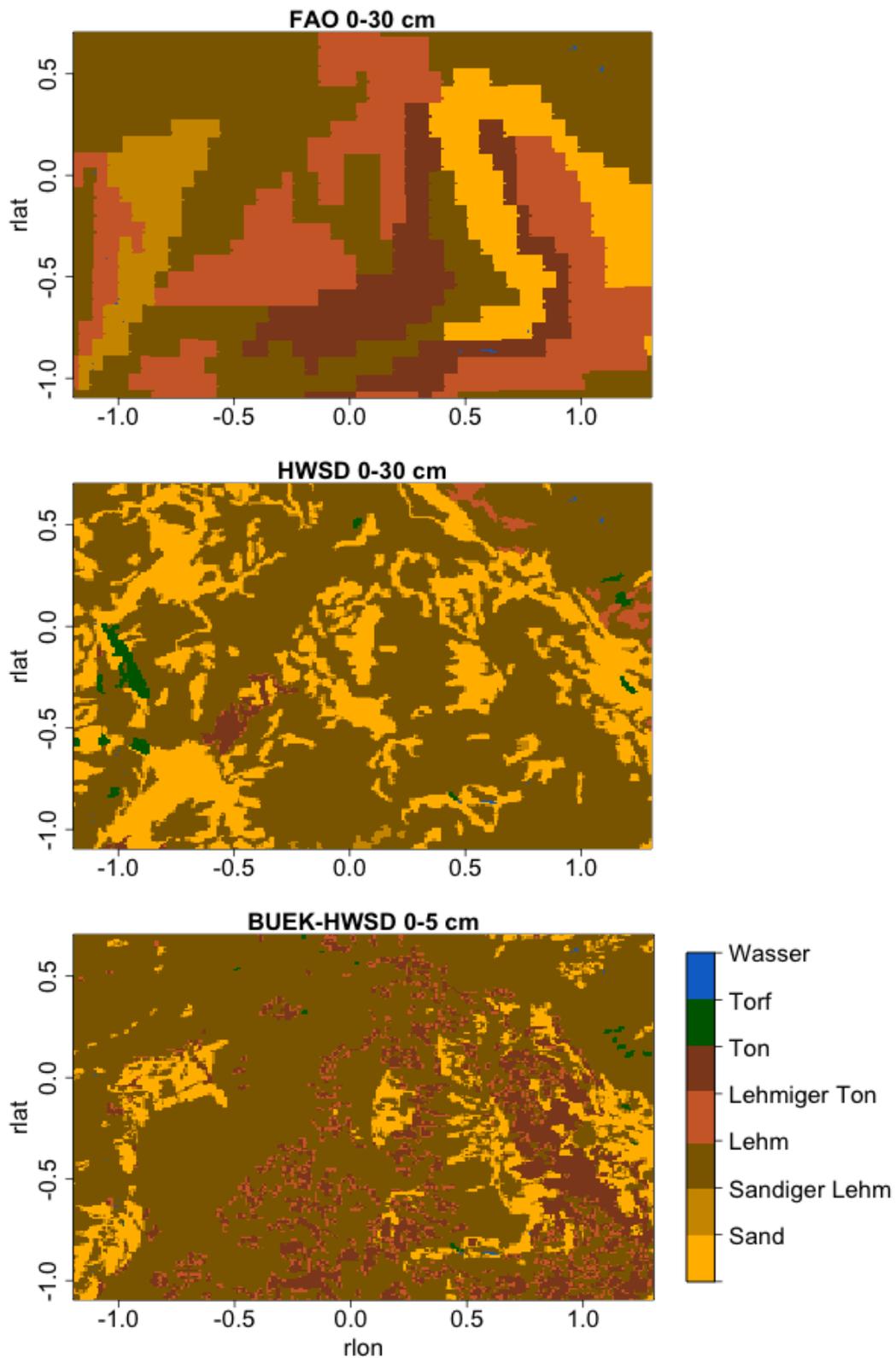


Abbildung 5.2: Bodenklassenverteilung im oberen Horizont der FAO-, HWSD- und BUEK-HWSD-Datensätze

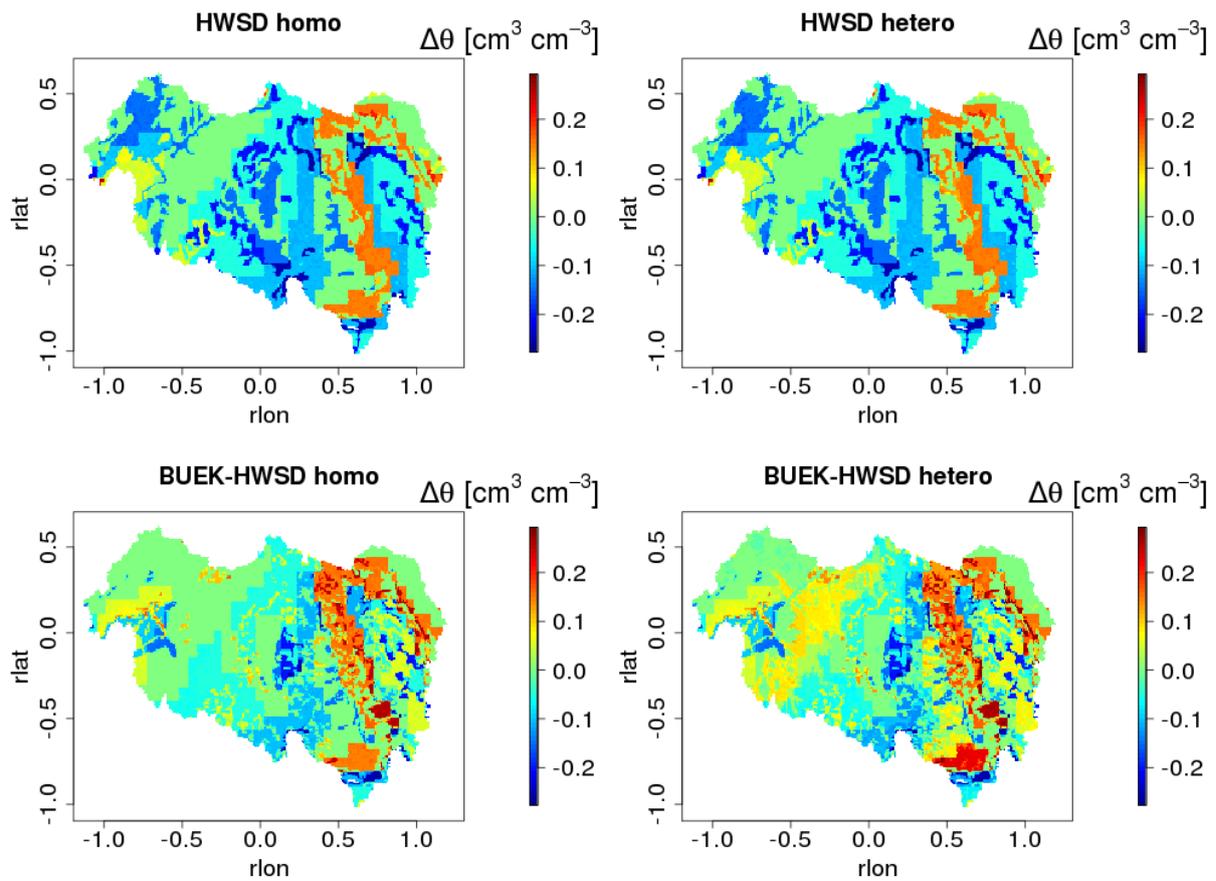


Abbildung 5.3: Differenzen der simulierten 10-jährigen mittleren Wassergehälter der obersten Bodenschicht der neuen Bodendatensätze (für vertikal homogenen und heterogenen Boden) zum FAO-Datensatz

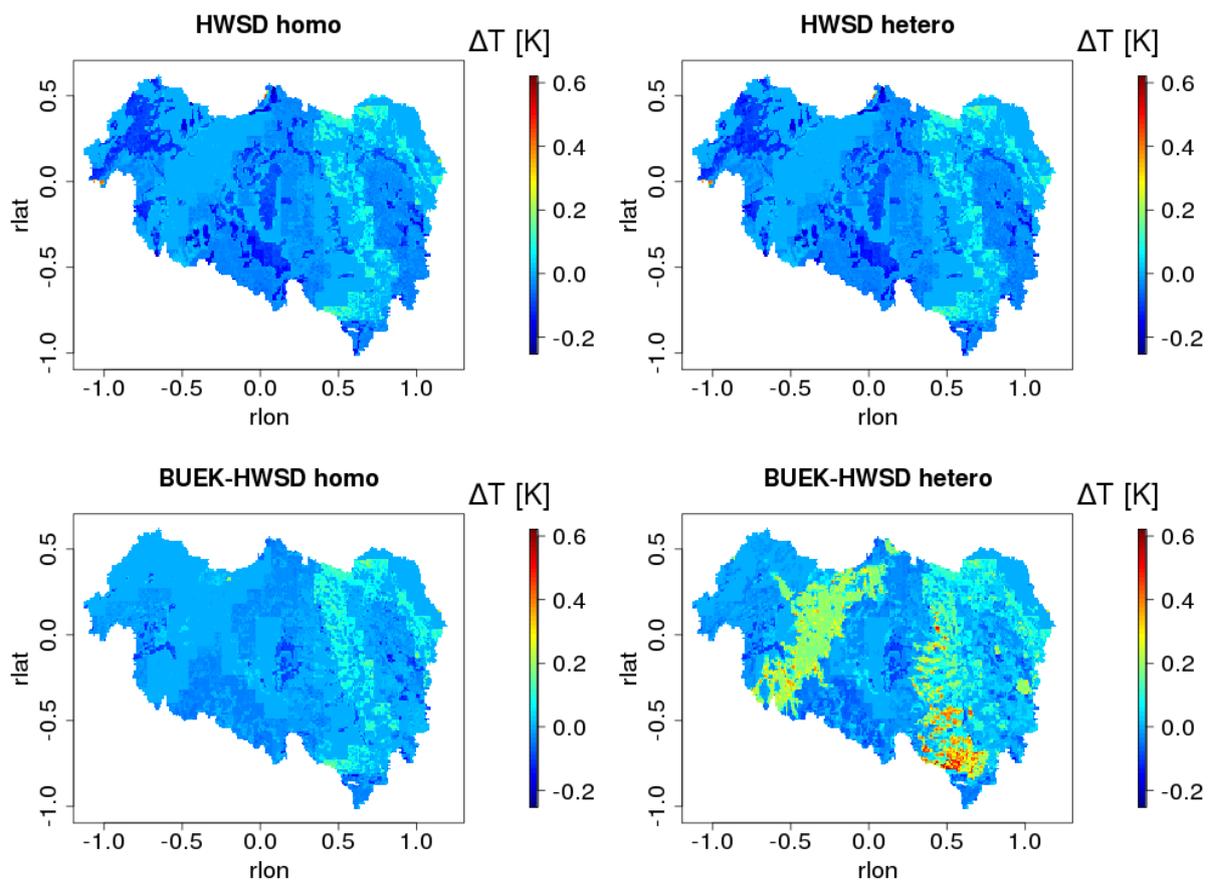


Abbildung 5.4: Differenzen der simulierten 10-jährigen mittleren Temperaturen der obersten Bodenschicht der neuen Bodendatensätze (für vertikal homogenen und heterogenen Boden) zum FAO-Datensatz

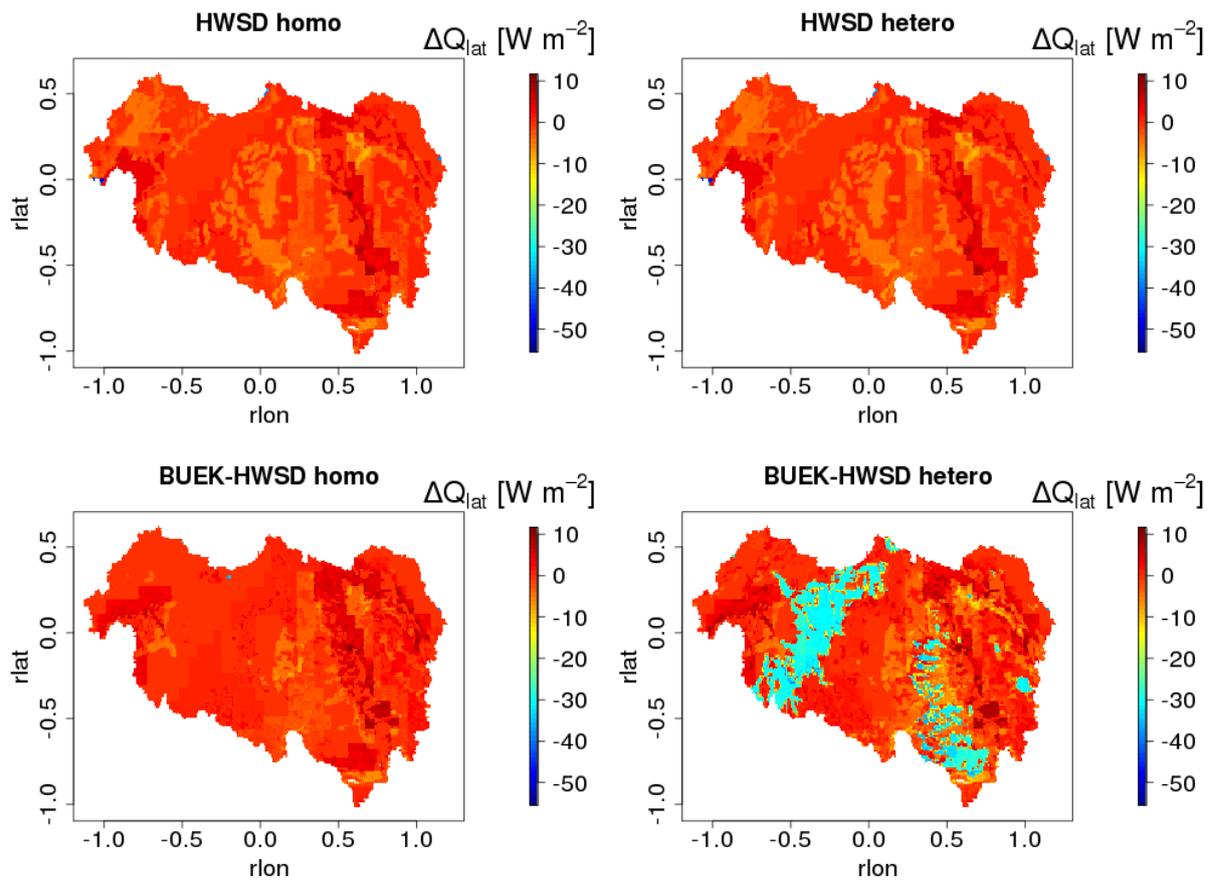


Abbildung 5.5: Differenzen der simulierten 10-jährigen mittleren latenten Wärmeflüsse der neuen Bodendatensätze (für vertikal homogenen und heterogenen Boden) zum FAO-Datensatz

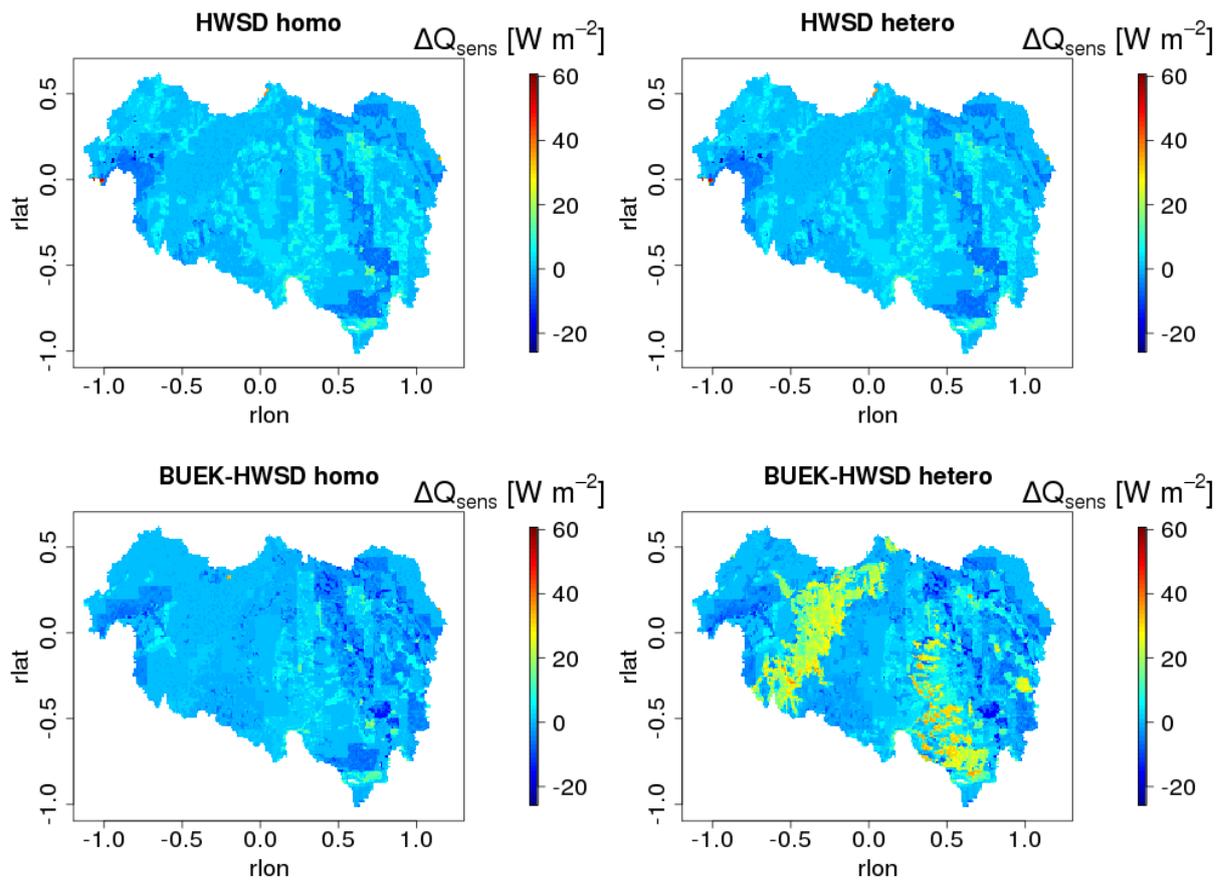


Abbildung 5.6: Differenzen der simulierten 10-jährigen mittleren sensiblen Wärmeflüsse der neuen Bodendatensätze (für vertikal homogenen und heterogenen Boden) zum FAO-Datensatz

6 Ausblick

Die Übersetzung der primären Bodeninformation in die Bodenartenklassen des Modells stellt eine starke Vereinfachung und einen Verlust von Information dar. Um die verfügbaren Bodeninformationen noch effizienter nutzen zu können, könnten beispielsweise zusätzliche Bodenartenklassen eingeführt werden.

Auch vertikal konnte die Bodeninformation für die regionalen Simulationen nicht vollständig genutzt werden, da ansonsten die Rechenzeit zu groß geworden wäre. Zukünftig könnten Optimierungen des Modell-Codes, z.B. Parallelisierung, zu einer Verringerung der Rechenzeit beitragen und somit höher aufgelöste Simulationen ermöglichen.

Die laterale Abflussmodellierung wurde noch nicht implementiert, da dies in gemeinsamen Arbeiten mit dem Deutschen Wetterdienst (T. van Phram, BiK-F/GUF; J. Brauch, DWD) europaweit in Durchführung ist. Stattdessen wurde die Annahme eines zeitlich konstanten Wassergehalts bei der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (Glg. 3.11) untersucht. Diese Annahme hat einen direkten Einfluss auf die vertikalen Energie- und Wasserflüsse und koppeln direkt mit der Atmosphäre (wie in Abb. 6.1) gezeigt. In dieser Abb. werden mit COSMO-CLM simulierte mittlere Tagesgänge über Afrika verglichen: (a) mit zeitlich konstanter Wärmeleitfähigkeit und (b) mit einer Parameterisierung der Wärmeleitfähigkeit (Johansen (1975)) in Abhängigkeit vom zeitlich variablen Wassergehalt. Die Wassergehaltsabhängigkeit zeigt sich deutlich.

Nach ausführlichen Tests dieser Erweiterungen wird das Gesamtpaket der Verbesserungen in TERRA-ML den Code-Verantwortlichen in der CLM Community und des COSMO Konsortiums für die COSMO-Referenzversion empfohlen. Die verbesserte Bodenmodellierung wird zu besseren Ergebnissen im INKLIM-A Projekt "Ein Kohlenstoff-Modell für das regionale Klimamodelsystem COSMO-CLM" führen und die laufenden Untersuchungen zur Wechselwirkung Landoberfläche – atmosphärische Konvektion in Hessen und Thüringen unterstützen.

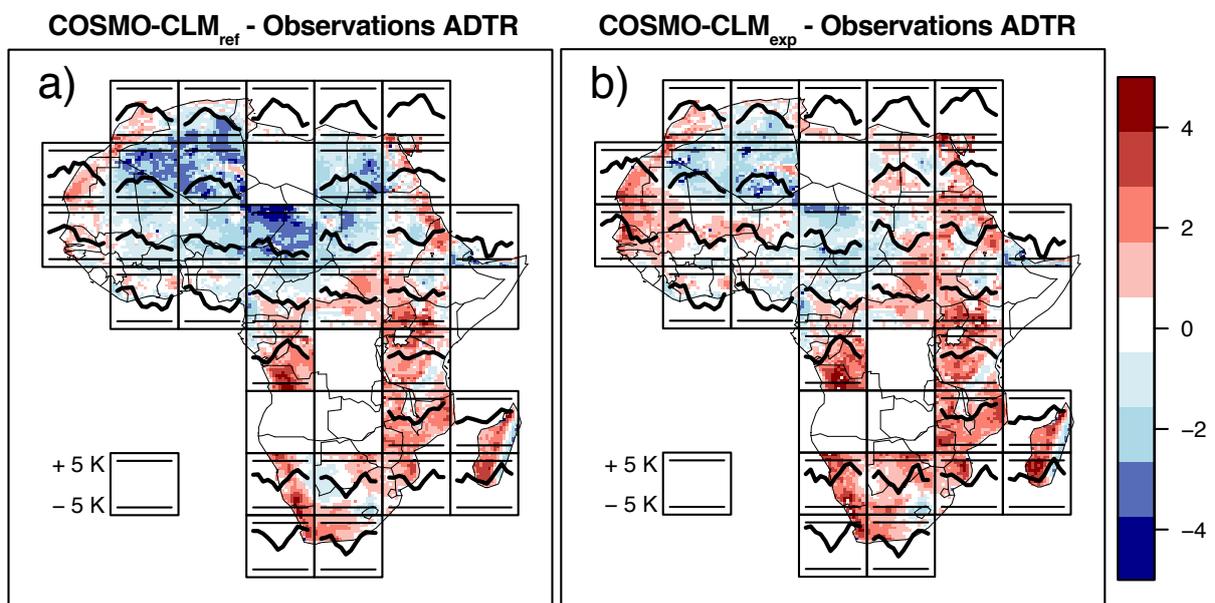


Abbildung 6.1: Langjährige mittlere Tagesamplituden der 2m-Temperatur (ADTR) simuliert mit COSMO-CLM (a) mit zeitlich konstanter Wärmeleitfähigkeit und (b) mit einer Parameterisierung der Wärmeleitfähigkeit (Johansen (1975)) in Abhängigkeit vom zeitlich variablen Wassergehalt im Vergleich mit Beobachtungen (in Kelvin). Die schwarzen Linien deuten den Jahresgang der Amplitudendifferenz an.

Danksagung

Das Projekt wurde im Rahmen von INKLIM-A durch das Hessische Landesamt für Umwelt und Geologie (HLUG) gefördert. Eine zusätzliche Förderung erfolgte durch das Biodiversität und Klima Forschungszentrum (BiK-F) im Rahmen der Landes-Offensive zur Entwicklung Wissenschaftlich-ökonomischer Exzellenz (LOEWE). Die Messdaten für den Standort Lindenberg wurden durch den Deutschen Wetterdienst (DWD) - Meteorologisches Observatorium Lindenberg / Richard- Abmann Observatorium erhoben und durch NCAR/EOL, gefördert durch die National Science Foundation, bereitgestellt (<http://data.eol.ucar.edu/>). Für die Bereitstellung der Messdaten am Standort Linden bedanken wir uns bei Prof. Dr. Ludger Grünhage (Justus-Liebig-Universität, Gießen). Die ERA-Interim-Daten wurden vom ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) bezogen.

Literaturverzeichnis

- Clapp, R. B. and Hornberger, G. M. (1978). Empirical equations for some soil hydraulic properties. *Water Resour. Res.*, 14(4):601–604.
- Cosby, B. J., Hornberger, G. M., Clapp, R. B., and Ginn, T. R. (1984). Exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resources*, 20(6):682–690.
- Doms, G., Förstner, J., Heise, E., Herzog, H.-J., Mironov, D., Raschendorfer, M., Reinhardt, T., Ritter, B., Schrodin, R., Schulz, J.-P., and Vogel, G. (2011). A Description of the Nonhydrostatic Regional COSMO Model, Part II: Physical Parameterization. Technical report, Consortium for Small-Scale Modelling.
- FAO-Unesco (1974). *Soil map of the world*. Unesco, Paris. 10 volumes plus 19 maps, scale 1:5000000, and CD-ROM.
- FAO/IIASA/ISRIC/ISSCAS/JRC (2009). *Harmonized World Soil Database (version 1.1)*. FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria.
- Grasselt, R., Schüttemeyer, D., Warrach-Sagi, K., Ament, F., and Simmer, C. (2008). Validation of terra-ml with discharge measurements. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(6):763–773.
- Hillel, D. (2004). *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press.
- Johansen, O. (1975). Thermal conductivity of soils. PhD thesis 531, University of Trondheim.
- Kalinka, F. and Ahrens, B. (2011). A modification of the mixed form of Richards equation and its application in vertically inhomogeneous soils. *Advances in Science and Research*, 6:123–127.
- Kammann, C., Grünhage, L., and Jäger, H.-J. (2000). N₂O- und CH₄-flüsse in der bodennahen Atmosphäre eines extensiv genutzten Grünlandökosystems. In Grünhage, L., Hanelwald, K., Jäger, H.-J., and Ott, W., editors, *Auswirkungen dynamischer Veränderungen der Luftzusammensetzung und des Klimas auf terrestrische Ökosysteme in Hessen - III - Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden Berichtszeitraum 1996 - 1999*, volume 274 of *Schriftenreihe des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie*, pages 81–121. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz.
- Richards, L. A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics*, 1(5):318–333.

- Richter, A., Adler, G. H., Fahrak, M., and Eckelmann, W. (2007). *Erläuterungen zur Nutzungsdifferenzierten Bodenübersichtskarte der Bundesrepublik Deutschland BÜK 1000 N*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- Rijtema, P. (1969). Soil moisture forecasting. Technical report 531, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen.
- Simmons, A., Uppala, S., Dee, D., and SHINYA Kobayashi, S. (2006). ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards. *ECMWF Newsletter*, 110:25–35.
- Sponagel, H. (2005). *Bodenkundliche Kartieranleitung: Mit 41 Abbildungen, 103 Tabellen und 31 Listen*. Schweizerbart.
- Van Genuchten, T., Leij, F., Yates, S., Laboratory, R. S. K. E. R., and (U.S.), S. L. (1992). *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils*. IAG - DW. Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency.
- Zeng, X. and Decker, M. (2009). Improving the Numerical Solution of Soil Moisture-Based Richards Equation for Land Models with a Deep or Shallow Water Table. *Journal of Hydrometeorology*, 10(1):308–319.
- Zhang, T. (2005). Influence of the seasonal snow cover on the ground thermal regime: An overview. *Reviews Geophysics*, 43(4):RG4002.