

# **Vergleich von Modellrechnungen mit COSMO-CLM/TERRA und COSMO-CLM/ VEG3D**

**Diplomarbeit im Fach Meteorologie**

Vorgelegt von

**Lucas Fischer**

April 2010

INSTITUT FÜR METEOROLOGIE UND KLIMAFORSCHUNG  
UNIVERSITÄT KARLSRUHE(TH) / FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE



# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1 Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>2 Die Boden-Vegetationsmodelle</b>	<b>5</b>
2.1 Das Bodenmodell TERRA_LM.....	7
2.2 Das Boden-Vegetationsmodell VEG3D.....	10
2.3 Die Implementierung des VEG3D in das COSMO-CLM .....	15
<b>3 CLM-Simulationen mit den zwei Boden-Vegetationsmodellen VEG3D und TERRA</b>	<b>19</b>
3.1 Stationsvergleich vom 08.08. – 28.08.2001 .....	20
3.1.1 Hartheim .....	21
3.1.1.1 Vergleich von VEG3D und TERRA .....	21
3.1.1.2 Vergleich von VEG3D und TERRA mit Messdaten.....	23
3.1.2 KIT Campus Nord .....	28
3.1.2.1 Vergleich von VEG3D und TERRA .....	28
3.1.2.2 Vergleich von VEG3D und TERRA mit Messdaten.....	32
3.1.2.3 Vergleich der Werte auf den zwei untersten Modelllevel von COSMO-CLM mit Messdaten.....	37
3.1.3 Vergleich weiterer Stationen von VEG3D und TERRA mit Messdaten.....	42
3.1.4 Der Einfluss der Landnutzung auf die Ergebnisse eines Stationsvergleichs..	49
3.1.4.1 Offenburg .....	50
3.1.4.2 Geislingen.....	51
3.1.4.3 Freudenstadt .....	52
3.1.4.4 Konstanz .....	54
3.1.4.5 Zusammenfassung .....	55
3.2 Flächenvergleich vom 08.08. – 28.08.2001 .....	57

---

3.2.1 Vergleich von VEG3D und TERRA .....	57
3.2.2 Vergleich von VEG3D und TERRA mit Messdaten.....	60
3.2.3 Vergleich der untersten Modellschichten zwischen VEG3D und TERRA.....	65
3.3 Flächenvergleich an zwei ausgewählten Tagen.....	70
3.3.1 Analyse des 15.08.2001.....	70
3.3.2 Analyse des 20.08.2001.....	73
<b>4 Zusammenfassung</b>	<b>79</b>
<b>5 Literaturverzeichnis</b>	<b>82</b>
<b>A Anhang</b>	<b>86</b>
A.1 Sensitivitätstest einer Simulation bei Verwendung unterschiedlich großer Zeitschritte.....	86
A.2 Anleitung für die Implementierung des Bodenmodells VEG3D in das Atmosphärenmodell COSMO-CLM .....	93
A.3 Ergänzung der Ergebnisse aus Kapitel 3 .....	98

# 1 EINLEITUNG

Wechselwirkungsprozesse zwischen Landoberfläche und Atmosphäre stellen ein wichtiges Glied des Energie- und Wasserkreislaufes auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Skalen dar. Ihre adäquate Beschreibung in numerischen Wettervorhersage- und Klimamodellen ist deshalb eine Grundvoraussetzung für die realitätsnahe Vorhersage bodennaher atmosphärischer Zustandsgrößen, wie z.B. die Temperatur und der Niederschlag. Die Bestimmung und Parametrisierung von Variablen der atmosphärischen Grenzschicht ist in hohem Maße abhängig von den Prozessen, die innerhalb des Bodens stattfinden. Es ist insbesondere bei Klimasimulationen ein deutlicher Einfluss der Komponente Bodenwassergehalt zu erwarten. So beeinflusst beispielsweise der Wassergehalt in den obersten Bodenschichten die Absorption der Strahlung und jener in tieferen Schichten die Transpiration und die Wärmeleitung.

Es ist von großem wissenschaftlichem Interesse den Zustand und die zeitliche Änderung vom Austausch von Energie und Feuchte über die Vegetation und den Boden zu beschreiben. Dies bildet in numerischen Modellen ein zentrales Element und findet Ausdruck in der Entwicklung von sogenannten SVAT-Modulen (Soil Vegetation Atmosphere Transfer), die an atmosphärische Simulationsmodelle gekoppelt, als untere Randbedingung dienen. In der vorliegenden Arbeit handelt es sich bei dem Atmosphärenmodell um das COSMO-CLM, das die Kopplung der Bodenprozesse an die untere Atmosphäre mithilfe des Mehrschichtenmodells TERRA\_LM vollzieht. Um die Vorhersage von oberflächennahen Größen zu verbessern, wurde in der vorliegenden Arbeit das Bodenmodell TERRA\_LM mit dem ursprünglich von G. Schädler (1990) entwickelten und danach mehrfach weiterentwickelten VEG3D ersetzt. Im Unterschied zum operationell verwendeten Modell TERRA\_LM (Doms et. al 2005) hat das VEG3D eine explizite Vegetationsschicht und sollte daher vor allem über Vegetation bessere Ergebnisse simulieren. C. Meissner (2008) hat in ihrer Dissertation herausgefunden, dass das VEG3D im stand-alone-Modus bessere Ergebnisse liefert als das TERRA\_LM. Inwiefern sich die gekoppelten Simulationen von COSMO-CLM mit VEG3D von denen mit TERRA unterscheiden, sollte in dieser Arbeit untersucht werden.

Im zweiten Kapitel werden die konzeptionellen Gemeinsamkeiten und Unterschiede der beiden Bodenvegetationsmodelle VEG3D und TERRA herausgearbeitet. Das dritte Kapitel beschäftigt sich ausführlich mit den Vergleichen der Simulationen mit den Modellen VEG3D und TERRA. Dabei wird insbesondere untersucht, welche Differenzen an Stationen innerhalb Baden-Württembergs auftreten. Weiter findet eine Analyse bezüglich des Einflusses der Landnutzung auf die Ergebnisse der Simulationen mit den Bodenmodellen statt. Die Vergleiche von

## Einleitung

---

Punktmessungen mit Modellgitterpunkten lassen für sich alleine gesehen keine sehr verlässlichen Aussagen zu. Deshalb besteht ein zweiter Teil der Simulationsauswertung darin, eine Analyse einer Fläche durchzuführen. In Kapitel 3.2 werden die Modelle VEG3D und TERRA für ein Gebiet, das ungefähr Baden-Württemberg umfasst, verglichen. Die Ergebnisse der punktuellen und flächenhaften Untersuchungen der gekoppelten Simulationen werden in der gesamten Auswertung nicht nur als Vergleich der beiden Bodenmodelle dargestellt, sondern auch im Vergleich mit Messdaten.

## 2 DIE BODEN-VEGETATIONSMODELLE

In Klimamodellen ist es heutzutage Standard, dass Modellierungskonzepte eingebaut sind, die die Wechselwirkung zwischen der Atmosphäre und der Erdoberfläche beschreiben. Diese sogenannten SVAT-Modelle (**S**oil **V**egetation **A**tmosphere **T**ransfer **M**odel) beschreiben die Flüsse von Impuls, Wärme und Wasserdampf zwischen Erdboden, Vegetation und der Atmosphäre mit unterschiedlichen Parametrisierungskonzepten (z.B. Deardorff 1978; Sellers et al. 1986; Dickinson et al. 1993) sowie Temperatur und Wassergehalt im Boden.

Das Boden-Vegetationsmodell stellt über Landoberflächen die unteren Randbedingungen für das Atmosphärenmodell zur Verfügung. Dabei handelt es sich um die Boden- und Lufttemperatur, die Boden- und Luftfeuchte sowie die Flüsse latenter und sensibler Wärme. Bereits in der Vergangenheit wurde diskutiert, ob die atmosphärische Grenzschicht mehr durch den Boden oder durch die Vegetation beeinflusst wird. Das Ergebnis hängt entscheidend davon ab, welche Variable man betrachtet. Dabei sahen einige Wissenschaftler (Noilhan und Planton 1989; Henderson-Sellers et al. 1993) in der Modellierung der Vegetationsschicht die größere Bedeutung, andere betonten die Verbindung von Bodenprozessen zu Vorgängen in der Atmosphäre (Wetzel und Chang 1987; Sun und Bosilovich 1996; Cuenca et al. 1996). Smirnova et al. (1997) hat unter anderem herausgefunden, dass bei hoher Bodenfeuchte die Vegetation einen geringen Einfluss auf die atmosphärische Grenzschicht besitzt. Festzuhalten ist, dass die räumlichen Unterschiede der Bodenoberflächentemperatur und Flüssen mit zunehmend höherer räumlicher Auflösung der meteorologischen Strömungsmodelle immer mehr an Bedeutung gewinnen (Adrian 1996).

Einige regional hoch auflösende Klimamodelle beschränken sich nicht mehr ausschließlich nur auf die Betrachtung von Bodenprozessen, sondern berücksichtigen den Einfluss der Vegetation auf die Flüsse, um eine möglichst genaue Beschreibung des Austauschs von Impuls, Wärme und Wasser zwischen der Atmosphäre und der Erdoberfläche zu gewährleisten.

Die Komplexität von SVAT-Modulen variiert stark. So beschreiben die Bodenmodelle der globalen Klimamodelle die physikalischen Prozesse im Boden vereinfacht, da die Zeit, die für die Berechnung der unteren Randbedingung zur Verfügung steht aufgrund der global zu berechnenden Skala beschränkt ist (Braun und Schädler 2005). Im Gegensatz dazu ste-

hen hoch entwickelte physikalische Bodenmodelle gegenüber. Die SVAT-Modelle in mesoskaligen Atmosphärenmodellen, wie beispielsweise dem COSMO-CLM, weisen bei Betrachtung ihres strukturellen Aufbaus eine mittlere Komplexität auf. In den Regionalmodellen werden unterschiedlich aufgebaute SVATs verwendet. Neben den verschiedenen Parametrisierungsansätzen zur Bestimmung des Bodenwassergehalts und der Bodentemperatur gibt es zwei Ansätze, die die Parametrisierung der Vegetation beschreiben. Zum einen besteht die Möglichkeit besteht darin, auf die Modellierung der Vegetationsschicht im Modell unter der Annahme zu verzichten, dass sich die Bestandstemperatur der Vegetation nicht von der Temperatur am Boden unterscheidet. Darüber hinaus werden im Rahmen dieses Ansatzes die Flüsse in der Grenzschicht aus Daten des Bodenmodells oder durch Vegetationsparameter bestimmt. Zur Berechnung der latenten und sensiblen Wärmeflüsse zwischen Boden und Atmosphäre wird die Oberflächentemperatur verwendet. Zu dieser Kategorie von Boden-Vegetationsmodellen gehören unter anderem die in COSMO-CLM (Will et al., 2007), REMO (Jacob, 2001) und HIRHAM (Christensen et al., 1996) verwendeten. Die zweite Möglichkeit zur Parametrisierung der Vegetation besteht darin, die Vegetationsschicht in das Modell zu integrieren. Dabei werden die Werte für die Transpiration und die Wärmeflüsse vom Blattwerk an die Bestandsluft und von dort an die untere Atmosphäre mit Hilfe einer Bestandstemperatur berechnet (vgl. Kap. 3.3). Dieses Modellierungsschema, in das eine homogene, masselose Vegetationsschicht integriert ist, existiert beispielsweise im RegCM (Giorgi et al., 1993), MM5 (Chen und Dudhia, 2001) und seit dem erstmaligen Einbau des Boden-Vegetationsmodells VEG3D im Jahr 2008 auch im COSMO-CLM (Meissner, 2008). Mittlerweile wurde von der ETH Zürich das Common Land Model (CLM – nicht zu verwechseln mit dem Klimamodell CLM) in das COSMO-CLM implementiert.

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit soll daher das ursprünglich bereits eingebaute Bodenmodell TERRA\_LM mit dem neu implementierten VEG3D verglichen werden. Simulationen mit den ‚stand-alone‘-Versionen (d.h. die Bodenmodelle werden mit Anfangs- und Randwerten ohne Kopplung an das Atmosphärenmodell gestartet) der beiden Bodenmodelle sind ausführlich in der Dissertation von C. Meissner beschrieben. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich hingegen mit der Untersuchung von gekoppelten COSMO-CLM Simulationen mit TERRA\_LM oder VEG3D. In den folgenden Kapiteln 2.1 und 2.2 werden die beiden verwendeten Bodenmodelle vorgestellt und die Unterschiede zwischen dem TERRA\_LM und dem VEG3D beschrieben.



## 2.1 DAS BODENMODELL TERRA\_LM

Im Regionalmodell COSMO (COntortium for Small-scale MOdelling) des DWD (Deutscher Wetterdienst) wird für die operationelle Wettervorhersage das Bodenmodell TERRA\_LM verwendet (Doms et al., 2005) (Zur Vereinfachung im Folgenden mit „TERRA“ abgekürzt). Das COSMO-CLM (Climate Local Model) rechnet im Vorhersage- und Klimamodus ebenfalls mit TERRA.

Ein wesentliches Merkmal des Mehrschichtenmodells TERRA ist, dass es im Gegensatz zum VEG3D keine explizite Vegetationsschicht vorsieht. Deshalb können die Wärme-flüsse an der Erdoberfläche nur mit Hilfe eines Bulk-Ansatzes, der die Temperatur und die Feuchte an der Oberfläche miteinbezieht, aus dem Bodenmodell und der untersten Atmosphärenschicht des Modells berechnet werden. Die Oberflächentemperatur ist ein gewichtetes Mittel aus der Temperatur der obersten Bodenschicht und der Schneetemperatur. Die Transpiration von Pflanzen  $Tr$  ist eine Funktion der potentiellen Verdunstung  $E_{pot}$  in Abhängigkeit der Oberflächentemperatur  $T_{sfc}$ , des atmosphärischen Widerstands  $r_a$  und des Blattwerk-Widerstands  $r_f$ .

$$Tr = r_a (r_a + r_f)^{-1} E_{pot}(T_{sfc})$$

Diese Parametrisierung nach Dickinson (1984) setzt voraus, dass die Temperatur des Blattwerks gleich der Oberflächentemperatur ist. Gleichheit wird darüber hinaus auch jeweils in den latenten und sensiblen Wärme-flüssen zwischen dem Blattwerk und der Bestandsluft, sowie der Bestandsluft und der untersten Atmosphärenschicht vorausgesetzt.

Der Transport von Wasser  $w_l$  ist als bodenphysikalischer Prozess von Bedeutung. Die Beschreibung erfolgt im TERRA mit der prognostischen Richards-Gleichung (Hillel, 1980).

$$\frac{\partial w_l(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ D_w(w_l, z) \frac{\partial w_l(z, t)}{\partial z} - K_w(w_l, z) \right] - r_w(w_l, z)$$

Die Aufnahme von Flüssigwasser aus dem Boden über die Wurzeln wird durch den letzten Term  $r_w$  beschrieben. Nach Rijtema (1969) werden die hydraulische Diffusität  $D_w$  und die hydraulische Leitfähigkeit  $K_w$ , welche beide vom Wassergehalt abhängig sind, durch Exponentialfunktionen ausgedrückt:

$$D_w(\bar{w}_l) = D_0 \exp\left[D_1 (w_{PV} - \bar{w}_l) / (w_{PV} - w_{ADP})\right]$$

$$K_w(\bar{w}_l) = K_0 \exp\left[K_1 (w_{PV} - \bar{w}_l) / (w_{PV} - w_{ADP})\right]$$

Die Parameter  $w_{PV}$  und  $w_{ADP}$  beschreiben das Porenvolumen (PV) und die Residualfeuchte (ADP = Air Dryness Point), während  $\bar{w}_l$  das gewichtete Mittel des Wassergehalts darstellt.

Die zeitliche Änderung der Bodentemperatur  $T_B$  wird durch die nachfolgende Gleichung beschrieben:

$$\frac{\partial T_B}{\partial t} = \frac{1}{\rho c} \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda_B \frac{\partial T_B}{\partial z} \right)$$

Darin entspricht  $\lambda_B$  der Wärmeleitfähigkeit des Bodens und  $\rho c$  der volumetrischen Wärmekapazität, welche sich aus den Wärmekapazitäten trockener Bodenkomponenten  $\rho_0 c_0$ , dem Wassergehalt  $\rho_l c_l$  und dem Eisgehalt  $\rho_{ice} c_{ice}$  zusammensetzt.

Die thermische Leitfähigkeit  $\lambda_B$  berechnet sich aus einer Kombination aus der Leitfähigkeit trockenen Bodens  $\lambda_{B,t}$  und der gesättigten Bodens  $\lambda_{B,s}$ , gewichtet mit Hilfe einer normierten Leitfähigkeit, der Kersten-Zahl  $K_e$ :

$$\lambda_B = K_e (\lambda_{B,s} - \lambda_{B,t}) + \lambda_{B,t}$$

Die bodennahen Größen (z.B. die 2m-Temperatur und die 10m-Windgeschwindigkeit) werden mit Hilfe eines auf der Ähnlichkeitstheorie basierendem Schema, das von Rasmendorfer (DWD) entwickelt worden ist, berechnet.

$$\phi_L = \phi_S + \frac{f_{SI}}{f_{SA}} (\phi_A - \phi_S)$$

Es gehen jeweils Werte am Boden  $\phi_S$  und aus der untersten Modellschicht  $\phi_A$  in die Berechnung mit ein. Der Parameter  $\phi_L$  gibt die Variable in einer bestimmten Höhe (hier 2 oder 10 m) wieder,  $f_{SI}$  und  $f_{SA}$  sind dimensionslose Widerstandsparameter.

Der Blattflächenindex und der Bewuchs sind jahreszeitabhängige Indizes der Vegetation, die Rauigkeitslänge hängt allgemein von der Zeit ab. Diese Vegetationsparameter werden

## Die Boden-Vegetationsmodelle

---

mit einem gewichteten Mittelwert aus den verschiedenen Landnutzungsanteilen innerhalb einer Gitterbox berechnet.

## 2.2 DAS BODEN-VEGETATIONSMODELL VEG3D

Das Boden-Vegetationsmodell VEG3D ist 1990 von G. Schädler entwickelt worden und wurde anschließend von Lenz durch eine Wurzel-Verteilungsfunktion (1999) und ebenfalls von Lenz mit einem Schnee-Modul erweitert (2002). Die letzte Modifikation des SVATs wurde mit der Implementierung einer Parameterisierung von Gefrier- und Schmelzprozessen im Boden von C. Meißner vorgenommen (Meißner, 2008). Im COSMO-CLM existiert ein Schalter (s. A. 2), mit dessen Hilfe zwischen den beiden Bodenmodellen TERRA und VEG3D gewechselt werden kann.

Im Gegensatz zum TERRA besitzt das VEG3D eine parametrisierte Vegetationsschicht. Diese ist homogen und masselos ('big leaf concept'). Zusammen mit dem Boden, der in eine beliebige Anzahl von Schichten mit nach unten exponentiell zunehmender Schichtdicke unterteilt ist, stellt das VEG3D damit ein Boden-Vegetationsmodell dar.

Zunächst werden einige wichtige Merkmale der Vegetationsschicht eingeführt. Im VEG3D befindet sich zwischen der Erdoberfläche und der untersten Atmosphärenschicht eine Vegetationsschicht, in der die turbulenten Flüsse, die Lufttemperatur und die Luftfeuchte mittels Bilanzierung der Energie- und Wasserflüsse bestimmt werden. Das Modell simuliert dazu auch die Reflektion und Absorption der einfallenden kurz- und langwelligen Strahlung.

Die verschiedenen Arten der Vegetation werden durch eine Aufteilung in Landnutzungsklassen klassifiziert. Im Gegensatz zum TERRA verwendet das VEG3D nur diejenige Landnutzungsklasse innerhalb einer Gitterbox, die prozentual am häufigsten auftritt. Die jahreszeitliche Veränderung der Vegetation findet mittels geeigneter Parameterisierungen im Modell ihre Berücksichtigung. Es werden die charakteristischen Größen wie der Blattflächenindex, der Bedeckungsgrad, die Rauheitslänge und die Verdrängungshöhe ausgegeben, ohne dabei die Vegetation vertikal detailliert aufzulösen ('big leaf concept'). Die von der Jahreszeit abhängige Wurzeltiefe wird durch den Vegetationstyp bestimmt und führt dazu, dass die aufgezählten Größen innerhalb einer gewissen Bandbreite variieren.

Im Pre-Processing des VEG3D wird einer Gitterbox die Landnutzungsklasse mit dem größten Flächenanteil als Landnutzung zugeordnet. Im nächsten Schritt werden die 23 Landnutzungsklassen auf die 10 Landnutzungsklassen des VEG3D angepasst (vgl. Tab.

2.1). Das auf diese Art und Weise erstellte Landnutzungskataster geht als Eingabefeld in die Modellsimulation mit ein.

Nummer	Beschreibung VEG3D	Beschreibung TERRA	
0	Entlaubtes Gebiet		
1	Urbanes Gebiet	Immergrüner Laubwald	(3)
2	Wasserfläche	Dichter Laubwald	(3)
3	Laubwald	Offener Laubwald	(3)
4	Nadelwald	Immergrüner Nadelwald	(4)
5	Mischwald	Sommergrüner Nadelwald	(4)
6	Kultivierte Landschaft	Mischwald	(5)
7	Kulturpflanzen	Süßwasser-Mangroven	(3)
8	Graslandschaft	Salzwasser-Mangroven	(3)
9	Mosaik aus Gras und Büschen	Mosaik Bäume	(5)
10	Undefiniert	Niedergebranntes Waldgebiet	(5)
11	Schnee und Eis	Immergrüne Büsche	(8)
12		Sommergrüne Büsche	(8)
13		Krautartige Vegetation	(8)
14		Spärliche Kräuter oder Gras	(8)
15		Überflutete Büsche oder Kräuter	(8)
16		Kulturlandschaft	(7)
17		Mosaik Kulturpflanzen / Bäume	(7)
18		Mosaik Kulturpflanzen / Gras	(7)
19		Unbedeckter Boden	(0)
20		Wasserfläche	(2)
21		Schnee und Eis	(11)
22		Urbanes Gebiet	(1)
23		Undefiniert	(1)

**Tabelle 2.1:** Beschreibung der Landnutzung im Bodenvegetationsmodell VEG3D und im TERRA. In Klammern steht die Zuordnung zu den Landnutzungsklassen des VEG3D.

Die Wärmeflüsse nahe der Erdoberfläche werden mit einem Bulk-Ansatz aus der Temperatur und der Feuchte berechnet. Diese ergeben sich aus den Werten im Vegetationsbestand und dem untersten Modelllevel. Der latente Wärmefluss zwischen der vegetationsbedeckten Erdoberfläche und der Atmosphäre setzt sich zusammen aus der Verdunstung des Erdbodens, dem Fluss aufgrund von Interzeption oder Kondensation an der Pflanzenoberfläche und der Transpiration  $Tr$  der Vegetation (Braun, 2005). Letztere lässt sich als Funktion der Sättigungsfeuchte an der Blattoberfläche  $q_s(T_f)$  und der Feuchte der Bestandsluft  $q_{af}$  ausdrücken:

$$Tr = (r_s + r_f)^{-1}(q_s(T_f) - q_{af})$$

Der Parameter  $r_s$  beschreibt den Stomata Widerstand nach Taconet et al. (1986) und Dear-dorff (1978), während  $r_f$  den Widerstand vom Blattwerk zur Umgebungsluft darstellt. Wenn der Interzeptionsspeicher nicht leer ist, wird die potentielle Verdunstung berechnet. Die Temperatur der Vegetationsschicht wird iterativ zusammen mit ihrer Energiebilanz bestimmt.

Die bodennahen Variablen, wie die 2m-Temperatur und die 10m-Windgeschwindigkeit, werden aus der integralen Form der Fluss-Gradient-Beziehung berechnet. Für die 2m-Temperatur ergibt sich folgende Funktion:

$$\theta_{2m} = \frac{\theta_*}{k} \left[ f_r \left( \frac{z_{oh} + 2}{L} \right) - f_r \left( \frac{z_r - d}{L} \right) \right] + \theta_a$$

$L$  ist die Monin-Obukhov Länge,  $\theta_a$  die potentielle Temperatur der untersten atmosphärischen Modellschicht,  $z_{oh}$  die Rauigkeitslänge,  $d$  die Verdrängungshöhe und  $f_r$  die Dyer-Businger Beziehung.

Neben den Unterschieden zwischen VEG3D und TERRA in der Beschreibung der Vegetation, weisen beide Modelle außerdem einen differenzierten Aufbau des Bodens und der zugehörigen bodenphysikalischen Prozessabläufe auf.

Das VEG3D besitzt 13 verschiedene Bodenarten. Im Boden werden der Wärme- und Wassertransport durch prognostische Gleichungen simuliert, wobei unter der Annahme der Vernachlässigbarkeit der horizontalen Flüsse nur die vertikale Komponente berücksichtigt wird. Diese werden mithilfe des Crank-Nicholson-Schemas berechnet.

Der Wassertransport setzt sich aus dem Niederschlag, der auf die Oberfläche trifft und infiltriert bzw. als Oberflächenwasser abfließt sowie der Versickerung, dem Entzug durch die Wurzeln der Vegetation und dem kapillaren Aufstieg zusammen. Die Berechnung erfolgt analog zum TERRA durch die Lösung der Richards-Gleichung:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K(\theta) \frac{\partial \psi(\theta)}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] + \frac{dK(\theta)}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} - r_w(z)$$

Die Aufnahme von Flüssigwasser aus dem Boden über die Wurzeln beschreibt der letzte Term  $r_w$ . Die hydraulische Leitfähigkeit  $K(\theta)$  und das Matrixpotential  $\psi(\theta)$  können wahlweise mit drei unterschiedlichen Ansätzen (Brooks & Corey, 1964; Campbell, 1974; Van Genuchten, 1980) parametrisiert werden. In den meisten Fällen zeigt die Van Genuchten Parametrisierung die besten Ergebnisse bei der Simulation der Bodenfeuchte (Braun und Schädler, 2005).

Das Modell erzeugt einen Abfluss, wenn die Niederschlagsrate die Infiltrationsrate übersteigt oder der Interzeptionsspeicher voll ist. In einer Bodenschicht wird ein Abfluss berechnet, sobald das gesamte Porenvolumen mit Wasser aufgefüllt ist. Im Gegensatz zum TERRA kann der berechnete Abfluss den Boden nicht verlassen, sondern wird in die oben drüber liegende Schicht transportiert. Somit kommt es immer erst zu einem Oberflächenabfluss wenn alle Bodenschichten gesättigt sind.

Der Wärmetransport wird durch die vertikale Komponente der Divergenz des molekularen Wärmeflusses  $\left( \lambda(\theta) \frac{\partial T_B}{\partial z} \right)$  beschrieben. Dabei werden Phasenumwandlungen nicht berücksichtigt (Braun, 2005). Die Gleichung für die Bodentemperatur ist eine Wärmeleitungsgleichung der Form:

$$c_B(\theta) \frac{\partial T_B}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda(\theta) \frac{\partial T_B}{\partial z} \right)$$

In dieser Gleichung werden die Wärmeleitfähigkeit sowie die Wärmekapazität des Bodens als Funktion des Bodenwassergehalts parametrisiert.

Der Parameter  $T_B$  beschreibt die Bodentemperatur und  $c_B$  entspricht der volumetrischen Wärmekapazität. Im Gegensatz zum TERRA ist die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda(\theta)$  eine Funktion des aktuellen Wassergehalts  $\theta$  und besitzt eine Abhängigkeit vom Eisgehalt.  $\lambda(\theta)$  ist eine komplizierte Funktion, die sich mit Hilfe von gemessenen Daten approximieren lässt.

Um die Gleichungen des Bodenmodells lösen zu können, werden eine obere sowie eine untere Randbedingung jeweils für Temperatur und Wassergehalt benötigt. Die obere beinhaltet den Wärmestrom an der Bodenoberfläche, sprich den Bodenwärmestrom, der sich aus der Energiebilanz der Erdoberfläche ergibt.

Am unteren Rand des Bodens wird der Wärmefluss, bei Berücksichtigung einer Simulationszeit von einigen Tagen, zu null angenommen. Das bedeutet, dass die Temperatur lokal-

zeitlich konstant betrachtet wird. Der Wassertransport bzw. der Abfluss am unteren Rand des Bodenmodells wird durch die Annahme beschrieben, dass der Gradient des Gravitationspotentials Null wird. Alternativ kann auch ein undurchlässiger Unterrand oder eine gesättigte Unterschicht (Grundwasser) eingestellt werden.

Im COSMO-CLM gibt es bis in eine Tiefe von 2,5 m hydrologisch aktive Schichten, in denen Wassertransport berechnet wird. Unterhalb befinden sich die passiven Schichten, in denen der Wassergehalt konstant gehalten wird. Im VEG3D wird nicht zwischen aktiven und passiven Bodenschichten unterschieden, da es sich ausschließlich um aktive Schichten handelt.

Die vertikale Aufteilung der Bodenschichten des VEG3D ist an das TERRA angepasst. Das VEG3D sieht die Möglichkeit vor, dass innerhalb einer Gitterbox vertikal unterschiedliche Bodenarten vorkommen können. Hiervon wurde jedoch zur besseren Vergleichbarkeit mit TERRA in dieser Arbeit kein Gebrauch gemacht. Aus dem gleichen Grund wurden bei der Simulation mit dem VEG3D nicht 13 verschiedene Bodenarten verwendet, sondern nur die 5 unterschiedlichen Bodenarten aus dem TERRA.

Ein wichtiger Unterschied zwischen dem VEG3D und dem TERRA besteht in der Berechnung der Wärmeflüsse an der Erdoberfläche. So beachtet das VEG3D durch Integration der Vegetationsschicht, zur Bestimmung der Flüsse die meteorologischen Größen innerhalb des Vegetationsbestandes. Dies ist beim TERRA aufgrund der fehlenden parametrisierten Vegetationsschicht nicht möglich. Ein weiterer Unterschied ist die unterschiedliche Parametrisierung des Bodenwassertransportes. Im TERRA wird das Schema von Rijtema (1969), im VEG3D dagegen die oben genannten Parametrisierungen (1980) verwendet. Hier wurde mit van Genuchten gearbeitet.



## 2.3 DIE IMPLEMENTIERUNG DES VEG3D IN DAS COSMO-CLM

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit bestand zunächst darin, das Bodenvegetationsmodell VEG3D in eine aktuelle Version des regionalen Klimamodells COSMO-CLM einzubauen. Bisher war es nur in der Version COSMO 4.0 implementiert (Meißner 2008). Deshalb wurde das VEG3D nun im Rahmen dieser Arbeit zum einen in das COSMO 4.2 CLM 5 integriert und zum anderen für zukünftige Vergleiche in die Version COSMO 4.8 CLM 7 eingefügt.

COSMO-CLM befindet sich in einem stetigen Entwicklungsprozess. Diese Tatsache bringt die Notwendigkeit mit sich, die Implementierung des VEG3Ds in das Regionalmodell immer wieder vornehmen zu müssen um auf den aktuellsten Stand von COSMO-CLM aufbauen zu können. Um den Aufwand des Einbaus auf ein Minimum zu senken, wird daher die hierzu notwendige Vorgehensweise im Anhang 6.1 explizit und detailliert für zukünftige Untersuchungen erläutert.

Dieses Kapitel beschreibt die wesentlichen Veränderungen im COSMO-CLM, die bei der Kopplung des Boden-Vegetationsmodells an das Atmosphärenmodell vorgenommen werden. Vereinfacht ausgedrückt werden die Routinen des TERRA durch die Routinen des VEG3D ersetzt und dann kompiliert. In der Praxis kommt neben den zusätzlich zu implementierenden Variablen ein komplett neuer Landnutzungsdatensatz hinzu, welcher aus externen Daten erzeugt wird. Da im TERRA keine explizite Landnutzungs Klasse, sondern in jeder Gitterbox die prozentuale Aufteilung verschiedener Landnutzungs Klassen enthalten sind, muss speziell für das VEG3D eine Landnutzungs Klasse aus dem externen Datensatz des DWD erzeugt werden. Hierzu werden aus den 23 Klassen des TERRA 10 Klassen für das VEG3D erzeugt, die dann als Eingabe-Feld im Modellsetup verwendet werden (vgl. Tab. 2.1). Das Landnutzungskataster des VEG3D wird erstellt, indem die hauptsächlich vorkommende Landnutzungsart innerhalb einer Gitterbox als Eingabegröße für das Modellsetup verwendet wird. Die Bodentypen werden, sofern keine dreidimensionale Bodenkarte zur Verfügung steht, vom TERRA mit angepasster Nummer übernommen und für die COSMO-CLM Simulationen verwendet (s. Tab 2.2).

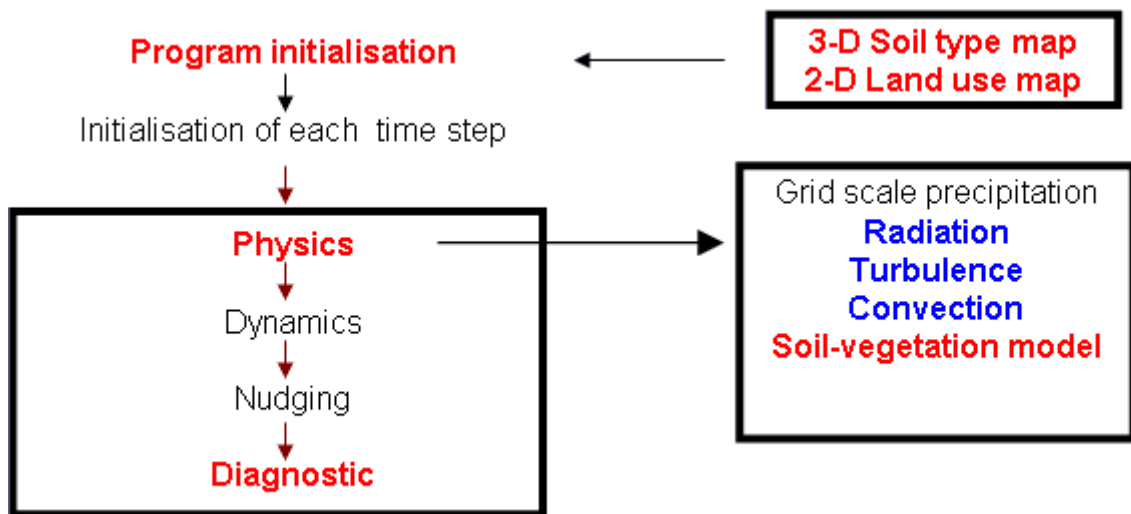
Nummer	Beschreibung VEG3D	Nummer	Beschreibung TERRA
1	Lehmiger Sand	1	Eis (17)
2	Lehm	2	Fels/Stein (18)
3	Schluffig toniger Lehm	3	Sand (9)
4	Toniger Lehm	4	Sandiger Lehm (7)
5	Tonerde	5	Lehm (2)
6	Torf	6	Lehmiger Ton (4)
7	Sandiger Lehm	7	Tonerde (5)
8	Wasser	8	Torf (6)
9	Sand	9	Wasser (8)
10	Schluffiger Lehm	10	Eis (über Wasser)
11	Sandig toniger Lehm		
12	Schluff		
13	Sandiger Ton		
14	Schluffiger Ton		
17	Eis		
18	Fels/Stein		

**Tabelle 2.2:** Verwendete Bodentypen in den Bodenvegetationsmodellen VEG3D und im TERRA. In Klammer stehen die VEG3D Bodentypen, die bei Übernahme des DWD Standardsatzes für die COSMO-CLM/VEG3D Simulationen verwendet werden.

Das Boden-Vegetationsmodell hat einen direkten Einfluss auf den Quellcode in drei physikalischen Routinen und in der diagnostischen Routine. Da dort Variablen aus dem Boden-Vegetationsmodell verwendet werden, müssen die nachfolgenden Routinen an das verwendete Bodenmodell VEG3D angepasst werden (Meißner 2008).

Die Strahlungsroutine wird bezüglich der Oberflächentemperatur, mit der die thermische Strahlung am Boden berechnet wird, und der Albedo, welche für die kurzwellige Strahlung verantwortlich ist, angepasst. Im VEG3D wird anstelle der Oberflächentemperatur die Bestandstemperatur für die Berechnung der langwelligen Strahlung verwendet. Die Albedo wird im TERRA konstant gehalten, im VEG3D ist sie dagegen eine von der Vegetation abhängige und somit zeitlich veränderliche Größe.

Für die Unterscheidung, inwieweit der Niederschlag als Schnee oder als Regen fällt, verwendet das VEG3D in der Konvektionsroutine neben der Temperatur in ca. 300 m Höhe die Bestandstemperatur. Das TERRA hingegen greift auf die Oberflächentemperatur zurück.



**Abbildung 2.1:** Skizze der Simulationsschritte im COSMO-CLM. In rot: Veränderungen im Quellcode. Blau: Routinen, die Variablen vom Boden-Vegetationsmodell verwenden.

Der latente und sensible Wärmefluss wird im TERRA mit Hilfe der Feuchte und der Temperatur an der Oberfläche in der Tubulenzroutine berechnet. Das VEG3D berechnet die Wärmeflüsse bereits im Boden-Vegetationsschema, womit die Flüsse für Zwecke der Rechneroutine bereits zur Verfügung stehen.

Als letztes wird der Einfluss auf die diagnostische Routine beschrieben. In ihr werden am Ende jedes Zeitschritts die oberflächennahen Größen berechnet. Wenn das VEG3D benutzt wird, findet die Berechnung dieser Größen (z.B. die 2m-Temperatur, die Feuchte, etc.) nicht mehr im Rahmen dieser Routine, sondern direkt im Boden-Vegetationsmodell statt.

Die Berechnung der 2m-Temperatur in den zwei Bodenmodellen VEG3D und TERRA wird hier im Hinblick auf die in den Abschnitten ... folgenden Vergleiche näher erläutert. Im Hauptprogramm des VEG3D wird die Temperatur in zwei Meter Höhe folgendermaßen berechnet:

$$T_{2m} = \frac{T^*}{k} \left[ f_r \left( \frac{z_{oh} + 2}{L} \right) - f_r \left( \frac{z_r - d}{L} \right) \right] + T_{am}$$

$L$  ist die Monin-Obukhov Länge,  $T_{am}$  die Temperatur der untersten atmosphärischen Modellschicht,  $T^*$  Skalierungstemperatur für die Prandtlschicht,  $z_{oh}$  die Rauigkeitslänge des Temperaturprofils,  $d$  die Verdrängungshöhe und  $f_r$  die Dyer-Businger Beziehung.

Die 2m-Temperatur wird in der Simulation des COSMO-CLM mit TERRA auf folgende von Raschendorfer (DWD) entwickelte Weise berechnet:

$$T_{2m} = T_{srf} + \frac{f_{SI}}{f_{SA}} (T_{atm} - T_{srf})$$

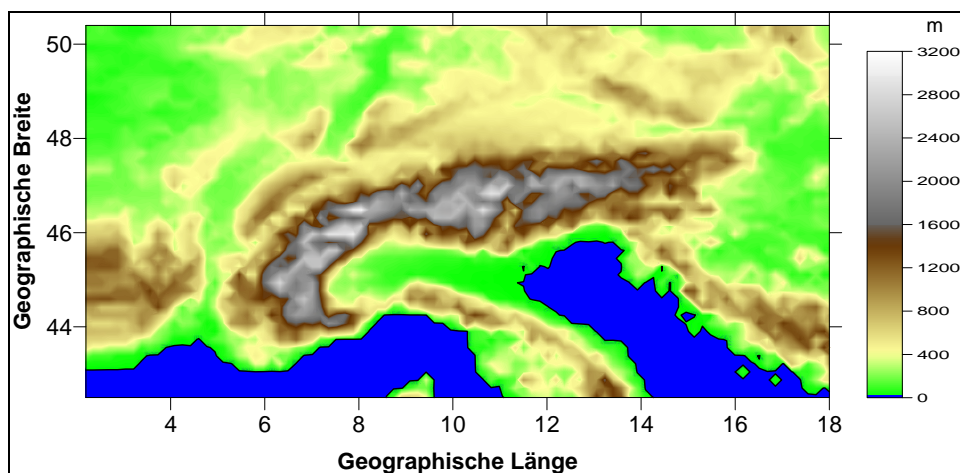
Es gehen jeweils Werte der Temperatur am Boden  $T_{srf}$  und aus der untersten Modelllevelschicht  $T_{atm}$  in die Berechnung mit ein. Die Parameter  $f_{SI}$  und  $f_{LA}$  sind dimensionslose Widerstandsparameter.

Die Berechnung der Temperatur in zwei Meter Höhe wird in der Modellbeschreibung des COSMO (Doms, 2005) nicht erläutert. Die oben gezeigten Formeln stammen direkt aus dem Programmcode. Die Temperatur wird im COSMO-CLM mit TERRA in der Routine *turbtran.incf* und mit VEG3D im Hauptprogramm des Bodenmodells *src\_soil\_veg3d.f90* berechnet.

### 3 CLM-SIMULATIONEN MIT DEN ZWEI BODEN-VEGETATIONSMODELLEN VEG3D UND TERRA

Die vorliegenden Simulationen mit den Boden-Vegetationsmodellen TERRA und VEG3D, gekoppelt mit dem Atmosphärenmodell COSMO-CLM (Version 4.2), wurden für den Zeitraum vom 08.08.2001 bis 28.08.2001 mit einer Auflösung von  $0.0625^\circ$  ( $\sim 7$  km) durchgeführt. Die Auswahl der simulierten Periode basiert auf klimatischen und technischen Aspekten: Zum einen spielt die Vegetation im Hochsommer eine große Rolle und zum anderen liegen müssen in dem ausgewählten Zeitraum ausreichend Messdaten vorliegen. Beide Aspekte, die wichtig für eine basierte Vergleichbarkeit sind, reduzieren die Simulationszeit auf den Zeitraum August 2001. Als Antriebsdaten lagen GME Vorhersagedaten vor. Das Gebiet, für das die Berechnungen angestellt wurden, erstreckt sich von  $2.2^\circ$  bis  $18.0^\circ$  östlicher Länge und von  $2.5^\circ$  bis  $50.4^\circ$  nördlicher Breite (s. Abb. 3.1). Die Alpen nehmen einen wesentlichen Teil des Modellgebietes ein, da sie einen großen Einfluss auf die Ergebnisse für Baden-Württemberg ausüben (Meissner, 2008).

In Abschnitt 3.1 werden mehrere Stationen innerhalb Baden-Württembergs mit einzelnen Modellgitterboxen verglichen. Das Kapitel 3.2 stellt eine Analyse der Modellsimulation mit dem Boden-Vegetationsmodell VEG3D des Ausschnitts mit der Ausdehnung in der Länge von  $6.5^\circ$  -  $10.5^\circ$  sowie in der Breite von  $47.5^\circ$  -  $50.0^\circ$  dar.



**Abbildung 3.1:** Berechnetes Modellgebiet mit Modellorographie.

Das Ziel der Untersuchung ist es, die Unterschiede zwischen den beiden Bodenmodellen VEG3D und TERRA, sowie den Einfluss der beiden Boden-Vegetationsmodelle auf die atmosphärische Grenzschicht festzustellen.

### **3.1 STATIONSVERGLEICH VOM 08.08. – 28.08.2001**

Im Rahmen des Vergleichs der Simulationen mit TERRA und mit VEG3D sollen die Ergebnisse von COSMO-CLM mit den beiden Bodenmodellen zunächst anhand der Daten für die Stationen Hartheim (s. Kap. 3.1.1) und am Messmast des KIT Campus Nord (vgl. Kap. 3.1.2) gegenüber gestellt werden.

Der Bodentyp beeinflusst die tägliche Variation der 2m-Temperatur, der Feuchte und der Wärmeflüsse. Die Unterschiede zwischen verschiedenen Bodentypen wirken sich auf die Evaporation und den fühlbaren Wärmestrom aus. So ist zum Beispiel die Verdunstung über sandigem Lehm höher als über reinem Lehmboden und der sensible Wärmefluss geringer. Je höher die Bodenfeuchte, desto größer ist der latente Wärmestrom an der Oberfläche. Auch die Art der Landnutzung spielt eine Rolle bei der Evapotranspiration und der Strahlung. So haben Waldflächen aufgrund ihrer dunkleren Farbe sowie ihrer komplexeren Oberflächenstruktur, die die einfallende Strahlung in hohem Maße absorbiert, eine sehr viel geringere Albedo als Ackerflächen.

Der Vergleich wird für zwei Gitterpunkte (Bezeichnung: (1) = [8.47°/49.05°], (2) = [7.76°/47.92°]) durchgeführt. Für diese Gitterpunkte liegt bei beiden Bodenmodellen die Landnutzung Wald vor. (s. Tab. 3.1). Die zum Gitterpunkt (1) am nächsten gelegene Station ist der Messmast am KIT [8.43°/49.09°], zum Gitterpunkt (2) ist es die Forstmeteorologische Messstelle Hartheim des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg [7.73/47.93].

In Kap. 3.1.3 folgt ein Vergleich für zehn ausgewählte Stationen innerhalb Baden-Württembergs, die aufgrund ihrer Lage in vier Kategorien unterteilt wurden. An diesen Stationen konnten die 2m-Temperatur, die maximale und minimale Temperatur, der Wind in 10 m Höhe, der Niederschlag und die spezifische Feuchte in 2 m Höhe ausgewertet werden, da diese Größen aus Meßreihen zur Verfügung standen.

Pflanzen- /Boden- eigenschaften	(1) KIT	(1) KIT	(2) Hartheim	(2) Hartheim
	TERRA	VEG3D	TERRA	VEG3D
Rauigkeitslänge z0 (m)	0.3	0.3	0.2	0.2
Blattflächenindex Minimum	2.8	7.0	2.9	7.1
Blattflächenindex Maximum	3.1	7.9	3.2	7.9
Minimaler Pflanzen- bedeckungsgrad	0.8	0.9	0.9	0.9
Maximaler Pflanzen- bedeckungsgrad	0.8	1.0	0.9	1.0
Wurzeltiefe (m)	0.6	1.5	0.6	1.5
Landnutzungsklasse	Laubwald	Laubwald	Laubwald	Laubwald
Bodentyp	Sandiger Lehm	Sandiger Lehm	Lehm	Lehm

**Tabelle 3.1:** Pflanzen- und Bodencharakteristik der Boden-Vegetationsmodelle TERRA und VEG3D für die beiden Standorte.

### 3.1.1 HARTHEIM

#### 3.1.1.1 VERGLEICH VON VEG3D UND TERRA

Die Konfiguration des COSMO-CLM war zur Berechnung der Bodentemperatur und des Bodenwassergehalts für den vorliegenden Lauf in zehn Schichten eingestellt. Die Initialisierungsdaten der beiden Größen wurden bei den Simulationen mit VEG3D und TERRA jeweils aus den GME Antriebsdaten gewonnen. Die einzelnen Schichtiefen sind der Tabelle 3.2 zu entnehmen. Mit dem VEG3D ergibt sich eine über die zehn Schichten gemittelte Bodentemperatur von 18.5°C. Damit sind die mit VEG3D berechneten Temperaturen im Mittel um 0.5 K niedriger als die Werte, die anhand von TERRA ermittelt wurden. Die obersten Bodenschichten bis in eine Tiefe von 0.25 m werden mit VEG3D um 1.0 K kälter berechnet als die mit TERRA. Die Differenz der Simulationsergebnisse von COSMO/VEG3D und COSMO/TERRA in der Tiefe von 0.25 m bis 1.00 m beträgt immerhin noch - 0.5 K. Ab einer Tiefe von 2 m unterscheiden sich die Bodentemperaturen zwischen den Simulationen der beiden Bodenmodelle nicht mehr. Die TERRA-Werte des Bodenwassergehalts sind bis auf die siebte Schicht (Tiefe von ca. 1 m bis 2 m) über den gesamten Boden hinweg trockener als die für VEG3D ermittelten Größen. Bei Betrachtung

## CLM-Simulationen mit den zwei Boden-Vegetationsmodellen VEG3D und TERRA

der einzelnen Bodenschichten ist ein Zusammenhang zwischen der Bodenfeuchte und der Bodentemperatur festzustellen. So ergibt die Auswertung der TERRA Daten bis in die Tiefe von 0.25 m eine um 0.9 – 1.1 K höhere Temperatur und gleichzeitig eine geringere Bodenfeuchte als die Werte des VEG3D. Die Betrachtung der 2m-Temperatur ergibt, dass die Werte von TERRA 1.7 K über den Daten des Bodenvegetationsmodell VEG3D liegen.

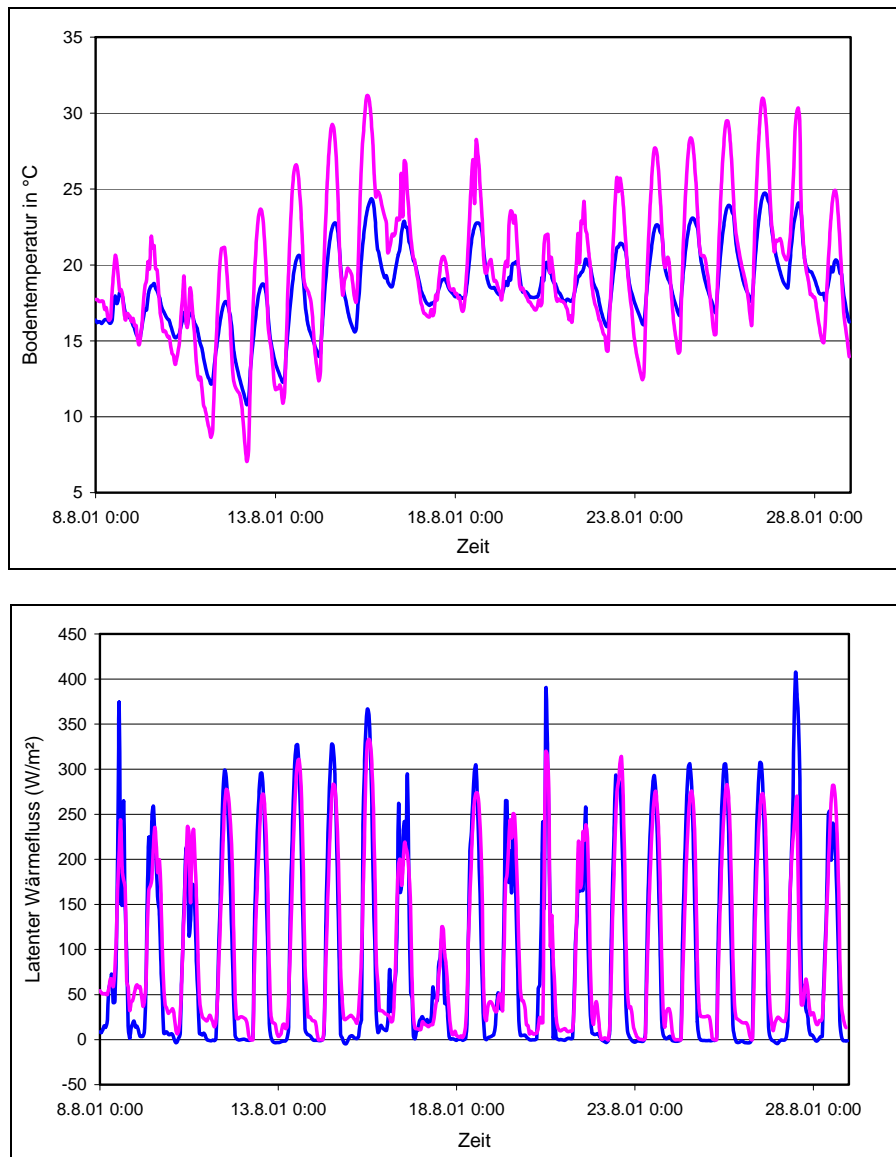
Temperatur [°C]	0,005m	0,025m	0,07m	0,16m	0,34m	0,7m	1,42m	2,86m	5,74m	11,5m
<b>VEG3D</b>	18.5	18.5	18.5	18.4	18.3	18.2	18.4	18.6	18.6	18.6
<b>TERRA</b>	19.6	19.6	19.5	19.3	19.0	18.7	18.5	18.6	18.6	18.6
Wassergehalt [Vol-%]										
<b>VEG3D</b>	34.6	26.4	21.3	16.8	10.7	10.5	11.6	12.0	11.9	11.9
<b>TERRA</b>	26.2	19.7	15.6	13.8	12.2	11.2	11.7	11.7	11.6	11.6

**Tabelle 3.2:** Bodentemperatur und Bodenwassergehalt für jede Schicht über den gesamten Zeitraum gemittelt (08.08.2001 – 28.08.2001).

Bei der Betrachtung der Tagesgänge der Bodentemperatur ist in den obersten drei Schichten ein markanter Unterschied in den Amplituden der beiden Modelle zu erkennen. Dies wird in der obersten Bodenschicht am deutlichsten, wo die Amplitude der Werte von TERRA die des VEG3D an einigen Tagen im Maximum um mehr als 6 K übertrifft (vgl. Abb. 3.2 oben). An jedem Tag liegt die höchste Temperatur, die sich anhand von TERRA ermitteln ließ über der des VEG3D, ebenso wie die tiefste mit TERRA ermittelte Temperatur an fast allen Tagen unterhalb der Daten des VEG3D liegt. Dies rührt eventuell von der Tatsache her, dass im VEG3D eine Vegetationsschicht parametrisiert ist. Außerdem ist der Boden in den obersten 25 cm mit der Simulation COSMO/TERRA deutlich trockener als mit der Simulation COSMO/VEG3D. Da an der vorliegenden Station die Landnutzung im Modell nur aus Waldflächen besteht, führt dies dazu, dass die Vegetationsschicht im VEG3D ein starkes Abkühlen durch eine hohe nächtliche Ausstrahlung verhindert und umgekehrt am Tag eine starke Erwärmung dämpft.

Das tägliche Maximum des mit VEG3D ermittelten latenten Wärmestroms liegt an 15 von 21 Tagen über den TERRA Werten. Am deutlichsten wird dies an Tagen mit Niederschlagsereignissen sichtbar (vgl. Abb. 3.2 unten).





**Abbildung 3.2:** Oben: Bodentemperatur der obersten Schicht in 0.5 cm Tiefe. Unten: Latenter Wärmefluss (VEG3D: Blau, TERRA: Rot).

### 3.1.1.2 VERGLEICH VON VEG3D UND TERRA MIT MESSDATEN

Für die Station Hartheim liegen beobachtete Werte der Bodentemperatur in sechs Tiefen, der 2m-Temperatur, der Strahlung sowie des Niederschlags vor. Diese werden in diesem Abschnitt mit den Modelldaten aus den Simulationen mit den Bodenmodellen TERRA und VEG3D verglichen.

An der Messstation Hartheim wird die Bodentemperatur in sechs Tiefen gemessen: 1cm, 3cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm und 40 cm. Die beiden Bodenmodelle berechnen die Temperatur in folgenden Tiefen: 0.5 cm, 2.5 cm, 7 cm, 16 cm, 34 cm, 70 cm, 142 cm, 286 cm, 574 cm

und 1150 cm. Um nun einen Vergleich durchführen zu können werden die Modelldaten auf die gemessenen linear interpoliert. Dies ermöglicht einen Vergleich der Werte in den obersten Bodenschichten bis in eine Tiefe von 40 cm, welche ein hohe zeitliche Variabilität aufweisen.

Die Statistik des Vergleichs zwischen der beobachteten und simulierten Bodentemperatur findet sich in Tabelle 3.3. Die mittlere quadratische Abweichung der Daten des VEG3D variiert zwischen -0.11 K und +1.47 K, mit dem TERRA reichen die Werte von +1.22 K bis +2.16 K. Beide Simulationen berechnen bis auf eine Ausnahme (VEG3D in 0.01 m Tiefe) zu hohe Temperaturen. Mit Hilfe der Abweichung lässt sich erkennen, dass die Bodentemperatur in 40 cm Tiefe von beiden Bodenmodellen am schlechtesten berechnet wird, wobei auch hier der Mittelwert von VEG3D (1.47 K) näher an der Beobachtung liegt als der des TERRA (2.16 K). Der Korrelationskoeffizient liegt bei den Daten des VEG3D zwischen 0.89 und 0.94 und ist damit höher als beim TERRA (0.75-0.86). Am besten korreliert bei beiden Modellen die Schicht in 40 cm Tiefe. Dies rührt von einem in dieser Tiefe schon sehr geringen Tagesgang. In der obersten Schicht ist die Standardabweichung am größten. Sie nimmt mit jeder Schicht nach unten ab. Damit nimmt auch die Varianz mit zunehmender Tiefe ab. Der größte Korrelationskoeffizient bedeutet somit nicht gleichzeitig die beste Übereinstimmung zwischen den Messdaten und der Simulation. Statistische Größe, z.B. hier der mittlere quadratische Fehler, die Standardabweichung und der Korrelationskoeffizient, müssen für die Bestimmung der Qualität einer Simulation zusammen betrachtet werden.

Durch den geringeren Tagesgang der Bodentemperatur in 40 cm Tiefe - was in der geringeren Varianz Ausdruck findet - als in den oberen Schichten, kann die Korrelation isoliert betrachtet irreführend sein. So lässt sich bei den Daten der Simulation mit TERRA und VEG3D in der untersten Schicht die größte (mittlere quadratische) Abweichung erkennen. Sie liegt mit 1.47/1.45 beim VEG3D und 2.16/2.13 beim TERRA deutlich über den Werten in den restlichen fünf Schichten.

	Tiefe [m]	RMSE [K]	Abw. [K]	Stdabw. [K]	Korrel.
<b>VEG3D</b>	0.01	-0.11	-0.17	2.61	0.90
	0.03	0.51	0.46	2.36	0.89
	0.05	0.55	0.50	2.17	0.89
	0.10	0.11	0.07	1.83	0.90
	0.20	0.38	0.35	1.43	0.91
	0.40	1.47	1.45	0.97	0.94
	0.01 - 0.40	0.48	0.44	1.78	0.91
<b>TERRA</b>	0.01	1.32	0.95	4.46	0.76
	0.03	1.84	1.56	3.88	0.75
	0.05	1.80	1.58	3.43	0.75
	0.10	1.22	1.09	2.65	0.77
	0.20	1.31	1.25	1.88	0.81
	0.40	2.16	2.13	1.19	0.86
	0.01 - 0.40	1.56	1.43	2.69	0.78

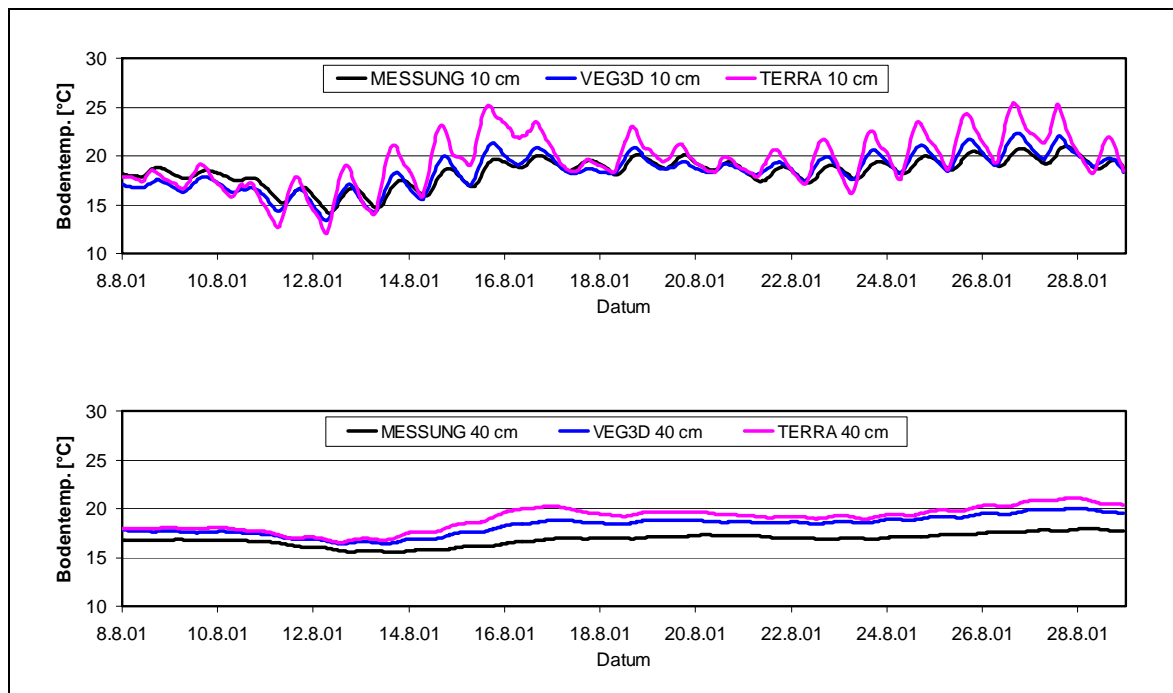
**Tabelle 3.3:** RMSE (Mittlere Quadratische Abweichung), Abweichung, Standardabweichung und Korrelationskoeffizient zwischen den beobachteten und simulierten Bodentemperaturen in verschiedenen Tiefen über den gesamten Zeitraum gemittelt.

Es zeigt sich, dass sich mit dem VEG3D wesentlich höhere Korrelationskoeffizienten und gleichzeitig deutlich geringere Abweichungen ergeben als mit dem TERRA. Die Bodentemperatur wird demnach mit dem Boden-Vegetationsmodell VEG3D besser berechnet. Über alle sechs Bodentiefen gemittelt, liegt der Wert des VEG3D 0.44 K und des TERRA 1.43 K über dem beobachteten Wert. Die Korrelation aller Bodenwerte in den sechs Tiefen beträgt 0.91 beim VEG3D und 0.78 beim TERRA. Auch die Standardabweichung ist bei der TERRA Simulation bedeutend größer als bei der Simulation mit VEG3D. Somit ergeben alle in diesem Vergleich berechneten statistischen Größen für das VEG3D die deutlich besseren Werte.

Bei der Betrachtung des Tagesgangs in Abbildung 3.3 wird ebenfalls ersichtlich, dass die Bodentemperaturen, hier beispielhaft für zwei Tiefen, vom VEG3D näher an der Kurve der

Messung liegen. In 10 cm Tiefe wird der Tagesgang recht gut widergegeben, in 40 cm Tiefe ist die tägliche Schwankung kaum noch zu erkennen. Das tägliche Maximum des TERRA Datensatzes liegt in 10 cm Tiefe bis 5 K über der Beobachtung, das vom VEG3D nur bis 1.5 K. Die Bodentemperatur in 40 cm Tiefe wird von beiden Bodenmodellen überschätzt, wobei mit TERRA im gesamten Zeitraum höhere Temperaturen berechnet werden, als mit VEG3D. Es ist zu beachten, dass die Simulation der Bodentemperatur und Bodenfeuchte eine Einschwingphase benötigt. Diese Phase wurde bei dieser Simulation auf eine Dauer von zwei Tagen festgelegt. Das heißt, dass die Simulationen am 06.08.2001 gestartet wurden.

Die Untersuchung der Bodentemperatur in verschiedenen Tiefen bis 40 cm hat ergeben, dass das VEG3D für einen Gitterpunkt mit der Landnutzungsklasse Wald im Sommermonat August wesentlich näher an der Realität liegt, als das TERRA (s. Anh. 3).



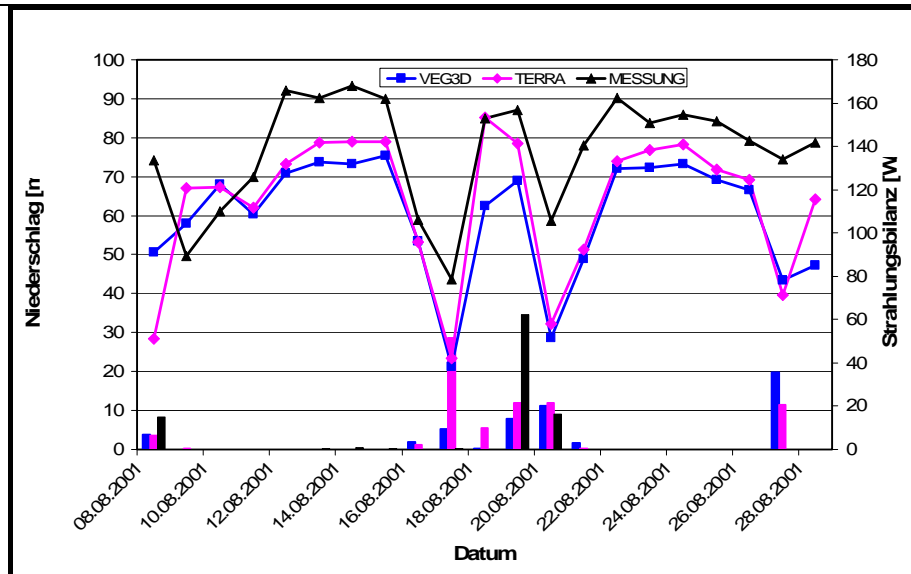
**Abbildung 3.3:** Tagesgang der Bodentemperatur in 10 cm (oben) und 40 cm (unten) von VEG3D, TERRA und Beobachtung.

Die Tagesmittelwerte der Strahlungsbilanz und der täglich aufsummierte Niederschlag sind in Abbildung 3.4 dargestellt. Das TERRA simuliert über den gesamten Zeitraum gemittelt eine Strahlungsbilanz ( $114 \text{ W/m}^2$ ), die näher an der beobachteten ( $138 \text{ W/m}^2$ ) liegt, als die des VEG3D ( $108 \text{ W/m}^2$ ). Die Korrelation der beiden Modelle mit der Beobachtung liegt bei 0.94, der mittlere quadratische Fehler ist bei der Simulation mit TERRA kleiner (VEG3D:  $-21.5 \text{ W/m}^2$ , TERRA:  $-11.4 \text{ W/m}^2$ ). Die Strahlungsbilanz wird somit von

TERRA etwas besser dargestellt. Bei der Betrachtung der Abbildung 3.4 wird der Einfluss der Strahlungsbilanz auf den Niederschlag deutlich, da die gemittelte Strahlung an einem Tag mit Niederschlag wesentlich geringer ist, als an trockenen Tagen. Beide Modelle berechnen Niederschlag auch an Tagen, an denen keiner gemessen wurde. Der größte Unterschied zwischen Modell und Messung liegt am 17.08.2001 vor. Das TERRA berechnet eine Summe von 28.8 mm, das VEG3D 5.3 mm, wobei in der Realität nur 0.1 mm gemessen wurden. Im gesamten Zeitraum tritt an drei Tagen nennenswerter beobachteter Niederschlag ( $> 1$  mm) auf. Das COSMO-CLM berechnet mit beiden Bodenmodellen Niederschlag an diesen Tagen. Dabei treten in der Tagessumme Unterschiede bis zu 23 mm (TERRA) und 26 mm (VEG3D) auf (19.08.2001). Der gesamte berechnete Niederschlag beträgt mit dem TERRA 79 mm und mit dem VEG3D 52 mm. Beim Vergleich mit dem beobachteten Wert von 53 mm liegt VEG3D in diesem Fall näher am Beobachtungswert.

Die Strahlungsbilanz wird an der Station Hartheim von beiden Bodenmodellen im Mittel zu niedrig berechnet, wobei das TERRA etwas näher an der Realität liegt. Die Albedo beträgt bei beiden Modellen 0.15. Die kurzwellige Strahlungsbilanz, die mit VEG3D berechnet wird, ist im Tagesmittel um  $5 \text{ W/m}^2$  niedriger als die mit TERRA berechnete. Dies zeigt, dass sich in der Simulation mit dem Bodenmodell VEG3D bei gleicher Albedo eine niedrigere kurzwellige Strahlungsbilanz ergibt als mit TERRA. Die langwellige Strahlung wird mit TERRA etwas größer bestimmt als mit VEG3D. Dies trägt zur wesentlich höheren 2m-Temperatur mit der TERRA Simulation bei (TERRA-VEG3D:  $+ 1.7 \text{ K}$ ).

Die Niederschlagssumme des VEG3D im gesamten Zeitraum unterscheidet sich nur um 1 mm von der Messung. Bei der Berechnung, ob und wie viel Niederschlag täglich fällt, ergeben sich Schwachpunkte in der Modellierung. Betrachtet man wie bei klimatologischen Fragestellungen Niederschlagssummen über längere Zeiträume, dann verliert die genaue Datierung der Niederschläge jedoch an Bedeutung.



**Abbildung 3.4:** Gemessene und simulierte Tagesmittel der Strahlungsbilanz und des Niederschlags.

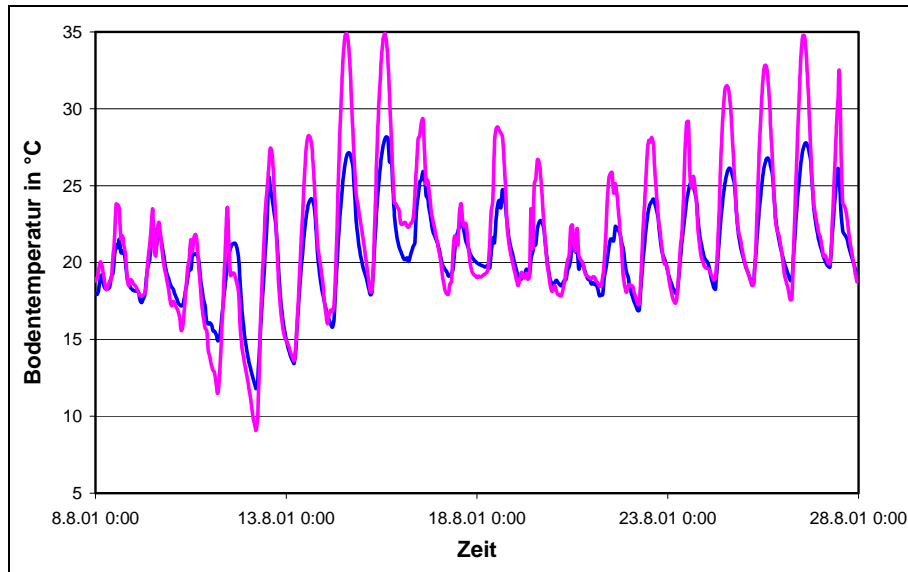
### 3.1.2 KIT CAMPUS NORD

#### 3.1.2.1 VERGLEICH VON VEG3D UND TERRA

Die Simulation mit dem Bodenmodell TERRA ergibt eine über alle zehn Schichten gemittelte Bodentemperatur von 20.2°C und liegt damit um 0.6 K über der Simulation des VEG3D. Die Temperaturen der obersten vier Schichten (bis 0,25 m) unterscheiden sich um 1.0 K (s. Tab. 3.4). Die Bodentemperatur für die darunter liegende Schicht von 0.25 m bis 1.00 m unterscheidet sich um 0.8 K (VEG3D: 19.6 °C; TERRA: 20.4 K) Die Betrachtung der tieferen Schichten zeigt eine Annäherung der beiden Modelle in der Bodentemperatur. Ab einer Tiefe von mehr als 2.5 m ergeben die Simulationen jeweils gleiche Werte.

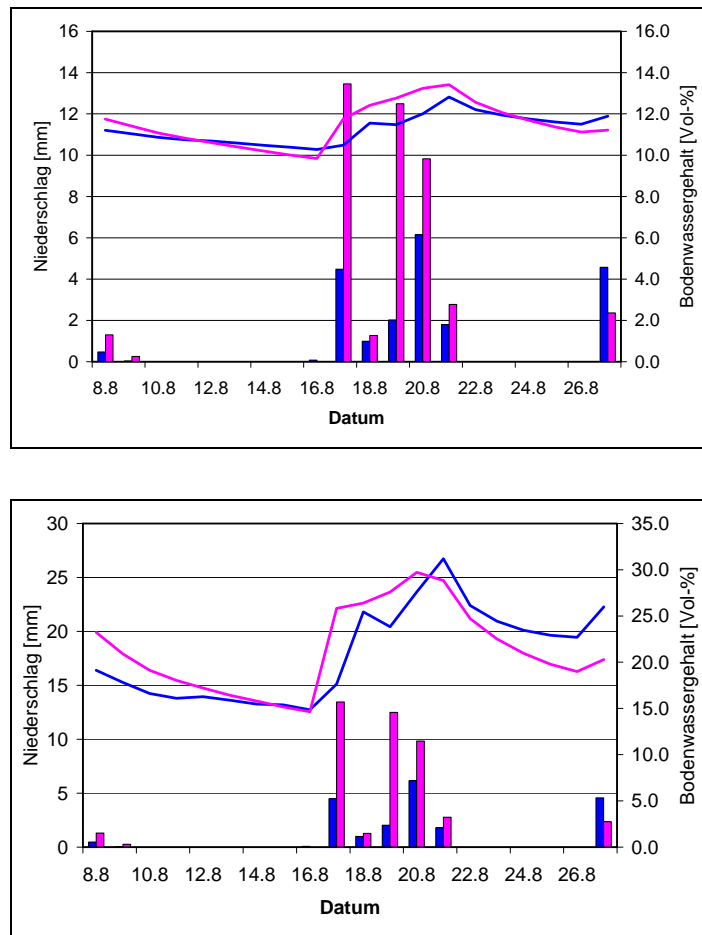
Temperatur [°C]	0,005m	0,025m	0,07m	0,16m	0,34m	0,7m	1,42m	2,86m	5,74m	11,5m
VEG3D	20.6	20.6	20.5	20.3	19.9	19.3	18.8	18.7	18.7	18.6
TERRA	21.7	21.6	21.5	21.2	20.7	20.0	19.1	18.7	18.7	18.6
Wassergehalt [Vol-%]										
VEG3D	18.0	13.5	9.7	7.0	6.1	6.3	10.8	13.7	13.8	13.8
TERRA	21.3	16.0	12.1	8.5	6.1	6.7	11.1	11.1	11.0	11.0

**Tabelle 3.4:** Bodentemperatur und Bodenwassergehalt für jede Schicht über den gesamten Zeitraum gemittelt.



**Abbildung 3.5:** Bodentemperatur der obersten Schicht in 0.5 cm Tiefe (VEG3D: Blau, TERRA: Rot).

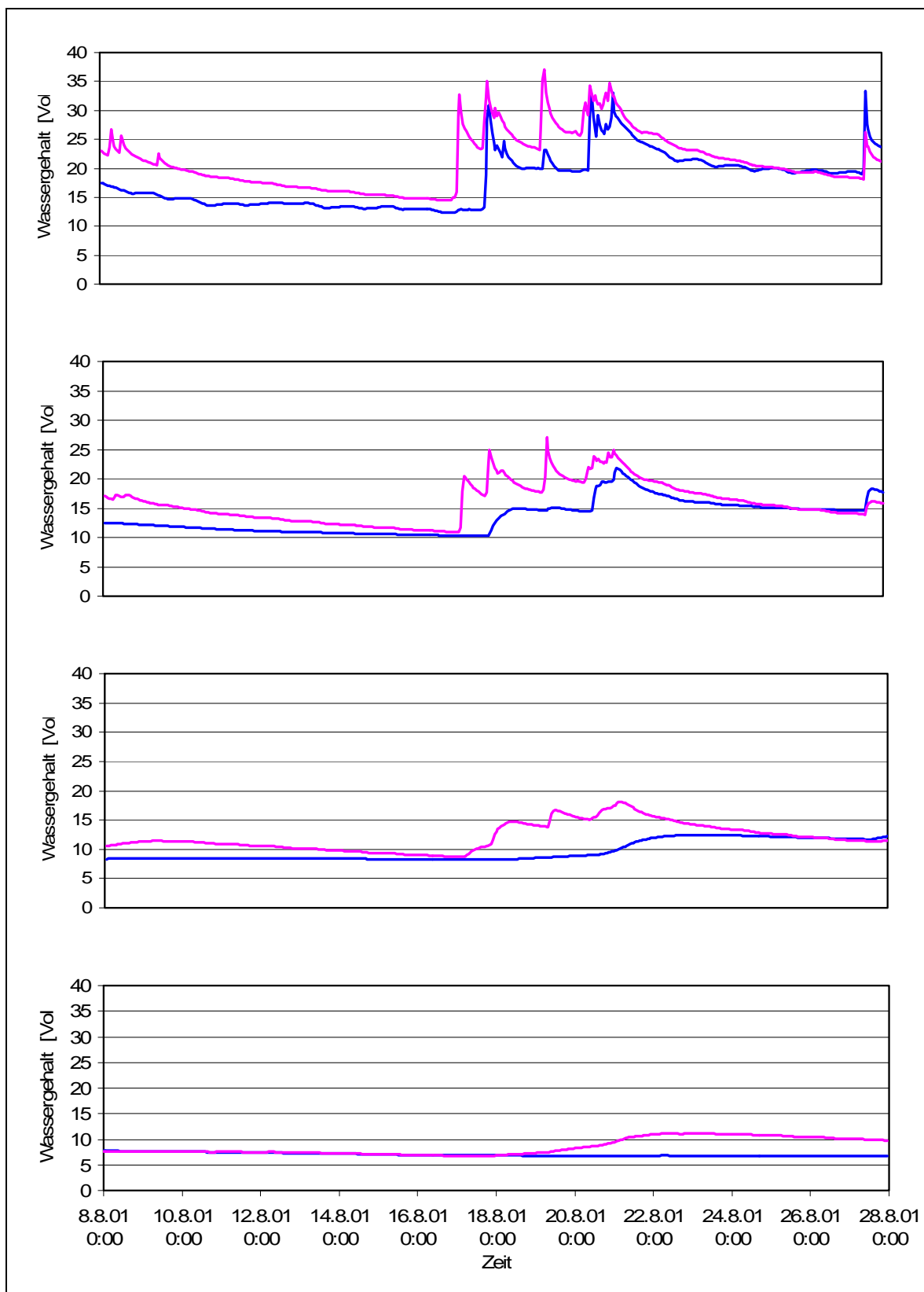
Am Messmast des KIT kommen mit TERRA in den obersten Bodenschichten wesentlich höhere Tagesmaximumwerte zustande als mit VEG3D (s. Abb. 3.5). Die Tagesminimumwerte stimmen hingegen gut überein. Ein Vergleich der Bodenfeuchteprofile (vgl. Tab. 3.4) zeigt, dass die mit TERRA ermittelten Daten in den vier obersten Schichten zunächst eine höhere Bodenfeuchte und ab einer Tiefe von über 1 m eine höhere Trockenheit, als die mit VEG3D ermittelten Werte aufweisen. Die über zehn Schichten gemittelte Bodenfeuchte des TERRA ist mit 11.5 Vol-% sehr nahe an dem Wert, der sich anhand von VEG3D ergibt (11.3 Vol-%). Bei der Mittelung über die obersten vier Schichten weist die TERRA-Simulation eine deutlich höhere Feuchte auf (TERRA: 16.8 Vol-%, VEG3D: 12.1 Vol-%). Die Zeitreihen der Bodenfeuchte der über zehn Schichten gemittelten Bodenfeuchte und die der obersten Schicht lassen sich in drei Phasen unterteilen (s. Abb. 3.6). Die Phase I entspricht den acht ersten Tagen, in denen eine fast lineare Abnahme der Bodenfeuchte in beiden Modellen erkennbar ist, wobei die Zeitreihe des VEG3D eine langsamer verlaufende Reduktion aufweist als die des TERRA. Die Phase II (9. – 14. Tag) ist von einem stufenhaften Anstieg des Bodenwassergehalts gekennzeichnet, wobei die Zunahme im Rahmen von TERRA, korrespondierend mit wesentlich höheren Niederschlägen, stärker ausfällt. In der letzten Phase des untersuchten Zeitraumes wiederholt sich der Verlauf der ersten Phase.



**Abbildung 3.6:** Tagessummen des Niederschlags und der Verlauf der über zehn Schichten gemittelten Bodenfeuchte (oben) und der obersten Schicht (unten) vom 8.8.2001 – 27.8.2001 (VEG3D: Blau, TERRA: Rot).

Die Betrachtung des Bodenfeuchteverlaufs in den einzelnen Schichten (s. Abb. 3.7) zeigt für die TERRA Daten in den obersten drei Schichten (~ 10 cm) eine deutlich stärkere Abnahme in den zwei Phasen ohne Niederschlag. In der vierten Schicht berechnet sich anhand von VEG3D eine monoton abnehmende Bodenfeuchte, mit dem TERRA ergibt sich dagegen vom zehnten Tag an eine dreitägige Zunahme. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte sich anhand der Betrachtung des gefallenen Niederschlags finden. Dieser ist mit 43.7 mm (TERRA) mehr als doppelt so hoch als beim VEG3D (20.7 mm) und beeinflusst dadurch die Bodenfeuchte bis in tiefere Schichten. In der fünften, sechsten und siebten Schicht liegen die Kurven der beiden Modelle mit leicht negativer Steigung sehr eng zusammen. Die Werte für die drei untersten Schichten (ab ca. 2 m) zeigen nahezu keine Veränderungen mehr in der Bodenfeuchte, die Werte für TERRA weisen hingegen größere Trockenheit auf.





**Abbildung 3.7:** Tagesgang des Bodenwassergehalts in den obersten vier Schichten (0.5 cm, 2.5 cm, 7 cm, 16 cm, von oben nach unten) (VEG3D: Blau, TERRA: Rot).

Um die Entwicklung der Bodenfeuchte genauer zu erklären soll im Folgenden der tägliche Niederschlag der beiden Modelle in die vorliegende Betrachtung mit einbezogen werden. In der Abbildung 3.6 (oben) lässt sich die Korrelation der beiden Größen sehr gut daran erkennen, dass der gefallene Niederschlag einen Anstieg der Bodenfeuchte zur Folge hat. Dabei ist ein Unterschied zwischen berechneten Werten für die beiden Modelle zu erkennen. Die für TERRA ermittelten Werte liefern vom 10. bis 14. Tag deutlich höhere Tagesniederschläge als das VEG3D, weisen aber am 14. Tag nur eine etwas höhere Bodenfeuchte (28.8 Vol-% zu 26.7 Vol-%) auf. Der Unterschied am Ende der ‚Trockenphase‘ (9.Tag) beträgt wie am Ende der ‚Regenphase‘ ungefähr 2 Vol-% (14.7 Vol-% zu 12.6 Vol-%). Die Bodenfeuchte für die mit TERRA ermittelten Werte nimmt schneller ab als im VEG3D. Als Ursache hierfür kann die zwischen den Bodenmodellen stark differierende Wurzeltiefe verantwortlich sein (s.Tab. 3.1). Eine Ursache kann auch die Verdunstung an der Erdoberfläche sein. Das Bodenmodell TERRA scheint die Evaporation höher zu berechnen als VEG3D (Meissner, 2008). Außerdem wird im VEG3D bei Übersättigung einer Bodenschicht das Wasser in die nächst höher liegende Schicht transportiert. Erst wenn der Interzeptionsspeicher in den Schichten gefüllt ist wird ein Abfluss berechnet. TERRA hingegen berechnet für jede Schicht einen Abfluss.

### 3.1.2.2 VERGLEICH VON VEG3D UND TERRA MIT MESSDATEN

Von den auf der Messwiese des KIT Campus Nord gewonnenen Daten wurden die folgenden sechs gemessenen Größen als Vergleichswerte für die Simulationen mit den Bodenmodellen VEG3D und TERRA verwendet:

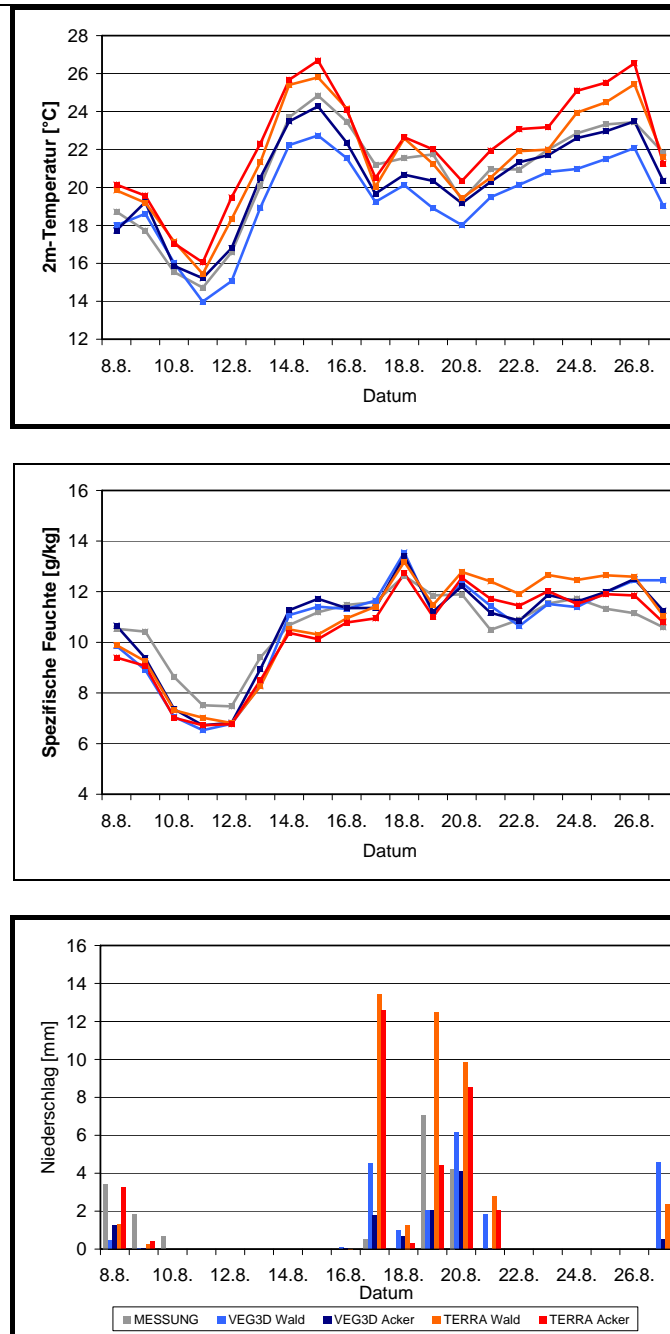
1. 2m-Temperatur	Tagesmittelwert	[°C]
2. Niederschlag	Tagessumme	[mm]
3. Spezifische Feuchte in 2 m Höhe	Tagesmittelwert	[g/kg]
4. Kurzwellige Strahlungsbilanz	Tagessumme	[W/m <sup>2</sup> ]
5. Strahlungsbilanz	Tagessumme	[W/m <sup>2</sup> ]
6. Sensibler Wärmestrom	Tagessumme	[W/m <sup>2</sup> ]

In diesem Kapitel werden diese Größen zum einen als Tageswerte verglichen, sowie zum anderen als Mittelwerte, Summen und mittlere Tagessummen für den gesamten Zeitraum vom 08.08.2001 – 28.08.2001 betrachtet.

In diesem Zusammenhang wird auch die Auswirkung der im Modell am jeweiligen und den nächstgelegenen Gitterpunkten zugrunde liegenden Landnutzungsclassen auf die Simulationsergebnisse untersucht. Dies waren in den hier betrachteten Fällen die Klassen Wald und Ackerland. Daher sind in dem Vergleich jeweils die Werte für die Landnutzung ‚Wald‘ und ‚Acker‘ untersucht worden.

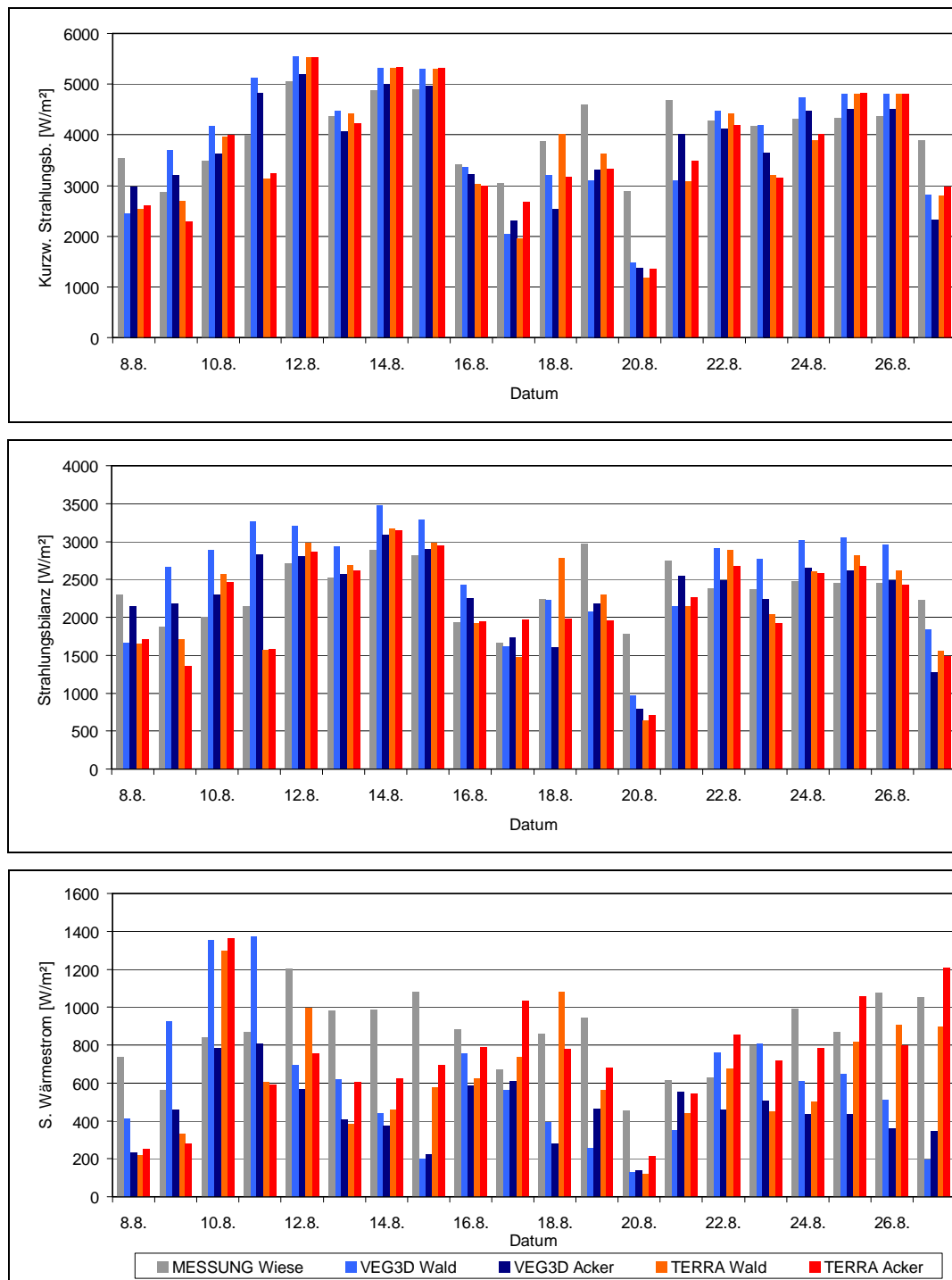
In Abbildung 3.8 sind die Temperatur und die spezifische Feuchte als Tagesmittel sowie der Niederschlag als Tagessumme dargestellt. Die Temperatur in zwei Meter Höhe wird mit den Daten des TERRA überschätzt und mit denen des VEG3D unterschätzt. Beide Modelle simulieren die Temperatur über Wald niedriger als über Acker, wobei die Werte des VEG3D Datensatzes mit der Landnutzungsclassen ‚Acker‘ am besten mit der Realität übereinstimmen (- 0.3 K). Die Auswirkung der hohen räumlichen Variabilität des simulierten Niederschlags zeigt sich besonders am 17.8. (TERRA: 13.4 mm, MESSUNG: 0.5 mm) und 27.8. (TERRA: 2.4 / 1.6 mm, MESSUNG: 0.0 mm). An diesen Tagen liegt die mit TERRA berechnete Temperatur unterhalb der gemessenen. Gleichzeitig wird an diesen Tagen mit TERRA deutlich mehr Niederschlag bestimmt als tatsächlich gefallen ist. Daraus resultiert möglicherweise die geringere Temperatur. Die spezifische Feuchte wird mit beiden Bodenmodellen gut bestimmt, die Daten des VEG3D entsprechen am besten dem Verlauf der Tagesmittelwerte.

Festzuhalten bleibt, dass zwischen den zwei Landnutzungsclassen der beiden Bodenmodelle deutliche Unterschiede zu erkennen sind. Keines der beiden Bodenmodelle liefert entscheidend bessere Werte. Es resultieren mit keiner Landnutzungsclassen durchweg bessere Ergebnisse. Der Niederschlag wird über Wald genauer prognostiziert, die Temperatur in zwei Meter Höhe über Ackerfläche. Eine Erklärung für die höhere Niederschlagssumme über Wald lässt sich nur schwer finden, da die hohe räumliche Variation zufällig dazu führen kann, dass sich an den Gitterpunkten mit der Landnutzungsclassen ‚Wald‘ mehr Niederschlag ergibt.



**Abbildung 3.8:** Gemessene und simulierte Tagesmittel und Tagessumme der 2m-Temperatur (oben), des Niederschlags (Mitte) und der spezifischen Feuchte in 2 m Höhe (unten) vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

Auf der Messwiese des FZK werden auch die Strahlungsbilanz sowie der sensible Wärmefluss gemessen. Als Vergleichsgrößen dienen die Tagessummen der kurzwelligeren Strahlungsbilanz, der Strahlungsbilanz sowie des sensiblen Wärmeflusses. Setzt man die Glieder der kurzwelligeren Strahlungsbilanz in das Verhältnis, so ergibt sich die Albedo (Reflexstrahlung/Globalstrahlung) als Größe für das Rückstrahlvermögen.



**Abbildung 3.9:** Gemessene und simulierte Tagessummen der kurzwelligen Strahlungsbi-  
 lanz (oben), der Strahlungsbilanz (mitte) und des sensiblen Wärmestroms (unten) vom  
 08.08.2001 – 28.08.2001.

Das Bodenmodell TERRA berechnet für beide Landnutzungsklassen eine Albedo von 0.16, das VEG3D bestimmt über Wald einen Wert von 0.16 und über Acker 0.22. Diese Unterschiede treten auf, da das TERRA für die Berechnung nicht die jahreszeitlichen Un-

terschiede in der Vegetation beachtet, sondern nur einen Mittelwert für alle Jahreszeiten berechnet. In Realität ist die Albedo über Wald kleiner als über einer Ackerfläche. Das bedeutet, dass die kurzwellige Strahlungsbilanz in der VEG3D-Simulation über Wald größer ist als über Acker (vgl. Abb. 3.9 oben). Die Strahlungsbilanz wird mit den VEG3D Daten über Wald überschätzt. Dies ist auf eine zu niedrige langwellige Strahlungsbilanz zurückzuführen und damit auf die zu niedrige 2m-Temperatur (s. Abb. 3.9 Mitte). Der sensible Wärmefluss wird mit beiden Bodenmodellen mit großer Variation berechnet. Das VEG3D unterschätzt den täglichen Wärmefluss bis zu 880 W/m<sup>2</sup> und überschätzt ihn bis zu 130 W/m<sup>2</sup>. Die mit TERRA berechneten Daten unterscheiden sich von der Messung zwischen – 530 W/m<sup>2</sup> und + 520 W/m<sup>2</sup>. Die Betrachtung der Mittelwerte über den gesamten Zeitraum (s. Tab. 3.5) ergibt, dass das VEG3D über Wald einen größeren sensiblen Wärmefluss berechnet als über Acker. Dieser Zusammenhang entspricht auch der Realität.

	MESSUNG	VEG3D WALD	VEG3D ACKER	TERRA WALD	TERRA ACKER
Temperatur in 2m Höhe [°C]	20.7	19.4	<b>20.4</b>	21.5	22.2
Spezifische Feuchte in 2m Höhe [g/kg]	10.7	10.6	<b>10.7</b>	<b>10.7</b>	10.4
Niederschlag [mm]	18	<b>21</b>	10	44	33
Sensibler Wärmefluss über Wiese [W/m <sup>2</sup> ]	855	601	451	634	<b>731</b>
Kurzw. Strahlungsb. über Wiese [W/m <sup>2</sup> ]	4046	<b>3910</b>	3705	3684	3672
Strahlungsbilanz über Wiese [W/m <sup>2</sup> ]	2350	2571	<b>2285</b>	2256	2166
Albedo über Wiese [%]	15	<b>16</b>	22	<b>16</b>	<b>16</b>

**Tabelle 3.5:** Über den gesamten Zeitraum gemittelte bzw. aufsummierte Werte der Simulationen mit den Bodenmodellen VEG3D und TERRA sowie die Messungen auf der Messwiese des FZK. Modellergebnisse, die am besten mit den Beobachtungen übereinstimmen, sind fett gedruckt.

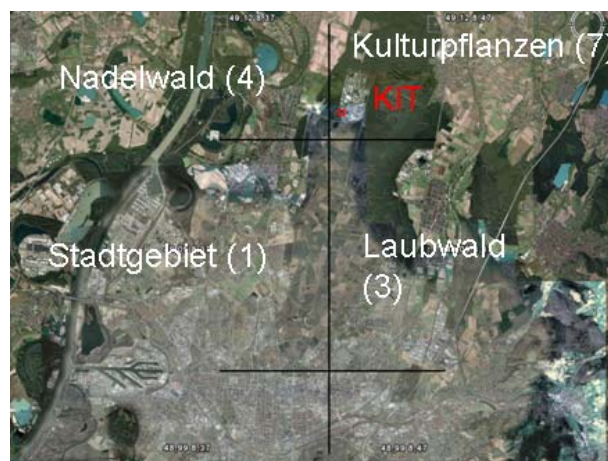
Die Tabelle 3.5 ergibt für die Betrachtung der Modellsimulationen, dass die Unterschiede zwischen den Landnutzungstypen ‚Wald‘ und ‚Acker‘ mit VEG3D realistischer wiedergegeben werden. Zum einen ist die Albedo über Acker größer und damit die kurzwellige Strahlungsbilanz geringer als über Wald und zum anderen ist der sensible Wärmefluss über Wald höher als über Acker. Die Unterschiede der 2m-Temperatur zwischen der Landnutzung ‚Wald‘ und ‚Acker‘ sind bei der Simulation mit VEG3D größer als bei der mit

TERRA. Der Niederschlag der VEG3D Simulation liegt näher an der Beobachtung als der des TERRA.

### 3.1.2.3 VERGLEICH DER WERTE AUF DEN ZWEI UNTERSTEN MODELLEVEL VON COSMO-CLM MIT MESSDATEN

Der folgende Abschnitt beschreibt den Vergleich einiger Variablen des untersten Modelllevels. Diese Daten entsprechen dem direkten Modelloutput und dienen als Basis zur Bestimmung der bodennahen Werte wie beispielsweise der 2m-Temperatur. Der direkte Modelloutput wurde verwendet, um einen Vergleich durchzuführen, der unbeeinflusst vom Postprocessing für die 2m-Werte ist. Das Berechnungsverfahren der 2m-Temperatur ist in Kapitel 2.3 nachzulesen

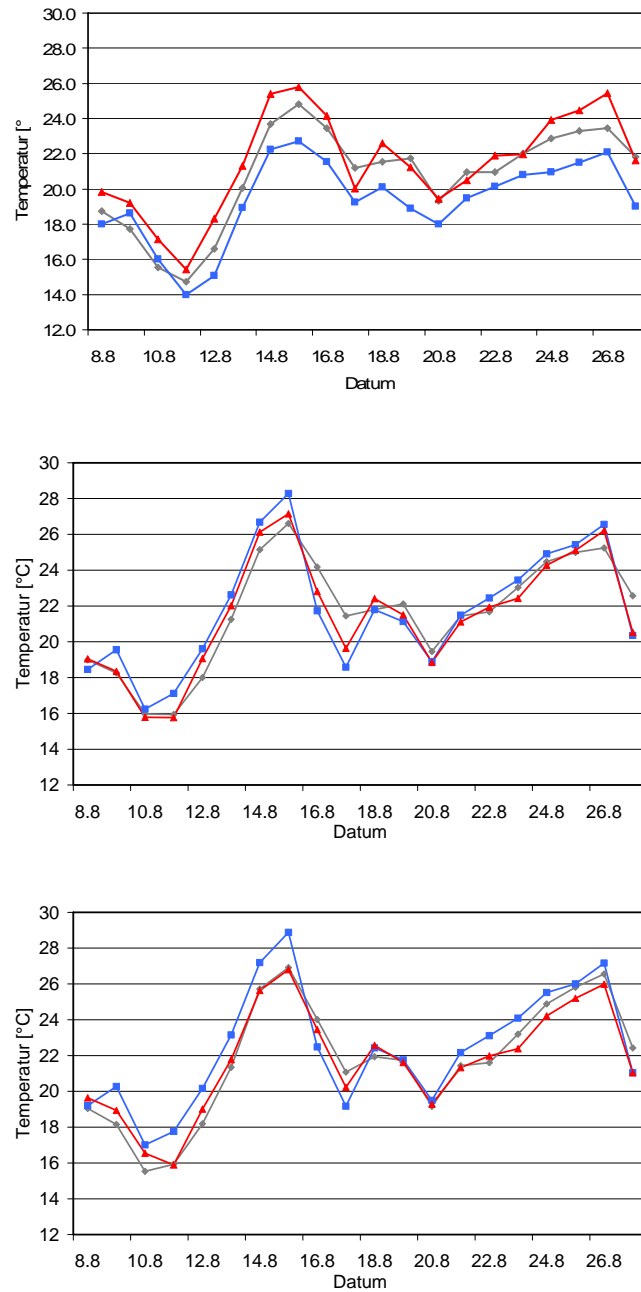
Am Messmast des Forschungszentrums Karlsruhe werden unter anderem die Temperatur, die Feuchte und die Windgeschwindigkeit bis in eine Höhe von 200 m gemessen. Mit diesen Größen wird im Folgenden ein Vergleich mit Modelldaten aus den Simulationen mit den Bodenmodellen VEG3D und TERRA über den Zeitraum vom 08.08.2001 – 28.08.2001 durchgeführt. Die ersten zwei Levels des Modells liegen in etwa 30 m und 100 m Höhe. Zusätzlich wird für die vertikale Betrachtung der Temperatur und spezifischen Feuchte die Werte in 2 m Höhe bzw. für den Wind die Daten in 10 m Höhe hinzugenommen. Die Daten des Messmast werden, da dieser in einem Waldgebiet stationiert ist, mit dem nächstliegenden Modellpunkt, der die Landnutzung ‚Wald‘ besitzt, verglichen.



**Abbildung 3.10:** Vergleich der Landnutzung des Modellgitters mit der Realität für den Messmast am KIT.

In der Abbildung 3.10 wird am Beispiel der Messwiese des KIT Campus Nord ersichtlich, dass die Landnutzung einer Gitterbox oftmals nicht der Landnutzung an der Messstation

entspricht. In dem untersuchten Fall liegt der Messmast innerhalb einer Gitterbox mit ‚Kulturpflanzen‘, wobei der Vergleich mit der angrenzenden Landnutzung ‚Wald‘ durchgeführt wird.



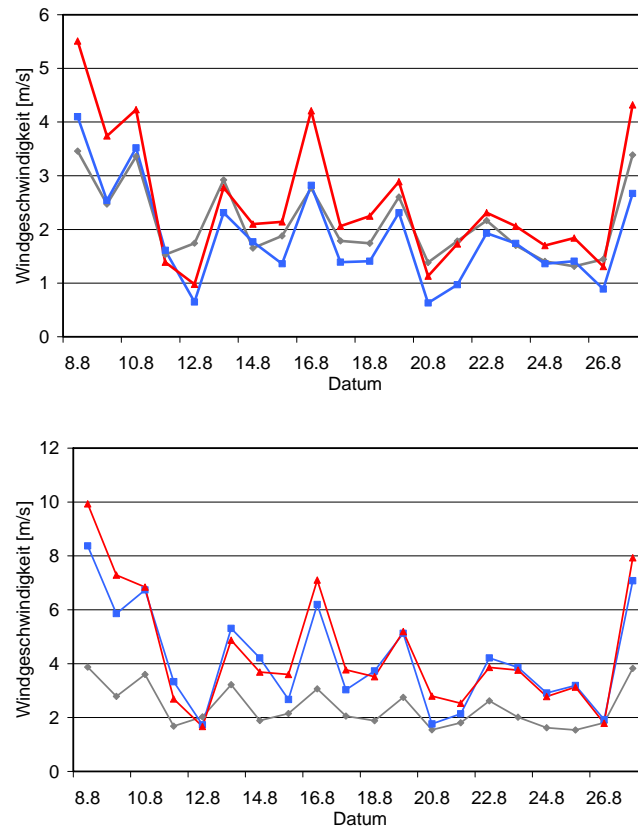
**Abbildung 3.11:** (v. oben n. unten): Tagesmittel der Temperatur in 2 m, 30 m und 100 m vom 08.08.2001 – 28.08.2001 (Blau: VEG3D, Rot: TERRA, Grau: Messung).

Die Tagesmitteltemperatur in 2 m Höhe, die mit der VEG3D Simulation berechnet wird, liegt an fast allen Tagen unterhalb der gemessenen (vgl Abb. 3.11). Die TERRA Simulation überschätzt die Temperatur in 2 m Höhe an den meisten Tagen. Es fällt auf, dass die



Differenz zwischen den Datensätzen von VEG3D und TERRA an warmen und trockenen Tagen besonders groß ist (vgl. Abb. 3.8 unten). An sonnigen Tagen unterscheidet sich die kurzweilige Strahlungsbilanz über Wald stärker von der über Acker als an bedeckten, regnerischen Tagen. Diese Differenzen werden im VEG3D möglicherweise durch die deutlichen Unterschiede in der Albedo über Wald und Acker hervorgerufen. Die größten Unterschiede der 2m-Temperatur belaufen sich auf mehr als drei Kelvin. Über den gesamten Zeitraum gemittelt ist die Simulation mit VEG3D 1.7 K zu kalt und die TERRA Simulation 0.8 K zu warm. In 30 m Höhe sind die Unterschiede der Bodenmodelle zur Beobachtung geringer. Im Mittel sind die Temperaturen des VEG3D 0.2 K wärmer und die des TERRA 0.1 K kälter als die gemessenen. Die Betrachtung der Temperatur in 100 m Höhe führt zu ähnlichen Ergebnissen wie in 30 m Höhe, wobei die mit VEG3D berechneten Daten im Mittel 0.7 K zu hoch und die des TERRA mit den gemessenen Daten genau übereinstimmen. In den beiden untersten Atmosphärenschichten des COSMO-CLM liegt die mit VEG3D berechnete Temperatur an den meisten Tagen über denen von TERRA. In zwei Meter Höhe ergeben dagegen die Daten des TERRA deutlich höhere Temperaturen als die des VEG3D. Eine Erklärung hierfür liegt eventuell in der Tatsache begründet, dass die 2m-Temperatur keine direkt im Modell ermittelte Größe darstellt, sondern mit Hilfe einer Flussgradientbeziehung berechnet wird. In diese Berechnung gehen weitere Grenzschichtannahmen mit ein, die zu einem unterschiedlichen Resultat führen können.

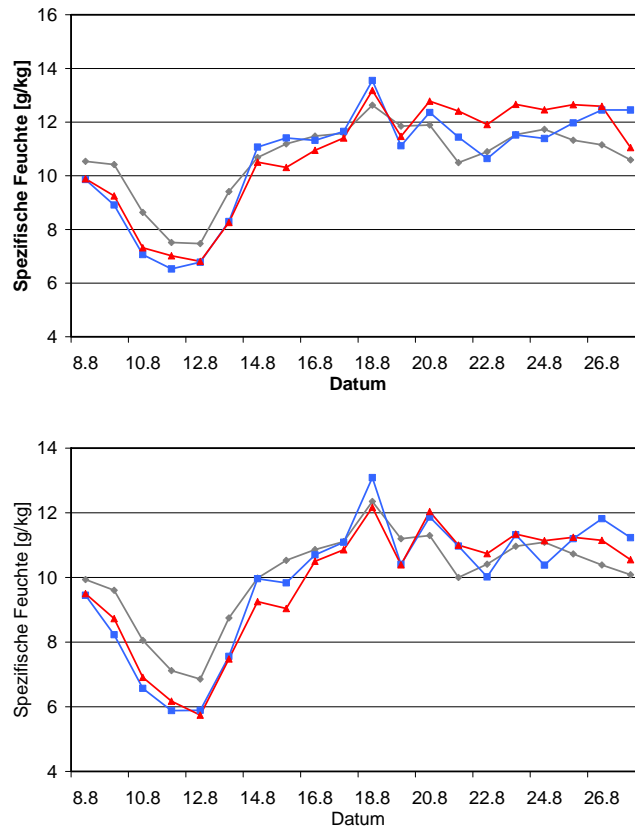
Die Ergebnisse der vertikalen Unterschiede der Temperatur deuten darauf hin, dass die Vegetationsschicht des VEG3D - in diesem Fall ‚Wald‘ - dämpfend auf die Temperatur wirkt. Mögliche Ursache kann die Berechnung der Stabilität der Grenzschicht sein, wodurch Unterschiede in beiden Modellen zu Differenzen des vertikalen Temperaturgradienten führen können.



**Abbildung 3.12:** Tagesmittel des Windes in 10 m (oben) und 30 m (unten) Höhe vom 08.08.2001 – 28.08.2001 (Blau: VEG3D, Rot: TERRA, Grau: Messung).

Der Wind in 10 m Höhe wird mit der VEG3D Simulation im Mittel 0.2 m/s unterschätzt (VEG3D: 1.9 m/s, Messung: 2.1 m/s) (s. Abb. 3.12). Die Daten des TERRA liegen an manchen Tagen im Mittel mehr als 1 m/s über den gemessenen. Gemittelt über den gesamten Zeitraum wird der Wind in 10 m Höhe mit TERRA 0.4 m/s überschätzt. Mit der Landnutzung ‚Wald‘ ergibt die Berechnung des Windes in 10 m Höhe mit dem Bodenmodell VEG3D deutlich geringere Windgeschwindigkeiten.

Der Wind nimmt in der Grenzschicht mit der Höhe stark zu. Dies führt am Messmast zu einem mittleren Wind in 30 m Höhe von 2.4 m/s. Die Modellsimulationen liegen deutlich über dem gemessenen Wert (VEG3D: 4.2 m/s, TERRA: 4.4 m/s).



**Abbildung 3.13:** Tagesmittel der spezifischen Feuchte in 2 m (oben) und 30 m (unten) Höhe vom 08.08.2001 – 28.08.2001 (Blau: VEG3D, Rot: TERRA, Grau: Messung).

Im Mittel stimmt die spezifische Feuchte in den Modellsimulationen in 2 m und 30 m Höhe gut mit der Beobachtung überein (VEG3D: 10.6 / 9.9 g/kg, TERRA: 10.7 / 9.8 g/kg, Messung: 10.7 / 10.1 g/kg). Bei der Betrachtung der Tagesmittel ist ein sehr ähnlicher Verlauf in beiden Höhen festzustellen (vgl. Abb. 3.13).

Festzuhalten bleibt, dass es zwischen dem direkten Modelloutput und den im Postprocessing berechneten Werten deutliche Unterschiede bei der Temperatur und dem Wind gibt. Mögliche Ursachen dieser Differenzen können die Rauigkeit, die Vegetationsparameter, die Stabilität oder die Kopplung der Turbulenz im Bodenmodell mit der Turbulenz im Atmosphärenmodell sein.

### 3.1.3 VERGLEICH WEITERER STATIONEN VON VEG3D UND TERRA MIT MESSDATEN

Für die Bewertung der Modellergebnisse aus den Simulationen vom 08.08.2001 – 28.08.2001 werden in diesem Kapitel die Messdaten von zehn ausgewählten Stationen aus Baden-Württemberg verwendet (vgl. Tab 3.6).

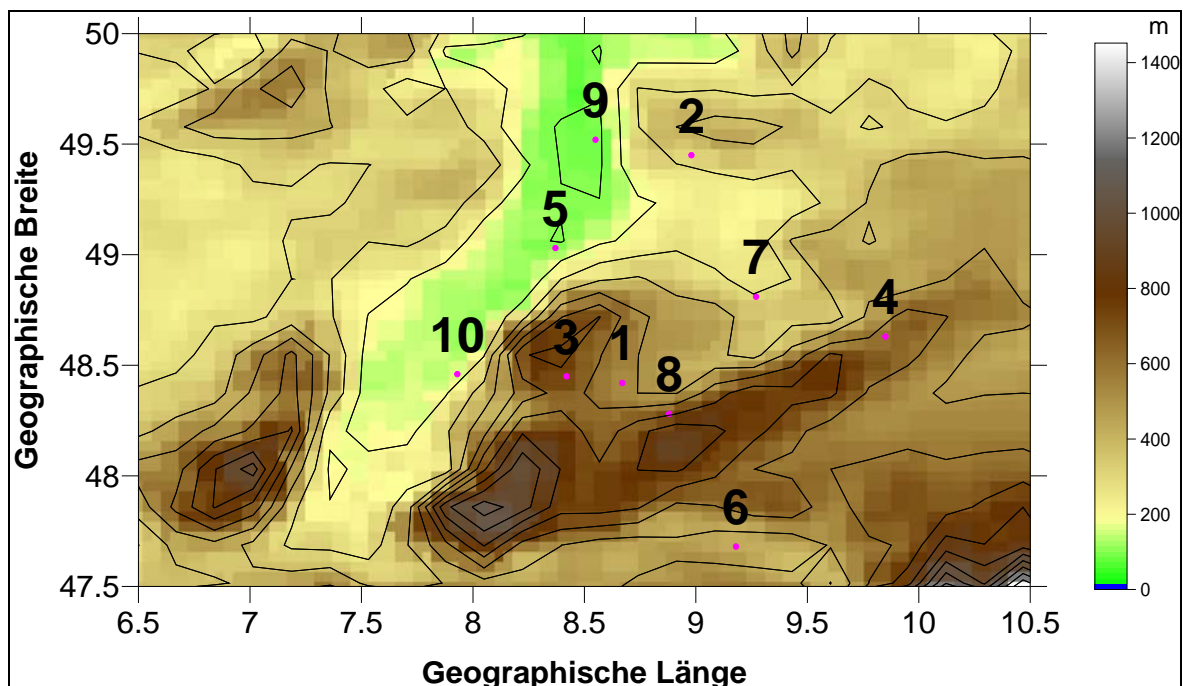
STATION		LON [°]	LAT [°]	HÖHE ü. NN [m]	Reale Umgebung
<b>Horb</b>	1	8.67	48.42	539	Wald, Acker
<b>Eberbach</b>	2	8.98	49.45	178	Wald, Urban
<b>Freudenstadt</b>	3	8.42	48.45	797	Wald, Wiese
<b>Geislingen</b>	4	9.85	48.63	443	Urban, Wald
<b>Karlsruhe</b>	5	8.37	49.03	112	Urban
<b>Konstanz</b>	6	9.18	47.68	443	Urban, Wiese
<b>Fellbach</b>	7	9.27	48.81	280	Urban
<b>Balingen</b>	8	8.88	48.28	571	Acker, Wiese
<b>Mannheim</b>	9	8.55	49.52	96	Acker, Urban
<b>Offenburg</b>	10	7.93	48.46	153	Urban

**Tabelle 3.6:** Übersicht aller verwendeter Stationen; Die Farben stehen für die im Modell vorherrschende Landnutzung (Gelb: Kulturpflanzen, Grün: Wald, Rot: Urbanes Gebiet). Außerdem wird die Station hinsichtlich ihrer realen Umgebung charakterisiert.

Diese zehn Stationen können grob in vier Klassen eingeteilt werden.

- *Stationen im Oberrheingraben:* Das Oberrheintal zeichnet sich durch ein besonders warmes Klima mit den deutschlandweit höchsten Sonnenstunden im Jahr aus. Die Stationen liegen alle in einer Höhe über NN von 100 m bis 150 m. In diesem Kapitel wird diese Region von den drei Stationen Offenburg (10), Karlsruhe (5) und Mannheim (9) widerspiegelt.
- *Mittelgebirgslagen:* Diese Stationen liegen meist in Tälern der Mittelgebirge oder auf Ebenen der Süddeutschen Schichtstufenlandschaft in einer Höhe zwischen 200 m und 600 m. Dazu gehören die Stationen Eberbach (2), Geislingen (4), Balingen (8), Horb (1) und Fellbach (7).

- *Bergstationen:* Die Stationen auf Mittelgebirgskämmen sind oft von spezifischen klimatischen Ausprägungen geprägt, was sich schon durch die Höhenunterschiede und den folglich vorhandenen Unterschieden in der Temperatur, der Feuchte und der Niederschlagsmenge ausdrückt. Unter den neun Stationen lässt sich nur die Station Freudenstadt (3) mit einer Höhe von 797 m über NN darin einordnen.
- *Voralpengebiet:* Die Station Konstanz (6) nimmt eine Sonderstellung ein, da dort das Klima vor allem durch den Bodensee geprägt wird. Der Einfluss der Alpen wirkt sich besonders bei Föhnlagen aus.



**Abbildung 3.14:** Untersuchte Stationen (1-10, s. Tab. 3.6) und Modellorographie.

Im Folgenden werden die Ergebnisse aller Stationen dargestellt. Ausgehend von den verfügbaren Datensätzen für den Simulationszeitraum werden sechs Größen ausgewertet und diskutiert. Es handelt sich um die spezifische Feuchte in zwei Meter Höhe, den Wind in zehn Meter Höhe, die Niederschlagssumme, die Temperatur in zwei Meter Höhe, die maximale Temperatur und die minimale Temperatur.

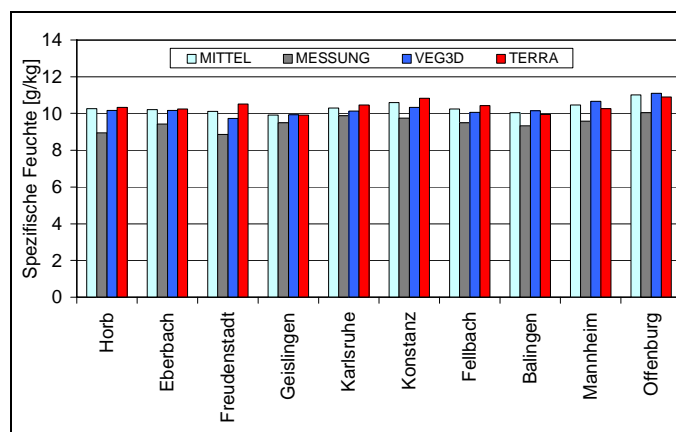
Der hellblaue Balken, der mit ‚MITTEL‘ gekennzeichnet ist, stellt das Mittel aus der Simulation mit VEG3D und TERRA dar. Im Bereich der Klimamodellierung hat es sich gezeigt, dass ein mit Hilfe mehrerer Modellläufe erstelltes Ensemble von Simulationen im Allgemeinen statistisch bessere Ergebnisse liefert als einzelne Simulationen. Mit der Implementierung des VEG3D in das COSMO-CLM ergibt sich eine zusätzliche Klimasimula-

tion für die Bildung eines Ensembles. Als ein erster Schritt in diese Richtung werden anhand der sechs folgenden Abbildungen die Mittelwerte der TERRA- und Veg3d-Simulationen diskutiert.

Die spezifische Feuchte  $q$  gibt die Menge Wasserdampf in Gramm pro Kilogramm feuchter Luft an. Sie ist in den Stationswerten nicht enthalten kann aber über den Dampfdruck  $e$  und den Luftdruck  $p$  in Stationshöhe berechnet werden:

$$q = 0.622 \cdot \frac{e}{p} \cdot 1000$$

Das Modell gibt jeweils die u-Komponente und die v-Komponente des Windes in 10 m Höhe aus. Daraus wurde dann der Betrag berechnet und mit den Stationswerten verglichen.

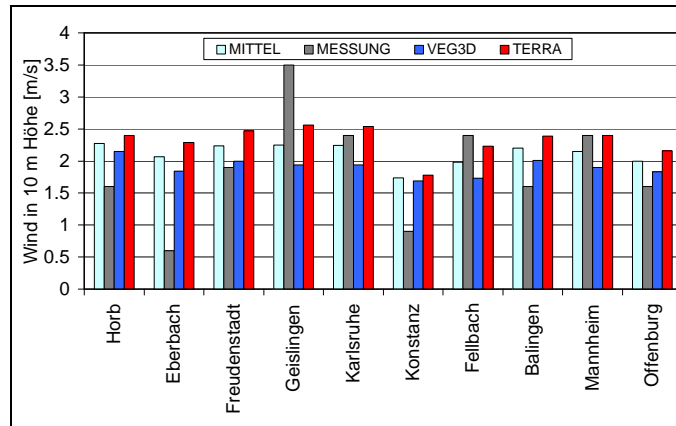


**Abbildung 3.15:** Vergleich der spezifische Feuchte gemittelt vom 8.8. – 28.8.2001.

Die spezifische Feuchte in zwei Meter Höhe wird an allen untersuchten Orten von beiden Bodenmodellen überschätzt (s. Abb. 3.15). Über der Landnutzung ‚Wald‘ und ‚Stadt‘ sind die Werte der spezifischen Feuchte, die mit TERRA berechnet wurden, größer als die der VEG3D Simulation.

Die spezifische Feuchte wird an den Stationen, wo die Landnutzungsart ‚Kulturpflanzen‘ vorherrscht, mit der VEG3D Simulation im Mittel am höchsten berechnet (Balingen: 10.2 g/kg, Mannheim: 10.7 g/kg, Offenburg: 11.1 g/kg). Die VEG3D Daten ergeben an den Stationen mit der Landnutzung ‚Wald‘ und ‚Kulturpflanzen‘ größere Abweichungen zur Beobachtung (zwischen 0.8 g/kg und 1.2 g/kg), als die Stationen innerhalb eines urbanen Gitterpunkts (zwischen 0.2 g/kg und 0.6 g/kg).

Die Werte der Datenreihe ‚MITTEL‘, die sich aus dem Mittelwert der Datensätze von Simulationen mit VEG3D und TERRA zusammensetzt, liegen aufgrund der Überschätzung von TERRA und VEG3D ebenfalls über den beobachteten.

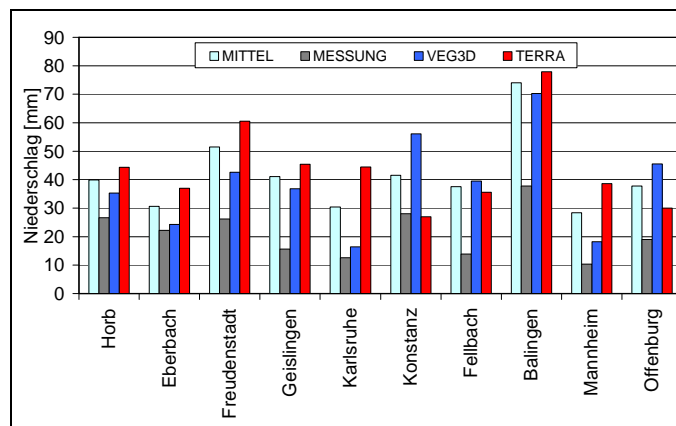


**Abbildung 3.16:** Vergleich des gemittelten 10m-Windes vom 8.8. – 28.8.2001.

Die Simulation mit VEG3D ergibt für Stationen, die innerhalb einer Gitterbox mit der Landnutzung ‚Wald‘ liegen, eine Überschätzung des Windes gegenüber der Beobachtung (vgl. Abb. 3.16). Dies trifft auch für die mit TERRA berechneten Werte zu. Die Daten des VEG3D liegen jedoch näher an den gemessenen als die des TERRA.

An der Station Geislingen wird der gemittelte Wind in zehn Meter Höhe in beiden Simulationen auffallend stark unterschätzt (VEG3D: - 1.6 m/s, TERRA: - 0.9 m/s). Eine deutliche Überschätzung des mittleren Windes weisen die Datensätze der beiden Bodenmodelle an der Station Eberbach auf (VEG3D: + 1.2 K, TERRA: + 1.7 K).

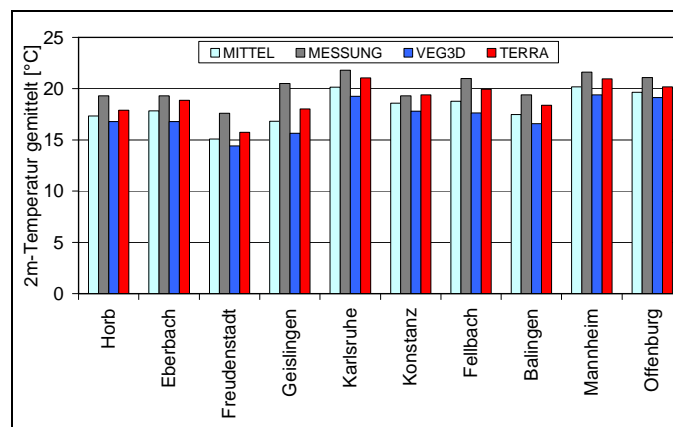
Der MITTEL-Datensatz führt nur an der Station Karlsruhe zu einem quantitativ besseren Ergebnis.



**Abbildung 3.17:** Vergleich des Niederschlags vom 8.8. – 28.8.2001.

Der Niederschlag wird in beiden Simulationen überschätzt, wobei die mit VEG3D berechneten Werte mit Ausnahme von Konstanz und Offenburg und Fellbach näher an den Beobachtungsdaten liegen als die mit TERRA simulierten (s. Abb. 3.17). Über der Landnutzung ‚Wald‘ liegen die Niederschlagssummen der VEG3D Simulation deutlich näher an der Messung. Mit dem Bodenmodell TERRA werden der Niederschlag an den Stationen Mannheim und Karlsruhe um das mehr als 2.5-fache vom gemessenen Wert zu hoch berechnet (Mannheim: + 275 %, Karlsruhe: + 256 %). Konstanz ist die einzige Station, an der im Bodenmodell TERRA zu wenig Niederschlag berechnet wird (- 1 mm).

Da beide Modelle zu viel Niederschlag berechnen, bewirkt das Mittel aus den beiden Datensätzen keine Annäherung an die Messdaten.

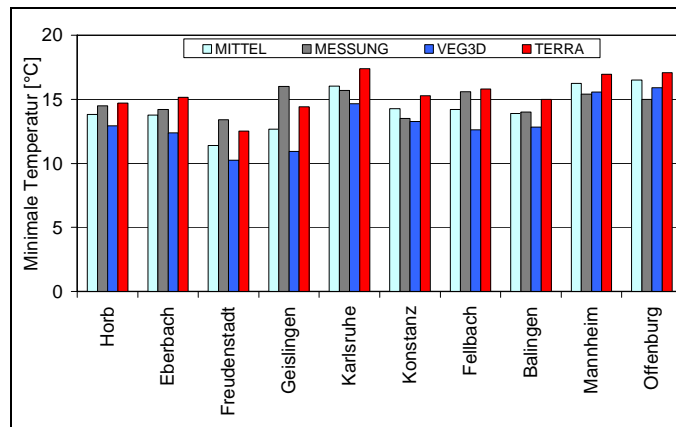


**Abbildung 3.18:** Vergleich der gemittelten 2m-Temperatur vom 8.8. – 28.8.2001.

Die gemittelte 2m-Temperatur der TERRA Simulation ergibt an allen Stationen genauere Werte als mit der VEG3D Simulation (vgl. Abb. 3.18). Aus den Daten des VEG3D resultiert an allen Stationen eine Unterschätzung (zwischen -1.51 K und - 4.86 K). Die mit TERRA berechneten Werte liegen bis auf die Station Konstanz (+ 0.1 K) ebenfalls unterhalb den gemessenen.

Auch bei der gemittelten 2m-Temperatur bewirkt die Mittelung der Datensätze von VEG3D und TERRA keine quantitative Verbesserung.



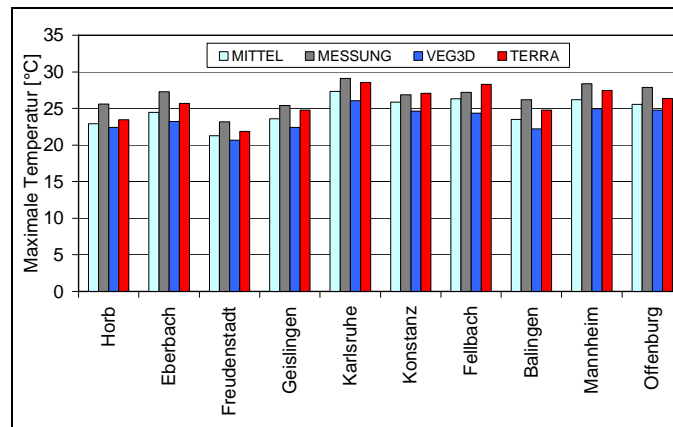


**Abbildung 3.19:** Vergleich der gemittelten minimalen Temperatur vom 8.8. – 28.8.2001.

Die über den gesamten Zeitraum gemittelte minimale Temperatur wird mit den von VEG3D berechneten Daten bis auf die Stationen Mannheim (+ 0.15 K) und Offenburg (+ 0.92 K) unterschätzt (s. Abb. 3.19). Bei beiden handelt es sich um Stationen, die sich innerhalb einer Gitterbox mit der Landnutzung ‚Kulturpflanzen‘ befinden.

Die Station Geislingen wird mit den VEG3D Daten um 5.1 K unterschätzt. Auch die Höhenkorrektur der Modellhöhe von 600 m auf die reale Höhe von 443 m kann diese hohe Abweichung nicht entscheidend mindern. Die Daten der TERRA Simulation variieren an den zehn Stationen scheinbar beliebig zwischen einer Überschätzung und Unterschätzung der minimalen Temperatur (Werte von – 1.57 K bis + 2.08 K).

Mit dem Datensatz MITTEL ergibt sich an den Stationen Eberbach (VEG3D: - 1.8 K, TERRA: + 0.9 K, MITTEL: - 0.4 K), Karlsruhe (VEG3D: - 1.0 K, TERRA: + 1.7 K, MITTEL: + 0.3 K) und Balingen (VEG3D: - 1.2 K, TERRA: + 1.0 K, MITTEL: - 0.1 K) eine Verbesserung.



**Abbildung 3.20:** Vergleich der gemittelten maximalen Temperatur vom 8.8. – 28.8.2001.

Die Betrachtung der maximalen 2m-Temperatur an den zehn ausgewählten Stationen ergibt, dass die Werte der VEG3D Simulation immer niedriger als die mit TERRA berechneten sind (- 1.1 K bis - 2.6 K). Die maximalen Temperaturen der TERRA Simulation liegen näher an den gemessenen Werten (+ 0.17 K bis - 2.15 K) als die mit dem Bodenmodell VEG3D berechneten (- 2.2 K bis - 4.1 K).

Der aus den VEG3D und TERRA Daten gemittelte Datensatz ENSEMBLE bewirkt bei der maximalen Temperatur keine Annäherung an die Messwerte.

Der Stationenvergleich der Simulationen mit den Bodenmodellen VEG3D und TERRA wurde durchgeführt, indem die Messwerte der Station mit den Modelldaten der Gitterbox, in der die Station liegt, analysiert wurden.

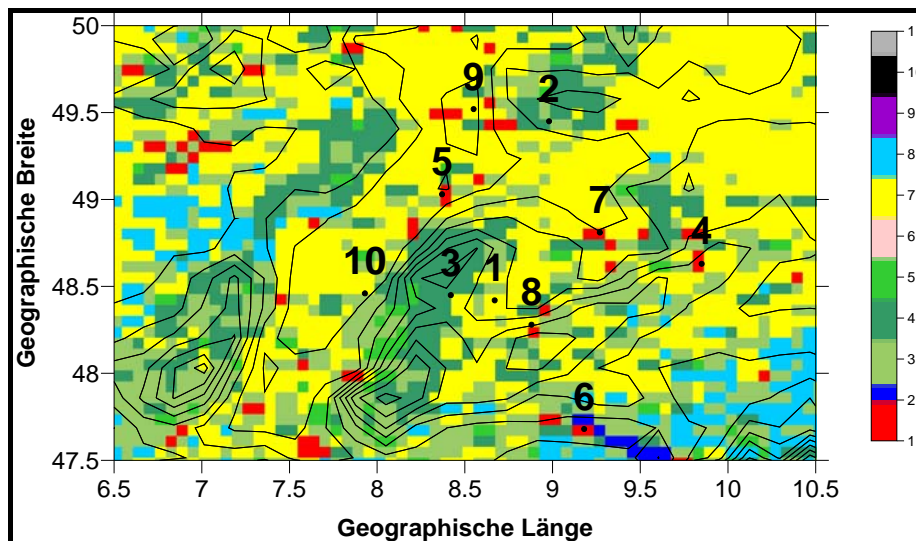
Die spezifische Feuchte, der Wind und der Niederschlag werden mit VEG3D über der Landnutzung ‚Wald‘ besser dargestellt, als mit dem Bodenmodell TERRA. Die gemittelte 2m-Temperatur berechnet das VEG3D im Vergleich mit den beobachteten Werten zu niedrig. Die tägliche Maximaltemperatur ergibt sich mit der VEG3D Simulation deutlich zu niedrig, dagegen wird die Minimaltemperatur zumindest über der Landnutzung ‚Kulturpflanzen‘ recht gut berechnet.

Die Mittelung der Simulationsergebnisse mit TERRA und VEG3D bewirkt in den meisten Fällen keine Verbesserung.

### 3.1.4 DER EINFLUSS DER LANDNUTZUNG AUF DIE ERGEBNISSE EINES STATIONSVERGLEICHS

In diesem Abschnitt wird untersucht, wie groß der Einfluss der Landnutzung auf das Ergebnis einer Simulation an einer Station ist.

Bei der Zuordnung der Landnutzung zu einer Station ergibt sich unter anderem das Problem, dass der am nächsten gelegene Modellgitterpunkt oftmals nicht die Landnutzung besitzt, die an der Station anzutreffen ist. Es ist des Weiteren möglich, dass die Station sehr nahe an der Grenze zur benachbarten Gitterbox liegt (vgl. Abb. 3.21). Deshalb werden bei einem Vergleich von Stationen mit dem Modell häufig mehrere Gitterpunkte in der nächsten Umgebung mit in die Analyse einbezogen, indem eine abstandsgewichtete Interpolation durchgeführt wird. Die vorherrschende Landnutzung der umliegenden Gitterpunkte wird dabei jedoch meistens außer Acht gelassen. In diesem Vergleich wurden die Stationen mit reinen Landnutzungsklassen verglichen. Damit ist gemeint, dass zum Beispiel eine Waldstation immer mit einem Gitterpunkt der die Landnutzung ‚Wald‘ besitzt verglichen wurde und nicht mit einem Mix aus verschiedenen Landnutzungsklassen.



**Abbildung 3.21:** Untersuchte Stationen (1-10, s. Tab. 3.6) und die Landnutzungsverteilung für Südwest-Deutschland.

Es gibt Konstellationen wo eine Station an der Grenze von zwei Gitterboxen mit der Landnutzungsklasse ‚Wald‘ und ‚Acker‘ liegt (s. Abb 3.21 Station 10). Ob es einen Einfluss hat, welche Landnutzung in die Berechnung mit eingeht und wenn ja, wie groß dieser ist, soll

der folgende Abschnitt zeigen, in dem Simulationen mit den Bodenmodellen VEG3D und TERRA verwendet werden.

Es werden anstatt der neun Stationen nur vier exemplarisch für die unterschiedlichen Kategorien untersucht:

- a) Offenburg (10) (Oberrheingraben)
- b) Geislingen (4) (Mittelgebirge)
- c) Freudenstadt (3) (Bergstation)
- d) Konstanz (6) (Bodensee/Voralpen)

Es werden nun die Stationsdaten mit den nächstgelegenen Modellpunkten, die eine unterschiedliche Landnutzungs-kategorie besitzen, verglichen. Bei den untersuchten Größen handelt es sich um die 2m-Temperatur, die minimale 2m-Temperatur, die maximale 2m-Temperatur, den Niederschlag, den Wind in zehn Meter Höhe und die spezifische Feuchte in zwei Meter Höhe.

#### **3.1.4.1 OFFENBURG**

Offenburg wird als „Tor zum Schwarzwald“ bezeichnet, da es in der Vorbergzone des mittleren Schwarzwaldes und an der Mündung des Kinzigtals in den Rheingraben liegt.

Im Modell ergibt sich an der Station die Landnutzung ‚Kulturpflanzen‘. Eine Gitterbox weiter südlich grenzt ein Modellgitterpunkt mit der Landnutzung ‚Wald‘ an. Diese beiden Modellpunkte werden nun mit der Messung verglichen.

Die Maximaltemperatur weicht bei beiden Modellrechnungen um 0.1 K (VEG3D) und 0.2 K (TERRA) zwischen den zwei Landnutzungen ab, wobei die höheren Werte über Acker berechnet werden (vgl. Tab.). Bei der Minimaltemperatur ergeben sich größere Differenzen (VEG3D: 1.9 K, TERRA: 0.4 K). Mit beiden Bodenmodellen ergeben sich mit der Landnutzung ‚Kulturpflanzen‘ die höheren Werte.

Der Vergleich mit der Beobachtung ergibt, dass die Simulationen für die Landnutzung ‚Kulturpflanzen‘ bessere Ergebnisse liefern. Die 2m-Temperatur wird mit den Daten des VEG3D um 2.0 K (Kulturpflanzen) bzw. 3.3 K (Wald) unterschätzt. Mit den Werten von TERRA ist die Abweichung geringer (Kulturpflanzen: - 0.9 K, Wald: - 1.3 K). Der Niederschlag wird mit beiden Simulationen überschätzt, wobei der Niederschlag über der Landnutzung ‚Kulturpflanzen‘ etwas näher an der Beobachtung liegt.

Die mittlere Windgeschwindigkeit in zehn Meter Höhe berechnet das VEG3D besser als das TERRA. Der Datensatz des VEG3D ergibt über Wald eine gute Übereinstimmung.

Die spezifische Feuchte wird bei beiden Modellen ungefähr um 1g/kg überschätzt.

	OBS	VEG3D ACKER	VEG3D WALD	TERRA ACKER	TERRA WALD
Max. Temp. [°C]	27.9	24.8	24.7	<b>26.4</b>	26.2
Min. Temp. [°C]	15.0	<b>15.9</b>	14.0	17.1	16.7
Mittlere 2m- Temp. [°C]	21.1	19.1	17.8	<b>20.2</b>	19.8
Niederschlag [mm]	19	46	47	<b>30</b>	36
Mittlerer Wind [m/s]	1.6	1.8	<b>1.6</b>	2.2	2.1
Spez. Feuchte [g/kg]	10.0	11.1	<b>10.8</b>	10.9	11.1

**Tabelle 3.7:** Vergleich der Bodenmodelle an der Station Offenburg bei Betrachtung von zwei verschiedenen Landnutzungsklassen. Die jeweils am besten passende Variante ist rot markiert.

### 3.1.4.2 GEISLINGEN

Die Station Geislingen liegt im Modellgebiet innerhalb der Landnutzung ‚urbanes Gebiet‘, aber ist auch umgeben von einer Gitterbox mit Landnutzung ‚Kulturpflanzen‘. Der Vergleich der Maximaltemperatur ergibt einen um 1 K höheren Wert mit der Landnutzung ‚Stadt‘, als mit ‚Acker‘ (vgl. Tab. 3.8). Die Minimaltemperatur wird mit TERRA innerhalb der ‚Stadt‘-Gitterbox nur 0.1 K geringer bestimmt als über Acker. Der VEG3D Datensatz unterscheidet sich zwischen den zwei Landnutzungsklassen um 1.1 K (ACKER: 12.1°C, STADT: 10.9°C). Die mittlere 2m-Temperatur wird mit beiden Bodenmodellen zu niedrig berechnet, wobei die Werte von VEG3D am weitesten von der Realität entfernt sind. Der Niederschlag wird ebenfalls von beiden Modellen überschätzt, wobei die Werte von VEG3D besser sind. Die Simulationen über einer Stadtfläche führt mit TERRA und VEG3D zu höheren Niederschlagssummen als über Ackerfläche. Der Wind wird von beiden Modellen unterschätzt. Die Daten von TERRA liegen näher an den beobachteten. Über der Ackerfläche ist der Wind im Mittel etwas höher als über bebautem Gebiet (VEG3D: +

## CLM-Simulationen mit den zwei Boden-Vegetationsmodellen VEG3D und TERRA

0.3 m/s, TERRA: + 0.1 m/s). Die spezifische Feuchte fällt in beiden Bodenmodellen über Stadtgebiet um 0.4 g/kg zu hoch aus. Über Ackerfläche ist sie mit den Daten des VEG3D 0.7 g/kg und mit den Werten des TERRA 0.2 g/kg zu hoch.

	OBS	VEG3D ACKER	VEG3D STADT	TERRA ACKER	TERRA STADT
Max. Temp. [°C]	25.4	21.4	22.4	23.8	<b>24.8</b>
Min. Temp. [°C]	16.0	12.1	10.9	<b>14.5</b>	14.4
Mittlere 2m- Temp. [°C]	20.5	15.9	15.6	17.9	<b>18.0</b>
Niederschlag [mm]	16	<b>28</b>	37	34	45
Mittlerer Wind [m/s]	3.5	2.2	1.9	<b>2.7</b>	2.6
Spez. Feuchte [g/kg]	9.5	10.2	9.9	<b>9.7</b>	9.9

**Tabelle 3.8:** Vergleich der Bodenmodelle an der Station Geislingen bei Betrachtung von zwei verschiedenen Landnutzungsklassen. Die jeweils am besten passende Variante ist rot markiert.

### 3.1.4.3 FREUDENSTADT

Die Wetterwarte Freudenstadt liegt südwestlich der Stadt in 797 m Höhe über NN. Die Landnutzung ist an der Station Wiese und in der Umgebung vorherrschend Wald (s. Abb. 3.22). Südöstlich von Freudenstadt überwiegt dann die Landnutzungsart Kulturpflanzen und Wiese. Die Station Freudenstadt liegt innerhalb einer Gitterbox mit Nadelwald als vorherrschende Landnutzung. Die nach Südosten benachbarte Gitterbox besteht vorrangig aus Kulturpflanzen.

Die mittlere 2m-Temperatur variiert bei der Simulation mit VEG3D um 1.4 K bei der mit TERRA um 0.5 K. Bei beiden ist die Temperatur über der Ackerfläche höher. Das Minimum der 2m-Temperatur variiert bei den Daten des VEG3D um 1.8 K bei denen des TERRA um 0.5 K, wobei auch hier die Werte über der Ackerfläche höher sind. Das Maximum der 2m-Temperatur wird mit beiden Modellen über der Landnutzung ‚Kulturpflanzen‘ höher berechnet (VEG3D: + 0.5 K, TERRA: + 0.9 K).



**Abbildung 3.22:** Umgebung von Freudenstadt mit der exakten Position der Messstation

Der Niederschlag wird von beiden Bodenmodellen überschätzt, wobei über Wald mehr Niederschlag berechnet wird (VEG3D: + 8 mm, TERRA: + 10 mm). Die Werte mit der Landnutzung ‚Kulturpflanzen‘ entsprechen bei beiden Modellen besser der Realität, wobei das VEG3D in diesem Vergleich besser abschneidet.

Die VEG3D Simulation ergibt auch die genaueren Werte für den mittleren Wind sowie für die spezifische Feuchte.



	OBS	VEG3D ACKER	VEG3D WALD	TERRA ACKER	TERRA WALD
Max. Temp. [°C]	23.2	21.2	20.7	<b>22.8</b>	21.9
Min. Temp. [°C]	13.4	12.1	10.3	<b>13.0</b>	12.5
Mittlere 2m- Temp. [°C]	17.6	15.8	14.4	<b>16.3</b>	15.8
Niederschlag [mm]	26.2	<b>35</b>	43	50	60
Mittlerer Wind [m/s]	1.9	2.2	<b>2.0</b>	2.4	2.5
Spez. Feuchte [g/kg]	8.9	10.0	<b>9.7</b>	10.6	10.5

**Tabelle 3.9:** Vergleich der Bodenmodelle an der Station Freudenstadt bei Betrachtung von zwei verschiedenen Landnutzungsklassen. Die jeweils am besten passende Variante ist rot markiert.

#### 3.1.4.4 KONSTANZ

Die Wetterstation Konstanz nimmt aufgrund der Nähe zum Bodensee eine Sonderstellung ein (s.o.). Im Modell liegt die Station in urbanem Gebiet. Die in direkter Umgebung liegenden Gitterboxen besitzen außerdem die Landnutzungen ‚Wasser‘ und ‚Wald‘ und werden für den folgenden Vergleich näher untersucht.

Die höchste Maximal- und 2m-Temperatur wird bei beiden Bodenmodellen über der Landnutzung ‚Stadt‘ berechnet, wobei die Werte von TERRA am besten mit der Beobachtung übereinstimmen. Die Daten des VEG3D unterscheiden sich in der 2m-Temperatur um 3.0 K, die des TERRA nur um 1.2 K. Die Minimaltemperatur wird mit dem Bodenmodell VEG3D besser simuliert als mit TERRA.

Mit dem TERRA wird der Niederschlag für alle drei Landnutzungsklassen sehr gut berechnet (- 1 mm bis + 5 mm). Der mittlere Wind in zehn Meter Höhe wird mit beiden Modellen überschätzt. Die größte Abweichung zur Realität ist bei den Punkten mit der Landnutzung ‚Wasser‘ vorzufinden (VEG3D: + 1.6 m/s, TERRA: + 1.3 m/s). Die Daten des VEG3D ergeben über Wald eine etwas geringere Windgeschwindigkeit als über urbanem Gebiet. Mit der TERRA Simulation sind die Geschwindigkeiten über Wald und Stadt im Mittel gleich groß. Die spezifische Feuchte ist über Wasser am größten (VEG3D: + 2.3



## CLM-Simulationen mit den zwei Boden-Vegetationsmodellen VEG3D und TERRA

g/kg, TERRA: + 1.4 g/kg). Über den zwei anderen Landnutzungsklassen wird die Feuchte ebenfalls überschätzt, wobei das VEG3D mit + 0.6 K (STADT) am besten mit der Realität übereinstimmt.

	OBS	VEG3D WASSER	VEG3D WALD	VEG3D STADT	TERRA WASSER	TERRA WALD	TERRA STADT
Max. Temp. [°C]	26.9	22.9	23.8	24.7	23.6	25.8	<b>27.1</b>
Min. Temp. [°C]	13.5	18.8	13.0	<b>13.3</b>	17.7	14.8	15.3
Mittlere 2m-Temp. [°C]	19.3	20.2	17.2	17.8	19.9	18.7	<b>19.4</b>
Niederschlag [mm]	28	57	52	56	30	33	<b>27</b>
Mittlerer Wind [m/s]	0.9	2.5	<b>1.6</b>	1.7	2.2	1.8	1.8
Spez. Feuchte [g/kg]	9.8	12.1	10.5	<b>10.3</b>	11.2	10.9	10.8

**Tabelle 3.10:** Vergleich der Bodenmodelle an der Station Konstanz bei Betrachtung von zwei verschiedenen Landnutzungsklassen. Die jeweils am besten passende Variante ist rot markiert.

### 3.1.4.5 ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Kapitel wurden die vier Stationen Offenburg, Geislingen, Freudenstadt und Konstanz bezüglich des Einflusses der Landnutzung auf die Simulationsergebnisse mit VEG3D und TERRA untersucht. Die Gemeinsamkeiten und Unterschiede der Größen 2m-Temperatur, maximale Temperatur, minimale Temperatur, Niederschlag, Wind in zehn Meter Höhe und spezifische Feuchte in Abhängigkeit der Stationskategorie und der Landnutzungsklasse sind im Folgenden zusammengefasst.

Mit dem Bodenmodell TERRA wird die 2m-Temperatur über den drei untersuchten Landnutzungsarten besser simuliert als mit VEG3D. Innerhalb einer Rangfolge liegt die Landnutzung ‚Stadt‘ am nächsten an der Realität, gefolgt von ‚Kulturpflanzen‘ und schließlich ‚Wald‘.

Die Auswertung der maximalen Temperatur hat ergeben, dass die Daten des TERRA näher an der Beobachtung liegen und sich die Qualität der Ergebnisse ebenfalls in die Reihenfolge von oben einordnen lassen. Beide Modelle simulieren über urbanem Gebiet die höchste und über Wald die niedrigste Maximaltemperatur.

Die minimale Temperatur wird im Mittel besser mit den Daten des VEG3D bestimmt als mit denen des TERRA. Die Differenz der Werte zwischen der Landnutzung ‚Kulturpflanzen‘ und ‚Wald‘ ist mit VEG3D deutlich größer als mit TERRA.

Die Betrachtung des Niederschlags zeigt die bessere Übereinstimmung der TERRA Daten für die Stationen des Oberrheingraben und der Voralpen. Die Werte des VEG3D liegen für die Station im Mittelgebirge und der Bergstation näher an der Realität. Beide Modelle überschätzen den gefallenen Niederschlag.

Der Wind in zehn Meter Höhe wird mit dem Bodenvegetationsmodell VEG3D für alle vier Stationen besser simuliert als mit TERRA. Die Berechnung über Wald entspricht im Vergleich zu den Landnutzungsklassen ‚Kulturpflanzen‘ und ‚Stadt‘ quantitativ am besten den Beobachtungsdaten.

Die Bodenmodelle VEG3D und TERRA überschätzen die spezifische Feuchte an den vier Stationen, wobei die Feuchte über Wald mit dem VEG3D am nächsten zur Beobachtung liegt.

Es fällt auf, dass die minimale 2m-Temperatur im Mittel in beiden Simulationen über Wald niedriger berechnet wird als über Acker. Die Simulation mit VEG3D berechnet die Minimaltemperatur deutlich niedriger als TERRA. Dies entspricht nicht der Realität, denn die allgemeine Erfahrung ist, dass die Minimaltemperatur über Acker niedriger ist als über Wald und bebauten Flächen. Dieser nicht der Realität entsprechende Sachverhalt ist auch schon aus vorhergehenden Arbeiten (Meissner, 2008) mit dem VEG3D bekannt und hat sich in dieser Arbeit nun verdeutlicht.

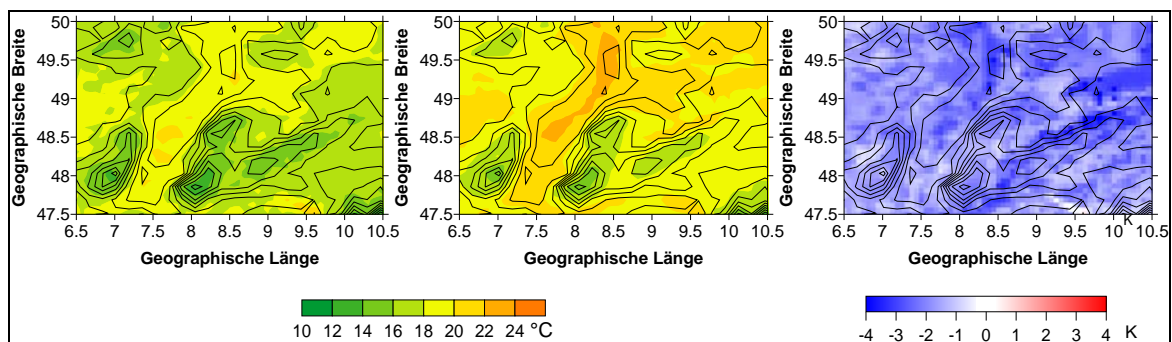
Die Maximaltemperatur über Acker ist im Allgemeinen höher als über Wald, bei bebauten Flächen und Acker ist sie in etwa ähnlich. Dies ergeben auch die Auswertungen der Simulationen mit den Bodenmodellen VEG3D und TERRA.

## 3.2 FLÄCHENVERGLEICH VOM 08.08. – 28.08.2001

Nach dem punktuellen Vergleich in Kapitel 3.1 von zwei Bodenmodellen an mehreren Stationen, wird nun im Folgenden ein flächenhafter Vergleich von Simulationen mit VEG3D durchgeführt. Bei der Analyse werden der VEG3D Datensatz mit den Daten der TERRA Simulation sowie mit interpolierten Messdaten (erstellt vom Potsdam Institut für Klimafolgenforschung (PIK) auf der Basis von mehr als 400 Stationsdaten) verglichen.

Bei dem hier betrachteten Gebiet handelt es sich um einen Ausschnitt von  $6.5^\circ - 10.5^\circ$  (Längengrad) und  $47.5^\circ - 50.0^\circ$  (Breitengrad) des im 3. Kapitel betrachteten. Für die Ergebnisse der Simulation ist dies von Bedeutung, da der Einfluss der Alpen in dem Gebiet, welches sich größtenteils aus Baden-Württemberg zusammensetzt, eine entscheidende Rolle spielt (Meissner, 2008). Zunächst werden in Abschnitt 3.2.1 der Niederschlag, die 2m-Temperatur und die Strahlungsbilanz summiert bzw. gemittelt vom 8.8.2001 – 28.8.2001 betrachtet, danach folgt der Vergleich mit Messdaten für die folgenden Größen: der Mittelwert, das Maximum und das Minimum der 2m-Temperatur, der Niederschlag, die spezifische Feuchte in 2 m Höhe, sowie der Wind in 10 m Höhe.

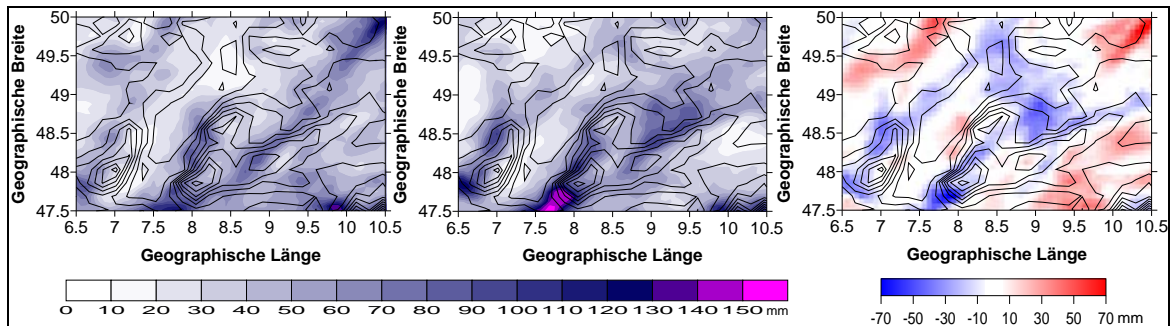
### 3.2.1 VERGLEICH VON VEG3D UND TERRA



**Abbildung 3.23:** Gemittelte 2m-Temperatur von VEG3D (links) und TERRA (Mitte); Rechts: Differenz VEG3D-TERRA gemittelt vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

Der Mittelwert der 2m-Temperatur vom 08.08.2001 – 28.08.2001 schwankt bei den Daten des VEG3D zwischen  $12.1^\circ\text{C}$  und  $21.4^\circ\text{C}$  und bei denen des TERRA zwischen  $13.1^\circ\text{C}$  und  $23.2^\circ\text{C}$  (s. Abb. 3.23). Mit den aus dem VEG3D ermittelten Werten ergibt sich ein Flächenmittel von  $17.5^\circ\text{C}$ , mit den TERRA Daten eines von  $19.5^\circ\text{C}$ . In der Abbildung 3.23 (rechts) ist zu erkennen, dass die Werte der TERRA Simulation in Baden-Württemberg fast überall wärmer sind - teilweise bis zu 4 K - als die des VEG3D. Die

Temperatur wird in der Simulation mit TERRA im Mittel um 2 K wärmer berechnet als mit der Simulation des VEG3D.



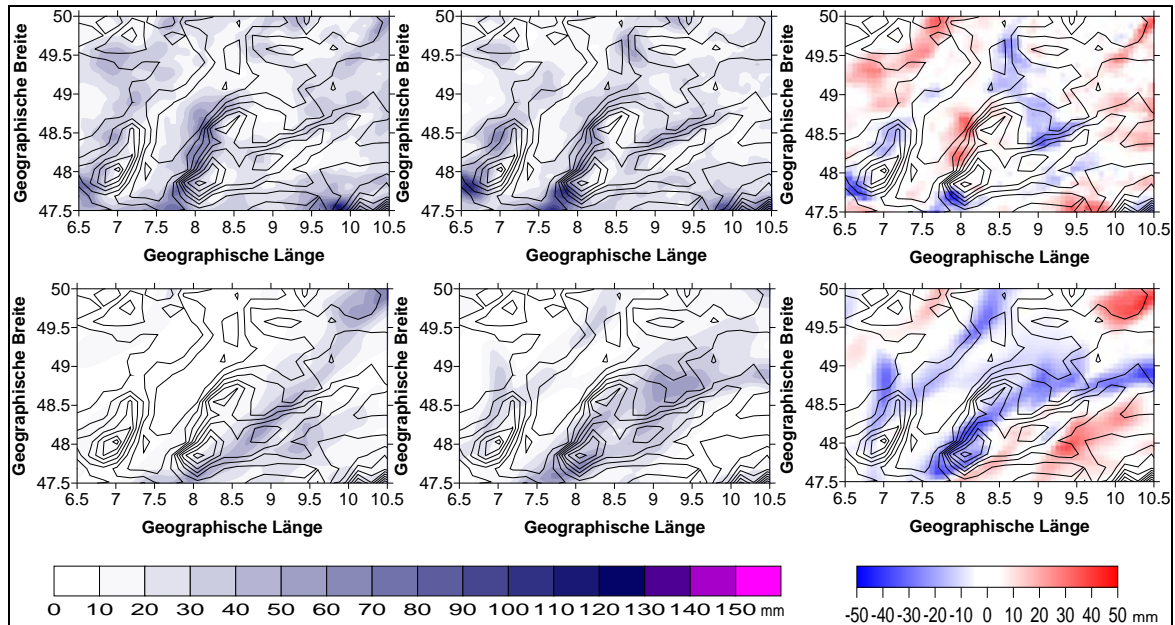
**Abbildung 3.24:** Niederschlagssumme (8.8. – 28.8.2001) von VEG3D (links) und TERRA (Mitte); Rechts: Differenz VEG3D-TERRA.

Die mit dem VEG3D Datensatz berechnete Niederschlagssumme (43.6 mm) unterscheidet sich nur sehr geringfügig von der des TERRA (44.5 mm). Die Summe schwankt an den Gitterpunkten zwischen Werten von 10 mm - 140 mm (VEG3D) und 10 mm - 160 mm (TERRA). Die flächenhafte Verteilung des Niederschlags weist in vielen Gebieten Ähnlichkeiten auf, kann aber trotzdem zwischen den beiden Modellen an einem Ort um mehr als 70 mm variieren (vgl. Abb. 3.24).

In Abbildung 4.25 sind die Summen des konvektiven und des skaligen Niederschlags der beiden Modelle dargestellt. Mit dem VEG3D werden zwischen 6 mm und 118 mm konvektiver Niederschlag, mit dem TERRA zwischen 5 mm und 116 mm berechnet. Im flächengemittelten Wert unterscheiden sich die beiden Bodenmodelle nur um 2 mm (VEG3D: 27.8 mm; TERRA: 25.8 mm). Unterschiede gibt es vor allem in der räumlichen Verteilung des Niederschlags. Im Weststau des Schwarzwaldes wird laut den VEG3D Daten bis zu 37 mm mehr konvektiver Niederschlag ausgelöst. Der Datensatz der TERRA Simulation ergibt im Bereich des Kraichgaus bis zur Schwäbischen Alb wesentlich größere konvektive Niederschlagsmengen.

Der skalige Niederschlag fällt in dem gesamten Zeitraum vorwiegend in einem Streifen ausgehend vom Südschwarzwald über die Schwäbische Alb bis in den Raum Würzburg, wobei mit dem Bodenmodell TERRA in diesem Bereich deutlich größere Niederschlagsmengen berechnet werden. Insgesamt bestimmt das TERRA für Baden-Württemberg eine Summe von 19 mm pro Gitterpunkt, das VEG3D 16 mm.

Die Untersuchung des Niederschlags hat gezeigt, dass die beiden Bodenmodelle beinahe die gleiche Menge an Niederschlag berechnen, diese jedoch deutliche Unterschiede in der räumlichen Verteilung aufweisen.

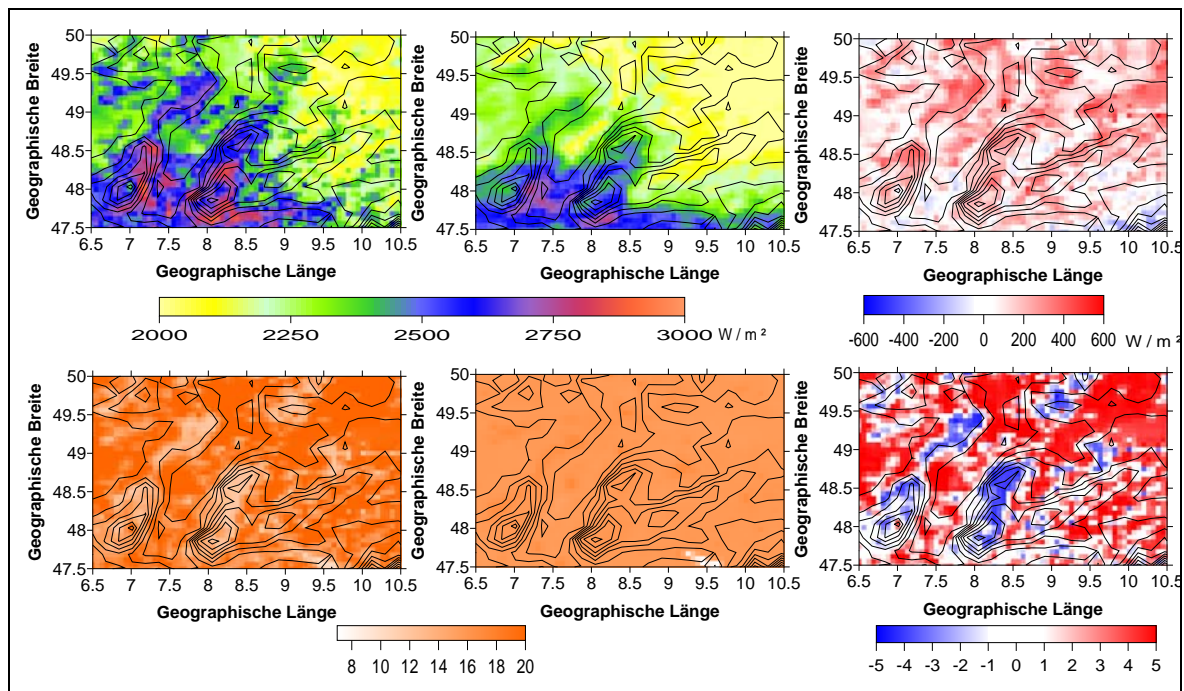


**Abbildung 3.25:** Oben: Konvektiver Niederschlag VEG3D (links) und TERRA (Mitte); Oben rechts: Differenz des konvektiven Niederschlags (8.8. – 28.8.2001) von VEG3D und TERRA. Unten: Skaliger Niederschlag VEG3D (links) und TERRA (Mitte); Unten rechts: Differenz des skaligen Niederschlags (8.8. – 28.8.2001) von VEG3D und TERRA.

Bei der Betrachtung der kurz- und langwelligen Strahlung wird zusätzlich die Albedo der beiden Modelle analysiert, da sie die Strahlungsbilanz an einem Ort beeinflusst. In der Abbildung 3.26 wird deutlich, dass die Albedo mit dem Boden-Vegetationsmodell VEG3D eine höhere räumliche Variabilität als mit dem TERRA besitzt. Dies hat zur Folge, dass die Strahlungsbilanz in der VEG3D Simulation ebenfalls durch stärkere räumliche Variationen charakterisiert ist. Über Waldgebieten ist die Strahlungsbilanz höher als über Ackerflächen, da über Wald die Albedo kleiner ist. In der Tagessumme der Strahlungsbilanz liegt die Differenz zwischen den Datensätzen von VEG3D und TERRA über die gesamte Fläche bei +145 W/m<sup>2</sup>, wobei das VEG3D Werte von 1945 W/m<sup>2</sup> bis 2908 W/m<sup>2</sup> und das TERRA Werte von 1709 W/m<sup>2</sup> bis 2775 W/m<sup>2</sup> berechnet. An manchen Orten ist die Strahlungsbilanz mit VEG3D Werten um mehr als 500 W/m<sup>2</sup> höher als mit TERRA Daten.



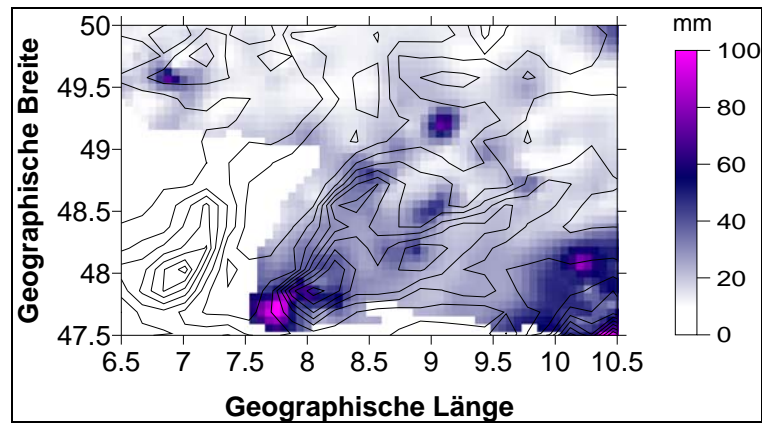
Da im TERRA die Albedo zeitlich konstant ist, zeigt sich eine geringere Variabilität als es im VEG3D der Fall ist und es berechnet dementsprechend eine weniger der Landnutzung abhängige Strahlungsbilanz.



**Abbildung 3.26:** Oben: Durchschnittliche Tagessummen der Strahlungsbilanz VEG3D (links) und TERRA (Mitte); Oben rechts: Differenz der Strahlungsbilanz (8.8. – 28.8.2001) von VEG3D und TERRA. Unten: Albedo von VEG3D (links) und TERRA (Mitte); Unten rechts: Differenz der Albedo von VEG3D und TERRA. Albedo-Werte in %.

### 3.2.2 VERGLEICH VON VEG3D UND TERRA MIT MESSDATEN

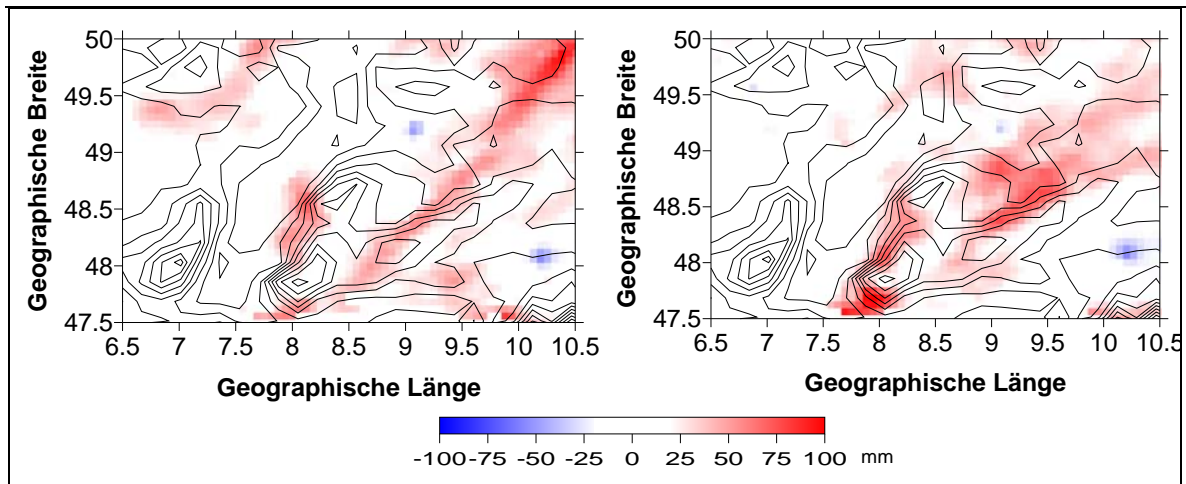
Für einen Ausschnitt mit den Längengraden  $6.5^{\circ}$  -  $10.5^{\circ}$  und den Breitengraden  $47.5^{\circ}$  -  $50.0^{\circ}$ , in dem Baden-Württemberg komplett beinhaltet ist, können die beiden Bodenmodelle mit dem Mittelwert, dem Maximum und dem Minimum der 2m-Temperatur, dem Niederschlag, der spezifischen Feuchte in 2 m Höhe, sowie dem Wind in 10 m Höhe verglichen werden. Variable wie die Bodenfeuchte oder die Wärmeflüsse sind in einer für Flächenvergleiche zu geringen Auflösung verfügbar. Untersucht wird der Zeitraum vom 08.08.2001 – 28.08.2001.



**Abbildung 3.27:** Gemessene Niederschlagssumme vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

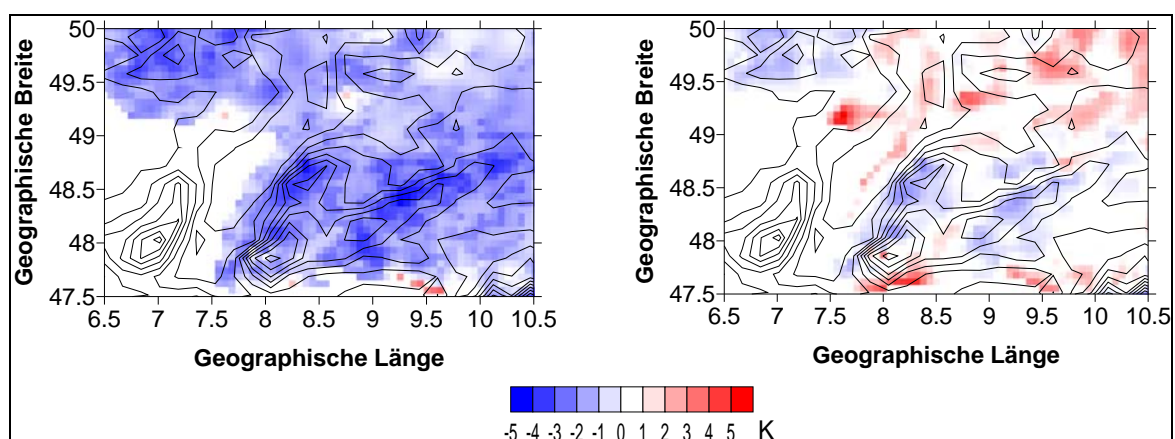
Der beobachtete Niederschlag beträgt im Flächenmittel 23.4 mm und variiert je nach Ort zwischen 7.6 mm und 105.3 mm (s. Abb. 3.27). Die Verteilung zeigt ein Süd-Nord-Gefälle mit den höheren Niederschlägen im Schwarzwald und im äußersten Süd-Osten. Das Maximum liegt dementsprechend im Südschwarzwald. Möglicherweise durch regionale Gewitter hervorgerufen, tauchen vereinzelt noch Orte auf, an denen wesentlich mehr Niederschlag gefallen ist als in der direkten Umgebung (ca.  $7^\circ/49.5^\circ$  und ca.  $9^\circ/49.2^\circ$ ). Wie gut die gesamte Niederschlagsmenge sowie die räumliche Variation von den Simulationen mit den Bodenmodellen VEG3D und TERRA wiedergegeben wird, soll die folgende Analyse aufzeigen.

Der Niederschlag wird im Flächenmittel von beiden Bodenmodellen deutlich zu hoch berechnet (VEG3D: + 21.0 mm, TERRA: + 21.2 mm). Neben der beinahe doppelt so hohen Niederschlagssumme im Vergleich zur Messung, gibt es auch sehr große örtliche Unterschiede zur Messung (s. Anh. 3). Sie betragen bei der Simulation mit VEG3D -54.5 mm bis +95.9 mm und bei der TERRA Simulation -56 mm bis +106.8 mm und erscheinen in Abbildung 4.28 deutlich. Das VEG3D stimmt im Rhein-Neckar Kreis, im Odenwald, im Kraichgau und im Schwarzwald recht gut mit der Beobachtung überein, im Luv des Schwarzwaldes und in einem schmalen Streifen vom Südschwarzwald bis an den Nord-Ostrand des Ausschnitts berechnet es zu hohe Niederschlagsmengen. Der TERRA Datensatz besitzt südöstlich der Schwäbischen Alb ein Gebiet mit recht guter Annäherung an die Messung. Starke Differenzen treten am Westrand des Schwarzwaldes, im Südschwarzwald und am nördlichen Rand der Schwäbischen Alb auf.



**Abbildung 3.28:** Differenz der Niederschlagssumme vom 08.08.2001 – 28.08.2001 zwischen den Werten von VEG3D und der Messung (links) und den Werten von TERRA und der Messung (rechts).

Als nächstes werden die 2m-Temperatur der Bodenmodelle mit der Beobachtung verglichen (s. Anh. 3). Das VEG3D berechnet im Zeitraum vom 8.8.2001 – 28.8.2001 fast im gesamten Ausschnitt eine zu niedrige 2m-Temperatur (vgl. Abb. 3.29). Am kältesten ist es im Bereich des Nordschwarzwaldes, der Schwäbischen Alb und dem Saarland (bis zu 4.8 K unter der Beobachtung). Das TERRA berechnet in den genannten Gebieten ebenfalls zu niedrige Temperaturen, allerdings unterschreiten sie die beobachtete Temperatur um höchstens 2.7 K. In der Rheinebene, im Odenwald, im Kraichgau, im Südschwarzwald, sowie im Südosten des Ausschnittes liegen die Werte von TERRA zum Teil bis zu 3 K über der Beobachtung. Das 75-Perzentil ist um 0.58 K wärmer als die Messung.



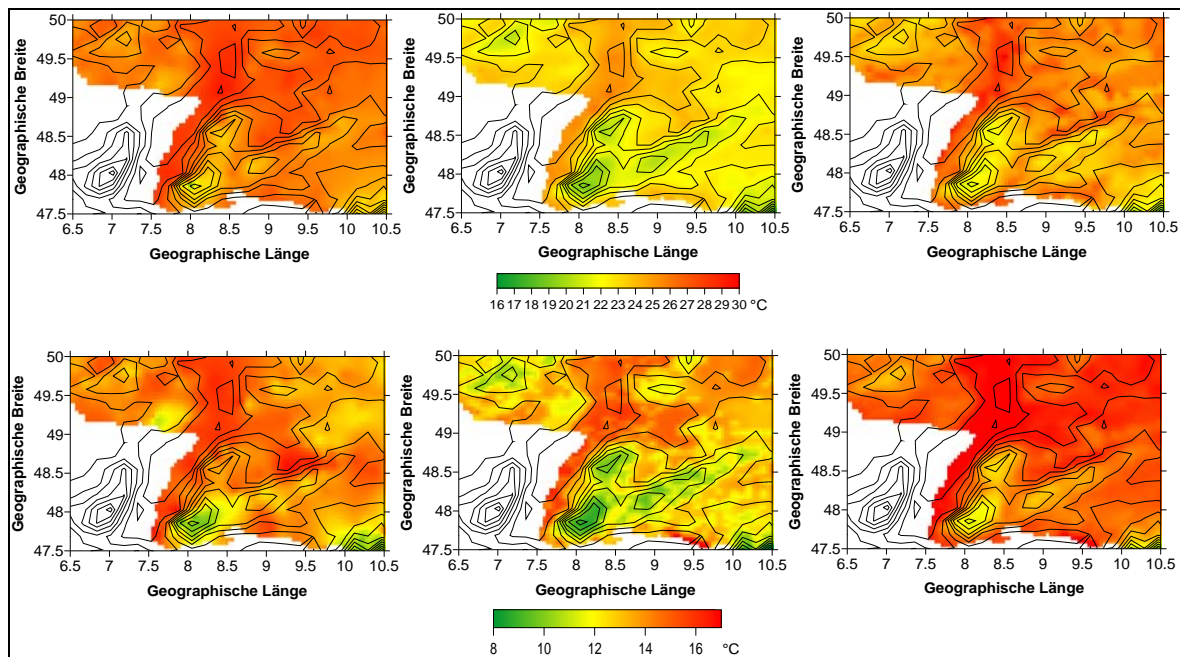
**Abbildung 3.29:** Differenz der vom 08.08.2001 – 28.08.2001 gemittelten 2m-Temperatur zwischen VEG3D und der Messung (links) und TERRA und der Messung (rechts).



## CLM-Simulationen mit den zwei Boden-Vegetationsmodellen VEG3D und TERRA

Der Korrelationskoeffizient der 2m-Temperatur zwischen Modell und Messung ist beim Datensatz von VEG3D mit 0.77 und bei dem von TERRA mit 0.79 recht hoch. Die Standardabweichungen der Simulationen sind beide größer als die der Beobachtung, die Berechnung des VEG3D liegt jedoch näher an der Messung (VEG3D: 1.3 K, TERRA: 1.4 K, MESSUNG: 1.2 K). Der mittlere quadratische Fehler des VEG3D Datensatzes übertrifft den von TERRA um 1.75 K (VEG3D: -1.88 K, TERRA: -0.13 K). Die statistische Auswertung der 2m-Temperatur ergibt, dass die Simulation mit dem Bodenmodell TERRA näher an der Realität liegt als die von VEG3D.

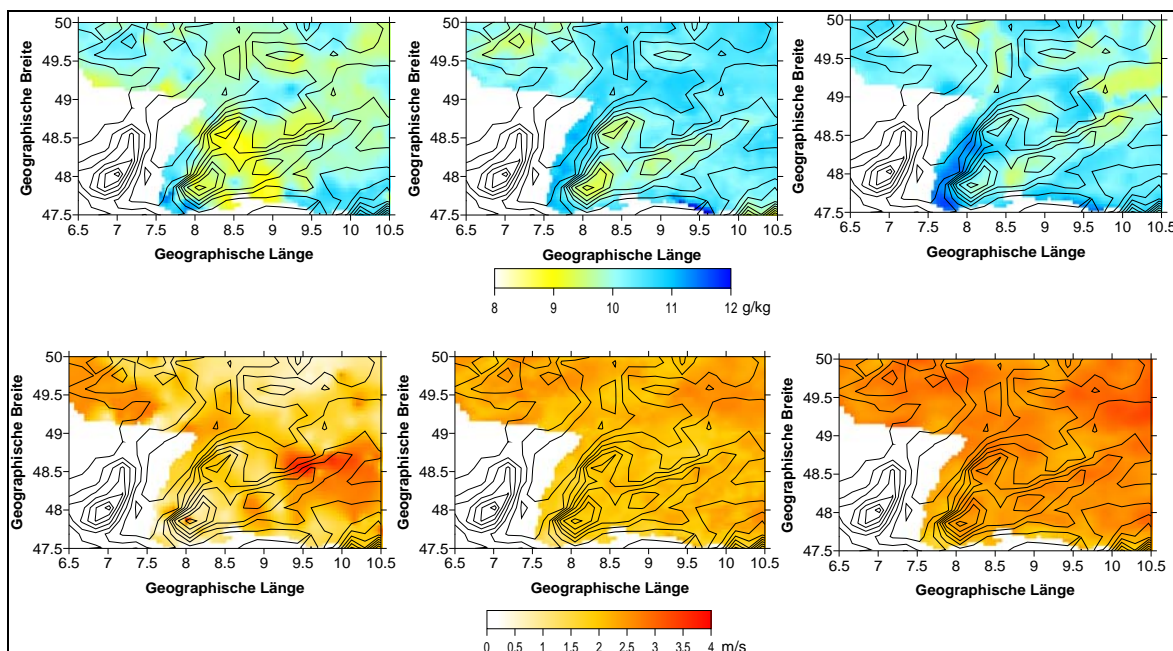
Wenn ein Klimamodell für einen Gitterpunkt A mehr Niederschlag erzeugt als an dem benachbarten Gitterpunkt B mit gleicher Modellhöhe, Bodenart und Landnutzung, dann wird jener Gitterpunkt A mit großer Wahrscheinlichkeit eine niedrigere 2m-Temperatur besitzen. Somit kann der zu hohe Niederschlag in der VEG3D-Simulation die deutlich zu niedrigen 2m-Temperaturen hervorrufen. Das original im COSMO-CLM implementierte Bodenmodell TERRA berechnet wie das VEG3D zu viel Niederschlag, die Temperatur wird dagegen im Mittel recht genau bestimmt.



**Abbildung 3.30:** Oben (v. l. n. r.): Maximale 2m-Temperatur der Messung, berechnet mit VEG3D und berechnet mit TERRA vom 08.08.2001 – 28.08.2001. Unten (v. l. n. r.): Minimale 2m-Temperatur der Messung, berechnet mit VEG3D und berechnet mit TERRA vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

Im Folgenden werden die maximale und minimale 2m-Temperatur näher untersucht. Dabei stellt sich heraus, dass die maximale 2m-Temperatur mit dem Datensatz des TERRA 30.3°C beträgt, mit dem des VEG3D 25.9°C und in der Realität 29.1°C (vgl. Abb. 3.30 oben). Das Flächenmittel wird von der VEG3D Simulation um 3.3 K, mit der des TERRA um 1.2 K zu niedrig berechnet. Die Standardabweichung der VEG3D Daten (1.2 K) ist niedriger als die von TERRA (1.5 K), die Korrelation dagegen höher (VEG3D: 0.85; TERRA: 0.76). Die Maxima der 2m-Temperatur werden mit der TERRA Simulation besser dargestellt als mit der von VEG3D. Eine mögliche Ursache kann die im VEG3D vorhandene Vegetationsschicht sein, wodurch in Bereichen mit Wald die Tagesmaxima der 2m-Temperatur herabgesetzt werden.

Bei der Betrachtung der Datensätze der minimalen 2m-Temperatur wird deutlich, dass der des TERRA zu einer Überschätzung und der des VEG3D zu einer Unterschätzung neigen (VEG3D: -1.1 K; TERRA: +1.3 K) (s. Abb. 3.30 unten). Die Korrelation ist bei beiden Simulationen deutlich niedriger als bei der maximalen Temperatur (VEG3D: 0.55; TERRA: 0.62). Beide Datensätze ergeben die größten Abweichungen im Bereich des Schwarzwalds und der Schwäbischen Alb.



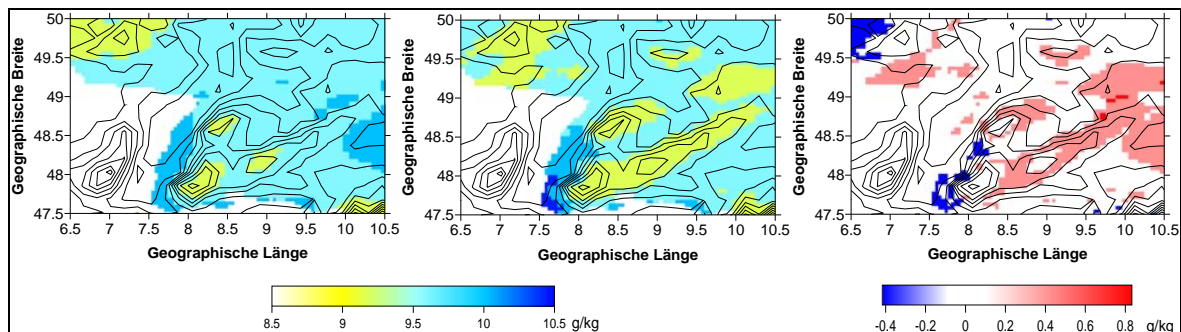
**Abbildung 3.31:** Oben (v. l. n. r.): Spezifische Feuchte in 2 m Höhe der Messung, berechnet mit VEG3D und berechnet mit TERRA vom 08.08.2001 – 28.08.2001. Unten (v. l. n. r.): Mittlerer Wind in 10 m Höhe der Messung, berechnet mit VEG3D und berechnet mit TERRA vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

Die spezifische Feuchte wird von beiden Modellen sehr ähnlich simuliert. Der flächengemittelte Wert ist mit VEG3D und TERRA gleich groß (VEG3D: 10.2 g/kg; TERRA: 10.2 g/kg), was einer Überschätzung von 0.4 g/kg entspricht. Die TERRA Daten zeigen im Bereich des Westrandes des Schwarzwalds bis zu 2.4 g/kg höhere Werte als die Messung ergeben haben. Über dem Nord- und Südschwarzwald sind die Werte der Simulation mit VEG3D näher an der Realität als die von TERRA.

Der mittlere Wind in zehn Meter Höhe wird mit den VEG3D Daten um 0.4 m/s und mit den Berechnungen des TERRA um 0.8 m/s überschätzt. Die nicht vorhandene Korrelation (Korrelationskoeffizient 0.05 bei VEG3D und 0.08 bei TERRA berechnet nach Pearson) zeigt, dass entweder die Stationsdatendichte für einen aussagekräftigen Vergleich zu gering ist, oder der Wind aufgrund der orographischen Effekte nur schwer zu modellieren ist.

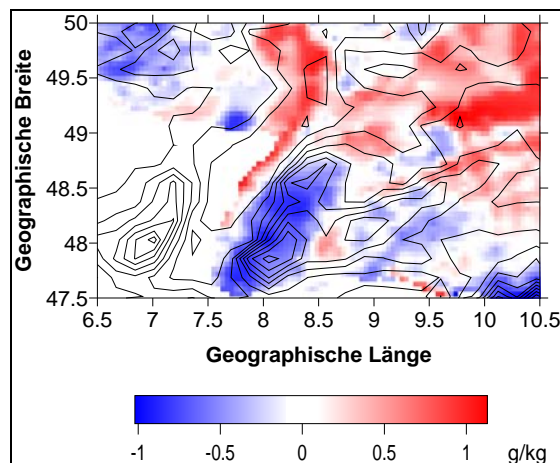
### 3.2.3 VERGLEICH DER UNTERSTEN MODELLSCHICHTEN ZWISCHEN VEG3D UND TERRA

Die Ausgabevariablen spezifische Feuchte in 2 m Höhe, 2m-Temperatur und Wind in 10 m Höhe werden im COSMO-CLM nicht direkt, sondern mithilfe einer Flussgradientbeziehung, in welche die unterste Modellschicht der Atmosphäre und die oberste Bodenschicht eingehen, berechnet (vgl. Kap. 2.3). In diesem Kapitel soll nun herausgefunden werden, wie sich die Bedingungen der untersten Atmosphärenschicht zwischen der Simulation des COSMO-CLM mit VEG3D und der mit TERRA unterscheiden. Die Simulation wurde mit 35 Levels durchgeführt, wobei das 35. Level die unterste Atmosphärenschicht im Modell darstellt (ca. 30 m). Untersucht wurde die Temperatur, der Wind und die Feuchte der 35. Schicht, die innerhalb der Prandtl'schicht liegt (ca. 30 m Höhe über Grund).



**Abbildung 3.32:** Spezifische Feuchte in der untersten Modellschicht berechnet mit VEG3D (links) und TERRA (Mitte) und die Differenz von VEG3D und TERRA (rechts) vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

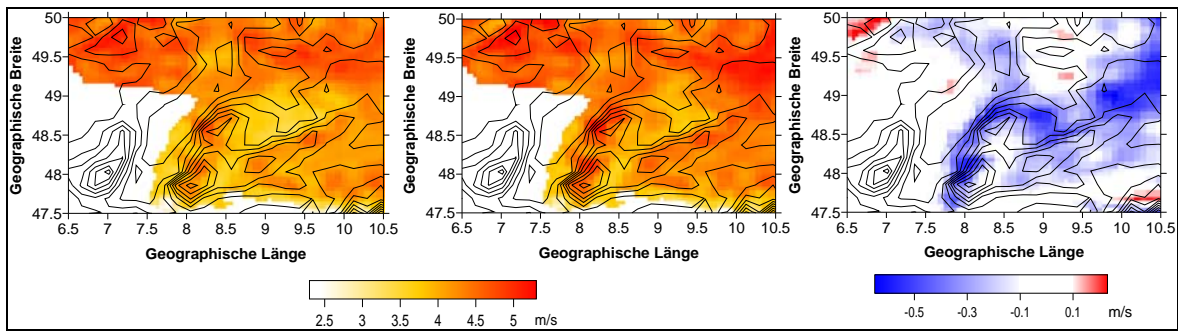
Die Analyse der spezifischen Feuchte in der untersten Atmosphärenschicht des Modells zeigt, dass die Simulation mit VEG3D höhere Werte ergibt als die mit TERRA. Das Mittel über den gesamten Ausschnitt (vgl. Abb. 3.32) beträgt mit den Daten des VEG3D 9.6 g/kg und mit denen des TERRA 9.5 g/kg. Mit dem VEG3D Datensatz ergibt sich im Bereich der Schwäbischen Alb, des Odenwalds und des Nordschwarzwalds eine höhere Feuchte als mit dem des TERRA, wobei in den Gipfellagen dieser Gebirgszüge die Berechnungen sehr gut übereinstimmen. Im Luv des Schwarzwaldes ist eine Unterschätzung der Feuchte festzustellen.



**Abbildung 3.33:** Differenz der spezifischen Feuchte in 2 m Höhe von VEG3D und TERRA vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

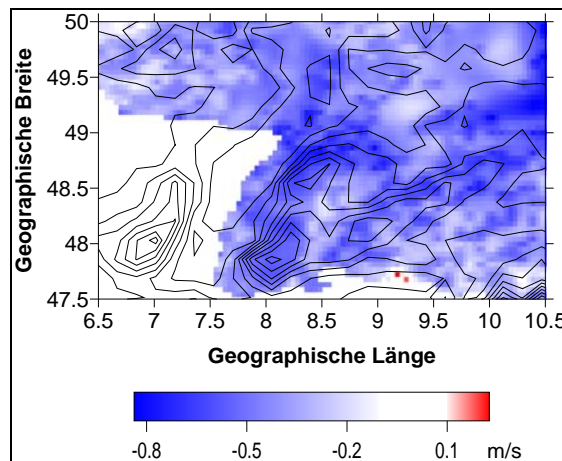
Der Vergleich der spezifischen Feuchte zwischen der untersten Atmosphärenschicht (s. Abb. 3.32) und in zwei Meter Höhe (s. Abb. 3.33) weist räumliche Unterschiede auf. Die Rheinebene wird mit der VEG3D Simulation in zwei Meter Höhe deutlich feuchter berechnet als mit der des TERRA. Die Daten des TERRA zeigen, dass im Bereich des Schwarzwalds und der Schwäbischen Alb eine stärkere Zunahme der spezifischen Feuchte in Richtung des Erdbodens vorhanden ist als mit dem Datensatz des VEG3D. Eine Rolle für diesen Zusammenhang spielt eventuell der Einfluss der Landnutzung, was in der VEG3D Simulation zu geringerer Feuchte über Wald als in der des TERRA führt. Über den gesamten Ausschnitt beträgt die mittlere spezifische Feuchte in zwei Meter Höhe bei den Simulationen mit VEG3D und TERRA jeweils 10.2 g/kg und ist damit um 0.6 g/kg (VEG3D) bzw. 0.7 g/kg (TERRA) feuchter.





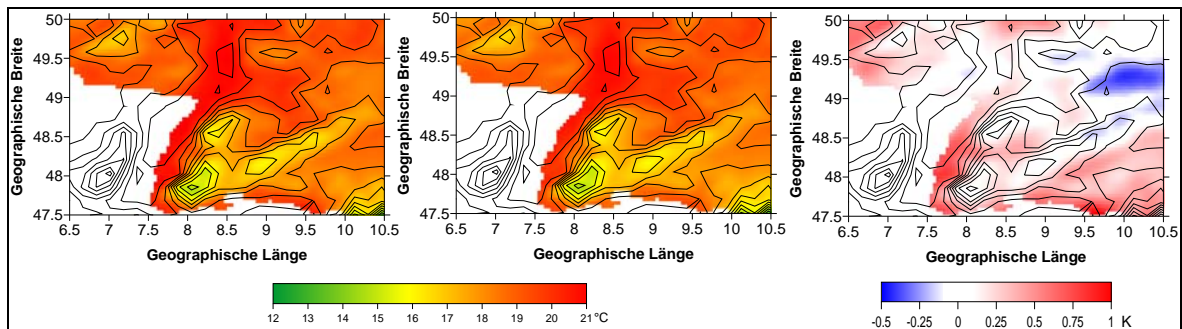
**Abbildung 3.34:** Mittlerer Wind in der untersten Modelllevelsicht berechnet mit VEG3D (links) und TERRA (Mitte) und die Differenz von VEG3D und TERRA (rechts) vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

Der mittlere Wind nimmt bei den Rechnungen mit beiden Bodenmodellen deutlich mit der Höhe zu. In der Simulation mit VEG3D ist die Zunahme größer als in der mit TERRA (VEG3D: + 2.1 m/s, TERRA: + 1.9 m/s), die mittlere Stärke ist jedoch mit TERRA am größten (VEG3D: 4.2 m/s, TERRA: 4.4 m/s).



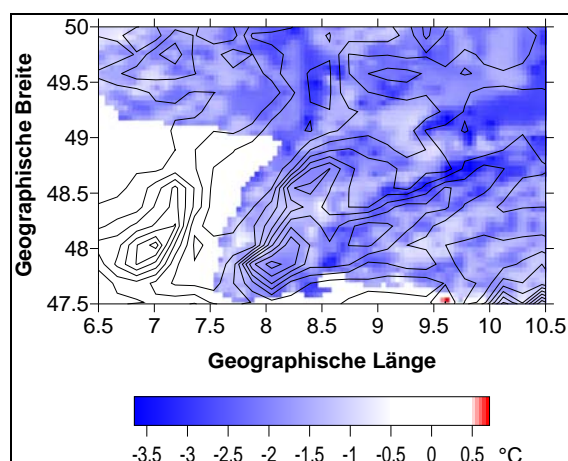
**Abbildung 3.35:** Differenz der Windes in 10 m Höhe von VEG3D und TERRA vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

Der Vergleich der Differenzen der beiden Modelle zwischen der Höhe von zehn Meter (s. Abb. 3.35) und des untersten Modelllevels (vgl. Abb. 3.34 rechts) zeigt, dass die Zunahme des Windes mit der Höhe vom Bodenmodell VEG3D größer berechnet wird als mit TERRA. Dies würde für eine labilere Schichtung der Simulation mit VEG3D sprechen.



**Abbildung 3.36:** Mittlere Temperatur in der untersten Modellschicht berechnet mit VEG3D (links) und TERRA (Mitte) und die Differenz von VEG3D und TERRA (rechts) vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

Mit dem Bodenmodell VEG3D wird die mittlere Temperatur der untersten Modellschicht im Mittel für den gesamten Ausschnitt etwas höher berechnet als mit TERRA (VEG3D: 18.6 °C, TERRA: 18.4 °C) (s. Abb. 3.36). Die Maximal- und Minimaltemperatur wird mit den Daten des VEG3D um 0.2 K überschätzt. Die Differenz der beiden Modelle zeigt, dass in den Gipfellagen von Pfälzer Wald, Nordschwarzwald, Südschwarzwald und Schwäbische Alb die mit VEG3D bestimmte Temperatur gut mit der in TERRA berechneten übereinstimmt. Der Vergleich von Abbildung 3.37 mit Abbildung 3.36 (rechts) ergibt, dass der vertikale Temperaturgradient in der VEG3D Simulation deutlich größer ist als in der des TERRA. In der untersten Atmosphärenschicht unterscheiden sich die berechneten Temperaturen im Mittel um 0.2 K, in zwei Meter Höhe beträgt die Differenz 1.8 K (VEG3D: 16.8 °C, TERRA: 18.6 °C).



**Abbildung 3.37:** Differenz der Temperatur in 2 m Höhe von VEG3D und TERRA vom 08.08.2001 – 28.08.2001.

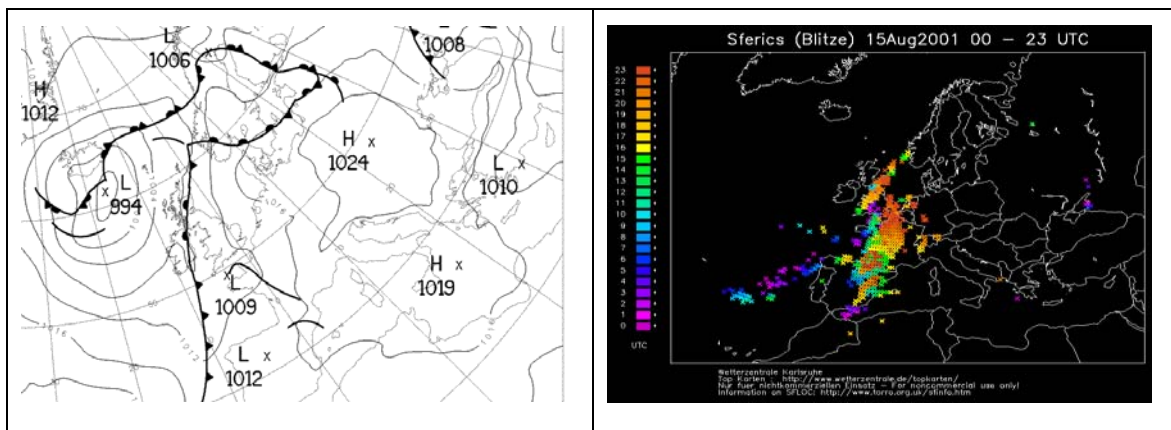
In Kapitel 3.2.2 wurde gezeigt, dass die Daten des VEG3D für die 2m-Temperatur deutlich unter den beobachteten liegen. Die Ergebnisse dieses Abschnittes können hilfreich sein um auf zukünftige Verbesserungsmöglichkeiten im Bodenvegetationsmodell zu schließen. Da auf der einen Seite die Daten des untersten Modelllevels keine großen Unterschiede der Temperatur zwischen der VEG3D und TERRA Simulation aufweisen und auf der anderen Seite die Bodentemperatur mit VEG3D besser berechnet werden (s. Kap. 3.1.1.2), sind die Bestandstemperatur sowie die direkten Einflüsse auf diese Größe im VEG3D näher zu untersuchen. Ein weiterer Bereich für zukünftige Untersuchungen sollte die Stabilität innerhalb der Grenzschicht bzw. Prandtl-schicht sein.

### 3.3 FLÄCHENVERGLEICH AN ZWEI AUSGEWÄHLTEN TAGEN

Im Folgenden werden nun der 15.08.2001 und der 20.08.2001 für Baden-Württemberg näher untersucht, wobei am ersten Termin hochsommerliches Wetter und am zweiten Termin wechselhaftes Wetter mit Niederschlägen geherrscht hat. Zunächst wird der 15.08.2001 analysiert, bevor der Vergleich mit den Bodenmodellen VEG3D und TERRA am 20.08.2001 folgt.

#### 3.3.1 ANALYSE DES 15.08.2001

Die Abbildung 3.38 zeigt die Bodenkarte vom 15.08.2001 um 00 Uhr für Europa. Eine dem Tief zwischen Island und den Britischen Inseln vorgelagerte Kaltfront nähert sich dem europäischen Festland. Im Zusammenwirken mit einem Hoch, dessen Zentrum über Polen liegt, wird feuchtwarmer Luft aus dem Süden nach Deutschland advehiert. An der Blitzkarte ist zu erkennen, dass sich die Kaltfront mit zahlreichen Gewittern bis zum Abend in die Mitte Frankreichs verlagert hat. Damit war am 15.08.2001 in Baden-Württemberg die Voraussetzung für einen heißen Sommertag gegeben. Inwieweit sich das COSMO je nachdem welches Bodenmodell verwendet wird unterscheidet, soll die Untersuchung der Strahlungsbilanz, der Bodentemperatur, der Bodenfeuchte und der 2m-Temperatur zeigen.



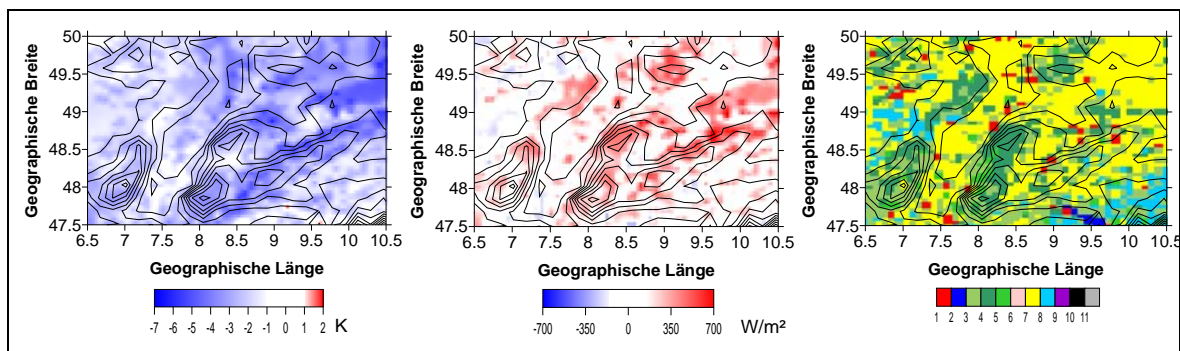
**Abbildung 3.38:** Links: Bodendruckkarte Europa vom 15.08.2001 um 00 Uhr (Werte in hPa); Rechts: Blitzkarte Europa vom 15.08.2001 von 00 – 23 Uhr. (Quelle: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de))

Die Strahlungsbilanz wird im Bodenvegetationsmodell VEG3D mit Hilfe der Albedo und der Bestandstemperatur berechnet. Wie oben bereits beschrieben, ist die Albedo im VEG3D je nach vorherrschender Landnutzung sehr variabel. Im TERRA ist die Albedo



## CLM-Simulationen mit den zwei Boden-Vegetationsmodellen VEG3D und TERRA

über die gesamte Fläche weniger veränderlich, was sich auch auf die räumliche Variabilität der Strahlungsbilanz auswirkt (s. Abb. 3.39). Vor allem über Waldgebieten wird die Albedo mit dem VEG3D niedriger als mit dem TERRA berechnet. Gleichzeitig ist die Tagessumme der Strahlungsbilanz mit den VEG3D Daten an einem hochsommerlichen Tag bis zu  $700 \text{ W/m}^2$  größer. Die Landnutzungsverteilung (s. Abb. 3.39 und Tab. 2.1) verdeutlicht den Zusammenhang, dass die Unterschiede der Strahlungsbilanz vor allem durch die Flächen mit Waldbestand hervorgerufen werden. Die flächengemittelte Tagessumme der Strahlungsbilanz beläuft sich auf  $3170 \text{ W/m}^2$  (VEG3D) und  $3038 \text{ W/m}^2$  (TERRA). Die 2m-Temperatur ist beim VEG3D Datensatz über den größten Teil Baden-Württembergs niedriger als bei TERRA (Mittelwert:  $-2.5 \text{ K}$ ).



**Abbildung 3.39:** Links: Differenz der 2m-Temperatur VEG3D – TERRA; Mitte: Differenz der Tagessummen der Strahlungsbilanz; Rechts: Landnutzungsverteilung (s. Tab. 2.1).

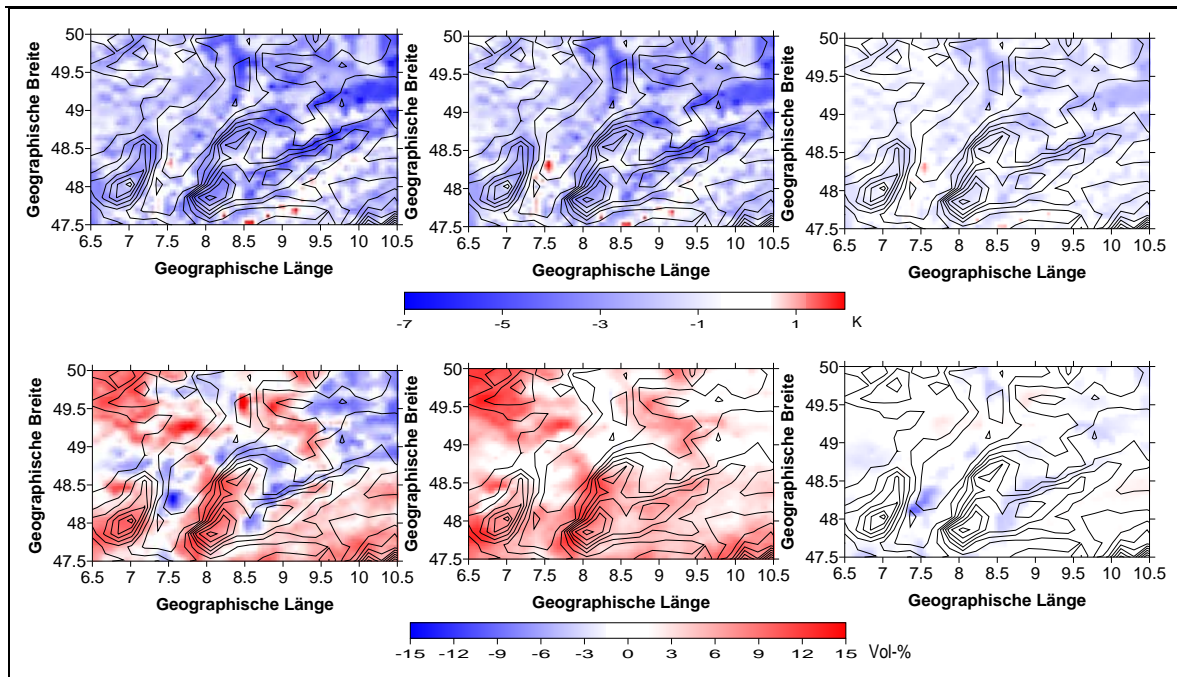
Die Untersuchung der Bodentemperatur und Bodenfeuchte mit den Datensätzen des VEG3D und des TERRA beinhaltet die oberste Schicht, das Mittel der ersten vier Schichten und den Mittelwert über alle zehn Bodenschichten. Dabei stellt sich heraus, dass sich die Modelle in den obersten Schichten am meisten unterscheiden (vgl. Abb. 3.40). Das VEG3D simuliert in 5 cm Tiefe eine um  $2.2 \text{ K}$  niedrigere Temperatur, im Mittel über zehn Schichten sind es nur  $0.9 \text{ K}$  (s. Tab. 3.11). Ebenso verhält es sich bei der Bodenfeuchte, wo das Mittel der obersten vier Schichten mit den Werten des VEG3D ( $16.9 \text{ Vol-\%}$ ) eine um  $4.2 \text{ Vol-\%}$  höhere Feuchte ergibt. Die Evaporation scheint mit der TERRA Simulation wesentlich höher zu sein als mit der des VEG3D.

	Tiefe [m]	Abweichung	Korrelation
<b>Bodentemperatur [°C]</b>	0.01	-2.2	0.76
	0.005 - 0.16	-1.9	0.77
	0.005 - 11.5	-0.9	0.87
<b>Bodenfeuchte [Vol-%]</b>	0.01	2.1	0.57
	0.005 - 0.16	4.2	0.68
	0.005 - 11.5	-0.5	0.88

**Tabelle 3.11:** Abweichung der Bodentemperatur und Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen und Schichten aus der Differenz von VEG3D und TERRA, dazu die Korrelation zwischen beiden Datensätzen am 15.08.2001.

Die Unterschiede der Bodenfeuchte zwischen beiden Modellen variieren räumlich sehr stark (vgl. Abb. 3.40). In der obersten Schicht schwankt die Differenz zwischen -15.1 Vol-% und +20.6 Vol-%. Für die Mittelung der ersten vier Schichten bleibt die starke räumliche Variation erhalten. Es fällt auf, dass die großen Differenzen (bis 13.6 Vol-% über den TERRA Daten) der Bodenfeuchte auf der Westseite von Vogesen, Pfälzer Wald und Schwarzwald liegen. Außerdem berechnet das VEG3D die Bodenfeuchte fast im gesamten Ausschnitt höher als das TERRA. Dies ist für das Flächenmittel der Differenz der Bodenfeuchte von zehn Schichten nicht mehr der Fall. Nun ergibt sich ein Mittelwert von 14.1 Vol-% (VEG3D) und 14.6 Vol-% (TERRA). Bezieht man die tiefen Schichten mit ein, nimmt die Differenz der Datensätze zwischen beiden Modellen ab und es verringert sich die Abhängigkeit der Bodenfeuchte von der Orographie und der Landnutzung.

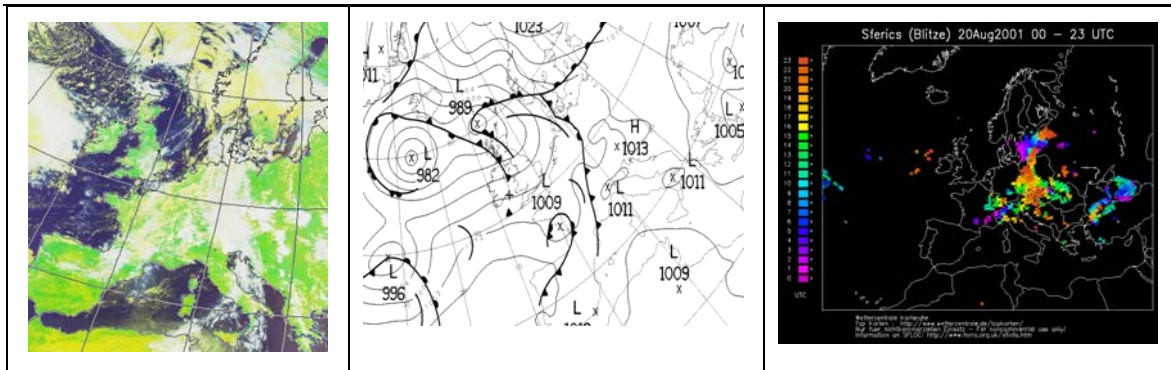
Die Bodentemperatur, die mit VEG3D in 5 cm Tiefe berechnet wird, ist teilweise um mehr als 7 K niedriger als die von TERRA und weist nur an wenigen Punkten eine höhere Temperatur als die TERRA Daten auf. Die flächenhafte Struktur der örtlichen Unterschiede ist in allen drei Schaubildern (s. Abb. 3.40) ähnlich, jedoch schwächen sich die Unterschiede ab, je mehr Schichten in die Berechnung mit eingehen. Die recht hohe räumliche Variation der Bodentemperatur ist im Gegensatz zu Bodenfeuchte nicht auf Orographieeffekte oder die verschiedenen Landnutzungsklassen zurück zu führen.



**Abbildung 3.40:** Oben: Differenz der Bodentemperatur VEG3D – TERRA; Unten: Differenz der Bodenfeuchte VEG3D – TERRA; Links: in 5 cm Tiefe; Mitte: 4 Schichten von 5 – 16 cm; Rechts: 10 Schichten von 5 – 1150 cm.

### 3.3.2 ANALYSE DES 20.08.2001

Der 20.08.2001 war in Deutschland von einer wellenden Kaltfront mit ergiebigen Niederschlägen geprägt. Die Blitzkarte (Abb. 3.41) zeigt im Südwesten einige Merkmale, hauptsächlich gab es aber erst über Polen und Tschechien etliche Gewitter. Dieser Tag wurde ausgewählt, da er im Gegensatz zum 15.08.2001 nicht trocken, sondern niederschlagsreich ist und damit hilfreich zur Fragestellung sein kann, welche Unterschiede es zwischen den beiden Simulationen mit dem Bodenmodellen VEG3D und TERRA je nach Witterungstyp gibt. Zusätzlich zum konvektiven und skaligen Niederschlag werden die Bodentemperatur, die Bodenfeuchte, die Wärmeflüsse und die Strahlungsbilanz näher betrachtet.



**Abbildung 3.41:** Links: Satellitenbild Europa vom 20.08.2001 um 12:59 Uhr; Mitte: Bodendruckkarte Europa vom 20.08.2001 um 00 Uhr (Werte in hPa); Rechts: Blitzkarte Europa vom 20.08.2001 von 00 – 23 Uhr. (Quelle: [www.wetterzentrale.de](http://www.wetterzentrale.de), [www.sat.dundee.ac.uk](http://www.sat.dundee.ac.uk))

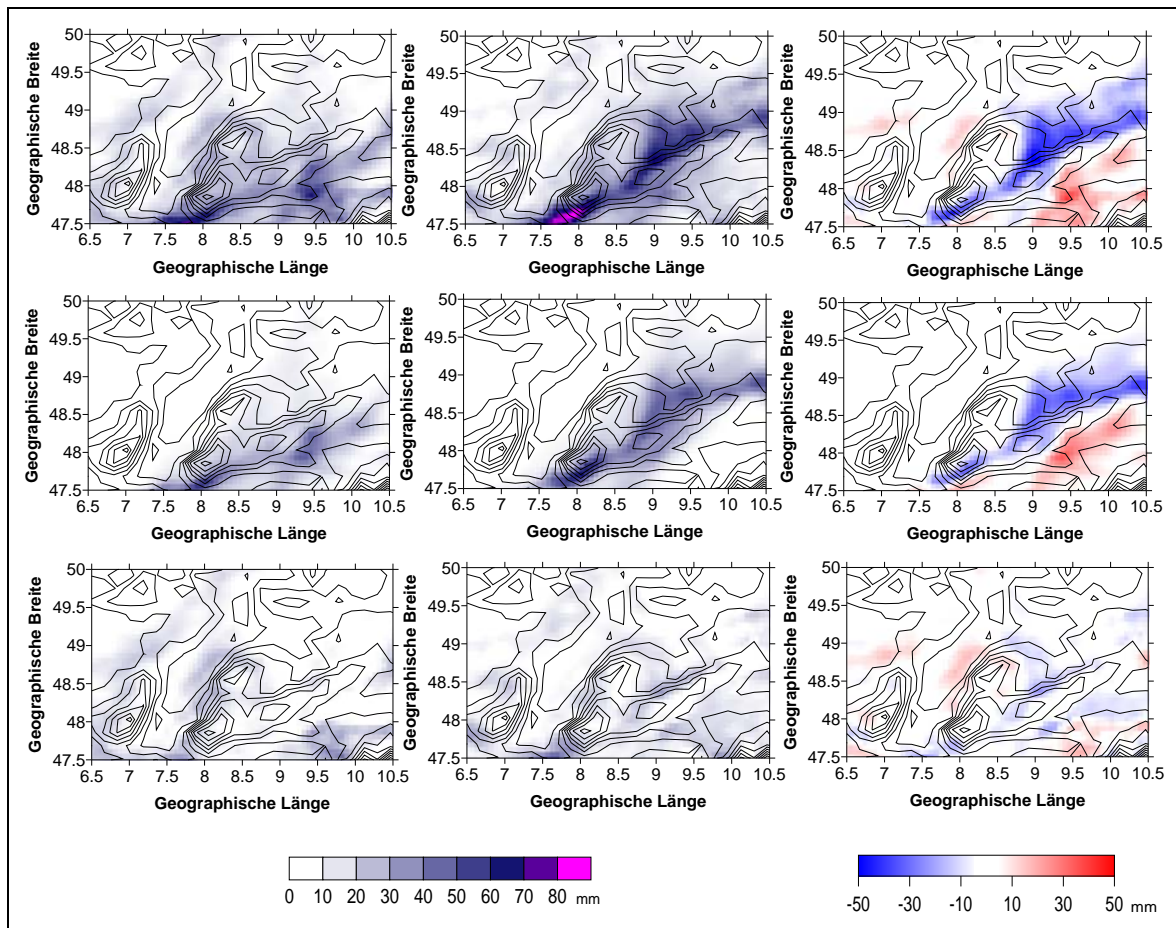
Der gesamte gefallene Niederschlag beträgt für das Gebiet aus der Abbildung 3.42 im Mittel 11.6 mm (VEG3D) und 14.4 mm (TERRA). Der maximale Niederschlag von 70.9 mm (VEG3D) und 82.0 mm (TERRA) liegt bei beiden Modellen im Südschwarzwald, womit die Werte des TERRA im Mittel und im Maximalwert über denen des VEG3D liegen.

Die Splittung des gesamten Niederschlags in einen konvektiven und skaligen Anteil zeigt weitere Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede auf. Im Mittel berechnet das TERRA einen 2.3 mm höheren skaligen Niederschlag (TERRA: 8.1 mm, VEG3D: 5.8 mm) und einen 0.5 mm höheren konvektiven Anteil (TERRA: 6.3 mm, VEG3D: 5.8 mm). Der Maximalwert des skaligen Niederschlags übertrifft den des VEG3D um 6.6 mm (TERRA: 59.7 mm, VEG3D: 53.1 mm). Mit dem Bodenmodell TERRA wird der Niederschlag hauptsächlich in einem Streifen ausgehend vom Südschwarzwald über die Schwäbische Alb bis in den Stuttgarter Raum berechnet, im VEG3D ist der skalige Niederschlag etwas weiter südwärts verlagert. Diese Tatsache verursacht örtliche Differenzen zwischen den beiden Simulationen bis zu 40 mm. Im Mittelwert des konvektiven Anteils unterscheiden sich die zwei Bodenmodelle nur geringfügig, wobei der Maximalwert im TERRA (46.9 mm) um 8.4 mm über dem des VEG3D (38.5 mm) liegt. Beide Bodenmodelle berechnen konvektiven Niederschlag auf der Westseite der Vogesen, dem Pfälzer Wald, im Bereich des Bodensees und am Westrand des Schwarzwaldes. In der COSMO-CLM Simulation mit dem VEG3D wird bis zu 17 mm mehr Niederschlag an der Luvseite des Nordschwarzwaldes durch Konvektion ausgelöst und deutlich weniger über der Schwäbischen Alb als mit TERRA.

Die Aufteilung des Niederschlags in seine beiden Anteile zeigt, dass sich mit dem Austausch des TERRA durch das VEG3D deutliche räumliche Verschiebungen des skaligen

## CLM-Simulationen mit den zwei Boden-Vegetationsmodellen VEG3D und TERRA

Niederschlags ergeben. Außerdem sieht man räumliche Unterschiede in der konvektionsbedingten Auslösung des Niederschlags, deren Ursache in der Strahlung und somit in den unterschiedlichen Werten der Albedo zwischen den Beiden Simulationen liegen kann. Ein weiterer Antrieb der zu den Differenzen in der Niederschlagsberechnung führt sind möglicherweise Unterschiede in der Bodenfeuchte.



**Abbildung 3.42:** 1. Reihe: Tagesniederschlag VEG3D (links) und TERRA (Mitte) vom 20.08.2001; Oben rechts: Differenz des gesamten Niederschlags (20.8.2001) von VEG3D und TERRA. 2. Reihe: Skaliger Niederschlag VEG3D (links) und TERRA (Mitte), rechts: Differenz des skaligen Niederschlags von VEG3D und TERRA. 3. Reihe: Konvektiver Niederschlag VEG3D (links) und TERRA (Mitte), rechts: Differenz des konvektiven Niederschlags von VEG3D und TERRA.



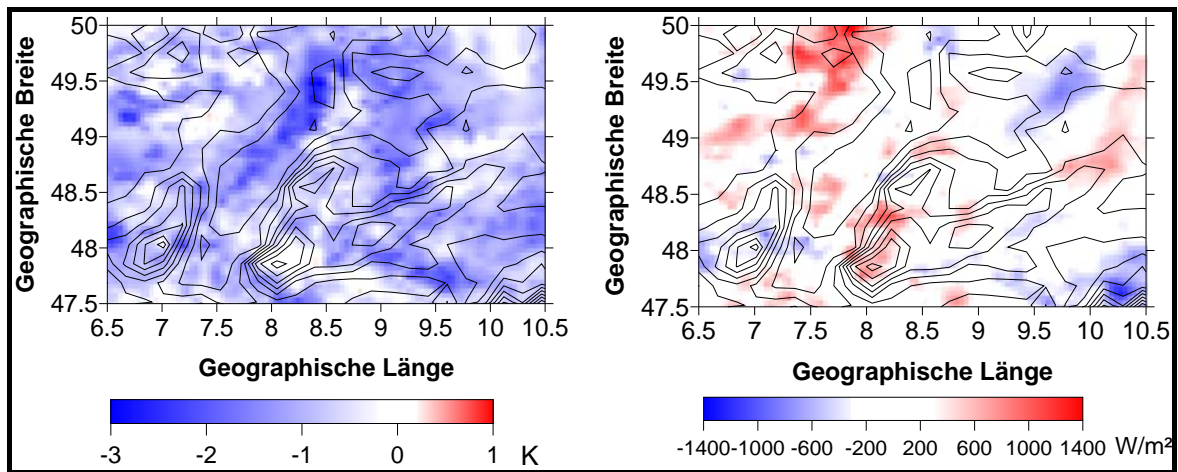
	Tiefe [m]	Abweichung [K]	Korrelation
<b>Bodentemperatur [°C]</b>	0.005	-0.2	0.87
	0.005 – 0.16	-0.4	0.86
	0.005 - 11.5	-0.3	0.93
<b>Bodenfeuchte [Vol-%]</b>	0.005	9.6	0.65
	0.005 – 0.16	10.7	0.71
	0.005 - 11.5	-2.9	0.72

**Tabelle 3.12:** Abweichung der Bodentemperatur und –feuchte in verschiedenen Tiefen und Schichten aus der Differenz von VEG3D und TERRA, dazu die Korrelation zwischen beiden Datensätzen am 20.08.2001.

Allgemein spielen die Bodenprozesse für die Entwicklung von Konvektion eine nicht zu vernachlässigbare Rolle, wobei die Abläufe in den oberen Schichten am meisten Einfluss auf die Grenzschichtprozesse bewirken. Im folgenden Abschnitt werden deshalb die Bodenfeuchte und die Bodentemperatur vom 20.08.201 näher beleuchtet.

Je tiefer man in den Boden vordringt, desto geringer wird die Variabilität der beiden Größen. Daher wird vor allem in den obersten Bodenschichten (bis ca. 0.3 m Tiefe) eine Verbindung zum aktuellen Wettergeschehen sichtbar, die tiefen Schichten (ab 0.3m Tiefe) spiegeln dagegen längerfristige Veränderungen wider. Die Werte des VEG3D ergeben in der obersten Schicht und in den ersten vier Schichten gemittelt eine wesentlich höhere Bodenfeuchte als die des TERRA (s. Tab. 3.12). Die Bodentemperatur wird mit dem VEG3D grundsätzlich niedriger berechnet als mit dem TERRA. Die Betrachtung der Korrelation zwischen den Datensätzen von VEG3D und TERRA ergibt bezüglich der Bodentemperatur deutlich höhere Werte als für die Bodenfeuchte.

Die räumliche Verteilung der Bodentemperatur lässt sich nicht mit Hilfe der Landnutzungsklassen erklären. Die Gebiete, in denen das VEG3D höhere bzw. niedrigere Temperaturen berechnet als das TERRA, liegen scheinbar beliebig verstreut über die gesamte Fläche. Auch bei der Bodenfeuchte gibt es keine Unterschiede je nachdem, ob es sich um Waldflächen oder um Ackerflächen handelt. Die Orographieunterschiede bewirken ebenso keine Differenzen zwischen den Modellen, zumindest sind diese an einem niederschlagsreichen Tag nicht zu erkennen (s. Anh. 3).



**Abbildung 3.43:** Links: Differenz der 2m-Temperatur zwischen VEG3D und TERRA; Rechts: Differenz der Tagessumme der Strahlungsbilanz vom 20.08.2001 zwischen VEG3D und TERRA.

Im Mittel ist die aus den Daten des VEG3D gewonnene 2m-Temperatur am 20.08.2001 ( $16.9^{\circ}\text{C}$ ) um  $0.9\text{ K}$  niedriger als die aus den TERRA Werten berechnete ( $17.8^{\circ}\text{C}$ ) (vgl. Abb. 3.43). Die größten Unterschiede (bis zu  $-2.94\text{ K}$ ) treten in der Rheinebene auf. Die flächenhafte Verteilung der Tagessumme der Strahlungsbilanz zeigt zum einen Bereiche mit deutlich höherer Strahlungsbilanz des VEG3D und Regionen mit wesentlich höherer Bilanz des TERRA (Unterschiede zwischen  $-1212\text{ W/m}^2$  und  $+1438\text{ W/m}^2$ ). Die Summe der Strahlungsbilanz, die aus dem Datensatz des VEG3D berechnet wurde, ist an diesem Tag über den gesamten Ausschnitt gemittelt um  $51\text{ W/m}^2$  höher als die mithilfe der TERRA Werte gewonnene. Die flächengemittelten Tagessummen betragen mit dem VEG3D  $904\text{ W/m}^2$  und mit dem TERRA  $853\text{ W/m}^2$ .

Die flächengemittelte Tagessumme des latenten Wärmeflusses ist bei beiden Modellen fast gleich groß (VEG3D:  $825\text{ W/m}^2$ , TERRA:  $826\text{ W/m}^2$ ), wobei jedoch große Unterschiede in der räumlichen Verteilung bestehen (vgl. Anh. 3). Der fühlbare Wärmefluss wird mit dem VEG3D ( $165\text{ W/m}^2$ ) niedriger berechnet, als mit dem TERRA ( $242\text{ W/m}^2$ ). Die höheren Werte in der Rheinebene haben eine höhere 2m-Temperatur zur Folge (s. Anh. 3 und Abb. 3.43).

An einem stark bewölkten und regnerischen Tag lassen sich landnutzungs- oder orographiebedingte Unterschiede zwischen VEG3D und TERRA nur sehr eingeschränkt erkennen und erklären. Die deutlich höhere Bodenfeuchte in der Simulation mit dem

CLM-Simulationen mit den zwei Boden-Vegetationsmodellen VEG3D und TERRA

---

VEG3D ruft einen höheren latenten Wärmefluss hervor und ist eine mögliche Erklärung für die niedrigere 2m-Temperatur.



## 4 ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Arbeit wurde das Bodenvegetationsmodell VEG3D in die Version 4.2 von COSMO-CLM eingebaut. Die durchgeführten Simulationen mit VEG3D und TERRA wurden punktuell und flächenhaft untersucht. Außerdem wurden die Simulationsergebnisse von beiden Bodenmodellen mit Messungen verglichen.

Die Auswertung der Datensätze von VEG3D und TERRA an der Stationen Hartheim über den Zeitraum vom 08.08.2001 – 28.08.2001 hat ergeben, dass die Bodentemperatur und die 2m-Temperatur mit VEG3D niedriger ausfallen, und die Bodenfeuchte trotz geringerem Niederschlag höher ist.

Beim Vergleich der Modelldaten mit Beobachtungen berechnet VEG3D an der Station Hartheim im gesamten Zeitraum deutlich näher an der Realität liegende Bodentemperaturen. Der Niederschlag stimmt sehr genau mit der Messung überein, das TERRA berechnet zu viel Niederschlag. Die Strahlungsbilanz wird von beiden Modellen unterschätzt, wobei die Werte des TERRA etwas näher an der Beobachtung liegen. Beide Modelle haben Probleme mit der genauen Datierung des Niederschlags.

Am Messmast des KIT berechnet das VEG3D ebenfalls eine niedrigere Bodentemperatur. Die Bodenfeuchte und der Niederschlag sind niedriger. Dies deutet auf eine höhere Evaporation bei der Simulation mit TERRA hin.

Der Stationenvergleich hat außerdem ergeben, dass der Wind in zehn Meter Höhe mit dem Bodenvegetationsmodell VEG3D besser simuliert wird als mit TERRA, aber von beiden stark überschätzt wird. Die Bodenmodelle VEG3D und TERRA überschätzen die spezifische Feuchte an den meisten Stationen, wobei die Feuchte über Wald mit dem VEG3D am nächsten zur Beobachtung liegt.

Die Untersuchung des Einflusses der Landnutzung auf die Ergebnisse der Modellsimulationen hat ergeben, dass die Berechnung des Winds und der spezifischen Feuchte über Wald mit VEG3D besser mit der Realität übereinstimmt, während über Acker und urbanem Gebiet TERRA bessere Ergebnisse liefert.

Die Unterschiede der mittleren Temperatur sind je nachdem ob die Landnutzung ‚Wald‘ oder ‚Acker‘ zugrunde liegen mit VEG3D deutlich größer, da die Vegetationsschicht dämpfend auf den Tagesgang der Temperatur wirkt. Die minimale Temperatur wird im Mittel besser mit den Daten des VEG3D bestimmt als mit denen des TERRA.

Die mit VEG3D berechneten Wärmeflüsse sind im Gegensatz zu den TERRA Werten über Wald höher als über Acker und entsprechen somit besser der Realität.

Die Auswertung für Baden-Württemberg über den gesamten Zeitraum weist eine um 2 K niedrigere 2m-Temperatur auf, gleichwohl der Niederschlag bei beiden Modellen in etwa übereinstimmend berechnet wird. Die unterschiedliche räumliche Variation des Niederschlags konnte nicht mithilfe der Betrachtung des konvektiven und skaligen Anteils erklärt werden. Die Albedo variiert bei der Simulation mit VEG3D stärker. Die daraus folgenden niedrigeren Werte über Wald führen zu einer höheren Strahlungsbilanz.

Das Bodenmodell TERRA schneidet beim Vergleich der 2m-Temperatur für Baden-Württemberg deutlich besser ab als das VEG3D. Der Niederschlag wird von beiden Modellen überschätzt.

Hinsichtlich der Unterschätzung des VEG3D für die 2m-Temperatur wurden die untersten beiden Modelllevels näher untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Temperatur in der untersten Atmosphärenschicht in beiden Simulationen nur geringe Unterschiede aufweist. Die Temperatur wird mit VEG3D sogar etwas höher berechnet. Da die Bodentemperatur von VEG3D besser der Realität entspricht, wäre zu erwarten, dass die 2m-Temperatur ebenfalls besser berechnet wird. Beide Modelle bestimmen die 2m-Temperatur mithilfe einer Flussgradientbeziehung, in die die Temperatur an der Erdoberfläche und in der untersten Atmosphärenschicht des Modells eingeht. In Zukunft sollte daher untersucht werden, ob die Berechnung der 2m-Temperatur im Programmcode verbessert werden kann.

Bei der Untersuchung eines Sommertags (15.08.2001) ergab sich für die Werte des VEG3D eine um 2.5 K niedrigere 2m-Temperatur, eine geringere Bodentemperatur und eine höhere Bodenfeuchte. Die Strahlungsbilanz ist an einem sonnigen Tag etwas höher als bei der Berechnung mit TERRA. Dies entspricht nicht dem erwarteten Zusammenhang zwischen der Strahlung und der Temperatur und scheint mit der Problematik bei der Berechnung der 2m-Temperatur zusammenzuhängen.

Am regenreichen Tag (20.08.2001) berechnen die zwei Bodenmodelle die 2m-Temperatur recht ähnlich. Die Auswertung der Datensätze führt zu einer um 0.9 K niedrigere 2m-Temperatur der VEG3D Daten gegenüber den mit TERRA berechneten Werten. Der Niederschlag wird mit VEG3D niedriger berechnet, die Bodenfeuchte ist trotzdem höher als

mit TERRA. Die Bodentemperatur ist bei der Berechnung mit VEG3D wie in den anderen Auswertungen niedriger, die Strahlungsbilanz höher.

Abschließend ist festzuhalten, dass das VEG3D die Wechselwirkung zwischen dem Boden und der atmosphärischen Grenzschicht insgesamt nicht besser beschreibt als das TERRA: Abhilfe könnte eine verbesserte Kopplung mit der Grenzschicht schaffen. Außerdem sollten weitere Landnutzungsparametrisierungen getestet werden. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Landnutzung einen deutlichen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat. Deshalb liegt es nahe, die Boden- und Landnutzungskataster zu verbessern.

Das Ziel wird sein, das Bodenmodell VEG3D so mit dem COSMO-CLM zu koppeln, damit zusätzlich zu Simulationen mit TERRA eine möglichst gute Modellberechnung mit VEG3D zur Verfügung steht. Damit hat man ein weiteres Modell-Setup zur Verfügung und kann zu einem größeren Ensemble gelangen.

## 5 LITERATURVERZEICHNIS

Adrian, G. (1996). Beschreibung der Wechselwirkung zwischen Erdboden und Atmosphäre in Regionalmodellen. *Promet* 25,3 , 80-86

Adrian, G. & D. Frühwald (2002). Design der neuen Modellkette GME/LM. *Promet* 27,3/4, 106-110

Braun, F.J., (2002). Mesoskalige Modellierung der Bodenhydrologie. *PhD thesis, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe*

Braun, F. & G. Schädler (2005). Comparison of soil hydraulic parameterizations for mesoscale meteorological models. *J. Appl. Meteorol.* **44** , 1116-1132

Brooks, R. H. and A. T. Corey (1964). *Hydraulic properties of porous media*. Hydrol. Pap. 3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado

Campbell, G. S. (1974). A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data. *Soil Sci.*, **117**, 311–314

Chen, F. and J. Dudhia (2001). Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modelling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Weather Rev.*, **129**, 569–585.

Christensen, J. H., O. B. Christensen, P. Lopez, E. van Meijgaard and M. Botzet (1996). The HIRHAM4 regional atmospheric climate model. DMI scientific report, Lyngbyvej 100, Copenhagen.

Cuenca, R. H., M. Ek & L. Mahrt (1996). Impact of soil water property parameterization on atmospheric boundary layer simulation. *J. Geophys. Res.* **101/D**, 7269-7277

Deardorff, J.W. (1978). Efficient prediction of ground surface temperature and moisture with inclusion of a layer of vegetation. *J. Geophys. Res.* **83**, 1889-1904

Dickinson, R.E. (1984). Modeling evapotranspiration for three dimensional global climate models. *Climate Processes and Climate Sensivity. Geophys. Monogr.* **29**, 58-72.

Dickinson, R. E., R. M. Errico, F. Giorgi & G. T. Bates (1988). Modelling of historic, pre-historic and future climates of the Great Basin. NCAR Final Rep. to USGS/NNWSI, 46 pp.

Dickinson, R. E., A. Henderson-Sellers & P.J. Kennedy (1993). Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as coupled to the NCAR community climate model. *NCAR Tech. Note NCAR/TN-387+STR*, 72 pp.

Doms, G., J. Förstner, E. Heise, H.-J. Herzog, M. Raschendorfer, R. Schrodin, T. Reinhardt & G. Vogel (2005). A description of the nonhydrostatic regional model LM. Part II: Physical parameterization. *DWD, zu finden unter: [www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org)*

Doms, G. & U. Schättler (2002). A decription of the nonhydrostatic regional model LM. Part I: Dynamics and numerics. *COSMO Newsletter*, **2**, 225–235.

Giorgi, F., R. Marinucci and G. T. Bates (1993). Development of a second-generation regional climate model (RegCM2): Boundary-layer and radiative transfer processes. *Mon. Weather Rev.*, **121**, 2794–2813

Henderson-Sellers, A., Z.-L. Yang & R.E. Dickinson (1993). The Project for Intercomparison of Land surface Parameterization Schemes. *Bull. Am. Meteor. Soc.* **74**, 1335-1349.

Hillel, D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. Academic Press, New York.

Jacob, D. (2001). A note to the simulation of the annual and inter-annual variability of the water budget over the Baltic Sea drainage basin. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **77**, 61–73

Jones, R. G., J. M. Murphy & M. Noguier (1995). Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. I: Assesment of control climate, including sensitivity to location of lateral boundaries. *Quarterl. J. Roy. Met.* **121**, 1413-1449

Mayer, H. D. Schindler, G. Fernbach & D. Redepening (2005). Forstmeteorologische Messstelle Hartheim des Meteorologischen Institutes der Universität Freiburg

Meissner, C. (2008). High-resolution sensitivity studies with the regional climate model COSMO-CLM. *PhD thesis, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe*

Noilhan, J. & S. Planton (1989). A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.* **117**, 536-549

Rijtema, P.E. (1969). Soil moisture forecasting. *Technical Report No. 513, Instituut voor Cultuurtechniek en Waterhuishouding, Wageningen*

Schädler, G. (1990). Numerische Simulationen zur Wechselwirkung zwischen LAndoberflächen und atmosphärischer Grenzschicht. *PhD thesis, Fakultät für Physik, Universität Karlsruhe*

Schättler, U., G. Doms & C. Schraff (2006). A description of the nonhydrostatic regional model LM. Part VII: User's guide. *DWD, zu finden unter: [www.cosmo-model.org](http://www.cosmo-model.org)*

Sellers, P.J., Y. Mintz, Y. Sud & A. Dalcher (1986). The design of a Simple Biosphere model (SiB) for use within general circulation models. *J. Appl. Meteor.* **34**, 16-32

Seth, A. & F. Giorgi (1998). The effects of domain choice on summer precipitation. Simulation and sensitivity in an regional climate model. *J. Clim.* **11**, 2698-2712

Smirnova, T.G., J.M. Brown & S.G. Benjamin (1997). Performance of different soil model configurations in simulating ground surface temperature and surface fluxes. *Mon. Wea. Rev.* **125**, 1870-1884

Sun, W.-Y. & M.G. Bosilovich (1996). Planetary boundary layer and surface layer sensitivity to land surface parameters. *Bound.-Lay. Meteor.* **77**, 353-378

Taconet, O., R. Bernard and D. Vidal-Madjar (1986). Evapotranspiration over an agricultural region using a surface flux/temperature model based on NOAA-AVHRR data. *J. Appl. Meteorol.*, **25**, 284–307

Van Genuchten, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 892–898

Wetzel, P.J. & C.-Z. Chang (1987). Concerning the relationship between evapotranspiration and soil moisture. *J. Clim. Appl. Meteor.* **26**, 18-27

Will, A. and Coauthors (2007). Physics and dynamics of the CLM. *Met. Zeitschrift*, *submitted*

## A ANHANG

### A.1 SENSITIVITÄTSTEST EINER SIMULATION BEI VERWENDUNG UNTERSCHIEDLICH GROßER ZEITSCHRITTE

Über die Unsicherheit bezüglich der Ergebnisse von Simulationen mit Klimamodellen wird häufig diskutiert. Ist man auf der einen Seite bestrebt, die Prozesse der Atmosphäre durch immer genauere Parametrisierungen zu beschreiben, darf man auf der anderen Seite die Einflüsse der Modellkonfiguration auf die Resultate nicht außer acht lassen. Das Abändern von Parametereinstellungen im Setup des Vorhersagemodells kann die Qualität der Ergebnisse erheblich beeinträchtigen (Meißner, 2008).

Dies muss bei der Konfiguration des Modellgebiets, der horizontalen Auflösung, den Antriebsdaten und dem Modellsetup beachtet werden. Für die Wahl des Modellgebiets werden maßgeblich die Ergebnisse dreier Studien mit einbezogen:

- (a) Die Gebietsgröße sollte möglichst klein gewählt werden, damit die synoptische Zirkulation den Antriebsdaten möglichst ähnlich ist (Jones et al., 1995).
- (b) Die Gebietsgrenzen sollten nicht in Regionen mit stark fluktuierender Orographie liegen (Dickinson et al., 1988).
- (c) Wenn das Gebiet zu klein ist, kann die Wirkung der globalen Antriebsdaten die Prozesse des internen, regionalen Antriebs zu stark beeinflussen (Seth und Giorgi, 1998).

Umfangreiche Sensitivitätsstudien (Panitz, HLRS-Jahrbuch) zeigten, dass für realistische Simulationen Mitteleuropas das Rechengebiet die Alpen komplett einschließen muß. Es hat in West-Ost-Richtung 180 und in Süd-Nord-Richtung 158 Gitterpunkte. Neben der technischen Frage bezüglich der Rechenzeit einer Simulation je nach horizontaler Auflösung, steht die meteorologische Frage, welche horizontale Auflösung am besten die kleinskaligen Prozesse (z.B. konvektiver Niederschlag in orographisch stark gegliederter Region) in der Atmosphäre beschreibt. Die horizontale Auflösung aller in dieser Arbeit durchgeführten Läufe beträgt  $0.0625^\circ$ , was einer Maschenweite von rund 7 km entspricht. Die Anfangs- und Randwerte, welche in dreistündigen Intervallen zur Verfügung stehen, stammen für die Sensitivitätsstudien aus GME-Analysen von August 2001.

Das Modellsetup wird durch verschiedene physikalische Parameterisierungen und Parameter sowie dynamischen Methoden und Initialisierungen konfiguriert. Als operationell ver-



wendetes Zeitintegrationsschema dient das sogenannte Leapfrog-Verfahren. Für die langsam variierenden Bewegungs-Moden wird ein großer Zeitschritt, für schnell variierende akustische Wellenmoden ein kleiner Zeitschritt verwendet (Doms und Schättler, 2002). Die für diesen Sensitivitätstest gewählten Einstellungen des großen Zeitschritts betragen 20, 40 und 80 Sekunden, woraus sich insgesamt 6 Simulationsläufe ergeben (3 x VEG3D und 3 x TERRA).

### **Simulation einer Episode mit drei verschiedenen Zeitschritten**

In diesem Kapitel werden Simulationen mit unterschiedlichen Zeitschritten von COSMO-CLM mit VEG3D und COSMO-CLM mit TERRA hinsichtlich des Einflusses bei der Berechnung verglichen. Die Läufe mit den drei Zeitschrittberechnungen 20 s, 40 s und 80 s werden zunächst für Südwestdeutschland und abschließend an zwei Gitterpunkten, welche der Messstation Hartheim sowie dem Messmast am KIT (Karlsruher Institut für Technologie) Campus Nord entsprechen, ausgewertet. Die Episode startet am 08.08.2001 um 00 Uhr und endet am 28.08.2001 um 00 Uhr. Die berechnete Gebietsgröße entspricht der aus Kapitel 3, wobei in den Schaubildern nur der Ausschnitt Südwestdeutschland zu sehen ist. Für alle Vergleiche werden der Tagesmittelwert der 2m-Temperatur und die Niederschlags-summe betrachtet.

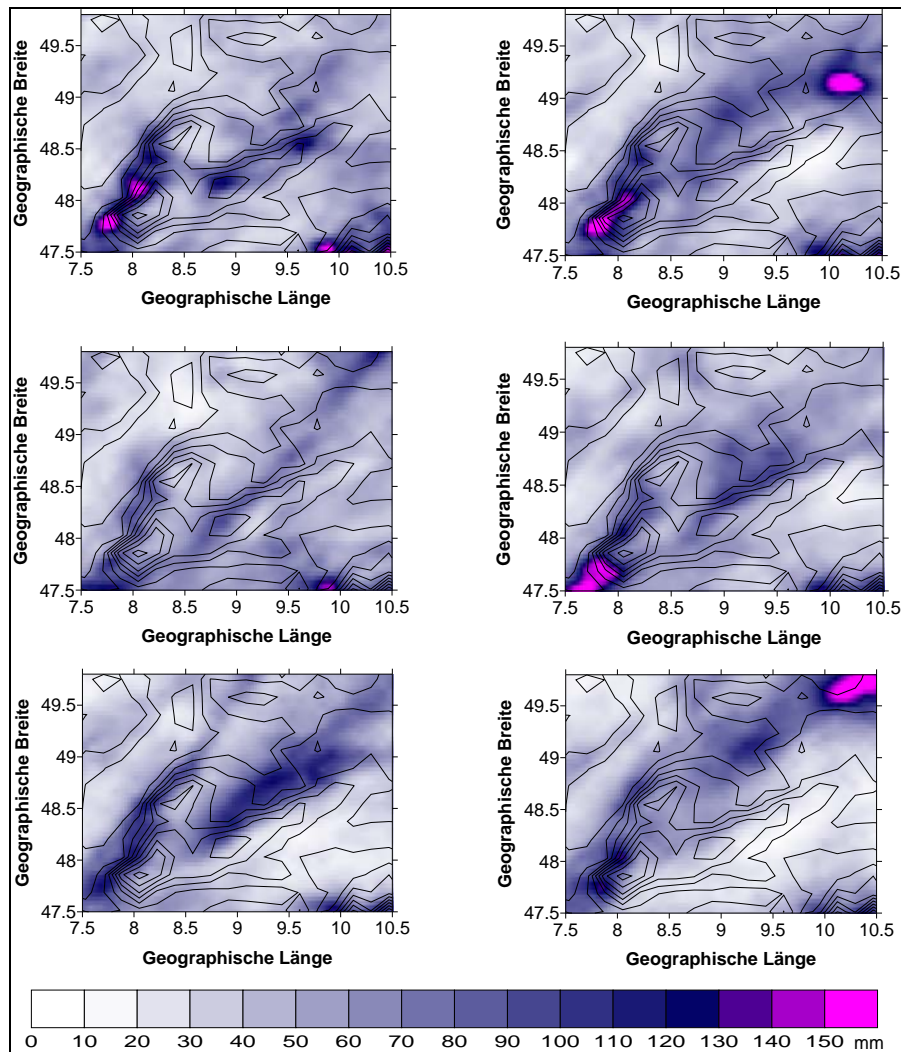
Bei der statistischen Auswertung eines Ausschnitts aus dem Südwesten Deutschlands ergeben sich Differenzen zwischen den Berechnungen mit unterschiedlichen Zeitschritten. Untersucht wurden wie im vorherigen Abschnitt die vom 08.08.2001 – 28.08.2001 gemittelte 2m-Temperatur sowie der gesamte gefallene Niederschlag. Letzterer schwankt im Flächenmittel nur sehr gering, wobei die größeren Unterschiede bei der TERRA Simulation liegen (VEG3D: ca. 2 mm; TERRA: ca. 5 mm). Es ist ein deutlicher Unterschied der Maximal- und Minimalwerte zu erkennen, je nachdem mit welchem Zeitschritt ein Lauf mit gerechnet wird (vgl. Tab. 3.2). Das Maximum des TERRA-Laufs mit 80 s liegt fast 28 mm über dem des TERRA-Laufs mit 40 s. Der Maximalwert des VEG3D-Laufs mit 20 s übertrifft den des VEG3D-Laufs mit 80 s sogar um ca. 60 mm.

Die flächengemittelten 2m-Temperaturen weichen je nach Zeitschritt um 0.4 K (VEG3D) und 0.6 K (TERRA) ab. Die Maximal- und Minimalwerte des TERRA unterscheiden sich, wie bei der Simulation mit VEG3D, bis zu 0.5 K.

	VEG3D_20s	VEG3D_40s	VEG3D_80s	TERRA_20s	TERRA_40s	TERRA_80s
<b>2m-Temperatur in [°C]</b>						
Minimum	12.1	12.1	12.3	12.9	13.1	13.2
Maximum	21.2	21.4	21.7	23.0	23.2	23.5
Mittelwert	17.4	17.5	17.8	19.2	19.5	19.8
<b>Niederschlag in [mm]</b>						
Minimum	14.9	10.0	8.9	8.5	11.9	8.0
Maximum	186.8	140.8	127.8	188.8	161.6	189.4
Mittelwert	47.9	45.6	47.6	51.3	47.4	46.1

**Tabelle A 1.1:** Statistik der 2m-Temperatur und des Niederschlags für die Simulation mit drei Zeitschritten vom 08.08.2001 – 28.08.2001

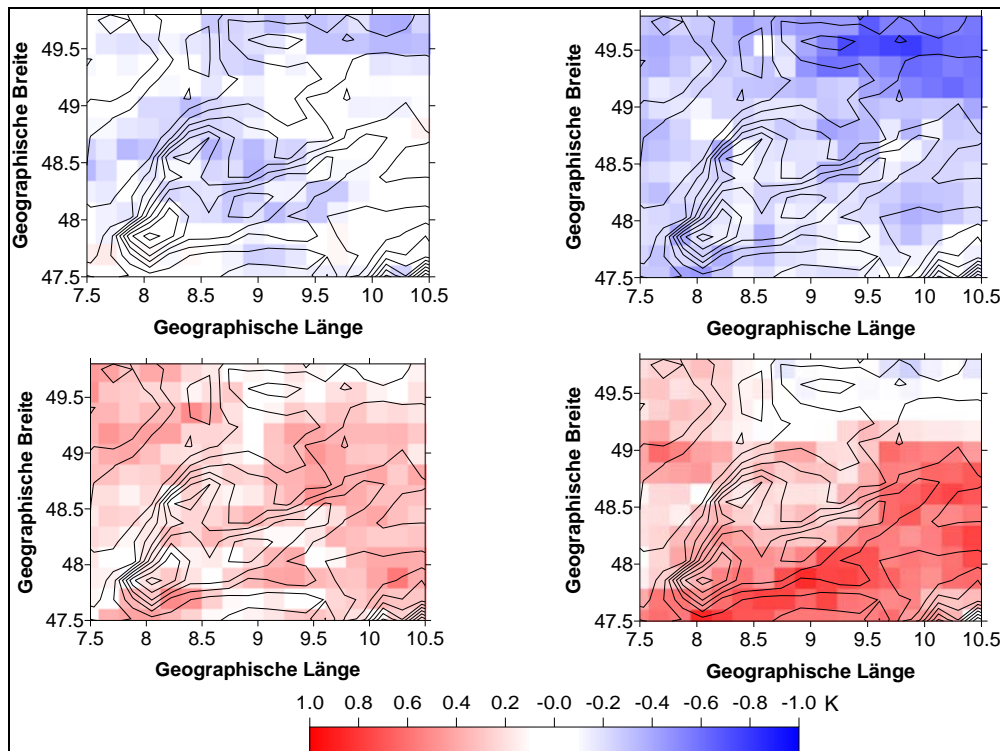
Die Veränderung des Zeitschritts bewirkt bei der Berechnung des Niederschlags deutlich erkennbare Unterschiede in der räumlichen Verteilung (s. Abb. 3.2). So fällt bei der TERRA Simulation mit 80 s eine Region im äußersten Nordosten des Gebietes mit Niederschlägen von mehr als 150 mm auf, während in den Berechnungen mit 20 s und 40 s die Niederschlagssumme in diesem Bereich bei 50-80 mm liegt. Die Niederschlagshöhe am Westrand des Schwarzwalds variiert um mehr als 50 mm zwischen den drei Zeitschritt-berechnungen. In der Rheinebene entstehen durch den veränderten Zeitschritt geringe Änderungen in der räumlichen Verteilung des Niederschlags. Auch bei den drei Läufen mit dem VEG3D sind markante Unterschiede im Schwarzwald und am nördlichen Teil der schwäbischen Alb zu erkennen. Das Rheintal und Teile des Kraichgau werden mit recht guter Übereinstimmung berechnet.



**Abbildung A 1.1:** Links (von oben nach unten): Niederschlagssumme VEG3D 20 s, 40 s, 80 s. Rechts (von oben nach unten): Niederschlagssumme TERRA 20 s, 40 s, 80 s.

Die Unterschiede der mit TERRA 80 s und 20 s berechneten 2m-Temperatur zu TERRA 40 s wird in der Abbildung 3.2 (rechts) dargestellt. Die Berechnung mit einem Zeitschritt von 20 s ergibt für das gesamte Gebiet niedrigere Werte als die Berechnung mit einem Zeitschritt von 40 s und hat die stärkste Abweichung im Nordosten. Die TERRA Simulation mit 80 s ergibt beinahe im gesamten Ausschnitt höhere Temperaturen als die TERRA Simulation mit 40 s und besitzt eine maximale Differenz im Südosten. Aus beiden Abbildungen ergibt sich zwischen den TERRA Simulationen ein Unterschied der flächengemittelten 2m-Temperatur von 0.6 K. Die gleiche Untersuchung mit dem VEG3D anstelle von TERRA ergibt eine geringere Differenz zwischen den drei Simulationen mit unterschiedlichen Zeitschritten (0.4 K). Der Vergleich von VEG3D 80 s und 20 s mit VEG3D 40 s

zeigt, dass die Simulation mit einem Zeitschritt von 80 s fast überall wärmer bzw. die Simulation mit einem Zeitschritt von 20 s kälter ist (s. Abb. 3.2 links).



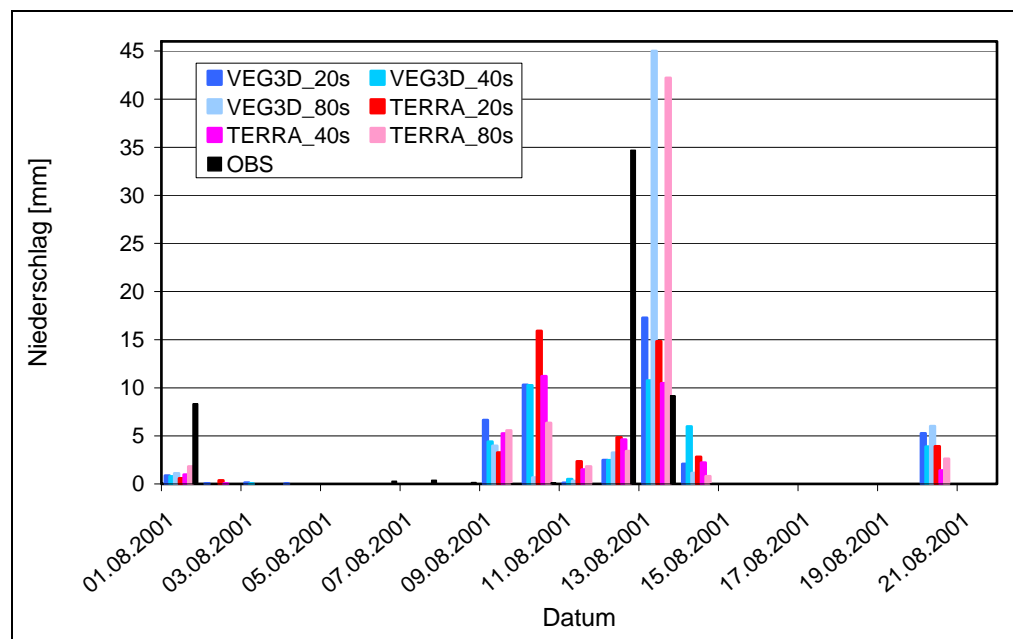
**Abbildung A 1.2:** Links oben: Differenz der 2m-Temperatur VEG3D 20 s – 40 s. Links unten: Differenz der 2m-Temperatur VEG3D 80 s – 40 s. Rechts oben: Differenz der 2m-Temperatur TERRA 20 s – 40 s. Rechts unten: Differenz der 2m-Temperatur TERRA 80 s – 40 s.

Neben den Vergleichen für ein Gebiet, das Baden-Württemberg umfasst, werden nun noch zwei Gitterpunkte innerhalb Baden-Württembergs bezüglich entstehender Veränderungen durch unterschiedliche Zeitschrittberechnungen untersucht. Zunächst wird der am nächsten zur Messstation Hartheim liegende Gitterpunkt analysiert, danach die Gitterbox, in dessen Bereich der Messmast am KIT steht. Dadurch wird ein Vergleich mit Beobachtungen möglich.

Über den gesamten Zeitraum gemittelt unterscheiden sich die 2m-Temperaturen für den Gitterpunkt ‚Hartheim‘ zwischen den drei Simulationen um 0.3 K (VEG3D) bzw. 0.4 K (TERRA). Bei der Untersuchung der Tagesmittelwerte der 2m-Temperatur ergeben sich maximale Abweichungen von 1.6 K (VEG3D) bzw. 1.0 K (TERRA). Beim über 21 Tage aufsummierten Niederschlag treten Unterschiede bis zu 27 mm auf. Vergleicht man den simulierten Niederschlag in allen drei Konfigurationen mit der Beobachtung, so schwan-

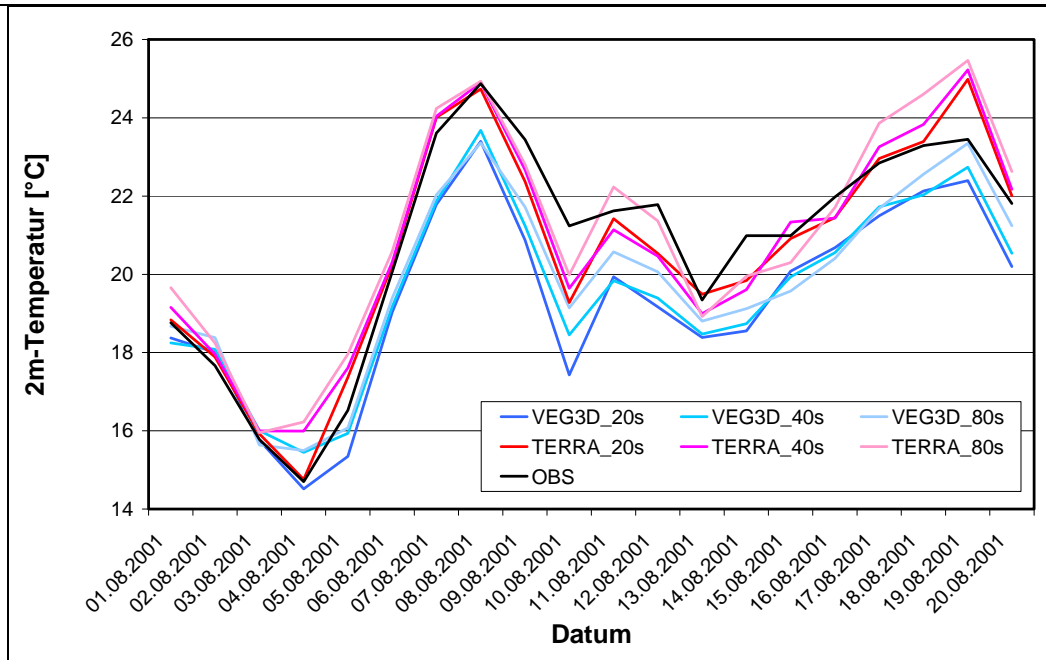
### Sensitivitätstest einer Simulation bei Verwendung unterschiedlich großer Zeitschritte

ken die Abweichungen zwischen -29 % (TERRA mit 40 s) und +22 % (TERRA mit 80 s). Beim VEG3D weichen die Werte zwischen -26 % bis +16 % vom Messwert ab. Die Betrachtung der Tagessummen zeigt deutliche Unterschiede von bis zu 34 mm (s. Abb. 5.3).



**Abbildung A 1.3:** Simulierte und beobachtete tägliche Niederschlagssumme an der Station Hartheim.

Am Gitterpunkt ‚Messmast KIT‘ ergibt die Analyse der über 21 Tage gemittelten 2m-Temperatur, dass sich die Werte des VEG3D und des TERRA in den drei Konfigurationen um höchstens 0.5 K differieren, die Tagesmittelwerte jedoch um bis zu 1.7 K (VEG3D) bzw. 1.5 K (TERRA) variieren. Der im gesamten Zeitraum gefallene Niederschlag schwankt bei der Simulation mit VEG3D zwischen 21 mm (40 s) und 29 mm (20 s), bei der Simulation mit TERRA zwischen 26 mm (20 s und 40 s) und 37 mm. Die Differenzen von 8 mm beim VEG3D und 11 mm beim TERRA stellen angesichts des geringen Gesamtniederschlags eine recht große Abweichung dar. Die Werte des VEG3D mit einem 40 s Zeitschritt liegen 19 % über der Beobachtung und mit dem 20 s Zeitschritt 63 % darüber. In der Tagessumme des Niederschlags unterscheiden sich die drei Konfigurationen der beiden Modelle um höchstens 8mm.



**Abbildung A 1.4:** Simulierte und beobachtete Tagesmittelwerte der 2m-Temperatur am Messmast des KIT.

## Zusammenfassung

Die Untersuchung von Simulationen, die mit unterschiedlichen Zeitschritten gerechnet wurden, hat ergeben, dass es je nachdem, mit welchem Zeitschritt man rechnet teilweise zu nicht vernachlässigbaren Unterschieden kommt.

Der Vergleich von Mittelwerten der 2m-Temperatur und Summen des Niederschlags für alle Gitterpunkte hat je nachdem welcher Zeitschritt für die Berechnung der Simulation angenommen wurde, Differenzen aufgezeigt. Die gemittelte 2m-Temperatur unterscheidet sich an manchen Orten bis zu 1 K. Die Werte des Niederschlags können um mehrere hundert Millimeter an einem Ort differieren. Die Unterschiede in der räumlichen Verteilung des Niederschlags sind groß. Die Ergebnisse der Simulationen mit verschiedenen Zeitschritten stimmen mit zunehmender Gebietsgröße besser überein. Besonders große Unterschiede treten bei Vergleichen an einzelnen Gitterpunkten auf.

Die Ursache der Unterschiede bei unterschiedlichen Zeitschritten ist bisher nicht bekannt und wird derzeit untersucht. Es gibt allerdings zeitschrittabhängige Prozesse im COSMO-CLM, die Differenzen hervorrufen können. So ist das Intervall der Berechnung der Konvektion abhängig von der Wahl des Zeitschrittes und kann möglicherweise Unterschiede in den Simulationsergebnissen bewirken.

## A.2 ANLEITUNG FÜR DIE IMPLEMENTIERUNG DES BODENMODELLS VEG3D IN DAS ATMOSPHÄRENMODELL COSMO-CLM

In dieser Arbeit wurde das Bodenmodell VEG3D zunächst in das Atmosphärenmodell COSMO 4.2 CLM-5 (darin sind alle Bugs bis zum COSMO 4.4 korrigiert) eingebaut. Später folgte der Einbau in die Version COSMO 4.8 CLM-7.

Im Code sind sämtliche Änderungen mit IMK (FISCHER) gekennzeichnet. Auf der Unix – Ebene lassen sich mit Hilfe der ‚grep‘ Suchfunktion die bearbeiteten Stellen in den einzelnen Fortran Programmen auffinden und direkt in den neu zu bearbeitenden Code einbringen. ( > *grep IMK (FISCHER) \** ).

Die Implementierung des VEG3D hat Auswirkungen auf sechzehn Programme der originalen COSMO-CLM Version. Hinzu kommen noch zwei speziell für das VEG3D benötigte neue Programme ‚data\_soil\_veg3d.f90‘, sowie die eigentliche VEG3D Routine ‚src\_soil\_veg3d.f90‘, welche in den Ordner */src* (= *source code*) eingefügt werden. Um die beim Einbau unterlaufenen Fehler leichter ausfindig zu machen, empfiehlt es sich immer wenn die Änderungen in einem Programm abgeschlossen sind, den Code mit einem > *make* zu kompilieren.

Die folgende Liste enthält die sechzehn Programme, die aufgrund des Einbaus vom VEG3D zu bearbeiten sind und beinhaltet gleichzeitig die wichtigsten durchzuführenden Änderungen.

1. data\_fields.f90
  - Einführung von zusätzlichen Strahlungsfeldern (soup, sodown, thup, thdown) um die am Boden ankommende langwellige und kurzwellige Strahlung auszugeben
  - Alle für das VEG3D benötigten Felder werden angelegt
2. data\_runcontrol.f90
  - Anlegen notwendiger namelist Parameter (bodhydwerte, bodhydfkt, lveg3d, lveg3dsoil)

3. `Imorg.F90`

- `initialize_loop` geändert um Julianischen Tag herausschreiben zu lassen
- Initialisierung der Pflanzeigenschaften (`PLCOV` = Pflanzenbedeckungsgrad, `LAI` = Blattflächenindex) nur wenn kein VEG3D verwendet wird und wenn es sich nicht um den ersten Zeitschritt handelt, ansonsten werden sie im VEG3D berechnet

4. `organize_data.f90`

- Für alle benötigten VEG3D Variablen wird ein Restart gesetzt
- Einlesen der VEG3D Landnutzung (*lanugebietalpen.txt*, *lanugebieta.d*, *lanu2\_8.d*; mehr zur Erstellung dieser Dateien s.u.) und der Bodentypen (*bodenzuordnung.txt*, *bodenzuordnung2\_8.txt*, sofern vorhanden; mehr zur Erstellung dieser Dateien s.u.) und Synchronisation der Datensätze sowie Verteilung auf alle Prozessoren

5. `organize_physics.f90`

- Aufruf von VEG3D als Bodenmodell
- Default Besetzung der Namelist Parameter

6. `parallel_utilities.f90`

- Subroutine `distribute_field_in` angelegt um Felder zu verteilen

7. `slow_tendencies.f90`

- Übergabe der Energieflüsse aus Bodenvegetationsmodell an Atmosphärenmodell; Dies betrifft nur den latenten und fühlbaren Wärmestrom, der Impuls wird wie im TERRA gelassen

8. `src_allocation.f90`

- Allokierung und Deallokierung aller zusätzlich benötigten VEG3D Felder

9. `src_conv_shallow.f90`

- Temperatur im Bestand wird verwendet für die Berechnung, ob der Niederschlag als Schnee oder Regen fällt

10. `src_conv_tiedtke.f90`



- Temperatur im Bestand wird verwendet für die Berechnung ob der Niederschlag als Schnee oder Regen fällt

11. src\_input.f90

- Restart Variablen für VEG3D hinzugefügt

12. src\_output.f90

- Restart Variablen (WB = Bodeneisgehalt, VTBOS = Temperatur der obersten Bodenschicht, EISG = Bodenwassergehalt) für VEG3D hinzugefügt

13. src\_radiation.f90

- Berechnung der Albedo für den Zeitschritt  $t = 0$  mit Hilfe des Bodentyps, der Vegetation und der Schnee/Eis Bedingungen
- Verwenden der potentiellen Temperatur im Bestand anstelle der Temperatur der Unterlage

14. src\_setup\_vartab.f90

- Zusätzliche Ausgabegrößen bei VEG3D Nutzung; Da nicht genügend Variablen vorhanden, werden solche verwendet, die sonst nicht in der Output-Liste stehen – dies sollte vor jeder Ausgabe überprüft werden

15. turbtran.incf

- Bodennahe Werte von Temperatur und Feuchte werden wie die 2m-Temperatur und 2m-Feuchte berechnet, wenn kein VEG3D

16. src\_turbdiff.f90

Nachdem diese sechzehn Programme erfolgreich kompiliert sind, werden noch die zwei Programme data\_soil\_veg3d.f90 und src\_soil\_veg3d.f90 in den Ordner */src* eingefügt und kompiliert.

Das VEG3D unterscheidet sich vom bereits im COSMO-CLM integrierten Bodenmodell TERRA unter anderem durch ein eigenes Landnutzungskataster und eine neue Bodentypklassifizierung. Diese Landnutzungsdateien und Bodentypdateien müssen als ASCII-Files vorliegen und in organize\_data.f90 explizit benannt werden. Beide Files

müssen beginnend von der linken unteren Ecke des Modellgebiets nach rechts oben aufgebaut sein. Dabei muss bei der Landnutzung pro Zeile die Länge, Breite und die Landnutzungs-kategorie enthalten sein. Die Zeile für die Bodenwerte beinhaltet den Bodentyp beginnend mit der obersten Bodenschicht bis zur untersten.

Zur Erstellung der ASCII-Files dienen die Programme `lanugebieta*.f90` und `bodenzuordnung*.f90` (\* steht für die jeweilige Größe und Auflösung des Modellgebietes, die in den Programmen manuell eingegeben wird).

Um alles erfolgreich kompilieren und verlinken zu können, müssen die Dependencies, die Fopts, die Objfiles und das Makefile ebenfalls an die Änderungen durch das VEG3D angepasst werden.

Die Abhängigkeiten der Programme des COSMO-CLM untereinander sind in der Datei Dependencies aufgelistet. Hier müssen die Verflechtungen von `data_soil_veg3d.o` und `src_soil_veg3d.o` innerhalb des Modells eingefügt werden. Dies sieht dann folgendermaßen aus:

```
$(OBJDIR)/data_soil_veg3d.o:      $(SRCDIR)/data_soil_veg3d.f90 \
    $(OBJDIR)/data_parameters.o
    echo compiling data_soil_veg3d.f90
    (cd $(OBJDIR) && $(F90) $(COMFLG) $(SRCDIR)/data_soil_veg3d.f90)
#
$(OBJDIR)/src_soil_veg3d.o:      $(SRCDIR)/src_soil_veg3d.f90 \
    $(OBJDIR)/data_constants.o   $(OBJDIR)/data_fields.o \
    $(OBJDIR)/data_modelconfig.  $(OBJDIR)/data_parameters.o \
    $(OBJDIR)/data_runcontrol.o  $(OBJDIR)/data_soil_veg3d.o \
    $(OBJDIR)/meteo_utilities.o
    echo compiling src_soil_multlay.f90
    (cd $(OBJDIR) && $(F90) $(COMFLG) $(SRCDIR)/src_soil_veg3d.f90)
#
```

Die Fopt's enthalten Compileroptionen, die je nachdem auf welchem System gerechnet wird, angepasst werden müssen. In dieser Arbeit sind die Optionen für die AIX eingestellt. In der Datei Objfiles dürfen die Object Files `data_soil_veg3d.o` und `src_soil_veg3d.o` nicht fehlen.

Als nächstes muss nun das Runfile an die Änderungen durch das VEG3D angepasst werden. Dazu gibt es einen ‚Schalter‘, der verantwortlich dafür ist, ob mit VEG3D oder TERRA als Bodenmodell gerechnet werden soll:

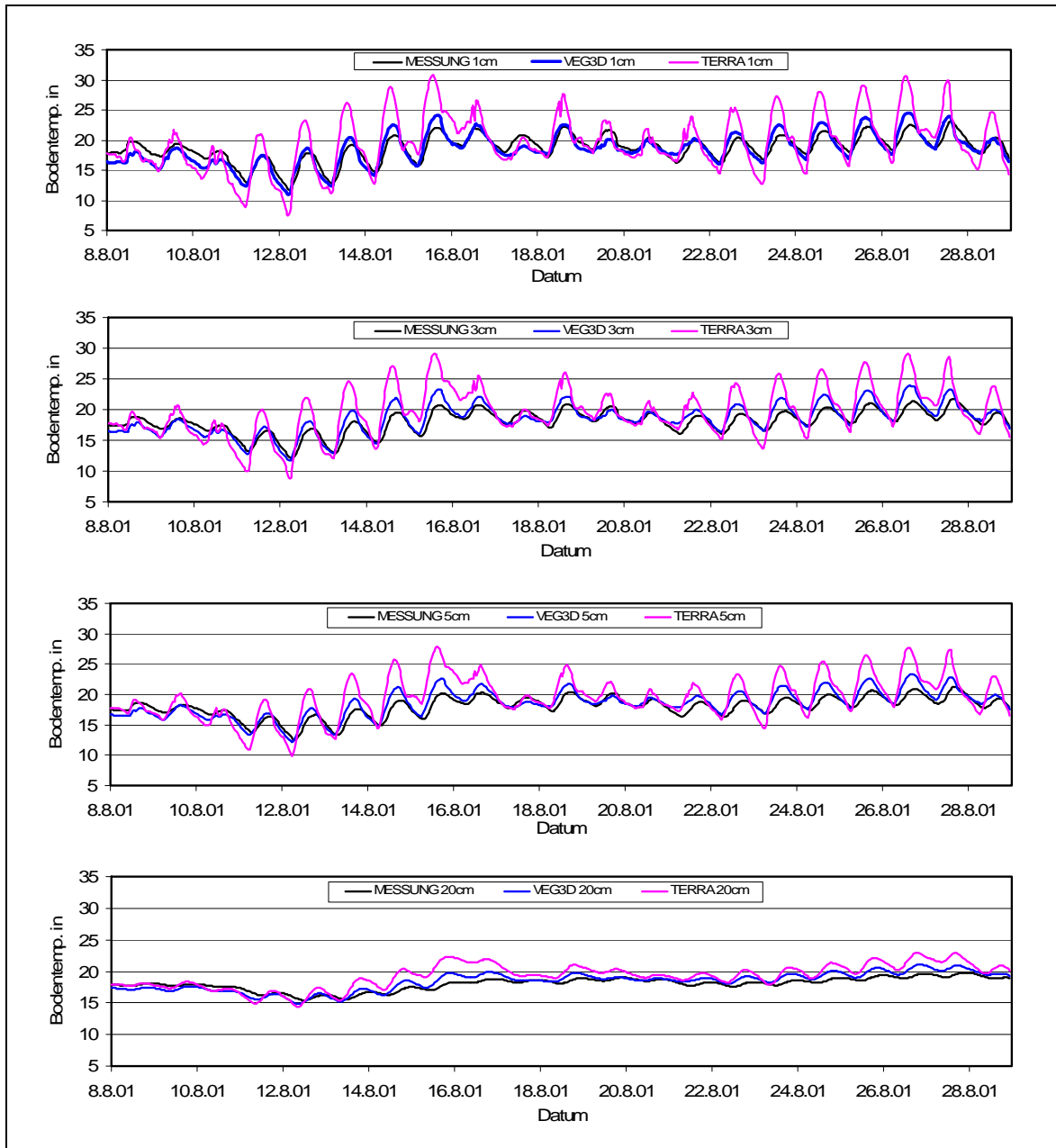
Mit der Einstellung `lveg3d = .TRUE.` wird das VEG3D anstelle von TERRA verwendet.

Stellvertretend für die Bodentypwerte des VEG3D kann auch weiterhin mit den Bodenwerten des TERRA\_LM gerechnet werden. Dazu setzt man im Runfile:

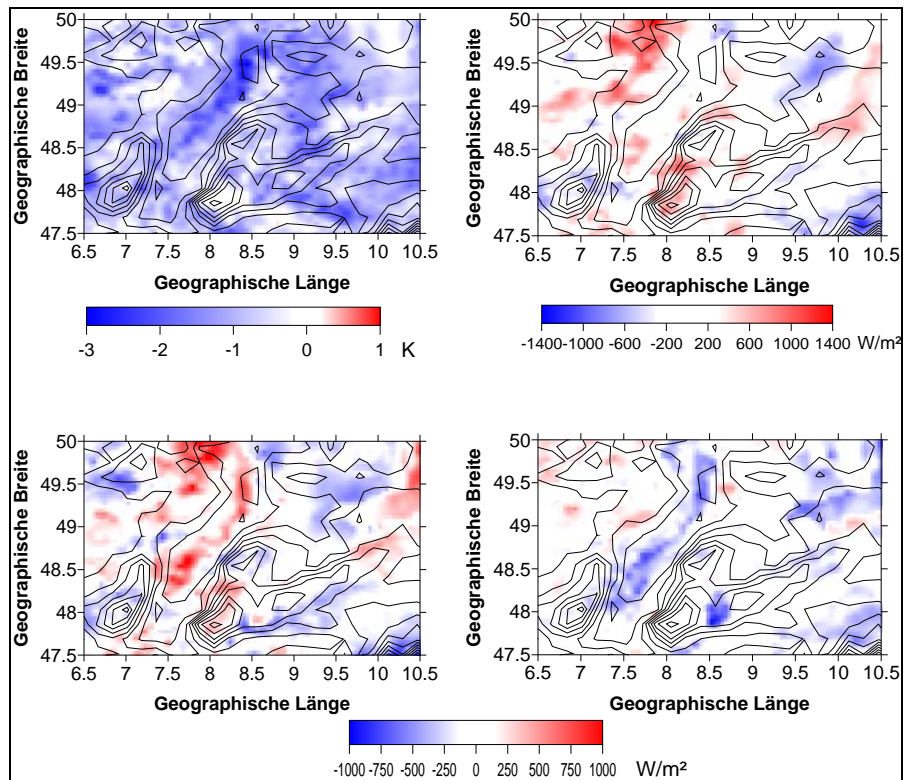
```
lveg3dsoil =.FALSE.
```

Damit ist die Implementierung des VEG3D in das COSMO-CLM abgeschlossen und eine Simulation mit dem Boden-Vegetationsmodell VEG3D, gekoppelt an das Atmosphärenmodell COSMO-CLM, ist durchführbar.

### A.3 ERGÄNZUNG DER ERGEBNISSE AUS KAPITEL 3

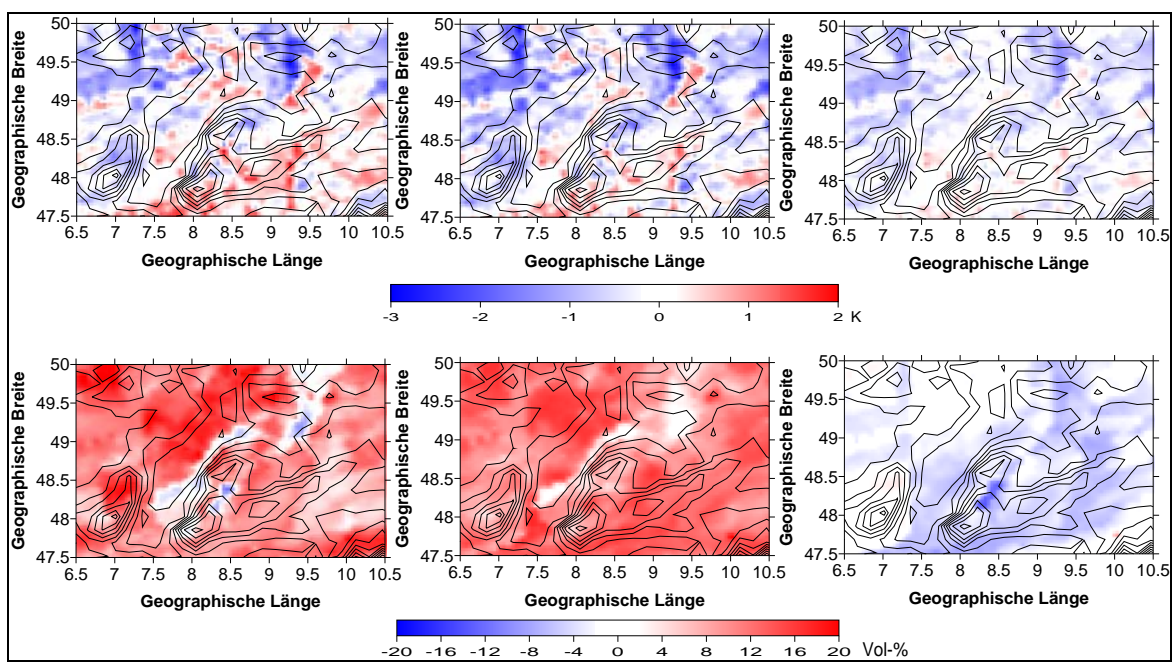


**Abbildung A 2.1:** Tagesgang der Bodentemperatur in den Tiefen 1 cm, 3 cm, 5 cm, 20 cm (von oben nach unten).

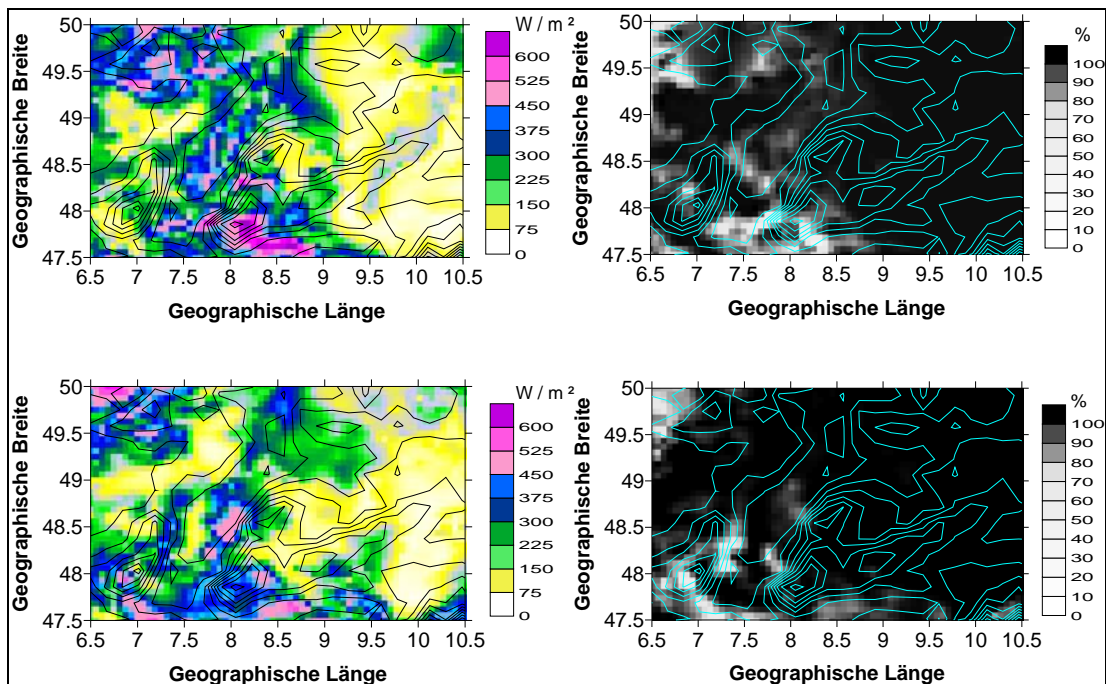


**Abbildung A 2.2:** Links oben: Differenz der 2m-Temperatur von VEG3D und TERRA am 20.08.2001; Rechts oben: Differenz der Tagessumme der Strahlungsbilanz von VEG3D und TERRA am 20.08.2001; Unten: Differenz der Tagessumme des Latenten Wärmeflusses (links) und Sensiblen Wärmeflusses (rechts) von VEG3D und TERRA am 20.08.2001.

Ergänzung der Ergebnisse aus Kapitel 3



**Abbildung A 2.3:** Oben: Differenz der Bodentemperatur VEG3D – TERRA; Unten: Differenz der Bodenfeuchte VEG3D – TERRA; Links: in 5 cm Tiefe, Mitte: Mittelwert über vier Schichten von 5 – 16 cm; Rechts: Mittelwert über zehn Schichten von 5 – 1150 cm.



**Abbildung A 2.4:** Links: Kurzwellige Strahlungsbilanz am 20.08.2001 um 12 Uhr mit VEG3D (oben) und TERRA (unten); Rechts: Wolkenbedeckung am 20.08.2001 um 12 Uhr mit VEG3D (oben) und TERRA (unten)