

## 2.5.3 Teilprojekt Hydrologie/Fernerkundung - Zwei-Wege-Kopplung der Modelle PROMET und MM5

### 1. Einleitung

Die Landoberfläche ist eine wesentliche Komponente des Klimasystems (IPCC, 2007). Ihre räumlich sehr heterogenen Eigenschaften (z.B. Landnutzung, Geländehöhe, Bodenart) beeinflussen die Energie- und Massenflüsse auf der Landoberfläche z.B. durch die Transpiration der Vegetation oder der kurz- und langwelligen Ausstrahlung.

Vor allem die Bedeckung der Landoberfläche mit unterschiedlicher Vegetation sowie die Versiegelung von Flächen wie z.B. in Städten kann räumlich stark variieren. Während die Heterogenität der Landoberfläche mit fernerkundlichen Methoden meist gut erfasst werden kann, stellt ihre Berücksichtigung in der Klimamodellierung nach wie vor eine wissenschaftliche Herausforderung dar. In den meisten Klimamodellen sind sogenannte Landoberflächenmodule (LSMs) für die Modellierung der Landoberflächenprozesse verantwortlich. Die Energie- und Massenflüsse der Landoberfläche werden dabei meist in der Auflösung des jeweiligen Klimamodells berechnet und gehen in die Modellierung des Klimas für ein bestimmtes Gebiet mit ein. Neuere LSMs benutzen oft einen subskaligen Ansatz, bei dem die Massen- und Energieflüsse der Landoberfläche für die am häufigsten vorkommenden Landnutzungsklassen nach prozentualen Anteilen für die Auflösung eines Pixels einzeln berechnet und schließlich aggregiert werden. Eine subskalige Orographie wird dabei jedoch nicht berücksichtigt. Durch die beschränkte räumliche Auflösung der sehr rechenaufwendigen Klimamodelle können die Eigenschaften der Landoberfläche, deren räumliche Dimension kleiner ist als die Pixelgröße der Klimamodelle, nicht in Klimasimulationen berücksichtigt werden. Dies betrifft auch eine Vielzahl meteorologischer Prozesse sowie komplexe Rückkopplungen zwischen Landoberfläche und Atmosphäre, die oft auf wesentlich kleineren Skalen stattfinden als diese derzeit mit Klimamodellen simuliert werden können. Diese subskaligen Prozesse und Rückkopplungen zu berücksichtigen stellt derzeit einen Forschungsschwerpunkt im Bereich der Klimamodellierung dar (IPCC, 2007) und kann zu einem besseren Verständnis des komplexen Landoberflächen-Atmosphären-Systems und in Folge auch zu einer Verbesserung zukünftiger Klimaszenarien beitragen. Zu diesem Zweck wurde ein Ansatz entwickelt, in dem das hydrologische Modell PROMET (siehe Kapitel E4; Mauser & Bach, 2009) mit dem regionalen Klimamodell MM5 (Pfeiffer & Zängl, 2009) gekoppelt wird.

### 2. Kopplungsgebiet

Das Kopplungsgebiet dieser Studie stellt einen Ausschnitt des MM5 Rechengebietes dar, in dem die Energie- und Massenflüsse der Landoberfläche hochaufgelöst von PROMET anstatt von MM5 selbst berechnet werden. Das Rechengebiet des Regionalmodells MM5 wird an dessen Rändern von Reanalysedaten oder globalen Klimamodellendaten angetrieben (siehe Kapitel S5). Das Kopplungsgebiet erstreckt sich über 1170 x 1170 km<sup>2</sup>. Es umfasst Zentraleuropa mit insge-

samt 18 Ländern von der Nordsee bis zum Mittelmeer. Abbildung 2.5.3.1 zeigt die Topographie des Kopplungsgebietes mit dem Einzugsgebiet der Oberen Donau. Die Landschaft ist geprägt von großen, fruchtbaren Ebenen, Mittelgebirgen und den Alpen, die eine klimatische Grenze von der gemäßigten Zone zum Mittelmeerklima darstellen.

### 3. Landnutzungsklassifikation

Die Landnutzung ist in Europa stark anthropogen geprägt. Die Landwirtschaft hält einen Flächenanteil von ca. 45 %. Städte und Siedlungen versiegeln große Flächen, besonders in dicht besiedelten Regionen. Für die Modellierung der Landoberflächenprozesse mit PROMET (siehe Kapitel E4) innerhalb des Kopplungsgebietes war eine detaillierte Abbildung der Landnutzung in einer räumlichen Auflösung von 1 km<sup>2</sup> notwendig.

Abbildung 2.5.3.2 zeigt die Landnutzung für das Kopplungsgebiet in der modellinternen Auflösung von 45 km<sup>2</sup>, wie sie im MM5 ursprünglich spezifiziert ist. Es dominieren die landwirtschaftlichen Flächen, die in der Klasse „Trockengebiete, Ackerland und Grasland“ zusammengefasst werden. Während in den Alpen hauptsächlich Nadelwälder zu finden sind, zeigen sich Laubwälder nördlich und westlich, vor allem jedoch südöstlich der Alpen.

Um in der Auflösung von PROMET (1 km<sup>2</sup>) eine detaillierte Abbildung der Landoberfläche für das Rechengebiet zu erhalten, wurde auf Grundlage der CORINE 2000 Landnutzungsklassifikation eine Karte erstellt, die auch die Heterogenität innerhalb der landwirtschaftlichen Flächen berück-

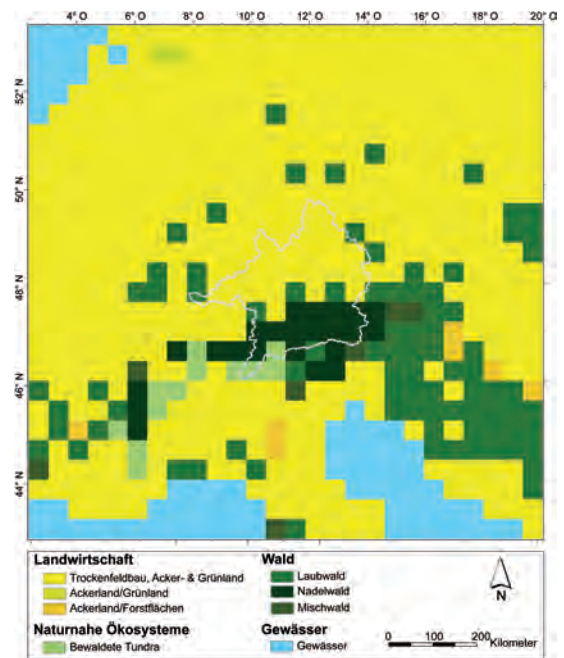


Abbildung 2.5.3.2: Landnutzungsklassifikation für das Modell MM5 in der modellinternen Auflösung von 45 x 45 km<sup>2</sup> für das Kopplungsgebiet.

sichtigt. Dafür wurden MERIS NDVI Daten, als auch statistische Daten von EUROSTAT herangezogen (Zabel et al., 2010).

Abbildung 2.5.3.3 zeigt die Landnutzungsklassifikation so, wie sie in PROMET mit 1 km<sup>2</sup> Auflösung verwendet wird. Die deutlich höhere Auflösung im Vergleich zur Landnutzung des meteorologischen Modells MM5 führt zu einer wesentlich genaueren Abbildung der Realität, in der die Heterogenität der Landoberfläche sichtbar wird.

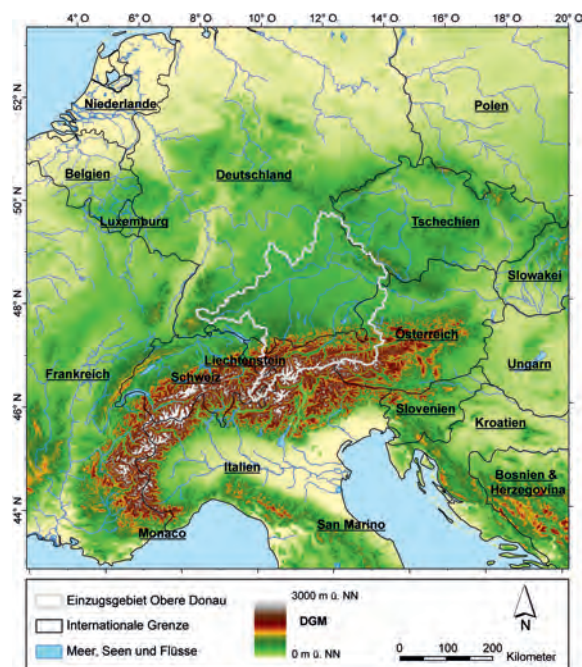


Abbildung 2.5.3.1: Die Topographie des Kopplungsgebietes für die 2-Wege-Kopplung. Höhenmodell aus SRTM-Daten.

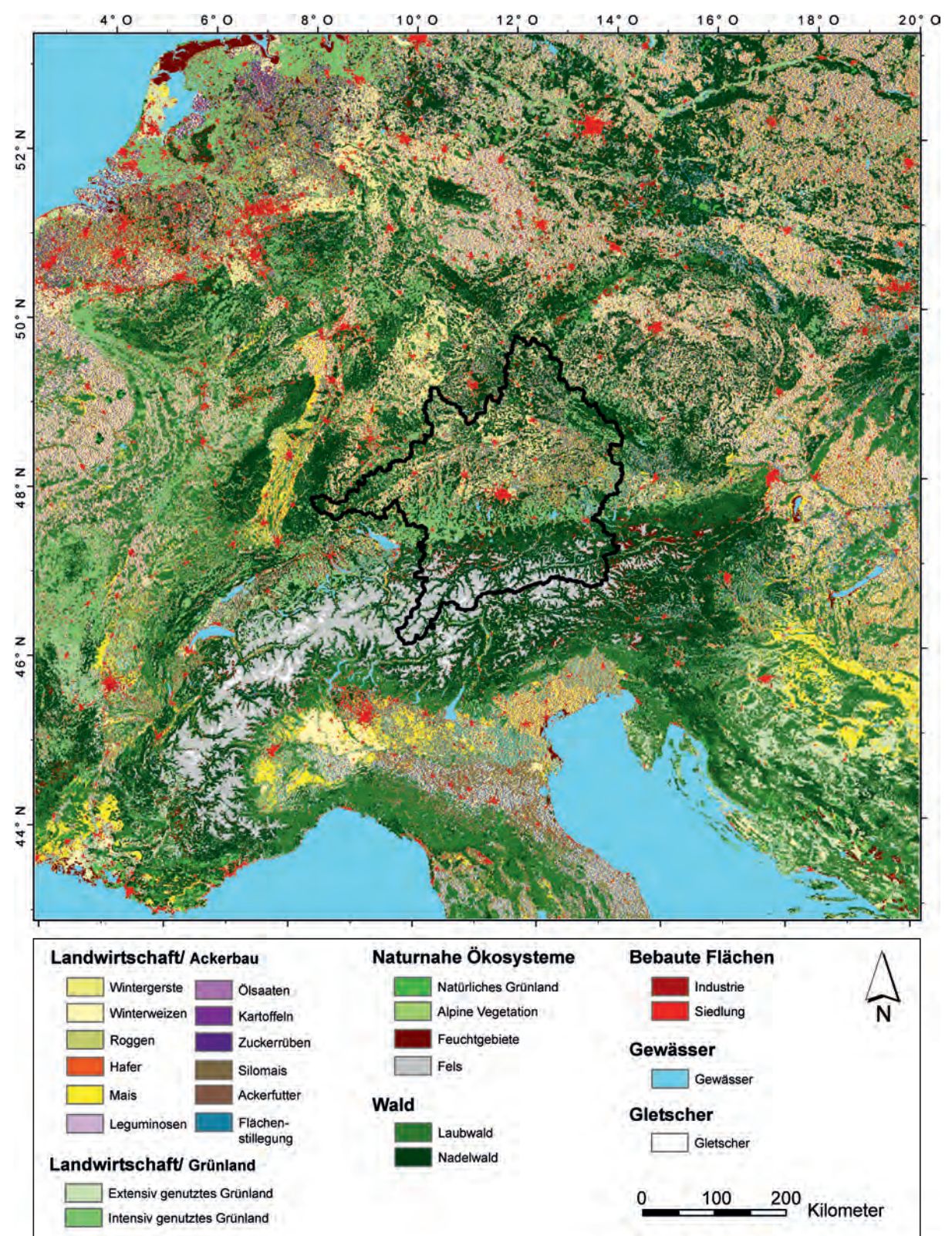


Abbildung 2.5.3.3: Landnutzungsklassifikation für das Modell PROMET in der modellinternen Auflösung von 1 x 1 km<sup>2</sup> für das Kopplungsgebiet.



Nicht nur, dass Städte, Felsen oder Gletscher in einer Auflösung von  $45 \times 45 \text{ km}^2$  nicht dargestellt werden können, auch die landwirtschaftlichen Klassen können bei höherer räumlicher Auflösung in die wichtigsten Nutzungsarten untergliedert werden. Dies ist ebenfalls von Bedeutung, da sich in Anbetracht des hohen Anteils landwirtschaftlicher Flächen in Mitteleuropa unterschiedliche phänologische Entwicklungen innerhalb verschiedener Ackersorten stark auf die zeitliche Dynamik z.B. der Transpiration oder anderer Energieflüsse auf der Landoberfläche auswirken.

#### 4. Zwei-Wege-Kopplung

PROMET wurde bereits erfolgreich mit Daten aus regionalen Klimamodellen (*REMO*, *MM5*) angetrieben (Marke, 2008). Daraus entstanden die Klimavarianten der regionalen Klimamodelle *REMO* und *MM5* (*skaliert & biaskorrigiert*), die in Kapitel S5 ausführlich beschrieben werden. Diese 1-Wege-Kopplung wurde im GLOWA-Danube Projekt entwickelt, um die Möglichkeit zu haben, das Modell PROMET mit Daten aus regionalen Klimamodellen anzutreiben. Dafür mussten die meteorologischen Daten aus den regionalen Klimamodellen auf die Auflösung des hydrologischen Modells herunterskaliert und anschließend einer Biaskorrektur unterzogen werden (siehe Kapitel S5).

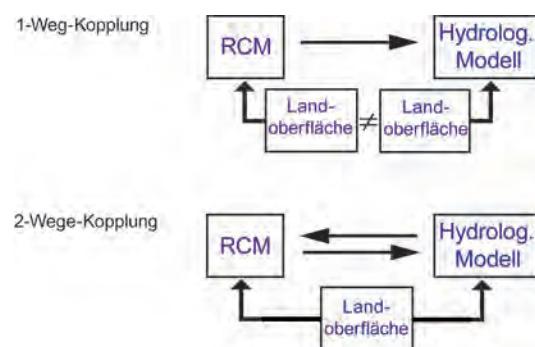


Abbildung 2.5.3.4: Schematische Darstellung des Grundprinzips der 1-Weg-Kopplung und der 2-Wege-Kopplung.

Während bei der 1-Weg-Kopplung sowohl das regionale Klimamodell (RCM) als auch das hydrologische Modell (siehe Abbildung 2.5.3.4) jeweils ihre eigenen Landoberflächen (Landnutzung, DGM, Bodenart) für die Berechnung der Energieflüsse der Landoberfläche heranziehen, werden bei der 2-Wege-Kopplung Inkonsistenzen vermieden, indem nicht mehr auf zwei verschiedene Landoberflächen in unterschiedlichen Auflösungen und Parametrisierungen zurückgegriffen wird, sondern nur noch auf ein und dieselbe Landoberfläche (siehe Abbildung 2.5.3.4). Die Landoberfläche dient nun als Bindeglied zwischen Atmosphäre und Hydrologie, über die Masse und Energie ausgetauscht werden.

In dem hier vorgestellten Ansatz der 2-Wege-Kopplung werden nun die Energieflüsse der Landoberfläche mit PROMET in einer räumlichen Auflösung von  $1 \times 1 \text{ km}^2$  berechnet, nachdem die meteorologischen Größen alle 9 Minuten von *MM5* in  $45 \times 45 \text{ km}^2$  bereitgestellt und von der Modellschnittstelle SCALMET (Marke, 2008) auf  $1 \times 1 \text{ km}^2$  herunterskaliert wurden.

Die Skalierung erfolgt im Fall der 2-Wege-Kopplung im Gegensatz zur 1-Weg-Kopplung ohne empirische Skalierungsfunktionen sowie ohne Biaskorrektur (siehe Kapitel S5) mit Hilfe von physikalischen Modellen oder quasi-physikalischen Ansätzen wie z.B. Höhengradienten, die aus den meteorologischen Daten von *MM5* für jeden Kopplungszeitschritt abgeleitet werden. Energie und Masse bleiben dabei stets erhalten. Um die

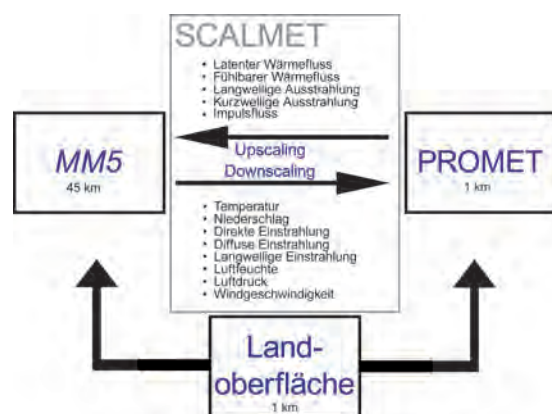


Abbildung 2.5.3.5: Schematische Darstellung der Methodik der 2-Wege-Kopplung.

Energiebilanz innerhalb des gekoppelten Land-Atmosphärensystems zu schließen, werden schließlich die von PROMET berechneten Energieflüsse der Landoberfläche an *MM5* übergeben. Dafür ist eine Skalierung der Energieflüsse von  $1 \text{ km}$  auf  $45 \text{ km}$  notwendig (siehe Abbildung 2.5.3.5). Skalenprobleme treten hierbei nicht auf, da die Energieflüsse ein lineares Verhalten aufweisen.

#### 5. Darstellung der Ergebnisse

Gekoppelte und ungekoppelte Modellsimulationen wurden über einen Zeitraum von 1996 bis 1999 mit ERA-40 Reanalysedaten des ECMWF angetrieben.

Während die mittlere jährliche Lufttemperatur aus den Stationsdaten im EZG der Oberen Donau für den 4-jährigen Simulationszeitraum  $7,0^\circ\text{C}$  beträgt, weisen die Ergebnisse der Simulation von *MM5* mit der *MM5*-internen Landnutzungs-klassifikation eine mittlere Lufttemperatur für das Gebiet der Oberen Donau von  $6,1^\circ\text{C}$  auf. In der voll gekoppelten Simulation beträgt die gemittelte Lufttemperatur  $6,9^\circ\text{C}$ . Über den gesamten Simulationszeitraum ist die Lufttemperatur aus der voll gekoppelten Simulation um ca.  $0,8^\circ\text{C}$  wärmer als die Temperatur aus der ungekoppelten Simulation und liegt somit näher an den interpolierten Messungen von Stationsdaten. Die 3-stündlichen Temperaturverläufe sind über das Jahr hinweg relativ ähnlich. Abbildung 2.5.3.6 zeigt dies exemplarisch für das Jahr 1999.

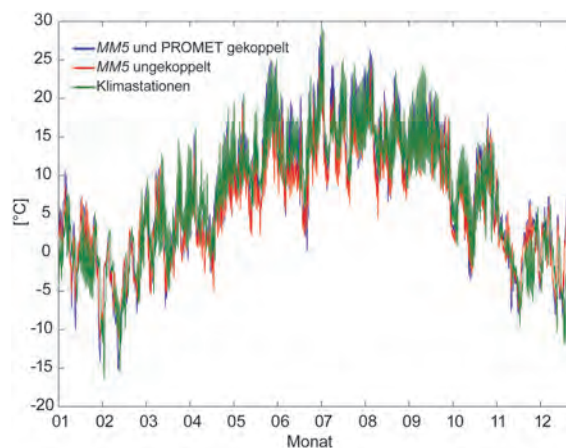


Abbildung 2.5.3.6: Modellierter 3-stündlicher Tagesgang der Lufttemperatur für das Jahr 1999 von *MM5* ungekoppelt (rot), *MM5* und PROMET voll gekoppelt (blau) und räumlich sowie zeitlich interpolierte Daten aus Klimastationen (grün), jeweils als Gebietsmittel der Oberen Donau.

Der Antrieb des Regionalmodells *MM5* aus ERA-40-Reanalysedaten sowohl für die voll gekoppelte als auch für die ungekoppelte Simulation an den Rändern des Rechengebietes bestimmt das Verhalten der simulierten Temperatur maßgeblich.

Es fällt dennoch auf, dass die Lufttemperatur in der ungekoppelten Simulation während der Sommermonate im Vergleich zu den zeitlich und räumlich interpolierten Daten aus Klimastationen zu kühl ist (Pfeiffer & Zängl, 2009). Dieser Effekt tritt besonders jeweils zu den Tagesmaxima auf. Um dieses Verhalten der Lufttemperatur zu verdeutlichen, zeigt Abbildung 2.5.3.7 den mittleren monatlichen Tagesgang der Lufttemperatur im Juni und im Dezember für die Modellsimulationen als Mittel über den Simulationszeitraum von 1996-1999.

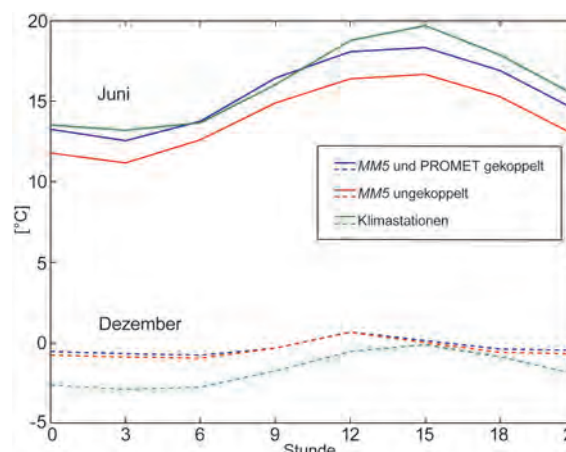


Abbildung 2.5.3.7: Tagesgang der mittleren Lufttemperatur als Gebietsmittel der Oberen Donau für Juni und Dezember als Mittel über die Jahre 1996-1999.

Hier wird deutlich, dass die Auswirkungen der hoch aufgelösten Landoberfläche auf die simulierte Lufttemperatur im Einzugsgebiet der Oberen Donau im Winter marginal sind, während im Sommer deutliche Unterschiede festzustellen

sind. Im Winter ist die umgesetzte Energiemenge auf der Landoberfläche zu gering, als dass sich starke Unterschiede zwischen dem gekoppelten und dem ungekoppelten Modellsystem ausbilden können. Im Sommer führen landnutzungsabhängige Rückkopplungsmechanismen zwischen der Landoberfläche und der Atmosphäre zu größeren Unterschieden der Lufttemperatur. Sie verändern dabei das Verhältnis von latentem zu fühlbarem Wärmestrom und haben zur Folge, dass sich im Juli das Maximum im Tagesgang der Temperatur im Fall der 2-Wege-Kopplung erhöht (siehe Abbildung 2.5.3.7). Damit liegt die simulierte Lufttemperatur der 2-Wege-Kopplung näher an den gemessenen Daten aus Klimastationen.

Eine mögliche Ursache könnte darin liegen, dass die neue Landnutzung versiegelte Flächen wie Städte oder Felsen abbildet, die in der *MM5*-Landnutzung mit  $45 \text{ km}^2$  Auflösung nicht dargestellt werden. Da sich versiegelte Flächen stärker erwärmen, und diese Energie anschließend an die Luft abgeben, erwärmt sich wiederum die Lufttemperatur stärker.

#### 6. Fazit

Da Klimamodelle in hoher räumlicher Auflösung bislang zu rechenaufwendig sind, stellt die 2-Wege-Kopplung mit dem darin enthaltenen Downscaling eine Möglichkeit dar, die Heterogenität der Landoberfläche mit deren Eigenschaften in Klimasimulationen zu berücksichtigen, indem die Landoberflächenprozesse in einer höheren Auflösung als die Prozesse in der Atmosphäre berechnet werden und anschließend die Massen- und Energieflüsse der Landoberfläche wieder an das Klimamodell zurückgegeben werden. Der Antrieb an den Rändern des Regionalmodells *MM5* durch ERA-40 Reanalyse-Daten determiniert das Modellverhalten maßgeblich. Die 2-Wege-Kopplung verändert die Ergebnisse der regionalen Klimamodelle im Rahmen des Modellantriebs. Dafür verantwortlich sind eine geänderte Landoberfläche, eine höhere räumliche Auflösung sowie eine verbesserte Parametrisierung der spezifischen Eigenschaften der Landoberfläche in PROMET. Damit konnte für die Jahre 1996-1999 gezeigt werden, dass der Tagesgang der Lufttemperatur mit Hilfe der 2-Wege-Kopplung zu besseren Ergebnissen führt als ein ungekoppelter Vergleichslauf.

#### 7. Ausblick

Weiterhin sind ausgiebige Untersuchungen zu Auswirkungen der 2-Wege-Kopplung notwendig. So sind Änderungen in der Strahlungsbilanz ebenso zu erwarten wie Änderungen im Niederschlag und damit auch im resultierenden Abflussverhalten. Vor allem konvektive Niederschlagsereignisse sind hierbei von großem Interesse. Diese finden auf so kleinen räumlichen Skalen statt, dass sie derzeit in Klimamodellen nur durch empirische Parametrisierungen simuliert werden können. Weitere Analysen und Vergleiche zwischen 2-Wege-Kopplung und 1-Weg-Kopplung hinsichtlich der Evapotranspiration, der Bodenfeuchte sowie der Oberflächentemperatur werden durchgeführt.

#### Autoren

F. Zabel, W. Mauser, T. Marke  
Department für Geographie, Lehrstuhl für Geographie und geographische Fernerkundung, Ludwig-Maximilians-Universität München

#### Literatur

- IPCC (Hrsg.) (2007): *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis. Contribution of the Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)], Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
- Marke, T. (2008): *Development and application of a model interface to couple regional climate models with land surface models for climate change risk assessment in the Upper Danube watershed*. Dissertation der Fakultät für Geowissenschaften, Digitale Hochschulschriften der LMU München, 188, München (<http://edoc.ub.uni-muenchen.de/1137/>).
- Mauser, W. & Bach, H. (2009): *PROMET- Large scale distributed hydrological modelling to study the impact of climate change on the water flows of mountain watersheds*. Journal of Hydrology, 376, 362 - 377.
- Pfeiffer, A. & Zängl, G. (2009): *Validation of climate-mode MM5-simulations for the European Alpine Region*. Theoretical and Applied Climatology, 101, 93 - 108.
- Zabel, F., Hank, T.B. & Mauser, W. (2010): *Improving arable land heterogeneity information in available land cover products for land surface modelling using MERIS NDVI data*. Hydrological Earth System Science Discussion, 7, 4145-4175, Under Revision.