

**Mesoskalige Simulation einer
Verdunstungsklimatologie für ein
semi-arides Untersuchungsgebiet
in Südmarokko**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität zu Köln**

**vorgelegt von
Heike Hübener
aus Leer**

Köln, 2005

**Berichterstatter: Prof. Dr. Michael Kerschgens
Prof. Dr. Peter Speth**

Tag der letzten mündlichen Prüfung: 14.12.2004

**Mesoskalige Simulation einer
Verdunstungsklimatologie für ein
semi-arides Untersuchungsgebiet
in Südmarokko**

Heike Hübener

Inhalt:	
Zusammenfassung	iii
Abstract	iv
Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole	v
1. Einführung, Forschungsstand und Ziel der Arbeit	1
1.1 Einführung	1
1.2 Stand der Forschung	3
1.2.1 Niederschlag	4
1.2.2 Klimaänderung und anthropogene Einflüsse	6
1.2.3 Bestimmung der Evapotranspiration in ariden und semi-ariden Gebieten	7
1.2.4 Wechselwirkung von Boden, Oberfläche und Atmosphäre	9
1.2.5 Methoden der Regionalisierung	12
1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	14
2. Untersuchungsgebiet und Kontext der Arbeit	17
2.1 Das Untersuchungsgebiet Wadi Draa	17
2.2 Forschungsprojekt IMPETUS	23
3. Methoden und Daten	27
3.1 Das Modell FOOT3DK	27
3.2 Das SVAT-Modul in FOOT3DK	33
3.3 Beschreibung der Nestingkette	39
3.4 Statistische Methoden	40
3.5 Daten	46
4. Bearbeitung der Boden- und Oberflächendaten	48
4.1 Ausgangsbedingungen der Vergleichssimulationen	49
4.2 Simulation: Grundwasser	55
4.3 Simulation: Bewässerung	57
4.4 Vergleich mit Messdaten	60
4.5 Zusammenfassung: Bearbeitung der Boden- und Oberflächendaten	65
5. Erstellung einer Verdunstungsklimatologie	67

5.1 Statistik der Wetterlagen	68
5.2 Auswahl der Repräsentanten	76
5.3 Starkniederschlagsereignis 31.3. bis 1.4.2002	81
5.4 Ergebnisse für ausgesuchte Einzeljahre	85
5.5 Ergebnisse der Verdunstungsklimatologie	88
6. Zusammenfassung, Diskussion und Ausblick	91
Literaturverzeichnis	99
Bildanhang	115
Danksagung	123

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird aus Simulationen mit dem mesoskaligen meteorologischen Modell FOOT3DK (**F**low **O**ver **O**rographically structured **T**errain, **3** **D**imensional, **K**öln Version) eine hochaufgelöste Verdunstungsklimatologie für ein semi-arides Untersuchungsgebiet in Südost-Marokko erstellt. Als Startwert und als seitliche und obere Randbedingungen werden Simulationen des LM (**L**okal **M**odell des Deutschen Wetterdienstes) genutzt, die an der Universität Bonn durchgeführt wurden. Die Klimatologie wird aus der gewichteten Rekombination von Simulationen einzelner Tage nach der Methode der statistisch-dynamischen Regionalisierung erstellt. Die Auswahl der Termine zur Rekombination orientiert sich an großskaligen Windrichtungsklassen (**C**irculation **W**eather **T**ypes – CWTs) aus Bodendruckdaten der Jahre 1958 bis 1997. Der Zusammenhang der Windrichtung und der Zirkulation mit dem Niederschlag an der Station Ouarzazate wird anhand von täglichen Niederschlagsdaten seit 1978 analysiert. LM-Antriebsdaten stehen für den Zeitraum von November 2001 bis Dezember 2002 zur Verfügung.

Zur Verbesserung der Wiedergabe der Evapotranspiration werden zwei Methoden eingeführt, die Bodenfeuchtefelder im Untersuchungsgebiet realistischer darzustellen. Eine Methode ermöglicht den Zugriff von Pflanzen auf Grundwasser unterhalb der unteren Grenze des Modells zur Transpiration. Die andere Methode approximiert die im Untersuchungsgebiet praktizierte Form der Bewässerung. Beide Methoden zeigen deutliche Verbesserungen der simulierten bodennahen Bedingungen im Vergleich mit gemessenen Werten der Temperatur, der Feuchte und des Windes in 2 m über Grund an vier im Untersuchungsgebiet gelegenen Klimastationen, sowie mit der Transpiration verschiedener standorttypischer Pflanzen.

Die Anwendung der statistisch-dynamischen Regionalisierung unter Einbeziehung dieser Methoden für das Jahr 2002 zeigt eine realistische Verteilung von Niederschlag und Evapotranspiration im Untersuchungsgebiet. Für extreme Trocken- und Feuchtjahre zeigt sich hingegen eine leichte Überschätzung der Feuchteprozesse im Trockenjahr und eine Unterschätzung im Feuchtjahr. Die statistisch-dynamische Regionalisierung sollte in dieser Region daher nur auf ausreichend lange Zeiträume angewendet werden. Die Ergebnisse der Klimatologie zeigen ein räumlich differenziertes und meteorologisch sinnvolles Bild der Evapotranspiration im Untersuchungsgebiet. Im Rahmen des Forschungsprojektes IMPETUS (Ein **I**ntegratives **M**anagement **P**rojekt für einen **E**ffizienten und **T**ragfähigen **U**mgang mit der Ressource **S**üßwasser in Westafrika) können die Ergebnisse als obere Randbedingungen in ein hydrologisches Modell eingehen. Die Methode lässt sich auf Klimaszenarien anwenden und ermöglicht ebenfalls die Simulation von Änderungen der Landnutzung und Wasserverfügbarkeit in der Region.

Abstract

In this work, a high resolution climatology of evapotranspiration for a semi-arid research site in south-eastern Morocco is obtained, using meso-scale meteorological simulations with the FOOT3DK (Flow Over Orographically structured Terrain, 3 Dimensional, Köln Version) model. Initial state and forcing conditions at the lateral and upper boundaries are taken from simulations with the LM (Lokal Modell of the German Weather Service), realised at the University Bonn. The climatology is obtained, using weighted recombination of single days according to the statistical-dynamical downscaling approach. Days for the recombination are selected taking into account daily wind direction classes (Circulation Weather Types – CWTs), based upon sea level pressure data of the years 1958 to 1997. To analyse the correlation of wind direction and circulation with the precipitation, daily rainfall measurements at the station Ouarzazate since 1978 are used. The LM simulations, taken as forcing condition, are available for November 2001 to December 2002.

To improve the simulated evapotranspiration, two methods are introduced, to depict more realistic soil moisture distributions in the investigation area. One of them enables the plants to draw on groundwater resources below the lower boundary of the model for transpiration. The other one approximates the type of irrigation, conducted in the area of research. Both methods significantly improve simulated near surface fields, when compared to measured temperature, humidity and wind in 2 m above ground at four climate stations in the research area, as well as to transpiration of several typical plants of this region.

Application of the statistical-dynamical downscaling approach, including the aforementioned methods, show realistic distributions of rainfall and evapotranspiration in the area under consideration for the year 2002. However, for extremely dry or wet years, this method leads to a slight overestimation of moist processes for the dry year and underestimation for the wet year. Therefore, in this region, statistical-dynamical downscaling should be only applied to sufficiently long time periods. The results of the climatology give a spatial distributed and meteorologically sensible picture of evapotranspiration in the research area.

In the scope of the interdisciplinary research project IMPETUS, the results of this study can be used as upper boundary conditions for a hydrological model. The method can be easily applied to climate scenarios, as well as to scenarios of changing land cover / land use or water availability in the region.

Liste der verwendeten Abkürzungen und Symbole

Variable	Erklärung	Einheit
ASR	Station Asrir	-
B	Bodenwärmestrom	$W m^{-2}$
c	Spreizfaktor für Vertikalkoordinate η	-
C_1	Koeffizient für Bodenfeuchtemodell	-
C_{1sat}	Koeffizient für Bodenfeuchtemodell	-
C_2	Koeffizient für Bodenfeuchtemodell	-
C_{2ref}	Koeffizient für Bodenfeuchtemodell	-
CAPE	Convective Available Potential Energy	J
CCA	Kanonische Korrelationsanalyse	-
c_s	Wärmeleitfähigkeit des Bodens	$J K^{-1} m^{-3}$
CWT	Windrichtungsklasse (engl.: <i>Circulation Weather Type</i>)	-
D_1	Dicke der oberen Bodenschicht im Modell	m
D_2	Dicke der gesamten Bodenschicht im Modell	m
DWD	Deutscher Wetterdienst	-
E	Totale Evapotranspiration	$W m^{-2}$
E_g	Evaporation vom Boden	$W m^{-2}$
EMY	Station El Miyit	-
E_r	Reevaporation von Regenwasser von Pflanzenoberflächen	$W m^{-2}$
E_{tr}	Transpiration	$W m^{-2}$
f	Normalkomponente des Coriolisparameters	s^{-1}
F	Stärke der direktionalen Strömung	-
F_1	Faktor des Strahlungseinflusses auf den Stomatawiderstand	-
F_2	Faktor des Einflusses der Bodenfeuchte auf den Stomatawiderstand	-
F_3	Faktor des Einflusses der Luftfeuchte auf den Stomatawiderstand	-
F_4	Faktor des Temperatureinflusses auf den Stomatawiderstand	-
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations	-
FOOT3DK	Flow Over Orographically structured Terrain, 3-Dimensional, Köln-Version	-
g	Schwerebeschleunigung der Erde	$m s^{-2}$
GME	Globalmodell des DWD	-
H	Höhe des Modelloberrandes	m

h	Höhe der Topographie	m
h_u	Formparameter	-
IMPETUS	Ein Integratives Management Projekt für den Effizienten und Tragfähigen Umgang mit der Ressource Süßwasser in Westafrika	-
IRK	Station Lac Iriki	-
JHB	Station Jebel Hussein ou Brahmin	-
K	Diffusionskoeffizient	$m^2 s^{-1}$
l	Mischungsweglänge	m
LAI	Blattflächenindex	$m^2 m^{-2}$
LM	Lokal Modell	-
L_v	Spezifische Verdampfungswärme von Wasser	$J kg^{-1}$
NAO	Nordatlantik-Oszillation	-
NCEP	National Centre of Environmental Prediction	-
n_{ch}	Bedeckungsgrad hoher Wolken	-
n_{cl}	Bedeckungsgrad niedriger Wolken	-
n_{cm}	Bedeckungsgrad mittelhoher Wolken	-
NN	Normal-Null: Meeresniveau	-
ORMVAO	Office Regionale de Mis en Valeur Agricole de Ouarzazate	-
ORZ	Station Ouarzazate	-
P	Niederschlag	mm
P_b	Auftriebsterm	$m^2 s^{-3}$
P_g	Anteil des Niederschlages, der auf den Boden fällt	mm
P_r	Anteil des Niederschlages, der auf Pflanzenoberflächen fällt	mm
P_s	Scherungsterm	$m^2 s^{-3}$
Q	Strahlungsbilanz am Erdboden	$W m^{-2}$
QMSL	Quasi-Monotones Semi-Lagrange Advektionsschema	-
Q_s	Kurzweilige Strahlungsbilanz am Erdboden	$W m^{-2}$
q_s	Spezifische Sättigungsfeuchte an der Erdoberfläche	$g kg^{-1}$
q_l	Spezifische Feuchte der untersten Atmosphärenschicht	$g kg^{-1}$
R_a	Aerodynamischer Widerstand	$s m^{-1}$
R_s	Stomatawiderstand	$s m^{-1}$
$R_{s \max}$	Maximaler Stomatawiderstand	$s m^{-1}$
$R_{s \min}$	Minimaler Stomatawiderstand	$s m^{-1}$
S	Südliche Strömung	-

S_0	Solarkonstante	W m^{-2}
SV	Südliche Scherungsvorticity	-
SVAT	Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer	-
SVD	Eigenwertzerlegung (engl.: <i>Singular Value Decomposition</i>)	-
T_{as}	Transmissivität der wolkenfreien Atmosphäre für kurzwellige Strahlung	-
T_{as}^*	Transmissivität der bewölkten Atmosphäre für kurzwellige Strahlung	-
T_d	Temperatur am Unterrand der gesamten Bodenschicht	K
TKE	Turbulent kinetische Energie	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
T_m	Temperatur am Unterrand der oberen Bodenschicht	K
T_s	Erdoberflächentemperatur	K
u	Zonale Windkomponente	m s^{-1}
u_g	Geostrophischer Wind, zonale Komponente	m s^{-1}
V	Gesamte Scherungsvorticity	-
v	Meridionale Windkomponente	m s^{-1}
v_g	Geostrophischer Wind, meridionale Komponente	m s^{-1}
veg	Vegetationsbedeckungsgrad	%
W	Westliche Strömung	-
w	Vertikale Windkomponente	m s^{-1}
W_2	Bodenwassergehalt in gesamter Bodenschicht	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
W_{fl}	Feldkapazität der Bodenfeuchte: $W_{fl} = 0,75 W_{sat}$	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
W_g	Bodenwassergehalt in oberster Bodenschicht	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
W_{geq}	Gleichgewichts-Bodenwassergehalt	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
WMO	World Meteorological Organization	-
W_r	Regenwassergehalt auf Pflanzenoberflächen	kg m^{-2}
$W_{r \max}$	Maximaler Regenwassergehalt auf Pflanzenoberflächen	kg m^{-2}
W_{sat}	Sättigungsbodenfeuchte	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
WV	Westliche Scherungsvorticity	-
W_{wilt}	Bodenfeuchte am Welkepunkt	$\text{m}^3 \text{m}^{-3}$
z	Kartesische Vertikalkoordinate	m
z_0	Rauhigkeitslänge	m
α	Albedo	-
Δz_{min}	Schichtdicke der untersten Atmosphärenschicht	m

δ_r	Prozentsatz mit Regenwasser benetzter Pflanzenoberflächen	%
∂	Partielle Ableitung	-
ε	Dissipation	$\text{m}^2 \text{s}^{-3}$
η	Geländefolgende Vertikalkoordinate	-
ϑ_m	Mitteltemperatur der gesamten Bodenschicht	K
ϑ_s	Mitteltemperatur der oberen Bodenschicht	K
θ_v	Virtuelle potentielle Temperatur	K
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W K}^{-1} \text{m}^{-3}$
ρ	Luftdichte	kg m^{-3}
ρ_s	Dichte des Bodens	kg m^{-3}
ρ_w	Dichte von Wasser	kg m^{-3}
ρ_{xy}	Korrelationskoeffizient zwischen x und y	-
σ	Standardabweichung	-
ψ	Auftrittshäufigkeit	%
Ψ_{sat}	Hydraulisches Potential des Bodens bei Sättigung	m
