

## 4 Bearbeitung der Boden- und Oberflächendaten

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit den Boden- und Oberflächendaten, die als untere Randbedingung in die Simulationen eingehen und zur Berechnung der turbulenten Flüsse benötigt werden. Um die Einflüsse verschiedener Maßnahmen voneinander abzugrenzen und getrennt bewerten zu können, werden Vergleichssimulationen mit identischen Randbedingungen für den selben Tag, den 6.6.2002 durchgeführt, in denen jeweils nur eine Komponente verändert wird. In Kap. 4.1 werden die Randbedingungen für diesen Tag beschrieben. Die im Rahmen von IMPETUS erstellten Datensätze für Bodenart und Landnutzung werden ebenfalls in Kap. 4.1 vorgestellt. Hier wird auch die Methode beschrieben, nach der die LANDSAT-Landnutzungsdaten mit den zuvor verwendeten GLCC-Daten zu einem neuen Kataster kombiniert werden. Eine kurze Diskussion der Ergebnisse bei Verwendung des neuen Datensatzes der Bodenarten ist auch in diesem Kapitel enthalten.

Um jedoch den Einfluss der neuen Datensätze auf die Simulation der Evapotranspiration untersuchen zu können, muss zuerst die Darstellung der Bodenfeuchte bearbeitet werden. Erste Simulationen mit der aus dem LM übernommenen Bodenfeuchte im Untersuchungsgebiet liefern Evapotranspirationswerte nahe Null. Somit ergibt sich die Notwendigkeit, den Bodenwassergehalt im Modell FOOT3DK für die angestrebten Simulationen auf eine Art zu erhöhen, die in der Lage ist, die bisher nicht berücksichtigten Prozesse in ihrer Wirkung zu approximieren. Hierzu werden zwei Ansätze realisiert. Zum einen wird eine Methode entwickelt und angewandt, den Effekt von Grundwasser in Schichten unterhalb des unteren Randes des Modells (1 m Tiefe) auf die Transpiration zu simulieren. Dieses Wasser steht ausschließlich zur Transpiration zur Verfügung und kann nicht durch kapillaren Aufstieg zur Oberfläche gelangen und dort verdunsten. Die Methode und ihre Ergebnisse werden in Kapitel 4.2 beschrieben. Simulationen mit dieser Art der künstlichen Erhöhung des Bodenwassergehaltes werden im weiteren mit ‚Grundwasser‘ bezeichnet. Zum anderen wird eine Methode getestet, die Bewässerungspraxis im Untersuchungsgebiet durch Überschwemmung der Palmengärten in der Oase im Rahmen einer Lâcher darzustellen. Die genutzte Methode und ihre Ergebnisse werden in Kapitel 4.3 vorgestellt. Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden Simulationen mit dieser Art der Bodenwassererhöhung mit ‚Bewässerung‘ bezeichnet.

In Kap. 4.4 werden die Ergebnisse der Vergleichssimulationen mit Messdaten der Temperatur, Feuchte, Windrichtung und Windstärke in 2 m über Grund verglichen, um eine Einschätzung der Simulationsgüte zu ermöglichen. Zusätzlich werden Transpirationmessungen an zwei Standorten im Simulationsgebiet genutzt.

Kap. 4.5 liefert einen kurzen Überblick der Ergebnisse der Vergleichssimulationen und fasst die Methoden und Daten der Boden- und Oberflächenparameter zusammen, die im weiteren Verlauf der Untersuchung Verwendung finden.

#### **4.1 Ausgangsbedingungen der Vergleichssimulationen**

Alle in diesem Kapitel vorgestellten Simulationen werden für den selben Termin, den 6.6.2002, durchgeführt. Die Bodendruckverteilung des Europäischen Wetterberichts für 00 UTC ist im Anhang (Abb. A.8 e) abgebildet. Dieser Tag wird ausgewählt, weil er nach Analyse von Wetterkarten und Satellitenbildern als typisch eingeschätzt wird: im Untersuchungsgebiet fiel kein Niederschlag und die Bewölkung zeigte nur in den Abendstunden dünne Zirruswolken. Nachts herrschten südliche Winde aus der ausgekühlten Sahara, die im Tagesverlauf durch Nordwinde aus dem Becken von Ouarzazate abgelöst wurden. Der atmosphärische Antrieb an den Seitenrändern und am Oberrand des Simulationsgebietes ist für alle Vergleichssimulationen identisch.

Die 24 Landnutzungsklassen des GLCC-Datensatzes werden für die Verwendung in FOOT3DK zu 10 Landnutzungsklassen zusammengefasst. Nur diejenigen Klassen, die im Untersuchungsgebiet auftreten, werden hier näher erläutert:

Die FOOT3DK-Landnutzungs-kategorie „trockener und flacher Bewuchs“ fasst die Klassen „trockene Anbaugelände und Weideland“, „Weide- und Anbauland gemischt“, „Grasland“, „Gras- und Buschland gemischt“ und „krautartige Tundra“ des GLCC-Datensatzes zusammen.

Die FOOT3DK-Landnutzungs-kategorie „trockener mittelhoher und hoher Bewuchs“ fasst die Klassen „Anbaugelände und Wald gemischt“, „Buschland“, „Savanne“, „bewaldete Tundra“ und „gemischte Tundra“ zusammen.

Die FOOT3DK-Landnutzungs-kategorie „immergrüner Wald“ fasst die Klassen „immergrüner Laubwald“, „immergrüner Nadelwald“ und „Mischwald“ zusammen.

Die FOOT3DK-Landnutzungs-kategorie „kahler Boden“ fasst die Klassen „unfruchtbarer und nur spärlich bewachsener Boden“ und „Tundra mit nacktem Boden“ zusammen. Der GLCC-Datensatz hat eine Auflösung von 30'' (ca. 1 km x 1 km).

Im Rahmen des IMPETUS-Projektes wurden Datensätze für Landnutzung (Abb. 4.2 a) und Bodenart (Abb.4.2 b) aus der Auswertung einer LANDSAT-Satellitenaufnahme von Oktober 2000 erstellt (Schmidt, 2003). Die Auflösung der Satellitenaufnahme und der daraus erstellten Datensätze beträgt 28,5 x 28,5 m. Die Bestimmung der Landnutzungsklassen aus den Reflektivitäten wurde anhand von direkten Vergleichen mit der Vegetation an verschiedenen Punkten im Untersuchungsgebiet validiert. Der Datensatz ist also aktuell und sehr realitätsnah und daher dem

älteren, gröber aufgelösten und nicht im Untersuchungsgebiet validierten GLCC-Datensatz vorzuziehen.

LNK	$z_0$	$\alpha$	veg (Som.)	veg (Win.)	LAI (Som.)	LAI (Win.)	$R_{smin}$
kahler Boden	0.05	0.2	1	1	1.0	1.0	30
trocken flacher Bewuchs	0.2	0.2	80	5	2.0	0.3	60
trocken mittelh. Bewuchs	0.5	0.15	80	3	2.3	0.5	60
Immergrüner Wald	1.0	0.15	95	95	2.5	2.5	40
Palmen	1.0	0.15	80	80	2.5	2.5	130
Zygophyllum	0.05	0.18	10	10	1.5	1.5	150
Tamarix Aphylla	0.5	0.19	30	30	1.8	1.8	150
Tamarix Africana	0.4	0.18	15	15	1.8	1.8	150
Acacia	0.4	0.18	15	15	2.0	2.0	150

**Tabelle 4.1: zugeordnete Parameter der im Untersuchungsgebiet vorkommenden Landnutzungsklassen aus dem GLCC und dem LANDSAT Datensatz.**

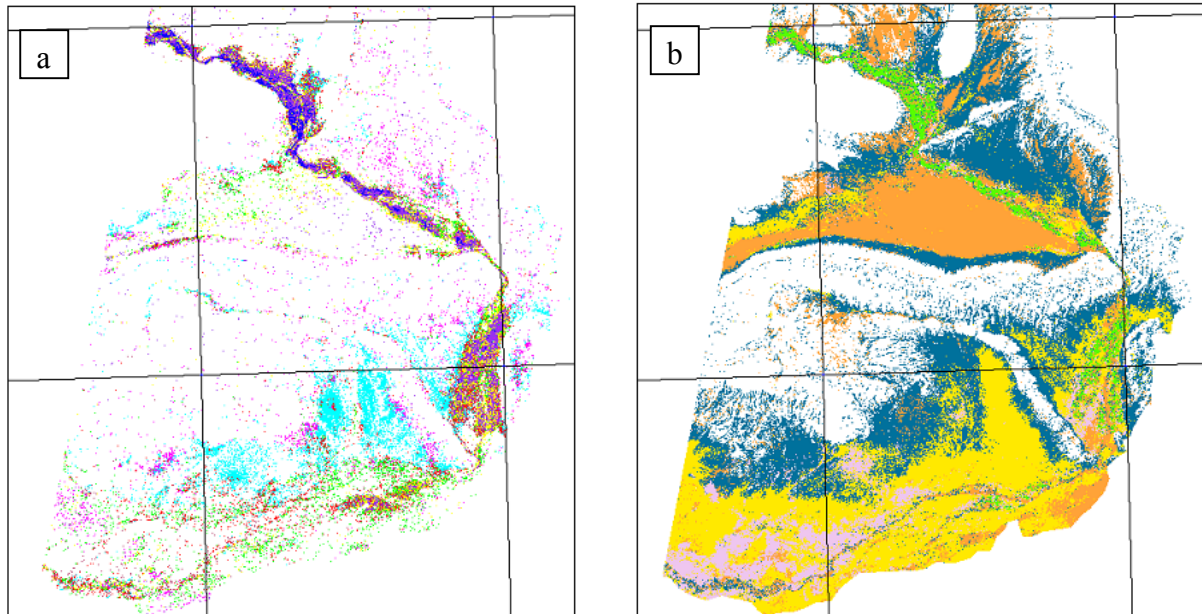
In Tabelle 4.1 sind die Werte der Parameter Rauigkeitslänge  $z_0$  [m], Albedo  $\alpha$ , Vegetationsbedeckungsgrad  $veg$  [%], Blattflächenindex LAI [ $m^2/m^2$ ] und minimaler Stomatawiderstand  $R_{smin}$  [s/m] der Landnutzungsklassen angegeben, die aus dem USGS GLCC-Datensatz zusammengefasst wurden. Die zugeordneten Parameter dieser Bewuchsklassen sind ursprünglich in Anlehnung an die Parameter des CORINE-Datensatzes (Co-ORDination of INformation on the Environment, *European Commission*, 1992) belegt worden, für das hier untersuchte Gebiet jedoch in Anlehnung an die Landnutzungsklassen des LANDSAT-Datensatzes modifiziert worden. Die Klassen „Palmen“, „Zygophyllum“, „Tamarix Aphylla“, „Tamarix Africana“ und „Acacia“ entstammen dem LANDSAT-Datensatz.

Für die Landnutzungsklassen des LANDSAT-Datensatzes werden die zugeordneten Parameter, sofern möglich, aus direkter Beobachtung gewonnen. Wo dies nicht möglich ist, wird auf Literaturwerte zurückgegriffen. Die Rauigkeitslängen der neu eingeführten Landnutzungsklassen („Palmen“, „Zygophyllum“, „Tamarix Aphylla“, „Tamarix Africana“, „Acacia“) werden als 1/10 der Bewuchshöhe angenommen. Eine Ausnahme bildet dabei die Klasse „Palmen“, für die die Rauigkeitslänge auf 1 m gesetzt wird, da größere Rauigkeitslängen unrealistisch sind. Die

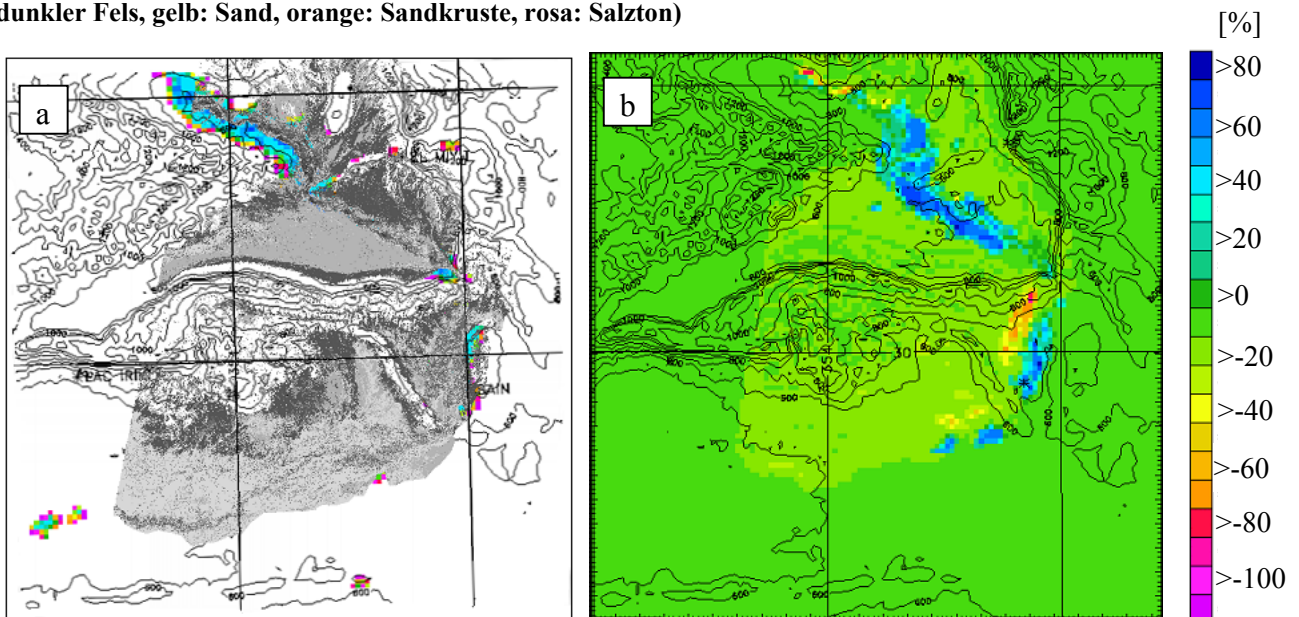
Bewuchshöhen, die Vegetationsbedeckungsgrade und die Blattflächenindizes der Bewuchsklassen außerhalb der Oase entstammen den Arbeiten von *M. Staudinger* im Rahmen des IMPETUS-Projektes. Der Blattflächenindex für Palmen wird von *F. Gresens*, ebenfalls im Rahmen des IMPETUS-Projektes, als  $1,2 \text{ m}^2/\text{m}^2$  abgeschätzt. Da dieser Wert aus Jahren mit geringer Wasserverfügbarkeit stammt (2000 bis 2002), in denen wenige Lâcher ausgegeben wurden und wenig Niederschlag fiel, wird der Blattflächenindex in den folgenden Simulationen nicht bis auf  $1,2 \text{ m}^2/\text{m}^2$  reduziert, sondern auf  $2,0 \text{ m}^2/\text{m}^2$  gesetzt. Dieser Wert ergibt sich aus einem Blattflächenindex von  $2,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$  multipliziert mit dem Vegetationsbedeckungsgrad von 80%. Der Klasse „immergrüner Wald“ wird aus Konsistenzgründen ebenfalls ein Blattflächenindex von  $2,5 \text{ m}^2/\text{m}^2$  zugeordnet. Mit dem aus der alten Zuordnung übernommenen Wert des Vegetationsbedeckungsgrades von 95% ergibt sich daraus ein resultierender Blattflächenindex von  $2,375 \text{ m}^2/\text{m}^2$ . Die übrigen Blattflächenindizes werden in Anlehnung an Literaturwerte angenommen. Laut *Gross* (1993) liegen Blattflächenindizes für trockenes Buschland zwischen 4 und  $12 \text{ m}^2/\text{m}^2$  und für Savanne zwischen 1 und  $5 \text{ m}^2/\text{m}^2$ . Der ursprüngliche Blattflächenindex für die Klasse „kahler Boden“ wird im Sommer reduziert und im Winter erhöht, um den Jahresgang herauszunehmen, der im Untersuchungsgebiet der Niederschlagsverfügbarkeit untergeordnet ist. Der Vegetationsbedeckungsgrad dieser Bewuchsklasse wird von ursprünglich 3% auf 1% reduziert. Dies trägt auch der besseren Repräsentation der Vegetation außerhalb der Oase durch den hoch aufgelösten LANDSAT-Datensatz Rechnung. Die Albedowerte werden anhand der Farbe der Vegetation der entsprechenden Klasse unter Berücksichtigung der von *Taylor et al.* (1997) für das HAPEX-Sahel Gebiet für Oktober angegebenen Werte abgeschätzt. Außerdem nennen *Taylor et al.* (1997) für dieses Gebiet minimale Stomatawiderstände für kahlen Boden von 210 s/m, Brachland (engl.: *fallow*) von 105 s/m, lichte Gebüschstreifen (engl.: *sparse tiger bush*) von 120 s/m und für dichte Vegetation von 80 s/m. Aus diesem Grund werden die minimalen Stomatawiderstände der neu eingeführten Landnutzungsklassen („Palmen“, „Zygophyllum“, „Tamarix Aphylla“, „Tamarix Africana“, „Acacia“) deutlich höher angesetzt, als die den bisher in FOOT3DK verwendeten Klassen („kahler Boden“, „trocken flacher Bewuchs“, „trocken mittelhoher Bewuchs“, „immergrüner Wald“) zugeordneten Werte (Tab. 4.1).

Die Vegetationsbedeckung im Simulationsgebiet in % aus den USGS GLCC-Daten zeigt Vegetation von mehr als 15 % lediglich im Bereich der Drâa-Flussoase (ohne Abbildung). Außerhalb der Oase liegt die Landnutzungsklasse „kahler Boden“ vor, die einen Vegetationsanteil von 1% enthält (vgl. Tab. 4.1). Die Vegetation in diesen Gebieten ist nicht näher spezifiziert. Die Vegetation in der Oase besteht aus den Landnutzungsklassen „immergrüner Wald“, „trocken

flacher Bewuchs“ und „trocken mittelhoher Bewuchs“. Der Vegetationsbedeckungsgrad ist im Inneren der Oase am größten und nimmt zu den Rändern hin ab.



**Abbildung 4.1: LANDSAT-Klassifikation des Drâa-Einzugsgebietes, a: Vegetation (blau: dichte Palmerei, violett: lichte Palmerei, rot: Zygophyllum, grün: Tamarix Aphylla, gelb: Tamarix Africana, pink: Acacia Ziziphus, cyan: Acacia Panicum, braun: Anabasis Hamada Salsola) b: Bodenart (grün: dichte Vegetation, blau: dunkler Fels, gelb: Sand, orange: Sandkruste, rosa: Salzton)**



**Abbildung 4.2: In a: Überblendung der beiden Landnutzungsdatensätze von USGS GLCC (farbig) und LANDSAT (grau). In b: Änderung der Vegetationsbedeckung GLCC minus LANDSAT [%]**

Aus dem LANDSAT-Datensatz der Landnutzungsklassen wird ein neues Kataster erstellt. Dieser Datensatz überdeckt nicht das komplette Modellgebiet sondern ist auf das hydrologische Einzugsgebiet des Wadi Drâa beschränkt. Darüber hinaus sind in der für diese Arbeit verfügbaren Version nicht alle Pixel im Einzugsgebiet klassifiziert. Daher wurde das hieraus erstellte Kataster an allen nicht klassifizierten Punkten mit dem bereits vorher verwendeten USGS GLCC-Datensatz

aufgefüllt. Die Verschneidung der beiden Datensätze für die Landnutzung geschieht dabei nach folgender Methode: Zunächst wird jedes Pixel des LANDSAT-Landnutzungsdatensatzes (28,5 m x 28,5 m) einer 1 km<sup>2</sup>-Gittermasche des Katasters zugeordnet. Dabei werden Pixel, die nicht vollständig in einer Gitterbox liegen, derjenigen Box zugerechnet, in der der überwiegende Teil des Pixels liegt. Danach wird für jede Gitterbox die Anzahl der LANDSAT-Pixel bestimmt, die innerhalb dieser Gitterbox liegen. Anschließend wird überprüft, ob die Pixel, die eine bestimmte Gittermasche überdecken im LANDSAT-Datensatz klassifiziert oder unklassifiziert sind. Da im Landnutzungsdatensatz (Abb. 4.1 a) nicht unterschieden wird, ob ein Pixel unbewachsen oder unklassifiziert ist, muss hierfür der Datensatz der Bodenarten (Abb. 4.1 b) zu Hilfe genommen werden. Für unklassifizierte oder unbewachsene Satellitenpixel im Landnutzungsdatensatz (weiße Bereiche in Abb. 4.1 a) wird zunächst überprüft, ob für das betreffende Pixel eine aus LANDSAT-Daten gewonnene Bodenartinformation vorliegt (farbige Pixel in Abb. 4.1 b). Ist dies der Fall, so wird das betreffende Pixel als „kahler Boden“ klassifiziert. Ist das Pixel auch im Datensatz der Bodenarten unklassifiziert (weiße Pixel in Abb. 4.1 b), so wird diesem Pixel die Landnutzungsclassen der Gittermasche aus dem GLCC-Datensatz zugeordnet.

Abschließend werden die prozentualen Anteile jeder Landnutzungsclassen in einer Gittermasche aus den Informationen der dieser Gittermasche zugeordneten Pixel neu berechnet. Da die Anteile der Landnutzungsclassen an einer Gittermasche im FOOT3DK-Kataster in vollen Prozent angegeben werden müssen, sind Auf- und Abrundungen nicht zu vermeiden. Bei der Rundung der Landnutzungsanteile auf volle Prozentzahlen kann es vorkommen, dass die Summe der Landnutzungsanteile nicht exakt hundert Prozent ergibt. In solchen Fällen wird der Anteil der Classen „kahler Boden“ erhöht oder erniedrigt, da dies die Landnutzungsclassen ist, die am häufigsten im Untersuchungsgebiet vorkommt. Solche Rundungsprozesse können zu einer Überschätzung der Vegetationsanteile von maximal 3% in den Gebieten führen, die außerhalb der Flussoase liegen.

Um einen visuellen Eindruck der Überblendung der beiden Datensätze zu ermöglichen ist in Abb. 4.2 a die Vegetationsbedeckung im Untersuchungsgebiet aus den GLCC-Daten (weiß für „kahlen Boden“ und farbig für % Vegetationsbedeckung) dargestellt und in grau die klassifizierte Bereiche der LANDSAT-Datensätze überlagert. Im mittleren und südlichen Teil des Untersuchungsgebietes ist der größte Teil der Oasenlandschaft durch die LANDSAT-Daten abgedeckt, im Norden liegt ein erheblicher Teil der als Oase verzeichneten Gittermaschen des GLCC-Datensatzes außerhalb der Abdeckung durch die LANDSAT-Daten.

In Abb. 4.2 b ist die Differenz der Vegetationsbedeckungsgrade zwischen dem GLCC-Datensatz und dem aus den LANDSAT- und den GLCC-Daten kombinierten Datensatz dargestellt. Blaue

Töne stellen Gebiete dar, in denen die Vegetationsbedeckung im neuen Datensatz reduziert ist, während hellgrüne bis rote Farben diejenigen Gebiete kennzeichnen, in denen die Vegetationsbedeckung im neu erstellten Datensatz größer ist, als in den GLCC-Daten. Die Drâa-Oase ist insbesondere im nördlichen Teil des Simulationsgebietes bei Verwendung der LANDSAT-Daten deutlich schmaler als im GLCC-Datensatz. Südlich des Durchstoßes durch den Jebel Bani zeigt sich eine Verlagerung des Gebietes mit der größten Vegetationsbedeckung nach Nordwesten. Die geringere Breite der Flussoase im nördlichen und die Verschiebung im südlichen Teil des Simulationsgebietes kann mehrere Ursachen haben. Zum einen kann das hier gezeigte Ergebnis eine tatsächliche Reduzierung und Verlagerung der bewachsenen Fläche zwischen der Erstellung des USGS-Datensatzes (1992/1993) und der LANDSAT-Satellitenaufnahme (Okt. 2000) bedeuten. Es ist aber auch nicht auszuschließen, dass die Unterschiede zumindest z. T. auch auf Ungenauigkeiten im USGS-Datensatz zurückzuführen sind. Darüber hinaus entstammt der LANDSAT-Datensatz nur einer einzigen Satellitenaufnahme. Ein Niederschlagsereignis kann in dieser Region durch Regenfeldbau oder vermehrte natürliche Vegetation in kurzer Zeit zu einer Erhöhung des Vegetationsbedeckungsgrades führen. Eine Erhöhung der Vegetationsdichte im LANDSAT-Datensatz kann also möglicherweise auch einen kurzzeitigen Effekt nach einem ergiebigen Niederschlagsereignis darstellen. Die einzige Station im Untersuchungsgebiet, für die in diesem Zeitraum Niederschlagsmessungen vorliegen, Foug Zguid (30°05'24''N, 6°52'30''W, 670 m ü. NN) hat jedoch von Oktober 1999 bis Dezember 2000 keinen Niederschlag verzeichnet, die Station Ouarzazate hat im Oktober 2000 ebenfalls keinen und im September lediglich 3 mm Niederschlag gemeldet. Daher ist davon auszugehen, dass es sich um einen permanenten Effekt und nicht um eine Reaktion auf ein einzelnes Niederschlagsereignis handelt. Das unter Einbeziehung der LANDSAT-Daten erstellte Kataster zeigt außerhalb der Flussoase eine höhere Vegetationsdichte als das Kataster aus GLCC-Daten. Dies ist möglicherweise z. T. auf die genannte Handhabung von Rundungsungenauigkeiten zurückzuführen. Das Vorhandensein einzelner Pixel mit klassifizierter Vegetation in Gittermaschen außerhalb der Oase erhöht die Vegetationsbedeckung der gesamten Gittermasche. Hierbei handelt es sich fast ausschließlich um Tamarisken und Akazien (vgl. Abb. 4.1 a).

In den LM-Simulationen ist die Bodenart für das gesamte FOOT3DK-Simulationsgebiet Lehm. Dies entspricht nicht den tatsächlichen Bodenarten, die in Abb. 4.1 b für einen Teil des Gebietes dargestellt sind. Vergleichssimulationen unter Verwendung eines differenzierten Datensatzes der Bodenarten zeigen keinen signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse (ohne Abbildung). Daher werden die Simulationen im weiteren Verlauf dieser Untersuchung mit der vorgegebenen Bodenart Lehm aus dem LM durchgeführt.

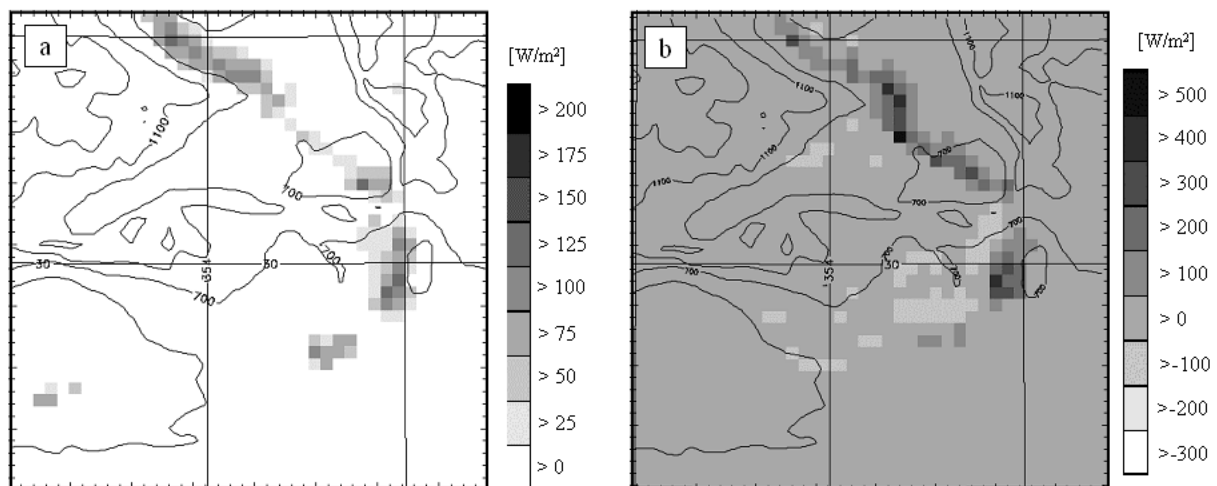
Der aus dem antreibenden Modell LM übernommene Bodenwassergehalt liegt mit Werten zwischen  $0,01$  und  $0,07 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  weit unterhalb des Welkepunktes für Lehm Boden von  $0,1547 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  (siehe Tab. 3.1) und erlaubt daher weder Verdunstung vom Boden noch Transpiration. In der räumlichen Struktur des Bodenwassergehaltes fehlt eine Wiedergabe der orographischen Struktur im Untersuchungsgebiet und eine Darstellung des erhöhten Bodenwassergehaltes in der Oase (ohne Abbildung). Ein Grund für diese mangelhafte Darstellung der Bodenfeuchte liegt in der geringen Tiefe des Bodenmodells des LM (1 m). In diesem Volumen kann nur eine begrenzte Menge Wasser gespeichert werden, das zur Transpiration zur Verfügung steht oder durch kapillaren Aufstieg an die Oberfläche kommen und dort verdunsten kann. Diese geringe Bodenfeuchte findet sich in den LM-Simulationen nicht nur an diesem Tag, sondern systematisch an Tagen die keine Bodenfeuchte aus einem kurz vorher stattgefundenen Niederschlagsereignis gespeichert haben. Unter diesen Bedingungen würden die Pflanzen im Untersuchungsgebiet vertrocknen. Bei Verwendung der vom LM vorgegebenen Bodenfeuchte findet Evapotranspiration nur mit Werten unterhalb von  $5 \text{ W/m}^2$  im Untersuchungsgebiet statt (ohne Abbildung). In der Realität haben die Pflanzen im Untersuchungsgebiet erhebliche Wurzeltiefen von deutlich mehr als 1 m (pers. Mitteilungen von *F. Gresens, M. Finckh*). *Kleindon und Heimann* (1998) nennen gemessene Wurzeltiefen in Savannen, tropischem Grasland, Wüsten und trockenen Buschlandschaften (engl.: *shrubland*) von 40 m bis zu 70 m. Dies ermöglicht es den Pflanzen, auf tief im Boden liegende Grundwasserreservoirs zuzugreifen. Darüber hinaus werden die Palmengärten in der Oase bewässert, was ebenfalls die Bodenfeuchte erhöht. Die Verfügbarkeit von Grundwasser in tiefen Schichten zur Transpiration sowie die Bewässerungspraxis im Untersuchungsgebiet ist in den LM-Simulationen nicht berücksichtigt.

## **4.2 Simulation: ‚Grundwasser‘**

Auch ohne vorhergehenden Niederschlag oder eine Lâcher steht den Pflanzen im Untersuchungsgebiet Wasser zur Verfügung. Dabei handelt es sich um Grundwasser, das in tiefen Bodenschichten vorliegt. Da FOOT3DK (analog zum LM) nur über ein Bodenmodell mit einer Mächtigkeit von 1 m Tiefe verfügt, muss ein solches Grundwasserreservoir künstlich in das Modell eingefügt werden. Zu diesem Zweck wird zunächst in einer Testsimulation der Faktor, der die Transpiration auf Grund des verfügbaren Bodenwassers reduziert, auf Null gesetzt. Programmtechnisch wird dies realisiert durch die Festschreibung des Wertes F2 (in Gleichungen [35] und [38], S. 37) auf den Wert 1, d.h. durch Ausschalten der Stomataleitfähigkeitsbegrenzung durch geringen Bodenwassergehalt. Damit wird ein idealer Zugang zu ausreichenden Grundwasserreserven für alle im Untersuchungsgebiet vorkommenden Pflanzen, auch außerhalb



der Oase, simuliert. Diese Annahme ist nicht realistisch. Sie stellt lediglich die Obergrenze des möglichen Einflusses dieser Methode auf die Simulationsergebnisse dar. Eine Kalibrierung der Methode anhand von Vergleichen mit gemessenen Transpirationsdaten führt zu einer Festsetzung des Faktors F2 auf den Wert 0,2 außerhalb und auf 0,45 innerhalb der Oase. Die im folgenden gezeigten Simulationen werden mit dieser Einstellung durchgeführt. Ein Vergleich mit Messdaten findet sich in Kapitel 4.4.



**Abbildung 4.3: Evapotranspiration [ $W/m^2$ ] für Simulationen mit ‚Grundwasser‘, 6.6.2002, 12 UTC. In a: kombinierte Landnutzungsklassen aus LANDSAT- und GLCC-Daten, in b: Differenz der Evapotranspiration Landnutzungsklassen GLCC-Datensatz minus kombinierte Landnutzungsklassen aus GLCC- und LANDSAT-Daten.**

Ein Vergleich des Flusses latenter Wärme für 12 UTC am 6.6.2002 der Simulation mit ‚Grundwasser‘ (Abb. 4.3 a) mit dem Fluss latenter Wärme für den selben Zeitpunkt ohne künstlich erhöhten Bodenwassergehalt (geringer als  $5 W/m^2$ , ohne Abb.) zeigt eine Erhöhung der Evapotranspiration auf Werte bis über  $150 W/m^2$  in einzelnen Gittermaschen in der Oase. Außerhalb der Oase erreicht der Fluss latenter Wärme in der Simulation mit ‚Grundwasser‘ Werte von weniger als  $25 W/m^2$ . Diese kommen ausschließlich durch Transpiration zustande, denn das Wasser kann nicht durch kapillaren Aufstieg zur Oberfläche gelangen um dort zu verdunsten, sondern steht ausschließlich zur Transpiration zur Verfügung.

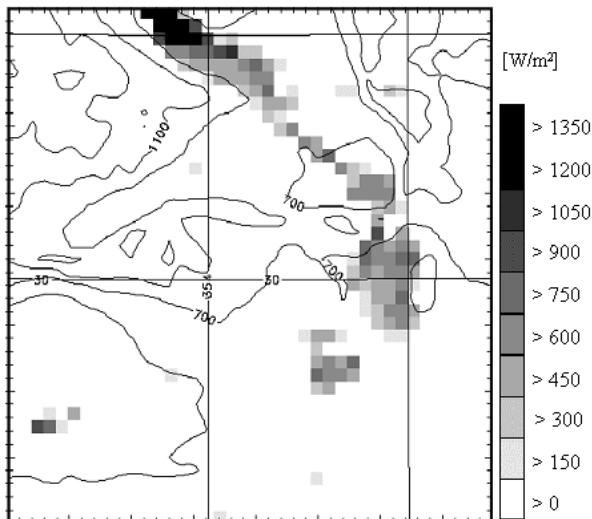
Die Differenz der Evaporation zwischen der Simulation mit dem Kataster aus GLCC-Daten und derjenigen mit dem Kataster aus LANDSAT- und GLCC-Daten (Abb. 4.3 b) zeigt eine ausgeprägte Reduktion und Verlagerung der Maximalwerte entsprechend der Reduktion und Verlagerung der Vegetation (Abb. 4.2 b). Da die Oase im LANDSAT-Datensatz insgesamt schmaler ausfällt und eine geringere Bewuchsdichte aufweist, ist der Anteil der Oasenfläche zur Evapotranspiration in Simulationen mit diesem Datensatz geringer. In einzelnen Gittermaschen außerhalb des Oasenbereiches werden ebenfalls erhöhte Transpirationswerte mit dem Kataster unter Verwendung der LANDSAT-Daten simuliert. Im Mittel über das gesamte Simulationsgebiet ist die

Evapotranspiration bei Simulationen mit dem neu erstellten Kataster aus LANDSAT- und GLCC-Daten jedoch reduziert.

Die hier vorgestellte Methode, den Einfluss von Grundwasser in tiefen Bodenschichten auf die Transpiration zu simulieren kann als zufriedenstellend betrachtet werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Transpiration aufrecht erhalten werden kann, ohne die Verdunstung an der Oberfläche zu beeinflussen. Die Wirkungen des simulierten Grundwassers zeigen plausible und konsistente Effekte auf die Modellatmosphäre.

### 4.3 Simulation: ‚Bewässerung‘

Die Bewässerungspraxis im Untersuchungsgebiet ist die sogenannte Überschussbewässerung. Wasser, das im Rahmen einer Lâcher aus dem Stausee abgelassen wurde oder einen ergiebigen Niederschlagsereignis unterhalb des Stausees entstammt, wird in fünf kleineren Staustufen im



**Abbildung 4.4: Evapotranspiration [W/m<sup>2</sup>] für Simulation mit ‚Bewässerung‘, 6.6.2002, 12 UTC**

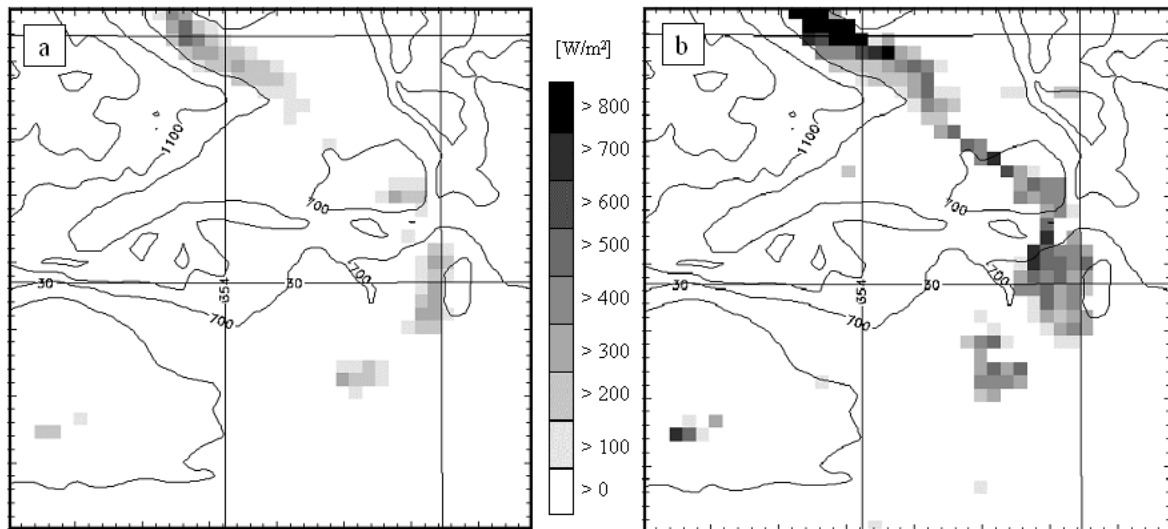
Unterlauf des Drâa für eine gewisse Zeit gespeichert, in der die Anlieger in diesem Teil der Flussoase ihre Felder bewässern können.

Um die Bewässerung im Zuge einer Lâcher zu simulieren wird die Initialisierung der Bodenfeuchte nicht aus dem antreibenden LM genommen. Stattdessen wird, zusätzlich zur oben beschriebenen Methode ‚Grundwasser‘, für zwei Stunden eines simulierten Tages die Feuchte in der obersten Bodenschicht ( $W_g$ ) für alle Gebiete mit mehr als 15% Vegetationsbedeckung auf ihren Maximalwert ( $W_g=W_{sat}$ ) gesetzt. Diese zwei

Stunden werden aufgeteilt in eine Stunde ‚Bewässerung‘ in der Nacht, von 1 UTC bis 2 UTC, und eine Stunde tagsüber, von 13 UTC bis 14 UTC, um den Tagesgang zu berücksichtigen. Der Grenzwert der Vegetationsbedeckung wurde so gewählt, dass alle in der Oase liegenden Gebiete bewässert werden, die Gebiete außerhalb der Oase jedoch nicht. Das Wasser sickert in dieser Zeit in die darunter liegende Bodenschicht ein und bietet so einen Speicher für die Evapotranspiration im weiteren Verlauf des Tages. Der Antrieb an den seitlichen Rändern und am Oberrand des Modells wird aus dem LM vorgegeben.

Wird ‚Bewässerung‘ simuliert, so bildet sich in der räumlichen Struktur des Flusses latenter Wärme (Abb. 4.4) sehr klar die Vegetation der Oase ab, denn nur dort wird die Bodenfeuchte erhöht. Innerhalb der Oase werden in der Simulation mit dem Kataster aus GLCC-Daten Werte zwischen

300 – 900 W/m<sup>2</sup> zur Mittagszeit simuliert. Außerhalb der Oase liegen die Werte fast in allen Gittermaschen unter 150 W/m<sup>2</sup>.

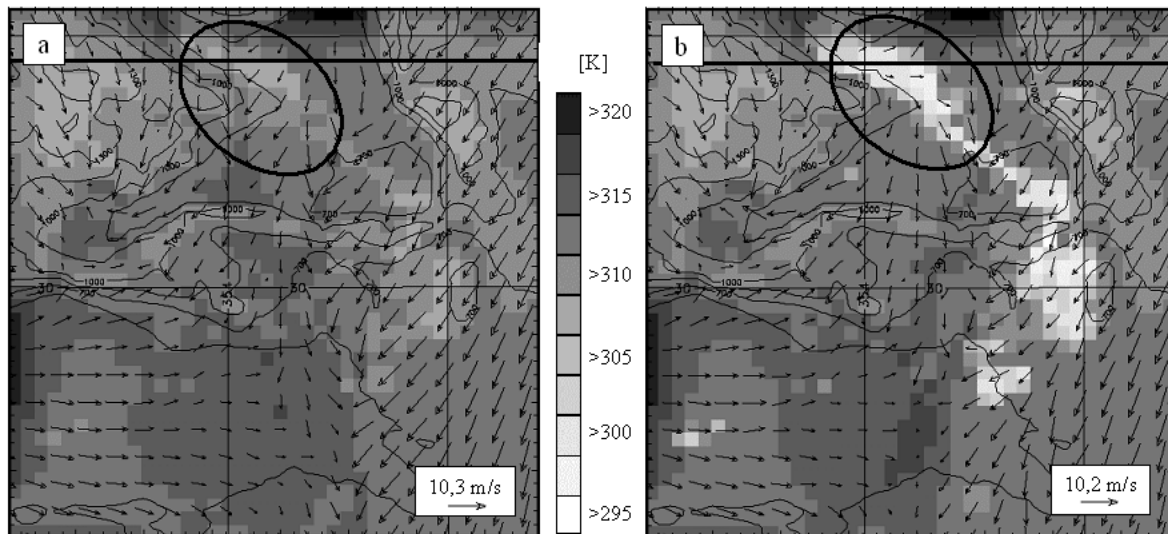


**Abbildung 4.5:** in a: Transpiration, in b: Verdunstung vom Boden [W/m<sup>2</sup>] für Simulation mit ‚Grundwasser‘ und ‚Bewässerung‘, 6.6.2002, 12 UTC

Je dichter die Vegetation in einer Gittermasche ist (hauptsächlich im Inneren der Oase), desto größer ist der Anteil der Transpiration am gesamten latenten Wärmefluss (Abb. 4.5 a). In Gittermaschen mit geringerer Vegetationsbedeckung (am Rand der Oase) ist die Transpiration geringer, der Anteil der Evaporation vom Erdboden (Abb. 4.5 b) ist dagegen erhöht.

Am Nordrand des Modellgebietes entstehen unrealistische Maximalwerte der Verdunstung, die z. T. über der Solarkonstanten liegen (schwarze Gitterboxen in Abb. 4.4 und 4.5 b). Dieser Effekt wird durch die Diskontinuität der Boden- und Atmosphärenbedingungen zwischen dem Antrieb durch das LM und den Bedingungen innerhalb des FOOT3DK-Simulationsgebietes verursacht. Während Boden und Luft im LM sehr trocken sind und sich dadurch im Tagesverlauf stark aufheizen können, führt die künstlich erhöhte Feuchte im FOOT3DK-Simulationsgebiet zu einer Erhöhung der feuchtstatischen Energie durch starke Verdunstung vom Boden (Abb. 4.5 b). Im Rahmen der Anpassung der Bedingungen der FOOT3DK-Felder an die Nestingvorgabe in den äußeren beiden Randreihen des Ausströmrandes werden hierdurch unrealistisch starke Vertikalbewegungen verursacht. Es ist daher sinnvoll, die äußeren Randreihen nicht in die physikalische Interpretation der Ergebnisse einzuschließen, sondern die Vorgänge dort als systematische Fehler zu behandeln. Um diese These zu untermauern, wurde eine Vergleichssimulation durchgeführt, in der das Untersuchungsgebiet um neun Gittermaschen (21 km) nach Norden und Westen verschoben wurde. Dadurch ließen sich orographische Effekte von Randeffekten trennen. Die Ergebnisse bestätigen die These, dass es sich bei den am Nordrand

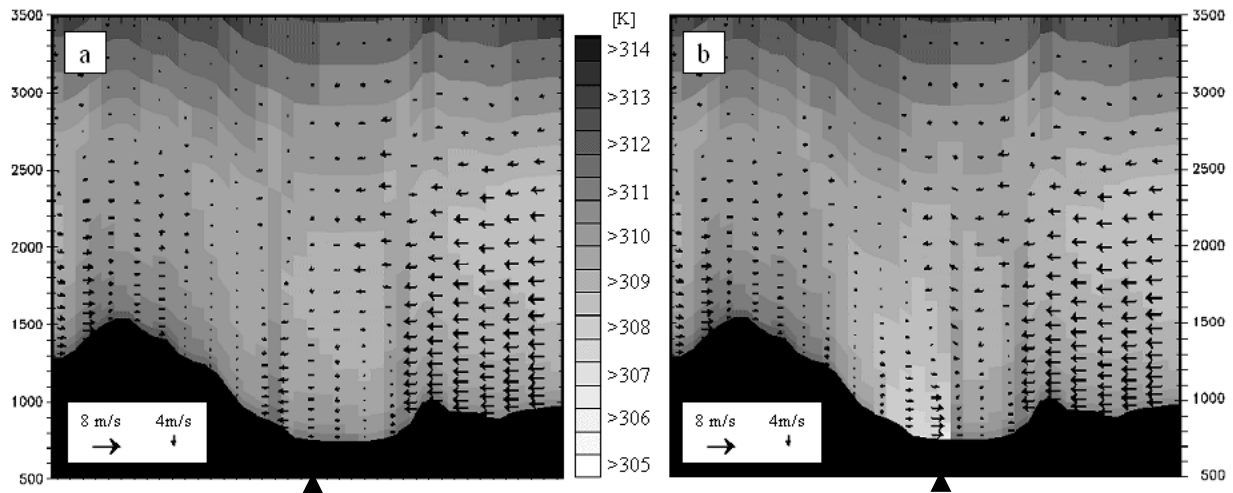
auftretenden Maxima um numerische Effekte am Modellrand handelt, da sich der Bereich der Extremwerte mit dem Rand nach Norden verlagert (ohne Abbildung).



**Abbildung 4.6: Oberflächentemperatur (schattiert) [K] und Horizontalwind in der ersten Atmosphärenschicht ca. 25 m über Grund (Pfeile) für den 6.6.2002, 12UTC, in a: nur ‚Grundwasser‘, in b: ‚Grundwasser‘ und ‚Bewässerung‘. Die geraden Linien geben die Position der Vertikalschnitte in Abb. 4.7 an.**

Neben den Energieflüssen am Boden werden auch andere Größen von der simulierten ‚Bewässerung‘ beeinflusst. Dies gilt z. B. für die Oberflächentemperatur und die bodennahen Winde. In Abbildung 4.6 werden die Oberflächentemperaturen (Graustufen) für den 6.6.2002, 12 UTC der beiden Simulationen nur mit ‚Grundwasser‘ und mit ‚Grundwasser‘ und ‚Bewässerung‘ gegenüber gestellt.

Die Abkühlung im Bereich der Oase in der Simulation mit ‚Bewässerung‘ (Abb. 4.6 b) im Vergleich zur Simulation ohne ‚Bewässerung‘ (Abb. 4.6 a) ist deutlich erkennbar. Darüber hinaus sind Windrichtung und –stärke in der untersten Atmosphärenschicht (ca. 25 m über Grund) durch Richtung und Länge der Pfeile in Abb. 4.6 wiedergegeben. Im nördlichen Bereich der Oase zeigt sich eine deutliche Änderung der Windrichtung und –stärke zwischen den beiden dargestellten Simulationen (siehe eingekreister Bereich). Um die Ursache dieses Effekts zu beleuchten, ist in Abb. 4.7 ein Vertikalschnitt entlang der in Abb. 4.6 eingezeichneten Linie für beide Simulationen gezeigt. Die Schattierung gibt die potentielle Temperatur wieder, die Pfeile zeigen die zonale und vertikale Windkomponente an. Um die bodennahen Effekte gut sichtbar zu machen, sind nur die unteren 3.5 km der Atmosphäre abgebildet. Im Bereich der Oase (Dreieck am Unterrand der Abb. 4.7) ist die potentielle Temperatur in der Simulation mit ‚Bewässerung‘ (Abb. 4.7 b) deutlich geringer, als in der Vergleichssimulation ohne ‚Bewässerung‘ (Abb. 4.7 a). Dadurch ist die atmosphärische Stabilität erhöht, was das Aufströmen am Hang erschwert und einen Kanalisierungseffekt entlang der Orographie auslöst.



**Abbildung 4.7:** Potentielle Temperatur (schattiert) [K] und Wind (Pfeile) für Simulation 6.6.2002, 12UTC, Vertikalschnitt von 0.5 bis 3.5 km Höhe entlang der in Abb. 4.5 eingezeichneten Linie. Das schwarze Dreieck am Unterrand bezeichnet die Position der Oase. In a: ohne, in b: mit ‚Bewässerung‘

Die eingeführte Methode, Bewässerung im Untersuchungsgebiet darzustellen, liefert meteorologisch sinnvolle Änderungen der Simulationsergebnisse. Diese erstrecken sich nicht nur auf den direkt variierten Parameter, die Bodenfeuchte, sondern induzieren auch Änderungen der Temperatur, der Feuchte und damit auch der Stabilität in bodennahen Luftschichten.

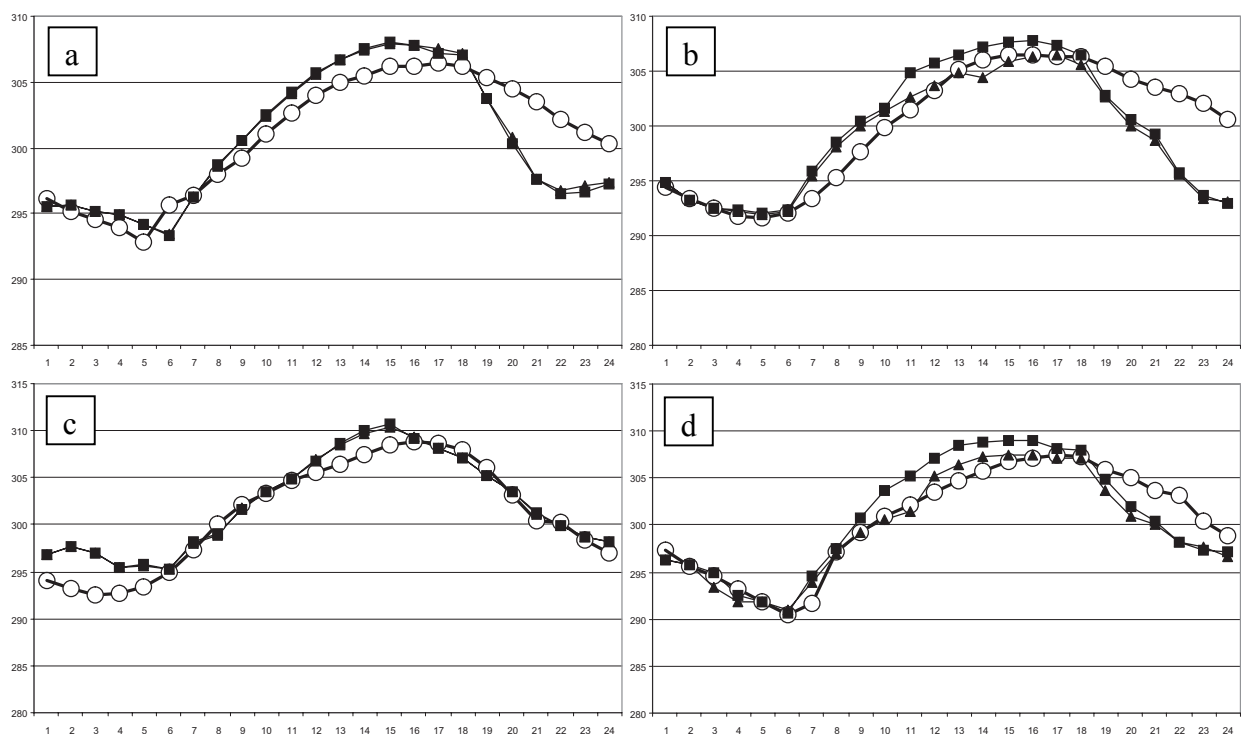
#### 4.4 Vergleich mit Messdaten

Zur Einschätzung der Qualität der Modellergebnisse und der vorgestellten Methoden der Erhöhung der Bodenfeuchte (‚Grundwasser‘ und ‚Bewässerung‘) werden die in Kap. 4.2 und 4.3 vorgestellten Simulationsergebnisse mit Messwerten der Klimastationen vom 6.6.2002 und mit Transpirationmessungen verglichen.

Dazu werden die Simulationen mit ‚Bewässerung‘ und mit ‚Grundwasser‘ genutzt. Zum Vergleich werden zunächst die Temperatur (Abb. 4.8) und die relative Feuchte (Abb. 4.9) der vier im Simulationsgebiet liegenden Stationen (EMY, JHB, IRK und ASR, Positionen siehe Abb. 2.1) verwendet. Die Messdaten in 2 m über Grund werden mit simulierten Werten der Gitterboxen verglichen, in denen die Stationen liegen. Anschließend werden gemessene Werte der Windrichtung und Windstärke der Stationen EMY, JHB und IRK mit simulierten Werten verglichen (Abb. 4.10). Da sich die Messstation ASR in der Oase zwischen den Palmen befindet, sind Windmessungen dort nicht repräsentativ für die Strömung oberhalb der Bestandsschicht.

Die simulierten Temperaturen für die Stationen El Miyit (EMY, Abb. 4.8 a), Jebel Hussein ou Brahmin (JHB, Abb. 4.8 b) und Asrir (ASR, Abb. 4.8 d) zeigen ab ca. 19 UTC einen deutlich stärkeren Temperaturabfall als die Messungen. In den Abendstunden bildeten sich im Untersuchungsgebiet hohe Ziruswolken aus, die die Abkühlung reduzierten. Aufgrund der Spreizung der vertikalen Schichten mit der Höhe sind die simulierten Atmosphärenschichten in der

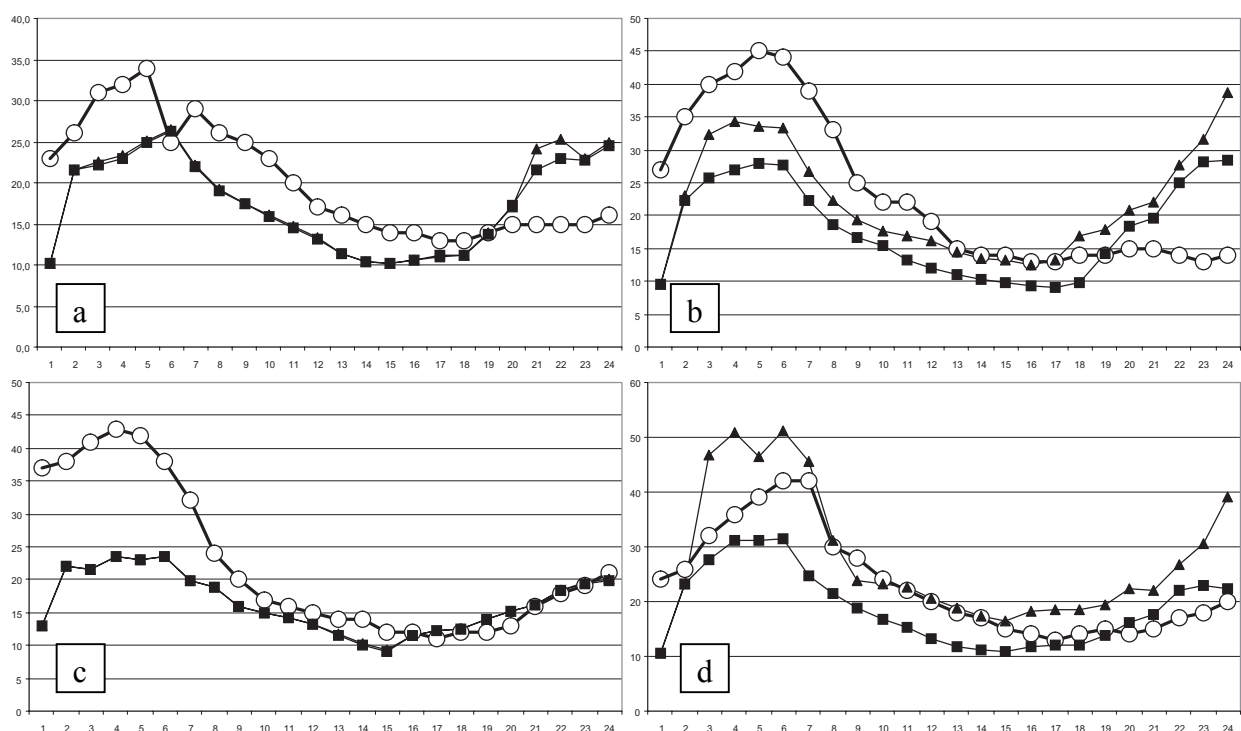
oberen Troposphäre bis zu 1,1 km dick (oberste Schicht: von ca. 12 km bis 13 km Höhe). Dadurch können hohe, dünne Zirruswolken nicht simuliert werden. Dies führt zu einer Verfälschung der Strahlungsbilanz, was sich in Folgefehlern insbesondere auf die Temperatur, aber auch auf die Energiebilanz am Erdboden auswirkt. An der Station Lac Iriki (IRK, Abb. 4.8 c) wird die nächtliche Abkühlung richtig dargestellt, jedoch wird die nächtliche Temperatur zu Beginn der Simulation etwas zu hoch simuliert. Während des Tages zeigen die Temperaturverläufe an allen vier Stationen relativ gute Übereinstimmung mit den Messwerten, wenngleich nicht alle Tagesmaxima exakt wiedergegeben werden.



**Abbildung 4.8: Vergleich von gemessener (Kreise) und simulierter Temperatur (Quadrate: nur ‚Grundwasser‘, Dreiecke: ‚Grundwasser‘ und ‚Bewässerung‘) in [K] an den Stationen: a) EMY, b) JHB, c) IRK und d) ASR für den 6.6.2002**

Die relative Feuchte zeigt an allen Stationen sowohl in den Messungen, als auch in den Simulationen einen deutlichen Tagesgang (Abb. 4.9). Allerdings wird sie an der Station IRK (Abb. 4.9 c) zu Beginn der Simulation deutlich zu hoch berechnet. Dies ist zumindest zu einem Teil mit der zu hoch simulierten Temperatur zu diesem Zeitpunkt zu erklären. An den Stationen EMY (Abb. 4.9 a) und JHB (Abb. 4.9 b) wird die relative Feuchte zu Beginn der Simulation ebenfalls etwas unterschätzt, noch stärker fällt allerdings die Unterschätzung der relativen Feuchte gegen Ende der Simulation auf. Eine Erklärung ist auch in diesem Fall in der Temperaturentwicklung zu finden: Die Unterschätzung der nächtlichen Temperatur an den Stationen führt zur Überschätzung der relativen Feuchte. An der Station ASR (Abb. 4.9 d) wird der Tagesgang der relativen Feuchte gut wiedergegeben. Die relative Feuchte in der Simulation mit ‚Grundwasser‘ (Quadrate) liegt etwas

unterhalb der gemessenen Werte, in der Simulation mit ‚Grundwasser‘ und ‚Bewässerung‘ (Dreiecke) etwas darüber. Der Bodenwassergehalt steuert über die Energiebilanz am Erdboden die Temperatur und die atmosphärische Feuchte in Bodennähe. Der Mechanismus, über den diese Steuerung ausgeführt wird, ist die Aufteilung der turbulenten Flüsse in sensible und latente Wärme. Die Evapotranspiration hängt also eng mit den Temperatur- und Feuchtegrößen in Bodennähe zusammen. Da bei der Methode ‚Bewässerung‘ nur innerhalb der Oase der Bodenwassergehalt erhöht wird und bei der Methode ‚Grundwasser‘ die Vegetation der Parameter ist, der die Evapotranspiration bestimmt, finden die größten Änderungen zwischen den verschiedenen Simulationen im Bereich der Oase statt (Station ASR). Die anderen Stationen (EMY, JHB, IRK) liegen außerhalb der Oase, daher sind die Unterschiede zwischen den Modellsimulationen gering.

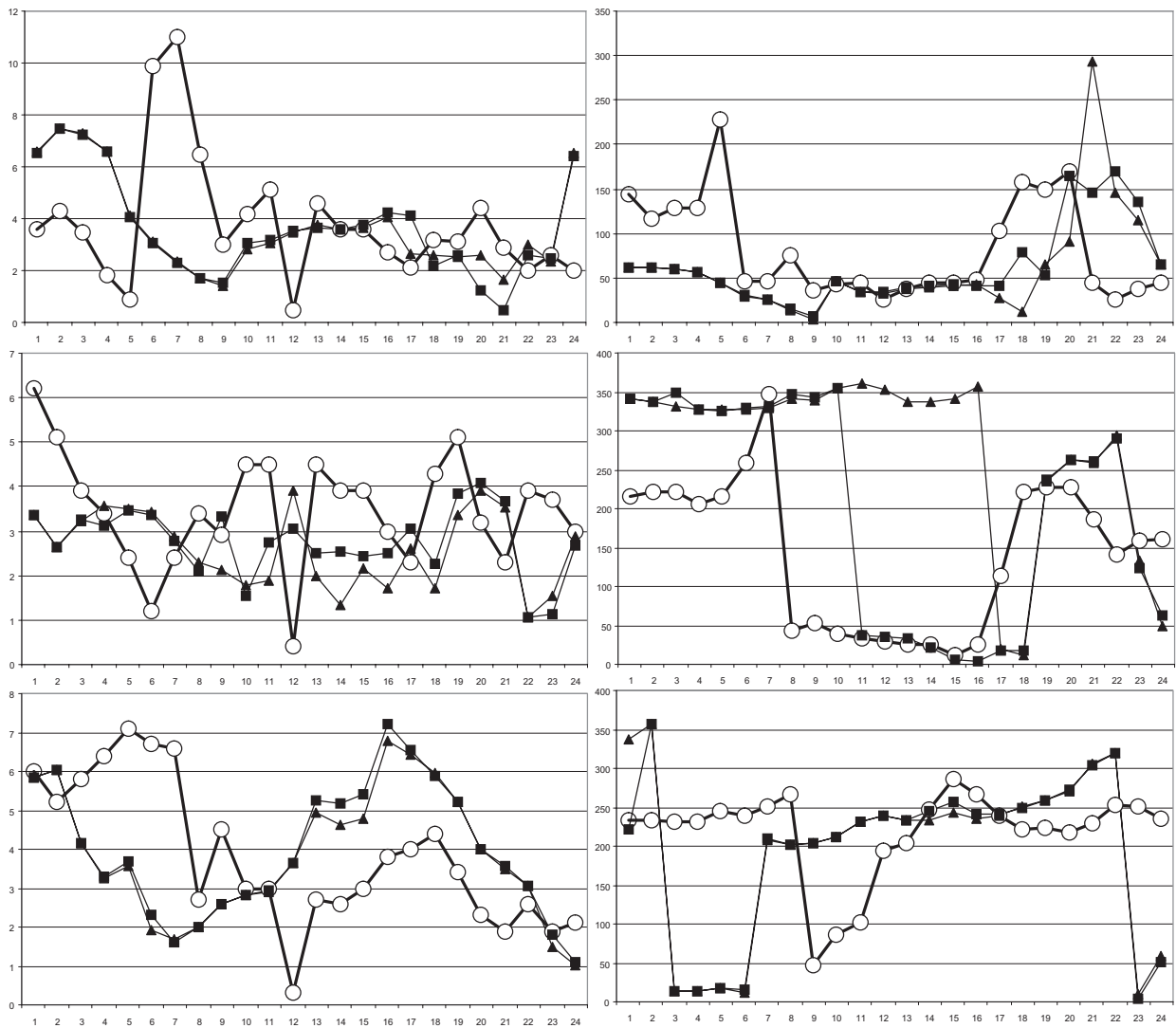


**Abbildung 4.9:** Vergleich von gemessener (Kreise) und simulierter relativer Feuchte (Quadrate: ‚Grundwasser‘, Dreiecke: ‚Bewässerung‘) in [%] an den Stationen: a) EMY, b) JHB, c) IRK und d) ASR für den 6.6.2002

Die gemessenen und simulierten Windgeschwindigkeiten (Abb. 4.10, linke Seite) weisen keinen sichtbaren Zusammenhang miteinander auf. Die Windmaxima in den frühen Morgenstunden an den Stationen EMY (Abb. 4.10, oben) und IRK (Abb. 4.10, unten) werden im Modell nicht simuliert. Stattdessen werden an der Station IRK (Abb. 4.10, unten) hohe Windgeschwindigkeiten am Nachmittag simuliert. Allerdings sind die Abweichungen an den Stationen nicht systematisch.

Bei der Betrachtung des Vergleichs der gemessenen und simulierten Windrichtungen (Abb. 4.10, rechte Seite) ist zu beachten, dass nördliche Windrichtungen sowohl durch sehr hohe ( $360^\circ$ ), als auch sehr niedrige Werte ( $0^\circ$ ) dargestellt sein können. Während der Nachtstunden zeigen die

Messungen an allen drei Stationen südliche Anströmungen, im Modell werden jedoch eher nördliche Windrichtungen simuliert. Zwischen Sonnenauf- und -untergang werden die Windrichtungen dagegen besonders für die Stationen EMY (Abb. 4.10, oben) und JHB (Abb. 4.10, mitte) realistisch simuliert. An der Station IRK (Abb. 4.10, unten) wird eine Phase nordöstlicher Winde am Vormittag im Modell nicht wiedergegeben, die simulierte Windrichtung bleibt südwestlich.



**Abbildung 4.10: Vergleich von gemessenen (Kreise) und simulierten Werten (Quadrate: ‚Grundwasser‘, Dreiecke: ‚Grundwasser‘ und ‚Bewässerung‘) der Windstärke (links) in [m/s] und der Windrichtung (rechts) in [°] an den Stationen EMY (oben), JHB (mitte) und IRK (unten) für den 6.6.2002**

Bei dem Vergleich der gemessenen und simulierten Werte sollte in Betracht gezogen werden, dass hier Punktmessungen mit Simulationen für eine atmosphärische Gitterbox mit einem Ausmaß von 3 km x 3 km verglichen werden. Eine vollständige Übereinstimmung der Werte ist schon aus diesem Grund nicht zu erwarten. Lokale Phänomene mit Größenskalen unterhalb der Modellauflösung werden im Modell parameterisiert. Hinzu kommt, dass die atmosphärischen Parameter im Modell für die unterste Schicht mit einer Dicke von 50 m berechnet werden und im



Mittelpunkt jeder atmosphärischen Box in einer Höhe von ca. 25 m über Grund vorliegen. Gerade in nächtlichen Situationen, in denen sich durch die starke Ausstrahlung eine sehr flache Grenzschicht bildet, ist ein einzelner Wert für die untersten 50 m der Atmosphäre nicht ausreichend, die Situation adäquat zu repräsentieren. Zum Vergleich mit den Messwerten wird eine Interpolation zwischen den Werten in ca. 25 m Höhe und den Oberflächenwerten durchgeführt. Dazu wird zunächst die Stabilität der untersten Atmosphärenschicht berechnet. Davon ausgehend werden unter Benutzung der Profilkfunktionen aus der Monin-Obukhov Ähnlichkeitstheorie für stabile, neutrale und labile Situationen die Größen Temperatur, potentielle Temperatur, Feuchte und Wind ausgehend von der Höhe der untersten Atmosphärenschicht nach unten in 1 m Schritten errechnet. Derjenige Wert, der für die entsprechende Gittermasche am nächsten an 2 m über Grund liegt wird im Vergleich in Abb. 4.8 bis 4.10 genutzt (EMY: 1,65 m; JHB: 1,61 m; IRK: 2,29 m; ASR: 2,05 m). Darüber hinaus können Abweichungen resultieren, wenn die Profilkfunktionen die Realität nicht exakt wiedergeben. Nichtsdestotrotz reproduzieren die Simulationen realistische Tagesgänge.

Zusätzlich zum Vergleich der simulierten Werte mit Messwerten der Klimastationen, wird ein Vergleich von gemessener mit simulierter Transpiration durchgeführt. An der Station El Miyit wurde die Transpiration verschiedener typischer Pflanzen des Untersuchungsgebietes zu verschiedenen Zeitpunkten im Frühjahr und Herbst gemessen, an der Station Asrir die Transpiration einer Dattelpalme (*F. Gresens*). Keine dieser Messungen fand am 6.6.2002 statt. Allerdings lassen sich aus den Messungen zu verschiedenen Zeitpunkten obere und untere Grenzwerte der Transpiration der jeweiligen Pflanzen ableiten. Die Messwerte liegen als Liter pro m<sup>2</sup> Blattfläche pro Tag vor. Um sie mit simulierten Werten zu vergleichen, werden die gemessenen Werte mit einem als konstant angenommenen Wert der spezifischen Verdampfungswärme,  $L_v$ , von  $2,5 \cdot 10^6$  J/kg multipliziert. Die Messwerte wurden von der Messung an einem Einzelblatt auf flächige Werte extrapoliert, indem der Blattflächenindex der betreffenden Pflanzenart abgeschätzt und Pflanzen dieser Art pro Fläche gezählt wurden (pers. Mitteilung *F. Gresens*, 2003).

Die Messwerte für die Station El Miyit reichen von  $0,012 \cdot 10^6$  J/m<sup>2</sup> bis  $0,14 \cdot 10^6$  J/m<sup>2</sup> pro Tag. Der erhebliche Unterschied von mehr als einer Größenordnung in den Messwerten resultiert sowohl aus den sich ändernden Blattflächenindizes, als auch aus Unterschieden in der Verfügbarkeit von Bodenwasser für die verschiedenen Messtermine. Transpirationswerte in der Größenordnung von  $0,012 \cdot 10^6$  J/m<sup>2</sup> pro Tag sind vernachlässigbar klein. Unter der Annahme von 12 Stunden konstanter Transpiration an einem Tag würden sich daraus Werte unter  $1$  W/m<sup>2</sup> ergeben, was deutlich unterhalb der Genauigkeit liegt, die mit Modellsimulationen erreichbar ist. Transpiration von  $0,14 \cdot 10^6$  J/m<sup>2</sup> pro Tag würde unter der gleichen Annahme Flüsse latenter Wärme von weniger als

10 W/m<sup>2</sup> produzieren, was ebenfalls noch unterhalb der Genauigkeit von Modellsimulationen liegt (z. B. *Dirmeyer et al.*, 2000). Die simulierte Transpiration für die Gitterbox in der sich die Station El Miyit befindetet, beträgt ca.  $0,17 \cdot 10^6$  J/m<sup>2</sup> pro Tag für Simulationen mit ‚Grundwasser‘ und gibt damit die richtige Größenordnung wieder. Die Station liegt außerhalb der Oase, daher ergeben sich keine Änderungen bei einer zusätzlichen Anwendung der Methode ‚Bewässerung‘.

Die Messungen an der Station Asrir wurden an einer Dattelpalme durchgeführt, die nicht nur mittels Lâcher bewässert, sondern z. T. auch mit Brunnenwasser gegossen wurde. Da die Station Asrir in einer Gittermasche liegt, die nicht zu 100% mit „Palmen“ bestanden ist, werden die gemessenen Werte mit einer Gittermasche verglichen, die im Inneren der Oase liegt und einen hohen Vegetationsbedeckungsgrad aufweist. Die gemessenen Werte erreichen, nach der gleichen Methode extrapoliert wie die Messungen an der Station El Miyit,  $4,79 \cdot 10^6$  J/m<sup>2</sup> pro Tag. Simulierte Transpirationswerte für eine mit „Palmen“ bestandene Gitterzelle innerhalb der Oase liefern Werte zwischen Null (ohne Bodenfeuchteerhöhung),  $2,07 \cdot 10^6$  J/m<sup>2</sup> für Simulationen mit ‚Grundwasser‘ und  $5,18 \cdot 10^6$  J/m<sup>2</sup> für Simulationen mit ‚Bewässerung‘. Die gemessene Transpiration liegt zwischen den Werten der Simulation mit ‚Grundwasser‘ und derjenigen mit zusätzlicher ‚Bewässerung‘. Die Methoden decken also den Bereich der realen Transpiration gut ab.

#### **4.5 Zusammenfassung: Bearbeitung der Boden- und Oberflächendaten**

In Vergleichssimulationen für einen typischen Tag, den 6.6.2002, wurden verschiedene Änderungen der Boden- und Oberflächenparameter auf ihre Wirksamkeit für die simulierte Evapotranspiration getestet.

Im Rahmen des IMPETUS-Projektes wurden Datensätze für Landnutzung und Bodenart aus der Auswertung einer LANDSAT-Satellitenaufnahme erstellt. Aus diesen Datensätzen, die in einer Auflösung von 28,5 x 28,5 m vorliegen, wurde ein neues Kataster der Landnutzungsklassen erstellt. Im Kataster aus GLCC- und LANDSAT-Daten ist die Oasenfläche und die Bewuchsdichte innerhalb der Oase reduziert, gleichzeitig aber die Vegetationsbedeckung außerhalb der Oase leicht erhöht. Vergleichssimulationen zeigen eine Erhöhung der Evapotranspiration in den Gebieten außerhalb der Oase, für die der LANDSAT-Datensatz vorliegt. Im Mittel über das gesamte Simulationsgebiet überwiegt der Effekt der reduzierten Oasenfläche, daher ist das Gebietsmittel der Evapotranspiration bei Simulationen mit dem neu erstellten LANDSAT-Datensatz reduziert. **Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Landnutzungsklassen im Kataster aus GLCC- und LANDSAT-Daten genutzt.** Die einheitliche Bodenart Lehm aus dem LM wird beibehalten, da die Sensitivität der Simulationsergebnisse auf diesen Parameter gering ausfällt.

Der aus dem antreibenden Model LM übernommene Bodenwassergehalt erweist sich als zu niedrig, da mit dieser Bodenfeuchte keine Transpiration stattfindet. Um die Bodenfeuchte in FOOT3DK für die angestrebten Simulationen auf sinnvolle Art zu erhöhen, werden zwei Ansätze realisiert. Da das Modell nur über ein Bodenmodell mit einer Mächtigkeit von 1m Tiefe verfügt, wurde ein künstliches Grundwasserreservoir durch Reduktion der Stomataleitfähigkeitsbegrenzung durch geringen Bodenwassergehalt in das Modell eingefügt. Der Fluss latenter Wärme ist in diesem Fall größer, als in der Simulation mit Bodenfeuchte aus dem LM. Außerhalb der Oase erreicht der Fluss latenter Wärme in der Simulation mit ‚Grundwasser‘ Werte von weniger als  $25 \text{ W/m}^2$ , in der Oase werden Werte bis zu  $150 \text{ W/m}^2$  simuliert. **Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die Werte des Parameters F2 in Gleichungen [35] und [38] nach unten begrenzt. Für Regionen innerhalb der Oase, die regelmäßig bewässert werden (z. T. mit Brunnenwasser) wird ein unterer Grenzwert von 0,45 gewählt, außerhalb der Oase wird der minimale Wert für F2 auf 0,2 gesetzt.** Damit ist ein geringes Maß an Transpiration für alle Pflanzen im Untersuchungsgebiet möglich, ohne zu unrealistisch hohen Transpirationswerten zu führen.

Die Bewässerung im Zuge einer Lâcher wird simuliert, indem für zwei Stunden eines simulierten Tages (eine Stunde nachts, eine tagsüber) die Feuchte in der obersten Bodenschicht für alle Gebiete mit mehr als 15% Vegetationsbedeckung auf ihren Maximalwert gesetzt. Die Bodenfeuchte in Gebieten außerhalb der Oase wird hierbei nicht verändert. Wird ‚Bewässerung‘ simuliert, so bildet sich in der räumlichen Struktur des Flusses latenter Wärme sehr klar die Vegetation der Oase ab. Je dichter die Vegetation in einer Gittermasche ist, desto größer ist der Anteil der Transpiration am gesamten Fluss latenter Wärme. In Gittermaschen mit geringerer Vegetationsbedeckung am Rand der Oase ist die Transpiration geringer, der Anteil der Evaporation vom Erdboden ist dagegen erhöht. Am Nordrand des Modellgebietes entstehen unrealistische Maximalwerte der Verdunstung, die z. T. über der Solarkonstante liegen. Dieser Effekt wird durch die Diskontinuität der Boden- und Atmosphärenbedingungen zwischen dem Antrieb durch das LM und den Bedingungen innerhalb des FOOT3DK-Simulationsgebietes verursacht. Neben den Energieflüssen am Boden werden auch andere Größen, z. B. Oberflächentemperatur und bodennahe Winde, von der simulierten ‚Bewässerung‘ beeinflusst. Im Bereich der Oase ist die atmosphärische Stabilität erhöht und Vertikalbewegungen sind reduziert, was einen Kanalisierungseffekt entlang der Orographie auslöst. **Zur Simulation einer Lâcher wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit die Methode ‚Bewässerung‘ zusätzlich zur Einstellung ‚Grundwasser‘ benutzt.**