

# 1 Einführung, Forschungsstand und Ziel der Arbeit

## 1.1 Einführung

Die Oberfläche der Erde ist zu ca. 70% von Wasser bedeckt, allerdings handelt es sich dabei überwiegend um Salzwasser. Lediglich 3% des Wassers auf der Erde ist Süßwasser, wovon wiederum 3/4 in Form von Eis an den Polen oder in Gletschern gebunden ist. Nur ca. 1% der globalen Wasservorkommen liegt als Fluss-, See- oder Grundwasser vor. Dieser Teil stellt den im jetzigen Klimazustand wesentlichen Teil des für den Menschen nutzbaren hydrologischen Kreislaufs der Atmosphäre dar. Diese Wasservorkommen werden durch Niederschlag regelmäßig aufgefüllt und stehen als Trinkwasserressource zur Verfügung.

Das verfügbare Süßwasser der Welt ist regional sehr unterschiedlich verteilt. Während in Island 600.000 m<sup>3</sup> pro Kopf und Jahr zur Verfügung stehen, sind es z. B. in Kuwait nur 75 m<sup>3</sup>. Aber auch innerhalb eines Landes können die Unterschiede gravierend sein. In Mexiko liefern 10% der Landoberfläche mehr als die Hälfte des jährlichen Oberflächenabflusses von Regenwasser. Die durchschnittliche Wasserverfügbarkeit lag 1990 bei 4.000 m<sup>3</sup> pro Kopf und Jahr. Dieser Wert ist nicht repräsentativ für das ganze Land, denn 90% des Landes sind arid und die Wasserverfügbarkeit liegt dort deutlich unterhalb des mittleren Wertes (*Population Reports*, 1998). Nicht nur der Niederschlag ist regional sehr unterschiedlich verteilt, sondern auch andere Komponenten des hydrologischen Kreislaufs. Verdunstung und Transpiration (zusammen Evapotranspiration genannt) stellen einen wesentlichen Teil dieses Kreislaufs dar. Wasserdampf wird durch die Atmosphäre transportiert und kann nach Kondensationsprozessen als Niederschlag ausfallen. Die Transportprozesse führen dazu, dass das Verhältnis von Niederschlag (P) zu Evapotranspiration (E) regional sehr unterschiedlich ausfällt. Gerade in den Subtropen wird durch die Evapotranspiration ein erheblicher Teil des verfügbaren Boden- und Oberflächenwassers an die Atmosphäre abgegeben und aus den Gebieten heraustransportiert; die Bilanz von Niederschlag minus Evapotranspiration (P-E) ist deutlich negativ.

Die Regionen der Welt, in denen das Verhältnis von mittlerem jährlichem Niederschlag zu mittlerer jährlicher potentieller Evaporation (Verdunstung von einer offenen Wasserfläche) geringer ist als 0,65 werden Trockengebiete genannt (*Solh et al.*, 2001). Dies beinhaltet hyper-aride, aride, semi-aride und mediterrane Ökosysteme, sowie Savannen und Grasland-Ökosysteme. Sie machen zusammen etwa 41% der Landoberflächen der Erde aus und werden von einem Sechstel der Weltbevölkerung bewohnt (*Solh et al.*, 2001). Zwei Drittel der Weltbevölkerung leben in Regionen, in denen nur ein Viertel des weltweiten jährlichen Niederschlages fällt. Besonders problematisch stellt sich die Situation in Afrika dar: Kontinentweit sind 65% der Landoberfläche als

Trockengebiete einzustufen (*Darkoh, 2003*). Darunter fällt auch die Region Südmarokko, die in dieser Studie beispielhaft betrachtet wird. Insbesondere hier führt starkes Bevölkerungswachstum zwischen 1,8% (*Population Reports, 1998*) und 2,0% (*Auswärtiges Amt der Bundesrepublik Deutschland, 2004*) zu steigendem Druck auf die Wasser- und Landschaftsressourcen. Vor diesem Hintergrund erweist sich die Untersuchung des hydrologischen Kreislaufs in ariden und semi-ariden Gebieten wie Südmarokko als essentiell.

Einige Arbeiten beschäftigen sich mit dem Niederschlag in der Region, andere Arbeiten behandeln den Bewässerungsbedarf für Kulturpflanzen oder den Zusammenhang zwischen Niederschlag und Biomasseproduktion. Welcher Teil des Bodenwassers durch Evapotranspiration wieder an die Atmosphäre abgegeben wird, ist jedoch noch nicht ausreichend untersucht. Realistische Abschätzungen der Evapotranspiration für unterschiedlich lange Zeiträume (von Stunden bis zu klimatologischen Zeiträumen von 30 Jahren) sind unabdingbare Voraussetzungen für hydrologische Modellierungen, für Berechnungen des Wasserbedarfes der Pflanzen zur Transpiration, sowie zur Abschätzung, welcher Anteil des Bewässerungswassers vom Boden selbst wieder verdunstet, ohne zur Produktion von Biomasse beizutragen.

Probleme der Quantifizierung der Evapotranspiration in ariden und semi-ariden Gebieten resultieren zum einen aus der Tatsache, dass diese Größe schwierig direkt zu messen ist. Hinzu kommt, dass gerade in ariden und semi-ariden Gebieten der Welt nur wenige Messstationen vorhanden sind und kontinuierlich betrieben werden. Die Bestimmung der Evapotranspiration aus hochaufgelösten Satellitendaten erfordert Überflüge der entsprechenden Satelliten (z. B: NOAA-AVHRR oder LANDSAT) und ist nur für wolkenfreie Atmosphären möglich, was durch die in den Subtropen häufig auftretenden hohen Zirruswolken problematisch ist (*Granger, 2000*). Eine mögliche Lösung bieten Modellsimulationen, allerdings liegen hierbei Probleme unter anderem in der groben Auflösung vieler Modelle, oder in den kurzen Simulationszeiträumen feiner aufgelöster Modelle. Darüber hinaus sind viele Atmosphärenmodelle nicht dazu geeignet Wasser in großer Bodentiefe zu simulieren. Die Simulation von Bewässerungspraktiken in meteorologischen Modellen ist ebenfalls noch nicht weit verbreitet. Es besteht daher Forschungsbedarf bei der Anpassung meteorologischer Modelle an die spezifischen Bedingungen in ariden und semi-ariden Gebieten, sowie in der Erstellung von Simulationen mit hoher räumlicher Auflösung für lange Zeiträume.

Im Rahmen des interdisziplinären Forschungsprojektes IMPETUS (Ein **I**ntegratives **M**anagement-**P**rojekt für einen **E**ffizienten und **T**ragfähigen Umgang mit der Ressource Süßwasser in Westafrika) wird der hydrologische Kreislauf mit all seinen Aspekten und Akteuren in zwei ausgewählten Flusseinzugsgebieten in Westafrika untersucht. Bei den beiden Flusseinzugsgebieten

handelt es sich um den Ouémé in Benin und den Wadi Drâa in Marokko. Die in IMPETUS beteiligten Disziplinen umfassen Meteorologie, Geologie, Geographie (darin auch Hydrologie und Fernerkundung), Biologie, Agrarökonomie, sowie Anthropologie und in Benin auch Medizin. Die Zielsetzung des Projektes ist das Verständnis des hydrologischen Kreislaufs in diesen Gebieten, die realitätsnahe Abschätzung möglicher künftiger Änderungen und die Entwicklung von Management-Strategien, die das Konfliktpotential um diese knappe Ressource minimieren. Um dieses Ziel zu erreichen ist eine enge Zusammenarbeit der beteiligten Disziplinen erforderlich. Forschungsergebnisse jeder Disziplin müssen in die Analysen der anderen Disziplinen einfließen, um ein umfassendes Bild der komplexen Zusammenhänge zu liefern. Ein wesentlicher Aspekt dieser Arbeit liegt daher in der Zusammenarbeit mit den anderen beteiligten Disziplinen.

Die vorliegende Arbeit behandelt die Evapotranspiration in einem Teil des Drâa-Einzugsgebietes südlich der Stadt Ouarzazate. Die Untersuchungsregion ist karg, nur entlang des Wadi befinden sich mehrere Flussoasen. Zur Berechnung der Evapotranspiration sind detaillierte Informationen über die relevanten Boden- und Oberflächenparameter im Untersuchungsgebiet erforderlich. Dies umfasst nicht nur den natürlichen Pflanzenbewuchs und den Bodenwassergehalt außerhalb der Oase, sondern auch die Anbau- und Bewässerungsstrategien der Oasenbewohner. Atmosphärische Messwerte in 2 m über Grund an vier im Untersuchungsgebiet liegenden Klimastationen, sowie Transpirationmessungen an einigen typischen Pflanzen werden zur Kalibrierung des Modells herangezogen. Die Ergebnisse dieser Arbeit werden als obere Randbedingung für hydrologische Modellierungen benötigt. Darüber hinaus liefern sie wesentliche Anhaltspunkte für agrarökonomische Überlegungen zur verbesserten Nutzung der vorhandenen Ressourcen des Wassers und der Anbaufläche. In weiterführenden Arbeiten kann mit der hier entwickelten Methode der Einfluss von Klimaänderungen auf die Verdunstung aus globalen Szenarienrechnungen ermittelt werden. Zusätzlich lassen sich Änderungen der Landnutzung (Beweidung, Anbaupflanzen, Bewässerungsmethoden etc.) im Untersuchungsgebiet simulieren und deren Einfluss auf die Verdunstung abschätzen. Dies ist zur Erstellung von Managementstrategien für die Region unerlässlich.

## **1.2 Stand der Forschung**

In diesem Kapitel wird der aktuelle Forschungsstand beschrieben, auf den diese Arbeit aufbaut. Zunächst wird ein Überblick über Arbeiten gegeben, die sich mit dem Niederschlag als Quelle des in der Region verfügbaren Wassers beschäftigen. Daran anschließend wird kurz auf die Frage des Einflusses von Klimaänderungen in der Region und der anthropogenen Einflüsse, die solche Änderungen verursachen können, eingegangen. Das Problem der Bestimmung der

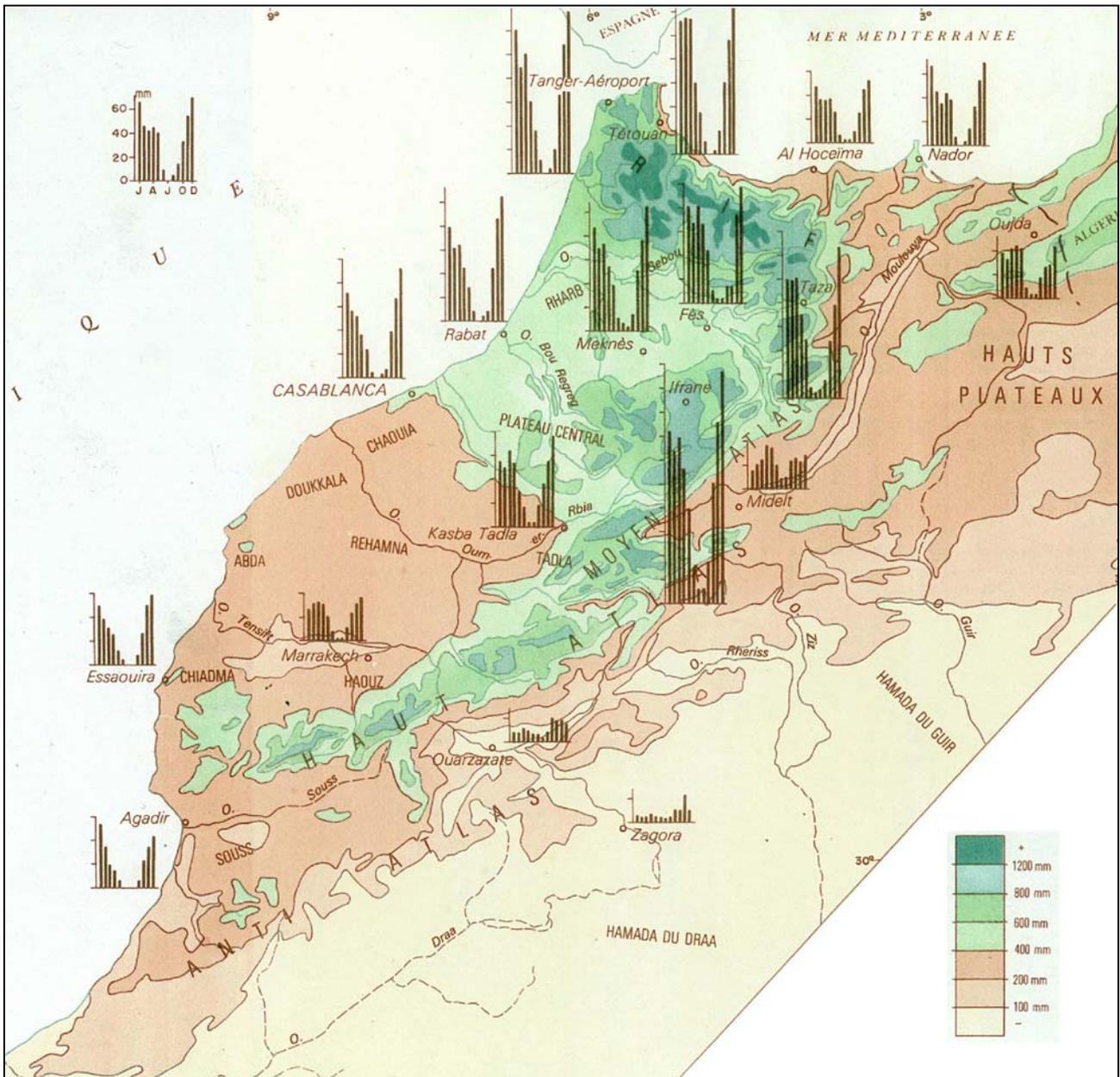
Evapotranspiration in ariden und semi-ariden Gebieten wird im darauffolgenden Unterkapitel dargestellt. In diesem Zusammenhang kommt der Verwendung von Modellsimulationen große Bedeutung zu. Hierbei stellen die Wechselwirkungen zwischen Boden und Atmosphäre die zentralen Mechanismen dar. Daher wird in einem weiteren Unterkapitel auf diese Wechselwirkungen und ihre Repräsentation in meteorologischen Modellen eingegangen. Schließlich werden statistische Methoden vorgestellt, die es ermöglichen, eine Klimatologie aus hochaufgelösten Episoden-Simulationen zu erstellen.

### 1.2.1 Niederschlag

In ariden und semi-ariden Gebieten ist der Niederschlag der bestimmende Faktor für die biologische Produktivität einer Region. Nach Untersuchungen von *Le Houerou und Hoste (1977)* werden in Nordafrika pro 1 mm mittlerem Jahresniederschlag 2 kg pflanzliche Biomasse produziert und somit die Kapazität der Region für Landwirtschaft und Viehhaltung bestimmt.

Der mittlere jährliche Niederschlag in Marokko ist räumlich sehr unterschiedlich verteilt (vgl. Abb. 1.1). Während in einigen Gegenden des Rif-Gebirges über 1.200 mm Niederschlag pro Jahr und in den Hochlagen des Atlas-Gebirges über 800 mm pro Jahr fallen, liegt der mittlere Jahresniederschlag am Rand der Sahara unter 100 mm. Generell fällt nördlich des Atlas-Gebirges etwas mehr Niederschlag, als südlich davon (*Hasler, 1980; Nicholson und Kim, 1997*).

Neben der räumlichen Verteilung der Niederschläge sind auch deren zeitliche Verteilung und die physikalischen Prozesse, die zur Niederschlagsbildung beitragen, von Bedeutung. Die Niederschläge nördlich des Atlas werden oft durch Zyklonen im Zusammenhang mit der Polarfront ausgelöst und weisen Maxima in den Wintermonaten auf. Sie zeigen eine deutliche Korrelation mit der Nordatlantik-Oszillation (NAO – Druckdifferenz zwischen Stationen in Island und den Azoren, Lissabon oder Gibraltar, je nach Index-Definition, z.B. *Knippertz et al., 2003c*). Ein hoher NAO-Index ist durch die Verstärkung der Antizyklone über den Azoren mit negativen Niederschlagsanomalien in Südeuropa und Nordafrika assoziiert (*Nicholson und Kim, 1997; Knippertz et al., 2003a,c; Luterbacher und Xoplaki, 2003*). Darüber hinaus weisen einige Autoren (*Nicholson und Kim, 1997; Knippertz et al., 2003c*) Korrelationen der winterlichen El Niño / Southern Oscillation Bedingungen mit dem Niederschlag in Südeuropa und Nordafrika nach. Ein positiver NIÑO3-Index (positive Anomalie der Meeresoberflächentemperatur im Ostpazifik) im Winter steht demnach mit reduziertem Niederschlag im folgenden Frühjahr in Verbindung.



**Abbildung 1.1: Ausschnitt aus der Niederschlagsverteilung Marokko [mm/Jahr] (farbig) der Jahre 1925-1949 und mittlere Monatsniederschläge an einzelnen Stationen [mm/Monat] (Histogramme) der Jahre 1933-1963. Aus: *Royaume du Maroc*, 1990: Atlas des Ressources Naturelles.**

An den Südhängen des Atlas-Gebirges und am Nordrand der Sahara weist die saisonale Niederschlagsverteilung Maxima während der Übergangsjahreszeiten auf. Diese Niederschläge können in vielen Fällen in Zusammenhang mit tropisch-extratropischen Wechselwirkungen und Höhenträgen gebracht werden (Knippertz, 2003b; Knippertz et al., 2003b). Sie treten häufig bei Anströmungen aus südlichen Richtungen auf, was auf die Bedeutung orographischer Effekte für die Niederschlagsbildung hinweist (Hasler, 1980; Knippertz, 2003a). Darüber hinaus kann bei nördlichen Windrichtungen Zyklonogenese im Lee des Atlas stattfinden. Ähnlich wie bei der Entstehung der sog. Sharav-Zyklonen oder Saharischen Tiefdruckgebiete, deren Entstehungsgebiet nach Alpert und Ziv (1989) östlich der hier behandelten Region liegt, können sich durch den

Transport von positiver Vorticity über den Atlas kleinskalige Zyklonen entwickeln. Sharav-Zyklonen treten besonders häufig im Frühjahr auf und können bei Feuchteadvektion aus dem Mittelmeergebiet mit Niederschlägen im Entstehungsgebiet und entlang ihrer Zugbahn nach Osten (über dem Kontinent, parallel zur afrikanischen Mittelmeerküste, z. T. bis nach Israel) verbunden sein (*Alpert und Ziv, 1989; Egger et al., 1995*).

In Südmarokko fallen Niederschläge häufig in Form von einzelnen, lokal begrenzten, dafür aber mitunter sehr intensiven Niederschlagsereignissen (*Nicholson und Kim, 1997*). Dadurch ist die Gefahr von Überflutungen und Bodenerosion durch Wasser nicht vernachlässigbar, obwohl die Region unter Wasserknappheit leidet. Der hydrologische Kreislauf und die damit einhergehenden Prozesse sind ohne die Berücksichtigung der verschiedenen Mechanismen der Generierung von Niederschlag in der Region nicht zu verstehen.

Die semi-ariden subtropischen Gebiete in Afrika und speziell Südmarokko weisen eine hohe interannuelle Niederschlagsvariabilität auf (*Nicholson et al., 1997; Ward et al., 1998*). Diese wird z. T. zusätzlich von dekadischer Variabilität überlagert (*Chbouki et al., 1995; Knippertz et al., 2003c*). Da die Niederschläge sehr spärlich sind und das Auftreten von mehreren Trockenjahren in Folge die Vegetation erheblich belastet, ist das Gebiet besonders sensitiv für Klimaänderungen, die zu einem gehäuften Auftreten solcher Trockenjahre oder Trockenperioden führen können (*Bullock und Le Houerou, 1996*). Nach Untersuchungen von *Hulme (1992)* hat die Niederschlagsvariabilität für die Region am Nordrand der Sahara, südlich des Atlas Gebirges, in der Klimaperiode 1961-1990 im Vergleich zu der Klimaperiode 1931-1960 zugenommen. Da mehrjährige Pflanzen ein einzelnes oder wenige Trockenjahre überstehen können, wirkt die Vegetation auf der Zeitskala von einzelnen Jahren abschwächend auf Niederschlagsschwankungen. Dauert eine Trockenperiode jedoch mehrere Jahre an, so leiden auch die robusteren Pflanzen und ein positiver Rückkopplungsmechanismus zwischen Vegetation und Niederschlag bildet sich aus (*Zeng et al., 1999*).

### **1.2.2 Klimaänderung und anthropogene Einflüsse**

Zusätzlich zur Variabilität auf Skalen von einigen Jahren bis Jahrzehnten lassen sich auch Unterschiede auf paläoklimatischen Zeitskalen feststellen. Im holozänen Klimaoptimum (d. h. vor ca. 6.000 Jahren) war das Klima in weiten Teilen Westafrikas feuchter als heute und die Sahara deutlich stärker bewachsen (z. B. *Street und Grove, 1976; Yu und Harrison, 1996*). Die Gründe, die zur Desertifikation in diesem Gebiet geführt haben, sind noch nicht vollständig verstanden. Während ein Teil dieser Entwicklung externen Faktoren, wie der Änderung der Solarkonstante und der Neigung der Erdrotationsachse zur Äquatorebene zugeschrieben werden kann (*Kutzbach und*

*Street-Perrott*, 1985; *COHMAP Members*, 1988), werden zusehends Wechselwirkungen zwischen Klima und Vegetation als wichtige Auslöser dieser Entwicklung belegt (z. B. *De Noblet-Ducoudré*, 2000; *Doherty et al.*, 2000; *Claussen et al.*, 2003). Ein wichtiger Faktor ist dabei, dass das Klima als ein Gleichgewichtssystem mit mehreren Ruhezuständen betrachtet werden kann. Nicht jeder dieser Zustände ist gegen kleine Störungen stabil. Geringfügige Veränderungen können das System aus seinem Ruhezustand bewegen und zu weitreichenden Änderungen, hin zu einem neuen Gleichgewichtszustand führen (*Kubatzki und Claussen*, 1998; *Wang und Eltahir*, 2001a,b). Daraus ergibt sich die Frage, wie sich mögliche zukünftige Klimaänderungen auf die Region auswirken werden. *Desanker und Magadza* (2001) weisen auf bereits eingetretene Klimaänderungen in Afrika in Form einer Erwärmung des Kontinents hin und konstatieren eine Abnahme der Niederschlagsmengen für mehrere Klimaszenarien bei Verdoppelung des atmosphärischen CO<sub>2</sub> Gehaltes. Dagegen leitet *Petit-Maire* (1990) aus theoretischen Überlegungen und Parallelen zu paläoklimatischen Bedingungen eine Zunahme der Vegetationsbedeckung in der Sahara und einen Anstieg der Niederschläge ab. *Claussen et al.* (2003) stellen eine solche Tendenz in Simulationen mit dem CLIMBER-2 (Climate-Biosphere) Modell für steigende atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentrationen ebenfalls fest, wenn auch in geringerem Maß. Die Auswirkungen von Klimaänderungen werden auch im Gebiet des Hohen Atlas wesentliche Bedeutung für Viehhaltung, Obstanbau und Tourismus haben (*Parish und Funnell*, 1999). Neben globalen Klimaänderungen spielen weitere anthropogene Faktoren wie z.B. Änderungen der Landnutzung oder der Bevölkerungsdichte eine Rolle (*Gleick*, 1992; *Bullock und Le Houerou*, 1996). Hierbei ist der Einfluss von Anbau- und Beweidungsstrategien von zentraler Bedeutung (*Le Houerou*, 2002). Durch starkes Bevölkerungswachstum erhöht sich der Nutzungsdruck auf die Landschaft, bei gleichbleibenden oder sogar sinkenden Niederschlägen. Die Intensivierung der Beweidung und der landwirtschaftlichen Nutzung sowie die Verstärkung der Variabilität der Niederschläge führt zur Reduzierung der Biodiversität in ariden und semi-ariden Ökosystemen (*Solh et al.*, 2001; *Le Houerou*, 2002).

### **1.2.3 Bestimmung der Evapotranspiration in ariden und semi-ariden Gebieten**

Ein zentrales Problem der meteorologischen Forschung in ariden und semi-ariden Regionen der Erde stellt die mangelhafte Datenverfügbarkeit dar. Meteorologische Messungen liegen entweder nicht oder nur in großen räumlichen Abständen und oftmals in Form nicht kontinuierlicher Zeitreihen vor. Verschiedene Autoren haben deutliche Unterschiede in der Quantifizierung sensibler und latenter Wärmeflüsse für verschiedene Mess- und Berechnungsmethoden in semi-ariden Regionen festgestellt. Für ein semi-arides Untersuchungsgebiet in der Türkei wurde

Evapotranspiration mit acht verschiedenen Methoden gemessen, berechnet oder simuliert (*Kite und Droogers, 2000*). Verglichen wurden mehrere Berechnungsmethoden, von denen einige unter dem Begriff FAO-24 zusammengefasst werden (vereinfachte Berechnungen, die sich für Bedingungen eignen in denen nur wenige Messdaten oder Abschätzungen von Werten vorliegen: entweder nur tägliche Solarstrahlung, nur Monatsmitteltemperatur und Sonnenscheinstunden, nur mittlere Tagestemperatur und tägliche Extremtemperaturen oder nur potentielle Evaporation und ein Pflanzenkoeffizient; *Beyazgül et al., 2000; Fontenot, 2004*). Diese und zusätzlich herangezogene Satellitenmessungen zeigten eine erhebliche Streuung der ermittelten Werte. Die Ergebnisse unter Verwendung einer komplexeren Berechnungsmethode (FAO-56 Methode: Nettostrahlung, Bodenwärmestrom, Sättigungsdampfdruck, aktueller Dampfdruck, Tagesmitteltemperatur und mittlere tägliche 2 m Windgeschwindigkeit müssen bekannt sein; *Allen, 2000*), Messungen mit einem Szintillometer (optische Messung von Turbulenz über eine Strecke zur Ermittlung des sensiblen Wärmeflusses, latenter Wärmefluss wird aus Energiebilanz abgeleitet; *Meijninger und De Bruin, 2000*) und die Ergebnisse der hydrologischen Modelle (SWAP und SLURP; *Droogers, 2000; Kite, 2000*) erweisen sich als konsistenter. Eine klare Aussage, welche Methode die exaktesten Ergebnisse produziert, kann von den Autoren jedoch nicht getroffen werden. Unterschiede zwischen der Bestimmung des latenten Wärmeflusses als Residuum der Energiebilanzgleichung und aus 1-dimensionalen Eddy-Korrelationsmessungen (Produkt der Verdampfungswärme und der Kovarianz zwischen vertikaler Windgeschwindigkeit und Feuchtefluktuationen) für ein semi-arides Untersuchungsgebiet in Arizona (USA) liegen unter  $50 \text{ W/m}^2$  für 20 min Mittelwerte, wobei sich die Abweichungen im Tagesverlauf durch Mittelung reduzieren (*Kustas et al., 1991*). Für drei Vegetationsbarrieren in Burkina Faso ermitteln *Ringersma und Sikking (2001)* Transpiration aus Saftflussmessungen und Evaporation des Bodens aus Bodenfeuchtemessungen und vergleichen die Ergebnisse mit Berechnungen nach der FAO-56 Methode. Sie kommen zu dem Schluss, dass die Berechnung nach der FAO-56 Methode die reale Evapotranspiration z.T. deutlich überschätzt. All diese und weitere Autoren (z. B. *Lloyd et al., 1997; Van den Hurk, 2001, Leuning et al., 2004*) betonen die Differenzen, insbesondere im sensiblen und latenten Wärmefluss, bei Verwendung verschiedener Bestimmungsmethoden. Die Ursachen für mangelnde Übereinstimmung zwischen Messungen und Modellergebnissen können in Schwächen des verwendeten Modells, aber auch in nicht gegebener Repräsentativität einer Punktmessung für die Fläche einer simulierten Gitterbox begründet sein (*Noilhan et al., 1991*). *Brotzge (2000)* führt Unterschiede von fast  $100 \text{ W/m}^2$  zwischen zeitgleichen Messungen des Bodenwärmestromes an, die nur 100 m voneinander entfernt vorgenommen wurden. Darüber

hinaus können z. B. Instrumentenfehler oder die fehlende Schließung des Energiehaushaltes die Interpretierbarkeit von Messdaten limitieren (*Brotzge und Weber, 2002*).

Eine realitätsnahe Abschätzung der turbulenten Flüsse ist besonders schwierig, wenn flächige Daten benötigt werden (z. B. *Watts et al., 2000*). Für ein Untersuchungsgebiet in Australien wurden während einer Feldkampagne die Komponenten der Energiebilanz am Boden durch Bodenmessungen und durch Messungen mit einem niedrig fliegenden Flugzeug verglichen (*Isaac et al., 2004; Leuning, et al., 2004*). Große räumliche Unterschiede in den Messungen der sensiblen und latenten Wärmeflüsse ergaben sich in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte, dem Blattflächenindex, der durch den Niederschlag in den drei vorherigen Monaten gesteuert wurde, und durch Inhomogenität der Bewölkung.

Die Extrapolation von Punktmessungen auf flächige Werte ist mit großen Unsicherheiten behaftet (vgl. *Infante et al., 1997*). Aus diesem Grund kommt gerade in datenarmen Gebieten der Simulation atmosphärischer Felder mit meteorologischen Modellen große Bedeutung zu. In viele dieser Modelle werden sogenannte SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer) Module implementiert, was zu einer Verbesserung der Wiedergabe der Energiebilanz am Erdboden führt (z. B. *Sen et al., 2001; Federer et al., 2003*). Jedoch sind auch die Unterschiede zwischen Ergebnissen verschiedener Modelle mitunter erheblich (z. B. *Cleugh et al., 2004*).

#### **1.2.4 Wechselwirkung von Boden, Oberfläche und Atmosphäre**

Die realistische Annahme verschiedener Boden- und Vegetationsparameter und ihrer Interaktion mit der Atmosphäre ist essentiell für die Qualität meteorologischer Simulationen. Bereits seit den Arbeiten von *Charney (1975)* und *Charney et al. (1977)* ist die Bedeutung der unterschiedlichen Albedo bewachsener und unbewachsener Flächen für das Klima bekannt. In diesen Arbeiten wird ein positiver Rückkopplungseffekt zwischen einer Reduktion der Vegetation und einem Rückgang des Niederschlages in semi-ariden Gebieten an Grenzen zwischen Wüsten und Monsunregionen belegt. In der Folge entstand eine Reihe von Arbeiten, die die Ergebnisse weiter verfeinerten (z. B. *Knorr et al., 2001; Myhre und Myhre, 2003*) und auf weitere Parameter der Vegetation, insbesondere den Feuchteeintrag in die Atmosphäre durch Transpiration, ausweiteten (z. B. *Zeng et al., 1999; Knorr et al., 2001; Narisma und Pitman, 2003*). Änderungen der Landnutzung und damit der Vegetation führen zu Änderungen der Konvektion (z. B. *Perlin und Alpert, 2001; Sogalla et al., 2001; Lyons, 2002*) und der Feuchtewiederverwertung (engl.: *recycling*) in semi-ariden Regionen (*Savenije, 1995*). Die Rauigkeitslänge einer Oberfläche ist von wesentlicher Bedeutung für die Entstehung von Turbulenz und damit für die Entwicklung von Konvektion (z. B. *Lyons, 2002*).

Neben der Albedo verschiedener Oberflächen und Vegetationsparametern (z. B. Vegetationsbedeckungsgrad, Blattflächenindex und Rauigkeitslänge) sind auch Bodenparameter (z. B. Bodenwärmekapazität, Kapillarität und Speichervermögen für Bodenwasser) von zentraler Bedeutung für die Simulationsergebnisse meteorologischer Modelle. In einer Untersuchung von *Brotzge und Weber* (2002) für ein semi-arides Untersuchungsgebiet in Oklahoma (USA) werden substantielle Einflüsse von Bodenart, Vegetationsbedeckung und Rauigkeitslänge auf die Komponenten der Energiebilanz, insbesondere die turbulenten Flüsse sensibler und latenter Wärme, nachgewiesen. Simulationen des Energiehaushalts am Erdboden für das semi-aride HAPEX-Sahel Gebiet mit einem mesoskaligen Modell zeigen erhebliche räumliche Variabilität in Abhängigkeit von der Bodenfeuchte (*Taylor et al.*, 1997). Der Einfluss der turbulenten Flüsse auf die Grenzschicht war in dieser Untersuchung gering, da in der betrachteten Wettersituation Advektion dominierte. Nach eindimensionalen Ensemblestudien von *Sogalla et al.* (2001) für Westafrika übt die Bodenfeuchte den größten Einfluss auf das Niederschlagsaufkommen aus und steuert damit auch das zur Verdunstung bereitstehende Wasser. Bei ausreichendem Angebot an Bodenfeuchte modulieren hauptsächlich die Albedo und die Rauigkeitslänge über die Turbulenz die Niederschlagstätigkeit. In Situationen, in denen die Verdunstung durch geringe Bodenfeuchte begrenzt ist, trägt eine hohe Vegetationsbedeckung über die Transpiration und die Verdunstung von Niederschlagswasser aus vorangegangenen Niederschlagsereignissen maßgeblich zur Erhöhung der Niederschlagstätigkeit bei (*Sogalla et al.*, 2001). Die Bodenfeuchte an der Oberfläche und in unterschiedlichen Bodentiefen wird auch von anderen Autoren (z. B. *Kustas et al.*, 1991; *Taylor et al.*, 1997; *Domingo et al.*, 1999) als essentiell für die Evapotranspiration genannt. Dies trifft besonders auf geringe Bodenwassergehalte und spärlich bewachsene Böden zu (*Dirmeyer et al.*, 2000). Gerade in ariden und semi-ariden Gebieten wird durch einzelne lokale Niederschlagsereignisse eine stark heterogene Bodenfeuchteverteilung erzeugt, die zu erheblichen Unterschieden in der räumlichen Struktur der Energiebilanz am Boden führt. Darüber hinaus treten Probleme bei der realistischen Wiedergabe der Evapotranspiration in Situationen auf, in denen die obere Bodenschicht trocken ist, die Pflanzen durch große Wurzeltiefe aber trotzdem transpirieren (*Taylor et al.*, 1997). In Savannen, tropischem Grasland, Wüsten und Halbwüsten können Wurzeltiefen von bis zu 70 m gemessen werden (*Kleindon und Heimann*, 1998). Starke Heterogenität der Bodenfeuchte wird neben der Niederschlagsverteilung auch durch Bewässerung verursacht. Die Simulation von Bewässerung findet sich bislang nur in agrarökonomischen oder hydrologischen Modellen (z. B. *Mailhol et al.*, 1999; *Droogers*, 2000), nicht aber in meteorologischen Modellen.

Für ein Untersuchungsgebiet in der Köln-Bonner-Bucht wurde von *Braun et al.* (2001) eine Studie mit dem Lokalmmodell (LM) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt. Um die Simulationsergebnisse an gemessene Werte anzunähern, wurden in der Studie von *Braun et al.* (2001) zwei Testsimulationen durchgeführt, in denen die Bodenfeuchte im Modell um 50%, bzw. 100% höher als in der ursprünglichen Simulation angenommen wurde. Dies verbesserte die Wiedergabe von sensiblem und latentem Wärmefluss, führte aber gleichzeitig zu einer Unterschätzung der maximalen Tagestemperaturen, verursacht durch eine reduzierte Aufheizung der Grenzschicht und damit zu einer Verschlechterung der Simulationsergebnisse.

Die erreichbare Messgenauigkeit für die turbulenten Flüsse sensibler und latenter Wärme liegt bei ca.  $\pm 10 \text{ W/m}^2$  (*Dirmeyer et al.*, 2000). Da die Evapotranspiration sehr sensitiv auf die Bodenfeuchte reagiert, muss die Bodenfeuchte möglichst exakt bekannt sein (*Dirmeyer et al.*, 2000), um die turbulenten Flüsse an der Erdoberfläche zu simulieren. Durch die oft starke räumliche Heterogenität der Bodenfeuchte liegen selbst in gut ausgestatteten Messgebieten die Bodenfeuchtemessungen i.A. nicht in ausreichender Dichte vor, um die Felder in ihrer Komplexität wiederzugeben.

Neben der Qualität kommt auch der Auflösung der Oberflächendaten große Bedeutung zu (z. B. *Zeng et al.*, 2002). Der Stellenwert der Gitterauflösung und die Behandlung subskaliger Oberflächenheterogenität für die realistische Wiedergabe turbulenter und sensibler Wärmeflüsse wird von *Shao et al.* (2001) in einer Untersuchung mit dem auch in dieser Arbeit verwendeten Modell FOOT3DK (Flow Over Orographically structured Terrain, 3-Dimensional, Köln-Version) für den Raum Köln/Bonn thematisiert. Der Aggregationseffekt, der durch die Mittelwertbildung von Boden- und Oberflächenparametern, wie z.B. Bodenfeuchte, für eine Gitterzelle in der Berechnung nicht-linearer Austauschprozesse am Boden zustande kommt, ist schon länger bekannt (z. B. *Hu und Islam*, 1997; *Hahmann und Dickinson*, 2001; *Nykanen et al.*, 2001; *Giorgi et al.*, 2003). Möglichkeiten, die einfache Mittelung von Parameterwerten zu verfeinern sind z.B. die Verwendung sogenannter effektiver Oberflächenparameter (z. B. *Hu et al.*, 1999) oder von Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen (engl.: probability density function, pdf) (*Avissar*, 1992; *Zeng et al.*, 2002). Gerade für nichtlineare Wechselwirkungen können jedoch deutlich Unsicherheiten resultieren (*Niyogi et al.*, 2002), wobei *Ács* (2003) eine stärkere Nichtlinearität bei der Transpiration, als bei der Evaporation von unbewachsenem Boden findet. Eine mögliche Lösung dieses Problems stellt der sogenannte Mosaik-Ansatz dar, bei dem alle Gebiete mit gleicher Landnutzung innerhalb einer Gittermasche vor der Berechnung zusammengefasst werden und die berechneten Größen danach anteilig gewichtet werden (*Boulet et al.*, 1999; *Molod und Salmun*, 2002). Eine weitere Möglichkeit ist die explizite Methode, bei der die Erdoberfläche feiner

aufgelöst wird als das Atmosphärenmodell. Die Austauschprozesse, insbesondere die turbulenten Flüsse am Boden, werden in diesem Fall für die feiner aufgelösten Bodengitterzellen berechnet, bevor sie an das atmosphärische Modell übergeben werden (*Koster und Suarez, 1992; Giorgi, 1997; Hu et al., 1999*). Die explizite Methode ist dabei dem Mosaik-Ansatz in stark heterogenem Gelände überlegen (*Mölders et al., 1996*). Bei homogenen Oberflächen kann auch die Methode der dominanten Klasse (als einheitlicher Wert für die ganze Gitterzelle) zu realistischen Simulationsergebnissen führen (*Molod und Salmun, 2002*). Zusätzlich zum Aggregationseffekt finden *Shao et al. (2001)* noch einen dynamischen Effekt, der durch subskalige turbulente Bewegungen zu erklären ist. Der dynamische Effekt führt zu einer Unterschätzung der turbulenten kinetischen Energie (TKE) und erfordert eine Umformulierung der Parameterisierung der TKE für das Modell. *Hasler et al. (2002)* weisen zusätzlich auf die Bedeutung der Anordnung unterschiedlich bewachsener Flächenanteile für die Evapotranspiration der einzelnen Flächenanteile und damit auch der Gesamtfläche hin.

### **1.2.5 Methoden der Regionalisierung**

In den bisherigen Forschungen zur Evapotranspiration in ariden und semi-ariden Gebieten liegen in vielen Fällen nur Fallstudien, zeitlich begrenzte Messkampagnen oder Simulationen für kurze Zeiträume vor. In Anbetracht der hohen intra- und interannuellen Variabilität der Niederschläge und damit des hydrologischen Kreislaufs in diesen Gebieten, besteht die Notwendigkeit von Untersuchungen auf langen Zeitskalen. Da hierfür nur Methoden wie Fernerkundung mittels Satelliten oder Modellsimulationen in Frage kommen, müssen Methoden entwickelt werden, um solche längerfristigen Untersuchungen durchführen zu können. Globale Zirkulationsmodelle liefern lange klimatologische Zeitreihen zur Untersuchung unterschiedlicher Phänomene in der Atmosphäre. Um jedoch Aspekte zu betrachten, deren horizontale Skala wesentlich kleiner ist als die Auflösung der Modelle (vgl. z. B. *von Storch, 1995*), ist eine Regionalisierung (engl.: downscaling) der Ergebnisse notwendig. Hierzu gibt es prinzipiell drei verschiedene Ansätze.

Die **statistische Regionalisierung** basiert auf der Kenntnis empirischer Zusammenhänge zwischen der globalen und der regionalen Skala, die aus Beobachtungsdaten abgeleitet sind. Diese Beobachtungsdaten müssen in hinreichend langen Zeitreihen vorliegen (z.B. *Fuentes, 1998: 30 Jahre*). In einigen Untersuchungen werden mittels Kanonischer Korrelationsanalyse (CCA) oder Eigenwertzerlegung (Singular Value Decomposition, SVD) optimal korrelierte Größen auf den verschiedenen Skalen ermittelt (z. B. *Wallace et al., 1992; Busuioc et al., 1999; Krüger, 2002*). Viele Studien nutzen Wetterlagen oder Zirkulationsklassen (z. B. *Trigo und DeCamara, 2000, Knippertz, 2003a*) als steuernde Information auf der großen Skala. Dieser Steuerparameter auf der

großen Skala wird als Antrieb für kleinere Skalige Prozesse angenommen, die Gegenstand der Untersuchung sind. Mit der klimatologischen Verteilung des Steuerparameters lassen sich die damit zusammenhängenden Parameter auf der regionalen Skala gewichten (von *Storch et al.*, 1993; *Zorita et al.*, 1995; *Enke und Spekat*, 1997).

Die **dynamische Regionalisierung** erfolgt durch das sogenannte Nesting<sup>1</sup> von Regionalmodellen oder allgemein feiner aufgelösten Modellen in ein Klimamodell. Gegenüber der statistischen Methode hat dieses Verfahren den Vorteil der physikalischen Kopplung der Ergebnisse an das antreibende Modell. Die Methode ist allerdings außerordentlich rechenzeitintensiv. Die dynamische Regionalisierung wurde daher hauptsächlich für Zeiträume von wenigen Monaten angewandt (z. B. *Giorgi*, 1990; *Christensen et al.*, 1997) und nur selten für Simulationen von mehreren Jahren (z. B. *Jones et al.*, 1995; *Jones et al.*, 1997). Ein weiterer Ansatz ist die Simulation mit Modellen, die unterschiedliche horizontale Auflösungen in verschiedenen Regionen erlauben (*Déqué und Pielidievre*, 1995). Ein möglicher Nachteil dieser Methode ist, dass Fehler des großskaligen Modells an das regionale Modell weitergegeben werden.

Die **statistisch-dynamische Regionalisierung** bietet die Möglichkeit einige Vorteile der beiden oben genannten Methoden zu kombinieren. Bei diesem Verfahren wird zunächst ein Parameter auf der Skala des Globalmodells gesucht, der physikalisch sinnvoll und signifikant mit dem zu untersuchenden Phänomen auf der regionalen Skala korreliert ist. Daran schließt sich eine Klasseneinteilung von Ereignissen oder Episoden nach Maßgabe des gewählten großskaligen Parameters an. Die Länge der Episoden hängt vom zu untersuchenden Zusammenhang ab. Aus den resultierenden Klassen, Clustern oder Gruppen werden daraufhin Repräsentanten ausgesucht, die die Situation möglichst gut darstellen. Diese werden dann mit einem durch das Globalmodell angetriebenen Regionalmodell simuliert. Aus einer gewichteten Rekombination der simulierten Episoden lässt sich schließlich eine Klimatologie erstellen, die die Vorteile der dynamischen Regionalisierung (physikalische Kopplung an das antreibende Modell) mit einem deutlich reduzierten Rechenaufwand nutzbar macht. Die Methode basiert auf Untersuchungen über den Zusammenhang von mesoskaligen Windcharakteristika und geostrophischen Windfeldern (*Wippermann und Gross*, 1981; *Heimann*, 1986).

Häufig werden **Wetterlagen** aus Bodendruckfeldern bestimmt und als steuernder Parameter auf der großen Skala genutzt (z. B. *Trigo und DaCamara*, 2000). Die sogenannten „Grosswetterlagen“ wurden ursprünglich von *Baur et al.* (1944) für Deutschland definiert und von *Hess und Brezowsky*

---

<sup>1</sup> Nesting (engl.): Verkettung und Antrieb von Modellen mit unterschiedlichen Auflösungen und Abmessungen. Beim passiven (oder one-way) Nesting wird nur das kleinere Skalige Modell mit Daten des größere Skaligen Modells angetrieben. Beim aktiven (oder two-way) Nesting werden Ergebnisse des Modells mit der feineren Auflösung an das Modell mit größerer Auflösung zurückgegeben und in den nächsten Simulationsschritt einbezogen.

(1977) weiterentwickelt. Diese Wetterlagen stellen typische Witterungssituationen dar, die mit bestimmten Wettererscheinungen in Deutschland verknüpft sind. Um diese Methode auf andere Gebiete übertragbar zu machen, entwickelte *Lamb* (1972) eine Klassifikation von Windrichtungsklassen (Circulation Weather Types, CWTs). Zu diesem Zweck wird die mittlere Strömungssituation einer Episode von mehreren Tagen Dauer mittels der durch den Gradienten des Bodendruckfeldes approximierten Strömungsrichtung ausgedrückt. Daraus ergeben sich acht direktionale (N, NO, O, SO, S, SW, W, NW) und zwei zirkuläre (zyklonal, antizyklonal) Klassen und deren Mischformen. Das Verfahren der subjektiven Bestimmung solcher Windrichtungsklassen wurde von *Jones et al.* (1993) durch eine objektive Berechnung ersetzt. Diese Analysemethode setzt die Annahme voraus, dass sich eine Wetterlage mehrere Tage quasistationär hält, bevor sie in einem vergleichsweise kurzen Zeitraum von etwa einem Tag in eine andere Wetterlage übergeht. Dadurch stellen die Wetterlagen oder CWTs zwar die großskalige atmosphärische Lage gut dar, sie können aber die Entwicklungen und Zugbahnen kleinerer Tiefdruckgebiete oder Randstörungen, sowie den Durchzug von Frontensystemen nicht wiedergeben. Um auch instationäre Situationen repräsentieren zu können, werden von *Fuentes und Heimann* (2000) und *Weimer* (2003) multivariate Analysemethoden für Episoden von mehreren Tagen Dauer angewendet, die eine zeitliche Entwicklung der Felder berücksichtigen.

### **1.3 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit**

In dieser Arbeit wird beispielhaft für aride und semi-aride Gebiete ein Teil des hydrologischen Kreislaufs im Drâa-Tal in Südmarokko untersucht. Eine realistische Abschätzung der Evapotranspiration ist in ariden und semi-ariden Gebieten für die Untersuchung des hydrologischen Kreislaufs essentiell. Da Messungen der Evapotranspiration i. A. nicht in ausreichender räumlicher Auflösung und zeitlicher Kontinuität vorliegen, bietet die Simulation mit meteorologischen Modellen die beste Möglichkeit, räumliche Felder dieser Größe zu erstellen. Für die Qualität der Modellergebnisse ist die Repräsentation der Interaktion von Atmosphäre und Oberfläche (Boden und Bewuchs) von entscheidender Bedeutung. Probleme bei der realistischen Simulation der Evapotranspiration treten z. B. durch die nicht vorhandene Wiedergabe tief liegender Grundwasserreservoirs auf, die den Pflanzen zur Transpiration zur Verfügung stehen. Ebenso ist die Darstellung von Bewässerungsmaßnahmen in meteorologischen Modellen noch nicht ausreichend untersucht. Um den hydrologischen Zyklus in ariden und semi-ariden Gebieten zu erfassen, sind Untersuchungen auf unterschiedlichen Zeitskalen, von Stunden bis zu Jahrzehnten, notwendig. Eine Methode längerfristige Untersuchungen durchzuführen, ist die statistisch-dynamische Regionalisierung. In der hier vorgelegten Untersuchung werden Windrichtungsklassen

als Steuerparameter auf der großen Skala für die statistisch-dynamische Regionalisierung verwendet. Dadurch können die unterschiedlichen Niederschlagsmechanismen berücksichtigt werden, die in der Region von Bedeutung sind. Darüber hinaus kann die Methode auf Klimaszenarien angewendet werden und bietet die Möglichkeit der Repräsentation geänderter Landoberflächen. Die Untersuchungsmethoden von Klimafaktoren, wie z. B. der Evapotranspiration, sollen auch auf Klimaszenarien anwendbar sein, um zukünftige Entwicklungen abschätzen zu können. Auch die Möglichkeit der Repräsentation geänderter Landoberflächen zur Untersuchung künftiger Entwicklungen ist von großer Bedeutung.

Die vorliegende Arbeit setzt bei der Simulation der Evapotranspiration und der Erstellung einer Verdunstungsklimatologie in einem semi-ariden Untersuchungsgebiet folgende Schwerpunkte:

1. Um die Bodenfeuchte in ariden und semi-ariden Gebieten angemessen darzustellen, werden in dieser Arbeit zwei Modellerweiterungen entwickelt und vorgestellt, die fehlenden Prozesse mit einfachen Mitteln in meteorologische Modelle zu implementieren. Dies gilt für tief liegender Grundwasserreservoirs, die zur Transpiration angezapft werden, sowie für die Wiedergabe von Bewässerungsstrategien.
2. In dieser Arbeit wird mit der Methode der statistisch-dynamischen Regionalisierung ein Verfahren genutzt und bewertet, das es ermöglicht, aus großskaligen Datenreihen eine Klimatologie für das Untersuchungsgebiet zu erstellen. Dafür werden meteorologische Felder der beteiligten Skalen miteinander verknüpft, die für die Bestimmung der Evapotranspiration von wesentlicher Bedeutung sind.
3. Die vorgestellte Methode der Klimatologieerstellung ist in weiterführenden Arbeiten auf Klimaszenarien anwendbar und bietet zusätzlich die Möglichkeit, den Einfluss von Landnutzungsänderungen auf das Klima zu untersuchen.

Für das Untersuchungsgebiet werden meteorologische Simulationen mit dem nicht-hydrostatischen mesoskaligen Modell FOOT3DK realisiert. Zu diesem Zweck wird eine meteorologische Modellkette eingeführt, mittels derer globale atmosphärische Analysen des Deutschen Wetterdienstes (DWD) in zwei Nestingschritten auf das Flusseinzugsgebiet des Wadi Drâa verfeinert werden. Die Simulation mit FOOT3DK liefert hochaufgelöste Felder der Evapotranspiration für das Untersuchungsgebiet. Aus diesen Simulationen wird mittels statistisch-dynamischer Regionalisierung die aktuelle klimatologische Evapotranspiration für die Region berechnet.

Im zweiten Kapitel dieser Arbeit wird zunächst das Untersuchungsgebiet vorgestellt und seine wesentlichen Eigenschaften besprochen. Daran anschließend wird das Forschungsprojekt

IMPETUS vorgestellt, in dessen Rahmen diese Arbeit eingebettet ist, und eine Einordnung der Arbeit in diesen Kontext gegeben. Das dritte Kapitel erläutert die verwendeten Methoden und Daten. Hier wird das Modell FOOT3DK beschrieben, die Nestingkette erläutert und die Methode der statistisch-dynamischen Regionalisierung näher betrachtet. Anschließend werden die für die Untersuchung genutzten Daten beschrieben.

Im Ergebnisteil werden zunächst Simulationen für einen konkreten Termin gezeigt und das Problem der begrenzten Datenverfügbarkeit für Boden- und Oberflächenparameter bearbeitet (Kap. 4). Neue Datensätze der Bodenart und Landnutzung im Untersuchungsgebiet werden vorgestellt und implementiert. Um dem Problem einer trockenen oberen Bodenschicht bei gleichzeitig stattfindender Transpiration der Pflanzen im Untersuchungsgebiet Rechnung tragen zu können, wird eine Methode zur realistischeren Darstellung tiefer Grundwasservorkommen im Modell entwickelt und angewandt. Darüber hinaus findet eine Methode Verwendung, die es ermöglicht, die im Untersuchungsgebiet stattfindende Form der Bewässerung der Oase wiederzugeben.

Zur Erstellung einer Klimatologie der Verdunstung im Untersuchungsgebiet wird die Methode der statistisch-dynamischen Regionalisierung verwandt. Dazu wird zunächst in Kapitel fünf auf der Basis von täglichen Feldern des Bodendrucks eine klimatologische Verteilung von atmosphärischen Strömungsmustern in der betrachteten Region erstellt. Die meteorologische Interpretierbarkeit der ermittelten Klassen, die jahreszeitliche Verteilung ihres Auftretens und besonders ihr Zusammenhang mit Niederschlag in der Untersuchungsregion werden in diesem Kapitel ebenfalls dargestellt. Anschließend wird die Auswahl der Repräsentanten der resultierenden Strömungsklassen dargestellt und die Simulationen für diese Termine werden beschrieben. Ein im Untersuchungszeitraum liegendes Starkniederschlagsereignis wird in einem Unterkapitel gesondert betrachtet. Die Ergebnisse der Klimatologie werden ebenfalls im Kapitel fünf vorgestellt. Zuletzt werden in Kapitel sechs die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ihre Bedeutung für die Forschung diskutiert. Als Ausblick werden mögliche Anwendungen der Untersuchungsergebnisse dargestellt, sowie noch offene Fragen thematisiert und verschiedene weiterführende Arbeiten vorgeschlagen.