

5 Erstellung einer Verdunstungsklimatologie

In diesem Kapitel wird mit der in Kap. 3.4 vorgestellten Methode der statistisch-dynamischen Regionalisierung eine Verdunstungsklimatologie berechnet. Zu diesem Zweck werden die Parameter Wetterlage und Niederschlag an der Station Ouarzazate ausgewählt, da sie für die Verdunstungscharakteristik wesentlich sind und in ausreichend langen Zeitreihen für eine statistische Analyse vorliegen. Nach der objektiven Methode von *Jones et al.* (1993) wird eine Statistik der Wetterlagen (Circulation Weather Types - CWTs) aus Bodendruckdaten der Jahre 1958 bis 1997 erstellt. Für diese Wetterlagen (oder Windrichtungsklassen) wird ein mittlerer Jahresgang ermittelt und mit Witterungscharakteristiken in der Untersuchungsregion verglichen. Anschließend werden die CWTs mit dem Niederschlag an der Station Ouarzazate für den Zeitraum 1978 bis 1997 korreliert. Die berechneten Windrichtungsklassen lassen sich mit typischen Witterungsverhältnissen in der Region in Verbindung bringen. Dies ist nicht selbstverständlich, da in die Approximation des realen Windes in Bodennähe durch den bodengeostrophischen Wind bereits einige Näherungen eingehen. Darüber hinaus werden die Bodendruckdaten in einer Auflösung von $5^\circ \times 10^\circ$ genutzt. In dieser Auflösung ist das Atlas-Gebirge deutlich niedriger dargestellt, als in der Realität und seine Wirkung als Wetterscheide wird unterschätzt. Zudem wurde hier nur der 00 UTC Termin zur Bestimmung der Zirkulationsklassen genutzt, da die Niederschlagsdaten ebenfalls nur mit täglicher Auflösung vorliegen.

Für die statistisch-dynamische Regionalisierung werden dynamisch gekoppelte Simulationen für typische Vertreter der einzelnen Klassen auf der Skala der statistischen Untersuchung durchgeführt. Um die Anzahl der benötigten Simulationen einzugrenzen und Redundanzen zu vermeiden, werden die CWTs in Gruppen mit ähnlichen Niederschlags- und Verdunstungscharakteristiken zusammengefasst. Um sowohl den Jahresgang, als auch den Zusammenhang mit dem Niederschlag in die Klimatologie einbeziehen zu können werden nach Möglichkeit aus jeder resultierenden Gruppe zwei Tage mit und zwei Tage ohne Niederschlag zur Simulation ausgewählt. Zusätzlich werden vier Tage mit ‚Bewässerung‘ simuliert. Die Rekombination zu einer Verdunstungsklimatologie erfolgt, indem die Simulationsergebnisse gewichtet mit der Auftrittshäufigkeit der Gruppe, die durch den jeweiligen Vertreter repräsentiert wird, addiert werden. Zur Bewertung der Ergebnisse dieser Methode werden zunächst Rekombinationen für ausgesuchte Jahre (das Jahr, aus dem die Repräsentanten stammen, 2002, ein Trockenjahr, 1984 und ein Feuchtjahr, 1989) durchgeführt und diskutiert. Anschließend werden die Ergebnisse der Verdunstungsklimatologie für den Zeitraum 1978 bis 1997 vorgestellt.

5.1 Statistik der Wetterlagen

Als Basis der Statistik dienen Wetterlagen (CWTs), die nach der in Kap. 3.3 beschriebenen Methode nach Jones et al. (1993) für den Zeitraum 1958 bis 1997 aus Bodendruckverteilungen des National Centre for Atmospheric Research (NCAR) erstellt wurden.

Die mittleren Bodendruckverteilungen für die Sommer- (April bis September) und Wintermonate (Oktober bis März) des Zeitraumes 1958 bis 1997 für die Region sind in Abb. 5.1 dargestellt. Sie zeigen ein ausgedehntes Hochdruckgebiet über dem Nordatlantik, das Azorenhoch, dessen östliche Ausläufer sich bis nach Südeuropa und Nordafrika erstrecken. Nördlich davon befindet sich ein Tiefdruckzentrum bei Island. Das Hoch ist in den Sommermonaten deutlich stärker, während das Tief in den Wintermonaten ausgeprägter ist. Der meridionale Druckgradient über dem Nordatlantik ist im Winter größer als im Sommer.

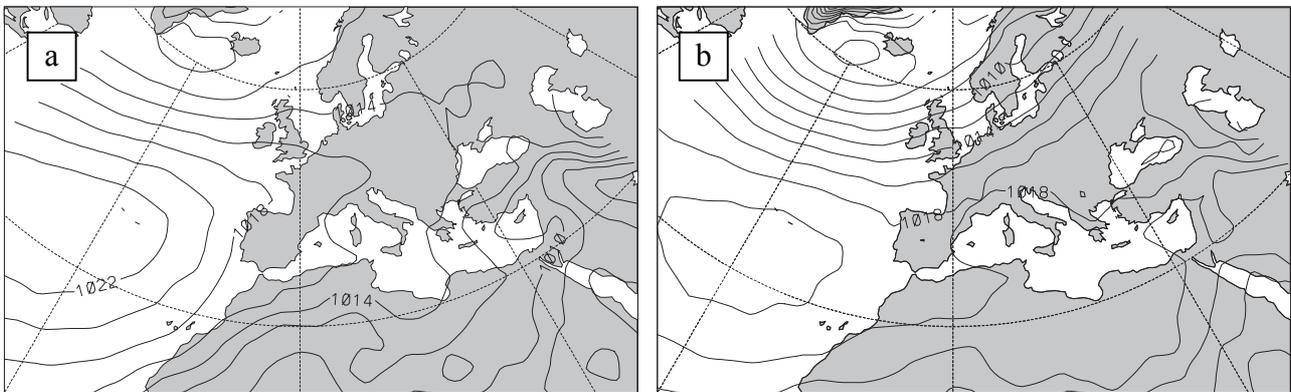


Abbildung 5.1: mittlere Bodendruckverteilungen für a: Sommer (Apr. bis Sept.) und b: Winter (Okt. bis März) im Analysezeitraum, 1958-1997, Isolinienabstand ist 2 hPa.

Unter der Näherung des bodengeostrophischen Windes lassen sich aus Druckmustern Windrichtungen ableiten. Unter dieser Annahme ist für das Untersuchungsgebiet in Nordwest-Afrika im Mittel von östlichen bis nordöstlichen Winden auszugehen. Mit der in Kap. 3.4 vorgestellten Methode werden Abweichungen von dieser mittleren Druckverteilung und damit Abweichungen von der mittleren Anströmung ermittelt. Anhand dieser Abweichungen werden alle Tage des Zeitraumes 1958 bis 1997 in die zehn Windrichtungsklassen (NO, O, SO, S, SW, W, NW, N, zyklonal, antizyklonal), sowie in Mischklassen aus direktionalen und zirkulären Klassen eingeteilt. In diesem Kapitel werden nur die Ergebnisse vorgestellt und diskutiert, die ohne unklassifizierte Termine erzielt werden. Die in Kap. 3.4 vorgestellte Möglichkeit, Schwachwindsituationen als unklassifizierte Tage zusammenzufassen zeigt keine signifikanten Abweichungen von den im weiteren dargestellten Zusammenhängen. Um alle Tage klassifizieren zu können werden daher die Schwachwindsituationen ebenfalls in Klassen eingeteilt. Bei der

Auswahl der Repräsentanten (Kap. 5.2) werden jedoch die Schwachwind Situationen ausgeschlossen.

Die mittleren Bodendruckfelder der einzelnen Klassen, sowie die zugehörigen Anomalien sind im Anhang abgebildet (Abb. A.1 und A.2 für Winter, A.3 und A.4 für Sommer). Saisonale Unterschiede in den Aussagen über die CWTs und ihren Zusammenhang mit dem Niederschlag werden im Text dargestellt. Der Jahresgang der Auftrittswahrscheinlichkeiten der einzelnen Druckmuster ist in Abb. 5.2 a dargestellt. Zur Untersuchung des Zusammenhanges der Windrichtungsklassen mit dem Niederschlag im Untersuchungsgebiet werden für den Zeitraum 1978 bis 1997 die täglichen Windrichtungsklassen mit dem Niederschlag an den Stationen Ouarzazate (Abb. 5.2 b), Er-Rachidia (Abb. 5.3 a) und Bechar (Abb. 5.3 b) verglichen (zur Position der Stationen vgl. Abb. 3.3). Neben der durchschnittlichen Niederschlagsmenge pro CWT und Monat (Abb. 5.2 b und 5.3 a und b), wird auch die Korrelation der Klassen mit der Anzahl von Niederschlagstagen (Abb. 5.4 bis 5.6) an den Stationen berücksichtigt.

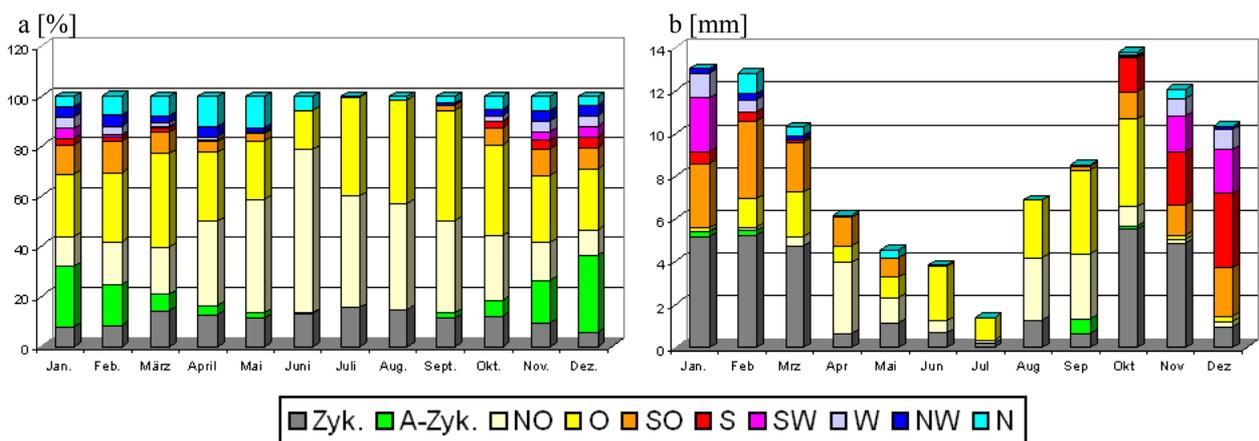


Abbildung 5.2: a: Auftrittshäufigkeit [%] der CWTs (Farben) pro Monat 1958 bis 1997, berechnet für 30°N, 5°W; b: mittlere Niederschlagsmenge [mm] pro CWT und Monat 1978 bis 1997, Station Ouarzazate (30°56'N, 6°54'W)

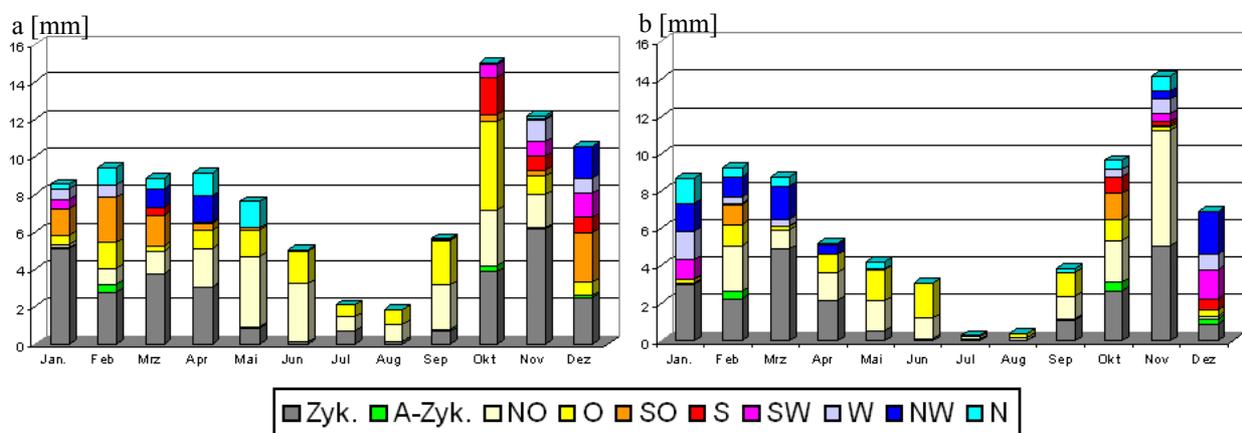


Abbildung 5.3: Mittlere Niederschlagsmenge [mm] pro CWT und Monat 1978 bis 1997; a: Station Er-Rachidia (31°59'N, 4°42'W); b: Station Bechar (31°37'N, 2°14'W)

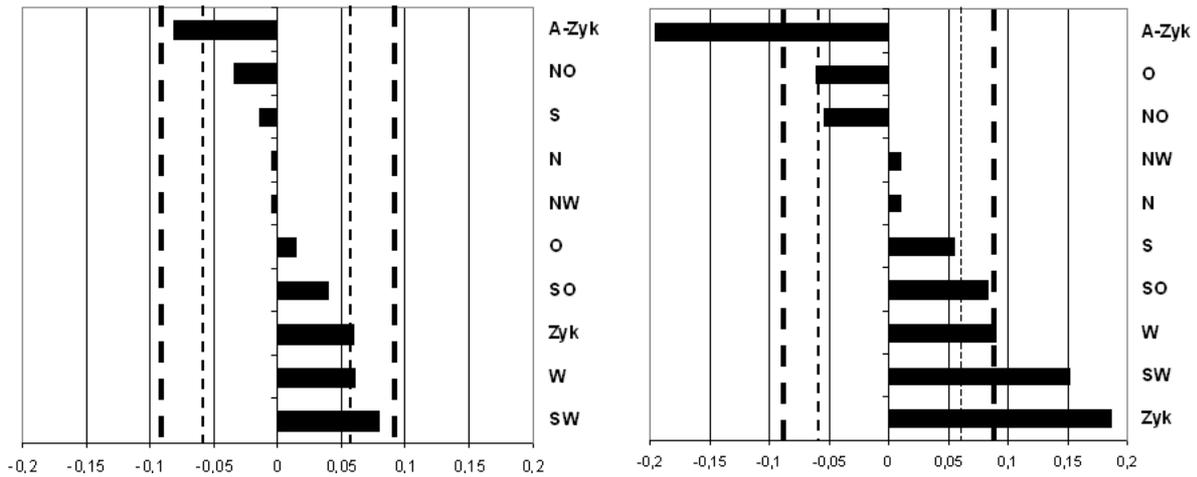


Abbildung 5.4: Korrelationen der einzelnen CWTs mit dem Auftreten von Niederschlagstagen an der Station Ouarzazate (30°56'N, 6°54'W) für den Zeitraum 1978 bis 1997, in a: für das gesamte Jahr, in b: für die Wintermonate Okt. bis März. Dünne gestrichelte Linie: 95 % Signifikanzniveau, dicke gestrichelte Linie: 99 % Signifikanzniveau. Signifikanztest: f-Test.

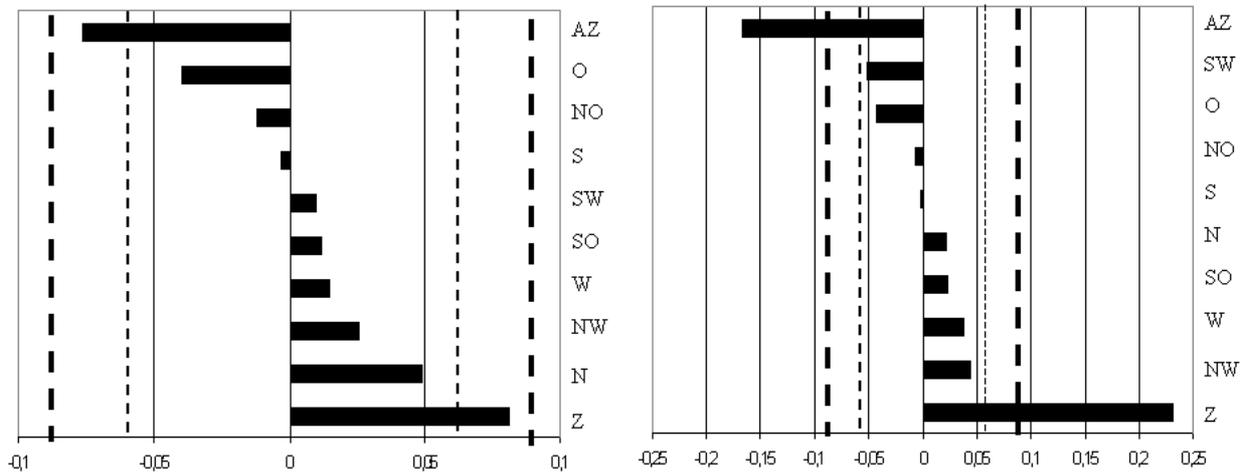


Abbildung 5.5: Wie Abb. 5.4 für die Station Er-Rachidia (31°59'N, 4°42'W)

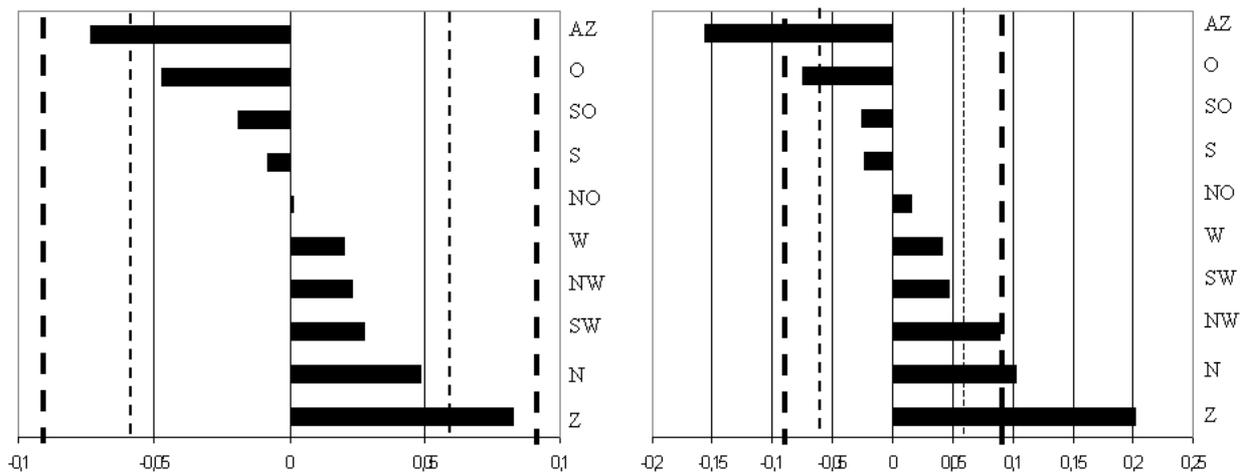


Abbildung 5.6: Wie Abb. 5.4 für die Station Bechar (31°37'N, 2°14'W)

Die mittlere Niederschlagsmenge für den Zeitraum 1978 bis 1997 beträgt für die Station Ouarzazate 103 mm. Damit ist der mittlere Niederschlag für diesen Zeitraum geringer, als für den

Zeitraum 1951 bis 2001 (siehe Abb. 2.2). Der mittlere Niederschlag der Stationen Er-Rachidia und Bechar beträgt 74,4 mm und 95,77 mm für diesen Zeitraum.

Im Folgenden werden die verschiedenen Windrichtungsklassen meteorologische eingeordnet und die synoptischen Situationen diskutiert, die zu Niederschlägen in den einzelnen Klassen führen.

CWT: Nordost (NO)

Bei sommerlichen Hochdruckwetterlagen über der iberischen Halbinsel und dem westlichen Mittelmeer dominieren in der Untersuchungsregion Winde aus Nordosten (Abb. A.1 und A.3 a und b). Diese Windrichtungsklasse stellt mit über 70% im Juni und 44 bis 54% in den Monaten Mai, Juli und August die häufigste Wetterlage während des Sommers dar, was dazu führt, dass die Abweichung vom mittleren Druckfeld im Sommer geringer ist als 2 hPa (Abb. A.3 b). An den Stationen Er-Rachidia und Bechar fallen an Tagen mit dieser Anströmung von Februar bis November geringe Mengen Niederschlag (max. 6,17 mm im November in Bechar, Abb. 5.3 b), an der Station Ouarzazate ist der Beitrag dieser Klasse zum Niederschlag noch geringer (max. 3,34 mm im April, Abb. 5.2 b). Die Korrelation dieser Klasse mit dem Auftreten von Niederschlagstagen ist für keine der Stationen signifikant (Abb. 5.4 bis 5.6). Der Niederschlag an Tagen mit dieser CWT resultiert überwiegend aus Mischklassen mit der zyklonalen Anströmung. Darüber hinaus können Anströmungen aus Nordosten in einzelnen Fällen Niederschlag mit sich bringen, wenn über dem erwärmten Mittelmeer Feuchte in die Atmosphäre eingebracht wird und diese Feuchte entlang der Südflanke des Atlas' in die Untersuchungsregion advehiert wird. Dort kann besonders im Sommer und Frühherbst durch Aufheizung des Bodens ein Hebungsmechanismus vorliegen, der die Feuchte zur Kondensation und zum Ausregnen bringt. Da die Station Ouarzazate weiter westlich liegt als die anderen beiden Stationen, sind die Beiträge dort geringer (siehe Abb. 3.3).

CWT: Ost (O)

Bei Anströmungen aus Osten (Abb. A.1 und A.3 c und d) erstreckt sich das Azorenhoch weit nach Osten, insbesondere über dem westlichen und zentralen Mittelmeer herrscht Hochdruck im Meeresniveau. Diese Klasse tritt das ganze Jahr über relativ häufig auf (mehr als 13% jedes Monats), in den Monaten Juli bis September ist sie mit über 35% am häufigsten vertreten (Abb. 5.2 a). Auch diese Klasse kann in einzelnen Fällen Niederschlag bringen (Abb. 5.2 b und Abb. 5.3 a und b). Die Feuchte stammt an diesen Tagen ebenfalls aus dem Mittelmeergebiet, wobei die Hebung am Südhang des Atlas stattfinden kann. Gemessen an ihrer Aufttrittshäufigkeit steht die östliche Windrichtungsklasse aber nur sehr selten mit Niederschlag in Verbindung, ihre Korrelation mit der Anzahl der Niederschlagstage ist im Winter für die Stationen Ouarzazate und Bechar negativ (95% Signifikanzniveau: dünne gestrichelte Linien in Abb. 5.4 b und 5.6 b).

CWT: Südost (SO)

Eine Anströmung aus Südosten ist mit einer Erhöhung des Drucks über Mitteleuropa und dem Mittelmeer und antizyklonaler Strömung über der Sahara verbunden. Gleichzeitig zeigt sich eine schwach negative Druckanomalie über dem Atlantik vor der marokkanischen Küste (Abb. A.1 und A.3 e und f). Diese Anomalie ist in vielen Fällen mit schwachen Trögen oder Tiefdruckgebieten vor der marokkanischen Küste verbunden. An der Südseite eines solchen Troges oder Tiefdruckgebietes kann Feuchtigkeit in das Untersuchungsgebiet advehiert und dort am südlichen Hang des Atlas' gehoben werden. Diese Klasse tritt eher im Winter auf (November bis März: 8 bis 11%, Abb. 5.2 a), im Sommer ist sie kaum vertreten. Tage, die zu dieser Windrichtungsklasse gehören, bringen einen erheblichen Teil des Niederschlages an der Station Ouarzazate (max. 3,75 mm im Februar, Abb. 5.2 b), etwas weniger an der Station Er-Rachidia (max. 2,62 mm im Dezember, Abb. 5.3 a) und fast keinen an der Station Bechar (max. 1,4 mm im Oktober, Abb. 5.3 b). Dies ist durch die geographische Position der Stationen zu erklären: je weiter die Station von der Westküste des afrikanischen Kontinents entfernt ist, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass der beschriebene Mechanismus zu Niederschlag führen kann. Die Korrelation mit dem Auftreten von Niederschlagstagen an der Station Ouarzazate ist im Winterhalbjahr auf dem 95% Niveau positiv signifikant (Abb. 5.4 b). Für das ganze Jahr, sowie für die anderen Stationen ist die Korrelation dieser Klasse mit Niederschlagstagen nicht signifikant.

CWT: Süd (S)

Zu einer Anströmung aus Süden kommt es, wenn ein Trog vor der marokkanischen Küste liegt (Abb. A.1 und A.3 g und h). Die negative Druckanomalie über dem Atlantik hat eine ähnliche Position wie für Anströmungen aus Südosten, ist jedoch stärker ausgeprägt. Die positive Druckanomalie über der Sahara ist schwächer, im Winter (Abb. A.1 h) über Europa jedoch stärker ausgeprägt, als bei der südöstlichen Anströmung. Diese CWT tritt nur in den Monaten Oktober bis März mit mehr als 1% (max. 4,7% im November) auf. Für die Monate Juli bis September ist ihre Auftretswahrscheinlichkeit über den gesamten analysierten Zeitraum von 40 Jahren Null (Abb. 5.2 a). Trotz ihres seltenen Auftretens bringen Tage dieser Klasse mit bis zu 3,46 mm (Dezember, Abb. 5.2 b) einen erheblichen Teil der mittleren Niederschläge an der Station Ouarzazate. An der Station Er-Rachidia ist die Niederschlagsmenge mit 2,03 mm deutlich geringer (Oktober, Abb. 5.3 a), in Bechar ist diese Klasse nicht von wesentlicher Bedeutung für das Niederschlagsaufkommen (0,9 mm im Oktober, Abb. 5.3 b). Die geringe Korrelation mit der Anzahl der Niederschlagstage (Abb. 5.4 bis 5.6, nicht signifikant) zeigt, dass es sich bei Niederschlägen an Tagen mit südlicher Anströmung, insbesondere an der Station Ouarzazate, um relativ große Niederschlagsmengen handelt.

CWT: Südwest (SW)

Ebenfalls mit Trögen vor der marokkanischen Küste steht die Klasse der Anströmungen aus Südwesten in Verbindung (Abb. A.1 und A.3 i und j). Die negative Druckanomalie vor der marokkanischen Küste ist jedoch deutlich stärker ausgeprägt, als bei südlichen Anströmungen und erstreckt sich über die Iberische Halbinsel und Marokko, im Sommer sogar über den größten Teil Europas. Im Winter ist die positive Druckanomalie weiter nach Norden verschoben und befindet sich über Schottland und Island. Diese CWT tritt nur zwischen Oktober und Mai auf, von Juni bis September ist sie im gesamten Untersuchungszeitraum 1958 bis 1997 nicht analysiert worden (Abb. 5.2 a). Sie trägt jedoch mit bis zu 2,5 mm im Januar in Ouarzazate einen Anteil zum Niederschlag an den Stationen bei (Abb. 5.2 b und 5.3 a und b). An der Station Ouarzazate ist diese Klasse für das Winterhalbjahr deutlich über 99% signifikant positiv mit dem Auftreten von Niederschlagstagen korreliert. Die Korrelationen an den anderen Stationen sind nicht signifikant.

Die Klassen SO, S und SW stehen mit weit nach Süden reichenden Trögen vor der marokkanischen Küste in Verbindung, an deren Vorderseite warme, feuchte Luft vom Atlantik in das Untersuchungsgebiet transportiert werden kann. Besonders effektiv ist dieser Mechanismus zur Niederschlagsgeneration, wenn in der mittleren Troposphäre Luft aus dem Ausströmbereich konvektiver Wolkencluster südlich der Sahara angezapft und entlang der Westküste des afrikanischen Kontinents nach Norden transportiert werden kann (siehe *Knippertz, 2003a*).

CWT: West (W)

Westliche Strömung im Untersuchungsgebiet ist mit einer negativen Druckanomalie vor der Küste der iberischen Halbinsel verbunden, die sich über Westeuropa und Marokko erstreckt (Abb. A.2 und A.4 a und b). Auch diese Klasse tritt nur von Oktober bis März mit Wahrscheinlichkeiten über 1% auf, von Juni bis Sept. ist sie im analysierten Zeitraum nicht aufgetreten (Abb. 5.2 a). Ihr Anteil am Niederschlagsaufkommen ist geringer, als der Beitrag der SO, S und SW Anströmungen (1,14 mm im Januar in Ouarzazate, 1,52 mm im Januar in Bechar und 1,19 mm im November in Er-Rachidia). Ihr Auftreten ist an der Station Ouarzazate signifikant positiv mit Niederschlagstagen korreliert (Abb. 5.4), an den beiden anderen Stationen nicht. Dies ist mit Advektion feuchter Luft vom Atlantik zu erklären, die bei geeigneten Hebungsbedingungen zu Niederschlag führen kann. Je größer die Entfernung zwischen der Station und der Küste ist, desto geringer ist der Zusammenhang mit dem Niederschlag in dieser Klasse.

CWT: Nordwest (NW)

Strömungen im Untersuchungsgebiet aus Nordwesten sind mit einem Tiefdruckgebiet oder Trog über der iberischen Halbinsel und dem westlichen Mittelmeer verbunden, auf dessen Rückseite Luft über den Atlas ins Untersuchungsgebiet transportiert wird (Abb. A.2 und A.4 c und d). Infolge

des adiabatischen Absinkens an der Südflanke des Hohen Atlas, sowie aus der Tatsache, dass es sich bei diesem Strömungsmuster i.A. um Trogrückseiten handelt die mit Absinkbewegungen assoziiert sind, ist für diese Windrichtungsklassen nicht mit Niederschlag zu rechnen. Die nordwestlichen Anströmungen kommen in den Monaten Juni bis Sept. mit weniger als 1% vor, in den anderen Monaten mit Wahrscheinlichkeiten von bis zu 4%. Der Beitrag dieser Windrichtungsklasse zur mittleren Niederschlagsmenge in Ouarzazate ist vernachlässigbar (Abb. 5.2 b). An den Stationen Er-Rachidia (1,64 mm im Dezember, Abb. 5.3 a) und Bechar (2,25 mm im Dezember, Abb. 5.3 b) kommt es im Winterhalbjahr zu Niederschlägen an Tagen dieser CWT. Dies kann auf Mischklassen mit zyklonaler Strömung zurückgeführt werden, oder in Einzelfällen auf Zyklognese im Lee des Atlas'. An der Station Bechar ist diese Klasse im Winter signifikant positiv mit dem Auftreten von Niederschlagstagen korreliert. Die Feuchte für diese Niederschläge stammt aus dem Mittelmeerraum.

CWT: Nord (N)

Bei Anströmungen aus Norden liegt ebenfalls eine Trogrückseite über dem Untersuchungsgebiet, die Strömung ist in diesem Fall noch stärker meridional geprägt, als bei der nordwestlichen Klasse (Abb. A.2 und A.4 e und f). Die nördliche CWT zeigt maximale Auftrittswahrscheinlichkeiten im Frühling und Frühsommer (Februar bis Juni, Abb. 5.2 a). Ihr Beitrag zum Niederschlag ist auf Mischklassen mit der zyklonalen Strömung, sowie auf einzelne Tage mit Zyklognese im Lee des Atlas' zurückzuführen. Ähnlich wie bei der Entstehung der sog. Sharav-Zyklonen oder Saharischen Tiefdruckgebiete können sich hier durch den Transport von positiver Vorticity über den Atlas kleinskalige Zyklonen entwickeln. Die saisonale Verteilung dieser Ereignisse deckt sich im wesentlichen mit dem Auftrittsmaximum der Sharav-Zyklonen im Frühjahr (*Alpert und Ziv, 1989; Egger et al., 1995*). Aufgrund der großskaligen Strömung und der lokalen Bodendruckverteilung kann für diese Fälle daher der gleiche Entstehungsmechanismus und die gleiche Feuchtequelle wie für Sharav-Zyklonen angenommen werden. Auch diese CWT ist an der Station Bechar im Winter signifikant positiv mit dem Auftreten von Niederschlagstagen korreliert (Abb. 5.6 b).

CWT: Zyklonal (Z)

Tage mit zyklonaler Wetterlage sind durch eine negative Bodendruckanomalie im Zentrum des Berechnungsgebietes gekennzeichnet (Abb. A.2 und A.4 g und h). Sie treten das ganze Jahr hindurch mit Wahrscheinlichkeiten von bis zu 10% auf (März: 10,97%, sonst um 5%, Abb. 5.2 a). Im Sommer handelt es sich bei Tagen mit dieser Windrichtungsklasse häufig um Hitzetiefs, die nicht mit Niederschlag in Verbindung stehen. In den Wintermonaten Oktober bis März bringen Tage dieser Zirkulationsklasse jedoch im Mittel einen wesentlichen Teil der Niederschlagssumme

(6,14 mm im November in Er-Rachidia, 5.3 a). Die positive Korrelation dieser Klasse mit dem Auftreten von Niederschlagstagen überschreitet für alle drei Stationen im Winter das 99% Signifikanzniveau deutlich. Die zyklonale Strömung stellt also einen wirksamen Mechanismus der Niederschlagsgenerierung in der Region dar.

CWT: Antizyklonal (A)

Bei der antizyklonalen Klasse (Abb. A.2 und A.4 i und j) ist der Luftdruck über dem Zentrum der Berechnung erhöht. Sie tritt besonders häufig im Winter auf; in den Monaten Dezember und Januar fallen klimatologisch über 30% der Tage in diese Klasse. Im Sommer treten Tage mit dieser Anströmrichtung nur selten auf: in den Monaten Juli und August liegt die Auftrittswahrscheinlichkeit unter 1% (Abb. 5.2 a). Diese Klasse ist im Allgemeinen nicht mit Niederschlag verbunden. Die Korrelation dieser CWT mit dem Auftreten von Niederschlagstagen zeigt an allen drei Stationen für das gesamte Jahr einen zu 95%, für das Winterhalbjahr deutlich über 99% signifikanten negativen Zusammenhang. Das mit der positiven Bodendruckanomalie einhergehende Absinken der Luft unterbindet effektiv die Bildung von Niederschlag.

Die Auswertung des Zusammenhanges zwischen den Windrichtungsklassen und dem Niederschlag an den Stationen Ouarzazate, Er-Rachidia und Bechar zeigt neben einigen gemeinsamen Charakteristiken der Region (positive Korrelation der zyklonalen CWT, negative Korrelation der antizyklonalen CWT mit dem Niederschlag) auch deutliche Unterschiede. In den Klassen SO, S und SW wird die notwendige Feuchte durch Tröge oder Tiefdruckzentren vor der marokkanischen Küste auf den Kontinent advehiert. Die Bedeutung dieses Mechanismus' für den Niederschlag nimmt von Westen nach Osten ab. Dagegen kann östlich des Hauptkamms des Atlas' Feuchte aus dem Mittelmeer nach Süden advehiert werden. Diese kann mit einem Hebungsmechanismus, z. B. durch Zyklogenese im Lee des Atlas', Niederschlag an den weiter östlich gelegenen Stationen bringen.

Um die unterschiedlichen Charakteristiken an den Stationen nicht zu vermischen, wird in der statistisch-dynamischen Regionalisierung nur eine Station als Niederschlagsindikator genutzt. Dazu wird die Station Ouarzazate ausgewählt, da sie nah am Simulationsgebiet liegt und daher zu erwarten ist, dass sie die dortigen Verhältnisse am Besten repräsentiert. Auch wenn die Verwendung einer einzelnen Messstation zur Erstellung dieser Statistik gerade für konvektive Situationen erhebliche Unsicherheiten mit sich bringt, liefern die Ergebnisse ein plausibles Bild der meteorologischen Prozesse im Untersuchungsgebiet. Es kann daher angenommen werden, dass die Analyseverfahren zur Auswahl von Repräsentanten typischer Wettersituationen im Untersuchungsgebiet geeignet ist.

Um die Anzahl der zu simulierenden Repräsentanten möglichst gering zu halten, werden einige der Windrichtungsklassen in Gruppen zusammengefasst, die gemeinsame Charakteristiken aufweisen. Anströmungen aus Nordosten und Osten werden zusammengefasst, da beide Klassen mit einer Ausdehnung des Azoren Hochs nach Osten über das Mittelmeer assoziiert sind. Beide CWTs stellen im Sommer den überwiegenden Teil der vorkommenden Windrichtungsklassen. Sie bringen in den Übergangsjahreszeiten und im Sommer einen nicht vernachlässigbaren Teil des Niederschlages. Weiterhin werden die südlichen Anströmrichtungen (SO, S, SW) zusammengefasst. Diese Zirkulationsklassen treten nur sehr selten auf, sind aber signifikant positiv mit Niederschlag an der Station Ouarzazate korreliert. Sie treten im Sommer nur extrem selten auf, bringen aber in den Übergangsjahreszeiten und besonders im Winter den wesentlichen Teil der Niederschläge im Untersuchungsgebiet. Südliche, südöstliche und südwestliche Anströmungen stehen im Allgemeinen mit weit nach Süden reichenden Trögen der Polarfront in Zusammenhang und können unter geeigneten Bedingungen tropische Luftmassen mit hoher potentieller Energie ins Untersuchungsgebiet bringen. Diese Situation kann zu Extremniederschlägen südlich des Atlas führen. Ebenfalls zusammengefasst werden die nordwestliche und die nördliche Windrichtungsklasse. In beiden Fällen ist mit adiabatischem Absinken und Trockenheit in der Untersuchungsregion zu rechnen. Beide Klassen sind das ganze Jahr über nur in sehr geringem Maße mit Niederschlag an der Station Ouarzazate verbunden.

Unter diesen Voraussetzungen verbleiben sechs Gruppen von Windrichtungsklassen zur Nachsimulation: 1: Nordost und Ost, 2: Südost, Süd und Südwest, 3: West, 4: Nordwest und Nord, 5: zyklonal und 6: antizyklonal. Mischklassen aus direktionalen und zirkulären Klassen werden nicht getrennt berücksichtigt, sondern finden sich zu jeweils 50% in den Klassen wieder, aus denen sie sich zusammensetzen. Repräsentanten mit und ohne Niederschlag für diese Gruppen werden im folgenden Unterkapitel beschrieben.

5.2 Auswahl der Repräsentanten

Zur Nachsimulation mit dem Modell FOOT3DK stehen Simulationen des LM vom 1.11.2001 bis 31.12.2002 als Antrieb zur Verfügung. Aus diesem Zeitraum werden nach Möglichkeit jeweils zwei Tage mit und zwei Tage ohne Niederschlag pro Windrichtungsgruppe ausgewählt.

Zur Auswahl der Repräsentanten werden folgende Kriterien genutzt:

- die Auswahl der Termine wird auf Tage eingegrenzt, an denen keine Mischklasse vorliegt, um die Ergebnisse für die einzelnen Gruppen voneinander abzugrenzen.
- Schwachwindsituationen werden ebenfalls ausgeschlossen, um die typischen Eigenschaften der verschiedenen Gruppen möglichst deutlich herauszustellen.

- Ein Termin mit möglichst typischem Bodendruckfeld einer Gruppe wird anhand von Karten des Europäischen Wetterberichtes ausgewählt. Es wird kein automatisches Verfahren zur Berechnung der Übereinstimmung mit dem mittleren Druckfeld der Klasse angewendet, denn ein mittleres Druckfeld einer CWT stellt nicht unbedingt einen besonders typischen Vertreter dieser Windrichtungsklasse dar. Gerade bei Klassen, die mit Tiefdruckzentren assoziiert sind, gibt das Mittelfeld eine Druckverteilung wieder, dessen Tiefdruckzentrum ausgedehnter und dessen Minimum abgeschwächt ist. Der wesentliche Effekt, das lokale Druckminimum, wird ‚verschmiert‘ über einen größeren Bereich in dem diese Minima auftreten können.
- Nicht alle Termine werden korrekt mit oder ohne Niederschlag vom LM simuliert. Es wird daher zunächst überprüft, ob ein Tag, der laut Messdaten ein Niederschlagstag ist auch in der Simulation Niederschlag bringt und umgekehrt.
- Um die saisonale Auftrittswahrscheinlichkeit einer Windrichtungsgruppe möglichst gut abdecken, wird angestrebt, die Termine zur Nachsimulation möglichst über die typischen Jahreszeiten des Auftretens dieser Gruppe zu verteilen.

Nicht in jeder Gruppe können alle Kriterien berücksichtigt werden. Die Ursache dafür liegt in dem sehr kurzen LM Nestingzeitraum (14 Monate: 1.11.2001 bis 31.12.2002). In einigen Gruppen traten in diesem Zeitraum nicht genügend Vertreter mit und ohne Niederschlag auf, um alle Kriterien zu erfüllen.

	zyklonal	antizyklonal	NO und O	SO, S, SW	W	NW und N
mit	2.4.2002	7.12.2001	8.3.2002	10.12.2001	15.11.2002	22.5.2002
Niederschlag	6.5.2002	9.4.2002	28.8.2002	31.3.2002	-	-
Auftrittswahrscheinlichkeit	1,05726 %	0,4242 %	3,1658 %	1,46895 %	0,30321 %	0,5457 %
ohne	17.2.2002	22.1.2002	4.12.2001	6.1.2002	8.4.2002	6.3.2002
Niederschlag	6.4.2002	10.3.2002	14.7.2002	28.10.2002	23.11.2002	28.12.2002
Auftrittswahrscheinlichkeit	7,78274 %	18,3458 %	48,38 %	8,91104 %	1,28678 %	8,32882 %

Tabelle 5.1: Termine zur Nachsimulation für die verschiedenen Windrichtungsgruppen und Auftrittswahrscheinlichkeiten der Gruppen in %

In Tabelle 5.1 sind die Tage, die zur Nachsimulation genutzt werden angegeben, sowie die klimatologischen Auftrittswahrscheinlichkeiten der jeweiligen Gruppen für das ganze Jahr. Zur Erstellung der Klimatologie wird die Auftrittswahrscheinlichkeit jeder Gruppe durch die Anzahl

der jeweiligen Repräsentanten geteilt. Bodendruckkarten der einzelnen Tage aus dem Europäischen Wetterbericht sind im Anhang (Abb. A.5 bis A.8) gezeigt.

Als Repräsentanten der zyklonalen Wetterlage mit Niederschlag werden der 2.4.2002 (Abb. A.5 a) und der 6.5.2002 (Abb. A.5 b) ausgewählt. Am 2.4.2002 meldeten die Stationen JHB 0,4 mm Niederschlag, alle anderen Stationen meldeten keinen Niederschlag. Für diesen Termin wird auch in FOOT3DK in einigen Gitterboxen geringfügiger Niederschlag simuliert. Der akkumulierte Niederschlag über 24 Stunden Simulationszeit ergibt einen Gebietsmittelwert von 0,04 mm, mit Werten von maximal 0,5 mm im nordöstlichen Teil des Simulationsgebietes. Der 2.4.2002 ist der dritte Tag eines extrem ergiebigen Niederschlagsereignisses in der Region. Das gesamte Ereignis wird in einem eigenen Unterkapitel (5.3) vorgestellt. Der Termin liefert trotz relativ geringen Niederschlages relativ hohe Verdunstungswerte aufgrund des vorangegangenen Niederschlages. Als zweiter Tag mit Niederschlag in dieser Klasse wurde der 6.5.2002 ausgewählt. Die Station EMY meldete an diesem Tag 3,4 mm, die Station ASR 1,0 mm Niederschlag, an den übrigen Klimastationen blieb es an diesem Tag trocken. In der Simulation findet sich über dem größten Teil des Modellgebietes Niederschlag von weniger als 1 mm, der zunächst im Norden einsetzt und sich im Tagesverlauf nach Süden ausbreitet. Der mittlere akkumulierte Wert für das ganze Gebiet beträgt 0,265 mm, mit den höchsten Werten (2 bis 3 mm) am Nordrand. Diese befinden sich in der äußersten Reihe des Modellgebietes und sind daher möglicherweise auf Randeffekte zurückzuführen.

Der 17.2.2002 (Abb. A.5 c) und der 6.4.2002 (Abb. A.5 d) sind die einzigen Termine im Zeitraum der LM Nestingvorgaben, an denen eine rein zyklonale Strömung vorlag und weder an einer der vier im Untersuchungsgebiet liegenden Stationen Niederschlag gemeldet wurde, noch mit dem Modell Niederschlag simuliert wird. Bei allen anderen Terminen ohne Niederschlag handelt es sich um Mischformen mit direktionalen Klassen oder um Schwachwindsituationen. Im Nestingzeitraum trat kein Tag mit dieser CWT und ohne Niederschlag in den Sommermonaten auf.

Für keinen der Tage mit antizyklonaler Strömung wurde an einer der im Untersuchungsgebiet liegenden Messstationen Niederschlag gemeldet. Um Tage mit dieser Bedingung trotzdem repräsentieren zu können werden zwei Tage als Vertreter der antizyklonalen Anströmung mit Niederschlag ausgewählt, an denen in FOOT3DK geringfügiger Niederschlag simuliert wird. Dabei handelt es sich um den 7.12.2001 und den 9.4.2002. Am 7.12.2001 resultiert der Niederschlag (0,285 mm im Gebietsmittel) aus einer vertikalen Windscherung, da in Bodennähe eine antizyklonale Strömung mit nördlichen bis nordwestlichen Windrichtungen über dem nordöstlichen Teil des Untersuchungsgebietes vorliegt (Abb. A.5 e), die oberhalb von ca. 1 km Höhe in eine südwestliche Strömung über dem gesamten Untersuchungsgebiet übergeht. Die 500 hPa Karte des

Europäischen Wetterberichtes zeigt darüber hinaus starke horizontale Scherung mit westlichen Winden südlich des Atlas und einem schwachen Hochdruckgebiet über der iberischen Halbinsel, das an seiner Südseite östliche Winde induziert (ohne Abb.). Die antizyklonale Strömung, die für den 9.4.2002 analysiert wird, resultiert aus insgesamt vier bodennahen Tiefdruckgebieten, die um das Untersuchungsgebiet herum verteilt sind und daher zwischen sich eine antizyklonale Tendenz erzeugen (Abb. A.5 f). Ein stärkeres Tiefdruckgebiet, das auch in 500 hPa noch zu finden ist, befindet sich vor der portugiesischen Küste, dessen Fronten über dem Atlantik vor der portugiesischen und marokkanischen Küste liegen. Ein sehr kleines Gebiet tieferen Druckes liegt knapp östlich der Westsahara, ein ebenfalls flaches Tief befindet sich über der Sahara südöstlich des Untersuchungsgebietes und ein okkludiertes Tiefdruckzentrum befindet sich über Korsika und Sardinien. Der simulierte Niederschlag für diesen Termin beschränkt sich auf wenige Gittermaschen und liegt dort unter 1 mm/Tag. Dieses Beispiel macht deutlich, dass z. T. sehr unterschiedliche meteorologische Situationen mit der hier genutzten Zuordnungsmethode zur gleichen CWT gerechnet werden. Da an einigen Tagen aus der Klasse der antizyklonalen Strömung Niederschlag gemessen wird, werden die hier vorgestellten Beispiele als Vertreter dieser Klasse mit Niederschlag in die Klimatologie einbezogen.

Als Repräsentanten der antizyklonalen Klasse ohne Niederschlag werden mit dem 22.1.2002 (Abb. A.6 a) und dem 10.3.2002 (Abb. A.6 b) Tage aus dem Winterhalbjahr ausgesucht, da diese Wetterlage im Winter am häufigsten auftritt.

Die Gruppe der NO und O Wetterlagen mit Niederschlag wird durch die Termine 8.3.2002 (Abb. A.6 c) und 28.8.2002 (Abb. A.6 d) repräsentiert. Am 8.3.2002 wurden an den Stationen EMY 6,2 mm, JHB 1,0 mm, IRK 0,2 mm und ASR 16,8 mm Niederschlag gemessen. Mit FOOT3DK wird für diesen Tag ein Gebietsmittel von 0,152 mm Niederschlag simuliert. Der Niederschlag breitet sich im Tagesverlauf von Norden nach Süden aus und liefert fast im gesamten Simulationsgebiet 1 mm akkumulierten Niederschlag über 24 Stunden. Am 28.8.2002 meldeten die Stationen EMY 0,4 mm, IRK 0,6 mm und ASR 0,6 mm Niederschlag, die Station JHB meldete an diesem Tag keinen Niederschlag, aber am 29.8.2002 2,8 mm. Die Simulation zeigt Niederschlag im Verlauf der 24 Stunden Simulationszeit über dem gesamten Gebiet mit niedrigen Werten (zwischen 0,1 und 1 mm) in der Südhälfte und bis zu 7 mm im Nordosten. Der Mittelwert des akkumulierten Niederschlages für diesen Tag beträgt 1,85 mm.

Als Tage ohne Niederschlag in dieser Windrichtungsgruppe werden der 4.12.2001 (Abb. A.6 e) und der 14.7.2002 (Abb. A.6 f) ausgewählt, um den Jahresgang möglichst gut abzudecken.

Als Vertreter der SO, S und SW Anströmungen mit Niederschlag werden der 10.12.2001 (Abb. A.7 a) und der 31.3.2002 (Abb. A.7 b) ausgewählt. Am 10.12.2001 meldeten die Stationen EMY

3,0 mm, JHB 1,2 mm, IRK 3,0 mm und ASR 3,6 mm Niederschlag. In der FOOT3DK-Simulation ist der Niederschlag auf die nordwestliche und die südöstliche Ecke des Simulationsgebietes beschränkt und zeigt in keiner Gitterbox akkumulierte Werte über 1 mm. Um der Tatsache gerecht zu werden, dass diese Wetterlagen oftmals ergiebige Niederschläge in der Region bringen, wird zusätzlich der 31.3.2002 dazugenommen. Bei diesem Tag handelt es sich um einen Tag mit extrem hohem Niederschlag in der Region. Die Station Ouarzazate meldete 48 mm in 24 Stunden, was der höchste Wert seit Beginn der Aufzeichnungen 1978 ist. Die Station IRK meldete an diesem Tag 17,0 mm, JHB 2,4 mm, EMY 1,2 mm und ASR 1,0 mm Niederschlag. Die Stationen meldeten am darauffolgenden Tag weitere Niederschläge. Da der akkumulierte Niederschlag jeweils um 6 UTC gemeldet wird, fällt ein Teil der am 1.4. gemeldeten Niederschläge bereits am 31.3. und muss somit in der Simulation des 31.3. wiedergegeben werden. Der simulierte Niederschlag für den 31.3.2002 beträgt 4,4 mm im Gebietsmittel. Das gesamte Ereignis wird im folgenden Unterkapitel (5.3) gesondert behandelt. Ein Extremereignis dieser Größenordnung ist im Untersuchungsgebiet zwar erst einmal seit Beginn der Messungen aufgetreten, es wird aber trotzdem in die Auswahl der Repräsentanten aufgenommen, um den Tag mit geringem simuliertem Niederschlag in dieser Gruppe auszugleichen.

Anfang Januar 2002 fanden mehrere Episoden südöstlicher Anströmung ohne Niederschlag statt (1. bis 3.1., 5. bis 11.1., 20.1. und 27. bis 30.1.2002). Die Gruppe der südlichen (SO, S, SW) Anströmungen ohne Niederschlag wird durch einen Termin aus diesem Zeitraum, den 6.1.2002 (Abb. A.7 c) repräsentiert. Als zweiter Termin wird der 28.10.2002 (Abb. A.5 d) hinzugenommen. Hierbei handelt es sich um den einzigen Tag des Nestingzeitraumes außerhalb der genannten Episoden im Januar, für den bei Anströmung aus SO, S oder SW weder in den Messwerten der Klimastationen, noch in den Simulationen Niederschlag zu verzeichnen ist. Diese Windrichtungsgruppe trat im Nestingzeitraum relativ selten auf und in vielen Fällen simuliert das Modell geringe Mengen Niederschlag auch an Terminen, an denen keine der im Untersuchungsgebiet liegenden Stationen Niederschlag gemeldet hat. Da es sich bei den simulierten Niederschlägen um wenige Gittermaschen mit geringen Regenmengen handelt, können diese durchaus realistisch sein. Die Messdaten der Klimastationen liefern nur punktuelle Werte und es kann nicht ausgeschlossen werden, dass an anderen Stellen im Untersuchungsgebiet Niederschlag gefallen ist. Nichtsdestotrotz werden die Simulationen, die Niederschlag produzieren, obwohl zum betreffenden Termin kein Niederschlag gemeldet wurde, nicht zur Auswahl der Repräsentanten herangezogen.

Für Anströmungen aus Westen, sowie für die Gruppe der NW und W Wetterlagen, liegt nur jeweils ein Termin mit Niederschlag im Zeitraum der LM Simulationen vom 1.11.2001 bis 31.12.2002. In

diesen beiden Windrichtungsgruppen wird nur der vorliegende Termin zur Repräsentation von Niederschlagstagen mit der entsprechenden Anströmung genutzt.

Westliche Wetterlagen mit Niederschlag werden durch den 15.11.2002 (Abb. A.7 e) repräsentiert. An diesem Tag fielen in EMY 1,8 mm, in JHB 0,4 mm, in IRK 3,4 mm und in ASR 2,2 mm Niederschlag. Die Simulation dieses Termins liefert über 24 Stunden akkumuliert einen Gebietsmittelwert von 0,388 mm, der sich im Tagesverlauf von Westen aus zuerst in der Nordhälfte, später auch in Teilen der Südhälfte des Simulationsgebietes ausbreitet. Die Maxima finden sich an den westlichen Hängen der orographischen Barrieren im Modellgebiet. Die westliche Windrichtungsklasse ohne Niederschlag wird durch den 8.4.2002 (Abb. A.7 f) und den 23.11.2002 (Abb. A.8 a) wiedergegeben. Auch in diesem Fall stehen nur wenige Termine im Nestingzeitraum zur Verfügung; die Auswahl orientiert sich an der klimatologischen Aufttrittshäufigkeit der westlichen CWT.

Zur Repräsentation der NW und N Anströmungen mit Niederschlag steht nur der 22.5.2002 (Abb. A.8 b) zur Verfügung. Der Niederschlag an diesem Tag betrug in ASR 3,2 mm, von den anderen Stationen im Untersuchungsgebiet wurde kein Niederschlag gemeldet. In der Simulation dieses Termins findet sich Niederschlag nur in geringen Mengen an wenigen Stellen in der Südhälfte des Modellgebietes. Als Repräsentanten für NW und N Anströmungen ohne Niederschlag werden der 6.3.2002 (Abb. A.8 c) und der 28.12.2002 (Abb. A.8 d) ausgewählt.

Zusätzlich wird ein Tag mit ‚Bewässerung‘ simuliert. Dabei handelt es sich um den 6.6.2002 (Abb. A.8 e). Die Einbeziehung von Terminen mit ‚Bewässerung‘ in die Statistik erfordert das Reduzieren der Aufttrittshäufigkeiten anderer Gruppen. In den in Kap. 5.4 und 5.5 vorgestellten Vergleichen mit vier Tagen mit ‚Bewässerung‘ werden die Aufttrittswahrscheinlichkeiten der häufigsten Gruppen (NO und O ohne Niederschlag und Antizyklonal ohne Niederschlag) um jeweils zwei Tage reduziert (1 Tag = 0,274% Aufttrittswahrscheinlichkeit).

5.3 Starkniederschlagsereignis 31.3. bis 1.4.2002

Vom 31.3. bis 1.4.2002 fielen in Ouarzazate 48 mm Niederschlag innerhalb von 24 Stunden. Damit handelt es sich bei diesem Ereignis um das stärkste Niederschlagsereignis mindestens seit 1978, dem Beginn der Aufzeichnungen an dieser Station. Im Zeitraum 31.3. bis 1.4.2002 fielen an den Stationen EMY 19 mm, JHB 8,6 mm, IRK 30,6 und ASR 22,4 mm Niederschlag. Am 31.3. lag eine Anströmung aus SO vor, am 1.4. eine Mischklasse aus zyklonaler und südöstlicher Strömung und am 2.4. eine zyklonale Strömung. (Bodendruckkarten des Europäischen Wetterberichtes für den 31.3., 1.4. und 2.4 sind im Anhang in Abb. A.6 a, A.8 f und A.5 a abgebildet.)

Die Simulation der Episode umfasst den 72 Stunden Zeitraum vom 31.3.2002, 00 UTC bis 2.4.2002, 23 UTC. Dieser Simulationszeitraum wurde gewählt, um die Entwicklung der Evapotranspiration in der Simulation auch nach dem Ende des Niederschlagsereignisses untersuchen zu können.

Das LM simuliert für den 31.3.2002 nordwestlich des FOOT3DK-Untersuchungsgebietes ein Niederschlagsereignis mit einem Maximalwert von 130 mm in einer Gittermasche (7 km Auflösung). Für das FOOT3DK-Simulationsgebiet liegen die Höchstwerte des akkumulierten Niederschlages über 24 Stunden im nordwestlichen Quadranten bei fast 90 mm in einer LM Gittermasche, in vier weiteren Gittermaschen werden vom LM Werte zwischen 60 und 75 mm simuliert. Eine Erhöhung der Bodenfeuchte durch den Niederschlag am 31.3. ist im LM für den 1.4. im Untersuchungsgebiet nicht zu finden, da hier durch den Neustart der Simulation am Monatsanfang die Information über die Bodenfeuchte verloren geht. Am 1.4.2002 erreichen die Maximalwerte des simulierten akkumulierten Niederschlages im LM bis zu 27 mm im nordöstlichen Bereich, im Nordwesten 2.5 bis 16 mm und zwischen 2 und 20 mm in der Südhälfte des FOOT3DK-Untersuchungsgebietes. Für den 2.4.2002 wird im LM kein Niederschlag mehr simuliert.

Die Bodenfeuchte des LM geht in die FOOT3DK-Simulationen nur im ersten Zeitschritt ein. In den weiteren Zeitschritten der Simulation wird die Entwicklung der Bodenfeuchte durch die atmosphärischen Prozesse in FOOT3DK gesteuert, wodurch das Problem der Inkonsistenz der Bodenfeuchtefelder zum Monatswechsel in den LM Simulationen umgangen werden kann. Allerdings muss davon ausgegangen werden, dass die LM Simulationen auch im atmosphärischen Teil Inkonsistenzen beim Übergang vom 31.3. zum 1.4. haben, die sich nicht vollständig aus den Simulationsergebnissen eliminieren lassen. Die durchgehende Simulation mit FOOT3DK lässt aber die Vermutung zu, dass die Felder zumindest im Inneren des Simulationsgebietes konsistent und kontinuierlich sind. Die FOOT3DK-Simulationen liefern deutlich geringere Niederschlagswerte im Untersuchungsgebiet. Sie erreichen bis über 30 mm für den 31.3., bis zu 15 mm am 1.4. und bis zu 0,5 mm am 2.4.2002. Die Niederschlagsverteilungen sind in Abb. 5.7 dargestellt.

Die räumliche Verteilung des Niederschlages für diese Episode zeigt am 31.3. ein ausgeprägtes Maximum am nordwestlichen Rand (Abb. 5.7 a), das durch ein ausgiebiges Niederschlagsereignis in der LM-Simulation verursacht ist. Die Niederschlagsmaxima im Inneren des Simulationsgebietes bilden sich an den orographischen Barrieren, die bei einer Anströmung aus südlichen Richtungen zu Hebung führen. Die Niederschläge am 1.4. sind zu einem Teil in Streifen orientiert, die sich in SW-NO-Richtung erstrecken (Abb. 5.7 b). Ein weiterer Niederschlagsbereich befindet sich im

Osten des Simulationsgebietes ebenfalls über höher gelegenem Gelände. Am 2.4. werden lediglich geringe Niederschlagsmengen in der nordöstlichen Ecke des Gebietes simuliert.

In Anbetracht der Windrichtungsklassen dieser Tage erscheint die räumliche Verteilung der Niederschläge im Untersuchungsgebiet plausibel. Die simulierten Niederschläge bilden sich überwiegend an orographischen Barrieren, die bei entsprechenden Anströmungen Hebung auslösen. Allerdings wird dieser Effekt an der Geländeschwelle des Jebel Bani, an dessen

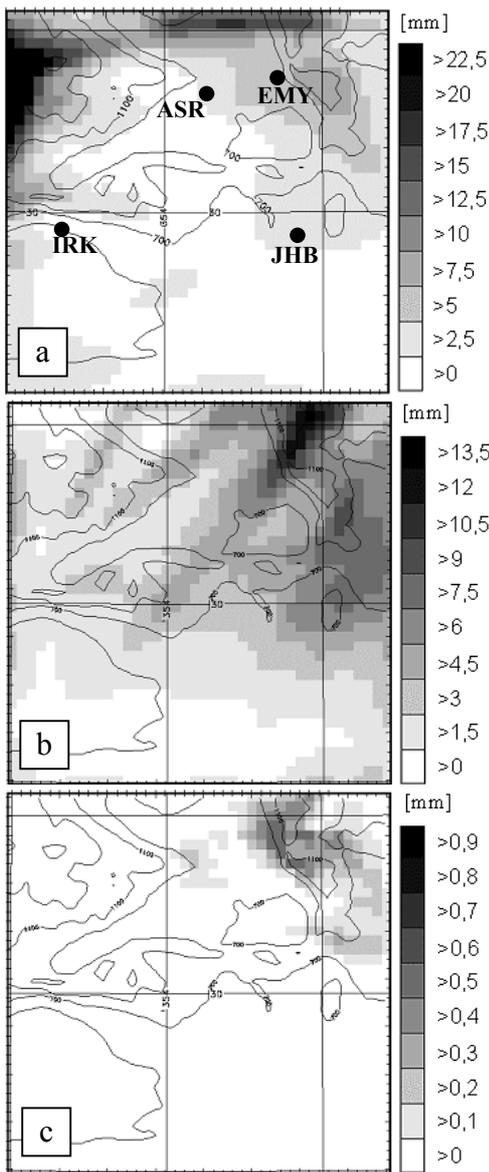


Abbildung 5.7: Akkumulierter Niederschlag [mm/Tag], a) 31.3., b) 1.4. und c) 2.4.2002

südlichem Abhang die Station IRK liegt, offensichtlich noch unterschätzt. In den Simulationen mit FOOT3DK wird das Niederschlagsereignis aus den Antriebsdaten des LM abgeschwächt. Bei Betrachtung der vorliegenden Messdaten für den Termin zeigt sich, dass die Niederschlagsmenge für die Stationen EMY und JHB sehr gut getroffen wird. Für die Stationen IRK und ASR werden die realen Niederschläge in der Simulation unterschätzt. Da die Niederschläge der LM-Simulation erheblich über den Ergebnissen der FOOT3DK-Simulation liegen, können die Niederschläge in FOOT3DK als realistischer eingeschätzt werden, als die Simulationsergebnisse des LM.

Die räumliche Verteilung des akkumulierten Niederschlages spiegelt sich deutlich in der Struktur der Evapotranspiration dieser Episode wider. In Abb. 5.8 sind die Tagesmittel der Verdunstung vom Boden für den 31.3., 1.4 und 2.4.2002 dargestellt. Das Niederschlagsmaximum am 31.3. im Nordwesten des Simulationsgebietes ist durch deutlich erhöhte Evaporation gekennzeichnet (Abb. 5.8 a). Das Niederschlagsgebiet im Nordosten zeigt mit Werten von bis zu 80 W/m^2 ebenfalls erhöhte Evaporation, jedoch deutlich geringer als im Nordwesten. Am 1.4. (Abb. 5.8 b) ist der Tagesmittelwert der Evaporation des Bodens ($77,7 \text{ W/m}^2$) höher, als am 31.3. ($21,6 \text{ W/m}^2$), was an der am 31.3. aufgetretenen starken Bewölkung liegt (ohne Abbildung). An diesem Tag ist die mittlere Evaporation, mit Ausnahme der Oasenfläche, im gesamten Simulationsgebiet größer als 20 W/m^2 . Am 2.4. liegt der Gebietsmittelwert des Evaporation bei $55,7 \text{ W/m}^2$ und ist damit immer noch weit über dem Wert

des 31.3., erreicht jedoch nicht die Werte der für den 1.4. simulierten Evaporation. Eines der Maxima liegt an diesem Tag in der Region, die an diesem Tag geringe Mengen Niederschlag erhalten hat, im Nordosten. Das zweite Maximum liegt in der Region, die noch erhebliche Bodenfeuchte aus dem Niederschlagsereignis vom 31.3. gespeichert hat und am 1.4. noch überwiegend von Wolken bedeckt war, im Nordwesten. Besonders in den Abbildungen für den 1. und 2.4. (Abb. 5.8 a und b) zeigen sich klare Minima der Evaporation im Oasengebiet, da hier der Boden von Pflanzen beschattet ist.

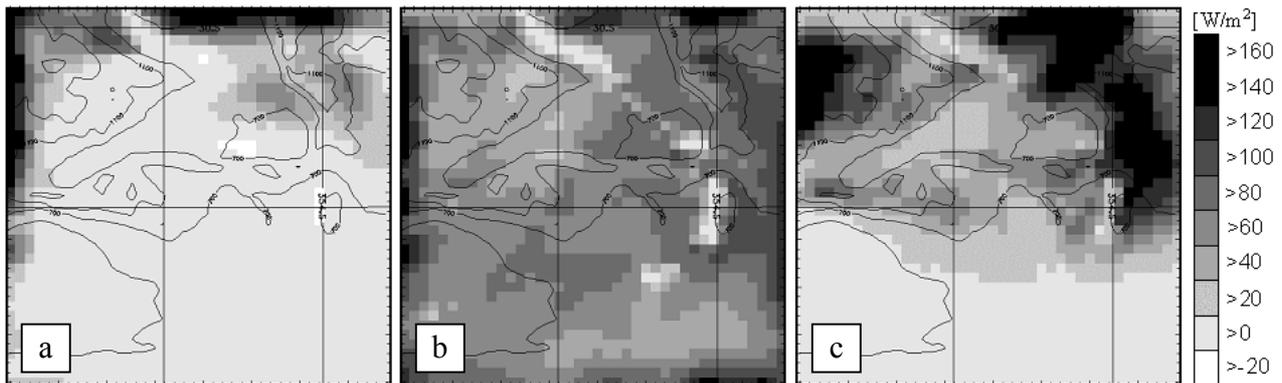


Abbildung 5.8: Verdunstung vom Boden in W/m^2 . Tagesmittelwerte für a: 31.3., b: 1.4. und c: 2.4.2002

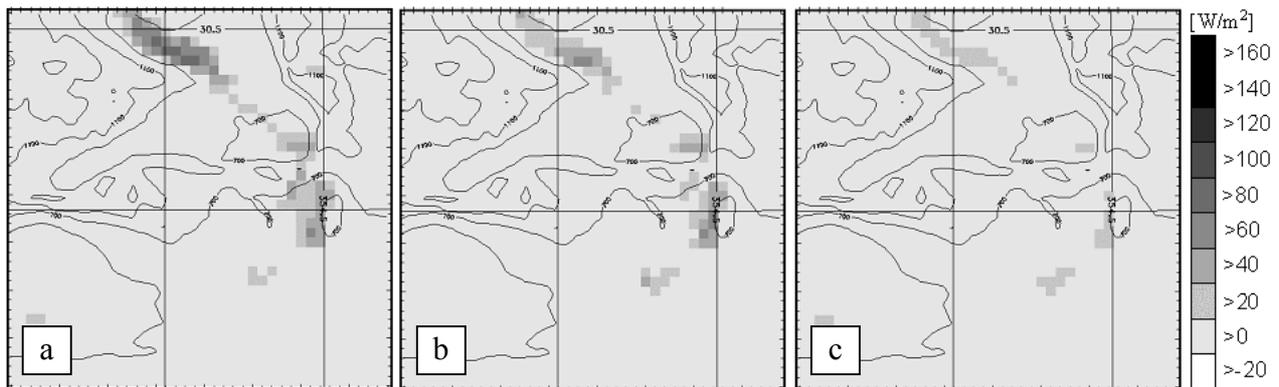


Abbildung 5.9: a: Reevaporation von Regenwasser auf Pflanzenoberflächen in W/m^2 für den 31.3.2002; b: Reevaporation von Regenwasser auf Pflanzenoberflächen in W/m^2 für den 1.4.2002; c: Transpiration in W/m^2 für den 2.4.2002.

Die Transpiration beträgt im Tagesmittel am 31.3. und am 1.4. weniger als $20 W/m^2$ (ohne Abbildung). Die Blattflächen sind maximal von Regenwasser bedeckt, was die Transpiration unterbindet. Dieses Interzeptionswasser verdunstet von den Blattflächen im Tagesverlauf über den 31.3. (Abb. 5.9 a) und 1.4. (Abb. 5.9 b). Erst am 2.4. kommt es im Laufe des Tages zu Transpirationswerten über $20 W/m^2$ in der Oase (Abb. 5.9 c), denn erst zu diesem Zeitpunkt ist das Interzeptionswasser verdunstet und die Bedingungen zur Transpiration sind gegeben.

Der überwiegende Anteil der Evapotranspiration wird von der Verdunstung vom Boden beigesteuert. Sie dominiert, insbesondere außerhalb des Oasenbereiches, die Evapotranspiration.

Die räumliche Struktur bildet die Verteilung der Niederschläge nach, allerdings erst nachdem sich die Wolken soweit aufgelöst haben, dass die Verdunstung effektiv werden kann.

Das Feld der Bodenfeuchte zeigt im Verlauf des 31.3. einen Anstieg bis über $0,2 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ in Teilen des Gebietes verursacht durch den Niederschlag. Mit dem Niederschlag am 1.4. nimmt die Bodenfeuchte in weiteren Teilen des Untersuchungsgebietes zu, bleibt jedoch überall unterhalb von $3 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$. Ab der Mittagszeit trocknet der Boden im Untersuchungsgebiet von Süden nach Norden wieder ab. Der geringe Niederschlag am 2.4. macht sich kaum bemerkbar, die Bodenfeuchte nimmt bis zum Abend fast im ganzen Untersuchungsgebiet auf Werte unter $0,01 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ ab.

Da keine Messwerte der Evaporation oder Transpiration für die Episode zur Verfügung stehen, kann die Exaktheit der Ergebnisse nicht belegt werden. Die Größenordnungen der simulierten Evaporation, Transpiration und Reevaporation, die physikalischen Zusammenhänge und der zeitliche Ablauf der Prozesse liefern aber ein schlüssiges Bild, das die komplexen Mechanismen der Evapotranspiration in zufrieden stellender Weise wiedergibt.

5.4 Ergebnisse für ausgesuchte Einzeljahre

In diesem Kapitel werden Ergebnisse für den Niederschlag und die Evapotranspiration der Rekombination der Repräsentanten der Windrichtungsgruppen für drei Jahre vorgestellt. Dabei handelt es sich um die Jahre 2002, 1984 und 1989. Zunächst wird untersucht, ob die Methode für das Jahr 2002, das im Nestingzeitraum liegt, die realen Niederschlagsverhältnisse an den im Untersuchungsgebiet gelegenen Klimastationen wiedergibt. Im Anschluss daran werden

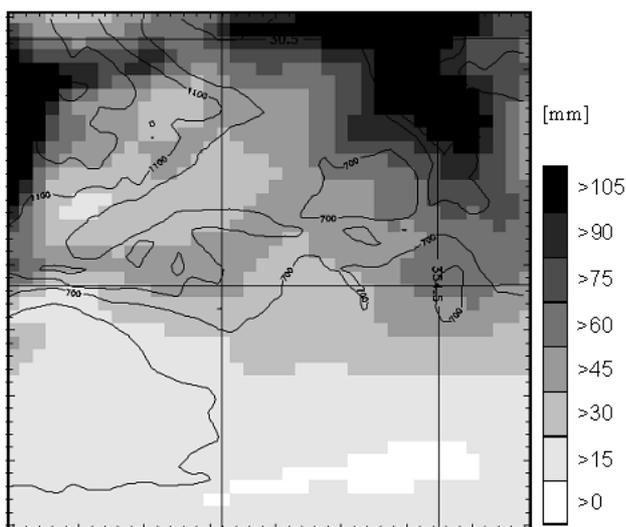


Abbildung 5.10: Akkumulierter Niederschlag [mm] Rekombination für 2002

Extremjahre untersucht. Bei dem Jahr 1984 handelt es sich um das trockenste Jahr des Zeitraumes 1978 bis 1997, für den tägliche Niederschlagsdaten der Station Ouarzazate vorliegen. Der Jahresniederschlag lag in diesem Jahr bei 21,2 mm. Dagegen stellt das Jahr 1989 mit einem Jahresniederschlag von 251,6 mm das feuchteste Jahr in diesem Zeitraum dar. Die genannten Jahreswerte beziehen sich auf kalendarische Jahre. Sie sind nicht identisch mit den hydrologischen Jahreswerten in Abb. 2.2.

Wird das Jahr 2002 rekombiniert, so ergibt sich ein Jahresniederschlag von 50,1 mm aus den Gewichtungungen der Repräsentanten. Verglichen mit den gemessenen Niederschlägen an den Stationen EMY von 45,2 mm, ASR von 64 mm, JHB von

32,4 mm und IRK von 42,5 mm liegen die simulierten Niederschläge in der richtigen Größenordnung, lediglich an der Station EMY wird der Niederschlag mit ca. 90 mm klar überschätzt. Die räumliche Verteilung der Niederschläge (Abb. 5.10) zeigt, dass die südliche Hälfte des Simulationsgebietes deutlich trockener ist, als die nördliche Hälfte. Dieser Effekt ist in der Realität auch anzunehmen, da das Gebiet im Süden direkt in die Sahara übergeht. Die mittlere Evapotranspiration liegt mit 236 mm um ca. 180 mm höher, als der Niederschlag. Dies liegt an den Beiträgen aus dem Grundwasser und der Bewässerung. Ohne diese Beiträge könnte maximal die Niederschlagssumme wieder verdunsten, was aber in der Region nicht realistisch ist.

Da die Rekombination der Repräsentanten für das Jahr 2002 realitätsnahe Ergebnisse liefert, wird nun untersucht, ob die Wiedergabe von Extremjahren mit der hier vorgestellten Methode ebenfalls möglich ist.

Zunächst wird der Jahrgang der CWTs und das Niederschlagsaufkommen pro CWT des Trockenjahres 1984 (Abb. 5.11) und des Feuchtjahres 1989 (Abb. 5.12) mit dem mittleren Jahrgang (Abb. 5.2) verglichen.

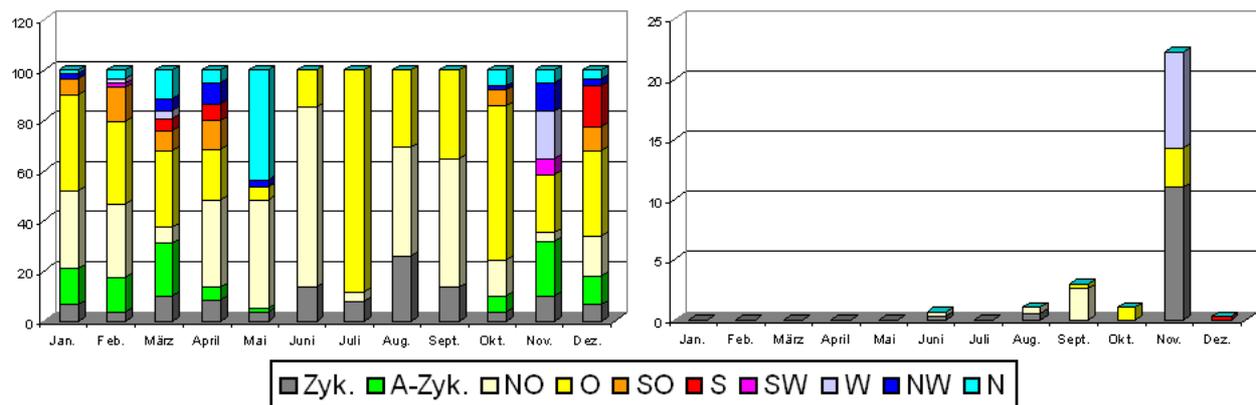


Abbildung 5.11: a: Auftrittshäufigkeit der CWTs in %; b: Niederschlagsmenge pro CWT für das Jahr 1984

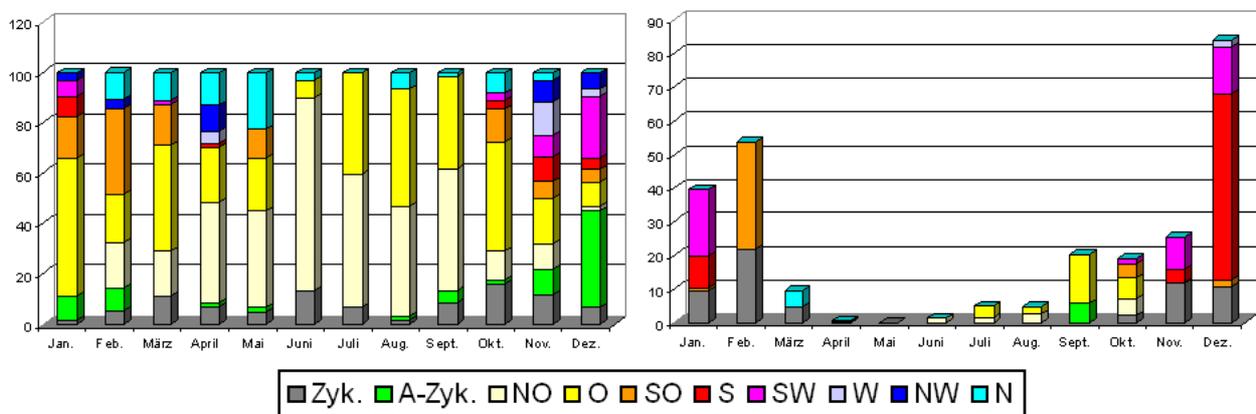


Abbildung 5.12: a: Auftrittshäufigkeit der CWTs in %; b: Niederschlagsmenge pro CWT für das Jahr 1989

Die in Kap. 5.2 als besonders niederschlagsrelevant herausgearbeiteten Windrichtungsklassen (zyklonal, SW, S, SO und W) treten im Trockenjahr 1984 so oft auf, wie im klimatologischen

Mittel (zusammen 9,62%, bzw. 9,63%, Abb. 5.11 a, bzw. 5.2 a). Im Feuchtjahr 1989 (Abb. 5.12 a) werden diese Klassen mit 16,26% deutlich häufiger analysiert. Die Auftrittshäufigkeit der zyklonalen Klasse ist im August 1984 mit über 20% sehr hoch, jedoch ist diese Anströmung im Sommer im Allgemeinen nicht mit Niederschlag verbunden. Eine Betrachtung von Jahreswerten der Auftrittswahrscheinlichkeiten einzelner Klassen reicht daher nicht aus, um den Zusammenhang mit dem Niederschlag zu beschreiben.

Der Niederschlag in 1984 beschränkt sich im Wesentlichen auf den November (Abb. 5.11 b). Die akkumulierte Niederschlagsmenge in diesem Monat (22 mm) setzt sich aus Niederschlägen an zwei Tagen zusammen, an denen Mischklassen mit der zyklonalen Strömung vorlagen. Am 9.11. fielen in Ouarzazate 16 mm Niederschlag (Mischklasse mit der westlichen Klasse) und am 27.11. wurden 6 mm Niederschlag gemeldet (Mischklasse mit der östlichen Anströmung).

Die Niederschläge in 1989 fallen hauptsächlich in den Monaten Januar und Februar, sowie September bis Dezember (Abb. 5.12 b). Vom 8. bis 31.8.1989 und vom 14.9. bis 5.10.1989 fanden mehrere Episoden von tropisch-extratropischer Wechselwirkung statt (*Knipperz, 2003a*). Dabei wird feuchte Luft aus den Ausströmbereichen tropischer Konvektionszellen südlich der Sahara an der Vorderseite weit nach Süden reichender Höhenträge in das Untersuchungsgebiet advehiert. An der Station Ouarzazate brachten diese Phasen Niederschläge von bis zu 25 mm (September, Abb. 5.12 b). Auch die Niederschläge den anderen Monaten dieses Jahres sind überwiegend mit Tiefdruckgebieten und ihren Fronten vor der Marokkanischen Küste verbunden.

Bei einer Rekombination des Jahres 1984 aus den Repräsentanten der in Kap. 5.2 beschriebenen Windrichtungsgruppen ergibt sich ein über das Simulationsgebiet gemittelter Jahresniederschlag von 21,7 mm. Er erreicht somit den realen Wertes an der Station Ouarzazate. Der Jahresniederschlag der Station Ouarzazate beträgt im Mittel über den Zeitraum 1991 bis 2001 98,65 mm, während an der weiter südlich und näher am Untersuchungsgebiet gelegenen Station Fom Zguid im gleichen Zeitraum nur 53 mm erreicht werden. Bei einer Annahme der Halbierung der Niederschläge aus Ouarzazate für das Untersuchungsgebiet liegen die simulierten Werte zu hoch. Es muss also davon ausgegangen werden, dass die Vertreter der Windrichtungsgruppen mit Niederschlag zu hohe Niederschlagsmengen für das Jahr 1984 simulieren.

Für das Jahr 1989 liefert die Methode mit den ausgewählten Repräsentanten 92,8 mm Niederschlag, im Vergleich zum gemessenen Niederschlag in Ouarzazate von 251,6 mm. Unter Einbeziehung der oben genannten Argumentation der Halbierung der Niederschläge aus Ouarzazate für das Untersuchungsgebiet ist die Wiedergabe des Niederschlages für dieses Jahr damit immer noch etwas zu niedrig. Die Vertreter der Windrichtungsgruppen mit Niederschlag liefern somit für das Jahr 1989 zu geringe Niederschlagsmengen. Es bleibt daher festzuhalten, dass die hier

verwendete Methode nicht geeignet ist, die Verhältnisse in Extremjahren angemessen wiederzugeben. Sie sollte daher nur für ausreichend lange Zeiträume angewendet werden, in denen die Extremjahre sich herausmitteln. Zur Erstellung einer Klimatologie ist die Methode geeignet, da der Effekt der Abschwächung von Extremwerten in diesem Fall erwünscht ist.

Die Flussdichten der Evapotranspiration pro Zeitschritt, die in W/m^2 vorliegen, werden in akkumulierte Werte in l/m^2 umgerechnet, indem die Momentwerte auf Stundenwerte extrapoliert, und die 24 Stunden jeden Tages aufsummiert werden. Anschließend wird dieser Wert durch die spezifische Verdampfungswärme für Wasser geteilt. Die simulierte Evapotranspiration beträgt nach dieser Methode 233 mm für das Jahr 1984 und 311 mm für das Jahr 1989. Sie liegt damit weit über den simulierten Niederschlägen von 21,7 mm und 92,8 mm für die betreffenden Jahre. Die Erklärung hierfür liegt in der Tatsache, dass durch das simulierte Grundwasser und die simulierte Bewässerung zusätzliches Wasser in das Untersuchungsgebiet gebracht wird, das dort verdunsten kann. Die Differenz von Niederschlag minus Evapotranspiration liegt in beiden Jahren bei etwas mehr als 200 mm.

5.5 Ergebnisse der Verdunstungsklimatologie

Die Verdunstungsklimatologie für das Untersuchungsgebiet wird mittels statistisch-dynamischer Regionalisierung (*Fuentes und Heimann, 2000*) erstellt. Für den Zeitraum 1958 bis 1997 werden aus Bodendruckdaten der NCAR-Reanalysen nach der objektiven Methode von *Jones et al. (1993)* Wetterlagen (CWTs) bestimmt, die zur Auswahl der zur dynamischen Nachsimulation verwendeten Termine genutzt werden. Zur Vermeidung von Redundanzen werden die CWTs in mehrere Gruppen mit gemeinsamen Charakteristiken im Simulationsgebiet zusammengefasst. Eine zusätzliche Unterteilung erfolgt anhand von Niederschlagsmeldungen der Station Ouarzazate für den Zeitraum 1978 bis 1997. Für jede der resultierenden Gruppen werden, soweit möglich, zwei typische Vertreter aus dem zum dynamischen Nesting bereitstehenden Zeitraum, 1.11.2001 bis 31.12.2002, ausgewählt und nachsimuliert. Die Repräsentanten der einzelnen CWTs werden nach der in Kap. 3.3 beschriebenen Methode zu einer Klimatologie rekombiniert, wobei vier Tage mit ‚Bewässerung‘ in die Klimatologie einbezogen werden, um eine mittlere Anzahl von Lâcher pro Jahr zu simulieren.

Die klimatologische Evapotranspiration (Abb. 5.13) zeigt den Verlauf der Oase deutlich in Form von erhöhten Werten, sowohl bei Berechnung der Klimatologie ohne ‚Bewässerung‘ (Abb. 5.13 a), als auch mit vier Tagen mit ‚Bewässerung‘ (Abb. 5.13 b). Außerhalb der Oase liegt die mittlere jährliche Evapotranspiration im überwiegenden Teil des Simulationsgebietes um $200 l/m^2$. Innerhalb der Oase zeigt sich trotz der geringen Gewichtung der Termine mit ‚Bewässerung‘ (ca.

1,1 %) ein Unterschied zwischen den Ergebnissen der Klimatologie mit und ohne ‚Bewässerung‘. In der Klimatologie mit vier Tagen ‚Bewässerung‘ (Abb. 5.13 b) erreicht die Evapotranspiration innerhalb der Oase höhere Werte, als in der Klimatologie ohne ‚Bewässerung‘. Der Flächenmittelwert liegt für die Klimatologie ohne ‚Bewässerung‘ bei 247 l/m^2 und damit um ca. 200 l über dem simulierten Niederschlag von $45,7 \text{ l/m}^2$. Werden vier Tage mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methode der Simulation von ‚Bewässerung‘ in die Klimatologie einbezogen, so ergibt sich ein Gebietsmittelwert von 262 l/m^2 .

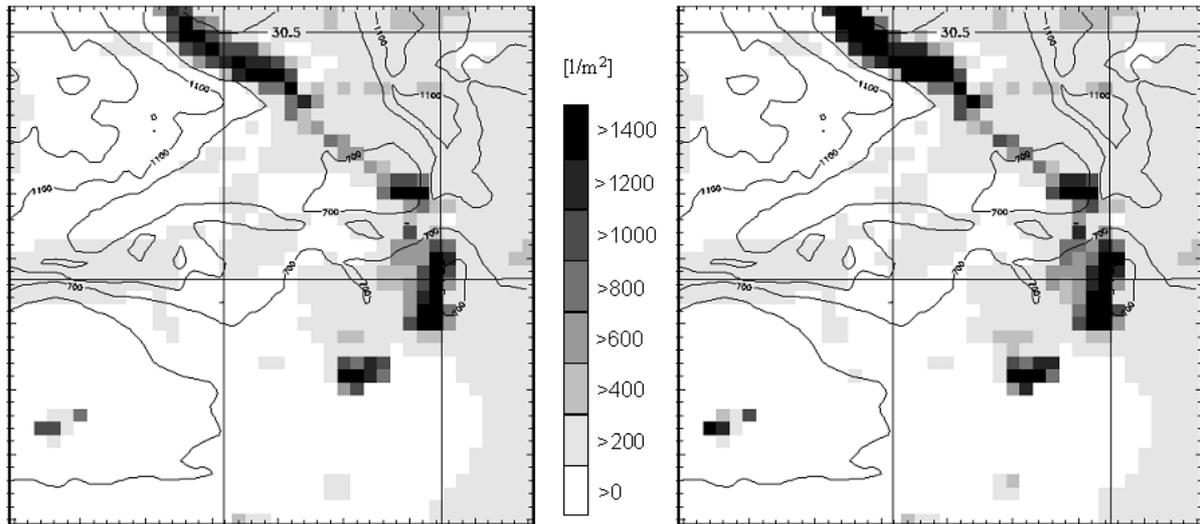


Abbildung 5.13: Klimatologische Evapotranspiration [l/m^2] in a) ohne Tage mit ‚Bewässerung‘, in b) mit vier Tagen mit ‚Bewässerung‘

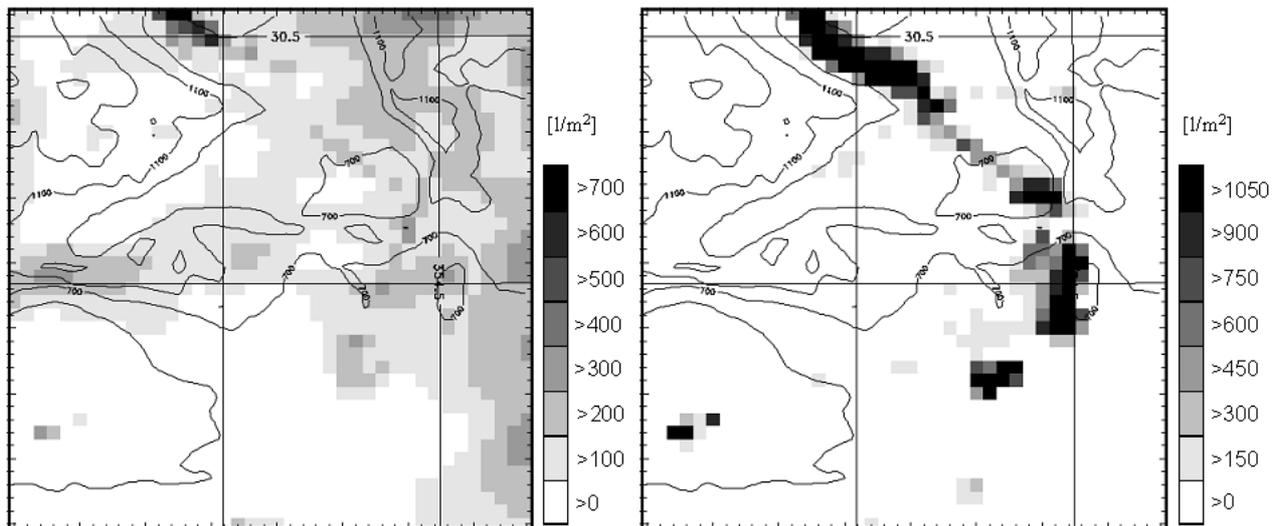


Abbildung 5.14: a) Evaporation vom Boden, b) Transpiration der Pflanzen in l/m^2 für die Klimatologie mit vier Tagen ‚Bewässerung‘

Eine Aufteilung der klimatologischen Evapotranspiration (mit vier Tagen ‚Bewässerung‘) in ihre Anteile Evaporation vom Boden und Transpiration der Pflanzen ist in Abb. 5.14 dargestellt. In der räumlichen Verteilung der Evaporation (Abb. 5.14 a) zeigt sich deutlich die Struktur der

Niederschlagsverteilungen der Repräsentanten. Im Bereich der Oase finden sich nur geringe Werte der Evaporation vom Boden, da hier der Bedeckungsgrad des Bodens hoch ist, wodurch die Verdunstung direkt vom Boden reduziert wird. Die hohe Transpiration in der Oase (Abb. 5.14 b) wird überwiegend durch die ‚Grundwasser‘ Einstellung in allen Simulationen verursacht, durch die Tage mit ‚Bewässerung‘ jedoch zusätzlich verstärkt.

Die Differenz von Niederschlag minus Evapotranspiration (P-E) ist, wie in ariden und semi-ariden Gebieten zu erwarten, deutlich negativ. Dies bedeutet, dass mehr Wasser durch Verdunstung aus dem Boden herausgeht, als durch Niederschlag hinein kommt. Möglich ist dieses Verhältnis nur auf Grund der Bewässerung durch Lâcher und durch Grundwasser, das aus anderen Regionen in das Untersuchungsgebiet einströmt. Die Ergebnisse stimmen also mit der Erfahrung im Untersuchungsgebiet überein. Sie geben darüber hinaus ein räumlich differenziertes Bild wieder, das die unterschiedlichen Prozesse, die bei der Verdunstung eine Rolle spielen, angemessen darstellt.