

# **Klimaökologische Aspekte in Gebirgen der südwestlichen USA unter besonderer Berücksichtigung der White Mountains**

VON

MICHAEL RIEN, THOMAS SPENGLER UND MICHAEL RICHTER

mit 15 Abbildungen, 3 Photos und 1 Tabelle

## **1 Einleitung**

Die vorliegenden Ergebnisse klimatologischer und phytogeographischer Studien beruhen auf vier Diplomarbeiten, die unter Betreuung und Mitwirkung von M. Richter erstellt wurden. Der Übersicht über die klimatologische Gliederung des Südwestens der USA, basierend auf Daten von VERLEGER (1998) folgt die Behandlung des mikroklimatischen Höhenwandels in der ariden Region vom Death Valley bis in die Hochlagen der White Mountains durch T. Spengler. Diese klimatologischen Grundlagen liefern Anhaltspunkte für die Vegetationsdifferenzierung zwischen der Sierra Nevada, zu der Daten eines Transektes von HETZNER (1998) vorliegen, über die White Mountains bis zum Wheeler Peak, die von M. Rien bearbeitet werden. Durch die Methode des Wechsels zwischen der makro- bis mikro-skaligen Ebene läßt sich die klimaökologische Position der White Mountains klar herausstellen.

Zu Beginn der Betrachtung steht die klimatische Charakterisierung des weiteren Umfeldes der White Mountains. Im vorliegenden Fall bietet sich eine regionale Bearbeitung des Raumes von 35° N bis 42° N und von 109° W bis 122° W an, um die Gegensätze zwischen dem humiden Westen und dem ariden Osten herausarbeiten zu können. Innerhalb dieses Gebietes von der Sierra Nevada bis zum Colorado-Plateau liegen die White Mountains exzentrisch im südwestlichen Quadranten (Abb. 1). Beim Vergleich mit der weiteren Umgebung muß jedoch gerade der östliche Raum intensiver berücksichtigt werden, da die klimatischen und floristischen Bezüge von den White Mountains zur Basin and Range Province viel enger sind als zur benachbarten Sierra Nevada (MOREFIELD 1988). In klimatischer Hinsicht resultiert dies aus der Barrierewirkung der Sierra Nevada gegenüber dem frontalen Wettergeschehen aus westlicher Richtung. Auch im Sommer machen sich die ozeanischen Einflüsse in dem vom Hochdruckkomplex über dem Pazifik beherrschten Großraum nur bis zur Sierra Nevada bemerkbar (BARRY 1992). Die trennende Wirkung des Gebirges auf das Klima hat eine ebensolche auf die Flora zur Folge, indem jene der kalifornischen Provinz nur unwesentlich über die Wasserscheide nach Osten übergreift und das Owens Valley bereits zum ariden Komplex der Basin and Range Province gehört (BARBOUR & MAJOR 1977).

Die folgenden Klima-Ausführungen behandeln insbesondere jene Elemente, die maßgeblich das Humiditätsmuster und die Höhenstufung der Region prägen: Temperatur, Niederschlag und Verdunstung.

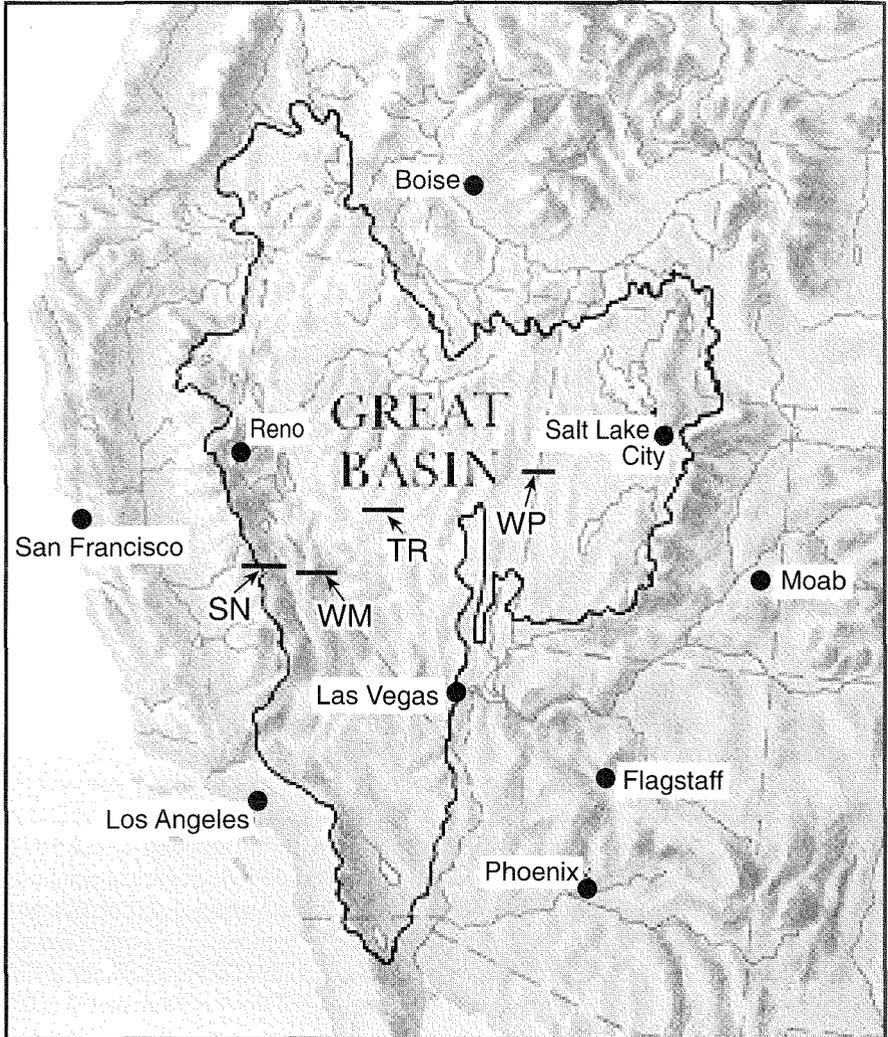


Abb. 1: Karte des Untersuchungsgebietes und Lage der Transekte. Sierra Nevada (SN), White Mountains (WM), Toiyabe Range (TR) und Wheeler Peak (WP)

## 2 Klimagradienten und makroklimatische Raummuster

### 2.1 Temperatur

Die Charakterisierung der thermischen Verhältnisse erfolgt normalerweise in Form von Isothermenkarten, wie sie in Abb. 2a am Beispiel der mittleren Jahrestemperatur vorliegt. Zwar spiegelt dieses Verfahren quasi-realistische Verhältnisse wider, jedoch läßt sich nur schwer abschätzen, welche Regionen im großräumigen Vergleich relativ zu warm oder zu kalt sind. Dies gilt vor allem für die Gebirge, die im vorliegenden Kartenausschnitt im Westen ozeanisch und im Osten kontinental geprägt sind. Hinzu kommt der planetarische Strahlungswandel, der eine relative Erwärmung von Norden nach Süden erwarten läßt.

Für eine Interpretation der Vegetationsverteilung erweisen sich Residuenkarten als zweckmäßiger, in denen die Wirkungen des Höhen- und Breitengradfaktors mit Hilfe von Regressionsberechnungen eliminiert werden. Im vorliegenden Fall werden die Abweichungen der Januar-Minimumtemperaturen und der Juli-Maximumtemperaturen präsentiert, da derartige Temperaturextreme für das Vorkommen oder Fehlen von Pflanzenarten viel entscheidender sind als Jahresmittelwerte. So werden am Beispiel der Januar-Minimumtemperaturen die relativ zu kalten bzw. zu warmen Gebiete bestimmt, indem das Distanzmaß eines Ortes links oder rechts der Regressionsgeraden (Abb. 2c) der jeweiligen Lokalität auf der Karte zugewiesen wird (Abb. 2b) (Interpolationsprogramm IDRISI).

Aufgrund dieses Verfahrens gilt die Sierra Nevada als wintermild; dagegen die Beckenregion zwischen Wheeler Peak und Wasatch Mountains sowie vor allem das

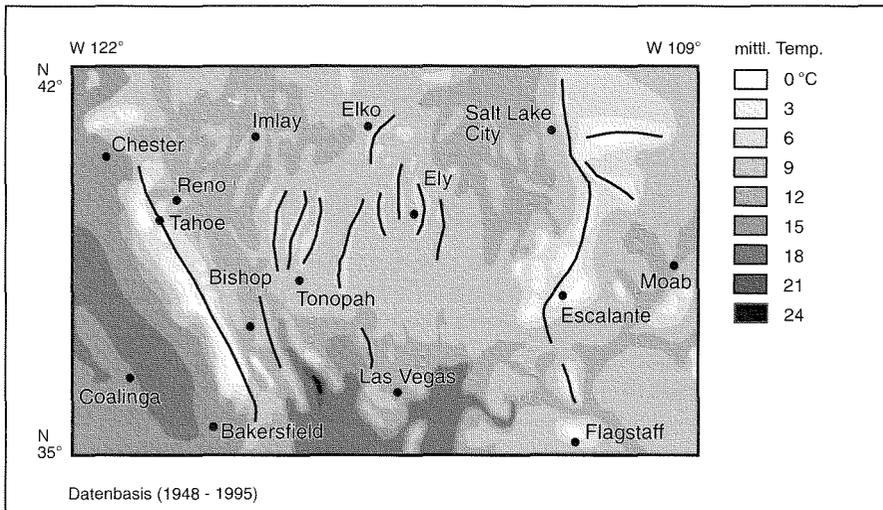


Abb. 2a: Mittlere Jahrestemperatur

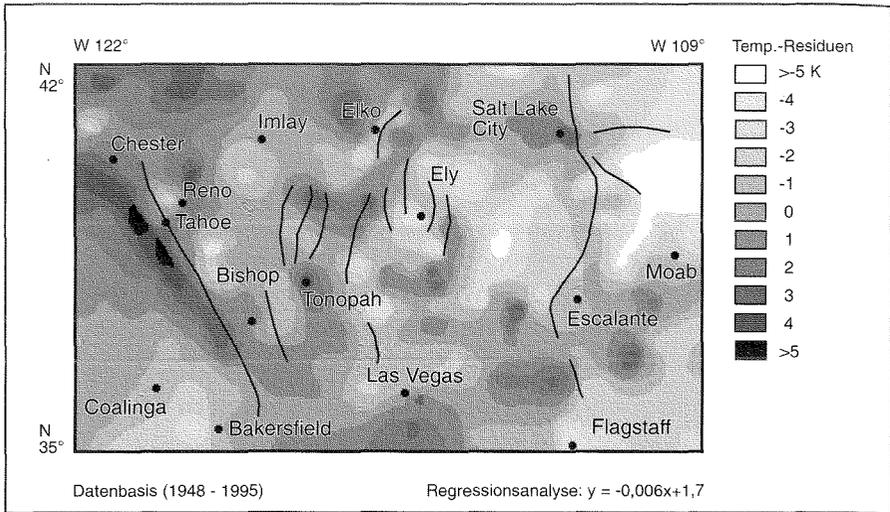


Abb. 2b: Residuen der Januar-Minimumtemperatur

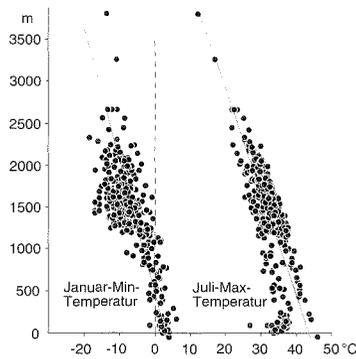


Abb. 2c: Höhengradienten der Lufttemperatur

Colorado-Plateau nördlich von Moab als winterkalt. Bei der Interpolation auf Grundlage von 401 Stationen (NCDC-Summaries 1900-1995), die sich unterschiedlich dicht über das Gebiet verteilen, treten die White Mountains als Gebirge mittlerer Abkühlungsverhältnisse hervor. Auch erscheint nach Auslegung der Isolinien das nach Süden geöffnete Owens Valley im Westen des Gebirgszuges etwas wärmer als das Fish Lake Valley unmittelbar im Osten. Im Fall der Juli-Maxima zeigt sich das Death Valley nicht nur in absoluter, sondern auch in relativer Hinsicht als ausgesprochener „hot spot“. Dies geht auf Hitzestaus in der Beckenlage zurück. Im White Mountains Gebiet bleibt im Sommer das Owens Valley relativ zu kühl, während sich zum Fish Lake Valley hin mittlere Verhältnisse einstellen. Die Sierra Nevada und

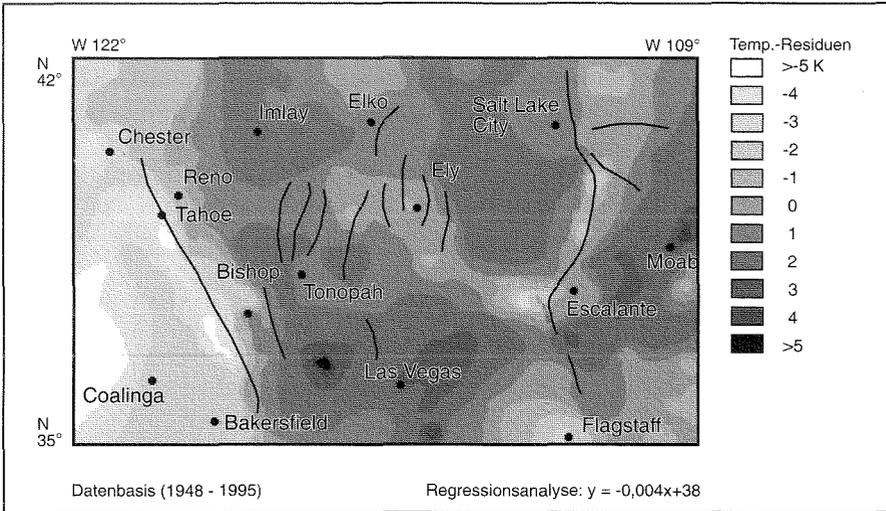


Abb. 2d: Residuen der Juli-Maximumtemperatur

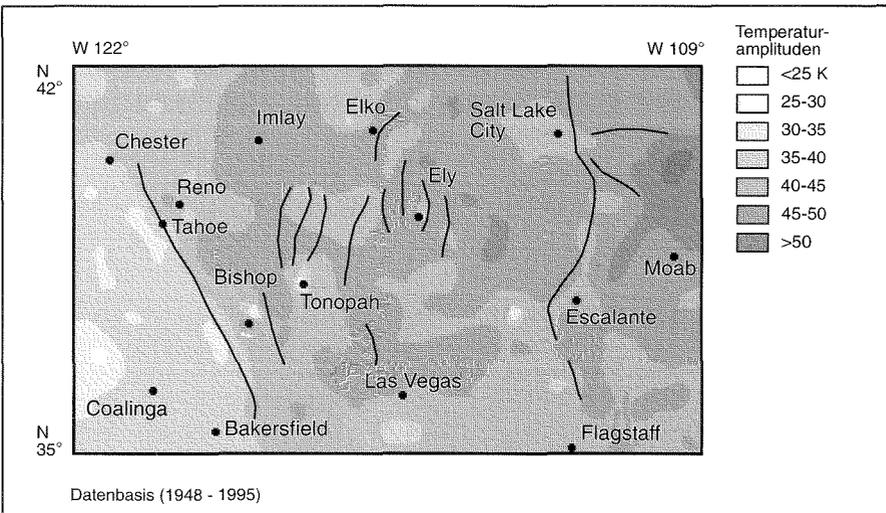


Abb. 2e: Amplituden zwischen Januar-Minimum und Juli-Maximumtemperatur

auch der Westteil Kaliforniens bleiben etwas kühler in der insgesamt dennoch erhitzen Großregion.

Wenn sich die Westseite der Sierra Nevada sowie der äußerste Westen als wintermild und im Sommer relativ gemäßigt erweisen, so resultiert daraus in der Karte der Amplituden zwischen den Absolutwerten eine geringe Jahresdifferenz (Abb. 2e). Dieser hellen Fläche stehen die dunklen im kontinentalen Osten der Region gegen-

über, wo nördlich von Moab die Unterschiede zwischen der mittleren Januar-Minimumtemperatur und Juli-Maximumtemperatur bei 54 K liegen. Auf der ozeanischen Seite der Sierra Nevada beträgt der Analogwert nur 25 K, und im Bereich der White Mountains wird mit 35 K bereits der thermische Übergang zum kontinentalen Wüstenklima der Great Basin Province vollzogen. Oder anders ausgedrückt: Hier beginnt die Klimazone, in der sich Pflanzen zum Überleben auf beträchtliche jahreszeitliche Temperaturdifferenzen einstellen müssen.

## 2.2 Niederschlag und Verdunstung

Neben der thermischen zeichnet sich der Bereich östlich der Sierra Nevada aber auch durch eine hygrische Kontinentalität aus, die zumindest in den Beckenlagen eine beträchtliche Aridität verursacht (Abb. 3a). Daß gerade der tiefste Punkt der USA, das Death Valley, zugleich die trockenste Region bildet, deutet auch den Grund der Regenarmut in den Tieflagen an: Zumindes tagsüber und in der warmen Jahreszeit verdunstet ein erheblicher Teil der aus hochreichenden Cumuluswolken ausfallenden Niederschläge, bevor er den Boden erreicht. Somit erklären sich teilweise auch die feuchten „Inseln“ in der nördlichen Wasatch Range bis zum San Francisco Peak nördlich von Flagstaff, handelt es sich doch um hochgelegene Stationen. Wahrscheinlich existieren noch mehr dieser „humid spots“ in anderen Abschnitten der (Basin and) Ranges; sie lassen sich jedoch mangels Daten zeitgleicher Erhebungsperioden nicht festlegen (vorliegende Datenreihe: Stationen von 1948-1995).

Im Falle der Sierra Nevada liegt eine deutliche Abweichung von den genannten Regeln vor. Zwar trifft auch hier die in Abb. 4d skizzierte höhenwärtige Zunahme

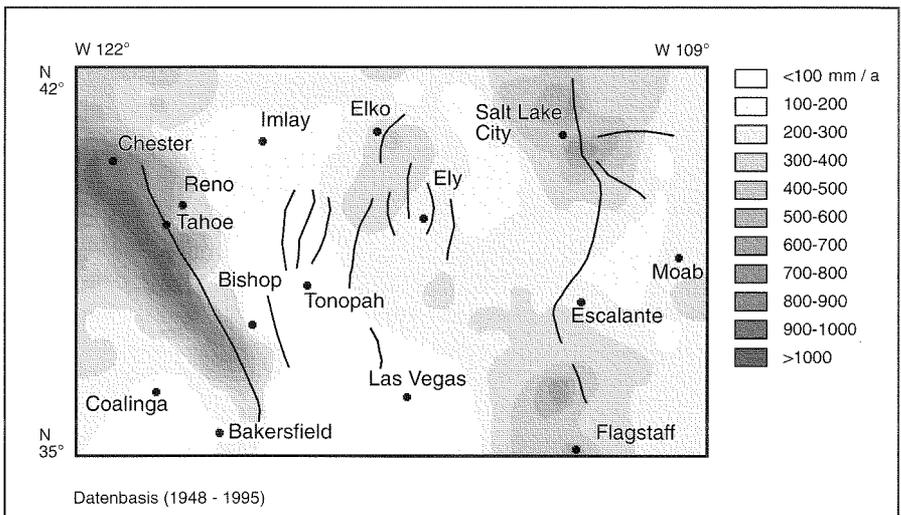


Abb. 3a: Mittlerer Jahresniederschlag

der Jahresniederschläge zu, jedoch handelt es sich hier im Vergleich zu den weiter östlich gelegenen Gebirgen um ein klares Winterregengebiet (Abb. 3b). Zyklonale Frontalereignisse führen nur auf der Westseite und in den Hochlagen zu Jahressummen bis über 1 000 mm und reichlich Schneefall. Das Owens Valley befindet sich hingegen in einer Leesituation mit Jahresmitteln unter 200 mm. Föhnwindwirkung dürfte hier die Trockenheit, die für eine prägnante Asymmetrie der Vegetation verantwortlich ist, noch verstärken (POWELL & KLIEFORTH 1991).

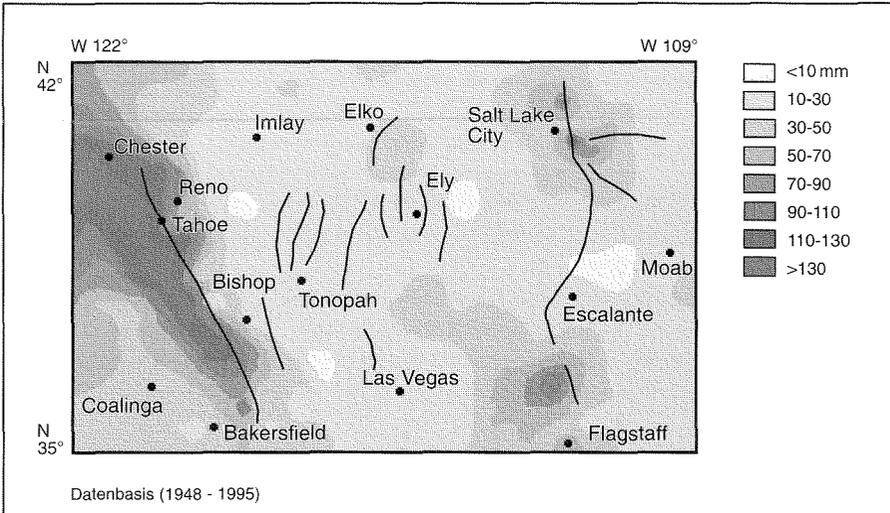


Abb. 3b: Mittlerer Niederschlag im Januar

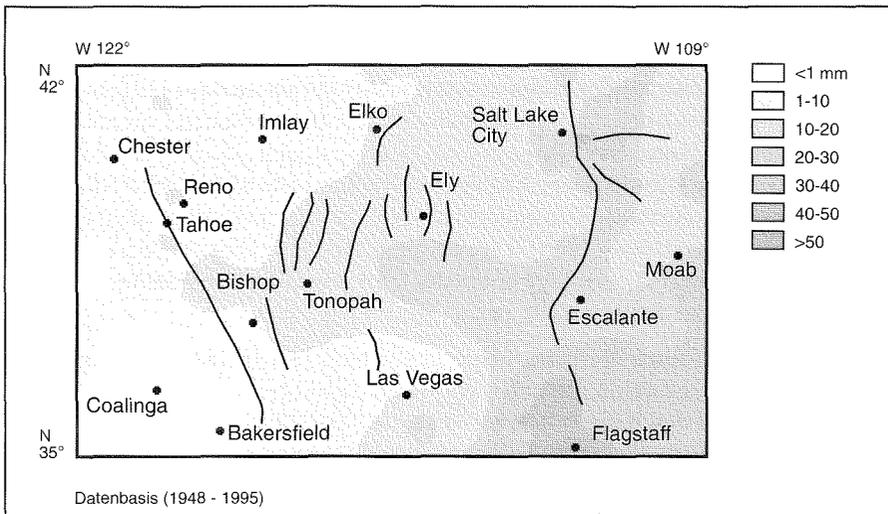


Abb. 3c: Mittlerer Niederschlag im Juli

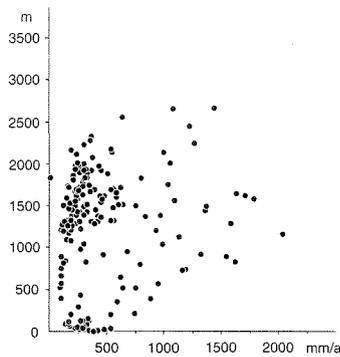


Abb. 3d: Höhengradient des Niederschlags

Bereits in den Hochlagen der White Mountains nimmt der Anteil an konvektiven Sommerniederschlägen zu. Diese stammen aus zunächst advektiven Luftmassen vom Golf von Mexiko, die nun zum Aufstieg gezwungen sind. Insbesondere die Umgebung von Flagstaff profitiert von diesen Sommerregen (Abb. 3c), die für die Wüsten- und Gebirgsvegetation äußerst wichtig sind: Der Ocotillo (*Fouquieria splendens*) in der Sonora z.B. könnte ohne die Sommerregen nicht überleben, und auch die Kakteen des Südwestens sind weitgehend hieran gebunden, da sie gelegentliche Sommerregen benötigen (ELLENBERG 1981). In Relation zu den Sommer- und Winterregengebieten profitiert die Wasatch Range im Nordosten des Kartenausschnitts gleichermaßen von den winterlichen Frontalniederschlägen wie von den sommerlichen Gewittern.

Der Negativpart im klimatischen Wasserhaushalt, die Verdunstung, ist ungleich schwerer zu erfassen als der Niederschlag. Zwar besteht im Untersuchungsgebiet ein Netz aus Class-A-Pans, jedoch führen diese Messungen nach JAUREGUI et al. (1978) aufgrund eines mikroklimatischen Oaseneffektes gerade in Trockengebieten zu überhöhten Werten. Auch das physikalisch exaktere Berechnungsverfahren der potentiellen Verdunstung nach PENMAN (1948) erweist sich als unzuverlässig, da mehrere der hierzu erforderlichen Klimaparameter nur an wenigen Orten erfaßt werden. So findet hier die wesentlich einfachere von SCHMIEDECKEN (1978) abgewandelte Methode nach PAPADAKIS (1966) Verwendung, die zumindest für meeresfernere Regionen, wie den trockenen Südwesten der USA, eine enge Korrelation zum Verfahren nach PENMAN zeigt.

Naturgemäß sollten die trockensten Teilbereiche ein erhöhtes Wasserdampf-sättigungsdefizit und damit ein hohes Verdunstungspotential besitzen. Überlagert wird dieser Effekt durch die Windeinwirkung als Abkühlungsgröße, so daß in Gebirgen die höhenwärts abnehmende Temperatur als reduzierende Größe für die Verdunstung einer verschärfenden Wirkung des Windes und auch der direkten Strahlung gegenübersteht. Üblicherweise nimmt also in tropischen und subtropischen Gebirgen die Verdunstungskraft mit zunehmender Höhe nicht wesentlich ab (HEN-

NING & HENNING 1981). Dies ist in der Jahresbilanz erst dann der Fall, wenn in Hochgebirgen eine längere Schneebedeckung an Bedeutung gewinnt und die veränderte Energieumwandlung bei Sublimations- und Ablationsvorgängen, die Albedo- und Bodenfeuchte-Effekte sowie das veränderte Mikroklima zu einer verminderten potentiellen Verdunstung führen. Dies trifft für die recht schneereichen Gebirge im subtropischen Südwesten der USA durchaus zu.

Die Abb. 4a-d machen deutlich, daß die Verdunstungswerte höhenwärts abnehmen und sich die Sierra Nevada, die Salt Lake-Umgebung und der nördlich von Flagstaff gelegene San Francisco Peak durch positive Wasserbilanzen auszeichnen. Für die White Mountains gilt dies nur für die subalpinen und alpinen Lagen ober-

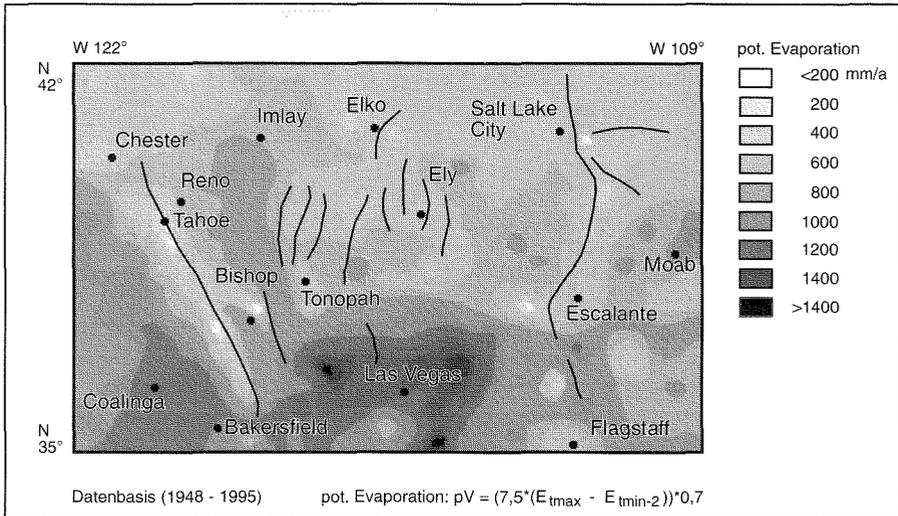


Abb. 4a: Mittlere potentielle Jahresverdunstung

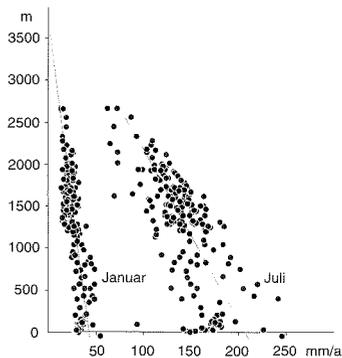


Abb. 4b: Höhengradienten der potentiellen Evaporation

halb 3 000 m. RICHTER & SCHRÖDER (1991) weisen in ihrer Berechnung für einen Death Valley-Barcroft Höhengradienten nach, daß bis 2 100 m, also bis etwa zur Untergrenze der Kiefern-Offenwälder, noch vollaride Verhältnisse herrschen, in 3 000 m bereits eine Jahreshälfte als humid zu bezeichnen ist und in Barcroft bei knapp 500 mm Jahresniederschlag und nur wenig mehr als 200 mm potentieller Verdun-

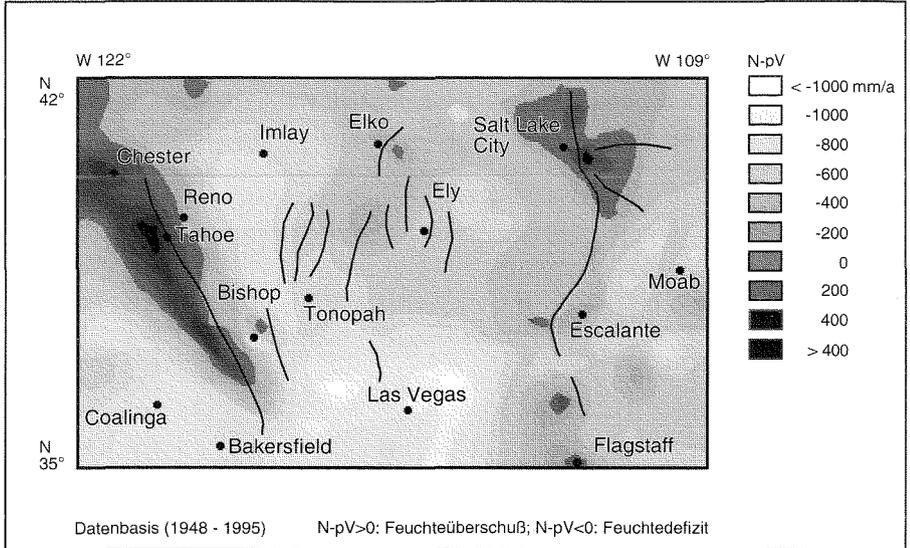


Abb. 4c: Jahresfeuchtebilanz (Niederschlag – pot. Evaporation)

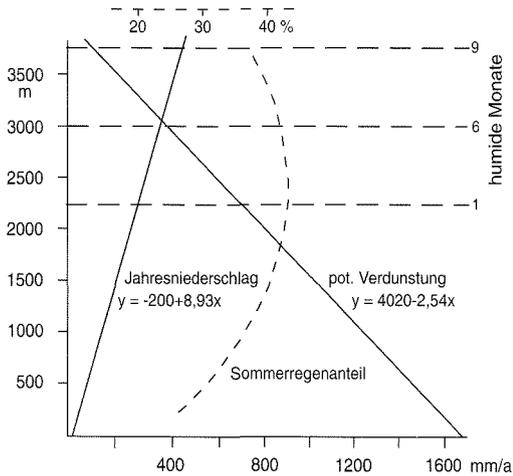


Abb. 4d: Höhengradienten der Jahresniederschläge, pot. Verdunstung und der Anzahl humider Monate

stung bereits neun humide Monate vorliegen. Ein Beleg für diese positive Wasserhaushaltsbilanz findet sich im Vegetationsbild mit den dichten alpinen Rasen auf dem Hochplateau bei 3 800 m zwischen Mount Barcroft und White Mountain Peak.

### **2.3 Die Bedeutung von Sommerregen für das Mikroklima in der Basin and Range Province**

In Abb. 4d ist eine weitere wichtige Variable eingetragen, die für den ariden Bereich der (Basin and) Ranges von ökologischer Bedeutung ist, nämlich der prozentuale Anteil der Sommerregen. Im vorliegenden Fall des Höhenverlaufs zwischen dem Death Valley und den White Mountains wird deutlich, daß in der Stufe der offenen Wälder zwischen 2 000 m und 3 500 m die sommerlichen Regenfälle auf rund 40% ansteigen, während sie in den trockeneren Lagen der Becken nur bei 20% liegen. Dieser Anstieg ist insofern bemerkenswert, da er nach Interpretation von Abb. 3c für die (Basin and) Ranges im Monat Juli höhere Niederschläge belegt als an der im Jahresmittel weitaus feuchteren Westseite der Sierra Nevada.

Da der eigentlich aride Komplex östlich der Sierra Nevada gerade in den Hochlagen von dieser ökologischen Gunstsituation profitiert, bedarf sie noch einer kurzen genetischen Erklärung. Das West-Ost-Profil in Abb. 5 macht deutlich, daß die Sierra Nevada eine wichtige Stellung als Klimascheide zwischen den pazifisch-feuchtemäßigten und den kontinental-trockenen Luftmassen einnimmt. Die Lage der White-Inyo Mountains und der Panamint Range im Regenschatten der Sierra Nevada geht aber nur aus der oberen Profilskizze für das Winterhalbjahr hervor. Die zyklonal-advektiven Luftmassen führen dann auf der Ostseite, also vor allem im Owens Valley, häufig zu Föhneffekten. Gelegentlich kann es auch zum Übergreifen der feuchten Luftmassen kommen, die den White Mountains Schnee bringen.

Im Sommerhalbjahr, das auf dem unteren Profilschema in Abb. 5 dargestellt ist, bleibt dagegen die Sierra Nevada ausgesprochen trocken. Dies ist die Phase verstärkter Brandeinwirkung, der z.B. die Mammutbaumbestände im Westen ihre Vitalität verdanken. Zeichnerisch etwas übertrieben, da nicht gerade extrem häufig, ist über den White Mountains ein Sommergewitter eingetragen; es kann natürlich genauso gut über der Panamint Range eingezeichnet sein und spielt auch weiter im Osten eine große Rolle, z.B. am San Francisco Peak (Abb. 3c). Gerade die Ostflanken der (Basin and) Ranges profitieren von den zumeist vom Süden aus dem Golf von Mexiko genährten Gewitterzellen. Unter diesen Vorgaben wird verständlich, weswegen die in Abb. 6 dargestellte Wildrose Ranger Station in der Panamint Range, etwa 150 km südöstlich von Bishop gelegen, schon ein leichtes Sommerregenmaximum aufweist (Pfeil), das dem Owens Valley in gleicher Höhenlage um 1 250 m fehlt. Bei der späteren Analyse der mikroklimatischen Messungen erklärt dieser Effekt auch die allgemein höheren Temperaturen und die geringere Feuchte in Bishop in Relation zum Wild Rose Canyon.

Nochmals zu betonen ist die Tatsache, daß die Hochstationen Crooked Creek und Barcroft in den White Mountains in Relation zu Bishop sehr wohl ein ausgeprägtes Sekundärmaximum der Niederschläge im Juli/August aufweisen. Das Owens Valley befindet sich in dieser Phase in einer offensichtlichen Lee-Position gegenüber den Luftmassen, die von Südosten her vom Golf von Mexiko einströmen. So gesehen bildet das Owens Valley aus klimagenetischer Sicht aufgrund seiner doppelten Leelage eigentlich die trockenste Region im Südwesten der USA. Daß das Death Valley absolut gesehen noch arider ist, hängt dabei nur mit seiner sehr tiefen Position zusammen, die von den verdunstenden Sommerregen nicht mehr erreicht wird. Die Hochlagen der White Mountains weisen zwar in den Wintermonaten humide Verhältnisse auf ( $N-pV > 0$ ), die warme Vegetationsperiode zeichnet sich aber trotz der Sommerregen durch ein Feuchtedefizit aus ( $N-pV < 0$ ). Für die Vegetationsentwicklung sollten sich also selbst in den Hochlagen kritische Voraussetzungen ergeben.

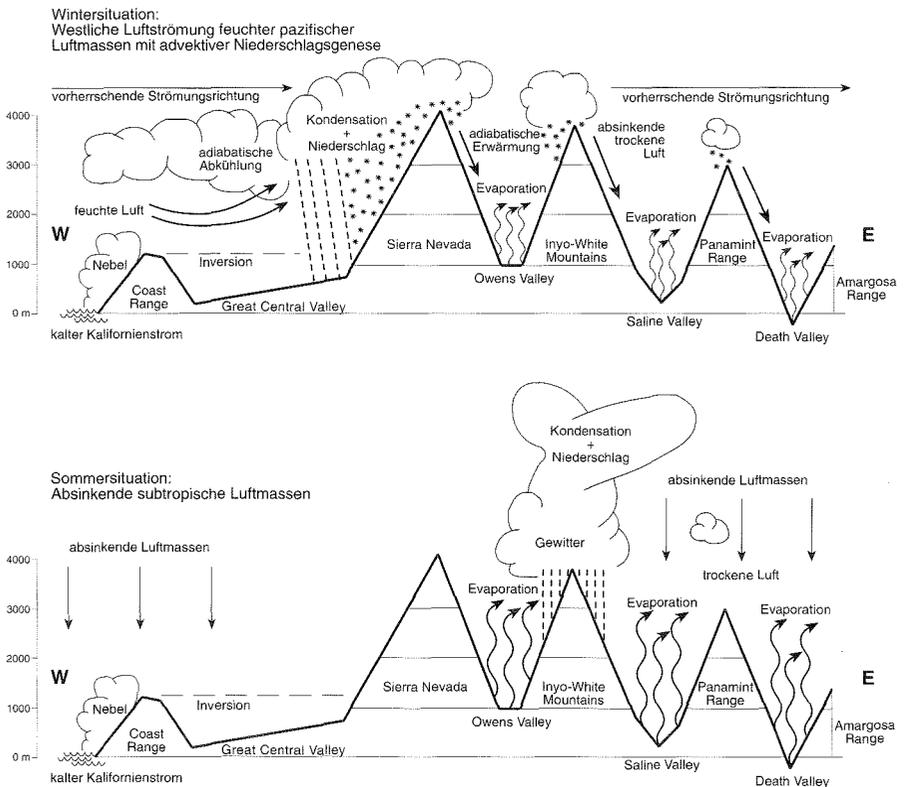


Abb. 5: Schematische Darstellung der vorherrschenden Luftströmungen, 37°N (verändert nach SCHOENHERR 1995)

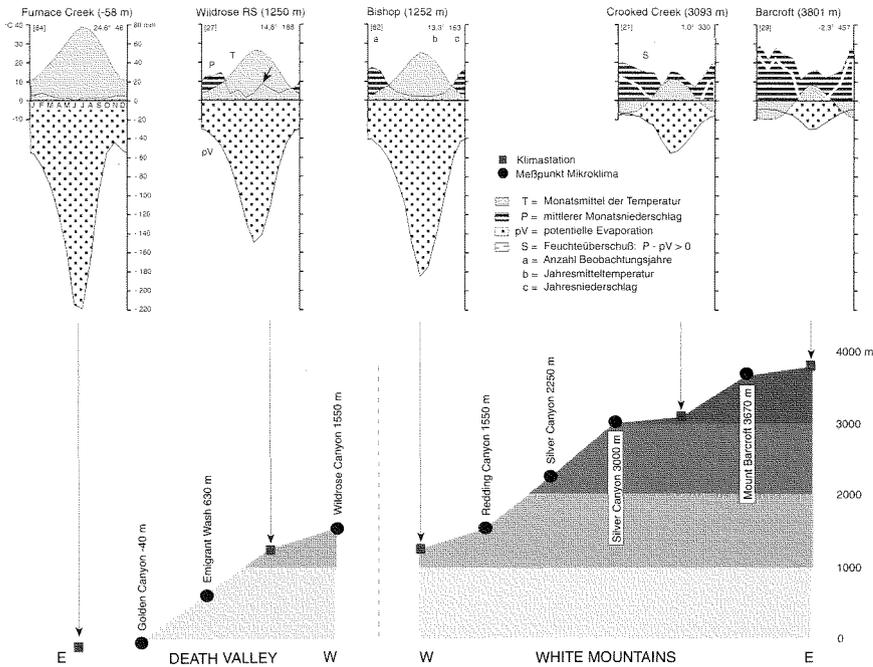


Abb.6: Lage der Klimastationen und Mikroklima-Meßpunkte entlang des Profils Death Valley-White Mountains

### 3 Mikroklimatische Detailstudien

#### 3.1 Strahlung und Temperatur

Vor dem Hintergrund der Bedeutung der Sommerregen und auch der winterlichen Schneebedeckung für die Vegetation erscheint es nun angebracht, diese Faktoren in ihrem mikroklimatischen Stellenwert näher zu untersuchen. Denn während bislang die großräumigen Strukturen des Klimas nur auf Basis von Wetterstationsdaten erklärt wurden, so reagieren die Pflanzen ja tatsächlich viel stärker auf das Mikroklima. Hier herrschen gerade im Gebirge viel extremere Verhältnisse vor, als es die makroklimatischen Studien zu erkennen geben.

Im Gegensatz zu den makroklimatischen Beobachtungen kann man in solchen Fällen nur auf punktuelle und kurze exemplarische Vergleichsmessungen zurückgreifen, da langjähriges Datenmaterial nicht verfügbar ist. So beruhen die folgenden Ergebnisse auf monatlichen Meßkampagnen vom Früh- bis Spätsommer 1996, die an den in Abb. 7 eingezeichneten Lokalitäten durchgeführt worden sind. Hierfür liegt ein aus zwei Teilstrecken zusammengesetztes Profil von Furnace Creek bis Barcroft vor, um einen großen Höhengradienten zwischen -58 m und 3 800 m abzudecken. Zur Verknüpfung der Daten zwischen dem Death Valley und den White

Mountains ist der Anschluß im 1 550 m-Niveau mit den Stationen Wild Rose- bzw. Redding Canyon doppelt belegt.

Daß dieses Verfahren notwendig ist, ergibt sich beispielsweise aus den Meßergebnissen zur Globalstrahlung. Hier ist davon auszugehen, daß sich der Anteil der diffusen Strahlung mit der Höhe zugunsten der direkten Strahlung verringert, da

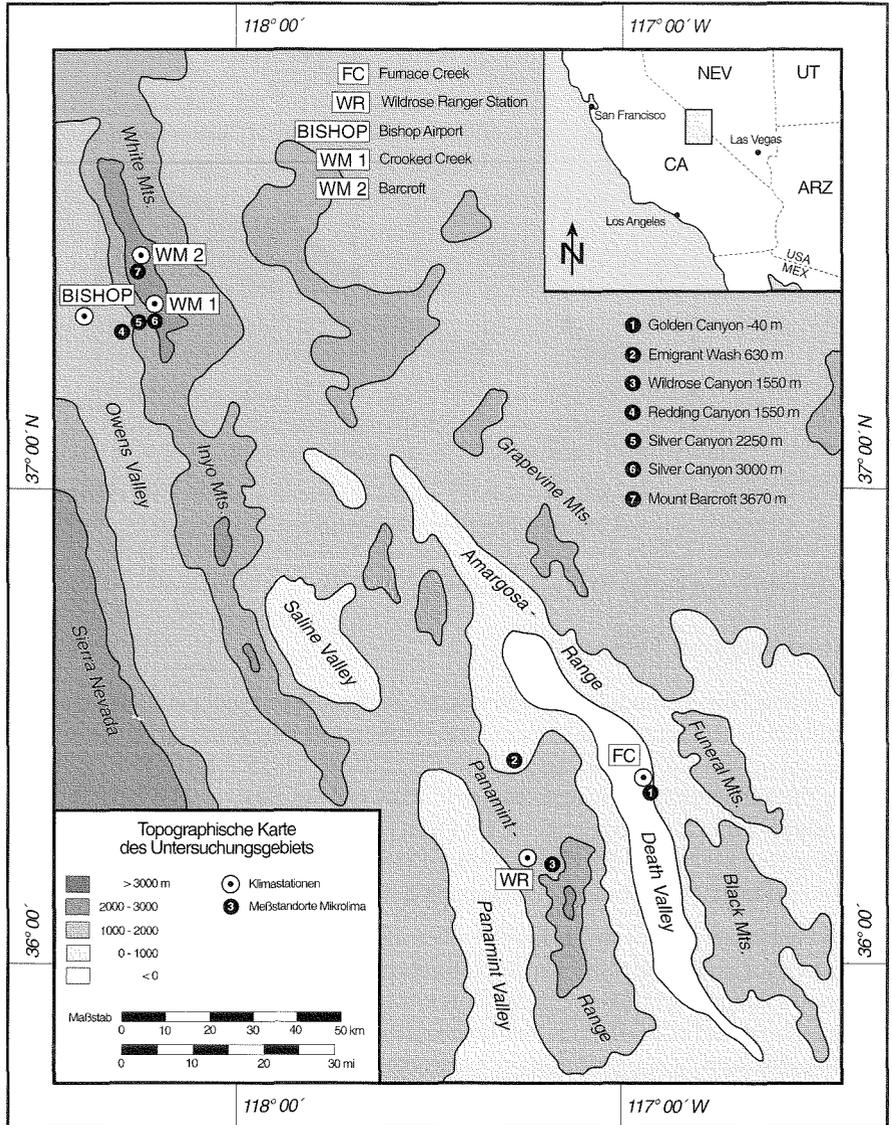


Abb. 7: Übersichtskarte der Death Valley-White Mountains Region

Luftdichte und Streuung abnehmen. Speziell in ariden Gebirgen führt die sehr hohe Staubanreicherung in den thermischen Tiefdruckkörpern bis zur Peplopause in ein bis zwei Kilometern über Grund zum exponentiellen Strahlungszuwachs. Oberhalb dieses Staubbörsers nimmt die Strahlung dann allmählich zu (Abb. 8a). In den vorliegenden Fällen des Death Valley und Owens Valley liegen jeweils getrennte Ausgangsniveaus vor, so daß nach Abb. 8b die Peplopause im ersten Fall bis etwa 1 500 m, im zweiten Fall bis ca. 2 800 m reicht. Der Strahlungszuwachs mit der Höhe kann bei Teilbewölkung, wie sie im Untersuchungsgebiet häufig auftritt, durch zusätzliche Reflexion an Wolken noch gesteigert werden (BARRY 1992).

So konnte im Juni während eigener Messungen auf 3 000 m an einem Schönwettertag bei Annäherung einzelner Altocumuli ein Zuwachs gegenüber der Normalstrahlung um 124 W/m<sup>2</sup> festgestellt werden. Mit dieser Steigerung von immerhin fast 10% wurden 1 278 W/m<sup>2</sup> erreicht, dies sind beachtliche 93% der Solarkonstanten (1 370 W/m<sup>2</sup>). In den White Mountains treten bei optimalen Verhältnissen überproportionale Strahlungswerte auf, die wiederum maximale Oberflächentemperaturen von über 70°C auf dunklem Substrat verursachen – Windstille vorausgesetzt (auf hellem Substrat wurden in 2 800 m Höhe immerhin noch 67°C erreicht). Außerdem kommt es gerade aufgrund der besonderen Reflexionsverhältnisse durch die Bewölkung in den Hochlagen zu Strahlungsvariationen, die innerhalb von wenigen Minuten Änderungen der Oberflächentemperaturen bis zu 15 K bedingen. Daraus folgt, daß sich die Vegetation in Hochgebirgen im allgemeinen und in den White Mountains im besonderen auf einen extremen mikroklimatischen Streß einstellen muß.

Dieser mikroklimatische Thermostreß spiegelt sich auch in den Tagesamplituden der Oberflächentemperatur wider. Abb. 9a belegt, daß sie sich im Barcroft-Level auf

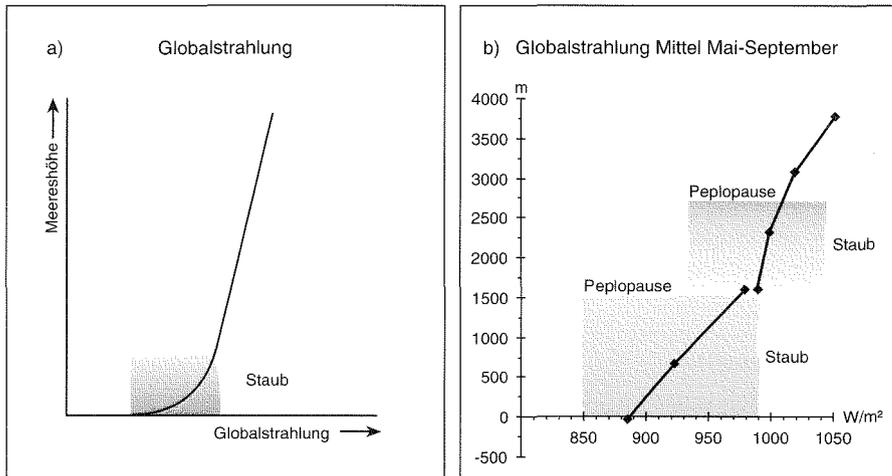


Abb. 8: Höhenverlauf der Globalstrahlung entlang des Death Valley-White Mountains Transektes: a) theoretischer Verlauf, b) Mittel der Meßwerte

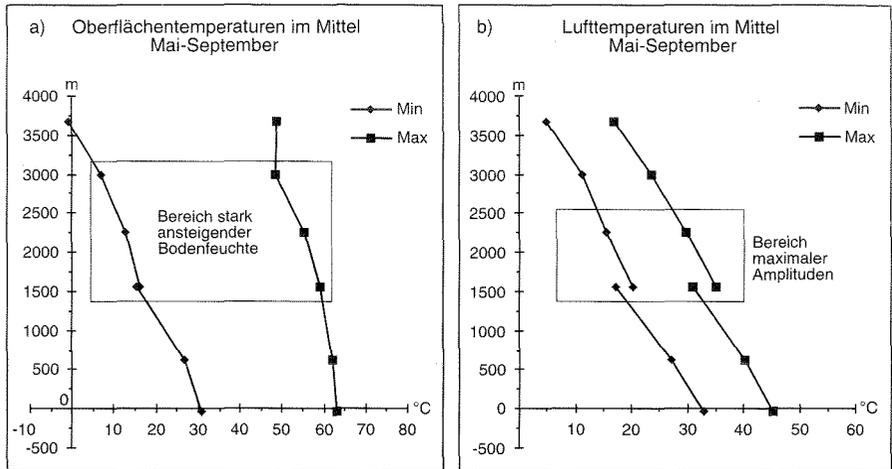


Abb. 9: Höhenverlauf der a) Oberflächen- und b) Lufttemperatur entlang des Death Valley-White Mountains Transektes

einen Mittelwert (!) von 50 K für den Zeitraum von Mai bis September belaufen, während der Analogwert am Grund des Death Valley nur 33 K beträgt. An dieser Gesetzmäßigkeit im Gebirge sind beide Extreme beteiligt, sowohl das Temperaturminimum aufgrund erhöhter Ausstrahlung, als auch das Temperaturmaximum aufgrund erhöhter Einstrahlung infolge der verringerten Lufttrübe (ein leicht anomaler Bereich zwischen 1 500 m und 3 000 m muß später in anderem Zusammenhang erklärt werden). Das Prinzip der erhöhten Temperaturamplituden an Oberflächen in Hochgebirgen muß hier betont werden, da es für die in Kapitel 2.1 behandelten Lufttemperaturen gerade nicht zutrifft. Dies geht aus Abb. 9b hervor, wo dieselbe Ausgangssituation, nämlich die geringe Staubbeklastung, dafür verantwortlich ist, daß sich die Luft im tageszeitlichen Wandel weder stark erwärmt noch abkühlt.

Als Folgerung läßt sich zunächst festhalten, daß von den strahlungs- und mikrothermischen Voraussetzungen her die ökologischen Grundbedingungen für Pflanzenwuchs gerade in trockenen Gebirgen als wenig günstig zu bezeichnen sind. Es stellt sich also die Frage, warum sich trotz dieses negativen Befundes die Vegetation in den White Mountains als recht dicht und die Flora als artenreich erweist.

### 3.2 Bodenfeuchte

Die extremen thermischen Verhältnisse müssen sich nicht zwangsläufig auf den ökologischen Wasserhaushalt auswirken. Zuvor wurde ja für das Untersuchungsgebiet positiv festgehalten, daß mit dem winterlichen Schneefall und den sommerlichen Konvektionsniederschlägen zwei Feuchtequellen zur Verfügung stehen. Theoretisch läßt sich hieraus ableiten, daß sich diese Situation auch mikroklimatisch aus-

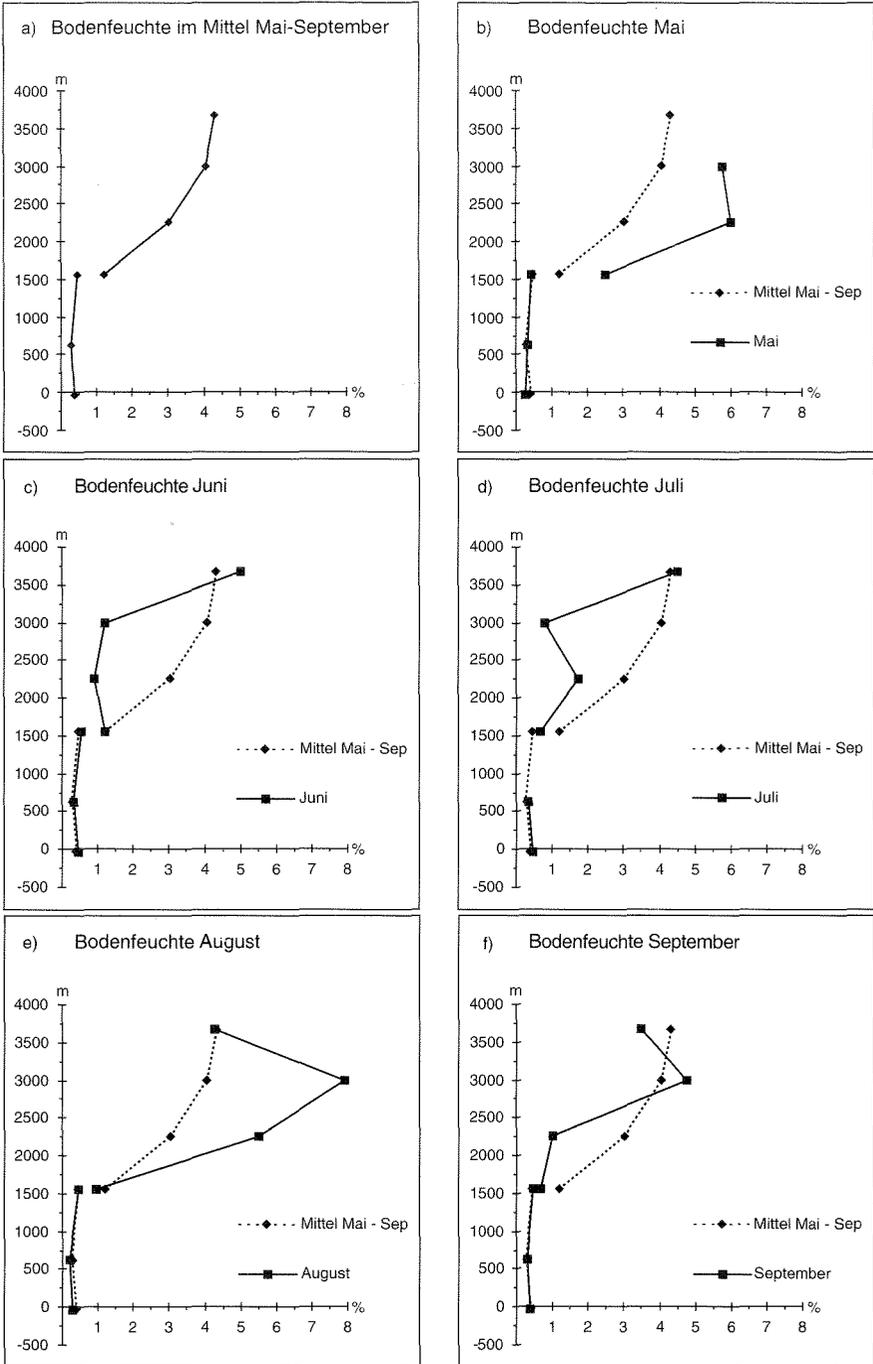


Abb. 10: Höhenverlauf der Bodenfeuchte entlang des Death Valley-White Mountains Transektes: a) Mittelwert der Meßperiode und b) - f) Monatswerte

wirkt, indem ein erheblicher Teil des Bodenwassers in latente Energie überführt wird. Dieses Phänomen der Verschiebung der sogenannten Bowenratio spielt im Untersuchungsgebiet jedoch keine sehr große Rolle, da es im Hochsommer zu den bereits erwähnten starken Aufheizungen kommt. Trotz starker Oberflächenerhitzung trocknen die Böden nicht allzu rasch und stark aus. Hierzu trägt die Bodenstruktur bei; die lehmigen Sande und sandigen Lehme, die entlang des gesamten Profils auftreten, zeichnen sich durch günstige Infiltrationsraten und für die Pflanzen günstige Wasserhaltekapazitäten aus.

In den mittleren Bodenfeuchteverhältnissen von Mai bis September spiegelt sich deutlich der Einfluß der ansteigenden Niederschläge im Höhenbereich über 2 000 m wider (Abb. 10a). Im Mai lassen sich noch die Einflüsse der Schneeschmelze oberhalb 1500 m nachweisen, da die Feuchtwerte positiv vom Mittel abweichen (Abb. 10b). Im Juni ist dieser Effekt schon weitgehend verschwunden, sieht man vom höchsten Meßpunkt einmal ab (Abb. 10c); auch der Juli erweist sich als relativ defizitärer Monat (Abb. 10d). Der Input an Schneeschmelzfeuchte ist jetzt wegen extrem hoher Sublimationsraten bis zu 95% (BEATY 1975) und der vornehmlichen Entwässerung zur Ostflanke selbst im Umfeld von Aperflecken sehr gering. In dieser Phase finden sich auch auf der untersuchten Westabdachung der White Mountains keine Schneefelder mehr. Diese bleiben lediglich an der Ostflanke länger bestehen, wo im Winter durch Verblasung und Verwirbelung größere Schneemengen in Gunstlagen des Reliefs akkumuliert werden. Mit fortschreitender Gewitteraktivität im August, die vor allem oberhalb ca. 2 000 m wirksam wird, stellt sich auf eben diesem Höhenbereich ein erneutes Feuchtemaximum ein (Abb. 10e). Erst oberhalb 3 000 m nimmt die Bodenfeuchte bis zum September wieder ab (Abb. 10f).

Für die Waldzone zwischen 2 000 m und 3 000 m stellt sich nur im Juni und Juli eine Dürrephase ein, bevor die Verhältnisse im August wieder günstiger werden. Letzteres dürfte ein Hauptgrund für die Ausbildung einer derart dichten Vegetation sein. Aus Abb. 9a wird ersichtlich, daß es sich eben um jenen Bereich handelt, wo aufgrund der stark ansteigenden Bodenfeuchte auch die Ausweitung der Oberflächentemperaturamplituden vorübergehend abgemildert wird. Zu beachten ist aber, daß sich die sommerlichen Konvektionsniederschläge durch eine sehr hohe raum-zeitliche Variabilität auszeichnen (während z.B. starke Regengüsse am 27. Juli 1996 im Silver Canyon zu enormen Überflutungen führten, blieb der nur 10 km entfernte Black Canyon weitgehend trocken). Die Vegetation muß folglich an extreme inter- und intraannuäre Variationen des Feuchtehaushaltes angepaßt sein.

### **3.3 Globaler Vergleich mit anderen Gebirgen in der subtropischen Trockenzone**

Die vorstehenden Ergebnisse weisen die Gebirgszüge der Basin and Range als Typus aus, in dem die Sommerniederschläge für den relativ dichten Bewuchs in den

mittleren und hohen Lagen von besonderer Bedeutung sind. Im Vergleich mit der extrem trockenen Hochatacama in Nordchile und dem feuchteren Karakorum in Kaschmir nehmen die White Mountains eine Mittelstellung ein. Im Karakorum steigen die Niederschläge vom Talgrund bis auf das 4000 m-Niveau von ca. 100 mm bis 800 mm an; in diesem Fall herrschen in den Tieflagen ähnlich trockene Vegetationstypen mit *Artemisia*-Dominanz wie im Owens Valley vor, während zumindest an den Nordhängen dichte und dunkle Fichtenwälder deutlich feuchtere Verhältnisse als in Ostkalifornien anzeigen. Auch hier spielen Sommerregen eine große Rolle. Die Hochatacama ist ungleich trockener, wobei die Niederschläge von ca. 25 mm im 2000 m-Niveau auf maximal 150 mm bei 4000 m Höhe ansteigen; hier führt diese Situation im Sommerregengebiet zu einer maximalen Vegetationsdichte von 40% mit Zwergsträuchern und Horstgräsern, während im Winterregengebiet die gleiche Niederschlagsmenge nur gerade für eine 2%ige Vegetationsbedeckung ausreicht (RICHTER, 1996).

Dieser Vergleich macht zwei wesentliche klimaökologische Kriterien für die Basin and Range Province und damit auch für die White Mountains deutlich:

- Der mäßige höhenwärtige Anstieg der Niederschläge erlaubt die Ausbildung von einer Halbwüste bis hin zu offenen Wäldern und dichten Rasen.
- Der Einfluß des Sommerregens ist trotz seiner raum-zeitlichen Variabilität und seines etwas geringeren Anteils am Jahresniederschlag für die Existenz der Wälder in den Trockengebieten von ausschlaggebender Bedeutung.

#### **4 Höhenstufen und Raummuster der Vegetation**

Nachdem die klimatischen Ausführungen auf eine klare Trennung zwischen dem Komplex der Sierra Nevada und der Basin and Ranges hinauslaufen, sollte bei der Vegetation eine entsprechende Differenzierung festzustellen sein. Ein weiterer Wandel ist zwischen dem Westen und Osten der Great Basin Provinz zu erwarten, da im gleichen Richtungsinne der Jahresniederschlag und der Sommerregenanteil allmählich zunehmen. Bei dieser Betrachtung ist aber noch nicht berücksichtigt, daß der klimatische Wandel von einem petrographischen zusätzlich überlagert wird. In dieser Hinsicht ist von einem homogenen granitischen Block bei der Sierra Nevada auszugehen, während die einzelnen Ranges von Nevada bis Utah/Colorado eine recht heterogene geologische Situation aus großenteils verschiedenen Sedimentgesteinen vorgeben. In diesem Fall stände demnach eine einheitliche Vegetationsabfolge der Sierra Nevada einer komplexen der Basin and Ranges gegenüber – also Verhältnisse, die den klimatischen Vorgaben eher entgegenlaufen. Es läßt sich nun die interessante Frage anschließen, welcher der beiden ökologischen Faktoren die Pflanzenwelt stärker prägt.

Ein zweckmäßiges Mittel zur Klärung dieser Beziehungen bilden Ähnlichkeitsanalysen. Nach MÜLLER-DOMBOIS & ELLENBERG (1974) folgen Vegetationsunter-

wirkt, indem ein erheblicher Teil des Bodenwassers in latente Energie überführt wird. Dieses Phänomen der Verschiebung der sogenannten Bowenratio spielt im Untersuchungsgebiet jedoch keine sehr große Rolle, da es im Hochsommer zu den bereits erwähnten starken Aufheizungen kommt. Trotz starker Oberflächenerhitzung trocknen die Böden nicht allzu rasch und stark aus. Hierzu trägt die Bodenstruktur bei; die lehmigen Sande und sandigen Lehme, die entlang des gesamten Profils auftreten, zeichnen sich durch günstige Infiltrationsraten und für die Pflanzen günstige Wasserhaltekapazitäten aus.

In den mittleren Bodenfeuchteverhältnissen von Mai bis September spiegelt sich deutlich der Einfluß der ansteigenden Niederschläge im Höhenbereich über 2000 m wider (Abb. 10a). Im Mai lassen sich noch die Einflüsse der Schneeschmelze oberhalb 1500 m nachweisen, da die Feuchtwerte positiv vom Mittel abweichen (Abb. 10b). Im Juni ist dieser Effekt schon weitgehend verschwunden, sieht man vom höchsten Meßpunkt einmal ab (Abb. 10c); auch der Juli erweist sich als relativ defizitärer Monat (Abb. 10d). Der Input an Schneeschmelzfeuchte ist jetzt wegen extrem hoher Sublimationsraten bis zu 95% (BEATY 1975) und der vornehmlichen Entwässerung zur Ostflanke selbst im Umfeld von Aperflecken sehr gering. In dieser Phase finden sich auch auf der untersuchten Westabdachung der White Mountains keine Schneefelder mehr. Diese bleiben lediglich an der Ostflanke länger bestehen, wo im Winter durch Verblasung und Verwirbelung größere Schneemengen in Gunstlagen des Reliefs akkumuliert werden. Mit fortschreitender Gewitteraktivität im August, die vor allem oberhalb ca. 2000 m wirksam wird, stellt sich auf eben diesem Höhenbereich ein erneutes Feuchtemaximum ein (Abb. 10e). Erst oberhalb 3000 m nimmt die Bodenfeuchte bis zum September wieder ab (Abb. 10f).

Für die Waldzone zwischen 2000 m und 3000 m stellt sich nur im Juni und Juli eine Dürrephase ein, bevor die Verhältnisse im August wieder günstiger werden. Letzteres dürfte ein Hauptgrund für die Ausbildung einer derart dichten Vegetation sein. Aus Abb. 9a wird ersichtlich, daß es sich eben um jenen Bereich handelt, wo aufgrund der stark ansteigenden Bodenfeuchte auch die Ausweitung der Oberflächen-temperaturamplituden vorübergehend abgemildert wird. Zu beachten ist aber, daß sich die sommerlichen Konvektionsniederschläge durch eine sehr hohe raum-zeitliche Variabilität auszeichnen (während z.B. starke Regengüsse am 27. Juli 1996 im Silver Canyon zu enormen Überflutungen führten, blieb der nur 10 km entfernte Black Canyon weitgehend trocken). Die Vegetation muß folglich an extreme inter- und intraannuäre Variationen des Feuchtehaushaltes angepaßt sein.

### **3.3 Globaler Vergleich mit anderen Gebirgen in der subtropischen Trockenzone**

Die vorstehenden Ergebnisse weisen die Gebirgszüge der Basin and Range als Typus aus, in dem die Sommerniederschläge für den relativ dichten Bewuchs in den

mittleren und hohen Lagen von besonderer Bedeutung sind. Im Vergleich mit der extrem trockenen Hochatacama in Nordchile und dem feuchteren Karakorum in Kaschmir nehmen die White Mountains eine Mittelstellung ein. Im Karakorum steigen die Niederschläge vom Talgrund bis auf das 4000 m-Niveau von ca. 100 mm bis 800 mm an; in diesem Fall herrschen in den Tieflagen ähnlich trockene Vegetationstypen mit *Artemisia*-Dominanz wie im Owens Valley vor, während zumindest an den Nordhängen dichte und dunkle Fichtenwälder deutlich feuchtere Verhältnisse als in Ostkalifornien anzeigen. Auch hier spielen Sommerregen eine große Rolle. Die Hochatacama ist ungleich trockener, wobei die Niederschläge von ca. 25 mm im 2000 m-Niveau auf maximal 150 mm bei 4000 m Höhe ansteigen; hier führt diese Situation im Sommerregengebiet zu einer maximalen Vegetationsdichte von 40% mit Zwergsträuchern und Horstgräsern, während im Winterregengebiet die gleiche Niederschlagsmenge nur gerade für eine 2%ige Vegetationsbedeckung ausreicht (RICHTER, 1996).

Dieser Vergleich macht zwei wesentliche klimaökologische Kriterien für die Basin and Range Province und damit auch für die White Mountains deutlich:

- Der mäßige höhenwärtige Anstieg der Niederschläge erlaubt die Ausbildung von einer Halbwüste bis hin zu offenen Wäldern und dichten Rasen.
- Der Einfluß des Sommerregens ist trotz seiner raum-zeitlichen Variabilität und seines etwas geringeren Anteils am Jahresniederschlag für die Existenz der Wälder in den Trockengebieten von ausschlaggebender Bedeutung.

#### **4 Höhenstufen und Raummuster der Vegetation**

Nachdem die klimatischen Ausführungen auf eine klare Trennung zwischen dem Komplex der Sierra Nevada und der Basin and Ranges hinauslaufen, sollte bei der Vegetation eine entsprechende Differenzierung festzustellen sein. Ein weiterer Wandel ist zwischen dem Westen und Osten der Great Basin Provinz zu erwarten, da im gleichen Richtungssinne der Jahresniederschlag und der Sommerregenanteil allmählich zunehmen. Bei dieser Betrachtung ist aber noch nicht berücksichtigt, daß der klimatische Wandel von einem petrographischen zusätzlich überlagert wird. In dieser Hinsicht ist von einem homogenen granitischen Block bei der Sierra Nevada auszugehen, während die einzelnen Ranges von Nevada bis Utah/Colorado eine recht heterogene geologische Situation aus großenteils verschiedenen Sedimentgesteinen vorgeben. In diesem Fall stände demnach eine einheitliche Vegetationsabfolge der Sierra Nevada einer komplexen der Basin and Ranges gegenüber – also Verhältnisse, die den klimatischen Vorgaben eher entgegenlaufen. Es läßt sich nun die interessante Frage anschließen, welcher der beiden ökologischen Faktoren die Pflanzenwelt stärker prägt.

Ein zweckmäßiges Mittel zur Klärung dieser Beziehungen bilden Ähnlichkeitsanalysen. Nach MÜLLER-DOMBOIS & ELLENBERG (1974) folgen Vegetationsunter-

suchungen der Annahme, daß sich unter ähnlichen Standortverhältnissen auch ähnliche Arten- und Formenkombinationen finden. Im vorliegendem Fall beruhen die im Gelände erhobenen Daten auf floristischen, pflanzenmorphologischen und strukturellen Angaben. Hierfür liegen 250 Vegetationsaufnahmen aus der Sierra Nevada, den White Mountains, der Toiyabe Range und dem Wheeler Peak vor, um den West-Ost-Wandel herauszuarbeiten. Die Erhebungen, die für die White Mountains exemplarisch in Tab. 1 vorgestellt werden, beruhen auf den gleichen Aufnahmemethoden und Flächengrößen, wobei sich die Höhendistanzen zwischen den jeweiligen Lokalitäten auf maximal 150 Höhenmeter belaufen. Da die Untersuchungen auf Ähnlichkeitsanalysen und somit auf möglichst exakte statistische Beurteilungen ausgerichtet sind, liegen vor Ort erfaßte Prozentwerte der Artendeckung vor. Die Flächengrößen betragen 10 mal 10 m, da für Vergleichsberechnungen eine Festlegung auf unterschiedlich große Minimumareale unzweckmäßig ist. Es liegen möglichst naturnahe Standorte zugrunde; azonale Vegetationstypen wie z.B. Pappel- oder Weidenauen bleiben bewußt unberücksichtigt. Die Ergebnisse der Toiyabe Range werden hier nicht vorgestellt, da als erstes Resultat bereits festzuhalten ist, daß kein großer Unterschied zu den White Mountains besteht.

#### **4.1 Floristische Ähnlichkeit und Höhenstufen**

Bei der Analyse der Sierra Nevada als westlichem Saum des Untersuchungsgebiets stellt sich eine deutliche Differenzierung der Vegetation zwischen Luv- und Leeseite heraus (Abb. 11a). Naturgemäß betrifft dies vor allem die unteren Höhenstufen, die auf der trockenen Ostseite durch eine relativ einheitliche Abfolge von der Strauchsteppe zum montanen Offenwald gekennzeichnet wird. Die Westseite erweist sich dagegen im gleichen Höhenbereich als heterogener, da sich das Artenpotential vom submontanen Mischwald bis zum subalpinen Nadelwald stärker verändert. Nur in den Kammlagen sind die Höhenstufen beider Expositionen analog, da hier die feuchten Luftmassen des Westens auf die Ostseite übergreifen.

Die Trennung zwischen West- und Ostseite kommt im Falle der Sierra Nevada auch im Clusterdiagramm der Ähnlichkeitsanalysen in Abb. 11b deutlich zum Ausdruck. Hier kann man feststellen, daß sich die westlichen Aufnahmestandorte weitgehend auf den linken Abbildungsteil konzentrieren und die östlichen auf den rechten. Wären die Expositionsunterschiede gering und die Höhenstufen auf der West- und Ostseite ähnlich, käme diese Trennung nicht klar zum Ausdruck (vgl. unten, Abb. 12b). Das aufgezeigte Bild der pflanzengeographischen Heterogenität in der Sierra Nevada läßt sich auch in dem Ähnlichkeitsdiagramm in Abb. 11c wiederfinden. In den unteren Höhenlagen ist die Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Expositionen gering, in den Kammlagen steigt sie deutlich an.

Eine ganz andere Situation spiegeln die Höhenstufen in den White Mountains wider. Sie sind hier auf beiden Seiten trotz unterschiedlicher petrographischer Vor-

Klimaökologische Aspekte in Gebirgen der südwestlichen USA

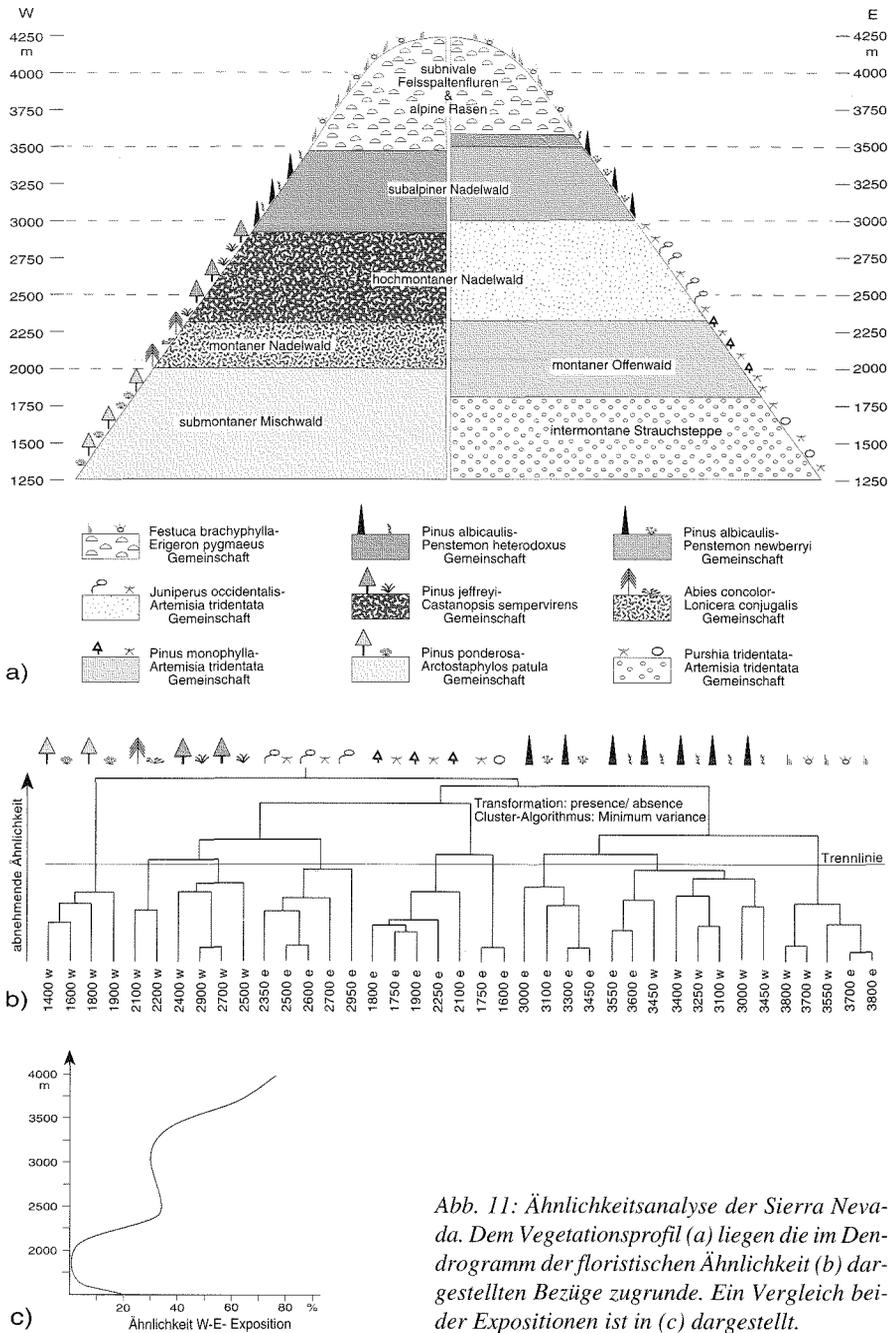


Abb. 11: Ähnlichkeitsanalyse der Sierra Nevada. Dem Vegetationsprofil (a) liegen die im Dendrogramm der floristischen Ähnlichkeit (b) dargestellten Bezüge zugrunde. Ein Vergleich beider Expositionen ist in (c) dargestellt.

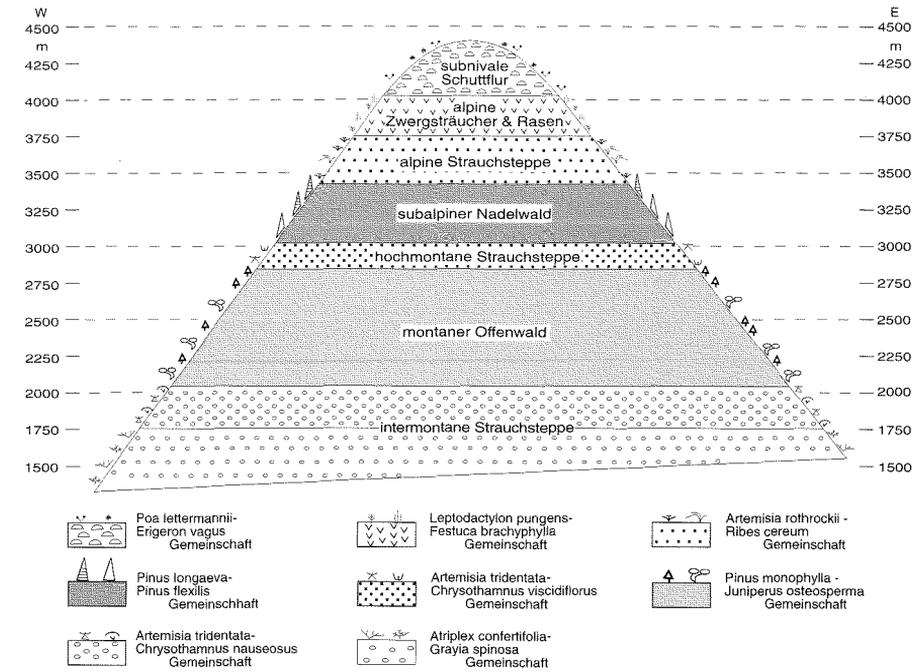


Photo 1: Blick auf die Mount-Whitney-Gruppe der Sierra Nevada (Ostflanke). Deutlich zu erkennen ist die doppelte Waldgrenze

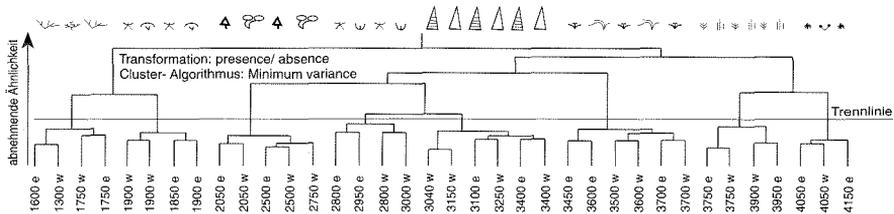
gaben nahezu identisch (Abb. 12a). Die im Profil aufgezeichnete klare vertikale Abfolge ergibt sich aus der Ähnlichkeitsanalyse im Dendrogramm (Abb. 12b), wo die Aufnahmen der West- und Ostseite in den einzelnen Höhengniveaus paarweise nebeneinander auftreten, also nicht wie im Falle der Sierra Nevada eine Trennung zwischen beiden Seiten vorliegt. Die hohe floristische Ähnlichkeit beider Expositionen in den White Mountains läßt sich auch in der den Untersuchungen zugrunde liegenden pflanzensoziologischen Tabelle erkennen, wo der Artenbesatz der West- und Osthänge für verschiedene Höhenlagen weitgehend identisch ist (Tab. 1, reduzierter Datensatz: 50 % der Arten sind aufgeführt, jedoch alle in die Berechnung einbezogen). Darüber hinaus läßt sich feststellen, daß vom Talgrund bis zur Obergrenze des Kiefern-Wacholder-Offenwaldes in etwa 2800 m Höhe die Vegetation mit derjenigen der Ostseite der Sierra Nevada nahezu übereinstimmt (vgl. Abb. 11a mit Abb. 12a). Der gemeinsame prägende Faktor ist in diesem Fall eindeutig die überlagernde Aridität. Erst von der hochmontanen Strauchstufe an, die sich in den White Mountains als sogenannte „balds“ zwischen einen unteren und oberen Offenwald schieben, zeichnet sich eine recht deutliche Veränderung mit wenig Bezügen zur Sierra Nevada ab.

Hierin läßt sich nun der prägende Einfluß des Sommerregens erkennen, der der Sierra Nevada weitgehend fehlt: Dort bleibt zum Beispiel die für die White Mountains so bezeichnende Bristlecone Pine (*Pinus longaeva*) des oberhalb der Strauch-

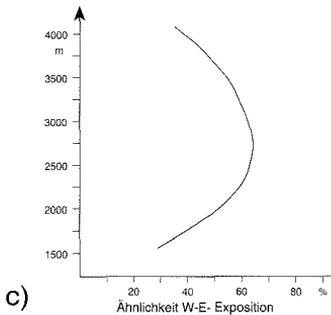
Klimaökologische Aspekte in Gebirgen der südwestlichen USA



a)



b)



c)

Abb. 12: Ähnlichkeitsanalyse der White Mountains. Dem Vegetationsprofil (a) liegen die im Dendrogramm der floristischen Ähnlichkeit (b) dargestellten Bezüge zugrunde. Ein Vergleich beider Expositionen ist in (c) dargestellt.







Photo 2: White Mountains; substratabhängige Ausbildung unterschiedlicher Vegetationstypen (3400 m)

stufe folgenden subalpinen Waldgürtels ebenso wie die bis 3700 m reichende Wermutart *Artemisia rothrockii* aus. Im Vergleich zur Sierra Nevada und zum Wheeler Peak sind nochmals die soeben erwähnten „balds“ hervorzuheben, die an vielen anderen Ranges in Nevada, Idaho, Utah und Arizona ebenfalls anzutreffen sind (VENZKE 1985). Sie sind keinesfalls klimatisch zu erklären, also etwa durch ein lokales Niederschlagsdefizit, und auch nicht petrographisch, da sie in allen Fällen ein ähnliches Höhenniveau einnehmen. Es handelt sich vielmehr um ein Phänomen der „unbesetzten Nische“, das RICHTER (1996) zum Beispiel vom nördlichen Tien Shan beschreibt. Der Hintergrund hierfür ist florenhistorischer Natur, da sich dieser Höhenbereich klimaökologisch durchaus für Baumwuchs eignet, jedoch für Baumarten die in der Region (noch) fehlen (Hintergründe für dieses in Zentralasien gleichfalls auftretende Phänomen vgl. AGANCHANJANC 1980).

Am Wheeler Peak als drittem Beispiel (Abb. 13a) zeigt sich erneut eine Ähnlichkeit in der semiariden Fußstufe und in dem montanen Kiefern-Wacholder-Offenwald mit den Verhältnissen in den White Mountains und der östlichen Abdachung der Sierra Nevada. Es fällt aber auf, daß der montane Offenwald bereits bei 2500 m von einer neuen Waldgesellschaft abgelöst wird, die feuchtere Verhältnisse ankündigt. Ähnlich wie an der Westseite der Sierra Nevada tritt hier wieder die Weißtanne (*Abies concolor*) auf und ersetzt die „balds“, bevor noch weiter oben mit der Fichte (*Picea engelmannii*) die rasch steigende Humidität endgültig offensichtlich wird. Insgesamt bleiben aber die Höhenstufen noch klar ausgebildet, zeigen also keine

Klimaökologische Aspekte in Gebirgen der südwestlichen USA

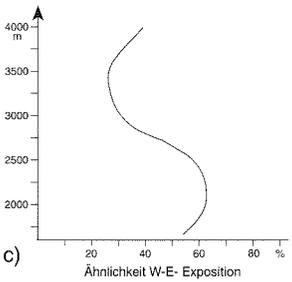
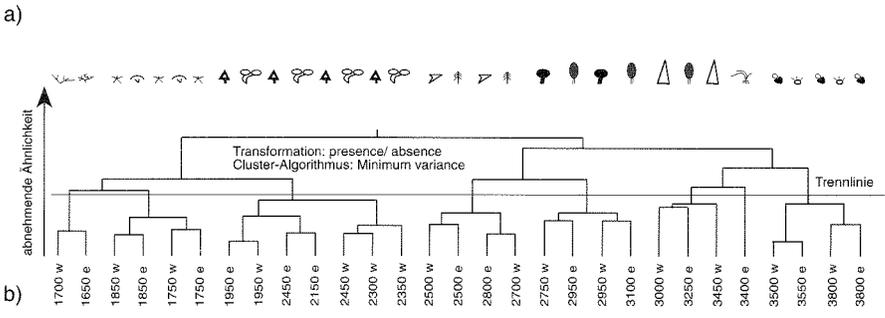
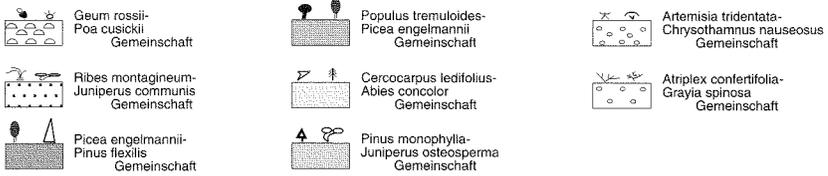
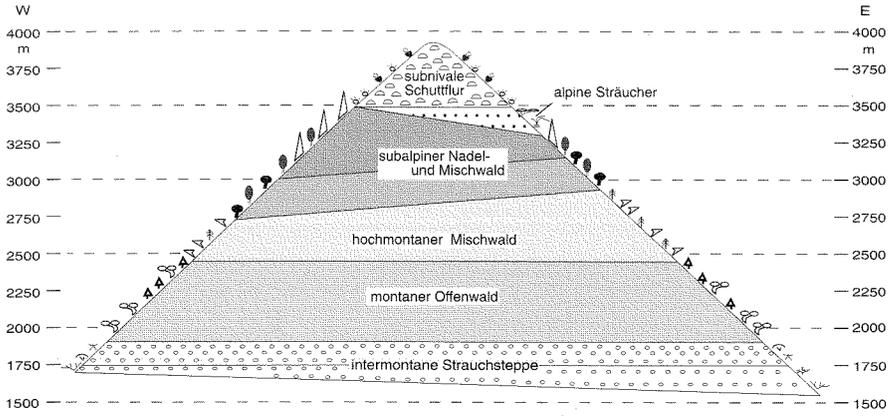


Abb. 13: Ähnlichkeitsanalyse des Wheeler Peak. Dem Vegetationsprofil (a) liegen die im Dendrogramm der floristischen Ähnlichkeit (b) dargestellten Bezüge zugrunde. Ein Vergleich beider Expositionen ist in (c) dargestellt.

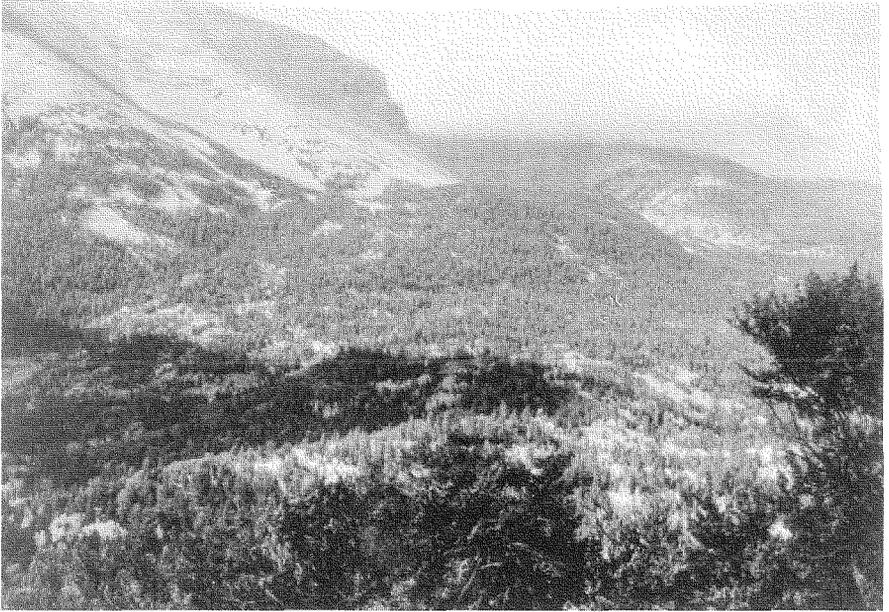


Photo 3: Wheeler Peak; subalpiner Nadel- und Mischwald mit Pappeln als brandbedingte Vorhölzer (hellere Waldbereiche)

deutlichen Expositionsunterschiede (Abb. 13 b). Nur an der oberen Waldgrenze findet sich an der Ostseite mit *Juniperus communis* wieder eine Asymmetrie; ihre Lage könnte topoklimatisch bedingt sein, da die Westseite in den Hochlagen von Starkwinden beeinflusst wird und diese Vorkommen im Aufwuchs behindert werden. Hierfür spricht auch die Tatsache, daß die unterhalb auftretenden Waldstufen auf der Ostseite etwas höher hinaufreichen als auf der Westseite.

Die möglichen Unterschiede der Windwirkung könnten auch den Kurvenverlauf in Abb. 13c erklären, wo insbesondere die Hochlagen eine geringere Ähnlichkeit in der Vegetation zwischen beiden Expositionen aufweisen als die Tieflagen. Zu überprüfen bleibt allerdings auch der petrologische Faktor als Einflußgröße, da auf der Westseite Kalke vorherrschen und auf der Ostseite Granite. Wenn man allerdings die Artenbesätze der gemeinsamen Pflanzengemeinschaften auf der West- und Ostseite miteinander und nicht die jeweiligen Höhenniveaus vergleicht, so lassen sich deutlichere Übereinstimmungen feststellen. Hier tritt nun ein anderer Typus an Expositionsunterschieden auf, nämlich jener der „geneigten“ oder „positionsverschobenen“ Höhenstufung, wohingegen die Sierra Nevada durch „floristische“ oder „syntaxonomische“ Expositionsunterschiede gekennzeichnet wird.

Ein abschließender Vergleich der drei Gebirge (Abb. 14) belegt eine deutliche syntaxonomische Trennung des Sierra Nevada- und des Wheeler Peak- Komplexes. Beide zusammen sind im überregionalen Dendrogramm aber über eine noch höhere

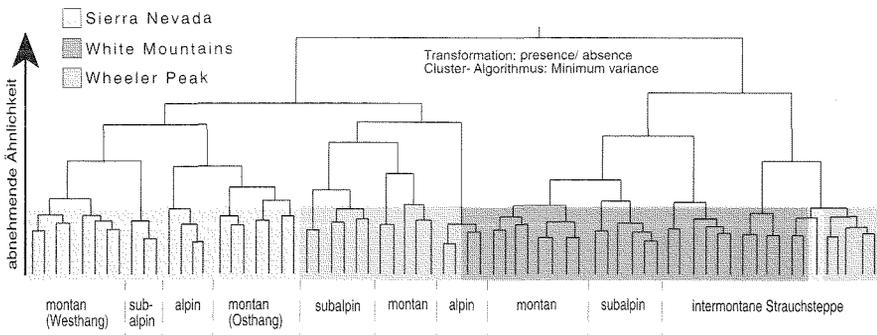


Abb. 14: Dendrogramm der floristischen Ähnlichkeit aller Gebirge

Brücke großer Unähnlichkeit von den White Mountains abgeschieden. Letztere nehmen auf der rechten Hälfte des Ähnlichkeitsdiagrammes mit dem dunkelgrau unterlegten Bereich eine isolierte Position ein. Einzig in den tieferen Lagen der Strauchsteppe mit *Artemisia tridentata* gibt es Beziehungen zu den anderen beiden Gebirgen, wobei in diesem Fall der Wheeler Peak den White Mountains näher steht als die Sierra Nevada. Diese Ähnlichkeit geht auf die gemeinsame Trockenheit zurück, könnte jedoch durch Beweidungseinflüsse noch verstärkt sein. Als Fazit stellt sich heraus, daß in den Hochlagen die erhöhte Humidität die Gemeinsamkeiten zwischen Wheeler Peak und Sierra Nevada erklären, in den Tieflagen dagegen die erhöhte Aridität die Gemeinsamkeiten zwischen Wheeler Peak und White Mountains.

## 4.2 Pflanzenmorphologische und strukturelle Merkmale

Eine weitere Möglichkeit, die Bezüge zwischen Klima und Vegetation im trockenen Südwesten der USA zu interpretieren, bietet die Analyse der Lebensformenspektren. Hier werden in Abb. 15 in Reihenfolge einjährige Therophyten und Geophyten mit Zwiebeln unterschieden, weiterhin Kräuter bzw. Gräser als Hemikryptophyten sowie Zwergsträucher als Chamaephyten ausgewiesen und unterschiedlich große Holzpflanzen in Nano-, Mikro- und Makro-Phanerophyten eingeteilt. In den Diagrammen erscheinen alle Lebensformen in Säulen übereinandergestellt, so daß auch die Gesamtdeckungsgrade als Erklärungsmerkmal herangezogen werden können.

Die Lebensformenanalysen lassen sich ziemlich leicht interpretieren. Hier fällt zunächst auf, daß die feuchte Westseite der Sierra Nevada die höchsten Deckungswerte und auch die höchsten Anteile an Meso- und Makro-Phanerophyten aufweist. Es wird aber auch deutlich, daß auf der Westseite des Wheeler Peaks (Abb. 15c) in Höhenlagen zwischen 2750 m und 3250 m bezüglich des Baumwuchses ganz ähnliche oder gar günstigere Verhältnisse herrschen als im feuchten Abschnitt der Sierra. Dies deutet erneut darauf hin, daß die Hochlagen dieser östlichen Range in ihren

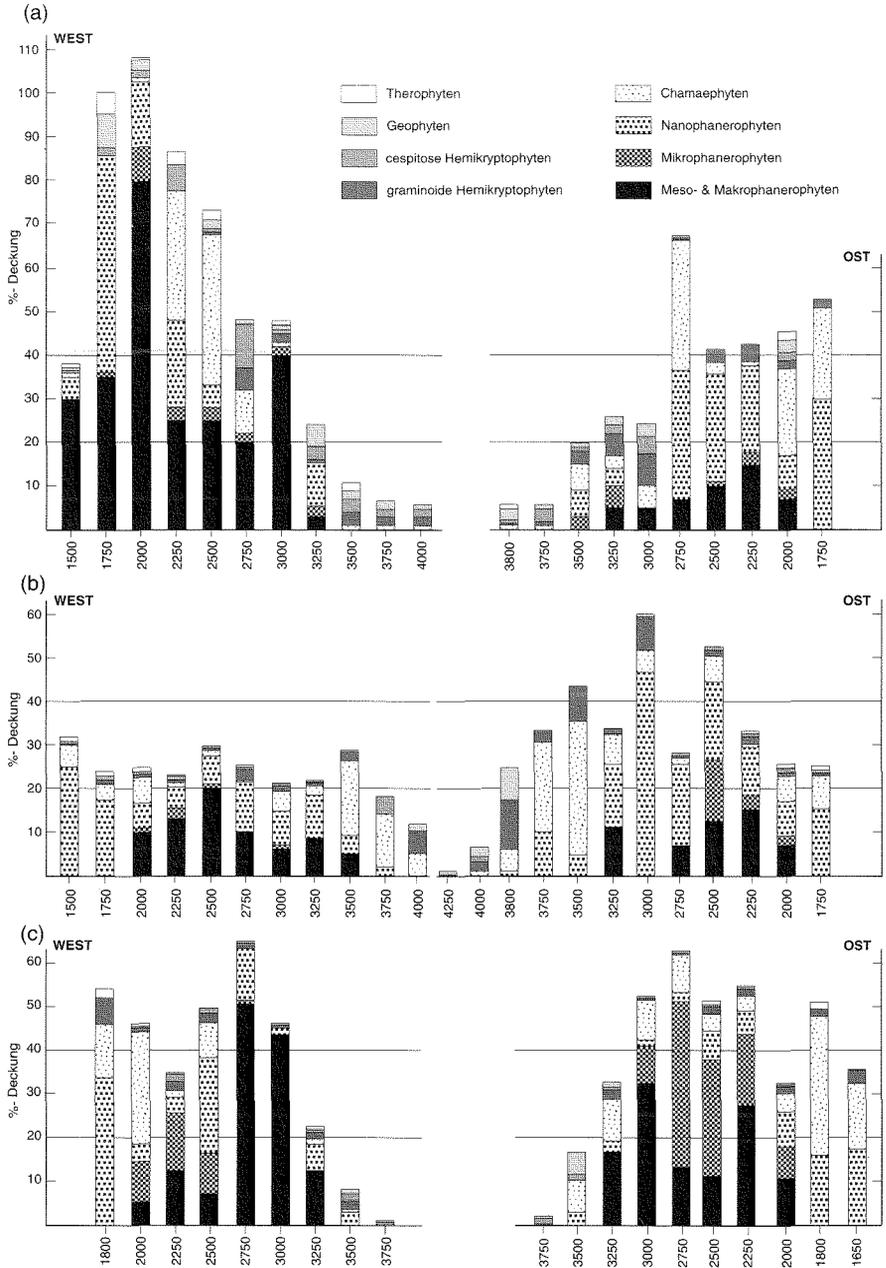


Abb. 15: Lebensformenspektren und Deckung entlang der Höhe. Sierra Nevada (a), White Mountains (b), Wheeler Peak (c)

Humiditätsvorgaben eher jenen der Sierra Nevada als denen der White Mountains entsprechen. Bei den White Mountains fällt wiederum auf, daß, abgesehen von ihrer insgesamt offeneren und baumärmeren Vegetation, die Westseite offensichtlich gegenüber der Ostseite in hygrischer Hinsicht etwas benachteiligt ist: Die Ostabdachung zeichnet sich durch eine höhere Gesamtdeckung aus, allerdings auch durch einen geringeren Baumanteil, wobei die „balds“ im 3 000 m-Niveau deutlich hervorstechen. Diese expositionsbedingten Abweichungen in der Deckung, die deutlicher als am Wheeler Peak sind, könnten wiederum einen Hinweis auf eine unterschiedliche Wasserversorgung liefern.

Zum ersten läßt sich leicht vorstellen, daß die Ostseite von den sommerlichen Gewittern aus der Richtung des Golfes von Mexiko und von Kalifornien stärker berührt wird als die Westseite. Ein weiterer Sachverhalt wird bei Berücksichtigung der geologischen Verhältnisse deutlich. Die White Mountains weisen eine Asymmetrie der Hangneigungsverhältnisse mit einer flacheren Abdachung auf der Ostseite auf. Verluste der Bodenfeuchte durch Interflow dürften hier geringer sein als auf der Westseite, so daß die Vegetation nach Regenfällen länger von einer günstigeren bodenhydrologischen Situation profitieren dürfte. Weiterhin ist auch denkbar, daß zum Owens Valley hin erhöhte Wasserverluste durch die vorwiegend steilstehende Lagerung der Gesteine mit senkrechten Klüften zustande kommen (vgl. hierzu RICHTER 1996, dort Abb. 21). Daß die geologischen Verhältnisse die Vegetation mitprägen, läßt sich in den White Mountains zumindest in zwei Gemeinschaften eindeutig belegen. Die Vorkommen der Bristlecone-Offenwälder beschränken sich auf kalkige und dolomitische Standorte, wohingegen über sandigem und quarzitischem Substrat Strauchformationen dominieren. MOREFIELD (1988) sieht darin einen Ausdruck der Wirkungsgefüge aus Reflexionsverhalten und Feuchteangebot bzw. Mineralzusammensetzung und Nährstoffverfügbarkeit.

## **5 Schlußbetrachtung**

Die vorliegende Arbeit macht deutlich, daß im trockenen Südwesten mit der Phytoindikation eine gute Möglichkeit der Klimainterpretation gegeben ist. Sie bietet sich in diesem menschenarmen Gebiet insofern an, als auf Grund der mangelhaften Datengrundlage ohne ein kostenaufwendiges Netz an Wetterstationen keine genauere Raumkennzeichnung möglich ist. Solche Verfahren können in anderen Gebieten der Erde, in denen noch weniger Dateninformationen vorliegen, dazu beitragen, eine nützliche Planungsgrundlage beispielsweise für eine weidewirtschaftliche Inwertsetzung oder auch für die Ausschöpfung an Wasserreserven zu erstellen, so etwa in den zentralasiatischen Trockengebieten (RICHTER 1997). In diesem Zusammenhang sei auf die Mountain Agenda 21 Artikel 13 von Rio 1992 hingewiesen, in der die Bedeutung von Hochgebirgen als „Wassertürme“ gerade für aride Vorländer besonders betont wird (MESSERLI & IVES 1997). Um in solchen Regionen entsprechenden Evaluationen durchführen zu können, ist es erforderlich, in Ländern wie den USA

mit Gebieten, die logistisch und infrastrukturell weitaus leichter zu bearbeiten sind, methodische Erfahrungen zu sammeln und Konzepte zu entwickeln. Daß im vorliegenden Fall neben diesem ursprünglichen Vorhaben auch noch einige prinzipiell und regional neue Erkenntnisse gesammelt wurden, darf als ein angenehmes Nebenprodukt erachtet werden, das sich bei der Anwendung eines neuen Verfahrens oftmals ergibt.

### Zusammenfassung

Die klimatische Stellung der White Mountains wird auf Grundlage von Klimamessungen an 401 Stationen mit Hilfe von Relationsberechnungen und Methoden der Phytoindikation präzisiert. Bei recht deutlichen thermischen Gegensätzen zwischen Kalifornien und den Basin and Ranges nehmen die White Mountains eine Zwischenstellung ein. In hygrischer Hinsicht sind sie bereits dem ariden Typus mit Tendenz zu stärkerer Sommerregenaktivität zuzuordnen. Der thermische „hot spot“ liegt eindeutig im Death Valley, der hygrische „driest spot“ befindet sich aufgrund einer doppelten Leelage bei relativer Betrachtung (Wasserbilanz auf Höhe bezogen) im Owens Valley.

Die klimatische Differenzierung zwischen der feuchten kalifornischen und der trockeneren Basin and Range Province spiegelt sich vor allem in den collinen und montanen Stufen bis etwa 2 750 m wider. In den subalpinen und alpinen Stufen weisen die Sierra Nevada und der Wheeler Peak als Eckpfeiler des West-Ost-Profiles aufgrund der gemeinsamen humiden Verhältnisse Ähnlichkeiten auf, während die White Mountains (und die Toiyabe Range) als Vertreter der Basin and Range durch eine relativ eigenständige Vegetation gekennzeichnet sind. Dabei unterliegen die drei Gebirge jeweils einem eigenen Expositionstypus:

- White Mountains: keine Expositionsunterschiede als Ausdruck homogener Klimavorgaben (vgl. Abb. 12)
- Wheeler Peak: wechselnde Expositionsunterschiede aufgrund von Verschiebungen der gleichen Höhenstufen als Ausdruck eines regionalen Klimawandels (vgl. Abb. 13)
- Sierra Nevada: prinzipielle Expositionsunterschiede aufgrund zweier verschiedener Floren als Ausdruck einer Trennung zweier Klimaregime (vgl. Abb. 11)

## **Literatur**

- AGANCHANJANC, O.E. (1980): Die geographischen Ursachen für die Lückenhaftigkeit der Flora in den Gebirgen Mittelasiens. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 124, S. 44-52
- BARBOUR, M.G. & MAJOR, J. (eds. 1977): *Terrestrial Vegetation of California*. New York.
- BARRY, R.G. (1992): *Mountain Weather and Climate*. London/New York.
- BEATY, C.B. (1975): Sublimation or melting: Observations from the White Mountains, California and Nevada, USA. In: *Journal of Glaciology*, Vol. 14, No. 71, S. 275-286.
- ELLENBERG, H. (1981): Ursachen des Vorkommens und Fehlens von Sukkulenten in den Trockengebieten der Erde. In: *Flora* 171, S. 114-169.
- HAEUPLER, H. (1982): *Evenness als Ausdruck der Vielfalt in der Vegetation*. Dissertationes Botanicae, 65, Vaduz.
- HENNING, I. & HENNING, D. (1981): Potential evaporation in mountain geocoecosystems of different altitudes and latitudes. *Mountain Research and Development* 1, p 267-274.
- HETZNER, S. (1998): *Vegetationskundliche Differenzierung der Sierra Nevada entlang eines West-Ost-Transektes*. Unveröff. Diplomarbeit, Inst. f. Geographie FAU-Erlangen.
- JAUREGUI, E., KLAUS, D. & LAUER, W. (1978): On the estimation of potential Evaporation and evapotranspiration in Central Mexico, *Colloquium Geographicum*, Band 13.
- MESSERLI, B. & IVES J.D. (eds., 1997): *Mountains of the World*.
- MOREFIELD, J.D. (1988): Floristic habitats of the White Mountains, California and Nevada: A local approach to plant communities. In: HALL, C.A. & DOYLE-JONES, V. (eds.): *Plant Biology of Eastern California*. Los Angeles, Oxford, p 1-18.
- MÜLLER-DOMBOIS, D. & ELLENBERG, H. (1974): *Aims and Methods of Vegetation Ecology*. New York, London, Sydney, Toronto.
- NCDC: *Climate data summaries on CD-Rom*. Desert Research Institute, Reno/Nevada, 1900-1995.
- PENMAN, H.L. (1948): Natural evaporation from open water, bare soil and grass. In: *Proc. Of the Royal Society of London, Ser.A., Mathematical and Physic Sciences*, 193, A 1032, p 120-145.
- POWELL, D.R. & KLIEFORTH, H.E. (1991): Weather in climate In: HALL, C.A. Jr.: *Natural History of the White-Inyo Range*. Berkeley, Los Angeles, Oxford, p.3-26.
- RICHTER, M. (1996): *Klimatologische und pflanzenmorphologische Vertikalgradienten in Hochgebirgen*. In: *Erdkunde*, Bd. 50, S. 205-237.
- RICHTER, M. & SCHRÖDER, R. (1991): *Klima und Vegetation im Death Valley National Monument*. In: *Erdkunde*, Bd. 45, S. 38-51.
- SCHMIEDECKEN, W. (1978): Die Bestimmung der Humidität und ihrer Abstufungen mit Hilfe von Wasserhaushaltsberechnungen. In: LAUER, W.: *Klimatologische Studien in Mexiko und Nigeria*. In: *Coll. Geogr.*, Bd.13, S.135-59.
- VENZKE J.-F. (1985): Der Pinyon-Juniperus-Trockenwald und die untere Waldgrenze im Südwesten der USA. In: *Geoökodyamik*, Jg. 6, S. 321-345.
- VERLEGER, K. (1998): *Hygrothermische Differenzierung des Südwestens der USA*. Unveröff. Diplomarbeit, Inst. f. Geographie FAU-Erlangen.

