

KLIMATOLOGISCHE UND VEGETATIONSKUNDLICHE HÖHENGRADIENTEN IM DEATH VALLEY NATIONAL MONUMENT

Mit 9 Abbildungen und 2 Tabellen

MICHAEL RICHTER und ROLF SCHRÖDER

Summary: Climatological and geobotanical gradients in Death Valley National Monument

The mountains framing the Death Valley-depression offer ideal opportunities for model-studies on climatic-ecological vertical gradients in arid zones, as this area represents an extreme desert with a great floristic potential. Four principles, which probably apply to altitude-changes in arid zones in general, are especially dominant. (1) Concerning microclimatic factors, the decrease of surface-temperature-amplitudes with increasing altitude means a contrast with characteristics of humid highlands. This is due to ground-humidity increasing with height, which causes the actual evaporation to rise, resulting in a growing amount of latent energy-transfer (decreasing Bowen-ratio). (2) Plant-adaptations show a virtually consistent appearance of the nanophyllia in low as well as in high elevations. This differs from the situation in humid mountains, where increasing radiation causes a considerable reduction of leaf-size. (3) If, for the same reason, there is a relative increase of scleromorphous superseding mesomorphous tissue, the mesomorphous leaf-structures concentrate in higher altitudes of the Death Valley-region, due to the vertical humidity-increase. (4) The „Merriam Effect“, i. e. the depression of life zones caused by convectional rain increasing with the mountain mass, is another difference to semi- or perhumid ranges, where radiation-gain has an opposite effect.

Aus klimatologischer und vegetationskundlicher Sicht bietet das Death Valley mit seinen Rahmengebirgen Bedingungen, die im Vergleich zu anderen Trockengebieten einzigartig sind. Die Sonderstellung ergibt sich aus der Regenschatten-Lage des eng begrenzten Beckens inmitten einer feuchteren Umgebung. Dabei wirken beträchtliche Höhenunterschiede auf kurzer Distanz kontrast-verschärfend (15 km zwischen Badwater, 85 m u. M., und Telescope Peak, 3368 m ü. M.).

Die N-S-Erstreckung des Death Valley-Grabenbruchs jenseits der Sierra Nevada, der Argus-Inyo-Mountains und der angrenzenden Panamint Mountains verursacht einen dreifachen Lee-Effekt (Abb. 1) und die Ausbildung der einzigen „echten Wüste“ der USA (Furnace Creek = 59 mm N/a). Die Beckenlage fördert zudem die Entstehung von Hitzedepressionen, so daß im Hochsommer ideale Voraussetzungen für die Energieumsetzung in fühlbare Wärme ohne

Luftmassenadvektion vorliegen. Hieraus erklären sich die extrem hohen Lufttemperaturen, wobei das absolute Maximum von 56,6°C weltweit der zweithöchste jemals gemessene Wert ist (10. 7. 1913).

Die vegetationskundliche Sonderstellung des Death Valley-Gebietes erklärt sich in erster Linie aus dem hydrothermischen Höhenwandel, der die Grundlage für eine vielfältige Differenzierung schafft. Hinzu kommt als Nachbarschaftseffekt aus den nahegelegenen White Mountains und der Sierra Nevada ein reichhaltiges Artenpotential. Aber auch der aride Beckengrund profitiert von der Brückenstellung zwischen den Florenprovinzen der Basin and Ranges im kontinentalen Norden und der Sonora im maritimen Süden. Dies erklärt die mit 1232 Arten (DEDECKER 1984) beachtliche Vielfalt der Taxa in der nördlichen Mojave, dem bedeutendsten Endemismuszentrum Californiens (STEBBINS a. MAJOR 1965).

Die Vorgabe des reichhaltigen floristischen Potentials im Bereich einer extremen Wüste bestimmt das Ziel der Arbeit, klimaökologische Höhengradienten für subtropisch-aride Hochgebirge modellhaft darzustellen. Andere Wüsten sind dafür nicht im gleichen Maße geeignet, da hier Gebirge entweder zentral, d. h. isoliert, oder peripher aufragen und somit ein eingeschränktes Artenspektrum aufweisen. Als kleine Wüste bietet das Death Valley bessere Bedingungen für grundsätzliche Aussagen über pflanzenmorphologische Anpassungsmöglichkeiten an das extreme Klima¹⁾.

Klimaökologische Grundlagen im Death Valley-Gebiet

Eine Übersicht der Klimagrundlagen und Pflanzengemeinschaften im Death Valley-Gebiet liegt neben der Arbeit von HÖLLERMANN (1973) in Form eines vervielfältigten Manuskripts für eine Exkursion der International Association of Vegetation Science vor (ROWLANDS 1988). Daneben stehen geobotanische Monographien über die Rahmengebirge zur

¹⁾ Für logistische Unterstützung danken wir dem Dep. of Geography, Arizona State Univ., Tempe, insbesondere Dr. M. Marcus und T. Miller.

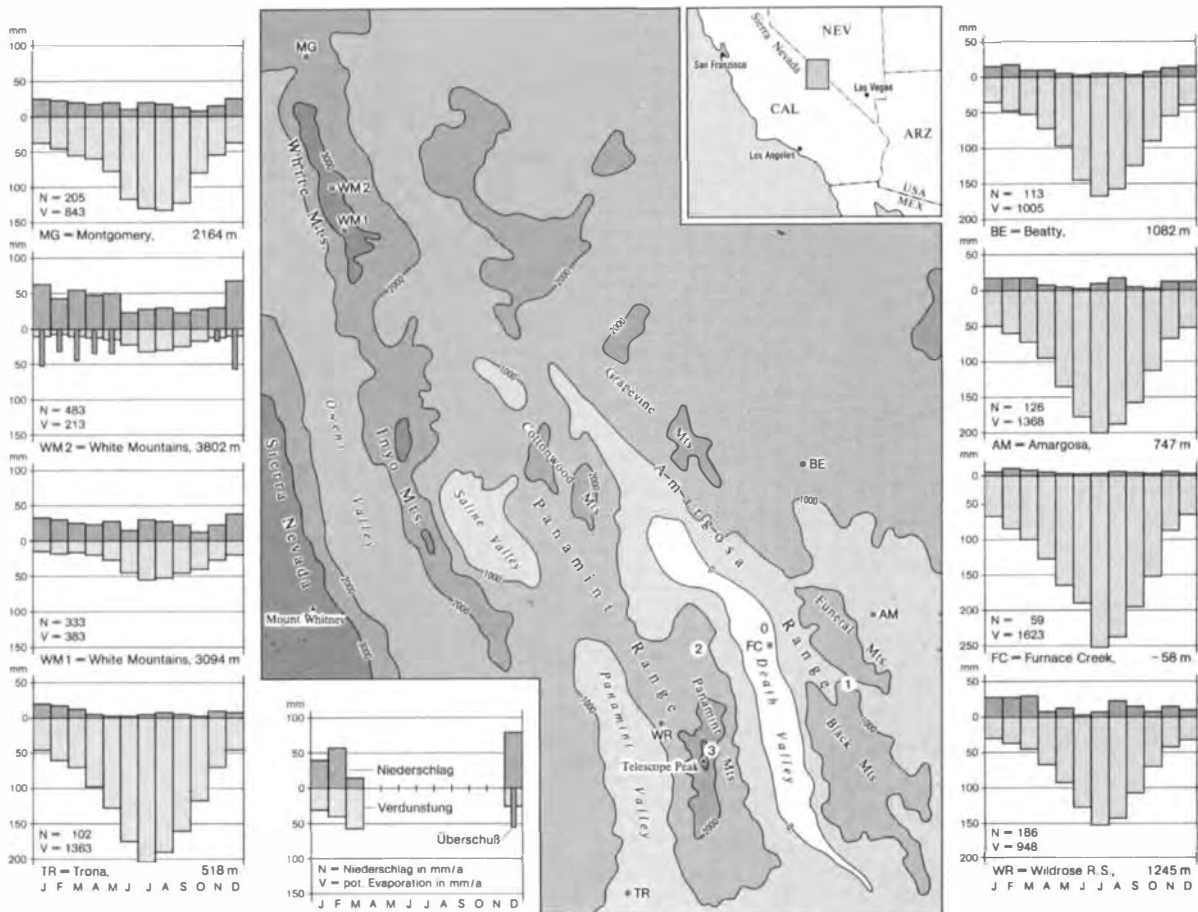


Abb. 1: Topographische Übersicht der Death Valley-Umgebung mit Eintragung der Klimastationen, die den Wasserhaushalts-Bilanzierungen (Diagramme links und rechts) zugrundeliegen, und der mikroklimatischen Meßpunkte: 0 = Furnace Creek, 1 = Pyramid Pass, 2 = Aguerberry Point, 3 = Rogers Peak

Topographic chart of the Death Valley area showing the meteorological stations which provided data for the water balances (diagrams left and right), and the microclimatic survey points: 0 = Furnace Creek, 1 = Pyramid Pass, 2 = Aguerberry Point, 3 = Rogers Peak

Verfügung (ANNABLE 1985, KURZIUS 1981, PETERSON 1984, SCHRAMM 1982). Genauere Aussagen zum Klimawandel erlauben Auswertungen von Daten des USDC Weather Bureau (NOAA 1988).

Monatskarten der mittleren Strömungsverhältnisse (BRYSON a. HARE 1974) verdeutlichen, daß das Klima der Mojave von zwei Zirkulationssystemen geprägt wird. Während der Wintermonate sorgen südwärts verlagerte Westwindstörungen für einen erhöhten Niederschlagsanteil. In den Sommermonaten herrschen nach HUNING (1978) südsüdöstliche Windrichtungen vor, die aufgrund der großen Distanz zum Golf von Kalifornien als Ursprungsgebiet feuchter Luftmassen in der warmen Jahreszeit nur selten Regen verursachen. Nach Süden nimmt hingegen der Sommerregenanteil durch auslaufende Hurri-

kane (chubrascos) und vor allem infolge von Konvektionsfeldern zu. In gleicher Richtung nehmen Sukkulente zu, da CAM-Pflanzen mit ihrem Nutzungsvermögen geringer Regenmengen auf gleichmäßigere Wasserversorgung ausgerichtet sind (JOHNSON 1976; vgl. ELLENBERG 1981, S. 136ff.).

Auch höhenwärts steigt der Prozentsatz sommerlicher Niederschläge bis in etwa 2500 m ü. M. an (Abb. 2b). Die Ursache liegt in der hohen Starkregenintensität sommerlicher Gewittergüsse, wobei ein erheblicher Teil des ausgefallenen Niederschlags vor Erreichen der Tieflagen bereits verdunstet ist. Hierbei ist eine Beziehung zwischen der Entstehungshäufigkeit von Konvektionszellen und dem Ausmaß der Massenerhebung unverkennbar. Die häufigeren Sommerregen führen zu einem Absinken der Vege-

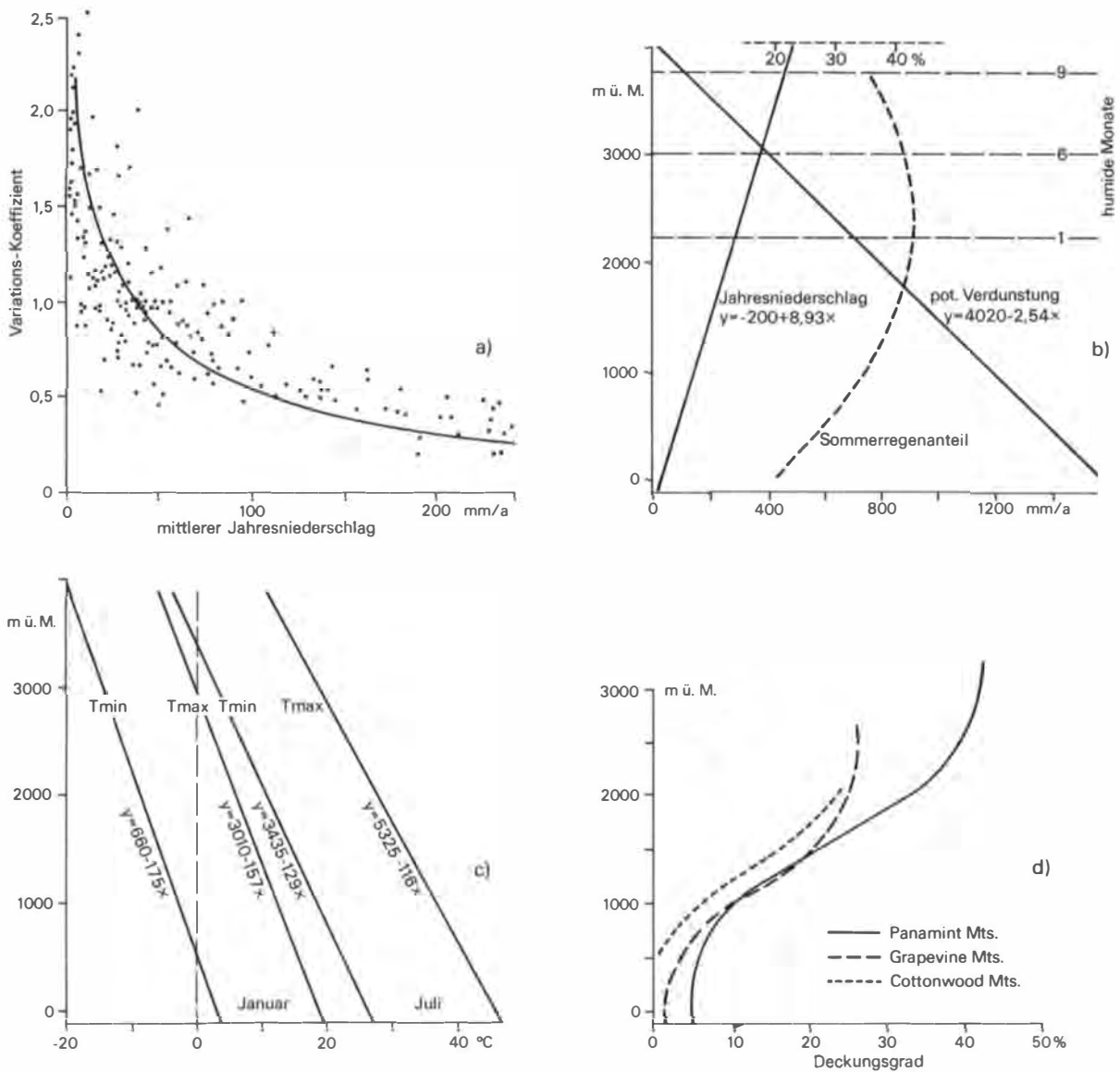


Abb. 2a-d: Klima- und Vegetationsgradienten im Death Valley-Gebiet. Veränderung des Variations-Koeffizienten mit der Jahresniederschlagssumme im SW der USA (aus EHLERINGER 1985) (a); Höhengradienten der Jahresniederschläge, potentiellen Verdunstung (berechnet n. PAPADAKIS, s. SCHMIEDECKEN 1978) und der Anzahl humider Monate ($n = 14$) (b); höhenwärtige Temperaturabnahmen im Winter und Sommer ($n = 10$) (c); Vertikalwandel der Pflanzenbedeckung (n. KURZIUS 1981, PETERSON 1984 und 48 eigenen Erhebungen in den Panamint Mts.) (d)

Climate and vegetation gradients in the Death Valley area. Fluctuation of the variation-coefficient with annual precipitation in the South-West of the United States (cf. EHLERINGER 1985) (a); altitude-gradients of annual precipitation, potential evaporation and number of humid months ($n = 14$) (b); vertical decrease of temperature in winter and summer ($n = 10$) (c); vertical alteration of vegetation cover (cf. KURZIUS 1981, PETERSON 1984, and 48 surveys carried out by the author in the Panamint Mountains) (d)

tationsgürtel und zu einer dichteren Pflanzendecke („Merriam Effect“ nach WELLS 1979). Im Falle des Death Valley-Gebietes werden die Auswirkungen in den Panamint Mountains deutlich, wo eine vielfäl-

tigere Vegetation als in den niedrigeren Rahmengebirgen zu beobachten ist. Oberhalb 2500 m ü. M. ist nach Auslegung der Stationswerte aus den White Mountains der Sommerregenanteil in Relation zum

Umland wieder rückläufig (Abb. 2b), was mit einer Abnahme des „precipitable water“ zusammenhängen dürfte.

Nicht nur die intraannuäre Niederschlagsverteilung wird höhenwärts gleichmäßiger, sondern auch die interannuäre. Dieser für die Vegetation wichtige Faktor einer kontinuierlicheren Wasserversorgung geht aus Berechnungen des Variabilitätskoeffizienten von EHLERINGER (1985) in Abb. 2a hervor. Der hier für den SW der USA angeführte Trend abnehmender Schwankungen bei zunehmenden Niederschlagssummen ist für Trockengebiete grundsätzlich gültig.

Die gegenläufigen Vertikalgradienten von Niederschlag und potentieller Verdunstung (Abb. 2b) verursachen den für die Vegetationsdichte entscheidenden Höhenwandel. Dabei fällt der rasche Anstieg der Gesamtdeckung in den Panamint Mountains zwischen 1000 und 2200 m ü. M. auf, also bis zu dem Niveau, in dem bereits ein Monat im Jahr humid ist (vgl. Abb. 2b u. d). Oberhalb stellt sich der mittlere Deckungswert auf ungefähr 40% ein, während er in den niedrigeren Grapevine und Cottonwood Mts. aufgrund des „Merriam-Effektes“ (s. o.) geringer bleibt. Daß die Pflanzendichte oberhalb 2200 m ü. M. trotz der rasch ansteigenden Humidität nur unwesentlich zunimmt, hängt mit der steigenden Wurzelkonkurrenz im semiarid-semihumiden Höhenbereich und mit den Schnee- bzw. Frostverhältnissen im Gipfelniveau zusammen.

Die hygrische Typisierung in Abb. 1 beruht auf dem Verfahren von SCHMIEDECKEN (1978), in der das pflanzenökologisch wirksame Wasserangebot unter Berücksichtigung der Bodenart und der tatsächlichen Vegetation erfaßt ist. Obwohl die drei höchsten Wetterstationen mangels anderer Daten außerhalb des Untersuchungsgebietes liegen, läßt sich aufgrund der ähnlichen Pflanzengesellschaften in den White und Panamint Mountains (HÖLLERMANN 1973, VASEK a. THORNE 1987) eine Datenübertragung vertreten. Es wird deutlich, daß nur in der alpinen Stufe an der White Mountains-Station WM 2 ein Wasserüberschuß zustandekommt. Schon bei WM 1, die der Panamint-Kammhöhe entspricht, reichen in der humiden Periode von Dezember bis Mai die Niederschläge nicht für eine Feuchtesättigung des Wurzelraums. Das 2000-m-Niveau (Montgomery) ist im langjährigen Mittel bereits vollarid. Hier bedingen sporadische Starkregen und die Schneeschmelze Konfluenzeffekte und Interflow, die die immer noch dichte Vegetation im Bereich der unteren Waldgrenze erklären. Nach unten nehmen die Fehlbeträge rapide zu und belaufen sich im Death Valley auf ca. 1500 mm/a, so daß sich hier die Vegeta-

tion weitgehend auf episodisch überspülte Gerinne (washes) der riesigen Schwemmfächer beschränkt.

Damit klingt an, daß innerhalb der klimatisch vorgegebenen Höhenstufen geomorphologisch-edaphische Faktoren modifizierend auf die Pflanzenverteilung einwirken. Ein Musterbeispiel für azonale Vorkommen bilden die Halophyten-Gesellschaften, die vor allem in der Umgebung der sporadisch überfluteten Salzpflanzen im Beckengrund des Death Valley auftreten. Aus einer Verbreitungskarte von HUNT (1966) läßt sich eine vereinfachte Abfolge in Abhängigkeit des nachlassenden Salz- und Feuchtegehaltes ableiten²⁾:

1. *Allenrolfea occidentalis* (pickleweed), die am Westrand des endorrheischen Beckens geschlossene Bestände bildet.
2. *Distichlis stricta* (saltgrass), die am Ostrand stärker vertreten ist.
3. *Tessaria spicata* (arrowweed) mit Reinbeständen in „Devil's Cornfield“ nördlich des Endbeckens.
4. Mesquite-Dickichte mit *Prosopis glandulosa* und dem Neophyten *Tamarix ramosissima* am Untergrund von Schwemmfächern.

Als kleinflächige, aber verbreitete Vorkommen sind unter den azonalen Gemeinschaften außerdem die Felsstrauch-Gesellschaften oberhalb ca. 1400 m ü. M. hervorzuheben, von denen sich vor allem die kalkholden als arten- und endemismenreich erweisen (*Cowania mexicana*-Ass.).

Die im klimaökologischen Zusammenhang relevanten Höhenstufen lassen sich im Death Valley in vier Zonen einteilen. Die xerothermen Tieflagen sind im System der „biotic communities“ (BROWN 1982) mit der aspektbildenden *Larrea tridentata* als „creosote zone“ dem „lower Sonoran“-Komplex zuzuordnen. Häufige Begleiter sind *Atriplex hymenelytra*, *Tidestromia oblongifolia*, *Ambrosia* (syn. *Franseria*) *dumosa* und *Encelia farinosa*. Da sich der Optimalbereich dieser Arten wie derjenige von *Larrea* bis etwa 1200 m ü. M. erstreckt (maximal bis 1500 m ü. M., Abb. 3), läßt sich hier die Stufenobergrenze festlegen. Nach Regenfällen zeichnet sich gerade diese Zone durch eine reiche Annuellenflora aus, die durch ihre besondere Blütenfülle gut bekannt ist. Sie tritt jedoch nicht alljährlich auf, da es sich mit mittleren Niederschlagssummen bis 150 mm/a noch um vollaride Gebiete hoher Ereignisvariabilität handelt (s. o.). In dieser Höhenstufe werden im Juli und August Temperaturen von 40°C fast täglich überschritten.

Ab etwa 300 m ü. M. treten *Hymenoclea salsola* und *Atriplex confertifolia* hinzu, die in die nächste Stufe der

²⁾ Pflanzennomenklatur nach DEDECKER (1984).

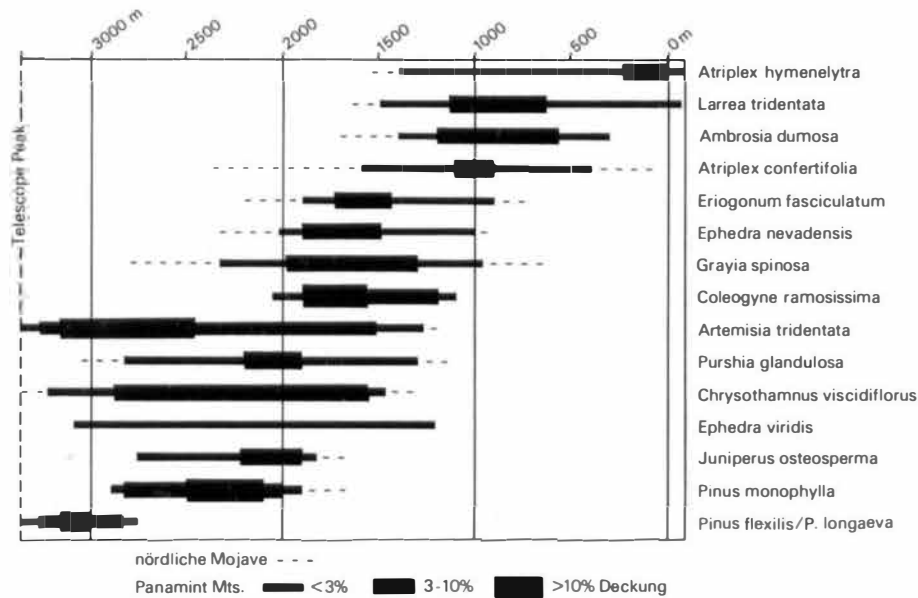


Abb. 3: Höhenverbreitung wichtiger Kennarten der Vegetationsstufen in den Panamint Mts. (n. DEDECKER 1984, ROWLANDS 1988 und eigenen Erhebungen)

Vertical distribution of important characteristic species of the vertical steps in the Panamint Mountains (from: DEDECKER 1984, ROWLAND 1988, and the author's own measurements)

„sagebrush zone“ oder „mixed shrub zone“ des „upper Sonoran“-Komplexes mit Affinitäten zur Basin and Ranges-Florenprovinz überleiten. Die Doppelbenennung deutet bereits an, daß die Vegetationsverhältnisse in diesem zwischen 1200 und 2000 m ü. M. gelegenen Gürtel weniger klar sind als im Beckengrund. Der „sagebrush“ *Artemisia tridentata* erscheint wegen seiner übergreifenden Höhenverbreitung bis 3300 m ü. M. als Stufenkennart ungeeignet (Abb. 3). Ebenfalls wenig aussagekräftig ist die unspezifische Bezeichnung der „gemischten Strauchzone“, die jedoch erkennen läßt, daß es sich um verschiedene (Zwerg-)Strauch-Gesellschaften handelt. Einige davon haben regionale Schwerpunkte, etwa die *Grayia spinosa-Lycium andersonii*-Ass. in den westlichen Rahmgebirgen (WEBB, STEIGER a. TURNER 1987) oder die *Menodora spinescens-Ericameria cooperi*-Ass. auf der Ostseite (KURZIUS 1981). Die weiteste Verbreitung zeigt die durchweg artenarme *Coleogyne ramosissima-Ephedra nevadensis*-Ass., in der beide Namengeber dem Höhenbereich der gemischten Strauchzone am ehesten entsprechen. Gerade in dieser Gesellschaft täuschen überdurchschnittlich hohe Deckungswerte darüber hinweg, daß die „gemischte Strauchzone“ mit 150–250 mm N/a und hochsommerlichen Temperaturen von über 30 °C noch immer vollarid ist.

Wieder klarer werden die Gesellschaftsverhältnisse in der folgenden, semiariden „pinyon-juniper zone“ des „Canadian transition“-Komplexes, in der die *Pinus monophylla-Juniperus osteosperma*-Ass. klar dominiert. Im Untersuchungsgebiet kommen nur in den Panamint Mts. beide Arten zusammen in dichteren Beständen vor (Kronenüberschirmung bis 40%). Die untere Baumgrenze setzt auf der Westseite in ca. 1850 m ü. M. (Wildrose Canyon) und auf der arideren Ostabdachung rund 200 m höher mit *Juniperus* ein. Von den Zwergstrauch-Gesellschaften der „mixed shrub zone“ bleiben *Artemisia tridentata*, *Grayia spinosa* sowie *Purshia glandulosa* vertreten und *Ephedra viridis* sowie *Chrysothamnus div. spec.* gewinnen an Bedeutung (Abb. 3).

Schwierigkeiten bereitet die Festlegung der Obergrenze der „pinyon-juniper zone“, da sie in der Kammpartie zwischen Rogers und Telescope Peak in etwa 2800 m ü. M. von baumlosen Zwergstrauchbeständen abgelöst wird. Angesichts des gedrungene Wuchses der *Chrysothamnus*-Arten, von *Salvia pachyphylla* und der hiesigen „sagebrush“-Vorkommen bietet der alpine Aspekt Schneedruckwirkung als plausible Erklärung. Gegen dieses Argument spricht der Baumwuchs am isolierten Kegel des Telescope Peak, der nun von den Arten der vierten Höhenstufe bestimmt wird: *Pinus flexilis*, *Pinus longaeva* und ferner

Juniperus occidentalis. So dürfte die Austrocknungsgefährdung der flachgründigen Böden auf den breiten Kammwölbungen das Fehlen der Bäume verursachen, während die Koniferen der Hanglagen vom Konfluenzeffekt in Felsspalten profitieren (zu weiteren Entstehungsursachen der baumfreien „balds“ und zur Standortvielfalt der „timberline ecotone“ s. HÖLLERMANN 1973, S. A92 bzw. 1980, S. 77). Ohnehin sticht die „subalpine pinyon zone“ der Panamint Mts. mit Jahresniederschlägen von ± 350 mm und verringerter Verdunstung als semihumide „Insel“ im ansonsten ariden Untersuchungsgebiet hervor.

Mikroklimatischer Höhenwandel im Hochsommer

Die folgenden Klima- und Vegetationsbeobachtungen beruhen auf Feldarbeiten vom 28. 7. bis zum 4. 8. 1990. Hieraus werden Erklärungsansätze für Faktoren wie Artenvielfalt, Deckungsgrad, Formen- und Konstruktionsmerkmale durch mikroklimatische Kenndaten unter extremen Streßbedingungen im Hochsommer abgeleitet. Neben diesem klimatologischen Aspekt fallen als Nebenprodukt rein klimatologische Erkenntnisse über subtropisch-aride Vertikalgradienten an.

An diesen beiden Fragestellungen orientiert sich die Lage der Meßstellen (Abb. 1), für deren Auswahl ein Vertikalabstand von etwa 1000 Höhenmeter und freie Exposition in ebener Umgebung zugrundeliegen:

Furnace Creek, 55 m u. M., hellgraues Geröll auf auslaufendem Schwemmfächer; $36^{\circ}27'15''$ n. Br.; $116^{\circ}51'40''$ w. L.

Pyramid Pass, 940 m ü. M., braunschwarze Basaltschlacken auf niedriger Kuppe am Paß zwischen Furnace Creek und Death Valley Junction; $36^{\circ}20'05''$ n. Br.; $116^{\circ}36'40''$ w. L.

Aguereberry Point, 1915 m ü. M., hellgrauer Dolomitschutt auf Spornlage im Kammbereich der nördlichen Panamint Mts.; $36^{\circ}21'35''$ n. Br.; $117^{\circ}02'40''$ w. L.

Rogers Peak, 3030 m ü. M., dunkelgraubraune Schiefercherben auf exponiertem Panamint-Gipfel; $36^{\circ}13'06''$ n. Br.; $117^{\circ}05'00''$ w. L.

An den zwei oberen Standorten wurde von beiden Autoren parallel gemessen, an den zwei unteren an verschiedenen Tagen (s. Termine in Abb. 4a-d). Für die Erstellung der Temperatur- und Luftfeuchte-Diagramme bildeten stündliche bzw. in der heißen Tageszeit halbstündliche Messungen mit Hygrothermo-Sensoren und Kontaktfühlern die Grund-

lage. Die Windgeschwindigkeiten wurden mit Windweg-Schalenanemometern ermittelt, die potentielle Evaporation mit Picherohren (weiße Filterpapiere, $\varnothing 30$ mm). Für die Strahlungsmessungen stand ein elektrisches Pyranometer zur Verfügung.

Da das Meßprogramm vorrangig auf vegetationskundliche Aspekte des Mikroklimas ausgerichtet war, wurden substratbedingte Reflexionsunterschiede bewußt in Kauf genommen. Für klimatologische Fragestellungen, insbesondere für die Bestimmung des Vertikalgradienten oberflächennaher Maximaltemperaturen, waren die Standorte wegen unterschiedlicher Substratfarben weniger geeignet. Die Albedowerte zum Zeitpunkt der maximalen Einstrahlung beliefen sich auf 21% in Furnace Creek, 10,5% am Pyramid Pass, 23% am Aguerberry Point und 11,5% auf dem Rogers Peak. Von der Reflexion her waren also nur die beiden Stationen im 0-m- und 2000-m- bzw. im 1000-m- und 3000-m-Niveau miteinander vergleichbar. Wegen der besonderen Bedeutung hochsommerlicher Maximaltemperaturen wurden zusätzlich Strahlungsäquivalenttemperaturen mit einem IR-Meßgerät (Raynger, Fa. Ahlborn) über dunklem Substrat registriert.

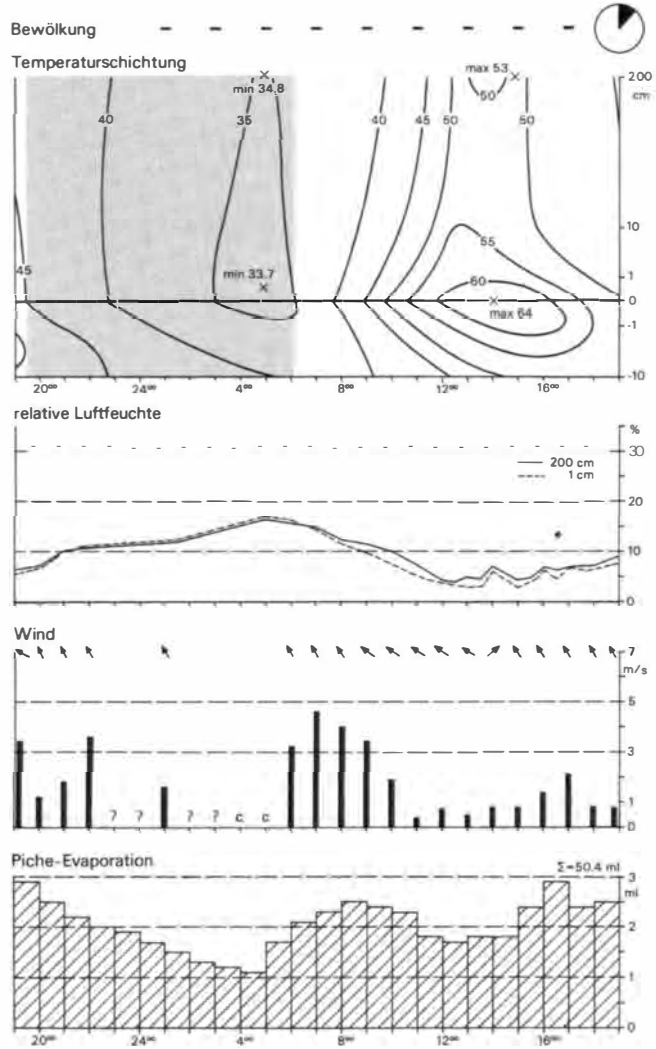
Synchrone Messungen wurden durch die Installation eines Dataloggers mit Thermosensoren in Furnace Creek erzielt. Abb. 5 belegt die Ähnlichkeit der einzelnen Tagesabläufe, wobei sich in 2 m ü. Gr. die größten Differenzen auf 2,6 K (Minima) und 2,9 K (Maxima) beliefen; noch geringere Schwankungsunterschiede an der Bodenoberfläche unterstreichen, daß die dünne Cirrenbewölkung am 30. 7. 1990 kaum Wirkung zeigte (Abb. 4c-d).

Ebenso bezeugen die Winderhebungen eine konstante Wetterlage während der Meßperiode. Teilweise gegenläufige Richtungskomponenten am Rogers Peak (Abb. 5), der an das 700-hPa-Niveau heranreicht, sprechen in Verbindung mit der Parallelmessung am Aguerberry Point für die typische Überlagerung eines Hitzetiefs durch ein Höhenhoch. Diese Situation zeichnet sich in Wetterkarten nur großräumig als umfassendes Bodentief über dem gesamten Wüstenbereich des Südwestens der USA ab. Tatsächlich handelt es sich aber um eine Ansammlung lokaler Luftdruck-Depressionen in den einzelnen Becken, die vom antizyklonalen Gradientwind überlagert werden. Zu den Merkmalen des begrenzten Hitzetiefs gehören die schwachen Luftbewegungen im Beckengrund und die heftigen am Oberrand (Abb. 4a u. c), die der Hangwindzirkulation angehören.

Die unterschiedlichen Reflexionsverhältnisse spielen bei der Interpretation der Diagramme der boden-

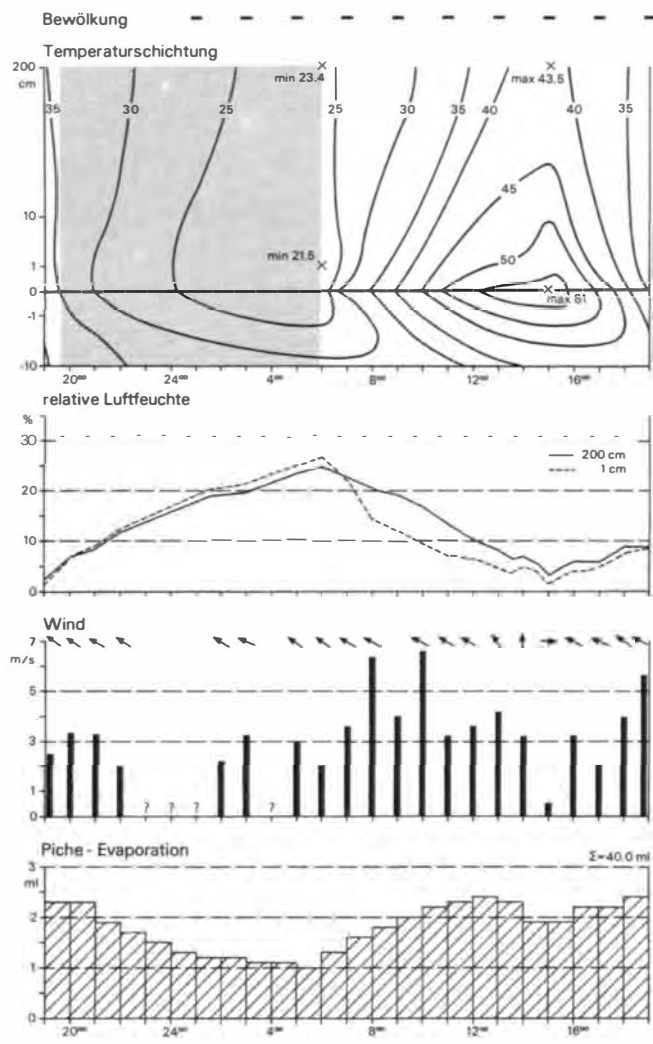
a) FURNACE CREEK, -55 m

2.-3. 8. 1990



b) PYRAMID PASS, 940 m

31. 7.-1. 8. 1990



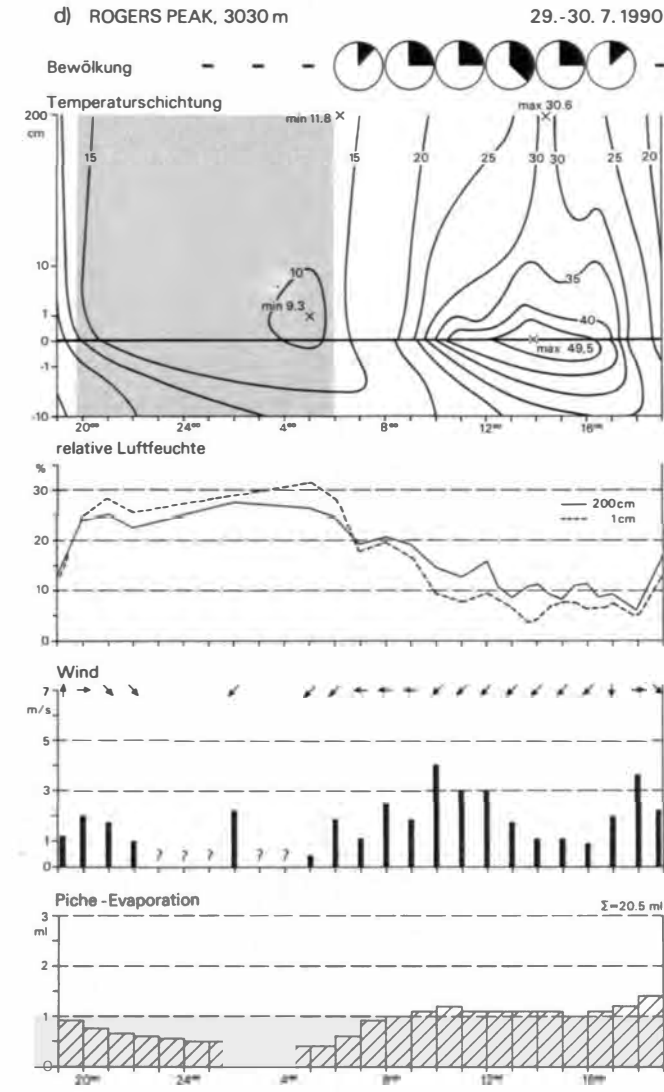
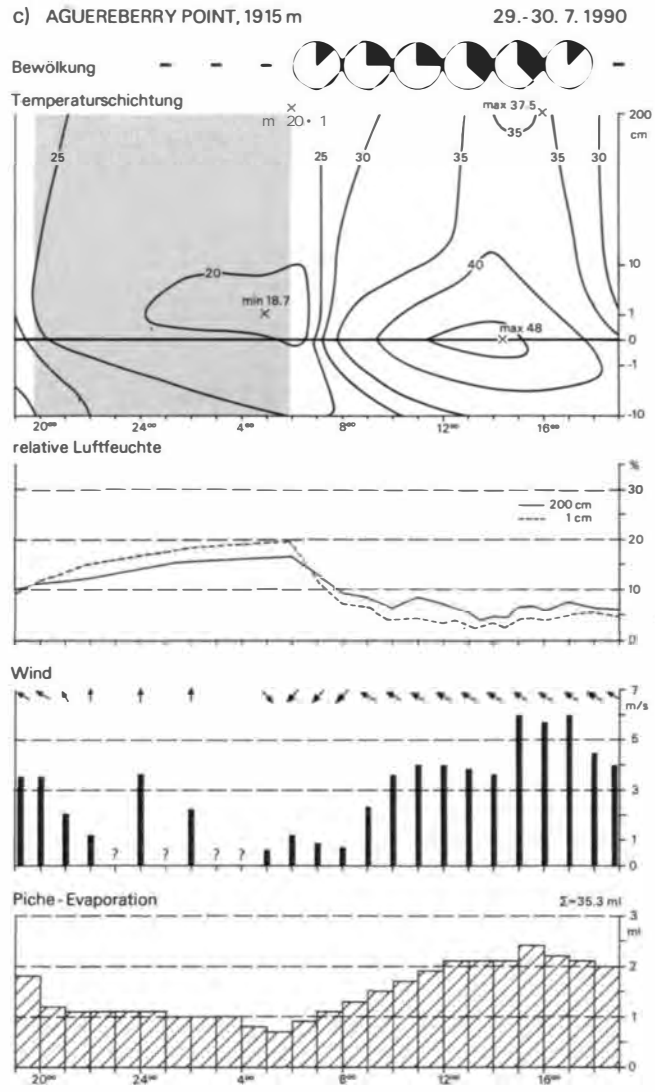


Abb. 4a-d: Tagesgänge des Mikroklimas im Juli/August 1990 an vier Stationen im Death Valley-Gebiet
Diurnal variation of microclimate at four stations in the Death Valley area during July/August 1990

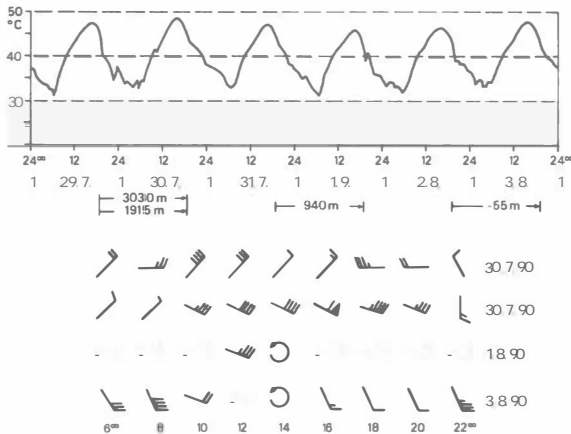


Abb. 5: Temperaturgang in 2 m ü. Gr. während der mikro-klimatischen Meßwoche (Furnace Creek) sowie Wind-richtungen und -geschwindigkeiten an den Meßstagen (mikroklimatische Meßstellen)

Temperature variation at 2 m above the surface during the microclimatic survey week; wind-speed and wind-direction on days of measurement

nahen Temperaturschichtung in Abb. 4a-d eine wichtige Rolle. Denn an den Standorten mit erhöhter Strahlungsabsorption (Pyramid Pass und Rogers Peak) ist die Scharung der Isolinien dichter als an den beiden mit erhöhter Albedo, was auf die stärkere Bodenerhitzung zurückzuführen ist. Im Falle der Parallelmessung am 30. 7. 1990 läßt sich für das 3000-m-Niveau mit 49,5 °C sogar ein höheres Oberflächenmaximum als im 2000-m-Niveau (48 °C) feststellen. Auch zwischen Pyramid Pass und Furnace Creek sind die Unterschiede mit 3 K (61 °C bzw. 64 °C) trotz der stärkeren Durchlüftung am höheren Standort nur gering.

Somit ergibt sich im Gegensatz zu den Extremen der Lufttemperatur und den Minima der Oberflächentemperaturen, die sich eng an einen linearen Höhengradienten anlehnen, beim Vertikalwandel der Bodenmaxima eine Parabel (kubische Form in Abb. 6). Unter gleichen Albedo-Voraussetzungen erfolgt die höhenwärtige Veränderung der Strahlungstemperaturen ebenfalls gleichsinnig, wie die aufgezeigte Gerade der mit dem IR-Strahlungsgeber erfaßten Oberflächenmaxima über dunklem Grund zeigt. Der Gradient liegt in diesem Fall mit 1,03 K/100 m sehr hoch, während sich derjenige der Oberflächenminima auf 0,75 K/100 m beläuft. Daraus ergibt sich eine höhenwärtige Abnahme der Tagesamplituden am Boden, was auf eine Zunahme latenter Wärmeerzeugung hindeutet.

Dies belegt die Bowen-Ratio³⁾, in der das Verhältnis von fühlbarem Wärme- zu latentem Energie-

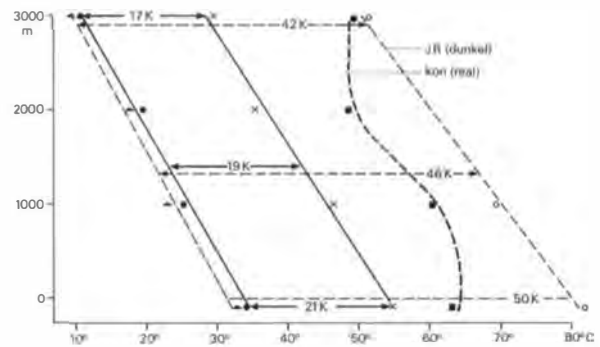


Abb. 6: Temperaturgradienten der Minima und Maxima an der Bodenoberfläche (gestrichelt) und in der Luft (durchgezogen) im Juli/August 1990. IR = Infrarotmessungen an dunklen Oberflächen, kon = Kontaktmessungen an Standortoberflächen

Gradients of minimum and maximum temperatures on the ground surface (broken line) and in the air (straight line) in July/August 1990. IR = infra-red measurements on dark surfaces, kon = contact measurements on the different location surfaces

Austausch berechnet wird. Nach Tab. 1 ist im 0-m-Niveau der entsprechende Wert nachmittags (12-16⁰⁰-Mittel) etwa doppelt so hoch wie im 3000-m-Niveau, woraus sich der deutlich höhere Anteil fühlbarer Wärmeproduktion ergibt.

Die H/LE-Verhältnisse lassen sich nicht für alle Stellen gut erklären, denn bei niedrigen Dampfdruckwerten bewirken geringe Schwankungen bereits erhebliche Veränderungen des Quotienten. Dieses Problem zeigt sich bei Einsatz hochsensibler Meßfühler unter starker Windeinwirkung, so daß die Berechnungen für das 1000-m- und 2000-m-Niveau kaum interpretierbar sind.

Bei den Luftfeuchte-Messungen lassen sich weder für 1 cm noch für 200 cm Meßhöhe gleichförmige Vertikaltrends ausmachen. Insbesondere die Ergebnisse vom Aguerberry Point im 2000-m-Niveau fallen aufgrund der niedrigen Werte aus dem Rahmen (s. Tab. 2). Vergleichsweise liegen die Maxima im 1000-m-Niveau deutlich höher, so daß auch in diesen beiden Fällen von einer unterschiedlichen Luftmassen-Herkunft auszugehen ist. Dies wird bei Einbeziehung der Windwerte um so klarer, da im Falle

³⁾ Bowen-Ratio (n. KESSLER 1985):

$$\beta = \frac{H}{LE} = 0,62 \frac{(t_b - t_a) p}{(\epsilon_b - \epsilon_a) 1013}$$

wobei t_b und t_a die Temperatur am Boden (1 cm) und der Luft (2 m) in °C, ϵ_b und ϵ_a der zugehörige Dampfdruck und p der gemessene Luftdruck in mb sind.

Tabelle 1: Energieumsätze in Furnace Creek (55 m u. M.; 3. 8. 1990) und am Rogers Peak (3030 m ü. M.; 30. 7. 1990)

Energy balances in Furnace Creek (55 m below s. l.; 3/8/90) and at Rogers Peak (3030 m above s. l.; 30/7/90)

	0-m-Niveau	3000-m-Niveau
Globalstrahlung in mJ/d	28,75	33,32
Strahlungsbilanz in mJ/d	12,26	20,7
Dampfdruck (mb, 12-16°) 1 cm ü. Gr.	6,9	4,4
Temperatur (°C, 12-16°) 1 cm ü. Gr.	56,4	36,7
Bowen-Ratio (Mittel 12-16°)	11	5,7

des Pyramid Pass die Strömungsrichtung tagsüber zwar mit derjenigen am Aguerberry Point übereinstimmt (Abb. 5), jedoch auf das östlich benachbarte Amargosa Valley als Ursprungsgebiet hindeutet. Hier scheint auch nachts ein regionaler Transfer (Abb. 4b) aus diesem rund 700 m höher gelegenen Nachbartal zu bestehen, indem das Bodentief im Death Valley über dem flachen Paß einen Sogeffekt verursacht.

Am westlich des Tales gelegenen Aguerberry Point deutet hingegen der Windwechsel in den Morgen- und Abendstunden auf ein autochthones beckeninternes System hin (Abb. 4c), wofür auch die mit dem 0-m-Niveau vergleichbaren Luftfeuchtegänge sprechen. Mit dem Gradientwind-Komplex in den Hochlagen sowie dem orographisch bestimmten Strömungssystem weiter unterhalb lassen sich zumindest zwei Luftkörper unterschiedlichen Wasserdampfgehalts verknüpfen. Denn während die Beckenränder des Death Valley bis mindestens 2000 m ü. M. von ausdörenden Winden betroffen werden, liegen die Differenzbeträge zur Taupunkt-Temperatur im Gipfelbereich mit 33,8 K am Rogers Peak gegenüber 43,3 K am Aguerberry Point deutlich niedriger (ebenfalls 43,3 K am Pyramid Pass und 49,3 K in Furnace Creek). Diese Situation bestätigt die Luft-

massentrennung zwischen Bodentief und überlagerndem Hoch (s. o.).

Dementsprechend ist auch der Unterschied bei der potentiellen Verdunstung zwischen den beiden Luftkörpern beträchtlich (s. Summen- und Maximalwerte in Tab. 2). Es fällt auf, daß die Differenz zwischen dem 2000-m- und 3000-m-Niveau ähnlich groß ist wie diejenige zwischen dem 0-m- und 2000-m-Niveau. Die Ursache für die geringe Verdunstungskraft im Gipfelbereich liegt vor allem in der deutlich schwächeren Durchlüftung begründet. Dabei liegt durchaus ein sommerlicher Normalfall vor, zeichnet sich in dieser Jahreszeit das 700-hPa-Niveau in den trockenen Subtropen doch generell durch ruhige Strömungsverhältnisse aus.

Die bisherigen Analysen ergeben, daß sich in thermischer Hinsicht die extremen Wüstenverhältnisse des Hochsommers bereits unterhalb 2000 m ü. M. abschwächen, in bezug auf die Luftfeuchte aber erst oberhalb günstigere Bedingungen einsetzen. Dies bedeutet, daß hier ein Wandel in den ökophysiologischen Voraussetzungen anzunehmen ist, der sich in symmorphologischen und anatomisch-morphologischen Merkmalen widerspiegeln dürfte. Die Wirkung der Luftmassen-Unterschiede ist dabei ausschlaggebend.

Tabelle 2: Luftfeuchte- und Verdunstungswerte in den verschiedenen Höhenniveaus; Meßhöhen 200 cm (rel. Lf. in %) bzw. 70 cm (Piche-EP in ml/d bzw. in ml/h)

Rel. humidity (in %; 200 cm above ground) and evaporation (Piche-EP in ml/d or ml/h, resp.; 70 cm above ground) in different altitudes

	-55 m	940 m	1915 m	3030m
rel. Luftfeuchte Ø	9,9	13,4	10,6	18
rel. Luftfeuchte Max.	16,5	24,4	16,6	27,3
rel. Luftfeuchte Min.	4	3,1	4	6
Verdunstung Σ	50,4	40	35,3	20,5
Verdunstung Min.	1,1	1	0,7	0,4
Verdunstung Max.	2,9	2,4	2,4	1,4

Symptomorphologische Merkmale der Vegetationsstufen im Hochsommer

Der systematische Wandel von Lebensformen-Spektren im SW der USA wird von SHMIDA u. BURGESS (1988) beschrieben. Aus einer Profilskizze zwischen küstennahen Chaparral- und kalifornischen Wüstenformationen (s. dort Fig. 5) ist abzuleiten, daß bei Jahresniederschlägen unter 500 mm/a der Anteil an Chamaephyten und vor allem Annualen wächst. Phanerophyten verlieren zwischen 600 und 200 mm/a allmählich an Bedeutung, während Hemikryptophyten zwischen 200 und 100 mm/a plötzlich aussetzen.

Gerade in den vollariden Becken der Mojave nehmen Therophyten mit 45–50% den höchsten Lebensformen-Anteil ein, gefolgt von Chamaephyten mit 25–30%. Winterannuelle sind nach Sichtung von Pflanzentabellen (WENT a. WESTERGAARD 1949) unterhalb 1000 m um ein Vielfaches stärker vertreten als Sommerannuelle, die sich dort nur nach ergiebigen Starkregen entfalten können. Somit besteht bei sommerlichen Untersuchungen mit der Annualen-Lücke der Nachteil, daß nur ein Teil des Artenspektrums erfaßt wird. Da dies aber der Normalfall ist und ohnehin nur Perenne mit der Streßwirkung xerothermer Standorte konfrontiert werden, sind symptomorphologische Untersuchungen im Hochsommer dennoch aufschlußreich.

Grundlage der Materialsammlung bildeten pflanzensoziologische Aufnahmen von jeweils 10 Standorten in den vier Höhengniveaus. Die Artenerfassung erfolgte mit Prozentwerten der Deckung (also nicht in Deckungsgruppen) und wurde mit Vermerken zur Lebensform, Blattkonsistenz und Blattgröße ergänzt. Um edaphische und geländeklimatische Effekte weitgehend auszuschalten, beschränken sich die Aufnahmeareale wiederum auf ebene bis schwach geneigte Flächen mit gleichen Substrat-Voraussetzungen innerhalb der Niveaus. Die Standorte befinden sich:

- im 0-m-Niveau im Auslaufbereich der Schwemmfächer zwischen dem NP Service Headquarter und Badwater (10);
- im 1000-m-Niveau auf Schwemmfächern am Rand der Greenwater Range (7) und auf dem Emigrant Wash (3);
- im 2000-m-Niveau auf Flußterrassen im Wildrose Canyon (5) und auf Hügeln am Agureberry Point (5);
- im Kambereich zwischen Rogers Peak und Telescope Peak (10).

Dendrogramme der Ähnlichkeitsindices nach JACCARD mit Gewichtung nach Deckungsgraden⁴⁾ (Clusternanalyse im Average linkage-Verfahren, Abb. 7a)

zeigen für die beiden unteren und oberen Höhenbereiche verschiedene pflanzensoziologische Voraussetzungen. In den xerothermen Tieflagen deuten jeweils eine Gesellschaft mit relativ hohem Ähnlichkeitsniveau und zwei Aufnahmen mit stark abweichendem Artengefüge an, daß aufgrund des geringen Florenpotentials keine markanten Differenzierungen vorliegen. In den Panamint Mts. zeichnet sich hingegen in den Höhenlagen um 2000 und 3000 m ü. M. eine Trennung in zwei Varianten ab, wobei *Artemisia tridentata* in beiden Fällen die höchste Stetigkeit aufweist. Der mittlere Deckungsgrad des sagebrush beläuft sich im 2000-m-Niveau auf 6%, im 3000-m-Niveau auf 19%. Die Gesellschaftsdifferenzierung hat hier allerdings keinen maßgeblichen Einfluß auf die Gesamtdeckung oder die Lebensformenspektren. So können bei hohen und geringen Deckungswerten Bäume vertreten sein oder auch nicht.

Im Beckengrund belegt die Lebensformenverteilung Chamaephyten- und /oder Nanophanerophyten-Dominanz, je nachdem ob *Atriplex hymenelytra* und *Tidestromia oblongifolia* oder *Larrea tridentata* vorherrschen. Letztere wird im 1000-m-Niveau bestimmend und bildet weiterhin allein den Nanophanerophyten-Anteil, während die Chamaephyten vor allem mit den hoch steten *Atriplex confertifolia* und *Ambrosia dumosa* vertreten sind. Kakteen können regelmäßig aber weitständig vorkommen (*Opuntia basilaris*, *O. echinocarpa* und *Echinocactus polycephalus*).

Sobald *Larrea* oberhalb 1200 m ü. M. ausfällt, spielen Nanophanerophyten keine Rolle mehr, sieht man von vereinzelt *Ribes cereum*-Vorkommen im 3000-m-Niveau ab. Chamaephyten bilden demnach in der „mixed shrub zone“ die konkurrenzstärkste Lebensform, und selbst in der *Pinus-Juniperus*-Ass. sowie in den noch höher liegenden *Pinus flexilis*-Beständen vermögen Bäume nur an wenigen Stellen die Zwergsträucher einzuschränken. Im 3000-m-Niveau nimmt die Bedeutung von Hemikryptophyten deutlich zu, da sie als weniger spezialisierte Lebensform zumindest im Sommer-Halbjahr nach der Schneeschmelze günstige Wuchsvoraussetzungen vorfinden. Neben *Poa*-, *Stipa*- und *Sitanion*-Gräsern sind hier einige buntblühende Stauden zu erwähnen, vor allem *Castilleja*- und *Penstemon*-Arten.

⁴⁾ Ähnlichkeitsberechnung nach JACCARD:

$$IS = \frac{0,5 Mc}{Ma + Mb + 0,5 Mc} 100,$$

wobei IS der Ähnlichkeitsindex in %, Ma und Mb die Summe der Deckungswerte der nur in a bzw. b und Mc der in beiden Arealen auftretenden Arten ist (s. MUELLER-DOMBOIS u. ELLENBERG 1974).

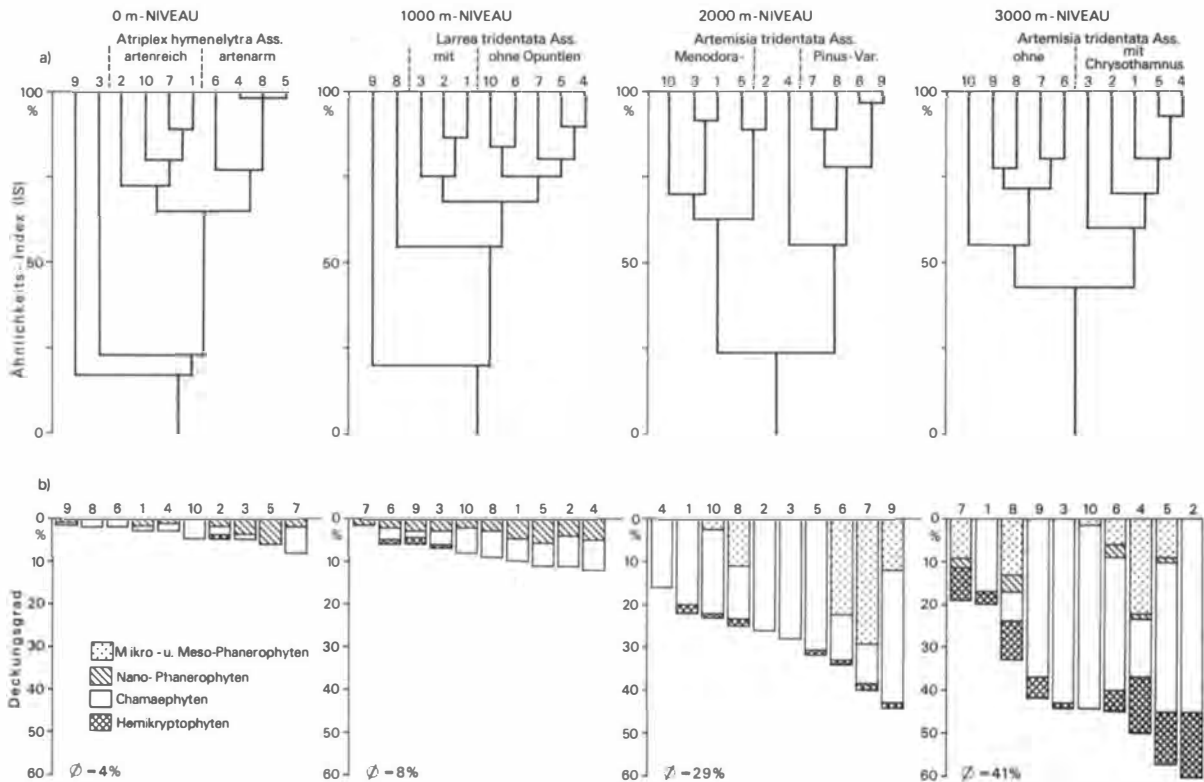


Abb. 7a u. b.: Dendrogramme der prozentualen Ähnlichkeit (a) und Lebensformenspektren (b) von jeweils zehn Pflanzenaufnahmen in vier Höhengiveaus

Dendrograms of percentage similarity (a) and life-form spectra (b) in four different vertical zones of ten plant surveys

Hinsichtlich der Blattkonsistenz (Abb. 8) spielen Sukkulente als aphyllle Vertreter in allen Höhenlagen nur eine bescheidene Rolle. Die xerotherme „creosote zone“ unterscheidet sich von den folgenden Vegetationsstufen durch den hohen Anteil sommerkahler Zwergsträucher (*Ambrosia*, *Encelia*). Mit zunehmenden Niederschlägen werden sie von skleromorphen Vertretern ersetzt, und auch semiskleromorphe Pflanzen nehmen bis zum 2000-m-Niveau zu. Oberhalb verändert sich der Anteil beider Gruppen trotz verstärkter Strahlungsintensität kaum. Statt dessen kommt es ab 2000 m zu einem raschen Zuwachs an mesomorphen Arten, wobei viele von dichten Haarfilzen (*Artemisia*, *Lupinus alpestris*, *Salvia pachyphylla*) oder Wachsschichten geschützt werden (*Penstemon*, *Linum lewisii*).

Bezüglich der Blattgröße überwiegen in den beiden mittleren Höhengiveaus leptophylle Größen (< 0,2 cm²), in den Tief- und Hochlagen hingegen nanophylle (0,2-2 cm²). Zusammengefasst nehmen aber beide Gruppen in allen Höhenstufen mehr als 85% ein, so daß als wesentliches Merkmal die Pflan-

zen des gesamten Vertikalspektrums allgemein zu einer starken Blattreduktion tendieren. Zumindest in den langen Trockenphasen verursachen Wasserman-

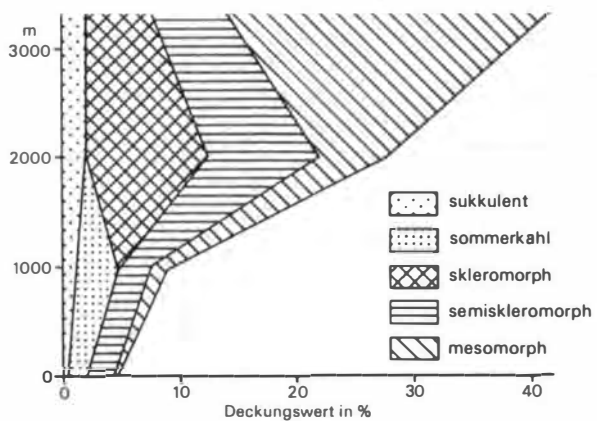


Abb. 8: Veränderung der mittleren Blattkonsistenz mit der Höhe auf Grundlage der vierzig Pflanzenaufnahmen
Alteration of mean leaf-consistency with altitude based on the above-mentioned 40 plants surveys

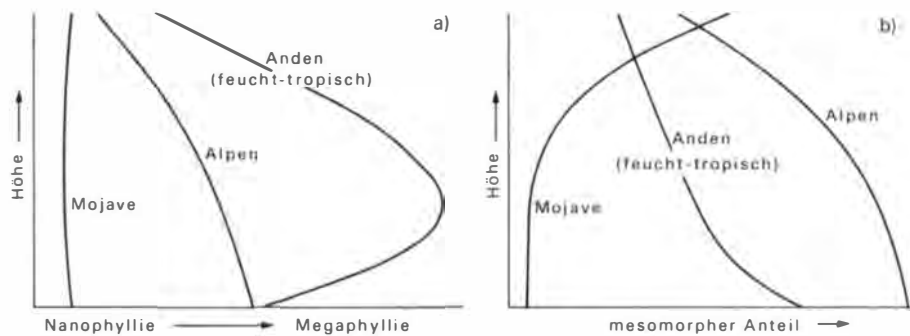


Abb. 9a u. b: Modellhafter Vergleich des Vertikalwandels der Blattgröße (a) und der Blattkonsistenz (b) in der nördlichen Mojave, den Alpen und den tropisch-humiden Anden

Model comparison of vertical variation of leaf-size (a); comparison of leaf-consistency on the Northern Mojave, the Alps and in the tropical, humid Andes (b)

gel und Hitze im Beckenrund sowie die intensive Einstrahlung im Gipfelniveau eine Blattreduktion als Antwort auf erhöhten Transpirationsbedarf, was in allen Höhen Nanophyllie verursacht (Abb. 9a).

Vergleich mit Höhengradienten in feuchteren Landschaftszonen

Gegenüber humiden Gebirgsabschnitten in den Tropen und kühl-gemäßigten Breiten lassen sich im Death Valley-Gebiet drei abweichende Trends bei den Höhengradienten feststellen, die ein mikroklimatisches und zwei klimaökologische Merkmale umfassen.

Unter den mikroklimatischen Faktoren ist gegenüber humiden Gebirgen die höhenwärtige Abnahme der Temperaturamplituden an der Bodenoberfläche hervorzuheben. Dieses Phänomen kommt in der Mojave durch die höhenwärts zunehmende Bodenfeuchte zustande, wodurch das Verdunstungspotential ansteigt und einen wachsenden Anteil latenter Energieumsetzung verursacht (niedrigere Bowen-Ratio). Da in humiden Gebirgen der Ektropen generell und in jenen der Tropen oberhalb der feuchten Höhenstufen dieser Vertikaltrend umgekehrt ist, muß in den Mojave-Gebirgen die extreme Bodenaustrocknung der Tieflagen den Grund für die Abweichung bilden.

Mit dem „Merriam Effect“, der Höhenstufen-Depression durch vermehrte Konvektions-Niederschläge bei zunehmender Massenerhebung, liegt ein weiterer Unterschied gegenüber semi- bis vollhumiden Gebirgen vor. Denn dort führt verstärkte Kontinentalität zu einem Strahlungsgewinn, der bei ausreichender Wasserversorgung einen Anstieg der

Vegetationsgürtel bedingt (s. Waldgrenzanstieg in den Zentralalpen oder von den Inner- zu den Randtropen).

Bei den pflanzlichen Anpassungsmerkmalen besteht ein Unterschied in der nahezu gleichbleibenden Nanophyllie zwischen Tief- und Hochlagen. Dagegen führt in den Tropen oberhalb der Stufe maximaler Niederschläge und in den gemäßigten Breiten von der Fußstufe an die zunehmende Einstrahlung zu einer kräftigen Blattreduktion. Abweichungen gibt es auch bei der Blattkonsistenz, da in der Mojave erst in größeren Höhen ausreichende Niederschläge die Entwicklung mesomorpher Blattstrukturen zulassen. In humiden Gebirgen verursacht hingegen die stärkere Strahlung in den Hochlagen einen Zuwachs skleromorpher zu Lasten mesomorpher Gewebe.

Bei diesen Unterschieden zu humiden Gebirgen dürfte es sich um Gesetzmäßigkeiten handeln, die auch für Vertikalprofile anderer Wüstengebiete gelten; entsprechende Untersuchungen müßten dies belegen.

Literatur

- ANNABLE, C. R. Vegetation and Flora of the Funeral Mountains, Death Valley National Monument, Cal. Cooperative National Park Resources Studies Unit. National Park Service/University of Nevada, Las Vegas Contribution Number CPSU/UNLV 016/07. Las Vegas, Nev. 1985.
- BROWN, D. E. (Ed.): Biotic Communities of the American Southwest - United States and Mexico. Desert Plants 4(1-4). Superior, Az. 1982.

- BRYSON, R. A. a. HARE F. K.: The Climates of North America. In: BRYSON, R. A. a. HARE F. K. (Ed.): Climates of North America. World Survey of Climatology, Vol. 10, 1-47. Amsterdam/London/New York 1974
- DEDECKER, M.: Flora of the Northern Mojave Desert, California. Cal. Native Plant Soc., Spec. Publ. No. 7, Berkeley, Cal. 1984.
- EHLERINGER, J.: Annuals and perennials of warm deserts. In: CHABOT, B. F. a. MOONEY, H. H. (Ed.): Physiological Ecology of North American Plant Communities. New York/London 1985, S. 162-180.
- ELLENBERG, H.: Ursachen des Vorkommens und Fehlens von Sukkulenten in den Trockengebieten der Erde. In: Flora 171, 1981, S. 114-169.
- HÖLLERMANN, P.: Some Aspects of the Geoecology of the Basin and Ranges Province (California Section). In: Arctic and Alpine Research 5(3/2), 1973, S. A85-A98.
- : Naturräumliche Höhengrenzen und die Hochgebirgsstufe in Gebirgen des westlichen Nordamerika. In: JENTSCH, C. u. LIEDTKE, H. (Hrsg.): Höhengrenzen in Hochgebirgen, Geogr. Inst. d. Univ. d. Saarlandes 29, 1980, S. 75-117.
- HUNING, J. R.: A Characterisation of the Climate of the California Desert. Contract No. CA-060-CT7-2812. Desert Planning Staff, Bureaus of Land Management, US Dept. of the Interior, Riverside, Cal. 1978.
- HUNT, C. B.: Plant Ecology of Death Valley, California. Geol. Sur. Prof. Papers 509. Washington, D. C. 1966.
- JOHNSON, H. B.: Vegetation and Plant Communities of Southern California Deserts: a Functional View. In: LATTING, J. (Ed.): Plant Communities of Southern California. Cal. Native Plant Soc. Spec., Publ. No. 2, S. 125-164. Berkeley, Cal. 1976.
- KESSLER, A.: Heat Balance Climatology. In: ESSENWANGER, O. M. (Ed.): General Climatology. World Survey of Climatology, Vol. 1A, Amsterdam/London/New York 1985.
- KURZIUS, M. A.: Vegetation and Flora of the Grapevine Mountains, Death Valley National Monument, Cal.-Nev. Cooperative National Park Resources Studies Unit. National Park Service/University of Nevada, Las Vegas Contribution Number CPSU/UNLV 016/06. Las Vegas, Nev. 1981.
- MÜLLER-DOMBOIS, D. a. ELLENBERG, H.: Aims and Methods of Vegetation Ecology. New York/London/Sydney/Toronto 1974.
- NOAA (Nat. Oceanic and Atmospheric Adm.): Climate data. Summary of the Day, West 1. Nat. Clim. Datacenter. US West Optical Pub. Denver 1988 (EDV-Datei).
- PETERSON, P. M.: Vegetation and Flora of the Cottonwood Mountains, Death Valley National Monument, Cal. Cooperative National Park Resources Studies Unit. National Park Service/University of Nevada, Las Vegas Contribution Number CPSU/UNLV 022/06. Las Vegas, Nev. 1984.
- ROWLANDS, P. G.: Physical Features, Climate and Vegetation of the Northern Mojave and Southwestern Great Basin Deserts between Bishop, California and Las Vegas, Nevada. USDI National Park Service. San Francisco, Cal. 1988 (unveröff. Mskr.).
- SCHMIEDECKEN, W.: Die Bestimmung der Humidität und ihrer Abstufung mit Hilfe von Wasserhaushaltsberechnungen - ein Modell. In: LAUER, W. (Hrsg.): Klimatologische Studien in Mexiko und Nigeria. Colloquium Geographicum 13, Bonn 1978, S. 135-159.
- SCHRAMM, D.: Floristics and Vegetation of the Black Mountains, Death Valley National Monument, Cal. Cooperative National Park Resources Studies Unit. National Park Service/University of Nevada, Las Vegas Contribution Number CPSU/UNLV 012/13. Las Vegas, Nev. 1982.
- SHMIDA, A. a. BURGESS, T. L.: Plant Growth-form Strategies and Vegetation Types in Arid Environments. In: WERGER, M. J. A., VAN DER AART, P. J. M., DURING, H. J. a. VERHOEVEN, J. T. A. (Ed.): Plant and Vegetation Structure. Den Haag 1988, S. 211-241.
- STEBBINS, G. L. a. MAJOR, J.: Endemism and Speciation in the California Flora. In: Ecological Monographs 35, 1965, S. 1-35.
- VASEK, F. C. a. THORNE, R. F.: Transmontane Coniferous Vegetation. In: BARBOUR, M. G. a. MAJOR, J. (Ed.): Terrestrial Vegetation of California. Cal. Native Plant Soc., Spec. Publ. No. 9, S. 797-832. Berkeley, Cal. 1987.
- WEBB, R. H., STEIGER, J. W. a. TURNER, R. M.: Dynamics of Mojave Desert Shrub Assemblages in the Panamint Mountains, Cal. In: Ecology 68 (3), 1987, S. 478-490.
- WELLS, P. V.: An Equable Glaciopluvial in the West: Pleniglacial Evidence of Increased Precipitation on a Gradient from the Great Basin to the Sonoran and Chihuahuan Deserts. In: Quaternary Research 12, 1979, S. 311-325.
- WENT, F. W. a. WESTERGAARD, M.: Ecology of Desert Plants. III. Development of Plants in the Death Valley National Monument, Cal. Ecology 30 (1), 1949, S. 26-38.