

Zur Genese von Badlands in Bolivien

Zusammenfassung

Badlands liegen auf dem bolivianischen Altiplano und in den gegen E gerichteten Andendurchbruchstätern. Ihre klimatischen Voraussetzungen und ihr Formenschatz werden diskutiert. Für geomorphologische Prozesse ist die Regenzeit entscheidend, wobei der intensiven Verdunstung Bedeutung zukommt. Überflutung und sofortige Austrocknung wechseln kurzfristig, was allgemein für Tropen typische Kleinformen hervorbringt. Dazu zählen Klein-Canyons, Erdpyramiden, (Quell-) Nischen, Gefällsknicke, Racheln, Kämme und als besonders behandelte Formen Mäander und «strauchbesetzte Deflationskuppen».

Resumen

Hay bad-lands (tierras malas) en el Altiplano boliviano y en los valles mesotérmicos. Se discuten sus condiciones climáticas y los procesos que forman su superficie. La época de lluvias causa la mayoría de las formas geomórficas, durante la cual la evaporación es también intensa. Inundaciones y resecaión rápida oscilan en tiempo breve, lo que causa formas pequeñas generalmente típicas para regiones tropicales. Mencionamos pequeños cañones, pirámides de tierra, cabeceras de valle poco espaciadas, terrazas, regueros, barrancos (huaicos), y tratamos especialmente meandros y morros formados por deflación eólica.

1. Untersuchungsobjekt

In Bolivien sind viele Fundstellen von Säugetierfossilien bekannt geworden (z. B. bei Tarija nach AHLFELD 1946, S. 310f.). Es handelt sich meistens um Gebiete ausgedehnter mergeliger Pliozän- oder Pleistozänsedimente, die durch intensive Abtragungsprozesse in Badlands verwandelt worden sind. Während gemeinsamen Exkursionen mit Paläontologen hatte ich 1973–1975 Gelegenheit, dazu geomorphologische Untersuchungen im nördlichen Teil des bolivianischen

Altiplano anzustellen¹⁾. Unter Badlands seien unwegsame, zerschrundete Gelände verstanden, die nur eine schütterere Vegetation aufkommen lassen und in zahllose unbeständige Formen der Erosion und Denudation zerlegt sind. Im folgenden wird versucht, das Altiplano im Bereich des Departements La Paz klimatisch zu charakterisieren und daraus Folgerungen auf die Abtragungsprozesse in Badlands zu ziehen. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich vom Titicacasee (ca. ab 15°30' S) bis fast 18° S und liegt im allgemeinen auf Höhen von 3800–4200 m ü. M. Es entstand hauptsächlich im Pliozän als Depression zwischen der West- und Zentralkordillere und war im Pleistozän nur spärlich vergletschert. Die Hauptentwässerung erfolgt im W durch den río Desaguadero, im E sind dessen Zuflüsse río Colorado und río Kheto durch eine Talwasserscheide bei Calamarca getrennt. Östlich dieses abflußlosen Entwässerungssystems des Hochlandes befinden sich mehrere aride Täler. Diese «Valles» wurzeln im Altiplano, fallen aber abrupt in Badlands ab und öffnen sich als Windpforten zum Amazonasbecken hin.

2. Klimatische Besonderheiten

Das Klima des nördlichen Altiplano ist durch den Wechsel von Feucht- und Trockenzeit geprägt. Die sommerliche Regenzeit von November bis März bewirkt häufig katastrophale Rutschungen in Siedlungen und bei schlecht angelegten Straßen. Da dann allgemein die Abtragungsprozesse am intensivsten sind, betrifft unser Überblick zum Klima hauptsächlich die Regenzeit.

Fig. 1 zeigt die Lage von 15 bolivianischen Klimastationen, die 1961–1973 einigermaßen regelmäßig arbeiteten. In Fig. 2 ist dazu die Niederschlagssumme ihres feuchtesten Monats (meistens Januar) in Relation zur Mitteltemperatur des wärmsten Monats (meistens auch Januar) gesetzt. Es fällt auf, daß der südöstliche Abschnitt im Höhepunkt der Regenzeit relativ warm und trocken ist. Dieses Gebiet häufiger Badlands weist also auch regenzeitlich eine starke Verdunstung auf²⁾. Genaue Meßreihen zur Verdunstung sind in Bolivien spärlich. Bei Fig. 3 wurde meist auf Klima-

1) In den Jahren 1973–1975 weilte ich mit Unterstützung des Schweizerischen Nationalfonds in Bolivien.

2) s. dazu MONHEIM (1956, S. 34 und 58 f.) zu Niederschlägen und Trockengrenze im nördlichen Altiplano.

Dr. Kurt Graf, Oberassistent am Geographischen Institut der Universität Zürich, Blümlisalpstrasse 10, 8006 Zürich.

Fig. 1: Klimastationen auf dem Altiplano des Departements La Paz zwischen 3800 und 4100 m ü. M. sowie La Paz/ San Calixto, 3660 m ü. M.

Fig. 2: Die Klimastationen von Fig. 1, nach Niederschlag und Temperatur im Januar geordnet (genauer: höchste Werte des Monatsniederschlags und der Monatsmitteltemperatur wurden gewählt). Die Orte mit dem trockensten und wärmsten Klima stehen rechts unten bzw. bei Fig. 1 im SE. Quelle: Anuarios Meteorológicos 1961–1973.

jährbücher (Anuarios Meteorológicos) 1960–1972 zurückgegriffen. Für Copacabana erwähnt ANTEZANA (1958, S. 186) Daten zur maximalen Verdunstung auf dicht krautbesetzter Oberfläche (= potentielle Evapotranspiration). Eine zehnjährige Beobachtungszeit gibt er als Grundlage an, ohne sie näher zu bezeichnen. Messungen mit Evapotranspirometern ergeben gesamthaft zu kleine Verdunstungswerte auf dem Altiplano, da ein dichtes Pflanzenkleid mit seiner relativ großen Rückstrahlung des Sonnenlichts (Albedo) weitgehend fehlt. Andererseits geben Piche-Evaporimeter mit ihrer kleinen Test-Wasserfläche (13 cm² nach THORNTWHAITE 1955, S. 15) allgemein zu hohe Verdunstungswerte, da die meiste Energie zur Evaporation von der Luft der Umgebung stammt. Für Desaguadero entnahm ich solche Daten zur maximalen Verdunstung auf Wasserflächen (= potentielle Evaporation) bei KESSLER (1970, S. 343), der sie als Mittelwert der Küstenstationen Desaguadero und Capachica/Peru angibt. In La Paz und Patacamaya wurde durch den Servicio Nacional de Meteorología mit Verdunstungswaagen gemessen, die mit einem Durchmesser der Wasserfläche von ca. 1.20 m genaue Werte der potentiellen Evaporation geben¹⁾.

In Badlands (z. B. von Patacamaya) bleiben die Monatsniederschläge stets deutlich hinter den maximal möglichen Verdunstungswerten zurück, es herrscht offenbar eine besonders intensive Verdunstung. Ein Vergleich der Differenz von Niederschlag und Verdunstung ist für unser Untersuchungsobjekt indessen nicht ganz stichhaltig, weil

1. die wirkliche Verdunstung (= aktuelle Evaporation) auf sandig-lehmigem Untergrund nicht jener über Wasserflächen (= potentielle Evaporation) gleichkommt.
2. die Niederschläge unregelmäßig fallen und kurzfristige Überschwemmungen bzw. Übersättigung hervorrufen können.
3. die Wasserbilanz auch vom Abfluß gesteuert wird und damit bei zu kleiner Verdunstung trotzdem zu vollständiger Austrocknung führen kann²⁾.

1) s. dazu die Vergleiche mit zwei verschiedenen berechneten Werten der potentiellen Evaporation in Puno/Peru von KESSLER (1970, S. 246).

2) KESSLER (1970, S. 251) läßt bei seiner Klimauntersuchung des Titicaca-Beckens den Zu- und Abfluß auch unberücksichtigt und behandelt die «klimatische Wasserbilanz» (= Niederschlag minus Verdunstung).

Fig. 3: Klimadaten zu vier ausgewählten Stationen: Copacabana (3840 m ü. M.) und Desaguadero (3810 m) am Titicacasee, Patacamaya (3790 m) und La Paz (Colegio San Calixto 3660 m, das im Gegensatz zum 4100 m hohen El Alto von La Paz im Talkessel unten liegt). In den Darstellungen zur klimatischen Wasserbilanz (s. Anm. 4) sind die Monatsmittel der potentiellen Verdunstung strichpunktiert aufgetragen, jene der Niederschläge mit ausgezogenen Linien. Die Rasterflächen zeigen ein Überwiegen des Niederschlags an. Quellen siehe Text.

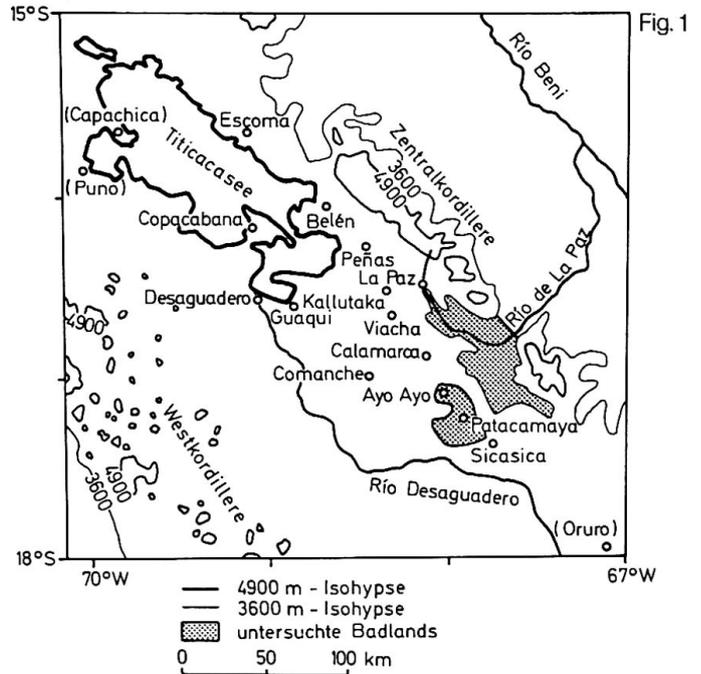


Fig. 1

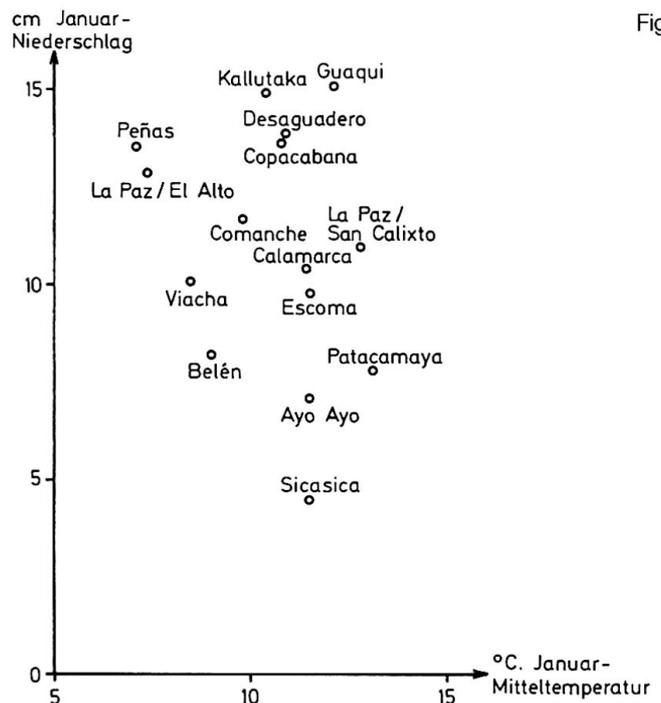
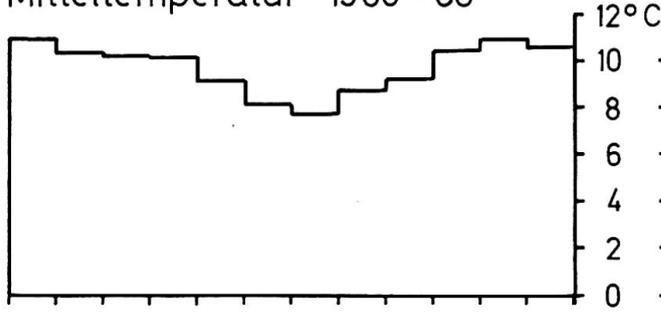


Fig. 2

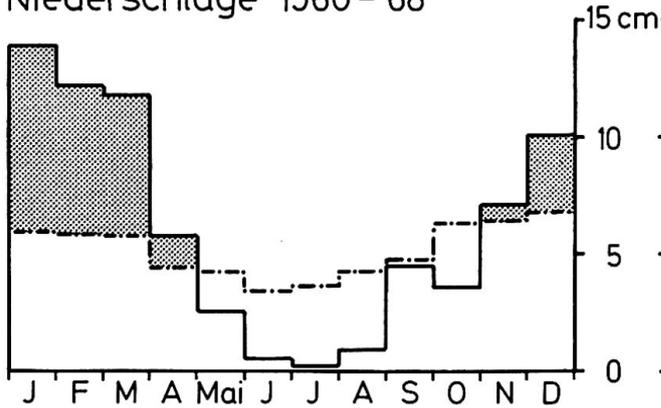
Fig. 3

Copacabana

Mitteltemperatur 1960 - 68

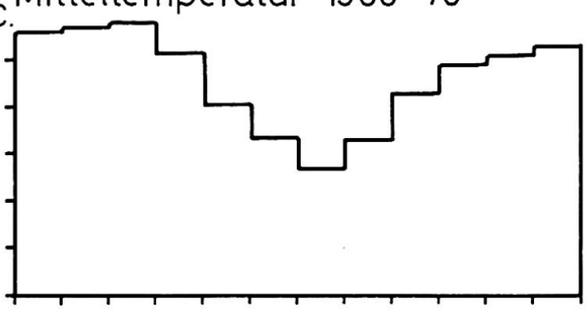


potentielle Evapotranspiration
Niederschläge 1960 - 68

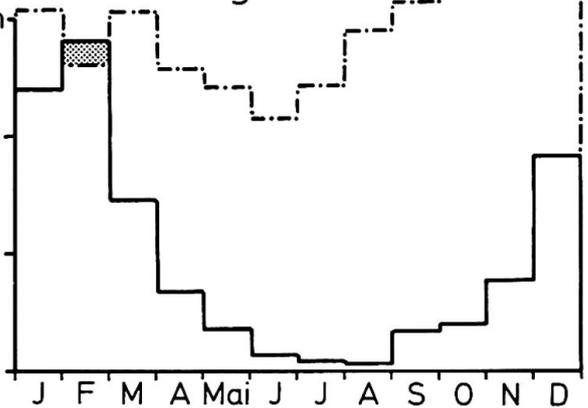


Desaguadero

Mitteltemperatur 1966 - 70

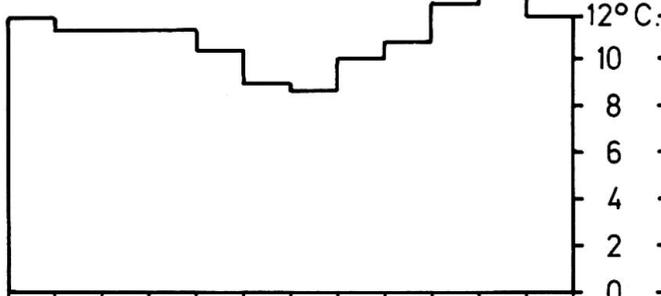


pot. Evaporation 1958 - 61
Niederschläge 1966 - 70

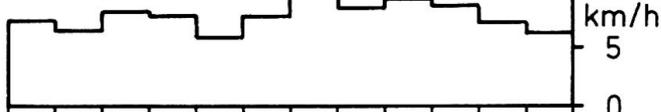


La Paz / San Calixto

Mitteltemperatur 1961 - 70



Windgeschwindigkeit 1961 - 70

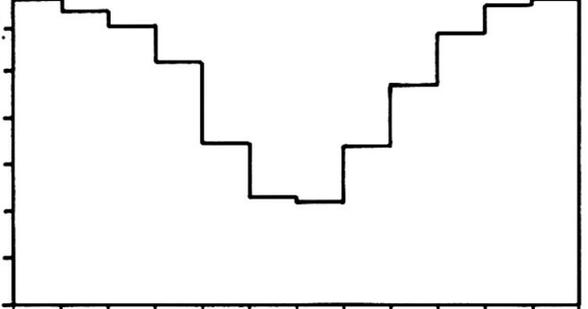


pot. Evaporation 1961 - 70
N. 1961 - 70



Patacamaya

Mitteltemperatur 1962 - 71



pot. Evaporation 1970 - 72
Niederschläge 1962 - 71



In La Paz zeichnet sich ungefähr ein Gleichgewicht in den Regenzeitmonaten ab. Man kann folgern, daß auf 3660 m in La Paz vom Klima her noch keine ausgeprägten Badlands erwartet werden dürfen. Sie setzen auch wirklich erst 300 m weiter unten, im Mondtal, weitflächig ein (Abb. 1). Damit erklärt sich bei Fig. 2, warum La Paz/San Calixto und v. a. La Paz/El Alto überraschend weit oben zu liegen kommen. Höhenwärts wird nämlich das Klima in La Paz stetig feuchter, dem río de La Paz abwärts folgend, erreicht man schnell extrem aride Badlands und Kakteenlandschaften. Leider fehlen für solche Valles Klimadaten, aber sie lägen in Fig. 2 deutlich rechts unten. Für die Verdunstung wirkt sich überdies der tageszeitliche Wind aus (TROLL 1968, S. 49), der im Mondtal unten mindestens so stark wie im Stadtzentrum von La Paz (San Calixto) weht. In Fig. 3 sind diese Daten zur Windgeschwindigkeit als Monatsmittel angegeben. Sie sind ungeachtet der Windrichtung gemittelt worden, weil in unserer Untersuchung allein die Stärke des Windes interessiert. Gute Ventilation beschleunigt die Verdunstung bzw. Austrocknung der Oberfläche und deren Bereitstellung für den Abtrag. Die stärksten Winde wehen in La Paz während der winterlichen Trockenzeit, sie sind aber während des ganzen Jahres beachtlich.

Ebenfalls nur mit Vorbehalt dürfen die Monatsmitteltemperaturen im Hinblick auf Austrocknung, Verwitterung und Abtrag hin beurteilt werden. In La Paz zeigten beispielsweise Stichproben im Oktober 1974, daß die Mittagstemperaturen am Schatten 18–20° C betragen können gegenüber 40–45° C an der Sonne. Bei so hohen Temperaturen erfolgt die Verdunstung des Oberflächenwassers tagsüber viel schneller, als man aufgrund der Schattentemperaturen erwarten würde. Die effektiven Verhältnisse der Austrocknung sind aber zudem wohl stets durch Lokalfaktoren geprägt. So beschleunigt z. B. der schnelle Abfluß als Sturzbäche in die ariden Valles hinunter die Wiederaustrocknung, was in La Paz die Badlandsbildung edaphisch begünstigt. Die Verdunstung ist überdies in Wirklichkeit ein langsames Einstellen auf das schütterere Pflanzenkleid. Sie stellt für die Landwirtschaft auf dem Altiplano einen Teufelskreis dar: Die primär große Verdunstung bewirkt einen Rückgang der Vegetation, wodurch die Albedo kleiner wird und damit die aktuelle Verdunstung noch größer. Der Trockenheit angepaßte Pflanzen gebieten diesem Kreis in gewissem Maß Einhalt.

3. Mechanismus der Abtragungsprozesse

Mergelige Sedimente bilden eine erste Voraussetzung für Badlands, wie sie beispielsweise auch in allen Breitenlagen der USA vorkommen (Grand Canyon in Arizona, die Regionen Mauvaises Terres und Bad Lands in Dakota). Ausreichendes Gefälle für oberflächlichen raschen Abfluß ist ebenfalls förderlich. Dazu kommen aber in den Randtropen klimatische Gegebenheiten, welche den Abtrag sehr begünstigen. Unser Vergleich von wechselfeuchten Stationen Boliviens ergab, daß gegen S und im Abstieg in die Valles die Trockenheit zunimmt und Badlands sich häufen. Wahrscheinlich ist aber nicht die Aridität an sich für die intensiven Abtragungsvorgänge entscheidend, sondern die Regenzeit. Während ca. fünf Monaten findet die hauptsächliche Abspülung statt. Die Luft bleibt auch während der Regenzeit sehr trocken. Sie bedingt also auch dann noch eine recht wirksame Verdunstung, welche überdies durch die Strahlung des steil einfallenden Sonnenlichts verstärkt wird. Auch in der Regenzeit trocknet daher die Oberfläche zwischen zwei Regenfällen sofort wieder aus (s. auch MONHEIM 1956, S. 55). Das tonige Material schrumpft leicht zusammen und lockert den Verband. Bei erneuten Schauern quillt das aufbereitete Material und kann abgespült werden. So wiederholt sich in kurzen Abständen das Wechselspiel von Verwitterung und Abspülung. Von November bis März pulsiert der Abtragungsmechanismus kurzatmig zwischen trockener und durchnäßter Feinerde, zwischen Aufbereitung und Abtrag. Damit sind die Voraussetzungen für die zahlreichen, fein herausmodellierten Formen in Badlands geschaffen. Die Großformen werden in Kleinformen zerlegt, bestimmen aber weiterhin das Großrelief. Es scheint, daß die Bildung von Kleinformen allgemein für tropische Abtragungsprozesse typisch ist. Damit soll nicht gesagt sein, daß solche Kleinformungen nicht auch in subtropischen und gemäßigten Breiten bei ähnlichem Klima und Witterungsablauf auftreten. Ein analoges Beispiel in tropischen Gebirgen sind die häufigen kurzfristigen Fröste, welche die Abtragungsvorgänge grundlegend bestimmen und zahlreiche Kleinformen von Strukturböden bewirken¹⁾. Auch

¹⁾ Die Problematik konvergenter Formung in Trockengebieten und Hochgebirgen behandelt KAISER (1970, S. 149 f.) und gibt dazu zahlreiche andere Autoren an.

Abb. 1: Badlands im Mondtal unterhalb La Paz (68°5'40" W / 16°33'30" S, 3200 m ü. M.), Blick nach N talaufwärts.

Abb. 2: Strauchbesetzte Deflationskuppen auf einem Rücken nahe Salla, 20 km nordöstlich von Sicasica (67°37'40" W / 17°9'30" S, 3750 m ü. M.).

Abb. 3: Abrupter Tälchenanfang, als Nische eingetieft in eine Tuffplatte zwischen Ayo Ayo und Patacamaya (67°56' W / 17°7'30" S, 3900 m ü. M.), im Hintergrund im SE ein Inselberg.

Abb. 4: Regelmäßige Mäander zwischen Ayo Ayo und Patacamaya (67°55' W / 17°8'30" S, 3900 m ü. M.), Blick nach NW.



dieser Prozeß ist bis in gemäßigte Breiten sehr wirksam, obschon er äquatorwärts ausgeprägter auftritt.

4. Oberflächenformen in Badlands

Die Feldarbeit im unübersichtlichen Gelände von Badlands gestaltet sich oft schwierig, wegekundige Indios haben aber erstaunlichen Orientierungssinn in solchen Labyrinthen. An Großformen findet man *Flächenreste*, welche eine frühere Verebnung durch Erosion oder Akkumulation nachzeichnen. Es kann sich also dabei einerseits um Inselberge (Tafelberge) handeln, die z. B. südlich von Ayo Ayo von einer harten Tuff-

schicht bedeckt sind (HOFFSTETTER 1971, S. 2472). Andererseits sind postglaziale bis rezente Murgänge in den Valles häufig (DOBROVOLNY 1962, S. 61 f.). Sie füllen breiartig oft ganze Talabschnitte aus. Als Sammelrinne für die regenzeitlichen Hochwasser dienen breite, schuttbedeckte Talzüge mit steilen Seitenwänden, *Canyons*.

Das erwähnte Großrelief wiederholt sich in ähnlicher Art in den Kleinformen. Anstelle der Inselberge stehen als Reste häufig *Erdpyramiden* (Abb. 1). Tälchen mit rechteckigem Canyon-Querprofil können noch bei kleinen Rinnsalen festgestellt werden. Auffällig ist, wie abrupt diese *Klein-Canyons* mit *Nischen* auf der ursprünglichen Verebnung beginnen (Abb. 3). Man

Fig. 4: Grundrißansicht von vier Mäanderschleifen bei der Lokalität von Abb. 4. Die zwei östlicheren zeigen den Normalfall mit scharfer Terrassenkante, die in diesem Beispiel ca. 5 m zum Wadibett abfällt. Die zwei westlichen sind durch Rutschungen abgeschnürt und weisen Nebenwadis auf.

Fig. 5: Perspektivische Ansicht eines mäandrierenden Klein-Canyons südlich von Ayo Ayo (68°1' W / 17°6' 30" S, 3900 m ü. M.), Blick talaufwärts gegen SE. Der Raster bezeichnet eine harte Schicht ca. 5 m über der Wadisohle; die unvermittelt in der Pultfläche einsetzenden Nischen von Neben-Wadis sind schwarz markiert.

glaubt jeweils, einen um einige Meter abgesackten Teil der leicht geneigten Pultfläche vor sich zu haben¹⁾. Im Längsprofil des Laufes ergeben sich zwei starke *Gefällsknicke*. Diese können sich bei Härterippen im Bachbett sowie bei einer Stufenmündung wiederholen (BARTELS 1970, S. 34). Die kleinsten Rinnen herabfließenden Regenwassers sind *Racheln* (Spülrinnen). Sie modellieren oft niedrige *Kämme* aus Lockermaterial heraus. All diese Formen können mit der flutartigen Abspülung im Wechsel mit sofortigem Austrocknen erklärt werden. Zwei Kleinformen, zu deren Bildung eine besondere Erosion wirkt, sollen nun noch besonders beleuchtet werden: mäandrierende Wadis und strauchbesetzte Deflationskuppen.

Mäanderformen lassen sich in besonders feinem Material und bei kleinem Gefälle in erstaunlicher Regelmäßigkeit finden (Abb. 4). Es sind periodisch austrocknende Talläufe (Wadis). Die größeren sind canyonartig ausgeweitet, die kleineren teilweise noch kerbenförmig eng (Fig. 5). Terrassenkanten begrenzen die Mäander beidseitig, die Wände fallen einige Meter steil bis zum sandigen Bachbett ab. In Fig. 4 sind vier Mäanderschleifen dargestellt, wovon die zwei östlichen den Normalfall mit rhythmischem Hin- und Herpendeln beibehielten. Die zwei westwärts folgenden Mäander sind hingegen durch Rutschungen teilweise aufgefüllt und zu Nebentälchen umfunktioniert worden. Die Neben-Wadis von S sind degeneriert, jene von N sind größer und haben teilweise ihrerseits zu mäandrieren begonnen.

Als «*strauchbesetzte Deflationskuppen*» möchte ich Kleinhügel aus Lockermaterial bezeichnen, denen ein Strauch Halt vor Abspülung und Winderosion geboten hat (Abb. 2). Deutlichste Ausprägung erlangt diese Kleinform in den Valles, wo sie Höhen bis 1,50 m erreicht. Häufig krönen sie Dornsträucher der Gattungen *Adesmia*/Leguminosae und *Baccharis*/Compositae. Offenbar können sie sich auf lokalen Verebnungen bilden, wo extreme Abspülprozesse zurücktreten und häufig Wind weht. Es fehlen Meßresultate, aber man muß die Windwirkung wohl in zwei Arten sehen. Tageszeitlicher Wind beteiligt sich direkt durch Ausblasung von Feinschutt (Deflation). Daneben wirkt sich der Wind aber auch indirekt aus,

¹⁾ Nach BÜDEL 1971, S. 42 könnte man von Quellnischen sprechen. Es handelt sich aber nicht um Wasseraustrittsstellen, sondern lediglich um eingefurchte Sammelrinnen (in Bolivien Quebradas genannt).

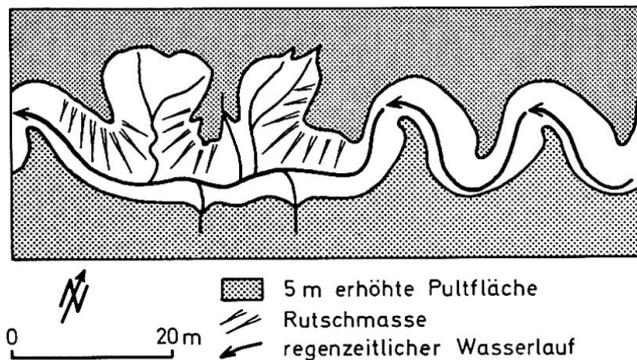


Fig. 4

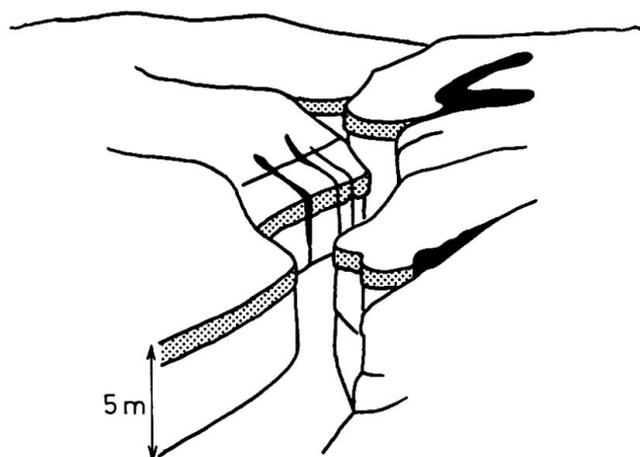


Fig. 5

indem er die Verdunstung fördert. In der Regenzeit können Sturzregen den Verband lösen, und im Zuge der sofort anschließenden Austrocknung wird das gelockerte Feinmaterial ausgeblasen.

Literatur

- AHLFELD, F., 1946. Geología de Bolivia. Revista del Museo de La Plata, Rep. Argentina (Nueva Serie), Sección Geología III: 5-370.
- ANUARIOS METEOROLÓGICOS, 1960-1972, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología, La Paz/Bolivien.
- ANTEZANA, O., 1958. Climas de Bolivia según el sistema de Thornthwaite. Rev. de la Fac. de Agronomía (3ª época) 34 (2ª entrega), La Plata, Argentina: 161-191.
- BARTELS, G., 1970. Geomorphologische Höhenstufen der Sierra Nevada de Santa Marta (Kolumbien). Giesener Geogr. Schriften 21: 56 S.

Abb. 5: Das Altiplano Boliviens. Die 3650–4200 m hohe Ebene wird im Westen von zahlreichen Vulkankegeln gesäumt, im Bild von den Payachatas (links Parinacota 6330 m, rechts Pomarapa). Das wechselfeuchte Klima läßt nur eine schütterere Steppenvegetation aufkommen. Große Weideflächen wechseln mit unwegsamem Badlands. Foto K. Graf, 6. Mai 1974.



BÜDEL, J., 1971. Das natürliche System der Geomorphologie mit kritischen Gängen zum Formenschatz der Tropen. Würzburger Geogr. Arb. 34: 152 S.

DOBROVOLNY, E., 1962. Geología del Valle de La Paz. Min. de Minas y Petróleo, Dep. Nac. de Geología, Boletín No. 3 (Especial), La Paz: 153 S.

HOFFSTETTER, R. et al., 1971. Le gisement d'Ayo Ayo (Bolivie), une succession stratigraphique Pliocène-Pléistocène datée par des Mammifères. Acad. Sc. Paris, t. 273: 2472–2475.

KAISER, K., 1970. Über Konvergenzen arider und «periglaziale» Oberflächenformung. Abh. Geogr. Inst. der Freien Univ. Berlin 13: 147–188.

KESSLER, A., 1970. Über den Jahresgang der potentiellen Verdunstung im Titicaca-Becken. Arch. Met. Geoph. Biokl., Ser. B, 18: 239–252.

MONHEIM, F., 1956. Beiträge zur Klimatologie und Hydrologie des Titicacabeckens. Heidelberger Geogr. Arb. 1: 152 S.

THORNTON, C. W., 1955. The Water Balance. Drexel Inst. of Technology, Publ. in Climatology VIII, 1, Centerton, New Jersey: 104 S.

TROLL, C., 1968. Geo-Ecology of the Mountainous Regions of the Tropical Americas. Colloquium Geogr. Bonn, Bd. 9: 15–56.