

Die Reliktlandschaften des Colorado Plateaus und Grand Canyons

Teil 2: Pliozäne Formung des Grand Canyons und der nördlichen Plateaus des Colorado Plateaus

Thomas Herzog, Kulturstraße 17c, 86165 Augsburg
& Achim Zimmermann, Hirschäckerstr. 43, 76139 Karlsruhe

Zusammenfassung: Im Teil 1 wurde die Formung der Grand Staircase, d.h. der weiten Plateaus und steilen Geländestufen des Colorado Plateaus betrachtet. Weil die Formung sehr schnell und durch gewaltige Erosions- und Transportmechanismen stattfand, wurde sie als Reliktlandschaft bezeichnet (das Relikt von katastrophalen geologischen Prozessen).

Im vorliegenden zweiten Teil werden Arbeiten zur Eintiefung des Grand Canyons zusammengefaßt. Sie spielte sich während tektonischer Unruhen bei der Öffnung des Golfs von Kalifornien und der enormen Erosion der nördlichen Plateaus ab. Zeitgleich wurden von einer gewaltigen Fläche der nördlichen Plateaus bis zu 2.000 Höhenmeter Gestein abgetragen (FLEMING 1994).

An der stratigraphischen Wende vom Miozän zum Pliozän bzw. absolut datiert vor 5,8 oder 5,47 Millionen Jahren (Ma; nach radiometrischen Datierungen; LUCCHITTA 1990), begann die Erosion den Grand Canyon in das Plateau zu schneiden, sie soll durch den Vorläufer des heutigen Colorado Rivers ausgelöst worden sein. Spätestens vor 3,8 Ma war ein Niveau nur 100 m über dem heutigen Colorado River erreicht (SHAFIQUILLA et al. 1980; DAMON et al. 1978). Das erodierte Gesteinsvolumen beträgt für den Bundesstaat Arizona ca. 4.000 km³ (AUSTIN 1994, 83).

Während der Erosion blieb die seit 35 bis 65 Ma sanft gewellte und durch paleo-eozäne Schotter versiegelte Oberfläche der südlichen Colorado Plateaus seltsamerweise verschont. Die Erosion verlief so schnell und vehement, daß eine völlig neue Trasse quer durch bestehende Täler geschnitten wurde (Kanab Creek oder Cataract Creek) sowie Höhenzüge (z.B. Kaibab Upwarp) und junge Vulkangebirge auf dem Shivwits- und dem Hualapai-Plateau durchtrennt wurden.

Erfolglos bleibt die Suche nach den erodierten Gesteinsmassen. Im Grand Canyon sind die Hänge kahl (somit fehlen auch die Indizien eines allmählich einschneidenden Colorado Rivers), und die Beckenfüllungen und Deltas unterhalb des Colorado Plateaus haben nur kleine Volumina. Deren Sedimente weisen auf eine schnelle Ablagerung zu der Zeit hin, als die Erosion im Grand Canyon begann.

Bislang sind keine schlüssigen Modelle für die Erosion des Grand Canyon publiziert, die erklären,

warum die alte Landoberfläche (s. Teil 1) verschont blieb, die vorhandenen reifen Täler unbenutzt blieben und in max. 2 Ma der Grand Canyon gebildet werden konnte. Die Korrelation der Erosionsleistung (4.000 km³ Gestein) und der Dauer (max. 1,7 bis 2,0 Ma) sowie das Fehlen der Sedimente deuten auf eine Katastrophe hin. Die zeitliche Disproportion in der Landschaftsentwicklung zwischen dem paleo-eozänen Colorado Plateau und dem pliozänen Grand Canyon spricht ebenfalls für eine Katastrophe, deren Relikt der Grand Canyon ist.

Zeitliche Eingrenzung der schnellen Grand Canyon-Erosion im Pliozän, Zeitmarken der südlichen Plateaus des Colorado Plateaus

Zur Eingrenzung der Grand Canyon-Erosion müssen die kartierenden Geologen die entsprechenden Ablagerungen ober- und unterhalb des Canyons ermitteln und zeitlich bestimmen. Dazu haben sie stratigraphische Hilfsmittel (das sind in die Sedimente eingebettete Fossilien, die für einen Zeitraum innerhalb der geologischen Schichtsäule charakteristisch sind) bzw. geochronologische Methoden (es werden z.B. die Verhältnisse von Kalium- und Argonisotopen gemessen, und daraus – anhand einer standardisierten Kalibrierkurve – ein Alter berechnet). Somit ergeben sich unterschiedliche Zeitmarken, z.B. wann die frühesten Sedimente unterhalb des Canyons abgelagert wurden oder im Canyon ein bestimmtes Niveau erreicht worden sein muß.

Die Bouse Formation (Abb. 2) ist ein frühes Flußdelta des Colorado Rivers in den damaligen Golf von Kalifornien und der erste sedimentologische Nachweis des Colorado Rivers überhaupt. Die Sedimente wurden mit der K/Ar-Methode auf $5,47 \pm 0,2$ Ma datiert (DAMON et al. 1978). Dieses Delta kann frühestens nach der Bildung der Hualapai Kalke abgelagert worden sein, die wiederum datierbare Vulkanite enthalten: Die Fortification Hill Basalte mit $5,8 \pm 0,2$ Ma (K/Ar-Datierung nach

Shafiqullah et al. 1980) und $5,0 \pm 0,4$ Ma (K/Ar-Datierung nach ANDERSON et al. 1972).

Die nächste prägnante Zeitmarke sind Basalttergüsse im Grand Canyon, die sich mit den Flußsedimenten des Colorado Rivers verzahnen. Aus dem K/Ar-Verhältnis wird ein Alter von 3,8 Ma berechnet (DAMON et al. 1978). Die datierten Basaltproben wurden aber nur 100 Höhenmeter über dem heutigen Niveau des Colorado Rivers entnommen, d.h. in weniger als 2 Ma wurde beinahe die aktuelle Tiefe des Grand Canyons erreicht; dazu mußten ca. 4.000 km^3 Gestein erodiert und transportiert werden (AUSTIN 1994, 83; dieser Wert gilt nur für den Anteil des Grand Canyons im Bundesstaat Arizona).

Die nächsten datierbaren Basalte mit 1,2 Ma liegen bereits auf dem heutigen Niveau des Colorado Rivers, so daß bereits vor diesem Zeitpunkt die Eintiefung des Lower Colorado Rivers abgeschlossen war (McKEE et al. 1967).

Pliozäne Zeitmarken der enormen flächigen Erosion der nördlichen Plateaus

Parallel zur Canyonbildung in den südlichen Plateaus wurden Teile im Norden des Colorado Plateaus flächig abgetragen. Dies kann durch aufgearbeitete Pollen aus den kreidezeitlichen Formationen präzise nachvollzogen werden (MERRIAM & BANDY 1965; FLEMING 1994), d.h. Pollengemeinschaften aus dem südlichen Utah, südwestlichen Colorado und dem westlichen New Mexico (Stern-Symbole in Abb. 2) wurden mit der Erosion der kreidezeitlichen Sedimentschichten freigesetzt und finden sich erstmals in 4,5 Ma alten Colorado River-Sedimenten wieder. Bereits vor 3,9 Ma, d.h. nur 600.000 Jahre später brachten die Zuflüsse charakteristische *Triprojectates*-Pollen aus dem zentralen Teil und dem mittleren Osten des Bundesstaates Utah mit (Abb. 2). Die ausgewerteten Daten zeigen für den Süden Utahs, daß zusammen mit der Flußentwicklung des Colorado Rivers und der Erosion des Grand Canyons eine rund 2.000 m mächtige mesozoische Schichtenfolge flächig abgetragen wurde. Die Autoren schließen im Zusammenhang mit ihren paläoklimatisch orientierten Arbeiten auf eine signifikant größere Erosions-, Transport- und Sedimentationsrate durch sehr hohe Niederschläge im Pliozän. Diese Erosion fand erstaunlicherweise unter Beibehaltung der Form der Grand Staircase statt, d.h. die 2.000 m Schichtsäule wurden auf mehrere Hundert Kilometer Länge und mehrere Hundert Kilometer Breite in maximal 600.000 Jahren exakt bis zu einem bestimmten stratigraphischen Niveau flächig abgeräumt (vgl. *stratifforme* Erosion der Plateaus, Teil 1, S. 5).

Glossar

Antezedentes Tal bezeichnet ein Tal, das vor der Hebung eines Gebirges angelegt wurde und bei der Landhebung seine Position beibehalten konnte

Flexur oder Monoklinale: Eine tektonisch verursachte, s-förmige Verbindung/Biegung zwischen zwei horizontal gelagerten Schichten oder Sedimentstapeln mit unterschiedlichen Höhenlagen (Karte und Profil der Abb. 4).

Kaibab Upwarp: Verfolgt man auf dem Colorado Plateau die Höhenlage der Kaibab Kalke (Abb. 4, Abb. 3 und Abb. 11), sie bilden die Geländeoberkante, in die der Grand Canyon eingeschnitten wurde, so steigt das Gelände vom Glen Canyon Dam am Lake Powell von 1.500 m ü. NN nach Südwesten zum Grand View Point auf 2.220 m (der Grand View Point liegt am Canyon Rand in der Mitte zwischen Grand Canyon Village und Desert View Point). Der North Rim des Canyons, d.h. die Südkante des Kaibab Plateaus, liegt über 2.400 m ü. NN hoch.

Die Kaibab Upwarp ist eine Flexur, sie wird sedimentologisch und anhand der gefalteten Formationen in die Laramische Gebirgsbildung gestellt (50 bis 70 Ma; BABENROTH & STRAHLER 1945; BOWERS 1972, LUCCHITTA 1990).

rim gravels: „Rim“ bezieht sich auf den westlichen und südwestlichen Rand des Colorado Plateaus zu den Mogollon Highlands, dem „Mogollon Rim“ (Abb. 2) und „gravels“ sind Kiese. Die Mogollon Highlands wurden im (Maastricht?) Paleozän und Eozän während der *Laramischen Hebung* gegenüber dem Gebiet des heutigen Colorado Plateaus als Gebirge gehoben (ELSTON et al. 1989; Abb. 5). Mit den steigenden Mogollon Highlands im Südwesten muß die Schichtfolge des Colorado Plateaus nach Nordosten gekippt sein, denn die Schüttungsrichtungen in den rim gravels zeigen von Südwesten nach Nordosten (FINELL 1962; McKEE & McKEE 1972; PEIRCE 1984; PEIRCE ET AL. 1979; PEIRCE & NATIONS 1986).

Weitere Erläuterungen s. Teil 1.

Nichtsdestotrotz blieb während dieser Zeit die paleo-eozäne Oberfläche der südlichen Teilplateaus des Colorado Plateaus unverändert. Geht man von der aktualistischen Sichtweise langsamer, allmählicher Erosion aus, dann müßte es eigentlich begrenzte, flutartige Regenfälle über den nördlichen Teilplateaus gegeben haben. Eine solche Sicht ist abwegig und wird natürlich nicht vertreten. Die extrem unterschiedlichen Erosionsverhältnisse im Norden und Süden sind demnach unverständlich. Man sollte stattdessen an eine extrem schnelle, schichtweise Erosion im Rahmen einer großflächigen Überschwemmung anstatt von Regenfällen denken, doch auch ein solches Szenario wird in keiner Publikation diskutiert.

Ungeklärter Verbleib des erodierten Materials

Sedimentologische Studien der Bouse Formation, dem frühen Delta des Colorado Rivers in den Golf von Kalifornien (Abb. 2) sowie der Imperial Formation im Salton Becken, einem sedimentgefüllten Becken ca. 50-100 km westlich der Bouse Formation an der Staatsgrenze Kalifornien-Mexiko, ermittelten ausschließlich präpliozäne Kiese lokaler Herkunft und schließen damit einen präpliozänen Colorado River in dieser Region völlig aus (WINKER 1987).

Darüber folgen im Salton Becken 900 m mäch-

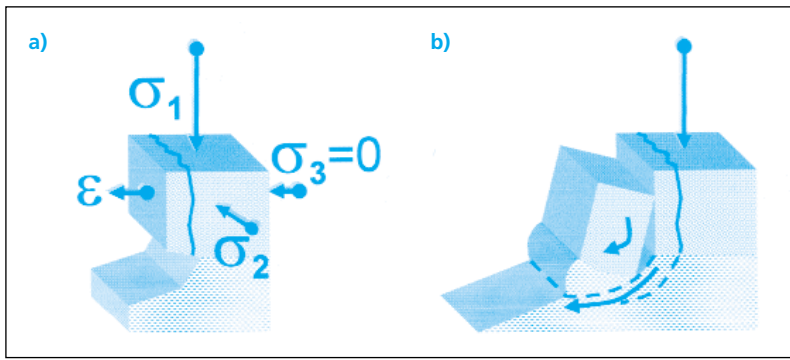


Abb. 9: Schematische Darstellungen der (a) typischen, natürlichen Spannungsverhältnisse in Gesteinen und (b) einer Rotationsrutschung (zylindrische Gleitfläche).

a) Die Spannungen sind mit Sigma (σ) angegeben, wobei σ nahe der Steilwand gegen Null geht. Das Ausweichen infinitesimaler Bereiche in der Steilwand, d.h. die Dehnung, bezeichnet ϵ . Übersteigt die Spannung die Festigkeit des Gesteins, geht die Dehnung gegen Unendlich und der Bruchzustand ist eingetreten. Laut Faustregel beträgt die Zugfestigkeit eines Gesteins nur 10% seiner Druckfestigkeit, d.h. der Bruchzustand kann auch an der Wandfläche sehr harter Gesteine leicht erreicht werden. Sind im Gesteinsverband zusätzliche, natürliche Trennflächen vorhanden, z.B. Klüfflflächen nach tektonischen Bewegungen, wird dieser „10%-Wert“ nochmals unterschritten.

b) Rotationsrutschung: Im Grand Canyon drücken die spröden Kalk- oder Sandsteinsfolgen in die darunterliegenden duktilen Tonschluffsteine und zerbrechen zu riesigen Blöcken. Durch die Pressung reißen die unterlagernden, duktilen Folgen entlang halbschalenförmiger Flächen durch, der auflastende Block rutscht (rotiert) auf der rundlichen Bewegungsfläche mit einer Drehbewegung weg.

tige Sedimente aus dem Einzugsbereich des Colorado Plateaus. An ihrer Basis liegen Sande und Tone mit einer turbiditähnlichen, rhythmischen Wechselfolge, die auf eine sehr schnelle Sedimentschüttung hinweisen (WINKER 1987). Turbidite im engeren Sinne sind große untermeerische Ströme aus Schlamm und großen Komponenten, die durch Beben oder Rutschungen aufgrund zunehmender Sedimentmassen von den Kontinentalrändern abgleiten und charakteristische Korn- und Schichtgefüge hinterlassen. D.h., die ersten erosiven Prozesse auf dem Colorado Plateau zur Eintiefung des Grand Canyons sind sehr schnell abgelaufen, wodurch turbiditähnliche Gefüge in seinen ersten Ablagerungen erzeugt wurden.

Merkwürdigerweise ist aber nur ein Teil der erodierten Gesteinsmassen in den umliegenden Becken und dem Delta in den Golf von Kalifornien wiederzufinden. Die von den nördlichen Plateaus abgetragenen und aus den südlichen Plateaus herausgeschnittenen Volumina von vielen Tausend Kubikkilometern Gestein können mengenmäßig nicht lokalisiert werden (van ANDEL & SCHOR 1964; LONSDALE 1989).

Die Verknüpfung der Beobachtungen, d.h. der erodierten und transportierten Gesteinsvolumina in dem kurzen Zeitraum von weniger als 2 Ma Jahren, führt unweigerlich zum Postulat einer katastrophenartigen Bildung des Colorado River-Entwässerungssystems, des Grand Canyons und des Colorado River Delta. Die Turbidite des Salton Beckens sind dafür zusätzliche, direkte Beweise. Die fehlenden erodierten Gesteinsmassen sind indirekte Zeugen dieser Prozesse.

Außergewöhnliche Position des sehr jungen Colorado Rivers in einer vielfach älteren Umgebung

Bei der Betrachtung des Colorado Rivers auf dem Colorado Plateau aus der Vogelperspektive fällt sein ungewöhnlicher Verlauf auf. Der Verlauf und seine Existenz an sich sind ungewöhnlich, wie folgende Punkte zeigen:

- Die geologische Karte zeigt (s. Literaturverzeichnis und Abb. 4), daß der Grand Canyon westlich der *Kaibab Upwarp* (kursiv geschriebene Begriffe sind im Glossar erläutert), also im Grand Canyon, alle tektonischen Vorzeichnungen durchschneidet. Obwohl in diesen tektonischen Schwächezonen Täler angelegt waren, wurden sie bei der vor rund 6 Ma beginnenden Tiefenerosion des Colorado Rivers nicht benutzt, was eigentlich bei allmählicher Erosion zu erwarten gewesen wäre. Beispiele sind der Little Colorado River, der Cataract Creek und der Kanab Creek (Abb. 3). Der Colorado River „überfuhr“ sie alle und schnitt den Grand Canyon beinahe senkrecht dazu (Abb. 4 und 12).

- Das Colorado Plateau war zum Zeitpunkt der Etablierung des Colorado Rivers längst ein Hochgebiet und steht ihm bis heute mit seinem Gefälle entgegen (Profil in Abb. 4).

- Außerdem bildet die Kaibab Upwarp einen steilen Anstieg im Plateau (Abb. 4 und Abb. 8). Die Kaibab Upwarp ist eine *Flexur*, sie wurde während der *Laramischen Hebung* gefaltet und mit der Formung der Grand Staircase freigelegt.

- Zusätzlich liegen mittelmiozäne Basaltdecken als Gebirge auf dem Shivwits und Hualapai Plateau, sie wurden ebenfalls vom Colorado River durchtrennt.

Die zentrale Frage ist deshalb, warum und wie das Colorado Plateau überhaupt überwunden und durchschnitten werden konnte. Hier wäre unter aktualistischen Voraussetzungen ein Umfließen der Gebirgszüge zu erwarten gewesen.

Erklärungsversuche für die Position des Colorado Rivers und des Grand Canyons

Alle diese Hindernisse hätten eine Entwässerung östlich des Plateaus in eine völlig andere Richtung bewirken müssen, z.B. nach Südosten zum Golf von Mexiko. Abb. 5 zeigt, wie extrem kurz die Canyon-Erosion im Verhältnis zur langen Existenz der alten Oberfläche zeitlich dauerte.

McKEE et al. (1967) erklären die heute vorliegende Sachlage mit einer rückschreitenden Erosion nach Nordosten: Das Modell der „rückschreitenden Erosion“ beinhaltet, daß das Einzugsgebiet eines Flusses immer weiter in das Hinterland verschoben wird, speziell wenn im Flußverlauf große

Höhenunterschiede auftreten oder diese durch tektonische Bewegungen zunehmen. Im Fall des Colorado Rivers hängt McKEE seinen Ansatz in die Öffnung des Golf von Kalifornien ein: Die Kaibab Upwarp wurde im Westen angenagt, durchtrennt und der Zugriff auf östlich der Kaibab Upwarp vorhandene Flußsysteme ermöglicht (Östlich der Kaibab Upwarp bestand – wahrscheinlich bis zum Beginn der Grand Canyon-Erosion [McKee et al. 1967] – eine Entwässerung über den Little Colorado River, den Marble Canyon und den Oberen Colorado River nach Norden; s. Abb. 3 und 1.). Die Entwicklung wurde durch die hohe Reliefenergie (großer Höhenunterschied auf eine kurze Strecke) nach der Hebung des westlichen Plateaurandes um 900 m begünstigt. Bei McKEE wird so der kurze Zeitrahmen (Abb. 5) und das sehr dynamische Szenario wiedergegeben, in dem die ungewöhnlich schnelle Erosion stattgefunden hat.

LUCCHITTA (1990) postuliert dagegen eine sukzessive Überwindung des Hindernisses der Kaibab Upwarp mit einem quasi-*antezedenten* Flußmodell. Er zeigt eine Profilskizze (LUCCHITTA 1990, 318), in der die heute nicht mehr vorhandenen, d.h. die bis heute erodierten Schichteinheiten westlich und östlich der Kaibab Upwarp an ihre Flanken zurückverlegt sind. Der Colorado River wird so von LUCCHITTA zuerst über eine Rampe an das Hindernis der Kaibab Upwarp herangeführt. Bei einer anschließenden Tiefenerosion soll die Kaibab Upwarp durch selektive Erosion der Schichten auf beiden Flanken bis zu den Kaibab Kalken freigelegt sowie an der einzigen, heute vorhandenen Stelle im Grand Canyon durchtrennt worden sein.

In beiden Modellen bleibt unerklärt, warum die Oberfläche der Kaibab Kalke (Abb. 4) seit dem frühen Alttertiär dieselbe anstehende Landoberfläche blieb, während die erodierten Gesteinsmassen der nördlichen Plateaus (es wurden dort 2.000 m Schichtsäule abgetragen) durch dieses einzige Nadelöhr transportiert wurden und sich der Colorado River linear durch alle geologischen Hindernisse innerhalb von 2 Ma bis zu 1.700 m tief einschchnitt. Auch das Netz der kurzen, steilen und unreifen Seitentäler, die den grandiosen Grand Canyon so einzigartig machen, verschonten die *Laramische Fläche* an ihren Flanken. Selbst im Südwesten, wo die Erosion speziell entlang dem Hualapai Plateau durch starke tektonische Bewegungen zusätzlich verstärkt wurde, liegen immer noch die *rim gravels* – die ältesten auf dem Colorado Plateau – ungestört auf dem Schluchtrand.

Der eklatante Unterschied zwischen den beiden Landschaften, zwischen der alten *Laramischen Landoberfläche* der Grand Staircase und dem jungen Grand Canyon, wird am Shivwits Plateau (Abb. 3) unter den ausgedehnten, 6,0-7,5 Ma (K/Ar-Alter: LUCCHITTA & McKEE 1975) alten Basaltdecken deutlich. Die Vulkanite liegen auf Schichten des obersten Paläozoikums (Kaibab Kalke) sowie des unter-



sten Mesozoikums. Das Plateau und die Basalte ragen 30 km nach Süden vor und werden an drei Seiten vom Grand Canyon angeschnitten. Der Canyon öffnet sich bei einer Tiefe von rund 1,5 km nur um wenige Kilometer und zeigt hier eine besonders schroffe und steile Morphologie. Das vom Canyon angeschnittene *Laramische Relief* weltet sich unter der Basaltdecke dagegen nur in wenigen Höhenmetern, obwohl es um Größen älter ist.

„This surface, and the rocks deposited on it, have been little modified by the Pliocene incision of the Colorado River that produced the mile-deep Grand Canyon despite the fact they are ten times older than the canyon“ (HUNTOON 1990, 261).

Abb. 10: Blick in ein „kopflöses“ Tal, das eine canyonartige Erweiterung einer Alkove ist und dessen Flanken wieder von Alkoven gezeichnet sind. Kopflös bedeutet, daß kein Bezug zu einem fließenden Gewässer oberhalb besteht.

Lokalität: Blick vom Grand View Trail entlang der Südseite der Horseshoe Mesa in das Tal des Hance Creek.

Beschleunigung der Canyonbildung durch Massenbewegungen

Die bisher vorgestellten Indizien und Modelle fokussieren die Tektonik als Triebfeder der Flußentwicklung. Die großregionale Tektonik des Colorado Plateaus wirkte durch die mechanischen Spannungen aber auch direkt auf jede einzelne Schicht.

Nur drei Täler, nämlich der Little Colorado River, der Cataract Creek und der Kanab Creek sind alte, reife Täler aus dem Miozän (LUCCHITTA 1990, 327; Abb. 3). Alle anderen Täler, die in ihrer Summe den Grand Canyon ausmachen sind im morphologischen Vergleich kurz, „steil und unreif“ (LUCCHITTA 1990, 323), d.h. die Folge einer schnellen Talbildung in weniger als 2 Ma Jahren im Gefolge des Grand Canyons. Im folgenden Abschnitt werden die kleinräumig aktivierten Prozesse zur Formung des Grand Canyons betrachtet.

Mechanismus und Beispiele für Massenbewegungen

Gesteinsmassen geraten in Bewegungen, wenn sich ihr Verband auflockert oder der stützende



Abb. 11: Die Kaibab Upwarp vom Aussichtspunkt Desert View Point gesehen (Abb. 3).

Untergrund nachgibt, und sie der Schwerkraft folgend rutschen, fließen, kollabieren, abstürzen, ein Gefälle herunterrollen etc. Die wichtigste Ursache im Grand Canyon sind Zugspannungen in den steilen Canyonwänden, besonders in den mächtigen, spröden Kalken und Sandsteinen tief unten im Canyon. Aus der eigenen Last der Schichten resultiert ein allseitig wirkender Druck, der sog. lithostatische Druck. Er kann an den Wänden der Klippen in horizontaler Richtung als Zugspannungen „entweichen“, so daß an der Wand schalenförmige Abplatzungen auftreten (Abb. 9). Deutlichster Indikator der horizontalen Spannungen sind die Talantiklinalen im Bett des Colorado Rivers (HEREFORD & HUNTOON 1990). Eine Talantiklinale ist eine Aufwölbung von Schichten im Boden eines Tals, wobei die Ursache vertikale Drücke sind, die im Bereich des Talbodens in die Horizontale umlenken, dadurch die Schichten zusammenschieben und aufwölben.

Abb. 12: Blick vom Startpunkt des Bright Angel Trail an der Ortschaft Grand Canyon Village (Abb. 3) parallel zur Störung der Bright Angel Fault. In der Bildmitte wird die Schwächezone entlang der alten laramischen Störung quer vom jüngeren Colorado River bzw. dem Grand Canyon zerschnitten.

Die Zugspannungen werden als die Triebfeder für die gewaltigen Alkoven gesehen (CARSON & KIRKBY 1972). Alkoven sind kurze, schalenförmig gewölbte Wände oder kurze Canyons mit gewölbten, oft überhängenden Wänden speziell an ihren



Enden (Abb. 10). Erweitert sich ein solcher Canyon, dann bildet er Amphitheater-förmige Talenden. Augenfällig werden diese besonders auf den wenigen Grand Canyon-Trails hinab zum Colorado River, die immer wieder unten am Fuß bzw. oben am Sims steiler und senkrechter Wände enden, in der Arena eines Amphitheaters aus harten Kalken oder Sandsteinen. Diesen Kaskaden fehlt der Bezug zu einem fließenden Gewässer darüber, d.h. zu einer Erosion durch Wasser, weil sie eben einen felsmechanischen Bildungsmechanismus haben.

Massenbewegungen im Zusammenspiel mit Wasser

Im Canyon wechseln sich kontinuierlich die steilwandbildenden, spröde brechenden Sandsteine und Kalke mit duktilen *Tonschluffsteinen* ab. An der Basis der spröden Gesteine verteilen sich die vertikalen Drücke in die unterlagernden duktilen Gesteine, daraus resultieren wiederum horizontale Spannungen. Werden die *Tonschluffsteine* auch noch erodiert und die spröden Klippen von Wasser unterschritten, erhöhen sich die Zugspannungen umso schneller. Dort können ganze Teile der Talflanken absitzen und blockförmig zerbrechen oder durch Rotationsrutschungen (Abb. 10) zusammen mit den horizontal induzierten Schubkräften in den freien Canyon ausweichen.

Massenbewegungen sind nicht zeitabhängig

Alle Mechanismen der Massenbewegungen sind heute zu beobachten und könnten, begleitet durch den schnellen Abtransport des aufgelockerten Gesteins durch Wasser, auch für die Vergangenheit die vorhandenen Talformen am besten erklären. Sie sind primär die Folge geologischer Prozesse und deren Heftigkeit, die Zeit spielt dabei keine Rolle.¹

HEREFORD & HUNTOON (1990, 444) relativieren Wind und Wasser, d.h. *Denudation* im weiteren oder *Deflation* im engeren Sinne, als die formgebenden erosiven Kräfte mit dem Satz, sie könnten allein keinen signifikanten Beitrag zur Erosion leisten, sofern sie nicht von einzelnen Überschwemmungen begleitet werden. Rezente Murengänge sind zwar vereinzelt, aber vorwiegend in den höhergelegenen Seitentälern zu beobachten, in denen der Regen und die Schneeschmelze von der Plateaufläche ankommen. In das Wüstenklima des Canyon tiefsten dringt nur selten ein Regentropfen vor und die Spuren von Muren sind sehr bescheiden. Außerdem produzieren diese Prozesse keine steilen Canyonwände.

Und trotzdem bleibt es unklar, wie die Prozesse ineinandergreifen und dominiert haben, um diesen gewaltigen Canyon zu formen:

- Wasser und Wind allein sind nicht effektiv genug, besonders nicht angesichts des engen Zeitrahmens.

- Wenn die felsmechanischen Eigenheiten der Schichtfolge des Colorado Plateaus die schnelle Talbildung der Grand Canyon begünstigt haben, muß zuerst ein Tal geschnitten werden, damit die Mechanik ansetzen kann. Die Sedimente im Salton Becken weisen hohe Sedimentationsraten und diese benötigte Talbildung aus, d.h. eine initiale, schnelle Erosion auf dem Plateau.

- Danach hat die weitere Zerkleinerung und der Transport der aufgelockerten Gesteinsmassen aus dem Canyon durch Wasser stattgefunden, d.h. durch den Colorado River und seine Zuflüsse. In der Vergangenheit sind sehr viel höhere Niederschläge im Plio-Pleistozän (s. oben) nachgewiesen.

- Auffallend ist das Fehlen der Reste der Massenbewegungen, d.h. der Schutt auf den Hängen und die herabgestürzten Blöcke unter den Klippen. Ebenso fehlen die erodierten 4.000 km³ Gesteinsmassen aus dem Grand Canyon plus viele Tausend-Kubikkilometer von den Plateaus, die in den umliegenden Becken oder in den alten und heutigen Deltas im Golf von Kalifornien nur zum Teil zu finden sind.

Bewertung, Diskussion und Ausblick

Die Qualität der gemachten Aussagen stützt sich auf eine Sammlung von Monographien und eine Reihe von Artikeln. Danach kann die Entstehung des Colorado Plateaus und die Flußgeschichte des Colorado Rivers trotz intensiver Forschung nur lückenhaft dargestellt werden. Die Theorien über Ursprung, Entwicklung und Talbildung des vielleicht größten Canyons der Erde zeichnen kein schlüssiges Bild, weil Modelle im Sinne des Aktualismus und langwierige Prozesse vorausgesetzt werden.

Dagegen führt die Diskussion über die geologischen Spuren hin zu einer schnellen bzw. katastrophenartigen Bildung des Colorado Plateaus und des Grand Canyons. Trotzdem fehlt in der Literatur ein Schritt – ein sehr mutiger – hin zu einem Modell, das auf zeitlich relativen Prozessen mit extremen Niederschlägen bzw. Wasserfluten, schneller Tektonik und daraus resultierender katastrophaler Erosion basiert. Schließlich sprechen Indizien dafür und lassen sich entsprechend verknüpfen, besser als die bisher publizierten, lückenhaften Flußgeschichten.

Einen solchen Ansatz wählt z.B. AUSTIN (1994), der den Durchbruch der Kaibab Upwarp von Ost nach West mit dem Bruch eines Damms erklärt, nachdem östlich der Kaibab Upwarp große Seen zur Zeit der Canyonbildung nachgewiesen wurden (vgl. Anmerkung 1). Der Colorado River entwässert nach diesem Modell ein Gebiet, das die Reliktlandschaft katastrophaler Prozesse ist.

Eine bemerkenswerte Sammlung geologischer Karten und Profile mit zahlreichen Geländeaufnahmen zum Colorado Plateau und dem Grand Canyon ist unter der folgenden Adresse im Internet zu finden:

http://www.kaibab.org/gc/geology/gc_geol.htm

Das Modell zur Flußgeschichte des Colorado Rivers und der Erosion des Grand Canyon nach McKee et al. (1967) wird unter folgender Adresse anhand zahlreicher Grafiken erklärt:

<http://www.kaibab.org/gc/geology/canform.htm>

Die Beurteilung „lückenhafte Flußgeschichte“ – wobei auch die Geschichte des Colorado Plateaus einbezogen wird – relativiert Ivo Lucchitta, einer der besten Kenner der geologischen Geschichte des Colorado Rivers: „How much departure from the present configuration is one willing to tolerate and still speak of the Colorado? (LUCCHITTA 1990, 312)“. Trotzdem darf dies nicht über entscheidende Fragen hinwegsehen lassen: Auch wenn sich Flüsse verändern, entwickeln oder verbinden, hinterlassen sie entsprechende Spuren. Diese fehlen aber im Umfeld des Colorado Plateaus vor dem Pliozän (Teil 1) und die Ereignisse im Pliozän wurden hier als eine geologische Katastrophe gedeutet.

Die Theorien über die Geschichte des Grand Canyons zeichnen kein schlüssiges Bild, weil Modelle im Sinne des Aktualismus und langwierige Prozesse vorausgesetzt werden.

Im Ausblick auf bereits „anerkannte“ katastrophale geologische Ereignisse sei zuerst auf die laufende Diskussion der Flutung des Schwarzen Meeres verwiesen, die innerhalb wissenschaftlicher Medien (sowie außerhalb, z.B. in Der Spiegel, Dezember 2000 Heft 1) überrascht aufgenommen und weit verbreitet wurde.

Für die USA ist unbedingt die pleistozäne Lake Missoula Flood zu nennen. Nach dem Bruch einer Gletscherbarriere vor dem Lake Missoula wurde ein Gebiet von 42.000 km² durch 1.600 km³ Wasser verwüstet, wobei bis 150 m tiefe Canyons in das anstehende Festgestein geschnitten wurden.

Die Untersuchung einer möglichen Verknüpfung der Existenz großer Seen östlich der Kaibab Upwarp mit der Bildung des Grand Canyons wäre an dieser Stelle bald zu erwarten.

Anmerkung

¹ Kürzlich wurde publiziert (Richard Young von der State University of New York in Genesco auf einer Tagung in

Flagstaff, zitiert von H. RADEMACHER in der Frankfurter Allgemeinen Zeitung vom 8. 11. 2000), daß im Gebiet des Grand Canyons unerwartet hohe Abtragungsraten von 17 bis 42 cm pro Jahrtausend ermittelt wurden, bedingt durch die hohe Reliefenergie (d.h. die Tendenz zur Erosion bedingt durch das Verhältnis aus Gefälle pro Strecke). Hierzu wurden vulkanische Aschelagen in den großen Seengebieten östlich der Kaibab Upwarp untersucht. Allerdings bezieht sich die Arbeit auf die „oberflächennahen“ Gewässer, nicht den schon tief eingeschnittenen Colorado River, und die Gesamterosionsleistung wird auf 6 Millionen Jahre berechnet – anstatt der tatsächlichen 2 Millionen Jahre.

Literatur

- AUSTIN SA (1994) Grand Canyon – Monument to catastrophe. Santee, California: Institute for Creation Research, pp. 1-110.
- ANDERSON RE, LONGWELL CR, ARMSTRONG RL & MARVIN RF (1972) Significance of K-Ar ages of Tertiary rocks from the Lake Mead region, Nevada-Arizona. *Geological Society of America Bulletin* 83, 273-288.
- BABENROTH DL & STRAHLER AN (1945) Geomorphology and structure of the East Kaibab Monocline, Arizona and Utah. *Geological Society of America Bulletin* 56, 107-150.
- BEUS SS & MORALES M (1990) Grand Canyon Geology. New York, Oxford: Oxford University Press.
- BOWERS WE (1972) The Canaan Peak, Pine Hollow, and Wastach Formations in the Table Cliff Region, Garfield County, Utah. *U.S. Geological Survey Bulletin* 1331B, 707-730.
- CARSON M & KIRKBY M (1972) Hillslope form and process. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 448-449.
- DAMON PE, SHAFIQUILLAH M & SCARBOROUGH RB (1978) Revised chronology for critical stages in the evolution of the Lower Colorado River [abs.]. *Geological Society of America Abstracts with Programs* 10, 101.
- FLEMING RF (1994) Cretaceous pollen in Pliocene rocks: Implications for climate in the southwestern United States. *Geology*, Vol. 22, pp. 787-790.
- HEREFORD R (1984) Driftwood in Stanton's Cave: The case for temporary damming of the Colorado River at Nankoweap Creek in Marble Canyon, Grand Canyon National Park, Arizona. In: EULER RC (ed) *The archaeology, geology, and paleobiology of Stanton's Cave*. Grand Canyon National History Association, Monograph 6, pp. 99-106.
- HEREFORD R & HUNTOON PW (1990) Rock movement and mass wastage in the Grand Canyon. In: BEUS SS & MORALES M (eds) *Grand Canyon Geology*. New York, Oxford: Oxford University Press, pp. 443-459.
- HUNTOON PW (1990) Phanerozoic structural geology of the Grand Canyon. In: BEUS SS & MORALES M (eds) *Grand Canyon Geology*. New York, Oxford: Oxford University Press, pp. 261-309.
- LONSDALE P (1989) Geology and tectonic history of the Gulf of California. In: WINTERER EL, HUSSONG DM & DECKER RW (eds) *The Eastern Pacific Ocean and Hawaii*. Geological Society of America, Boulder, Colorado, *The Geology of North America*, Vol. N, pp. 499-521.
- LUCCHITTA I (1990) History of the Grand Canyon and of the Colorado River in Arizona. In: BEUS SS & MORALES M (eds) *Grand Canyon Geology*. New York, Oxford: Oxford University Press, pp. 311-332.
- LUCCHITTA I & MCKEE EH (1975) New chronological constraints in the history of the Colorado River and the Grand Canyon [abs.]. *Geological Society of America. Abstracts with Programs*, Vol. 9, pp. 746-747.
- MCKEE ED, WILSON RF, BREED WJ & BREED CS (1967) Evolution of the Colorado River in Arizona. *Museum of Northern Arizona Bulletin* 44, 67 pp.
- MCKEE ED & MCKEE EH (1972) Pliocene uplift of the Grand Canyon Region: Time of drainage adjustment. *Geological Survey of America Bulletin* 83, 1923-1932.
- MERRIAM R & BANDY OL (1965) Source of Upper Cenozoic sediments in Colorado Delta region. *Journal of Sedimentary Petrology* 35, 911-916.
- MORALES M (1990) Mesozoic and Cenozoic strata of the Colorado Plateau near the Grand Canyon. In: BEUS SS & MORALES M (eds) *Grand Canyon Geology*. New York, Oxford: Oxford University Press, pp. 247-260.
- SHAFIQUILLAH M, DAMON PE, LYNCH DJ, REYNOLDS SJ, REHRIG WA & RAYMOND RH (1980) K-Ar geochronology and geologic history of Southwestern Arizona and adjacent areas. *Arizona Geological Society Digest* 12, 201-260.
- VAN ANDEL TH & SHOR GG (1964) Marine geology of the Gulf of California. *American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, Memoir* 3, 350 pp.
- WINKER CD (1987) Neogene stratigraphy of the Fish Creek-Vallecito Section, Southern California: Implications for early history of the Northern Gulf of California and Colorado Delta. Unpublished Ph.D. dissertation, University of Arizona, Tucson, 494 pp.
- YOUNG RA (1966) Cenozoic geology along the edge of the Colorado Plateau in Northwestern Arizona. Ph.D. dissertation, Washington University, Washington, 167 pp.
- YOUNG RA (1970) Geomorphological Implications of Pre-Colorado and Colorado tributary drainage in the Western Grand Canyon Region. *Plateau*, Vol. 42, pp. 107-117.
- YOUNG RA & BRENNAN WJ (1974) Peach Springs Tuff, its bearing on structural evolution of the Colorado Plateau and development of Cenozoic drainage in Mohave County, Arizona. *Geological Society of America Bulletin* 85, 83-90.

Karte

Grand Canyon Natural History Association, Museum of Northern Arizona (1986) *Geologic map of the eastern part of the Grand Canyon National Park, Arizona*. Washington D.C.: Williams & Heintz Map Corporation.