

Langzeitproblem: Entstehung eines Salzbergs im Iran

Aufstieg des Kuh-e-Namak trotz ausgedehnter Regenperioden?

Manfred Stephan, Lerchenweg 26, 71394 Kernen i.R.

Zusammenfassung: Der Salzberg Kuh-e-Namak (Zentraliran) wurde im Quartär trotz ausgedehnter Regenzeiten (Pluviale) um mehr als 300 Meter herausgehoben (BUSCHE et al. 2002). Es wird gezeigt und diskutiert, dass diese Hypothese der Salzberg-Entstehung mit den langfristig verstandenen, auch im Iran ausgeprägten Pluvialzeiten schwerlich vereinbar ist. Daher ist der Schluss plausibler, dass in diesem Fall der Salzberg längst komplett weggelöst worden wäre. Die Befunde am Kuh-e-Namak lassen sich einleuchtender mit der Annahme erheblich kürzerer quartärer Regenzeiten erklären (wahrscheinlich mehrere Zehnerpotenzen geringer). Zum besseren Verständnis dieser Vorgänge wird einleitend das geologische Umfeld des Salzbergs, die großräumige Flächenbildung im Zentraliran und die tertiäre chemische Gesteinszersetzung skizziert.

Einführung: Zum geologischen Umfeld des Kuh-e-Namak

Salzlager von mehreren Hundert Metern Mächtigkeit (Dicke), die von kilometermächtigen Sedimenten bedeckt werden, sind instabil und neigen dazu, unter der Auflast plastisch zu „fließen“, zumal Salz mit einem spezifischen Gewicht um 2,1 leichter als das überlagernde Gestein ist. Sie können als pilzförmige Salzstöcke bzw. Salzdiapire (griech. von *diapirein*, durchstoßen) oder auch als langge-

streckte Salzmauern entlang tektonischer Störzonen nach oben das Deckgebirge durchdringen. Steigen Salzdiapire so weit auf, dass sie mit grundwasserführenden (Locker-)Sedimenten wie Sanden oder Kiesen in Kontakt kommen, werden die Salze gelöst und können als Sole abtransportiert werden (z.B. TALBOT & JACKSON 1987, 76-81). Dieser Lösungshorizont wird als Salzspiegel bezeichnet; man spricht auch von der Salzlösungsfront. Ausgedehnte Schichtfolgen im Untergrund Norddeutschlands und der südlichen Nordsee sind mit aufgedrungenen Salzstrukturen durchsetzt (z.B. ROTHE 2005, 175-179; vgl. Abb. 1).

Im Iran gibt es in drei Regionen insgesamt einige Hundert Salzdiapire.¹ Im abflusslosen Becken der Großen Kevir-Ebene stoßen etwa 50 pilzförmige Salzdiapire bis zur Oberfläche durch. In der westlichen Fortsetzung des Beckens, das heute nur durch eine kaum merkliche Wasserscheide von diesem getrennt ist (BUSCHE et al. 2002, 72), liegt u.a. das kleinere Becken von Qom (bzw. Ghom oder Qum). Der bedeutendste Salzdiapir ist hier der Kuh-e-Namak (= Salzberg). Er liegt 20 km nordwestlich der Stadt Qom und etwa 110 km südwestlich von Teheran (Abb. 2).²

Im Großen Kevir-Ablagerungsbecken wurden seit dem Eozän (Alttertiär) 6-7 km Sediment abgesetzt. Die Salzlager entstammen zwei Ablagerungs-episoden. Das reine, ältere Salz gehört zur ober-eozänen *Lower Red Formation (LRF)*, die aus Salz-/Tonstein-Schichtfolgen aufgebaut ist; darüber liegt der oligozäne Qom-Kalk. Das darauffolgende jüngere Salz ist mit Ton-, Silt-, Sand- und Gipslagen gebändert und bildet die Basis der ins Untermiozän eingeordneten *Upper Red Formation (URF)*, die noch weiter untergliedert wird (M1-3) (Abb. 3 und Tab. 1). Beim Aufstieg wurden die Salzdiapire durch seitlichen Druck leicht verdreht. Das geschah vermutlich im Obermiozän (vgl. Tab. 1) und wird als komplex abgelaufene Fernwirkung der plattentektonisch bedingten Kollision Indiens mit Südasien verstanden (BUSCHE et al. 2002, 69-70). Das ältere Salz bildet die Kerne der Diapire (Abb. 4). Diese Ereignisse endeten im Zentraliran mit der flächenhaften Abtragung (Kappung) einer mindestens 1000 m mächtigen Schichtenfolge, die zuvor durch tektonische Bewegungen und den Salzaufstieg stark deformiert worden war. Die flächenhafte Kappung legte also die entstehende Kevir-Fläche erheblich tiefer (Abb. 3).

Tab. 1: Vereinfachte Darstellung der jüngeren erdgeschichtlichen Systeme und Untergliederungen (Tertiär ab Obereozän und Quartär) sowie einige geologische Formationen und Ereignisse im Zentraliran (Weiteres im Text). Der angenommene mehr- bis vielfache Wechsel von Pluvial- und Interpluvialzeiten in den Tropen und Subtropen sowie von Kalt- und Warmzeiten in den hohen geographischen Breiten ist nicht dargestellt.

Quartär	Holozän („Nacheiszeit“; Jetztzeit)		
	Pleistozän („Eiszeit“)	Jungpleistozän (Spätquartär)	Wechsel von Pluvialen (Feuchzeiten) und Interpluvialen (Trockenzeiten)
		Altpleistozän (Früh- bzw. Altquartär)	
Grenze Tertiär/Quartär			Bachtari-Konglomerat
Tertiär	Pliozän	Endtertiäre Bildung der Kevir-Rumpffläche	
	Miozän	Obermiozän	Diapir-Aufstieg
		Untermiozän	Upper Red Formation (URF); an ihrer Basis junges Salz
	Oligozän		Qom-Kalk
		Obereozän	Lower Red Formation (LRF); mit altem Salz

Jungtertiäre Kevir-Rumpffläche und Gesteinszersetzung

Nachfolgend werden die Bedingungen skizziert, die zur Entstehung des Salzbergs Kuh-e-Namak führten. Dabei wird gezeigt, dass seine Heraushebung auf das Quartär beschränkt war. Das wiederum führt zu zeitlichen Problemen seiner Entstehung bzw. Erhaltung (s. nächsten Abschnitt).

Voraussetzung für die Entstehung des Kuh-e-Namak ist die Bildung der Großen Kevir-Fläche im Jungtertiär (Abb. 3; vgl. Tab. 1). Diese Ebene gehört in den weltweiten Rahmen der Entstehung ausgedehnter Flächen (*Rumpfflächen*) auf dem Festland infolge großräumiger Abtragungs- bzw. Abspülprozesse. Das ist ein schwieriges und seit vielen Jahrzehnten diskutiertes Problem der Geomorphologie, der Lehre von der Oberflächengestalt der Erde (z.B. DAVIS & RÜHL 1912; BREMER 1989; 2003; WIRTHMANN 1994; BORGER 2000; BOLDT 2001; Überblick bei BUSCHE 2002; BUSCHE et al. 2005, 11-31).

Die jungtertiäre Kappungsfläche der Großen Kevir-Ebene schneidet die unterschiedlichsten und verstellten Sedimentgesteine (Ton-, Sand-, Gips und Salzlagen) waagrecht ab und greift auch nach Süden über die große tektonische Kevirstörung auf flach abgeschnittene metamorphe Gesteine über; das wäre jedoch bei *hartem* Gestein kaum möglich gewesen (Abb. 3). Nach BUSCHE et al. (2002, 70) erklärt sich dieser Befund genauso wie irgendwo sonst auf der Erde: Die Große Kevir-Rumpffläche ist durch *flächenhafte Abspülung* entstanden; vorausging eine chemische Intensivzersetzung der Ton- und Sandsteine. Damit ist gemeint: Zunächst hatten chemische Prozesse die Gesteine bis in größere Tiefen zersetzt. Es wird angenommen, dass dies unter Bedingungen geschah, die es heute nirgends auf der Erde gibt. Man vermutet, dass dafür das Klima verantwortlich war; vieles deutet darauf hin, dass es damals (fast) weltweit erheblich wärmer und bedeutend regenreicher war als selbst

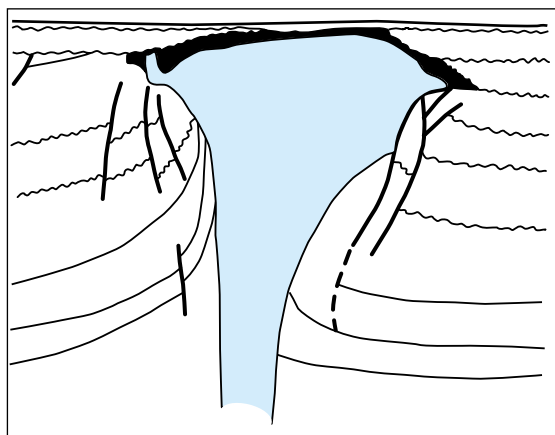


Abb. 1: Senkrechter Schnitt durch einen mehrere km hohen, pilzförmigen Diapir (blau) aus Zechstein-salz mit Gipschut (schwarz), der als Lösungsrelik (Residuum) im Bereich des Grundwasserspiegels nahe der Erdoberfläche entstanden ist. Der Diapir hat beim Aufstieg die Schichtfolgen durchbrochen und randlich hochgeschleppt bzw. tektonisch verstellt. Wienhausen bei Celle, Nordwestdeutschland. (Verändert nach A. BENTZ)

in den heutigen feuchten Tropen (BORGER 2000, 166-169; BOLDT 2001, 41, 68; BREMER 2002, 26-27).³ Solche Voraussetzungen waren im anschließenden Quartär (wohl) nicht mehr gegeben; schon deshalb kann auch die Kevir-Rumpffläche nicht erst im Quartär entstanden sein. Funde dieser tertiären Zersetzungsprodukte kennt man auch aus dem iranischen Hochland und seiner Umgebung (BUSCHE et al. 2002, 70). Das mehr oder weniger weiche, zersetzte Substrat wird *Saprolit* genannt, was drastisch-wörtlich „verfaultes Gestein“ bedeutet.

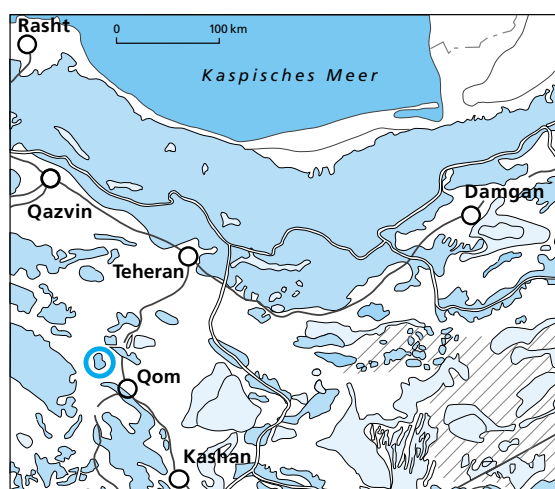


Abb. 2: Geographische Lage des Salzbergs Kuh-e-Namak im Zentraliran. Der durch einen Kreis gekennzeichnete Salzberg liegt ca. 20 km nordwestlich der Stadt Qom und etwa 110 km südwestlich von Teheran. Die Doppellinien markieren Wasserscheiden. Der hellblaue und schrägschraffierte Bereich rechts gehört zur Großen Kevir-Ebene (vgl. Abb. 3). (Verändert nach BUSCHE et al. 2002)

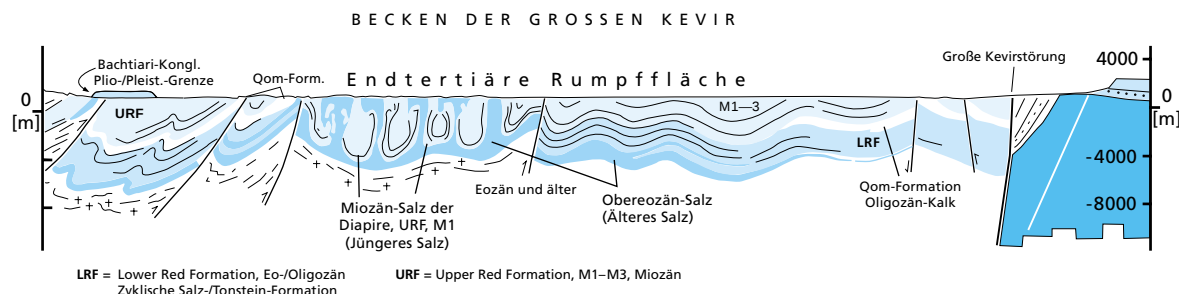


Abb. 3: Senkrechter Schnitt durch das Becken der Großen Kevir (Zentraliran) von Nordwest (links) nach Südost (rechts). Halblinks sind skizzenhaft Diapire angedeutet (älteres Obereozän-Salz mittelblau; jüngerer Miozän-Salz hellblau; vgl. Abb. 4). Im Bereich geringerer Salzmächtigkeiten (links außen und rechts) reichte der Auftrieb für das Aufsteigen des Salzes nicht aus. Eindrücklich ist die weitgespannte endtertiäre Kevir-Rumpffläche; sie kappt die gefalteten und salttektonisch gestörten Schichtfolgen horizontal, ungeachtet der jeweiligen Sedimentsorten. Die Rumpffläche greift sogar ganz rechts über die tektonische Naht der großen Kevirstörung auf metamorphes Gestein (dunkelblau) über. Ganz links auf der Rumpffläche als jüngstes Sediment Reste des Bachtiari-Konglomerats, das an die Tertiär-/Quartär-Grenze gestellt wird (s. Tab. 1). (Verändert nach BUSCHE et al. 2002)

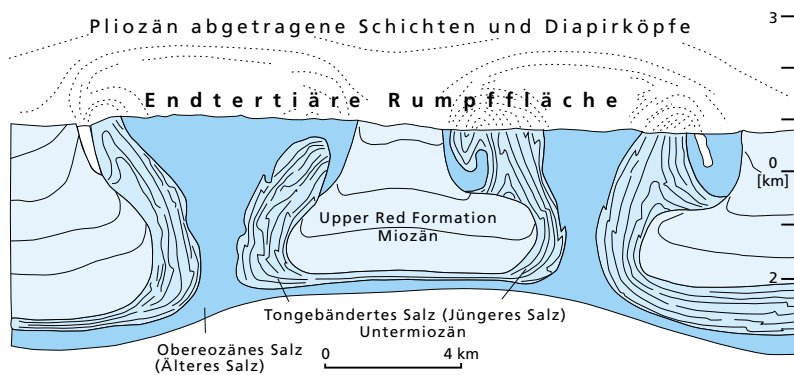


Abb. 4: Senkrechter Schnitt durch zwei Diapire (dunkelblau) der Großen Kevir-Ebene (Zentraliran), die durch die endtertiäre Rumpfflächenbildung gekappt sind. Das ältere, obereozäne Salz (dunkelblau) ist aus größerer Tiefe aufgestiegen. Es schleifte beim Aufstieg als Kern der Diapire das u.a. mit Tonlagen gebänderte jüngere, untermiozäne Salz von der Basis der Upper Red Formation mit nach oben. Auch hier wurde diese mehrere km mächtige Formation beim Salzaufstieg durchbrochen und randlich hochgeschleppt. (Verändert nach BUSCHE et al. 2002)

Diese Zersetzungsdecke konnte anschließend leicht flächenhaft abgetragen, also abgespült werden (z.B. ROHDENBURG 1983, 421, 434; BUSCHE 1998, 17-19, 25; 2005, 73-74; BOLDT et al. 2002, 96). Das wird zusätzlich dadurch erleichtert, dass Saprolit einen geringen inneren Zusammenhalt (Kohäsion) der Mineralkörner besitzt (FELIX-HENNINGSSEN 1990, 148); er kann zersetzungsbedingt bis über 20% seines Volumens verloren haben (BUSCHE 2005, 71). Auch EISSMANN (1997, 22, 24) weist auf die gute Vorbereitung hin, die die Gesteinszersetzung der anschließenden Abtragung leistete. Ebenso bildete nach STENGEL (2002, 16) der Saprolit für nachfolgende Erosionsprozesse ein extrem anfälliges Substrat; seine flächenhafte Abtragung muss „sehr schnell abgelaufen sein“ (BUSCHE et al. 2005, 79). Noch heute können weltweit in bestimmten Arealen mehrere Hundert Meter mächtige Saprolitdecken erhalten sein (z.B. BREMER et al. 1995, 13; BUSCHE et al. 2005, 66-74). Für die großräumige Abspülung des Saprolits in der heute extrem trockenen Sahara, also im Verlauf der auch dort ausgedehnten tertiären Flächenbildung, nimmt BUSCHE (1998, 42) „hohe, oft sicherlich katastrophartige Starkniederschläge“ an.

Der (wasserfreie) Anhydrit in der Tiefe neben dem Salzberg Kuh-e-Namak geht nach oben in (wasserführenden) gefalteten Gips über (vgl. Abb. 6: Gipsreiche Salzfalte). Man geht davon aus, dass der Gips nur bei starker Wasseraufnahme in einem heute nicht mehr vorhandenen durchgehenden oberflächennahen Grundwasserkörper entstanden sein kann, also unter sehr regenreichen (humiden) Bedingungen. Neben anderen Befunden weist das auf frühere hohe Niederschläge im Iran hin (s.u.). Nicht nur die Gesteine sind an dieser Rumpffläche horizontal abgeschnitten (s.o.). Auch die Salzdiapire wurden flach gekappt; das ergab sich unter feuchten Klimabedingungen nach BUSCHE et al. (2002, 70-71) zwangsläufig. Denn im Kontakt-

bereich des Salzes mit untersättigtem, fließenden Grundwasser bildete sich ein Lösungshorizont (Salzspiegel). Diese Lösungsfront ist mit dem Niveau der Kevir-Rumpffläche identisch (vgl. Abb. 3, 4 und 6a). Im Bereich dieses Horizonts wurde das Salz gelöst und durch die abfließende Salzsole aus der Kevir-Ebene heraustransportiert (s.u.). Die Salzdiapire konnten infolge ständiger Lösung an dieser Front nicht über die Rumpffläche herausgehoben werden. Im Tertiär konnten also noch keine Salzberge entstehen.

Die Rumpffläche der Großen Kevir kann nach BUSCHE et al. (2002, 70-71) auch deshalb keine im Trockenklima entstandene Reliefform sein, weil sie in den nördlichen Randbereichen von Resten des Bachtari-Konglomerats überlagert ist (Abb. 3). Zeitlich wird das Konglomerat an die Tertiär/Quartär-Grenze gestellt (Tab. 1). Diese Geröllschüttung ist also jünger als die große Rumpffläche und wird als frühestes Sediment der Region angesehen, das unter halbwüstenhaften (semiariden) Bedingungen entstanden ist – allerdings kann man angesichts des enormen Wassertransports der Gerölle an dieser Klimazuordnung Zweifel anmelden. Abflusslos kann die Große Kevir-Rumpffläche samt ihren Randgebieten nach BUSCHE et al. (2002, 71) erst später geworden sein, nachdem wiederum große Teile des Bachtari-Konglomerats von der Kevir-Fläche abgetragen und die Erosionsprodukte durch starke Strömungsereignisse aus der Ebene heraustransportiert worden waren, also nicht vor dem Altquartär.⁴ Neben weiteren Befunden dürfte dies zeigen, dass der Kuh-e-Namak erst nach dem Ende des extrem niederschlagsreichen Tertiär-Klimas entstanden sein kann, also frühestens im Altpleistozän (vgl. Tab. 1; Abb. 6a-b). Das ist wichtig, um die zeitlichen Bedingungen seiner Entstehung einzugrenzen. Die damit verknüpften Zeitprobleme werden im nächsten Abschnitt behandelt.

Salzberg-Erhaltung: Nicht im Halbwüstenklima, erst recht nicht in Regenzeiten

Im vorigen Abschnitt wurde dargestellt, dass die extrem feuchtklimatische Situation bis zum Abschluss der endtertiären Kevir-Rumpfflächenbildung noch keine Heraushebung des Salzdiapirs als Berg ermöglichte (Abb. 3, 4 und 6a). Im Folgenden wird gezeigt: Selbst wenn der Salzdiapir im anschließenden Quartär unter zeitweise wüstenhaftem Trockenklima als Salzberg aufstieg, hätte er einer Auflösung in den – wie man annimmt – langen quartären Regenperioden (Pluvialen) nicht entgegen können. Dieser Widerspruch lässt sich lösen, wenn zumindest die Dauer der feuchten Pluvialzeiten erheblich verkürzt wird.

Bis zum Ende des Tertiärs wurde also die Heraushebung des Salzdiapirs durch grundwasser-

bedingte Salzlösung verhindert. Man geht davon aus, dass sich dies mit zunehmendem Trockenklima im Verlauf des Frühquartärs geändert hat. Während die meisten Kappungsflächen der Diapire in der Großen Kevir nahezu im Niveau der Rumpffläche liegen, hat nach BUSCHE et al. (2002, 72) ein um 50 m herausgehobener Salzberg die endtertiäre Kappungsfläche bewahrt (Abb. 5). Ähnlich der stärker herausgehobene Kuh-e-Namak; er gehört zu den bedeutendsten Salzbergen und ragt 320 m über die Rumpffläche auf. Ungefähr um diesen Betrag sei der Salzdiapir im Quartär herausgehoben worden. Auch er besitzt ein mehr oder weniger flaches Gipfelniveau (Abb. 6d), das als Rest einer annähernd horizontalen Kappungsfläche gedeutet wird (BUSCHE et al. 2002, 73-74). Es handle sich bei der Gipfelverebnung beider Berge also um Relikte der spättertiären Rumpffläche, die sich trotz Heraushebung und Lösungsprozessen (s.u.) im Salz erhalten hätte. Von der Stimmigkeit dieser Annahme hängt die Argumentation der Autoren ab.

Die feuchtklimatischen Pluvialzeiten des Quartärs dürften nur kurzzeitige Episoden gewesen sein.

Für das ältere (eozäne) Salz (s.o.; vgl. Abb. 4) wurde ein vergleichsweise hoher mittlerer Nettoaufstieg von 10 mm pro Jahr berechnet (BUSCHE et al. 2002, 72). Aber Diapire steigen nach TALBOT & JACKSON (1987, 79, 82-83) zeitweise aufgrund verschiedener Mechanismen oft schief auf, die eine Seite (bedeutend) schneller als die andere; und diese unterschiedlichen Bewegungen und Aufstiegsraten wechseln mit Zeiten ab, in denen der Salzaufstieg völlig zum Erliegen kommt.⁵ Insgesamt gelangen BUSCHE et al. (2002, 72-73) für den Salzdiapir zu einem sehr geringen durchschnittlichen Hebungswert während des Quartärs, und zwar unter der Voraussetzung eines (ariden) Trockenklimas: „Unter der Annahme, dass das aride Klima, das den Salzdiapiraufstieg über seine Umgebung erst ermöglichte, seit mindestens 1 Mio. Jahren herrscht, ergäbe sich eine nur unbedeutende Brutto-(etwa gleich Netto-) Hebungsrate von nur 0,3 mm/a“ – also lediglich 3 Zehntel Millimeter pro Jahr. Das stimmt mit den generellen Salzdiapir-Aufstiegsraten von TALBOT & JACKSON (1987, 79) überein, die schubweise verlaufen: „Wachstumsperioden, in denen sie für einige Millionen Jahre um 0,1 bis 1 Millimeter pro Jahr empordringen, wechseln mit Phasen völligen Stillstands ab“ (s.o.). BUSCHE et al. (2005, 61) geben einige Millimeter pro Jahr an.

Angesichts derart geringer durchschnittlicher Hebungsraten erklärt tatsächlich allenfalls die Annahme eines langzeitlichen (ariden) Vollwüstenklimas im Quartär, warum das Salz des Kuh-e-Namak

Glossar

- Anhydrit** (CaSO_4): Wasserfreier → Gips.
- Arid**: Trocken, regenarm (Vollwüste).
- Diapire**: → Salzdiapire.
- Doline**: Einsturztrichter an der Erdoberfläche, hervorgerufen durch Lösung von Kalk, Gips oder /und Salz im Untergrund. → Karst.
- Erdfall**: → Doline, → Karst.
- Gips** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): Wasserhaltiger → Anhydrit.
- Humid**: Feucht, regenreich.
- Interpluviale, Interpluvialzeiten**: Wüstenhafte Trockenzeiten im Pleistozän der Subtropen (→ Pluviale).
- Karst**: Oberbegriff für Lösung bzw. Lösungsformen in mehr oder weniger leicht löslichen Gesteinen (Kalk, Gips, Salz). → Doline.
- Kevir**: Im Iran verwendete Bezeichnung für eine periodisch oder episodisch überschwemmte und austrocknende *Salztonebene* in einem abflusslosen Becken.
- Konglomerat**: Grobkörniges Ablagerungsgestein; besteht (weitgehend) aus verbackenem, gerundetem Kies.
- Metamorphe** (= umgewandelte) Gesteine: Gefüge und Mineralbestand dieser Gesteine wurde durch erhöhte Drücke und/oder Temperaturen, z.B. durch Versenkung in die tiefere Erdkruste, mehr oder weniger stark verändert bzw. *umgewandelt*, bevor sie durch Heraushebung an die Erdoberfläche gelangten.
- Plattentektonik**: Theorie, wonach die Erdkruste und Teile des oberen Erdmantels aus großen und kleineren Platten besteht. Die Platten werden horizontal verschoben (Kontinentalverschiebung), und zwar – wie man annimmt – als Auswirkung wärmebedingter Materialströme (Konvektion) im tieferen Erdmantel. Bei Zusammenstößen zwischen Platten können in der „Knautschzone“ des Kollisionsbereichs Gebirge aus dem Untergrund herausgepresst werden.
- Pluviale, Pluvialzeiten**: Regenreiche Zeitabschnitte im Pleistozän der Tropen und Subtropen (→ Interpluviale).
- Residuum**: Unlöslicher Rückstand, Rest.
- Rumpffläche**: Ausgedehnte Verebnung (Ebene), durch flächenhafte Abtragung (Abspülung) gebildet. Dabei wurde im Bereich der Rumpffläche die Erdoberfläche tiefergelegt.
- Salzdiapire** (griech. von *diapirein*, durchstoßen), **Salzstöcke**, **Salzmauern**: Rundliche oder mauerartig langgestreckte, große Salzmassen, die aus der Tiefe aufdringen und dabei überlagernde Gesteine durchstoßen.
- Salzgletscher**: Sekundäre Folge zeitweise beschleunigter → Salzdiapirhebung. Dabei „fließen“ Salzmassen relativ rasch gletscherzungenartig der Schwerkraft folgend seitlich über den Austrittsrand des Diapirs hinaus. Als Gleitmittel dienen geringe Wassergehalte zwischen den Salzkristallen (interkristallines Wasser).
- Salzsole**: → Sole
- Salzspiegel**: Oberflächennaher Lösungsbereich, in dem das Salz eines (aufsteigenden) → Salzdiapirs mit grundwasserführenden (Locker-) Sedimenten in Kontakt kommt; auch Salzlösungsfront genannt.
- Salztektonik**: Störungen bzw. Verstellungen von Schichtfolgen durch Bewegungen des Salzes.
- Saprolit** (= „verfaultes“ Gestein): Chemisch bedingtes Zersetzungsprodukt von Gestein; Minerale wie Feldspäte und Glimmer und selbst ein Teil des Quarzes sind weggelöst. Saprolit ist dadurch weich und porös; er kann leicht abgetragen werden.
- semiarid**: halbtrocken (Halbwüste)
- Silt** (auch **Schluff** genannt): Korngröße zwischen Sand und Ton (0,002 bis 0,063 mm Durchmesser).
- Sole**: Gesättigte Salzlösung (Salzsole).
- Tektonik, tektonisch**: Lehre vom Bau, den Bewegungen und Störungen der Erdkruste.

nicht aufgelöst wurde. Jedoch zeigen selbst die heutigen Niederschlagswerte, verglichen mit der gegenwärtigen Salzlösungsrate: Obwohl in dieser Trockenregion nur 75 mm Niederschlag pro Jahr fällt (Halbwüstenklima)⁶, wurden für die lösungsbedingte Abtragung des Salzbergs Werte zwischen 10 und 12,5 mm pro Jahr errechnet (BUSCHE et al. 2002, 72-73; BUSCHE et al. 2005, 61). Diese große Menge gelösten Salzes übertrifft noch im heutigen regenarmen Halbwüstenklima das Salzvolumen

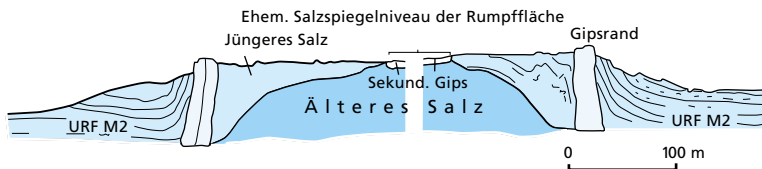


Abb. 5: Ein Salzberg der Großen Kevir-Ebene, der nach BUSCHE et al. (2002, 71) während des Quartärs ca. 50 m über die Rumpffläche herausgehoben wurde. Im Zentrum das ältere Salz (dunkelblau); randlich das mit hochgeschleppte gebänderte jüngere Salz der Upper Red Formation (URF M2). Der steil gestellte Gipsrand ist ein Lösungsrest (Residuum). Die ausgeprägt ebene Dachfläche des Diapirs wird als herausgehobener Rumpfflächenrest gedeutet, der im Endtertiär im Niveau des Salzspiegels durch flächenhafte Salzlösung entstanden war (s. Text). (Verändert nach BUSCHE et al. 2002)

weit, das während des langfristig verstandenen Quartärs jährlich durch die minimale angenommene Hebungsrate des Salzdiapirs hinzukam. Es ist deshalb nicht ersichtlich, wie der Salzdiapir jemals als Berg über die Rumpffläche hätte aufsteigen können bzw. er wäre längst weggelöst worden, wenn man die genannten Hebungsraten von BUSCHE et al. (2002) bzw. TALBOT & JACKSON (1987) mit der vorausgesetzten Dauer des Quartärs verknüpft und ein dem heutigen vergleichbares Halbwüstenklima voraussetzt.

Das Steinsalz des Kuh-e-Namak enthält nicht-lösliche Bestandteile wie Silt und etwas Ton; in stärker verunreinigten Partien 3-3,5%. Als unlösliches Restprodukt (Residuum) bedeckt diese meist 2-3 Dezimeter starke Auflage große Teile des Salzbergs (BUSCHE et al. 2005, 61). 10 cm Residuum entsprechen also etwa 3 m gelöstem Salz (BUSCHE et al. 2002, 74-75). Auf der Residuum-Bedeckung können an manchen Stellen bestimmte Pflanzen siedeln, die auch in der umgebenden Halbwüste vorkommen. Für die regenreichen Pluvialzeiten nehmen BUSCHE et al. (2002, 74) an, dass eine relativ dichte Strauch-, Kraut- und Grasvegetation weite Teile des Berges bedeckt hat. Die Autoren sagen aber zurecht, dass „oberflächliche Lösung selbst bei geringen Regenmengen möglich gewesen sein muss“. Doch wie wäre dann – angesichts der oben genannten Zahlen – die komplette Auflösung des Salzbergs in *langzeitlich verstandenen* Pluvialen verhindert worden? Gerade durch die feuchtigkeitsbindende Residuum-Auflage wurde der Lösungsprozess noch beschleunigt.

Weiter setzt sich selbst bei den geringen Niederschlägen im heutigen Halbwüstenklima die intensive Verkarstung des Berges durch Einbrüche mit freigelegtem Salz fort: Nahezu alle Erdfälle sind jung und ohne Residuum-Auflage. Der gesamte Berg ist „durch einen extremen Lösungsdolinenkarst geprägt“; vermutlich bahne sich ein künftiger „Zusammenbruch des Salzbergs durch innere Lösung“ an. Bei jedem stärkeren Regen werden von den Berghängen größere Residuum-Mengen als Schlammströme in senkrechte Lösungstrichter im Salz gespült; der Schlamm füllt große Hohlräume im Inneren des Berges aus (BUSCHE et al. 2002, 76).⁷ Dies setzt voraus, dass sich das Residuum oft erneuert, was wiederum die erhebliche Salzlösung

an der Oberfläche des Berges bestätigt. Deshalb müssen in der Tat die Interpluvialzeiten – wenn man sie als langfristig auffasst – erheblich trockener gewesen sein als das heutige Halbwüstenklima mit 75 mm Niederschlag pro Jahr. Vielleicht waren sie aber auch (in Analogie zu den Pluvialen; s.u.) kürzer als gemeinhin angenommen – sonst hätte angesichts dieser zerstörenden Lösungsvorgänge der Kuh-e-Namak wohl kaum entstehen bzw. erhalten bleiben können.

Aber das eigentliche Problem für eine Deutung der Salzbergentstehung im Langzeitrahmen sind die ausgeprägten Regenzeiten. Sie belegen eine erneute „Humiditätszunahme“, nämlich „in den Pluvialzeiten des Quartärs“ (BUSCHE et al. 2002, 71). Unter Pluvialen versteht man regenreiche Perioden während des Pleistozäns (Tab. 1), die in den Tropen und Subtropen für große Niederschläge sorgten.⁸ Selbst in der heute größten und trockensten Wüste der Erde, der Sahara, fand der Wechsel von feuchtwarmen Pluvial- und wüstenhaften Interpluvialzeiten statt; BUSCHE (2005, 78-79) nimmt für die Sahara drei Pluviale an.⁹ Das führte dort z.B. zur Entstehung großer Flussnetze und ausgedehnter Seen (BUSCHE 1998, 84-105).

Dieser Befund hat erhebliche Konsequenzen für die Rumpffläche der Großen Kevir im Iran. Wie auch BUSCHE et al. (2005, 61) ausdrücklich zum Salzberg Kuh-e-Namak äußern, war nach dem sehr feuchten Tertiär-Klima „jeweils in den pleistozänen Pluvialzeiten zeitweilig wieder Lösung im Grundwasserniveau möglich“. Dann ist selbst bei Heraushebung des Salzbergs in den wüstenhaften Interpluvialzeiten kaum verständlich, wieso er in den *langzeitlich* verstandenen Pluvialen nicht komplett aufgelöst wurde. Das Ausmaß der Niederschläge wird bereits deutlich, wenn man *nur eines* der pluvialzeitlichen Sahara-Flusssysteme betrachtet. Es hat einen „riesigen Schwemmfächer“ aufgeschüttet, der „über 300 km weit verfolgbar ist“ (BAUMHAUER et al. 1989, 496). Zur Zeit seiner Entstehung „müssen intensiv pluviale Bedingungen geherrscht haben“ (BUSCHE 1998, 99; vgl. 95-105). Es war also eine sehr regenreiche Episode; die von der Zentral-sahara nach Norden gerichteten Flusssysteme erreichten das Mittelmeer (BUSCHE 2005, 17). Es dürfte kaum möglich sein, die Folgerung zu vermeiden, dass in den regenreichen, *langzeitlich verstandenen* Pluvialen der Salzberg komplett aufgelöst worden wäre. Das wird am Schluss des nächsten Abschnitts auch anhand der Verebnungsflächen am Kuh-e-Namak herausgestellt.

Von Flächen- zu Talbildung – gleiche Ursache bei Gestein und Salz?

Zunächst wird in diesem Abschnitt erklärt, warum die Entstehung des Salzbergs Kuh-e-Namak nicht

mit der Bildung von Bergen und Berghängen in (gewöhnlichen) *Gesteinen* vergleichbar ist.

Zum Verständnis ist folgende Beobachtung wichtig: Mit dem Nachlassen und Ausklingen der Tiefenzerstörung des Gesteins (Saprolitbildung) im Endtertiär (s.o.) verengte sich weltweit die Abtragung zunehmend auf kleinere Flächen. Der Grund ist: Nach der weitgehenden Abspülung des *weichen* Zersetzungsprodukts Saprolit waren die erosiven Kräfte des fließenden Wassers immer weniger in der Lage, ausgedehnte *Ebenen* zu bilden bzw. die im Tertiär entstandenen Ebenen konnten nicht mehr durch flächenhafte Abspülung tiefergelegt werden (s.o.). Zunehmend war es den Abtragungskräften nur noch möglich, sich *linear* ins Gestein einzuschneiden, also Täler auszuräumen und flache Hänge zu versteilen (BOLDT 1997; 1998; BOLDT et al. 2002; BUSCHE et al. 2005, 18-31; vgl. STEPHAN 2006, 73-74). Als Ergebnis wurde ein immer ausgeprägteres Landschaftsrelief herauspräpariert. Weltweit beobachtet man also im Verlauf des Tertiär und Quartär, wie es BREMER (2002, 32) ausdrückt, „eine generelle Zunahme der Relieferung“.

Unzutreffend dürfte sein, dass BUSCHE et al. (2002, 74) diesen Prozessablauf auf die Bildung eines *Salzbergs* wie den Kuh-e-Namak übertragen. Die Autoren postulieren, die Salzlösung hätte – aus unbekannten Gründen, wie betont wird – am Kuh-e-Namak immer weniger gewirkt. Denn die einmal über das Lösungsniveau des Salzspiegels herausgehobenen Salzbereiche seien der flächenhaften Abtragung zunehmend entzogen gewesen. Deshalb habe sich der Fuß des Berges beim Herausheben immer mehr verbreitert.

Jedoch werden hier nicht vergleichbare Prozesse miteinander parallelisiert. Zwar kann die flache Oberfläche *gewöhnlicher Tafelberge* vor weiterer Abtragung weitgehend verschont bleiben, wenn – wie erwähnt – nach Abspülung des zersetzten Gesteins die Erosion sich auf tiefere Niveaus beschränkt (u.a. Talbildung und Hang-Versteilung). *Anders jedoch bei Salzbergen*; wie im vorigen Abschnitt beschrieben geht selbst im heutigen Halbwüstenklima die Erniedrigung des Berges durch Salzlösung auf der *gesamten Oberfläche* (und ebenso im Berginneren) weiter. Gleichfalls wurde darauf hingewiesen, dass noch in der Gegenwart die Lösungsmengen erheblich die Salz-mengen übertreffen, die durch die Aufstiegsrate des Diapirs hinzukommen. Dass dennoch nach dem Altquartär der Salzaufstieg insgesamt die Lösung übertraf und der Salzberg erhalten blieb, dürfte sich am ehesten mit der Annahme *kurzzeitiger* Pluviale erklären – es ist kaum ersichtlich, wie der Kuh-e-Namak sonst der kompletten Auflösung hätte entgehen können.

Es ist auch kein plausibler Grund erkennbar, wieso es – ausgerechnet angesichts der sehr feuchten quartären Pluvialzeiten – „Schwellenwerte“ der Salzlösungsintensität gegeben habe, die eine stär-

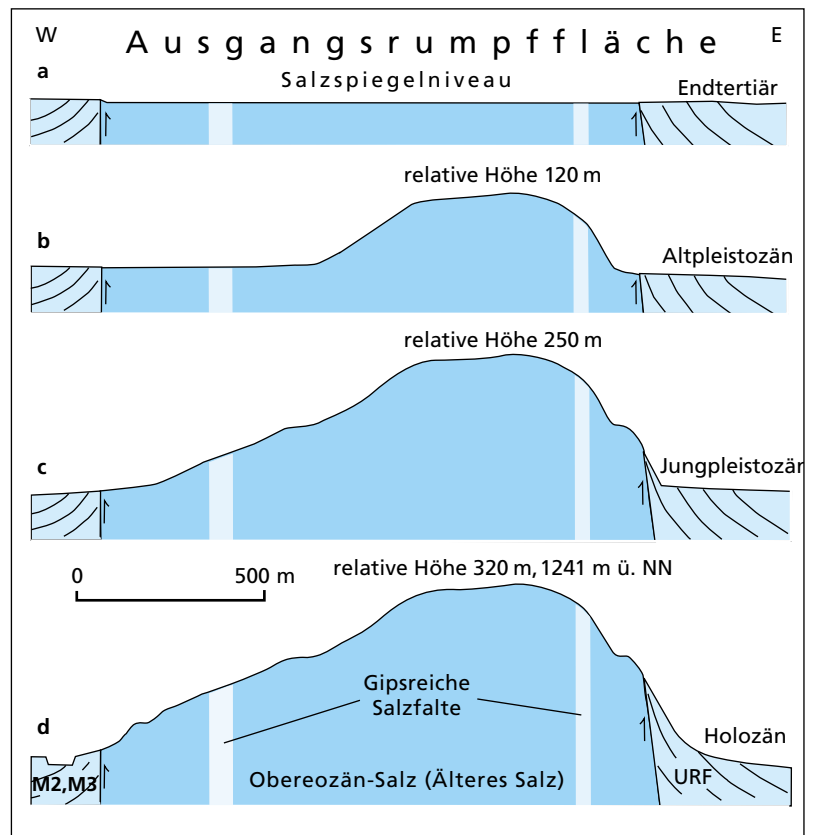


Abb. 6: *Phasen der Reliefontwicklung des aufsteigenden Salzbergs Kuh-e-Namak nach BUSCHE et al. (2002). Beidseitig ist die durch Faltung senkrecht gestellte salzige Gipszone markiert (hell). a Bis zum Endtertiär verhinderte die im niederschlagsreichen Klima wirk-same Salzlösung im Niveau der Rumpffläche (Salzspiegel) ein Herausheben des Diapirs. b Erst im vergleichsweise weniger feuchten Quartär-Klima konnte sich das Salz als Berg-form über die Rumpffläche erheben, obgleich sich im Altpleistozän (Frühquartär) im Rumpf-flächen-Niveau bei einer Hebungs-Verzögerungsphase seitlich noch eine relativ ausgedehnte lösungsbedingte Verebnung bildete. c Bei geringer werdender Salzlösung infolge abneh-mender Niederschläge verbreiterte sich die herausgehobene Basis des Bergs; ein Teil der genannten Verebnung blieb als Stufe bei den weiteren Aufstiegsphasen im Jungpleistozän (Spätquartär) erhalten. d Bis zur vollständigen Heraushebung in der Jetztzeit (Holozän) ist die treppenartige Stufe im Salz erkennbar, und es bildeten sich in tieferen Niveaus weitere kleine Lösungs-Treppungen (links). Neben dem Salzberg die hochgeschleppten Schichtfolgen der Upper Red Formation (URF M2, M3). (Verändert nach BUSCHE et al. 2002)*

kere Auflösung des Kuh-e-Namak verhindert hätten (BUSCHE et al. 2002, 74).¹⁰ Denn Salzlösung ist nicht klimaabhängig wie (wahrscheinlich) die Zersetzung des Gesteins (vgl. z.B. BORGER 2000, 106-187; BOLDT et al. 2002, 96-107). Es mag (auch) klimatische Gründe haben, dass die Zersetzung von Gestein sich in den feucht-warmen Pluvialen des Quartärs praktisch nicht fortsetzte (s.o.), aber die Salzlösungsintensität des Wassers ist davon nicht betroffen.

In den Pluvialzeiten des Quartärs war nicht wie heute die *Oberfläche* des Berges und das inzwischen zerklüftete (verkarstete) *Berginnere* am stärksten durch Lösung betroffen (s.o.), sondern der Fuß des Kuh-e-Namak. Am Bergfuß sind während verschiedener Stillstände des Salzaufstiegs (vgl. TALBOT & JACKSON 1987, 79; s. vorigen Abschnitt) jeweils größere oder kleinere Flächenverebnungen gebildet wurden (BUSCHE et al. 2005, 61). Die Auto-ren vermuten, dass der ausgeprägteste Flächenteil

bei einer Hebungs-Verzögerungsphase im Altpleistozän herausgelöst wurde (BUSCHE et al. 2002, 72-74). Diese größere Fläche wie auch die späteren Kleinflächen entstanden, als zu verschiedenen Zeiten der Aufstieg des Diapirs erlahmte und der Kuh-e-Namak von der Rumpffläche her seitlich viel intensiver angelöst werden konnte (vgl. Abb. 6b). Bei nachfolgenden Hebungs-Episoden blieben die zuvor gebildeten Lösungsflächen als treppenartige Relikte an den Berghängen erhalten (vgl. Abb. 6c-d). Wichtig ist, dass diese herausgehobenen Flächenreste – trotz weitergehender Lösung auf der Oberfläche des Salzberges (s.o.) – noch recht gut erhalten sind (BUSCHE et al. 2002, 73-74).

Dieser Tatbestand zeigt, dass die einstige Lösung im Salzspiegelniveau der Rumpffläche eine sehr ausgeprägte Formung hinterließ. Diese Formen blieben trotz späterer Überprägung durch Oberflächenlösung gut erkennbar. Daraus kann man schließen, dass ihre Entstehung auf *erheblich intensiver verlaufende Lösungsphasen im Pleistozän zurückgeht als die Prozesse auf der Oberfläche* des Berges.¹¹ Neben den oben genannten Problemen zeigt auch dieser Befund, dass der Schluss kaum zu umgehen sein dürfte: Bei *langzeitlichen* Hebungsstillständen in den Pluvialen wäre der Kuh-e-Namak im Niveau der Rumpffläche komplett weg-gelöst worden.

Lösungsvorschlag: Kurzzzeitige feuchte Pluviale

Wenn die feuchten Pluvialzeiten des Quartärs erheblich kürzer waren, sollte auch der Aufstieg der Salzdiapire bedeutend schneller erfolgt sein als herkömmlich angenommen wird (s.o.). Ob das der Fall gewesen sein kann unter der Annahme, dass die mächtigen Sedimentfolgen über den ursprünglich horizontal gebildeten Salzlagern (vgl. Abb. 3) in erheblich kürzerer Zeit aufgeschichtet wurden, müsste untersucht werden. Rascher Salzaufstieg ist von der Masse der Überlagerung (Druck) abhängig. Im Labor hat man Salz durch höheren Druck zu schnellerem Kriechen veranlasst (TALBOT & JACKSON 1987, 79). Es fragt sich, wie Salz auf schnellere Druckzunahme infolge rasch zunehmender Sediment-Auflast reagiert. Vielleicht ist aber wichtiger, dass nach TALBOT & JACKSON (1987, 84) bereits 0,1 Gewichtsprozent Wassergehalt im Salz für eine viel schnellere Salzbewegung genügt: Demnach sollte die raschere Salzmobilität durch geringe Mengen Wasser zwischen den Salzkristallen des Diapirs (interkristallines Wasser) „keineswegs auf Salzgleitscher beschränkt sein, sondern auch in den Salzstöcken in der Tiefe stattfinden“ (vgl. Anm. 5). Und wenn es zutrifft, dass die meisten Salzdiapire sich im späteren Verlauf ihres Aufstiegs „quasi fest-zufressen“ scheinen, weil der Auftrieb zu gering

geworden ist (TALBOT & JACKSON 1987, 84), fragt es sich, ob der früher stärkere Auftrieb eine viel schnellere Hebung der Diapire bewirkt hat, der die starke Salzlösung der Pluvialzeiten mehr als aus-gleich.¹² Passend wäre im Rahmen eines Kurzzeit-verständnisses der Tatbestand, dass ein rascher Salzaufstieg *nicht über lange Zeiträume* funktioniert hätte. Denn dann wären die Salzlager im Untergrund rasch aufgebraucht worden („Nachschub-problem“); das hätte zum baldigen Erlahmen des Auftriebs geführt.

Es ist kaum denkbar, wie der Aufstieg des Salzes über das Niveau der Rumpffläche während der regenreichen Pluvialzeiten möglich war, falls es sich dabei um *lange Perioden* gehandelt hätte. Wenn das Trockenklima, das den Salzdomaufstieg über seine Umgebung erst ermöglichte, seit mindestens 1 Million Jahren herrscht (BUSCHE et al. 2002, 72-73; s.o.), steht das in kaum vereinbarem Gegensatz zu den Regenzeiten des Quartärs. BUSCHE et al. (2005, 61-62) äußern selbst *ausdrücklich bezüglich des Kuh-e-Namak*, dass „jeweils in den pleistozänen Pluvialzeiten zeitweilig wieder Lösung im Grundwasserniveau möglich war“, und dass die Salzlösungsfront „im Niveau eines *pluvialzeitlich* hohen Grundwasserspiegels“ lag. Dieser Widerspruch dürfte sich nur bei Annahme zeitlich sehr begrenzter regenreicher Pluvial-Episoden lösen – sie waren zu kurz, um den Salzberg komplett wegzulösen.

Zwischen den regenreichen Pluvialen lagen (aride) Interpluvialzeiten, also Trockenzeiten mit Wüstenbildung. Für die Sahara zeigt BUSCHE (1998, 69, 176-200 u.a.), dass die Interpluviale zum Teil noch extremer waren als das heutige Sahara-Klima. Das gilt für fossile Windschliff- und Dünenformen, die gegenwärtig in dieser enormen Größe und geographischen Ausdehnung nicht mehr gebildet werden (BUSCHE 2005, 32-35). Sie gehen auf viel gewaltigere Stürme als die heutigen zurück (vgl. BAUMHAUER et al. 1989, 496). Aber nur die Windgeschwindigkeiten seien größer als heute gewesen, nicht die Trockenheit (BUSCHE et al. 2005, 334; vgl. 324-337). Für den Aufstieg des Kuh-e-Namak werden die trockenen Interpluvialzeiten die günstigsten Episoden gewesen sein. Allerdings nur, wenn sie *ausgeprägt arid* waren (Vollwüstenklima) – sonst hätten selbst sie der Salzlösung ebenso Vorschub geleistet wie heutzutage das Halbwüstenklima im Zentraliran (s.o.).

Fazit: Unter der Voraussetzung langzeitlicher, feuchter Pluviale (so BUSCHE et al. 2002) erscheint die Erhaltung des Kuh-e-Namak praktisch ausgeschlossen. Vielmehr dürften die Pluviale zeitlich sehr begrenzte *Episoden* gewesen sein; sie waren zu kurz, um zur Auflösung des Salzbergs zu führen (man kann wahrscheinlich von einem mehrstelligen Zeitreduktionsfaktor ausgehen; genauere Angaben sind derzeit nicht möglich).¹³

Literatur

- BAUMHAUER R, BUSCHE D & SPONHOLZ B (1989) Reliefgeschichte und Paläoklima des saharischen Ost-Niger. *Geograph. Rdsch.* 41, 493-499.
- BOLDT K (1997) Entwicklung von Schichtstufenlandschaften durch restriktive Flächenbildung – das Beispiel der fränkischen Haßbergstufe und ihres westlichen Vorlandes. *Petermanns Geograph. Mitt.* 141, 263-278.
- BOLDT K (1998) Das Modell der restriktiven Flächenbildung – ein Ansatz zur Erfassung von Regeln der Landschaftsgenese im Bereich wechselnd widerständiger Sedimentgesteine. *Z. Geomorph. NF* 42, 21-37.
- BOLDT K-W (2001) Känozoische Morphogenese im nordöstlichen Mainfranken. Formung im globalen Wandel des klimatisch-strukturellen Wirkungsgefüges. *Würzburger Geograph. Arb.* 96, 1-405.
- BOLDT K-W, JUNG J & BUSCHE D (2002) Verwitterung und Sedimente als Indikatoren der tertiären Reliefentwicklung. Vergleichende Studien im nordöstlichen Mainfranken und im Spessart. *Trierer Geograph. Studien* 25, 91-114.
- BORGER H (2000) Mikromorphologie und Paläoenvironment. Die Mineralverwitterung als Zeugnis der cretazisch-tertiären Umwelt in Süddeutschland. Relief – Boden – Paläoklima, Bd. 15. Berlin-Stuttgart: Borntraeger.
- BRANDT M (2006) Wie alt ist die Menschheit? Demographie und Steinwerkzeuge mit überraschenden Befunden. 2. Aufl. Baiersbrunn: Hänssler.
- BREMER H (1989) Allgemeine Geomorphologie. Methodik – Grundvorstellungen – Ausblick auf den Landschaftshaushalt. Berlin-Stuttgart: Borntraeger.
- BREMER H (2002) Reliefgenerationen in den feuchten Tropen. *Petermanns Geograph. Mitt.* 146, 26-33.
- BREMER H (2003) Morphogenese im Dekkan. Boden – Relief – Paläoklima, Bd. 18. Berlin-Stuttgart: Borntraeger, 279-511.
- BREMER H, mit Beiträgen von SPÄTH H, SANDER H, LAUFENBERG M & KREUTZWALD H (1995) Boden und Relief in den Tropen. Grundvorstellungen und Datenbank. Relief – Boden – Paläoklima, Bd. 11. Berlin-Stuttgart: Borntraeger.
- BUSCHE D (1998) Die zentrale Sahara. Oberflächenformen im Wandel. *Perthes Geographie im Bild*. Gotha: Perthes.
- BUSCHE D (2002) Literaturempfehlungen: Reliefgeschichte. *Petermanns Geograph. Mitt.* 146, 64-67.
- BUSCHE D (2005) Nasse und trockene Reliefgeschichte der zentralen Sahara. Klima- und Formungswandel im Quartär. / Vom feuchttropischen Klima im Tertiär zu den Pluvialen und Interpluvialen des Quartär. In: DREIKLUFT R (Hg) *Die Sahara. Natur und Geschichte*. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft, 16-109.
- BUSCHE D, KEMPF J & STENGEL I (2005) Landschaftsformen der Erde. Bildatlas der Geomorphologie. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft/Primus.
- BUSCHE D, SARVATI R & SIEFKER U (2002) Kuh-e-Namak: Reliefgeschichte eines Salzdoms im abflusslosen zentraliranischen Hochland. *Petermanns Geograph. Mitt.* 146, 68-77.
- DAVIS WM & RÜHL A (1912) Die erklärende Beschreibung der Landformen. Leipzig-Berlin: Teubner.
- EISSMANN L (1997) Die ältesten Berge Sachsens oder die morphologische Beharrlichkeit geologischer Strukturen. *Altenburger Naturwiss. Forsch.* 10, 7-56.
- ENGELHARDT W v & ZIMMERMANN J (1982) Theorie der Geowissenschaft. München etc.: Schöningh.
- FELIX-HENNINGSSEN P (1990) Die mesozoisch-tertiäre Verwitterungsdecke (MTV) im Rheinischen Schiefergebirge. Aufbau, Genese und quartäre Überprägung. Relief – Boden – Paläoklima, Bd. 6. Berlin-Stuttgart: Borntraeger.
- GOULD SJ (1990) Die Entdeckung der Tiefenzeit. Zeitpfeil und Zeitzklus in der Geschichte unserer Erde. München-Wien: Hanser.
- ROHDENBURG H (1983) Beiträge zur allgemeinen Geomorphologie der Tropen und Subtropen. Geomorphodynamik und Vegetation – Klimazyklische Sedimentation – Panplain/Pediplain – Pediment – Terrassen-Treppen. *Catena* 10, 393-438.
- ROTHER P (2005) Die Geologie Deutschlands. 48 Landschaften im Portrait. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft/Primus.
- SCHWARZBACH M (1988) Das Klima der Vorzeit. Eine Einführung in die Paläoklimatologie. 4. Aufl. Stuttgart: Enke.
- STENGEL I (2002) Alte Verwitterung – junge Folgen: Reliefgenese in Südnamibia. *Petermanns Geograph. Mitt.* 146, 16-23.
- STEPHAN M (2006) Die Landschaftsformen – unter anderen als heutigen Bedingungen entstanden. *Stud. Int. J.* 13, 73-77.
- TALBOT CJ & JACKSON MPA (1987) Salz-Tektonik. *Spektrum der Wissenschaft*, Oktober, 76-86.
- WIRTHMANN A (1994) Geomorphologie der Tropen. 2. Aufl. Erträge der Forschung, Bd. 248. Darmstadt: Wiss. Buchgesellschaft.
- ZIEGLER R (1999) Urmenschen. Funde in Baden-Württemberg. *Stuttgarter Beitr. Naturk. C* 44, 1-79.

Anmerkungen

- Das Folgende wird vor allem im Anschluss an BUSCHE et al. (2002) beschrieben und diskutiert.
- Von der Stadt Qom (Suchbegriff!) ausgehend, ist der Kuh-e-Namak leicht im (kostenlosen) Internet-Geographie-(Geomorphologie-)Programm *Google Earth* zu finden. Deutlich erkennbar sind in der Umgebung des Berges gebänderte Formationen (vgl. Abb. 4 und 5), gekappte Faltenstrukturen sowie in Horizontal-Perspektive – wenn auch schematisch! – die Form des Berges mit dem abgeflachten Gipfelniveau und der größeren Verebnung (vgl. Abb. 6).
- Damit ist das Prinzip des Aktualismus für diese Thematik zumindest in seiner strengen Form aufgegeben. Dieses regulative Prinzip der Geowissenschaften (ENGELHARDT & ZIMMERMANN 1982, 350-355) besagt, dass die heutigen Bedingungen auf der Erde *im Wesentlichen* auch für die Erdvergangenheit gültig seien. Bezüglich der Rumpflächenbildung im Alttertiär betont jedoch BREMER (2002, 26), dass „für die alttertiären Verhältnisse der aktualistische Vergleich nicht möglich ist“. Das Aktualismus-Problem wird z.B. von GOULD (1990, 170-194) systematisch untergliedert und diskutiert, was hier nicht erörtert werden kann.
- Die Transport- bzw. Verfrachtungsrichtung aus der Großen Kevir-Ebene, bevor sie abflusslos wurde, ist nach BUSCHE et al. (2002, 71-72) nicht völlig klar; es sei aber nur der Süden möglich: In angrenzende Sedimentbecken oder weiter bis ins Meer (BUSCHE et al. 2005, 147).
- Seit dem Miozän läuft nach TALBOT & JACKSON (1987, 84-86) infolge größeren Drucks, ausgelöst durch platten-tektonische Aktivität, der Salzaufstieg im Zagrosgebirge (Südiran) merklich beschleunigt ab. Dagegen handelt es sich bei horizontalen Salzbewegungen der dortigen Diapire um sog. Salzgleitscher; sie sind eine sekundäre Folge der Salzdiapir-Erhebung. Dabei „fließt“ (gleitet) das Salz mit Hilfe von Wasser zwischen den Salzkristallen (interkristallines Wasser) als Gleitmittel – offenbar nach seltenen Regenfällen – der Schwerkraft folgend seitlich über den Austrittsrand hinaus, und zwar kurzfristig um bis zu einem halben Meter pro Tag (BUSCHE et al. 2002, 73). Auch der Kuh-e-Namak soll einen Salzgleitscher besitzen (so TALBOT & JACKSON 1987, 85); dies weisen jedoch BUSCHE et al. (2002, 73) aufgrund von Geländebefunden als nicht belegbar zurück.
- Zum Vergleich: Im *extrem trockenen* Vollwüstenklima der zentralen Sahara beträgt heute der Niederschlag zwischen 0 und ca. 17 mm/Jahr; der maximale Wert wird nur von der Station Tamanrasset (Südalgerien) in der südlichen Zentralsahara im August/September durch schwache Ausläufer des tropischen Monsunregens erreicht (BUSCHE 1998, 9).

- ⁷ BUSCHE et al. (2002, 75-76) versuchen, zwischen Endtertiär und Gegenwart 4 Karstgenerationen zu unterscheiden; das muss hier nicht im Einzelnen diskutiert werden.
- ⁸ Wichtig ist, dass nur bezüglich hoher Breiten und nur für bestimmte Zeiten das Pleistozän als *Eiszeit* bezeichnet werden kann (Tab. 1; vgl. BUSCHE 2005, 79). Ferner geht man davon aus, dass die pleistozänen Pluvial- und Interpluvialzeiten in den Tropen und Subtropen nicht mit den Warm- und Kaltzeiten der hohen geographischen Breiten synchron verlaufen sind (BUSCHE 1998, 69; vgl. SCHWARZBACH 1988, 224-226, 238).
- ⁹ Zumindest das letzte Pluvial hat es in allen Wüsten der Erde gegeben (so BUSCHE 2005, 26).
- ¹⁰ Nach BUSCHE et al. (2002, 74) habe es „offenbar Schwellenwerte“ gegeben, „bei deren Unterschreitung jeweils ein weiterer Teil des Diapirs aus der Flächenbildung herausfiel, weil der Lösungsabtrag – warum auch immer – weniger Effektiv als in seiner Umgebung war“. Doch worin solche Schwellenwerte begründet sein sollen, wird nicht gesagt.
- ¹¹ Vielleicht konnten zurzeit dieser starken pluvialen Lösungsschübe die Salzsolen aus der Großen Kevir-Ebene noch oder erneut abfließen. BUSCHE et al. (2002, 71) erwägen die Hypothese, dass sich die endgültige Abflusslosigkeit der Ebene erst im Laufe des Pleistozäns entwickelt habe.
- ¹² Die Hebungsgeschwindigkeit der meisten Diapire der Großen Kevir-Ebene scheint geringer gewesen zu sein als das des Kuh-e-Namak; sie wurden im Niveau der Rumpffläche gelöst (s. Text). Hier übertraf die Lösungsrate die Hebungswerte.
- ¹³ Hier wird *ausschließlich* dieser Aspekt quartärer Geomorphologie behandelt; zahlreiche andere geowissenschaftliche Probleme, die Zeitfragen des Pleistozäns betreffen, bleiben möglichen späteren Bearbeitungen vorbehalten. Dieser Methodik folgt zu recht auch BRANDT (2006), der sich ausschließlich auf zwei Themen konzentriert, die menschliche Bevölkerungsentwicklung und die Anzahl der altsteinzeitlichen Werkzeuge. Die Altsteinzeit (Paläolithikum) umfasst den weitaus größten Teil des Quartär (z.B. ZIEGLER 1999); jedoch sind die Werkzeugmengen „im konventionellen Zeitrahmen um einen etwa vierstelligen Faktor zu niedrig“ (BRANDT 2006, 146). Beide Aspekte führen zu dem Schluss, dass die (quartäre) Menschheitsgeschichte statt der radiometrisch datierten 2 Millionen Jahre „nur einige Tausend Jahre gedauert haben“ dürfte (149). – Zur wissenschaftstheoretischen Rechtfertigung dieser Methodik vgl. M. STEPHAN: Entgegnung auf einige Aspekte der Kritik an der biblisch-urgeschichtlichen Geologie; [www.wort-und-wissen.de/artikel/a01/a01/pdf, 41-54](http://www.wort-und-wissen.de/artikel/a01/a01/pdf,41-54).

Fleckige Flügel für Fruchtfliegen

Evolution komplexer Eigenschaften: veränderte Regulation oder echter Neuerwerb?

Niko Winkler, Rosenbergweg 29, Baiersbrunn

Zusammenfassung: Verschiedene Fruchtfliegenarten haben unterschiedliche Flügelmuster. Bisher fraglich war, wie diese Muster entstehen; insbesondere dann, wenn nahe verwandte Arten nur durchsichtige, ungemusterte Flügel besitzen. Es konnte gezeigt werden, dass kleine genetische Änderungen in den Regulationsbereichen eines farbgebenden Gens dafür verantwortlich sind. Die grundsätzliche Frage nach der Entstehung der zugrunde liegenden regulativen Netzwerke wird dadurch allerdings nicht beantwortet.

Die Regulation von Farbigkeit

Das Aussehen von Organismen wird unter anderem von ihren Genen kontrolliert. So sind beispielsweise Wellensittiche in ihrer australischen Heimat normalerweise grün. Ihre Federn enthalten sowohl einen blauen als auch einen gelben Farbstoff. Fällt Blau aus, so erscheinen die Tiere gelb, fällt Gelb aus, so erhalten wir blaue Wellensittiche. Daneben sind die dunklen Federn mit

einem weiteren Farbstoff, Melanin, farblich abgesetzt. Beim Ausfall aller drei Farben erhält man reinweiße Tiere. Die Veränderung solcher Farbmuster ist in der Natur jedoch eher selten auf einen Totalausfall (Verlustmutation) zurückzuführen. Meistens sind die Farb- oder Musterabänderungen graduell und gehen auf eine räumlich veränderte Gen-Ausprägung zurück.

Man kann, in vereinfachter Form, Verlust- und Regulationsmutanten des Farbstoffs Melanin bei Wirbeltieren an deren Augen unterscheiden: Echte Albinos können überhaupt kein Melanin mehr produzieren und haben daher auch rote Augen (Verlustmutante). Bei Tieren mit schwarzen Augen, aber weißen Federn oder Fell ist lediglich die Melaninproduktion in den Federn bzw. im Fell herunterreguliert oder abgeschaltet (Regulationsmutante). Ein bekanntes, ja fast schon berühmtes Beispiel für eine Genregulation der Melaninproduktion ist der Birkenspanner. Es handelt sich hier um einen Falter, dessen Flügel normalerweise eine weiße Grundfarbe haben und mit braunen Flecken besprenkelt sind. Es sind aber auch völlig schwarze