

Gottfried Hofbauer

Granit-Exfoliation und die bevorzugte Position von Felsburgen *Granite exfoliation and the favored position of tors*



Abb. 1: Granit-Felsgruppen im Bodmin Moor, Cornwall. In den weiten Moorlandschaften der Britischen Inseln vermögen solche Felsen die Landschaft wesentlich deutlicher zu prägen als in den meist von Wald bestandenen Mittelgebirgen Zentraleuropas. Diese Felsgruppen finden sich nicht – wie viele andere Felsfreistellungen – an den Flanken tief eingeschnittener Täler, sondern in charakteristischer Weise auf Höhen und Kuppen.

Fig 1: Granite tors in Bodmin Moor, Cornwall. In the vast moors of the British Isles, granite tors shape the landscape much more distinctly than in the forested uplands in Central Europe. In contrast to other rock assemblages, the typical location of granite tors is not on the slopes of deeply incised rivers, but on hilltops.

Kurzfassung

Die Entstehung von Granit-Felsburgen wird – insbesondere in Deutschland – nahezu durchweg auf ein und dieselbe Entstehungsweise zurückgeführt: Demnach hätten solche Felskonstellationen ihre charakteristische Form im wesentlichen unter einer Verwitterungsdecke erhalten, in der das Gestein entlang der schon aus der Tiefe mitgebrachten Klüfte zergliedert wird. Dabei sind im wesentlichen auch die wegen ihrer

Form oft auch als „Wollsäcke“ bezeichneten rundlichen Felsformen entstanden. Nach diesem von Verwitterungsprozessen gestalteten Akt bedarf es dann nur noch einer erosiven Freilegung der im Untergrund schon vorgefertigten Felsburg.

Dieses Schema wird hier in seiner scheinbaren Allgemeingültigkeit in Frage gestellt. Wir erkennen darin überdies ein Abbild traditioneller Zuständigkeiten einzelner geowissen-

schaftlicher Arbeitsrichtungen, wobei sich Tektonik (die Anlage und Überlieferung der Klüfte aus der Tiefe) und Klimamorphologie (tiefreichende chemische Verwitterung in Vorzeitklimaten) den zu erklärenden Gegenstandsbereich in deutlich abgegrenzter Weise aufteilen. Die Freilegung der Felsgruppe ist dann letztlich nur noch der Epilog. Beobachtungen an freiliegenden Granitkörpern zeigen jedoch, dass Felsgruppen in der Regel aus abgelösten und in der Folge in kleinere Abschnitte zerbrochenen Schalen hervorgehen. Diese Schalen sind das Ergebnis einer auch als **Exfoliation** bezeichneten Zerklüftung des Gesteins entlang erst oberflächennah aufspringender Trennflächen, die meist eine mehr oder weniger ausgeprägte domartige Wölbung zeigen. Felsgruppen, die aus solchen fragmentierten Exfoliationsstrukturen hervorgehen, haben ihren stabilsten Ort in den Scheitelbereichen dieser Aufwölbungen.

An den meisten Granitfelsgruppen ist zudem deutlich erkennbar, dass ihre vertikale Zergliederung im wesentlichen erst an der Oberfläche oder oberflächennah stattfindet. Umgekehrt würde eine schon vor der Dekompression angelegte vertikale Klüftung der Exfoliation entgegenwirken, da diese nur dann möglich ist, wenn möglichst große Schalenabschnitte felsmechanisch kohärent reagieren können und nicht schon vorneweg in kleine Abschnitte untergliedert sind.

Wir können daher annehmen, dass die meisten auf Höhen sitzenden Felsgruppen in dieser Weise aus Exfoliationsstrukturen heraus angelegt wurden. Tiefgreifende Verwitterungseffekte, wie sie bislang regelhaft als Erklärung angeführt wurden, wären für ihre Entstehung demnach nicht nur völlig bedeutungslos, sondern sogar kontraproduktiv.

Das betrifft auch den im Zusammenhang mit der Entstehung von Felsburgen zumeist vernachlässigten Prozess der Krustenbildung. Während die Bildung solcher Krusten unter Bedeckung nur schwer zur längerfristigen

Stabilisierung einer Felsoberfläche führen kann, ist sie im Freien durch die Besiedelung mit Flechten und wechselnde atmosphärischen Bedingungen stark begünstigt.

English abstract at the end of the article

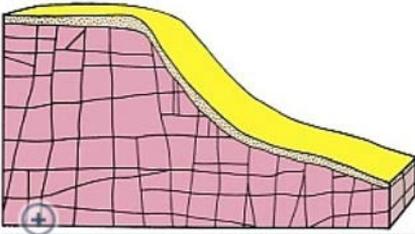
1. Felsgruppen (Tors)

Felsgruppen, mitunter auch in spektakulären Formen arrangiert, sind auffälliges Element vieler Granitlandschaften. Bekannte Beispiele gibt es auch in Deutschland zur Genüge – die Felsgruppen über dem Okertal im Harz, die Greifensteine im Erzgebirge, die Drei-Brüder-Felsen und der Rudolfstein im Fichtelgebirge oder die Felsen am Weißenstein im Steinwald. In den unbewaldeten Moorlandschaften der britischen Inseln vermögen solche Felsen die Landschaft in viel deutlicherer Weise zu prägen – zugleich ist dort auch zu sehen, dass diese Felsgruppen bevorzugt auf Geländerücken und Kuppen auftreten (Abb. 1). Dieser Umstand mag dazu beigetragen haben, dass die aus dem keltischen stammende Bezeichnung „tor“ (Hügel) als Fachbegriff für solche Felsgebilde in die internationale Wissenschaftssprache gelangte [1].

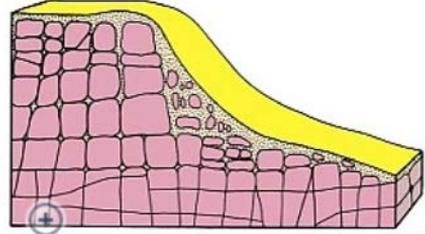
2. Traditionelle Erklärungsmuster

Die Entstehung dieser Felsgruppen wird in den betreffenden naturkundlichen Erläuterungen zumeist auf ein und dasselbe Schema zurückgeführt: Demnach wären die Felsen im wesentlichen das Ergebnis einer innerhalb des Bodens oder einer Verwitterungsschicht vollzogenen Zersetzung. Dabei wurden bereits aus der vorangegangenen Geschichte des Granits überlieferte Klüfte geweitet, wobei die einzelnen Segmente des Granits auch die Abrundung zu den charakteristischen „Kissen“ oder „Wollsäcken“ erfuhren. In einer nachfolgenden Abtragungsepisode wurden die Felsen schließlich freigelegt – befreit vom stützenden Sediment folgen Verstürze und weitere Zerstörung (Abb. 2). Der letzte Akt dieses Prozesses wur-

Entstehung der Felstürme



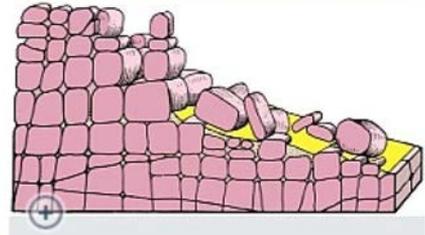
1) Granit, geklüftet und durch Abtragung freigelegt



2) Das Eindringen von Wasser führt zur Verwitterung von Kanten und Ecken. Die Gesteinskörper werden abgerundet



3) Nach dem Wegspülen des Verwitterungsgruses bleiben die "Granitwollsäcke" felsbildend an der ursprünglichen Stelle zurück

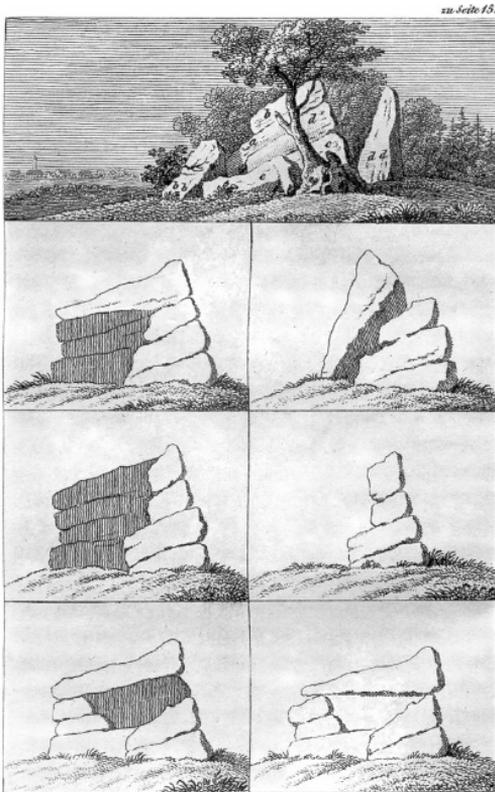


4) Im Laufe der Zeit kommt es zum teilweisen oder vollständigen Zusammenbruch der Felsen. Es entstehen blockmeere am tieferen Hang

Abb. 2: Das traditionelle Erklärungsmodell zur Entstehung von Granitfelsgruppen. Dieses Beispiel wurde aus der Geotop-Beschreibung für die „Drei-Brüder-Felsen“ (Fichtelgebirge) entnommen, die Bildunterschriften stammen aus dem Originaltext [2]. Weitgehend ähnliche Erklärungen finden sich an vielen anderen Granitfels-Gruppen, gleich in welcher Geländesituation sie angetroffen werden. Diese Erklärungen fokussieren sich räumlich ausschließlich auf die Felsgruppen und vernachlässigen deren Position im weiteren räumlichen und strukturellen Zusammenhang des Granitkörpers. Man beachte weiter, dass die Segmentierung entlang von Klüften nach diesem Schema im wesentlichen bereits unter der Verwitterungsschicht abgeschlossen wird. Diese Darstellung steht der Beobachtung entgegen, dass die Felsgruppen in der Regel aus relativ wenig zerklüfteten Felsbereichen hervorgehen und die späte vertikale Zergliederung von Felsgruppen erst an der Oberfläche oder zumindest in Oberflächennähe erfolgt.

Fig. 2: Traditional explanation of the origin of granite tors. This sample is taken from the description of the „Drei-Brüder-Felsen“, a geotope in the Fichtelgebirge, North Bavaria; the captions are the original text [2]. Broadly similar explanations can be found for other tors, independently of their topographical situation. A common feature of this standard explanation is the focus on the tors without regard to the structural context with the granite body in its broader context. Within this model, the disintegration of the granite is accomplished entirely inside the regolith cover. This explanation is in contradiction to observations, that tors have their origin in relatively weakly fractured parts of the granite, while final disintegration by vertical fracturing happens mainly on the surface or near the surface under the influence of gravity.

de im Grunde schon von Goethe so verstanden und in einer auch heute noch modern wirkenden Skizzenfolge illustriert (Abb. 3).



Goethes Werke 51^{ter} Bd.

Abb. 3: Goethes modern anmutende Skizze aus dem Jahr 1820 zur Entstehung von verstürzten Felsgruppen ist an der Granitblock-Landschaft der Luisenburg (Fichtelgebirge) orientiert. Die schraffierten Bereiche in der linken Spalte („vorher“) sind in der rechten („nachher“) verloren gegangen [3].

Fig 3: Notwithstanding its origin as early as 1820, Goethe's sketch of a collapsed rock group has a modern touch. It was designed to explain the block chaos of the Luisenburg (Fichtelgebirge, North Bavaria). The hatched parts in the left column („earlier“) were lost in the right column („later“) [3].

Dieses Modell trennt deutlich unterschiedliche Entwicklungsschritte von einander ab. Die Anlage der tektonischen Strukturen, also insbesondere der Klüfte, die später als Leitbahnen für die chemische Verwitterung

diene, geht voran. Dieses Strukturinventar bringt der Granit in diesem Modell aus seiner in der Tiefe der Kruste erfahrenen Frühzeit mit nach oben. Im nächsten Schritt ist der Granit von seinem Gesteinsdach befreit und liegt nun nahe der Oberfläche. Schon vor der endgültigen Freilegung wird der feste Fels dort von der Verwitterung erfasst.

Ein wichtiger Aspekt des traditionellen Modells ist, dass diese Verwitterung nicht an der freien Oberfläche, sondern in der Verwitterungsdecke stattfinden soll. Unter diesen Umständen herrschen anhaltend feuchte Bedingungen, die vor allem die chemische Zersetzung des Gesteins begünstigen. Leitbahnen der Verwitterung sind die Klüfte, entlang derer der Granit segmentiert und zu den oft auch als „Wollsäcke“ bezeichneten Formen zugerundet wird. Der letzte Akt ist die erosive Freilegung dieser Formen: Befreit von dem durch die Verwitterung entstandenen Lockersediment bleiben die fest gebliebenen Bereiche als Felsgruppen zurück.

An dieser Stelle gilt es anzumerken, dass dieses Modell die Vorstellung beinhaltet, dass im Untergrund die Grenze zwischen verwittertem Granit und Festgestein relativ scharf verläuft. Die in der Folge freigestellten Felsen sind nämlich nicht bizarr geformte, kavernöse Ruinen, sondern relativ gleichförmig begrenzte Felsblöcke. Eine solche scharfe Begrenzung wäre tatsächlich auch im Untergrund möglich, wenn sich zwischen dem unverwitterten Gestein und der Verwitterungsumgebung eine abgrenzende **Kruste** bilden kann. Dieser Faktor wird in dem traditionellen Modell allerdings zumeist vernachlässigt.

Krustenbildung ist ein Prozess, der jedoch unter freiem Himmel wesentlich effizienter und regelhafter verläuft als in einer Verwitterungsschicht. Zum einen können an der Luft zumindest zeitweise auch trockene

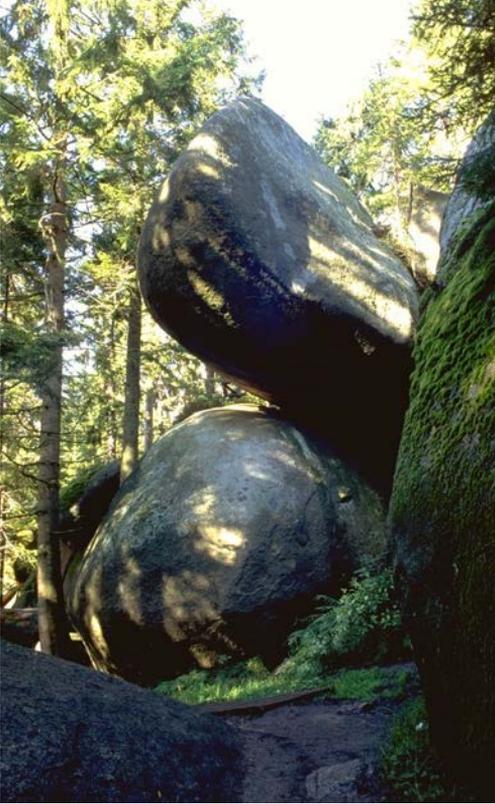


Abb. 4: Das aus verstürzten Granitblöcken bestehende Felsenlabyrinth der Luisenburg liegt am Hang eines in der jüngeren Landschaftsentwicklung zunehmend erosiv versteilten Rückens. Die Ausgangssituation kann durchaus eine breitere Höhe – oder eben gar der Scheitel einer Exfoliationsstruktur gewesen sein.

Fig. 4: The chaos of granite blocks at the Luisenburg is situated on the slope of a crest, which became steeper due to erosional processes in the more recent development of the landscape. The original situation of the former tor could have been on a broader hill or even on the culmination of an exfoliation structure.

Bedingungen herrschen, zum anderen ist auch die Besiedelung mit Photosynthese betreibenden Organismen – also Cyanobakterien und Algen als Symbionten in Flechten – möglich. An der freien Oberfläche sind Krusten nicht nur vielfältiger, sondern auch physikalisch bedeutend stabiler als innerhalb von Verwitterungs substraten [4].

Für die Bewahrung kohärenter Felsoberflächen sind mineralisch-biologische Krusten unerlässlich, wobei sich je nach klimatischen Umgebungsbedingungen unterschiedlich robuste Typen entwickeln können. Die Formentwicklung der Felstürme wird wesentlich



Abb. 5: Die meisten auf Gesteinsoberflächen entwickelten Krusten sind eine Kombination aus mineralischen und biogenen Komponenten. In diesem Fall ist die Oberfläche von Bakterien und Flechten besiedelt, wozu aber nach innen hin eine – an der rötlichen Färbung erkennbare – Zementation mit Eisenoxiden kommt. Die Kruste unterstützt den Zusammenhalt der Gesteinsoberfläche, kann aber auch wieder zerstört werden. Mte. Limbara (Sardinien).

Fig. 5: On rock surfaces, most crusts are a combination of mineral and biological components. In this case the surface is populated by bacteria and lichens, added to by cementation with iron oxides inside the rock (see red color). The crust supports the coherence of the rock surface, but it is not a permanently indestructible shield. Mte. Limbara (Sardinia).

von diesen unter freiem Himmel herrschenden Bedingungen gesteuert – Krusten, die aus dem Verwitterungs substrat überliefert worden sein könnten, würden demnach als erstes in eine „Freiluft“-Kruste umgewandelt werden. Ob ein solcher Prozess dann auch gelingt, bevor das Gestein weiter zerfällt, ist eine andere Frage.

In jedem Fall vernachlässigt das traditionelle Modell die für die Bildung von stabilen Felsen wichtige Frage der Krustenbildung. Zum anderen entspricht die in diesem Modell zum Ausdruck kommende Abfolge von Bildungsschritten in auffälliger Weise den Zuständigkeiten unterschiedlicher geowissenschaftlicher Forschungstraditionen: Die Tektonik kümmert sich um die durch die endogenen Kräfte angelegten Strukturen, also das „Reich“ des Erdinneren: hier wurde das Trennflächeninventar, also das Kluftmuster des Granits, angelegt. Das Aufgabengebiet der Geomorphologie sind hingegen die exogenen, also von außen angreifenden, formgebenden Prozesse. Hier ist es insbesondere die Klimamorphologie, die mit ihrem Interesse an tiefreichenden Verwitterungsprozessen diesen Akt in Anspruch genommen hat.

Die chemische Verwitterung wurde aus der Sicht der Klimamorphologie zudem als charakteristische Erscheinung eines wechselfeuchten Tropenklimas angesehen, wie es für die Tertiärzeit auch in Mittel- und Westeuropa angenommen wird. Aus dieser Sicht wurden die formenden Prozesse auch gleich noch zeitlich eingeordnet. Die geologische Gegenwart – das Quartär mit seinem überwiegend eiszeitlichem Klima – erschien aus dieser Sicht lediglich als kurzes Nachspiel, in dem die Felsburgen durch erosive Prozesse dann nur noch von ihrer Verwitterungsüberdeckung befreit werden mussten.

Doch es ist nicht nur das Problem, dass Felsbildungen vor allem einer stabilisierenden Krustenbildung bedürfen, das Zweifel an dem traditionellen Modell nährt. Jüngere Forschungen haben ergeben, dass ein Teil der Trennflächen des Granits erst nahe an der Oberfläche oder überhaupt erst an der Oberfläche entsteht. Dabei ist besonders bemerkenswert, dass sogar die „exogen“ geschaffenen Landschaftsformen Einfluß auf die Raumlage der Klüfte nehmen können.

Das betrifft insbesondere die schalenartigen Exfoliationsstrukturen, aus deren weiteren Zerfall offensichtlich viele Felsgruppen hervorgehen. Es gibt also gleich mehrere Gründe, dieses traditionelle Modell kritisch zu überdenken.

3. Der ideale Granit von Hans Cloos

Die Anlage von Klüften in einem Tiefengestein wie Granit unterscheidet sich von der eines Sedimentgesteins. Letzteres entsteht an der Geländeoberfläche und kann erst dann Klüfte entwickeln, wenn es nicht mehr wie ein Lockergestein Korn für Korn, sondern als zusammenhängender Verband auf ansetzende Spannungen reagieren kann. Das Lockergestein muss also erst durch hinreichende Zementation – zumeist in Verbindung mit einer mehr oder minder mächtigen Überlagerung – zu einem Festgestein geformt werden, um im Verband auf kluftbildende Spannungen reagieren zu können. Ein Granit entsteht hingegen in der Tiefe unter erheblichem Überlagerungsdruck. Die Kristallisation hat ein stark verschränktes Gefüge hervorgebracht, in dem mehrere Mineralarten eng miteinander verzahnt sind. Das ist der wesentliche Grund für das felsmechanisch so kohärente Verhalten des Granits. Das Gestein reagiert auf ansetzende Spannungen deshalb weniger durch kleinräumiges Zerbrechen als durch Absonderung in größeren räumlichen Einheiten.

Unsere Vorstellungen von der tektonischen Struktur eines Granits sind stark von dem Bild eines „idealen“ Granitplutons geprägt (Abb. 6). Die im Jahr 1923 erstmals von Hans Cloos publizierte Grafik wurde bis weit in die zweite Hälfte des 20. Jahrhunderts immer wieder in Lehrbüchern reproduziert [5]. Es entstand in einer Phase der Granitforschung, in der die Frage nach der Platznahme des Magmas die zentrale Fragestellung war. Cloos vertrat die Position, dass Granit sich nicht durch die Assimilation von Neben-

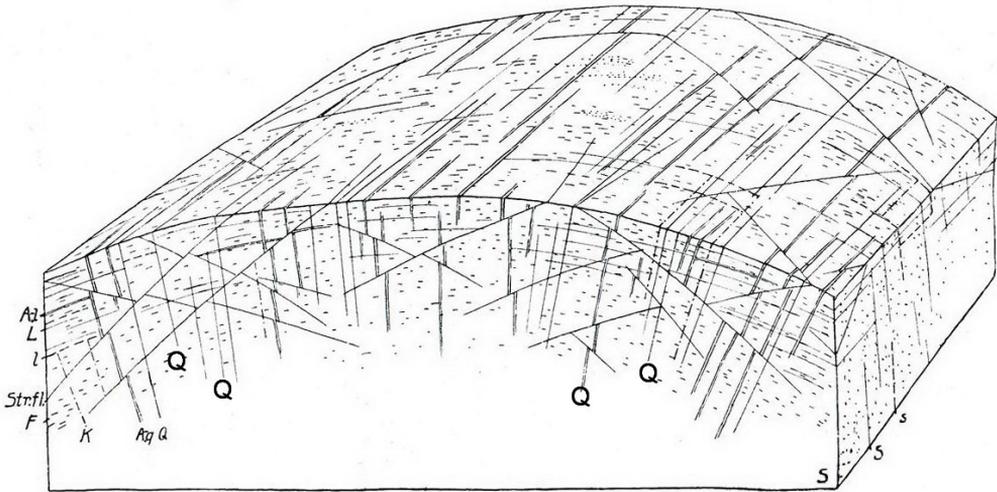


Abb. 6: Das ideale Strukturbild eines Granits von Hans Cloos 1923. **Die Platznahme eines Granits ist nicht ein einziger kurzer Akt, sondern eine lange Geschichte.** Die in einem Granit erhaltenen Strukturen können daher Zeugnisse unterschiedlicher Episoden ab dem Moment repräsentieren, in dem das Magma vom Fließzustand in den festen Zustand übergeht. Bei diesem Übergang können gerade noch aktiv gewesene Bewegungszustände als Einregelung von Kristallen oder schlierenartigen Mineralansammlungen fixiert werden. Solche magmatischen Muster sind hier als zahlreiche, kurze feine (zwischen dem rechten und linken Bildrand laufende) Striche dargestellt. Diese sind parallel zur kuppelartigen Großstruktur, wie sie auch die **Lagerklüftung (L)** zeichnet, angeordnet (die Oberfläche des Blockmodells entspricht einer Lagerklüftung). Parallel zur magmatischen Orientierung liegen die als **Längsklüfte (S)** bezeichneten Trennflächen (die Aufsichtsfläche der Skizze entspricht einer solchen Längsklüftung), während die anderen steilen/vertikalen Klüfte die magmatische Orientierung schneiden und als **Querklüfte (Q)** bezeichnet werden (zur Verdeutlichung wurden mehrere dieser Klüfte nachträglich mit „Q“ markiert; die rechte und linke Außenkante des Blockmodells entspricht einer solchen Querklüftung).

Fig. 6: The ideal structure of a granite by Hans Cloos (1923) [5]. The intrusion of a granitic magma is not a short-lived event, but rather has a long history. The structures preserved in the rock may be relics of different episodes, starting with the transition of the fluid magma to a rigid mass. The last movements of the fluid magma, as an alignment of minerals or as streaky patterns („Schlieren“) could be fixed at this stage. Such structural elements of magma movement are depicted as subtle lines (between the right and left of the figure). These are aligned parallel to the large dome-like structure marked as the „Lagerklüftung“ (L, flat-lying fractures). The surface of the model is a „Lagerklüftung“. The marked „Längsklüfte“ (S = longitudinal joints) are parallel to the magmatic orientation. The front view of the model is a „Längsklüftung“. The steep/vertical joints cut the magmatic structure and are therefore denoted as „Querklüfte“ (Q – crosscutting joints on the left and right side of the figure).

gesteinen seinen Platz verschaffe, sondern das Magma von der tieferen in die mittleren Kruste aufsteigt und sich dort mit seinem ganzen Volumen einzunisten vermag. Cloos hat aus dieser Platznahme eine lange Geschichte gemacht: Von der Intrusion der Schmelze bis zur umfassend abgeschlossenen Kristallisation muss der Granit sich gleichsam in einem Ringen mit seiner Umgebung seinen Platz schaffen. Das Strukturinventar des Granitkörpers wurde als Ausdruck dieses Ringens angesehen, zu-

gleich aber auch als Beleg seiner stofflichen wie bildungsgeschichtlichen Eigenständigkeit gegenüber seiner Umgebung.

Die Vorstellung, die Anlage der Strukturelemente eines Granitkörpers wäre mit seiner Kristallisation im wesentlichen abgeschlossen, wurde zur Zeit von Cloos von vielen Geologen geteilt. Heute wird das jedoch in mehrfacher Hinsicht in Frage gestellt – auch im Riesengebirge, das als konkretes Vorbild für den „idealen Granit“ diente.

In der Kritik steht besonders die möglicherweise zu vereinfacht wahrgenommene magmatische Struktur des Granits, aber eben auch der Umstand, dass das Strukturinventar zeitlich wie funktional zu eng an die Platznahme gekoppelt wurde [6]. Schließlich gilt es auch zu bedenken, dass der Riesengebirgs-Granit nach seiner Platznahme noch mehr als 200 Millionen Jahre den in der Erdkruste auftretenden Spannungen ausgesetzt war – ein Schicksal, das er mit all den vielen Graniten teilt, die in Mitteleuropa im Zusammenhang mit der variskischen Tektonogenese im Permokarbon entstanden [7].

Das Granit-Bild von Cloos hat aber auch zur Verbreitung einer damit verbundenen Struktur-Terminologie beigetragen. Neben Strukturen, die durch Fließbewegungen des Magmas entstanden sein können, werden horizontale Trennflächen als **Lagerklüfte** bezeichnet, während unter den steil bis senkrecht dazu orientierten Flächen **Längs- oder Querklüfte** unterschieden werden können (Abb. 6).

Eine Unterscheidung in Längs- und Querklüfte setzt allerdings einen Bezug zu einem erkennbaren übergeordneten, nicht-isometrischen Strukturelement voraus. Ein solches wäre im Falle eines Granits etwa dann gegeben, wenn der Körper eine stark asymmetrische Form hätte, bei der deutlich eine Längs- und Querachse unterschieden werden könnten. Ein anderer möglicher Bezug wäre denkbar, wenn der Granit eine erkennbare magmatische Orientierung (etwa in Form einer Kristall-Einregelung) hätte – dies war die Situation, die Hans Cloos im Riesengebirge angetroffen und für sein Modell herangezogen hat.

In der Praxis lässt sich ein solches übergeordnetes Strukturelement allerdings häufig nicht oder nur nach mühsamen Untersuchungen identifizieren, so dass die Unterscheidung in Längs- und Querklüfte oft we-

nig Sinn macht [8]. Wir können diese Klüfte im folgenden auch pragmatisch als **Vertikalklüfte** oder steile Klüfte zusammenfassen, wobei sich „vertikal“ nicht auf die absolute Raumlage, sondern auf die weitgehend rechtwinklige Stellung zu den Lagerklüften bezieht, die ihrerseits aber keineswegs immer in strenger Weise horizontal ausgerichtet erscheinen, sondern auch mehr oder weniger stark gekrümmt sein können.

In vielen Fällen nimmt die Krümmung von „Lagerklüften“ so zu, dass diese Bezeichnung wie auch ihre Bedeutung problematisch wird. Geologen neigen dann mitunter dazu, von einer „zwiebelschalenartigen“ Struktur zu sprechen (auch in der englischen Literatur finden wir den Begriff "onion fractures"). Eine weitere, aber bereits genetisch orientierte Bezeichnung ist „Exfoliations-Kluft“ (im Englischen exfoliation joint, sheet joint bzw. sheet fracture). Der Begriff „Exfoliation“ betont die oft auch visuell sehr markante „Herausschälung“ des Granits. Diese schalenartig gekrümmten Klüfte sind ein markantes Merkmal vieler Granitmassen, die dadurch halbkuppelförmige, domartige Konturen annehmen können und sich wie eine russische Matroschka immer wieder in ähnlicher, aber jeweils kleinerer Gestalt aus den jeweils äußeren Schalen herauslösen.

4. Exfoliation vs. Lagerklüftung

Der soeben schon skizzierte Schritt von der „Lagerkluft“ zur meist mehr oder weniger stark gekrümmten Exfoliations- oder Schalenklüftung ist jedoch nicht mehr im Sinne des Granitbildes von Cloos [9]. Zwar hat der Granit in seinem Modell insgesamt eine leichte Wölbung, diese wurde jedoch als Ausdruck seiner nach oben drängenden Platznahme angesehen. Die Lagerklüftung ist im Riesengebirge auch nicht auf den Granit beschränkt, sondern zieht von diesem in den umgebenden geologischen Rahmen weiter – ein Umstand, der von Cloos als



Abb. 7: Blick über die Hochfläche von Bodmin Moor (Cornwall). Exfoliations-Dome haben in der Regel Durchmesser kleiner 1 km und sind damit zumeist wesentlich kleiner als der Granitkörper insgesamt. Diese Ansicht zeigt eine relativ flache Aufwölbung mit einem breiten Scheitel, auf dem gleich mehrere Felsgruppen – natürlich nur zeitlich begrenzt – stabil bleiben konnten.

Fig. 7: The view over Bodmin Moore (Cornwall) displays an exfoliation dome. The curvature is rather low and the diameter is less than 1 km, which is a typical size for domes, being much smaller than the granite body as a whole. The broad culmination is a stable platform for tors.

Folge der Aufwölbung interpretiert wurde, die mit der Platznahme des Granits auch seine Umgebung erfasste und daher auch als eine schon in der Tiefe angelegte Struktur angesehen werden konnte [10].

Die Exfoliationsklüftung, wie sie in der jüngeren Literatur beschrieben wird, hat also mit der Lagerklüftung im Sinne von Cloos nicht mehr gemeinsam, als das sie – trotz der mehr oder weniger starken Krümmung – als eine im Grunde horizontal orientierte Anlage erscheint. Die dabei auftretenden, domartigen Aufwölbungen betreffen dabei aber nicht einen Granitkörper insgesamt, sondern in der Regel nur einzelne Teilbereiche. Ein Granitkörper kann somit viele, nebeneinander sitzende domartige Exfoliationsstrukturen aufweisen. Prominente Beispiele sind im Capanne-Granit (Elba, Abb. 8) oder den Cairngorms im Schottischen Hochland zu beobachten, wo die Exfoliations-Dome charakteristische Durchmesser von wenigen 100 m bis zu etwa 1 km aufweisen [11].

Am Beispiel des Granits vom Monte Pindo (Spanien) können wir die Beziehung zwischen Exfoliationsklüften und erst dann folgenden Vertikalklüften deutlich beobachten (Abb. 11). Der Granitkörper wurde offensichtlich zuerst von der Oberfläche her in mehr oder weniger weitreichende Schalen zerlegt. Die trennenden Flächen sind nach oben gewölbt, wie es bei Exfoliationsklüften zumeist der Fall ist. Erst in einem folgenden Schritt zerbrachen die derart abgelösten Schalen in kleinere Segmente. Die trennenden Brüche können als Vertikalklüfte bezeichnet werden, wobei allerdings nicht deutlich ist, ob diese hier wie ältere, die aus größere Tiefe kommen, ein regelmässiges Muster bilden oder das Auseinanderbrechen nicht eher zufälligen lokalen Unebenheiten folgt [12].

Diese Beobachtungen lassen sich ohne weiteres auf den etwas kleiner dimensionierten Schlossberg von Flossenbürg übertragen. Der in seiner Weiträumigkeit außergewöhn-

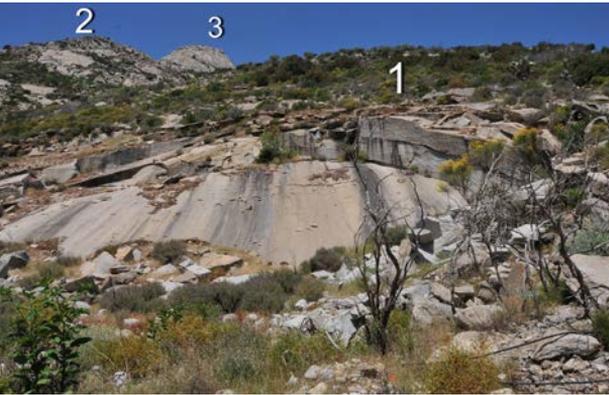


Abb. 8: Drei nebeneinander sitzende, von Exfoliations-Strukturen bestimmte Dome im Capanne-Granit (Elba). Lok. Pomonte.

Fig. 8: A group of three domes, each with prominent exfoliation structures. Capanne granite (loc. Pomonte, Elba, Italy).

liche Aufschluß belegt, dass die in anderen Klimaten beobachtbaren strukturellen Erscheinungen auch unter mitteleuropäischen Verhältnissen zu finden sind (Abb. 12, 13). Tatsächlich können wir derartige Exfoliationsstrukturen im Grunde erdweit nachweisen, was gegen eine besondere Klimaempfindlichkeit dieser Strukturen spricht [13].

Zugleich zeigt die steiler entwickelte Form in Flossenbürg besonders deutlich, dass Felsgruppen nur in den Bereichen für eine gewisse Zeit stabil erhalten werden können, in denen ihre Basis weitgehend eben ist (vgl. Abb. 10). In den Fällen, in denen eine mehr oder weniger domartige Exfoliationsklüftung angelegt ist, können das nur die Scheitelbereiche dieser Strukturen sein. Dies ist in spektakulärer Weise auch am Torre di San Giovanni (Elba, Italien) zu beobachten, auf dessen nur sehr schmalen Scheitel sich gerade noch ein Felssegment zu halten vermochte – wäre es nicht beizeiten in die Burgmauer integriert worden, würde dieser Abschnitt heute vielleicht schon inmitten der vielen anderen, den Fuß des Felsen säumenden Blöcken liegen (Abb. 14, 15).



Abb. 9: Inselberg mit konturparalleler Schalenklüftung. Von der einst weiter nach außen reichenden linken Flanke (schwarze Strichelung) sind die Fußbereiche noch erhalten. Monte Pulchiana 673 m, Nord-Sardinien.

Fig. 9: "Inselberg" with an exfoliation structure mostly parallel to its outer form. On the left flank of the mountain, the rest of an older exfoliation sheet is still preserved (the black dashed line).

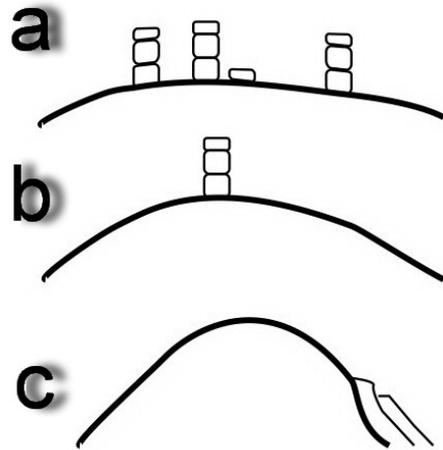


Abb. 10: Flach gewölbte Dome (a) können umfangreichere Felsgruppen stabil halten, während steilere Strukturen nur einen schmalen Scheitelbereich aufweisen (b) oder eben überhaupt keine längerfristige gravitative Stabilisierung bieten können (c).

Fig. 10: Low domes (a) are able to support broader tors, while steeper structures have only narrow culminations (b). More extreme forms are unable to stabilize tors for longer periods (c).

Der Torre di San Giovanni entspricht dem Endstadium einer Entwicklung, nach der nur noch der abschließende Zerfall dieser Felsburg folgen kann. Zugleich sehen wir an ihm



Abb. 11: Granit am Fuß des Monte Pindo (Galizien, Nordwest-Spanien). Die Hangkonturen folgen weitgehend der schalenförmigen Absonderung des Granits. **Die Öffnung dieser Exfoliationsklüfte ist der erste Schritt in der Zerlegung des Gesteinskörpers, der zweite besteht in der Auflösung der weiträumig zusammenhängenden Platten in kleinere Teile und Blöcke.** Die aufreißenden Vertikalklüfte müssen sich dabei offensichtlich nicht notwendig an möglicherweise schon vorgezeichneten, regelmässig strukturierten Klufthemustern orientieren: **in vielen Fällen scheinen instabile aktuelle Hanglagen das Auseinanderbrechen der Platten zu steuern.** Auf den relativ glatten Exfoliations-Klufflächen können segmentierte Schalenreste nur in Bereichen mit relativ flacher Neigung oder im Scheitelbereich längerfristig stabil lagern. Auf den Oberflächen älterer Segmente sind zudem rinnenartige Erosionsformen als Folge ablaufender Niederschläge zu sehen (siehe den großen Block im Vordergrund).

Fig. 11: Granite at the base of Monte Pindo (Galicia, NW-Spain). The slope morphology follows generally the curved sheets of the granite. The opening of these exfoliation joints is the first step in the disintegration of the granite body, the second step is the fracturing of the sheets, which are cohesive over a rather long range. Here, the steep fractures („Vertikalklüfte“) do not necessarily follow a predetermined and regular joint pattern: in many cases accidental instabilities seem to direct the late fracturing process. On the relatively smooth surfaces of the exfoliation joints, segmented sheets can stay for longer periods only on the culminations or on parts with a flatter slope. The surface of some older blocks is marked by gullies as a result of present erosion by rain (the large block in the foreground).

in besonders deutlicher Weise, wie rundliche Formen ohne weiteres an der Erdoberfläche entstehen können, wobei es sich nicht um ein Resultat der Verwitterung, sondern um ein besonderes felsmechanisches Verhalten handelt: die bei der Exfoliation freigelegten Flächen sind nicht raue Verwitterungsflächen, sondern relativ glatte, zusammenhängende Ablösungsstrukturen.

Der Torre di San Giovanne kann auch als restlicher Kern eines **Inselberges** angesehen

werden. Der Begriff Inselberg ist primär geomorphologischer Natur, indem er einen einsam über einer Ebene stehenden Berg bezeichnet (Abb. 9) [14]. Viele Inselberge zeigen allerdings eine ausgeprägte Exfoliationsklüftung, so dass eine ursächliche Verbindung ihrer Gestalt mit dieser Art von strukturbildender Absonderung wahrscheinlich ist.

Exfoliationsklüftung ist zwar ein charakteristisches Merkmal von Granitformen, aber



Abb. 12: Flossenbürg (Ansicht von Süden). Die Felsgruppe mit der Burgruine befindet sich auf der Kulmination der von den Schalenklüften gebildeten Kuppel. Deren Flanken sind zu steil, als dass dort Felsgruppen gehalten werden könnten.

Fig. 12: The castle koppie of Flossenbürg from the south. The tor is sitting on the culmination of the exfoliation structure. Its sides are too steep to stabilize a rock group.



Abb. 13: Flossenbürg: Etwas versetzte Ansicht mit Details der Schalenklüftung und der aufsitzenden Felsgruppe. Man beachte die glatte Oberfläche der im Vordergrund in Aufsicht erkennbaren Exfoliationsklüft.

Fig. 13: Flossenbürg, a different view revealing details of the exfoliation joints and the tor on the top. Notice the smooth surface of the exfoliation joint in the foreground.

nicht auf dieses Gestein beschränkt. Gesteine mit einem ähnlich fest verzahnten Gefüge sind relativ selten, zeigen dann aber auch ähnliches Verhalten. Ein treffendes Beispiel ist der aus fest zementiertem Arkose-Sandstein aufgebaute Uluru (Abb. 16, 17).

Solange Felsburgen in der hier vorgestellten Weise aus Abfolgen übereinander gestapelter Exfoliationssegmente bestehen, können

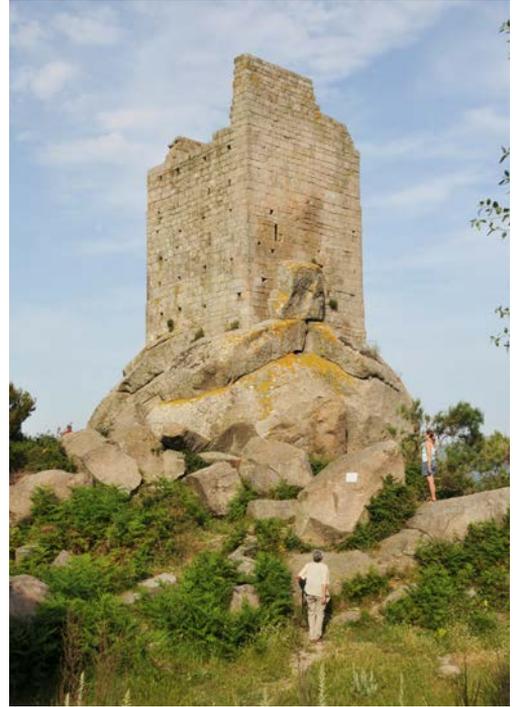


Abb. 14: Der Torre di San Giovanni (Elba, Italien) steht auf einer kleinen, strukturell gesonderten Kuppe des Capanne-Plutons. Die Exfoliationsklüftung zeichnet die Kuppel in perfekter, halbkreisförmiger Kontur vor. Am Scheitelpunkt ist ein Granit-Quader als Rest der sonst bereits völlig abgetragenen nächst äußeren Schale erhalten und in das Fundament des Turms integriert.

Fig. 14: The Torre di San Giovanni (Elba, Italy) is built on a small crest, which is a separate structure in the Capanne pluton. The exfoliation joints surround the dome in a perfect semicircle. On the culmination a square stone is preserved as the last relic of an outer shell which was otherwise totally eroded, safe in the foundation of the tower.

uns die gut aufgeschlossenen Granite wie am Monte Pindo oder am Flossenbürger Schlossberg zuverlässige Vorlagen für die strukturell gesteuerte Entstehung dieser Formen geben. Es ist also keine Laune der Landschaftsentwicklung, wenn wir etwa in den Moorlandschaften Britanniens die Felsburgen als tors auf den Kuppen antreffen (Abb. 1, 7), sondern eine Konsequenz aus dem Entlastungsverhalten von Gesteinen, die aus großer Tiefe den Weg ans Licht gefunden



Abb. 15: Detail aus der Exfoliationsklüftung unter dem Torre di San Giovanni (siehe Abb. 14., links). Die Klüftflächen sind glatt und belegen die mechanisch durchgreifende Ablösung. Die innere der beiden Schalenklüftflächen ist weniger verwittert als die äußere und dokumentiert die sukzessive Entwicklung der Abschaltung und die Freilegung zunehmend enger gerundeter Formen.

Fig. 15: Detail of the exfoliation joint beneath the Torre di San Giovanni (see also left, Fig 14). The surfaces of the joint are smooth as a result of a sharp mechanical rupture. In consequence of the relatively later fracturing in the progress of exfoliation, the inner joint looks fresher than the outer and documents the successive development of the sheeting and the exposure of increasingly more tightly rounded forms.

haben. Felsgruppen können sich natürlich auch in anderen morphologischen Situationen bilden. Sehen wir von extremen Umgebungen wie Hochgebirgen ab, dann finden wir Felsfreistellungen vor allem in Hangsituationen. Dort führt die verstärkte, zum Tal hin orientierte Abtragung von Lockermaterial zur Freilegung von Felsen. So finden wir viele Täler seitlich von



Abb. 16: Exfoliationsklüftung an der Flanke des Uluru (Australien). Die Klüftung (Pfeilmarkierung) schneidet die Schichtung des fest zementierten klastischen Sedimentgesteins. Die Schale rechts ist zudem leicht angehoben.

Fig. 16: Exfoliation joints on the slope of Uluru (Australia). The joints (marked by arrows) cut the bedding of the tightly cemented sedimentary rock. The sheet on the right is detached.



Abb. 17: Exfoliationsklüftung an einer kleinen Randkuppe des Uluru (Australien). Wie bei den Granitkuppeln sind im Kulminationsbereich blockartig zerfallene Reste früherer Schalen erhalten.

Fig. 17: Exfoliation sheets on a small hill on the edge of Uluru (Australia). Similar to granite domes, the culmination is cluttered with blocks of a disaggregated exfoliation sheet.

Felsgruppen begleitet. Diese Felsen können dann aber aus jedem beliebigen Festgestein bestehen, wobei ihre Position in Hanglagen im Vergleich zu den auf den Höhen sitzenden Granitfels-Gruppen aber nur eine relativ kurzlebige Stabilität gewährt.

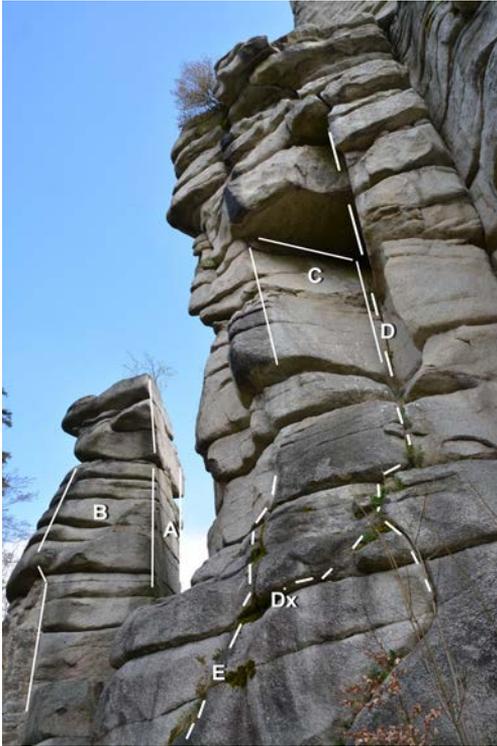


Abb. 18: Die Isolation in einzelne Türme erfolgt durch den weiteren Zerfall größere Felsgruppen entlang vertikaler und auch diagonalen Klüfte. Die Kluft A ist relativ jünger als die Kluft B, entlang der die Lagerklüfte schon deutlich weiter ausgewittert sind. Ein diagonaler Ausbruch ist entlang der Kluft C erfolgt, die seitlich von der relativ älteren Kluft D begrenzt wird. Die Kluft D setzt sich ihrerseits nicht geradlinig nach unten hin fort, sondern verzweigt sich, wobei ein Ast in einer schon existenten Lagerklüft ausläuft. Eine weitere Diagonalkluft E hat erstaunlicherweise noch nicht zum Abriss der links davon liegenden Felskissen geführt. Weißenstein (Steinwald, Nordostbayern).

Fig. 18: Tors are disintegrated into isolated towers by vertical and transverse fractures. Fracture A is younger than B, where the horizontal joints (Lagerklüfte) are more pronounced because of advanced weathering. A transverse rupture follows joint C, which is terminated by the older fracture D. But D has no straight continuity to the bottom. Instead one part of it branches with one part into a preexistent Lagerklüft. Another transversal joint E has not yet resulted in a rupture of the rocks on the left side. Weißenstein (Steinwald, NE-Bavaria).

5. Vertikaler Zerfall als letzter Akt

Gegen die traditionelle Interpretation der Granit-Felsgruppen spricht ein weiterer, ein-



Abb. 19: Rundliche, „Wollsack“-artige Formen können auch bei der vertikalen Zerteilung abgesprengter Schalen in direkter Weise – ohne tiefgreifende Verwitterung – entstehen. Granite Gorge (Australien)

Fig. 19: Round “Woolsack” forms can be formed directly along vertical fractures. Deep weathering is not a necessary condition. Granite Gorge (Australia).

fach wahrzunehmender Umstand: die „Vertikalklüftung“, die der Verwitterung den Weg zur Zergliederung des Granits in „Wollsäcke“ weisen soll, entsteht im Grunde erst nach der Abspaltung einer Schale oder auch einer Abfolge von Schalen.

Dies ist auf der einen Seite eine mechanische Notwendigkeit: jede vertikale Kluft würde den felsmechanischen Zusammenhang einer Schale zerstören. Zum anderen lässt sich das ohne weiteres an vielen Felsgruppen direkt an der Frische der durch Abrisse freigelegten Klüftflächen beobachten. Die vertikale Klüftung führt so zur weiteren Zergliederung der

Felsgruppen, bis diese schließlich gänzlich kollabiert sind. Wesentliche Kraft hinter dieser weiteren Zerklüftung sind Zugspannungen, allein durch Gravitation und/oder Destabilisierung der Basis.

Auf den ersten Blick erstaunlich ist allerdings die Mächtigkeit der Felsgruppen, die Stapel über viele von Lagerklüften getrennte Segmente bilden können. Die vertikalen Klüfte können offensichtlich durch diese Stapel hindurch schlagen, was nur dann möglich ist, wenn diese in einem felsmechanischen Zusammenhang stehen.

Das kann aber nur dann der Fall sein, wenn die Lagerklüfte nicht durchgehend sind – sie also keine wirklichen Exfoliationsstrukturen sind. Nicht alle horizontalen Strukturelemente müssen als primäre Exfoliationsstrukturen angelegt worden sein – eine später folgende, weitere Aufgliederung des Gesteins ist durchaus möglich, wobei weiträumige seitliche Kohärenz, wie sie für die Exfoliationsklüftung unabdingbar ist, nicht mehr notwendig ist. Eine andere Erklärung könnte sein, dass die felsmechanische Verbindung der einzelnen Segmente trotz durchgehender Lagerklüftung allein schon durch den von der Auflast bedingten Kontakt gegeben ist.

Mit Annäherung an die Oberfläche und letztlich frei exponiert werden die Spannungen, die die primären Exfoliationsstrukturen auslösen, zunehmend von weiteren, vor allem klimatischen und verwitterungsbedingten Effekten begleitet.

In den Jahren 2014-2016 wurde ein Granit-Exfoliations-Dom in der Sierra Nevada mit einer Vielfalt von Messgeräten bestückt und durchgehend beobachtet. Dabei wurde deutlich, dass auch thermische Effekte das Abspalten von Schalen auslösen können [15]. Das bedeutet aber nicht, dass thermische Effekte für die Exfoliation an sich ursächlich

wären – Lagerklüfte und ihre konvexen Verwandten treten bereits in Tiefen auf, die weit unterhalb der von der Oberflächentemperatur erreichten Bereiche liegen.

Mit zunehmender Zergliederung in weitere, feinere +/- oberflächenparallele Trennflächen wird es schwerer, die bestimmenden Ursachen eindeutig zu fassen. In der englischsprachigen Terminologie wird zwischen dem Abplatzen dünner, nur mm–cm mächtiger Lagen an der Oberfläche freiliegender Granite und der größeren, dm-m weite Abstände schaffenden Exfoliation unterschieden [16]. Das *flaking* genannte dünn-schalige Abplatzen wird auf ein Zusammenspiel verschiedener Verwitterungseffekte (thermische Schwankungen, Salzverwitterung, feucht-trocken-Wechsel, Expansion infolge Wasseraufnahme bei chemischer Verwitterung) zurückgeführt. Buschfeuer können ähnliche Effekte hervorrufen. Diesen Fragen in zufriedenstellender Weise nachzugehen, liegt allerdings jenseits der Reichweite dieser Arbeit.

Eine bemerkenswerte Absonderungsform verdient hier aber noch der Erwähnung. Die als **Pseudoschichtung** (*pseudobedding*) bezeichnete Zergliederung in besonders eng aufeinander folgende +/- horizontale Trennflächen ist in ihrer Entstehung bisher nicht zufriedenstellend geklärt. Ihr Vorkommen in unterschiedlichen klimatischen Milieus spricht dagegen, dass sie das Ergebnis rein äußerlicher Faktoren sein könnte [17].

Möglicherweise spielt die Geschwindigkeit der Freilegung eine Rolle, die unterschiedliche Gradienten beim Spannungsaufbau zur Folge haben könnte. Die Ursachen könnten aber auch primär magmatisch angelegt sein, in dem sie auf Gefügeunterschiede, wie Schlieren oder wiederholte pegmatitische Einschaltungen, gründen.



Abb. 20: Pseudoschichtung im Granit der Greifensteine (Erzgebirge). Ein großer Fremdgesteins-Einschluss (an der Basis der Wand) zieht offenkundig die Aufmerksamkeit einiger Besucher an: dieser Block ist von der horizontalen Absonderung nicht erfasst. Zudem befinden wir uns im oberen Bereich der Granit-Intrusion, in der auch lagerartige Kompositionswechsel zu beobachten sind.

Fig. 20: Pseudobedding at the „Greifensteine“ granite (Erzgebirge, Germany). A large xenolithic inclusion (at the base of the wall) attracts the interest of some visitors: This block is not affected by the pseudobedding. Further, the locality is situated near the top of the granite intrusion, where some horizontal changes in composition are observable.

An den Greifensteinen (Erzgebirge) lassen sich dazu einige bemerkenswerte Beobachtungen machen (Abb. 20, 21). Zum einen ist diese Felsgruppe im oberen Bereich einer Granitintrusion angesiedelt. Im Gestein lassen sich horizontale Wechsel unterschiedlicher Korngrößen beobachten, was aber nicht in systematischer Weise über den Aufschluß insgesamt verfolgt werden konnte. Weiter ist das felsmechanische Verhalten des Gesteins kleinräumig stark differenziert. So grenzen Partien mit Pseudoschichtung scharf an Segmente mit x-förmigen Kluftmustern. Weiterhin ist ein großer Xenolith weder von der Pseudoschichtung noch von den anderen strukturellen Mustern betroffen. Das Gestein hat auf ansetzende Spannungen

kleinräumig differenziert reagiert, oder die ansetzenden Spannungen waren bereits kleinräumig differenziert. Beide Möglichkeiten sprechen gegen die Anlage dieser Strukturen in der Tiefe, sondern eher für eine von umgebenden Einschränkungen wenig behinderte Reaktion an oder nahe der Geländeoberfläche. Letztlich kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass gerade die Pseudoschichtung mehr eine Folge bereits primär magmatisch angelegter Gefügeunterschiede sein könnte.

Als Fazit gilt es herauszustellen, dass die Exfoliation zweifellos bedeutend und in ihrer Wirkung grundsätzlich unumstritten ist, sich aber in einzelnen Fällen Abgrenzungspro-



Abb. 21: Die Klüftung in den Greifensteinen zeigt eine kleinräumige Differenzierung in mehrere Reaktionsbereiche. Neben Bereichen mit Pseudoschichtung (1) treffen wir auf Segmente mit relativ unregelmäßiger Lagerklüftung (2) und einen Bereich mit x-förmigen Mustern (3). Offensichtlich hat das Gestein auf ansetzende Spannungen kleinräumig differenziert reagiert, oder die ansetzenden Spannungen waren kleinräumig differenziert.

Fig. 21: Jointing in the „Greifensteine“ reveals a small-scale differentiation in several parts of the rock. Segments with pseudobedding (1) are bordered by a segment with an irregular orientation (2) and a segment with an x-pattern (3). Evidently, the rock has reacted differently to one kind of stress, or stresses were differentiated on such a small scale.

bleme gegenüber anderen, ebenfalls oberflächenparallel bzw. weitgehend horizontal orientierte Trennflächen verursachenden Prozesse ergeben können.

6. Phasen der Gefügebildung in Graniten

Während Hans Cloos uns ein Bild vorgestellt hat, in dem die Klüftstruktur eines Granits durch seine bei der Platznahme und Kristallisation herrschenden Kräfte bestimmt wird, zeigen uns viele Aufschlüsse, dass Trennflächen in Graniten auch das Ergebnis junger, an der Oberfläche oder oberflächennah stattfindender Prozesse sein können.

Versuchen wir einen grundsätzlichen Blick auf die Strukturgeschichte eines Granits, der

über die Phase der Platznahme hinaus geht und auch die Freilegung aus seiner Überdeckung mit berücksichtigt, dann lassen sich folgende Abschnitte unterscheiden (Abb. 22):

(I) Magmatische Gefüge: Fließgefüge, Schlieren oder gar magmatische Bänderung. Schlieren werden zumeist von Biotit gebildet, da dieses Mineral in der Regel zu den frühen Kristallisaten eines Granit-Magmas gehört. Die bevorzugte Ausrichtung von Mineralachsen ist hingegen besonders gut an der Einregelung von Feldspäten zu studieren. Diese Erscheinungen sind zweifellos die ältesten Strukturen, die in einem Granit erhalten werden können. Da es sich um stoffliche Inhomogenitäten handelt, können sie am

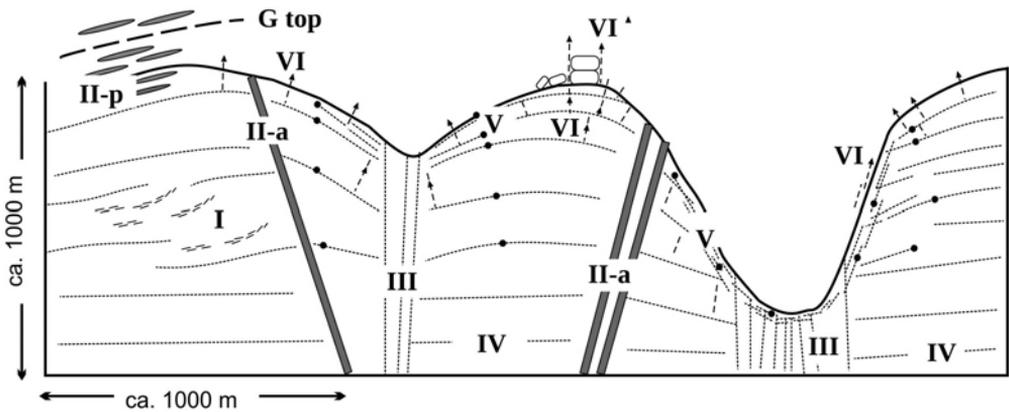


Abb. 22: Gefügegenerationen eines Granits – idealisiertes Modell. (I) Magmatische Gefüge – (II) Frühe Spaltenfüllungen: II-a Aplite, II-p Pegmatite – fluidreiche Restmagmen sammeln sich vor allem im Dachbereich von Graniten, unter Umständen auch im Nebengestein oberhalb des Granitdachs (G top) – (III) Regionaltektonische Strukturen – (IV) Bedeckte bzw. tiefe Dekompressionseffekte – (V) Oberflächennahe und oberflächliche Dekompressionseffekte, zusätzl. Punktmarkierung – (VI) Abschließende oberflächennahe und oberflächliche Zerfallseffekte, zusätzl. Pfeilmarkierung. Die Abfolge (I-III) ist Jahrzehnte altes geologisches Allgemeinwissen. Die Entwicklung der Trennflächen bei der Freilegung des Granits bzw. an der Oberfläche (IV-V) ist hingegen das Ergebnis neuerer Forschungen in der Sierra Nevada (USA), den Schweizer Alpen und den Graniten auf den Britischen Inseln [20].

Fig. 22: Generations of structural elements in an ideal granite. [I] Magmatic structures – (II) Early fissures filled with aplites (II a) and pegmatites (II p) – late magmas with high fluid concentrations accumulate preferentially in the upper parts of a granite, possibly in the rocks above its top (G top) – (III) Structures caused by regional tectonics – (IV) Deep or covered decompression structures (V) Near ground or surface decompression, marked by points – (VI) Final disintegration on the surface or in the subsurface, marked by arrows – The generations (I-III) have been common geological knowledge since decades. The steps (IV-V) are expression of the unloading of the granites and the result of more recent research in the Sierra Nevada (USA), Swiss Alps and British Isles [20].

Ende auch das Absonderungsverhalten des Gesteins an der Oberfläche beeinflussen [18].

(II) Frühe Spaltenfüllungen: Pegmatite und Aplite, die in der Spätphase der Kristallisation entstehen. Der Granit ist schon soweit kristallisiert, dass er in größeren zusammenhängenden Bereichen spröde reagieren kann. Unter diesen Umständen wie angesichts der großen Auflast sind hydraulische Aufbrüche des Gesteins von Bedeutung, die in der Folge auch gleich von den auslösenden fluidreichen Medien gefüllt werden. "Trockenes" Aufreißen von Klüften ist in großen Tiefen ohne hydraulische Unterstützung kaum möglich. [19].

(III) Regionaltektonische Strukturen aus der Zeit zwischen Abkühlung/Kristallisation und Freilegung. In der kontinentalen Kruste eingebettet, ist der Granit allen in diesem

Bereich wirksam werdenden tektonischen Spannungen ausgesetzt. Diese werden bevorzugt seitlich angreifen und können daher vor allem zur Anlage steiler bis vertikaler Klüfte führen. Solche noch in der Tiefe angelegten Vertikalklüfte sind von jenen zu unterscheiden, die erst ganz am Ende an der Oberfläche den Zerfall von Exfoliationsstrukturen herbeiführen (Gefügegeneration VI). Bereiche mit Scharen besonders dicht ausgeprägter Vertikalklüftung zeichnen bei der Freilegung des Granits die Zonen stärkerer Verwitterung vor – sie sind die wesentlichen Strukturelemente, die Granitkörper in weitere Segmente unterschiedlicher Dimension unterteilen können.

(IV) Bedeckte bzw. tiefe Dekompressionseffekte, die während der Freilegung entstehen. In der Terminologie einiger Geologen

werden diese Strukturen auch als „Syn-Aufstiegs-Klüfte“ bezeichnet [21]: weitgehend horizontale Lagerklüfte (vermutlich als früher Exfoliationseffekt) und leicht konvexe Strukturen. Tiefen von mehreren 100 Metern sind für die Entstehung solcher Trennflächen dokumentiert.

(V) Oberflächen- und oberflächliche Dekompressionseffekte: Spannungen, die in dieser späten Phase oder nach der Freilegung wirksam werden, auch „Post-Aufstiegs-Klüfte“ [21]. Diese Trennflächen zeigen häufig eine Orientierung an der umgebenden Morphologie. Möglich sind erneut steile Klufflächen sowie stark konvexe Exfoliations-Strukturen. Die domartigen Strukturen in den Abb. 8, 9, 11-15, 23 sind auf diese Effekte zurückzuführen.

(VI) Abschließende oberflächennahe und oberflächliche Zerfalleffekte sind der letzte Akt in der Geschichte eines Granits. Dazu gehört der auch durch gravitative Instabilitäten ausgelöste Zerfall von Felsgruppen, wobei durch Abrisse eine späte Generation von „Vertikalklüften“ entstehen können (vgl. Abb. 18). Weitere, nun aber von Verwitterungseffekten begleitete oder davon auch wesentlich geleitete Entwicklung oberflächenparalleler und auch anderer Absonderungsformen (vgl. Abb. 19, siehe insbesondere die Greifensteine Abb. 21). Die Abgrenzung von originalen Exfoliationsstrukturen kann in konkreten Fällen problematisch sein. Beim Zerfall von Felsgruppen lassen sich klimatisch gesteuerte Formenreihen unterscheiden (siehe Abschnitt 8). So wird am Ende jede Felsgruppe zerfallen – zuerst in einzelne Blöcke, schließlich in einzelne Körner.

Die oben verwendeten Begriffe „syn-“ und „post-Aufstieg“ in Hinblick auf die jüngeren Phasen IV-V gehen auf Arbeiten zur Felsmechanik von Graniten vor allem in den Schweizer Alpen zurück. Dort war es mög-

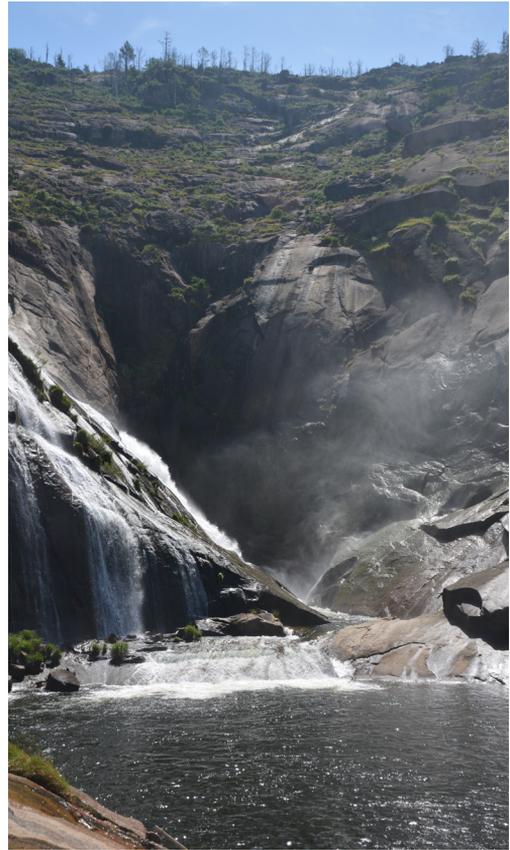


Abb. 23: Die zu einem jungen Taleinschnitt hin verstellte Schalenklüftung an der Cascada de Èzaro am Fuß des Mte. Pindo, Spanien.

Fig. 23: The exfoliation structure in the Cascada de Èzaro dips to this recent valley. Mte. Pindo, Spain.

lich, Klüfte aus mehreren Phasen der Freilegungsgeschichte des Granits zu unterscheiden [21]. Besonders spektakulär ist im Aar-Massiv das Vorkommen junger, erst an der Geländeoberfläche entstandenen Klüfte („Post-Aufstiegsklüfte). Die jüngste Generation der Klufflächen erlaubt eine präzise zeitliche Einordnung: Indem sie keine Spuren von Eisschliff aufweisen und zugleich auch tiefer (bergnäher) liegen als solche mit Schliff-Spuren, **muss ihre Entstehung erst nach dem Rückzug des Eises erfolgt sein.** Alle Gesteinsoberflächen mit Eisspuren sind in diesen Bereichen bereits abgerissen.

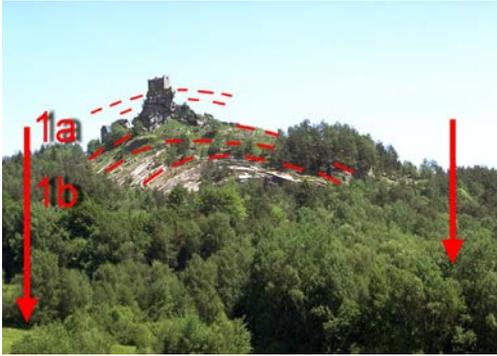


Abb. 24: Die Geschichte des Schlossbergs von Flossenbürg lässt sich in mindestens zwei Etappen gliedern. Die stark gekrümmten Exfoliationsstrukturen sind eine Reaktion auf die zu beiden Seiten erfolgte Eintiefung. Ein älterer Abschnitt der Exfoliation ist im oberen Abschnitt (Phase 1a) in Form fragmentierter Schalenreste am Scheitelpunkt erhalten. Darunter sind die relativ jüngeren Exfoliationsklüfte auf das heutige Talniveau ausgerichtet (Phase 1b). Diese Zeugnisse weisen damit vermutlich nicht weiter zurück als in die Zeit der erdgeschichtlich jungen Taleintiefung in den letzten Jahrhunderttausenden.

Fig. 24: The history of the castle rock of Flossenbürg can be subdivided into two stages. Generally, the strongly curved exfoliation structures can be explained as a reaction to the valley incision on both sides of the hill. An older stage of exfoliation is preserved as a rock assemblage (tor) on the top of the dome (1a). Beneath this older stage, the younger exfoliation joints are directed to the recent valley floor. The preserved structures are representative of recent valley incision no further back than the last hundreds of thousands of years.

Diese Studie belegt in anschaulicher Weise, dass ein beträchtlicher Teil der Klüfte erst beim oder gar nach dem Aufstieg des Granitkörpers angelegt wurden. Junge, nachkaltzeitliche Kluftstrukturen wurden auch aus den Cairngorms in Schottland beschrieben [vgl. 22]. Solche jungen, mitunter auch sehr kleinräumigen Anpassungseffekte an die Morphologie sind auch außerhalb glazial geprägter Bereiche zu beobachten. Ein prägnantes Beispiel ist die zu einem jungen Taleinschnitt orientierte Exfoliation am Fuß des Mte Pindo (Abb. 23).

Kurze felsmechanische Reaktionszeiten auf Durchstiche oder Wandzurückverlegungen

in Steinbrüchen sind auch aus der Ingenieur-Geologie bekannt und können in wenigen Jahren bis Dekaden zu bruchtektonischen Reaktionen führen [23].

Als Fazit dieser Betrachtung können wir festhalten, dass die Strukturgeschichte eines Granits mehrere Abschnitte durchläuft und daher eine komplexe Abfolge bilden kann. Auch die strukturelle Gewichtung, die sich letztlich in einem an der Oberfläche angekommenen Granitmassiv zeigt, kann von Fall zu Fall unterschiedlich sein – je nachdem, welcher der Abschnitte sich als strukturdominierend durchgesetzt hat.

Ungeachtet der möglichen strukturellen Vielfalt gilt es aber herauszustellen, dass die jungen, erst nahe oder gar ganz an der Oberfläche entstanden Trennflächen bei der Betrachtung des Granits wie in Hinblick auf die Entstehung von Felsburgen zu Unrecht vernachlässigt wurden. Die im traditionellen Erklärungsmodell so scharf vorgenommene Trennung zwischen endogener Strukturanlage (Tektonik) und Verwitterung vermag dem komplexen Ineinandergreifen exogener und endogener Faktoren, sowie der Beteiligung von Organismen bei der Entwicklung von Krusten, nicht zu genügen. Für die Felsen am Schloßberg von Flossenbürg ergibt sich am Ende aber dennoch eine klare und einfache Geschichte (Abb. 24).

7. Pop-Ups

Hinweise auf eine weitere, allerdings endogene Disposition wurden durch die statistische Erfassung von bogenförmig aufgewölbten oder auch aufgeknickten Exfoliationsstrukturen gefunden: diese in der Literatur als A-Tents („A-Zelte“) oder Pop Ups beschrieben Aufbrüche zeigen bevorzugte Ausrichtungen, die auf die Entlastung ungleicher seitlicher Kompression des Granits zurückgeführt werden (Abb. 25)[24].



Abb. 25: Die mit der Schalenklüftung verknüpfte Dekompression hinterlässt sichtbare Effekte. Wirkt sich die Aufwölbung ungleichförmig an mechanischen Schwachstellen der abgeplatzen Schale aus, können kleinräumig kleine Aufbrüche – **Pop-ups** oder **A-Tents** (A-Zelt)-Strukturen – auftreten (siehe Pfeil). Mte. Limbara (Sardinien), Die starke Zerklüftung könnte durch Frostsprengung verstärkt worden sein.

*Fig. 25: Decompression in combination with exfoliation can result in special visible effects as **Pop-ups** or **A-Tents** (marked by arrow). Statistical work supports the explanation, that decompression is not necessarily isometric, governed not only by the removal of crust on the top of the granite. Anisotropic horizontal decompression is probable, as the Pop-Ups are clustered along the directions of compressive tectonic stresses. On Mte. Limbara (Sardinia), frost effects could be the reason for the strong fissuring.*



Abb. 26: Aufgebogene Schalenklüftung in der Granite Gorge (Australien) – besonders deutliche Stellen sind mit Pfeilen markiert.

Fig. 26: Domed extension structure in the Granite Gorge (Australia) – particularly distinct situations are marked with arrows.



Abb. 27: Exfoliations-Struktur an der Küste der Bretagne. Vorkommen wie diese finden sich auch in einer reliefarmen Umgebung. Dies spricht dafür, dass die mit der Exfoliation verknüpfte Aufwölbung im wesentlichen eine Folge der Gesteins-Ausdehnung ist. Von den vielen Faktoren, die die Anlage der Exfoliationsklüftung in Oberflächennähe beeinflussen könnten, wären auch direkt auf das Gesteine einwirkende Gezeitenkräfte denkbar.

Fig. 27: Exfoliation structure on the coast of Brittany. Samples like this in low-relief environments strengthen interpretations, that doming in the context of exfoliation is a matter of rock extension. Tensions caused by the tides could support exfoliation.

Weniger prägnante Aufwölbungseffekte können allerdings an vielen Exfoliationsstrukturen beobachtet werden (Abb. 26, 27). Die umgekehrte Hypothese, dass Exfoliationsklüftung möglicherweise nur dann funktioniert, wenn seitliche Kompression entlastet wird, ist schwer nachzuvollziehen. Bedenkt man, dass ein an der Oberfläche anstehender Granit in der Regel von einer mehrere Kilometer mächtigen Auflast befreit wurde, sollte seitliche Kompression nur nachrangige Bedeutung haben.

8. Der Gestalt der Felsburgen

Die Morphologie von Granitfelsen zeigt eine erstaunliche Vielfalt. Viele Formen sind nicht nur in ihrer Gestalt komplex, sie sind auch

das Ergebnis des Zusammenspiels vieler Faktoren. Dennoch gibt es Formen, die sich auf die Dominanz bestimmter Formungsprozesse zurückführen lassen. Wenn diese Prozesse eine starke klimatische Prägung haben, treffen wir sie auch in entsprechenden geographischen Bereichen gehäuft an.

Die in Abb. 28 zusammengestellte Übersicht ist sicher nicht vollständig, doch sie versammelt einige charakteristische Typen, deren Zustandekommen auch relativ gut verständlich ist. Hervorzuheben ist dabei, dass sich alle diese Formen frei an der Oberfläche entwickeln und so auch in allen Stadien bis zur völligen Auflösung der Felsgruppen beobachtet werden können.

Abb. 28:

Fig. 28:

Felsburgen im Zerfall

Felsburg mit Wollsack-Verwitterung

+ *humid* / + *Kruste*

Weit verbreitet im kontinentalen Europa – leicht humides bis trockeneres kontinentales Klima. Krustenbildung bewahrt Kohärenz der Felsoberflächen (Weißenfels, Steinwald, NE-Bayern)

Common in continental Europe – slightly humid to dry continental climate. Crusts preserve the coherence of rock surfaces.

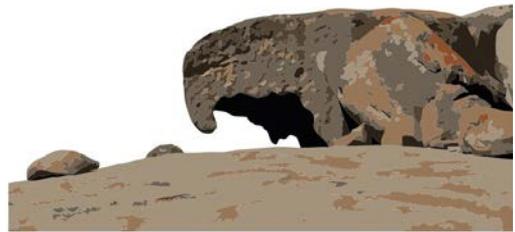


Tafoni-Zerfall

++ *arid* / ++ *Kruste* / ++ *Salz*

Extreme robuste Krustenbildung (case hardening), Abblättern dünner Lagen und Grus-Absonderung in schattigen, relativ feuchteren Innenbereichen, unterstützt von Salzsprengung: küstennahe Standorte (Kangaroo Island, Australien)

Extremely robust crusts (case hardening), segregation of thin flakes and grus in the shaded, moist parts inside the hollowed rocks, enforced by salt weathering; localities near sea coasts.



Große runde Formen

++ *arid* / ++ *Kruste*

Entsprechende Kluftweite vorausgesetzt, Zurundung v.a. durch durch intermittierendes Abblättern dünner Lagen bei sonstiger Stabilisierung der Oberfläche durch Krustenbildung (Devil's Marbles, Australien)

Intermittent segregation of flakes, meanwhile stabilisation of rock surfaces with crusts.



„Schildkröten-Morphologie“

++ *humid* / + *Kruste*

Zerstörung von oben herab durch trocken/feucht-Wechsel und Regenaufschlag. Auf der Dachplatte entwickeln sich Verwitterungs-Gruben, Schutz der unteren durch die oberen Blöcke (Bodmin Moor, Cornwall).

„Turtle back structure“ – destruction from above by dry/moist changes and rain impact. Growth of weathering pits on the roof plate, protection of lower plates by upper ones.



Kontinuierliche Abgrusung

++ *humid* / ++ *Salz*

Weitgehend kontinuierliche Durchfeuchtung, chemisch aggressive salzreiche Atmosphäre, keine anhaltende Krustenbildung (Tregastel, Bretagne vergl. auch Abb. 33).

Extensive moisture penetration, chemically aggressive salty atmosphere, no persistent crusts – see also Fig. 33.



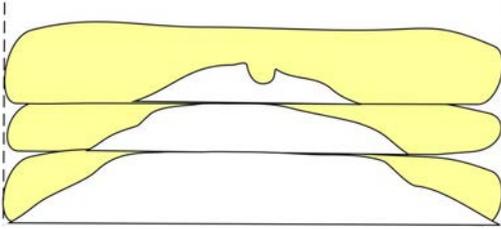


Abb. 29: Felsgruppen mit „schildkrötenpanzer-artigen“ Formen entstehen aus Abfolgen ursprünglich gleichen Durchmessers. Der Zerfall findet von oben her statt, wobei die oberen Platten die unteren vor Sonneneinstrahlung und Trocken/Feucht-Wechseln schützen. Die Zunahme der Durchmesser nach unten ist somit Ausdruck des Umstandes, dass erst die jeweils höhere Platte verkleinert werden muss, bevor auch die untere direkt von den zerstörenden Mechanismen erfasst werden kann. Die Zerstörung der jeweils obersten Platte kann weiterhin durch die Entwicklung von Verwitterungsgruben verstärkt werden.

Fig. 29: Tors with „turtle-back“ elements are the result of weathering of rocks with an originally similar size. The decomposition starts from above, whereby the upper plate protects the lower one from insolation and dry/moist-change. The increase in the rock-diameter towards the base is a consequence of the fact that the destructive agencies reach the lower levels later: they are not affected until the sheltering upper plate is reduced. The destruction of the uppermost plate is reinforced by the growth of weathering pits.



Abb. 30: Beispiel einer von Verwitterungsgruben schon fortgeschritten zerstörten Dachplatte einer Felsgruppe in Cornwall, Carn Brea süd. Pool.

Fig. 30: Example of weathering pits on a top plate of a tor group in Cornwall. The destruction of the top plate is already in an advanced state.

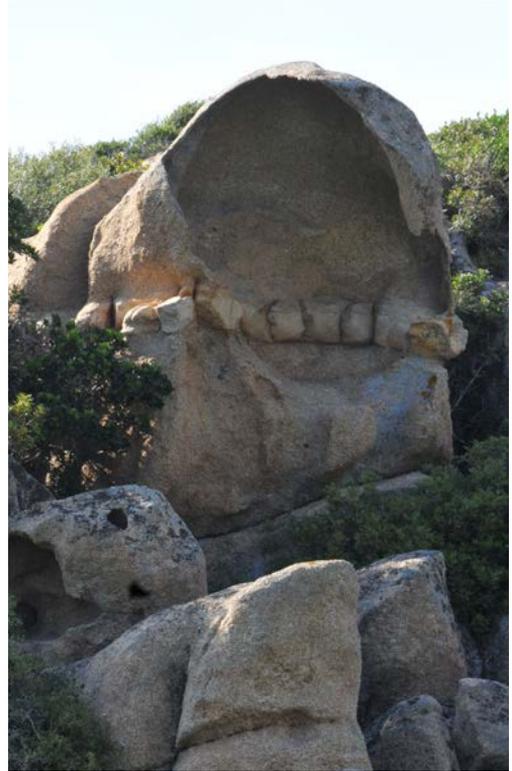


Abb. 31: Das physikalische Verwitterungsverhalten ist stark abhängig von der Korngröße des Granits: je grober, desto rascher ist – unter gleichen Umgebungsbedingungen – normalerweise der Zerfall. Wie deutlich solche Korngrößeneffekte sein können, ist an einem Tafoni zu sehen, der mittig von einem feinkörnigen Aplitgang gequert wird. Korsika, oberhalb Calvi.

Fig. 31: The rate of physical weathering depends strongly on the grain size of the granite: the coarser it is, the faster disintegration works, given an equal climatic environment. A particularly striking case is seen in a Tafoni rock, crossed by a fine-grained aplite-dyke. Corsica, above Calvi.

Neben dem Klima (Humidität/Aridität wie auch Frost-Tau-Wechsel) sowie dem Salzgehalt der Luft bzw. der Niederschläge ist die Ausbildung von Krusten ein wichtiger Faktor. Krusten können die Stabilität der Felsoberflächen bedeutend erhöhen, zugleich schaffen sie auch Kohärenz, so dass sich der Zerfall der Oberfläche von der Abgrusung einzelner Körner zugunsten des Abblätterns dünner Schuppen verschieben kann.



Abb. 32: Der Exfoliations-Dom auf Kangaroo-Insel (Australien) zeigt uns erneut eine charakteristische Situation mit Resten von Felsgruppen im relativ flachen Scheitelbereich. Die Lokalität ist wegen ihrer zu bizarren Gebilden verwitterten Tafoni bekannt. Extrem robuste Krustenbildung schützt nicht nur die Felsrelikte, sondern auch die Oberfläche der Exfoliations-Struktur (Foto: Schiffauer, geschnitten GH).

Fig. 32: Exfoliation dome on Kangaroo-Island (Australia). A typical exfoliation structure with tafoni boulders as the relics of a former tor. They are preserved on the rather flat culmination of the dome. The rock crusts are very robust, protecting not only the tafoni forms, but also the surface of the exfoliation structure (photo: Schiffauer, tailored GH).



Abb. 33: Verwitterte Granitfelsen in der Bretagne. Die feuchte, salzhaltige Luft unterstützt die kontinuierliche Zerstörung des Granits. Die Felsoberflächen sind weitgehend frei von Krusten und von ständiger Abgrusung betroffen.

Fig. 33: Weathered granite in Brittany. The moist, salty atmosphere supports a continuous destruction of the granite. The rock surface is generally free of a biological and mineralogical crust.

9. Tiefenverwitterung

Kehren wir am Ende nochmals zu dem traditionellen Szenario zurück: die Anlage von Felsburgen in tiefen Verwitterungszonen. Voraussetzung dafür ist die Existenz eines Lockersediments, in dem Bodenfeuchte und durchziehendes Wasser vor allem die chemische Verwitterung des Gesteins voranbringen. In der Verwitterungszone können für eine bestimmte Zeit relativ unzersetzte Blöcke (Kernsteine, *corestones*) zurückbleiben, und an deren Basis ist vor allem entlang vertikaler Klüfte unregelmäßig aufgelöster Fels zu erwarten.

Um den in diesen Verwitterungszonen zergliederten Granit freizulegen, bedarf es einer Veränderung des Sedimentbudgets: es muss mehr Verwitterungsmaterial entfernt werden als im gleichen Zeitraum neu geschaffen wird. Ein Erosionsimpuls kann in kurzer Zeit die lokale Erosionsbasis tieferlegen und das in der Tiefe liegende Gestein erreichen und freilegen. Ein solcher Effekt könne aber auch durch Verstärkung der flächenhaften Abtragung erfolgen, sei es durch Flächenspülung oder gar Winderosion.

In einem Granitgebiet sind normalerweise keine günstigen Voraussetzungen für eine grundsätzliche Veränderung der einmal angelegten Reliefverhältnisse gegeben. Da tiefer gelegene Landschaftsbereiche in der Regel in Zonen verstärkter tektonischer Beanspruchung – insbesondere in Bereichen verstärkter Vertikalklüftung – angelegt werden, fehlen gesteinsbedingte Voraussetzungen, die eine Reliefumkehr ermöglichen könnten: sehen wir von raschen tektonischen Hebungen ab, können einmal angelegte Talgründe in Granitlandschaften also kaum zu Höhen werden.

Granit-Felsgruppen oder -Felslandschaften, die in Verwitterungslagen entstanden sind, sollten wir daher in erster Linie noch immer dort finden, wo sie entstanden sind: im



Abb. 34: An einigen Stellen kommt im Bereich der „Teufelsmurmeln“ der noch zusammenhängende Granit ans Licht. Auch hier in morphologischen Tieflagen hat die Exfoliation flache Aufdomungen verursacht.

Fig. 34: Devil's Marbles (Australia). Some of the granite body is visible beneath the boulder groups. Although we are in a broad lowland, exfoliation has produced low domes.



Abb. 35: In der Ebene von Kulgera (Northern Territory, Australien - 25°50'8.04"S, 133°17'11.89"E) sind zahlreiche flache Exfoliationsdome von der Verwitterungsdecke entblößt. Stark verwitterte Reste höherer Exfoliationsniveaus sind – nur innerhalb des Granit-Doms – in einzelnen Blöcken verstreut.

Fig. 35: In the plains around Kulgera (N.T., Australia), many low exfoliation structures stand above the ground. Strongly weathered boulders, again relics of former higher exfoliations levels, are scattered in the area of the curved granite surface.

Bereich der Talböden. Neben Resten von Felsgruppen sind in diesem Zusammenhang auch lose Blöcke zu erwarten, die als Kernsteine (*corestones*) aus der Verwitterungsschicht freigelegt wurden und dann mehr oder weniger isoliert oder verstreut an der Geländeoberfläche zu finden sind.



Abb. 36: Die Granitschalen von Kulgera sind von starker chemischer Verwitterung betroffen und weich wie Butter. Aus einem zerfallenen Block sind weiße Stücke aus kaolinisiertem Granit herausgebrochen. Zugleich werden die Exfoliationsflächen wie die losen Granitblöcke von einer dicken, aber brüchigen und durchlässigen Kruste aus unter Bedeckung ausgefallenen Fe-Oxiden umzogen. Die Szene verdeutlicht, wie zerbrechlich Formen sein können, wenn sie aus der Verwitterungsschicht frei gelegt werden (Lok. wie vorangehend).

Fig. 36: The granite sheets around Kulgera have experienced intense chemical weathering and are as soft as butter. Parts of a disintegrated boulder reveal white, kaolinitic granite. Boulders and the exfoliation sheet are covered with a thick red crust, rich in iron oxides. Both crusts are the result of weathering in the subsurface. Despite that, the crust is brittle and permeable. This scene underlines the possible weakness of uncovered granite forms (loc. as above).



Abb. 37: Blockförmige Reste höherer Exfoliationschalen mit einer sehr dicken, im wesentlichen unter Bedeckung entstandenen Kruste. Diese ist allerdings so brüchig, dass sie den ungeordneten Zerfall nach der Freilegung aus der Verwitterungsschicht nicht in bedeutender Weise verzögern kann (Lok. wie zuvor).

Fig. 37: Boulders as relics of a former exfoliation sheet. The thick crust is very brittle, so rapid destruction after it is uncovered is inevitable (loc. as above).

Solche Granit-Szenarien sind in manchen Landschaften durchaus zu finden. Ein Beispiel dafür sind die berühmten „Teufelsmurmeln“ (Devils Marbles, Karlu Karlu) in Australien. Hier treffen wir, über eine Fläche von mehreren Quadratkilometern verstreut, kleinere Felsgruppen und auch vereinzelte Blöcke (Abb. 34). Ein Teil dieser Relikte liegt direkt den Sedimenten des Talbodens auf, ein anderer liegt jedoch auf Felsengrund, dessen flach emporgewölbte Formen davon zeugen, dass auch hier – ungeachtet der Tallage – Exfoliationsstrukturen vorliegen.

Finden wir Exfoliation und tiefreichende chemische Verwitterung zusammen, dann muss die Exfoliation der Verwitterung vorangegangen sein. Dies ist in der Umgebung von Kulgera (Northern Territory, Australien) in mehreren Fällen zu beobachten. In der weiten Ebene sind durch flächenhafte Abtragung eine ganze Gruppe von flach aufgewölbten Exfoliationsstrukturen freigelegt worden (Abb. 35-37). Wie bei den Devils Marbles deutet dieses Muster auch hier darauf hin, dass die mit der Druckentlastung verbundene konvexe Expansion auch bei weitgehend ebenem Talrelief und – vermutlich – auch unter einer Verwitterungsschicht stattfinden konnte (es kann allerdings auch nicht ausgeschlossen werden, dass die flachen Dome erst nach oberflächlicher Ausbildung der Exfoliationsstrukturen von Sediment bedeckt wurden). In jedem Fall hat die folgende chemische Verwitterung den Granit intensiv zersetzt: Die Feldspate sind weitgehend zu Kaolinit umgewandelt, die Oberflächen der noch erhaltenen Blöcke sind mit mehreren Zentimetern mächtigen Fe-Hydroxiden imprägniert (Abb. 36, 37).

Die Verwitterung hat somit zwar den Granit in einen Saprolith [25] umgewandelt, aber die aus der Exfoliation resultierenden Strukturen nicht zerstört. Die Wirkung tiefer Verwitterung scheint die Exfoliation von



Abb. 38: Die Erhaltung von robusten Kernsteinen in einem Verwitterungshorizont ist nicht selbstverständlich. Dies ist nur möglich, wenn diese noch massiven Bereiche durch eine Rinde geschützt werden, die die Durchlässigkeit für wässrige Lösungen bedeutend reduziert. Diese Rinde kann besonders aus eisenreichen Verwitterungsrückständen entstehen. In diesem Fall hat es aber nicht gereicht: trotz der teilweise noch „frischen“ Eindrucks ist in das Gesteinsgefüge in den Kernsteinen bereits in Einzelkörner (Grus) aufgelöst (Lok. Matzendorf, Passauer Wald).

Fig. 38: The preservation of robust corestone in a weathering layer is not a matter of course. Corestones can only survive, when their still unweathered cores get protection from a crust, which lowers permeability for aqueous solutions significantly. Normally, the crust is composed of weathering relics rich in iron. In this case, protection was not sufficient: despite its rather fresh look, the cores have already disintegrated to grus (loc. Matzendorf, Passau forest, Bavaria).

Graniten nicht verhindern, sondern nur im Nachhinein mehr oder weniger zersetzen zu können.

Im Grunde wäre so auch eine modifizierte Fassung des traditionellen Modells denkbar: durch Exfoliation geschaffene Strukturen könnten in einem zweiten Schritt unter Bedeckung zu späteren Felsgruppen überformt werden. Dies kann nicht ausgeschlossen werden, aber bei einer solchen Entwicklung kann es keinen Gewinn an Stabilität geben. Stattdessen wird das Ergebnis in den meisten Fällen deutlich schlechter als an der freien Oberfläche sein und Felsgruppen mit nur reduzierter Haltbarkeit hervorbringen können.

Die Bewahrung mechanisch robuster Felsen und Kernsteine in Verwitterungsumgebun-



Abb. 39: Der Lausitzer Granodiorit geht seitlich in eine Verwitterungszone über. Die Kernsteine sind in Grus eingebettet, der Grad der chemischen Verwitterung ist nur gering. Die Pfeile markieren Reste von Krusten, die offenbar nicht hinreichend waren, um ihre Kerne vor dem völligen Zersatz in Grus zu bewahren. Die noch erhaltenen Kernsteine sind von schwacher Konsistenz und würden bei der Herauswitterung umgehend zerfallen. - Lausitz, Steinbruch Valtenberg.

Fig. 39: The Lusatian Granodiorite (East Germany) grades laterally into a weathering complex. The core stones are embedded in grus, chemical weathering is low. Relics of crusts are marked by arrows – evidently, they failed to protect their cores. Some corestones are still preserved, but they are of brittle consistency – if they were to be uncovered they would disintegrate immediately (loc. Valtenberg, Lusatia).

gen ist offensichtlich alles andere als eine Selbstverständlichkeit. So wie Krustenbildung auch an der Oberfläche die Abgrenzung von Atmosphäre und Gestein unterstützt, so ist es in einem feuchten Verwitterungssubstrat unerlässlich, die zersetzten von den unzersetzten Bereichen zu sondern.

Nur funktioniert die Krustenbildung in der Tiefe angesichts der feuchten Umgebung und dem Ausschluss von Photosynthese bei weitem nicht so effizient und nachhaltig wie unter freiem Himmel. So gibt es selbst dann, wenn wir die Bildung von Granitfelsgruppen als einen der Exfoliation nachgeordneten Prozess für möglich halten, wenig gute Argumente, einen solchen Werdegang zur Vorlage eines Standardmodells zu machen. Es ist daher auch wenig verwunderlich, wenn

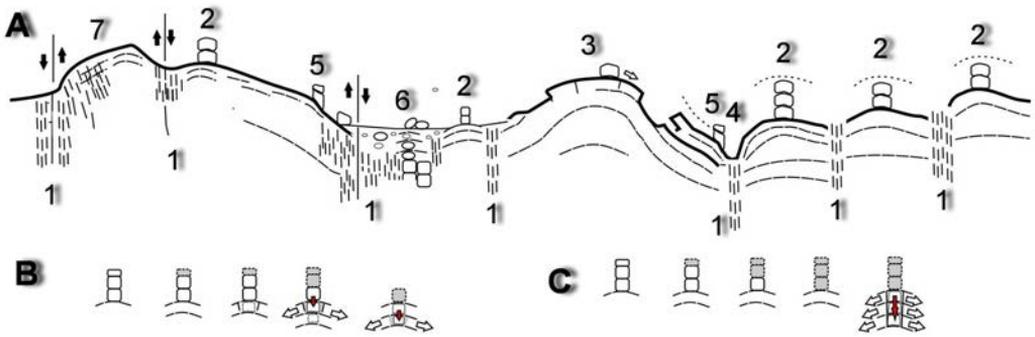


Abb. 40: **Ideale Struktur einer Granitlandschaft**

A Granitmassive bestehen aus Gruppierungen von Exfoliationsdomen, die von verwitterungsanfälligen, vertikalgeklüfteten Bereichen untergliedert werden (1). Die für diesen Großbau relevante Vertikalklüftung resultiert aus tektonischen Beanspruchungen aus der Prä- und Synaufstiegs-Geschichte. Mit Annäherung an die Geländeoberfläche beginnt die Anlage von Exfoliationstrukturen (2). Die dabei felsmechanisch isolierten Schalen zerbrechen in der Folge – entlang einer zweiten, von oberflächennahen Effekten bestimmten Generation von Vertikalbrüchen – in Schollen, deren Erhaltung vor allem in den Scheitelbereichen der domförmigen Exfoliationstrukturen begünstigt ist: in dieser Position finden sich letztlich die charakteristischen Granit-Felsburgen. Besonders massive, kluftarme Bereiche des Granits können sich zu Inselbergen entwickeln (3). Die Rückwitterung des Granits vollzieht sich von den stärker vertikal geklüfteten zu den weniger geklüfteten, späteren Inselberg-Bereichen. In den über der Landschaft erhabenen Inselbergen zeigt sich die Exfoliation in besonders ausgeprägter Weise. Die Dekompression orientiert sich auch an der umgebenden Morphologie und kann sehr kurzfristig auf Veränderungen des Reliefs reagieren – junge, erst nach Ende der letzten Kaltzeit (vor ca. 10.000 Jahren) entstandene Kluftanlagen sind in mehreren Studien dokumentiert (4). Felsburgen sind in Hangsituationen (5) zwar eine charakteristische Erscheinung, dort aber nur von besonders kurzfristiger Stabilität und für den Granit nicht spezifisch. Zonen tiefer Verwitterung sind nach dem traditionellen Erklärungsmuster die hauptsächlichen Ursprungsgebiete von Felsburgen (6). Die Voraussetzungen dafür sind allerdings aufgrund der verstärkten chemischen Verwitterung nicht optimal. Dennoch lassen sich Situationen finden, in denen Felsgebilde auftreten, allerdings weniger als stabile „Burgen“, sondern als verstreute „Kernsteine“ (Typus: *Devil's Marbles*). Doch auch hier ist die Anlage von Exfoliations-Domen in der Regel vorausgehend. Da die Verwitterung in diesen Bereichen relativ intensiv wirkt, ist die Erhaltung von Felsgruppen – im Gegensatz zur traditionellen Vorstellung – in solchen Umgebungen besonders benachteiligt. Stark vertikal geklüftete Granitlandschaften entwickeln sich normalerweise zu morphologischen Senken (6). Werden solche von älteren Kluftbildungsphasen geprägte Granitbereiche schneller gehoben als die Verwitterung an der Oberfläche voranschreitet – und ist diese Hebung noch relativ jung – können auch stark geklüftete Granite für eine gewisse erdgeschichtliche Zeit morphologische Hochgebiete bilden (7). Im Rahmen dieser Konzeption lassen sich kontinuierliche (B) wie episodische (C) Reaktivierung von Felsfreistellungen unterscheiden. Während in der ersten Situation theoretisch eine **steady-state-Dynamik** möglich ist, bedarf die zweite einer episodischen Reaktivierung durch erosive Unterschneidung. In diesem zweiten Fall sind die erosiven Stillstands-Phasen also länger als die Zeit, die für den Zerfall der Felsburgen benötigt wird – im ersten Fall werden neue Exfoliationsstrukturen noch während der Dekomposition der Felsburgen freigelegt.

Fig. 40: **Ideal structure of a granite landscape**

(A) Granite massifs are groups of exfoliation domes, separated by segments with pronounced vertical fractures (1). These vertical structures are the result of tectonic stresses created before or during unloading. Nearer to the surface, exfoliation joints were created (2). In a next step, the mechanically isolated sheets are broken: these generation of vertical fractures are governed by surficial effects. Sheet fragments are preserved especially in the culmination of the exfoliation domes: there we find the typical tors. Particularly massive parts of the granite can be transformed into inselbergs (3). The backweathering of the granite starts in its denser jointed parts, ending at the poorly fractured later inselbergs. In their isolated and elevated position, inselbergs reveal the mechanism of exfoliation in a pronounced manner. Decompression can be modified by the surrounding morphology, reacting rapidly. Young postglacial fracture systems are documented in some cases (4). Tors are a common phenomena on valley slopes, but this occurrence is not specific to granite, and their stability is in short term. In the traditional explanation, areas of deep weathering are the principal source of granite tors (6). But the preconditions are not ideal, because of the destructive effects of chemical weathering. Nevertheless, we find situations with granitic relics not as stable rock castles, but as scattered corestones (type: *Devils Marbles*). But here too, the expression of exfoliation structures is precedent. Because of strong weathering, the preservation of rock assemblages is at a disadvantage in such environments. Strongly vertically fractured granite landscapes normally evolve to lowlands (6). Strong uplift may bring parts like that into elevated positions, providing uplift overcomes decomposition by weathering. In recently uplifted segments, heavily fractured granites can prevail for some time at elevated levels (7). In this modell, continuous (B) and episodic reactivation (C) of rock exposure are possible. The first scenario may be an expression of a steady state dynamic, whereas the second case of episodic reactivation could be governed by distinct pulses of erosion. In this second scenario, the time of erosional stagnation exceeds the time of decomposition of the tors.

neuere Arbeiten über die Entstehung von Felsburgen ihren Ursprung nicht in weit entfernten tropoiden Vorzeitklimaten, sondern in der geologischen Gegenwart des Quartärs sehen [26].

10. Ideal-Modell einer Granitlandschaft

Granitlandschaften scheinen in besonderer Weise von den Eigenschaften des Gesteins geprägt zu sein. Der Aufstieg aus der Tiefe führt zu Dekompressionseffekten, die aufgrund der besonderen Kohärenz des Gefüges so bei anderen Gesteinen nicht oder nur in Sonderfällen zu finden sind.

Leider sind uns Granitlandschaften immer nur in mehr oder weniger beschränkten Ausschnitten einsehbar, so dass der Versuch, ein modellhaftes Strukturbild einer Granitlandschaft zu zeichnen, erhebliche spekulative Elemente beinhalten kann. Dennoch wollen wir das Kapitel nicht ohne einen solchen Versuch abschließen.

Abstract

In regard to the emergence of granite tors, we find a widely applied model. This is the case especially in Germany, where granites are mostly covered by forests and their tectonic structure is not visible. In accordance with this model, granite rock assemblages get their typical form inside a weathering layer. There the rock is disintegrated along its joints, which are seen as heritage of earlier stresses in deeper parts of the crust. Along with weathering, rounded pillow-like „wool sacks“ were formed. After that, erosional stripping is the last step to expose the already pre-formed rock castle.

This standard explanation is questioned in its general application. Moreover, we recognize therein a reflection of traditional geoscientific responsibilities, where tectonics (the origin of joints in the deep crust) and climatic geomorphology („Klimamorphologie“, deep weathering in earlier climates) are distinct stages in

the treatment of a geological subject. The uncovering of the rocks from its weathering mantle is treated merely as an epilogue, disregarding effects related near the surface or during exposure.

Observations of widely exposed granites display a different pattern. Rock assemblages are the result of fragmented exfoliation sheets. Exfoliation is caused by unloading of the granite, starting some hundreds of meters below ground. Exfoliation creates more or less dome-like structures, where rock assemblages can be stabilized especially on the culminations of the domes.

Many granite tors display a late stage of vertical fracturing, which is a rather recent effect near the surface or above ground. Conversely, any previously implemented fracturing would counteract exfoliation, which needs a coherent reaction over a broader part of the rock. This kind of late fracturing is to be distinguished from fracturing in the deeper crust. In an uncovered granite, these earlier vertical structures govern physical and chemical weathering and as a consequence the division of a granite body in smaller parts. This more coherent smaller parts are the subject of exfoliation, which therefore can create a lot of domes in one granite.

As a consequence we conclude, that most of the rock assemblages in high positions are the result of exfoliation. Deep weathering, until now regarded as a standard explanation for the origin of granite tors, seems to be meaningless or even counter-productive. This view is further supported, when we regard the growth of rock crusts. Crusts are an indispensable prerequisite for the stabilisation of rock surfaces. Inside a weathering mantle prevailing moisture and the absence of light inhibit the building of durable crusts, while in open air conditions, lichens can augment the protection of a mineral crust. So, on tors and rock castles, we find typical crusts of an open environment and normally no relics of crusts from any deep weathering.

Dank

Dank an Joachim Rohn (Lehrstuhl Angewandte Geologie am GeoZentrum der Universität Erlangen-Nürnberg) und Peter Suhr (ehemals Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie in Sachsen) für die kritische Durchsicht früherer Manuskript-Versionen und nützliche Literaturhinweise! Dank auch an Karen Christenson für die Korrektur der englischsprachigen Passagen. Mein Dank geht weiter auch an die vielen Teilnehmer des Kurse Granit (I) und Granit (II) in der Naturhistorischen Gesellschaft Nürnberg – mit ihrem kritischen Verständnis und ihrer Diskussionsfreude haben sie erheblich zur Entwicklung dieses Themas beigetragen!

Anmerkungen

[1] „Tor“ (Felsformation) [https://de.wikipedia.org/wiki/Tor_\(Felsformation\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Tor_(Felsformation)) – abgerufen 3.2.2019.

[2] LfU Bayern „Geotop Drei-Brüder-Felsen“, https://www.lfu.bayern.de/geologie/geotope_schoensten/54/index.htm

– abgerufen 6.3.2019. Die Bildunterschriften stammen aus dem Originaltext; diese Modelle stützen sich wiederum auf Lehrbücher zur Geomorphologie wie Wilhelmy (1958) oder Ahnert (2009, siehe dort auch Seite 74, Abb. 6.10)

[3] Goethe hat die Luisenburg im Sommer 1785 wie auch im April 1820 besucht. Nach dieser zweiten Visite veröffentlichte er die Studie „Die Luisenburg bei Alexanders-Bad“ noch im gleichen Jahr in seiner mehrbändigen Zusammenstellung „Zur Naturwissenschaft überhaupt“. Darin ist auch erstmals diese Grafik zu finden, die nach Goethes Vorlage umgesetzt wurde. Die Abbildung ist wiederum in seinen Werken „letzter Hand“ zu finden (1833). Die in der Grafik oben notierte Seitenreferenz stammt aus dieser Ausgabe. Zur kulturgeschichtlichen Bedeutung dieser damals neuen erdgeschichtlichen Sichtweise siehe Piper (2010).

[4] Siehe BÜDEL (2004), HOFBAUER (2012, 2013) – dort weitere Literatur zu diesem Themenkomplex.

[5] Das ideale Strukturbild eines Granits, in Hans CLOOS 1923, von ihm in seinem Lehrbuch zur „Inneren Dynamik“ 1936 erneut verwendet und in der Folgezeit auch in Lehrbüchern vieler anderer Autoren abgedruckt. Auch MIGOŃ (2006), p. 18 bringt das Cloos-Modell, allerdings in einer etwas vereinfachten Form.

[6] MIERZEJEWSKI (2002), ŽÁK et al. (2009)

[7] Viele posttektonischen variskischen Granite aus der Zeit Oberkarbon-Unterperm erlebten in der Folgezeit mehrfach weitere tektonische Beanspruchungen. So wurde z.B. der Harz mit seinen Graniten in der Oberkreide stark verstellt und nach Norden aufgeschoben.

[8] Die Kartierung magmatischer Gefüge erfordert besonders gute Aufschlussverhältnisse und eine umfassende Strukturaufnahme. In neuerer Zeit können Kristalleinregelungen auch geophysikalisch durch Messung der magnetischen Suszeptibilität modelliert werden.

[9] CLOOS, HANS (1925). Die Frage, ob es in Plutoniten tatsächlich Lagerklüfte gibt, die nicht als Exfoliationsklüfte entstanden sind, wäre zu diskutieren. Indem der Terminus „Lagerkluft“ aber rein geometrisch-beschreibend angelegt ist, bleibt er aber in jedem Fall sinnvoll und vor jeder genetischen Interpretation nützlich.

[10] CLOOS (1925), p. 106.

[11] HALL et al. (o.A.) Scottish landform examples. The Cairngorms: „Extensive sections through dome flanks found along glacial valley sides provide clues as to the bedrock controls on the location and form of the Cairngorm domes. Domes are locally delimited by valleys aligned along linear alteration zones [...] Sections provided by glacial cliffs show that domes are developed on lenticular masses of massive rock, up to 1 km long. These sections also show that, as in other classic granite terrains (Migoń, 2006), there is a general parallelism between curved sheet joints and dome surfaces.“

[12] Die vertikalen Klüfte und Bruchstrukturen eines Granits wären demnach auf mindestens zwei Bildungsabschnitte zurückzuführen. Dabei ist das in der Tiefe angelegte Muster Ausdruck regionalgeologischer Stress-Situationen, die an der

Oberfläche gebildeten Brüche können hingegen Folge rein lokaler gravitativer Instabilitäten sein [13] MIGOŃ (2006): Granite landscapes of the world.

[14] AHNERT (2003), MIGOŃ (2006). Die Entstehung von Inselbergen ist ein lang diskutiertes Thema auch in der deutschen Klimamorphologie und kann hier nicht ausführlicher behandelt werden. Der Begriff „Inselberg“ ist allerdings nicht auf Granitlandschaften beschränkt und umfasst auch Berge aus anderen Gesteinen. Diese können dann aber auch – wie etwa der Uluru (Australien) – von Exfoliationsklüftung geprägt sein.

[15] COLLINS et al. (2018), dazu siehe auch die grundlegende Arbeit von BAHAT (1999).

[16] „Flakes“ würde im deutschen „Flocken“ bedeuten, was aber nicht in Gebrauch ist. Die gebräuchlichere Bezeichnung „Schuppen“ bzw. „Abschuppung“ umfasst dafür unterschiedliche Größenordnungen. Siehe auch MIGOŃ (2006).

[17] MIGOŃ (2006), p. 31.

[18] CLOOS (1925): Das Bioitschlieren-Gefüge des Riesengebirgsplutons hat erhebliche Auswirkungen auf die Gestalt der Landschaft im Großen.

[19] BANKWITZ (2004).

[20] GLASSER (1997), BAHAT et al. (1999). BUCHER & LOEW (2009), HENCHER (2006), HENCHER et al. (2011), MARTEL 2006, GUNNEL et al. (2013), HALL et al. (o.A.), ZIEGLER et al. (2014).

[21] BUCHER & LOEW (2009).

[22] zuerst von GLASSER (1997)

[23] HENCHER 1995, 2006 sowie HENCHER et al. (2011).

[24] ERICSON & OLVMO (2004); TWIDALE & BOURNE (2009)

[25] Als „Saprolith“ wird ein *in situ* chemischer stark zersetztes Gestein bezeichnet, in dem dennoch auch noch ursprüngliche Gefügemerkmale erhalten sein können.

[26] PHILLIPS et al. (2006), GUNNEL et al. (2013). Diese Arbeiten gründen u.a. auf Isotopen-Studien. Da die Erdoberfläche erreichende kosmische Strahlung die Bildung bestimmter Isotope verursacht (v.a. ^{10}Be und ^{26}Al), lässt sich das Expositionsalter innerhalb bestimmter Fehlergrenzen bestimmen.

Literatur

AHNERT, F. (2009): Einführung in die Geomorphologie. - Stuttgart (Ulmer) (4. Aufl.).

BAHAT, D., GROSSENBACHER, K. & K. KARASAKI (1999): Mechanism of exfoliation joint formation in granitic rocks, Yosemite National Park. - Journal of Structural Geology 21, 85–86.

BANKWITZ, P. (2004): Tiefkrustale Bildung von Klüften in Granitplutonen. - Sitzungsberichte der Leibnitz-Sozietät 70: 59-88.

BUCHER, S.B. & S. LOEW (2009): Talklüfte im Zentralen Aaregranit der Schöllenen-Schlucht (Kanton Uri, Schweiz). - Swiss J. Geosci. 102 (2009) 403–421.

BÜDEL, B., WEBER, B., KÜHL, M., PFANZ, H., SÜLTEMEYER, D. & D. WESSELS (2004): Reshaping of sandstone surfaces by cryptoendolithic cyanobacteria: bioalkalization causes chemical weathering in arid landscapes. - Geobiology 2, 261-268

CAMPELL, E.M. & C.R. TWIDALE (1995): The various origins of minor granite landforms. - Caderno Lab. Xeolóxico de Laxe, Coruña. 1995. Vol. 20, pp. 281-306..

CLOOS, H. (1922): Tektonik und Magma: Untersuchungen zur Geologie der Tiefen, Bd. 1. - Abh. Preuß. Landesanstalt N.F. 89.

CLOOS, H. (1922): Der Gebirgsbau Schlesiens und die Stellung seiner Bodenschätze. - Berlin: Borntraeger.

CLOOS, H. (1923): Das Batholithenproblem. - Berlin: Borntraeger.

CLOOS, H. (1925): Einführung in die tektonische Behandlung magmatischer Erscheinungen (Granittektonik), 1. Spezieller Teil: Das Riesengebirge in Schlesien. - Berlin: Borntraeger.

CLOOS, H. (1936): Einführung in die Geologie: Ein Lehrbuch der Inneren Dynamik. - Berlin: Borntraeger.

CLOOS, H., BALK, R., CLOOS, E. & H. SCHOLTZ (1927): Die Plutone des Passauer Waldes (Tektonik und Magma, Untersuchungen zu Geologie der Tiefen, Band III). - Berlin: Borntraeger.

COLLINS, B.D., STOCK, G.M., EPPES, M.-C., LEWIS, S.W., CORBETT, S.C. & J.B. SMIT (2018): Thermal influences on spontaneous rock dome exfoliation. - Nature Communications (2018) 9:762. Dazu ein Video – zuletzt abgerufen am 6.3.2019: <https://www>.

- youtube.com/watch?v=Z08Da5yfPEI
- ERICSON, K. & M. OLVMO (2004): A-Tents in the central Sierra Nevada, California: a geomorphological indicator of tectonic stress. *Phys. Geogr.* 25, 291–312.
- GLASSER, N.F. (1997): The origin and significance of sheet joints in the Cairngorm granite. - *Scottish J. of Geology* 33, 125-131.
- GUNNELL, Y., JARMAN, D., BRAUCHER, R., CALVET, M., DELMAS, M., LEANNI, L., BOURLÈS, D., ARNOLD, M., AUMAÎTRE, G. & K. KEDDAOUCHE (2013): The granite tors of Dartmoor, Southwest England: rapid and recent emergence revealed by Late Pleistocene cosmogenic apparent exposure ages. - *Quaternary Science Reviews* 61 (2013), 62-76.
- HALL, A.M., GILLESPIE, M.R., THOMAS C.W. & K. EBERT (O.A.) *Scottish Landform Examples: The Cairngorms – A pre-glacial upland granite landscape.* - <https://core.ac.uk/download/pdf/9698633.pdf> (zuletzt besucht 9.6.2019)
- HALL, A.M. & W.M. PHILLIPS (2006): Glacial modification of granite tors in the Cairngorms, Scotland. - *J. Quart. Science* (2006) 21(8) 811–830.
- HALL, A.M. & W.M. PHILLIPS (2006): Weathering pits as indicators of the relative age of granite surfaces in the Cairngorm Mountains, Scotland. - *Scotland. Geogr. Ann.*, 88 A (2): 135–150.
- HENCHER, S. (1995): Interpretation of direct shear tests on rock joints. - In: DAEMAN J.J.K., SCHULTZ R.A. (eds) *Proceedings 35th US symposium on rock mechanics.* Lake Tahoe, pp 99–106.
- HENCHER, S. (2006): Weathering and erosion processes in rock – implications for geotechnical engineering. - In: *Proceedings symposium on Hong Kong soils and rocks*, March 2004, Institution of Mining, Metallurgy and Materials and Geological Society of London, pp 29–79.
- HENCHER, S.R., LEE, S.G., CARTER T.G., & L.R. RICHARDS (2011): Sheeting joints: characterisation, shear strength and engineering. - *Rock Mech Rock Eng* 44; 1-22.
- HOFBAUER, G. (2012): Verwitterungsformen an Dolomit-Felsen der Frankenalb - *Natur und Mensch, Jahresmitteilungen der Naturhistorischen Gesellschaft Nürnberg e.V. für 2012*, 75-103
- HOFBAUER, G. (2013): Biokrusten - mit Fokus auf den Dolomit der Frankenalb. - <https://www.gdgh.de/Berichte/b16>
- KOZŁOWSKI, A., IŁNICKI, S., MATYSZCZAK, W. & A. MARCINOWSKA (2016): Magmatic and post-magmatic phenomena in the Karkonosze granite and its metamorphic envelope (West Sudetes, SW Poland). - *Acta Geologica Polonica*, Vol. 66 (2016), No. 3, pp. 451–471.
- LEITH, K., MOORE, J., AMANN, F. & S. LOEW (2013): In situ stress control on microcrack generation and macroscopic extensional fracture in exhuming bedrock. - *Journal of Geophysical Research Solid Earth* 119. <https://doi.org/10.1002/2012JB009801>.
- LOOPE D.B. & C.M. BURBERRY (2018): Sheeting joints and polygonal patterns in the Navajo Sandstone, southern Utah: Controlled by rock fabric, tectonic joints, buckling, and gullyng. - *GEOSPHERE*, v. 14, no. 1818-1836
- MARTEL, S.J. (2006): Effects of topographic curvature on near-surface stresses and application to sheeting joints. - *Geophysical Research Letters* 33, L01308, doi:10.1029/2005GL024710, 2006.
- MIERZEJEWSKI, M.P. (2002): Additional data and remarks to HANS CLOOS's work in the Karkonosze Mts (Riesengebirge). - *Z. geol. Wiss., Berlin* 30 (2002) 1/2: 37 – 48.
- MIGOŃ, P. (2006): *Granite Landscapes of the World.* - xxviii + 384p., Oxford (Oxford Univ. Press).
- PHILLIPS, W.M., HALL, A.M., MOTTRAM, R., FIFIELD, L.K., D.E. SUGDEN (2006): Cosmogenic ¹⁰Be und ²⁶Al exposure ages of tors and erratics, Cairngorm Mountains, Scotland: Timescales for the development of a classic landscape of selective linear glacial erosion. - *Geomorphology* 73, 222-245.
- PIPER, A. (2010): „Mapping Vision: Goethe, Cartography and the novel.“ *Spatial Turns: Space, Place, and Mobility in German Literary and Visual Culture.* Eds. Jaimey Fisher and Barbara Mennel (Amsterdam: Rodopi, 2010) 27-51.
- TWIDALE, C. R. & J.A. BOURNE (2009): On the origin of A-tents (pop-ups), sheet structures, and associated forms. - *Prog. Phys. Geogr.* 33, 147–162.
- TWIDALE, C.R. & VIDAL ROMANI, J.R. (2005): *Landforms and geology of granite terrains.* - viii + 351 S., Leoben, London, New York: Balkema.
- TWIDALE, C.R., VIDAL ROMANI, J.R., CAMPBELL, E.M.

- & J.D. CENTENO (1996): Sheet fractures: response to erosional offloading or to tectonic stress? *Z. Geomorph. N.F. Suppl.-Bd.* 106, 1-24.
- VIDAL ROMANI, J.R. (1989): Granite geomorphology in Galaica (NW Spain). - *Cuaderno Lab. Xeoloxico de Lax Coruña*, 13: 89-163 (bilingual).
- VIDAL ROMANI, J.R. & C.R. TWIDALE (2010): Structural or climatic control in granite landforms? The development of sheet structures, foliation, boudinage, and related features. - *Caderno Lab. Xeolóxico de Laxe, Coruña*. 2010. Vol. 35, pp. 189 – 208.
- WILHELMY, H. (1958): *Klimamorphologie der Massengesteine*. – Braunschweig, Westermann
- ŽÁK, J., VERNER, K., KLOMINSKY, J. & M. CHLUPÁČOVÁ (2009): „Granite tectonics“ revisited: insights from comparison of K-feldspar shape-fabric, anisotropy of magnetic susceptibility (AMS), and brittle fractures in the Jizera granite, Bohemian Massif. - *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rdsch.)* 98 949-967.
- ZIEGLER, M., LOEW, S. & D. BAHAT (2014): Growth of exfoliation joints and near-surface stress orientations inferred from fractographic markings observed in the upper Aar valley (Swiss Alps). - *Tectonophysics* 626: 1-20.

Anschrift der Verfassers	Dr. Gottfried Hofbauer Anzengruberweg 2 91056 Erlangen geoldoku@gdgh.de
--------------------------	---