

Barrera, H. V., A Study of the „Nieve penitente“ of the Chilean Andes. Assoc. Intern. d'Hydrologie Scientifique, Bull. No. 23. Sixième Assemblée Génér. à Edingbourg 1936. II. Part. de Travaux de l'Assoc. — Compt. Rend. et Mém. des Commiss. des Neiges et des Glaciers. Riga 1938. S. 587 bis 622.

²⁷⁾ *Neumann, Sigfrid*, Quer durch Vom Hochland Boliviens zum Amazonas. München o. J.

²⁸⁾ *Cabot, Thom. D.*, The Cabot Expedition to the Sierra Nevada de Santa Marta of Columbia. Geogr. Review, vol. 29, 1939. S. 587 ff. und Fig. 23.

²⁹⁾ *Marmillod, F.*, Notes sur l'alpinisme au Mexique. Die Alpen, Bd. 18, Bern 1942. S. 211—215.

³⁰⁾ *Long, Const.*, Le développement de l'alpinisme au Mexique. Die Alpen, Bd. III, 1927. S. 227.

³¹⁾ *Matthes, F. E.*, a. a. O. 1934.

³²⁾ *Wentworth, Ch. K.*, a. a. O. 1940.

³³⁾ Meteorological Reports of the Mouna Kea Expedition 1935. Bull. Americ. Meteorolog. Society, Pt. I by *J. W. Coulter*, vol. 19, 1938, S. 349—51; Pt. II: The Meteorological Observations at Lake Waiau, Aug. 8—19, 1935, by *Cl. T. Raine*, vol. 20, 1939, S. 97—105; Pt. III: Climate of the Humuula Plateau, by *J. W. Coulter*, vol. 20, 1939, S. 417—19.

³⁴⁾ *Gregory, H. E.* and *Wentworth, Ch. K.*, General Features and Glacial Geology of Mouna Kea, Hawaii. Bull. Geol. Soc. America, 48, 1937, S. 1719—1742.

³⁵⁾ *Marinelli, O.*, Forme di fusione nelle nevi dell'Etna osservate durante e dopo l'eruzione del marzo 1910. Ztschr. f. Gletscherkde. V. 1910/11, S. 224—228.

³⁶⁾ *Dittler, E.*, Eine Geologenfahrt auf den Pic von Teneriffa. Vorträge d. Vereins z. Verbreitung naturwiss. Kenntnisse in Wien. 68 Jg. Wien 1928.

³⁷⁾ *Faès, H.*, Les pénitentes de neige sur le Pic de Ténériffe. Die Alpen, 1936, S. 434—436.

³⁸⁾ *Spink, P. C.*, Further Notes on the Kibo Inner Crater and Glaciers of Kilimanjaro and Mount Kenya. The Geogr. Journ., 106, 1945. S. 210—216.

³⁹⁾ *Odell, N. E.*, Observations on the rocks and glaciers of Mount Everest. The Geogr. Journ., vol. 66, 1925. S. 289 bis 315

⁴⁰⁾ *Odell, N. E.*, Geological and some other Observations in the Mount Everest Region. Appendix D of: *Tilman, H. W.*, Mount Everest 1938. Cambridge 1947. S. 147—151 u. Abb. 13 b und 33.

⁴¹⁾ *Nichols, Rob. L.*, Nieves penitentes near Boston, Massachusetts. Science, vol. 89, No. 2320. 1939.

BRANDUNGSHÖHLEN UND BRANDUNGSKEHLEN

W. Panzer

Mit 5 Abbildungen

Wo immer Meereswellen an das Felsgerüst eines aufsteigenden Festlandes anprallen, entsteht ein Kliff, das heißt ein Steilhang, dessen Form und Ausmaß abhängig sind von der Höhe und dem Böschungswinkel des Landes, der Stärke und Richtung der Brandung, der Standfestigkeit des Gesteins und der Zeit, die zur Einwirkung der Wellen auf das Gestein verfügbar war.

Vor dem Kliff ist in der Regel eine felsige Plattform gelegen, auf der die Brandungswogen gegen das Kliff anlaufen. Sie ist ihr Werk und wird als Brandungsplattform oder Schorre bezeichnet. Die Lage zwischen Niedrigwasser- und Hochwasserlinie beweist allein schon ihre Entstehung aus der Arbeit der Brandungswellen, wenn nicht diese selbst bei ruhiger See in ihrem Spiel, bei starker Dünung oder Sturm im Unmaß ihrer Wucht, mit der sie gegen das Gestade donnern, deutlich Zeugnis davon ablegten, daß sie es sind, die hier den Fels zertrümmern und sich in den Landabfall hineinfressen. Die Brandungswelle überschlägt sich meist schon draußen vor der Schorre und schwappt auf ihrer Rampe reißend und mit ungeheurem Schwall ans Kliff heran und brandet an ihm hoch. Was sich an losgebrochenem Schutt am Fuß des Kliffs gesammelt, wird von jeder dieser Brandungswogen mitgerissen, gegen das Kliff geschleudert und zurückgezerrt. So wird die Brandungsplattform abgeseuert und geschliff-

fen, stellenweise auch ausgestrudelt, das Kliff jedoch mit schweren Schlägen behämert.

Die Ausbildung von Strudellöchern in der Brandungsplattform, d. h. also die Schaffung von Höhlungen im Gestein, die ihre Entstehung der Brandung verdanken, ist anscheinend an bestimmte Gesteine gebunden. *Carlé* beschreibt die schönen Strudelkessel im Granit der Bucht von Vigo¹⁾. Sie sind in gleicher Art bei La Coruña zu beobachten, wo sie beim alten Leuchtturm Torre de Hercules, ebenfalls teilweise mit großen Mahlsteinen und bis zu 50 m Höhe überm Meeresspiegel, von einer früheren Brandungszeit des Meeres in dieser Höhe an der Granitküste Zeugnis ablegen. Auch im Granit der südchinesischen Küste sind sie, in geringerer Höhe, z. B. auf der Insel Cheung Chow unweit Hongkong, bis mannstief und mit glatten Wänden und Mahlsteinen am Grund beredete Zeugen für eine junge Strandverschiebung. An der Südküste der Iberischen Halbinsel, unweit Cadiz, ist die Brandungsplattform in harten geröllreichen Sandsteinen und Konglomeraten von Brandungstöpfen „siebartig durchlöchert“²⁾, und auf der Ostseite der jonischen

¹⁾ *H. Carlé*, Strudelkessel im Granit am Ufer der Bucht von Vigo (NW-Spanien). Geol. d. Meere u. Binnengewässer. 4, 1940. S. 247—249.

²⁾ *O. Jessen*, Die Straße von Gibraltar. Berlin 1927. S. 52. — *Ders.*, Südwest-Andalusien. Erg. H. 186 zu Peterm. Mitt. Gotha 1924. S. 54 und Abb. 9 (Insel Santipetri).

Insel Leukas sind es Nummulitenkonglomerate und Breccien, in denen bis zu 8 m tiefe Strudel-löcher entwickelt sind³⁾. Sie erinnern allerdings stark an geologische Orgeln, also Verwitterungsschote, deren Wände durch Strudelung geglättet sind.

In allen den genannten Fällen handelt es sich um Gesteine, die aus verschiedenen widerstandsfähigen Bestandteilen zusammengesetzt sind und wohl aus diesem Grunde die Strudelochbildung erleichtert, wenn nicht sogar ermöglicht haben.

Im Kliff bringt die aufprallende Brandungswoge keine Strudelbewegungen und somit auch keine ausgestrudelten Höhlungen zustande. Sie schlägt mit hartem Stoß, „gerichtetem Schlag“⁴⁾, und breiter Fläche gegen den Fels. Dabei wird eingeschlossene Luft mit ungeheurem Druck in das Gestein gepreßt und entweicht mit lautem Fauchen und Pfeifen durch die Klüfte⁵⁾. So wird der ganze Fels in seiner Grundfeste erschüttert, sein Gefüge immer mehr gelockert, bis sich entlang den Fugen schließlich kleine oder große Einzelstücke des Gesteins herauslösen und Höhlungen zurücklassen. In diesen Höhlungen sowie an ihren Kanten kommen Druck und Sog der Brandungswelle nun verstärkt zur Wirkung, weitere Gesteinsstücke werden ausgebrochen, und die Höhlungen werden so zu Höhlen, Brandungshöhlen.

Die Form der Brandungshöhlen ist notgedrungen unregelmäßig, denn sie ist abhängig vom Gefüge des Gesteins, von seiner Klüftung, Schichtung, Absonderung und Zusammensetzung, und alle Brandungshöhlen zeigen übereinstimmend, wie große Kluft- und Schichtflächen ihre Gestalt beherrschen, nicht aber Größe und Menge der Brandungsgerölle, mit denen die Klifffläche beworfen worden ist, die Höhlenbildung bedingen oder auch nur beeinflussen. Die formende Wirkung des mitgeführten Brandungsschuttes, gleichviel welcher Größe, ist das Schleifen und Glätten, das sich von der Schorre in den Boden einer am Kliffuß ausgebrochenen Brandungshöhle hineinziehen kann und wohl auch ihre unteren Seitenwände und Kanten mitergreift. Doch das bleibt nur ein leichtes Überformen, das die Wesenszüge der Klüftung und Schichtung nicht zu beseitigen vermag.

Die Lage der Brandungshöhlen ist entsprechend der Zusammenballung der Wucht der

Brandungswelle nächst dem Fuß des Kliffes vorzugsweise der untere Teil des Kliffs, kann sich aber entsprechend dem Gefüge des Gesteins beliebig weit verlagern, so wie auch die Ausmaße der Brandungshöhle vom Gesteinsgefüge und der Standfestigkeit des Gesteins abhängig sind und oft zu großer Höhe über dem unmittelbaren Brandungsbereich hinauswachsen können. Die großen Brandungshöhlen im Granit der Costa Brava Kataloniens knüpfen sich zum Teil an ausgeräumte Diabasgänge und zeigen am Beispiel der Cova de Tamariu (oder D'Es Tremadiu) östlich Palafrugell, die eine enge Einfahrt hat, sich nach innen aber beträchtlich erweitert⁶⁾, daß hier die Brandung nur die Rolle des Lockerns und Schuttverfrachtens übernommen hat. Gleichwohl ist es eine echte Brandungshöhle.

Die Lebensdauer einer Brandungshöhle dieser Art ist sicherlich gering, denn jeder Brandungsschlag erschüttert das Gesteinsgefüge, führt zu weiterem Herausbrechen und damit zur Erweiterung und schließlich zum Zusammensturz der Höhle. Die Brandungshöhlenbildung ist nur eine Begleiterscheinung der Brandungsarbeit des Meeres an der Kliffküste, nicht notwendige Folge.

Wie richtungweisend und entscheidend für die Brandungsarbeit an der Kliffküste aber die Klüftung des Gesteins ist, läßt sich an jedem Kliff und in jedem geklüfteten Gestein aufs deutlichste beobachten. Die großen Klüfte sind geradezu die Leitlinien für die Brandungsarbeit. Namentlich an dicht gescharten Klüften, die senkrecht zum Küstenverlauf in das Land hinein gerichtet sind, vermag die Brandungswelle schnell ein aufrecht stehendes Gesteinsblatt herauszubrechen. Es entsteht eine Brandungsgasse, in der die Brandungswelle, in der Enge mit verstärkter Wucht und oft zerfetzt in weißen Gischt, hereinrauscht, stille steht und mit gewaltigem Sog zurückweicht. Die Anordnung der großen Klüfte ist bestimmend für die Richtung und die Schnelligkeit, mit der das Meer sich an der Kliffküste ins Land hineinarbeitet. Daß an den Längs- und Querklüften das Meer sich schneller vorwärts frißt, beweisen die vor der Kliffküste gelegenen Klippen, die in ihrer Anordnung noch oft das alte Kluftsystem erkennen lassen, das die Brandungswirkung leitete. Wie sehr die Abtrennung von Inseln durch „Kliffkanäle“ (= Brandungsgassen), die sich entlang den „Schwächelinien“ entwickeln, bestimmt wird, hat G. v. Zahn an der regelmäßigen Anordnung der Inseln und

³⁾ W. v. Seydlitz, Über Brandungserosion durch Strudel-löcher. Z. f. Geomorph. III. 1927. S. 57—61.

⁴⁾ O. D. von Engeln, Geomorphology. Systematical and regional. New York 1942. S. 519.

⁵⁾ Die Einwirkung der bei Brandung entstehenden Preßluft auf das Gesteinsgefüge hat schon Ferd. v. Richthofen in seinem Führer für Forschungsreisende (Hannover 1901. S. 333 ff.) hervorgehoben. — Vgl. auch W. Panzer, Die Hebrideninsel Lewis. Z. Ges. Erdk. Berlin 1928. S. 42.

⁶⁾ Servei del Mapa Geològic de Catalunya. Explicació de la fulla núm. 24; Santa Feliu de Guixols. Barcelona 1923. S. 24 f.

Klippen vor der bretonischen Küste zeigen können⁷⁾.

Es ist verständlich, daß sich zwischen steilstehenden Kluftflächen besonders gern und unschwer Brandungshöhlen bilden, daß sie aber bei dem schnellen Fortschreiten der Brandungswirkung ebenso leicht vergehen. Ihre Form ist aber immer ähnlich. Sie sind hoch und schmal, weil sich die ausräumende Brandungsarbeit selbstverständlich längs der steilen Klüfte leicht vollzieht und weil sich über einer schmalen Höhlung, die ein ausgeräumtes Gesteinsblatt hinterließ, leichter ein Stück Decke hält als über weitabständigen Seitenwänden. Gleichwohl sind auch breite, flachdachige Brandungshöhlen möglich. Wo nämlich das Gestein von flachliegenden Kluftflächen oder

einmal als allseits umbrandete Klippe von der Hauptinsel losgelöst war; nur so wird verständlich, daß er auch auf der landwärtigen Seite bis nahe zum Meeresspiegel herunter abgetragen und unterwaschen ist, so daß die Brandung von der heutigen Seeseite her den Tunnel gar durchschlagen konnte. Die Dünung und die Brandung, mit der der Südostmonsum die Wellen des Südchinesischen Meeres gegen die Felsenküste anlaufen läßt, schlagen heute regelmäßig nur von Südosten in den Brandungstunnel hinein, während es eine Zeit gegeben haben muß, da auch auf der Nordwestseite des Felsenkopfes dieser kleinen Halbinsel regelmäßige Brandung stand. Ein Auftauchen des Landes in junger Zeit hat wohl den Bildungsvorgang unterbrochen oder wenigstens

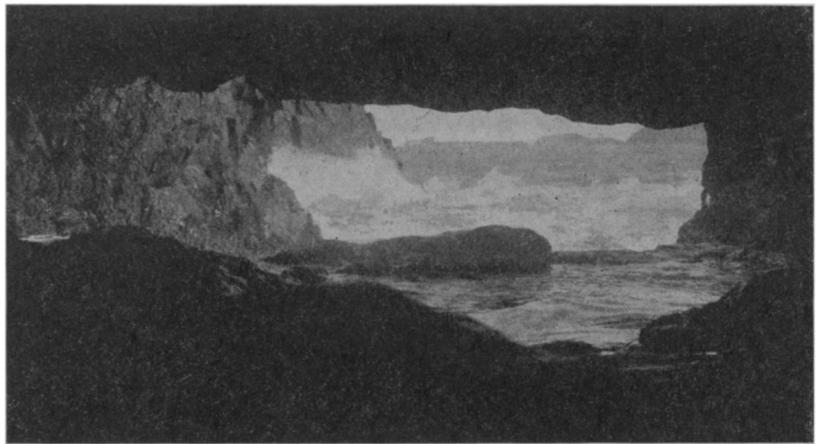


Abb. 1.
Inneres des Brandungstunnels
im Cap d'Aguilar, Hongkong
Dach, Seitenwände und Boden
durch Klüfte bestimmt. Brandungsschutt fehlt.

Aufn. Panzer 1931

Schichtfugen durchzogen wird, kann von der Brandungswelle, die das Kliff berennt, an seinem Fuß besonders leicht Gestein entlang den Klüften oder Schichtfugen aus dem Felsverband gelöst und herausgespült werden, so daß die Bedingungen zur Bildung flachdachiger Brandungshöhlen gegeben sind. An der Küste von Hongkong ist in dem felsigen Vorgebirge des Cap d'Aguilar ein Brandungstunnel im Porphyrt entwickelt, dessen Formung durch die Klüftung im Gestein besonders auffällig ist. Es ist ein mehrere Meter breiter, über mannshoher Tunnel, dessen flaches Dach von einer der fast waagerechten Bankungsklüfte begrenzt wird, die das Gestein durchfugen und zusammen mit den senkrecht stehenden Klüften den Quaderbau des Vorgebirges bedingen (s. Abb. 1). Dieser von der Brandung ausgewaschene Torweg ist in einem Felsbuckel entstanden, der heute zwar durch einen niedrigen grasbestandenen Hals mit dem übrigen Inselkörper fest verbunden ist, früher aber offenbar schon

verlangsamt — sonst wäre das flache Höhlendach wohl von der Brandung längst zusammengeschlagen.

In nächster Nähe dieses Brandungstunnels ist nun eine zweite Brandungshöhle entstanden, die bezeichnend zwischen steilen Klüften, schmal und hoch, entwickelt ist und die die gleiche Annahme einer jungen Strandverschiebung verlangt. Sie ist ebenfalls auf beiden Seiten geöffnet, also ein Brandungstunnel, wird aber sicherlich nur von einer Seite her weitergebildet. Auf der „Landseite“ dieses Felspaltes, wie man diese Brandungshöhle nennen möchte, liegen große Brandungseröle. Sie sind gewiß nicht durch den großen schmalen Spalt hereingeschleudert, sondern stammen von hohen Brandungswellen, die bei großen Stürmen gelegentlich von Süden her die „Landseite“ des Felsenspaltes erreichen (s. Abb. 2). Daß sie nicht regelmäßig auch auf dieser Seite auflaufen, mag eben mit der anzunehmenden jungen Wasserspiegeländerung in Zusammenhang stehen. Die beiden Brandungshöhlen oder -tunnel sind aus dem ersten Bildungsgang, der ihre Entstehung überhaupt ermöglichte, heraus-

⁷⁾ G. W. v. Zahn, Studien über die zerstörende Arbeit des Meeres an Steilküsten. Mitt. Geogr. Ges. Hamburg XXIV. 1909. S. 265.

gerückt und so in einen Schwebeszustand ihres Daseins gebracht, der ihre Lebensdauer sicherlich verlängern wird. Ohne Spiegelschwankung wären wohl auch diese Höhlen längst der Brandung, die sie schuf, zum Opfer gefallen.

Auch in wesentlich leichter abtragbarem Gestein, als es der harte Porphyrit ist, können sich Brandungshöhlen bilden, wenn nur die Standfestigkeit des Gesteines eine Zeitlang aus-

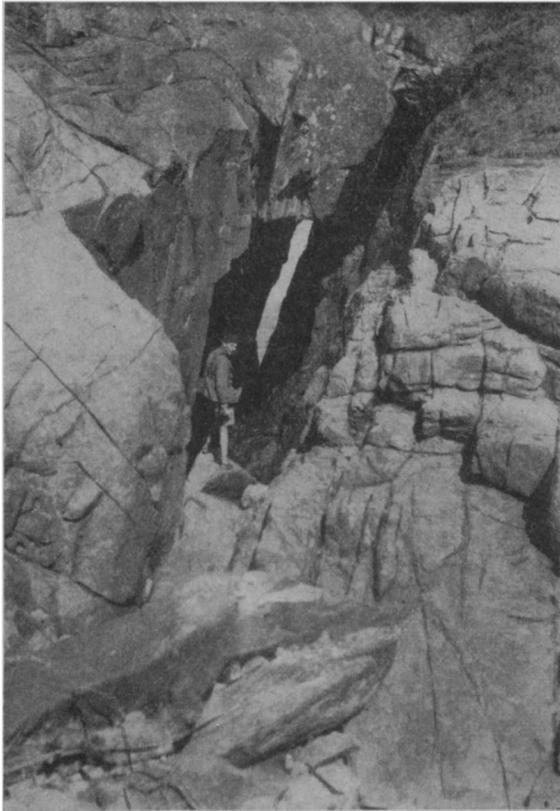


Abb. 2. Brandungshöhle im Cap d' Aguilar, Hongkong
Zwischen den steilstehenden Klüften ist von der Brandung ein schmales Gesteinsblatt herausgezerrt. Aufnahme von der heute nicht mehr von regelmäßiger Brandung erreichten „Landseite“ aus. Aufn. Panzer 1931

reicht, ein Höhlendach zu bilden. Am Moss Beach der kalifornischen Küste, auf der Westseite des Montaragebirges südlich San Francisco, besteht das wenige Meter hohe Kliff aus steilstehenden blauen Tonen und Granitgrusschichten, sehr zäh und oft zu Sandsteinen verfestigt, die in etwa 1 m Höhe über Mittelwasser mit scharfer Diskordanz von einer Lage dicker gut gerundeter Granitblöcke und kleinerer Gerölle überlagert werden. Sie bilden ein grobes Fanglomerat, vielleicht sogar dessen küstennahe Umwandlung in ein Küstenkonglomerat aus früherer Zeit. Sie

werden von geschichteten feineren Geröllagen und einer mächtigen Packung erdigen gelblichen Sandes überlagert. In den zähen Ton-, Grus- und Fanglomeratschichten hat die Brandung leichtes Spiel, sie wäscht die großen Blöcke aus und unterspült so den Kliffhang, der in seiner Zähigkeit standfest genug ist, eine Zeitlang nicht nur Brandungshöhlen, sondern vorübergehend sogar Brandungstunnel zu bilden. In solchem Gestein verändern sich die Formen freilich oft in wenigen Tagen. Aber auch bei Brandungstoren, die in festerem Gestein gebildet sind, ist schon der Mensch zum Zeugen ihres Verfalls geworden. Das „Bürgermeistertor“ am steilen Kliff der Bäreninsel im nördlichen Polarmeer, das Nordenskjöld 1864 entdeckte und nach der volkstümlichen Bezeichnung der dort in Scharen vorkommenden Mantelmöve (*Larus marinus*) benannte, wurde 1870 unverändert wiedergefunden, war 1899 aber zusammengebrochen⁸⁾. Ähnlich ist das Snepps Gatt genannte Brandungstor im Buntsandstein der Insel Helgoland vor den Augen der Inselbewohner, am Pfingstsonntag 1895, eingestürzt⁹⁾. Beim Bürgermeistertor der Bäreninsel ist die Zerstörung nicht nur der Brandung zuzuschreiben. In arktischen Gewässern ist der Strand oft lange Zeit von Eismassen belagert, und dieser „Eisfuß“ schafft besonders günstige Bedingungen für einen fortgesetzten Wechsel zwischen Frost und Tauen, so daß das Gestein in Höhe der Wasserlinie durch den Vorgang der Frostsprengung zermürbt und abgetragen wird, mehr als darüber und darunter. Das häufige Vorkommen von Brandungshöhlen an den Küsten arktischer Gewässer ist daher mit Fridtjof Nansen, der es von der Bäreninsel ausführlich beschrieben hat¹⁰⁾, sehr wohl der starken Mitwirkung der Frostsprengung zuzuschreiben. Die „shore erosion by frost“ bildet ja überhaupt die Grundlage für Nansens Auffassung von der Bildung der norwegischen Strandplatte¹¹⁾.

Der Brandung widerstanden hat bisher der Bogenfelsen an der südlichen Namibküste Südwestafrikas, der sich „wie ein Triumphbogen sechzig Meter hoch über die rauschende Brandung wölbt und doch nichts ist als ein lächerlicher Zufall in dem ewigen Gegenspiel der inneren und

⁸⁾ G. Andersson, Ymer 1900. Mitgeteilt und abgebildet bei A. Supan, Grundzüge der Phys. Erdkunde. 6. Aufl. Leipzig 1916. S. 604 f.

⁹⁾ O. Pratz, Helgoland und die Zerstörung seiner Felsküste durch das Meer. Geol. Charakterbilder, Heft 38. Berlin 1930. Taf. 3. — Vergl. auch das heroische Gemälde von Friedr. Preller d. Ä. „Sonnenaufgang auf Helgoland“.

¹⁰⁾ Fr. Nansen, Spitzbergen. Leipzig 1921. S. 38 und 44 ff. sowie Einschaltbild 6.

¹¹⁾ F. Nansen, Strandflat and isostasy. Kristiania 1922. S. 28 ff.

äußeren Erdkräfte¹²⁾). Der Ausräumung des weichen Kerns einer flach überkippten Falte aus härterem Gestein verdankt er sein Dasein, d. h. also einem Vorgang, der sehr wohl auch durch Verwitterung und Schwerkraft, also gewöhnliche Denudation, dieses Felsentor schaffen konnte und der Brandung nur bescheidene Freispülungsarbeit zuweist. Sonst wäre dieses zerbrechliche Gebilde wohl längst zusammengeschlagen. Vor der Ostküste der Gaspé-Halbinsel im St. Laurentz golf ist bei dem Dorf Percé, das seinen Namen von dem berühmten, aus roten und gelben Kalksteinen zu fast 90m aufsteigenden "Percé Rock" erhalten hat, im Jahre 1845 ein ähnliches Brandungstor eingestürzt¹³⁾).

Es gibt auch große Brandungshöhlen, bei denen sehr berechtigt die Frage aufgeworfen werden kann, ob denn bei ihrer Entstehung überhaupt der Brandung eine nennenswerte Rolle zukam und nicht andere Kräfte der Abtragung am Werke waren. Große Kalksteinhöhlen lassen grundsätzlich Entstehung durch die lösende Wirkung des Süßwassers vermuten, und die Blaue Grotte von Capri zeigt sehr deutlich, daß sie nicht durch Brandung geschaffen wurde, zumindest aber ihre heutige Wassererfüllung vorwiegend Meeresspiegelschwankungen geschichtlicher Zeit verdankt. Doch gibt es andere Höhlen, die man unbedingt als Brandungshöhlen deuten möchte und die gleichwohl die Richtigkeit der Deutung fraglich zu machen scheinen. Die Fingalshöhle auf der Insel Staffa ist zwischen senkrecht stehenden Basaltsäulen herausgearbeitet, entlang den Absonderungsklüften, die sauber freigelegt und nicht durch Brandungsschutt verschliffen oder ausgegagt sind. Es gibt zu denken, daß auch der Giants Causeway in Nordirland¹⁴⁾ eine Brandungsplattform auf Basaltsäulen darstellt, deren Köpfe keine Abschleifung zeigen, sondern in verschiedener Höhe mit scharfer Kante abbrechen. Es hat also offenbar kein Abscheuern und Abhobeln, sondern ein Ausbrechen der Säulenköpfe zur Brandungsplattformbildung geführt. Die Mehrzahl der Köpfe zeigt sogar Dellen mit Seewasserpflützen, also wohl eine chemische Abtragung des Säuleninnern zwischen widerstandsfähigeren Rändern. Hier wie bei der Fingalshöhle hat jedoch die Brandung durch Stoß, durch Druck- und Saugwirkung beim Wogenanprall das Gesteins-

gefüge gelockert. Je heftiger die Brandung anstürmt, desto stärker muß die Lockerung des Gefüges sein. Allein: je stärker das Gefüge gelockert wird, desto geringer ist die Möglichkeit, daß sich ein Felsdach über der so heftig wirkenden Brandung erhält. Die Ausbildung von Brandungshöhlen ist somit ein Vorgang, der vom Gleichgewicht zwischen Brandungsstärke und Standfestigkeit des Gesteins bestimmt wird. Je stärker die Brandung arbeitet, desto leichter wird Gestein herausgerissen und so eine Brandungshöhle gebildet werden können, desto schneller aber auch wird die Grenze der Standfestigkeit des Gesteins erreicht. Eine geringe Steigerung der Brandungsstärke führt zur Überschreitung dieser Grenze und damit unmittelbar zur Zerstörung einer begonnenen Brandungshöhle. An den offenen Außenküsten der Ozeane mit oft schwerer Sturmbrandung wird diese Gleichgewichtsgrenze so häufig überschritten, daß die Möglichkeit zur Bildung und Erhaltung von Brandungshöhlen gering ist. An Küsten aber, deren Brandung wesentlich eine Dünnungsbrandung ist, kann leichter beim größeren Gleichmaß des Kräfte- spiels sich eben jener Schwebezustand einstellen, bei dem die Standfestigkeit des Gesteins gerade eben noch dem Höchstmaß ausräumender Brandungswirkung die Waage hält, und dort sind dann die Brandungshöhlen zahlreich. So ist im gleichbleibenden Gestein die Lage zur Brandung, im gleichen Brandungsbereich die Verschiedenartigkeit des Gesteins maßgebend für die Möglichkeit zur Bildung und Erhaltung von Brandungshöhlen. Dabei ist zu bedenken, daß auch innerhalb des gleichartig zusammengesetzten und gleichartig gefügten Gesteins das Azimut des Brandungsanlaufs in der Kluftröse von nicht geringer Bedeutung sein muß: der Winkel zwischen Brandungsrichtung und Hauptkluftrichtung wird das Ausmaß und die Art der Brandungswirkung weitgehend bestimmen. Die Einzeluntersuchung solcher Fragen wäre lohnend, aber sicherlich nicht leicht, da ja die Küste nicht nur von dem Meere, sondern immer gleichzeitig auch von den abtragenden Kräften des festen Landes beeinflusst und verändert wird und diese Kräfte eben auch entlang natürlichen „Schwächelinien“ schneller wirken¹⁵⁾. An der Schärenküste der Äußeren Hebriden wie an der skandinavischen Schärenküste folgt die „selektive“ Brandungswirkung genau den Bahnen, denen die selektive Erosion des Inlandeises gefolgt war und der die heutige subaerische Abtragung durch fließendes Wasser und Frostsprengung vorzugsweise

¹²⁾ H. Cloos, Gespräch mit der Erde. München 1947. S. 76. — Gute Abbildung bei H. Grimm, Afrikafahrt West. Henschels Luginsland, Heft 34. Frankfurt a/M. 1913. S. 101.

¹³⁾ Nach frdl. Mitteilung von Herrn W. Tuckermann — Heidelberg.

¹⁴⁾ Gute Abbildung bei Fr. Lotze, Wie entstehen Schrumpfungsklüfte? Natur und Museum 62, 1932, S. 129 nach H. Robleder, Der tertiäre Vulkanismus in Nordirland. Geol. Charakterbilder Heft 37, Taf. 3.

¹⁵⁾ Das wird von E. de Martonne, Traité de Géographie physique, 3. Aufl. II., Paris 1926, S. 974 für die Küsten NW-Frankreichs betont, in deren Kliff das Sickerwasser Klüfte für die Brandungsarbeit besonders geeignet macht.

folgt. Das wird schon aus den Karten kleineren Maßstabs — etwa der norwegischen Karte 1 : 100 000 — klar und tritt bei Karten größeren Maßstabs blickfangend in Erscheinung. Die Küsten von Labrador und von Neufundland, von British Columbia und Alaska wie von Patagonien, Grahamland und von der Südinsel Neuseelands, die alle vielfach schon sehr sorgfältig aufgenommen sind, zeigen diese enge Beziehung zwischen Kluftnetz, eiszeitlicher Überformung und heutiger Küstengestalt.

Hat schon die bis hierher geführte Untersuchung ergeben, daß die Bildung von Brandungshöhlen in höherem Grade vom Gestein als von der Brandung bestimmt wird, so zeigt sich nun im weiteren Fortgang, daß die Brandungskehlen in noch viel stärkerem Maße, doch in anderer Weise, bestimmter Gesteinsbeschaffenheit ihr Dasein verdanken.

Die Brandungskehle ist mit ihrem überhängenden Dach (Überhang), halbrunder Rückwand und der glatten Sohle gewiß nichts anderes als eine Sonderform der Brandungshöhlen, doch ist es eine auffällige Tatsache, daß gut entwickelte Brandungskehlen selten sind und meist nur punktweise an der Küste vorkommen, kaum je in zusammenhängender Flucht, wie das bei gleichbleibendem Gestein und gleicher Brandungsstärke zu erwarten wäre. Ja, man darf behaupten, daß an Kliffküsten die Brandungshöhlen weit zahlreicher vorkommen als gute Brandungskehlen. Die Brandungskehle ist in ihrer eigentlichen Form als durchlaufende Unterschneidung des Kliffhanges ein wahres Kunstgebilde, das die groben Hammerschläge einer großen Brandung kaum zustande bringen, weil sie es, bevor es recht gebildet sein kann, roh zerschlagen. Gewiß stört ihre Bildung der Gezeitenhub, der die Wasserlinie und damit die Brandung zweimal täglich an dem Kliff oft viele Meter auf- und abwärts führt und so die Bildung einer Hohlkehle in gleichbleibender Höhe verhindert, doch müßte dann doch wenigstens in Hochwasserhöhe eine Brandungskehle sich bilden können. Allein sie fehlt auch dort, und immer ist es fast — so seltsam das auch scheint — die Brandung selbst, die das Zustandekommen eines so formenschönen Gebildes, wie es eine echte Brandungskehle ist, verhindert. So wird verständlich, was *G. W. v. Zahn* bei seiner Untersuchung der zerstörenden Arbeit des Meeres an Steilküsten beklagt: „Umso größer aber war mein Erstaunen, daß ich in der Bretagne und auf den Scilly-Inseln äußerst selten eine typische Hohlkehle zu finden vermochte“¹⁶⁾, und daß er dann in einer Überschau aller näher bekannten Kliff-

küsten der Erde zum gleichen Ergebnis der „Seltenheit dieser Erscheinung“ kommt. Er führt dann eine Reihe wohlherzogener Gründe auf, durch die die Bildung einer Hohlkehle erschwert wird. Doch übersieht er, daß in seinen eigenen sorgfältigen Beobachtungen schon ein Hinweis auf die Bildungs- und Erhaltungsmöglichkeit von Brandungskehlen gegeben ist, wenn er feststellt: „Die beiden einzigen Stellen, wo dies der Fall war“ (— die Brandungskehle typisch ausgebildet war —) „lagen nicht dem freien Meere zugewandt, sondern an der Seite von Klippen“ und im einzelnen dann erklärt: „Von einer Brandungswirkung kann hier noch weniger die Rede sein“¹⁷⁾.

Diese sehr richtige und wichtige Beobachtung ist merkwürdigerweise noch kaum recht aufgegriffen worden. Zwar hat schon 1913 *Emil Werth*¹⁸⁾ in seiner Kritik der *Zahnschen* Anschauung hervorgehoben, daß für die Bildung bzw. das Fehlen einer Brandungskehle der Gezeitenhub nicht ausschlaggebend sei, da offene Ozeanküsten auch bei starkem Gezeitenhub sehr wohl auch Brandungskehlen entwickeln könnten. Aber *Gradmann* macht gerade wieder den Mangel an Gezeiten an der an auflandigen Winden reichen algerischen Küste mit verantwortlich für das dort häufige Auftreten von Brandungskehlen, neben der geringen Höhe des Kliffs¹⁹⁾. Ein hohes Kliff liefert so viel Schutt, daß die Brandung in der weiteren Unterschneidung des Gehänges lange Zeit gehindert wird. Dem Gestein hingegen sei, im Gegensatz zur Anschauung von *Werth*, der seine Bedeutung betont, keine ausschlaggebende Rolle anzuerkennen, da die algerische Küste Brandungskehlen in festem Kalkstein, tertiären Konglomeraten und Sandsteinen, wenig verfestigten Sandablagerungen und, besonders prachtvoll entwickelt, in kristallinen Schiefen aufweise.

So bleiben viele Widersprüche bestehen, und *Otto Maull*, der selbst im Anschluß an die Studien von *Edwin Fels* auf Korfu²⁰⁾ doch wieder die Gesteinsbeschaffenheit für wesentlicher hält als andere Bedingungen, muß in seiner 1938 erschienenen „Geomorphologie“ feststellen²¹⁾, daß die Erörterung dieser Frage zu einer genügenden Klärung bisher nicht geführt habe. Die Brandungskehle sei jedenfalls nicht die gesetzmäßige Folge des Meeresangriffs auf die Steilküste.

¹⁷⁾ *G. W. Zahn*, a. a. O. S. 233.

¹⁸⁾ *E. Werth*, Die Bedingungen zur Bildung einer Brandungskehle. *Z. Ges. Erdk.* Berlin 1911. S. 35—42.

¹⁹⁾ *R. Gradmann*, Die algerische Küste in ihrer Bedeutung für die Küstenmorphologie. *Pet. Mitt.* 63, 1917. S. 137 ff., 174 ff., 209 ff.

²⁰⁾ *E. Fels*, Die Küsten von Korfu. *Mitt. Geogr. Ges. München*, 16. 1923. S. 21*—114*.

²¹⁾ *O. Maull*, *Geomorphologie*. Wien 1938. S. 377.

¹⁶⁾ *G. W. Zahn*, a. a. O. S. 233.

Bei der erwiesenen Seltenheit von guten Brandungskehlen auf der Erde muß die Fragestellung schon von vornherein nicht die bisherige, die nach den Ursachen ihres Fehlens, sein, sondern gerade umgekehrt: Unter welchen Bedingungen kann eine Brandungskehle gebildet und erhalten werden? Mit dieser Frage entfällt zunächst der Zwang, die Brandungskehle als das Mittelglied in einer Entwicklungsreihe anzusehen. Man ging bisher, vielleicht ganz unbewußt, von der Voraussetzung aus, daß im steilen Kliff zuerst sich eine Kerbe (engl. nip) bemerkbar macht, die dann zur richtigen Hohlkehle (engl. notch) vergrößert wird und die bei fortdauernder Wirkung dann zuletzt zur Brandungshöhle (engl. sea cave) werden kann. Allein die oben vorgetragene, aus Beobachtungen abgeleitete Auffassung, wonach die Brandungshöhlen im wesentlichen unmittelbar aus der Kliffwand herausgerissene oder ausgeräumte, aber nicht ausgenagte und ausgeschliffene Hohlformen sind, verbietet, Kerbe/Kehle/Höhle als Glieder einer Entwicklungsreihe aufzufassen. Wohl kann die Kerbe einerseits zur Höhle werden, aber für die Brandungshöhlenbildung ist die Kehle nicht Voraussetzung. Die Brandungskehle ist in ihrer typischen Form ganz sicher Endglied einer stetigen und sicherlich nicht stürmischen Entwicklung. Sie ist ein sauber ausgefrästes Gebilde, das nicht den Raubtierzahn der reißenden Brandung, sondern beharrlichem Nagen sein Dasein verdankt. Dabei sind alle Mittel der Abtragung anwendbar, nur muß ein Gleichmaß ihrer Wirkung eingehalten werden. Der Stoß der Brandungswelle darf nur eine bescheidene Lockerung des Gefüges herbeiführen, so daß nur kleine Brocken ausgebrochen und entfernt werden und Zeit genug zum Abschleifen der Kanten bleibt. Daraus ergibt sich, daß die Menge des verfügbaren Brandungsschuttes gering bleibt und zu feineren Bestandteilen zermahlen wird, so daß mit jedem Brandungsschlag ein stetiges, jedoch nur feines Wetzen durch die mitgeführten Feinbestandteile erfolgt. Der chemische Angriff durch das Meerwasser auf das Gestein darf nicht zu heftig sein, da sonst ein löcheriges Zerschneiden und nicht die Glätte einer Brandungskehlenrückwand erreicht würde. Der Frost darf nur in Form der Frostabschälung wie beim Jung Gatt im Buntsandstein Helgolands die Deck- und Rückwand abblättern²²⁾, während der Spaltenfrost schon gleich wieder zackige Höhlen ausbricht wie auf der Bäreninsel, wo eben Brandungshöhlen, nicht aber Brandungskehlen zustandekommen.

²²⁾ O. Pratje, Helgoland und die Zerstörung seiner Felsküste durch das Meer. Geol. Charakterbilder Heft 38. Berlin 1930. Taf. 2.

So sind die Möglichkeiten zur Bildung einer echten Brandungskehle stark beschränkt, und innerhalb des eingeeengten Rahmens gibt wohl das Gestein den Ausschlag. Eine Zusammenstellung der Vorkommen wohlentwickelter Brandungskehlen muß unbestreitbar den Korallenkalk als das geeignetste Gestein zur Bildung und Erhaltung einer Brandungskehle ansprechen, wie Werth das in seiner kritischen Stellungnahme zu v. Zahns Auffassung bereits getan hat (s. o. S. 34). Brandungskehlen im Korallenkalk sind wohl am frühesten von Afrika bekannt geworden, wo in Äquatornähe an der Ostküste und auf den vorgelagerten Inseln gehobener Korallenkalk ganz wunderbar wie von einem riesigen Kehlhubel in Höhe der Wasserlinie unterschritten ist²³⁾. Sie sind jedoch inzwischen von allen tropischen Meeren bekannt geworden. Wo immer gehobener Korallenkalk vom Meer bespült wird, ist die bezeichnende Musterform einer Brandungskehle zu finden. Bespült ist wohl der rechte Ausdruck, denn es zeigt sich, daß die Brandungskehle gerade auch da besonders sauber ausgebildet wird, wo keine starke Brandung das Gestein erreicht. Das Außenriff an korallenriffumsäumten Küsten fängt die Meeresdünnung meist in starker Brandung ab, so daß die Lagune dahinter ruhig bleibt und trotzdem ausgezeichnete Brandungskehlen im gehobenen Korallenkalk entwickelt sein können. Kennzeichnend für die Brandungskehlenküste im Korallenkalk ist vor allem das Fehlen von Brandungsschutt. So liegt die Vermutung nahe, daß diese schöne Brandungskehle im Korallenkalk gar nicht durch die mechanische Arbeit der Brandungswellen erzeugt wird, sondern einem Lösungsvorgang ihr Dasein verdankt²⁴⁾. Die ätzende Wirkung der Meereswellen, die das Kliff belecken, schein den Korallenkalk zersetzt und den Zersatz abwaschbar gemacht zu haben, so daß allmählich eine Hohlkehle herausgelaugt wird.

Es ließe sich nun zweierlei einwenden: Vermag das Meerwasser mit seiner chemischen Zusammensetzung überhaupt Korallenkalk zu lösen? und zweitens: Ist es nicht eben doch das feine Schleifmittel des Korallenkalkzersatzes, das mechanisch, von den kleinen Brandungswellen gegen den Korallenkalk bewegt, allmählich eine Kehle ausnagt? Die zweite Frage sei zuerst beantwortet. Es ist unbestreitbar, daß von jeder Brandungswelle die gefügelockernde Druck- und Zugwirkung ihres Schlages und die Schleifwirkung ihres mitgeführten Brandungsschuttes aus-

²³⁾ Vgl. die schönen Abbildungen aus neuerer Zeit von O. Pratje in Natur und Volk 66. 1936. S. 29 ff.

²⁴⁾ W. Panzer, Junge Küstenhebung im Bismarckarchipel und auf Neuguinea. Z. Ges. Erdk. Berlin 1933. S. 177 und Abb. 9 auf Taf. IV.

geübt wird und somit das Kliff, aus welchem Gestein es immer bestehe und wie groß oder gering die Brandung immer sei, mechanisch angegriffen wird. Allein ist schon die Spärlichkeit, wenn nicht das Fehlen sichtbaren Brandungsschuttes bezeichnend für die Brandungskehlenküste im Korallenkalk, auch wenn eine oft recht breite Brandungs-Platte vor dem Kliff entwickelt ist, so gibt besonders der Umstand zu denken, daß es Kliffe im Korallenkalk gibt, die keine vorgelagerte Brandungs-Platte haben, aber trotzdem durch eine wohlentwickelte Brandungskehle unter einem überhängenden Dach ausgezeichnet sind, so daß hier nur das reine, sinkstofffreie Meerwasser für die Schaffung einer Brandungskehle verantwortlich gemacht werden kann.

auf die Bildung der Hohlkehle, so daß man, da eine Regenwasserschicht sich auf dem Meerwasser wohl auch bei ruhiger See nicht lange halten kann, wohl annehmen muß, daß außerdem wohl eine Art Grundwasserstrom in Höhe des Meeresspiegels austritt und dort die Brandungskehle aus dem Korallenkalk löst. Äquaturnahe Küstenlandschaften mit Kliffen im gehobenen Korallenkalk sind sicherlich durch großen Regenreichtum ausgezeichnet. Auf den Hawaiischen Inseln, wo die *Wentworths*chen Beobachtungen diese starke Beteiligung des Süßwassers an der Formenbildung in der Brandungszone zu fordern scheinen, ist die jährliche Regenhöhe mit etwa 900 mm nicht gerade groß²⁰⁾, doch auf Neu Mecklenburg, an der Nordküste von Neuguinea und an der Westküste

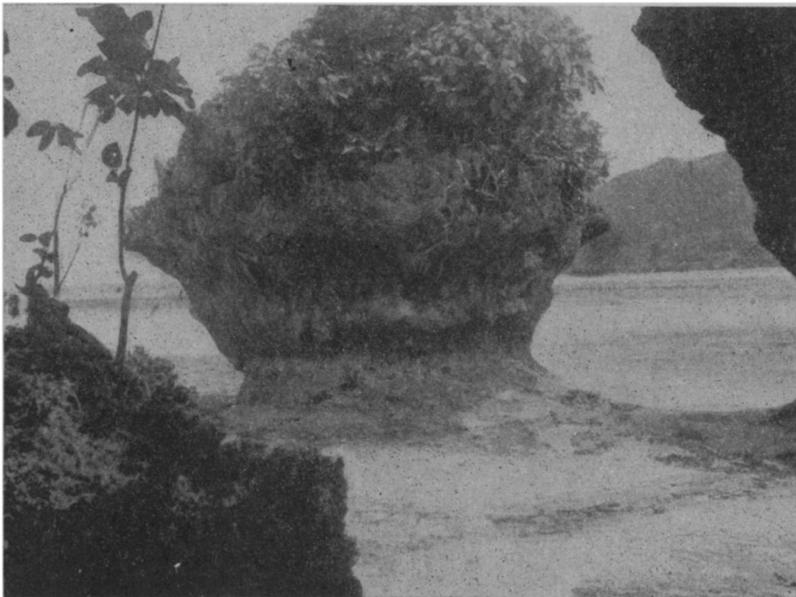


Abb. 3.
*Pilzfelsen aus Korallenkalk,
Patlangat auf Neu Mecklenburg,
Bismarck Archipel*

Zwei Brandungskehlen (Lösungskehlen) übereinander (auch im Vordergrund rechts erkennbar), stark verkarstete Kappe, spärlicher Brandungsschutt auf der Riffplatte.

Aufn. Panzer 1932

Auf den Hawaiischen Inseln, wo gehobener Korallenkalk an vielen Stellen vom Meer in einem Kliff angegriffen wird und Brandungskehlen mustergültig ausgebildet sind, hat *Wentworth* die ebene Strandfläche vor dem Kliff, die Brandungsplatte, als „Lösungsstrandplatte“ (solution bench) gedeutet, jedoch die Ansicht ausgesprochen, daß die Lösung nicht von dem an kohlenurem Kalk gesättigten Meerwasser ausgehen könne, sondern, wie die hochgradige Verkarstung im gehobenen Korallenkalk beweise, ganz wesentlich vom Regenwasser und anderem landbürtigen Wasser vorgenommen sei²⁵⁾. Das überhängende Dach der Brandungskehle verhindere wohl eine unmittelbare Einwirkung von Regenwasser

der Philippineninsel Luzón, wo ähnliche Hohlkehlenbildungen im gehobenen Korallenkalk zu beobachten sind, übersteigt der jährliche Niederschlag 2000 mm beträchtlich. Allein es mutet dann doch schon recht eigenartig an, daß in diesen Landschaften auch ein völlig losgetrenntes Stück des alten gehobenen Korallenriffs von umlaufenden Hohlkehlen in Pilzfelsen verwandelt werden konnte, wie das an der Küste von Neu Mecklenburg (s. Abb. 3) oder an der Küste der Philippinen zu beobachten ist. Die nur wenige Quadratmeter große Fläche eines solchen Pilzfelsens wird kaum einen ausreichenden Grundwasserstrom zu nähren in der Lage sein, der auch noch eine Brandungskehle herauszulösen

²⁵⁾ *Ch. K. Wentworth*, Marine bench forming processes II, Solution Benching, *Journal of Geomorphology*, II, 1939, S. 3—25.

²⁰⁾ Die Zahl gilt für Honolulu. Auf der dem Passat zugewandten Nordostseite der Inseln ist der Niederschlag wesentlich höher, an der Nordostküste von Hawaii z. B. 3560 mm.

fähig ist, nachdem er sich beim Auflösen der Oberfläche des Pilzfelsens in eine hochgradig verkarstete Kappe schon stark mit kohlen-saurem Kalk angereichert hat. Vor allem aber spricht gegen eine maßgebliche Beteiligung von Süßwasser bei der Brandungskehlenbildung der Umstand, daß auch in niederschlagsarmen Klimaten mit hoher Verdunstung und demnach wohl sicher recht geringem Grundwasserstrom ganz ausgezeichnet geformte Brandungshohlkehlen vorkommen. Die beige-fügte Aufnahme von Port Sudan an der afrikanischen Küste des Roten Meeres (Abb. 4) zeigt auffällig, wie stark gesteinsgebunden diese Brandungskehlen sind und daß für ihre Bildung doch in erster Linie das Meerwasser verantwortlich zu machen ist. Denn hier im Küstenland des Roten Meeres unter $19\frac{1}{2}^{\circ}$ nördl. Breite und bei kaum mehr als 200 mm jährlichem Niederschlag ist unter der Strandplatte, auf der der Ort erbaut ist, kein nennenswerter Grundwasserstrom zu erwarten. Und dann vor allem ist nicht einzusehen, warum die Lösung da am stärksten sein soll, wo sie durch das anbrandende Meerwasser am meisten in ihrer Wirkungsmöglichkeit gehindert wird.

Nein, es kann wohl mit voller Sicherheit angenommen werden, daß die Bildung einer Hohlkehle im Korallenkalk vorzüglich Brandungsarbeit des Meeres ist. Damit ist auch dem anderen obigen Einwand begegnet: Das Meerwasser scheint mit seiner chemischen Zusammensetzung und im Tropenklima offenbar doch eben fähig zu sein, Korallenkalk chemisch anzugreifen und so die Brandungskehle in ihrer Musterform zu bilden, die damit also eine durch „chemische Erosion“ geschaffene Form darstellt, wie man das nicht sehr glücklich nennt.

Daß der Korallenkalk nicht nur zur Bildung, sondern auch zur Erhaltung einer Brandungskehle ganz besonders geeignet ist, verdankt er wohl der ungewöhnlichen Standfestigkeit des Gesteins. Korallenkalk ist außerordentlich zäh und unempfindlich gegen Stoß, wie jeder Hammerschlag ergibt: man hat den Eindruck, als ob auch der schwerste Schlag schon innerhalb der nächsten Zentimeter des Gesteines aufgefangen wird. Es ist ein ungemein schlechter Druckleiter und bei dem Mangel einer Klüftung auch von schweren Brandungsschlägen kaum zu erschüttern oder gar zu lockern. So wird es verständlich, daß sich im Korallenkalk im Gegensatz zu wohl allen anderen Gesteinen Brandungskehlen auch auf größere Erstreckung an der Küste entlang ausbilden und erhalten können.

Eine auf längere Strecke durchlaufende und mustergültig ausgebildete und erhaltene Brandungskehle in einem anderen Gestein als Korallenkalk ist mir nur von dem Bild bekannt, das

L. Berg am Ufer der Nikolai-Insel im Aralsee aufgenommen hat²⁷⁾. Allein es ist wohl keine echte Brandungskehle, wiewohl es sich um ein echtes Kliff und die Brandung eines Salzsees handelt, die die Formen geschaffen haben. Aber aus dem scharfen Hohlknick, mit dem das Dach dieser Brandungskehle über der steilen, leicht gekrümmten Rückwand ansetzt, geht hervor, daß hier in flach geschichtetem Gestein eine harte Bank durch Wellenschlag herausgewaschen wurde und nun wie ein Brandungskehlendach weit überhängt. Im Trockenklima Turkestans verbleibt

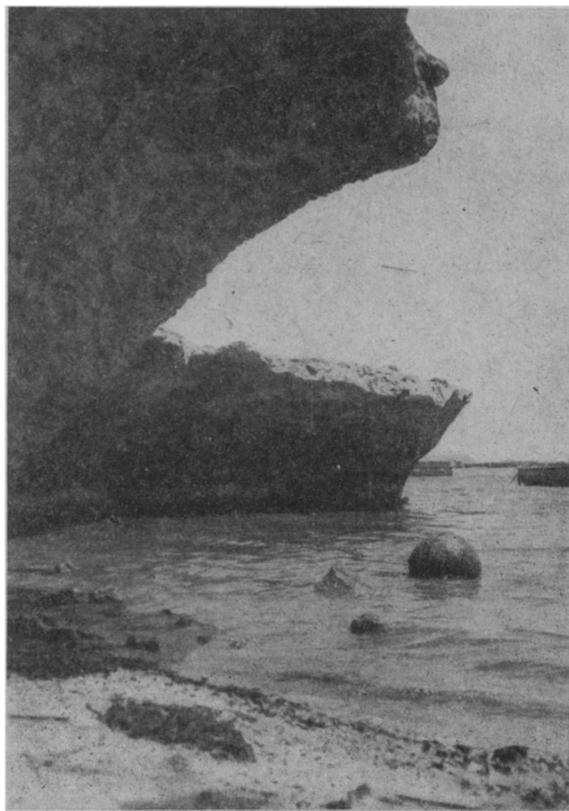


Abb. 4. Brandungskehle im Korallenkalk von Port Sudan, Rotes Meer

Weit überhängendes Dach. Brandungsschutt gering und kleinstückig. (Die Steinkugel ist Menschenwerk.)

Aufn. Panzer 1934

wohl auch den weichen ausgespülten Mergeln, um die es sich handeln dürfte, die hohe Standfestigkeit, die zur Erhaltung einer solchen Form vonnöten ist. Die Brandungskehle ist hier eine *Ausspülungskehle*.

In flachgeschichteten Gesteinen geringerer Verfestigung, also den meisten neogenen Schichten,

²⁷⁾ Wiedergegeben bei *Supan-Obst*, Grundsätze der Physischen Erdkunde. 7. Aufl. II., Berlin 1930, S. 464.

entwickelt sich an einem Kliff mit mäßiger Brandung wohl immer schnell ein Kliffprofil, das härtere Bänke schützend über Auswaschungen weicherer Schichten überstehend zeigt und so den Eindruck einer echten Brandungskehle vermittelt. Die beigefügte Abbildung (Abb. 5) vom Ostgestade der San Francisco-Bucht in Kalifornien zeigt sogar zwei Kehlen übereinander. Es handelt sich um miozäne Sandsteine und Mergel, die von einer dicken pleistozänen Decke überlagert werden. Die Schichten fallen nach Nordosten, von der Küste in das Land, die Küste läuft an dieser Stelle im Streichen, so daß die Ausbisse der Schichten gleiche Höhe über dem Meeresspiegel halten und ein waagrecht gelagertes Gestein vortäuschen. Eine harte Pectenbank ist kräftig unter-

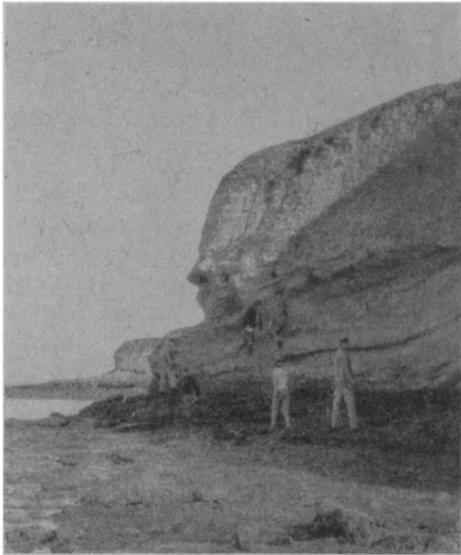


Abb. 5. Kliff mit zwei Brandungskehlen übereinander, Bucht von San Francisco, Kalifornien

Die beiden Hohlkehlen sind durch Herausarbeiten von Gesteinsunterschieden entstanden (Auspülungskehlen), zeigen also nicht verschiedene Meeresspiegelstände an!

Aufn. Panzer 1929

spült, doch ist das Liegende der pleistozänen Deckschicht ebenfalls verfestigt, so daß auch über der Pectenbank eine weich geformte Hohlkehle zustandekommt. Beide Kehlen sind von der Brandung herausgewaschen, sind also Brandungskehlen. Sie gehören aber nicht zu den in Rede stehenden Brandungskehlen in homogenem Gestein, und sie verschwinden auch, sobald die neogenen Schichten gleichmäßig werden. In zähen jungtertiären Mergeln und Mergelkalken an der Mündung der Gironde nächst Royan, gleich nördlich Pointe de Vallières, haben sich, nicht durch die Brandung, aber durch die tägliche Gezeitenströmung, Strudeltöpfe teilweise zu einer unter-

irdischen Galerie zusammengeschlossen, aber eine gute Brandungskehle ist im Kliff hier nicht entwickelt.

Im Sandstein, etwa dem Buntsandstein Helgolands, sind die Bedingungen zur Ausbildung von Brandungskehlen anscheinend recht günstig, wie die von *Pratje* mitgeteilten Beobachtungen und Abbildungen beweisen²⁸⁾, aber dort wird die Grenze der Standfestigkeit zu häufig durch die schwere Sturmbrandung überschritten, als daß die feiner ausgearbeiteten Gebilde von Brandungskehlen sich erhalten könnten — sie werden meist wohl schon im Beginn ihrer Ausbildung zerschlagen.

Wird diese zerstörende Arbeit der Brandung ausgeschaltet, dann ist im Sandstein eine Brandungskehle wohl entwickelbar. Das läßt sich trefflich im Franciscan Sandstone Kaliforniens (Jura) beobachten, wo auf der Ostseite der Bucht von San Francisco am Molate Point der Halbinsel Potrero bei Niedrigwasser eine saubere, nur etwa 1 m hohe Hohlkehle entwickelt ist, vor der sich eine kleine Brandungsplattform leicht zur nahen Wasserlinie neigt. Diese Plattform zeigt bezeichnende Beschaffenheit: sie ist zum Teil ganz glatt, zum Teil mit Blöcken überstreut, die auffällig eckig sind im Gegensatz zum feineren Kies, der gut oder wenigstens besser gerundet ist. Hier ist der Brandungsschutt demnach nur mit den leicht bewegbaren feineren Bestandteilen an der Herausformung der Brandungskehle beteiligt. Die größeren Bestandteile werden offenbar von der gemäßigten Brandung in der Bucht nur wenig bewegt. Ja, daß der Brandungsschutt bei der Herausbildung der Brandungskehle in diesem Sandstein überhaupt nur sehr gering beteiligt ist, wird schlagend durch die Brandungsplattform selbst bewiesen, deren grober Schutt an manchen Stellen zu quadratmetergroßen glatten Flächen mittels angetriebener Ölrückstände der benachbarten großen Ölraffinerien verkittet ist und somit an der Kliffumformung unbeteiligt bleibt. Das Kliff ist aber frisch, so daß es hier also nur der leichte Wellenschlag mit einer gelegentlichen Beimischung von feinem Kies und wahrscheinlich doch auch die Ätzwirkung des Salzwassers sind, die hier in ruhiger Arbeit eine mustergültige Brandungskehle schaffen.

Es ist wohl sicherlich kein Zufall, daß an der algerischen Nordküste die Sandsteine der Hafeneinfahrt von Tipasa, 60 km WSW Algier, besonders schöne Brandungskehlen zeigen, ja, der eigentümliche Felsklotz in der Hafeneinfahrt, der ein altes Grabmal trägt, durch eine umlaufende Bran-

²⁸⁾ O. *Pratje*, Helgoland und die Zerstörung seiner Felsküste durch das Meer. Geol. Charakterbilder Heft 38. Berlin 1930.

dungskehle zu einem Pilzfelsen geworden ist²⁹⁾. Dort ist die Brandung sicherlich weitaus gemäßigter als an einer Außenküste. Daß solche Unterschnidungen, wenn auch viel unregelmäßiger und mit zerklüfteten und zerfressenen Wandungen, auch in anderen Gesteinen vorkommen können, beweisen die kristallinen Schiefer der Küstenvorsprünge beiderseits der Bucht von Algier³⁰⁾.

Wenn in den Limonitsandsteinen des Morsumkliffs auf Sylt sich eine Brandungskehle auf der Ostseite der Insel, also am ruhigen Strand des leeseitigen Wattenmeeres, erhalten hat³¹⁾, so wird damit nur wiederum bewiesen, daß der ruhige Wellenschlag im keineswegs sehr widerstandsfähigen, ja mit der Schichtung seewärts geneigten Gestein viel eher eine saubere Kehle auszunagen vermag als grobe Brandung im viel festeren Gestein.

Zwar ist an der bewegteren Côte d'Azur Südfrankreichs auf der Westseite der Bucht von Agay (unweit des Bahnhofs) eine besonders schöne Brandungskehle in die Küstenplattform eingeschnitten, aber diese setzt sich aus wechsellagernden Sandsteinen und Konglomeraten des Rotliegenden zusammen, deren verschiedene Widerstandsfähigkeit sehr wohl die eigentliche Ursache der Brandungskehlenbildung sein kann und damit diese Brandungskehle für die Förderung der angeschnittenen Fragen ungeeignet macht.

Die Zähigkeit und Standfestigkeit, wie sie dem Korallenkalk zu eigen ist, scheint offenbar ganz ähnlich auch Lava zu besitzen. Die Ufer der Insel Fernando da Noronha vor der brasilianischen Ostküste werden stellenweise von prächtigen Hohlkehlen im Basalt umrandet³²⁾. Auch das durch *Chamisso's* Gedicht berühmt gewordene trostlos öde Felseneiland Sala y Gomez im Stillen Ozean, 3000 km westlich der chilenischen Küste, scheint trotz der Umgürtung mit einem Korallenriff im niedrigen Kliff seiner dunklen Lavagesteine eine Brandungskehle aufzuweisen³³⁾. Auf der Nordinsel von Neuseeland ist in die Westseite bei Auckland ein erstaunliches Kliff eingeschnitten, das „majestätisch“ über das schmale Band der Brandungsplatte darunter „überhängt“. Und das Gestein ist ein „hochgradig widerstandsfähiges, gleichförmiges ungeklüftetes vulkanisches Konglomerat“³⁴⁾. Auf der Kap

Verdeninsel Sao Vicente sind die Tuff- und Lavaschichten des Inselchens Ilha dos Passaros, dem letzten Rest eines vom Meer durchbrochenen Kratterringwalls, der den Porto Grande genannten Naturhafen der Hauptstadt Mindello bildet, von einem Kliff mit Brandungskehlen angeschnitten³⁵⁾.

Daß selbst bei einem Lavakliff die ätzende Wirkung des Seewassers eine Rolle spielen kann, scheint durch die Versuche von *Joly* erwiesen, der zu zerkleinertem Basalt in mehrmonatiger Dauer abwechselnd Luft und Wasserzutreten ließ und dessen Messungen ergaben, daß je qm Gesteinsoberfläche im süßen Wasser 0,2048 g, im Seewasser jedoch 0,5926 g, also fast die dreifache Menge in Lösung ging³⁶⁾. Im tropisch warmen Wasser mag der Lösungsvorgang noch beschleunigt sein.

Für Kalkstein ist diese lösende Wirkung des Meerwassers entgegen der Erwartung offenbar nicht allgemein als sicher angenommen. Wir haben schon erwähnt, daß sie selbst für Korallenkalk, wo Meereswasserätzung unbestreitbar ist, von *Wentworth* abgelehnt wird, da das Meereswasser mit kohlenstoffsaurem Kalk gesättigt sei. Und in der Tat muß es auffallen, daß von den Kalkkliffküsten, etwa denen des Mittelmeeres, das Vorkommen von Brandungskehlen keineswegs als besonders häufig berichtet wird. Die Costas de Garraf südwestlich Barcelona fallen so steil ins Meer, daß sich die Bahn in Tunneln hinter dem Außenkliff ihren Weg suchen muß. An vielen Stellen greift das Meer in tiefen Schluchten in die Kreidekalke ein, an vielen Stellen hat es Höhlen aufgerissen, aber eine gute Brandungskehle ist nicht da. In den Kalken der Ligurischen Küste kommen Brandungshöhlen vor, die, durch die Schichtenlagerung begünstigt, beispielsweise in der Bucht von Sori eine mehrere Meter tiefe Brandungshöhle unter überhängendem und mit dem Schichtfallen seewärts geneigten Dach herausgearbeitet haben, aber eine Brandungskehle ist das nicht. An der dalmatischen Küste, den Küsten Griechenlands, etwa bei Nauplia, im Busen von

²⁹⁾ R. Gradmann, Die algerische Küste in ihrer Bedeutung für die Küstenmorphologie. *Pet. Mitt.* 63, 1917. Taf. 21, Fig. 5 und 6.

³⁰⁾ R. Gradmann, a. a. O. S. 142 und Taf. 21, Fig. 7.

³¹⁾ E. Werth, Die Bedingungen zur Bildung einer Brandungskehle. *Z. Ges. Erdk.* Berlin 1911. S. 39 f.

³²⁾ O. Maull, Vom Itaiaya zum Paraguay. Leipzig 1930. S. 9 und Abb. 1.

³³⁾ H. Falke, Die Insel Sala y Gomez. *Natur und Volk* 71, 1941, S. 146—150 und bes. Abb. 4.

³⁴⁾ J. A. Baltrum, Abnormal shore platforms. *Journal of Geology* 34, 1926. S. 800 und Fig. 3 und 4.

³⁵⁾ E. Werth, Die Bedingungen zur Bildung einer Brandungskehle. *Z. Ges. Erdk.* Berlin 1911, S. 39. — E. Friedländer, Beiträge zur Kenntnis der Kapverdischen Inseln, Berlin 1913, erwähnt diese Brandungskehlen nicht, macht aber auf ehemalige Brandungshöhlen aufmerksam, die auf Boavista zahlreich vorkommen, so an der NW-Küste und auf der kleinen Leuchtturminsel gegenüber der Hauptstadt Sal Rey in 70—80 m NN, als Anzeichen einer alten Strandlinie aufgefaßt (S. 58) und in 200 m NN in der Rocha d'Estancia (Taf. X, Fig. 20 und 21). Nach den in Abb. 21 erkennbaren zapfenförmigen Gebilden im Hintergrund der Höhle sowie beim Fehlen sonstiger Anzeichen für so bedeutende Meeresspiegelschwankungen möchte man die Höhle freilich mehr für eine Verwitterungshöhle als für eine Brandungshöhle halten.

³⁶⁾ J. Joly, Expériences sur la dénudation par dissolution dans l'eau douce et dans l'eau de mer. *C. R. Int. Geol. Congr.* VIII. fasc. 2. Paris 1901. S. 780.

Ägina, an den Küsten Attikas, der Insel Kreta: immer wieder überrascht geradezu, wie selten in dem scheinbar doch geeigneten Kalkstein Brandungskehlen ausgebildet und erhalten sind. Das Gleiche gilt auch für die Kreidesteilküsten des Armeikanals, wo auf der englischen wie der französischen Seite bis zu 100 m hohe Kliffs entwickelt sind, die Schichten wohl auch oft in kleinen Gesimsen und Hohlkehlen herauswittern, eine Brandungskehle aber meistens fehlt³⁷⁾.

An dieser kurzen Übersicht, die beliebig zu erweitern wäre, ist auszusetzen, daß der Kalkstein doch zu sehr als ein Begriff genommen wird, da er ja chemisch ebenso wie in seinen physikalischen Eigenschaften im größten Ausmaße veränderlich sein kann. Darum hat *Edwin Fels* bei seiner Untersuchung der Küsten der Insel Korfu schon deutlich nach Gesteinen unterschieden: Plattenkalke zeigen niemals eine Brandungskehle, doch in dichten Kalksteinen, vor allem dichten kristallinen Kalken, wenn sie nicht geschichtet sind, sind Brandungskehlen „typisch“ entwickelt.

Zu denken gibt da freilich, was der gleiche sorgfältige Beobachter als allgemeinen Schluß mitteilen muß: Die Brandungskehlen sind in dichten Kalken, Konglomeraten oder Breccien nur da entwickelt, wo dem anstehenden Gestein kein Block- oder Sandstrand vorgelagert ist, wo das Gestein vielmehr mit steilem Böschungswinkel in das tiefe Wasser abfällt. Damit wird wiederum, wie für die oben mitgeteilte Beobachtung von der Küste Neuguineas, die eigentliche Erosionswirkung der Brandung mittels ihres Brandungsschuttes ausgeschaltet, und wenn wir weiter hören, daß im Gips auf Korfu wundervolle Brandungskehlen oder eigentlich schon Höhlen bis zu 4 m Tiefe bei nur einem halben Meter Höhe „eingefressen“ sind, dann wird doch eben wieder deutlich, daß der chemischen Ätzung durch das Seewasser eine große, wenn nicht ausschlaggebende Rolle, auch in Kalkgesteinen, zufällt. Dafür spricht auch die Kantenschärfe, mit der die Brandungskehlen in das Kalkgestein von Korfu eingeschnitten sind, und ihre gleichmäßige Höhe. Am offenen Meer mit hoher Brandung ist selbst im Gips eine Brandungskehle nicht vorhanden. Auch von der Straße von Gibraltar berichtet *Jessen*, daß die besonders schroffen und hohen Steilhänge der Kalksteinküste an ihrem Fuß von „Brandungshohlkehlen unterwühlt“ sind³⁸⁾.

Es ist wohl nicht mehr notwendig, nun auch noch andere verbreitete Gesteine durchzusprechen, wie weit sie sich zur Bildung einer Brandungskehle eignen oder sie vermissen lassen, wie ganz offenbar an allen Küsten der Granit. Die

Frage, unter welchen Voraussetzungen sich an der Kliffküste des Meeres eine Brandungskehle bilden und erhalten kann, ist weder hinsichtlich der Brandung noch bezüglich des Gesteins eindeutig zu beantworten. Es kann von jeder Brandung und es kann in jedem Gestein eine Brandungskehle ausgebildet werden. Aber die beobachtete Seltenheit von guten Brandungskehlen an den Kliffküsten der Erde zeigt, daß innerhalb der vielen Möglichkeiten, die Gestein und Brandung bieten, offenbar nur wenige in ihrem Zusammenspiel zur Bildung einer Brandungskehle führen. Der Idealfall gleichmäßiger Brandung in einheitlichem Gestein unmittelbar vor Erreichen der Gleichgewichtsgrenze zwischen Brandungsstärke und Standfestigkeit des Gesteins ist so selten auf der Erde wie das Vorkommen von guten Brandungskehlen. Je gleichmäßiger die Brandung, desto größer die Bedeutung chemischer Einwirkung des Brandungswassers aufs Gestein. Zu große Löslichkeit im stillen Wasser schafft keine Brandungskehle, sondern eine tief eingreifende niedrige Auslaugungshöhle wie im Gips von Korfu. Standfestigkeit und Löslichkeit im warmen salzreichen Meer des Tropengürtels machen den Korallenkalk besonders geeignet zur Entwicklung und Erhaltung einer Brandungskehle. Alle Übergänge zu Auslaugungshöhlen sind dabei gegeben und beobachtbar. Allgemein vertragen massige Gesteine mit geringem Druckleitungsvermögen, wie ein blasiger Basalt, auch stärkere Brandung und entwickeln doch ein Kliff mit guter, wenn auch rauher Brandungskehle. Anderen Gesteinen wird meist ihre Klüftigkeit zum Nachteil, darum sind in ihnen Brandungskehlen unter sonst günstigen Bedingungen nur immer da entwickelt, wo nicht Klüfte das Gebilde stören und zerstören. Doch die Haltbarkeit ist meist gering, und darum ist zu einer Zeit auch immer nur an einzelnen Stellen das Vorkommen einer Brandungskehle zu beobachten. Daß die Umsegelung der Küste Griechenlands dem einzelnen Beobachter doch an recht vielen Stellen einzelne Brandungskehlen zeigt (*Maull*), beweist nur eben, daß zu der gegebenen Zeit nur an den einzelnen Stellen Brandungskehlen ausgebildet und erhalten waren, daß also weder das Gestein noch daß die Brandung allein in Griechenland zur Brandungskehlenbildung und -erhaltung führen. Ein späterer Beobachter wird andere Brandungskehlen an ganz anderen Stellen beobachten. Und doch darf daraus nicht geschlossen werden, daß die Brandungskehle notwendige Zwischenform der in Weiterbildung befindlichen Kliffküste sei. Das eingangs entworfen Bild der Brandungswirkung zeichnet die Entwicklung auf, wie sie zur Brandungshöhlenbildung führt. Die Brandungskehlenbildung ist ein Sonderfall. An vielen,

³⁷⁾ *E. Brand*, Bilder der Kreide-Steilküste in Nordfrankreich. Natur und Volk 71, 1941. S. 465—471.

³⁸⁾ *O. Jessen*, Die Straße von Gibraltar. Berlin 1927. S. 51 f.

ja den meisten Kliffküsten braucht gar nie eine Brandungskehle ausgenagt zu werden. Sobald die Brandungsarbeit den „maximalen Böschungswinkel“ einer Steilküste durch Unterschneidung überschreitet, also durchaus vor Erreichung der Senkrechten, muß es ja zum Abbruch und zum Ausbrechen von einzelnen Quadern längs der Klüfte stellenweise Brandungshöhlen im Gestein entstehen, die, wie die Beispiele der Brandungstunnel von Hongkong erwiesen, gar nicht erst das Stadium einer Brandungskehle zu durchschreiten hatten, sondern punktwies im Geklüft herausgebrochen sind. Die Brandungskehle kann zur Brandungshöhle sich erweitern, ohne daß ein Grenz- und Größenmaß für beide anzugeben ist, die Brandungshöhle aber ist durchaus nicht regelmäßig aus der Brandungskehle fortentwickelt, sondern vielfach grundsätzlich ein anderes, ein unstetes Gebilde.

Die im stillen Wasser und durch Ätzung löslicher Gesteine besonders schön entwickelte Brandungskehle nur als Folge chemischer Lösung und nicht mehr der Brandung anzusehen, wäre verfehlt. Der Wellenschlag, das Lecken, Spülen, Waschen auch der kleinsten Wellen, deren Wirkung in dem Querschnittsschwung der Brandungskehle deutlich wird, erweist, sofern wir diesen Wellenschlag als Brandung anerkennen, daß die Brandungskehle eine Sonderform im Formenschatz der Kliffküste ist, die ihre Ausbildung der Brandung in geeignetem Gestein verdankt.

Zusammenfassung

Brandungshöhlen sind an allen Kliffküsten verbreitet. Ihre unregelmäßige Form beweist, daß sie meist aus dem Gefüge des Kliff-

gesteins herausgebrochen sind. Klüfte und Schichtfugen bestimmen ihre Umrißformen. Ihre Bildung und Erhaltung ist abhängig vom Gleichgewicht zwischen Brandungsstärke und Standhaftigkeit des Gesteins. Die Brandungshöhlen sind ständigem Formenwandel unterworfen. Sie sind kurzlebige, unstete Gebilde. Sie häufen sich in ihrem Auftreten, wo besondere Bedingungen des Klimas — der Eisfuß polarer Gewässer — oder Besonderheiten des Gesteins — besondere Standfestigkeit, steilstehende Klüfte in der Brandungsrichtung — die Bildung erleichtern. Bei örtlichen Unterschieden in der Gesteinsbeschaffenheit werden Brandungshöhlen ausgewaschen, nicht ausgebrochen.

Brandungskehlen sind Sonderformen der Kliffküste, die nur bei ganz bestimmtem Zusammenwirken von Meeresbrandung und Gestein entstehen und daher selten sind. Sie sind Endglied einer Entwicklung und damit stete Gebilde. Sie entstehen dann, wenn ein gleichmäßiger, nicht zu harter Wellenschlag der Brandung ein Kliff aus standfestem Gestein trifft. Massiges, vor allem zähes Gestein wie Korallenkalk und Lava, ist ganz besonders geeignet zur Brandungskehlenbildung und -erhaltung. Neben die Gleichmäßigkeit der Brandung scheint gleichwertig, gelegentlich sogar ausschlaggebend, die chemische Ätzung und Zersetzung zu treten. In Korallenkalk und Gips tritt das besonders in Erscheinung, doch scheint es auch bei Silikaten wirksam zu sein. Bei vorwiegend chemischer Arbeit der Brandungswellen entstehen Lösungskehlen oder Auslaugungskehlen, bei Herausarbeiten weicher Schichten eines flach lagernden Gesteins Ausspülungskehlen, die zu ausgespülten Brandungshöhlen werden können. Nur hier ist eine regelmäßige Fortentwicklung der Kehle zur Höhle gegeben. Sonst sind Brandungskehle und Brandungshöhle nicht Glieder einer Entwicklungsreihe, sondern entstehen unabhängig voneinander. Sie sind beide Formenbestandteile der Kliffküste, aber weder die Brandungshöhlen noch die Brandungskehlen sind gesetzmäßige Folge der Brandungsarbeit des Meeres an Kliffküsten.

KÖNIGSFELD IM SCHWARZWALD

Ein deutsches Ländchen mit evangelisch-herrnhutischer Grundprägung¹⁾

W. Tuckermann

Mit 1 Abbildung

Der folgende Aufsatz will mit einem kultur-geographischen Thema besonderer Art vertraut machen, dessen höchste Eigenart sich dem Verfasser bei einem längeren Aufenthalt im Schwarzwald im Jahre 1944 erschlossen hat. Wenn der

Titel in der obigen Form gefaßt wird, so soll damit gesagt sein, daß die trotz aller Sonderfälle

¹⁾ Die Arbeit sollte einer literarischen Spende der Heidelberger philosophischen Fakultät für den hochverdienten