

Die Holzkeilspaltung im alten Steinabbau

Fritz Mangartz/Olaf Pung

Wenn sich nur eine „Tatsache“ alter Steingewinnungstechnik in den Köpfen des Publikums festgesetzt hat, dann ist es die des Einsatzes von Holzkeilen, welche, mit Wasser zum Quellen gebracht, die Spaltung besorgten. In der Fachwelt allerdings ist dieses Thema bis heute

höchst umstritten. Die bisherige Forschung zur Spaltung von Stein mit quellenden Holzkeilen – im Folgenden „Quellkeile“ – konzentrierte sich auf zwei Fragen: Reicht der Druck von quellendem Holz aus, um Stein zu spalten und wurde das Verfahren in antiken Steinbrüchen

tatsächlich angewandt? Die Wirksamkeit dieser Methode war bis in die 1960er Jahre allgemein anerkannt: Sowohl in der technischen¹ als auch in der historischen Literatur² wird die Quellkeilspaltung nicht als Kuriosum, sondern als Selbstverständlichkeit beschrieben.

Use of wooden wedges in stone quarrying

If there is one thing that most people remember about ancient stone quarrying techniques, it is that wooden wedges soaked in water to make them swell were used to split the stones. However, today experts are divided in their opinion as to whether this method was actually used. Previous research on the splitting of stones with wooden wedges by soaking them in water focused on two questions: Does wood as it swells create enough pressure to split stone and was this method actually used in ancient stone quarries? The effectiveness of this method was never

really doubted until the 1960s. Both in technical historical and folkloric literature, splitting stones with water-soaked wooden wedges was always described as a standard method and never as an oddity.

The article first analyses the different research theses on this subject and then examines the physical and technical foundation of this method in great detail. The authors then provide archaeological and historical sources as proof of the many methods which used wooden wedges to split stones. They conclude that swelling wood creates enough pressure to split stone and that this method was actually already employed in ancient stone quarries.

Forschungsgeschichte

1956 versuchte Antoine Zuber erstmals im archäologischen Zusammenhang die Wirksamkeit experimentell zu beweisen: Nach anfänglichen Schwierigkeiten gelang es ihm tatsächlich, Granit mit Quellkeilen zu spalten. Erstmals bezweifelt wurde die Wirksamkeit der Quellkeilspaltung durch Josef Röder 1965: „Wenn immer wieder in der Literatur die Vorstellung auftaucht, dass man in der Antike mit Holzkeilen gespalten habe, wobei der Quelldruck des angefeuchteten Holzes die Sprengwirkung besorgt habe, so kann dem nicht energisch genug widersprochen werden. Solche Angaben finden sich zwar auch in den historischen Einleitungen fast aller Steinmetzlehrbücher, sind aber unserer Ansicht nach falsch. Man kann auf

diese Weise gewisse schiefriig ausgebildete Steine spalten, Hartgestein jedoch nicht.“³ Röder sah das Ganze als eine „Fehldeutung“ aus dem früher üblichen „Abfüttern“ von Metallkeilen mit Holzlamellen; auf Zuber's Publikation ging er nicht ein.

1968 wies Carl Nylander die Behauptungen Röders zurück. Für ihn war die Verwendung des Verfahrens und damit dessen Wirksamkeit für Hartgestein bis in das 19. Jahrhundert bezeugt⁴, für Weichgestein sogar bis in die 1960er Jahre. Etwa von diesem Zeitpunkt an herrschte vor allem im deutschsprachigen Raum Verunsicherung. Zwar wurde in den darauf folgenden Jahren die Wirksamkeit der Quellkeilsplattung von vielen Autoren anerkannt⁵. Dabei stützte man sich aber hauptsächlich auf die zuvor genannten Quellen, neue Fakten wurden nicht eingebracht.

Rosemarie Klemm kam 1984 von der teilweisen Ablehnung Röders („gewisse schiefriig ausgebildete Steine“ ja, „Hartgesteine jedoch nicht“) gar zu einer völligen Ablehnung⁶. Bei einer Beschreibung der Gewinnung von Kalk- und Sandstein im Alten Ägypten erklärte die Autorin, „die Annahme einer Methode des Absprengens durch quellendes Holz“ erscheine ihr „gänzlich abwegig“. Andere ließen die Frage wiederum offen, da es aus ihrer Sicht keine eindeutigen Beweise gab⁷.

Angelina Dworakowska widmete sich erstmals 1989 umfassend dem Thema der Quellkeilsplattung⁸. Dabei ging sie grundsätzlich davon aus, dass eine Spaltung mit quellenden Holzkeilen möglich ist. Als Beweis hierfür zitiert sie eine Vielzahl schriftlicher und mündlicher Berichte aus dem 19. und der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Die Autorin suchte nach Spuren der Anwendung in der Antike, fand aber keine eindeutigen Beweise. Besonders erhellend waren ihre Ausblicke in die Forschungsgeschichte: Als Folge der wissenschaftlichen Expedition Napoleons nach Ägypten gelangten die Granitsteinbrüche von Assuan und mit ihnen die Quellkeiltheorie zu Beginn des 19. Jahrhunderts in das Blickfeld der Ägyptologie. In der Folge verbreitete sich die Theorie auch in die klassische Archäologie. Zahlreiche frühe Forscher, unter ihnen auch aner-

kannte Koryphäen wie Wilhelm Dörpfeld und Arthur Evans, übernehmen sie und sprechen vom Quellkeileinsatz für Fälle, bei denen sich aus heutiger Sicht durchaus nichts mehr belegen lässt⁹. Leider wird die Arbeit von Dworakowska in der nachfolgenden Forschung nahezu völlig ignoriert, einzig Jean-Claude Bessac verweist 1996 auf sie.

Franz Löhner und Heribert Illig versuchten 1992 nochmals, die Frage experimentell zu klären: In einen Granitstein wurden Löcher gebohrt, in diese wurden „Holzstäbe, die künstlich getrocknet worden waren“ getrieben und mit Wasser begossen. Der Block konnte jedoch nicht gespalten werden. Der Wert dieser Aussage wird dadurch geschmälert, dass weder für den Stein nähere Material- und Größenangaben gemacht, noch zu den Holzstäben Anzahl, Holzart und Dimensionen genannt werden. Auch fehlen Angaben zu Art und Dauer des Wässerns¹⁰.

Die Unsicherheit beim Thema Quellkeilsplattung führte teilweise dazu, dass dem Problem der technischen Machbarkeit ausgewichen wurde. Rosemarie und Dietrich D. Klemm argumentierten 1985 gar, die Materialien Holz und Wasser seien in den unwirtlichen Gegenden altägyptischer Steinbrüche schwer zu beschaffen gewesen¹¹.

In französischen Publikationen bleibt die Wirksamkeit des Verfahrens weiterhin unbestritten, so äußert sich z. B. Jean-Claude Bessac 1996: „Auch wenn die Verwendung von (quellenden) Holzkeilen für den Abbau harter Steine wie Granit ... gegen Anfang des 20. Jahrhunderts fast gänzlich verschwunden ist, so gibt es doch aus ethnografischen und historischen Quellen eine Vielzahl sehr detaillierter Hinweise, die die Verwendung in bestimmten Steinbrüchen vor diesem Zeitpunkt bezeugen.“¹² Bessac sucht nach Indizien für die Anwendung des Verfahrens in der Antike, ein Nachweis anhand der Abbauspuren in antiken Steinbrüchen gelingt jedoch nicht eindeutig.

Dagegen setzten sich in den 1980er und 1990er Jahren sowohl in der deutsch- als auch englischsprachigen Literatur zur Ägyptologie Zweifel an der Wirksamkeit der Quellkeilsplattung durch. So schreibt

z. B. Dieter Arnold 1994: „Die Theorie, die Ägypter hätten Holzkeile durch Befeuchten zum Quellen gebracht, ist rein hypothetisch und die Wirksamkeit umstritten.“¹³ In diesem Sinne äußerte sich auch Rosemarie Klemm 1997¹⁴, doch bieten beide Publikationen keine andere Erklärung zur Blockablösung in altägyptischen Steinbrüchen. Ähnlich schätzen für Ägypten jüngst auch Barbara G. Aston, James A. Harrel und Ian Shaw den Sachverhalt ein: „Wooden wedges, even when expanded by soaking them with water, would almost certainly not have been strong enough to fracture the granite (although for an extremely laborious but successful attempt see Zuber 1956: 202).“¹⁵ Demgegenüber stimmt Christoph Höcker für die römische und griechische Antike der Anwendung des Verfahrens zu und übernimmt damit die Meinung der Vorgängerschrift¹⁶, ohne auf die vorausgegangene Kontroverse auch nur hinzuweisen¹⁷.

Insgesamt fällt auf, dass die Diskussion parallel, aber ohne Austausch geführt wurde. Die Mehrzahl der Ägyptologen folgt den Ausführungen Röders von 1965 bzw. Klemms von 1985 und behauptet im Extremfall, eine Quellkeilsplattung habe es nicht nur in Ägypten nicht gegeben, sondern sei generell unmöglich. In der klassischen Archäologie hingegen beharrt man weitgehend auf der ungeprüften Quellkeiltheorie.

Physikalische und technische Grundlagen

Festigkeit von Stein

Alle Spaltverfahren zur Gewinnung von Stein machen sich den Umstand zunutze, dass Stein eine relativ niedrige Zugfestigkeit besitzt. Dass man einen Stein zwar nicht ohne weiteres zerdrücken, dafür eine dünne Platte aber leicht durch Biegebeanspruchung zerbrechen kann, ist allgemein bekannt. Nach einer in der Technik gebräuchlichen Faustformel beträgt die Zugfestigkeit von Stein etwa ein Zehntel von dessen Druckfestigkeit. Da sich die Zugfestigkeit von Steinen im Versuch nur schwer ermitteln lässt, werden in der Regel Werte für die

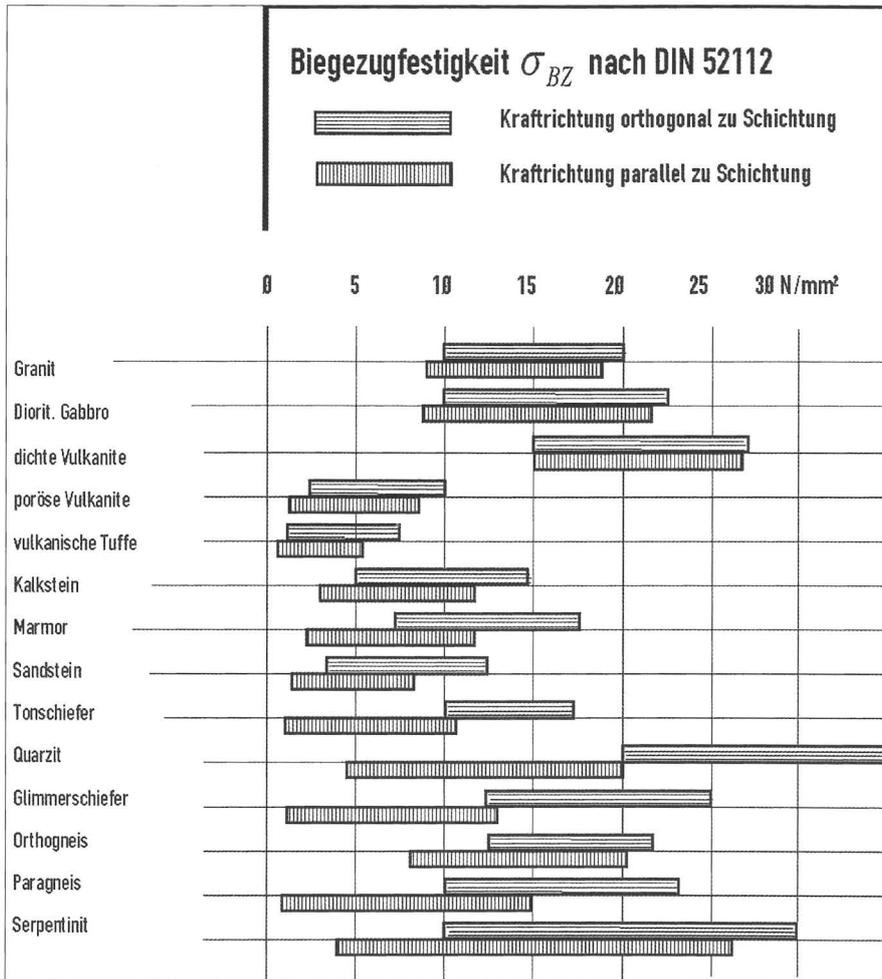


Abb. 1: Biegezugfestigkeiten einer Auswahl von Gesteinen

Biegezugfestigkeit angegeben. Im Biegezugversuch werden die Steine auf Knickung beansprucht. In Abb. 1 sind die Biegezugfestigkeiten einiger Natursteine angegeben. Das Diagramm verdeutlicht eine weite Streuung der Werte auch innerhalb einer Gesteinssorte.

Einschlagen von Keilen

Ein Keil wirkt nach dem physikalischen Gesetz der schiefen Ebene. Wie bei Hebel und Flaschenzug lässt sich dabei die Kraft auf Kosten eines längeren Weges vermehren. Die resultierende, also den Stein „zerreißende“ Kraft F_2 berechnet sich nach der Formel $F_2 = F_1 / \sin \alpha$ aus der Kraft des einschlagenden Hammers F_1 und dem Winkel des Keils α . Reibungskräfte sind hierbei unberücksichtigt. Nach diesem Gesetz wird die resultierende Kraft umso größer, je schlanker der Keil ist, also je geringer der Winkel α ¹⁸: Bei 30° verdoppelt sich die

Kraft, bei 15° beträgt sie schon knapp das vierfache von F_1 (Abb. 2).

Aus diesem Grund strebt man in der Praxis nach möglichst schlanken Keilen. Die Keillöcher müssen hierzu aber ebenso schlank sein, was durch die Schlankheit der Werkzeuge, mit denen man die Löcher ausarbeitet, begrenzt wird. Ein Kunstgriff ist die Verminderung des Winkels durch „Lamellen“ (vgl. Abb. 3). Diese Metallstücke reduzieren zusätzlich die Reibung an den Keilflanken.

Beim Einschlagen werden die Keile hoch beansprucht, sie müssen daher aus einem Material bestehen, das sich weder plastisch noch elastisch verformt. Weiterhin muss das Material der Keile zäh genug sein, um nicht zertrümmert zu werden. Aus diesen Gründen eignen sich für das Keilen nach dem Prinzip der schiefen Ebene hauptsächlich Metallkeile, vorzugsweise aus Stahl. Keile aus Holz oder Stein eignen sich nur bedingt. Aber

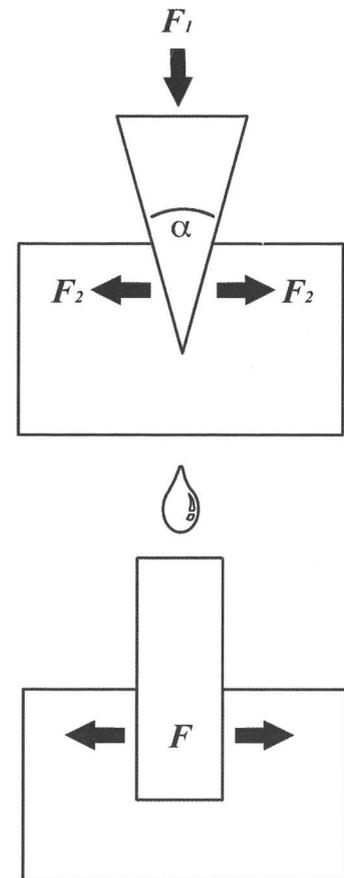
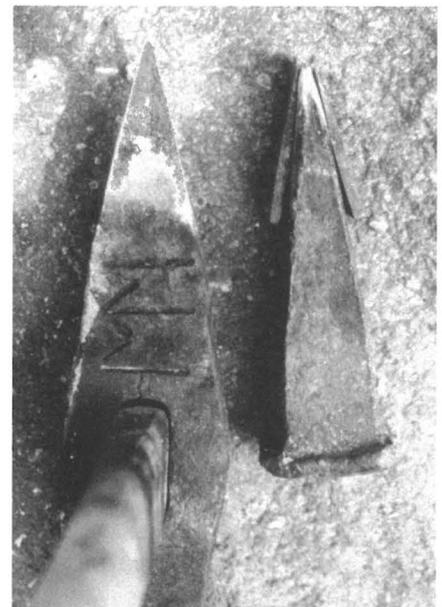


Abb. 2: Keilwirkung bei der Gesteinsspaltung. Oben: Die Wirkung von Eisenkeilen, unten: Die Wirkung von Quellkeilen

Abb. 3: Werkzeuge für die Spaltung von Basaltlava, Osteifel, 19./20. Jh. Links: Zweispitz zum Ausschlagen der Keilrillen. Ihre Form ergibt den Querschnitt der Rille und damit die Form des Keils. Rechts: Keil mit „Lamellen“ zur Winkelverminderung und Reibungsreduktion



auch der härteste Stahlkeil hat seine Grenze erreicht, wenn die Reibungskräfte zwischen Keil und Stein die Kraft des eintreibenden Hammers übersteigen¹⁹.

Quellkeile

Die im Stein zu erzielende Spaltfläche ist von der Größe der Keile, der Holzart und der Festigkeit des Steins (vgl. Abb. 1) abhängig. In technischen Berichten zur Quellkeilspaltung werden oft die bevorzugten Holzarten angegeben. Eine umfangreiche Zusammenstellung findet sich bei Bessac 1996²⁰, wo von Hartgehölzern wie Eiche, Ulme, Walnuss und Buche ebenso die Rede ist, wie von Linde, Esche und Espe bzw. Pappel. Selbst Fichtenholz wird genannt und auch von Weidenholz gesprochen²¹.

Bossard gibt 1984 nicht die Quellwerte für alle Holzarten an, sondern nur für das stark quellende Buchenholz (bis zu 20 % Volumenquellung) und das schwach quellende Fichtenholz (bis 12 % Volumenquellung)²². Die übrigen Hölzer liegen zwischen diesen Werten. Es mag trivial klingen, dass die Wahl der Holzart regional sicher auch durch Vorkommen und Verfügbarkeit der entsprechenden Gehölze begrenzt war. Einzelaussagen mit universellem Anspruch zur Wahl der Holzart haben demnach keinen großen Wert. Theoretisch kann die mit quellendem Holz zu erzielende Spaltfläche nach den in Abb. 4 dargestellten idealisierten Formeln berechnet werden.

Die Spaltfläche (A-Spalt) ist gleich der Wirkungsfläche des Keils oder der Keile (A-Keil) mal dem Quelldruck des entsprechenden Holzes (σ_{Quell} , siehe Tab. 3) geteilt durch die Biegezugfestigkeit des entsprechenden Steins (σ_{BZ} , siehe Abb. 1)²³. In einem Gedankenexperiment haben wir Granit mit einer Festigkeit von 15 N/mm² und Buchenholz mit einem maximalen Quelldruck von 400 N/mm² in die Formel eingesetzt. Danach spaltet ein Holzkeil mit einer Fläche von 1000 mm² (entspricht 10 cm²) eine Fläche von etwa 26 666 mm² (etwa 266 cm²). Für Granit und Buchenholz ergibt sich also ein Flächenverhältnis von ca. 1 : 25 (Abb. 5).

Ein weiterer Vergleich bekräftigt, dass die theoretisch verfügbaren Kräfte für die

$$A_{\text{Spalt}} = \frac{A_{\text{Keil}} \cdot \sigma_{\text{Quell}}}{\sigma_{\text{BZ}}}$$

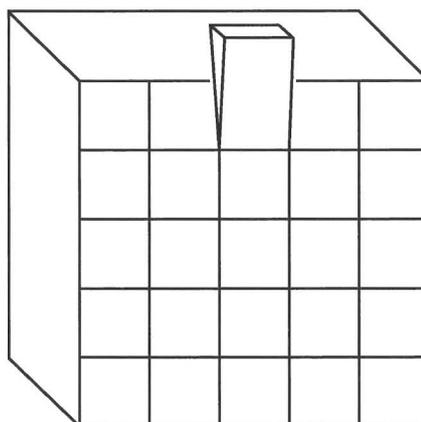
$$A_{\text{Keil}} = \frac{A_{\text{Spalt}} \cdot \sigma_{\text{BZ}}}{\sigma_{\text{Quell}}}$$

Abb. 4: Formeln zur Ermittlung von erreichbaren Spalt- bzw. notwendigen Keilflächen bei der Steinspaltung mit Quellkeilen

Spaltung von Stein ausreichend sind. Horst Wilke und Wolfgang Thunig beschrieben 1973 ein hydraulisches Steinspaltgerät, das ebenfalls nach dem Prinzip des Keils arbeitet und im Steinbruch verwendet wird²⁴. Dabei erzeugt es Spaltungen in einer Größenordnung, die der von handgeschlagenen Keilen entspricht. Es werden zwei Gerätetypen genannt, das größere der beiden erzielt in einem Loch mit 44 mm Durchmesser und einer Tiefe von 800 mm eine Kraft von 7,3 MN (Meganewton). Dies entspricht einem Druck von etwa 200 N/mm² - also der Hälfte des errechneten Maximaldruckes von quellendem Buchenholz.

Im Gegensatz zum Eisenkeil wirkt der Quellkeil nicht nach dem Prinzip der schiefe Ebene, sondern aus seinem Inneren durch Quelldruck. Ein Holz„keil“ kann also im Gegensatz zum eisernen

Abb. 5: Granitspaltung mit hölzernen Quellkeilen nach den angegebenen Berechnungen. Die Spaltfläche im Granit kann das 25-fache der Angriffsfläche des Quellkeiles betragen. Die bereits abgespaltene Blockhälfte ist nicht dargestellt



durchaus parallele Flanken besitzen, dies ist sogar von Vorteil: Ein quellendes Brettchen, im Prinzip beliebiger Stärke, drückt sich durch das Quellen nicht selbst heraus. Daher sind natürlich Keillöcher mit parallelen Flanken mögliche Anzeiger für Quellkeilspaltungen. Es kommt beim Holz nur auf die Keilfläche an. Im angenommenen Idealfall ist der Quell„keil“ also kein Keil im eigentlichen Sinn mehr, er hat aber auch eine Spaltwirkung. Mit gewissen Einschränkungen gelten diese Aussagen auch für Bohrloch und Holzpflock (s. u.).

Technische Voraussetzungen zum Herstellen der Keillöcher

Ein Keil, der einen Stein zerreißen soll, setzt eine Vertiefung im Stein voraus. Keillöcher sind vielfach in antiken Steinbrüchen zu beobachten; Archäologen haben auf Grund von Form und Verteilung der Keillöcher über verschiedene Spalttechniken spekuliert. Deshalb sollte man sich die Anforderungen an ein Keilloch und die Herstellungstechniken vergegenwärtigen.

Es stehen für das Ausarbeiten von Vertiefungen in Stein vier Möglichkeiten zur Verfügung:

1. Bohren mit einer Schneide.

Es ist möglich, Steine mit weichen Mineralien (wie etwa Marmor) mit einer rotierenden Metallschneide zu bohren, so wie man Holz bohrt. Die gleiche Wirkung haben Bohrköpfe aus Flint, wie sie z. B. im Alten Ägypten beim Ausbohren von Steingefäßen verwendet wurden. Für silikatische Steine ist das Bohren mit einer nicht aus Hartmetall bestehenden Schneide ungeeignet, da sich das Werkzeug zu schnell abnutzt. Hartmetallbohrer wurden erst ab Mitte des 20. Jahrhunderts in der Steinbruchtechnik eingeführt.

2. Bohren mit losem Schleifmittel.

Dabei wird ein körniges Material von großer Härte – in der Regel Quarzsand – als Schleifmittel verwendet. Form und Härte des eigentlichen Bohrers sind dabei von untergeordneter Bedeutung. Es wurde schon früh erkannt, dass ein röhrenförmiger Bohrer (z. B. ein Röhrenknochen, ein Holunderzweig oder später ein Kupferrohr) viel ökonomi-

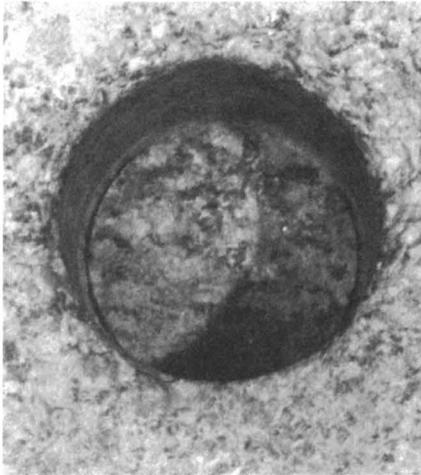


Abb. 6: Bohrloch mit Stumpf des Bohrkerns in einem Granit-Türsturz, Asasif, Ägypten, 19. Dynastie, um 1200 v. Chr.

scher arbeitet als ein Bohrer in Form eines Vollzylinders mit gleichem Durchmesser (vgl. Abb. 6). Der Bohrkern kann leicht ausgebrochen werden, sobald die Tiefe größer als der Durchmesser ist²⁵.

3. Schlagbohrverfahren.

Hier wird ein relativ stumpfer Bohrmeißel schlagend in den Stein getrieben. Die Schneide wirkt dabei zermürend statt schneidend, das Drehen des Bohrers dient nur zum Umsetzen der Schneide. Wird von Hand gebohrt (für größere Löcher: eine Person hält und dreht den Bohrer, eine zweite schlägt), so ist das Verfahren sehr zeitaufwendig. Für tiefere Löcher ist ein Bohrer aus hartem Stahl vorausgesetzt. Zu weiches Metall federt den Schlag ab, wodurch der Schlagimpuls gedämpft wird; oder der Bohrer verbiegt sich und bleibt im Loch stecken. Da aber im Gegensatz zum schneidenden Bohrverfahren auch harte, silikatische Steine mit Schlag gebohrt werden können, wurde das Verfahren in der Neuzeit zum Bohren von Sprenglöchern verwendet²⁶. Hier wurde der große Aufwand des Schlagbohrens von Hand in Kauf genommen, um die Sprengladung möglichst tief ins Gestein zu bringen. Die Erfindung des Pressluftbohrers im späten 19. Jahrhundert hat das Schlagbohrverfahren um ein Vielfaches beschleunigt, seither sind die anderen drei Verfahren im Steinbruch praktisch bedeutungslos.

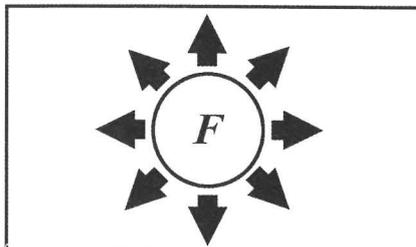
4. Ausarbeitung von Keillöchern mit Hammer und Spitzseisen bzw. mit der Zweispitz.

Diese Arbeitsweise erfordert erheblich weniger Zeit als die zuvor beschriebenen Handbohrverfahren. Man benötigt aber auch ein sehr viel aufwändiger herzustellendes Werkzeug: Eine schlanke Spitze – in der Regel aus Metall –, die hart genug ist, etwas in den Stein einzudringen, aber zäh genug, um dabei nicht abzubrechen. Statt einer langsamen Abrasion oder Zermürbung können so größere Stücke aus dem Stein herausgesprengt werden. Jedoch ist, anders als bei den Bohrverfahren, das Verhältnis von Breite zu Tiefe des Keilloches durch die Werkzeugform begrenzt (Abb. 7).



Abb. 7: Ausschlagen einer Keilrille an einem Basaltlava-Rohblock mit der Zweispitz

Abb. 8: Radiale Wirkung der Spaltkraft bei runden „Keilen“



Die Bohrverfahren 1 bis 3 ergeben zwangsweise zylindrische Löcher, mit Verfahren Nr. 4 lassen sich auch andere Formen herstellen. Eine zylindrische Form der Keillöcher ist weder für geschlagene noch für quellende Keile günstig: Erstens wirken die Kräfte bei einem runden „Keil“ radial in alle Richtungen (Abb. 8), wodurch beim Einsatz mehrerer Keile in Reihe viel Kraft verschenkt wird. Zweitens weist ein Bohrloch im Längsschnitt immer parallele statt nach unten verjüngte Flanken auf, weshalb der Keil nicht in der Tiefe des Loches wirken kann. Somit sind Bohrlöcher im Steinbruch als Kompromiss zu interpretieren. Sie haben zwar eine ungünstige Form für die Aufnahme von Spaltkeilen, waren aber in der Voreisenzeit leichter herzustellen. Das Gleiche gilt für die Zeit seit der Erfindung des Pressluftbohrers.

„Lamellen“, „Beilegebleche“, „Keilfutter“

In der Praxis der Keilspaltung werden oft pro Keil zwei Beilagen, so genannte „Lamellen“, verwendet. Dazu gibt es folgende Erklärungen: In der Literatur wird häufig angegeben, dass die Beilagen der „Druckverteilung“ dienen. Die Beilagen können dies allerdings nur dann leisten, wenn sie sich plastisch oder elastisch verformen. Dies ist bei Beilagen aus Holz (s. u.) gegeben. Irrig ist die Vorstellung, die Beilagen sollten ein Ausplatzen der Keillöcher vermeiden. Dies kann nur dadurch verhindert werden, dass der Winkel des Loches dem des Keils entspricht. Die Reibung von Metall auf Metall ist geringer als von Metall auf Stein, wodurch die Wirkung des Keils verbessert wird. Mit den Beilagen kann die Form des Keilloches korrigiert werden.

Bei mit Zweispitz oder Spitzseisen ausgearbeiteten Löchern kann der Winkel nur so spitz gemacht werden, wie die Schlankheit des Werkzeuges es zulässt. In solche Löcher setzt man für gewöhnlich leicht keilförmige Beilagen mit der Spitze voraus, was das Loch nach oben verjüngt und die Keilwirkung erhöht (vgl. Abb. 3).

Gebohrte Löcher sind zylindrisch, weisen also überhaupt keine Verjüngung auf. Theoretisch können leicht kegelstumpf-



Abb. 9: Einsatz sog. „Patentkeile“ für die Spaltung von Basaltlava, „Patent“ ist eigentlich das Keilfutter. Durch seinen speziellen Querschnitt (siehe Kasten) können Keile auch im Bohrloch gezielt, anstatt in alle Richtungen wirken

förmige Keile eingeschlagen werden. In der Praxis sind solche Keile aber unpraktikabel, da die Kraft erstens nur am Eingang des Loches und zweitens radial in alle Richtungen wirkt. Daher wurden mit der Erfindung des Pressluftbohrers im späten 19. Jahrhundert so genannte „Patentkeile“ eingeführt: Zwei exakt auf den Bohrllochdurchmesser abgestimmte Passstücke garantieren eine ganzflächige Kraftübertragung auf die Bohrlochflanken. Da man die Löcher in nahezu beliebiger Tiefe bohren kann, können die Keile einen sehr schlanken Winkel haben (Abb. 9). Eine ähnliche Lösung ermöglicht den Einsatz von Holzkeilen in Bohrlöcher: Man setzt zunächst einen Pflock und treibt in diesen einen Hartholzkeil.

Trocknen und Wässern der Quellkeile

Verschiedentlich wird in den Quellen von einer speziellen Trocknung des Holzes, etwa im Ofen, gesprochen. Dies scheint uns wesentlich: Grünes Holz hat einen Wassergehalt von bis zu 50 %, welcher bei sechsmonatiger Lagerung im Trockenen nur auf um 30 % reduziert wird. Selbst ganz lufttrockenes Holz enthält noch bis 20 % Wasser²⁷. Nur ein völliges

Trocknen (Darren) des Holzes unter dosierter Wärmeeinwirkung erlaubt es, die ganze Quellfähigkeit des Holzes auszunutzen. Da darrtrockenes Holz auch recht schnell wieder Luftfeuchtigkeit aufnimmt, müssen die Quellkeile nach ihrer Trocknung schnell zur Spaltung eingesetzt werden. Für das Wässern der Keile gibt es verschiedene Detailangaben. Meist wird von „Begießen“ o. Ä. gesprochen. Ferner werden Mulden als Wasserreservoir um die Bohrlöcher und ein „Wassertank“ zur kontinuierlichen Befeuchtung²⁸ sowie Tau oder Gesteinsfeuchte als Quellmittel erwähnt²⁹.

Unterschiede von Metallkeilen und Quellkeilen in der Druckentwicklung

In einigen Beschreibungen der Quellkeilspaltung wird gesagt, dass das Verfahren parallel zur Spaltung mit Metallkeilen für besondere Aufgaben eingesetzt wurde. Hugo Blümner berichtete schon 1884, man bediene sich zur Stein-spaltung „heutzutage zweier Methoden: entweder nimmt man eiserne Keile, welche man gleichzeitig mit verstärkten Schlägen in die Löcher hineintreibt, oder man nimmt Keile von gut getrocknetem Holze, welche man fest in die Keillöcher eintreibt und dann mit Wasser begießt; sie schwellen dadurch auf und wirken alle zusammen so stark, daß sie hinreichende Kraft besitzen, um den Block in seiner ganzen Länge, welche durch die Rinne vorgezeichnet ist, loszusprengen. Dies Verfahren ist dem anderen bei weitem vorzuziehen, weil die Keile alle gleichmäßig wirken und daher die Gefahr, daß ein langer und schmaler Block, wie eine Säule, ein Obelisk u. dgl., in Stücke zerbreche, dabei am geringsten ist.“³⁰ Auch Josef Röder gab 1958 an: „Spaltungen mit Holzkeilen wurden bis in jüngere Zeit gelegentlich an Marmoren durchgeführt, um einen sehr gleichmäßigen Druck zu erzielen. Dabei wurden die Keile entweder mit dem Hammer eingetrieben oder durch Begießen mit Wasser zum Aufquellen gebracht.“³¹

Die hier aus der Steinbruchpraxis überlieferten Vorteile der Quellkeilmethode lassen sich anhand folgender Überlegungen nachvollziehen: Bei geschlagenen Metallkeilen steigt die Kraft im Keilloch sprunghaft mit jedem Schlag.

Auch gelingt es nicht, alle Keile gleichzeitig zu schlagen. Bei einer langen Spaltung mit vielen Keilen werden daher in der Praxis die Keile von mehreren Arbeitern gleichzeitig geschlagen³². Erst wenn alle Keile unter gleicher Spannung stehen, was der Steinbrucharbeiter am Klang erkennt, legt die Mannschaft eine Pause ein, um der Spaltwirkung Zeit zu geben. Bei der Quellkeilmethode geht das Wässern der Keile innerhalb einer Minute vor sich, während der Quellvorgang Stunden dauert. In dieser Zeit steigen die Kräfte langsam und stetig.

Die Verwendung von Holz bei der Keilspaltung von Steinen – Archäologische, historische und volkskundliche Belege³³

Der Einsatz von quellendem Holz zur Stein-spaltung ist nach heutigem Kenntnisstand in antiken Quellen nicht genannt. Zu bemerken ist an dieser Stelle jedoch die Erwähnung von Keilen aus Olivenholz in antiken griechischen Inschriften, wobei die genaue Verwendung unklar bleibt³⁴. In der archäologischen Deutung sind drei Varianten zu unterscheiden:

Erstens ist versucht worden, die im Stein erkennbaren Spaltspuren dem Quellkeilverfahren zuzuordnen. Zweitens hat man in Keillöchern und -rillen bei Kulturen, welche keine eisernen Werkzeuge kannten, Indizien für die Quellkeilsspaltung gesehen. Schließt man die Verwendung von Keilen aus anderen Materialien wie Bronze oder Stein aus, so bietet sich die Quellkeiltheorie als Erklärung an. Drittens hat man in antiken Steinbrüchen Holzkeile gefunden, die als Quellkeile interpretiert wurden.

Die Unterscheidbarkeit der Keiltaschen – Holz oder Metall?

Grundsätzlich ist es denkbar, dass sich die Löcher zur Aufnahme von Quellkeilen stark von denen für geschlagene

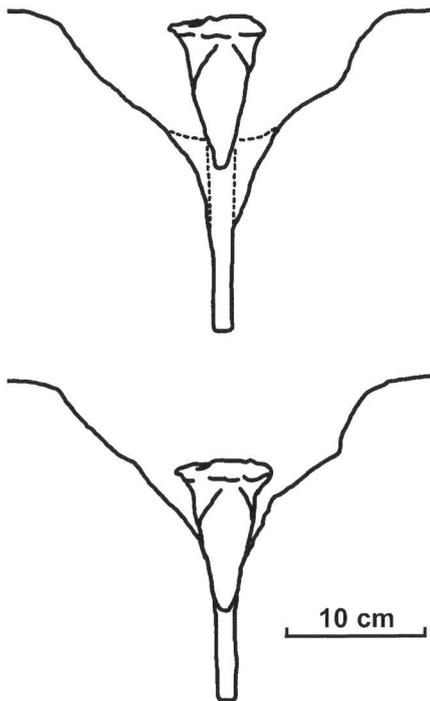


Abb. 10: Römerzeitliche Spalttechnik am Trachyt des Drachenfels. Die nach Ansicht der Verf. quellkeilverdächtigen Keiltaschen mit parallelen Flanken werden von Röder 1974, S. 528 dahingehend interpretiert, dass sich Eisenkeile ihren Weg durch Zermürbung der Taschenflanken selber bahnen

Metallkeile unterscheiden. Bei Metallkeilen ist der maximale Druck durch die Schlagkraft des eintreibenden Hammers bestimmt; sobald die Reibungskraft zwischen Keil und Stein bzw. zwischen Keil und Lamelle zu stark wird, ist der Druck nicht mehr zu steigern. Die Größe des Keils hat dabei keinen Einfluss auf den Spaltdruck. Das ist beim Quellkeil anders: Das Einschlagen dient hier nur zum „Vorspannen“ des Keils. Entscheidend ist der Quelldruck des Holzes, und dieser ist umso wirksamer, je größer der Keil im Verhältnis zur Spaltfläche im Stein ist.

Aufgrund der Quellenlage ist festzustellen, dass Archäologen zu diesem Aspekt bisher größtenteils nur Vermutungen anstellen. Ihre Ergebnisse decken sich allerdings bisweilen mit den hier vorgestellten Beobachtungen und Berechnungen. Die Möglichkeit, dass Holzkeile in Löchern mit parallelen Flanken (Abb. 10) gesessen haben können, wird da-

gegen kaum in Betracht gezogen³⁵. Somers Clarke und Reginald Engelbach beobachteten in altägyptischen Steinbrüchen große Keiltaschen und stellten die Hypothese auf, dass kleine Keiltaschen für Eisen-, große aber für Holzkeile angelegt worden sind³⁶. Auch Marc Waelkens, Paul de Paepe und Luc Moens glauben, dass die unterschiedlichen Keilverfahren anhand der Keillöcher zu unterscheiden seien: „Der Gebrauch hölzerner Keile kann eindeutig anhand der sorgfältig vorbereiteten, weit auseinander liegenden Keillöcher von großen Dimensionen (zwischen 20 und 60 cm) unterschieden werden.“³⁷ Dörpfeld und Schliemann³⁸ sowie Evans³⁹ beobachteten zylindrische Löcher in Steinblöcken der minoischen Epoche. Davon ausgehend, dass zylindrische Löcher für geschlagene Metallkeile keinen Sinn machen, können solche Löcher ihrer Meinung nach nur zur Aufnahme quellender Holzpflocke gedient haben. Angelina Dworakowska⁴⁰ sah jedoch in beiden Fällen keine Beweise, dass es sich dabei überhaupt um Keillöcher handelt und Jean-Claude Bessac berichtet von horizontalen, leicht kegelförmigen Keillöchern in einem antiken Steinbruch, welche seiner Ansicht nach ein „Reservoir“ für die Aufnahme des Wassers besaßen⁴¹.

Die Unterscheidbarkeit anhand der Druckspuren

An den Angriffsflächen eines Keils (wie auch eines anderen Werkzeuges) verändert sich durch den hohen Druck und die Reibung das Kristallgefüge des Steins, was die betreffende Stelle hell („zermürbt“) erscheinen lässt. 1923 wurde vermutet, dass dies bei einer Spaltung mit Quellkeilen nicht auftritt, und es wurde darin ein Unterscheidungsmerkmal gesehen⁴². Dies kann jedoch nur für witterungsgeschützte Keilspuren gelten. Erfahrungsgemäß verschwinden solche Spuren im Außenbereich schon nach wenigen Jahrzehnten.

Keilspuren bei Kulturen ohne Eisenwerkzeuge

In der Diskussion um die Gewinnung von Steinblöcken im Alten Ägypten war die Quellkeilmethode eine verbreitete Theo-

rie. Schließlich besaßen die Ägypter nur Werkzeuge aus Bronze oder Stein – beides keine geeigneten Werkstoffe für das Abkeilen der Rohblöcke im Steinbruch. In den Ausführungen zur Forschungsgeschichte wurde bereits dargelegt, wie unter Ägyptologen nach der Publikation von Röder 1965 die Ablehnung gegen das Quellkeilverfahren wuchs. Leider wurden jedoch keine alternativen Erklärungen geliefert. So behauptete Rosemarie Klemm 1984, man habe Kalk- und Sandsteinblöcke „in Trennfugen losgeschlagen und vom Untergrund abgehoben (unter Ausnutzung von Tonlagen im Gestein als natürliche Blockbegrenzung) oder gleichfalls abgemeißelt.“⁴³ Auch Arnold konnte keine plausible Erklärung zur Blockablösung anbieten⁴⁴.

Das Problem muss also offen bleiben, solange detaillierte Untersuchungen von Abbauspuren in altägyptischen Steinbrüchen fehlen. Beobachtet und beschrieben werden in der Regel die Steinbruchwände mit den Spuren der Schrotgräben, nicht aber die Bruchsohle mit den Spuren der Blockablösung. Auch an verbauten und damit genauer datierbaren Steinblöcken wurden noch keine umfassenderen Studien zu Steinbruchtechniken durchgeführt.

Jean-Pierre Protzen beobachtete Keiltaschenreihen in den Inka-Steinbrüchen von Machu Picchu und Ollantaytambo⁴⁵. Da auch die Inkas kein Eisen kannten und andere Metalle nur spärlich verwendeten, wird hier ebenfalls mit gutem Grund auf den Einsatz von Quellkeilen geschlossen.

Gefundene Holzkeile

Nach Enrico Dolci wurde in den Marmorbrüchen bei Carrara in einem Bereich mit antiken Abbauspuren ein Holzkeil mit den Maßen 35 x 40 cm (Keilfläche ?) gefunden⁴⁶. Ähnliche Funde gab es in den umliegenden Brüchen angeblich noch mehrfach, so dass für den Autor kein Zweifel am Einsatz dieser Methode besteht⁴⁷. Obwohl die Größe dieses Keils auch für eine ehemalige Verwendung als Quellkeil spräche, ist dies – zieht man die mannigfachen weiteren Möglichkeiten der Holzkeilverwendung im Steinbruch in Betracht – noch kein Beweis. Sollte etwa durch den Fund von

Keiltaschen gleicher Größe der Beweis erbracht werden können, so bliebe immer noch die Frage, ob die Spaltung auch tatsächlich durch Wasserzugabe und Quellen bewirkt wurde.

Die Verwendung von Holz und Wasser bei der Spaltung von Steinen

Nach unseren Beobachtungen ist die Sachlage noch komplizierter, da sich weitere Möglichkeiten der Holzverwendung bei der Spaltung von Steinen ergeben. Grundsätzlich lassen sich drei Verwendungsarten unterscheiden. Bei einer vierten Methode werden zwar Eisen- statt Holzkeile genommen, genau wie bei mancher Holzkeilverwendung wird aber auch Wasser zur Durchführung der Spaltung eingesetzt. Die unterschiedlichen Methoden müssen auch als Hinweis auf die zahlreich möglichen Missverständnisse, Fehlinterpretationen und letztlich gar Legendenbildungen, welche die Diskussion teilweise bestimmen, gewertet werden⁴⁸. Bei den besagten Methoden handelt es sich um:

1. Einsatz von Holzkeilen als Spaltkeilen, welche mit einem Hammer in vorbereitete Vertiefungen eingeschlagen werden. Die dabei auftretenden starken Belastungen an der Keilschneide ermöglichen diese Verwendung von hölzernen Keilen bei härteren Gesteinen nur, wenn sie einen eisernen Schuh besitzen.
2. Einsatz von Holz als Futter für eiserne Spaltkeile. Hier gibt es wiederum zwei Möglichkeiten: Einerseits die Verwendung von je zwei Holzbrettchen, zwischen die die eisernen Keile jeweils eingeschlagen werden. Andererseits die Verwendung massiver Holzkeile oder Pflöcke (bei Bohrlöchern), in die eiserne Keile eingetrieben werden. Der Zweck ist (s. o.) in beiden Fällen der gleiche. Die Keildruckwirkung wird gleichmäßig auf die Anlagefläche verteilt und die Keile bleiben beim Einschlagen nicht an der rauen Gesteinsoberfläche hängen.
3. Einsatz von trockenen hölzernen Spaltkeilen, welche durch Wasser zum Quellen gebracht werden (Quellkeile). Auch hier gibt es zwei Varianten: Zum einen Quellkeile im eigent-

lichen Sinn, die in Rillen oder Taschen wirken und zum anderen Quellpflöcke, die stramm in Bohrlöcher eingeschlagen werden.

4. „Ankeilen“ mit Metallkeilen und anschließendes Wässern. Da Metall nicht quillt, erscheint die Methode auf den ersten Blick absurd. Und obgleich verlässlichere Quellen zur Anwendung dieser Variante fehlen, finden sich doch zumindest Hinweise in der Literatur, etwa bei Wolfgang Wurster: „E. Althöfer, München, verdanke ich die Mitteilung, daß in Steinbrüchen des Spessart nur mit Metallkeilen angekeilte Sandsteinblöcke durch wiederholtes Benetzen mit Wasser zum Zerspringen gebracht werden.“⁴⁹ Wurster sieht dies durch den „Flächendruck des Wassers“ begründet. Nach unserem Verständnis des Kapillargesetzes werden zwei Flächen, zwischen denen Wasser kapillar einströmt, aber eher zusammengezogen als auseinandergetrieben. Eine andere mögliche Erklärung des von Wurster beschriebenen Phänomens bietet der gut belegte Einfluss von Wasser auf das Bruchverhalten von Glas. So benetzt der Glaser dieses nach dem Anritzen mit etwas Wasser, bevor er es bricht. Die wissenschaftliche Erklärung dieses Vorgangs findet sich bei Michalske und Bunker 1988⁵⁰. Ob dieses Modell vom amorphen Silikat Glas auf die zumeist kristalline Struktur von Natursteinen übertragen werden kann, bedarf allerdings weiterer Nachforschungen.

Bezüglich der ersten Methode findet sich in einem geologischen Bericht über die vulkanischen Erscheinungen im Gebiet des Laacher Sees vom Ende des 18. Jahrhunderts ein Hinweis zur Verwendung von „hölzernen, mit Eisen beschlagenen Keilen“ für die Spaltung der Basaltlava in den unterirdischen Niedermündiger Mühlensteinbrüchen⁵¹. Ein weiter entwickeltes Relikt aus dieser Zeit könnte ein Keil sein, der in der Werkzeugsammlung des Deutschen Vulkanmuseums, Mendig, aufbewahrt wird. Der Eisenkeil – für einen normalen Spaltkeil ungewöhnlich lang – ist an seinem stumpfen Ende so ausgeschmiedet, dass er hohl blieb und ein quadratisches Loch besitzt. In diesem Loch befindet sich noch ein fest eingetriebenes Holz-

stück, sein aus dem Keil ehemals herausragendes Ende ist abgebrochen. Hier handelt es sich also nicht, wie von Nose beschrieben, um einen Holzkeil mit Eisenschuh, sondern eher um einen Eisenkeil mit hölzernem Kopf. Er dürfte aus dem 19. oder frühen 20. Jahrhundert stammen. Wenn auch zweifelhaft ist, dass es sich hierbei um einen klassischen Spaltkeil handelt, so zeigt dieses Werkzeug doch, dass neben den üblichen Steinhauer- und Steinbrecherhämmern auch Kompositgeräte aus Eisen und Holz in Gebrauch waren.

Zur zweiten Methode ist festzuhalten, dass noch zu Beginn des 20. Jahrhunderts in den Mühlensteinbrüchen bei Jonsdorf im äußersten Südosten Sachsens Sandsteine durch das Eintreiben von Eisenkeilen in Buchenkeile abgebaut wurden⁵². Zur Gewinnung von kleineren Werkstücken bediente man sich der allgemein bekannten Vorgehensweise, nämlich Eisenkeile zwischen Eisenbleche einzutreiben⁵³. In den römischen Mühlensteinbrüchen Mayens fand man Eisenkeile, welche noch zwischen je zwei dünnen Holzbrettchen in den Keiltaschen saßen⁵⁴. Für die Hereintreibearbeit im Bergbau des 19. Jahrhunderts wird das Einsetzen von hölzernen Pflöcken – meist aus Hartholz bestehend – in Bohrlöcher beschrieben⁵⁵, in diese Pflöcke wurden Eisenkeile zur Spaltung eingetrieben⁵⁶. Gätzschmann sprach 1846 von einer „sehr ausgebreiteten Anwendung“ und erwähnte dabei ausdrücklich auch die Granitgewinnung.

Die älteste fundierte historische Quelle zur dritten Methode stammt aus dem letzten Jahrzehnt des 17. Jahrhunderts. Als Beispiel für die Auswirkungen von Kälte und Eis auf Gestein berichtet Philippe de la Hire: „Wenn man sehr große Steine von der Natur eines Kiesels (damit sind wohl eher die Materialeigenschaften als Form und Größe des Gesteins gemeint, die Verf.) spalten will, welche man ‚meulieres‘ nennt, weil man sich ihrer zum Anfertigen von Mühlensteinen für Mühlen bedient, legt man rings um die Stelle, dort wo man spalten möchte, kleine Löcher von ungefähr zwei ‚pouces‘ (5,5 cm) Tiefe und einem viertel ‚pouce‘ (knapp 1 cm) Breite (damit ist wohl Durchmesser gemeint, s. u.: ‚cheville‘ = Pflock, die Verf.) an. Dann nimmt man Weidenholzpflo-

cke, die im Ofen gut getrocknet wurden, welche mit Kraft in die Löcher eingeschlagen werden, man gießt Wasser gleichmäßig über alle diese Pflöcke („chevilles“)⁵⁷, welche alle zusammen langsam anschwellend letztlich eine so große Spannung bewirken, daß sie den Stein an der Stelle, wo sie plaziert wurden, spalten.⁵⁸ Bei dem Gestein handelt es sich wohl um Süßwasserquarzit aus den Mühlsteinbrüchen der Champagne um La Ferté-sous-Jouarre. Diese an sich schon sehr detaillierte und dadurch auch glaubwürdige Beschreibung erhält einen noch höheren Wert, da laut Pierre Poulain in den Mühlsteinbrüchen von La Ferté-sous-Jouarre noch 1926 Stein mit Quellkeilen gespalten wurde⁵⁹.

Ferner wird erwähnt, dass in verschiedenen Brüchen noch bis in das 18. Jahrhundert mit Wasser zum Quellen gebrachte hölzerne Keile verwendet worden sind⁶⁰, und Zuber berief sich 1956 auf die mündliche Aussage eines Steinhauers aus den Vogesen, der berichtete, dass dort bis zum Ende des 19. Jahrhunderts mit Hilfe von quellenden Hartholzkeilen Granit gewonnen wurde⁶¹. Nach Poulain wurde die Technik zu Beginn des 20. Jahrhunderts in Frankreich nicht nur in La Ferté-sous-Jouarre angewendet, sondern auch kurz nach der Jahrhundertwende in den Steinbrüchen von Tonnerre. Auch Maurice Pillet schreibt, „die alten Steinbrecher von l’Orne hätten ihm erklärt, man habe früher mit Keilen aus sehr trockenem Weidenholz die Keiltaschen bestückt.“⁶² Hugo Blümner nennt gegen Ende des 19. Jahrhunderts im Rahmen der Erläuterung antiker Steintechnik im Mittelmeerraum die Spaltung mit Quellkeilen als zu seiner Zeit noch üblich⁶³. Seine Vermutung, „dass auch die Alten sich vielfach der hölzernen Keile bedient haben,“ legt nahe, dass ihm keine entsprechende antike Schriftquelle, deren er sich sonst ausführlich bedient, bekannt war. Leider führte er auch nicht an, wo er die Ausübung dieser Technik beobachtete, oder wer sie ihm berichtet hat.

Für den Schweizer Jura in der Nähe von Dole sind römische Steinbrüche erwähnt, in denen hölzerne Keile, noch in ihren Keiltaschen steckend, aufgefunden wurden⁶⁴. Der Block hatte sich nicht vom Untergrund gelöst⁶⁵. Feuvrier berichtet davon, dass der Abbau mit Quellkeilen

auch damals noch „an bestimmten Stellen ... ausschließlich für das Brechen sehr harter Materialien, speziell für Sandsteine zur Herstellung von Mühlsteinen“ in Gebrauch gewesen sei. Hierfür gibt es anscheinend auch Belege vom deutschen Hochrhein bei Waldshut⁶⁶. Dort wurden im 19. Jahrhundert in ausgebleichten, stark verkieselten Sandsteinen Mühlsteine in einer recht eigenwilligen Methode gebrochen. Zunächst wurden auf dem Durchmesser des gewünschten Mühlsteins dicht an dicht von Hand gebohrte Löcher gesetzt – so tief, wie der Rohling dick werden sollte. Um den liegenden Rohling nun abzuspalten, trieb man noch drei bis fünf Löcher auf der Bohrlochtiefe waagrecht unter den Rohling und stopfte diese mit trockenem Hartholz (wohl Pflöcken !). Dies wurde wiederum mit Wasser zum Quellen gebracht, wobei die Ablösung bei gleichzeitigem Eintreiben von Eisenkeilen gelang.

Gätzschnmann führt unter Zitierung älterer Literatur verschiedene Varianten des bergbautechnischen Einsatzes von Quellkeilen an⁶⁷. Auch hier sei der Einsatz in Bohrlöchern die am besten geeignete Anwendung. So können die Keile entweder vor oder nach dem Eintreiben gewässert werden, oder aber sie quellen allein durch die Feuchtigkeit des Gesteins bzw. sogar durch den nächtlichen Tau auf⁶⁸. Allerdings deuten seine Ausführungen an, dass er weder Zeuge dieser Verfahren war, noch den Berichten unbedingt Glauben schenken will.

Volkskundliche Belege

1946 wurden Sandsteinblöcke aus dem zerstörten Ludwigshafener Rheinbrückenportal für die Verwendung in kommunalen Gebäuden verwertet. Die Spaltung erfolgte mit Quellkeilen („wahrscheinlich Eiche“), deren Köpfe mit Eisenbändern gesichert waren. Sie wurden zwischen zwei Eisenplättchen fest eingetrieben und dann mit Wasser zum Quellen gebracht. Bei Spaltungen im Lager wurde für jeden Quellkeil eine Keiltasche ausgeschlagen, bei Stoßspaltungen vertikal zum Lager wurde eine tiefe Rille angelegt, in welche die Quellkeile dichter gesetzt werden konnten. Bis etwa 1,5 m lange Blöcke konnten so gespalten werden⁶⁹.

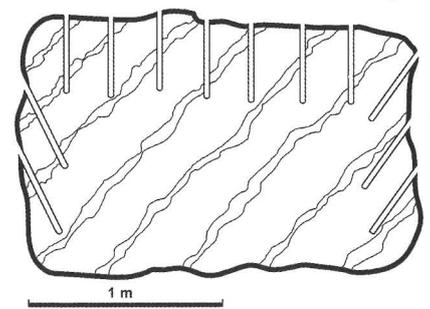


Abb. 11: Skizze des 1984/85 von Hermann Schetter sen. in Hechingen mit Quellkeilen gespaltenen Kalksteins (Skizze: Frank Eger)

Ein weiterer Hinweis aus dem Linksrheinischen ist Verena Schubert-Andres zu verdanken. In der Frankenthaler Bildhauerwerkstatt ihres Mannes wurden von 1929 bis 1968 Sandsteinrohlinge nach folgender Methode in Form gebracht: Zunächst hat man, meist in Rillen, seltener in einzelne Keiltaschen, eiserne Keile eingetrieben. Diese wurden teilweise wieder entfernt und dann vorrätige Quellkeile leider unbekannter Holzart eingeschlagen. Die Keilgrößen konnten variieren, in ihrer Form und Größe ähnelten sie den üblichen eisernen Keilen. Je nach Spaltung waren die Quellkeile weit (ca. 20 cm) oder eng (max. 10 cm) auseinander gesetzt. Nach dem Wässern der Holzkeile dauerte es etwa eine Stunde, bis der Stein gerissen war. Spaltungen von 1 m auf 1 m wie auch Spaltungen über Eck konnten so problemlos bewältigt werden⁷⁰.

Für eine weitere Variante existieren ebenfalls Augenzeugenberichte: So wurde auf Sri Lanka Mitte der 1980er Jahre in nicht industrialisierten Schotterbrüchen Material mit Quellkeilsplattung gewonnen. In Abständen von 20 cm gesetzte Bohrlöcher von etwa 3 cm Durchmesser⁷¹ wurden mit runden, stramm sitzenden Holzpflocken bestückt, die man mit Wasser zum Quellen brachte. Allerdings entwickelte hier nicht das quellende Holz die Spaltwirkung, sondern erst schmale, lange Hartholzkeile, die nun in den nassen Pflöcken eingeschlagen wurden. Auf Kissen sitzend, besorgte dann eine ganze Familie mit Hämmern die Schotterproduktion aus den so gewonnenen Steinblöcken⁷².

Auch in Deutschland wurde zu dieser Zeit noch mit Quellkeilen gespalten,

wenn auch nur als Demonstration für Steinmetzlehrlinge. Frank Eger unterrichtete die Verf. von der Spaltung eines Kalksteinblocks in den Jahren 1984/85, die durch den Steinmetzmeister Hermann Schetter sen., dem Inhaber eines Steinmetz- und Bildhauerbetriebs in Hechingen, durchgeführt worden war. Beim Stein handelte es sich um einen harten Kalkstein mit deutlicher Schichtung, die Spaltfläche von mindestens 3 m² lief parallel zum Lager (Schichtung).

Mit einer Bohrmaschine wurden Löcher mit einem Durchmesser von 36 mm und einer Tiefe von 60 cm gebohrt (Abb. 11). Die Lochabstände lagen zwischen 20 cm und 30 cm. Mit dem Spitzisen wurden um die Bohrlöcher Mulden ausgespitzt, in denen sich das Wasser ansammeln konnte. Als Quellkeile wurden Rundhölzer aus Eiche oder Buche auf einer Drehbank leicht kegelstumpfförmig angespitzt. Die dickeren Enden versah man mit Metallringen, um ein Aufsplintern beim Einschlagen zu verhindern. Die Quellkeile wurden eingeschlagen und über einen ganzen Tag gewässert, dabei immer wieder mittels Vorschlaghammer eingetrieben. Am Abend erfolgte nochmals eine ausgiebige Wässerung. Auf den Steinblock wurde eine Wanne mit Wasser aufgestellt, aus der Leinentücher heraushingen. Durch den Kapillartransport des Wassers war somit die ausrei-

chende Bewässerung der Quellkeile über die Nachtstunden gewährleistet. Am nächsten Morgen war der Block gespalten.

Der jüngste bekannt gewordene Einsatz von quellendem Holz am Stein spielte sich schließlich 1998 vor eher folkloristischem Hintergrund ab. Alljährlich findet in der südfranzösischen Granitregion Sidobre eine „Fête de la Pierre“ statt, die sich inzwischen zu einem Ereignis von überregionalem Rang entwickelt hat. Dort wird das Spalten garagengroßer Granitblöcke mittels Hartholzpflöcken, die dicht an dicht in von Hand gebohrte Löcher gesetzt und mit Wasser begossen werden, vorgeführt. Wenngleich es angeblich noch nicht „allzulange her“ gewesen sein soll, dass dies die einzig gebräuchliche Methode war⁷³, so legt die Auswertung der zur Verfügung gestellten Fotografien allerdings doch möglicherweise nahe, dass es sich bei den Keilen, die anschließend in die Hartholzpflöcke eingeschlagen wurden, nicht um hölzerne, sondern um handelsübliche eiserne handelte (vgl. Abb. 12). Träfe das zu, so fiele dieses Beispiel eher in die unten stehende Kategorie der Zwischenformen beim Spalten von Steinen unter Holzverwendung.

Zwischenformen

In den Baumberger Sandsteinbrüchen bei Havixbeck wurden von Hand „ausreichend tiefe Löcher in die Werksteinbank geschlagen, die die Umriss des gewünschten Blocks markierten. Dann setzte man jeweils zwei Scheite aus getrocknetem Buchenholz in jedes Loch und trieb mit dem Hammer einen Eisenkeil stramm dazwischen. Anschließend wurde Wasser zwischen die Keillöcher gegossen. Bis ein Block auf diese Weise von der Bank getrennt wurde, konnte es ... schon mal eine Stunde dauern.“ Diese von Joachim Eichler beschriebene Technik wurde bis in die 1950er Jahre angewendet⁷⁴. Schon Gätzschmann erwähnte u. a. unter Hinzuziehung älterer Literatur für den Sandsteinabbau den gleichzeitigen Einsatz von Quell- und Eisenkeilen, die abwechselnd eingetrieben werden⁷⁵. Der ausschließliche Einsatz von Quellkeilen sei nur bei leicht spaltbaren Gesteinen möglich.

Unklare Verwendung

In einer der ältesten deutschsprachigen Steinbruchdarstellungen werden schließlich ausdrücklich „hölzerne und eiserne Keile“ erwähnt. Eine Beschreibung ihres Einsatzes erfolgt allerdings nicht. Jedoch sind die Keile auf dem zugehörigen Holzschnitt am Fuß eines per Hebespaltung zu brechenden Steinblocks dargestellt und werden von einem Arbeiter mit einem schweren Hammer eingetrieben (Titelbild). So liegt es nahe, dass die Holzkeile zumindest für die Spaltung selbst – in welcher Form auch immer und nicht nur, um etwa erhaltene Risse offen zu halten – verwendet wurden⁷⁶.

Zusammenfassung

Die eingangs gestellten Fragen können also nur bejaht werden. Der Druck von quellendem Holz reicht aus, um Stein zu spalten; dieses Verfahren wurde auch tatsächlich in antiken Steinbrüchen angewandt. Archäologische, historische und volkskundliche Quellen belegen den Einsatz von hölzerne Keilen und Zuschlägen zur Spaltung von Steinen bis weit in das 20. Jahrhundert. Bei der Sammlung von Belegen fiel auf, dass es etliche Varianten der Holzkeilverwendung gab und teilweise noch gibt. Die Tabellen 1 und 2 geben deshalb nochmals eine Übersicht zu den Techniken und ihren Quellenbelegen (Tab. 1) sowie zu den Techniken und ihren Belegen in Abhängigkeit vom gespaltenen Gestein (Tab. 2).

Die Spaltung von Steinen mit hölzerne Keilen, speziell Quellkeilen, ist grundsätzlich möglich, für diese Technik gibt es zahlreiche Belege. Je nach Gesteinsart, Region, Tradition und Zeitstellung sind die verschiedensten Varianten dieser Abbautechnik möglich. Da die Tradition der alten Technik jedoch fast abgebrochen ist, kann heute kaum auf Erfahrungswerte zurückgegriffen werden. Für die meisten archäologischen Befunde werden so erst Experimente letzte Gewissheit ergeben. Ausgangspunkt für in der Folgezeit geplante Versuche wird die Formel der Abb. 4 sein, mit der die für eine erfolgreiche Spaltung unbedingt notwendige Gesamtfläche der Quellkeile abgeschätzt werden kann.

Abb. 12: Einsatz von Wasser und evtl. Holz bei der Granitspaltung im Sidobre, Frankreich. „Fête de la Pierre“, 1998



Technik	Archäologische Belege	Historische Belege	Volkskundliche Belege
Holzkeile mit oder ohne Eisenschuh als Spaltkeile		RÖDER 1958, NOSE 1790	Vulkanmuseum Mendig
Holz als Futter für eiserne Spaltkeile	HÖRTER (u.a.) 1950/51	RUBEN 1961, GÄTZSCHMANN 1846	
Quellkeile	PROTZEN 1985, DOLCI 1980, DOLCI 1988, FEUVRIER 1917	ORLANDOS 1968, RÖDER 1958, NOËL 1965, PILLET 1936, BLÜMNER 1884, FEUVRIER 1917, GÄTZSCHMANN 1846, FALKENSTEIN 2001	ZUBER 1956, pers. Mitt. THIELE, pers. Mitt. SCHUBERT- ANDRES
Quellpflocke in Bohrlöchern	DÖRPFELD/SCHLIEMANN 1886, EVANS 1921-1935, BESSAC 1988, REISNER 1931,	de la HIRE o. J.	pers. Mitt. CHRISTOPH, pers. Mitt. EGER, RING-HEBER 1999
Ankeilen mit Metallkeilen und anschließendes Wässern		WURSTER 1969	
Unklare Verwendung von hölzernen Keilen	DWORAKOWSKA 1975, COMENIUS 1654		
Zwischenformen		GÄTZSCHMANN 1846	pers. Mitt. EICHLER

Tab. 1: Techniken und Belege für die Holzkeilspaltung ohne Rücksicht auf die Zuverlässigkeit der Quelle

Um Ansätze für weiter notwendige Experimente zu geben, wurden in Abb. 1 die Biegezugfestigkeiten verschiedener Gesteine und in Tab. 3 Quelldrücke einzelner Holzarten aufgeführt. Da Holzquelldrücke – bis auf die Ausnahme beim Buchenholz – nicht in der holztechnischen Literatur angegeben sind, wurden sie über den Quotient Quellmaß/Quelldruck abgeschätzt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass Holz mit hohem Quellmaß auch hohen Quelldruck entwickelt. Es soll ausdrücklich betont werden, dass diese Berechnungen nur ein Anhalt sein können. Die Verf. sind sich sicher, dass z. B. die Wahl einer besonders quellfähigen Holzart weniger Einfluss auf das Gelingen der Spaltung hat, als zahlreiche andere, z. T. kaum abwägbarere Faktoren. Diese wären etwa der Keilwinkel, auftretende Reibungskräfte, die Art der „Lamellen“, der Trocknungs-

zustand und die Bewässerungsart des Holzes.

Zusätzlich könnte die Formel verwendet werden, um für spezielle Abbauspuren an speziellen Gesteinen zu klären, ob eine Quellkeilspaltung überhaupt in Frage kommt. Anwendbar ist sie nicht bei Bohrlöchern, die genauesten Werte liefert sie bei Keillöchern mit annähernd parallelen Flanken. Die meisten vorliegenden Materialaufnahmen von antiken Steinspaltungen enthalten z. B. fast immer Details der Spaltspuren, jedoch selten Angaben zur Größe der gespaltenen Fläche. Ohne diese Information ist die Ermittlung der Relation von Keil- zu Spaltfläche und damit ein Abschätzen der angewendeten Spalttechnik schwer möglich. Dies zeigt, wie wichtig eine umfassende Dokumentation für die künftige Beurteilung unserer Frage ist⁷⁷.

Anmerkungen

- 1 z. B. Krauth/Sales-Mayer 1896, S. 167; Czezowski 1946, S. 133; Mucha 1949, S. 8; Weber-Kozinska 1960, S. 196; Noël 1965, S. 162.
- 2 z. B. Houel 1782, S. 30; Engels 1808, S. 6; Viollet-le-Duc 1854-1868, Bd. 2, S. 278; Blümner 1884, S. 78; Feuvrier 1917; Neuburger 1919, S. 400; Petrie 1923, S. 71; Behn 1926, S. 6; Fiehn 1929, Sp. 2289; Capart/Werbrouck 1930, S. 300 f.; Clarke/Engelbach 1930, S. 24; Reisner 1931, S. 70; Pillet 1936, S. 76; Lucas/Harris 1962, S. 63 ff.; Orlandos 1968, S. 19 sowie Müller-Wiener 1988, S. 42.
- 3 Röder 1965, S. 515. Interessant hierzu auch: ders. 1958, S. 43: „Spaltungen mit Holzkeilen wurden bis in jüngere Zeit gelegentlich an Marmoren durchgeführt, um einen sehr gleichmäßigen Druck zu erzielen. Dabei wurden die Keile entweder mit dem Hammer eingetrieben oder durch Begießen mit Wasser zum Aufquellen gebracht.“ Der Verwendung von Quellkeilen für Granit widerspricht Röder allerdings auch hier, wenngleich diese Technik „im Kreise

Technik	Kalkstein	Marmor	Sandstein	Basaltlava	Süßwasser-quarzit	Granit
Holzkeile mit und ohne Eisenschuh als Spaltkeile		RÖDER 1958		NOSE 1790, Museum Mendig		
Holz als Futter für eiserne Spaltkeile			RUBEN 1961	HÖRTER (u.a.) 1950/51		
Quellkeile	FEUVRIER 1917	RÖDER 1958 DOLCI 1980, DOLCI 1988	FEUVRIER 1917, pers. Mitt. THIELE, pers. Mitt. SCHUBERT-ANDRES, FALKENSTEIN 2001			ZUBER 1956
Quellpflöcke in Bohrlöchern	pers. Mitt. EGER				de la HIRE o.J.	RING-HEBER 1999
Ankeilen mit Metallkeilen und anschließendes Wässern			WURSTER 1969			
Zwischenformen			pers. Mitt. EICHLER			GÄTZ-SCHMANN 1846

Tab. 2: Techniken und Ihre Belege in Abhängigkeit vom Gestein

Tab. 3: Quelldrücke verschiedener Holzarten.

Holz	Radiales Quellmaß (%) ^a	Quelldruck (N/mm ²) ^b	geschätzter Quelldruck (N/mm ²)
Ahorn	4,5	400	240
Buche	7,5		-
Eiche	6,8		360
Esche	8,6		460
Espe	6,1		325
Fichte	5,7		300
Kiefer	6,9		370
Lärche	5,2		280
Linde	8,8		470
Ulme	5,9		315

a Issel 1910, S. 346.
b Bossard 1984, S. 216.

der Steinhauer am Felsberg“ für möglich gehalten werde.

- 4 Nylander 1968 u. a. unter Verweis auf Zuber 1956, der sich auf die mündliche Aussage eines Steinhauers aus den Vogesen beruft, welcher bezeugte, dass dort bis zum Ende des 19. Jahrhunderts mit Hilfe von quellenden Hartholzkeilen Granit gewonnen wurde.
- 5 z. B. Durkin/Lister 1983, S. 81; Dolci 1988, S. 81; Kozelj 1988, S. 6; Ward-Perkins 1992.
- 6 Klemm 1984, Sp. 1274.
- 7 Dworakowska 1975, S. 118, nach einer ausführlichen Zusammenfassung des Kenntnisstandes: „Undoubtedly the whole question will have to be studied right from the very foundations.“ Waelkens/de Paepe/Moens 1988, S. 103 f.: „The subject most certainly should be studied in greater detail.“ Arnold 1991, S. 39: „most specialists seem to agree that wooden wedges, after being watered, would not be able to break granite“, ohne weitere Quellenangaben und unter Eingeständnis des Erfolgs von Zuber. Die Möglichkeit, dass die Quellkraft von Holz in der Antike zur Gewinnung von Weichgestein genutzt wurde, wird hingegen befürwortet.
- 8 Dworakowska 1989.

- 9 Ebd., S. 30-33.
- 10 Löhner/Illig 1992. Im gleichen Artikel versuchen die Autoren noch die Wirksamkeit weiterer Steinbearbeitungstechniken wie Sägen, Bohren oder die so genannte „Klopfttechnik“ zu widerlegen, dabei erscheinen uns die Literaturstudie stark eingeschränkt und die praktischen Versuche unbeholfen.
- 11 Klemm/Klemm 1985, S. 31. Diese Argumentation wird von Schmitz 1985, S. 19 zurückgewiesen.
- 12 Bessac 1996, S. 235. Dazu beruft sich Bessac auf sieben Literaturquellen, „um nur“, so der Autor, „die zuverlässigen zu nennen“. Auf die ab Röder 1965 in Deutschland vorgebrachten Zweifel wird dabei nicht eingegangen. Ähnlich wie Bessac äußert sich Adam 1995, S. 26: Das Verfahren sei zwar grundsätzlich möglich (unter Verweis auf Noël 1965), jedoch für die Antike nicht nachweisbar.
- 13 Arnold 1994, Stichwort „Steinbruchtechnik“.
- 14 Klemm 1997, S. 413 f.
- 15 Aston/Harrel/Shaw 2000, S. 7.
- 16 Fiehn 1929, Sp. 2289.
- 17 Höcker 2001, Sp. 942: „Abtrennen durch in Bohrungen eingefügte, danach gewässerte Holzkeile“, weitere Details werden nicht genannt.
- 18 Dieser Sachverhalt wird schon in Herons „Mechanik“ beschrieben: „Je spitzer der Winkel des Keiles gemacht wird, um so leichter, d. h. infolge eines schwächeren Schlages, greift er an.“ Vgl. Heron 1900; S. 108 u. S. 281.
- 19 Heise/Herbst 1923, S. 134 geben die Höchstkraft für geschlagene Stahlkeile mit 30-40 t (also ca. 300-400 kN) an. Jedoch handelt es sich offenbar nur um eine Vermutung und nicht um einen Messwert. Wir haben diesen Wert mit den in Abb. 1 angegebenen Biegezugwerten in Relation gesetzt, daraus ergibt sich eine theoretisch zu erzielende Spaltfläche von wenigen Quadratdezimetern. Dies entspricht nicht der allgemeinen Praxiserfahrung im Steinbruch.
- 20 Bessac 1996, S. 234 f.
- 21 Krauth/Sales-Mayer 1896, S. 167; Mucha 1949, S. 8.
- 22 Bossard 1984, S. 216.
- 23 Für die Formel gehen wir vom Idealfall des Holz„keiles“ mit parallelen Flanken aus (vgl. Abb. 2).
- 24 Wilke/Thunig 1973, S. 81.
- 25 Zur Verwendung von Hohlbohrern in der Ur- und Frühgeschichte siehe z. B. Weiner 2000. Auch für die Altägyptische (Stocks 2001) und die Minoische Kultur (Küpper 1996) lässt sich das Verfahren nachweisen. In der vorindustriellen Bau- und Mühlsteingewinnung Europas scheint es dagegen unbekannt gewesen zu sein. Die Verfasser wußten kein entsprechendes Beispiel, nicht einmal für die aus eigener Anschauung bestens bekannte alte Basaltlava- und Tuffgewinnung der Eifel.
- 26 Mangartz 1998, S. 33; Schaaf 2002.
- 27 Issel 1910, S. 342 f.; pers. Mitt. durch Frank Eger.
- 28 Viollet-le-Duc 1854-1868, Bd. 2, S. 278.
- 29 Gätzschnann 1846, S. 299 f.
- 30 Blümner 1884, S. 79; eine ähnliche Bemerkung findet sich bei Orlandos 1968, S. 19.
- 31 Röder 1958, S. 33.
- 32 siehe z. B. Anm. 53.
- 33 Bessac 1996 und Dworakowska 1989 führen hierzu verschiedene weitere Belege aus französischer sowie polnischer Steinmetzfachkunde- und volkskundlicher Literatur an.
- 34 Orlandos 1968, S. 19, Anm. 3; Dworakowska 1975, S. 109.
- 35 Ausnahme: Röder 1974, S. 525 f. Er hat solche trotz seiner unübertroffenen Kenntnis alter Steinbrüche nur in einem Fall aufgefunden, nämlich in den römischen Trachytbrüchen des Drachenfels am Rhein. Interessant ist seine Wertung des Befunds: „Vermutlich gibt diese Lochform dem sicherlich unausrottbaren Irrtum neue Nahrung, daß Stein früher fast ausschließlich mit quellendem Holz gespalten worden sei. Die schmalen dünnen Brettchen, die man oben drein paßgenau in die Schlitzte hätte einschieben müssen, dürften freilich kaum die nötige Quellkraft entwickelt haben, gelegentlich recht große und lange Spaltungen auszulösen.“ Unter Berufung auf zweimal in diesen Schlitzten aufgefundene Eisenreste meint er weiter, dass die Eisenkeile durch Zermürbung des Gesteins beim Einschlagen in die Schlitzte sich ihr nötiges keilförmiges Bett selber geschaffen hätten (vgl. Abb. 10). Ob das so stimmt, wagen wir zu bezweifeln: Eigene Erfahrungen mit „römischen“ Werkzeugen zeigen, dass es wesentlich leichter und viel weniger aufwendig ist, die „klassische Keiltasche“ mit schrägen Flanken herauszuschlagen.
- 36 Clarke/Engelbach 1930, S. 24.
- 37 Waelkens/de Paepe/Moens 1988, S. 17; Übersetzung durch die Verf. Gleichere Meinung wie Waelkens/de Paepe/Moens 1988 sind auch Durkin/Lister 1983, S. 81.
- 38 Dörpfeld/Schliemann 1886, S. 387 f.
- 39 Evans 1921-1935, Bd. 2, S. 233.
- 40 Dworakowska 1975, S. 100.
- 41 Bessac 1988, S. 44 und Abb. 4.
- 42 Petrie 1923, S. 71.
- 43 Klemm 1984, Sp. 1274.
- 44 Arnold 1991, S. 38 f.
- 45 Protzen 1985, S. 169.
- 46 Dolci 1980.
- 47 Ders. 1988, S. 81.
- 48 Zur Quellkeilspaltung wurden von den Verf. an Osteifeler Basaltlava Experimente durchgeführt, die – was bei diesem Material zu erwarten war – erfolglos blieben. Eine amüsante Folge der Versuche aber verdient Erwähnung, da sie ebenfalls Wege der Legendenbildung beleuchtet: In einer Examensarbeit für das Lehramt, welche die Osteifeler Basaltlavasteinbrüche zum Thema hat, taucht plötzlich die Quellkeilspaltung in der Aufzählung alter Arbeitstechniken auf, obwohl sie bis dahin schriftlich an keiner Stelle erwähnt wurde. Als Beleg wird ein Foto unserer experimentell gesetzten Holzkeile gezeigt, vgl. Schwientek 1998, S. 24. So erbrachte unser Versuch, die mündlich kolportierte Quellkeiltheorie für Basaltlava zu widerlegen, nicht nur den gewünschten Erfolg, sondern leider auch die erstmalige Erwähnung der widerlegten Theorie als Tatsache im Schrifttum.
- 49 Wurster 1969, S. 30, Anm. 15.
- 50 Michalske/Bunker 1988.
- 51 Nose 1790, S. 99: „Die Kaulen sind etwa dreyzehn bis funfzehn Lachter tief, und fünf und zwanzig Fuß im Durchmesser die runden Oeffnungen weit, aus welchen die durch hölzerne, mit Eisen beschlagene Keile losgetriebenen und nachher unter der Erde behauenen Steine, mit einer Winde-Maschine mittelst Pferd und Seil herausgezogen werden.“
- 52 Ruben 1961, S. 20 f.
- 53 Ebd.: „Stieß man auf gefritteten Sandstein, begannen die Steinbrecher das ‚Abbänken‘. Es kommt darauf an, große Steinplatten zu gewinnen. Nach Anweisung des Bruchmeisters suchten die Brecher die natürlichen horizontalen Schichten, die durch größeren Kies nachgiebiger sind, und schlugen in eine solche Schicht mit dem Zweispitz (doppelseitiger Pickel) einen sog. Hebefalz, einen keilförmigen Spalt. In diesen trieben sie Buchenkeile, einen neben den anderen, und in die Buchenkeile trieben sie eine ununterbrochene Reihe von Eisenkeilen, die 50 cm lang und oben 5 cm im Quadrat waren. Gleichzeitig suchte der Bruchmeister auf dem freigelegten Sandsteinblock einen der in die Tiefe gehenden Risse und ließ ihn ebenfalls zu einem Falz erweitern. Auch in diesen wurden Buchenkeile und Eisenkeile getrieben. Dann wurden die Männer aus allen Brüchen zusammengerufen, und jedem wurde eine Gruppe von etwa 10 Keilen zugeteilt. Sie setzten sich davor und schlugen alle zusammen möglichst gleichmäßig auf die Keile ein. Danach trieben sie eine zweite Reihe von Keilen und notfalls noch eine dritte hinein. Nach Stunden hörte man es knacken. Die Bank löste sich vom Felsen, sie war ‚gehoben‘. In den oberen Spalt wurden dann Steine und Holz hineingeworfen und Winden eingesetzt und der gelöste Steinblock umgelegt. Auf diese Weise brauchte man manchmal zwei bis drei Tage geduldiger Arbeit, um etwa eine 2 bis 3 oder gar 5 m hohe und bis zu 20 m lange Wand zu ‚heben‘, wenn diese Arbeit überhaupt gelang. Die gehobene Wand wurde in der selben Weise, nur in kleinerem Maßstab, wieder unterteilt, indem Ritzen mit dem Zweispitz eingeschlagen wurden. In diese wiederum wurden Eisenbleche gelegt und diese mit eisernen Keilen auseinandergetrieben.“
- 54 Hörter/Michels/Röder 1950/51, S. 21.
- 55 Gätzschnann 1846, S. 298 f.
- 56 Eine ähnliche Vorgehensweise beschreibt auch Wurster 1969, S. 30, jedoch ohne die Herkunft der Information zu nennen.
- 57 Generell wird man, wenn in alten Beschreibungen der Steinspaltung von „Pflöcken“, „chevilles“ (frz.) oder „sticks/poles“ (engl.) die Rede ist, annehmen dürfen, dass es sich um eingesetzte Holzpflocke und damit Bohrlöcher handelt. Ob sie dann nur als Futter für Eisenkeile, oder aber als Quellkeile dienten, wäre evtl. der weiteren Beschreibung zu entnehmen. In Frankreich – z. B. Trou du Diable bei Bérland, pers. Mitt. durch A. Belmont – wurde an verschiedenen alten Mühlsteinbrüchen beobachtet, dass Mühlsteine durch dicht an dicht auf den Durchmesser gesetzte Bohrlöcher gewonnen wurden. Dies sind möglicherweise Spuren einer Abtrennung der Steine mit Hilfe von Holzkeilen. Vgl. auch Falkenstein 2001.
- 58 de la Hire o. J., Übersetzung durch die Verf.
- 59 Poulain 1954.
- 60 Noël 1965, S. 162.
- 61 Zuber 1956.
- 62 Pillet 1936, S. 77.

- 63 Blümner 1884, S. 78 f.
 64 Feuvrier 1917, S. 271 f.
 65 Ebd. Feuvrier zitiert einen Steinbruchbesitzer, der berichtet, was seine Arbeiter 1909 – also acht Jahre vor der Niederschrift durch Feuvrier – entdeckt und ihm zugetragen hätten. So ist die Glaubwürdigkeit dieser Quelle etwas fraglich. Auch ist nicht sicher, ob die hölzernen Keile mit oder ohne den Einsatz von Wasser verwandt wurden.
- 66 Falkenstein 2001, S. 228.
 67 Gätzschnmann 1846, S. 299 f.
 68 Ebd.: „Ein ganz ähnliches Verfahren soll (sic!) in Frankreich zur Gewinnung von Mühlsteinen angewendet werden. Man haut aus der ganzen Masse hohe runde Steinsäulen von dem nöthigen Durchmesser heraus, meiselt dann in bestimmten Abständen ringsherum Löcher ein und treibt in diese trockene harte Holzkeile. Diese saugen den in der Nacht fallenden Thau an und sprengen den Stein auseinander.“
- 69 Pers. Mitt. durch H.-G. Thiele, Ludwigshafen. Er begann seine Lehre als Steinmetz 1946 in Ludwigshafen und hat selbst bei den beschriebenen Arbeiten mitgewirkt.
- 70 Frau Schubert-Andres hat diese Technik noch 1970 erfolgreich angewendet, um einen Betonpfeiler zu spalten.
- 71 Unklar ist, ob diese Löcher von Hand oder maschinell gebohrt wurden.
- 72 Pers. Mitt. durch J. Christoph, Freudenberg.
 73 Ring-Heber 1999.
 74 Eichler bezieht sich in seiner Mitteilung auf die Auskünfte des 80-jährigen Steinmetzen Wilhelm Fark aus Havixbeck, dessen Familie seit 1881 einen eigenen Bruch bewirtschaftet. Vgl. Eichler 1996, S. 23.
- 75 Gätzschnmann 1846, S. 299.
 76 Comenius 1654, Taf. 89.
 77 Für Literatur- und Abbildungshinweise danken wir Klaus Börner vom Abraxas Verlag, Joachim Eichler vom Bamberger Sandstein Museum Havixbeck, Holger Schaaff von der Forschungsstelle Vulkanpark Mayen sowie Gertrud Röder. Hinweise zum Schrifttum sowie weitere Anregungen verdanken wir Dietwolf Baatz und Gerd Weisgerber. Alain Belmont, Universität Grenoble, stellte uns seine Abschrift aus dem unpublizierten Bericht von Philippe de la Hire zur Verfügung. Jochen Christoph berichtete uns von seinen Beobachtungen auf Ceylon, Verena Schubert-Andres, Frank Eger sowie Hans-Günther Thiele berichteten uns von ihren Arbeiten mit der Quellkeiltechnik. Anne-Marie Ring-Heber stellte freundlicherweise ihre Fotografien von der „Fête de la Pierre“ im Sidobre zur Verfügung. Ursula Tegtmeyer, Heinrich-Barth-Institut Köln, versorgte uns mit Details zur Holzphysik, und Stefan Wenzel, Forschungsstelle Altsteinzeit Neuwied, half bei der Literaturbeschaffung und übernahm freundlicherweise die Durchsicht des Manuskripts.
- Die Verfasser - Jugendfreunde aus der Osteifeler Steinbruchregion – stiessen gleichzeitig, aber aus unterschiedlichen Tätigkeitsfeldern (F.M.: Archäologe, O.P.: Steinmetz und Restaurator) auf dieselbe Fragestellung. Es ist uns wert zu bemerken, dass eine Grundlage für den vorliegenden Beitrag im alten, gemeinsamen „jugendlichen Forscherdrang“ besteht.

Bibliographie

- ADAM, Jean Pierre:
 1995 *La Construction Romaine*, Paris 1995.
- ARNOLD, Dieter:
 1991 *Building in Egypt: Pharaonic Stone Masonry*, New York 1991.
 1994 *Lexikon der ägyptischen Baukunst*, Düsseldorf 1994.
- ASTON, Barbara G./HARRELL, James A./SHAW, Ian:
 2000 *Inorganic Materials: Stone*, in: Nicholson, Paul T./Shaw, Ian (Hrsg.): *Ancient Egyptian Materials and Technology*, Cambridge 2000, S. 5-77.
- BEHN, Friedrich:
 1926 *Die Steinindustrie des Altertums*, Mainz 1926.
- BESSAC, Jean-Claude:
 1988 *Problems of Identification and Interpretation of Tool Marks on Ancient Marbles and Decorative Stones*, in: Herz, N./Waelkens, Marc (Hrsg.): *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade, Dordrecht/London/Boston 1988* (= Nato ASI Series Vol. 153), S. 41-53.
- 1996 *La pierre en Gaule Narbonnaise et les carrières du Bois des Lens (Nîmes): histoire, archéologie, ethnographie et techniques*, *Ann Arbor 1996* (= *Journal of Roman Archaeology*, suppl. 16).
- BLÜMNER, Hugo:
 1884 *Technologie und Terminologie der Gewerbe und Künste bei Griechen und Römern*, Bd. 3, Leipzig 1884.
- BOSSARD, Hans Heinrich:
 1984 *Holzkunde*, Bd. 2: *Zur Biologie, Physik und Chemie des Holzes*, Stuttgart 1984.
- CAPART, Jean/WERBROUCK, Marcelle:
 1930 *Memphis, à l'Ombre des Pyramides*, Bruxelles 1930.
- CLARKE, Somers/ENGELBACH, Reginald:
 1930 *Ancient Egyptian Masonry*, London 1930.
- COMENIUS, Johann Amos:
 1654 *Orbis sensualium pictus*, o. O. 1654.
- CZEZOWSKI, A.:
 1946 *Kamieniolomy*, Warszawa 1946.
- DÖRPFELD, Wilhelm/SCHLIEMANN, Heinrich:
 1886 *Tiryns. Der prähistorische Palast der Könige von Tiryns*, Leipzig 1886.
- DOLCI, Enrico:
 1980 *Carrara - Cave antiche - Materiali Archeologici; relazione delle campagne di rilevamento dei beni culturali del territorio promosse dal Comune di Carrara, anni 1977-1979*, Carrara 1980.
 1988 *Marmora Lunensia: Quarrying technology and archaeological use*, in: Herz, N./Waelkens, M. (Hrsg.): *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade, Dordrecht/London/Boston 1988* (= Nato ASI Series Vol. 153), S. 77-84.
- DURKIN, M. K./LISTER, C. J.
 1983 *The Rods of Digenis. An Ancient Marble Quarry in Eastern Crete*, in: *Annual of the British School of Athens* 78, 1983, S. 69-96.
- DWORAKOWSKA, Angelina:
 1975 *Quarries in Ancient Greece*, Wrocław (u. a.) 1975.
 1989 *Wooden wedge in ancient quarrying practice: critical examination of the state of research*, in: *Archaeologia (Warszawa)* 38, 1989, S. 25-35.
- EICHLER, Joachim:
 1996 *Der Steinbruch. Bamberger Sandstein damals und heute*, in: *Detail. Zeitschrift für Architektur und Baudetail* 1996, Heft 1, S. 22 ff.
- ENGELS, J. D.
 1808 *Ueber den Bergbau der Alten in den Ländern des Rheins, der Lahn und der Sieg*, Siegen 1808.
- EVANS, Arthur:
 1921-1935 *The Palace of Minos at Knossos*, 4 Bde., London 1921-1935.
- FALKENSTEIN, Franz:
 2001 *Ganz schön bunt, der Buntsandstein in der Umgebung von Waldshut am südöstlichen Schwarzwaldrand*, in: *Aufschluss* 52, 2001, S. 227-241.
- FEUVRIER, Julien:
 1917 *A propos des carrières de pierre de Dole, Saint-Ylie, Sampans, Damparis*, in: *Revue des Etudes anciennes* 19, 1917, S. 269-272.
- FIEHN, Karl:
 1929 *Steinbruch-Technik*, in: Kroll, Wilhelm/Mittelhaus, Karl (Hrsg.): *Paulys Realencyclopädie der classischen Altertumswissenschaft*, Stuttgart, 1929, 2. Reihe, 6. Halbband, Sp. 2241-2293.
- GÄTZSCHMANN, Moritz Ferdinand:
 1846 *Vollständige Anleitung zur Bergbaukunst, dritter Theil: Die Lehre von den bergmännischen Gewinnungsverfahren*, Freiberg 1846.
- HEISE, Fritz/HERBST, Friedrich:
 1923 *Lehrbuch der Bergbaukunde mit besonderer Berücksichtigung des Steinkohlebergbaues*, Berlin 1923.
- HERON, <Alexandrinus>:
 1900 *Herons von Alexandria Mechanik und Katoptrik (Opera quae supersunt omnia)*, hrsg. in arabisch und deutsch von Nix, L./Schmidt, W., Leipzig 1900.
- HIRE, Philippe de la:
 o. J. *Explication des principaux effets de la glace et du froid*, in: *Mémoires de l'académie royale des sciences depuis 1666 jusqu'en 1699*, Bd. IX, Paris, Compagnie des Libraires, 1730, S. 475-500 (unveröffentlicht).
- HÖCKER, Christoph:
 2001 *Steinbruch*, in: Cancik, Hubert/Schneider, Helmuth (Hrsg.): *Der Neue Pauly. Enzyklopädie der Antike*, Stuttgart/Weimar 2001, Bd. 11, Sp. 941 ff.
- HÖRTER, Fridolin/MICHELS, Franz-Xaver/RÖDER, Josef:
 1950/51 *Die Geschichte der Basaltlavaindustrie von Mayen und Niedermendig, Teil I: Vor- und Frühgeschichte. Jahrbuch für Geschichte und Kultur des Mittelrheins und seiner Nachbargebiete* 2/3, 1950/51, S. 1-32.
- HOUËL, Jean Pierre Louis Laurent:
 1782 *Voyage pittoresque des îles de Sicile, de Malte et de Lipari*, Paris 1782.
- ISSEL, Hans:
 1910 *Das Schwinden und Quellen*, Rei-

- Ben, Werfen, Verziehen des Holzes, in: Kraiss, P. (Hrsg.): *Gewerbliche Materialkunde*, Bd. 1: Die Hölzer, Stuttgart 1910, S. 342-353.
- KLEMM, Rosemarie:
1984 Steinbearbeitung, in: Helck, Wolfgang/Otto, Eberhard (Hrsg.): *Lexikon der Ägyptologie*, Bd. 4, Wiesbaden 1984, Sp. 1274 f.
- 1997 Steine und Steinbrüche, in: Schulz, Regine/Seidel, Matthias (Hrsg.): *Ägypten. Die Welt der Pharaonen*, Köln 1997, S. 410-415.
- KLEMM, Rosemarie/KLEMM, Dietrich D.:
1985 Die Steine der Pharaonen, München 1985.
- KOZELJ, Tony:
1988 Extraction of Blocks in Antiquity: Special Methods of Analysis, in: Herz, N./Waelkens, M. (Hrsg.): *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Dordrecht/London/Boston 1988 (= Nato ASI Series Vol. 153), S. 31-39.
- KRAUTH, Theodor/SALES-MAYER, Franz:
1896 Das Steinhauerbuch. Die Bau- und Kunstarbeiten des Steinhauers, Leipzig 1896.
- KÜPPER, Michael:
1996 Mykenische Architektur. Material, Bearbeitungstechnik, Konstruktion und Erscheinungsbild (Diss. Universität Marburg), Leidorf 1996.
- LÖHNER, Franz/ILLIG, Heribert:
1992 Auf Granit beißen, in: *Vorzeit-Frühzeit-Gegenwart. Interdisziplinäres Bulletin*, 1992, Nr. 2, S. 58-66.
- LUCAS, Alfred/HARRIS, John Richard (Bearb.):
1962 *Ancient Egyptian Materials and Industries*, London, 4. Aufl., 1962.
- MANGARTZ, Fritz:
1998 Die antiken Steinbrüche der Hohen Buche bei Andernach. Topographie, Technologie und Chronologie, Mainz 1998 (= Vulkanpark-Forschungen. 1).
- MICHALSKE, Terry A./BUNKER, Bruce C.:
1988 Wie Glas bricht, in: *Spektrum der Wissenschaft* 1988, S. 114-121.
- MUCHA, Otto:
1949 *Arbeitskunde für Steinmetzen und Steinbildhauer*, Hamburg, 2. Aufl., 1949.
- MÜLLER-WIENER, Wolfgang:
1988 *Griechisches Bauwesen in der Antike*, München 1988.
- NEUBURGER, Albert:
1919 *Die Technik des Altertums*, Leipzig 1919.
- NOËL, Pierre:
1965 *Technologie de la pierre de taille*, Paris 1965.
- NOSE, Carl Wilhelm:
1790 *Orographische Briefe über das Siebengebirge und die benachbarten zum Theil vulkanischen Gegenden beyder Ufer des Niederrheins. II. Theil, Niederrheinische Reise, Frankfurt 1790.*
- NYLANDER, Carl:
1968 Bemerkungen zur Steinbruchgeschichte von Assuan, in: *Archäologischer Anzeiger* 6, 1968, S. 6-10.
- ORLANDOS, Anastasios K.:
1968 *Les matériaux de construction et la technique architectural des anciennes grecs*, Paris 1968.
- PETRIE, William Matthew Flinders:
1923 *Arts and Crafts of Ancient Egypt*, Edinburgh 1923.
- PILLET, Maurice:
1936 L'extraction du granit en Egypte à l'époque pharaonique, in: *Bulletin de l'institut française d'archéologie orientale*, Bd. 36, 1936, S. 71-84.
- POULAIN, Pierre:
1954 L'extraction et la taille des sarcophages dans la carrière de „Roche Taillée“ a Arcy-sur-Cure (Yonne), in: *Revue archéologique de l'Est et du Centre-Est: consacrée aux antiquités nationales d'Alsace, Bourgogne, Champagne, Franche-Comté, Lorraine, Lyonnais, Nivernais* 5, 1954, S. 29-45.
- PROTZEN, Jean-Pierre:
1985 Inca Quarrying and Stonecutting, in: *Journal of the Society of Architectural Historians* 44, 1985, S. 161-182.
- REISER, George Andrew:
1931 Mycerinus. The Temples of the third Pyramid at Giza, Cambridge 1931.
- RING-HEBER, Anne-Marie:
1999 Der Sidobre im Südwesten Frankreichs (Département Tarn). Einzigartiges Granitmassiv am Fuß der Cevennen, in: *STEIN* 1999, Heft 1, S. 22-25.
- RÖDER, Josef:
1958 Zur Technik der römischen Granitindustrie, in: Jorns, Werner (Hrsg.): *Der Felsberg im Odenwald*, Amt für Bodendenkmalpflege im Regierungs-Bezirk Darmstadt, Inventar der Bodendenkmäler 1, Kassel 1959, S. 17-38.
- 1965 Zur Steinbruchgeschichte des Rosengranits von Assuan, in: *Archäologischer Anzeiger* 3, 1965, S. 467-552.
- 1974 Römische Steinbruchtätigkeit am Drachenfels, in: *Bonner Jahrbuch* 174, 1974, S. 509-544.
- RUBEN, Walter:
1961 *Die Mühlsteinbrüche bei Jonsdorf*, Leipzig, 2. Aufl., 1961.
- SCHAAF, Holger:
2002 Rätselfhafte Stollen bei Plaidt (Kr. Mayen-Koblenz). Zeugnisse der frühen Trassindustrie in der Pelenz, in: *Acta Praehistoria et Archaeologica* 34, 2002 (Festschrift Ament) (im Druck).
- SCHMITZ, Bettina:
1985 *Die Steine der Pharaonen*, Hildesheim 1985.
- SCHWIENSTEK, Mario:
1998 Die Entwicklung des Basaltlava-Abbaus und der Weiterverarbeitung sowie der Folgenutzung der abgebauten Flächen im Raum Mayen-St. Johann-Ettringen-Kottenheim seit dem ausgehenden 19. Jahrhundert. Examensarbeit/Lehramt Geographie an der Universität Koblenz, Koblenz 1998.
- STOCKS, Denys A.:
2001 Testing ancient Egyptian granite-working methods in Aswan, Upper Egypt, in: *Antiquity* 75, 2001, S. 89-94.
- VIOLLET-LE-DUC, Eugène-Emanuel:
1854-1868 *Dictionnaire raisonné de l'architecture française du XIe au XVIe siècle*, Paris 1854-1868.
- WAELEKENS, Marc/DE PAEPE, Paul/ MOENS, Luc:
1988 *Quarries and the Marble Trade in Antiquity*, in: Herz, N./Waelkens, M. (Hrsg.): *Classical Marble: Geochemistry, Technology, Trade*, Dordrecht/London/Boston 1988 (= Nato ASI Series Vol. 153), S. 11-28.
- WARD-PERKINS, John Bryan:
1992 *Marble in antiquity: collected papers*, London 1992.
- WEBER-KOZINSKA, M.:
1960 Górnictwo kamienne, in: *Zarys dziejów górnictwa na ziemiach polskich*, Katowice 1960.
- WEINER, Jürgen:
2000 Kenntnis-Werkzeug-Rohmaterial. Ein Vademekum zum ältesten Handwerk des Menschen, in: *Archäologische Informationen* 23, 2000, Heft 2, S. 229-242.
- WILCKE, Horst/THUNIG, Wolfgang:
1973 *Gewinnen, Bearbeiten und Versetzen von Werkstein*, Berlin 1973.
- WURSTER, Wolfgang:
1969 Antike Steinbrüche an der westlichen Nordküste Aeginas, in: *Archäologischer Anzeiger* 7, 1969, S. 21-30.
- ZUBER, Antoine:
1956 Techniques du travail des pierres dures dans l'Ancienne Égypte, in: *Techniques et Civilisation* 29, vol. 5, No. 5, 1956, S. 161-180 und 30, vol. 5, No. 6, 1956, S. 195-215.

Anschriften der Verfasser:

Fritz Mangartz M.A.
Forschungsstelle für Vulkanologie,
Archäologie und Technikgeschichte
An den Mühlsteinen 5
D-56727 Mayen
f.mangartz@vulkanpark-forschung.de

Olaf Pung
Kavalierstr. 11,
D-13187 Berlin
olaf_pung@ngi.de