

## Bis er bricht: Wie viel Hitze verträgt ein Stein?

Until it breaks: How much heat can a stone resist?

Ulrich Obojes<sup>1</sup>, Michael Unterwurzacher<sup>2,3</sup>, Andreas Saxer<sup>4</sup>, Peter W. Mirwald<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Amt für Geologie und Baustoffprüfung, Autonome Provinz Bozen-Südtirol, Italien

<sup>2</sup> Institut für Archäologien, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich

<sup>3</sup> Fachbereich für Geographie und Geologie, Universität Salzburg, Salzburg, Österreich

<sup>4</sup> Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich

<sup>5</sup> Institut für Mineralogie und Petrographie, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich

### Zusammenfassung

Die Prozesse, die zu Schädigungen durch große Hitzeeinwirkung am Bauwerk aus Stein führen können, sind noch nicht völlig verstanden. Deshalb wurden an typischen Tiroler und Südtiroler Werksteinen Porphyr, Marmor, Kalkstein, Sandstein und Granit von 2005 bis 2010 exemplarische Studien im Rahmen einer Dissertation durchgeführt. Das Hauptaugenmerk dieser Studien lag auf jenen Gesteinsveränderungen, die sich bei Temperaturbereichen zwischen 200°C und 1000°C abspielen. Die Ergebnisse der petrophysikalischen und materialtechnischen Untersuchungen im Zuge der thermischen Laborexperimente belegen zum Teil beträchtliche Veränderungen des Gesteins. Die Bildung von Klüften sowie Verfärbungen sind erwartungsgemäß die auffallendsten makroskopisch zu erkennenden Veränderungen. Viel entscheidender für die Gesteinsschädigung sind jedoch jene Prozesse, die sich im Mikrobereich abspielen, nämlich bei Porosität, hygri-schem Verhalten, Festigkeit, Mineralstruktur und Mineralbestand. So erfolgt beispielsweise beim kompakten Brixner Granit (Granodiorit) eine völlige Zerlegung der Prüfkörper bei längerer Überschreitung der Tiefquarz – Hochquarz Umwandlungstemperatur von 573°C aufgrund der dabei auftretenden Volumensänderung der Quarzkristalle.

**Schlüsselworte:** Naturwerkstein, Verwitterung, Thermische Beanspruchung, Materialwissenschaft, Petrophysik

### Abstract

To arrive at a better understanding of the processes that produce thermal effects on stone objects, a PhD thesis has been performed at the Institute of Mineralogy and Petrography, University of Innsbruck on regionally important tyrolean and south tyrolean natural stone such as granite, porphyry, sandstone, marble and limestone. The objective was to observe the many processes that occur within a temperature range of 200°C to 1000°C and result in damage or alteration to the various rock types. Some of the methods employed, such as microscopy, spectroscopy, pressure testing and gravimetry have normative characteristics. That made it possible to determine technical, petrophysical and materials science parameters. The results of these temperature experiments showed that the development of cracks and discoloration were the most common macroscopic changes to stone caused by fire. Other physical changes noted included very pronounced changes in the petrophysical characteristics of the rocks, such as their porosity, hygri-c parameters, strength, mineral transformation and structural changes. The laboratory experiments have also shown that, within the temperature range of common fires which is usually 300°C to 1000°C distinct material changes occur between 500°C and 1000°C. A common example is the degassing that occurs in limestone to produce burnt lime. For sandstones and quartz rich igneous rocks, there is a large increase in porosity that obviously correlates with the crystalline phase transitions between low quartz ( $\alpha$ ) and high quartz ( $\beta$ ) at 573°C. The thermally induced changes in porosity and mineral content result in subsequent changes to the weathering behaviour of the rocks. For buildings made of natural stones, the resulting effects of fire can also mean, that the stability of their construction as well as their aesthetic qualities can be significantly altered and damaged.

**Keywords:** Natural stone, weathering, thermal stress, materials science, petrophysics

### 1 Einleitung

Viele der historischen Bauwerke und Kunstobjekte weltweit sind aus Naturstein. Die Erforschung der Gesteinsvorkommen, der Gesteinsverwendung und der materialtechnischen und petrophysikalischen Eigenschaften der verschiedenen Gesteine stellt daher einen Beitrag zur Erhaltung dieser Kulturgüter dar. Bauwerke und Kulturobjekte aus Stein sind stille Zeugen der Geschichte, die auch Zeitalter und Epochen dokumentieren, von denen z. T. heute keine schriftli-

chen Zeugnisse oder mündliche Überlieferungen mehr vorhanden sind. Doch so dauerhaft Stein erscheinen mag, auch dieses Material ist Veränderungen unterworfen und schädigenden Einflüssen ausgesetzt. Dabei können Schäden an historischen Bauwerken die unterschiedlichsten Ursachen haben. Durch verschiedenste Umweltbelastungen, Verwitterung, unsachgemäße Eingriffe in die Bausubstanz oder mangelnde Baupflege können die Bauwerke erhebliche geschädigt werden. Eine weitere, jedoch oftmals unterschätzte, Gefahr für historische aber auch zeitgenössische



Bausubstanz waren und sind Großbrände. Gesteinsphysikalische Schädigungen, hervorgerufen durch die starke Hitzeentwicklung und die beträchtlichen Temperaturschwankungen, tragen zu Veränderungen und oftmals einer Stabilitätsverringerung des Baumaterials bei. Ziel der hier beschriebenen Arbeit war es, relevante petrophysikalische und materialtechnische Parameter von häufig verwendeten Naturbausteinen aus dem alpinen Umfeld Nord- und Südtirols eingehender in Simulationsexperimenten zu ermitteln und die physikalischen und mineralogischen Veränderungen, die im Zuge von „Brandereignissen“ entstehen, festzuhalten (OBOJES 2010). Auch wenn die ausgewählten Gesteine überwiegend regionale Bedeutung haben, wurden die Prüfgesteine so ausgewählt, dass sie überregionale Relevanz haben.

Die Auswirkungen, die durch Temperaturveränderung am Gestein hervorgerufen werden, sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Grob vereinfacht können diese Faktoren in externe und interne Variablen unterteilt werden.

- I) Bei den externen Variablen sind die maximal erreichte Temperatur, der Temperaturwechsel pro Zeit, die Dauer einer Temperaturbelastung, zyklische Temperaturschwankungen (GÓMEZ-HERAS 2006; MCFADDEN ET AL. 2005; HAJPÁL 2002) und die Ausmaße der betroffenen Gesteinsoberfläche hervorzuheben (WEISS ET AL. 2004; 2000).
- II) Die internen Variablen werden durch die mineralogischen Komponenten, die das Gestein aufbauen dominiert. Diese Faktoren beinhalten alle chemischen, mechanischen und physikalischen Diversitäten (Wärmedehnung, Wärmeleitfähigkeit, Phasenübergänge, Albedo, u.v.m.). Ebenso sind auch die Beziehungen der Komponenten zueinander (Textur, Gefüge, Porenraum) von großer Bedeutung.

Viele dieser Variablen wurden primär anhand von sedimentologischen Verwitterungsvorgängen in heißen Klimazonen und in weiterer Folge auch an anthropogen geschaffenen Natursteinobjekten studiert (WHITE ET AL. 1999). Der Insolation (Sonneneinstrahlung) kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu (WEISS ET AL. 2004; WARKE & SMITH 1998). So können an sonnenexponierten Lagen ohne weiteres Oberflächentemperaturen von 70°C erreicht werden (SNETHLAGE 1984). Des Weiteren begannen sich Wissenschaftler auch für die zerstörerischen Einflüsse von Buschbränden auf betroffene Gesteinsareale zu interessieren (DORN 2003). Diese Feuer stellen sozusagen eine extreme Form der thermischen Verwitterung dar (ALLISON & BRISTOW 1999; ALLISON & GOUDI 1994; BLACKWELDER 1926) und können Temperaturen von 500°C bis 1400°C erreichen (SHAKESBY & DOERR 2006; BUTLER ET AL. 2004). Ausgehend von diesem Ansatz ist es nicht mehr weit bis zur detaillierten Erforschung der Auswirkungen von Brandereignissen an von Menschenhand erbauten Natursteinobjekten (GILLHUBER ET AL. 2010; GILLHUBER 2010; DIONISIO 2007; OBOJES & MIRWALD 2007; OBOJES ET AL. 2006; DIONISIO & AIRES-BARROS 2004; EHLING & KÖHLER 2000).

## 2 Untersuchungen

### 2.1 Gesteinstypen

Bei den untersuchten Naturwerksteinen handelt es sich um regional in Tirol und Südtirol vorkommende und verwendete Gesteine, welche lokal eine große Verbreitung haben und so das Erscheinungsbild von Dörfern und Städten sowie das gesamte Landschaftsbild entscheidend prägen. Folgende Gesteine wurden ausgewählt:

#### Magmatite

- **Brixner Granit [BG]** (Granodiorit)
- **Andrianer Porphyry [BQA]** (ignimbritisch-pyroklastische Tuffe und Brekzien / Quarzporphyry der Etschtaler Vulkanitgruppe)
- **Sarner Porphyry Rot [BQSR]** (rhyolithische Lava, Ignimbrit / Quarzporphyry der Etschtaler Vulkanitgruppe)
- **Sarner Porphyry Grün [BQSG]** (rhyolithische Lava, Ignimbrit / Quarzporphyry der Etschtaler Vulkanitgruppe)

#### Sandstein

- **Möltner Sandstein [GS]** (Alpiner Buntsandstein / Grödner Sandstein)

#### Kalksteine

- **Laaser Marmor [LAS]** (metamorpher Kalkmarmor)
- **Hagauer Marmor [HAG]** (Liaskalk der Adneter Fazies)

Es wurde immer möglichst homogenes Material entnommen um die Vergleichbarkeit der Untersuchungen zu gewährleisten. So wurden u.a. beim Andrianer Porphyry, welcher Brekzien und mit xenolithischen Einsprenglingen durchzogene Abfolgen aufweist, sehr heterogene Partien vermieden.

### 2.2 Methodik

Von den für die experimentellen Laboruntersuchungen ausgewählten regionalen Naturwerksteinen, welche in möglichst unverwittertem Zustand aus Steinbrüchen bzw. Abbaugeländen entnommen wurden, wurden homogene Kerne mit einem Durchmesser von 5 cm herausgebohrt. Diese Kerne wurden auf eine Länge von 10 cm zugeschnitten. Die erhaltene Menge von über 200 Prüfkörpern ermöglichte es pro Temperaturbereich und Gesteinstyp 4 Zylinderproben zu analysieren (inklusive Frost-Tau-Versuchen). Mittels der erhaltenen Zylinder und weiteren, als Plättchen mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Dicke von ca. 1 cm gefertigten Proben derselben Gesteinstypen, wurden die im Folgenden beschriebenen technischen und petrophysikalischen Untersuchungen und Experimente vorgenommen. Folgende Versuchsanordnung wurde gewählt: getrocknete Probenkörper wurden in Kammeröfen mit freistrahrenden Heizspiralensystemen vom Typ CARBOLITE 1100 ELF bei atmosphärischen Druckbedingungen kontrolliert beheizt, um genormte und nachvollziehbare Ergebnisse erzielen zu können. Die vorbereiteten Proben wurden der jeweiligen Hitzeeinwirkung für 6 Stunden ausgesetzt (200°C, 400°C, 600°C, 800°C,

1000°C) und bei Raumtemperatur wieder abgekühlt. Die maximale Exposition betrug 1000°C. Immer wurde genauestens darauf geachtet, dass ausschließlich Hitze- bzw. Hitze und Frostschäden und keine sonstigen, durch Arbeitsschritte hervorgerufene Gefügestörungen oder Schäden das Ergebnis beeinflussen konnten. Auf die Resultate der Untersuchungen zur Frostbeständigkeit wird im hier vorliegenden Artikel nicht genauer eingegangen.

Folgende Untersuchungen wurden sowohl vor den thermischen Experimenten als auch nach Durchführung der Experimente an den Gesteinsproben nach geltenden EN-Normen und aktueller Fachliteratur vorgenommen, um die auftretenden Veränderungen zu erforschen:

- Petrographische Beschreibung (nach EN 12407)
- Röntgendiffraktometrie (XRD)
- Röntgenfluoreszenzanalyse (XRF)
- Differenzthermoanalyse (DTA) und Thermogravimetrie (TG)
- Elektronenstrahl-Mikroanalysator (EMPA)
- Ramanspektroskopie
- Rasterelektronenmikroskopie (REM)
- Bestimmung Spezifische Oberfläche (BET)
- Wasserdampfsorption (Sorptionsprüfschrank SPS11)
- Quecksilberdruckporosimetrie
- Hygrische Messungen (Wassersättigung, Porosität)
- Dichtebestimmung (nach EN 1936)
- Ultraschallmessung (nach EN 12504 / EN 14579)
- Bestimmung der Druckfestigkeit (nach EN 1926)
- E-Modul Bestimmung
- Frostbeständigkeit (nach EN 12371)

### 3 Resultate und Diskussion

#### 3.1 Magmatite

##### 3.1.1 Brixner Granit

Hierbei handelt es sich um ein sehr festes, vorwiegend gleichkörniges und homogenes magmatisches Gestein des Unterperm mit isotropem Gefüge. Es besitzt ein helles, leicht grüliches, massiges Gesamtaussehen und die Hauptkomponenten sind glasig erscheinender Quarz, weißlich erscheinender Feldspat und Glimmerplättchen. In diesem kompakten Gestein führen thermische Spannungen durch eine inhomogene mineralogische Zusammensetzung, wie sie auch bei Gesteinsanalysen von GÓMEZ-HERAS ET AL. (2006) beschrieben wurden, zu intrakristallinen, aber auch interkristallinen Klüftung. Zusätzlich spielen der Phasenübergang von  $\alpha$ - zu  $\beta$ -Quarz bei 573°C und die damit verbundene Volumensänderung von 1,01 cm<sup>3</sup>, das entspricht etwa 4,5 %, in Kombination mit der geringen Porosität (~1 Vol. %) und der daraus resultierenden Unfähigkeit des Gesteinsgefüges die Dehnungsspannungen zu kompensieren, eine bedeutende Rolle in der Schadensbildung (s. Abb. 1) (OBOJES 2010). Die Feldspat- und Glimmerkomponenten zeigen aufgrund der geringen Dauer der thermischen Bean-

spruchung (lediglich 6 Stunden) kaum relevante Änderungen, jedoch treten bei höherer Temperaturbelastung zunehmend intrakristalline Klüfte auf. Die Klüftnetze können bei starker Temperaturbeanspruchung (höher als 600°C) zu einem zunehmenden Verlust der strukturellen Integrität und dem Zusammenbruch des Mineralverbandes im Brixner Granit führen (s. Tab. 1). Der Verlust der strukturellen Integrität geht einher mit einer markanten Zunahme der Porosität. Farbliche Veränderungen des Granits konnten während der Hitzeexperimente nicht festgestellt werden.

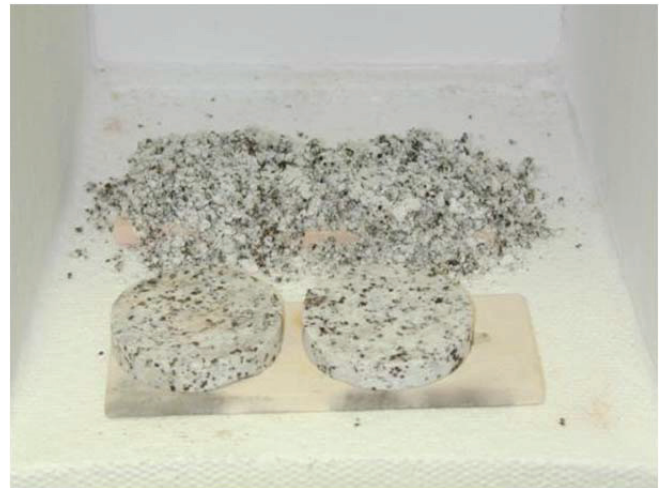


Abb. 1: Proben (5 x 1 cm) aus Brixner Granit. Im Hintergrund zerfallen nach 650°C/6h; im Vordergrund noch intakte Gesteinsproben nach 550°C/6h

Fig. 1: Samples (5 x 1 cm) of Brixner Granite. Disintegrated in the background after 650°C/6h and intact in the front after 550°C/6h

##### 3.1.2 Quarzporphyre

Im Gegensatz zum Granit von Brixen erweisen sich die untersuchten, permischen Porphyre aus dem Großraum um Bozen und dem Sarntal als geradezu hitzeresistent. Hierbei spielt das porphyrische Gefüge, bei welchem Mineralklasten, in diesem Fall vorwiegend Quarz, Feldspäte und untergeordnet Glimmer, in einer mikrokristallinen bzw. glasigen Matrix eingebettet sind, die entscheidende Rolle. Diese Klasten weisen hier meist ein Korngrößenspektrum zwischen 0,1 und 5 mm auf. Die Matrix in Kombination mit den vorhandenen Porenräumen (Porosität 3 bis 6 %) wirkt als Puffer für die auftretenden thermischen Spannungen im Gestein. Trotz dieser ausgleichenden Eigenschaften der Matrix kommt es zur Bildung von inter- und intrakristallinen Klüften, jedoch nicht in dem Ausmaß wie beim Brixner Granit. Die rot-grau-orangen bzw. grünen Porphyre zeigen bei höheren Temperaturen Farbänderungen in Richtung gelb bis rostig-rot, was ein rein optisches Erkennen von Brandschäden, besonders bei der vormalig grünen Varietät, ermöglicht. Derartige Farbänderungen hin zur Rotfärbung bei brandgeschädigten Gesteinen wurden in der Literatur bereits beschrieben (SIPPEL ET AL. 2007; ZIER & WEISE 2005; HAJPÁL & TÖRÖK 2004). Es gibt weiters markante Unterschiede beim statischen E-Modul der thermisch beanspruchten Gesteinsproben, je nachdem wie fortgeschritten die Druckbelastung und die daraus und aus der größeren Porosität bei höheren Temperaturen resultierende Druckkompakti-





on des Gesteinskörpers sind. Das Material erfährt durch die Drucklast zwar eine erneute, teilweise Verfestigung, jedoch wäre die damit einhergehende Längenänderung (Strain), welche nach 6 Stunden Exposition des Materials bei 1000°C beim Brixner Granit etwa das 6-fache, beim Andrianer Porphyry und dem Roten Sarner Porphyry das 2-fache und beim Grünen Sarner Porphyry das 3-fache des Normalwertes (Ausgangssprobe) betragen kann, wenig vorteilhaft für die Baukonstruktion. Diese Materialveränderungen führen, besonders im höheren Temperaturbereich, zu einer starken Abnahme der Druckfestigkeit (s. Tab. 1). Das im Zuge der Hitzeeinwirkung entstehende sozusagen geöffnete Gestein, bietet für nachfolgende Verwitterungsprozesse gute Angriffsflächen. Schäden können durch den vergrößerten Porenraum und die Klüftung vermehrt auftreten.

Tab. 1: Materialkennwerte Magmatite (s. Kap. 2)

Tab. 1: Material properties of igneous rocks

Gesteine Temperatur	Gemittelte Ergebnisse Magmatite			
	Porosität W-vak Vol. %	Ultraschall Laufzeit in µs	Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Strain ε mm/m
BG	0,5	20	131	2
BG600°C	4,2	75	53	10
BG1000°C	/	/	/	/
BQA	5,8	28	112	7
BQA600°C	7,8	33	119	9
BQA1000°	13,7	62	54	13
BQSR	5,4	25	173	5
BQSR600°C	6,0	35	163	6
BQSR1000°C	7,4	61	104	10
BQSG	2,7	19	151	3
BQSG600°C	4,5	33	163	5
BQSG1000°C	7,3	57	78	9

### 3.2 Sandstein

Das Verwitterungsverhalten von Sandsteinen wurde bereits mehrfach beschrieben (z.B. TURKINGTON & PARADISE 2005), doch nur wenige Autoren betrachteten die Auswirkungen von hohen Temperaturbelastungen. Hier sind besonders ältere Arbeiten (OLLIER & ASH 1983; SCOTTER 1970; EMERY 1944; BLACKWELDER 1926) und die neuere Arbeit von DORN (2003) über die Auswirkungen von Feuer als Faktor für Umwelt- und Bodenveränderungen, als Vorreiter dieser Thematik zu erwähnen.

Die Abfolge des hier untersuchten, permischen Sandsteines stellt die basale Einheit der Südtiroler Dolomiten dar. Der Sandstein aus einem Steinbruch nahe Mölten (Südtirol) ist sehr Quarzreich mit vorwiegend rötlichem, aber auch grau-orangem und braunem Erscheinungsbild. Makroskopisch erkennbar sind Quarzkörner im mm-Bereich, Muskovit, untergeordnet auch inkohlte organische Reste und opake Komponenten. Im Mikrobereich sind stängelige Aluminiumhydroxide auffallend. Dieser Sandstein ist trotz einer beträchtlich größeren Porosität im Vergleich zu den hier angeführten magmatischen Gesteinen, aber auch den Karbonaten, ein robuster, gut bearbeitbarer und dadurch auch

geschätzter Naturwerkstein. Rein optisch war bei den thermischen Experimenten eine Verfärbung erst ab Temperaturen von etwa 300°C in den rot-rosa Bereich festzustellen. Dieser Farbumschlag von Gelb-Orange hin zu diversen Rottönen wird durch die Oxidation des im Sandstein enthaltenen, opaken Eisens (Eisenoxide- hydroxide) hervorgerufen. Bei den Untersuchungen stellte sich weiters heraus, dass der Übergang von α- zu β-Quarz, wie schon bei den Porphyren und dem Brixner Granit, entscheidend für das weitere Materialverhalten ist. Neben diesem Phasenübergang, der mit Volumensänderungen und Klüftbildungen im Mineralverband einhergeht, konnte eine weitere, markante Reaktion nachgewiesen werden. Die Entwässerungsreaktion des vorhandenen Aluminium Hydroxids Al(OH)<sub>3</sub> (Nordstrandit) im Temperaturbereich von etwa 270°C. Auch diese Reaktion, welche bei weiterer Temperaturzunahme zur Bildung von Korund führt, geht mit Volumens- und Strukturänderungen einher (OBOJES ET AL. 2006). Im Rahmen der Druckversuche erfährt das Gestein durch die Drucklast zwar eine teilweise Wiederverfestigung (Kompaktion und Stauchung) und es kommt zu Kornverzahnungen, jedoch ist die damit einhergehende Längenänderung, welche beim Sandstein nach 1000°C/6h das 2- bis 3-fache des ursprünglichen Wertes betragen kann, ein Problem für die Statik der mit diesem Gestein errichteten Bauwerke.

Tab. 2: Materialkennwerte Sandstein (s. Kap. 2)

Tab. 2: Material properties of sandstone

Gesteine Temperatur	Gemittelte Ergebnisse Sandstein			
	Porosität W-vak Vol. %	Ultraschall Laufzeit in µs	Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Strain ε mm/m
GS	19,3	36	40	4
GS600°C	23,1	74	25	7
GS1000°C	24,3	101	33	9

Somit kann im Rahmen einer Verallgemeinerung dieser Ergebnisse angenommen werden, dass Brandschädigungen an Sandsteinen (s. Tab. 2) nicht nur optische Beeinträchtigungen und Veränderungen darstellen, sondern durch ablaufende petrophysikalische Vorgänge auch die Dauerhaftigkeit und Stabilität des Werkstoffes und somit des Gebäudes beträchtlich gefährden.

### 3.3 Kalksteine

#### 3.3.1 Laaser Marmor und Hagauer Marmor

Der Laaser Marmor (Ausgangsgestein > 500 Ma; mehrere Metamorphosen) ist ein sehr reiner, weißer Kalzit-Marmor aus dem Vinschgau mit geringen Mengen an Quarz, Feldspat, Glimmer, Graphit, Pyrit und Dolomit. Die durchschnittliche Kalzitkorngröße beträgt 0,3 bis 1,0 mm bei Maximalwerten von 0,6 bis 1,5 mm (UNTERWURZACHER & OBOJES 2012). Der Hagauer Marmor (Liaskalk / Kramsach in Tirol) ist ein kompakter, roter bis rosa Kalkstein mit fossilen Komponenten. Bei den thermischen Versuchen welche an Laaser- und Hagauer Marmor durchgeführt wurden bestätigte sich, dass Marmor bzw. generell Karbonatgesteine bei Temperaturen über 600°C an Stabilität

einbüßen und aufgrund der Abgabe von CO<sub>2</sub> in weiterer Folge völlig ihren Zusammenhalt verlieren und ein weißes Pulver aus Branntkalk (CaO) entsteht. An dieser Stelle muss die Beobachtung erwähnt werden, dass manche Kalksteinzylinder bei Temperaturen um 600°C ihren Zusammenhalt gänzlich verloren, andere sich jedoch bei der gleichen Temperaturbelastung auf den ersten Blick kaum veränderten. Dies zeigt sehr gut, wie sensibel die Kalzitkristalle in diesem Temperaturbereich reagieren und bereits geringfügige Abweichungen in Gefüge, Mineralogie oder Temperatureinwirkung führen zu einer erhöhten bzw. verringerten CO<sub>2</sub> Entgasung und Bildung von Branntkalk. In weiterer Folge reagiert dieser Branntkalk mit Wasser bzw. auch mit dem Wasserdampf unter Raumbedingungen zu Ca(OH)<sub>2</sub> und wird zunehmend brüchig (OZGUVEN & OZCELIC 2013). Die Besonderheiten des Kalzitkristalls in Bezug auf sein Verhalten bei Wärmezufuhr, bedingt durch die sehr unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten entlang der kristallinen Achsen (a-Achse  $-6 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ , c-Achse  $+26 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ ), führen jedoch schon bei weit niedrigeren Temperaturbereichen (bereits ab 20°C) zu Spannungen im Gesteinskörper und in weiterer Folge zu Klüftbildungen und Verformungen (KOCH 2006; KOCH & SIEGSMUND 2004; SIEGSMUND ET AL. 2000; GASCON & BALBAS 1986). Anhand der Veränderungen von Parametern welche mit der Porosität direkt zusammenhängen (Sorption, spez. Oberfläche, Wassersättigung, etc.) ist deutlich festzustellen, dass die Werte im Bereich von 400°C bis 600°C Temperaturbelastung um ein Vielfaches höher liegen, als die Ausgangswerte der unbelasteten Marmorproben. Damit gekoppelt steigt die Ultraschalllaufzeit und sinkt die Druckfestigkeit der Probenkörper mit steigender thermischer Belastung (s. Tab. 3). Beim Hagauer Marmor bilden besonders die mit Kalzitkristallen verfüllten Klüftsysteme bevorzugte Schwächezonen, an denen die experimentell durchgeführten Temperaturbehandlungen und in geringerem Maße auch die Frostbelastungen verstärkt Schädigungen hervorrufen.

Tab. 3: Materialkennwerte Kalksteine (s. Kap. 2)

Tab. 3: Material properties of carbonate rocks

Gesteine Temperatur	Gemittelte Ergebnisse Kalksteine			
	Porosität W-vak Vol. %	Ultraschall Laufzeit in µs	Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>	Strain ε mm/m
LAS	0,5	22	41	0,7
LAS600°C	2,9	79	45	10
LAS1000°C	/	/	/	/
HAG	0,5	19	54	1
HAG600°C	3,7	36	41	3
HAG1000°C	/	/	/	/

#### 4 Schlussfolgerung

Durch die erfolgten Materialanalysen konnte gezeigt werden, dass die ausgewählten Naturwerksteine anfällig für Schädigungen durch hohe Temperatureinwirkung sind und dass besonders jene Veränderungen, welche sich im Mikrobereich abspielen von größter Bedeutung sind. Das so ge-

wonnene Wissen bildet eine umfangreiche Grundlage für zukünftige restauratorische und technische Fragestellungen und soll Planern, Ingenieuren, Geowissenschaftlern und Interessierten beim tieferen Verständnis von Verwitterungsprozessen an Naturwerksteinen helfen.

#### Danksagung

Die vorgestellte Dissertation *Veränderungen an Naturwerksteinen durch thermische Beanspruchung: Petrophysikalisch - materialwissenschaftliche Untersuchungen an ausgewählten Gesteinsarten* wurde finanziert durch ein Interreg IIIA-Projekt Italien-Österreich und ein Forschungsstipendium der Autonomen Provinz Bozen-Südtirol. Das Probematerial wurde dankenswerterweise von den Steinbruchbetreibern zur Verfügung gestellt. Für Ihre Unterstützung sowie fachliche Diskussionen gilt unser besonderer Dank Dr. Peter Tropper (Univ. Innsbruck) sowie Dr. Volkmar Mair (Autonome Provinz Bozen-Südtirol).

#### Literatur

- ALLISON, R. J. & BRISTOW, G. E. (1999): The effects of fire on rock weathering: Some further considerations of laboratory experimental simulation - Earth Surface Processes and Landforms, **24** (8): 707-713
- ALLISON, R. J. & GOUDIE, A. S. (1994): The effects of fire on rock weathering: An experimental study. In: D.A. Robinson & R.B.G. Williams (eds.), Rock Weathering and Landform Evolution. Wiley, Chichester, 41-56
- BLACKWELDER, E. (1926): Fire as an agent in rock weathering - Journal of Geology, **35**: 134-140
- BUTLER B. W., COHEN J., LATHAM D. J., SCHUETTE R. D., SOPKO P., SHANNON K. S., JIMENEZ D., BRADSHAW L. S. (2004): Measurements of radiant emissive power and temperatures in crown fires - Canadian Journal of Forest Research, **34** (8): 1577-1587
- DIONISIO, A. (2007): Stone decay induced by fire on historic buildings: the case of the cloister of Lisbon Cathedral (Portugal). In: Prikryl, R. & Smith, B. J. (eds.), Building stone decay: From diagnosis to conservation, London, 87-98
- DIONISIO, A., & AIRES-BARROS, L. (2004): Fire effects on stone materials. The case of Lisbon's Cathedral. In: L. Aires-Barros, F. Zezza, A. Dionisio and M. Rodrigues (eds.), Influence of the Environment and Defense of the Territory on Recovery of Cultural Heritage. Lectures and Proceedings of the 6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin, Lisbon, 143-147
- DORN, R. I. (2003): Boulder weathering and erosion associated with a wildfire, Sierra Ancha Mountains, Arizona - Geomorphology, **55** (1-4): 155-171
- EHLING, A. & KÖHLER, W. (2000): Fire damaged Natural Building Stones. Proceedings of 6th International Congress on Applied Mineralogy ICAM, Göttingen, 975-978
- EMERY, K. (1944): Brush fires and rock exfoliation - American Journal of Science, **242**: 506-508
- GASCON, F. & BALBAS, M. (1986): Modelo tensorial en la dilatacion lineal termica anisotropa de marmoles. Boletín Geologico y Minero. T. XCVII-VI, 793-802



- GILLHUBER, S., LERHBERGER, G., GÖSKE, J. (2010): Fire damage of Trachyte: investigations of the Teplá monastery building stones - Geological Society, London, Special Publications, **333**: 73-79
- GILLHUBER, S. (2010): Anwendungsbezogene gesteinsphysikalische Eigenschaften und Verwitterungsprozesse des Teplá-Trachyts, 122 S., Münchner Geowissenschaftliche Abhandlungen B13.
- GÓMEZ-HERAS, M., ÁLVAREZ DE BUERGO, M., VARAS, M. J., FORT, R., MORCILLO, M., MOLPECERES, C. (2006): Fire damage of heritage building stones: methodological considerations on current research, In: G. Mileva & M. Hristova (eds.), Built Heritage: Fire Loss to Historic Buildings, SKALA, Varna, 132-141
- HAJPÁL, M. & TÖRÖK, A. (2004): Mineralogical and colour changes of quartz sandstones by heat - Environ. Geol., **46**: 311-322
- HAJPÁL, M. (2002): Changes in Sandstones of Historical Monuments Exposed to Fire or High Temperature - Fire Technol., **38** (4): 373-382
- KOCH, A. (2006): Deformation von Fassadenplatten aus Marmor: Schadenskartierungen und gesteintechnische Untersuchungen zur Verwitterungsdynamik von Marmorfassaden, 198 S., Universitätsverlag Göttingen.
- KOCH, A. & SIEGESMUND, S. (2004): The combined effect of moisture and temperature on the anomalous expansion behaviour of marble - Environmental Geology, **46**: 350-363
- MCFADDEN, L. D., EPPES, M. C., GILLESPIE, A. R., HALLET, B. (2005): Physical weathering in arid landscapes due to diurnal variation in the direction of solar heating - Bulletin of the Geological Society of America, **117** (1-2): 161-173
- OBOJES, U. (2010): Veränderungen an Naturwerksteinen durch thermische Beanspruchung: Petrophysikalisch – materialwissenschaftliche Untersuchungen an ausgewählten Gesteinsarten, 193 S., unv. Diss., Universität Innsbruck.
- OBOJES, U. & MIRWALD P. W. (2007): Naturwerksteine in Tirol/Südtirol: Eigenschaftsveränderungen regionaler Bausteine infolge Belastung mit hohen Temperaturen. In: Anja Diekamp (Hrsg.), Naturwissenschaft und Denkmalpflege, university press, Innsbruck, 133-140
- OBOJES, U., SAXER, A., TROPPER, P., MIRWALD P. W. (2006): The effects of fire and heat on natural building stones: first results from the Gröden Sandstone. In: R. Fort, M. Álvarez de Buergo, M. Gomez-Heras & C. Vazquez-Calvo (eds.), Heritage Weathering and Conservation, Taylor & Francis, Rotterdam, 521-524
- OLLIER, C. D. & ASH, J. E. (1983): Fire and rock breakdown - Zeitschr. Geomorphologie N. F., **27** (3): 363-374
- OZGUVEN, A & OZCELIC, Y (2013): Investigation of some property changes of natural building stones exposed to fire and high heat, Construction and Building Materials, **38**: 813-821.
- SCOTTER, D. R. (1970): Soil temperatures under grass fires - Australian Journal of Soil Research, **8**: 273-279
- SHAKESBY, R. A. & DOERR, S. H. (2006): Wildfire as a hydrological and geomorphological agent - Earth Science Review, Volume **74**, Issues 3-4: 269-307
- SIEGESMUND, S., ULLEMEYER, K., WEISS, T., TSCHEGG, E. K. (2000): Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion - Int. J. Earth. Sci. **89**: 170-182
- SIPPEL, J., SIEGESMUND, S., WEISS, T., NITSCH, K. H., KORZEN, M. (2007): Decay of natural stones caused by fire damage. In: Prikryl, R. & Smith, B. J. (eds.), Building stone decay: From diagnosis to conservation, London, 139-151
- SNETHLAGE, R. (1984): Steinkonservierung, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Heft 22, 203 S., München.
- TURKINGTON, A. V. & PARADISE, T. R. (2005): Sandstone weathering: A century of research and innovation - Geomorphology, **67** (1-2 SPEC. ISS.): 229-253
- UNTERWURZACHER, M. & OBOJES, U. (2012): White marble from Laas (Lasa), South Tyrol – its occurrence, use and petrographic-isotopical characterisation, AJES, Vienna, **105** (3): 26-37
- WARKE, P. A. & SMITH, B. J. (1998): Effects of direct and indirect heating on the validity of rock weathering simulation studies and durability tests - Geomorphology, **22** (3-4): 347-357
- WEISS, T., SIEGESMUND, S., KIRCHNER, D., SIPPEL, J. (2004): Insolation weathering and hygric dilatation: Two competitive factors in stone degradation - Environmental Geology, **46** (3-4): 402-413
- WEISS, T., SIEGESMUND, S., RASOLOFOSON, P. (2000): The relationship between deterioration, fabric, velocity and porosity constraint. In: Proceedings of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice, 215-223
- WHITE, A. F., BLUM, A. E., BULLEN, T. D., VIVIT, D. V., SCHULZ, M., FITZPATRICK, J. (1999): The effect of temperature on experimental and natural chemical weathering rates of granitoid rocks - Geochimica et Cosmochimica Acta, **63** (19-20): 3277-3291
- ZIER, H. W. & WEISE, G. (2005): Brandschäden an Natursteinen - Dargestellt am Beispiel des Kirchenbrandes in Riethnordhausen - WTA-Journal for Technology and Applications in Building Maintenance and Monument, **1**: 35-63