GEOLOGICA SAXONICA
Journal of Central European Geology
52/53 (2007) 3–22

Der Elbsandstein: Vorkommen, Verwendung, Eigenschaften

Elbe Sandstone: deposits, use, properties

Siegfried Grunert
Lachenweg 8, D-01640 Coswig, Germany

Kurzfassung

Viele Bauwerke in der Welt sind von Sandsteinen aus dem Elbsandsteingebirge in Sachsen errichtet. Die Sandsteine werden Elbsandsteine genannt. In der vorliegenden Arbeit sind die Qualitäten der Elbsandsteine erläutert und ihre messbaren Eigenschaften. Eine Diskussion der Verwitterung der Sandsteine hilft zur richtigen Pflege und Restaurierung von Sandstein-Bauwerken und -Skulpturen.

Abstract

Many buildings in the world are made from sandstone that is cut in the Saxon mountain range called Elbsandsteingebirge whence it derives its name Elbe Sandstone. The present work describes the qualities and measurable properties of the Elbe sandstone. A discussion of the weathering behaviour of the sandstone helps to establish appropriate maintenance and restoration processes of sandstone buildings and sculptures.

Einleitung

Der Elbsandstein ist als Bau- und Werkstoff weit über die Grenzen Deutschlands hinaus bekannt. Der Wiederaufbau der Dresdner Frauenkirche – zweifellos das bedeutendste Sandsteinbauwerk unserer Tage – hat ihn besonders in das Blickfeld gerückt. Viel ist über ihn gearbeitet worden. Neue Messungen haben die allgemeinen Materialkenntnisse untermauert; neue Sichtweisen sind hinzu gekommen. Mit der vorliegenden Arbeit wird der Versuch unternommen, Bekanntes und Neues zu einem knappen, aber in sich geschlossenem Bild zusammenzufügen.

Vorkommen und Verwendung des Elbsandsteines

Das Elbsandsteingebirge ist eine der interessantesten Felslandschaften Deutschlands. Seine Ausdehnung wird im SW durch Bad Gottleuba und Pirna, im NO durch Lohmen und Hohnstein markiert. Im SO schließt es die Landesgrenze ab. Die Landschaft ist bestimmt durch eine während der oberen Kreidezeit entstandene Sandsteinplatte, die mit ca. 4° gegen NO geneigt ist, sie stößt im NO gegen eine Verwerfung mit über 400 m Sprunghöhe. Im SW lagert sie flach auf stark verfaltetem und metamorphem Grundgebirge. Durch

weitständige Schichtung und Klüftung wird die Sandsteinplatte horizontal und vertikal gegliedert. Die Elbe und ihre Nebenflüsse haben in die Sandsteinplatte Täler geschnitten und so die Tafelberge wie Königstein, Lilienstein und die zerklüfteten Felsmassive wie das Basteigebiet und die Schrammsteine geschaffen. Vorkommen von kreidezeitlichem Sandstein befinden sich auch am südlichen Stadtrand von Dresden bei Dippoldiswalde und im Tharandter Wald zwischen Dresden und Freiberg.

Der Sandstein wird seit fast 1.000 Jahren als Baustoff und Werkstoff genutzt. Er ist fest, verwitterungsbeständig und gut bearbeitbar. Er hat günstige bauphysikalische Eigenschaften. Deshalb wurde er nicht nur im örtlichen Bauwesen genutzt, sondern auch früh schon zur Errichtung bedeutender Bauwerke außerhalb des Gebietes; genannt seien der Meißner Dom, das Schloss in Torgau, das Rathaus in Hamburg, das Schloss in Kopenhagen. Durch seine unterschiedliche Ausbildung ist der Sandstein aus diesem Gebiete nicht nur als Baustein und Skulpturstein geeignet. Auch als Wasserbaustein hat er sich bewährt. Weit über 100 Jahre alte Wassertröge und kunstvolle Brunnenschalen gibt es aus ihm. Es sind auch Mühlsteine zum Mahlen von Getreide oder von Farben aus ihm hergestellt worden. Selbst Wasserrohre hat man aus ihm gefertigt. Begehrt waren Schleifsteine zur Metallbearbeitung. In allen Größen wurden sie geliefert, von wenigen Zentimetern Durchmesser für feinmechanische Arbeiten bis zu 2 Metern Durchmesser für den Maschinenbau. Mühlsteine hat bereits die Hanse gehandelt. Von der zweiten Hälfte des 19. Jhs. bis zum Anfang des 20. Jhs. hatten Schleifsteine zur Bereitung von Holzschliff für die Papierindustrie große Bedeutung. Sie wurden in die ganze Welt exportiert.

Haupt-Transportweg war die Elbe. Und so findet man überall an der Elbe und ihren schiffbaren Nebenflüssen Bauwerke aus Elbsandstein. Seit der Errichtung des Eisenbahnnetzes, d.h. seit der Mitte des 19. Jhs., wurde der Elbsandstein in ganz Europa verbaut. Der Handelsort für Elbsandstein ist von alters her Pirna. Die Steingewinnung im größeren Stil begann wahrscheinlich um 1170 im Tharandter Wald für den Bau des Klosters Altzella. Der Sandstein für den Bau des Meißner Domes, Baubeginn 1266, kam aus dem Wesenitztal. Mit der Entwicklung der Flussschifffahrt begann auch der Sandsteinabbau an den Felshängen des Elbtales – zuerst bei Pirna und rechtselbisch in Posta. Im 14. Jahrhundert erschlossen die Steinbrecher die Felshänge im Elbtal bis Rathen, im 15. Jh. bis Königstein. Die Postelwitzer Steinbrüche wurden zu Beginn des 17. Jhs. eröffnet und die linkselbisch unmittelbar an der Landesgrenze liegenden Teichsteinbrüche zu Beginn des 18. Jhs. (Beeger, D. 1973, Grunert, S. 1982). Die Steinbruchindustrie hatte sich zu einem bedeutenden Wirtschaftspotential der Region entwickelt. In der zweiten Hälfte des 19. Jhs. arbeiteten bis zu 3.000 Menschen in 500 Steinbrüchen. In der Landschaft weisen sich die historischen Steinbruchgebiete durch interessante Hohlformen aus (Abb. 1). Um die Wende zum 20. Jh. produzierten noch 300 Steinbrüche. Durch die Entwicklung neuer Bauweisen sank der Bedarf an Naturstein. In den 50er Jahren des 20. Jhs. produzierten noch 19 Steinbrüche (Andreas 1955).

Da die Steinbrüche im Elbtal den Schiffsverkehr gefährdeten, mussten einige bereits am Ende des 19. Jhs. eingestellt werden. Zu Beginn des 20. Jhs. wurden die meisten Steinbrüche im Elbtal geschlossen, um den Charakter der Landschaft zu erhalten. Die Sandsteingewinnung wurde in weniger attraktive Landschaftsbereiche des Gebietes verlagert. Durch den Landschaftsschutz und die Erhebung weiter Teile des Elbsandsteingebirges zum Nationalpark wurde der Sandsteingewinnung eine strenge Reglementierung auferlegt (Grunert 1982, 1986).

Heute werden sieben Steinbrüche in der Region betrieben (Tab. 1). Die Steinbrüche der Firma Sächsische Sandsteinwerke GmbH Pirna sind so angelegt, dass sie alle im Gebiet vorkommenden Sandsteinvarietäten gewinnen können. Auch für die Restaurierung von historischen Bauwerken, die aus Sandstein errichtet wurden und deren Gewinnungsstätten schon lange geschlossen sind, vermag diese Firma geeignetes Ersatzmaterial zu liefern. Die Steinbrüche sind mit modernen Gewinnungsmaschinen ausgestattet und sehr leistungsstark. Obwohl die Steinbearbeitung in den Betrieben mit modernen Maschinen erfolgt, arbeiten bei ihnen auch erfahrene Steinmetze und Bildhauer, die auf Wunsch der Kundschaft den Stein traditionell bearbeiten können.

GEOLOGICA SAXONICA
Journal of Central European Geology 52/53 (2007) 3 – 22

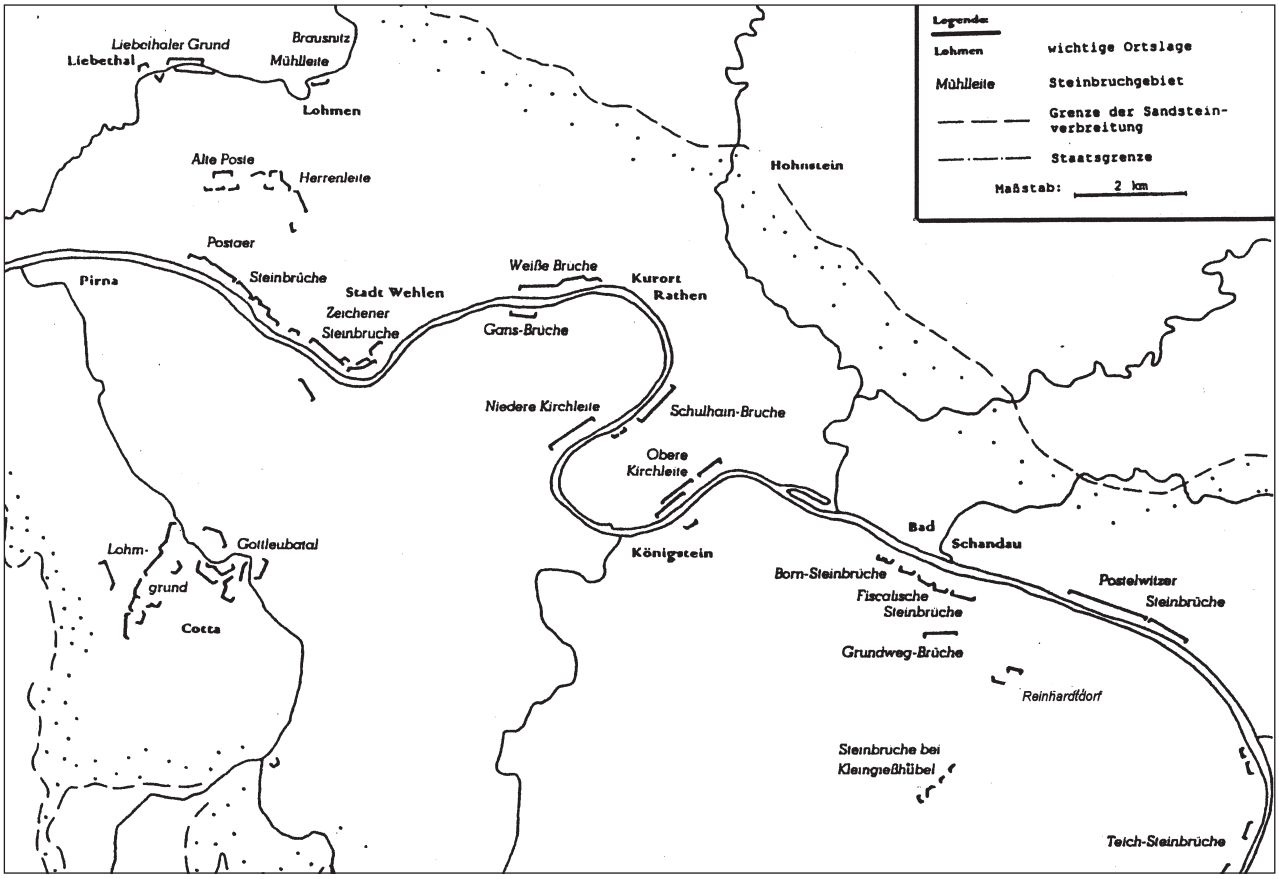

Abb. 1: Historische Steinbruchgebiete im Elbsandsteingebirge (Grunert & Kutschke 1995).

Fig. 1: Historic quarry areas in the Elbsandsteingebirge (Grunert & Kutschke 1995).

Der Stein und seine Eigenschaften

Allgemeine Kennzeichnung

Die Bezeichnung „Elbsandstein“ wird im Natursteinhandel für die Sandsteine benutzt, die aus den Steinbrüchen des Elbsandsteingebirges geliefert werden bzw. geliefert worden sind. Man unterscheidet beim Elbsandstein zwischen dem Cottaer und dem Postaer Sandstein. Die Bezeichnungen entsprechen den Typuslokalitäten. Cotta ist ein Dorf südlich von Pirna. Posta liegt auf der rechten Elbseite unmittelbar bei Pirna; es ist heute ein Stadtteil von Pirna. Die Sandsteinvarietäten sind von Kundigen durch Augenschein, erforderlichenfalls an ihrem Bruch beim Anschlagen, zu unterscheiden.

Die erfahrenen Steinmetze beschreiben die beiden Sandsteinvarietäten so:

Cottaer Sandstein ist leicht manuell bearbeitbar. Er gestattet die Herstellung feingliedrigster Bildhauerarbeiten. Er patiniert silbergrau. Er nimmt Wasser schwer auf, gibt es schwerer ab und lässt es auch schwer durchsickern. Er ist frostbeständig, aber empfindlich gegenüber stauender Nässe. Cottaer Stein muss in Weißkalk verlegt werden.

Postaer Sandstein hat eine höhere Festigkeit und ist dadurch schwerer manuell bearbeitbar. Bildhauerarbeiten aus diesem Stein werden gröber. Er hat eine höhere Abriebfestigkeit; er patiniert schwarz. Postaer Sandstein nimmt Wasser leicht auf, gibt es auch leicht wieder ab und lässt es auch durchsickern. Er ist frostbeständig.

Tab. 1: Sandsteinfirmen im Elbsandsteingebirge.

Tab. 1: Building stones of sandstone producing firms in the Elbsandsteingebirge (Elbe Sandstone Mountains).

Betreibende Firma	Sandsteinvarietät	Steinbruch
Sächsische Sandsteinwerke GmbH, 01796 Pirna	Postaer Sandstein	„Mühlleite“ – bei Lohmen „Wehlen“ – bei Dorf Wehlen
	Cottaer Sandstein	„Lohmgrund I“ – bei Cotta „Lohmgrund II“ – bei Cotta „Neundorf“ – bei Pirna-Neundorf „Reinhardtsdorf“ – bei Reinhardtsdorf
Bamberger Natursteinwerk Hermann Graser GmbH und Co. KG, 96052 Bamberg	Postaer Sandstein	„Alte Poste“ – bei Lohmen

Es gibt noch die Bezeichnung „Kirchleite Sandstein.“ Dieser ist bis zur Mitte des 20. Jhs. bei Königstein abgebaut worden. Er vereinigt alle „guten Eigenschaften“ beider Sansteinvarietäten in sich. Petrographisch ist er ein Cottaer Sandstein. Diesem Gestein entspricht das heute als „Reinhardtsdorfer Sandstein“ angebotene Material. Der Steinhandel bietet Cottaer Sandstein, Postaer Sandstein und Rheinhardtsdorfer Sandstein an und unterteilt diese noch nach Struktur und Farbe (Tab. 4).

Petrographie

Die durch den Steinbruchbetrieb gewinnbaren Sandsteine des Elbsandsteingebirges sind kieselig gebundene Quarzsandsteine. [Die wenigen oberflächennah vorkommenden karbonathaltigen Sandsteine sind nicht (oder nur ganz lokal) als Baustein genutzt worden.] Die Sandkomponente besteht zu über 90 % aus Quarz. In einigen Sandsteinen finden sich Feldspat (meist sehr stark korrodiert) und Glaukonit akzessorisch. Unter dem Polarisationsmikroskop und dem Rasterelektronenmikroskop erkennt man folgende Gefügestruktur: Die Quarzkörner sind bei der Verfestigung als Kristalle weitergewachsen. Wenn das Kristallgitter benachbarter Körner übereinstimmt, verbinden sie sich an der Berührungsstelle. Sie kristallisieren zusammen. Die Quarzkörner bilden ein fest verbundenes Skelett. Der Porenraum zwischen den Körnern ist beim Postaer Sandstein offen. Bei dem Cottaer Sandstein sitzt in den Kornzwickeln des Porenraumes der Feinkornanteil. Dieser besteht aus Quarz, Illit und gut auskristallisiertem authigenen Kaolinit. Bei der Diagenese ist der Feldspat hydrolytisch abgebaut worden. Kaolinit hat sich neu gebildet und das freigesetzte SiO_2 ist an die Quarzkörner der Sandfraktion ankristallisiert. Dabei sind benachbarte Quarzkörner, die zufällig so orientiert sind, dass ihr Kristallgitter zusammenpasst, nahtlos miteinander verwachsen. Quarz und Illit sind der primäre Feinkornanteil des Sedimentes, der durch die Sammelkristallisation des Quarzes in den Kornzwickeln konzentriert worden ist.

Der Feinkornanteil ist bestimmend für die unterschiedlichen Eigenschaften von Cottaer und Postaer Sandstein. Der Reinhardtsdorfer Sandstein (bzw. Kirchleite Sandstein) ist nach seiner Petrographie ein Cottaer Sandstein, der zum Postaer Sandstein tendiert. Sein Unterschied zu den heute im Handel befindlichen Sandsteinen begründet die gesonderte Bezeichnung.

Technisch-physikalische Eigenschaften

Vorbemerkung

In den messbaren Merkmalen bilden sich die bereits verbal beschriebenen Eigenschaften der beiden

Tab. 2: Unteres 5%-Quantil ($x_{5\%}$) von Festigkeitsmerkmalen an 42 Sandsteinen aus historischen und noch betriebenen Steinbrüchen (Grunert 1982).

Tab. 2: Lower 5%-quantile ($x_{5\%}$) of the strength properties of 42 sandstone types from historic and active quarries (Grunert 1982).

Art der Belastung	**Postaer Sandstein**	**Cottaer Sandstein**
Druckfestigkeit [N/mm²] Lasteintrag senkrecht zur Schichtung,lufttrocken	40	20
Druckfestigkeit [N/mm²] Lasteintrag parallel zur Schichtung,lufttrocken	30	20
Druckfestigkeit [N/mm²] Lasteintrag senkrecht zur Schichtung, wassergesättigt	30	10
Druckfestigkeit [N/mm²] Lasteintrag parallel zur Schichtung, wassergesättigt	20	10
Biegezugfestigkeit [N/mm²] Bruchfläche senkrecht zur Schichtung, lufttrocken	2,5	2,5
Biegezugfestigkeit [N/mm²] Bruchfläche parallel zur Schichtung, lufttrocken	2,0	2,0
Spaltzugfestigkeit [N/mm²] Bruchfläche senkrecht zur Schichtung, lufttrocken	2,0	1,5

Sandsteinvarietäten ab. Tab. 2 und Tab. 3 enthalten statistisch aufbereitete Messergebnisse eines Untersuchungsprogrammes, bei dem Sandstein aus produzierenden und auch für die Baugeschichte wichtigen historischen Steinbrüchen untersucht worden ist (Grunert 1982, 2007). Durch die Untersuchungen wurde ein vergleichbares Zahlenmaterial geschaffen, das u. a. bei der Erneuerung historischer Bauwerke die Steinauswahl erleichtern kann. Das Programm umfasste 42 Großproben. Für jedes Merkmal wurde die nach den Prüfvorschriften erforderliche Anzahl Einzelmessungen durchgeführt. Das daraus gebildete arithmetische Mittel wurde für die weitere statistische Bearbeitung als relevant für die Probe angenommen. In den zitierten Arbeiten sind die angewandten Messverfahren und die statistische Aufbereitung beschrieben. Diese mit „traditionellen“ Mitteln gemessenen Ergebnisse werden ergänzt durch Ergebnisse modernerer Messverfahren und in ihrer Aussage miteinander verglichen.

Festigkeitsmerkmale

Tab. 2 enthält die unteren 5 %-Quantile der Festigkeitsmerkmale für Postaer und Cottaer Sandstein. Die Werte geben eine Orientierung für die Abschätzung der Standsicherheit von bestehenden Bauwerken.

Aus den Zahlen ist erkennbar, dass die Festigkeit des Cottaer Sandsteines deutlich niedriger ist als die des Postaer Sandsteines. Beide Sandsteinvarietäten erleiden bei Wassersättigung eine Festigkeitsminderung. Beim Cottaer Sandstein ist die Festigkeitsminderung größer. Die Festigkeitsanisotropie zeichnet sich in der Statistik beim Postaer Stein deutlicher ab als beim Cottaer. Am Postaer Stein selbst ist die Schichtung meist nicht erkennbar. Wolkig ausgebildete Braunfärbungen, die den Postaer Stein stellenweise durchziehen, sind von der Schichtung unabhängig. Im Gegensatz dazu weist der Cottaer Stein meistens eine in der Schichtung liegende Flaserung auf. Durch die niedrigeren Festigkeitswerte wird beim Cottaer Stein in der statistischen Auswertung die Anisotropie nicht deutlich. In der Biegezugfestigkeit verhalten sich beide Sandsteinvarietäten nahezu gleich. Dagegen unterscheiden sie sich deutlich in der Spaltzugfestigkeit, ebenso in der Ankerausbruchfestigkeit (Tab. 4). Besonders deutlich werden die Unterschiede beider Steinvarietäten in der Abriebfestigkeit (Tab. 4). Hierin drückt sich auch die leichtere Bearbeitbarkeit des Cottaer Sandsteins aus.

Tab. 3: Gefügemerkmale von 42 Sandsteinen aus historischen und noch betriebenen Steinbrüchen (Grunert 1982).

Tab. 3: Properties of the structure of 42 sandstone types from historic and active quarries (Grunert 1982).

Merkmal	Dim.	Postaer Sandstein (n=24)		Cottaer Sandstein (n=18)		Gesamtstichprobe (n=42)	
		$\bar{X}$	σ	$\bar{X}$	σ	$\bar{X}$	σ
Median der Korngrößenverteilung	**mm**	0,37	0,11	0,12	0,02	0,27	0,15
Korngr. < 0.063 mm	**M.-%**	2,93	1,59	11,98	4,36	6,81	5,46
Reindichte	**g/cm³**	2,662	0,0075	2,656	0,0084	2,659	0.0083
Rohdichte	**g/cm³**	2,085	0,052	2,051	0,056	2,070	0,056
Porosität	**%**	21,78	1,86	22,81	2,16	22,22	2,03
Wasseraufnahme	**M.-%**	7,61	1,37	8,89	1,75	8,16	1,65
Sättgungsbeiwert	**–**	0,729	0,70	0,78	0,065	0,751	0,072
kapillare Steighöhe	**mm**	322	56	156	126	251	124
Permeabilität	**md**	1529	1146	154	144	940	1104
Kornbindungsgröße	**mm**	0,0409	0,0145	0,0148	0,0031	0,0296	0,0170
Kornbindungsfestigkeit	**kp/cm²**	92,3	20,7	74,5	14,0	84,7	20,0
Masseverlust bei Kristallistionssprengung	**g/cm²**	0,097	0,137	0,735	0,419	0,371*)	0,431*)

*) arithmetisches Mittel nicht zulässig, da bei diesem Merkmal für Postaer und Cottaer Sandstein unterschiedliche Verteilungen gelten; $\bar{X}$ = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung

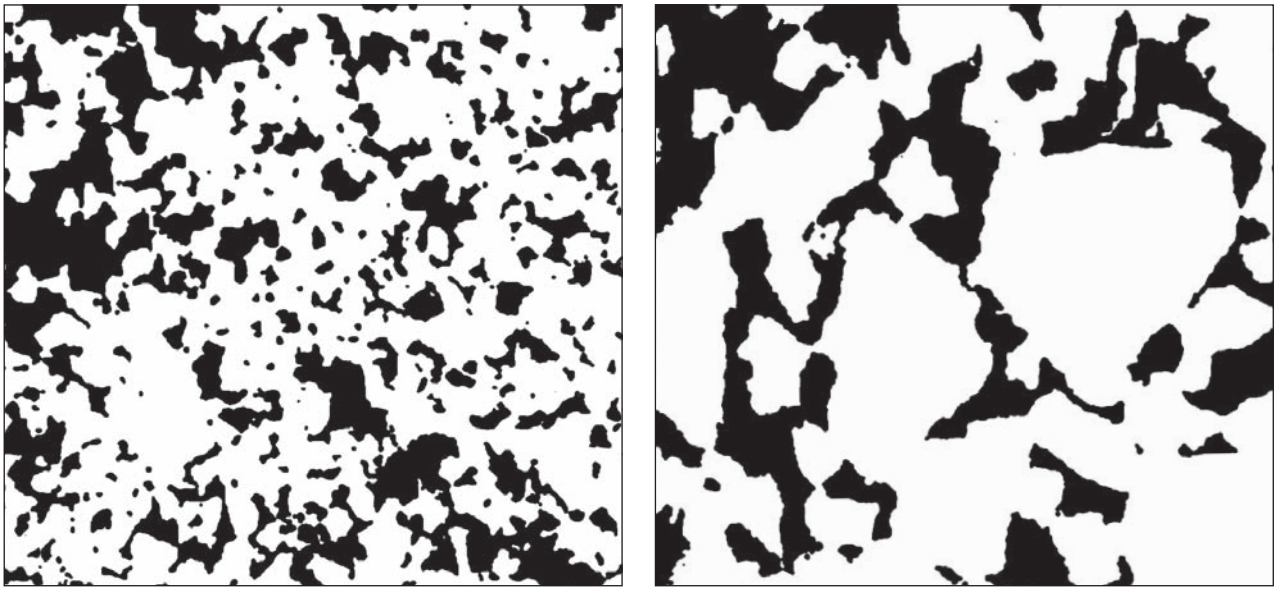

Abb. 2: Porenstruktur von einem Cottaer Sandstein aus dem Tagebau Neundorf (links) und einem Postaer Sandstein aus dem Tagebau Mühlleite (rechts); beide im gleichen Bildmaßstab. Die Poren sind schwarz dargestellt (Grunert et al. 1997).

Fig. 2: Structure of the pores of Cotta sandstone from the Neundorf quarry (left) and Posta sandstone from the Mühlleite quarry (right); same scale. The pores are shown in black. (Grunert et al. 1997).

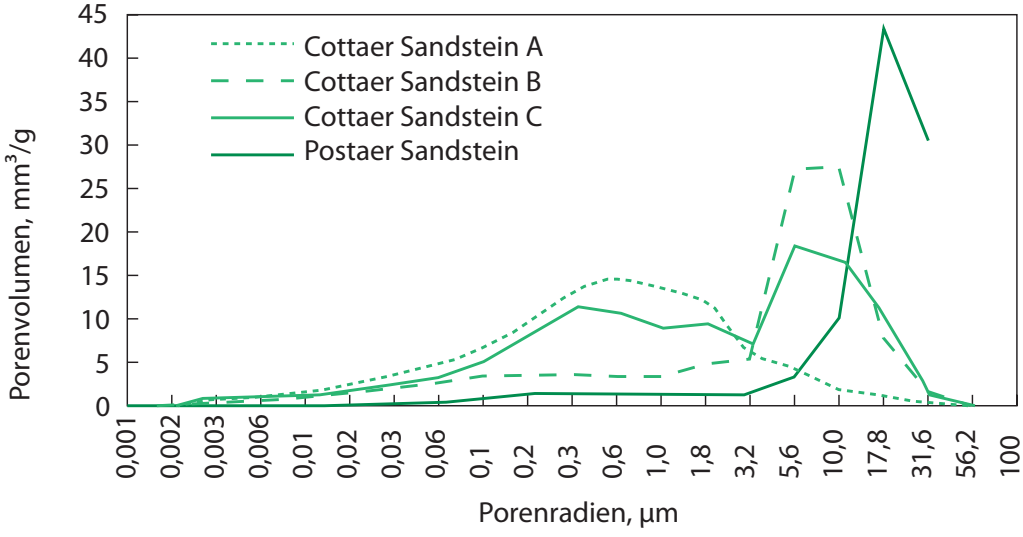

Abb. 3: Verteilung der Porenradien und des Porenvolumens für bruchfrische Cottaer und Postaer Sandsteine (Grunert et al. 1997)

Fig. 3: Distribution of pore radius and pore volume of fresh Cotta sandstone and Posta sandstone (Grunert et al. 1997).

Gefügemerkmale

Traditionell gemessene Gefügemerkmale enthält Tab. 3 (Grunert 1982, 2007). Zunächst werden die mikroskopischen Beobachtungen bestätigt. Der Cottaer Sandstein ist feinkörniger als der Postaer und sein Feinkornanteil deutlich höher. Der höhere Feinkornanteil erklärt die höhere Porosität, die größere Wasseraufnahme und den höheren Sättigungsbeiwert des Cottaer Sandsteines. Die mit Quecksilberporosimetrie und Bildanalyse gemessenen Porositätsmerkmale liefern zwar abweichende Werte, bestätigen aber die gleiche Tendenz (Tab. 5, Tab. 6). Auch die niedrigere Permeabilität (Tabelle 3) ist durch den höheren Feinkornanteil verständlich: kleinere Körner → engere Poren → geringere Durchlässigkeit. Bildanalyse und Quecksilberporosimetrie gestatten, das Porengefüge zu untersuchen. Abb. 2 zeigt die Porenstruktur eines Cottaer und eines Postaer Sandsteines, wie sie für die Bildanalyse durch Tränken des Porenraumes mit fluoreszierendem Harz sichtbar gemacht wird. Das Diagramm auf Abb. 3 vergleicht die Porenradienverteilung eines charakteristischen Postaer Sandsteines mit Porenradienverteilungen von drei ebenfalls charakteristischen Cottaer Sandsteinen. Der Postaer Sandstein weist zwar einen geringen Anteil sehr enger Poren auf, zeigt aber bei 17,8 µm ein klares Maximum. Bei der Ausbildung der Porenradienverteilung der Cottaer Sandsteine muss man aber differenzieren: In Abb. 3 sind charakteristische Verteilungen von drei Gruppen ausgewiesen: Gruppe A besitzt ein breites, flaches Maximum zwischen 0,06 und 3,2 µm, Gruppe B ein steiles Maximum zwischen 3,2 und 17,8 µm. Gruppe C zeigt zwei deutliche Maxima zwischen 0,06 und 3,2 µm und zwischen 3,2 und 31,6 µm.

Der Postaer Sandstein zeigt eine relativ große kapillare Steighöhe. Aber da ist die niedrige kapillare Steighöhe (Tab. 3) beim Cottaer Sandstein! Eine Sandsteinsäule aus dem an Feinkorn reichen Cottaer Sandstein, in Wasser gestellt, saugt das Wasser weniger hoch als der an Feinkorn arme Postaer Sandstein - ein Widerspruch zum Kapillargesetz!? Das mikroskopische Bild kann es erklären: Die Quarzkörner der Sandfraktion sind starr miteinander verbunden. Beim Eindringen des Wassers umgeben sich die Mineralkörner der Feinkornfraktion mit Wasserhüllen und dichten so den Porenraum ab, sie verhindern das tiefere Eindringen des Wassers und bremsen den kapillaren Aufstieg des Wassers. In Tab. 7 (Grunert et al. 1997) ist die Messung der kapillaren Wasseraufnahme nach DIN 52147 für je eine Probe Cottaer und Postaer Sandstein angegeben. Die arithmetischen Mittel der Messergebnisse lassen die Unterschiede der beiden Gesteine eigentlich nicht erkennen.

Tab. 4: Petrophysikalische Eigenschaften der von der Firma „Sächsische Sandsteinwerke GmbH“ angebotenen Elbsandsteine. (Prüfung gemäß DIN bzw. EN). (Internet: http://www.sandsteine.de, 2. Februar 2004; °) Mayer 1990; °°) Information Sächsische Sandstein GmbH.

Tab. 4: Petrophysical characteristics of the Elbe sandstone quarried by the Sächsische Sandsteinwerke GmbH.

Merkmal	Dimension	Cottaer Sandstein	Postaer Sandstein	Reinhardtsdorfer Sandstein
Rohdichte	kg/dm³	2,13	2,1	2,02
Wasseraufnahme	Vol.%	13,5	13,4	14,7
Druckfestigkeit	N/mm²	42,0	63,0	53,6
Biegezugfestigkeit	N/mm²	5,1	4,9	4,55
statischer Elatizitätsmodul	N/mm²	11969 °)	22921 °)	10544 °°)
Querdehnzahl	–	0,1670 °)	0,1616 °)	
dynamischer Elatizitätsmodul	N/mm²	12915 °)	26369 °)	
Abriebfestigkeit	cm³/50cm²	13,9	6,8	15,6
Ankerausbruch-festigkeit	N	420	670	534
Frost-Tau-Wechsel-versuch	–	frostbeständig	frostbeständig	frostbeständig

Erst der Vergleich der Maximal- und Minimalwerte, der Varianz und der Standardabweichung zeigen, dass die Dynamik der kapillaren Sättigung offenbar bei den beiden Proben unterschiedlich verlaufen ist. Die ausgeprägtere Anisotropie und im Zentimeterbereich liegende Gefügeunterschiede des Cottaer Sandsteines bilden sich deutlich ab. Eine beachtenswerte, aus den Zahlen nicht erkennbare Tatsache ist, dass der Postaer Sandstein sich bereits nach 1 Stunde gesättigt hatte, während bei dem Cottaer Sandstein die Sättigung nach 24 Stunden noch nicht abgeschlossen war.

Die Kornbindungsgröße (Tab. 3) ist eine Maßzahl für die Größe der Verbindungsflächen, die die Sandkörner untereinander haben. Sie ist der Quotient aus dem Anteil der Berührungsstellen am Umfang der Körner und der Anzahl der Berührungsstellen multipliziert mit dem Median der Korngrößenverteilung. Anteil und Anzahl der Berührungsstellen werden unter dem Mikroskop ausgemessenen, der Median der durch Siebanalyse bestimmten Korngrößenverteilung entnommen (Grunert 1982, Hirschwald 1912). Die Kornbindungsfestigkeit ist der Quotient aus der Spaltzugfestigkeit und der Kornbindungsfläche multipliziert mit 100. Die Kornbindungsfläche wird aus der Porosität ermittelt (Hirschwald 1912). Über diese beiden das Gefüge beschreibenden Maßzahlen stellt man die Verbindung zu den Festigkeitsmerkmalen und zur Verwitterungsbeständigkeit her. Aus der geringeren Kornbindungsgröße beim Cottaer Sandstein erklärt sich die geringere Druckfestigkeit und die geringere Spaltzugfestigkeit ebenso wie die geringere Ankerausbruchfestigkeit und der höhere Abrieb bei der Messung der Abriebfestigkeit (Tab. 2, Tab. 4). Die natürliche Verwitterung der Sandsteine erfolgt durch Kristallisationssprengung, d.h. durch das Auskristallisieren von Wasser oder Salzen im Porenraum. Man spricht von Frostsprengung oder Salzsprengung. Der Prozess ist im Labor leicht nachzubilden, indem man durch den Kristallisationsversuch den Masseverlust bei der Kristallisationssprengung bestimmt. Aus der geringeren Kornbindungsgröße und der geringeren Kornbindungsfestigkeit erklärt sich der größere „Masseverlust bei Kristallisationssprengung“ → d. h. die höhere Empfindlichkeit des Cottaer Sandsteines gegenüber Verwitterungseinflüssen.

Tab. 5: Porosimetrie an Cottaer Sandstein (BA = Bildanalyse, QHP = Quecksilberporosimetrie) (Grunert et al. 1997).

Tab. 5: Porosimetry of Cotta sandstone (BA = image analysis, QHP = mercury pressure porosimetry) (Grunert et al. 1997).

Art der Messung	Stat. Maßzahle	bruchfrischer Stein				von Bauten ausgebauter Stein			
		Steinbruchgebiet			$\bar{x}$	Kirche in		$\bar{x}$	$\bar{x}$
		Lohmgrund	Neuendorf.	Reinhardtsdorf		Oschatz	Zwickau		
Porenvolumen (QHP), mm³/g	ar. Mittel	99,12	122,37	110,23	102,62	96,56	94,75	96,02	100,38
	Min.	86,50	93,38	94,24	86,50	82,39	86,92	82,39	82,39
	Max.	118,55	167,43	134,88	167,43	105,17	107,04	107,04	167,43
	Varianz	55,10	1564,36	186,63	198,55	68,17	81,97	68,94	162,58
	Stabw	7,42	39,55	13,66	14,09	8,26	9,05	8,09	12,75
	n	30	3	6	39	14	6	20	59
Porenoberfläche (QHP), m²/g	ar. Mittel	1,25	2,15	0,92	1,27	0,93	2,51	1,40	1,31
	Min.	0,26	1,53	0,30	0,26	0,34	0,63	0,34	0,26
	Max.	3,99	3,11	1,55	3,99	2,18	4,29	4,29	4,29
	Varianz	0,59	0,71	0,29	0,61	0,30	2,26	1,35	0,84
	Stabw	0,77	0,84	0,54	0,78	0,55	1,50	1,13	0,92
	n	30	3	6	39	14	6	20	59
Gesamtporosität QHP), %	ar. Mittel	20,39	23,67	23,29	21,09	21,01	19,57	20,58	20,92
	Min.	18,33	19,42	19,13	18,33	16,57	17,73	16,57	16,57
	Max.	23,82	30,13	29,25	30,13	30,23	21,72	30,23	30,23
	Varianz	1,74	32,32	14,30	6,59	13,79	2,42	10,53	7,83
	Stabw	1,32	5,68	3,78	2,57	3,71	1,56	3,16	2,80
	n	30	3	6	39	14	6	20	59
Mittl.Porenradius (QHP), µm	ar. Mittel	6	5	21	8	2	2	2	6
	Min.	0,5	1	8	0,5	0,8	1	1	0,5
	Max.	80	11	67	80	6	4	6	80
	Varianz	239,94	29,89	657,71	291,58	2,41	1,01	1,92	192,83
	Stabw	15,49	5,47	25,65	17,08	1,55	1,01	1,35	13,89
	n	27	3	5	35	14	6	20	55
Makroporosität >6 µm, (BA), %	ar. Mittel	17,7	19,3	18,7	18,4	17,3	19,1	17,6	18,1
	Min	8,5	17,8	18,2	8,5	13,2	19,0	13,2	8,5
	Max	21,3	21,1	19,1	21,3	20,8	19,1	20,8	21,3
	Varianz	18,74	1,95	0,22	9,62	6,13	0,00	2,32	7,66
	Stabw	4,33	1,40	0,47	3,10	2,48	0,07	2,31	2,77
	N	7	4	4	15	8	2	10	25
Mittl.Porenradius, (BA), µm	Ar. Mittel	105	85	94	97	103	82	99	98
	Min	51	74	89	51	83	78	78	51
	Max	139	115	99	89	122	85	122	122
	Varianz	913,62	407,58	25,00	606,07	306,55	24,50	326,22	471,16
	Stabw	30,23	20,19	5,00	24,62	17,51	4,95	18,06	21,71
	n	65114	41485	28210	134809	94905	22288	117193	25200

Merkmale der thermischen Eigenschaften

Thermische Eigenschaften sind an Naturstein relativ selten gemessen worden. Auch hier werden nur an einzelnen Proben gewonnene Messergebnisse vorgestellt.

Die thermische Dilatation, gemessen bei einem kontinuierlichen Aufheizprozess im Dilatometer (Typ 402 EP der Fa. Netzsch/Selb) mit einer Aufheizrate von 5 K/min., wird in den Diagrammen von Abb. 4 und der Tab. 8 für je einen Cottaer und einen Postaer

Tab. 6: Porosimetrie an Postaer Sandstein (BA = Bildanalyse, QHP = Quecksilberporosimetrie) (Grunert et al. 1997).

Tab. 6: Porosimetry of Posta sandstone (BA = image analysis, QHP = mercury pressure porosimetry) (Grunert et al. 1997).

Art der Messung	stat. Auswertung	bruchfrisch aus Stbr.		ges. bruchfr.	Ausbaustein ursprücklich aus den Teichsteinbrüchen	Postaer Sandstein gesamt
		Mühlleite	Wehlen			
Porenvolumen (QHP), mm³/g	ar. Mittel	97,53	98,16	97,88	91,12	93,46
	Min.	73,78	89,23	73,78	70,74	70,74
	Max.	111,03	117,70	117,70	115,23	117,70
	Varianz	276,39	138,64	173,07	164,76	171,60
	Stabw	16,62	11,77	13,16	12,84	13,10
	N	4	5	9	17	26
Porenoberfläche, (QHP), m²/g	ar. Mittel	0,10	0,17	0,14	0,11	0,12
	Min.	0,03	0,03	0,03	0,01	0,01
	Max.	0,18	0,47	0,47	0,64	0,64
	Varianz	0,01	0,03	0,02	0,03	0,02
	Stabw	0,07	0,17	0,14	0,16	0,15
	n	4	5	9	17	26
Gesamtporosität (QHP), %	ar. Mittel	20,23	21,29	20,82	19,51	19,97
	Min.	16,52	18,74	16,52	15,46	15,46
	Max.	22,76	23,77	23,77	26,61	26,61
	Varianz	7,19	5,60	5,80	8,27	7,55
	Stabw	2,68	2,37	2,41	2,88	2,75
	n	4	5	9	17	26
Mittl. Porenradius (QHP) µm	ar. Mittel	26	30	28	33	31
	Min.	22	16	16	15	15
	Max.	30	40	40	50	50
	Varianz	13,33	90,80	55,78	111,19	90,08
	Stabw	3,65	9,53	7,74	10,54	9,49
	n	4	5	9	14	23
Makroporosität >6 µm (BA), %	ar. Mittel	18,8	20,9	19,6	20,0	19,7
	Min	18,4	18,7	18,4	18,9	18,4
	Max	19,4	23,3	23,3	21,4	23,3
	Varianz	0,09	4,57	2,66	1,07	2,17
	Stabw	0,30	2,14	1,56	1,04	1,47
	n	7	4	11	4	15
Mittl. Porenradius (BA), µm	ar. Mittel	168	167	167	174	169
	Min	138	135	135	144	135
	Max	182	212	212	185	212
	Varianz	216,90	1054,92	446,85	402,0	414,55
	Stabw	14,73	32,48	21,14	20,05	20,36
	n(count)	76757	39670	116427	42288	81958

Sandstein wiedergegeben. Geprägt wird der Verlauf der Dilatationskurven durch die Phasenumwandlung von α-Quarz in β-Quarz bei 573 °C, die mit einer spontanen reversiblen Aufweitung des Kristallgitters verbunden ist. Die Dilatationskurven beider Sandsteine laufen fast parallel. Beim Cottaer Sandstein ist die Dilatation

bis 150 °C höher. Beim Postaer Sandstein ist sie im Bereich des Umwandlungspunktes beachtlich höher, was sich zwanglos aus dem höheren Quarzgehalt erklärt. Dilatationswerte, gemessen nach dem Verfahren von Knöfel & Schubert (1993), enthält Tabelle 9. In den Temperaturintervallen von -20° bis +20 °C und +20° bis +60 °C ist der Ausdehnungskoeffizient des Cottaer Sandsteines höher als der des Postaer Sandsteines, in dem nur an einzelnen Proben gemessenen Intervall von +20 °C bis *300 °C ist der Ausdehnungskoeffizient des Postaer Sandsteines deutlich höher.

Die Wärmeleitfähigkeit wurde mit dem Einplattenmessverfahren nach Bock (DIN 52612) an der MPA Dresden gemessen. Tabelle 10 enthält die Messergebnisse an je 3 Platten – senkrecht und parallel zur Schichtung geschnitten – der gleichen Probe von Cottaer und von Postaer Sandstein. Die Anisotropie der beiden Sandsteine ist widersprüchlich. Für eine Verallgemeinerung gibt es bei diesem Merkmal noch zu wenig Kenntnisse. Das gleiche gilt auch für die Messdaten zur Wärmekapazität (Tab. 11). Die Messwerte grenzen die Proben deutlich voneinander ab, sind aber nur für diese Proben relevant (Grunert et al. 1997).

Bemerkungen zur Anwendbarkeit von den diskutierten Messdaten

Für die hier als traditionell bezeichneten Messdaten sind mit Hilfe der mathematischen Statistik die verbal erläuterten Zusammenhänge auch als gesicherte Korrelationen und Regressionen nachgewiesen worden (Grunert 1982, Grunert 2007). Die einzelnen Merkmale für Cottaer und Postaer Sandstein bilden sich überschneidende Gesamtheiten, so dass auf Grund eines einzelnen gemessenen Merkmals wie Druckfestigeit oder Porosität die Zuordnung eines Sandsteines zu einer der beiden Gruppen nicht möglich ist. Fügt man mehrere Merkmale zu Diskriminanzfunktionen zusammen, wird eine Trennung der beiden Sandsteinvarietäten möglich. Diese Tatsache rechtfertigt, Merkmale der Elbsandsteine nach den Varietäten Cottaer und Postaer Sandstein zu Stichproben zu vereinigen und statistische Maßzahlen, wie arithmetisches Mittel oder die Quantile, zu berechnen. Da beide Sandsteinvarietäten visuell unterscheidbar sind, ist es auch legitim, diese Maßzahlen zur Abschätzung bestimmter Eigenschaften zu verwenden, wenn es nicht möglich ist, die erforderlichen Rechengrößen am Objekt zu ermitteln. Voraussetzung für diese Vorgehensweise ist, dass man die Streubreite der als Rechengrößen benutzten Merkmale kennt und sich möglicher Fehler bewusst ist. Das entbindet natürlich nicht von den Messungen, die für die Beantwortung von Fragestellungen mit hohem Verantwortungsgrad erforderlich sind. Für neues Material gelten die von der Lieferfirma angegebenen aktuellen Materialeigenschaften und Kennwerte.

Das Altern der Sandsteine

Die Patina: Die auffallendste Veränderung des Elbsandsteines durch das Altern ist das Patinieren. Innerhalb von etwa 30 Jahren nimmt der ursprünglich frische Stein eine deutlich graue Färbung an, die in den folgenden Jahrzehnten weiter dunkelt. Besonders intensiv ist diese Verfärbung an Bauwerksteilen, die durch Schlagregen belastet werden (Roland Boden[1]). An den patinierten Bereichen ist die Steinoberfläche fest und die ursprüngliche Bearbeitung unverändert erhalten. Die Regel besagt: Cottaer Sandstein patiniert silbergrau, Postaer Sandstein tief schwarz. Das unterschiedliche Patinieren des Elbsandsteines ist von materialkundigen Architekten offensichtlich gezielt gestalterisch genutzt worden. An der Kathedrale in Dresden (Abb. 5) – und vielen anderen Bauwerken – ist das zweifelsfrei zu erkennen. Allein aus diesem Grunde sollte der Umgang mit der Patina bei denkmalpflegerischen Maßnahmen sehr behutsam sein.

Im mikroskopischen Bild erkennt man, dass die Patina als dunkelbraune bis schwarze Abscheidung die Körner des Sandsteines an der Oberfläche umhüllt und die Wandungen der oberflächennahen Poren auskleidet. In sehr porigen Bereichen des Sandsteines

[1] Die genannten Herren – inzwischen geachtete Fachleute – haben als Studenten im Rahmen ihrer Ausbildung an diesen Fragen aktiv mitgearbeitet. Ich möchte ihnen auf diesem Wege für ihren Einsatz nochmals danken und ihre Leistungen würdigen.

Tab. 7: Kapillare Wasseraufnahme von Cottaer und Postaer Sandstein gemessen an Werksteinen aus einem historischen Bauwerk (Grunert, et al. 1997).

Tab. 7: Capillary water absorption of Cotta and Posta sandstone, measured in hewn stones used in historic buildings (Grunert et al. 1997).

Art der Messung	**Stat. Maßz.**	**Cottaer Sandstein**			**Postaer Sandstein**		
		// ss	**^ ss**	**ges.**	**// ss**	**^ ss**	**ges.**
kapillare Wasseraufnahme nach 24 h [kg/m²];	$\bar{X}$	21,6	19,2	20,4	21,0	20,9	20,9
	Min.	17,3	12,2	12,2	20,6	19,4	19,4
	Max.	23,8	25,1	25,1	21,4	21,9	21,9
	Varianz	6,7	33,6	19,5	0,1	1,1	0,5
	σ	1,6	5,8	4,4	0,4	1,1	0,7
	n	5	5	10	5	4	9
Wasserraufnahmekoeffizient [(kg/m²)/ t^1/2]		6	3,5	4,55	6,02	4,38	5,2

// ss = gemessen parallel zur Schichtung, ^ ss = gemessen senkrecht zur Schichtung, ges = Gesamtumfang, Stat.Maßz. = statistische Maßzahlen; $\bar{X}$ = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung , Min. = niedrigster Wert, Max. = höchster Wert

oder an profilierten Bauwerksteilen kann die schwarze Färbung bis zu einem Zentimeter tief in den Stein eingreifen. Unter der schwarzen Patina ist der Stein bis zu 2 Zentimeter Tiefe hellbraun verfärbt. Erst darunter ist die ursprüngliche Farbe des Steines erhalten. Die färbende Substanz besteht aus oxidischen bzw. hydroxidischen Eisenmineralen, denn sie verfärbt sich beim Glühen rot. Abpräpariert wird die schwarze Substanz vom Magneten angezogen (Dirk Böhme[1]). Als schwarze Minerale kommen in Betracht: Hämatit, Maghemit und Magnetit, als braune Minerale: Limonit und Goethit.

Die Dynamik der Patinierung ist wie folgt zu modellieren (Grunert 1995): Das Aufschlagwasser dringt in den Stein ein und löst Eisenminerale. Durch die Verdunstung wandern die Lösungen zur Steinoberfläche. Dort scheiden sich die gelösten Stoffe ab. Durch Stoffwechselprozesse von Mikroorganismen kann eine Reduktion des Eisens erfolgen. Da die patinierten Oberflächen eine höhere Festigkeit haben als der Stein, kann man nicht ausschließen, dass auch SiO_2 an diesem Prozess teilnimmt. Einfluss auf den Patinierungsprozess haben neben der Hintermörtelung primär das Gefüge und natürlich auch der Eisengehalt des Steines. Chemische Analysen von bruchfrischem Elbsandstein weisen zwischen 0,01 und 0,78 Masse-% Fe_20_3 aus (Grunert 1978).

Durch Hydrophobieren der frischen Steinoberfläche kann die Patinierung verzögert werden. Da jedoch die Verdunstung unter den hydrophobierten Bereich in den Stein hinein verlegt wird, kann es dort zur Anreicherung von Salzen und damit zu Schädigungen kommen. Konkrete Beobachtungen solcher Schäden liegen mir jedoch nicht vor.

Die Patina dichtet die Steinoberfläche ab und bildet so einen natürlichen Schutz. Sie vermindert aber auch die Transpiration des Steines. Dadurch konzentriert sich die Transpiration auf weniger stark patinierte Bereiche. Dort kann es zur Anreicherung von Schadsalzen kommen und damit zur Korrosion. Dichtet die Patina den Stein so weit ab, dass die Transpiration gänzlich unterbunden wird, kann es zum stellenweisen Absprengen der Patina kommen. Flächiges Ablösen der Patina tritt vorrangig beim Cottaer Sandstein auf. An den von der Patina befreiten Flächen kann es erneut zur Patinierung kommen oder auch zur intensiven Korrosion. Das Absprengen der Patina tritt i. Allg. erst nach etwa 100 Jahren Bewitterung auf. Dann ist es angeraten, die Gesteinsoberfläche durch eine geeignete Behandlung wieder durchlässig zu machen.

Das Entfernen der Patina ist ohne Verlust der ursprünglich durch den Steinmetzen oder Bildhauer geschaffenen Steinoberfläche nicht möglich. Der unter der Patina liegende gelb verfärbte Bereich ist auch nie die Steinfarbe, die der Architekt dem Bauwerk geben wollte. Alle Reinigungsverfahren zerstören zwangsläufig die vom Steinmetz geschaffene Steinoberfläche. Nur der Steimetz kann die patinierte Oberfläche abarbeiten und eine neue Bearbeitungsfläche schaffen. Viele der in jüngster Zeit „gereinigten" Fassaden sehen jetzt fleckig aus, ihre ursprünglich glatte Steinoberfläche zeigt tiefe Abrasionsspuren und die ehedem schönen Bauwerke sind durch die „Reinigung" verunstaltetet. Gute Architekten haben das Patinieren des Elbsandsteines bewusst als Gestaltungsmittel eingesetzt und haben gewollt, dass die Struktur des Bauwerkes durch das Patinieren unterstrichen wird und das Bauwerk durch sein Altern interessanter wird. Im Gegensatz dazu ist die Porta Nigra in Trier 180 n. Chr. von einem römischen Baumeister offensichtlich bewusst als weißes Stadttor projektiert und aus einem weißen Sandstein errichtet worden. Doch die Restaurierung 1966–1973 hat darauf verzichtet, die ursprüngliche weiße Farbe des Bauwerkes wieder herzustellen; denn schon im Mittelalter war das Stadttor schwarz patiniert und hat damals seinen heutigen Namen erhalten.

Krusten: An Bereichen, die nicht vom Regenwasser abgespült werden, kann es zur Abscheidung von Krusten kommen. Sie setzen als Ausblühungen an, bilden dann sinterartige Oberflächen und blähen schließlich blumenkohlartig auf. Diese Krusten sind meistens Gips. Das Calcium des Gipses ist als Straßenstaub bzw. Abrieb von Mörtel und Putz, das Sulfation aus der Stadtatmosphäre zu erklären. Die Krusten sind eine ästhetische Beeinträchtigung. Sie können auch zur Korrosion des Steines führen. Sie schadfrei zu entfernen, ist nicht leicht und erfordert große Sorgfalt.

Frostverwitterung: Der Postaer Sandstein gilt grundsätzlich als frostbeständig. Das gilt auch weitgehend für den Cottaer Sandstein. Es gibt aber Bänke, die bedingt frostbeständig sind, die empfindlich gegen stauende Nässe sind. Für die Verwitterungsdynamik poröser Stoffe ist das Porengefüge von Bedeutung. Wie aus dem Korngefüge leicht zu verstehen ist, kann die Porenverteilung bei dem Cottaer Sandstein zwei Maxima zeigen (Gruppe C in Abb. 3). Das eine Maximum wird bedingt durch die Sandfraktion, das andere durch die Feinkornfraktion. Sven Wallasch[1] leitete folgende Modellvorstellung ab: Bei Befrosten des wassergesättigten Sandsteines kristallisiert das Wasser in den gröberen Poren aus. Das Wasser in den feineren Poren, das nur wenige Moleküle starke Häutchen bildet, bleibt beweglich und wird durch Sammelkristallisation des Wassers in die größeren Poren hineingezogen und übt dann eine Sprengwirkung aus, die zum Zerfrieren des Steines führt. Da der Cottaer Stein schwer Wasser aufnimmt, tritt dieser Schaden nur bei unsachgemäßem Einbau auf.

Aus praktischen Beobachtungen konnten aus „Sättigungsbeiwert (S)" und „Masseverlust bei Kristallisationssprengung (Kr)" folgende Kriterien zur Verwitterungsbeständigkeit der Sandsteine abgeleitet werden (Grunert 1982):

S < 0,75	verwitterungsbeständig
0,75 < S < 0,9; Kr < 1,5 g/cm²	bedingt verwitterungsbeständig
0,75 < S < 0,9; Kr > 1,5 g/cm²	nicht verwitterungsbeständig
S > 0,9	nicht verwitterungsbeständig

Für die heute zum Einsatz kommenden Sandsteine weist der Frost-Tau-Wechsel-Versuch Frostbeständigkeit aus (Tab. 4).

Salzverwitterung: Wasserlösliche Salze können als Lösungen im Porenraum der Sandsteine wandern. Die Verdunstung führt sie an die Steinoberfläche. An der Oberfläche und dem oberflächennahen Porenraum kristallisieren sie aus. Der Kristallisationsdruck zersprengt den Kornverbund, und die Steinoberfläche sandet ab. Tausalze sind Sandsteinbauwerken gefährlich. Sie können Bauwerksteile innerhalb weniger Jahre ernsthaft schädigen. Der „Masseverlust bei Kristallisationssprengung" gestattet, die Empfindlichkeit der Sandsteine gegenüber dieser Belastung abzuschätzen.

Tab. 8: Messwerte des technischen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Elbsandsteinen (Grunert et al. 1997).

Tab. 8: Measured values for the technical thermal expansion coefficient of Elbe sandstone (Grunert et al. 1997).

Temperaturbereich	Cottaer Sandstein Lohmgr. I, Bildhauerbank	Postaer Sandstein Mühlleite, Weiße Bank
t [°C]	dL [10^{-5} /°C]	dL [10^{-5} /°C]
50–100	1,1655	1,0193
100–150	1,3451	1,2386
150–200	1,4692	1,5105
200–250	1,6436	1,6689
250–300	1,7359	1,8404
300–350	1,9454	1,9624
350–400	2,1794	1,9984
400–450	2,6570	2,9771
450–500	3,2320	3,5883
500–550	4,4659	5,0754
550–600	8,3262	10,0505
600–650	0,5512	0,7580
650–700	0,1423	0,2501
700–750	0,0363	0,1503
750–800	0,0678	0,1593

Beyer (1911) fand an Felswänden u.a. Alaun und Gips als Ursache für die Sandsteinverwitterung, Frau Lentschig-Sommer (1961) zusätzlich Alunogen. Die Freisetzung der zur Bildung des Alauns und des Alunogens erforderlichen SO_4^{2-}-Ionen führte Häntzschel (1929) auf die Oxidation des im Sandstein akzessorisch vorhandenen Pyrites zurück. In der Stadtatmosphäre können Abgase in Verbindung mit Staub und Mörtel zur Bildung von Schadsalzen führen.

Schäden durch ungeeignete Mörtel: Eine alte Steinmetzregel besagt: Sandstein muss in Weißkalk verlegt werden. Das gilt besonders für den Cottaer Sandstein. Die im Cottaer Sandstein teilweise auftretende Marmorierung wird durch Einlagerungen von feinen Ton- und Kohlehäutchen verursacht. Die Kohle entspricht etwa einer Braunkohle, d. h. sie enthält Huminsäure. Durch einen alkalischen Porenwasserstrom, wie ihn Zementmörtel verursachen kann, wird die Huminsäure mobilisiert. Sie wandert an die Steinoberfläche und verursacht dort braune Flecken. Die Flecken bauen sich durch Oxidation nach einiger Zeit von selbst ab. Verwendet man Kalkmörtel, dann wird durch das Calcium im Porenwasserstrom die Huminsäure festgelegt, und man vermeidet sich Ärger.
Alkalireiche Portlandzemente können auf kieselig gebundenen Sandstein korrosiv wirken. Die Alkalien des Zementes bilden mit SiO_2 lösliche Silikate. Dabei werden die Kontaktstellen der Quarzkörnchen gelöst, und der Sandstein sandet ab.

Zu starre Fugenmörtel können zum Ausbrechen der Kanten an den Steinen führen. Sandstein hat eine Ausdehnung ähnlich wie Stahl (Tab. 9). Bei Sonneneinstrahlung kann sich eine Fassade bis auf über 70 °C aufwärmen. Die thermische Dilatation führt dann zu erheblichen Spannungen an den Fugen, wenn diese nicht nachgeben.

Schäden durch korrodierende Stahlanker: Bis in die erste Hälfte des 20. Jahrhunderts sind Anker, Klammern und Bolzen aus Stahl (oft auch tragend) in Sandsteinkonstruktionen eingebaut worden. Als Korros-

Tab. 9: Thermische Ausdehnungskoeffizienten, gemessen nach Knöfel und Schubert an Werksteinen aus historischen Bauwerken (Grunert et al. 997).

Tab. 9: Thermal expansion coefficients measured according to Knöfel and Schubert. in hewn stones used in historic buildings (Grunert, et al. 1997).

Temperaturbereich [° C]	Stat. Maßzahlen	Cottaer Sandstein			Postaer Sandstein		
		Wärmedehnung [1/ K]			Wärmedehnung [1/ K]		
		// ss	^ss	ges.	// ss	^ ss	ges.
-20 bis +20	$\bar{X}$	$10{,}93 \cdot 10^{-6}$	$11{,}54 \cdot 10^{-6}$	$11{,}24 \cdot 10^{-6}$	$10{,}85 \cdot 10^{-6}$	$10{,}12 \cdot 10^{-6}$	$10{,}49 \cdot 10^{-6}$
	Min.	$9{,}775 \cdot 10^{-6}$	$10{,}66 \cdot 10^{-6}$	$9{,}775 \cdot 10^{-6}$	$8{,}816 \cdot 10^{-6}$	$9{,}682 \cdot 10^{-6}$	$8{,}816 \cdot 10^{-6}$
	Max.	$12{,}03 \cdot 10^{-6}$	$12{,}12 \cdot 10^{-6}$	$12{,}12 \cdot 10^{-6}$	$12{,}98 \cdot 10^{-6}$	$10{,}55 \cdot 10^{-6}$	$12{,}98 \cdot 10^{-6}$
	n	3	3	6	3	3	6
+20 bis +60	$\bar{X}$	$9{,}94 \cdot 10^{-6}$	$10{,}67 \cdot 10^{-6}$	$10{,}31 \cdot 10^{-6}$	$6{,}410 \cdot 10^{-6}$	$10{,}40 \cdot 10^{-6}$	$8{,}41 \cdot 10^{-6}$
	Min.	$9{,}251 \cdot 10^{-6}$	$9{,}559 \cdot 10^{-6}$	$9{,}251 \cdot 10^{-6}$	$0{,}173 \cdot 10^{-6}$	$8{,}374 \cdot 10^{-6}$	$0{,}173 \cdot 10^{-6}$
	Max.	$10{,}81 \cdot 10^{-6}$	$12{,}12 \cdot 10^{-6}$	$12{,}12 \cdot 10^{-6}$	$10{,}75 \cdot 10^{-6}$	$12{,}11 \cdot 10^{-6}$	$12{,}11 \cdot 10^{-6}$
	n	3	3	6	3	3	6
+20 bis +300	$\bar{X}$	$14{,}6\ 10^{-6}$	$14{,}8 \cdot 10^{-6}$	$14{,}7 \cdot 10^{-6}$	$15{,}9 \cdot 10^{-6}$	$16{,}1 \cdot 10^{-6}$	$16{,}0^{-6}$
	n	1	1	2	1	1	2

$\bar{X}$ = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung , Min. = niedrigster Wert, Max. = höchster Wert, n = Anzahl der Messungen

sionsschutz benutzte man Schwarzbrennen, Verbleien, Bitumenanstriche, Einbetten in Kalk- oder Portlandzement-Mörtel sowie Feuerverzinkung. Sehr gut bewährt hat sich das Schwarzbrennen, eine thermische Behandlung, die der Schmied nach der Fertigstellung des Werkstückes vornimmt, bei der sich der Stahl mit einer dünnen festen Oxidschicht überziehrt. Wenig bewährt hat sich das Feuerverzinken. Wenn der Korrosionsschutz wirkungslos geworden ist, rosten die Stähle. Die durch das Rosten bedingte Volumenvergrößerung zertreibt die verankerten Bauteile. Dabei bilden sich radiale Risse um das Ankerloch.

Zerstörung durch Brandbelastung: Obwohl die aus Elbsandstein errichtete Altstadt Dresdens durch den anglo-amerikanischen Luftterror 1945 vollständig niedergebrannt worden ist, gibt es keine systematische Untersuchung über Brandschäden an Bauwerken aus Elbsandstein. Allgemeine Beobachtungen und physikalische Logik besagen: Bei Brandbelastung schalt der Sandstein ab. Die geringe Wärmeleitfähigkeit (Tab. 10) bewirkt, dass sich zunächst nur die Oberfläche der thermisch belasteten Sandsteinbauteile aufheizt; die starke Wärmedehnung (Tab. 8) bewirkt – in Verbindung mit der geringen Zugfestigkeit (Tab. 2) – dass die aufgeheizte Schale von dem weniger stark erwärmten Bereich abreißt. Eine durchgängige Erwärmung auf 573 °C, dem Umwandlungspunkte „Tiefquarz zu Hochquarz" (Abb. 4), führt zu einer Entfestigung des Kornverbandes. Der Cottaer Sandstein scheint weniger empfindlich zu sein als der Postaer. Da sich der den frischen Sandstein gelb färbende Limonit bei 300 °C in rotes Eisenoxid umwandelt, ist die rote Verfärbung bei thermisch belasteten Elbsandsteinen ein gutes Kriterium für die Bewertung.

Verwitterungsformen

Angriff der Verwitterung: Die Verwitterung des Sandsteines setzt von der Oberfläche her ein. Ein Versagen des Steines in seinem Inneren – wie das bei Marmor passieren kann (Grunert 1988) – ist mit großer Wahrscheinlichkeit beim Elbsandstein an Bauwerken noch nicht beobachtet worden. Roland Boden [1)] entnahm einer über 200 Jahre alten Skulptur, die wegen Kriegsschäden erneuert werden musste, einen Bohrkern. Mikroseismische Prüfung und Druckfestigkeitsmes-

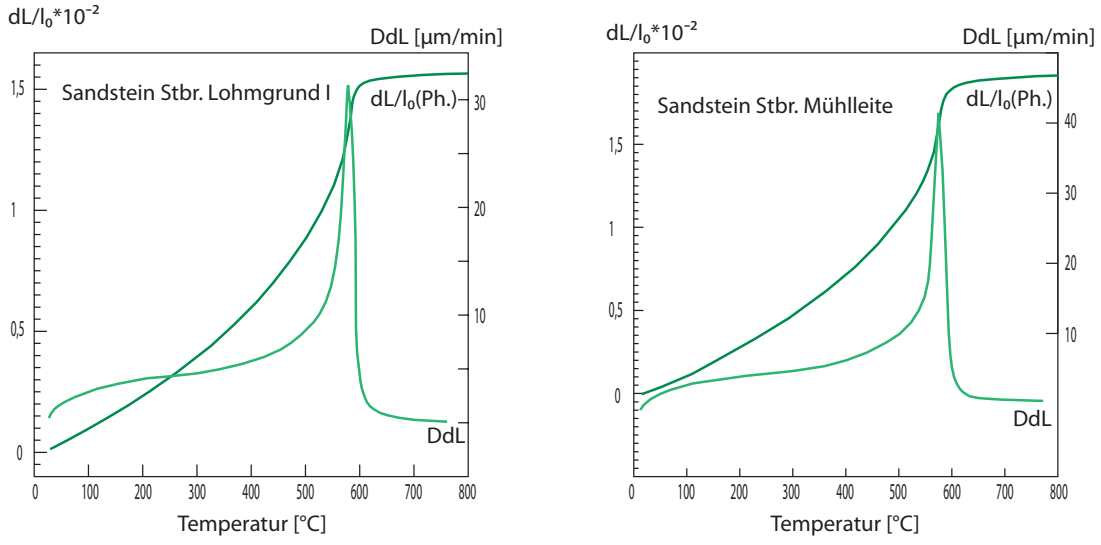

Abb. 4: Dilatometermessungen je eines Cottaer Sandsteines („Bildhauerbank" im Tagebau Lohmgrund I) (linkes Bild) und eines Postaer Sandsteines („*Weiße Bank*" im Tagebau Mühlleite) (rechtes Bild) (Grunert et al. 1997).

Fig. 4: Dilatometry of a Cotta sandstone from the layer *Bildhauer Bank* of the Lohmgrund quarry (left picture) and a Posta sandstone from the layer *Weiße Bank* in the Mühlleite quarry (right picture) (Grunert et al. 1997).

sungen zeigten, dass sich die Festigkeit im Inneren der Skulptur nicht verändert hatte. Eine durchgängige Entfestigung wäre nur denkbar, wenn ein gänzlich wassergesättigter Cottaer Stein sehr spontan durchfriert. In den Cottaer Steinbrüchen sind die unteren Bänke im bergfeuchten Zustand frostempfindlich, aber nicht nach dem Austrocknen.

Absanden: Die allgemeine Erscheinungsform der Verwitterung ist das Absanden. Verursacht wird es durch Frostsprengung oder Salzsprengung beim Einsatz von Tausalzen oder ungeeignetem Mörtel. Meist tritt es erst ein, wenn die Patina abgefallen oder erntfernt worden ist. Beim Postaer Stein wird Absanden selten beobachtet. Ist der Stein homogen, dann versetzt sich die Korrosionsfläche parallel zur Oberfläche. Im Cottaer-, häufiger noch beim Kirchleite-Sandstein, kommen fossile Kriechspuren vor. Diese sind beständiger als der umgebende Sandstein und werden durch die Verwitterung aus dem Stein herausmodelliert – wahrscheinlich unter Mitwirkung der Winderosion.

Wabenverwitterung: Ein fast nur an natürlichen Felswänden beobachtetes Phänomen ist die Wabenverwitterung. Grübchen, mehrere Zentimeter im Durchmesser und ca. 2 bis 3 Zentimeter tief, können dicht bei dicht Felswände überziehen und verleihen ihr so eine wabenartige Oberfläche. Es kommen aber auch vereinzelt stehende Grübchen vor, auch größere Hohlformen. Im 19. Jahrhundert wurden sie als Zeugnisse der Winderosion angesehen. Heute sieht man die Ursache in der Wirkung der Salzsprengung (Häntzschel 1929, Lentschig-Sommer 1961). Diese Verwitterungsform tritt bei den Elbsandsteinen vorzugsweise an den Sandsteinen auf, die der Varietät Cottaer Sandstein zuzuordnen sind. Von westdeutschen Autoren wird die Erscheinungsform als Alveolarverwitterung beschrieben. Die Dynamik des Prozesses ist noch nicht zufriedenstellend geklärt. Über die Zeiträume, die zur Bildung dieser Oberflächenstrukturen erforderlich sind, kann man auch kaum Aussagen machen, sie messen mehrere Jahrzehnte bis zu geologischen Zeiträumen. An Bauwerken kommt diese Verwitterungsform sehr selten vor.

Hohlkehlen durch stauende Nässe: An Felswänden bilden sich Hohlkehlen über grundwasserstauenden Schichten aus. Eine ähnliche Verwitterungsdynamik stellt sich an Bauwerken ein über vorspringenden Ab-

Tab. 10: Wärmeleitfähigkeit von Cottaer und Postaer Sandstein, gemessen nach Bock (DIN 52612) an Werksteinen an historischen Gebäuden (Grundert et al. 1997).

Tab. 10: Thermal conductivity of Cotta and Posta sandstone measured according to Bock (DIN 52612) in hewn stones in historic buildings (Grunert et al. 1997).

Merkmal	Stat. Maßzahlen	Cottaer Sandstein			Postaer Sandstein		
		// ss	^ ss	ges.	^ ss	^ ss	ges.
Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	$\bar{X}$	1,6956	1,6699	1,6824	1,0466	1,2373	1,1419
	Min	1,6635	1,5478	1,5478	0,9305	1,1122	0,9305
	Max	1,7210	1,7442	1,7442	1,1331	1,3383	1,3383
	Varianz	0,0009	0,0112	0,0050	0,0109	0,0132	0,0206
	σ	0,0293	0,1057	0,0709	0,1045	0,1149	0,1434
	n	3	3	6	3	3	6

$\bar{X}$ = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung, Min. = niedrigster Wert, Max. = höchster Wert, n = Anzahl der Messungen.

sätzen in den Fassaden und in den Winkeln zwischen befestigtem Gehsteig und aufgehendem Mauerwerk. Das sich auf den horizontalen Flächen sammelnde Wasser wird von den angrenzenden vertikalen Steinen des Mauerwerks kapillar aufgesogen. Es bildet sich ein vertikaler Porenwasserstrom bis zur kapillaren Steighöhe. Dort verdunstet das Wasser. Die gelösten Substanzen scheiden sich an der Oberfläche des Steines und im oberflächennahen Porenraum ab. Sie bilden dort Krusten und bewirken eine intensive Salzsprengung. Auch durch die Frostsprengung wird der wassergesättigte Bereich geschädigt. Bei längerer Einwirkung dieser Korrosion bilden sich in den Stauwasserbereichen horizontale Hohlformen. Diese Verwitterungsform tritt nur bei Cottaer Sandstein auf. Durch die geringe kapillare Steighöhe beim Cottaer Sandstein konzentriert sich das angebotene Wasser mit seinen schädigenden gelösten Salze in einem engen Bereich des durchfeuchteten Bauteils. Dadurch konzentriert sich dort die ganze schädigende Kraft. Bei dem Postaer Sandstein werden durch die relativ große kapillare Steighöhe die schädigenden Stoffe und deren Auswirkung auf einen größeren Bereich verteilt und dadurch unwirksam. Förderlich hinzu kommt die höhere Zugfestigkeit sowie die höhere Korbindungsfestigkeit, und schließlich kann sich in den größeren Poren der Kristallisationsdruck schwerer aufbauen (Grunert 1971).

Korrosionsformen in Wechselwirkung mit der Patinierung: Die Patina bildet sich vorrangig auf den der Hauptwindrichtung zugewandten Flächen, d.h. auf den Flächen, die am stärksten vom Regenwasser betroffen werden. Bei freistehenden Sandsteinobjekten ist dann oft die der Hauptwindrichtung zugewandte Seite stärker patiniert als die dem Wind abgewandte. Die patinierten Flächen sind gegen das Aufschlagwasser abgedichtet und verfestigt. Der durch den Stein diffundierende Porenwasserstrom wandert - von der Verdunstung angetrieben, zu den unpatinierten Stellen. Dort wirkt dann die Verwitterung konzentriert (Grunert 1995). So können beispielsweise giebelbekrönende Obelisken auf der Wetterseite gänzlich intakt erscheinen und von der Rückseite vollständig ausgehöhlt sein.

Die Haltbarkeitsdauer: Sandsteinbauwerke überleben Jahrhunderte schadlos, wenn sie der Mensch (oder ungewöhnliche Naturgewalten) nicht zerstört. Damit ist der Sandstein den meisten künstlichen Baustoffen überlegen. Bei einem richtig konstruierten und ausgeführten Sandsteinbauwerk kann ein Versagen der Statik durch Alterung bzw. Verwitterung des Steines nahezu ausgeschlossen werden. Da die Verwitterung an der Außenfläche des Steines ansetzt, ist sie beobachtbar, und ein statisch bedingter Schaden kann nur durch Schwächung der Querschnitte tragender Bauteile ein-

Tab. 11: Wärmekapazität von Cottaer und Postaer Sandstein, gemessen an Werksteinen aus historischen Gebäuden (Grunert et al. 1997).

Tab. 11: Thermal capacity of Cotta and Posta sandstone meassured in hewn stones of historic buildings (Grunert et al. 1997).

Merkmal	Stat. Maßzahlen	Cottaer Sandstein	Postaer Sandstein
Wärmekapazität [(kJ/kgK)]	$\bar{X}$	0,70200.	0,68400
	Min.	0,69500	0,66600
	Max.	0,71200	0,69500
	σ	0,00854	0,01464
	n	3	3

$\bar{X}$ = arithmetisches Mittel; σ = Standardabweichung, Min. = niedrigster Wert, Max. = höchster Wert, n = Anzahl der Messungen.

Abb. 5: Architektonisches Detail an der Kathedrale in Dresden.

Fig. 5: Architectonic detail on the cathedral at Dresden.

treten. Ausnahmen bilden Verbundkonstruktionen, bei denen die Verbundbaustoffe (z.B. Stahl) durch Alterung oder Korrosion versagen.

Die dargestellten Verwitterungsformen schreiten erst nach Jahrzehnten, z. T. erst nach Jahrhunderten, so weit fort, dass sie als Schaden angesehen werden müssen. Oft sind sie konstruktiv bedingt, d. h., sie wären konstruktiv vermeidbar gewesen. Neben der konstruktiven Gestaltung ist eine Steinauswahl unter Beachtung der technisch-physikalischen Eigenschaften ausschlaggebend für die funktionalen Eigenschaften des Bauwerkes und die Dauerhaftigkeit der Steinkonstruktionen.

Nachwort

Obwohl der Sandstein zu den schon am längsten genutzten Baustoffen zählt, ist der Informationsbedarf über seine Eigenschaften bei weitem noch nicht abgesättigt. Mit der vorliegenden Studie sollten vorhandene Kenntnisse aufgezeigt, aber auch der Informationsbedarf deutlich gemacht werden. Sandstein ist ein Baustoff, der Gestaltungsreichtum gestattet. Namhafte Architekten haben das erkannt und genutzt. Natursteinfassaden sind Besonderheiten. Sie zu erhalten, ist eine kulturelle Aufgabe, die Einfühlungsvermögen in die Gestaltungsidee des Architekten und Materialkenntnis erfordert. Dass Skulpturen durch den Steinrestaurator gepflegt werden müssen, ist allgemein anerkannt, aber auch Natursteinbauwerke sollten nicht ohne Anleitung durch Natursteinspezialisten saniert werden. Der Einsatz des Sandsteines im Bauwesen hat sich zunehmend zum Dekormaterial hin gewandelt. Bei der Steinauswahl darf nicht nur der visuelle Eindruck zum Kriterium gemacht werden. Dauerhaft schön kann ein Bauwerk nur sein, wenn nicht nur die Schönheit des Steines zum Zeitpunkt des Einbaues betrachtet wird, sondern wenn alle Eigenschaften des Baustoffes den Anforderungen an das Bauwerk gerecht werden.

Danksagung

Herrn T. Lewandofski gilt der Dank für die elektronische Bearbeitung der Abbildungen 3 und 4.

Literatur

Andreas, G. (1955): Die Steinbruchindustrie im Elbsandsteingebirge. – Heimatkundl. Bl., **4/5**: 34–49. Dresden.

Beyer, O. (1911): Alaun und Gips als Mineralneubildungen und als Ursache der chemischen Verwitterung in den Quadersandsteinenen des sächsischen Kreidegebietes. – Z. dt. geol. Ges., **63**: 429–467, Berlin.

Beeger, D. (1973): Anfänge der Entwicklung der Steinbrecherei im Elbsandsteingebirge. – Informationen Fachausschuss und Erzeugnisgruppen Werksteine und Pflaster **8**: 6–8, Dresden.

Grunert, S. (1973): Ein Beitrag zur Bewertung von Sandsteinen für bautechnische Zwecke. – Wiss. Z. Hochsch. Archit. Bauw. Weimar, **18**: 365–368, Weimar.

Grunert, S. (1978): Petrochemische Untersuchungen an Kreidesandsteinen aus der Elbtalzone. – Freiberger Forsch.-H., **A 563**: 65–104, Leipzig.

Grunert, S. (1982): Der Sandstein der Sächsischen Schweiz als Naturressource, seine Eigenschaften, seine Gewinnung und Verwendung in Vergangenheit und Gegenwart. – Diss., TU Dresden, 1–424.

Grunert, S. (1986): Der Sandstein der Sächsischen Schweiz. – Abh. Staatl. Mus. Mineral. Geol. Dresden, **34**: 1–155, Leipzig.

Grunert, S. (1988): Eine Theorie zu der an Marmorskulpturen beobachteten Innenverwitterung. – Abh. Staatl. Mus. Mineral. Geol. Dresden, **35**: 95–98, Leipzig.

Grunert, S. (1995): Patinierung und Korrosion im Prozess der Verwitterungsdynamik an Natursteinfassaden aus Elbsandstein. – Sediment '95, 10. Sedimentologentreffen 24. bis 28. Mai 1995 an der Bergakademie Freiberg. Kurzfassung der Vorträge und Poster, S. 111–118. Freiberg.

Grunert, S. (2007): Statistische Untersuchungen zur Aussagefähigkeit petrophysikalischer Messergebnisse über die Eigenschaften kieselig gebundener Sandsteine aus der Sächsischen Schweiz. – Geologica Saxonica, **52/53**: 23–68, Dresden.

Grunert, S., Kutschke, D. (1995): Exkursion B 3: Der Elbsandstein als Werk- und Dekorstein – wichtige Abbaugebiete, markante Bauwerke. – Sediment '95, 10. Sedimentologentreffen. Exkursionsführer: 111–118, Freiberg.

Grunert, S., Kutschke, D., Szilagyi, J. (1997): Neue Ergebnisse und Erkenntnisse zur technischen Gesteinskunde des Elbsandsteins. Freiberger Forsch.-H., **C 468**: 109–118, Freiberg.

Häntzschel, W. (1929): Pyrit-Konkretionen im Turon-Quader des Elbsandsteingebirges und ihre Bedeutung für die chemische Verwitterung. – Cbl. Mineral. etc., Abt. B, **1929**: 19–26, Stuttgart.

Hirschwald, J. (1912): Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. – Berlin (Bornträger).

Knöfel, D., Schubert, P. (1993): Mörtel und Steinergänzungsstoffe in der Denkmalpflege. – Verbundforschung zur Denkmalpflege, Handbuch: Berlin (Ernst & Sohn).

Kutschke, D., Grunert, S., Hempel, S. (1995): Zur Porosität von Sandsteinen des sächsischen Turons. – Sediment '95, 10. Sedimentologentreffen. Kurzfassung und Poster, Freiberg.

Lentschig-Sommer, S. (1961): Petrographische Untersuchung der Wabenverwitterung des Elbsandsteines. – Jb. Staatl. Mus. Mineral. Geol. Dresden, **1960**: 111–126, Dresden.

Lentschig-Sommer, S. (1961): Ein Vorkommen von Alunogen (Keramohalit) im Elbsandsteingebirge. – Jb. Staatl. Mus. Mineral. Geol. Dresden, **1960**: 109–110, Dresden.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Geologica Saxonica - Journal of Central European Geology

Jahr/Year: 2007

Band/Volume: 52-53

Autor(en)/Author(s): Grunert Siegfried

Artikel/Article: Der Elbsandstein: Vorkommen, Verwendung, Eigenschaften 3-22