



## Petrografie und ausgewählte technische Eigenschaften von Inschriftenträgern aus dem römischen Tempelbezirk auf dem Pfaffenberg bei Carnuntum

NINA GADERMAYR<sup>1</sup>, HANS KURZWEIL<sup>2</sup> & WALTER STRASSER<sup>3</sup>

43 Abbildungen, 14 Tabellen

Österreichische Karte 1:50.000  
Blatt 61 Hainburg an der Donau

*Sedimentologie*  
*Petrologie*  
*Geophysik*  
*Hydrogeologie*  
*Leithakalk*  
*Badenium*  
*Sarmatium*  
*Pannonium*

### Inhalt

Zusammenfassung	42
Abstract	42
Einleitung	42
Geologische Rahmenbedingungen	44
Der Leithakalk	45
Untersuchungskonzept	47
Einleitende Arbeiten	47
Makroskopische Beurteilung von Inschriftenträgern	47
Probenahme	49
Tätigkeiten im Gelände	49
Sedimentpetrografischer Untersuchungsteil	51
Mikroskopische Untersuchungen	51
Röntgendiffraktionsanalytik	56
Zusammengefasste Ergebnisse	58
Gesteinskundlich-technischer Untersuchungsteil	59
Spaltzugfestigkeit	59
Ultraschallanalytik	60
Kapillare Saugfähigkeit	60
Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck	62
Gesteinsdichte und Gesteinsporosität	62
Hygrische Dehnung	63
Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten	64
Zusammengefasste Ergebnisse	65
Ergänzende technische Gesteinsprüfungen	66
Architektonisches Baumaterial: Druckfestigkeit	66
Haldenfunde: Schleifabrieb nach BÖHME	66
Zusammenfassende Beurteilung der Untersuchungsergebnisse	67
Quellenverzeichnis	70
Literatur	70
Normen und Richtlinien	70

1 NINA GADERMAYR: Hammer-Purgstall-Gasse 3, 1020 Wien. nina.gadermayr@gmx.at

2 HANS KURZWEIL: Department für Geodynamik und Sedimentologie, Universität Wien, Althanstraße 14, 1090 Wien. johannes.kurzweil@univie.ac.at

3 WALTER STRASSER: TPA – Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GMBH, Polgarstraße 30, 1220 Wien. walter.strasser@tpaqi.com

## Zusammenfassung

Grundsätzliches Ziel dieser Arbeit war es, ausgewählte Fragmente von Inschriftenträgern aus dem römischen Tempelbezirk auf dem Pfaffenberg bei Carnuntum petrografisch zu charakterisieren, Aussagen zur Herkunft und Qualität der zur Herstellung von Inschriftentafeln verwendeten Gesteinsarten abzuleiten und in Verbindung mit der Erarbeitung technischer Parameter auch eine Art von Datenbank für Restauratoren zu schaffen, als Grundlage beispielsweise für Restaurierungen im Rahmen von Denkmalpflege. Nach makroskopischer Sichtung von ca. 650 Inschriftenfragmenten konnten diesen insgesamt fünf Arten von Leithakalk zugeordnet werden, die durch Korngrößenverteilung, Sortierung im Kornaufbau, Strukturen und andere Gesteinsmerkmale deutlich unterschieden sind. Detaillierte Beschreibungen dieser Gesteinstypen erfolgten anschließend auf mikroskopischem und röntgenanalytischem Wege. Aussagen zum Entstehungsbereich der Leithakalk konnten vor allem unter Einbindung mikrofazialer Untersuchungen gemacht werden, wonach diese in einem flachen Schelfmeer, im Bereich der Fazieszonen 6, 7 und 8 nach WILSON (1975) entstanden sind. Die genaue Herkunft der für die Inschriftentafeln verwendeten Gesteinsarten konnte nicht eindeutig festgelegt werden. Die festgestellten sedimentpetrografischen, aber auch technischen Kennwerte der untersuchten Materialarten sprechen dafür, dass die benötigten Gesteine aus der näheren Umgebung von Carnuntum, insbesondere aus den Hainburger Bergen und aus Wolfsthal stammen. Die Kennwerte gesteintechnischer Eigenschaften vermitteln interessante Informationen über die Qualität der genutzten Gesteinsarten und lassen vorsichtige Schlüsse auf ihre selektive Verwendung zu. Wegen mangelnder Probenverfügbarkeit an Inschriftenträgern wurden ergänzende gesteintechnische Untersuchungen auch an architektonischem Baumaterial etc. durchgeführt und Übereinstimmung mit den an den Inschriftenträgern ermittelten Eigenschaften gefunden.

Die zur Herstellung von Inschriftentafeln verwendeten Gesteinsarten sind hauptsächlich als poröse, weiche Kalksteine bzw. Kalksandsteine zu bewerten. Nachteilig auf die Beständigkeit dieser Gesteine wirken sich manche, für ihre Bearbeitung vorteilhafte Eigenschaften aus, wie geringe Festigkeit oder hohe Porosität. Ein weiterer Nutzen dieser Arbeit ist schließlich im Wissen um spezifische Eigenschaften der verwendeten Gesteine für Aufgaben im Rahmen von Denkmalpflege zu sehen. Die erarbeiteten Daten sollten für Restauratoren im Zuge anfallender Konservierungsmaßnahmen bzw. bei der Auswahl geeigneter Gesteine für Ausbesserungszwecke eine wesentliche Grundlage sein, um diesbezügliche Aufgaben erfolgreich durchzuführen.

## Petrography and selected technical characteristics of epigraphic tablets from the Roman temple precincts at the top of Pfaffenberg situated nearby Carnuntum, Lower Austria

### Abstract

The aim of this study was to investigate petrographic properties of selected fragments of epigraphic tablets from the Roman temple precincts from the top of the Pfaffenberg nearby Carnuntum, Lower Austria. In addition to the collection of data on provenance and qualities of the rocks used to produce epigraphic tablets, technical parameters of these materials also have been acquired to establish a kind of database for restorers supporting monument preservations. After examination of about 650 tablet fragments, five types of the so called "Leithakalk" have been distinguished according to their grain size distribution, sorting, structures and other rock forming characteristics. In addition, more detailed investigations have been carried using microscopic and X-ray diffraction analytical methods. Concerning the formation of "Leithakalk", the shelf sea facial zones 6, 7 and 8 have been specified according to WILSON (1975), particularly based upon microfacies analyses. The exact origin of the rocks used for these epigraphic tablets could not be determined. However, petrography and also the technical characteristics of the investigated rocks indicate a source from the nearby surrounding of Carnuntum. Furthermore, technical data can also be used to get information on the particular building use of different rock materials. Due to the lack of adequate sizes to test specimens following official instructions, supplementary investigations of architectural building material have been carried out. The results were equivalent to those obtained from studied tablets. The rock types used to produce our research objects are mainly porous and even soft limestones or calcareous sandstones. Low strength and/or high porosity are generally considered negative material properties for alteration resistance. However, they can be very helpful for manual processing of rock materials. The knowledge of the specific properties of the "Leithakalk" helps to meet requirements for monument preservations.

## Einleitung

Die antike Stadt Carnuntum verdankt ihre historische Bedeutung zweifellos ihrer strategisch günstigen Lage am Schnittpunkt von Bernstein- und Limesstraße, im Bereich der heutigen Gemeinden von Petronell-Carnuntum und Bad Deutsch-Altenburg im Osten Niederösterreichs. War der Donaulimes von großer militärischer Wichtigkeit, so verschaffte zum anderen die Lage an der Bernsteinstraße Carnuntum große wirtschaftliche Vorteile. Diese führten

letztlich zur Entwicklung Carnuntums zur antiken Hauptstadt der römischen Reichsprovinz Oberpannonien und gleichzeitig zu einem der wichtigsten Militärstützpunkte am Donaulimes (JOBST, 1996).

Zur Blütezeit im 3. Jahrhundert nach Christus lebten in der *Colonia Septima Aurelia Antoniniana Carnuntum* etwa 50.000 Einwohner. Die Stadt war zu dieser Zeit ein Zentrum römischer Lebenskultur und ein Treffpunkt der Kulturen ([www.carnuntum.co.at](http://www.carnuntum.co.at)). Tempelbezirke, Amphitheater



Abb. 1.  
Idealisierte Rekonstruktion der Provinzhauptstadt Carnuntum (3. Jahrhundert nach Christus); Kartenentwurf: Werner Jobst, Suzanna Szentes (JOBST, 1998).

und andere Kulturdenkmäler gaben der Stadt ein prächtiges Aussehen, würdig einer der bedeutendsten Metropolen des römischen Imperiums (Abb. 1). Ein bevorzugtes Areal für die Anlage solcher Kulturdenkmäler war der Pfaffenberg im Ortsgebiet von Bad Deutsch-Altenburg (Abb. 2). Er spielte in der Antike die Rolle eines Stadtberges von Carnuntum.

Auf dieser landschaftlich so charakteristischen, heute durch einen Steinbruch zerstörten Anhöhe war für die Architekten und Baumeister des pannonischen Heeres der ideale Platz, ein zentrales Provinzheiligtum zu errichten. Es wurde dem Gott *Jupiter Optimus Maximus Carnuntinus* geweiht und diente auch als offizielle Verehrungsstätte des römischen Kaiserkultes (JOBST, 1978, 1992; PISO, 2003). Errichtet wurde dieser Tempelbezirk in der 1. Hälfte des 2. Jahrhunderts nach Christus, mit einer umfangreichen Ausstattung von Altären, einem Tempel, Kultstatuen, einem Kulttheater, verschiedenen Denkmälern und anderen Heiligtümern.

Verfall und gewaltsame Zerstörung in der Spätantike führten dazu, dass von der gesamten Anlage auf dem Pfaffenberg nur mehr Bruchstücke erhalten blieben. Den unansehnlichen Gebäuderelikten des ehemaligen Tempelbezirks wurde bis um die Mitte des 20. Jahrhunderts kaum Aufmerksamkeit gewidmet, auch sind archäologische Forschungstätigkeiten deshalb ausgeblieben. Erst als durch die rasante Entwicklung des immer größer werdenden Steinbruchs von Bad Deutsch-Altenburg (Hollitzer Baustoffwerke) eine akute Gefährdung des Ruinengeländes erkannt wurde und eine Zerstörung dieses Areals unmittelbar bevorstand, wurden überstürzt Grabungsarbeiten zur Freilegung und Bergung verschiedener Fundstoffe eingeleitet (PISO, 2003).

Es ist nicht Aufgabe dieser Arbeit, den Verlauf der Rettungsarbeiten und die damit verbundene Freilegung von Baudenkmalern des größten bisher auf dem Boden Pannoniens bekannten Heiligtums für *Jupiter Optimus Maximus* zu kommentieren. Feststeht, dass im Zuge des Fortschreitens dieser Tätigkeiten ein nie vermuteter Umfang an archäologischen Kostbarkeiten entdeckt werden konnte. Diese Vielfalt an Funden und Freilegungen im Tempelbezirk führte sogleich zur Inangriffnahme umfangreicher wissenschaftlicher Forschungstätigkeit (PISO, 2003). Ein diesbezügliches Aufarbeitungsprogramm sah eine Gliederung der wissenschaftlichen Arbeiten nach bestimmten Themenschwerpunkten vor, wobei neben Architektur, Weihaltären, Skulpturen u.a. den aufgefundenen Inschriften besondere wissenschaftliche Aufmerksamkeit zuteil wurde (MAYR, 2003).

Es mag Zufall sein, aber es entspricht auch einer gerne eingehaltenen Vorgangsweise im Rahmen solcher umfangreicher und komplexer archäologischer Forschungsprogramme, nämlich die Bearbeitung und Interpretation des inschriftlichen Materials an den Beginn der Untersuchungstätigkeit zu stellen, um mit den sich einstellenden Ergebnissen allen anderen am Gesamtprojekt beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ein richtungweisendes Instrument zur Erleichterung ihrer Forschungstätigkeit zur Verfügung zu stellen (PISO, 2003). Diese ebenso anspruchsvolle wie schwierige Aufgabe, die zum Teil sehr schlecht erhaltenen Inschriftenfunde des Tempelbezirks zu bearbeiten, wurde von Ioan Piso, einer international an-



Abb. 2.  
Römischer Tempelbezirk am Pfaffenberg, kurz vor seiner Zerstörung durch den Steinbruchbetrieb; Flugaufnahme, generell Blickrichtung SE (MAYR, 2003).

erkannten Persönlichkeit auf dem Gebiet der lateinischen Epigraphik, übernommen.

Die Veröffentlichung der Ergebnisse dieser umfassenden und so ausgezeichneten Forschungsarbeit erfolgte im Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften: Jobst Werner (Hrsg.) - Werner Jobst „Das Heiligtum des *Jupiter Optimus Maximus* auf dem Pfaffenberg/Carnuntum, Band 1“ - Band 1: Ioan Piso: Die Inschriften, Reihe: Der römische Limes in Österreich, Band 41, 2003.

Die aus den Arbeiten von PISO am Inschriftenmaterial gewonnenen Erkenntnisse förderten das wissenschaftliche Interesse an diesem Forschungsgebiet (Abb. 3) und führten in der Folge dazu, auch das mit dieser Thematik verbundene wissenschaftliche Umfeld in Forschungsaktivitäten einzubinden. Diese betrafen u.a. materialkundliche Untersuchungen an den Inschriftenträgern im Tempelbezirk.

In seinen Ausführungen hat PISO (2003) zwar generell auf die als Inschriftenträger genutzten Gesteinsarten verwiesen. Weiterführende materialspezifische Aspekte nach der Art und Herkunft der Gesteine blieben dabei aber unberührt, weil mit seinen Forschungsarbeiten interdisziplinäre Betrachtungsweisen, insbesondere im Hinblick auf die Einbindung der Natur- bzw. Erdwissenschaften, nicht verknüpft waren. Dieser, aus naturwissenschaftlicher Sicht etwas einseitigen Betrachtung der Inschriftenträger, sollte mit der Durchführung nach nachstehend beschriebenen Untersuchungen begegnet werden.

Anknüpfend an diverse Vorarbeiten wurde dieses Projekt (NA 42/F-2000 „Petrologie der Inschriftentafeln auf dem Pfaffenberg“) vom Amt der Niederösterreichischen Landesregierung (Baudirektion, Abteilung Allgemeiner Baudienst-Geologischer Dienst) finanziell unterstützt. Ziel und Zweck dieser Arbeit war es, Aussagen zur Herkunft und Qualität der zur Herstellung von Inschriftentafeln verwendeten Gesteinsarten zu erstellen und, in Verbindung mit der Erarbeitung technischer Parameter, auch eine Grundlage für Restauratoren zu schaffen, beispielsweise für Restaurierungen im Rahmen von Denkmalpflege.

Die Untersuchungen erfolgten an vom Museum Carnuntinum zur Verfügung gestellten Forschungsobjekten. Sie wurden im Wesentlichen an dem zu diesem Zeitpunkt benannten Institut für Geologische Wissenschaften an der

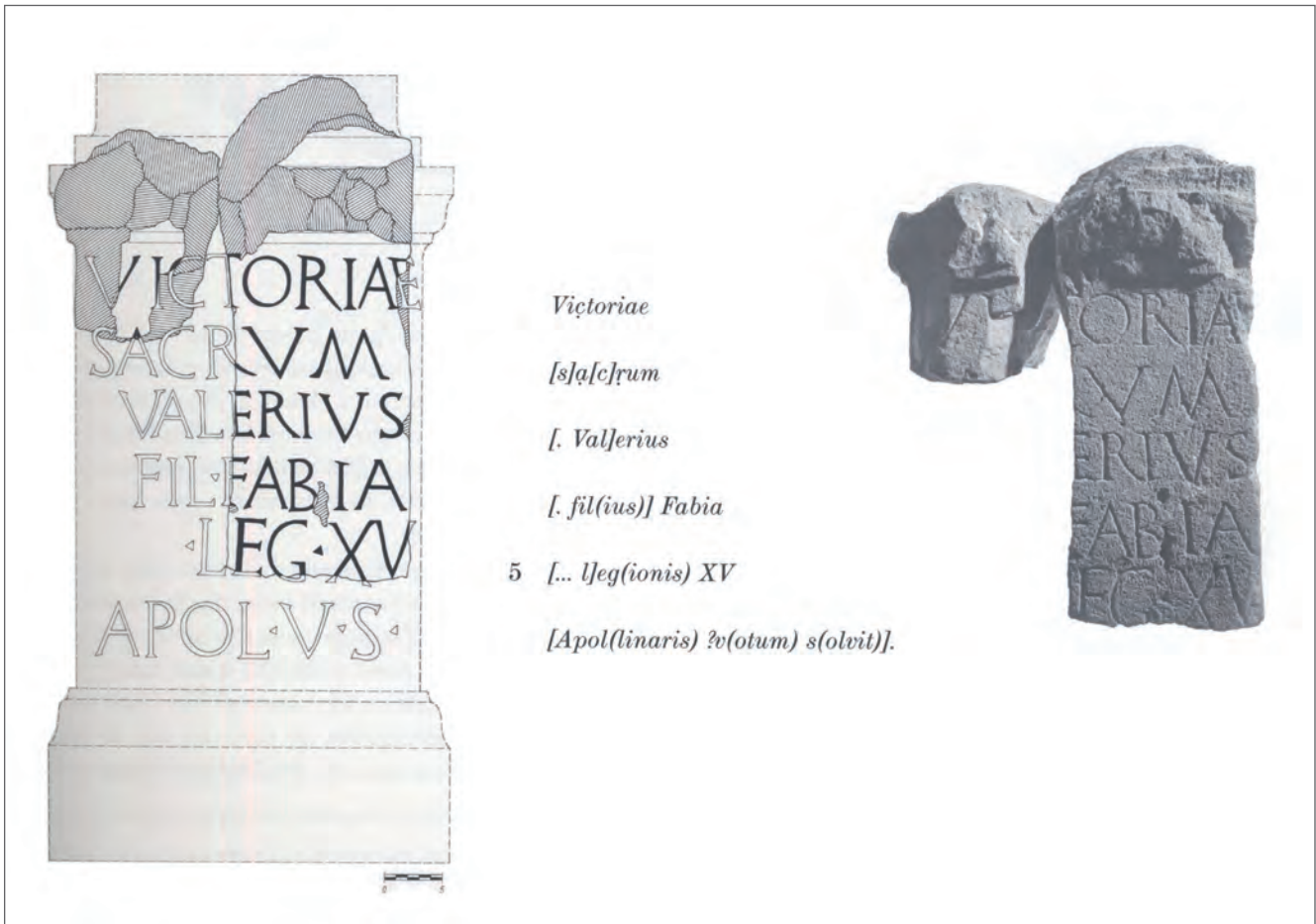


Abb. 3. Inschriftenbeispiel aus PISO (2003): Altar oder Basis aus Kalksandstein, Zwei Fragmente aus dem Amphitheater/Tribüne (rechts) mit Rekonstruktionsversuch (links).

Universität Wien durchgeführt. Zur Bestimmung der nachgenannten technischen Parameter erwies sich eine Kooperation mit der TPA – Gesellschaft für Qualitätssicherung und Innovation GMBH, als besonders wertvoll und erfolgreich.

### Geologische Rahmenbedingungen

Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, befand sich der durch den Steinbruchbetrieb zerstörte Pfaffenberg aus geologischer Sicht im Bereich der Nordwest-Abdachung der Hainburger Berge, die, am Ostrand des Wiener Beckens gelegen, die morphologische Fortsetzung des Leithagebirges darstellen.

Geologisch gesehen bestehen die Hainburger Berge aus einem mächtigen Kern aus kristallinen Schiefen mit kleineren Intrusivkörpern aus Granit bis Granodiorit. Dieser Komplex wird von permomesozoischen Gesteinen umhüllt und in weiterer Folge von einer mitteltriadischen Karbonatgesteinsserie überlagert (Abb. 4). Über den Kalken und Dolomiten dieser Abfolge liegt transgressiv Leithakalk, der bereits im Zeitalter der Römer in groß angelegten Steinbrüchen zwischen Pfaffenberg (331 m), Hundsheimer Berg (480 m) und dem sogenannten Hexenberg, im Bereich des Südhanges des Hundsheimer Berges, abgebaut wurde. Über dem Leithakalk sind vor Ort schließlich lithologisch

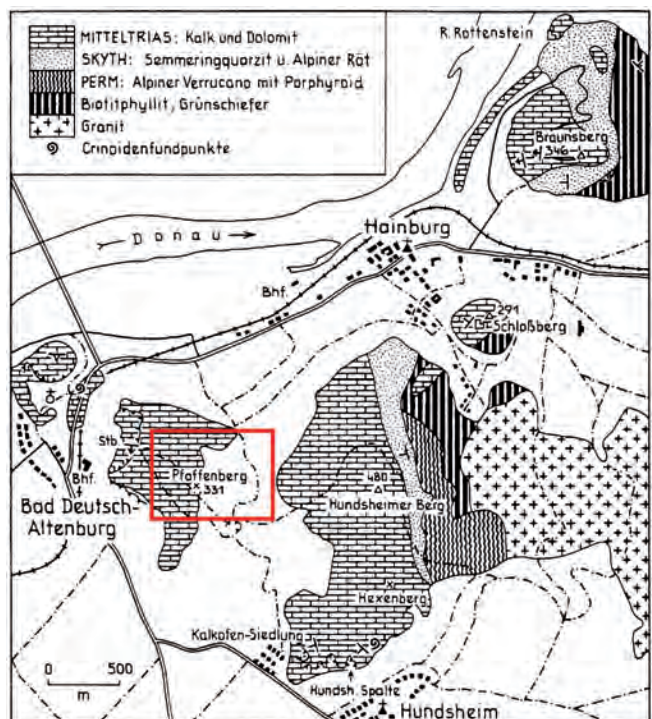


Abb. 4. Geologische Skizze der Hainburger Berge (TOLLMANN, 1977: Abb. 28, nach SPENDLINGWIMMER).

unterschiedlich zusammengesetzte sarmatische und panonische Ablagerungen verbreitet (WESSELY, 1958, 1961). Pleistozäne Schotter und Löss bilden den Abschluss dieses generellen Sedimentationsprofils.

Eine etwas weiter führende Gliederung der genannten Einheiten nach lithologischen Aspekten sieht nach den vorhandenen Unterlagen im kristallinen Kern der Hainburger Berge grundsätzlich durch Metamorphose bedingte Unterschiede in den hier verbreiteten Gesteinsarten (TOLLMANN, 1977; SCHNABEL, 2002).

Der höher metamorphe Anteil dieses kristallinen Kerngebietes besteht überwiegend aus Paragneisen (Oligoklas führende Zweiglimmergneise), Glimmerschiefern (Granat und Staurolith führend) und quarzitischen Glimmerschiefern, während in einer schwächer metamorph ausgeprägten Serie die zugehörigen Gesteinsarten aus Biotitphylliten, sandigen Schiefern, Grünschiefern sowie aus Kalksilikathornfelsen zusammengesetzt sind. Die als Intrusivkörper innerhalb der Schiefer beschriebenen sauren Intrusivgesteine liegen in den Wolfsthaler Bergen und am Teichberg bei Hainburg in Form von pegmatitisch bzw. aplitisch durchzogenen, fein- bis mittelkörnigen Zweiglimmergraniten bis Granodioriten vor. Ihr geologisches Alter ist als variszisch ausgewiesen. Die Lithologie der über dieser Kernformation entwickelten permomesozoischen Hülle ist deutlich umfangreicher variiert (Abb. 4). Sie umfasst insbesondere im Gebiet um den Braunsberg (346 m) und im Süden von Hainburg „Alpinen Verrucano“ in Form von Phengitschiefern und Serizitphylliten mit gelegentlichen Einschaltungen von Porphyroid. Mächtig entwickelt sind hier vor allem Ablagerungen aus der Untertrias, die als gut geschichteter Semmeringquarzit, mit rötlicher, hellvioletter bis hellgrüner Farbe, häufig mit Einschaltungen von Quarzkonglomeratlagen und Tonschiefern des „Alpinen Röt“ verbunden sind.

Über diesen tieferen Hüllgesteinen befindet sich der bekannte, mächtige, mitteltriadische Karbonatgesteinskomplex, dessen dunkelgraue, geschichtete Dolomite sowie die hellen dolomitischen Kalke mit untergeordneten Brekzien den Rohstoff für den Steinbruchbetrieb in Bad Deutsch-Altenburg darstellen.

Im Hangenden dieser Basis aus kristallinem Kern und den permomesozoischen Hüllgesteinen folgen dann neogene Ablagerungen, die vor Ort am östlichen Rande des Wiener Beckens ebenfalls durch eine beträchtliche Bandbreite an verschiedenen Sedimentgesteinsarten charakterisiert sind. Die stratigrafische Gliederung des Neogen im Bereich des Wiener Beckens ist, unter besonderer Berücksichtigung des gegenständlichen Untersuchungsgebietes, in Tabelle 1 dargestellt.

Das Wiener Becken als eigenständiger Sedimentationsraum erreichte im mittleren Badenium im Zuge einer kräftigen Dehnungsphase seine heute vorliegende geometrische Ausbildung. Durch die Aktivität von Bruchsystemen, in Verbindung mit einer sich einstellenden, spezifischen Beckenmorphologie, kam es zur Entwicklung faziell deutlich gegliederter Sedimentarten, die vor allem längs der Randbereiche des Beckens durch größere Heterogenität in ihrer Zusammensetzung auffallen. Während im zentralen Beckenabschnitt überwiegend tonig-mergelige Sedimente auf ruhige, im Wesentlichen gleichbleibende Sedimentationsvorgänge verweisen, sind die Sedimentabfolgen an

den Randlagen des Beckens durch wechselnde Ablagerungsverhältnisse vergleichsweise lokal geprägt und durch überwiegend grobkörnigere Ablagerungen, wie Konglomeraten, Sandsteinen, Sanden und auch dem Leithakalk gekennzeichnet. Die lithologischen Entwicklungen der Beckenrandlagen sind auch für das gegenständliche Untersuchungsgebiet zutreffend und für Carnuntum deswegen von großer Bedeutung, weil mit der Entstehung des Leithakalkes vor Ort der Baustoff seinen Ursprung hat, der von den Römern später zur Errichtung ihrer Provinzhauptstadt mit ihren Baudenkmalern bevorzugt wurde. In weiterer Folge änderten sich die Sedimentationsbedingungen im Wiener Becken wenig. Zwar setzten mit einer Aussüßung des Meeres allmählich Brackwasserverhältnisse ein, die Fazies des Sarmatiums ist lithologisch aber der des Badenium ähnlich und durch entsprechende Gesteinsformationen auch im Gebiet um Carnuntum belegt. Später, im Pannonium, sind Klimaschwankungen, in Verbindung mit Änderungen von Verdunstungsraten und Zuflussmengen aus dem Hinterland die Ursache für zunehmend wechselhafte Sedimentationsbedingungen mit vor Ort überwiegend feinkörnig, schluffig-tonigen Sedimenten. Diese und nachfolgend auf eiszeitliche Einflussnahmen zurückgehende fluviatile Ablagerungen haben für die gegenständliche Problematik aber keinerlei Bedeutung

### Der Leithakalk

Bei den zur Herstellung von Inschriftentafeln verwendeten Gesteinen handelt es sich bis auf einige aus Marmor bestehende Inschriftenfragmente, die nicht Gegenstand dieser Untersuchungen waren, um Leithakalke, welche im Badenium und Sarmatium des Wiener und auch des Eisenstädter Beckens anzutreffen sind und petrografisch generell als helle, poröse Kalksteine und Kalksandsteine beschrieben werden (SCHNABEL, 2002).

Die Leithakalke können lithologisch grundsätzlich in „gewachsene“ und „detritär“ entstandene Kalkgesteinsarten gegliedert werden (JANOSCHEK, 1951).

„Gewachsene“ Leithakalke sind nach dieser Auffassung ursprüngliche Riffbildner, die im Wesentlichen aus Skelettfragmenten kalkabscheidender Rotalgen zusammengesetzt sind und oft noch Kolonie bildende Organismen in Lebendstellung erkennen lassen. Neben dieser Art von Abkömmlingen aus Biohermen sind längs der Beckenrandlagen häufig auch Leithakalke entwickelt, die aus einer Anhäufung umkrusteter Fremdkörper und fragmentierter Korallenäste bestehen und mit Schlamm, Sand und sonstigen Fossilrümmern verkittet sind. Übergänge zwischen beiden Gesteinsarten sind weit verbreitet, auch zu konglomeratischen Einschaltungen, Sandsteinen oder Mergeln, dann meist nur mit untergeordneten Anteilen von Korallenschutt. „Detritäre“ Leithakalke bestehen aus stärker aufgearbeitetem Korallengrus, der gemeinsam mit Sand, Schlamm und Hartteilen anderer Organismen zu einem kompakten bis mürben Gestein verfestigt ist. Sie sind häufiger anzutreffen als die „gewachsenen“ Leithakalke und oft in Übergängen zu diesen. Zum Entwicklungszeitraum beider Gesteinsarten ist schließlich anzuführen, dass „gewachsener“ Leithakalk nur bis zum Ende des Badenium gebildet wurde, während „detritäre“ Leithakalke auch im Sarmatium und, zurücktretend, selbst im Pannonium verbreitet sind.

EPOCHEN	STUFE			SERIENGLIEDERUNG	FOSSIL-FUNDPUNKTE		
	EUROPA	ZENTRALE PARATETHYS	Mio. J.				
PLEIST.	etc. CALABRIAN			Donauterrassenschotter, Löß	Spaltenfüllung von Hundsheim etc.		
PLIOZ.	ASTI	ROMAN	1,8	Fluviatile Schotter	Vertebr. fauna v. Alt-Lichtenwart		
	ZANCLE	DAC	3,7		Vertebr. v. Deutsch-Altenburg		
O. MIOZÄN	MESSIN	PONT	5,4	Trockenlegung Zone G: Gelbe Serie, Rohrbacher Kgl. Süßwasserkalk, Blaue Serie Zone F: Lignitische Serie (Cong. neumayri)	Echkogel b. Mödling, Velm, Stammersdorf Zillingdorf, Neufeld, Götzendorf		
	6,8						
	TORTON	PANNON	8,7	Zone E: Subglobosa-Zone (Cong. subg.) Zone D: Partsch-Zone (Cong. partsch) Zone C: Hoernes-Zone (Cong. hoernes) Zone B: Impressa-Zone (Mel. impressa) Zone A: Zwischensand (Replidacna-Arten)	Brunn-Vösendorf, Leopoldsdorf Inzersdorf; Meidling Leobersdorf; Gaiselberg b. Zist. Hautzendorf Nur in Bohrungen		
	11,8		11,6				
M. MIOZÄN	SERAVALL	SARMAT	O.	Verarmungszone Macra-Schichten Obere Ervilienschi.	Nonion granosum-Z.	Nur in Bohrungen Ulrichskirchen Nexing, Atzgersdorf	
			M.	Untere Ervilienschi.	Eph. hauerinum-Z.		Wien-Hernals
			U.	Mohrensternienschi.	Eph. reginum-Z.		Wien-Türkenschanze
	14,0	BADEN	O.	Rotalienzone Bulminenzzone Sandschalerzone Obere Lagenidenzone Untere Lagenidenzone	1500 m marine Mergel, Sande, Kongl., Badener Tegel	Leithakalke	Haupts. in Bohrungen, Lindabrunn Pötzeinsdorf, Neudorf/March Gainfarn, Grinzing, Enzesfeld Baden, Vöslau, Sooß Frättingsdorf, Neudorf-Spalte?
M.							
15,8							
LANGHIAN		U.	16,8				
U. MIOZÄN	BURDIGAL	KARPAT	1000-1500 m	N: Laaer Serie (1000 m) mariner Schlier: Uvig. Bononiensis	S: Limmisch: Aderklaaer Kgl. (400 m) Aderklaaer Schi. (800 m) Gänsernd. Schi. (300 m)	Niederkreuzstätten und Korneuburger Becken	
		OTTNANG	17,5	N: Marin: Luschitzer Serie: Fossilarmes Schlier Cibicides-Elphidium- Schlier	S: brachyhalin: 600 m Oncophora-Schi. (= Bockfließer Schi.)		
	EGGENBURG		19	Bathysiphon- Cyclam-Schl.	Orther Kongl.	Nur aus Bohrungen bekannt	
			22,3	Schlier-Basisschutt Tonmergel von Großkrut			

Tab. 1. Stratigraphische Abfolge des Wiener Beckens nach TOLLMANN (Originaltext 1985: 494). Der eingefärbte Bereich kennzeichnet die vor Ort gegebene stratigraphische Entwicklung.

Zur Frage der Einbindung bestimmter Leithakalkvorkommen in die baulichen Tätigkeiten von Carnuntum liegen bisher keine lithologisch bzw. technologisch begründeten Erkenntnisse vor. Beweisführungen dieser Art sind im Regelfall auch praktisch kaum möglich, da spezifische, nur auf bestimmte Bereiche zutreffende Materialeigenschaften an den Leithakalken kaum abzuschließen sind. Diese Problematik konnte auch im Rahmen dieser Untersuchungen nicht zufriedenstellend geklärt werden, auch wenn durch die eingeschlagene Untersuchungsmethodik die Herkunft der für die Inschriftentafeln am Pfaffenberg verwendeten Leithakalke eingegrenzt werden konnte.

KIESLINGER (1949), der sich mit dem Baustein „Leithakalk“ in Wien als einer der ersten auseinandersetzt, beschreibt zehn verschiedene Vorkommen von Leithakalk in Niederösterreich und dem Burgenland, deren Gesteine zum Bau des Stephansdoms in Wien verwendet wurden. Aus materialkundlicher Sicht kommen diese Gesteine grundsätzlich auch für die Herstellung von Inschriftentafeln auf dem Pfaffenberg in Betracht, da zwischen ihnen und den Vorkommen um den Tempelbezirk keine wesentlichen Materialunterschiede bestehen. Mitentscheidende Ausschließungsgründe für derartige Überlegungen – und das gilt wohl für alle von Carnuntum weiter entfernten Leithakalk-

vorkommen – sind dann sicherlich transporttechnische Beweggründe, die bei der Beurteilung nach dem Woher von Bau- und Dekorsteinen für das Heiligtum des Jupiter Optimus Maximus auf dem Pfaffenberg zu berücksichtigen sind.

## Untersuchungskonzept

Nach den Vorstellungen zum Projektprogramm waren folgende Arbeitsstufen vorgesehen:

Einleitende Arbeiten mit den Schwerpunkten:

- Sichtung und makroskopische Beurteilung von Inschriftenträgern; Fotodokumentation und Scannen charakteristischer Materialflächen zur Archivierung auf Datenträgern.
- Probenahmen von Inschriftenträgern für sedimentpetrografische und technische Gesteinsanalysen.
- Geländebegehungen, einschließlich von Beprobungen und Fotodokumentationen im Bereich Carnuntum als Grundlage für herkunftsspezifische Zuordnungen der zur Herstellung von Inschriftentafeln verwendeten Gesteinsarten.

Sedimentpetrografischer Untersuchungsteil betreffend:

- Mikroskopische Untersuchungen
- Röntgendiffraktionsanalytik
- Zusammengefasste Ergebnisse

Gesteinskundlich-technischer Untersuchungsteil mit den Schwerpunkten:

- Spaltzugfestigkeit
- Ultraschallanalytik
- Kapillare Saugfähigkeit
- Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck
- Gesteinsdichte und Gesteinsporosität
- Hygrische Dehnung
- Bestimmung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten
- Zusammengefasste Ergebnisse

Ergänzende technische Gesteinsprüfungen betreffend:

- Architektonisches Baumaterial: Druckfestigkeit
- Haldenfunde: Schleifabrieb nach BÖHME

Ursprünglich war geplant, das Untersuchungsprogramm wesentlich umfangreicher zu gestalten und insbesondere Oberflächenprüfungen sowie Untersuchungen zur Frostbeständigkeit zu berücksichtigen. Im Zuge von Material-sichtungen und Beurteilungen zur Probenahme stellte sich jedoch sehr bald heraus, dass die für die Untersuchungen zur Verfügung gestellten Inschriftenfragmente nur in einzelnen Fällen den Erfordernissen bezüglich Probengröße entsprachen und damit ein wesentlicher Anteil der vorgesehenen technologischen Materialprüfungen (mechanische

Oberflächenprüfung, Bohrfestigkeitsprofil, Pendelversuch, Sandfleckmethode, optische Oberflächenprüfung, Wasserabgabe bei verschiedenen Temperaturen, Frostbeständigkeitsprüfung) entfallen musste. Versuchsweise wurde der Schleifabrieb nach BÖHME und die Druckfestigkeit an vergleichbarem, architektonischem Baumaterial vom Pfaffenberg ermittelt. Weiters musste im Zuge sedimentpetrografischer Arbeiten auf Schwermineraluntersuchungen verzichtet werden, da die dafür benötigten Probenmengen nicht annähernd zur Verfügung standen.

## Einleitende Arbeiten

### Makroskopische Beurteilung von Inschriftenträgern

Die makroskopische Sichtung von insgesamt ca. 650 Inschriftenfragmenten (Abb. 5, 6) erfolgte nach Farbe, Korngrößeninhalt, Sortierung im Kornaufbau, Strukturen und anderen Gesteinsmerkmalen, wie beispielsweise dem Fossilinhalt und auch dem Erhaltungszustand der Inschriftenträger. Damit konnte ein erster Überblick über die verwendeten Gesteinstypen und die zur Probenahme geeigneten Fragmente gewonnen werden.



Abb. 5. Inschriftendepot in Bad Deutsch-Altenburg mit den in Kisten gelagerten Inschriftenfragmenten.



Abb. 6. Zusammenstellung ausgewählter Inschriftenfragmente.

Zum Erhaltungszustand der Inschriftenträger ist generell anzumerken (Abb. 7), dass aufgrund von Vandalismus die Stücke zum Großteil stark zerbrochen sind (DAVIES, 1980) und zusätzlich einen variierenden Verwitterungsgrad aufweisen, der auf Dauer und Art von Lagerung im Boden zurückzuführen ist.

Bei dieser Sichtung konnten fünf Leithakalktypen den Inschriftenträgern zugeordnet werden:

(a) Kalksandstein, fein- bis mittelkörnig, gelblich (Abb. 7):

Bei diesem Gestein handelt es sich um einen Kalksandstein mit sehr guter Partikelsortierung und einem hohen Porositätsgrad. Es besteht aus karbonatischen Materialanteilen und terrigenen Beimengungen, die überwiegend aus Quarz, untergeordnetem Feldspat und hellem Glimmer zusammengesetzt sind. Auffällig sind bei vielen Fragmenten deutliche „Stege“, aufgrund eines sedimentären Schichtgefüges, sowie die Ausbildung häufiger cm-großer „Rostflecken“. Das Gefüge dieses Kalksteintyps entspricht dem Endprodukt intensiver Sedimentaufbereitung sowie beträchtlichem Partikeltransport in seinem Bildungsmilieu. Nach dem genetischen Zuordnungsschema von WILSON (1975) entspricht diese Art von Leithakalk einem Foraminiferen reichen Grainstone der Fazieszonen 7 und 8, der im Bereich von Gezeitenbarren oder Lagunenkanälen gebildet wurde.

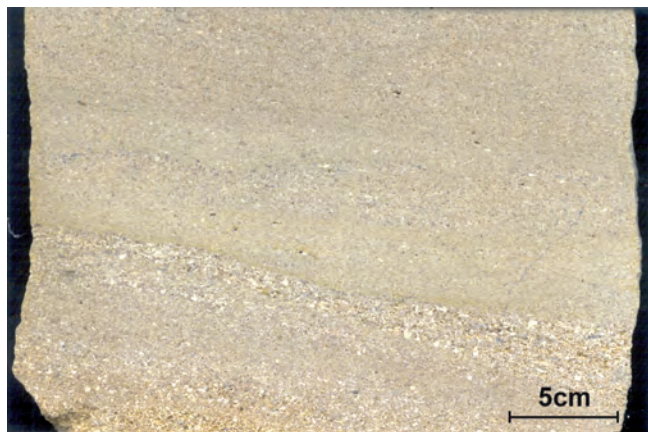


Abb. 7. Kalksandstein, fein- bis mittelkörnig, gelblich; weitere Details im Rahmen von Dünnschliffbeobachtung ausgewiesen.

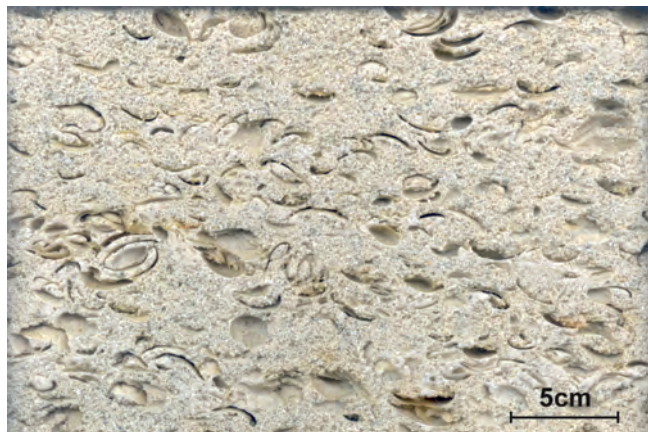


Abb. 8. Fossilkalk, dicht; weitere Details im Rahmen von Dünnschliffbeobachtung ausgewiesen.

(b) Fossilkalk, dicht (Abb. 8):

Dieser Gesteinstyp beschreibt gegenüber dem erstgenannten einen sehr kompakten, dichten und meist hellgrauen Leithakalk zu dessen sichtbarem Mineralbestand Kalzit (Fossilreste) und Quarz vorrangig zählen. Nach WILSON (1975) wurde dieser Kalkstein den Fazieszonen 2 und 7 zugeordnet und entspricht damit dem Bildungsmilieu im Bereich von Schelflagunen mit offener Wasserzirkulation und Ruhigwasserbereichen unterhalb der normalen Wellenbasis.

(c) Kalkbrekzie/Kalkrudit, feinkörnig (Abb. 9):

Bei diesem korngestützten Material handelt es sich um einen groben, schlecht sortierten Kalkrudit mit großer Variabilität hinsichtlich Gefüge, Farbe und Zusammensetzung. Unterschiede im Einregelungsgrad der Komponenten führen zu annähernd schichtigen, meist aber massig ausgebildeten Brekzien, auch sind nach dem Rundungsgrad der Gemengteile häufig Übergänge zu konglomeratischer Gesteinsausbildung gegeben. Das Bildungsmilieu dieses bioklastischen Grainstones ist im Hangbereich zum tieferen Wasser bzw. zum Schelfrand hin anzusetzen.



Abb. 9. Kalkbrekzie/Kalkrudit, feinkörnig; weitere Details im Rahmen von Dünnschliffbeobachtung ausgewiesen.

(d) Lithothamnienkalk (Abb. 10):

Kennzeichnend für diesen Kalkarenit sind gut erhaltene, weiße, bis dm-große, rundliche Rotalgennester, die in einer ansonsten fein- bis mittelkörnigen, grauen Grundmasse regellos verteilt sind. Bei den Bestandteilen dieser Grundmasse handelt es sich um feinerriehene Biogenpartikel, gut sortiert und hochporös. Vereinzelt treten auch hier „Rostflecken“ auf. Nach dem genetischen Zuordnungsschema von WILSON (1975) ist es wiederum ein Foraminiferen reicher Grainstone der Fazieszonen 7 und 8, der im Bereich von Gezeitenbarren und Lagunenkanälen entstanden ist.

(e) Kalkoolith (Abb. 11):

Bei diesem Leithakalk handelt es sich um einen sehr gut sortierten, weitgehend aus Ooiden zusammengesetzten Gesteinstyp, der als Inschriftenträger auf dem Pfaffenberg nur in einem einzigen Fall diagnostiziert werden konnte. Ooide sind generell rundliche Körner mit einem Durchmesser von < 2 mm, die aus einer oder mehreren konzentrisch um einen Kern angeordneten Lamellen aufgebaut sind. Der Kern besteht oft aus einem karbonatischen Partikel oder einem Quarzkorn. Ein aus Ooiden aufgebautes Sediment-



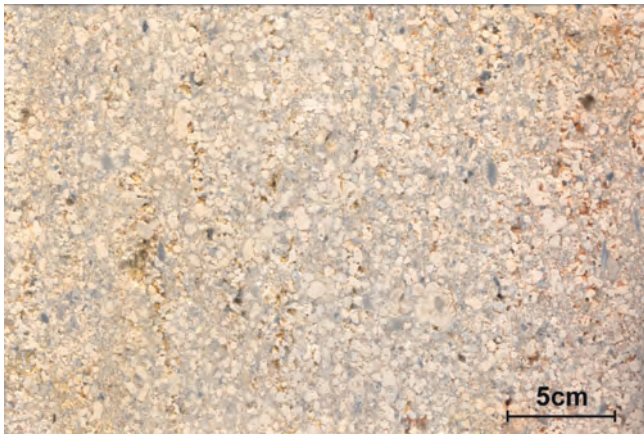


Abb. 10. Lithothamnienkalk; weitere Details im Rahmen von Dünnschliffbeobachtung ausgewiesen.

gestein wird als Oolith bezeichnet (TUCKER, 1985). Oolithische Grainstones entstehen vorzugsweise in der bewegten Wasserzone von Gezeitenbarren („Ooid-Untiefen“) am äußeren Rand von Karbonatplattformen oder auch im lagunären Milieu. Nach WILSON (1975) handelt es sich um die Fazieszone 6, die diesen Kriterien entspricht.

Zwischen diesen deutlich differenzierten Leithakalktypen sind Übergangsentwicklungen häufig zu beobachten, wie auch manche Inschriftenträger erkennen lassen. Proben

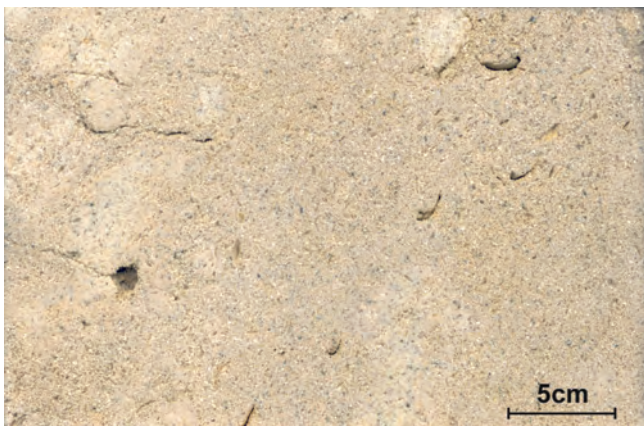


Abb. 11. Kalkoolith; weitere Details im Rahmen von Dünnschliffbeobachtung ausgewiesen.

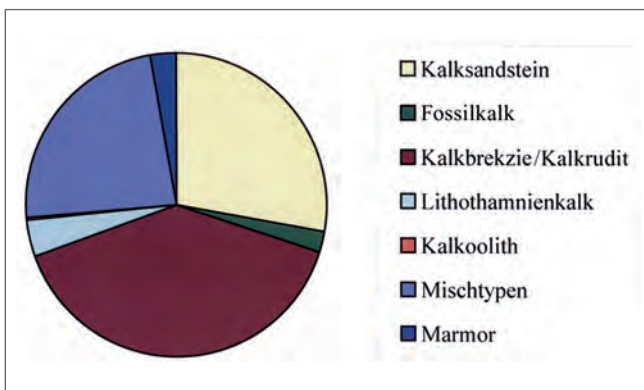


Abb. 12. Grafik zu den makroskopisch als Inschriftenträger festgestellten Gesteinsarten.

dieser Art wurden dann als „Mischtyp“ eingestuft. Wie bereits erwähnt, liegt bei einigen Inschriftenfragmenten weißer Marmor als Trägermaterial vor. Diese Fragmente wurden im Rahmen dieses Untersuchungsprogramms nicht weiter begutachtet, da Marmorvorkommen in diesem Teil Pannoniens nicht vorhanden sind und es sich demnach um importiertes Bau- oder Dekormaterial handelt.

Eine mengenmäßige Erfassung der makroskopisch unterschiedenen Gesteinsarten ist aus Abbildung 12 bzw. aus Tabelle 2 ersichtlich.

Gesteinstyp	Anzahl in Stk.	%
Kalksandstein	182	28
Fossilkalk	15	2
Kalkbrekzie/Kalkrudit	259	39
Lithothamnienkalk	25	4
Kalkoolith	1	0,15
Mischtypen	155	24
Marmor	19	3
<b>Summe</b>	<b>656</b>	<b>100</b>

Tab. 2. Prozentuelle Anteile der begutachteten Inschriftenfragmente.

### Probenahme

Im Anschluss an die makroskopische Beurteilung von Inschriftenträgern erfolgten Probenahmen zur Durchführung der geplanten sedimentpetrografischen und technischen Gesteinsanalysen.

Im Einvernehmen mit dem Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Abteilung für Kultur und Wissenschaft, Herrn Univ. Prof. Dr. Werner Jobst, und dem Restaurator und Bildhauermeister Erich Pummer, Rossatz, wurden Inschriftenfragmente ausgewählt, welche die festgestellten Gesteinstypen repräsentieren und für eine Beprobung geeignet waren. Die Durchführung der Probenahme oblag dem Restaurator. Die daraufhin für obiges Untersuchungsprogramm zur Verfügung gestellten Proben entsprachen dann Bohrkernen mit einem Querschnitt von 2,5 cm und einer Länge zwischen 1,8 und maximal 9,7 cm (Abb. 13). Auf die Problematik zur Vorgangsweise dieser Art von Probenahme für den angestrebten Untersuchungsumfang wurde bereits verwiesen. Es wird klar, dass nach dieser Vorgabe, selbst bei geringstmöglichem Probeinsatz, zahlreiche der vorgesehenen Untersuchungen nicht vorschriftsgemäß durchgeführt werden konnten.

### Tätigkeiten im Gelände

Geländebegehungen im Raum von Carnuntum mit angeschlossenen Beprobungen waren die Grundlage für herkunftsspezifische Zuordnungen der zur Herstellung von Inschriftentafeln verwendeten Gesteinsarten. Bezüglich der Tempelanlage auf dem Pfaffenberg wurde davon ausgegangen, dass unmittelbar in der Nähe liegende Gesteinsvorkommen, nämlich am Pfaffenberg selbst, als Materialquelle verwendet wurden.

Römische Steinbrüche sind allerdings nicht nur aus dem Raum von Bad Deutsch-Altenburg bekannt, sondern nach



Abb. 13.  
Beispiel für die Beprobung eines Inschriftenfragmentes: Der entnommene Probekörper ist rechts aufgelegt. Das Inschriftenfragment wurde vom Restaurator nach erfolgter Probenahme dem ursprünglichen Zustand wieder angeglichen (links).

ROHATSCH (1996, 1997) auch in den Leithakalkvorkommen bei Au/Leithagebirge, Winden/Neusiedlersee, Wolfsthal und Edelsthal sowie im südlichen Wiener Becken und um Wien (Abb. 14) nachgewiesen. Da man, wie bereits erwähnt, davon ausgehen musste, dass diese Vorkommen durchwegs Leithakalke mit im Gesamtgebiet weitgehend gleichwertig ausgebildeten lithofaziellen Eigenschaften erschließen, war es im Hinblick auf abgesicherte Aussagen zur Herkunft der als Inschriftenträger auf dem Pfaffenberg verwendeten Gesteinsarten grundsätzlich sehr zu bezweifeln, konkrete Zusammenhänge zwischen einzelnen Leithakalkvorkommen und den Inschriftenträgern herzustellen.

Aus dieser Sicht konzentrierte sich die Geländetätigkeit ausschließlich auf die nächste Umgebung von Carnuntum, wobei die in Abbildung 14 ausgewiesenen Vorkommen eingehend geprüft und beprobt wurden. Es handelt sich um folgende Gebiete:

- Bereich um den Pfaffenberg und den Hundsheimer Berg: Römersteinbrüche 1 und 2.
- Steinbruch Wolfsthal: Oolithvorkommen.
- Geländeabfall zur Donau zwischen Bad Deutsch-Altenburg und Petronell.

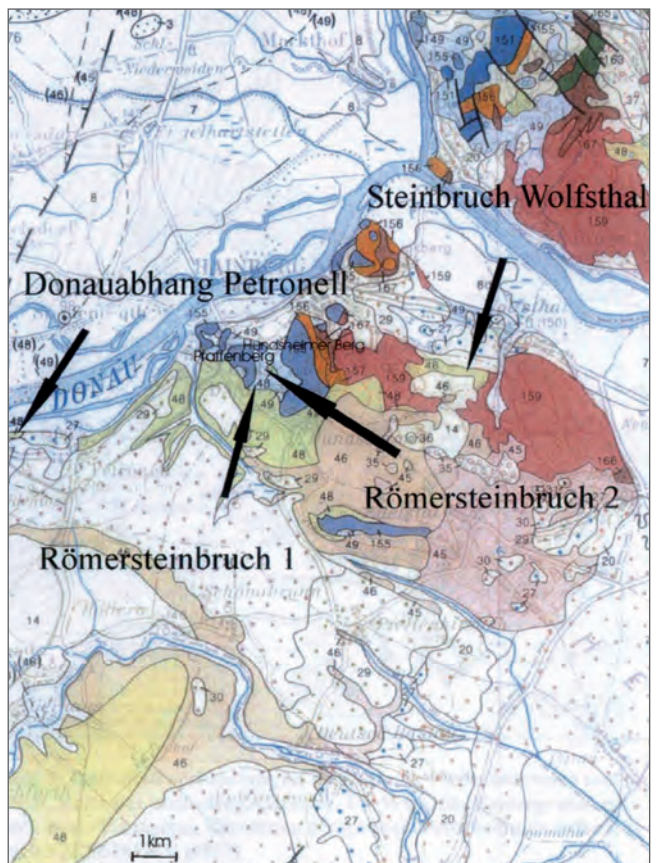


Abb. 14.  
Lage der untersuchten Leithakalkvorkommen (Pfeile) in einem vergrößerten Ausschnitt der geologischen Karte von Wien und Umgebung 1:200.000 von FUCHS & GRILL (1984). Index: 48 – Tonmergel, Sand, Schotter – Sarmatium, 49 – Tonmergel, Sand, Schotter – mittleres- bis unteres Badenum.

## Sedimentpetrografischer Untersuchungsteil

### Mikroskopische Untersuchungen

Von Proben der makroskopisch unterschiedenen Leithakalktypen wurden in einem ersten Arbeitsabschnitt Präparate zur mikroskopischen Beschreibung der Gesteine angefertigt. Diese betrafen zum einen Dünnschliffpräparate für polarisationsmikroskopische Untersuchungen (Schliffdicke < 20 Mikrometer) zur Feststellung des mineralogischen Stoffbestandes und dem Korngefüge der Gesteine, zum anderen paläontologische Dickschliffe (Schliffdicke 30–70 Mikrometer) zur Identifizierung mikrofazialer Strukturmerkmale. In beiden Fällen wurden besondere Präparationstechniken eingehalten. Die meist Hohlräum-reichen und stark porösen Materialproben wurden zunächst zur Festigung ihres Gefüges mit Kunstharz imprägniert, wobei die blaue Farbe des Harzes spätere Beobachtungen zur Entwicklung des Porenraumes ganz wesentlich erleichterte. Eine zusätzliche karbonatspezifische Einfärbung der Gesteinsdünnschliffe erfolgte nach Anleitung von EVAMY & SHERMAN (1962), abgewandelt nach DICKSON (1965), und diente zur genaueren Unterscheidung von Kalzit und Dolomit, insbesondere auch zur Unterscheidung  $Fe^{2+}$  freier und  $Fe^{2+}$  führender Karbonate.

Die nachfolgenden Dünnschliffbeschreibungen charakterisieren das mikroskopische Erscheinungsbild der makro-

skopisch zugeordneten fünf Leithakalktypen der Inschriftenträger:

(a) Kalksandstein, fein- bis mittelkörnig, gelblich (Abb. 15, 16):

Wie bereits erwähnt und durch Dünnschliffbeobachtung hier bestätigt, bestehen die Kalksandsteine der Inschrift-

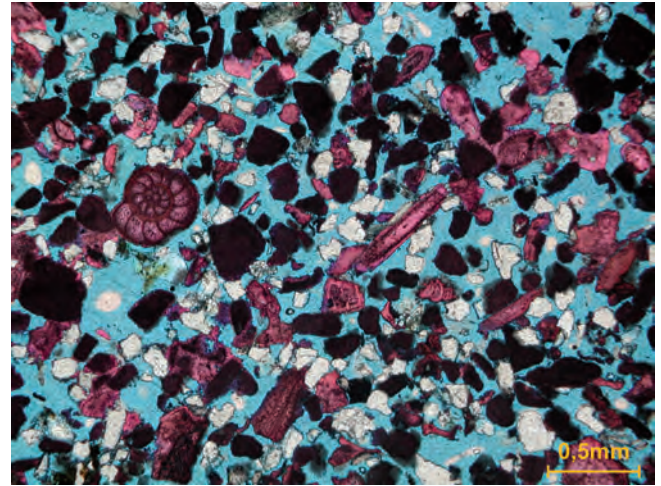


Abb. 16.  
Inschriftenfragment 1a/313 – Dünnschliffdokumentation: kalzitische Skelettanteile – rötlich/bräunliche Farbtöne, silikatische Anteile – hell, Porenraum – blau.



Abb. 15.  
Inschriftenfragment 1a/313 – Kalksandstein mit entnommenen Bohrproben.

tenfragmente aus karbonatischen (kalzitischen) Materialanteilen mit terrigenen Beimengungen aus überwiegendem Quarz, untergeordnetem Feldspat und hellem Glimmer. Feinkörnige und mittelkörnige Materialarten sind kornmorphologisch deutlich unterschieden. Die annähernd isometrisch-rundlichen Kornformen der terrigenen Anteile stehen im Gegensatz zu den nach Größe und Form beträchtlich variierenden karbonatischen Partikeln, die sich im Zuge hydrodynamischer Aufbereitungsprozesse anders verhalten als Quarzkörner und beim Zerfall karbonatischer Skelette auch noch durch zusätzliche Faktoren geprägt sind. Dieser Materialvorgabe sind auch die Korngrößenentwicklungen in diesem Gesteinstyp angepasst. Bei insgesamt guter Sortierung variieren sie bei terrigenen Komponenten zwischen 0,1 und 0,6 mm Korndurchmesser und liegen bei den Skelettfragmenten etwas über dieser Größenordnung. Letztere zeigen auch eine geometrische Einregelung länglicher Partikel.

Die durchschnittliche Porosität beträgt ca. 40 % und tritt im Wesentlichen in Form von sekundären Gesteins- und Partikellösungsporen auf. Die hohe Porosität der Kalksandsteine ist in ihrer nur sehr gering entwickelten Zementation begründet. An diagenetischen Erscheinungsformen finden sich drei Arten von Zement:

Feiner, zirkumgranularer, randlich häufig Fe-haltiger, kalzitischer Zement, der als Umsäumung von Komponenten in Erscheinung tritt. Syntaxiale Zementumwachsungen bevorzugt an Echinodermenresten. Blockig-drusige Zemente in diversen biogenen Hohlräumen, beispielsweise in Ostracoden (Abb. 16).

Am Fossilinhalt der Skelettfragmente sind Corallinaceen, Echinodermen, Mollusken, Foraminiferen und Ostracoden beteiligt. Zu den beobachteten Foraminiferenarten zählen hyaline Formen wie *Elphidium*, *Uvigerina*, *Bolivina*, *Heterostegina*, *Cibicides lobulatus*, *Asterigerinata*, *Borealis*, *Reusella*, *Globigerina* und diverse andere Rotalien, auch treten vereinzelt nicht näher bestimmte miliolide und agglutinierende Foraminiferen auf.

Mit Bezugnahme auf vorliegende Nomenklaturen handelt es sich bei diesem Gesteinstyp also um einen Kalksandstein, der nach DUNHAM (1962) als quarzreicher, bioklastischer „Grainstone“ bzw. nach FOLK (1962) als quarzreicher Biosparit einzustufen ist. Nach WILSON (1975) fällt er aus genetischer Sicht in den Bereich eines Foraminiferen reichen Grainstone der Fazieszonen 7 und 8, dessen Bildungsmilieu innerhalb von Gezeitenbarren oder Lagunenkanälen anzusetzen ist.



Abb. 17. Inschriftenfragment 2/126 – dichter Fossilkalk mit entnommenen Bohrproben.

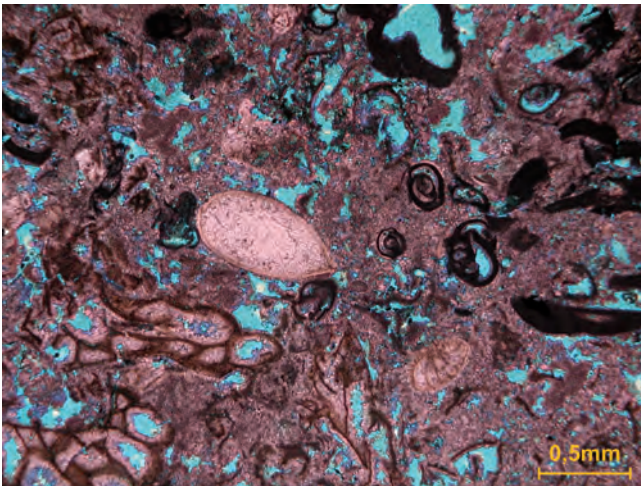


Abb. 18.  
Inschriftenfragment 2/126 – Dünnschliffdokumentation: Kalkskelette von Bryozoen als wesentliche Gesteinsbildner.

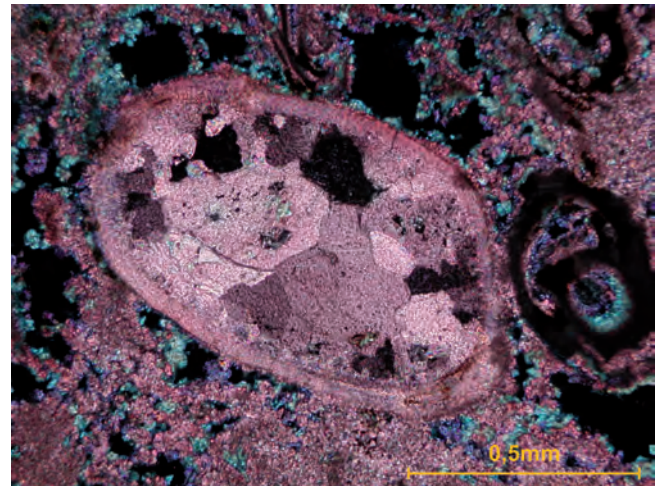


Abb. 19.  
Inschriftenfragment 2/126 – Dünnschliffdokumentation: drusiger Kalzitcement in einer Ostracodenschale.

(b) Fossilkalk, dicht (Abb. 17–19):

Dieser kompakte und sehr dicht entwickelte Kalkstein besteht mineralogisch im Wesentlichen aus Kalzit (Skelettanteile) sowie, zurücktretend, aus Quarz in Form von feinkörnig-eckigen Körnern und gelegentlich auftretenden Schichtsilikaten.

Die durchschnittliche Porosität liegt bei ca. 20 % und äußert sich in Zwickel-, Hohlform- und Partikellösungsporen. Deutliche Hinweise auf die im Rahmen der Kalksteinbildung abgelaufenen diagenetischen Prozesse liegen in Form von teilweise  $Fe^{2+}$  reichen, zirkumgranularen Zementsäumen und drusigem Zement vorzugsweise in Hohlräumen von Biogenresten vor. Dominierend im Gestein sind allerdings feinkörnige Kalzitemente in häufig wolkiger Ausbildung, die sich im Zuge diagenetischer Prozesse aus primär mikritischen Anteilen (Einzelkorndurchmesser  $< 0,03$  mm) im Gerüst von Karbonatpartikeln entwickeln konnten.

Die hauptanteiligen Skelettfragmente bestehen im Wesentlichen aus grobmaschigen, zerlegten Bryozoenresten und Foraminiferen, darunter *Elphidium*, *Quinqueloculina* und ande-

ren inkrustierten Formen. Auch Ostracoden und Reste von Wurmröhren sind in diesem Gesteinstyp keine Seltenheit.

Mit Bezug auf DUNHAM (1962) ist dieser Fossilkalk als „Grainstone“ bis „Wackestone“ zu bezeichnen.

(c) Kalkbrekzie/Kalkrudit (Abb. 20–22):

Die mm bis wenige cm großen Komponenten dieses korngestützten Karbonatgesteins sind stark fragmentiert und setzen sich überwiegend aus kalzitischen Bioklasten, untergeordneten karbonatischen Gesteinsfragmenten sowie terrigenem Material aus Quarz und Feldspat zusammen. Die Porosität dieses schlecht sortierten Kalkrudits ist bei ca. 30 % anzusetzen. Auch in diesem Gestein sind verschiedene Zementgenerationen anzutreffen, wobei syntaxiale Anwachssäume an Echinodermenfragmenten, hundezahnartiger Blockzement auf Partikelrändern (Abb. 21) oder blockig bis drusiger Zement in biogenen Hohlräumen besonders auffällig sind.

Die auch hier hauptanteiligen Skelettfragmente bestehen im Wesentlichen aus Bruchstücken von Rotalgen, austernartigen Muschelschalen und Foraminiferen sowie Echino-

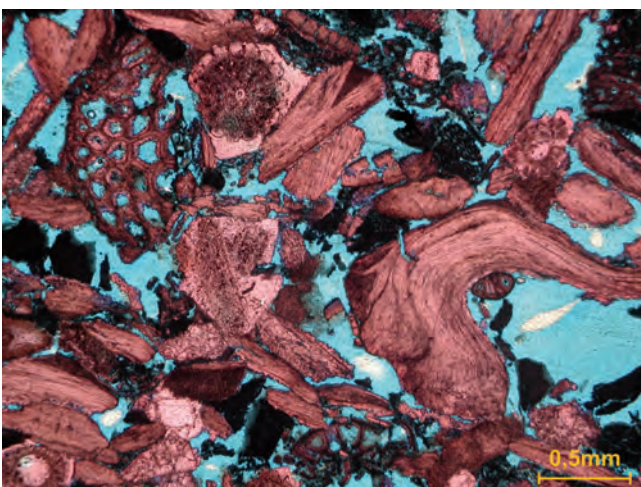


Abb. 20.  
Inschriftenfragment 3/28 – Dünnschliffdokumentation: biogene Kalkbrekzie im Wesentlichen aus kalzitischen Bioklasten.

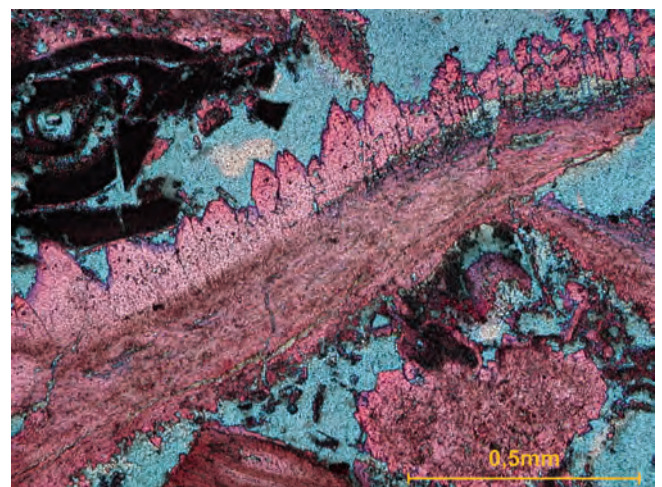


Abb. 21.  
Inschriftenfragment 3/65 – Dünnschliffdokumentation: hundezahnartiger Blockzement auf einer Molluskschale.



Abb. 22.  
Inschriftenfragment 3/28 – Kalkbrezie mit entnommenen Bohrproben.

dermenresten, Korallen, Ostracoden und Bryozoen. Die Bandbreite an Foraminiferenvergesellschaftungen ist beträchtlich und umfasst *Elphidium*, *Amphistegina*, *Alveolina* (ev. *Borealis*), agglutinierende Foraminiferen, nummulitide Großforaminiferen, miliolide Foraminiferen wie *Quinqueloculina* und

inkrustierende Formen. Der Fossilgehalt unterliegt starken Schwankungen.

Einzustufen ist dieser Gesteinstyp als bioklastischer „Grainstone“ bzw. als „Rudstone“ (DUNHAM, 1962) oder nach FOLK (1962) als „Biosparit“.

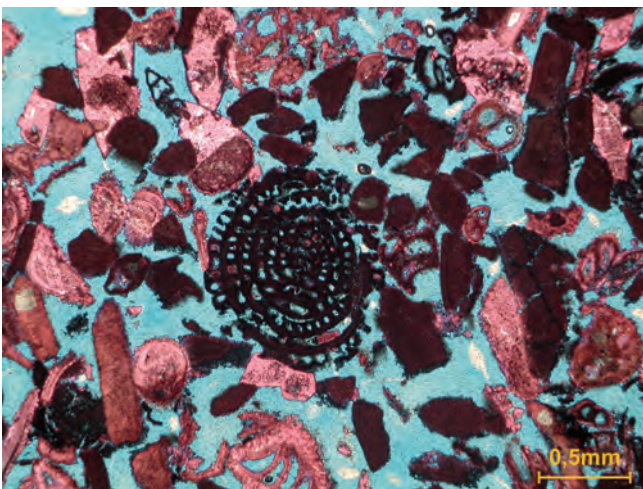


Abb. 23.  
Inschriftenfragment 4/40 – Dünnschliffdokumentation: poröser Lithothamnienkalk mit Anteilen des zuvor genannten Fossilinhalts.

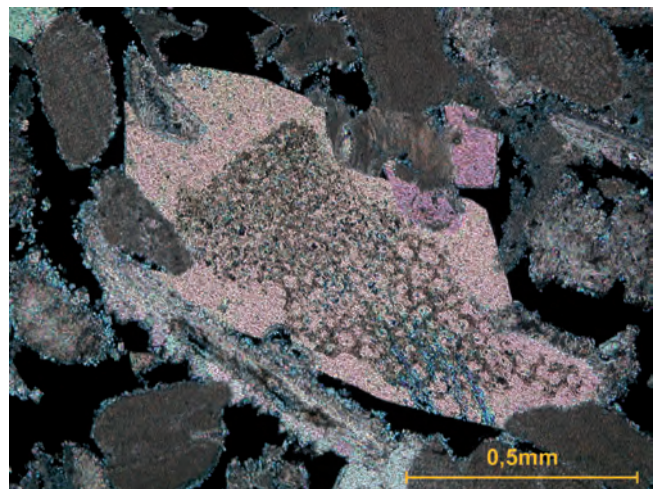


Abb. 24.  
Inschriftenfragment 4/40 – Dünnschliffdokumentation: syntaxial zementierter Echinodermenrest.



Abb. 25.  
Inschriftenfragment 4/40 – Lithothamnienkalk mit entnommenen Bohrproben.

(d) Lithothamnienkalk (Abb. 23–25):

Dieser Gesteinstyp besteht nahezu ausschließlich aus kalzitischen Skelettfragmenten. Die Partikelgröße der Fossilreste liegt im Allgemeinen zwischen 0,2 bis 0,6 mm, vereinzelt treten auch längere Individuen bis zu über 1 mm auf.

Die hohe Porosität dieses Kalkes beruht auf starker sekundärer Gesteins- und Partikellösung. Weitere diagenetische Erscheinungsformen betreffen syntaxialen Kalzitcement auf Echinodermenresten (Abb. 24) und hundezahnartigen Blockzement an diversen Partikelrändern.

Am Fossilinhalt hauptbeteiligt sind wiederum Rotalgen sowie Echinodermenreste, Molluskenschalen, Ostracoden, Bryozoen und Foraminiferen (hauptsächlich *Elphidium*, *Asterigerinata*, *Cibicides lobulatus*, *Alveolina*, *Quinqueloculina* und *Globigerina*), auch sind Wurmröhren verbreitet.

Nach DUNHAM (1962) und FOLK (1962) handelt es sich bei diesem Gesteinstyp abermals um einen bioklastischen „Grainstone“ bzw. um „Biosparit“.

(e) Kalkoolith (Abb. 26–29):

Im Unterschied zu den bisher aufgezeigten Gesteinstypen besteht dieser Gesteinstyp praktisch ausschließlich

aus kalzitischen Ooiden, wie auch mit Hilfe von Röntgendiffraktionsanalytik bestätigt werden konnte. Begleitende Komponenten aus Quarzkörnern und Bioklasten haben nur untergeordnete Verbreitung. Die Durchschnittsgröße der kugeligen bis eiförmigen Körner liegt bei ca. 0,4 mm, wobei längliche Rindenoide gegebenenfalls bis zu 1 mm groß werden können. Das Gestein ist insgesamt sehr gut sortiert, seine bereichsweise variierende Porosität ist bei ca. 30 % anzusetzen.

Unter den Ooidarten dominieren Einfachooide mit einer oder nur wenigen Lamellen (Rindenoide) gegenüber Mikritooiden und mehrschaligen Normalooiden. An strukturellen Entwicklungen finden sich des Weiteren radialstrahlige sowie konzentrische Schalenstrukturen, auch sind mikritische Ausbildungsformen verbreitet (Abb. 27–29). Als Kerne dienen den Ooiden Quarzkörner (mono- und polykristallin), Feldspat (Plagioklas, Alkalifeldspat bzw. Mikroklin), Glimmer, Foraminiferen (insbesondere *Elphidium* und *Quinqueloculina*) und Bruchstücke von Ooiden selbst. Das oolithische Gefüge ist grundsätzlich korngestützt mit punktförmigen, flächigen und, seltener, ineinandergreifenden Kornkontakten. Kalzitischer, hundezahnartiger Zement um die Komponenten und blockiger bis drusiger Sparitzement in den Zwischenräumen sind im Wesentlichen das Bindemittel dieses Karbonatgesteins, das nach DUNHAM



Abb. 26.  
Inschriftenfragment 6/50 – Kalkoolith mit entnommenen Bohrproben.

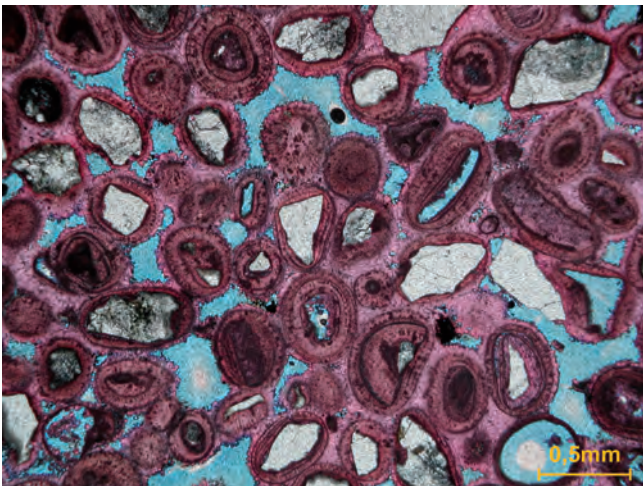


Abb. 27.  
Inschriftenfragment 6/50 – Dünnschliffdokumentation: poröser Kalkoolith mit den angeführten Schalenstrukturen und Kernarten.

(1962) als oolithischer „Grainstone“ bzw. nach FOLK (1962) als „Oosparit“ einzustufen ist.

Ein Vergleich dieses Inschriftenträgermaterials mit dem Kalkoolith aus dem aufgelassenen Steinbruch in Wolfsthal (Abb. 29) zeigt trotz geringer Porosität und häufigerem Auftreten von mineralischen Bruchstücken als Kerne von Ooiden eine weitgehende Übereinstimmung beider Gesteinsarten. Die festgestellten Materialunterschiede unterstützen

vielmehr, im Hinblick auf die Annahme von vor Ort zur Entstehung ooidreicher Karbonatsedimente relativ eingeschränkten Bildungsbedingungen, das nur lokale Vorkommen dieses Gesteinstyps, dessen kleinräumiges und durch Übergangsentwicklungen geprägtes Auftreten auch in der Verfügbarkeit des Gesteins um den Pfaffenberg und seiner dementsprechenden seltenen Verwendung als Baustein oder eben als Inschriftenträger zum Ausdruck kommt.

### Röntgendiffraktionsanalytik

Dieser Untersuchungsteil wurde zur qualitativen und semiquantitativen Ermittlung der Mineralgemische an dem in Pulverform vorliegenden Probenmaterial von Inschriftenträgern durchgeführt.

Die Untersuchungen erfolgten an einem Röntgendiffraktometer des Typs Philips PW 3710 unter Verwendung von CuK $\alpha$ -Strahlung, einer Anodenspannung von 45 kV, einer Stromstärke von 35 mA und einer Aufnahmegeschwindigkeit von 1° (2 Theta) pro Minute. Zur bestmöglichen Erfassung von Mineralbeständen und ihrer anteilmäßigen Verbreitung in den Proben waren spezielle Präparationserfordernisse nötig. Sie betrafen zum einen die Herstellung „texturfreier Pulverpräparate“ zur semiquantitativen Bestimmung der am Aufbau der Proben beteiligten Minerale, zum anderen die Herstellung „texturierter Pulverpräparate“, insbesondere zur Identifizierung spezifischer Schichtsilikatgruppen. Die Registrierung der mittels Röntgenstrahlung erfassten Minerale erfolgt unter anderem auf



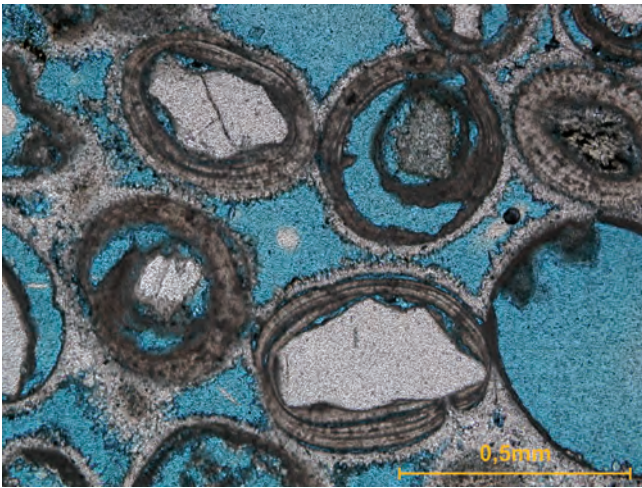


Abb. 28.  
Innschriftenträger 6/50 – Dünnschliffdokumentation: Ooide umsäumt von feinkörnigem Hundezahnzement.

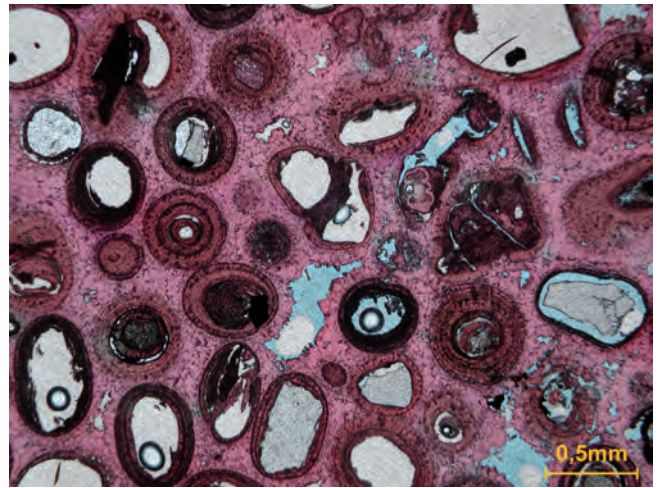


Abb. 29.  
Dünnschliff eines oolithischen Kalksteins aus dem aufgelassenen Steinbruch in Wolfthal.

grafischem Wege (Abb. 30, 31), über die Aufzeichnung von Reflexen in Verbindung mit ihren relativen Intensitäten. Mit Bezug auf die 2 Theta-Position der einzelnen Reflexe und die daraus errechneten d-Werte ist die Feststellung des Mineralbestandes in den Proben grundsätzlich gewährleistet. Die detaillierte qualitative Auswertung der Röntgendiagramme erfolgte dann nach MOORE & REYNOLDS (1989) bzw. nach BRINDLEY & BROWN (1980) sowie, in semiquantitativer Hinsicht, unter Berücksichtigung einer modifizierten Methode von SCHULTZ (1964).

Das zur Veranschaulichung des Untersuchungsverfahrens gewählte Beispiel zeigt, dass der Kalksandstein des Innschriftenträgers 1a/313 im Wesentlichen aus Kalzit besteht. Als Nebengemengteile treten Quarz und Feldspat sowie untergeordneter Glimmer auf.

Tabelle 3 vermittelt einen Überblick zu den röntgenografisch bestimmten Mineral-Anteilen (Gew. %) der nachfolgend genannten Innschriftenträger:

1a/313, 1b/99, 1b/20	Kalksandstein, fein- bis mittelkörnig (Leithakalktyp [a])
2/126	Fossilkalk, dicht (Leithakalktyp [b])
2/57, 3/65, 3/28, 5/34	Kalkbrekzie/Kalkrudrit, feinkörnig (Leithakalktyp [c])
4/40	Lithothamnienkalk (Leithakalktyp [d])
6/50	Kalkoolith (Leithakalktyp [e])

Aus diesen Untersuchungsergebnissen geht klar hervor, dass die Leithakalke weitestgehend aus dem Mineral Kalzit zusammengesetzt sind. Etwas abweichend von dieser generellen Entwicklung verhalten sich die Kalksandsteine und der Kalkoolith, die mit relativ hohen Anteilen von

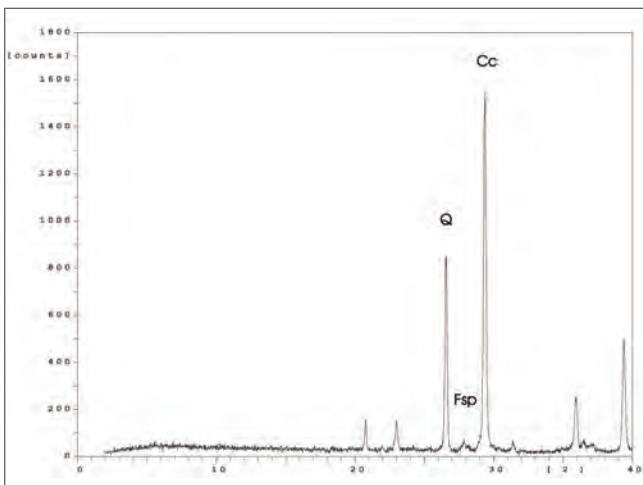


Abb. 30.  
Röntgendiagramm des Innschriftenträgers 1a/313 – texturreies Pulverdiagramm.  
Abkürzungen zu wesentlichen Mineralanteilen in der Probe: Cc – Kalzit, Q – Quarz, Fsp – Feldspat.

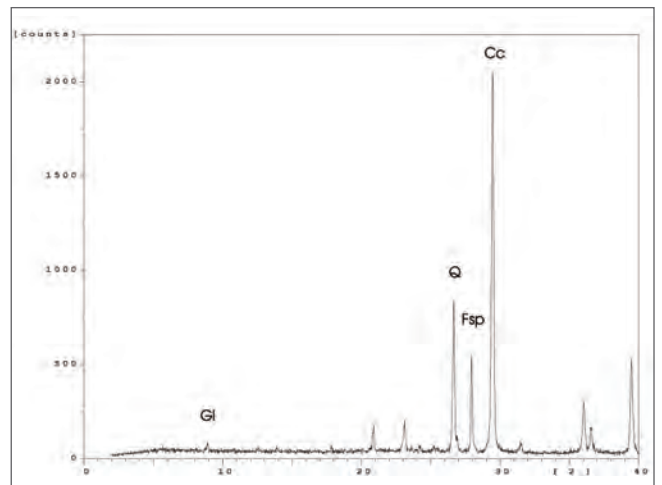


Abb. 31.  
Röntgendiagramm des Innschriftenträgers 1a/313 – texturiertes Pulverdiagramm.  
Abkürzungen zu wesentlichen Mineralanteilen in der Probe: Cc – Kalzit, Q – Quarz, Fsp – Feldspat, Gl – Glimmer.

Proben	TM	Q	Fsp	Cc	Dol
1a/313	6	19	2	73	0
1b/20	0	5	3	92	0
1b/99	4	1	0	95	0
2/57	0	1	0	99	0
2/126	0	1	0	99	0
3/28	0	0	0	100	0
3/65	0	1	0	99	0
4/40	0	0	0	100	0
5/34	0	1	0	98	1
6/50	12	8	3	77	0

Tab. 3. Mineralogische Zusammensetzung (Gew. %) der nebenstehend genannten Proben nach SCHULTZ (1964). Abkürzungen: TM – Schichtsilikate gesamt, Q – Quarz, Fsp – Feldspat, Cc – Kalzit, Dol – Dolomit.

Quarz, Schichtsilikaten und auch Feldspat terrigene Einflüsse aus dem nahen Hinterland des Bildungsbereiches karbonatischer Sedimente erkennen lassen (Abb. 32). Wesentlich für diese Art mineralogischer Zusammensetzungen erscheint auch das Bildungsmilieu beider Leithakalktypen, wobei die zu ihrer Entstehung führenden Sedimentationsprozesse (WILSON, 1975) Beimengungen terrigener Materialanteile in den sich entwickelnden Karbonat-Gesteinen unterstützen.

### Zusammengefasste Ergebnisse

Unter den ca. 650 zur petrografischen Beurteilung vorgelegten Inschriftenfragmenten konnten insgesamt fünf nach Gefüge, Kornaufbau, Mineralogie und Fossilinhalt deutlich differierende Gesteinsarten bestimmt werden. Die Röntgendiffraktionsanalyse bestätigt den mikroskopisch festgestellten Mineralbestand dieser Gesteine mit Kalzit als Hauptgemengteil, Quarz, Feldspat und Glimmer als Nebengemengteile bzw. Akzessorien und einem stellenweisen Auftreten von Dolomit.

Im Hinblick auf Zuordnung des für die Inschriftenträger verwendeten Gesteinsmaterials konnte anhand von vergleichenden Dünnschliffbeobachtungen festgestellt werden, dass die aus den ehemaligen Römersteinbrüchen 1 und 2 (Abb. 14) stammenden Proben am ehesten dem Inschriftenmaterial des Leithakalktyps (c) Kalkbrekzie/Kalkrudit, feinkörnig, entsprechen. Es handelt sich hierbei um groben Riffschuttalk, der mit seinen zahlreichen stark fragmentierten, biogenen Resten bereits aus makroskopischer Sicht diesbezügliche Zusammenhänge vermuten ließ. Eine Verbindung des Inschriftenfragments 6/50 – Leithakalktyp (e) Kalkoolith – mit dem Steinbruch Wolfsthal erscheint schon wegen der Einmaligkeit dieses Vorkommens in der Region um Carnuntum gegeben. Auftretende Materialunterschiede (siehe Mikroskopische Untersuchungen) sind mit wechselnden Bildungsbedingungen vor Ort und den sich daraus ableitenden Übergangsentwicklungen im Zuge der Gesteinsbildung zu erklären und somit kein gravierender Grund, die Zusammengehörigkeit des Inschriftenträgers mit dem Wolfsthaler Kalkoolith in Frage zu stellen.

Beim Versuch, bestimmte Leithakalkvorkommen Inschriftenfragmenten zuzuordnen, ist außerdem ganz allgemein zu berücksichtigen, dass frisch aus den Steinbrüchen

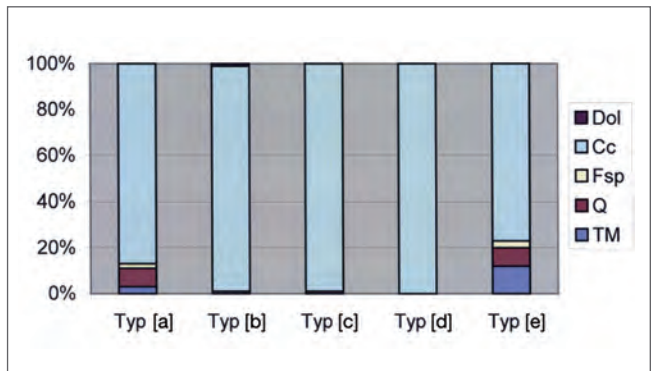


Abb. 32. Mineralogische Zusammensetzung der fünf Leithakalktypen, festgestellt auf röntgenografischem Wege unter Berücksichtigung eines modifizierten Bestimmungsverfahrens von SCHULTZ (1964).

stammende Proben sich hinsichtlich der Ausbildung bestimmter Zementarten und den daraus resultierenden Porositätsentwicklungen deutlich vom Gesteinsmaterial der Inschriftenträger unterscheiden. Das Probenmaterial aus den Steinbrüchen erscheint stärker zementiert und zeigt bei höherer Festigkeit auch eine insgesamt merklich niedrigere Porosität. In frischen Proben aus den Steinbrüchen sind meist mehrere Zementgenerationen zu beobachten. Nach Mikritisierung verschiedenster Partikel im Sediment erfolgte in einer ersten Phase der Materialverfestigung die Ausbildung von hundezahnartigem Zement oder Faserzement („Zement A“ nach FLÜGEL, 1978). Anschließend verringerte sparitischer Zement („Zement B“) den verbliebenen Porenraum, häufig in Verbindung mit „syntaxialem Zement“.

Während im Ablauf dieser Zementationsprozesse die primäre Porosität im dichter werdenden Kalkstein abnahm und zunehmend kompakte Gefügeentwicklungen eintraten, dominiert in den Inschriftenfragmenten sekundäre Porosität als Folge von Partikel- und Gesteinsanlösung mit deutlich höherem Porenvolumen. Ob diese Art von Porosität mit den üblichen diagenetischen Prozessabläufen zur Bildung sekundärer Porosität im vollen Umfang erklärt werden kann, ist zu bezweifeln. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die Entwicklung dieses Hohlraumvolumens als Folge langfristig wirksamer Witterungseinflüsse entstanden ist, wobei, bei gegebener Abdeckung der Inschriftenfragmente durch Humus, auch einsetzende Bodenbildungsprozesse den ursprünglichen Materialzustand der Werksteine verändert haben sollten.

Die Tatsache, dass zwischen frischem Naturstein aus den Steinbrüchen und den Inschriftenträgern beträchtliche Qualitätsunterschiede auftreten, gibt Anlass, besonders darauf hinzuweisen, dass diese Problematik bei anfallenden Konservierungs- oder Restaurierungsmaßnahmen vorrangig Beachtung finden sollte, um Misserfolge im Rahmen von Denkmalpflege etc. zu vermeiden.

## Gesteinskundlich-technischer Untersuchungsteil

Die Gewinnung von Gesteinen und die Möglichkeit sie zu bearbeiten bzw. sie als Bau- oder Dekorstein zu verwenden hängt naturgemäß von ihren physikalisch-technischen Eigenschaften ab. Um diese zu ermitteln sind gezielt eingesetzte Prüfverfahren im Labor eine notwendige Voraussetzung. Materialspezifische Kennwerte werden auf diesem Wege erarbeitet und bilden dann mit ihren Aussagen die Grundlage zur weiteren Vorgangsweise hinsichtlich des Einsatzes bestimmter Werkstoffe, was im gegenständlichen Fall insbesondere für Restauratoren im Hinblick auf die Vorgangsweise bei der Bearbeitung von Steinmaterial von Nutzen sein sollte.

Natursteine haben im Gegensatz zu vielen anderen Baustoffen eine meist deutlich ausgeprägte, strukturbedingte Richtungsabhängigkeit in ihrer Gefügeentwicklung und, in diesem Zusammenhang, eine oft beträchtliche Schwankungsbreite ihrer technischen Eigenschaften. Anisotropie und Inhomogenitäten eines Gesteins müssen deshalb bei der Ermittlung von Kennwerten besondere Beachtung finden, zum einen durch möglichst normgerechte Probendimensionierungen, zum anderen durch eine genügend große Anzahl von Messungen.

Die im Rahmen der gegenständlichen Problematik angewendeten Prüfverfahren werden nachfolgend vorgestellt. Bei ihrer Anwendung wurde grundsätzlich versucht, sich an den jeweiligen Norm-Vorschriften zu orientieren. Da aber Mindestprobemengen von Inschriftenfragmenten jedoch in keinem Fall zur Verfügung standen, waren lediglich Anlehnungen an diese Vorgaben möglich.

### Spaltzugfestigkeit

Das Spaltzugmessverfahren ist eine Methode zur indirekten Bestimmung der Gesteinszugfestigkeit. Spaltzugfestigkeit und Druckfestigkeit sind Gesteinskennwerte, die Aussagen über den Zusammenhalt (Kohäsion) eines Gesteinsgefüges ermöglichen.

Die ÖNORM B 3124-4 beschreibt die korrekte Durchführung des Versuches. Dabei wird ein Probekörper einem zunehmenden Druck ausgesetzt (Abb. 33), wobei die Belastungssteigerung pro Sekunde zwischen 0,5 und 1 N je mm<sup>2</sup> Prüffläche liegen muss. Die dabei senkrecht zur Druckspannung entstehenden Zugspannungen führen bei

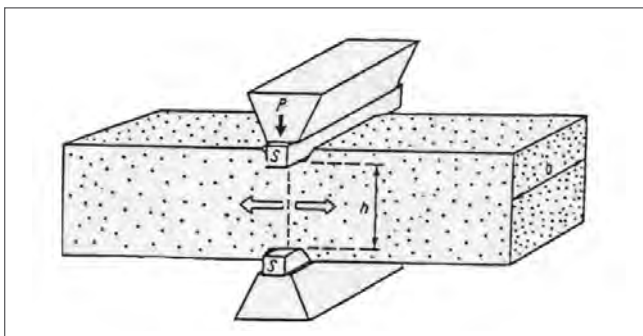


Abb. 33. Schematischer Versuchsaufbau zur Prüfung der Spaltzugfestigkeit. P = Druckstempel zur Aufbringung der Kraft, S = halbelastischer Streifen zur Kraftverteilung.

Überschreiten der Kohäsion des Gesteins zu Bruch. Es bildet sich ein von der Prüfkörpermitte ausgehender, diametral verlaufender Riss.

Die Spaltzugfestigkeit wird aus der Bruchlast und den Probedimensionen nach folgender Formel berechnet:

$$\sigma_{sz} = 2 \cdot F_{szmax} / (\pi \cdot d \cdot h)$$

$\sigma_{sz}$  Spaltzugfestigkeit [MPa]  
 $F_{szmax}$  Maximalkraft bei Bruch [N]  
 d Probendurchmesser [mm]  
 h Probenhöhe [mm]

Die Bestimmung der Spaltzugfestigkeit kann nach zwei Belastungsrichtungen erfolgen (Abb. 34). Mittelwertbildungen von Prüfwerten waren nicht möglich, da die Mindestanzahl von fünf Prüfkörpern je Materialprobe nicht zur Verfügung stand.



Abb. 34. Versuchsanordnungen zur Messung von Spaltzugfestigkeit: quer (a, b) und längs (c) zur Achse des Prüfkörpers.

Aus den in Tabelle 4 zusammengestellten Messwerten ist erkennbar, dass alle geprüften Gesteinsarten eine leichte, richtungsabhängige Anisotropie aufweisen. Die Prüfungen erfolgten senkrecht dazu. Die geringe Anzahl von Messwerten ist natürlich nicht ausreichend, abgesicherte Bewertungen von Materialeigenschaften zu gewährleisten. Hinweise auf bestimmte Werkstoffqualitäten sind jedoch ersichtlich, da die Untersuchungsergebnisse Gefügeentwicklungen der einzelnen Leithakalk-Typen zumindest andeutungsweise nachzeichnen und so beispielsweise die größere Festigkeit eines dichten Fossilalks (2/126) gegenüber einem Kalksandstein (1a/313) erkennbar ist.

Proben	$\sigma_z$	$\sigma F1$	$\sigma F2$
1a/313	0,4	0,7	
1b/20	2,0	keine Probe	
1b/99	0,3	0,9	
2/57	0,5	2,0	
2/126	1,1	0,5	3,3
3/28	0,3	0,9	
3/65	0,4	0,8	1,8
4/40	0,2	1,2	
5/34	0,5	0,3	2,0
6/50	0,8	2,9	

Tab. 4. Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsprüfung (Angaben in [MPa]). Abkürzungen:  $\sigma_z$  – Messung senkrecht zur Anisotropie,  $\sigma F1$  – Messung parallel zur Anisotropie,  $\sigma F2$  – Messung senkrecht zu den Kanten der Schichtebene.

## Ultraschallanalytik

Der Einsatz dieses Verfahrens im Rahmen von Denkmalpflege ist insofern von Bedeutung, weil diese relativ einfache und leicht zu handhabende Methode zerstörungsfrei arbeitet und die Ergebnisse ausgezeichnete Informationen über Objektzustände, Restaurierungsbedarf bzw. die Beurteilung von eingeleiteten Restaurierungsmaßnahmen liefern (FLEISCHER, 2002). Mit dieser Methode können beispielsweise Hinweise auf Inhomogenitäten im Gestein, wie Risse unter der Gesteinsoberfläche (Abplatzungen) etc. sichtbar gemacht werden, können Kornbindungsprobleme aufgezeigt oder Art und Umfang von Gesteinsschädigungen festgestellt werden. Diese Beobachtungen sind deswegen möglich, weil die Geschwindigkeit von Ultraschallwellen beim Durchlaufen eines Gesteins von den spezifischen Eigenschaften der gesteinsbildenden Minerale und auch der Porosität im Gestein abhängt. Bevorzugte Orientierungen von Mineralen sowie Anisotropien des Porenraumes verursachen dann entsprechend richtungsabhängige Unterschiede bei der Entwicklung von Ultraschallgeschwindigkeiten im Gestein, wodurch material-spezifische Eigenschaften, beispielsweise von Bausteinen, unmittelbar aufgezeigt werden.

Die ÖNORM EN 14579 beschreibt die Anwendung von Ultraschallanalytik im Naturstein.

Alle Proben vom Pfaffenberg wurden wegen der Anisotropie mit diesem Verfahren (Abb. 35) in je zwei Richtungen untersucht. Dabei wurden Schallköpfe an die Probenzylinder gelegt und diese unmittelbar durchschallt. Dabei erhält man die Laufzeit der Ultraschallwellen. Die Messdistanz zwischen den Schallköpfen wurde mit Hilfe einer Schublehre ermittelt.

Die spezifische Ultraschallgeschwindigkeit eines Gesteins wird nach der Formel

$$v = d / t$$

berechnet.

V	Ultraschallgeschwindigkeit [km/s]
d	Messdistanz [mm]
t	Laufzeit [ $\mu$ s]

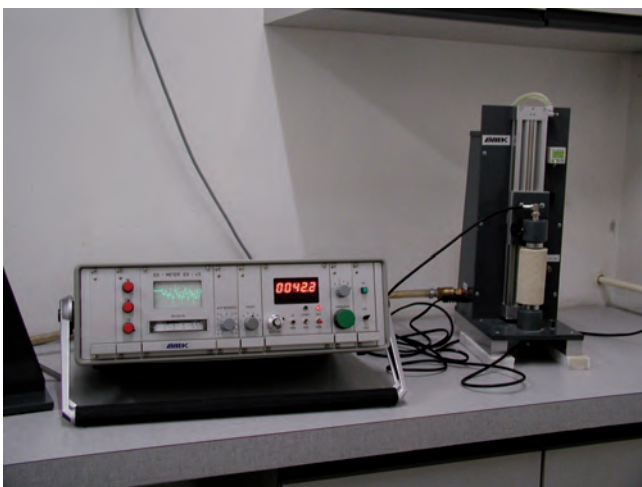


Abb. 35.  
Gerät zur Ultraschallmessung.

Die in Tabelle 5 zusammengestellten Untersuchungsergebnisse zeigen, dass die Quermessungen an den Probezylindern tendenziell höhere Werte haben als in Längsrichtung. Mit Bezug auf die unter Kapitel „Spaltzugfestigkeit“ gemachten Angaben zur Orientierung der Probenzylinder ist davon auszugehen, dass die Unterschiede der Ultraschallgeschwindigkeiten durch Einregelung von Partikeln oder Anisotropien im Porenraum hervorgerufen werden und damit die bekannten Gefügeentwicklungen der verschiedenen Leithakalktypen ansprechen. Weiters bestätigen die Resultate die unterschiedlichen Materialdichten der verschiedenen Inschriftenfragmente, wodurch der dichte Fos-silkalk von Probe 2/126 besonders deutlich charakterisiert ist.

Proben	längs	quer
1a/313	2,3	2,5
1b/20	3,1	4,3
1b/99	2,4	3,5
2/57	3,1	4,2
2/126	4,3	5,9
3/28	2,6	3,9
3/65	2,6	3,6
4/40	2,4	3,1
5/34	3,2	4,4
6/50	3,3	4,6

Tab. 5.  
Zusammenstellung von Ergebnissen der Ultraschalluntersuchungen (US-v in [km/s]).

## Kapillare Saugfähigkeit

Die kapillare Wasseraufnahme beschreibt die Fähigkeit eines Gesteins zur spontanen Wasseraufnahme und ist damit ein weiterer, wesentlicher Parameter zur Abstimmung allfälliger Restaurierungsvorhaben an Bauelementen. Poröse Natursteine beginnen bei unmittelbarem Kontakt mit Wasser (Grundwasser oder Niederschlag) dieses aufzunehmen. Die sich dabei entwickelnde Saugkraft steht in Abhängigkeit zur Kapillarität eines Gesteins und ist durch die Porenstruktur geprägt. Daneben können im Gestein verbreitete, quellfähige Schichtsilikate einen beträchtlichen Anteil an Wasser aufnehmen.

Zur Messung der kapillaren Saugfähigkeit werden zylindrische Probekörper in ein mit Wasser gefülltes Becken gestellt, solange, bis das Gestein kein Wasser mehr aufnimmt. Gleichzeitig wird in regelmäßigen Zeitabständen die Steighöhe des Wassers im Probekörper festgestellt. Auf dieser Grundlage wird die Sauggeschwindigkeit berechnet. Die kapillare Saugfähigkeit eines porösen Gesteins wird durch den „Wasseraufnahmekoeffizienten“ ausgedrückt. Dieser gibt an, wie viel Wasser pro Flächeneinheit und der Quadratwurzel der Zeit von einem Gestein durch kapillares Saugen aufgenommen wird.

Die Untersuchungsdurchführung erfolgte in Anlehnung an die ÖNORM EN 1925.

Zu den Ergebnissen in Tabelle 6 ist grundsätzlich anzumerken, dass die kapillare Saugkraft die Länge aller Probekörper überstieg und somit keine Aussagen zur absoluten Saugtiefe der untersuchten Gesteinsarten getroffen werden konnten. Überdurchschnittlich hohe Sauggeschwindigkeiten der Proben 1a/313 (Kalksandstein, fein- bis mit-

Probe 1a/313 durchschnittliche Sauggeschwindigkeit: 0,44 mm/min

Steighöhe in mm	32	47
Zeit in Min.	1	2

Probe 1b/20 durchschnittliche Sauggeschwindigkeit: 6,92 mm/min

Steighöhe in mm	22	40	50	58	85	90
Zeit in Min.	1	2	3	4	7	13

Probe 1b/99 durchschnittliche Sauggeschwindigkeit: 7,27 mm/min

Steighöhe in mm	30	39	46	52	57	62	68	71	73	76	80
Zeit in Min.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Probe 2/57 durchschnittliche Sauggeschwindigkeit: 2,16 mm/min

Steighöhe in mm	15	20	25	30	35	50	55	60	67
Zeit in Min.	1	2	3	4	8	16	20	25	31

Probe 2/126 durchschnittliche Sauggeschwindigkeit: 0,18 mm/min

Steighöhe in mm	45	40	50	65	70
Zeit in Min.	15	46	105	226	398

Probe 3/28 durchschnittliche Sauggeschwindigkeit: 5,54 mm/min

Steighöhe in mm	15	25	30	38	45	52	55	58	60	72
Zeit in Min.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	13

Probe 3/65 durchschnittliche Sauggeschwindigkeit: 5,45 mm/min

Steighöhe in mm	18	28	33	38	42	46	49	52	60
Zeit in Min.	1	2	3	4	5	6	7	8	11

Probe 4/40 durchschnittliche Sauggeschwindigkeit: 2,50 mm/min

Steighöhe in mm	60	90
Zeit in Min.	6	36

Probe 5/34 durchschnittliche Sauggeschwindigkeit: 0,44 mm/min

Steighöhe in mm	15	25	35	50	60	70	80
Zeit in Min.	1	5	13	29	59	87	180

Probe 6/50 durchschnittliche Sauggeschwindigkeit: 15,5 mm/min

Steighöhe in mm	32	48	55	62
Zeit in Min.	1	2	3	4

Tab. 6.  
Zusammenstellung von Ergebnissen der Untersuchungen zur Feststellung der kapillaren Saugfähigkeit.

telkörnig) und 6/50 (Kalkoolith) sind mit der diesen Proben generell zukommenden hohen Porosität zu erklären. Der Schichtsilikatanteil dieser Proben erscheint zu gering, um wesentlich zur Saugfähigkeit beizutragen, auch ist diesbezüglich anzuführen, dass mit den festgestellten Glimmerphasen keine quellfähigen Tonminerale in diesen Gesteinstypen vorliegen. Die sehr geringe Saugkraft der Proben 2/126 (Fossilkalk, dicht) und 5/34 (Kalkbrekzie/Kalkrudite, feinkörnig) ist mit der generell hohen Dichte dieser Gesteine verbunden. Die Sauggeschwindigkeiten aller übrigen entsprechen mittleren Saugleistungen.

Im Hinblick auf die hohe kapillare Saugfähigkeit von Inschriftenfragmenten ist grundsätzlich festzuhalten, dass solche Gesteinsarten gegenüber Frostsprengung, Salzausblühungen und generell chemischen Verwitterungseinflüssen empfindlich reagieren. Es sollte daher vermieden werden, solche Inschriftenträger langfristig im Freien zu lagern. Auch ist zu bedenken, dass Bausteine dieser Qualität sich nur bedingt zur Errichtung von Außenmauern oder Fassaden eignen.

## Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

Dieser Wert beschreibt den Anteil an gebundenem Wasser in einer wassergesättigten Gesteinsprobe und wird im Wesentlichen durch die Porosität dieses Materials bestimmt.

Die Ermittlung des Kennwertes beruht darauf, dass im Zuge des Kochens einer Gesteinsprobe die im Porenraum befindliche Luft größtenteils entweicht und Wasser in den frei gewordenen Hohlraum eindringt, dessen „Feuchtmasse“ dann ermittelt wird. Zur Bestimmung der Wasseraufnahme (siehe ÖNORM B 3122) wird zunächst die Trockenmasse der Proben bestimmt, danach erfolgt eine 10-stündige Wasserlagerung. Zu Beginn dieser Lagerungsdauer werden die Proben zwei Stunden lang gekocht, dann zwei Stunden abgekühlt und anschließend nochmals sechs Stunden in kochendem Wasser belassen. Es folgt die Bestimmung der Probemasse im feuchten Zustand ( $m_f$ ) und die Berechnung der prozentuellen Menge des aufgenommenen Wassers.

Die massebezogene Wasseraufnahme errechnet sich aus der Probemasse im wassergesättigten und im trockenen Zustand.

$$W_{m24} = (m_f - m_t) \cdot 100 / m_t$$

$W_{m24}$  massebezogene Wasseraufnahme in 24 Stunden [Gew. %]

$m_f$  Masse der wassergesättigten Probe bzw. Feuchtmasse [g]

$m_t$  Trockenmasse [g]

Hohe Wasseraufnahme von Gesteinen begünstigt Frostsprengung und grundsätzlich chemische Verwitterung, auch wird die Ausbildung von Krusten und Ausblühungen unterstützt. Die festgestellten Werte zwischen 9 und 24 % (Tab. 7) entsprechen der großen Bandbreite dieser Gesteine, wobei dichte Leithakalke (2/126; Fossilkalk, dicht) naturgemäß geringere Wasseraufnahme zeigen als poröse (1a/99; Kalksandstein, fein- bis mittelkörnig). Die üblicherweise an Kalksandsteinen bestimmte Wasseraufnahme liegt in Abhängigkeit von der jeweiligen Probenbeschaffenheit bei 5 bis 15 Gew. %.

Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck und die Rohdichte der Proben zeigen gute Korrelation (Abb. 36). Zunehmende Rohdichte bewirkt ein Abnehmen der Wasseraufnahme.

Proben	Wasseraufnahme (Gew.%)
1a/313	10,34
1b/20	14,75
1b/99	22,04
2/57	15,50
2/126	9,45
3/28	15,25
3/65	17,79
4/40	23,68
5/34	16,41
6/50	12,01

Tab. 7. Ergebnisse der Untersuchungen zur Wasseraufnahme der Leithakalktypen.

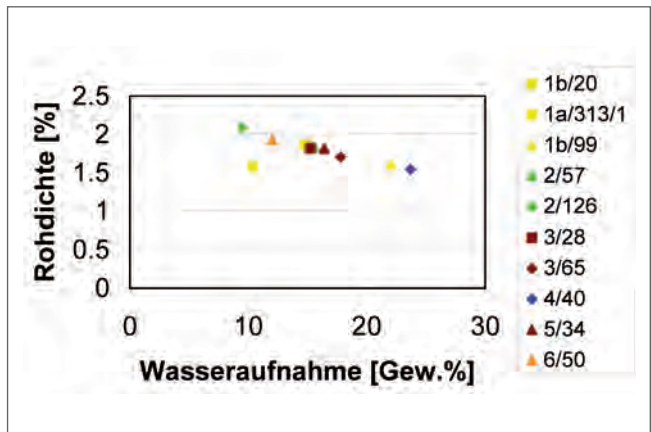


Abb. 36. Korrelation von Wasseraufnahme gegen Rohdichte der Proben.

## Gesteinsdichte und Gesteinsporosität

### Rohdichte

Die Rohdichte ( $\rho_R$ ) beschreibt die Dichte eines Gesteins einschließlich vorhandener Hohlräume. Das Volumen der geometrisch einfach definierten Materialproben wurde im Ausmessverfahren mit einer Schublehre ermittelt, die Masse mit einer Waage festgestellt. Der Quotient von Masse und Volumen ergibt gemäß ÖNORM B 3121 die Rohdichte:

$$\rho_R = m / V$$

$\rho_R$  Rohdichte [g/cm<sup>3</sup>]

$m$  Masse [g]

$V$  Volumen [cm<sup>3</sup>]

### Reindichte

Die Reindichte ( $\rho_o$ ) ist die spezifische Dichte eines porenfrei gedachten Gesteins und wird mittels Pyknometer bestimmt.

Die Messung erfolgt an analysenfein gemahlenem, im Trockenschrank bei 105° C auf Gewichtskonstanz getrocknetem und im Exsikkator auf Raumtemperatur abgekühltem Probematerial. Die Bestimmung der Dichte erfordert zunächst eine Eichung des Gerätes. Dafür werden das Tara-gewicht des Pyknometers ( $G_B$ ) sowie das Gewicht des bis zur Messmarke mit Wasser gefüllten Pyknometers bei dessen bekannter Temperatur ( $G_B + G_{W(T_1)}$ ) benötigt. In das trockene Pyknometer werden anschließend ca. 20 g Probe gefüllt und das Gewicht ( $G_t + G_B$ ) bestimmt. Die Differenz der Wägungen ( $(G_t + G_B) - G_B$ ) ergibt das Gewicht der Probemenge  $G_t$ . Es folgt die Befüllung des Pyknometers mit destilliertem Wasser bis zur Wasserbedeckung der Probe, ein anschließendes Kochen des Pyknometers auf dem Wasserbad zum Entweichen von Luftporen und schließlich, nach dem Abkühlen des Pyknometers auf Raumtemperatur, ein Auffüllen des Gerätes mit Wasser bis zur Messmarke sowie die Messung der Temperatur ( $T_2$ ). Nach diesen Vorgängen wird das Gesamtgewicht ( $G_{P(T_2)} = \text{Tara } (G_B) + \text{Bodenprobe } (G_t) + \text{Wasser } (G_{wRest(T_2)})$ ) bestimmt.

Die für die Berechnung der Reindichte benötigten Gleichungen lauten:

$$\rho_o = G_t / V_s$$

$$V_s = V_{Pyk(T2)} - V_{wRest(T2)}$$

$$V_{wRest(T2)} = (G_{P(T2)} - (G_t + G_B)) / Y_{w(T2)}$$

Wenn der Temperaturunterschied zwischen  $T_1$  und  $T_2 < 4^\circ \text{C}$  beträgt, gilt:

$$V_{Pyk(T2)} = G_{w(T1)} / Y_{w(T1)}$$

- $\rho_o$  Reindichte der Probe [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
- $G_t$  eingewogene Probemenge [g]
- $V_s$  Volumen der Probe [ $\text{cm}^3$ ]
- $V_{Pyk(T2)}$  Pyknometervolumen bei  $T_2$  [ $\text{cm}^3$ ]
- $V_{wRest(T2)}$  Volumen des Wassers im mit Probe gefülltem Pyknometer [ $\text{cm}^3$ ]
- $G_{P(T2)}$  Gesamtmasse des mit Wasser und Probe gefüllten Pyknometers [ $\text{cm}^3$ ]
- $G_B$  Taragewicht des Pyknometers [g]
- $G_{w(T1)}$  Gewicht des Wassers bei  $T_1$  [g]
- $G_{wRest(T2)}$  Gewicht des Wassers im mit Probe gefülltem Pyknometer [g]
- $Y_{w(T1)}$  spezifische Dichte des Wassers bei  $T_1$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
- $Y_{w(T2)}$  spezifische Dichte des Wassers bei  $T_2$  [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]
- $T_1$  Eichtemperatur [ $^\circ\text{C}$ ]
- $T_2$  Messtemperatur [ $^\circ\text{C}$ ]

### Wahre und scheinbare Porosität

Da die Porosität direkten oder indirekten Einfluss auf die meisten physikalischen Gesteinseigenschaften hat, gilt sie als eine der wichtigsten Materialeigenschaften. Die wahre Porosität beschreibt das gesamte Porenvolumen einer Probe, einschließlich isolierter, nicht kommunizierender Poren.

Die Berechnung erfolgt aus der Rein- und Rohdichte eines Gesteins (Tab. 8):

$$P = 1 - \rho_R / \rho_o$$

- $P$  wahre Porosität [%]
- $\rho_R$  Rohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] = Gesteinsdichte inkl. Porosität
- $\rho_o$  Reindichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ] = Dichte ohne Poren (gemahlene Probe)

Die scheinbare bzw. offene Porosität stellt nach DE QUERVAIN (1967) den Porenraum dar, der durch kapillare Wasseraufnahme bis zur Gewichtskonstanz gefüllt wird und beschreibt damit den kommunizierenden Porenraum eines Gesteins.

Wie bereits mehrfach festgestellt, zeichnen sich die untersuchten Proben der Inschriftenfragmente allgemein durch hohe Porositätswerte aus, wobei unterschiedliche Gefügekennmerkmale bzw. die Materialdichte der einzelnen Leithalkaltypen durch ihre Porositätsentwicklung deutlich charakterisiert sind.

Proben	$\rho_R$	$\rho_o$	P
1a/313	1,6	2,7	40,3
1b/20	1,9	2,7	30,9
1b/99	1,6	2,7	39,5
2/57	1,8	2,7	31,9
2/126	2,1	2,7	22,8
3/28	1,8	2,7	32,9
3/65	1,7	2,7	36,0
4/40	1,5	2,7	42,4
5/34	1,8	2,7	32,5
6/50	1,9	2,6	25,1

Tab. 8. Ergebnisse der Bestimmungen von Rein- und Rohdichte sowie der Porosität. Abkürzungen:  $\rho_R$  – Rohdichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ],  $\rho_o$  – Reindichte [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ], P – wahre Porosität [%].

### Hygrische Dehnung

Wasseraufnahme kann in einem Gestein infolge hygrischer Dehnung grundsätzlich zu Spannungsverformungen führen. Diese Eigenschaft ist ebenfalls richtungsabhängig und wird wesentlich vom Quellverhalten von im Gestein enthaltenen Schichtsilikaten beeinflusst. Ein diesbezüglicher Kennwert ist beispielsweise für die Verträglichkeit zwischen Naturstein und Konservierungsmitteln von vorrangiger Bedeutung.

Zur Bestimmung der hygrischen Dehnung (Abb. 37) werden die Proben einer 24-stündigen Wassereinwirkung unterzogen und auftretende Längenunterschiede mit ei-

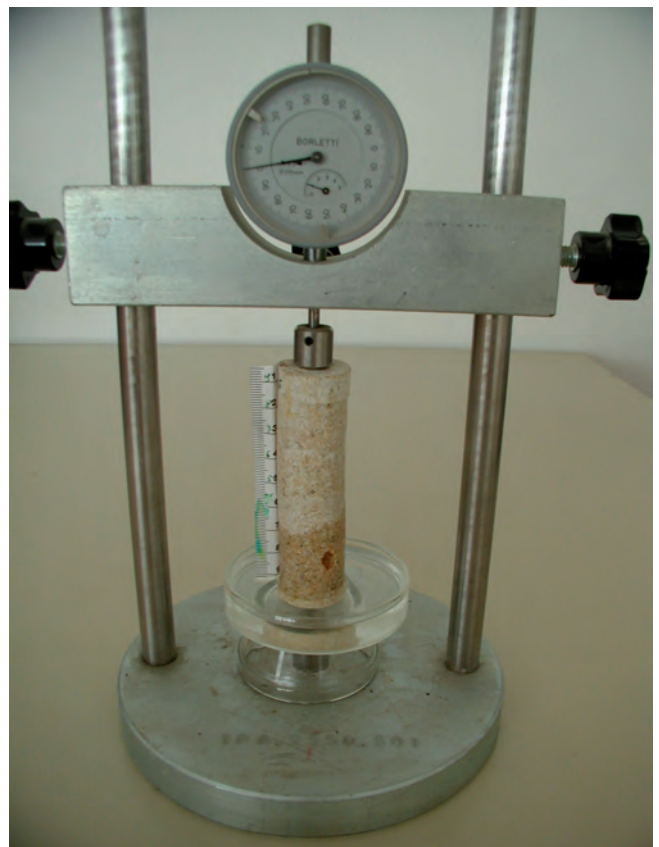


Abb. 37. Gerät zur Messung der hygrischen Dehnung von Materialproben.

nem Dilatometer gemessen. Längendifferenzen zwischen trockener und wassergesättigter Probe [µm] werden in [%] bzw. in [‰] ausgedrückt.

Da die in Frage kommenden Leithalke praktisch keine Schichtsilikate enthalten, liegt die hygrische Dehnung dieser Gesteinsarten nur im ‰-Bereich (Tab. 9). Sie kann damit als kritischer Parameter im Rahmen dieser Untersuchungen vernachlässigt werden.

Proben	Probenlänge [mm]	Hygr. Dehnung [µm]	Hygr. Dehnung [‰]
1a/313	47,5	4	0,08
1b/20	91,6	3	0,03
1b/99	81,2	0	0,00
2/57	67,7	22	0,32
2/126	97,1	7	0,07
3/28	72,3	3	0,04
3/65	59,9	1	0,01
4/40	91,0	2	0,02
5/34	84,6	20	0,24
6/50	62,6	1	0,02

Tab. 9. Untersuchungsergebnisse zur hygri-schen Dehnung der Leithalke. Abkürzungen: mm – Probenlänge trocken, µm – Probenlänge wassergesättigt [mm], ‰ – Längendifferenz [mm].

### Bestimmung des thermischen Ausdehnungs-koeffizienten

Dieser Parameter ist ein weiterer kritischer Kennwert zur Beurteilung von Naturwerksteinen. Die Kenntnis ihrer Dehnungseigenschaften ist grundlegend für die Errichtung von Bauwerken etc., da Naturwerksteine meist eine verwitterungsbedingte Sensibilität gegenüber thermischer Beanspruchung aufweisen. Wie bei hygri-scher Dehnung kann Wärmedehnung zu Scherspannungen führen. Die thermische Dehnung eines Gesteins beruht auf einer Volumenzunahme der gesteinsbildenden Minerale. Der Anteil von Mineralen mit großer thermischer Dilatation (quarzreiche Gesteine) spielt zur Entwicklung von Dehnung die dabei entscheidende Rolle.

Die diesbezügliche Untersuchung der Leithalke erfolgte im indirekten Messverfahren im Vergleich zu Quarzglas als Referenzmaterial. Der verwendete Standard DURAN® ist



Abb. 38. Gerät zur Messung des thermischen Ausdehnungskoeffizienten.

Glas mit einem mittleren linearen Ausdehnungskoeffizienten von  $3,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  nach DIN 52 328, was bedeutet, dass ein Glasstab von 1 m Länge sich bei einer Erwärmung von  $100^\circ \text{ C}$  um 0,325 mm ausdehnt. Die Ermittlung des Kennwertes benötigt zunächst einen bis zur Massekonstanz getrockneten Prüfkörper. Seine Länge wird bei Raumtemperatur und, nach definiertem Aufheizen, bei  $100^\circ \text{ C}$  mittels Dilatometer gemessen (Abb. 38). Der lineare Koeffizient der thermischen Ausdehnung zwischen den Temperatur-extremwerten wird als unitäre Längenänderung bei einer Änderung der Temperatur von  $1^\circ \text{ C}$  angegeben.

Die Berechnung des Koeffizienten ergibt sich dann aus der Ausgangslänge der Probe bei Raumtemperatur, der Längenänderung bei Erwärmung und der Temperaturdifferenz. Sie erfolgt nach der Formel:

$$\beta = l / l_0 \cdot (l - l_0) / (t - t_0)$$

- l Länge des Probekörpers im erwärmten Zustand [mm]
- $l_0$  Länge des Probekörpers bei Raumtemperatur [mm]
- t Temperatur des Probekörpers im erwärmten Zustand [ $^\circ\text{C}$ ]
- $t_0$  Raumtemperatur [ $^\circ\text{C}$ ]

Proben	Probenlänge $l_0$	Dehnung $l - l_0$	Ausdehnungs-koeffizient $\beta$
1a/313	47,45	22	5,80
1b/20	91,55	43	5,87
1b/99	81,20	39	6,00
2/57	67,70	40	7,39
2/126	97,10	45	5,79
3/28	72,30	41	7,09
3/65	59,85	33	6,89
4/40	91,00	50	6,87
5/34	84,60	44	6,50
6/50	62,60	29	5,79

Tab. 10. Untersuchungsergebnisse zur thermischen Dehnung der Leithalke. Abkürzungen:  $l_0$  – Länge des Probekörpers [mm],  $l - l_0$  – Dehnung [µm],  $\beta$  – Ausdehnungskoeffizient [ $10^{-6}/^\circ \text{ K}$ ].

Das Ausmaß thermischer Dehnung wird durch das Gefüge eines Gesteins, der Korngröße der an seinem Aufbau beteiligten Gemengteile (je grobkörniger ein Gestein, desto größer ist seine thermische Dehnung) und den Anteil an thermisch sensiblen Mineralen (beispielsweise Quarz) bestimmt. Sandstein hat im Allgemeinen (siehe ÖNORM B 3129) einen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von 0,4 bis 0,6 mm/m/ $100^\circ \text{ C}$ , Kalkstein von 0,3 bis 0,7 mm/m/ $100^\circ \text{ C}$ . Mit Werten zwischen  $5,8 \cdot 10^{-6}$  und  $7,4 \cdot 10^{-6}$  liegen die untersuchten Gesteinsarten im für Kalksteine üblichen Bereich (Tab. 10).  $5,8 \cdot 10^{-6}$  bedeutet, dass sich ein Körper mit einer Länge von 1 m bei einer Erwärmung um  $100^\circ \text{ C}$  um 0,58 mm ausdehnen würde.

Der Kennwert der Kalkbrekzie (c) weist aufgrund ihres größeren Kornaufbaus etwas höhere Werte auf. Quarz hat wegen seiner geringen Verbreitung in den Proben höchstens nachrangige Bedeutung zur Ausdehnungsentwicklung.



## Zusammengefasste Ergebnisse

Die Ergebnisse der an den Inschriftenfragmenten durchgeführten technischen Gesteinsprüfungen zeigen durch ihre Wechselbeziehungen, dass die ermittelten Kennwerte bestimmte Materialeigenschaften der beteiligten Leithakalke als Bewertungskriterien für Restaurierungsmaßnahmen etc. in zufriedenstellendem Ausmaß beschreiben. Zwar ist es bedauerlich, dass der ursprünglich dafür vorgesehene Untersuchungsrahmen wegen unzureichender Probenverfügbarkeit nicht eingehalten werden konnte, die Ergebnisse der angewendeten Methoden reichen aus der Sicht der Autoren aber aus, die materialspezifischen Besonderheiten der als Inschriftenträger verwendeten Werksteine grundsätzlich zu beurteilen und auf dieser Basis eine Art von Datenbank für zukünftige Tätigkeiten im Rahmen von Denkmalpflege anzulegen.

Von den ermittelten gesteintechnischen Parametern korrelieren Porosität, Ultraschallgeschwindigkeit, Wasseraufnahme, Rohdichte und Spaltzugfestigkeit erwartungsgemäß (Abb. 39–41). Für weiterführende, statistisch abgesicherte Aussagen ist die Datenmenge zu gering, sie genügt jedoch, um grundsätzliche Überlegungen zur Auswahl von Gesteinsarten aus der näheren Umgebung des Pfaffenberges für bestimmte Einzelbauteile der Tempelanlage, etwa zum Einmeißeln von Inschriften, anzustellen.

Je nach Verwendungsart eines Gesteins für bauliche Zwecke sind bestimmte gesteintechnische Eigenschaften erforderlich. Ein Bildhauersandstein sollte beispielsweise feinkörnig, homogen, ungeschichtet und gleichkörnig sein. Für leichtere Bearbeitung ist auch verhältnismäßig geringe Festigkeit erwünscht, bei dennoch vorhandener Verwitterungsresistenz.

Von den genannten Leithakalktypen wurden zur Herstellung von Inschriftentafeln eher weiche Gesteine bevorzugt, die sich durch hohe Porosität, geringe Rohdichte und auch durch geringere Festigkeit auszeichnen (Typ (a) Kalksandstein, fein- bis mittelkörnig, Typ (c) Kalkbrekzie/Kalkrudit, feinkörnig). Dichte, festere und damit schwerer zu bearbeitende Gesteinsarten (Typ (b) Fossilkalk, dicht) fanden wenig Beachtung. Die ebenso nur untergeordnete Nutzung von Typ (d) Lithothamnienkalk ist mit dem Auftreten von Rotalgenknollen und der damit verbundenen Inhomogenität des Gesteins in Zusammenhang zu bringen. Warum Typ (e) Kalkoolith, als Unikat unter den Inschriftenträgern, mit Kalksandstein ähnlichen Kennwerten nicht häufiger Verwendung fand, bleibt offen. Vielleicht war es seine geringe Verfügbarkeit, die einen Einsatz zur Herstellung von Inschriftentafeln begrenzte.

Bezüglich Verwitterungsbeständigkeit dieser Kalksteine sind Korngefüge, Art des Bindemittels, die mineralogische Zusammensetzung und der Anteil löslicher Komponenten, sowie die Festigkeit, die Porositätsentwicklung, das kapillare Verhalten und die Wasseraufnahme der Gesteine entscheidende Kennwerte. Bis auf Typ (b) Fossilkalk, dicht, sind alle anderen Gesteinsarten durch hohe Porosität, geringe Rohdichte, hohe Wasseraufnahme und generell geringere Festigkeit gekennzeichnet und dementsprechend als verwitterungsempfindlich einzustufen. Besonders gilt dies für Kalksandsteine und den Kalkoolith, die durch ih-

ren Gehalt an Feldspat und Glimmer bzw. an Tonmineralen die Verwitterungsempfindlichkeit zusätzlich begünstigen.

Vor Durchführung von Restaurierungsarbeiten an Inschriftenfragmenten sollten vor allem diese zuletzt genannten Ergebnisse der technischen Gesteinsuntersuchungen als richtungsweisend eingestuft werden. Aufgrund dieser Kennwerte können beispielsweise geeignete Steinschutz- und Konservierungsmittel gewählt und durch systematischen Vergleich von Kontrollmessungen auch konkrete Aussagen zur Qualität und Dauerhaftigkeit von ausgeführten Konservierungsmaßnahmen abgeleitet werden.

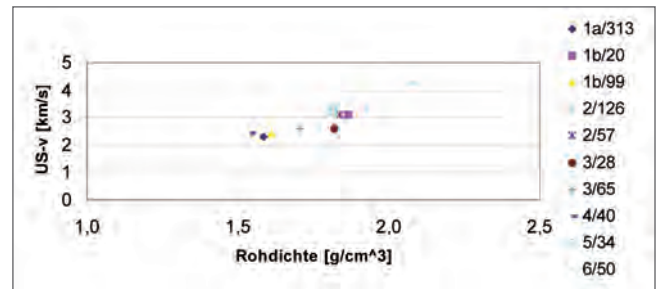


Abb. 39. Beziehung zwischen Rohdichte und Ultraschallgeschwindigkeit.

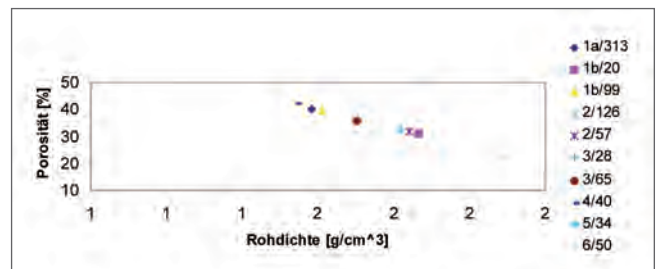


Abb. 40. Beziehung zwischen Rohdichte und Porosität.

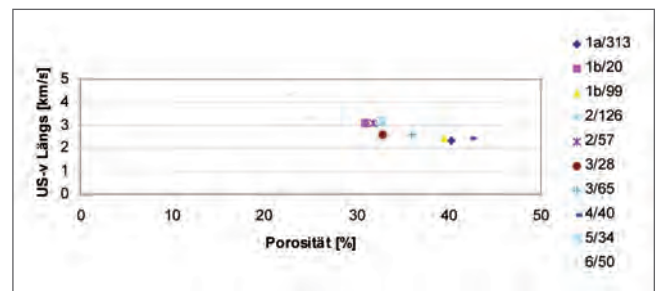


Abb. 41. Beziehung zwischen Porosität und Ultraschallgeschwindigkeit.

Für diese drei Abbildungen gilt: Je höher die Dichte des Gesteins, desto schneller ist die Ultraschallgeschwindigkeit entwickelt. Bei geringerer Dichte, also höherer Porosität, müssen mehr Poren von den Schallwellen umlaufen werden, wodurch die US-Geschwindigkeit sinkt.

## Ergänzende technische Gesteinsprüfungen

Um den sich wegen mangelnder Probenverfügbarkeit für bestimmte technische Gesteinsprüfungen ergebenden Einschränkungen wenigstens teilweise zu begegnen, wurde versucht, die Bestimmung von Druckfestigkeit und dem Schleifabrieb nach BÖHME an mit den Inskriptenträgern vergleichbarem, architektonischem Baumaterial und geeigneten Haldenfunden aus dem Bereich des Tempelbezirkes durchzuführen.

Diese Vorgangsweise wurde nach sedimentpetrografischer Prüfung und übereinstimmenden Ergebnissen mit den Proben von Inskriptenträgern als zulässig erachtet. Beide Parameter sind im Hinblick auf die gegenständliche Problematik als kritische Kennwerte ausgewiesen.

### Architektonisches Baumaterial

#### Druckfestigkeit

Nach WINKLER (1997) ist die Druckfestigkeit ein allgemeiner Kennwert zur Beurteilung der Gesteinsfestigkeit und beschreibt die Widerstandsfähigkeit eines Gesteins gegenüber Bruch bei mechanischer Belastung durch Druck. Die Durchführung der Festigkeitsbestimmung erfolgte, etwas modifiziert, nach ÖNORM B 3124/1 (Abb. 42). Zur Prüfung werden entsprechend dimensionierte Bohrkernbe benötigt, die im wassergesättigten und trockenen Zustand in einer Universalprüfmaschine solange einem konstant zunehmenden Druck ausgesetzt werden, bis ein Bruch des Zylinders eintritt.

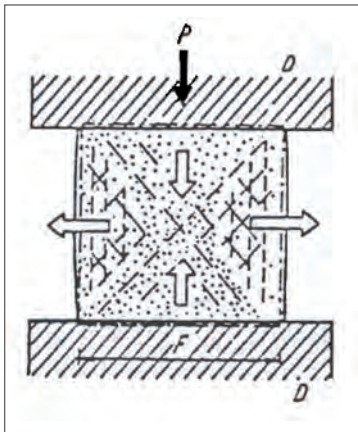


Abb. 42.  
Versuchsaufbau zur Druckfestigkeitsprüfung.  
Abkürzungen: P – einwirkende Drucklast, D – Druckplatten, F – Prüffläche (Querschnittsfläche).

Aus der zum Materialbruch führenden Kraft und der berücksichtigten Prüfkörpergeometrie wird die Druckfestigkeit nach folgender Formel berechnet:

$$\sigma_D = F_{D_{\max}} / A$$

$\sigma_D$  Druckfestigkeit [MPa]

$F_{D_{\max}}$  Bruchlast [N]

A Querschnittsfläche des Prüfkörpers [mm<sup>2</sup>]

Die Druckfestigkeiten aller gemessenen Proben (Tab. 11) sind im trockenen Zustand höher als im wassergesättigten, da die mit zunehmendem Druck auftretenden Spannungen nicht in den mit Wasser gefüllten Porenraum ausweichen können.

Nach ÖNORM B 3129 liegen die Richtwerte für Druckfestigkeit bei dichten Kalksteinen üblicherweise zwischen 80 und 180 MPa, bei porösen zwischen 20 und 90 und betragen bei Kalksandsteinen 15 bis 50 MPa. Die Messwerte der Leithakalke passen grundsätzlich in diese Trendvorgabe, sie liegen aber deutlich unter den Erfahrungswerten. Probe „2-H“ entspricht dem Typ (c) Kalkbrekzie/Kalkrudit, alle übrigen sind unterschiedlich zusammengesetzte Kalksandsteine vom Typ (a). Mit solchen Druckfestigkeiten sind die Gesteine nicht geeignet, höhere Druckbeanspruchungen auszuhalten.

Proben	WA [Gew. %]	Rohdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]	P [%]
1a-H	24,9	1,5	2,7	44,8
1b-H	17,6	1,7	2,7	38,2
2-H	8,9	2,2	2,7	19,1
3-H		1,8	2,7	33,5
5-H	17,1	1,7	2,6	33,3
Proben	US L [km/s]	US Q [km/s]	wassersatt [Mpa]	trocken [Mpa]
1a-H	1,5	1,9		4,7
1b-H	2,5	2,8	6,1	8,8
2-H	3,7	4,0	7,2	19,3
3-H	2,1	2,6		
5-H	3,1	3,2	5,7	10,5

Tab. 11.  
Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an architektonischem Baumaterial sowie ihrer Kennwerte betreffend Wasseraufnahme, Rohdichte, Reindichte, Porosität und Ultraschallgeschwindigkeit.  
Abkürzungen: WA – Wasseraufnahme [Gew. %], P – Porosität [%], US L – Ultraschallgeschwindigkeit längs zur Anisotropie [km/s], US Q – Ultraschallgeschwindigkeit quer zur Anisotropie [km/s].

### Haldenfunde

#### Schleifabrieb nach BÖHME

Die Härte von Gesteinen lässt sich im Gegensatz zur Härte von Mineralen nur durch indirekte Messmethoden bestimmen, beispielsweise als Widerstand gegen Abrieb. Diese Vorgangsweise gibt Auskunft über die Festigkeit der Kornbindung in einem Gestein.



Abb. 43.  
BÖHME-Schleifscheibe

Die Bestimmung der Abriebfestigkeit erfolgte nach dem BÖHME-Verfahren gemäß ÖNORM B 3126/2 (Abb. 43).

Als Schleifverlust gilt der nach 16 Prüfperioden ermittelte Volumensverlust des Probekörpers (22 Umdrehungen bilden eine Prüfperiode), der nach folgender Formel berechnet wird:

$$\Delta V = \Delta M / \rho_R$$

$\Delta V$  Volumensverlust [cm<sup>3</sup>]  
 $\Delta M$  Masseverlust nach 16 Prüfperioden [g]  
 $\rho_R$  Rohdichte [g/cm<sup>3</sup>]

Der Schleifverschleiß einer Gesteinsprobe [cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>2</sup>] wird schließlich durch den arithmetischen Mittelwert der gemessenen Probekörper ausgedrückt.

Haldenproben	Leithakalktyp	$\rho_R$ [g/cm <sup>3</sup> ]	BÖHME-Abrieb [cm <sup>3</sup> /50 cm <sup>2</sup> ]
1	3	2,21	32,30
2	4	1,65	39,10
3		2,47	12,60
4		2,33	28,70
6	1	1,86	41,32
7	3	2,26	34,30

Tab. 12.  
Ergebnisse zum BÖHME-Versuch.

Die Richtwerte für den Schleifabrieb nach BÖHME liegen bei dichten Kalken zwischen 15 und 40 cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>2</sup> und bei porösen Kalken zwischen 25 und 60 cm<sup>3</sup>/50 cm<sup>2</sup> (ÖNORM B 3129). Die in Tabelle 12 angeführten Untersuchungsergebnisse erfassen im Wesentlichen das gesamte Spektrum der als Inschriftenträger festgestellten Leithakalktypen, wobei die Bandbreite der Verschleißwerte durch Probe 6, einem Kalksandstein mit hohem Abrieb, und Probe 3, einem dichten Fossilalk mit geringem Abrieb, definiert ist.

Mit diesen Ergebnissen rechtfertigt der BÖHME-Test seine Akzeptanz als wichtiges Verfahren zur Ermittlung eines spezifischen technischen Kennwertes, der im Rahmen der gegenständlichen Problematik geeignet ist, als eine Art von Summenparameter beispielsweise die Verwitterungsempfindlichkeit von Inschriftenträgermaterial zu charakterisieren.

## Zusammenfassende Beurteilung der Untersuchungsergebnisse

Grundsätzliches Ziel dieser Arbeit war es, ausgewählte Fragmente von Inschriftenträgern aus dem römischen Tempelbezirk auf dem Pfaffenberg bei Carnuntum petrographisch zu charakterisieren, Aussagen zur Herkunft und Qualität der zur Herstellung von Inschriftentafeln verwendeten Gesteinsarten abzuleiten und in Verbindung mit der Erarbeitung technischer Parameter auch eine Art von Datenbank für Restauratoren zu schaffen, als Grundlage beispielsweise für Restaurierungen im Rahmen von Denkmalpflege.

Nach makroskopischer Sichtung von ca. 650 Inschriftenfragmenten konnten diesen insgesamt fünf Arten von Leithakalk zugeordnet werden, die durch Korngrößenverteilung, Sortierung im Kornaufbau, Strukturen und andere Gesteinsmerkmale deutlich unterschieden sind (Tab. 13). Detaillierte Beschreibungen dieser Gesteinstypen erfolgten anschließend auf mikroskopischem und röntgenanalytischem Wege. Aussagen zum Entstehungsbereich der Leithakalke konnten vor allem unter Einbindung mikrofazieller Untersuchungen gemacht werden, wonach diese in einem flachen Schelfmeer, im Bereich der Fazieszonen 6, 7 und 8 nach WILSON (1975) entstanden sind. Die genaue Herkunft der für die Inschriftentafeln verwendeten Gesteinsarten konnte nicht eindeutig festgelegt werden. Die festgestellten sedimentpetrographischen, aber auch technischen Kennwerte der untersuchten Materialarten sprechen dafür, dass die benötigten Gesteine aus der näheren Umgebung von Carnuntum, insbesondere aus den Hainburger Bergen und aus Wolfsthal, stammen.

Die Kennwerte gesteintechnischer Eigenschaften vermitteln interessante Informationen über die Qualität der genutzten Gesteinsarten und lassen vorsichtige Schlüsse auf ihre selektive Verwendung zu (Tab. 14). Wegen mangelnder Probenverfügbarkeit an Inschriftenträgern wurden ergänzende gesteintechnische Untersuchungen auch an architektonischem Baumaterial etc. durchgeführt und in Übereinstimmung mit den an den Inschriftenträgern ermittelten Eigenschaften für vergleichbar befunden. Die zur Herstellung von Inschriftentafeln verwendeten Gesteinsarten sind hauptsächlich als poröse, weiche Kalksteine bzw. Kalksandsteine zu bewerten. Nachteilig auf die Beständigkeit dieser Gesteine wirken sich manche für ihre Bearbeitung vorteilhafte Eigenschaften aus, wie geringe Festigkeit oder hohe Porosität.

Ein weiterer Nutzen dieser Arbeit ist schließlich im Wissen um spezifische Eigenschaften der verwendeten Gesteine für Aufgaben im Rahmen von Denkmalpflege zu sehen. Die erarbeiteten Daten sollten für Restauratoren im Zuge anfallender Kornservierungsmaßnahmen bzw. bei der Auswahl geeigneter Gesteine für Ausbesserungszwecke eine wesentliche Grundlage sein, diesbezügliche Aufgaben erfolgreich durchzuführen.

Probe	Typ	Nomenklatur		Mineralogie [%]				
		FOLK (1962)	DUNHAM (1962)	Cc	Qz	Gl	Fsp	Dol
1a/313	1	BS, Qf	G, Qf, bkl	73	19	6	2	0
1b/20	1	BS, Qf	G, Qf, bkl	92	5	0	3	0
1b/99	1	BS, Qf	G, Qf, bkl	98	1	1	0	0
2/57	3	BS	G-R, bkl	99	1	0	0	0
2/126	2	BS	G-W, bkl	99	1	0	0	0
3/28	3	BS	G-R, bkl	100	0	0	0	0
3/65	3	BS	G-R, bkl	99	1	0	0	0
4/40	4	BS	G, bkl	100	0	0	0	0
5/34	3	BS	G-R, bkl	98	1	0	0	1
6/50	5	OS	G, oo	77	8	12	3	0

Tab. 13.

Zusammengefasste Ergebnisse der sedimentpetrografischen Untersuchungen an den Inschriftenträgern.

Abkürzungen: 1 – Kalksandstein, 2 – Fossilalkalk, 3 – Kalkbrekzie/Kalklutit, 4 – Lithothamnienkalk, 5 – Kalkoolith, BS – Biosparit, OS – Oosparit, G – Grainstone, W – Wackestone, R – Rudstone, bkl – bioklastisch, Qf – Quarz führend, oo – oolithisch, Cc – Kalzit, Qz – Quarz, Gl – Glimmer, Fsp – Feldspat, Dol – Dolomit, max. KG – maximale Korngröße, Ø KG – durchschnittliche Korngröße, FA – Fossilanteil, ZG – Zementationsgrad, sg – sehr gut, m – mittel, schl – schlecht, sschl – sehr schlecht, - - sehr gering, + - gering, ++ - mittel, +++ - hoch.

#### Inschriftenfragmente

Probe	Typ	WA [Gew.%]	w [kg/m <sup>2</sup> h]	β [10 <sup>-6</sup> /°K]	KS [mm/min]	HD [%]	ρ <sub>R</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]
1a/313	1	10,3	42,5	5,8	23,5	0,1	1,6
1b/20	1	14,8	54,1	5,9	6,9	0,0	1,9
1b/99	1	22,0	67,3	6,0	7,3	0,0	1,6
2/57	3	15,5	26,9	7,4	2,2	0,3	1,8
2/126	2	9,5	7,4	5,8	0,2	0,1	21,1
3/28	3	15,3	43,1	7,1	5,5	0,0	1,8
3/65	3	17,8	42,4	6,9	5,5	0,0	1,7
4/40	4	23,7	43,0	6,9	2,5	0,0	1,5
5/34	3	16,4	14,5	6,5	0,4	0,2	1,8
6/50	5	12,0	56,1	5,8	15,5	0,0	1,9

#### Haldenmaterial

Probe	Typ	BA [cm <sup>3</sup> /50cm <sup>2</sup> ]	ρ <sub>R</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]
1	3	32,3	2,2
2	4	39,1	1,7
3		12,6	2,5
4		28,7	2,3
6	1	41,3	1,9
7	3	34,3	2,3

#### Architektonisches Material

Probe	Typ	WA [Gew.%]	ρ <sub>R</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	ρ <sub>0</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	P [%]	US L [km/s]	US Q [km/s]	σ <sub>Ds</sub> [Mpa]	σ <sub>Dt</sub> [Mpa]
1a-H	1	24,9	1,5	2,7	44,8	1,5	1,9		4,7
1b-H	1	17,6	1,7	2,7	38,2	2,5	2,8	6,1	8,8
2-H	3	8,9	2,2	2,7	19,1	3,7	4,0	7,2	19,3
3-H			1,8	2,7	33,5	2,1	2,6		
5-H	3	17,1	1,7	2,6	33,3	3,1	3,2	5,7	10,5

Tab. 14.

Zusammengefasste Ergebnisse der ermittelten gesteintechnischen Kennwerte an den Inschriftenträgern.

Abkürzungen: WA – Wasseraufnahme, w – Wasseraufnahmekoeffizient, β – Thermischer Ausdehnungskoeffizient, KS – Kapillare Sauggeschwindigkeit, HD – Hygrische Dehnung, ρ<sub>R</sub> – Rohdichte, ρ<sub>0</sub> – Reindichte, P – Porosität, US L – Ultraschallgeschwindigkeit, längs, US Q – Ultraschallgeschwindigkeit, quer, σ<sub>s</sub> – Spaltzugfestigkeit, Messung senkrecht zur Anisotropie, σ<sub>F1</sub> – Messung parallel zur Anisotropie, σ<sub>F2</sub> – Messung Senkrecht zu den Kanten der Schichtebene, BA – BÖHME Abriebfestigkeit, σ<sub>Ds</sub> – Druckfestigkeit, wassergesättigt, σ<sub>Dt</sub> – Druckfestigkeit, trocken.

[mm]						
max. KG	Ø KG	Sortierung	Orientierung	FA	ZG	Porosität
0,6	0,3	sg	+++	++	+	+++
0,7	0,2	sg	+	++	++	+++
0,9	0,4	sg	+++	++	++	+++
3	1	m-schl	++	+++	+++	++
3	1	schl	-	+++	+++	+
10	2	m	+++	+++	++	+++
65	2	m-schl	+++	+++	++	+++
4	0,4	sschl	-	+++	+	+++
4	0,6	schl	+	+++	+	++
1	0,4	sg	-	+	++	+++

$\rho_0$ [g/cm <sup>3</sup> ]	P [%]	US L [km/s]	US Q [km/s]	$\sigma_z$ [Mpa]	$\sigma_{F1}$ [Mpa]	$\sigma_{F2}$ [Mpa]
2,7	40,3	2,3	2,5	0,4	0,7	
2,7	30,9	3,1	4,3	2,0		
2,7	39,5	2,4	3,5	0,3	0,9	
2,7	31,9	3,1	4,2	0,5	2,0	
2,7	22,8	4,3	5,9	1,1	0,5	3,3
2,7	32,9	2,6	3,9	0,3	0,9	
2,7	36,0	2,6	3,6	0,4	0,8	1,8
2,7	42,4	2,4	3,1	0,2	1,2	
2,7	32,5	3,2	4,4	0,5	0,3	2,0
2,6	25,1	3,3	4,6	0,8	2,9	

## Quellenverzeichnis

### Literatur

- BRINDLEY, G.W. & BROWN, G. (1980): Crystal structures of Clay minerals and their X-ray identification. – Mineralogical Society, Monograph **5**, 495 S., London.
- DAVIES, J.L. (1980): Roman military deployment in Wales and the Marches from Claudius to the Antonines. – In: HANSON, W.S. & KEPPIE, L.J.F. (Eds.): Roman Frontier Studies 1979 – papers presented to the 12<sup>th</sup> International Congress of Roman Frontier Studies, British archaeological reports. – BAR, Intern. Series, **71**, 255–277, Oxford.
- DE QUERVAIN, F. (1967): Technische Gesteinskunde. – Mineralogisch-Geotechnische Reihe, 2. Auflage, 261 S., Basel-Stuttgart (Birkäuser).
- DICKSON, J.A.D. (1965): A modified staining technique for carbonates in thin section. – Nature, **205**, 587, London.
- DUNHAM, R.J. (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. – Mem. Amer. Ass. of Petrol. Geol., **1**, 108–121, Tulsa.
- EVAMY, B.D. & SHERMAN, D.J. (1962): The applications of staining techniques to the study of diagenesis in limestones. – Proc. Geol. Soc., **1599**, 102, London.
- FLEISCHER, G. (2002): Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege. – Diss. Technische Universität Wien, 184 S., Wien.
- FLÜGEL, E. (1978): Mikrofazielle Untersuchungsmethoden von Kalen. – 454 S., Berlin (Springer).
- FOLK, R.L. (1962): Spectral Subdivision of Limestone Types. – Mem. Amer. Ass. of Petrol. Geol., **1**, 62–84, Tulsa.
- FUCHS, W. & GRILL, R. (1984): Geologische Karte von Wien und Umgebung 1:200.000. – Geol.B.-A., Wien.
- JANOSCHEK, R. (1951): Das inneralpine Becken. – In: SCHAFER, F.X. & GRILL, R. (1951): Geologie von Österreich, 2. Aufl., 526–693, Wien (Deuticke).
- JOBST, W. (1978): 11. Juni 172 n. Chr. – Der Tag des Blitz- und Regenwunders im Quadenlande. – Sitzungsber. Österr. Akad. d. Wiss., Philosophisch-Historische Kl., **335**, 35 S., Wien.
- JOBST, W. (1992): Carnuntum. Das Erbe Roms an der Donau. – Katalog zur Ausstellung des Archäologischen Museums Carnuntum in Bad Deutsch-Altenburg AMC, 536 S., Wien (Amt d. NÖ Landesregierung, Abt. III/2).
- JOBST, W. (1996): Archäologischer Park Carnuntum – Tätigkeitsbericht 1994. Carnuntum Jahrbuch 1995, Zeitschrift f. Archäologie und Kulturgeschichte des Donauraumes, Wien (Österr. Akad. d. Wiss.).
- JOBST, W. (1998): Carnuntum: Führer. – 64 S., Wien (ÖBV Pädagogischer Verlag).
- KIESLINGER, A. (1949): Die Steine von St. Stephan. – 486 S., Wien (Herold).
- MAYR, N. (2003): Zur Petrologie und ausgewählten technologischen Eigenschaften der Inschriftentafeln des römischen Tempelbezirkes auf dem Pfaffenberg bei Carnuntum. – Dipl. Arb., Universität Wien, 82 S., Wien.
- MOORE, D.M. & REYNOLDS, R.C. JR. (1989): X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. – 332 S., Oxford (Univ. Press).
- PISO, I. (2003): Die Inschriften. – In: JOBST, W. (Ed.): Das Heiligtum des Jupiter Optimus Maximus auf dem Pfaffenberg/Carnuntum – Der römische Limes in Österreich, **41**, 176 S., Wien (Verlag ÖAW).
- ROHATSCH, A. (1996): Forschungen zur historischen Gesteinsverwendung in Österreich. – Restauratorenblätter, **17**, zum Thema 20 Jahre Steinkonservierung 1976–1996, Bilanz u. Perspektiven, M & C, Klosterneuburg–Wien.
- ROHATSCH, A. (1997): Gesteinskunde in der Denkmalpflege unter besonderer Berücksichtigung der jungtertiären Naturwerksteine von Wien, Niederösterreich und dem Burgenland. – Habilitationsschrift BOKU, VII + 284 S., Wien.
- SCHNABEL, W. (2002): Geologische Karte von Niederösterreich 1:200.000 mit Kurzerläuterung. – 47 S., Geol. B.-A., Wien.
- SCHULTZ, L.G. (1964): Quantitative interpretation of mineralogical composition from X-ray and chemical data for the Pierre Shale. – USGS Prof. Paper, **391-C**, C1-C31, Washington D.C.
- TOLLMANN, A. (1977): Geologie von Österreich. Band 1: Die Zentralalpen. – 766 S., Wien (Deuticke).
- TOLLMANN, A. (1985): Geologie von Österreich. Band 2: Außerzentralalpiner Anteil. – 710 S., Wien (Deuticke).
- TUCKER, E. (1985): Einführung in die Sedimentpetrologie. – 265 S., Stuttgart (Enke).
- WESSELY, G. (1958): Geologische Neuaufnahme des Tertiärs und Quartärs der Hainburger Berge und angrenzender Gebiete. – Diss. Univ. Wien, 291 S., Wien.
- WESSELY, G. (1961): Geologie der Hainburger Berge. – Jb. Geol. B.-A., **104**, 273–349, Wien.
- WILSON, J.L. (1975): Carbonate Fazies in Geologic History. – 471 S., New York (Springer).
- WINKLER, E.M. (1997): Stone in architecture: Properties, durability. – 3<sup>rd</sup> edition, 313 S., Berlin (Springer).

### Normen und Richtlinien

Anmerkung: Da zwischen dem Untersuchungszeitraum und der Drucklegung des vorliegenden Beitrags das nationale Normenwerk teilweise auf europäische Normen umgestellt wurde, werden die neuen Normen in Klammer angeführt.

DIN 52 328: Prüfung von Glas; Bestimmung des Längenausdehnungs-Koeffizienten.

ÖNORM EN 1925: Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung.

ÖNORM EN 14579: Prüfverfahren für Naturstein: Bestimmung der Geschwindigkeit der Schallausbreitung.

ÖNORM B 3121: Prüfung von Naturstein: Reindichte, Rohdichte, Schüttdichte (ÖNORM EN 1936).

ÖNORM B 3122: Prüfung von Naturstein: Wassergehalt und Wasseraufnahme (ÖNORM EN 13755).

ÖNORM B 3124/1: Prüfung von Naturstein: Mechanische Gesteinseigenschaften: Einaxiale Zylinderdruckfestigkeit (ÖNORM EN 1926).

ÖNORM B 3124/4: Prüfung von Naturstein: Mechanische Gesteinseigenschaften: Einaxiale Zugfestigkeit; Spaltzugfestigkeit.

ÖNORM B 3126/2: Prüfung von Naturstein und anorganischen Baustoffen: Verschleißprüfung; Schleifscheibenverfahren nach Böhme (ÖNORM EN 14157).

ÖNORM B 3129: Natürliche Gesteine, Richtwerte für die Auswahl.