

Petrophysikalische Eigenschaften einer Auswahl von Bausteinen aus Deutschland und ihr Bezug zur Petrographie dieser Gesteine

Petrophysical properties of a selection of dimensional stones from Germany in relation to the petrography of these rocks

Siegfried Grunert¹ & Jana Szilagyi²

¹ Lachenweg 8, 01640 Coswig, Deutschland

² Closewitzer-Straße 42, 07743 Jena, Deutschland

Kurzfassung

An 14 Sedimentgesteinen, die seit langer Zeit als bedeutende Bau- und Dekorsteine genutzt werden, sind die thermischen und hygrischen Eigenschaften sowie Merkmale des Gefüges gemessen worden. Die Ergebnisse und die Untersuchungsverfahren werden dargestellt, Fundstellen und Petrographie der Gesteine beschrieben. Zusammenhänge zwischen den petrographischen und den petrophysikalischen Eigenschaften werden diskutiert.

Abstract

The thermal and hygric properties as well as the characteristics of the structure were measured on 14 sedimentary rocks, which have been used as important decoration and building material for a long time. The results and methods of the analysis will be described, places of discovery and the petrography of the rocks explained. Links between the petrographical and the petrophysical properties will also be discussed.

1. Einführung

1.1. Der Auftrag

Historische Bauten erfüllen uns mit Ehrfurcht. Geschichtsträchtigkeit und Schönheit sind es meist, die Bauwerken den Denkmalcharakter verleihen. Die Erhaltung der Baudenkmale ist eine kulturelle Aufgabe, die alle Generationen verpflichtet, nach bestem Wissen und Können zu handeln. Sie verbindet Historiker, Kunstwissenschaftler und Künstler mit den Bauschaffenden, die letztlich technische Maßnahmen zur Erhaltung projektieren und ausführen müssen. Wichtige Voraussetzung für bauliche Maßnahmen ist die Kenntnis der historischen Baustoffe. Die Erfahrungen der Bauleute vergangener Zeiten sind vergessen, und so müssen wir heute dieses Defizit dadurch schließen, dass wir die Probleme mit modernen

wissenschaftlichen Verfahren durchdringen. Das gilt besonders für den Baustoff „Naturstein“, und damit ist das Forschungsfeld der Mineralogie gefragt.

Die vorliegende Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Forschung und Technik gefördert. Sie ist Bestandteil des Projektes „Mitwirkung bei der Verbesserung von Methoden zur Diagnose und Therapie von Tragstabilitätsschäden/-schwächen kritischer Mauerwerkspartien an Baudenkmalern (BAU 7025 B)“. Das Forschungsprogramm ist mit dem Ziel, fundierte Grundlagen für die Bauwerkserhaltung in der Denkmalpflege zu schaffen, aufgenommen worden. Im Rahmen dieses Programms wurden Gesteine, die als Bausteine häufig genutzt worden sind, als „Leitgesteine“ benannt. An diesen Gesteinen sollten exemplarisch baurelevante Untersuchungen durchgeführt werden. Während die mechanischen Eigenschaften der Gesteine vielfach gemessen worden sind, besteht bei den thermischen und hygrischen Eigenschaften noch echter Informationsbedarf. An 14 „Leitgesteinen“, die

zu den am häufigsten in Deutschland an Baudenkmalen verwendeten gehören, sollten neben Reindichte und Rohdichte, kapillare Wasseraufnahme, Wärmedehnung und Wärmeleitfähigkeit bestimmt werden. Herr Prof. A. P. Boué hatte im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung und Technik, nach Beratung mit der AG Natursteine, die zu untersuchenden Gesteine und die zu messenden Merkmale festgelegt. Die mineralogisch-petrographischen und die petrophysikalischen Untersuchungen führte Frau Dipl.-Geoln. J. Szilagy an der Professur Angewandte Geologie des Institutes für Geotechnik der TU Dresden unter Leitung von Herrn Prof. S. Grunert von 1992 bis 1995 durch; beteiligt waren das Baustofflabor am Institut für Baustoffe und Tragwerke der TU Dresden und die Materialprüfanstalt (MPA) Dresden (jetzt BAU-TEST GmbH) (Szilagy 1995). Allen, die diese Arbeit durch finanzielle Förderung, sachkundigen Rat und technische Unterstützung ermöglichten, danken die Autoren aufrichtig.

1.2. Bereitstellung der Proben

Das zu untersuchende Probenmaterial wurde von der Firma Pressbau Oberhausen als Versuchskörper in den vom Auftragnehmer angegebenen Abmessungen, d. h. als Prismen, Würfel und Platten, zur Verfügung gestellt. Auch die Bergung des Materials war von dieser Firma ausgeführt worden. Da der Auftraggeber Wert darauf legte, dass die Untersuchungen an Materialien aus Bauwerken durchgeführt werden, an denen denkmalpflegerische Arbeiten vorgesehen sind, wurde das Probenmaterial zumeist von Ausbausteinen gewonnen. Zur Realisierung aller geforderten Messungen war ein Gesamtvolumen von mindestens 2,5 m³ Gestein in bearbeitbaren Blöcken je Probe erforderlich. War die Gewinnung des Materials an dem Denkmal selbst nicht möglich, wurde nach einem Austauschbauwerk gesucht oder auch auf bruchfrisches Material zurückgegriffen. Bei der Bewertung der gemessenen Daten sollten dieser Aspekt beachtet und die Messwerte nicht kritiklos auf bruchfrisches Material übertragen werden.

In Tabelle 1 sind die Proben aufgelistet. Bezeichnungen und Entnahmestellen der Proben entsprechen den Angaben der Fa. Pressbau. Die benutzten Probenbezeichnungen sind Handels- oder Lokalnamen und keine geologischen oder petrographischen Bezeichnungen. Sie werden im weiteren Text beibehalten. Alle genannten Ge-



Abb. 1: Die Abbaustellen der untersuchten Gesteine.
Fig. 1: Mining places of the examined rocks.

steine kommen in verschiedenen Varietäten vor. Bei der Probenahme wurde offenbar darauf geachtet, dass von dem jeweiligen Gestein die charakteristischste Varietät zur Untersuchung ausgewählt worden ist. In der Übersichtskarte (Abb. 1) sind die Herkunftsorte der Proben eingetragen.

2. Beschreibung der untersuchten Gesteine

2.1. Petrographische Untersuchungsmethoden

Die petrographischen Untersuchungen dienen zunächst der Kennzeichnung der Proben. Da es sich bei Gesteinen um Mehrstoffsysteme handelt, deren einzelne Bestandteile unterschiedliche physikalische Eigenschaften besitzen und deren Zusammenwirken die physikalischen Ge-

Tab. 1: Die untersuchten Natursteine.**Tab. 1:** The examined natural stones.

Probenbezeichnung	Entnahmestelle
Anröchter Dolomit	Anröchter Dolomit-Steinbrüche
Bucher Sandstein	Steinbruch nordwestlich Buch
Cottaer Sandstein	Kunstakademie Dresden
Ihrlerteiner Grünsandstein	Ihrlerteiner Sandsteinbruch
Krensheimer Muschelkalk	Kölner Dom
Muschelkalk Halberstadt	Dom St. Stephan u. St. Sixtus, Halberstadt
Obernkirchner Sandstein	Hapag-Lloyd Haus, Hamburg
Postaer Sandstein	Hauptbahnhof Dresden
Ruhrsandstein	Alte Post, Herdecke
Sander Schilfsandstein	Steinbruch Sand am Main
Schaumkalk Naumburg	Dom St. Peter u. Paul, Naumburg
Udelfanger Sandstein	Udelfanger Sandsteinbruch
Wüstenzeller Sandstein	Steinbruch Wüstenzell
Zeitzer Sandstein	Gut Raba, Gut Röden

steinseigenschaften bestimmen, ist die Beschreibung des Stoffbestandes wichtig. Daneben sind auch Struktur und Textur zu berücksichtigen. Für die petrographische Charakterisierung der Gesteine wurden optische Methoden (Makro- und Mikroskopie), Röntgenanalyse und thermische Analyse angewandt. Dabei wurde eine auf das Wesentliche konzentrierte Darstellung angestrebt.

Röntgenanalyse und thermische Analyse sind als ergänzende Methoden zur optischen Beschreibung zum Einsatz gekommen, um die qualitative Bestimmung des Gesamtmineralbestandes abzusichern. Für beide Verfahren wurden Pulverpräparate in der Korngröße <0,063 mm hergestellt durch vorsichtiges Zerkleinern im Achatmörser, Absieben und erneutes Zerkleinern des Siebrückstandes.

Die Ergebnisse der Röntgenanalyse und der thermischen Analyse werden bei der Darstellung der Methodik jeweils mit diskutiert. Die optischen Beobachtungen wurden in die Beschreibung der Gesteine eingearbeitet.

Röntgenanalyse: Bei der Röntgendiffraktometrie werden die Röntgenstrahlen am Kristallgitter der Minerale gebeugt. Die Identifizierung der Minerale erfolgt durch Messung der Beugungswinkel der Reflexe (gebeugte Strahlen) und deren Intensität. Gemessen wurde mit dem SIEMENS Diffraktometer D 5000.

Aufnahmebedingungen: CuK α -Strahlung, Ni-Filter, WL 1.5406, variable Divergenzblende. Pulverpräparate

Gesamtprobe. Analytiker: Herr Dr. Ch. Henrichs. Die Ergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Da die Nachweisgrenze der Röntgenanalyse bei ca. 5 Masse-% liegt, sind Minerale, die in geringerer Menge enthalten sind, nur bedingt erfasst worden.

Sandsteine: Im Postaer Sandstein, Obernkirchner und Bucher Sandstein tritt neben Quarz (Reflexe: 20,8 (100); 26,6 (101)) Kaolinit auf (Reflexe: 12,4 (001); 24,9 (002)). Dem Sander Schilfsandstein, Udelfanger Sandstein, Wüstenzeller Sandstein und Ruhrsandstein sind außer Quarz, Chlorit (Reflexe: 6,2 (001); 12,5 (002)) und Muskovit (Reflex: 8,8 (001)) gemeinsam. Im Cottaer Sandstein ist neben Quarz Kaolinit enthalten. Ferner sind im Udelfanger Sandstein, Wüstenzeller und Cottaer Sandstein Kalifeldspat (Reflex: 27,5 (002)), im Ruhrsandstein Kalifeldspat und Albit (Reflex: 27,9 (002)), im Sander Schilfsandstein Albit nachweisbar.

Karbonatgesteine: Der Ihrlerteiner Grünsandstein enthält neben Quarz sowohl Calcit als auch Dolomit. Krensheimer Muschelkalk, Muschelkalk Halberstadt und Schaumkalk Naumburg bestehen in der Hauptsache aus Calcit. Untergeordnet tritt Quarz auf. Im Anröchter Dolomit konnten Calcit, Quarz und Albit nachgewiesen werden (aber kein Dolomit). Der Zeitzer Sandstein besteht hauptsächlich aus Dolomit (wobei der Dolomitgehalt in den verschiedenen Varietäten des Zeitzer Sandsteines

unterschiedlich ist), zuzüglich enthält er in wechselnden Gehalten Quarz.

Thermische Analyse: Bei dem Verfahren werden die exothermen und endothermen Reaktionen und die Gewichtsveränderung gemessen, die beim kontinuierlichen Aufheizen der Probesubstanz eintreten. Die thermischen Reaktionen (bedingt durch Phasenumwandlungen, chemische Reaktionen, Reaktionstemperatur, Reaktionsintensität und Gewichtsveränderung) sind materialkennzeichnende Merkmale. Gemessen wurde mittels der STA (Simultaneous Thermal Analysis) 409 EP der Firma NETZSCH. Analytikerin: Frau Dipl.-Geoln. B. Grunert.

Das Prinzip der Thermoanalyse beruht darauf, dass gleichzeitig und unter gleichen Bedingungen eine Inertsubstanz und das zu untersuchende Probematerial erhitzt werden. Probematerial und Inertsubstanz werden dabei in derselben homogenen Temperaturzone des regelbaren Rohrofens kontinuierlich auf eine bestimmte Endtemperatur erhitzt. Durch zwei Thermolemente, die zu einem Differenzthermoelement geschaltet sind, wird die Temperaturdifferenz (ΔT) zwischen beiden gemessen. Registriert werden die Reaktionstemperaturen mittels Differenzthermoanalyse (DTA), die dabei auftretenden Gewichtsveränderungen mittels Thermogravimetrie (TG) und deren erste Ableitung (DTG). Aufzeichnung, Anzeige und Auswertung der Messungen erfolgten rechnergestützt. Zur Interpretation der Thermogramme wurden in der Literatur vorliegende Informationen (Liptay 1971–76; Mackenzie 1960; Mackenzie 1970, 1972) genutzt. Da es sich bei dem untersuchten Material um Stoffgemische handelt, kann es zu Überlagerungen von thermischen Effekten kommen (z. B. Tonminerale und Quarz). Die Unterscheidung der Tonminerale und Glimmer in ihre Gruppen (Illit, Kaolinit, Muskovit, Chlorit) ist bei der thermischen Analyse nicht oder schwer möglich. Hier ist die Röntgenanalyse überlegen. Auch einige mit der Röntgenanalyse nachgewiesene Minerale sind bei der Differentialthermoanalyse aufgrund ihres relativ geringen Gehaltes in den Gesteinen bei den Aufnahmen nicht in Erscheinung getreten. Infolge ihres inerten Verhaltens im entsprechenden Temperaturbereich sind z. B. auch die Feldspäte nicht nachweisbar. Dagegen wird durch die Thermoanalyse das beim thermischen Dissoziieren der Karbonate freigesetzte CO_2 quantitativ gemessen; der Karbonatgehalt kann daraus stöchiometrisch berechnet werden. Die im Temperaturbereich von 300 bis 500 °C auftretenden exothermen Effekte konnten nicht in jedem

Falle eindeutig einer bestimmten Reaktion zugeordnet werden. Organische Substanz, die in diesem Temperaturbereich exotherme Reaktionen zeigt, verhält sich röntgenamorph. Hier musste die Dünnschliffmikroskopie Aufschluss geben. In Tabelle 2 sind die mittels Thermoanalyse identifizierten Komponenten der Proben ersichtlich.

Karbonatgesteine: Bei Anröchter Dolomit, Muschelkalk Halberstadt, Krensheimer Muschelkalk und Schaumkalk Naumburg ist die Hauptkomponente Calcit (CaCO_3). Die Reaktionstemperaturen vom Zerfall des Calcites (Freisetzung von CO_2) liegen zwischen 869,4 und 920 °C. Mackenzie (1972) gibt für diese Reaktion einen Temperaturbereich von 860 bis 1010 °C an. Zerfallstemperatur, Gestalt und Größe des Effektes können vom in der Probe herrschenden CO_2 -Druck beeinflusst werden. Der durch optische Methoden und die Röntgenanalyse nachgewiesene Quarz im Anröchter Dolomit kommt in der DTA-Kurve nicht zum Ausdruck (möglicherweise zu geringer Quarzgehalt). Zeitzer Sandstein zeigt den charakteristischen Doppelpack (790,8 °C; 898,8 °C) des Dolomites, der gleichzeitig die Hauptkomponente darstellt. Der Quarzanteil tritt in der DTA-Kurve nicht in Erscheinung.

Sandsteine: Außer beim Sander Schilfsandstein ist die Modifikationsänderung des Quarzes (Umwandlung von α - zu β -Quarz) im Temperaturbereich von 573,0 bis 575,1 °C den Sandsteinen gemeinsam. In der Literatur wird für die Umwandlung 574,1 °C unter Luftatmosphäre angegeben. Die Peaklage ist u. a. abhängig von vorhandenen Verunreinigungen oder Baufehlern im Quarzkristall selbst. Ähnlich den Karbonatgesteinen treten bei den Sandsteinen im Bereich von 341 bis 461,4 °C exotherme Effekte auf. Im Cottaer Sandstein und Ruhsandstein konnte im Dünnschliff organische (kohlige) Substanz beobachtet werden, so dass für diese Sandsteine der exotherme Effekt das Vorhandensein von Organika (300–500 °C) anzeigt. Der endotherme Effekt (728,6 °C) bei Ruhsandstein, der exotherme Effekt bei 350,6 °C und der endotherme Effekt bei 738,4 °C im Udelfanger Sandstein können ein Hinweis auf Glimmer sein. Der im Wüstenzeller Sandstein makroskopisch, mikroskopisch und röntgenographisch beobachtbare Glimmergehalt ist in der DTA-Aufnahme nicht nachweisbar.

Optische Untersuchung: Die makroskopische Gesteinsansprache (Struktur, Textur, Farbe, Besonderheiten) er-

Tab. 2: Mineralbestand der untersuchten Gesteine gemessen mit der thermischen Analyse und der Röntgenanalyse.**Tab. 2:** Mineral composition of the investigated rocks measured by thermal analyses and X-ray analysis.

Probenbezeichnung	Thermische Analyse		Röntgenanalyse
	bestimmte Minerale	Karbonat- gehalt Ma.-%	bestimmte Minerale
Anröchter Dolomit	Cc	45,5	Cc, Qz, Ab
Bucher Sandstein	Qz, Tm		Qz, Kl
Cottaer Sandstein	Qz, Tm, Org.		Qz, Kl, Kf
Ihrlersteiner Grünsandstein	Qz, Dl	40,1	Qz, Dl, Cc
Krensheimer Muschelkalk	Cc	97,1	Cc
Muschelkalk Halberstadt	Cc	98,5	Cc
Obernkirchner Sandstein	Qz, Tm		Qz, Kl
Postaer Sandstein	Qz, Tm		Qz, Kl
Ruhrsandstein	Qz, Gl, Org.		Qz, Chl, Mk, Ab, Kf
Sander Schilfsandstein	Tm/Gl,		Qz, Ab, Kf
Schaumkalk Naumburg	Cc	99,4	Cc
Udelfanger Sandstein	Qz, Tm/Gl, Cc	< 2	Qz, Kf, Chl, Mk.
Wüstenzeller Sandstein	Qz, Tm/Gl		Qz, Kf, Chl, Mk.
Zeitzer Sandstein	Dl	85,5	Dl
Legende: Cc = Calcit; Dl = Dolomit; Qz = Quarz; Kl = Kaolinit; Chl = Chlorit; Gl = Glimmer; Mk = Muskovit; Kf = Kalifeldspat; Ab = Albit, Tm = Tonminerale; Org. = Organika (kohlige Substanz).			

folgte an frischen Bruchflächen und z. T. an gesägten Gesteinsflächen. Anschließend wurden die gesägten Platten und die Bruchflächen in verschiedenen Vergrößerungen fotodokumentarisch aufgenommen (Tafel 1–14 in den Anlagen). Für die mikroskopische Gesteinsansprache wurden pro Gestein zwei Dünnschliffe angefertigt, parallel und senkrecht zur Schichtung. Hergestellt wurden die Dünnschliffe auf der Trenn- und Schleifmaschine Discoplan-TS der Fa. STRUERS. Der Porenraum wurde zur Kontrastierung angefärbt. Die Tränkung der Gesteinskörper (ca. 40 × 20 × 5 mm) erfolgte mittels Sudanblau gefärbtem Epoxidharz unter Vakuum (Gerät: Epovac der Firma STRUERS). Mit der Mikroskopie lassen sich Mineralbestand, Bindemittel und Gefügemerkmale beschreiben und bestimmen (Mackenzie & Guilford 1981). Das Hauptaugenmerk lag auf den Bestandteilen Quarz, Feldspat, Gesteinsbruchstücken, Glimmer und karbonatischen Klasten sowie in einigen Sandsteinen auf Glaukonit zur qualitativen Kennzeichnung. Mikroskopiert und fotodokumentiert wurde mit dem Jenapol von Carl Zeiss Jena durch Frau Dipl.-Geoln. J. Szilagy. Zur weiteren Kennzeichnung des Mikrogefüges der Gesteine wurden REM-

Aufnahmen von Herrn Dr. Schiekkel am Institut für Baustoffe und Tragwerke (der TU Dresden) angefertigt (Tafel 1–14).

Der Mineralbefund der optischen Untersuchungen sowie die makroskopischen und mikroskopischen Gefügebefunde flossen in die Gesteinsbeschreibungen des folgenden Abschnittes ein. Auf den Bildtafeln (Tafel 1–14) werden die Fotoaufnahmen der verschiedenen Vergrößerungen gegenübergestellt.

2.2. Petrographie und Herkunft der untersuchten Gesteine

Die folgenden Beschreibungen konzentrieren sich auf die zur Kennzeichnung des Steinmaterials wichtigen Merkmale. Sie verbinden die unmittelbar auf das vorliegende Probematerial bezogenen eigenen Beobachtungen mit den aus der einschlägigen Literatur entnommenen Informationen, um dem Leser den Anschluss zu weiterer Literatur zu erleichtern. Die stratigraphischen Angaben sind

Grunert, S.; Szilagy, J.

der Nomenklatur der Deutschen Stratigraphischen Kommission (2002) angeglichen.

» Anröchter Dolomit

Andere Handelsbezeichnung: Anröchter Grünstein, Anröchter Grünsandstein. Ein grauer bis graugrüner Kalksandstein. Gewinnungsorte sind Anröchte und Klieve bei Soest, Nordrhein-Westfalen, Soester Börde. Dort sind noch mehrere Steinbrüche in Betrieb, der Stein wird von 7 Firmen angeboten (Czekalla 2002). Man unterscheidet die Varietäten obere „Blaue Bank“ und untere „Grüne Bank“. Die letztgenannte ist technisch wichtiger. Vermutlich entspricht die Probe der Varietät „Grüne Bank“. Stratigraphische Stellung: Oberkreide, Oberturon, Soester Grünsand (Striatoconcentricus-Schichten/Lamarcki-Schichten). Bauwerke: Kirche in Anröchte, Plastik im Bergentalpark in Soest (Müller 1993: 6.4.13) (Grimm 1990: Nr. 143).

Beschreibung der Probe: Anröchter Dolomit

Tafel 1

Nachgewiesener Mineralbestand: Calcit, Quarz, Albit, Glaukonit.

Makroskopische Beschreibung: Dunkelgrauer, dichter, fossilführender Kalkstein, hell- bis dunkelgraue Schalenreste bis 3,5 cm; vereinzelt, z.T. auch gehäuft auftretend.

Mikroskopisches Bild: Quarzkomponenten gut sortiert, kaum gerundet, in karbonatischer Matrix, Glaukonit als unregelmäßige bis kugelige Aggregate; häufig Foraminiferen, seltener Schalenbruchstücke; karbonatisches Bindemittel, kein sichtbarer Porenraum.

REM-Aufnahme: Das feinkristalline Karbonat umschließt die klastischen Komponenten. Poren und fragliche Fossilienabdrücke in der Größe von 10 bis 20 µm sind erkennbar.

» Bucher Sandstein

Ein blassolivfarbener, mittelkörniger Sandstein mit schichtiger Struktur. Das Gestein wird in den Varietäten „Gelbbraun“ und „Grau“ geliefert (Müller 1993: 6.2.16) (Grimm 1990: Nr. 109). Hier liegt die Varietät „Gelbbraun“ vor. Gewinnungsort ist Buch bei Ebern/Unterfranken (Bayern), Hassberge. Ein Steinbruch produziert

noch (Czekalla 2002). Der Steinbruch, dem auch die Probe entnommen worden ist, befindet sich nordwestlich Buch. Stratigraphische Stellung: Oberer Keuper, Rhaetium, k6.

Beschreibung der Probe: Bucher Sandstein

Tafel 2

Nachgewiesener Mineralbestand: Quarz, Kaolinit.

Makroskopische Beschreibung: Graugelb, heterogen, fein- bis mittelkörnig, porös, schräggeschichtet, Wechsel von feineren zu größeren Lagen.

Mikroskopisches Bild: Quarzkörner kaum gerundet, punktuelle Kornkontakte. Gesteinsbruchstücke, sichtbarer Porenraum.

REM-Aufnahme: Die Quarzkörner stehen in Kornkontakt, sie erscheinen von Kaolinit umhüllt. Die Porenräume stehen untereinander in Verbindung.

» Cottaer Sandstein

Cottaer Sandstein ist ein nach technisch-petrographischen Kriterien ausgegliederter Typ des Elbsandsteins, der nach dem Haupt-Gewinnungsgebiet bei dem Ort Cotta südlich Pirna (Sachsen) benannt ist. Es ist ein weißer, hellgrauer oder hellgelber feinkörniger Sandstein mit kieseliger Kornbindung, der im Porenraum einen Tonanteil enthält. Oft zeigt er eine charakteristische Flaserung, die durch Einlagerung feiner Ton- oder Kohlehäutchen erzeugt wird. Die kohlige Substanz enthält Huminsäuren. Stratigraphische Stellung: Oberkreide, Turonium, Labiat-Schichten, Schmilka-Formation. Bekannte Bauwerke: Brandenburger Tor in Berlin, Kolonnaden am Schloss Sanssouci.

Das Gestein wird heute noch am südlichen Stadtrand von Pirna im Lohmgrund bei Cotta und in Pirna-Neundorf abgebaut und als Dekor- und Bildhauerstein in großem Umfang angeboten (Müller 1993: 6.2.4, 6.4.26) (Grunert 1983).

Die vorliegende Probe wurde von Teilen aus dem Dachbereich (Acrotherium oder Attica) der Kunstakademie in Dresden, die bei Rekonstruktionsarbeiten abgenommen worden sind, von der Firma Pressbau 1992 gewonnen. Z. Zt. des Baues der Dresdener Kunstakademie (1891–1894) produzierten mehrere Steinbrüche südlich Pirna; die Herkunft des Materials wurde dann oft als „Gottleubatal“ angegeben.

Beschreibung der Probe: Cottaer Sandstein

Tafel 3

Nachgewiesener Mineralbestand: Quarz, Kaolinit, Kalifeldspat, organische Substanz, Glaukonit.

Makroskopische Beschreibung: Licht braungrau, feinkörnig, glaukonitführend; im Zentimeterbereich unregelmäßig zwischengelagerte feine Häutchen aus toniger und kohli-ger Substanz bewirken flaserige Struktur.

Mikroskopisches Bild: Die Quarzkörner sind über Kornkontakte miteinander verbunden, toniges Zwischenmittel, sichtbarer Porenraum.

Bestimmbare Komponenten: Neben Quarz, Polyquarze, akzessorisch Glaukonit, Feldspat, selten Glimmer auftretend.

REM-Aufnahme: Die Quarzkörner zeigen durch autigenes Wachstum Regenerierung der Kristallflächen. Eingestaltige Tonminerkristalle sitzen den Quarzkörnern auf. Offene Poren sind zwischen den Körnern erkennbar.

» Ihrlersteiner Grünsandstein

Andere Bezeichnung: Regensburger Grünsandstein. Gelbgrüner, karbonathaltiger, feinkörniger Sandstein. Gewinnungsort ist Ihrlerstein bei Kelheim/Donau, mittlere Frankenalb, Niederbayern. Stratigraphische Stellung: Oberkreide, Cenomanium. Bekannte Bauwerke: Dom zu Regensburg, Alte Pinakothek und Neue Pinakothek in München, Löwendenkmal in Bad Abbach (Müller 1993: 6.4.1) (Grimm 1990: Nr. 130). Die Probe ist im Ihrlersteiner Sandsteinbruch gewonnen worden.

Beschreibung der Probe: Ihrlersteiner Grünsandstein

Tafel 4

Nachgewiesener Mineralbestand: Quarz, Dolomit, Calcit, Glaukonit.

Makroskopische Beschreibung: Hellolivgrau, fein- bis mittelkörnig, glaukonitisch, weiße Fossilienreste, z. T. größere „Löcher“ in der Steinoberfläche.

Mikroskopisches Bild: Quarze kantengerundet, teilweise splittrig; Quarzkornkontakte selten, Glaukonitaggregate gut gerundet, farbgebend (grün), häufig Fossilreste von Zweischalern, karbonatisches Bindemittel, sichtbarer Porenraum.

REM-Aufnahme: Den z. T. gut gerundeten Quarzkörnern sitzen Karbonatkristalle auf. Karbonatkristalle bilden auch die Kornkontakte. Der Porenraum ist offen.

» Krensheimer Muschelkalk

Hell braungrauer bis rotbrauner dichter Schalenrümmer-Kalkstein. Gewinnungsort: Grünsfeld-Krensheim, Württemberg. Varietäten: Helle Bank, rötliche Bank. Stratigraphische Stellung: Muschelkalk, Obere Hauptmuschelkalk-Folge. Bauwerke: Moritzkirche in Coburg, Überlinger Münster (neben anderen Naturwerksteinarten), Massivmauersteine an der neuen Universität Würzburg-Sanderlingen und dem Olympiastadion in Berlin (Grimm 1990: Nr. 169). Die Probe ist am Kölner Dom ausgebaut worden.

Beschreibung der Probe: Krensheimer Muschelkalk

Tafel 5

Nachgewiesener Mineralbestand: Calcit.

Makroskopische Beschreibung: Hellgrau, feinporig, fossilreich (Schalenschill), Wechsel von dicht gepacktem Fossilschutt und lockeren Lagen, z. T. größere Hohlräume bis 1 cm Durchmesser.

Mikroskopisches Bild: Überwiegend Schalenreste von mikritischen Säumen umgeben, mikritische Extraklasten, z. T. umkrustet, gut gerundet, sparitischer Zement als Bindemittel, sichtbarer Porenraum (Zwickelporen, Hohlformporen), inhomogene Verteilung.

REM-Aufnahme: Blockzement und feinkristalliner Calcit kommen nebeneinander vor, Poren sind erkennbar.

» Muschelkalk Halberstadt

Der Dom St. Stefan und St. Sixtus zu Halberstadt (Bauzeit: 1239–1491) ist aus Kalkstein errichtet, der in dieser Region gewonnen worden ist. Das Gestein ist hell-gelbbraun bis weiß. Es zeigt z. T. Kreuzschichtung sowie Anreicherungen von Konchilienresten und ist ooidisch ausgebildet. Stratigraphische Stellung: Unterer Muschelkalk, Wellenkalk-Folge, Schaumkalkzone.

Am 08.04.1945 ist der Dom bei einem anglo-amerikanischen Luftangriff bombardiert und dabei stark beschädigt worden. Der Wiederaufbau hatte unmittelbar nach dem Krieg begonnen und ist in den 1980er Jahren

Grunert, S.; Szilagy, J.

weitgehend abgeschlossen worden. Das Proben-Material wurde im Oktober 1992 durch die Fa. Pressbau aus Abbruchmaterial entnommen, das durch die Erneuerungsarbeiten (1991/92) auf der Nordseite des Domes (an dem ersten Außen-Pfeiler des Langhauses östlich des Nordturmes) frei geworden war (Kutschke 1992).

Beschreibung der Probe: Muschelkalk Halberstadt

Tafel 6

Nachgewiesener Mineralbestand: Calcit.

Makroskopische Beschreibung: Dunkelocker, oolithisch, fossilreich (Schalenreste), teilweise in Hohlräumen dichter weißer Kalkstein mit einer scharfen Abgrenzung zum porösen Teil auftretend

Mikroskopisches Bild: Die Substanz ist mehrheitlich aus den Ooiden herausgelöst, in den gefüllten Ooiden keine Internstruktur erkennbar, in Hohlräume (von Kalkschalen stammend) Calcitkristalle sprossend, vorhandene Poren nicht oder kaum miteinander in Verbindung stehend.

REM-Aufnahme: Die Ooide sind von unterschiedlicher Größe, leer oder gefüllt und von feinkörniger Grundmasse umhüllt, die in die Hohlräume hineinragenden Calcitkristalle erscheinen wie Lösungsformen.

» Obernkirchner Sandstein

Grauweißer bis gelblichweißer, feinkörniger Sandstein. Gewinnungsort: Obernkirchen bei Hannover, Bückeberge, Südniedersachsen. Der Sandstein wird abgebaut. Eine Firma produziert daraus Werk- und Dekorstein (Czekalla 2002). Stratigraphische Stellung: Unterkreide, Berriasium, Bückeberg-Formation (Wealden). Varietäten: Obernkirchen Gelb, Obernkirchen Weiß. Hier liegt die Varietät Obernkirchen Gelb vor. Bauwerke: Dom in Aachen, Dom in Hildesheim, Dom in Lübeck, Zitadelle in Jülich, Rathaus in Bremen (Müller 1993: 6.2.9) (Grimm 1990: Nr. 120). Die Probe entstammt dem Hapag-Lloyd Haus in Hamburg.

Beschreibung der Probe: Obernkirchner Sandstein

Tafel 7

Nachgewiesener Mineralbestand: Quarz, Kaolinit.

Makroskopische Beschreibung: Sandstein braungrau, homogen, feinkörnig, weiße Flecken (Anreicherung toniger Substanz?), bereichsweise Schalenreste auftretend.

Mikroskopisches Bild: Quarz, Gesteinsbruchstücke und Schwerminerale; Quarz oft mit Einschlüssen, suturierte Quarzkornkontakte, sichtbarer Porenraum.

REM-Aufnahme: Die Quarzkörner stehen in Kornkontakt; sie zeigen leichtes authigenes Wachstum. Kaolinitplättchen sitzen den Körnern auf und bilden Kornbrücken. Der Porenraum ist erkennbar.

» Postaer Sandstein

Postaer Sandstein ist eine nach technisch-petrographischen Kriterien ausgegliederte Varietät des Elbsandsteins, der nach der historischen Gewinnungsstätte in Pirna-Posta benannt ist. Er ist ein weiß bis gelbbrauner, fein- bis mittelkörniger Quarzsandstein in kieseligem Kornbindung ohne Tonkomponenten im Porenraum (Grunert 1986). Derzeitige Gewinnung in zwei Steinbrüchen bei Lohmen und einem bei Stadt Wehlen östlich Pirna/Sachsen. Stratigraphische Stellung: Turonium, Schrammstein-Formation. Er ist ein sehr resistenter Werk-, Dekor- und Bildhauerstein (Müller 1993: 6.2.54) (Grunert 1986).

Das Material der Probe ist bei Abbrucharbeiten an einem Pfeiler eines Bahnbogen östlich des Hauptbahnhofes Dresden (Wiener Straße, Ecke Fritz Löffler-Straße) durch den Bauhof der Reichsbahndirektion Dresden am 07.01.1992 ausgebaut worden. Vor dem Ausbau waren die Blöcke durch Herrn Dipl.-Geol. Kutschke gekennzeichnet worden. Es waren 15 Blöcke mit einem Volumen von jeweils ca. 0,1 bis 0,5 m³. Nach mehrwöchiger Zwischenlagerung auf dem Bauhofgelände wurde das Material im Auftrag der Firma Pressbau GmbH von einer Speditionsfirma nach Oberhausen zur Anfertigung der Prüfkörper geholt. Nach seiner Ausbildung zu urteilen, stammt der Sandstein dieses Bauwerkes aus den Teich-Steinbrüchen an den linken Hängen des Elbtales zwischen dem Haltepunkt Schöna der DB und der Landesgrenze nach Tschechien. Sie haben für zahl-reiche bedeutende Bauwerke Material geliefert: Rathaus in Hamburg, viele Kunstbauten der Eisenbahn, Empfangsgebäude der Bahnhöfe von Dresden und Leipzig. Sie lieferten auch das Material für Bildhauerarbeiten, z. B. der Atlanten am Schloss in Dresden. Stratigraphische Stellung: Oberkreide, Turonium, Schmilka-Formation.

Beschreibung der Probe: Postaer Sandstein

Tafel 8

Nachgewiesener Mineralbestand: Quarz, Kaolinit.

Makroskopische Beschreibung: Ockerfarbener, fein- bis mittelkörniger Sandstein, vereinzelt Grobkörner, porös.

Mikroskopisches Bild: Quarze sind in der Mehrheit Einzelkristalle, teilweise mit Anwachssäumen, seltener sind Polyquarze, sehr selten Feldspat und Glimmer; die Körner sind in kieseliger Kornbindung, sichtbarer Porenraum.

REM-Aufnahme: Die Quarzkörner zeigen durch authigenes Wachstum auf ihren Oberflächen eine Fassettierung und sind punktuell miteinander verwachsen, so dass zwischen den Körnern offener Porenraum ausgebildet ist.

» Ruhrsandstein

Andere Bezeichnung: Herdecker Ruhrsandstein. Ein grauer, mittelsandiger Sandstein. Gewinnungsorte: Herdecke und Ahlbringhausen, Ruhrtal (Nordrhein-Westfalen). Der Stein wird in mehreren Steinbrüchen abgebaut und von 6 Firmen als Werk- und Dekorstein angeboten (Czekalla 2002). Stratigraphische Stellung: Oberkarbon, Namur C (Grimm 1990: Nr.058).

Das Probenmaterial wurde offenbar aus der Alten Post in Herdecke entnommen.

Beschreibung der Probe: Ruhrsandstein

Tafel 9

Nachgewiesener Mineralbestand: Quarz, Kalifeldspat, Albit, Muskovit, Chlorit, organische Substanz.

Makroskopische Beschreibung: Grauer, mittelkörniger Sandstein, teilweise mit grobkörnigen Lagen, dicht, z. T. Häufung von kohligem Substanz.

Mikroskopisches Bild: Quarz kaum gerundet mit Einschlüssen, Gesteinsbruchstücke, Feldspat (Plagioklas, Kalifeldspat), Hellglimmer, toniges Zwischenmittel und suturierte Kornkontakte der Quarzkörner, kein sichtbarer Porenraum.

REM-Aufnahme: Die Quarze zeigen authigenes Wachstum. Tonmineralplättchen sitzen den Kornoberflächen auf, sie bilden z. T. den Kontakt zu Nachbarkörnern oder füllen die Strukturporen.

» Sander Schilfsandstein

Andere Bezeichnung: Grüner Mainsandstein, Hermannsberger Sandstein. Ein hell-olivgrüner, fein- bis mittelkörniger Sandstein. Gewinnungsort: Am Hermannsberg südlich Sand am Main, 8 km südöstlich von Hassfurt, Hassberge, Oberfranken (Bayern). Stratigraphische Stellung: Mittlerer Keuper, k3, Stuttgart-Formation (Schilfsandsteinstufe). Bedeutende Bauwerke: Residenz und Ursulinenkloster in Würzburg, Schloss Castel in Gent (Belgien), Schloss Wiesentheid, Schloss Seehof bei Bamberg (GRIMM 1990: Nr. 095). Das Probenmaterial wurde im Steinbruch Sand am Main entnommen.

Beschreibung der Probe: Sander Schilfsandstein

Tafel 10

Nachgewiesener Mineralbestand: Quarz, Albit, Muskovit, Chlorit.

Makroskopische Beschreibung: Hellolivgrau, homogen, feinkörnig, wenig Hellglimmer, dunkle Einsprenglinge.

Mikroskopisches Bild: Quarze kantig, teilweise suturierte Kornkontakte, Gesteinsbruchstücke, Feldspäte bereits leicht korrodiert, Zwischenmittel meist tonig, sichtbarer Porenraum.

REM-Aufnahme: Die Quarzkörner zeigen authigenes Wachstum, andere Körner (Feldspäte) offenbar Korrosionsformen auf den Oberflächen. Feinkörniges Material füllt die Kornzwischenräume.

» Schaumkalk Naumburg

Andere Bezeichnung: Schaumkalk Freyburg. Hellgelber, auch lichtgrauer bis dunkelgrauer fein- bis grobporiger oolithischer Kalkstein. Der Schaumkalk bildet zwei oder drei Horizonte an der oberen Grenze des unteren Muschelkalkes, die über das gesamte Verbreitungsgebiet des Muschelkalkes in Thüringen verbreitet sind. Die Mächtigkeit der Bänke reicht von wenigen Dezimetern bis zu drei Metern. Wegen seiner Festigkeit und guten Bearbeitbarkeit ist er im gesamten Verbreitungsgebiet seit dem Mittelalter verwendet worden. In den dreißiger Jahren des 20. Jh. befanden sich Gewinnungsstätten u. a. in Oberdorla bei Mühlhausen, Gossel bei Arnstadt, Mihla an der Werra und Meinigen (Hoppe 1939). Stratigraphische Stellung: Unterer Muschelkalk, Wellenkalk-Folge, Schaum-

Grunert, S.; Szilagy, J.

kalkzone. Die Probe ist von der Fa. Pressbau vom Naumburger Dom 1992 entnommen worden. Ursprünglich gebrochen wurde das Gestein vermutlich in Freyburg a. d. Unstrut bei Naumburg. Dort wird das Gestein auch noch abgebaut. Weitere bekannte Bauwerke: Schlosshotel Reinhardsbrunn (Müller 1993: 6.5.3).

Beschreibung der Probe: Schaumkalk Naumburg

Tafel 11

Nachgewiesener Mineralbestand: Calcit.

Makroskopische Beschreibung (zwei Varietäten): 1. Varietät: Grau, feinporös, teilweise größere Poren, zuweilen dicht, untergeordnet fossile Schalenreste. 2. Varietät: Dunkelocker, oolithisch, fossilreich (Schalenreste), stellenweise große Hohlräume (ehemals Fossilien), partiell Bereiche von dichtem Kalkstein.

Mikroskopisches Bild: Substanz in den Ooiden größtenteils erhalten, darin ist keine Internstruktur erkennbar. Ooide und Schalenreste liegen in grober Matrix vor (z. T. Einzelkristalle erkennbar); in Hohlräume („leere“ Ooide und Schalenreste) sprossen Calcitkristalle, die Poren stehen kaum oder nicht in Verbindung.

REM-Aufnahme: Das Gestein ist nahezu gleichkörnig rekristallisiert. Durchschnittliche Größe der Einzelkristalle bei 25 µm. Die Ooide sind nicht ausgefüllt und bilden z. T. geschlossene Poren. In die Hohlräume ragen Kristallrasen.

» Udelfanger Sandstein

Heller grüngelber, karbonathaltiger, feinkörniger Sandstein. Gewinnungsort: Udelfangen bei Trierweiler, Landkreis Trier/Rheinland-Pfalz. Der Stein wird von zwei Firmen gewonnen und als Werk-, Dekor- und Bildhauerstein angeboten (Czekalla 2002). Stratigraphische Stellung: Unterer Muschelkalk, m1. Bedeutsame Bauten: Porta Nigra und Liebfrauenkirche in Trier, Chor im Kölner Dom, Bauteile im Reichstagsgebäude Berlin (Müller 1993: 6.2.32) (Grimm 1990: Nr.091). Die Probe entstammt einem Udelfanger Sandsteinbruch.

Beschreibung der Probe: Udelfanger Sandstein

Tafel 12

Nachgewiesener Mineralbestand: Quarz, Kalifeldspat, Chlorit, Muskovit, Calcit.

Makroskopische Beschreibung: Braungrau, homogen, feinkörnig, Hellglimmer und dunkle Einsprenglinge sind sichtbar.

Mikroskopisches Bild: Quarzkörner sind randlich korrodiert und teilweise undulös auslöschend, Gesteinsbruchstücke, Feldspat (Mikroklin), Glimmer, toniges, schwach karbonatisches Zwischenmittel, sichtbarer Porenraum.

REM-Aufnahme: Die Körner erscheinen durch authigenes Wachstum fassettiert und überdeckt von Schichtsilikat-Kristallen, auch vereinzelt Calcit-Kristallen. Sie stehen in Kornkontakt, dazwischen reichlich offener Porenraum.

» Wüstenzeller Sandstein

Andere Bezeichnung: Roter Mainsandstein. Dunkelroter, feinkörniger Sandstein (Korndurchmesser ca. 0,1 mm). Abbauort: Wüstenzell südlich Marktheidenfeld bei Würzburg / Unterfranken / Bayern. „Heute eine der wichtigsten Sandsteinsorten überhaupt“ (Müller 1993) in den Altbundesländern Deutschlands (die Verfasser). Der Sandstein wird von einer Firma gewonnen und für verschiedene Verwendung angeboten (Czekalla 2002). Stratigraphische Stellung: Oberer Buntsandstein, Plattensandstein, s7, „Roter Mainsandstein“ (Müller 1993: 6.3.13) (Grimm 1990: Nr. 087). Die Probe wurde im Steinbruch Wüstenzell entnommen.

Beschreibung der Probe: Wüstenzeller Sandstein

Tafel 13

Nachgewiesener Mineralbestand: Quarz, Kalifeldspat, Chlorit, Muskovit.

Makroskopische Beschreibung: Der Sandstein ist rötlichbraun, homogen, feinkörnig, mit einem deutlichen Hellglimmergehalt und größeren dunklen Einsprenglingen.

Mikroskopisches Bild: Quarzkörner kantig, angerundet, oftmals randlich korrodiert und verzahnend; Gesteinsbruchstücke, Glimmer (teilweise verbogen), toniges Zwischenmittel, teilweise Quarzkornkontakte, sichtbarer Porenraum.

REM-Aufnahme: Die Quarzkörner zeigen durch authigenes Wachstum gebildete Kristallflächen. Feldspäte – kenntlich an treppenartig ausgebildeter Oberfläche – sind von den Spaltflächen aus ankorrodiert. Feinkörnige Substanz (Schichtsilikate) sitzt den Körnern auf und füllt die Kornzwickele. Die Poren sind miteinander verbunden.

» Zeitzer Sandstein

Grauer bis gelbbrauner dolomitischer Sandstein bis sandiger Dolomit. Das Gestein war ein wichtiges und in der Vergangenheit viel genutztes Baumaterial der Region. Es ist in mehreren Steinbrüchen der näheren Umgebung von Zeitz abgebaut worden. Heute liegen alle Steinbrüche still. Bedeutende Bauwerke: Schloss Moritzburg (begonnen 1657) und Schlosskirche (früher Dom, Bauzeit 1433–1499) in Zeitz. Da aus den historischen Gebäuden nicht ausreichend Material entnommen werden konnte, wurde es beim Abbruch von landwirtschaftlichen Wirtschaftsgebäuden in Raba (Ortsteil der Gemeinde Haynsburg (Kr. Zeitz), 4 km südwestlich von Zeitz und Röden (Ortsteil der Gemeinde Droßdorf bei Zeitz (4 km südlich von Zeitz) im Juli 1993 durch die Fa. Pressbau Proben gewonnen. Stratigraphische Stellung: Unterer Buntsandstein, s2, Bernburgfolge (Kutschke 1993), (Grunert & Kutschke 1997).

Beschreibung der Probe: Zeitzer Sandstein

Tafel 14

Nachgewiesener Mineralbestand: Dolomit, untergeordnet Quarz, Feldspäte.

Makroskopische Beschreibung: Grau, stark karbonathaltig, feinporös, durch Konzentration von Glimmern und toniger Substanz in einzelnen Lagen (grüngraue Farbe) stark geschichtet.

Mikroskopisches Bild: Quarz- und Feldspatkörner in grob-spätiger, dolomitischer Grundmasse „schwimmend“, teilweise punktuelle und längliche Quarzkornkontakte auftretend, Karbonatgehalt schwankend. Die Quarzkörner sind gut gerundet bis kantengerundet, randlich korrodiert und von Dolomit umhüllt, teilweise undulös auslöschend, Feldspäte in prismatischer Form und teilweise kantengerundet; kaum Porenraum.

REM-Aufnahme: Dichte Packung von Dolomitkristallen in plättchenförmiger Tracht. Größe der Kristalle zwischen 2 und 20 μm . Zwischen den Kristallen Poren von 2 μm und kleiner.

3. Petrophysikalische Untersuchungen

3.1. Vorbemerkungen

Die petrophysikalischen Messungen erfolgten unter Beachtung der gültigen DIN-Vorschriften. Wenn sich aus messtechnischen Gründen ein Abweichen von den Vorschriften erforderlich machte, wurde das im Text beschrieben. Merkmale, für deren Messung keine Standards vorliegen, wurden nach in der angegebenen Literatur dargestellten Verfahren gemessen oder nach den beschriebenen, selbst entwickelten Verfahren.

3.2. Rohdichte, Reindichte und Porosität

Dichte und Porosität gehören zu den gesteintechnischen Eigenschaften, die zur allgemeinen Charakterisierung von Natursteinen bestimmt werden. Sie stehen in unmittelbarer Beziehung zu der mineralischen Zusammensetzung und dem Gefüge.

Die Dimension der Dichte ist g/cm^3 . Es wird zwischen der Reindichte ζ_0 und der Rohdichte ζ_r unterschieden (DIN 52 102). Die Reindichte ζ_0 (auch Korndichte) ist die Masse je Raumeinheit eines Minerals oder Gesteins ausschließlich etwa vorhandenen Porenraumes. Die Rohdichte ζ_r (auch Raumdichte) ist die Masse je Volumeneinheit eines Gesteins einschließlich des vorhandenen Porenraumes.

Die Bestimmung der Reindichte erfolgte in Anlehnung an die DIN 52 102 im Baustofflabor Semperstraße des Institutes für Tragwerke und Baustoffe der TUD unter Leitung von Frau DI Hempel. Vor der Messung wurden die Proben bei 60 °C auf Massekonstanz getrocknet und im Exsikkator abgekühlt. Massekonstanz ist erreicht, wenn die Masse sich innerhalb von 24 h nicht um mehr als 0,1 % ändert. Die Ermittlung der Reindichte erfolgte mit dem automatischen Heliumpyknometer vom Typ ACCUPYC 1330 der Firma MICROMERITICS bei einer Probeneinwaage von ca. 10 g Die Dichte ζ_0 wird auf 0,01 g/cm^3 gerundet angegeben.

Die Ermittlung der Rohdichte erfolgte an vorgefertigten Prüfkörpern durch Ausmessen und Wiegen. In der

Tab. 3: Rohdichte, Reindichte und Porosität der Gesteine.

Tab. 3: Bulk density, grain density and porosity of the rocks.

Probenbezeichnung	Rohdichte [g/cm ³]			Reindichte [g/cm ³]			Porosität [Vol-%]		
	Min.	Mw.	Max.	Min.	Mw.	Max.	Min.	Mw.	Max.
Anröchter Dolomit	2,52	2,55	2,57	2,73	2,74	2,75	5,9	7,0	8,0
Bucher Sandstein	1,99	1,99	1,99	2,66	2,67	2,68	25,2	25,5	25,8
Cottaer Sandstein	2,02	2,03	2,06	2,66	2,68	2,70	22,9	24,1	25,2
Ihrlersteiner Grünsandstein	2,13	2,15	2,18	2,70	2,71	2,71	19,3	20,6	21,4
Krensheimer Muschelkalk	2,29	2,32	2,34	2,74	2,74	2,75	14,9	15,5	16,4
Muschelkalk Halberstadt	2,14	2,18	2,23	2,73	2,73	2,74	18,3	20,1	21,9
Obernkirchner Sandstein	2,14	2,15	2,18	2,67	2,67	2,67	18,4	19,4	20,0
Postaer Sandstein	2,05	2,06	2,06	2,66	2,66	2,67	22,2	22,7	23,2
Ruhrsandstein	2,53	2,53	2,54	2,68	2,69	2,70	5,6	6,1	6,3
Sander Schilfsandstein	2,19	2,20	2,22	2,66	2,66	2,66	16,5	17,1	17,7
Schaumkalk Naumburg	1,79	1,82	1,84	2,73	2,73	2,74	32,6	33,3	34,4
Udelfanger Sandstein	2,06	2,07	2,08	2,69	2,69	2,70	22,7	23,1	23,7
Wüstenzeller Sandstein	2,29	2,30	2,32	2,68	2,68	2,69	13,8	14,3	14,9
Zeitzer Sandstein	2,55	2,66	2,74	2,73	2,78	2,83	2,1	4,3	6,6

DIN-Vorschrift wird dieses Verfahren für grobporige Gesteine vorgeschlagen, fand aber hier bei allen zu bearbeitenden Gesteinen Anwendung, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Neben der Messung an Würfeln (Kantenlänge 100 mm) wurden auch in Verbindung mit der Messung der Wärmeleitfähigkeit die Bestimmungen der Rohdichte an Platten (300 × Ø0 × 35mm) durchgeführt, die zum Vergleich in die Anlagen mit aufgenommen worden sind.

Die Gesamtporosität p berechnet sich aus Reindichte und Rohdichte nach der Formel:

$$p = (1 - \zeta_r / \zeta_0) \cdot 100 \text{ [Vol-\%]}$$

$$p = \text{Gesamtporosität [Vol-\%]}$$

$$\zeta_0 = \text{Reindichte [g/cm}^3\text{]}$$

$$\zeta_r = \text{Rohdichte [g/cm}^3\text{]}$$

In Tabelle 3 werden neben den Mittelwerten der Messergebnisse von Rohdichte (gemessen an Würfeln), Reindichte und Porosität der Gesteine auch die Schwankungsbreiten angegeben. Letztere spiegeln die Variationsbreite innerhalb der Gesteine wider. Die Rohdichten liegen zwischen 1,79 und 2,74 g/cm³, die Reindichten zwischen 2,66 und 2,83 g/cm³ und die Gesamtporositäten zwischen 2,1 und 34,4 Vol.-%. Die Messwerte der Reindichte haben die geringste Spannweite.

Sie bilden den Mineralbestand unmittelbar ab. Zum Vergleich hier die Reindichte der Hauptgemengteile: Quarz 2,65 g/cm³, Calcit 2,715g/cm³, Dolomit 2,87g/cm³, Feldspäte um 2,6 g/cm³.

Karbonatgesteine: Die Karbonatgesteine weisen sich durch die höhere Reindichte aus. Anröchter Dolomit und Zeitzer Sandstein (der Zeitzer Sandstein wird im weiteren mit den Karbonatgesteinen verglichen, da es sich hier um die stark dolomitische Varietät handelt) besitzen sowohl innerhalb der Karbonatgesteine als auch insgesamt gesehen die höchsten Rohdichten. Hierbei handelt es sich um sehr dichte Karbonatgesteine. Zwischen Rohdichte und Reindichte besteht nur wenig Differenz. Dies kommt auch in einer geringen Porosität zum Ausdruck.

Beim Zeitzer Sandstein ist die Schwankungsbreite für alle drei Parameter am größten. Schaumkalk Naumburg weist von allen Gesteinen die niedrigste Rohdichte und die höchste Porosität auf. Der Unterschied zwischen Roh- und Reindichte ist hier ebenfalls am größten. Die Messwerte für Krensheimer Muschelkalk und Muschelkalk Halberstadt liegen im Bereich von denen der Sandsteine. Die höchste Porosität hat der Schaumkalk Naumburg.

Sandsteine: Die Reindichten der Sandsteine liegen bei den von Quarz und Feldspat. Es gibt kaum Unterschiede,

wohingegen die Rohdichten größeren Schwankungen unterliegen, was sich zwangsläufig in den Porositäten ausdrückt. Bucher Sandstein mit der geringsten Rohdichte hat auch die höchste Porosität. Bis auf den Ruhrsandstein treten bei allen Sandsteinen relativ große Unterschiede zwischen der Rohdichte und der Reindichte auf. Bei Ruhrsandstein handelt es sich um einen sehr dichten Sandstein. Nach Zeitzer Sandstein weist er die geringste Porosität der hier untersuchten Gesteine auf.

Vergleicht man Sandsteine und Karbonatgesteine, fällt auf, dass die zuletzt genannten höhere Reindichten und – bis auf zwei Ausnahmen (Schaumkalk Naumburg und Ruhrsandstein) – auch die höheren Rohdichten besitzen. Während die Reindichte vom Mineralbestand der Gesteine bestimmt wird, ist die Porosität und damit auch die Rohdichte, von der Diagenese abhängig.

3.3. Kapillare Wasseraufnahme

Die Kapillarität ist die Fähigkeit poröser Stoffe, entgegen der Schwerkraft, aus einem tieferliegendem Depot Flüssigkeiten anzusaugen. Sie wird durch die Porendurchmesser bedingt, aber auch durch die Gesamtporosität, die Beschaffenheit der Porenwände und die Verbindung der Poren untereinander. Bei den klastischen Sedimenten formen Korngrößenverteilung und Diagenese das Porengefüge. Als wirksame Porengrößen für das kapillare Saugen werden 100 nm bis 1 mm angegeben; größere Poren können sich durch die Schwerkraft ebenfalls füllen. Der kapillare Transport kann durch verschiedene Prozesse beeinflusst werden: So fallen Poren, die durch Kapillarkondensation mit Wasser gefüllt sind, für den kapillaren Feuchttransport aus. Auch Poren, in denen Luft eingeschlossen ist, entfallen. Solche Lufteinschlüsse entstehen z. B. dann, wenn größere Poren, durch das raschere Ansaugen der Flüssigkeit in benachbarten kleineren Poren, von dem Kapillarstrom umflossen werden. MENG (1993) hat die Prozesse eingehend untersucht und dargestellt.

Zur Kennzeichnung der Kapillarität wurde hier der „Wasseraufnahmekoeffizient“ nach DIN 52 617 (Bestimmung der Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen) genutzt. Er wurde ursprünglich für die Beschreibung künstlicher Baustoffe wie Putze und Ziegel entwickelt, wird aber auch zur Natursteinprüfung angewandt. Mit der DIN EN 1925 (Bestimmung des Wasseraufnahme-

koeffizienten infolge Kapillarwirkung) wird er Bestandteil der Prüfverfahren für Naturstein.

Der Wasseraufnahmekoeffizient ω ist der Quotient aus der flächenbezogenen Wasseraufnahme w und der Quadratwurzel aus der Zeit t der Wasseraufnahme:

$$\omega = W/\sqrt{t} \quad [\text{kg}/\text{m}^2/\sqrt{\text{h}}]$$

ω = Wasseraufnahmekoeffizient [$\text{kg}/\text{m}^2/\sqrt{\text{h}}$]

W = Masse des aufgenommenen Wassers
bezogen auf die Saugfläche (flächenbezogene Wasseraufnahme) in kg/h^2

t = Zeit der Wasseraufnahme in Stunden [h]

Der Wasseraufnahmekoeffizient ω ist um so höher, je schneller und je mehr Wasser von dem zu prüfenden Material aufgenommen wird. Er ist eine Eingangsgröße für bauphysikalische Berechnungen.

Der Wasseraufnahmekoeffizient wurde an Prüfkörpern mit den Abmaßen $40 \times 40 \times 160$ mm gemessen. Pro Gestein wurden 10 Körper geprüft; jeweils 5 waren so geschnitten, dass der Kapillarstrom senkrecht, weitere 5, dass er parallel zur Schichtung aufsteigt. Zunächst wurden die Prüfkörper bei 60°C bis zur Massekonstanz getrocknet und im Exsikkator abgekühlt. Anschließend wurden die Prismenflächen mit Wachs abgedichtet, um einem seitlichen Wasserverlust durch Verdunstung vorzubeugen. Basis- und Deckfläche blieben frei. Vor und nach der Behandlung mit Wachs erfolgte die Bestimmung der Masse der Prüfkörper, um die Masse des Wachses bei der Auswertung berücksichtigen zu können.

Nach der Probenvorbereitung wurden die Prüfkörper mit der Basisfläche als Saugfläche nach unten ca. 3 mm tief in ein Wasserbad eingetaucht. Vor dem Eintauchen und dann in Zeitabständen von jeweils 10 min, 30 min, 1 h, danach stündlich bis zu 7 h – und wiederum nach 24 h – erfolgte die Wägung der einzelnen Prüfkörper. Bei Durchfeuchtung wurde die Messung an dem betreffenden Prüfkörper abgebrochen. Für die Berechnung des Wasseraufnahmekoeffizienten kommen die bis vor der Durchfeuchtung gemessenen Werte in Betracht. Aus den Wägeregebnissen wurde die flächenbezogene kapillare Wasseraufnahme W berechnet, das ist die Masse des aufgenommenen Wassers bezogen auf die Saugfläche. Sie hat die Dimension kg/m^2 . Aus den an den parallel gemessenen Prüfkörpern bestimmten Werten der flächenbezogenen Wasseraufnahme wurden die arithmetischen Mittel gebildet und diese über der Quadratwurzel der Prüfzeit in Diagrammen aufgetragen. Aus dem Anstieg der Kurve

Tab. 4: Kapillare Wasseraufnahme und Wasseraufnahmekoeffizient.

Tab. 4: Water intake by capillary attraction and water absorption coefficient

Probenbezeichnung	Kapillare Wasseraufnahme Ma% (nach 24 Stunden)		Wasseraufnahmekoeffizient (kg/m ²)/√t	
	parallel zur Schichtung	senkrecht zur Schichtung	parallel zur Schichtung	senkrecht zur Schichtung
Anröchter Dolomit	0,12	0,35	0,11	0,25
Bucher Sandstein	5,18	4,50	2,98	2,84
Cottaer Sandstein	6,03	3,96	5,60	3,50
Ihrlersheimer Grünsandstein	5,84	3,65	3,33	2,39
Krensheimer Muschelkalk	0,66	0,40	0,51	0,33
Muschelkalk Halberstadt	0,58	0,62	0,30	0,40
Obernkirchner Sandstein	3,65	3,34	2,41	2,24
Postaer Sandstein	6,58	5,53	6,02	4,38
Ruhrsandstein	0,34	0,31	0,30	0,25
Sander Schilfsandstein	3,08	2,95	3,30	2,50
Schaumkalk Naumburg	2,99	1,46	2,55	0,83
Udelfanger Sandstein	6,09	5,98	9,40	9,00
Wüstenzeller Sandstein	1,81	1,50	1,35	1,10
Zeitzer Sandstein	0,34	0,63	0,28	0,52

wird der Wasseraufnahmekoeffizient berechnet nach der Formel:

$$\omega = \Delta W / \Delta \sqrt{t} \text{ [(kg/m}^2\text{)}/\sqrt{\text{h}}]$$

Auswertung: Tabelle 4 enthält die parallel und senkrecht zur Schichtung gemessenen Werte der Wasseraufnahmekoeffizienten. Die Spannweite der Ergebnisse liegt zwischen 0,11 (kg/m²)/√h (Anröchter Dolomit) und 9,4 (kg/m²)/√h (Udelfanger Sandstein). Die Anisotropie der Gefüge und die Diagenese bilden sich ab; parallel zur Schichtung ist die Kapillarität meistens höher. Generell liegen die Werte der Karbonatgesteine niedriger als die der klastischen Sedimente. In der Literatur wird der Wasseraufnahmekoeffizient für Natursteine mit Werten von 0,85 bis 110 (kg/m²)/√h angegeben (MENG 1993). Die Schwankungsbreiten innerhalb eines Gesteins sind relativ hoch.

Karbonatgesteine: Bei Anröchter Dolomit, Krensheimer Muschelkalk, Zeitzer Sandstein und Muschelkalk Halberstadt liegen die Wasseraufnahmekoeffizienten z.T. weit unter 1 (kg/m²)/√h, bei dem porösen Schaumkalk Naumburg weit darüber. Die Versuchskörper vom An-

röchter Dolomit und Zeitzer Sandstein saugen senkrecht zur Schichtung scheinbar etwas stärker als die parallel zur Schichtung. Bei den anderen Karbonatgesteinen verhält es sich umgekehrt. Schaumkalk Naumburg weist unter den Karbonatgesteinen die höchste Kapillarität auf. Die Ursache für diese Unterschiede liegen in der Porosität und am effektiven Porenraum, d.h. am Anteil der Poren, die miteinander in Verbindung stehen. Da es sich bei Anröchter Dolomit und Zeitzer Sandstein um sehr dichte Gesteine handelt, steht für das kapillare Saugen kaum bzw. kein Porenraum zur Verfügung. Bei der mikroskopischen Untersuchung haben Anfärbeversuche des Porenraumes gezeigt, dass die bei den anderen Karbonatgesteinen vorhandenen Poren nur bis zu einem gewissen Anteil untereinander verbunden sind. Teilweise sind die Hohlräume auch so groß, dass sie für die kapillare Wasseraufnahme nicht wirksam sind.

Sandsteine: Beim Ruhrsandstein liegt der Wasseraufnahmekoeffizient mit 0,30 parallel bzw. 0,25 (kg/m²)/√h senkrecht zur Schichtung so niedrig wie bei den Karbonatgesteinen. Grund hierfür ist die geringe Porosität. Anfärbeversuche am Porenraum waren erfolglos. Der Wüstenzeller Sandstein hat nach dem Ruhrsandstein die ge-

ringsten Wasseraufnahmekoeffizienten. Er zeichnet sich ebenfalls durch eine niedrige Porosität aus. An einigen Prüfkörpern von Bucher Sandstein, Ihrlener Sandstein und allen Prüfkörpern des Udelfanger Sandsteins kam es vor Ablauf der Prüfzeit zur Durchfeuchtung, sowohl parallel als auch senkrecht zur Schichtung; beim Udelfanger Sandstein bereits nach 7 Stunden. Diese Sandsteine haben ein sehr hohes und schnelles Saugvermögen. Alle drei Sandsteine besitzen eine hohe Porosität. Sie lassen sich gut durchfärben, d. h. viele Poren stehen untereinander in Verbindung. Das Anfärben des Porenraumes der anderen Sandsteine gestaltete sich schwierig, das könnte ein Hinweis für wenig miteinander kommunizierenden Porenraum sein. Bei den Sandsteinen sind die Wasseraufnahmekoeffizienten parallel zur Schichtung meist höher, d. h. das kapillare Saugvermögen ist stärker als senkrecht zur Schichtung. Dieses Verhalten ist auf Unterschiede in der Textur der Sandsteine zurückzuführen. Das unterschiedliche Saugverhalten ähnlich zusammengesetzter Gesteine könnte in der Art und dem Anteil des Zwischenmittels liegen. So könnten Anteile an quellfähigem Material als Barriere bei der kapillaren Wasseraufnahme wirken (Grunert 1971).

Im Gegensatz zu den Sandsteinen kam es bei den Karbonatgesteinen nicht zur Durchfeuchtung der Proben. Die Kurven in den graphischen Darstellungen der flächenbezogenen Wasseraufnahme (kg/m^2) über der Zeit zeigen für die Karbonatgesteine einen flacheren Anstieg. Stellt man Porosität und flächenbezogene Wasseraufnahme (in kg/m^2) gegenüber, ist bei den Sandsteinen eine lineare Korrelation beobachtbar. Bei den Karbonatgesteinen besteht die Korrelation zwischen Porosität und flächenbezogener Wasseraufnahme aus einem Polynom zweiten Grades (Meng 1993).

Die kapillare Wasseraufnahme gehört wie Sättigungsbeiwert, Feuchtigkeits- und Haftwassergehalt sowie Permeabilität zu den hygrischen Eigenschaften von Natursteinen, die im Zusammenhang mit der Frost- und Verwitterungsbeständigkeit stehen.

Leider waren die zuletzt genannten im Forschungsprogramm nicht enthalten, so dass diese nicht untersucht werden konnten und nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden. Der Wasseraufnahmekoeffizient allein gibt nur bedingt Auskunft für die Frost- und Verwitterungsbeständigkeit des Materials. So ist z. Bsp. der Postaer Sandstein trotz seines höheren Wasseraufnahmekoeffizienten frost- und verwitterungsbeständiger als der Cottaer Sandstein (Grunert 1971).

3.4. Thermische Längenänderung

Die Formveränderung infolge Temperatureinwirkung ist auch bei dem Einsatz von Naturstein an Bauwerken, z. B. als Fassadenbekleidung, Abdeckplatten oder Bodenplatten konstruktiv zu berücksichtigen. Grundlage für die Messung bildet DIN 51 045-1 (12/1999). „Temperaturabhängige Längenänderung“ Δl ist die Summe aus der reversiblen thermischen Längenänderung, den Längenänderungen aus reversiblen Modifikationsänderungen und den irreversiblen Anteilen der Längenänderung, die durch Stoffaustausch, Modifikationsänderungen, Umkristallisation, Schmelzphasenbildung und Kristallisation hervorgerufen werden“ (DIN 51 045-1 12/1999). Besonders bei Naturstein-Baustoffen ist die Anisotropie der die Gesteine aufbauenden kristallinen Minerale und die Anisotropie des Gesteinsgefüges wirksam. Der Wärmedehnkoeffizient α ist ein Merkmal zur Berechnung der Längenänderung fester Stoffe bei Temperaturänderungen. Zu seiner Bestimmung wird die Längenänderung Δl bei der definierten Temperaturänderung ΔT auf die Ausgangslänge l_0 des Prüfkörpers bezogen und der Quotient auf die Temperaturänderung ΔT :

$$\alpha = (\Delta l / l_0) / \Delta T \text{ [1/K]}$$

Δl = Längenänderung

l_0 = Ausgangslänge

ΔT = Temperaturänderung

Die vorliegenden Messungen erfolgten nach dem statischen Verfahren von Knöfel & Schubert (1993) und dem dynamischen Verfahren mittels Dilatometer an dem Gerät STA (Simultaneous Thermal Analysis) 409 der Firma NETZSCH.

Messungen nach Knöfel & Schubert: Die Prüfkörper werden nacheinander definiert auf die Temperaturen + 20 °C, – 20 °C, + 20 °C und + 60 °C eingestellt und die Längenunterschiede gemessen. Geprüft wurden 10 prismenförmige Prüfkörper mit den Maßen 40 × 40 × 160 mm; 5 waren so geschnitten, dass die Längsachse senkrecht, 5 dass sie parallel zur Schichtung steht. Die Prüfkörper wurden bei 60 °C auf Massekonstanz im Trockenschrank getrocknet. Vor der Messung wurden die Prüfkörper allseitig mit dünner Aluminiumfolie wasserdampfdicht abgedichtet, um den Feuchtegehalt der Prüfkörper während der Messung konstant zu halten.

Tab. 5: Wärmedehnkoeffizient gemessen nach Knöfel & Schubert (1993).

Tab. 5: Thermal expansion coefficient measured after Knöfel & Schubert (1993).

Probenbezeichnung	Prüfrichtung zur Schichtung	Wärmedehnkoeffizient α [1E – 6/K]					
		Temperaturintervall					
		α_{T1} [– 20 °C ... + 20 °C]			α_{T2} [+ 20 °C ... + 60 °C]		
		Min.	Mw.	Max.	Min.	Mw.	Max.
Anröchter Dolomit	parallel	4,460	4,635	5,070	6,491	7,308	8,566
	senkrecht	4,019	4,804	5,950	6,915	7,660	8,708
Bucher Sandstein	parallel	5,066	5,645	6,171	13,91	14,49	15,16
	senkrecht	5,945	6,386	6,666	13,62	13,98	14,57
Cottaer Sandstein	parallel	9,775	10,93	12,03	9,251	9,94	10,81
	senkrecht	10,66	11,54	12,12	9,559	10,67	12,12
Ihrlersteiner Grünsandstein	parallel	3,079	3,712	4,323	7,5580	8,092	8,486
	senkrecht	2,676	3,452	4,457	7,225	7,9500	8,748
Krensheimer Muschelkalk	parallel	1,434	1,659	1,933	5,149	5,445	5,593
	senkrecht	1,949	2,379	2,799	5,501	5,983	6,823
Muschelkalk Halberstadt	parallel	2,941	6,625	12,79	0,173	3,339	5,3662
	senkrecht	3,271	5,420	6,579	2,073	4,379	5,681
Obernkirchner Sandstein	parallel	5,450	6,267	6,533	12,61	13,59	14,62
	senkrecht	5,673	6,492	8,486	12,60	13,34	14,85
Postaer Sandstein	parallel	8,816	10,85	12,98	0,173	6,410	10,75
	senkrecht	9,682	10,12	1055	8,374	10,40	12,11
Ruhrsandstein	parallel	6,410	7,130	7,721	10,85	11,44	12,34
	senkrecht	5,492	6,485	7,680	10,26	11,82	13,44
Sander Schilfsandstein	parallel	2,796	3,260	3,823	10,03	11,16	12,14
	senkrecht	3,541	4,147	6,243	8,820	10,05	11,54
Schaumkalk Naumburg	parallel	2,682	3,255	3,812	6,784	7,190	7,570
	senkrecht	3,369	3,641	3,931	6,944	8,227	9,100
Udelfanger Sandstein	parallel	3,546	4,214	5,522	9,343	10,68	11,64
	senkrecht	3,562	4,028	4,688	9,250	9,821	10,21
Wüstenzeller Sandstein	parallel	4,577	5,302	5,976	8,307	9,215	10, 19
	senkrecht	4,222	5,340	6,516	9,255	9,776	10,36
Zeitzer Sandstein	parallel	3,694	4,357	5,215	11,55	12,08	12,60
	senkrecht	4,349	4,880	5,464	12,08	12,81	13,94

Legende:
Anzahl der Messungen pro Temperaturintervall und Richtung je 5, Cottaer Sandstein, Postaer Sandstein, Muschelkalk Halberstadt je 3). Min. = niedrigster Messwert; Max. = höchster Messwert, Mw. = arithmetischer Mittelwert.

Die Prüfkörper wurden bei einer Haltezeit von zwei Stunden der jeweiligen Temperatur im Klimaschrank ausgesetzt und anschließend die Längenänderung gemessen. Aus der gemessenen Längenänderung Δl wird, bezogen auf die Ausgangslänge l_0 , der Wärmedehnkoeffizient α_T nach der Formel berechnet:

$$\alpha_{T1,2} = (\Delta l/l_0)/\Delta T [1/K]$$

α_T = Wärmedehnkoeffizient
 Δl = Längenänderung
 l_0 = Ausgangslänge
 ΔT = Temperaturdifferenz

wobei α_{T1} den Temperaturbereich von – 20 °C bis + 20 °C und α_{T2} den Bereich von + 20 °C bis + 60 °C umfasst. Die Mittelwerte und die Schwankungsbreiten werden in Ta-

Tab. 6: Wärmedehnkoeffizient nach Dettling (1961).**Tab. 6:** Thermal expansion coefficient after Dettling (1961).

Gestein	Temperaturbereich in °C	mittlere lineare Wärmedehnzahl α [1E-6/K] Grenzwerte	mittlere lineare Wärmedehnzahl α [1E-6/K] Mittelwert
Sandstein mit kieseligem Bindemittel	0 ... 60	10,5 ... 12,0	11,8
sonstige Sandsteine	0 ... 60	10,0 ... 12,5	11,0
Kalkst. (reiner Kalkspat)	0 ... 30	3,5 ... 6,0	4,5
	30 ... 60	4,0 ... 6,5	5,0
Kalkstein mit Beimengungen	0 ... 30	bis 11,0	
	30 ... 60	bis 11,5	
Dolomit, Magnesit	0 ... 60	7,0 ... 10,0	8,5

belle 5 angegeben. Die Messungen konnten im Labor des Instituts für Baustoffe und Tragwerke der TU Dresden mit Unterstützung durch Frau Dipl.-Ing. U. Menzel ausgeführt werden.

Auswertung der Messungen nach Knöfel & Schubert: Die Ursache für unterschiedliches Wärmedehnungsverhalten der einzelnen Gesteine liegt im Mineralbestand (prozentualer Anteil der einzelnen Minerale am Gesamtkornbestand) und im Gefüge. Eine Richtungsabhängigkeit der Wärmedehnung kann durch das Gesteinsgefüge bedingt sein, wie ablagerungsbedingter, schichtiger Materialwechsel oder Einregelung der Mineralkörner. (Kristalline Minerale haben unterschiedliche Dehnungen in den verschiedenen Richtungen des Kristallgitters.) Im Allgemeinen zeigen Karbonatgesteine eine thermisch geringere Dehnung als Sandsteine. Beimengungen im Karbonatgestein, z. B. Quarz, können die Wärmedehnung erhöhen.

Temperaturbereich – 20 bis + 20 °C: Da die Proben bei 60 °C getrocknet worden sind, kann sich trotz Massekonstanz noch Restwasser in den Poren befinden. Im Temperaturbereich unter 0 °C kann dieses Restwasser gefrieren und eine zusätzliche Dehnung hervorrufen. Die Messwerte umfassen den Bereich von 1,434 10⁻⁶/K für Krensheimer Muschelkalk bis 12,98 10⁻⁶/K für Postaer Sandstein.

Karbonatgesteine: Die Schwankungsbreite der Karbonatgesteine liegt zwischen 1,434 10⁻⁶/K (Krensheimer Muschelkalk) und 12,79 10⁻⁶/K (Muschelkalk Halberstadt). Erhöhte Dehnwerte bei Anröchter Dolomit und Zeitzer Sandstein können durch den Gehalt an Quarz-

komponenten hervorgerufen sein. Die sehr hohen Dehnungswerte des Muschelkalkes Halberstadt sind nicht eindeutig zu erklären.

Sandsteine: Die Schwankungsbreite liegt bei den Sandsteinen zwischen 2,676 10⁻⁶/K für Ihrlersteiner Grünsandstein und 12,12 10⁻⁶/K für Cottaer Sandstein. Je nach Art und Menge des Bindemittels kann die Wärmedehnung schwanken. Kieselig gebundene Sandsteine, z. B. Bucher Sandstein, Obernkirchner Sandstein, Postaer Sandstein und Ruhrsandstein, haben eine höhere Wärmedehnung als karbonatisch gebundene (Ihrlersteiner Grünsandstein). Die Dehnungswerte für Sandsteine mit tonigem Bindemittel: Sander Schilfsandstein, Udelfanger Sandstein und Wüstenzeller Sandstein fallen geringer aus als die der kieselig gebundenen. Eine Ausnahme bildet Cottaer Sandstein. Neben Tonmineralen enthält er kohlige Substanz. Durch beide Komponenten kann ein hoher Gehalt an Restwasser trotz Trocknung zurückbleiben. Die hohen Dehnwerte könnten ihre Ursache im Gefrieren dieses Porenwassers und damit verbundenen Gefügeauflösungen haben.

Temperaturbereich + 20 bis + 60 °C: Die Messwerte liegen zwischen –0,178 10⁻⁶/K für Muschelkalk Halberstadt und 15,16 10⁻⁶/K für Bucher Sandstein. Karbonateinkristalle zeigen eine sehr starke Anisotropie in ihrem Dehnverhalten, auch negative Dehnwerte in einer Achsenrichtung.

Generell gliedern sich die vorliegenden Messwerte in bereits vorhandene Ergebnisse ein, wie die u. a. von Dettling (1961) publizierten Werte in Tabelle 6 zeigen.

Messungen mit dem Dilatometer: Hierbei werden die Probenkörper einem kontrollierten Aufheizprogramm un-

Tab. 7: Wärmedehnkoeffizient gemessen mit dem Dilatometer (STA 409, Fa. NETZSCH).

Tab. 7: Thermal expansion coefficient measured by dilatometer (STA 499 Fa. NETZSCH).

Probenbezeichnung	Prüfrichtung zur Schichtung	Wärmedehnkoeffizient α [$10^{-6}/K$]		
		Temperaturintervall		
		20 ... 60 °C	60 ... 00 °C	20 ... 300 °C
Anröchter Dolomit	parallel	5,7886	7,796	8,938
	senkrecht	5,2778	7,481	9,848
Bucher Sandstein	parallel	9,1438	12,312	15,566
	senkrecht	8,7478	12,208	15,189
Cottaer Sandstein	parallel	9,0620	12,135	14,632
	senkrecht	9,0261	12,041	14,764
Ihrlersteiner Grünsandstein	parallel	6,8430	10,619	15,979
	senkrecht	5,9517	10,545	16,663
Krensheimer Muschelkalk	parallel	4,8247	8,119	15,023
	senkrecht	5,3918	9,724	17,533
Muschelkalk Halberstadt	parallel	3,4994	6,124	14,161
	senkrecht	2,7653	5,436	14,889
Obernkirchner Sandstein	parallel	8,7268	11,584	14,032
	senkrecht	7,6397	11,148	13,377
Postaer Sandstein	parallel	10,1860	12,810	15,862
	senkrecht	9,7927	13,284	16,091
Ruhrsandstein	parallel	8,3477	10,944	13,947
	senkrecht	8,5441	11,417	14,570
Sander Schilfsandstein	parallel	5,9464	6,467	10,451
	senkrecht	5,8154	7,065	11,456
Schaumkalk Naumburg	parallel	6,9958	9,208	11,977
	senkrecht	7,4576	9,172	12,531
Udelfanger Sandstein	parallel	5,8610	10,231	13,281
	senkrecht	7,5042	10,322	14,405
Wüstenzeller Sandstein	parallel	7,3210	9,755	12,791
	senkrecht	6,8808	9,015	12,125
Zeitzer Sandstein	parallel	6,9731	9,938	20,318
	senkrecht	6,5981	9,754	14,154

terworfen. Zum Einsatz kam das Dilatometer 402 EP der Firma NETZSCH. Dabei handelt es sich um ein Schubstangendilatometer, d. h. die Längenänderung beim Aufheizen der in einer Halterung eingespannten stäbchenförmigen Probe wird mechanisch auf das Anzeigegerät übertragen. Die als Probenhalterung verwendeten Materialien müssen in ihrem Temperaturverhalten definiert sein und ein reversibles Verhalten zeigen. Für diese Messungen muss die Probenhalterung aus Quarzglas sein. Sinterkorund zeigt in den unteren Temperaturbereichen eine starke Eigendehnung, die die Dehnungswerte für die Gesteine z. T. stark überlagern kann. Die Temperatur wird über ein Thermoelement vom Typ S, das sich über der Probe

in der Halterung befindet, gemessen. Die Ausgangslänge der Probekörper wurde vor dem Einbau in die Halterung bei der Bezugstemperatur von ca. 20 °C gemessen.

Die Größe und Form der Prüfkörper ist gerätespezifisch. Die Prüfkörper sind stäbchenförmig, haben eine Stärke von ca. 8 mm und eine Länge von mindestens 25 mm bis höchstens 50 mm. Die Endflächen der Probekörper müssen eben und rechtwinklig zur Probenlängsachse sein, die Kanten frei von Graten. Nur wenn die Gesteine ausreichend homogene Gesteine und nicht zu grobkörnig sind, ist es möglich, die dem Gerät entsprechenden kleinen Prüfkörper herzustellen. Für das Zuschneiden der Prüfkörper stand eine Trenn- und Schleif-

maschine Typ Discoplan-TS der Firma STRUERS zur Verfügung. Bei einigen der Gesteine gestaltete sich dieses Vorhaben als schwierig, z.B. durch eine lockere Kornbindung oder starke Ausprägung der Schichtung. Aus Kapazitätsgründen konnte die Wärmedehnung nur an je einem Stäbchen senkrecht und parallel zur Schichtung bestimmt werden.

Zur Beurteilung des Dehnverhaltens von Gesteinen wird in der Literatur (Peschel 1977) ein Temperaturbereich von 0 bis 200 °C als ausreichend angegeben. Bei den vorliegenden Messungen wurde für alle Proben der Bereich zwischen 20 °C und 300 °C untersucht. Die Auswertung der Dilatationskurve erfolgte rechnergestützt. Tabelle 7 enthält die Ergebnisse.

Auswertung der Messungen mit dem Dilatometer: Da es sich hier bei den angegebenen Werten um die Ergebnisse von Einzelmessungen handelt, dürfen sie in ihrer Aussage nicht zu eng bewertet werden. Trotzdem sollen sie diskutiert werden. Zunächst die Werte des Temperaturintervalls 20 bis 300 °C: Die Mehrheit der Gesteine zeigt senkrecht zur Schichtung die größeren Dehnwerte. Die Differenz zwischen den senkrecht und parallel zur Schichtung geprüften Probekörpern ist bei den einzelnen Gesteinen unterschiedlich. Die größten Unterschiede zeigen Anröchter Dolomit, Ihrlersteiner Grünsandstein, Krensheimer Muschelkalk und Udelfanger Sandstein. Bucher Sandstein, Obernkirchner-, Wüstenzeller- und Zeitzer Sandstein sind durch eine etwas stärkere Dehnung parallel zur Schichtungsrichtung gekennzeichnet. Die Differenz ist meist gering. Eine ausgeprägte Schichtung als mögliche Ursache kommt nicht in Frage, da keines der genannten Gesteine eine solche zeigt. Bei den Karbonatgesteinen ist sie durch eingeregeltere Fossilreste angedeutet. Bei Bucher Sandstein ist eine Schrägschichtung, hervorgerufen durch Korngrößenwechsel, sichtbar. Sie hat keinen stärkeren Einfluss auf das Dehnverhalten. Ebenso ist kaum ein Unterschied im Wärmedehnverhalten des Cottaer Sandsteins parallel und senkrecht zur Schichtungsrichtung zu beobachten, obwohl Cottaer Sandstein eine deutliche Schichtung hat. Krensheimer Muschelkalk und Muschelkalk Halberstadt zeigen ein stärkeres Ansteigen des Ausdehnungskoeffizienten in den höheren Temperaturbereichen als die übrigen Gesteine. Grundlegende Unterschiede zwischen der Dehnung der Karbonatgesteine und der Dehnung der Sandsteine aber bestehen nicht. Nur in den unteren Temperaturbereichen sind die Ausdehnungskoeffizienten der Karbonatgesteine z. T. etwas niedriger.

Die Ergebnisse beider Verfahren schließen in den Temperaturintervallen aneinander an, sind aber nicht unmittelbar miteinander vergleichbar. Sie unterscheiden sich in den methodischen Ansätzen. Die Probekörper haben eine andere Geometrie und können leicht den Homogenitätsbereich unterschreiten. Und die Proben sind unterschiedlich vorbehandelt worden.

Für das Verfahren nach Knöfel & Schubert wurden die Prüfkörper bis zur Massekonstanz getrocknet, mit Alufolie umwickelt und anschließend mit einer Haltezeit von zwei Stunden dem jeweiligen Temperaturbereich ausgesetzt. Die Prüfkörper für das Dilatometerverfahren wurden bei Raumtemperatur gelagert. Sie enthielten beim Messvorgang noch eine geringe Restfeuchte. Die Wärmedehnung kann bei Gesteinen mit einem Restfeuchtegehalt gegenüber getrockneten Gesteinen geringer sein. Im Temperaturintervall + 20 bis + 60 °C überdecken sich beide Verfahren. Die Messwerte des Dilometers liegen meist dicht unter dem niedrigsten Messwert des Verfahrens nach Knöfel und Schubert. Nur bei dem Halberstädter Muschelkalk, dem Postaer Sandstein und dem Schaumkalk Naumburg liegen die Messwerte des Dilometers in der Spannweite der Messwerte nach KNÖFEL und SCHUBERT. Die thermische Anisotropie der Gesteine bildet sich beim Vergleich der Verfahren nur bedingt ab.

3.5. Wärmeleitfähigkeit

„Die Wärmeleitfähigkeit λ ist eine Stoffeigenschaft, die angibt, wie groß in einem gegebenen Temperaturfeld der Wärmestrom ist, der die Messfläche unter der Wirkung des Temperaturgefälles in Richtung der Flächennormalen durchströmt“ (DIN 52 612 9/1979). Sie wird in W/(mK) angegeben. Die Wärmeleitfähigkeit wurde in der Materialprüfanstalt Dresden (MPA) von Frau Kaltoven mit dem Einplattenmessverfahren nach Bock (DIN 52 612 9/1979) bestimmt.

Die plattenförmigen Prüfkörper haben die Abmessungen 300 × 300 × 35 mm. Die Oberflächen der Prüfkörper müssen eben und planparallel sein. In dem Messgerät lagert der Prüfkörper während der Prüfung zwischen einer Heizplatte (oben) und einer Kühlplatte (unten). Mit einem rechnergestützten Messprogramm wird der Wärmefluss durch den Prüfkörper aufgenommen. Vor der Messung wurden die Prüfkörper bei 60 °C bis zur Massekonstanz getrocknet.

Tab. 8: Wärmeleitfähigkeit der Gesteine.

Tab. 8: Thermal conductivity of the rocks.

Probenbezeichnung	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]						Af
	λ_1 parallel zur Schichtung			λ_2 senkrecht zur Schichtung			λ_1/λ_2
	Min.	Mw.	Max.	Min.	Mw.	Max.	
Anröchter Dolomit	1,3320	1,7330	1,9930	1,2970	1,7653	2,0410	0,98
Bucher Sandstein	1,2280	1,2867	1,3840	1,4050	1,4617	1,5680	0,88
Cottaer Sandstein	1,5480	1,6693	1,7420	1,6640	1,6957	1,7210	0,98
Ihrlersteiner Grünsandstein	1,3330	1,4107	1,5120	1,3700	1,4107	1,4430	1,00
Krensheimer Muschelkalk	0,7790	0,8500	0,8940	1,0380	1,0777	1,1230	0,79
Muschelkalk Halberstadt	0,7640	0,7867	0,8270	0,5390	0,6883	0,8130	1,14
Obernkirchner Sandstein	0,8140	1,3480	1,6980	0,9960	1,0220	1,0640	1,32
Postaer Sandstein	1,1120	1,2370	1,3380	0,9310	1,0467	1,1330	1,18
Ruhrsandstein	1,3990	1,6373	2,0600	0,6480	0,9570	1,2120	1,71
Sander Schilfsandstein	1,0020	1,1620	1,2500	1,2140	1,2893	1,4010	0,90
Schaumkalk Naumburg	1,3240	1,7087	1,9550	1,6560	1,7127	1,8170	1,00
Udelfanger Sandstein	1,3070	1,3633	1,4000	1,1430	1,2390	1,3210	1,10
Wüstenzeller Sandstein	0,8690	1,2263	1,4170	0,9780	1,0760	1,1370	1,14
Zeitzer Sandstein	0,8270	1,3470	1,4170	–	–	–	–

Legende:
Anzahl der gemessenen Prüfkörper pro Prüfrichtung 3; Muschelkalk Halberstadt senkrecht 6; Min.= niedrigster Wert, Max. = höchster Wert, Mw. = arithmetisches Mittel.

Auswertung: Die Wärmeleitfähigkeiten der Gesteine ist abhängig vom Mineralbestand und vom Gefüge. Unter den Mineralen im Mineralbestand der hier untersuchten Gesteine haben Quarz mit 7,67 W/mK, Chlorit mit 5,14 W/mK, Dolomit mit 4,50 W/mK und Calcit mit 3,57 W/mK hohe Wärmeleitfähigkeit; Muskovit mit 2,32 W/m K, Biotit mit 1,17 W/m K und die Kalifeldspäte mit 2,31–2,49 W/m K eine niedrige (Landolt-Börnstein 1982: 311, 312). Auch der Grad der Verfestigung und die Art der Bindung haben Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit. Mit steigender Dichte nimmt sie zu, mit steigender Porosität nimmt sie ab. Sie ist auch abhängig von der Porenfüllung. Desgleichen hat auch Klüftigkeit eine Abnahme der Wärmeleitfähigkeit zur Folge. Die Anisotropie im Gefüge, wie Einregelung der Mineralkörner oder Schichtung, kann sich in einer Anisotropie der Wärmeleitfähigkeit, die der Anisotropiefaktor ($\lambda_{\text{parallel}}/\lambda_{\text{senkrecht}}$) beschreibt, ausdrücken. Karl, Manthey & Schuster (1965) geben für wenig geschichtetes Gestein einen Anisotropiefaktor von 1,0 bis 1,2 an, für stark ge-

schichtete Sandsteine einen Anisotropiefaktor von 1,5 bis 2,0. Schwankungen der Wärmeleitfähigkeit innerhalb einer Gesteinsart können auf dem Zusammenspiel der beschriebenen Faktoren beruhen.

Die Spannweite der Literaturwerte ist hoch. Als Beispiele für Gesteine aus Deutschland wurden folgende Werte zusammengestellt (Landolt-Börnstein (1982: 329):

Sandstein	1,3–5,1 W/m K	n = 67
kompakter Kalkstein	2,3–3,5 W/m K	n = 6
Dolomit	2,5–4,5 W/m K	n = 37
Kalkmergel	1,8–3,5 W/m K	n = 8

Tabelle 8 enthält die arithmetischen Mittelwerte und die Spannweiten der an den geprüften Gesteinen parallel und senkrecht zur Schichtung gemessenen Wärmeleitfähigkeiten λ . Unabhängig von Gestein und Prüfrichtung liegt der niedrigste Messwert bei 0,8140 W/m K (Obernkirchner Sandstein, parallel zur Schichtung), der höchste Wert bei 2,0600 W/m K (Ruhrsandstein, parallel zur

Schichtung). Damit liegen die Werte im unteren Bereich der oben angegebenen Literaturwerte.

Karbonatgesteine: Anröchter Dolomit und Schaumkalk Naumburg zeigen die höchsten Werte, Muschelkalk Halberstadt und Krensheimer Muschelkalk die niedrigsten Werte der Wärmeleitfähigkeit. Anröchter Dolomit besitzt neben einer hohen Dichte eine geringe Porosität.

Die Messwerte für den Schaumkalk Naumburg sind nicht vergleichbar, da es sich bei den Prüfkörpern für dieses Messverfahren um eine andere Varietät des Schaumkalkes handelt. Krensheimer Muschelkalk und Muschelkalk Halberstadt haben eine hohe Dichte. Durch die hohe Porosität wird die Wärmeleitfähigkeit herabgesetzt. Die Schwankungsbreite der Mittelwerte bei den Karbonatgesteinen liegt zwischen 0,6883 (Muschelkalk Halberstadt) und 1,7653 W/mK (Anröchter Dolomit).

Sandsteine: Die höchste Wärmeleitfähigkeit zeigt Cottaer Sandstein, die niedrigste Ruhrsandstein. Ruhrsandstein besitzt eine ausgeprägte Wärmeleitfähigkeitsanisotropie. Es besteht ein deutlicher Unterschied zwischen der Wärmeleitfähigkeit parallel und senkrecht zur Schichtung. Durch den hohen Gehalt von Mineralen mit einer geringen Wärmeleitfähigkeit (Feldspat, Glimmer, kohlige Substanz und Tonminerale) kann die Wärmeleitfähigkeit des Ruhrsandsteins erheblich herabgesetzt werden. Bei Wüstenzeller Sandstein und Sander Schilfsandstein (geringe Porositäten) nimmt die Wärmeleitfähigkeit durch den Gehalt an Glimmer und Feldspat ab. Die Schwankungsbreite der Mittelwerte liegt bei den Sandsteinen zwischen 0,9570 (Ruhrsandstein) und 1,6957 W/m K (Cottaer Sandstein).

3.6. Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit gibt den Widerstand an, den feste Körper dem Zerdrücken entgegensetzen. Sie hat die Dimension N/mm². Die Messungen wurden von Frau Dipl.-Ing. Menzel im Labor des Institutes für Tragwerke und Baustoffe der TUD ausgeführt. Die Proben waren lufttrocken, die Maße der Prüfkörper betragen 40 × 40 × 160 mm.

Bei den hier vorliegenden Messungen zeigte unter den Sandsteinen der Bucher Sandstein die niedrigste Druckfestigkeit mit einem Mittelwert von 38,00 N/mm² und

einer Spannweite zwischen 35,0 und 41,0 N/mm². Die höchsten Werte erbrachte der Ruhrsandstein, sie lagen zwischen 91,2 und 168,0 N/mm² mit einem arithmetischen Mittel von 140,16 N/mm².

Bei den Karbonatgesteinen zeigte die niedrigsten Werte der Schaumkalk Naumburg, sie lagen zwischen 12,8 und 38,8 N/mm² mit einem arithmetischen Mittel von 24,36 N/mm². Die höchsten Werte wurden am Zeitzer Sandstein gemessen mit Werten zwischen 98,0 und 188,9 N/mm² und einem arithmetischen Mittel von 143,78 N/mm². Generell sind die Messwerte mit bereits publizierten Druckfestigkeits-Werten von äquivalenten Gesteinen vergleichbar. Die Messung der Druckfestigkeit war nachträglich in das Programm aufgenommen worden. Von drei Proben lagen keine geeigneten Prüfkörper mehr vor. Deshalb wurden die Werte für Cottaer und Postaer Sandstein einer älteren Arbeit entnommen (GRUNERT 1982). Beide Sandsteinproben waren in den gleichen Steinbruchgebieten entnommen worden, denen auch die entsprechenden Proben des Messprogrammes entstammen. Sie sind also im Material gleich. Allerdings erfolgte damals die Messung an Würfeln mit 5 cm Kantenlänge; damit sind die Werte nicht direkt vergleichbar. Die Druckfestigkeiten enthält Tab. 9.

4. Schlussbetrachtungen

Thema dieser Arbeit war die Bestimmung gesteintechnischer Kennwerte an 14 Gesteinen, die seit langem als Bausteine genutzt worden sind und deren Kenntnis für die Projektierung moderner Bauwerke ebenso wichtig ist wie für die Erhaltung historischer Bauwerke. Das Versuchsprogramm umfasste die Bestimmung wichtiger Gefügemerkmale wie Rohdichte, Reindichte und Gesamtporosität, kapillare Wasseraufnahme, Wärmedehnung, Wärmeleitfähigkeit und zuzüglich Druckfestigkeit. Von den hygrischen Eigenschaften wurde die kapillare Wasseraufnahme bestimmt. Die Ermittlung der Kennwerte erfolgte in Anlehnung an vorhandene DIN-Vorschriften und andere in der Praxis angewandte Verfahren. Bei der Messung der thermischen Dehnung kamen zwei Methoden zur Anwendung: das Verfahren nach Knöfel & Schubert und das Dilatometerverfahren. Bei den vektorialen Merkmalen

Tab. 9: Druckfestigkeit.

Tab. 9: Compressive strength.

Probenbezeichnung	Druckfestigkeit [N/mm ²]		
	Min.	Max.	arithm. Mittel
Anröchter Dolomit	101,1	164,9	140,78
Bucher Sandstein	35,0	41,0	38,00
Cottaer Sandstein *)	17,0	29,1	21,54
Ihlersteiner Grünsandstein	36,6	46,8	40,72
Krensheimer Muschelkalk	46,0	65,0	55,20
Muschelkalk Halberstadt	n. g.	n. g.	n. g.
Obernkirchner Sandstein	59,0	99,9	80,12
Postaer Sandstein **)	39,9	45,2	42,90
Ruhrsandstein	91,2	168,0	140,16
Sander Schilfsandstein	57,0	67,0	62,80
Schaumkalk Naumburg	12,8	38,8	24,36
Udelfanger Sandstein	62,0	69,0	65,20
Wüstenzeller Sandstein	91,0	98,0	94,60
Zeitzer Sandstein	98,0	188,9	143,78

Legende:
Druckfestigkeit gemessen an Prismen (n = 5). *) Cottaer Sandstein aus Stbr. Neuendorf. **) Postaer Sandstein aus Stbr. Schöna, gemessen an Würfeln (n = 5) (Grunert 1982), n. g. = nicht gemessen.

der gesteintechnischen Eigenschaften erfolgte die Bestimmung sowohl parallel als auch senkrecht zur Schichtung.

Die Bestimmung von Dichte und Porosität dient der allgemeinen Charakterisierung der Gesteine. Sie steht im Zusammenhang mit der Frost- und Verwitterungsbeständigkeit. Gleichzeitig kann sie Rückschlüsse auf eine mögliche Schadstoffaufnahme und einen möglichen Schadstofftransport zulassen. Die thermische Dehnung ist für die hauptsächlich im Hochbau als Platten eingesetzten Natursteine von Bedeutung. Die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine ist eine Rechengröße für die Bauwerksklimatik. Die Wärmedämmung kann besonders bei der Umnutzung historischer Gebäude von Wichtigkeit sein. Poröse Gesteine mit niedriger Wärmeleitfähigkeit können den Wärmeaustausch verzögern, d. h. es entstehen gleichmäßig warme Räume. Dichte Gesteine mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit neigen zum Niederschlagen von Feuchtigkeit an ihrer Oberfläche.

Um die Ergebnisse interpretieren zu können und den Lesern Vergleichsmöglichkeiten zu petrographisch ähnlichen Gesteinen zu vermitteln, wurden Mineralbestand und Gefüge der untersuchten Gesteine mit Hilfe der Polarisationsmikroskopie und der Rasterelektronenmikro-

skopie beschrieben, der Mineralbestand auch mittels Röntgenanalyse und thermischer Analyse. Die petrographische Untersuchung gestattet die nachstehende Gruppierung:

Klastische Sedimente:

- Die Körner stehen in Kornkontakt. Sie sind durch Zusammenkristallisieren miteinander verwachsen. Der Porenraum ist offen. Hierzu gehören Bucher Sandstein, Obernkirchner Sandstein, Postaer Sandstein.
- Die Körner stehen in Kornkontakt; der Porenraum ist teilweise oder ganz mit tonigem Zwischenmittel ausgefüllt. Dies trifft zu für Cottaer Sandstein, Ruhrsandstein, Sander Schilfsandstein, Udelfanger Sandstein, Wüstenzeller Sandstein.
- Die Körner stehen nur zum Teil in Kornkontakt; Karbonate bilden das Bindemittel. Dies ist der Fall bei Anröchter Dolomit, Ihlersteiner Grünsandstein, Zeitzer Sandstein.

Karbonatische Sedimente:

- Partikel von karbonatischen Organismenresten, Ooide, wenige klastische Komponenten „schwimmen“ in karbonatischem Zement. Zu dieser Gruppe zählen

Krensheimer Muschelkalk, Muschelkalk Halberstadt, Schaumkalk Naumburg.

Die hier geprüften petrophysikalischen Merkmale überschneiden sich jedoch von Gruppe zu Gruppe. Nur innerhalb der Gruppen sind Beziehungen zum Grad der Diagenese erkennbar. So setzt das stärkere authigene Wachstum der Quarze bei Obernkirchner Sandstein die Porosität und die kapillare Wasseraufnahme geringfügig herab, aber die Druckfestigkeit hinauf. Auch beim Ruhrsandstein bewirkt die höhere Packungsdichte eine niedrigere Porosität, eine niedrigere kapillare Wasseraufnahme und eine höhere Druckfestigkeit. Die dichte Verwachsung des karbonatischen Bindemittels beim Anröchter Dolomit und Zeitzer Sandstein hat die gleiche Wirkung. Die hohe Porosität beim Schaumkalk Naumburg ist im optischen Bild unübersehbar. Die thermischen Merkmale der Gesteine sind wenig differenziert, aber enger an die mineralische Zusammensetzung gebunden. Bei der Wärmeleitfähigkeit sind neben dem Mineralbestand Porosität und Kornkontakte von Einfluss, desgleichen bei der Wärmedehnung. Bei der Behandlung der einzelnen Merkmale war bereits auf die augenfälligen Verbindungen zur Petrographie hingewiesen worden.

Die Auswahl der Gesteine für diese Untersuchungen bietet einen guten Querschnitt durch die Vielfalt der in Deutschland genutzten Baugesteine. Damit werden Vergleiche und Analogieschlüsse ermöglicht. Doch trotz der Gemeinsamkeiten hat jedes Gestein eigene Besonderheiten, jedes ist ein „Individuum“. Zwar bestimmen der Mineralbestand und das Gefüge die Eigenschaften der Gesteine, aber bei hohen Anforderungen können die mikroskopischen Untersuchungen die physikalischen Messungen nicht ersetzen.

5. Danksagung

An mehreren Abschnitten dieser Arbeit waren selbstlose Helfer beteiligt. Allen im Text Genannten – aber auch den Ungenannten – danken die Autoren ganz aufrichtig. Der besondere Dank gebührt Frau Dipl.-Geoln. Brigitte Grunert für die aktive Unterstützung bei der Fertigstellung des Manuskriptes zu dieser Veröffentlichung.

6. Literaturverzeichnis

- Czekalla, M (2002): Dokumentation und Analyse der Sandsteingewinnung in Deutschland. – Unveröff. Diplomarbeit Technische Universität Dresden, Fakultät für Forst-, Geo- und Hydrowissenschaften Institut für Geographie; Fakultät für Bauingenieurwesen, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Angewandte Geologie der TU Dresden, Dresden. I–IX, 1–95, 4 Anl. 1 Karte.
- Detting, H (1961): Die Wärmedehnung des Zementsteines, der Gesteine und der Betone / vorgelegt von Heinz Detting. Diss. 1959. Hochschulschrift, Technische Hochschule Stuttgart, Stuttgart. 1–193, graph. Darst.
- Deutsche Stratigraphische Kommission [Hrsg.] (2002): Stratigraphische Tabelle von Deutschland, Aufl. 2002, Potsdam.
- DIN 52 102 §(1988): Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Bestimmung von Dichte, Trockenrohddichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität. – Seite 1–10, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- DIN 52 617 (5/1987): Bestimmung der Wasseraufnahmekoeffizienten von Baustoffen. Deutsche Norm. – Seite 1–4, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- DIN EN 1925 (5/1999): Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten infolge Kapillarwirkung. Deutsche Fassung. – Seite 1–6, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- DIN 51 045 (09/1989): Bestimmung der thermischen Längenänderung fester Körper. – Teil 1: Grundlagen: Seite 1–8, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- DIN 51 045-1 (12/1999): Bestimmung der thermischen Längenänderung fester Körper. September 1989 (Entwurf). – Seite 1–12, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- DIN 52 612 (9/1979): Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit dem Plattengerät. – Teil 1: Durchführung und Auswertung, Seite 1–6 (9/1970). Teil 2: Weiterbehandlung der Messwerte für die Anwendung im Bauwesen, Seite 1–5, (6/1984). Teil 3 Wärmedurchlasswiderstand geschichteter Materialien für die Anwendung im Bauwesen. Seite 1–3 (9/1979). DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin; Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.
- Grimm, W.-D. (1990): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. – 1–255, Anl. 1–200. Arbeitsheft 50, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, München.
- Grunert, S. (1971): Ein Beitrag zur Bewertung von Sandsteinen für bautechnische Zwecke. – Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Jg. 18, 365–368, Weimar.

- Grunert, S (1983): Der Sandstein der Sächsischen Schweiz als Naturressource, seine Eigenschaften, seine Gewinnung und Verwendung in Vergangenheit und Gegenwart. – Von der Fakultät für Bau- Wasser- und Forstwesen des Wissenschaftlichen Rates der TU Dresden zur Erlangung des akademischen Grades Doktor der Wissenschaften (Dr. sc. nat.) genehmigte Dissertation, Dresden. 1–424, 2 Bd., 1 Anlagen-Bd.
- Grunert, S. (1986): Der Sandstein der Sächsischen Schweiz. – Abhandlungen des Staatlichen Museums für Mineralogie und Geologie zu Dresden. Band 34. 5–155, Leipzig, (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie).
- Grunert, S. & Kutschke, D. (1997): Musterfläche Zeitz. Teilbericht Geologie I. Petrographische Charakteristik des Zeitzer Sandsteines (Bearbeitungszeit 1991–1995). Unveröffentlichter Arbeitsbericht. TU Dresden, Inst. f. Geotechnik, Professur Angewandte Geologie. 1–20, 9 Anlagen.
- Hoppe, W. (1939): Vorkommen und Beschaffenheit der Werk- und Dekorsteine in Thüringen. – Berlin (Union Deutsche Verlagsgesellschaft Berlin Roth & Co.). 7–147, 1 Karte, 1 Tafel.
- Karl, R., Manthey, W. & Schuster, K. (1965): Gesteinsphysikalische Parameter: Teil B: Wärmeleitfähigkeitswerte von Mineralen und Gesteinen und deren Abhängigkeit von anderen Gesteinsparametern. Freiburger Forschungshefte (FFH) C 197. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig. 1–76
- Knöfel, D. & Schubert, P. (1993): Mörtel und Steinerfüllstoffe in der Denkmalpflege. – Handbuch, Sonderheft aus der Publikationsreihe der BMFT-Verbundforschung zur Denkmalpflege. Verlag Ernst & Sohn, Berlin. 1–225
- Kutschke, D. (1992): Muschelkalk Halberstadt. Unveröffentlichter Arbeitsbericht. TU Dresden, Inst. f. Geotechnik, Professur Angewandte Geologie.
- Kutschke, D. (1993): Zeitzer Sandstein. Unveröffentlichter Arbeitsbericht. TU Dresden, Inst. f. Geotechnik, Professur Angewandte Geologie.
- Landolt-Börnstein (1982): Zahlenwerte und Funktionen aus Wissenschaft und Technik. Neue Serie. Gruppe V: Geophysik und Weltraumforschung. Band 1 Physikalische Eigenschaften der Gesteine, Teilband A. Thermische Eigenschaften, Seite 305–343. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York.
- Liptay, G. (1971, 1973, 1974, 1975, 1976): Atlas of thermal-analytical curves. Bd. 1–5, Budapest (Akadémiai Kiadó).
- Mackenzie, R. C. (1960 ff): SCIFAX Differentialthermal analysis data index, London.
- Mackenzie, R. C. (1970, 1972): Differential Thermal Analysis. Volume 1: Fundamental Aspects (1970). Volume 2: Application (1972). Academic Press, London & New York.
- Mackenzie, W. S. & Guilford, C. (1981): Atlas der gesteinsbildenden Minerale in Dünnschliffen. Ferdinand Enke Verlag Stuttgart, 1–97.
- Meng, B. (1993): Charakterisierung der Porenstruktur im Hinblick auf die Interpretation von Feuchttransportvorgängen. – Aachener Beiträge zur Bauforschung (ibac), Band 3, Aachen (Verlag der Augustinus Buchhandlung). 1–280.
- Müller, F. (1993 ff): Internationale Natursteinkartei. III. Auflage. – Ebner Verlag, Ulm.
- Peschel, A. (1977): Natursteine. – Monographienreihe Nutzbare Gesteine und Industriemineralien, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie. 1–390.
- Szilagy, J. (1995): Untersuchungen petrophysikalischer Eigenschaften an Leitgesteinen der Denkmalpflege. Unveröffentlichter Forschungsbericht. Professur Angewandte Geologie am Institut für Geotechnik der TU Dresden. 1–42, 51 Abb. (davon 25 Taf.).

6. Anhang

Makro- und Mikrofotos: Dipl.-Geoln. Jana Szilagyi
REM-Aufnahmen: Dr. rer. nat. Michael Schiekel, Dipl.-Geoln. Jana Szilagyi.

Tafel 1: Anröchter Dolomit – dichter Kalkstein mit Fossilienresten.

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab: 1 cm.

Oben rechts: Frische Bruchfläche, Vergrößerung. Hauptsächlich Calcit (graubraun), geringe Anteile von Glaukonit (dunkelgrün) sind homogen verteilt. Maßstab: 1 mm.

Unten links: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Quarze (weiß und grau) kantig, tlw. gut gerundet, in unterschiedlichen Korngrößen. Glaukonit (grünlich schwarz) kugelig, auch langgestreckte Körner. Karbonat (bunt) teilweise Einzelkörner erkennbar, meist als Grundmasse. Maßstab: 0,1 mm.

Unten rechts: REM-Übersichtsaufnahme. In feinkristallines Karbonat eingebettetes Quarzkorn (Bildmitte); Porenräume und „Abdrücke“, die von Fossilien stammen könnten. Maßstab: 100 µm.

Plate 1: Anröchter Dolomit – compact fossiliferous limestone.

Top on the left: Sawed surface. Scale: 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane, magnification. Chiefly calcite (greyish brown). A small amount of glauconite is homogeneous distributed. Scale 1 mm.

Bottom on the left: Microscopic section. Crossed nicols. Quartz (white and grey) angular, partially rounded; Glauconite (greenish black) globular and prismatic grains. Ground mass is fine-grained carbonate (coloured), some grains are recognizable. Scale 0.1 mm.

Bottom on the right: SEM survey picture. In the middle of the picture a quartz-grain imbedded in fine-grained carbonate, voids and imprints of fossils may be. Scale: 100 µm.

Tafel 2: Bucher Sandstein – poröser Quarzsandstein mit Schrägschichtung und Wechsel zwischen feineren und größeren Lagen.

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm

Oben rechts: Frische Bruchfläche. Kornbindung meist über Quarzkornkontakte, die Porenhohlraumform ist gut zu erkennen. Maßstab: 1 mm.

Unten links: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Überwiegend aus Quarzkomponenten bestehend, die punktuell, aber auch durch längliche Kornkontakte, miteinander verbunden sind. Daneben Gesteinsbruchstücke (Polyquarze) und als Kornumrandung bzw. Zwickelfüllung tonige Komponenten auftretend. Maßstab: 0,1 mm.

Unten rechts: REM-Übersichtsaufnahme. Quarzkörner, deren Kornbindung und den sie umschließenden Porenhohlraum. Die Körner sind teilweise mit Tonmineralen umhüllt. Maßstab 100 µm.

Plate 2: Bucher Sandstein – Porous quartzose sandstone with stratification by change in the grain size.

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane, magnification. Chiefly quartz grains in grain bound. The shape of the void spaces is well to see. Scale 1 mm.

Bottom on the left: Microscopic section. Crossed nicols. Quartz (white and grey) angular. Small amount of rock fragments. The most quartz grains are in grain bound; few are surrounded by caolinite. Some void spaces are filled with clay. Scale 0.1 mm.

Bottom on the right: SEM survey picture. Quartz grains, grain bound and the voids. Quartz grains in grain bound; some Grains are enveloped by clay minerals. Scale 100 µm.

Tafel 3: Cottaer Sandstein. Braungrauer, feinkörniger Sandstein; z.T. mit gelblicher Färbung durch Limonit, „Marmorierung“ durch kohlige Lagen, die \pm parallel der Schichtung folgen.

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Oben rechts: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Quarzkomponenten kantig bis schwach gerundet mit punktuellen und länglichen Kornkontakten, z.T. randlich korrodiert. Glaukonite (Bildmitte, oberer Bildrand) in körnig-traubiger Form. Maßstab 1 mm.

Unten: REM-Übersichtsaufnahme. Quarzkomponenten mit Regeneration der Kristallflächen, Porenhohlraumform und Tonminerale (oben links). Maßstab 100 μm .

Plate 3: Cottaer Sandstein. Brownish grey, fine-grained sandstones, partly yellow coloured by limonite; marbled by small layers of coal.

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Microscopic section. Crossed nicols. Quartz grains angular or subrounded in grain bound, partly corroded. Aggregates of glauconite. Pores, in the interspaces clay. Scale 1 mm.

Bottom: SEM survey picture. Quartz grains with regeneration of the crystal faces, pores and clay minerals. Scale 100 μm .

Tafel 4: Ihrlersteiner Grünsandstein. Hellolivgrauer, glaukonitischer, karbonatischer Sandstein mit weißen Fossilresten.

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Oben rechts: Frische Bruchfläche. Glaukonit (dunkelgrün) homogen verteilt, unterschiedliche Farbprägung von hellgrau bis gelblich. Maßstab 1 mm.

Unten links: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Quarzkomponenten kantig oder angerundet, zumeist an Karbonat (bunt) angrenzend, selten punktueller oder länglicher Kontakt zu anderen Quarzkörnern. Glaukonit (grün, gelbgrün) angerundet, tlw. in Nestern auftretend. Maßstab 0,1 mm.

Unten rechts: REM-Detailaufnahme. Glaukonitkorn umgeben von Poren und Quarzkörner mit Aufwachsung von Karbonat, teilweise mit gut ausgebildeten Kristallflächen. Maßstab 100 μm .

Plate 4: Ihrlersteiner Grünsandstein. Greenish grey glauconitic carbonate sandstone with particles of fossils.

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane, magnification. The dark particles are glauconite. Scale 1 mm.

Bottom on the left: Microscopic section. Crossed nicols. Quartz grains angular or subrounded in contact with carbonate (many-colored). Rounded aggregates of glauconite (green or yellow). Scale 0.1 mm.

Bottom on the right: SEM detail picture. Glauconit grain surrounded by pores and Quartz grains with crowded up crystals of carbonates. Scale 100 μm .

Tafel 5: Krensheimer Muschelkalk. Hellgrauer, feinporiger Kalkstein mit Schalenrümern und größeren Hohlräumen durch herausgelöste Schalenreste.

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Oben rechts: Frische Bruchfläche, Vergrößerung. Calcitische Grundmasse, in die Schalenrümern eingebettet sind. Maßstab 1 mm.

Unten links: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Dicht gelagerte, zumeist parallel eingeregelt Schalenreste, umgeben von einem dunklen Saum, innen mit sparitischem Zement gefüllt. In offene Porenräume gesprossene Kristalle durch Imprägnierung des Porenraumes mit gefärbt. Maßstab 1 mm.

Unten rechts: REM-Übersichtsaufnahme. Blockzement und feinkristalliner Calcit nebeneinander, am oberen Bildrand Porenhohlraum. Maßstab 100 μm .

Plate 5: Krensheimer Muschelkalk. Light-grey fine porous limestone with embedded broken shells and caverns by lost of shells.

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane, m. Crossed nicols. Compact layered shells. The shells are surrounded with a dark material and filled with sparagmitic cement. The pore is filled with calcite crystals. Scale 1 mm.

Bottom on the right: SEM survey picture: Compact cement and fine crystalline calcit close to, on the top of the picture a void. Scale 100 µm.

Tafel 6: Muschelkalk Halberstadt. Ockerfarbener, oolithischer Kalkstein mit Schalenresten.

Links oben: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Rechts oben: Frische Bruchfläche. Vergrößerung. Oolithischer Kalkstein mit „leeren“ Poren in feiner Grundmasse und Schalenresten (Muscheln, Schnecken). Maßstab 1 mm.

Links unten: Gesteinsdünnschliff. Ohne Analysator – Ooide (weiß: „leere“ Poren; gelb: mit Fluoreszenzharz imprägniert; dunkelgrau: mit Calcit gefüllt) in mikrosparitischer Grundmasse. Teilweise treten Fossilreste auf. Maßstab 1 mm.

Rechts unten: REM–Detailaufnahme. Calcitfüllung in einem Ooid, randlich feinkörnig, nach innen (links) grobkörniger werdend. Maßstab 100 µm.

Plate 6: Muschelkalk Halberstadt. Ochre coloured, oolitic limestone with fragments of shells.

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane, magnification. Oolitic limestone with “free” pores in a fine-textured matrix. there are fragments of shells (mussels, snails). Scale 1 mm.

Bottom on the left: Microscopic section. Without analyzer. Ooids (white: free pores; yellow: with fluorescence-resin filled pores; dark grey: with calcite filled pores) in microsparitic matrix. Scale 1 mm.

Bottom on the right: SEM detail picture. Calcitic filling of an ooid, at the border fine grained in the middle larger (left side of the picture). Scale 100 µm.

Tafel 7: Obernkirchner Sandstein. Braungrauer, homogener Sandstein mit braunen Flecken (Limonit), z. T. Schalenreste; weiße, Schalenreste ähnelnde, tonige Bereiche (rechte Bildhälfte).

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Oben rechts: Frische Bruchfläche. Vergrößerung. Feinkörniger, homogener Sandstein, tlw. Anreicherungen von dunklem, limonitischem (?) Material. Maßstab 1 mm.

Unten links: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Hauptsächlich aus Quarzkörnern (weiß, grau, schwarz) bestehend mit verzahnten Kornkontakten. Quarze tlw. korrodiert. Vereinzelt treten Gesteinsbruchstücke auf. Maßstab 0,1 mm.

Unten rechts: REM–Übersichtsaufnahme. Quarzkomponenten und Porenstruktur. In Porenräume gewachsene Neubildung von Quarz, welche die detritischen Körner umhüllen. Maßstab 100 µm.

Plate 7: Obernkirchner Sandstein. Brownish grey homogenous sandstone with brown spots (limonite), partly fragments of fossils and inclusions of white clay shaped like fossils.

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane. Magnification. Finely grained sandstone partly concentration of limonitic material. Scale 1 mm.

Bottom on the left: Microscopic section. Crossed nicols. Preponderate quartz (white, grey, black), the grain boundary of the quartz grains are intercrystallized and sometimes corroded. There are few rock particles. Scale 0.1 mm.

Bottom on the right: SEM survey picture. Quartz grains and pores structure. In the pore interspaces are quartz crystals grown with surround the detrital grains. Scale 100 µm.

Tafel 8: Postaer Sandstein. Ockerfarbener, fein- bis mittelkörniger Sandstein.

Links oben: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Rechts oben: Gesteinsdünnschliff Gekreuzte Polarisatoren. Übersicht über die Quarzkorn- und Porenstruktur. In der Hauptsache aus Quarzkomponenten aufgebaut mit Struktur- und Lösungsporen. Die Quarzkörner sind verzahnt. Maßstab 1 mm.

Unten: REM-Übersichtsaufnahme. Quarzkörner umhüllt mit authigenem Quarz. Maßstab 100 µm.

Plate 8: Postaer Sandstein. Ochre coloured fine- to middle grained sandstone

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Microscopic section crossed nicols. Quartz grains in various size intercrystallized form structure pores. Scale 1 mm.

Bottom: SEM survey picture. Quartz grains surrounded with authigenic quartz. Scale 100 µm.

Tafel 9: Ruhrsandstein. Grauer, dichter Sandstein, stellenweise mit Lagen kohligter Substanz und grobkörnigerem Sand.

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Oben rechts: Frische Bruchfläche. Quarz, Feldspat, kohlige Substanz und opakes Material in dichter Lagerung. Maßstab 1 mm.

Unten links: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Quarze, Gesteinsbruchstücke (Polyquarze), Feldspat (mit Zwillinglamellierung) und Glimmer in enger Verbindung, kein sichtbarer Porenraum. Maßstab 1 mm.

Unten rechts: REM-Übersichtsaufnahme. Bruchflächen von Quarzkörnern (Bildmitte, unten rechts). Quarzanwachsungen und Regeneration von Kristallflächen. Zwischen den Quarzen Tonminerale (oben rechts). Maßstab 100 µm.

Plate 9: Ruhrsandstein. Grey compact sandstone, partly with layers of coaly material and coarser grained sand

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane. Quartz, feldspar, coaly material and opaque matter in compact bedding. Scale 1 mm.

Bottom on the left: Microscopic section. Crossed nicols. Quartz, rock particles (polyquartz), feldspar (with lamellar twinning) and mica compact bedded, no visible pore spaces. Scale 1 mm.

Bottom on the right: SEM survey picture. Fracture planes of quartz grains (in the middle of the picture and in the upper right corner), authigenic quartz, between the quartz grains clay minerals (top on the right corner). Scale 100 µm.

Tafel 10: Sander Schilfsandstein. Hellolivgrauer, homogener Sandstein, tlw. „rostfleckig“.

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Oben rechts: Frische Bruchfläche. Quarze, Feldspat, Chlorit (grün) in homogener Verteilung. Maßstab 1 mm.

Unten links: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Quarze (weiß, grau), Gesteinsbruchstücke und Feldspat (mit Zwillinglamellierung), Ton und Poren (schwarz). Die Körner sind punktuellen und länglichen Kornkontakten. Quarzkomponenten z.T. korrodiert und mit anderen Komponenten verzahnt. Maßstab 0,1 mm.

Unten rechts: REM-Übersichtsaufnahme. Korn- und Porenstruktur, Neubildung von Quarz, der in Hohlräume sprosst (links unten) und Regeneration von Kristallflächen. Maßstab 100 µm.

Plate 10: Sander Schilfsandstein. Light olive-green, homogenous sandstone, partly with “iron-moulds”.

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane. Quartz, feldspar and chlorite (green) in homogenous distribution. Scale 1 mm.

Bottom on the left: Microscopic section. Crossed nicols. Quartz (white, grey), feldspar (with lamellar twinning), stone fragments, clay and pores (black). The grains are in point contact and long contact. The quartz grains are partly corroded and also with other grains intercrystallized. Scale 0.1 mm.

Bottom on the right: SEM survey picture. Fabric of grains and pores. Authigenic quartz crown in the pores (on the top), and overgrown crystal faces. Scale 100 μm .

Tafel 11: Schaumkalk Naumburg. Grauer, feinporöser Kalkstein.

Links oben: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Rechts oben: Frische Bruchfläche. Vergrößerung. Oolithischer Kalkstein; Ooide meist mit Calcit ausgefüllt, teilweise auch „leere“ Ooide. Maßstab 1 mm.

Links unten: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Gefüllte Ooide (hell- bis dunkelgrau) und Hohlformen (schwarz) in mikrosparitischer Grundmasse. In Poren calcitischer Zement sprossend. Maßstab 1 mm.

Unten rechts: REM-Übersichtsaufnahme. Unregelmäßig verteilte Ooide (leer und gefüllt) in sparitischer Grundmasse. Maßstab 100 μm .

Plate 11: Schaumkalk Naumburg. Grey, finely porous limestone.

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane. Oolitic limestone, most of the ooids are filled with calcite, some are not filled. Scale 1 mm.

Bottom on the left: Microscopic section. Crossed nicols. Filled ooides (light-grey to dark-grey) and pores (black) in microsparitic matrix. In pores calcite. Scale 1 mm.

Bottom on the right: SEM survey picture. Irregular distributed ooides in sparitic matrix. Scale 100 μm .

Tafel 12: Udelfanger Sandstein. Braungrauer, feinkörniger, homogener Sandstein, glimmerhaltig (helle Punkte) mit dunklen Flecken.

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Oben rechts: Frische Bruchfläche. Vergrößerung. Feinkörniger Sandstein mit dunklen Punkten und teilweise schwarzen Flecken. Maßstab 1 mm.

Unten links: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Sandstein aus Quarz (weiß, grau) und überwiegend Gesteinsbruchstücken bestehend. Quarze meist gerundet, randlich korrodiert mit punktuellen und länglichen Kornkontakten. Einzelne Karbonatkomponenten (oben rechts), Glimmer teilweise verbogen (oberer Bildrand). Maßstab 0,1 mm.

Unten rechts: REM-Übersichtsaufnahme. Kornkomponenten und Porenstruktur, Mineralneubildung (ebene Flächen) in Hohlräume sprossend, Neubildung von Kaolinit (Bildmitte, stapelförmig). Maßstab 100 μm .

Plate 12: Udelfanger Sandstein. Brownish grey, fine-grained homogenous sandstone with mica (light points) with dark spots.

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane. Fine-grained Sandstone with dark points and black spots. Scale 0.1 mm.

Bottom on the left: Microscopic section. Crossed nicols. Sandstone composed by quartz and prevailing rock-particles. The quartz grains are mostly rounded, corroded, in point contacts and long contacts. Sporadic calcite (on the top at right) and deformed mica flakes. Scale 0.1 mm.

Bottom on the right: SEM survey picture: Fabric of grains and pores. Corroded and authigenic overcrown mineral grains. In the middle of the picture an authigenic book of kaolinit. Scale 100 μm .

Tafel 13: Wüstenzeller Sandstein. Rötlichbrauner, homogener feinkörniger Sandstein. Helle, lichtreflektierende Punkte sind Hellglimmer.

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Oben rechts: Frische Bruchfläche. Feinkörniger Sandstein mit deutlichem Hellglimmergehalt und Quarz, tlw. mit Bindemittel überzogene Körner. Maßstab 1 mm.

Unten links: Gesteinsdünnschliff Gekreuzte Polarisatoren. Quarze meist eckig, z.T. abgerundet, oftmals randlich korrodiert. Kornkontakte punktuell und länglich, an korrodierten Stellen auch Verzahnung auftretend. Hellglimmer vereinzelt als große Leisten (gelb) vorkommend, Gesteinsbruchstücke. Maßstab 0,1 mm.

Unten rechts: REM–Detailaufnahme. Feldspat (Bildmitte) umgeben von Quarzkomponenten, z.T. mit tonigen Bindemittel überzogen. Maßstab 100 µm.

Plate 13: Wüstenzeller Sandstein. Reddish brown, homogenous fine grained sandstone. The bright points are light reflecting mica flakes.

Top on the left: Sawed surface: Scale 1 cm.

Top in the right: Fresh fracture plane. Fine grained Sandstone with bright mica and quartz, partly are the grains covered with matrix. Scale 1 mm.

Bottom on the left: Microscopic section. Crossed nicols. Most of the Quartz grains are angular, some partially rounded, often corroded. The gains are in long contact and point contact, at corroded parts intercrystallized. There are also bright Mica and rock particles. Scale 0.1 mm.

Bottom on the right: SEM detail picture. A feldspar grain (in the middle of the picture) surrounded by quartz grains. The grains are partly enveloped by clayish material. Scale 100 µm.

Tafel 14: Zeitzer Sandstein. Grauer, stark dolomitischer Sandstein; durch grüngraue glimmerreiche, tonig Lagen geschichtet.

Oben links: Gesägte Oberfläche. Maßstab 1 cm.

Oben rechts: Frische Bruchfläche. Größere Hohlräume in dicht erscheinender karbonatischer Grundmasse. Maßstab 1 mm.

Unten links: Gesteinsdünnschliff. Gekreuzte Polarisatoren. Quarzkomponenten (Einzelkörner: weiß, grau; Polyquarze: fleckig) zwischen Karbonaten (Dolomit: braun, braungrau; Calcit: bunt) „schwimmend“. Porenraum nicht erkennbar. Maßstab 1 mm.

Unten rechts: REM–Übersichtsaufnahme. Überwiegend karbonatische Grundmasse. Maßstab 100 µm.

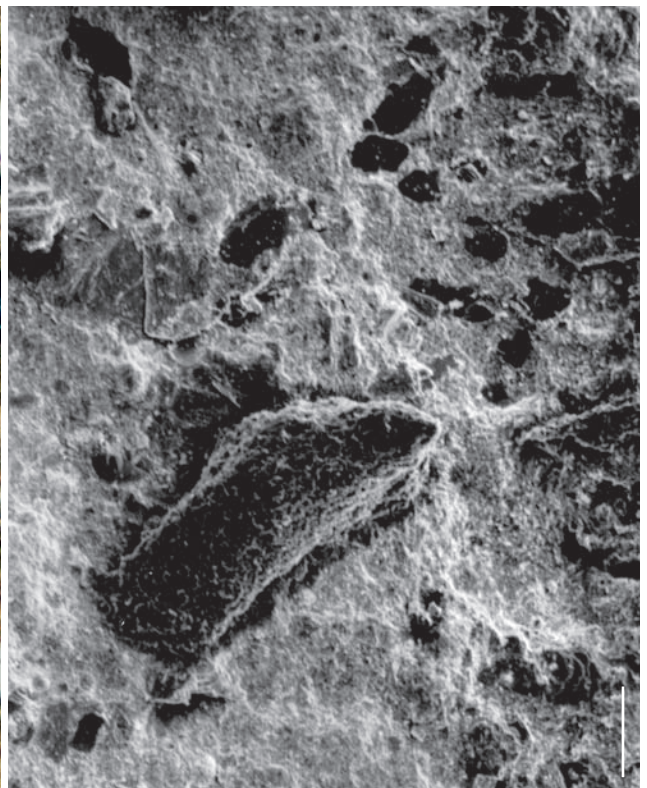
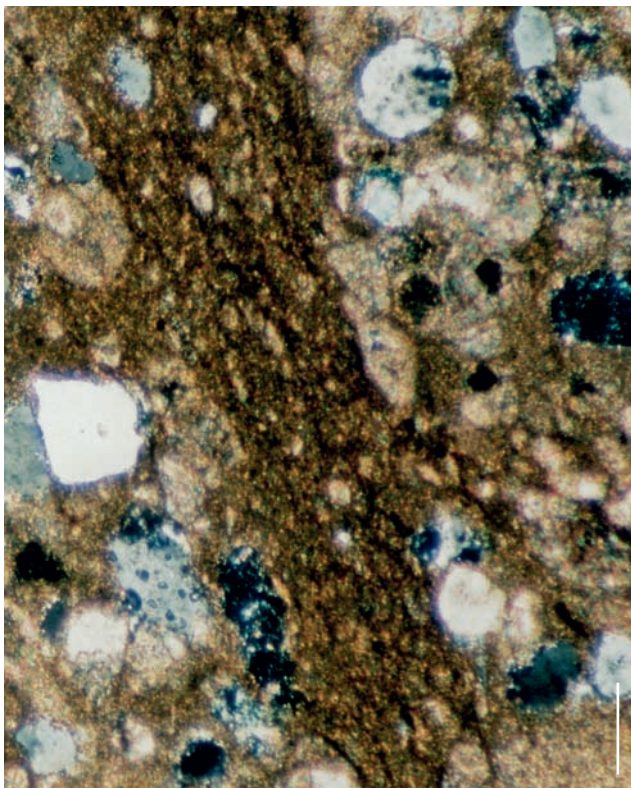
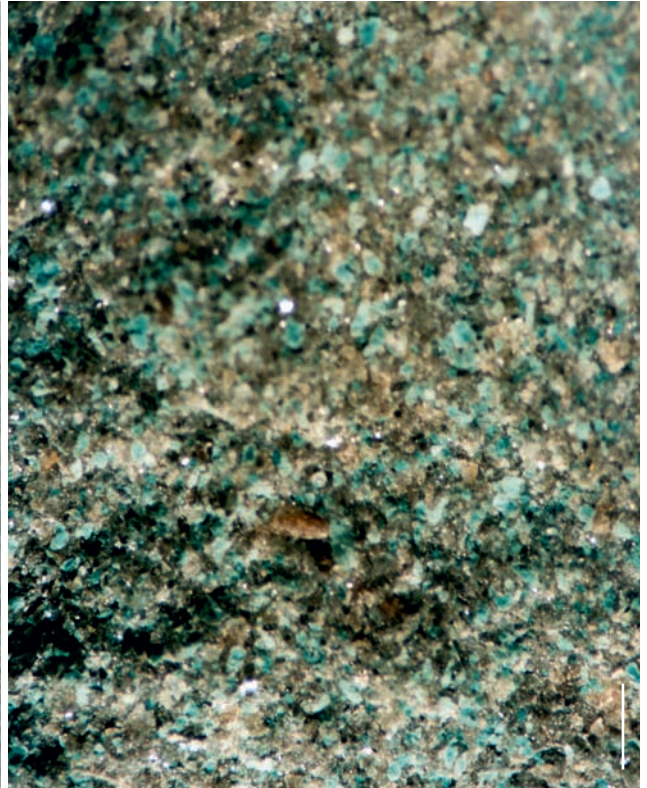
Plate 14: Zeitzer Sandstein. Dolomitic sandstone sheeted by greenish grey layers of mica and clay.

Top on the left: Sawed surface. Scale 1 cm.

Top on the right: Fresh fracture plane. Pores in the carbonate matrix. Scale 1 mm.

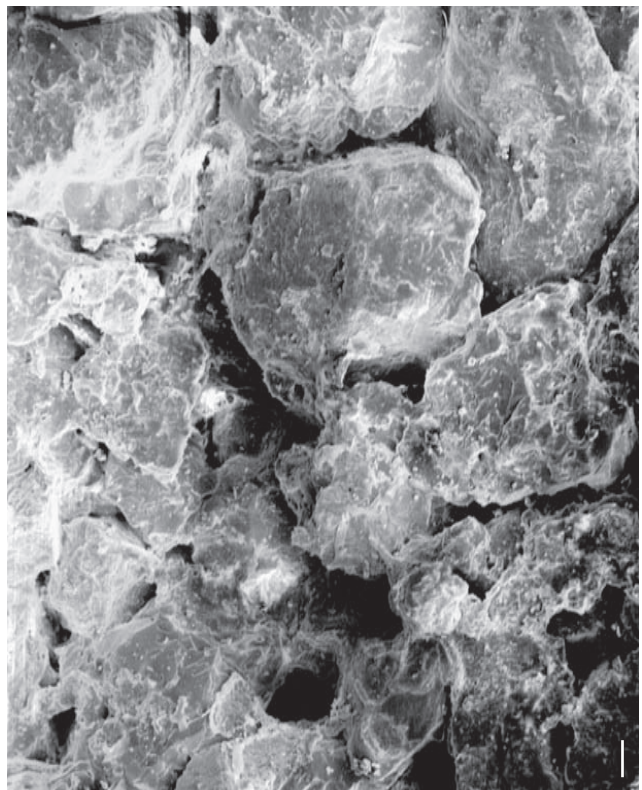
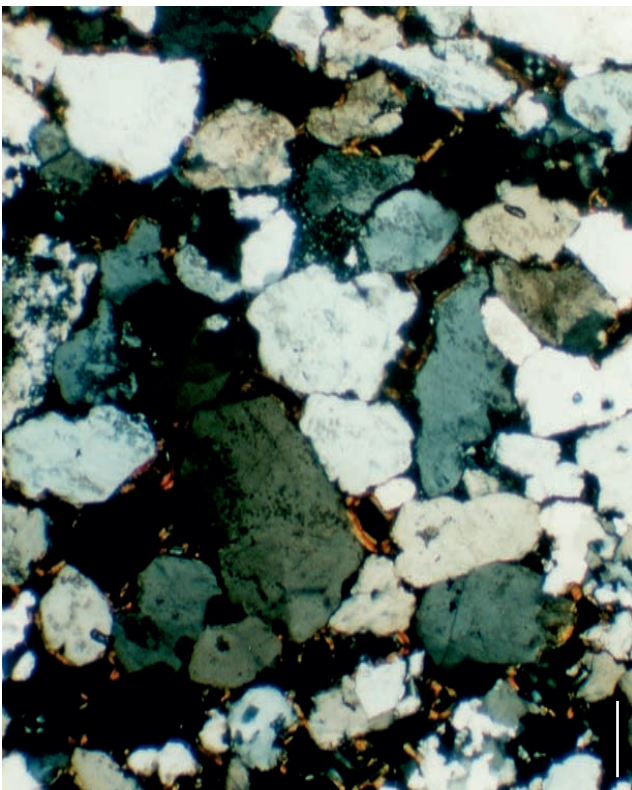
Bottom on the left: Microscopic section. Crossed nicols. Quartz grains (white, grey) floating between the carbonatic matrix (dolomite is brown, calcite many-coloured). There are no pores. Scale 1 mm.

Botom on the right: SEM survey picture. Carbonatic matrix. Scale 100 µm.

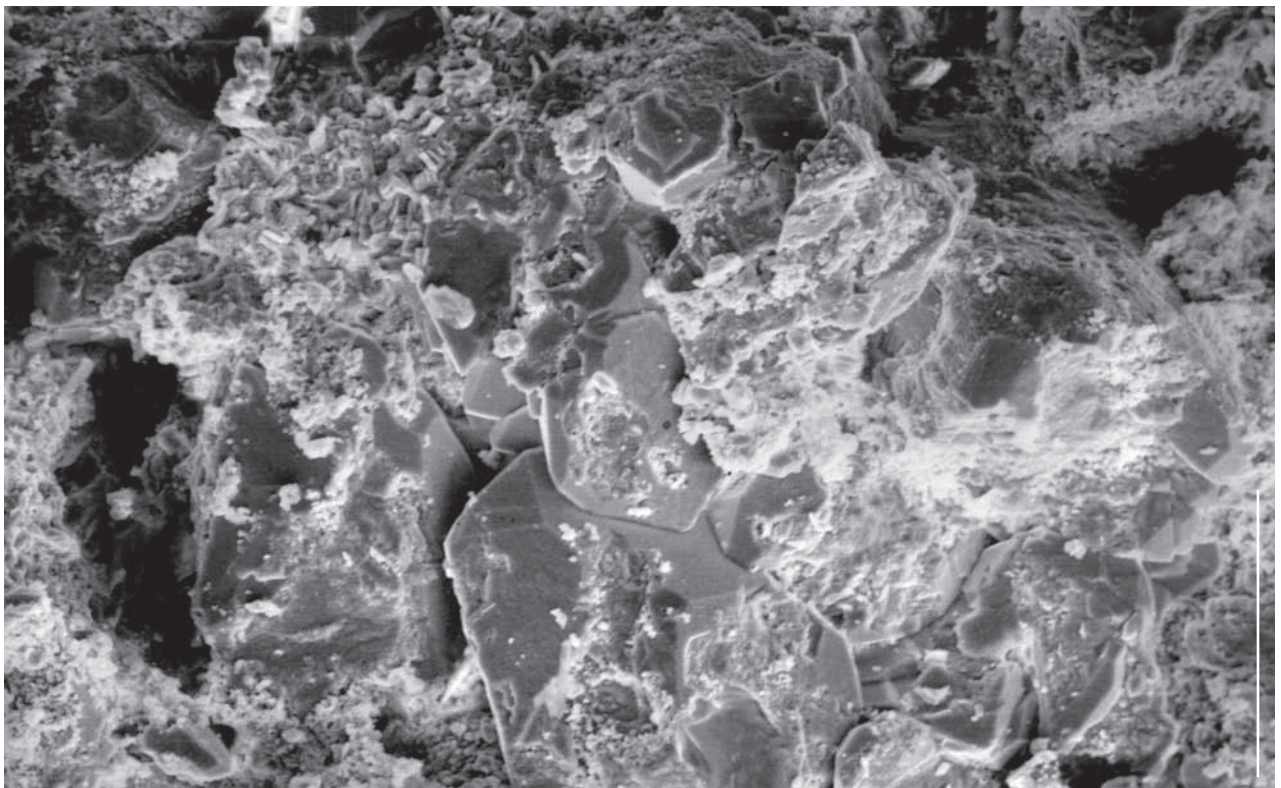
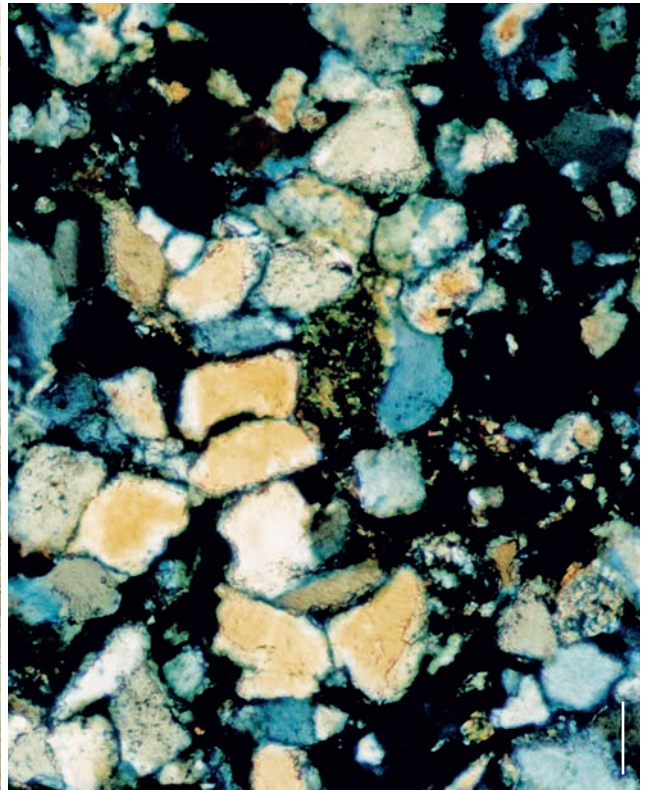


Tafel/Plate 1: Anröchter Dolomit.

Grunert, S.; Szilagy, J.

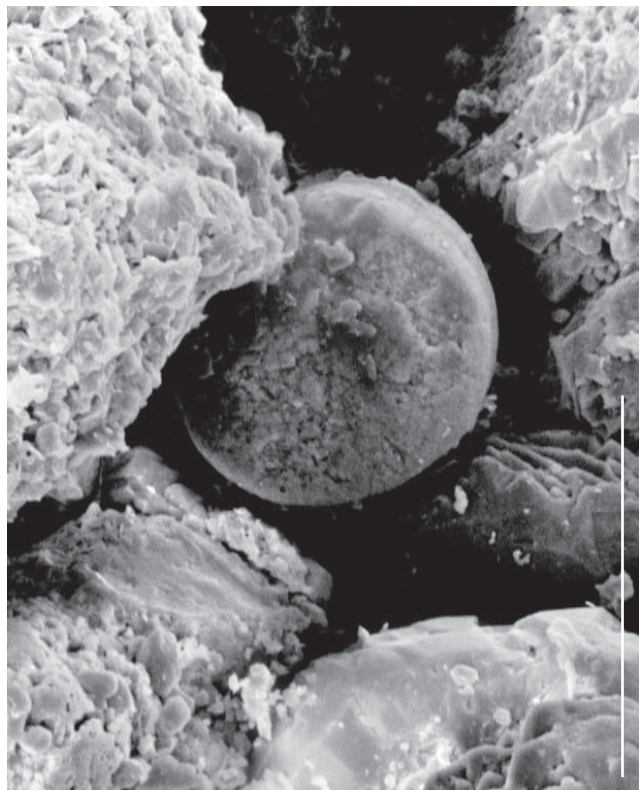
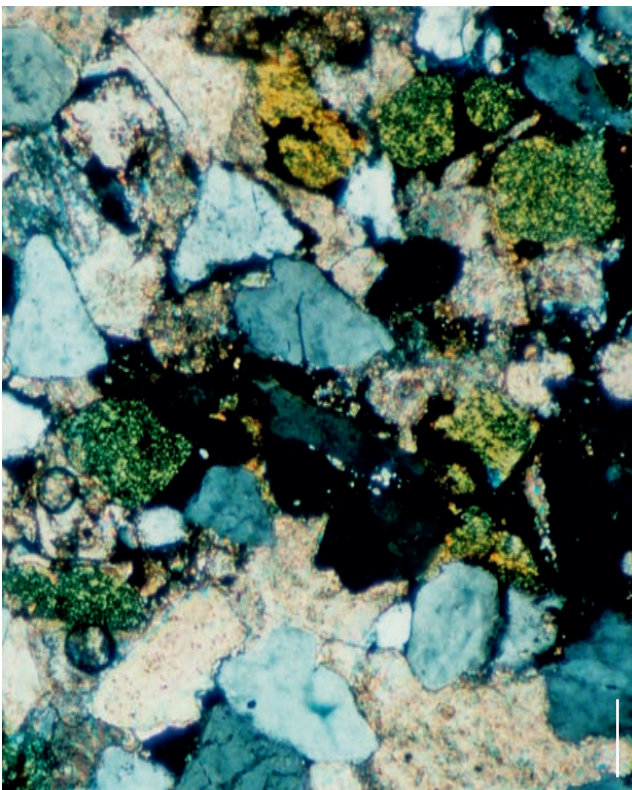
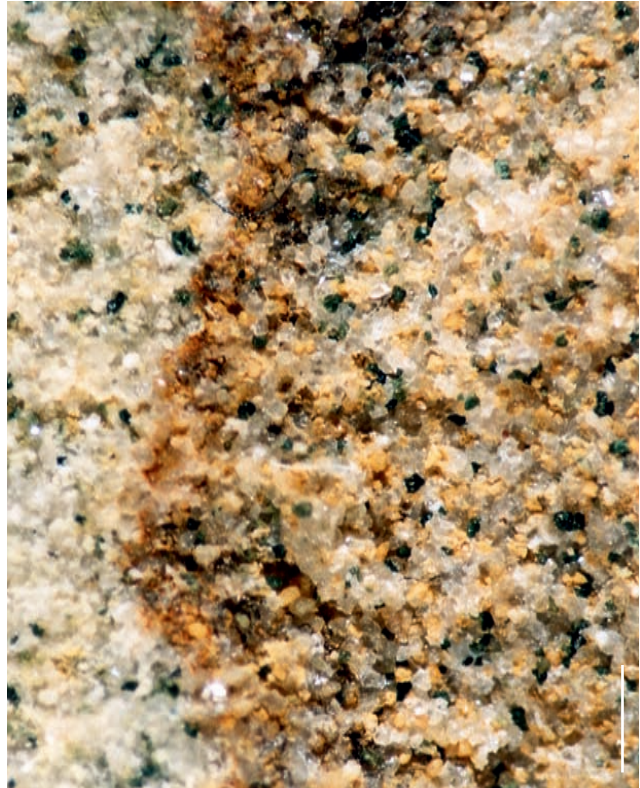


Tafel/Plate 2: Bucher Sandstein.

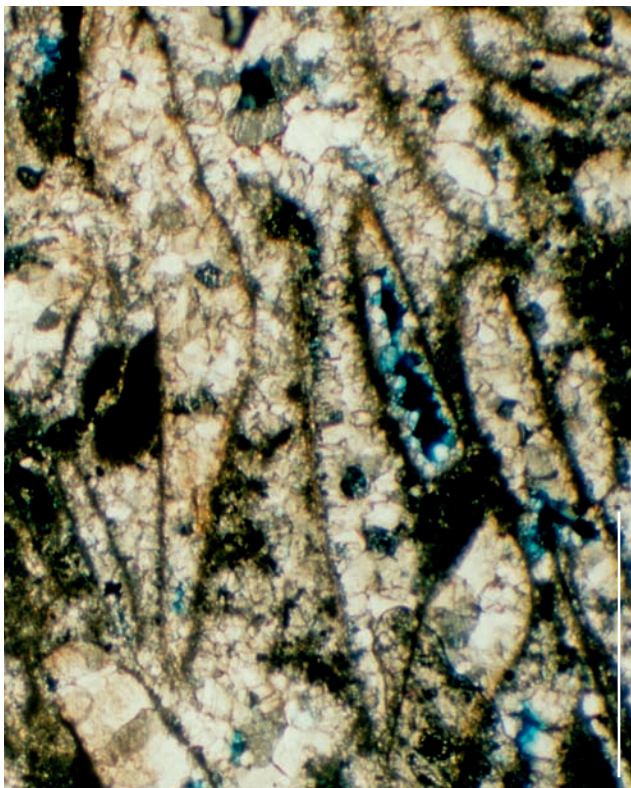


Tafel/Plate 3: Cottaer Sandstein.

Grunert, S.; Szilagy, J.

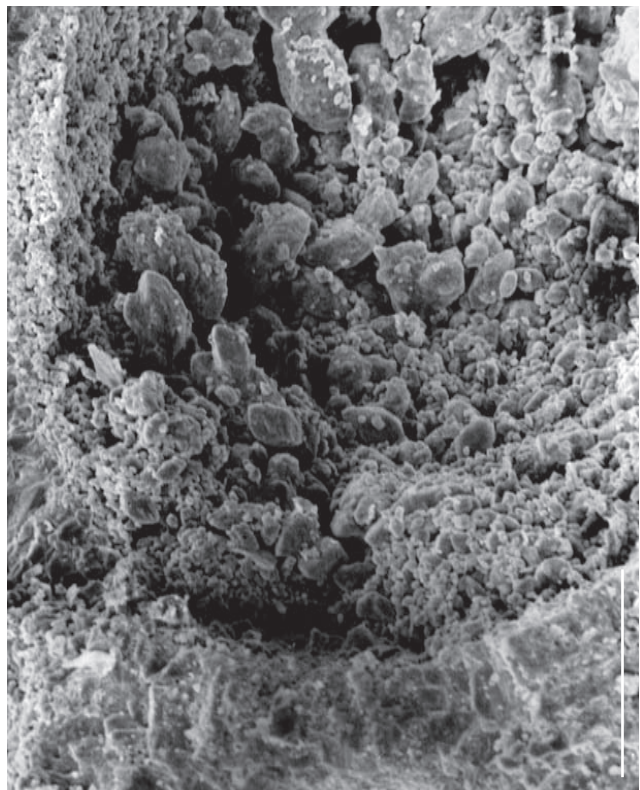
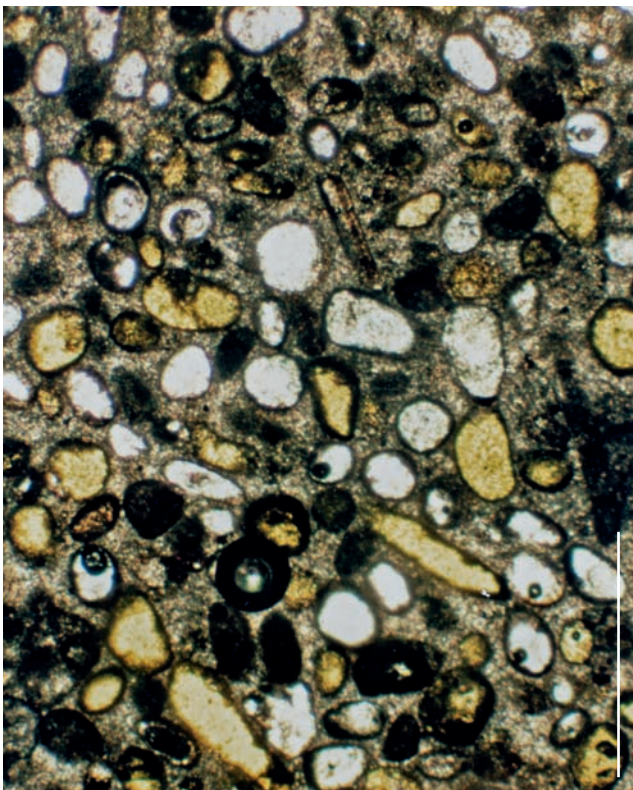


Tafel/Plate 4: Ihrlersandstein.

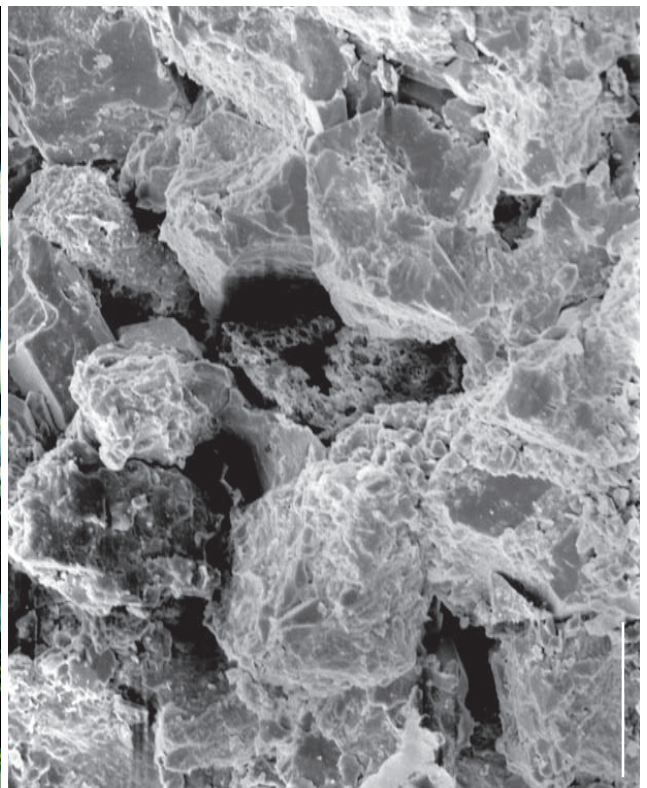
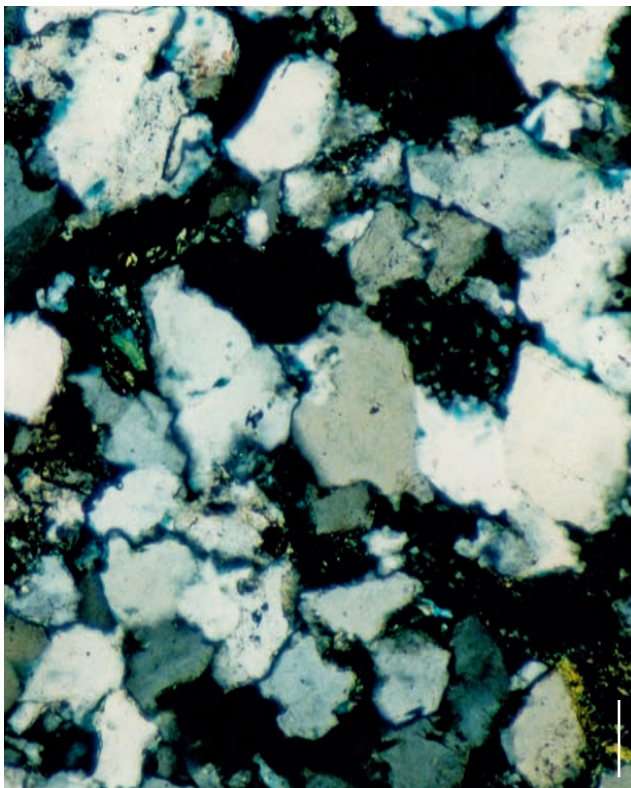


Tafel/Plate 5: Krensheimer Muschelkalk.

Grunert, S.; Szilagy, J.

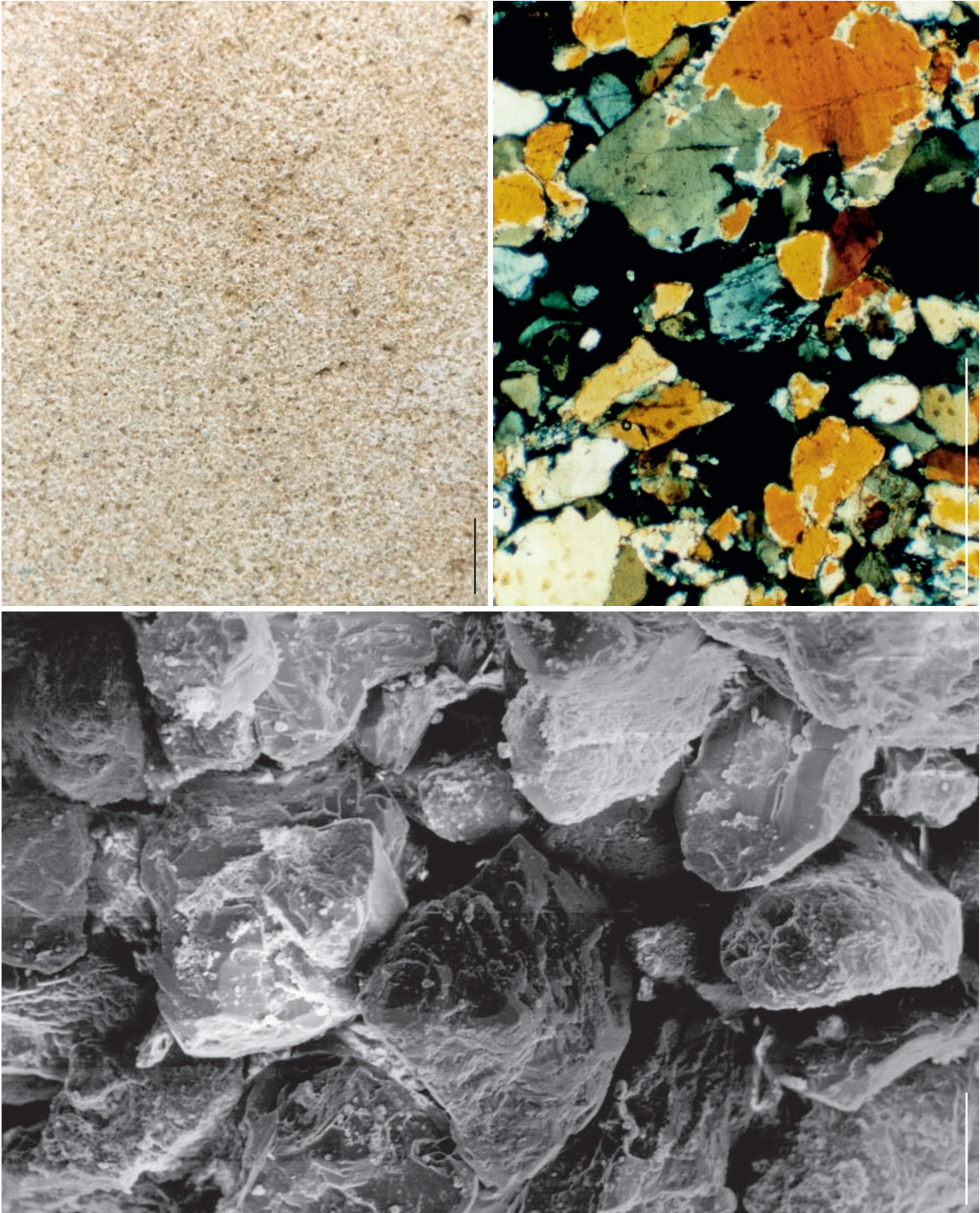


Tafel/Plate 6: Muschelkalk Halberstadt.

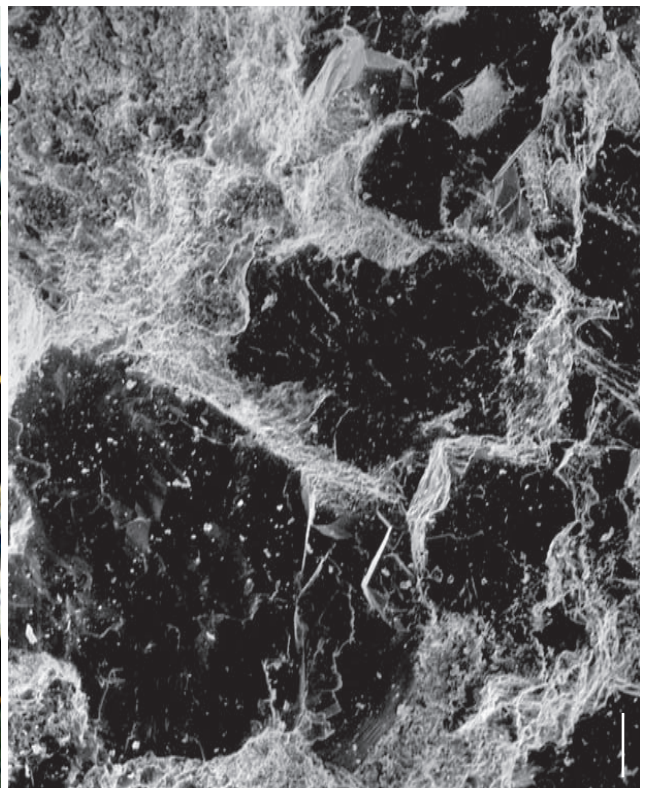
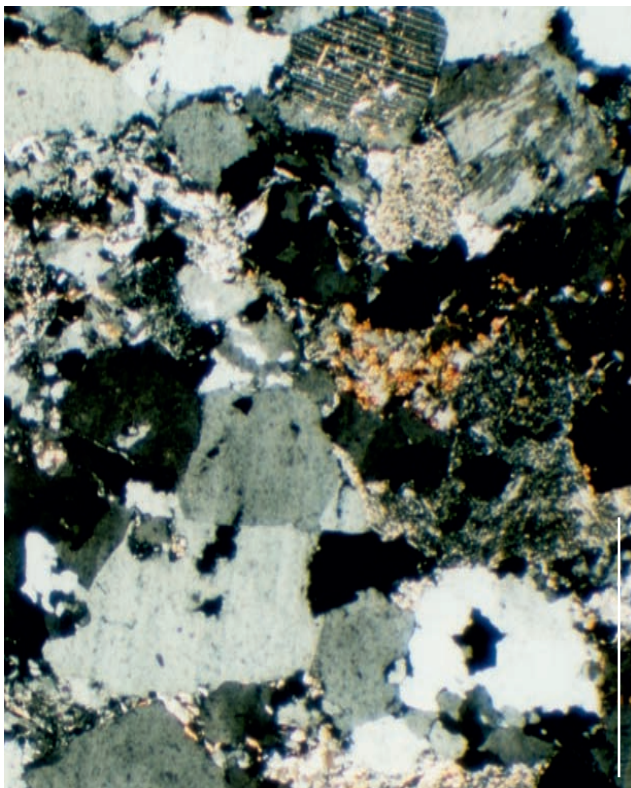
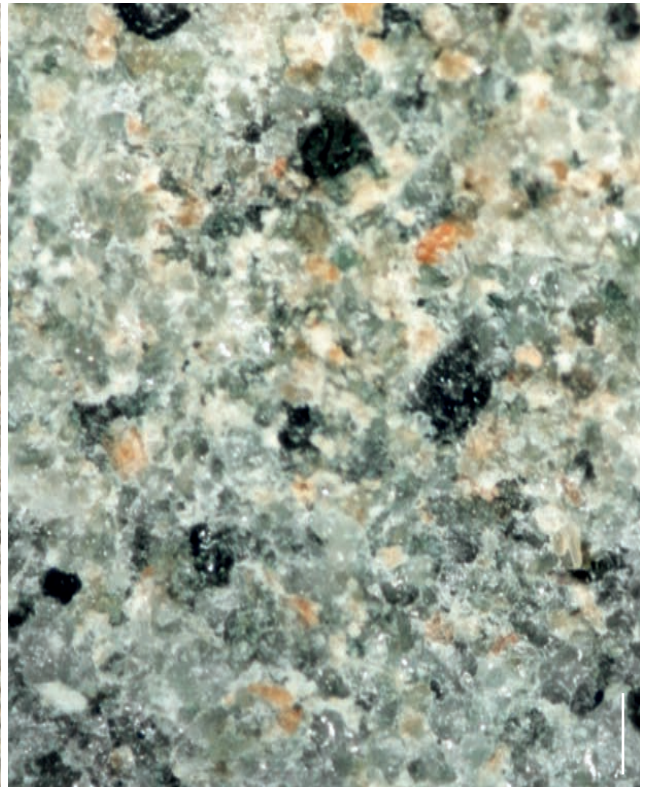


Tafel/Plate 7: Obernkirchner Sandstein.

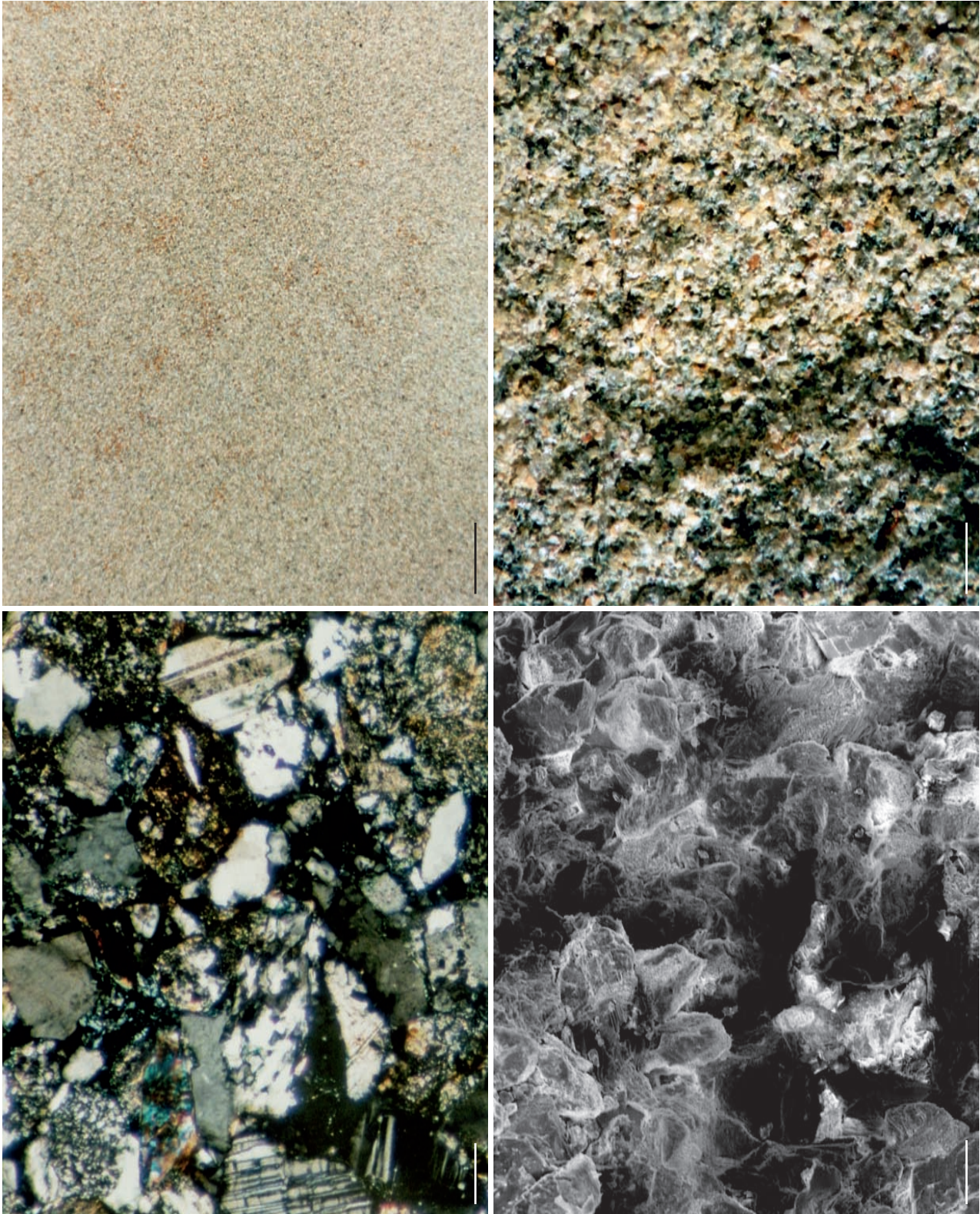
Grunert, S.; Szilagy, J.



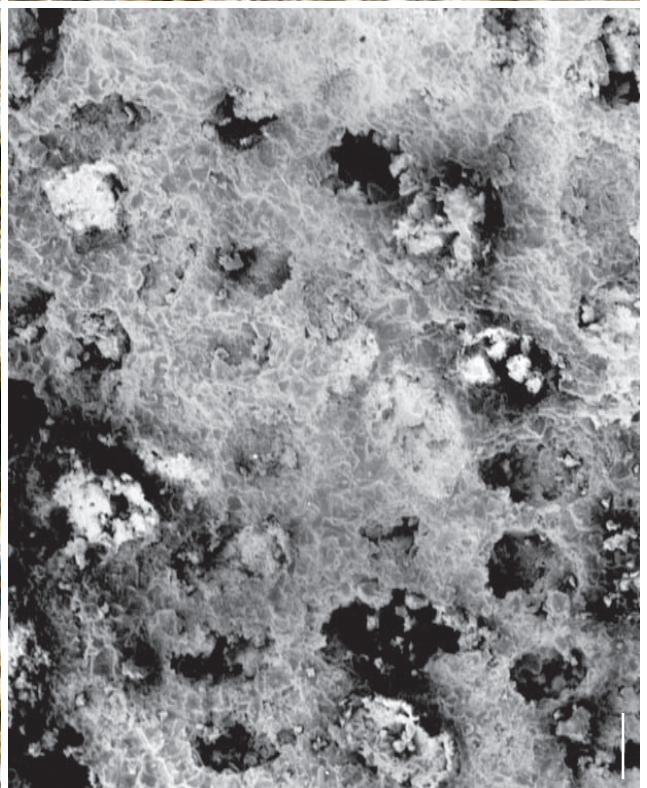
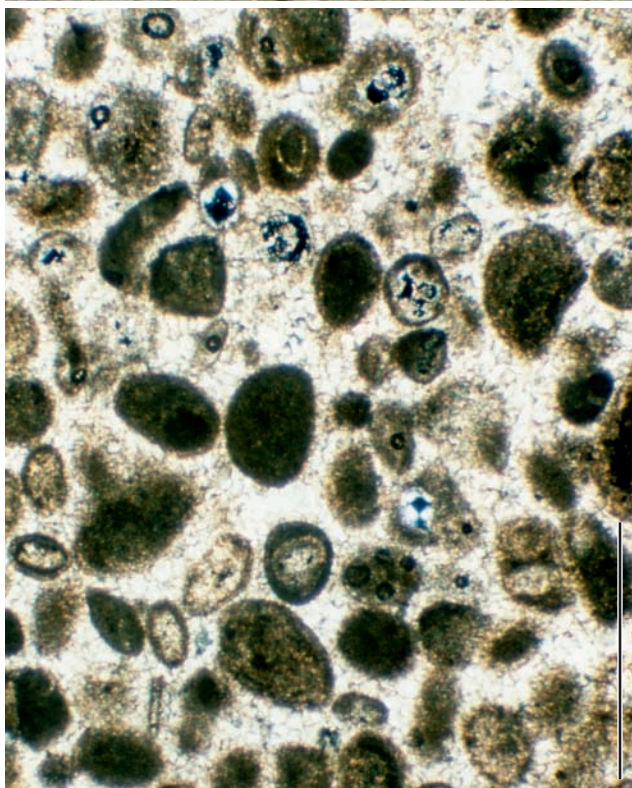
Tafel/Plate 8: Postaer Sandstein.



Tafel/Plate 9: Ruhrsandstein.

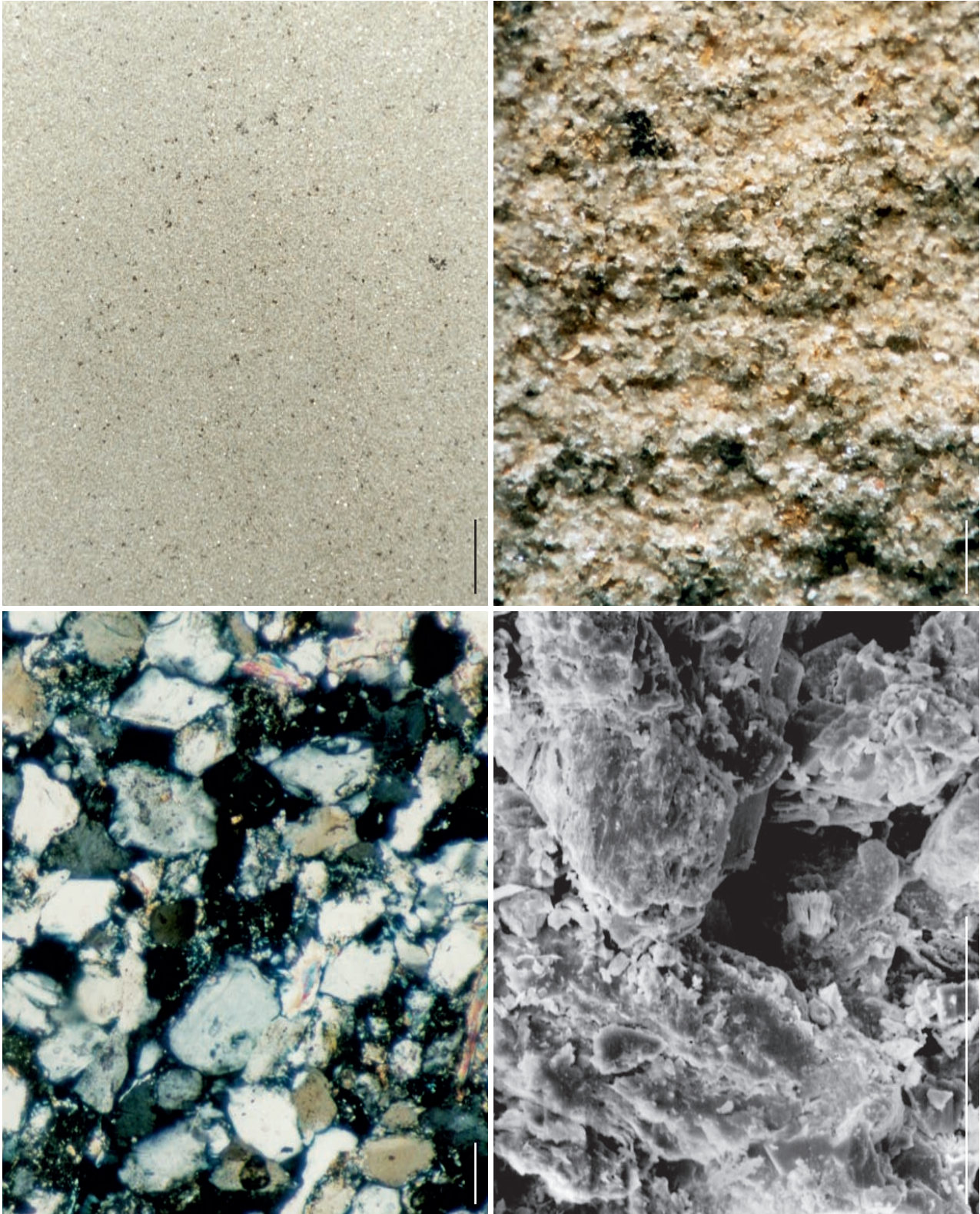


Tafel/Plate 10: Sander Schilfsandstein.

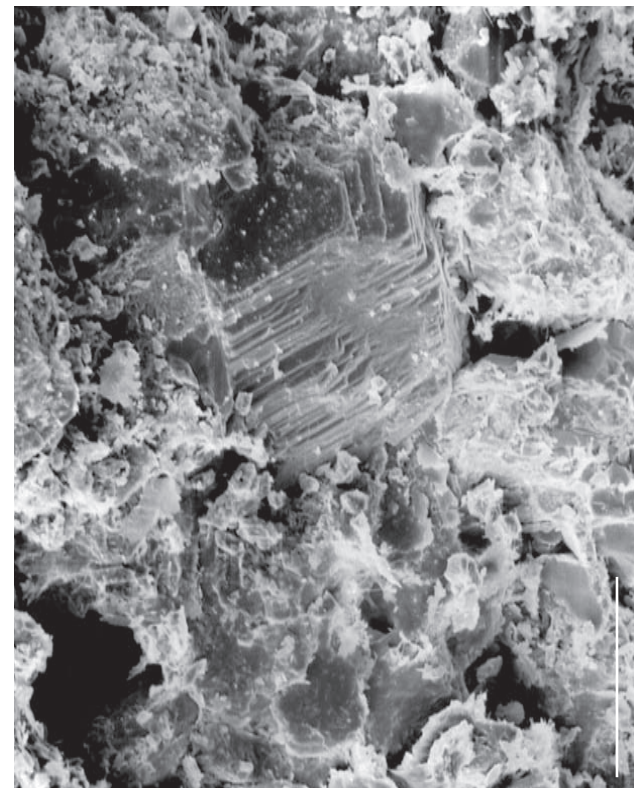
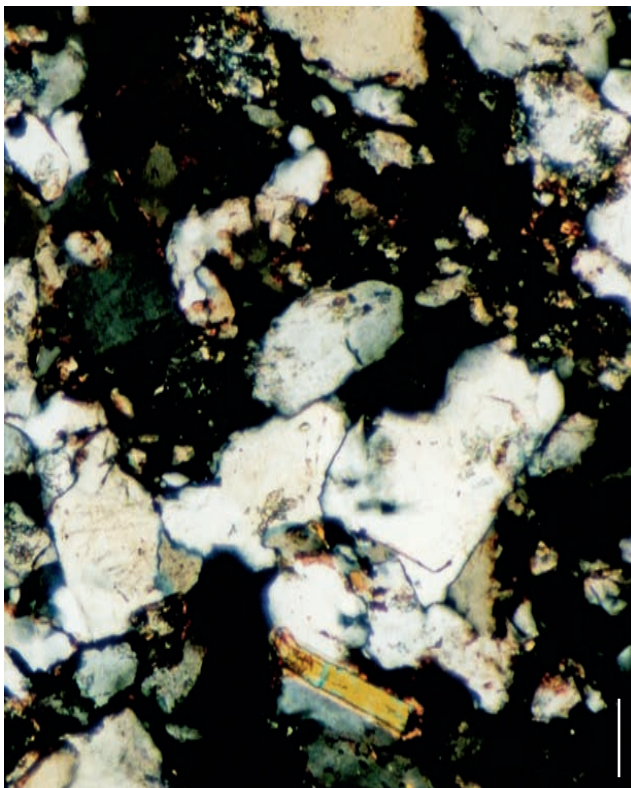


Tafel/Plate 11: Schaumkalk Naumburg.

Grunert, S.; Szilagy, J.

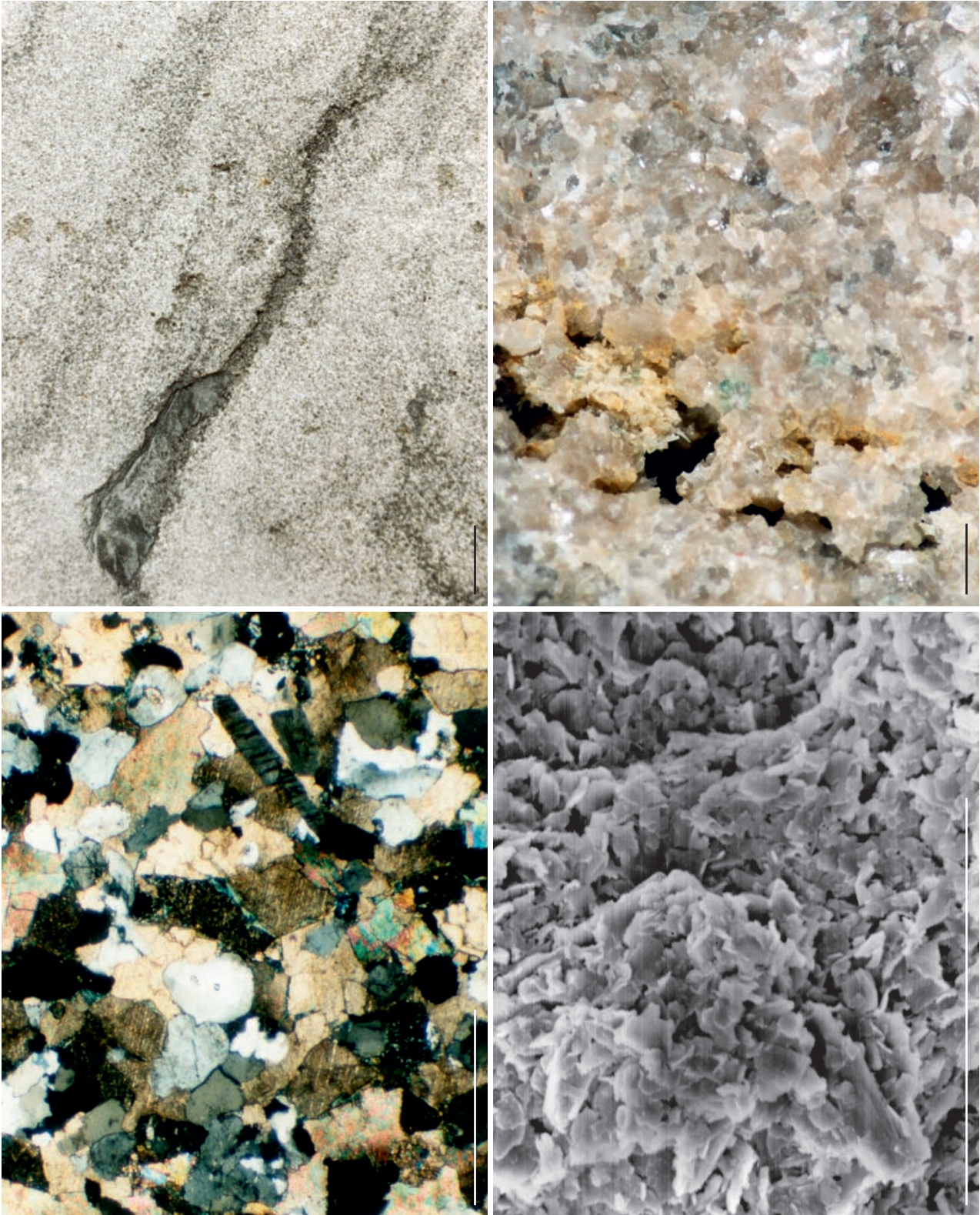


Tafel/Plate 12: Udelfanger Sandstein.



Tafel/Plate 13: Wüstenzeller Sandstein.

Grunert, S.; Szilagy, J.



Tafel/Plate 14: Zeitzer Sandstein.