

Petrographie:

Bausandsteine im Fokus

Die mineralogische Zusammensetzung und das Gefüge eines Steins beeinflussen dessen gesteintechnische Eigenschaften. Das stellen die Autoren im Folgenden an COTTAER, UMMENDORFER und SOLLING SANDSTEIN dar.

Sandsteine gehören traditionell zu den wichtigsten deutschen Naturwerksteinen. Sie wurden in sehr vielen historischen Bauwerken verarbeitet und werden auch in der modernen Architektur eingesetzt, oft in der Kombination mit Stahl und Glas. Neben ästhetischen Kriterien sollten aber vor allem die gesteintechnischen Eigenschaften den praktischen Gebrauch dieser Naturwerksteine bestimmen.

Am Beispiel ausgewählter Sandsteine wird in diesem Beitrag der Einfluss der mineralogischen Zusammensetzung und des Gesteinsgefüges auf die gesteintechnischen Kennwerte dargestellt. Dabei wird besonders auf die Richtungsabhängigkeiten eingegangen.

Zur Auswahl der Proben

Für die Untersuchungen wurden Proben ausgewählt, die über Jahrzehnte an Gebäuden in mehr oder weniger exponierter Lage den Witterungseinflüssen ausgesetzt waren. Man verwendete Ausbaumaterialien, die im Zuge von Restaurierungsarbeiten am Marmorpalais in Potsdam angefallen waren. Außerdem wurden bruchfrische Referenzproben der ausgewählten Sandsteinsorten COTTAER, UMMENDORFER und SOLLING SANDSTEIN untersucht. Die petrographischen und gefügekundlichen Eigenschaften wurden ermittelt, indem man jede Probe an drei senkrecht zueinander orientierten Dünnschliffen untersuchte. Diese wurden parallel und senkrecht zur Schichtung (zum Lager) nach dem in Abb.1 dargestellten Schema angefertigt. Außerdem wurde ein Kathodolumineszenz(KL)-Mikroskop eingesetzt; durch die charakteristischen KL-Farben wurden Quarz-Zemente sowie karbonatische und tonige Bindemittel identifiziert.

Die untersuchten Sandsteine: Gefüge und Petrographie

Alle bearbeiteten Sandsteine werden im Folgenden kurz mineralogisch charakterisiert.

COTTAER SANDSTEIN (Co) ist ein feinkörniger, überwiegend tonig gebundener Sandstein. Er ist hellgrau und enthält dunkelgraue Tonfasern, die das Gestein schichtparallel durchziehen. Quarzanteil: rund 75 %. Parallel zur Schichtung verlaufen häufig Lagen von Serizitanreicherungen durch das Gestein (Abb. 2a).

UMMENDORFER SANDSTEIN (Um) liegt in zwei Varietäten vor. Die bruchfrische Probe weist ihn als feinkörnigen, gut sortierten Quarzsandstein mit kieseliger Bindung aus (Quarzanteil über 90 %). Längliche Körner weisen eine leichte schichtparallele Einregelung nach der Kornform auf (Abb. 2b).

Die verbaute Probe zeichnet sich hingegen durch eine geringere Korngröße, eine schlechtere Sortierung und einen hohen Matrixanteil 10–20 %, Abb. 2c) aus (»Matrix« = das natürliche Gestein, in dem Minerale eingebettet sind).

Beim SOLLING SANDSTEIN (So, auch Roter Wesersandstein) handelt es sich um ein feinkörniges, glimmerführendes Gestein mit toniger und kieseliger Bindung. Der Gehalt an Eisenoxid im Bindemittel färbt es rot. Die

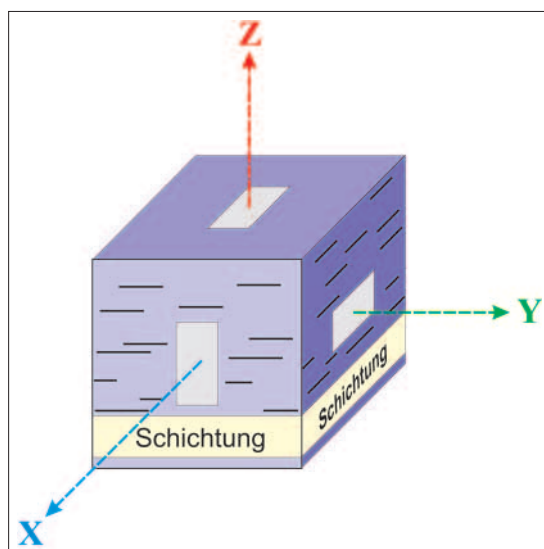


Abb. 1: Dünnschliff-Schnittlagen. Die z-Richtung stellt die Senkrechte zur Schichtung dar.

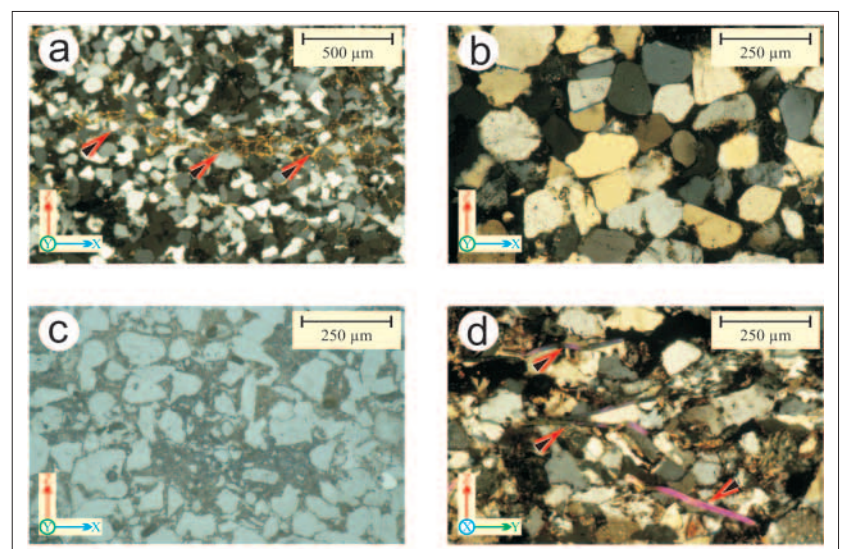


Abb. 2: Mikrogefüge der untersuchten Sandsteine. (Dünnschliffabbildungen; gekreuzte Polarisatoren).

Schichtung ist gut an Streifen unterschiedlicher Rottöne und eingeregelter Hellglimmern zu erkennen. Der Quarzanteil liegt bei etwa 50%. Die meist länglichen Quarzkörner zeigen eine deutliche schichtparallele Einregelung nach der Kornform (Abb. 2d). Der Feldspatanteil liegt bei 10%. Mit einer Einregelung parallel zur Schichtung weisen die Glimmer eine deutliche Vorzugsorientierung auf.

Zur quantitativen Beschreibung der Gefüge wurden an repräsentativen Dünnschliffausschnitten digitalisierte Bilder der Korngrenzen ausgewertet (Bildbearbeitungsprogramm DIANA). Die durchschnittlichen Korngrößen der drei Sandsteine liegen alle im Fein- bis Mittelsandbereich (Tab. 1).

Eine Vorzugsorientierung der Korngrenzen lässt sich bei allen drei Sandsteinen nachweisen (siehe Abb. 3a). Die Korngrenzen sind bevorzugt parallel zur Schichtung (xy-Ebene, Abb.1) angeordnet, was sich in yz- oder xz-Schnittlagen in einem mehr oder weniger stark ausgeprägten Maximum senkrecht zur z-Richtung bemerkbar macht. In einem ungeschichteten Gestein wären in allen drei Schnittlagen mehr oder weniger kreisförmige Korngrenzenverteilungen zu beobachten (vgl. Abb 3a oben).

Die deutlichste Schichtung weist SOL-LING SANDSTEIN auf. COTTAER und UMMENDORFER Sandstein besitzen eine weniger deutlich ausgebildete Schichtung. Im Vergleich dazu ist z. B. der POSTAER SANDSTEIN (ein Elbsandstein) annähernd ungeschichtet.

Gesteintechnische Merkmale

Nachfolgend werden an den drei untersuchten Sandsteinen die Wechselbeziehungen von gesteinsphysikalischen und gefügekundlichen Eigenschaften diskutiert.

Zur Qualitätsbewertung von Naturwerksteinen wird in der Regel der **Elastizitätsmodul (E-Modul)** verwendet. In jüngerer Vergangenheit hat sich die Bestimmung des dynamischen E-Moduls über die ermittelte Ultraschallgeschwindigkeit, und zwar der Kompressionswellen-Geschwindigkeit (V_p), eingebürgert.

Die Geschwindigkeitswerte werden in wechselndem Maße von der Porosität bzw. der Rohdichte, dem Bindemittelgehalt und dem Kopplungsgrad der

	Porosität P [Vol.-%]	Rohdichte d_{roh} [g/cm ³]	Reindichte d_{rein} [g/cm ³]	Wasseraufnahme unter Vakuum		Sättigungswert S [-]	mittlere Korngröße (>30µm) [mm]	
				W_{vak} [Gew.-%]	W_{atm} [Gew.-%]			
Co	bruchfrische Probe	24.5 +/- 1.7	2.000 +/- 0.047	2.648 +/- 0.004	12.3 +/- 1.1	7.6 +/- 1.0	0.68	0.10
	verwitterte Probe	21.1 +/- 0.4	2.088 +/- 0.011	2.646 +/- 0.004	10.1 +/- 0.3	6.3 +/- 0.5	0.62	0.15
Um	bruchfrische Probe	24.0 +/- 0.6	2.012 +/- 0.015	2.647 +/- 0.005	11.9 +/- 0.4	8.6 +/- 0.3	0.72	0.26
	verwitterte Probe	19.6 +/- 0.2	2.131 +/- 0.007	2.650 +/- 0.004	9.2 +/- 0.1	4.9 +/- 0.2	0.53	0.13
So	bruchfrische Probe	12.4 +/- 0.2	2.341 +/- 0.006	2.672 +/- 0.004	5.3 +/- 0.1	3.2 +/- 0.1	0.62	0.13
	verwitterte Probe	18.2 +/- 0.7	2.168 +/- 0.021	2.651 +/- 0.004	8.4 +/- 0.4	5.5 +/- 0.1	0.63	0.12

Tabelle 1: Gesteinsphysikalische Kennwerte der untersuchten Sandsteinproben.

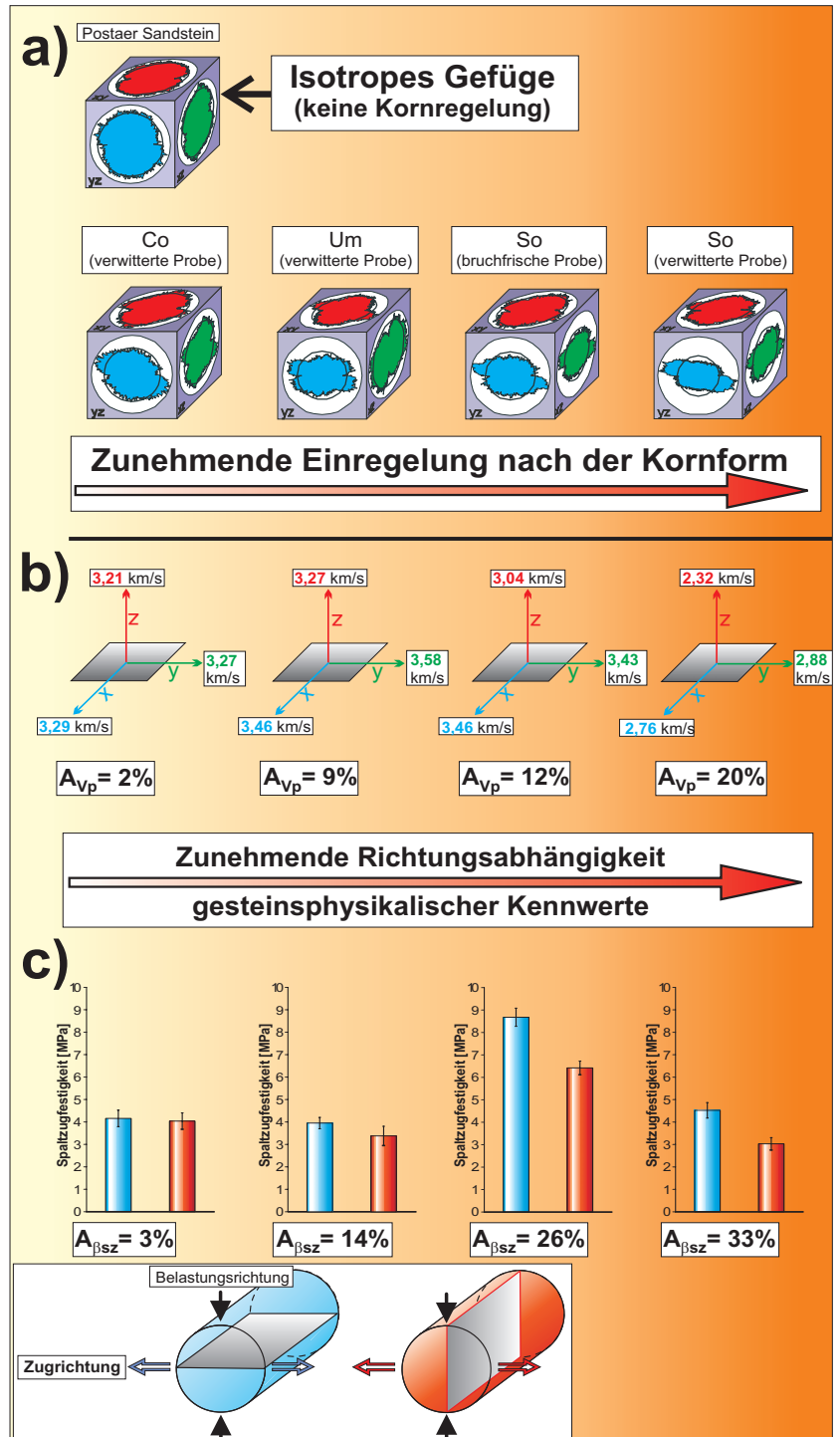


Abb. 3: Richtungsabhängigkeit gesteinsphysikalischer Eigenschaften von der Kornformregelung.



Holland

Mineralkörner beeinflusst (Schön 1983), aber auch in einem nicht geringen Anteil von einer gefüge- bzw. strukturbedingten Anisotropie («Anisotropie» = die Eigenart, nach verschiedenen Richtungen verschiedene physikalische Eigenschaften zu zeigen). Beim COTTAER SANDSTEIN variieren die Geschwindigkeiten ungefähr um 3,2 km/s mit einer sehr geringen Anisotropie (A_{Vp}) von ca. 2% (Abb. 3b). Beim UMMENDORFER SANDSTEIN (A_{Vp} ca. 9%) variieren die Werte richtungsabhängig zwischen 3,27 und 3,58 km/s. SOLLING-SANDSTEIN ($A_{Vp} \leq 20\%$) weist zum Teil deutlich geringere Geschwindigkeiten auf: 2,32 – 2,88 km/s (verwitterte Probe) bzw. 3,04 – 3,46 km/s (bruchfrische Probe). Die Unterschiede zwischen beiden Proben resultieren aus den unterschiedlichen Rohdichten (2,17 und 2,34 g/cm³; vgl. Tab. 1). Die Variation der Geschwindigkeiten in verschiedenen Richtungen (Anisotropie) entspricht den ermittelten Gesteinsgefügen hinsichtlich der Korngrößenregelung.

Für die Festigkeitsanalyse wurde die **Zugfestigkeit** ausgewählt. Der indirekte Test (Spaltzugversuch) wird durchgeführt, indem ein zylindrischer Prüfkörper in einer Druckprüfmaschine auf zwei gegenüberliegenden Mantellinien mit einer Druckkraft belastet wird. Im Inneren des Prüfkörpers wird so eine Zugspannung quer zur Richtung der Druckkraft ausgelöst (siehe Schema Abb. 3c unten). Die ermittelten Spaltzugfestigkeiten befinden sich im Spektrum der untersuchten Sandsteinproben zwischen 3 und 9 MPa (Abb. 3c). Der bruchfrische SOLLING-SANDSTEIN weist mit Abstand die höchste Festigkeit auf, was auf seinen vergleichsweise dichten Kornverband zurückzuführen ist. Innerhalb der einzelnen Proben ist zum Teil eine starke Abhängigkeit der Gesteinsfestigkeit von der Beanspruchungsrichtung festzustellen. Auch hier nimmt die Anisotropie der Spaltzugfestigkeit ($A_{\beta_{SZ}}$) mit dem Grad der Kornregelung zu. Beim SOLLING-SANDSTEIN (verbaute Probe) ist die Spaltzugfestigkeit senkrecht zur Schichtung ($\beta_{SZ} = 3,0$ MPa) gegenüber parallel zur Schich-

tung ($\beta_{SZ} = 4,5$ MPa) sogar um ein Drittel geringer.

Die diskutierten Proben weisen mit Werten zwischen 18 und 24 Vol.-% hohe, aber vergleichbare **Porositäten** auf. Eine Ausnahme bildet der bruchfrische SOLLING-SANDSTEIN mit einer Porosität von 12,4 Vol.-%. Die Rohdichten differieren ebenfalls nur geringfügig und verhalten sich umgekehrt proportional zur Porosität (Tab. 1). Die Reindichte sollte bei Sandsteinen mit Quarz als Hauptbestandteil (Dichte: 2,65 g/cm³) annähernd gleich sein, was sich an den untersuchten Proben bestätigt.

Die relativen Unterschiede der **Wasseraufnahme unter Vakuum** (W_{vak}) entsprechen denen der Porosität (Tab. 1). Aus dem Verhältnis zwischen der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck (W_{atm}) und W_{vak} ergibt sich nach DIN 52 103 (1988) der Sättigungsgrad S eines Gesteins: $S = W_{atm}/W_{vak}$. Danach gilt ein Gestein mit $S < 0,75$ als verwitterungsbeständig. Alle Pro-



Grabmale
und Grabanlagen.
In bester Qualität.
Direkt ab Lager oder
nach Ihren Wünschen
und Angaben ganz
individuell gefertigt.
Typisch Holland Graniet.

Graniet

stone+tec 2005
Halle 3

Tel. 00 31-5 99/62 03 20
Fax 00 31-5 99/61 96 69
www.hollandgraniet.com
info@hollandgraniet.nl

 **holland graniet**

ben liegen mit Sättigungswerten von 0,53 bis 0,72 unter dieser Schwelle (vgl. Tab. 1).

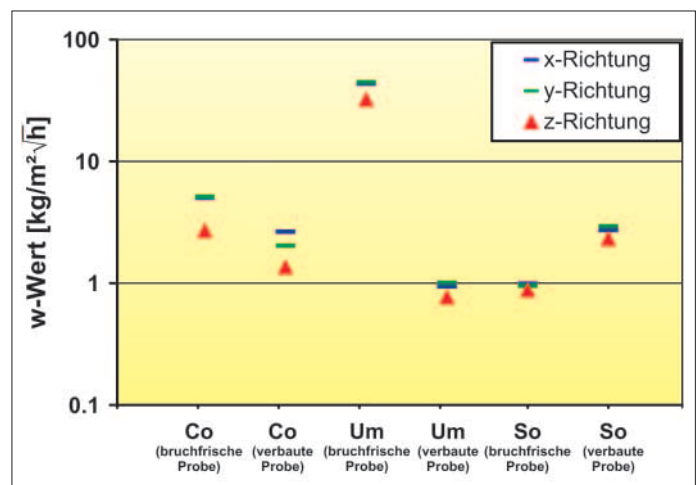
Der Kennwert zur **kapillaren Wasseraufnahme (w-Wert)** wurde richtungsabhängig bestimmt (Abb. 4). Der w-Wert drückt allgemein die Fähigkeit eines porösen Stoffes aus, flüssiges Wasser (z. B. Grundwasser im Kontakt zum Gebäude, Regenwasser) im Porengrößenbereich zwischen 0,1 und 1000 µm Durchmesser (Kapillarporen) freiwillig aufzunehmen. Insgesamt lassen sich alle untersuchten Proben mit Ausnahme des bruchfrischen UMMENDORFER SANDSTEINS als langsam saugende Sandsteine mit w-Werten von 0,8 bis 5,1 kg/m² h bezeichnen. Der bruchfrische UMMENDORFER hat als einzige Probe fast keinen Matrixanteil und ist deswegen im Vergleich wesentlich grobporiger, was wiederum zu einem hohen kapillaren Saugvermögen führt (w-Wert: 32-43 kg/m² h). Die Anisotropie des w-Wertes, welche die Richtungsabhängigkeit der Wasseraufnahmegeschwindigkeit zum Ausdruck bringt, variiert

zwischen 10 % (bruchfrischer SOL-LING-SANDSTEIN) und 50% (COTTAER SANDSTEIN). Naturgemäß ist die Wasseraufnahme senkrecht (z-Richtung) und parallel zur Schichtung (x-, y-Richtung) am unterschiedlichsten. Die hohen Anisotropiewerte beim COTTAER SANDSTEIN gehen auf die schichtparallelen Tonschlieren zurück, die senkrecht zur Schichtung als Wasserstauer wirken. Es überrascht, dass die Proben mit starker

Kornformregelung geringere Anisotropien des w-Wertes aufweisen. Das rührt daher, dass die Schichtung nicht allein durch die Einregelung der Mineralkörner definiert ist, sondern auch durch Materialwechsel bzw. einem Wechsel in der Korngröße wie im vorliegenden Fall.

Die **Porenradialverteilungen** mittels Quecksilber-Porosimetrie sind in Abb. 5 repräsentativ an zwei Extremen

Abb. 4: Wasseraufnahmekoeffizienten oder w-Werte der untersuchten Proben in Abhängigkeit von der Raumrichtung.



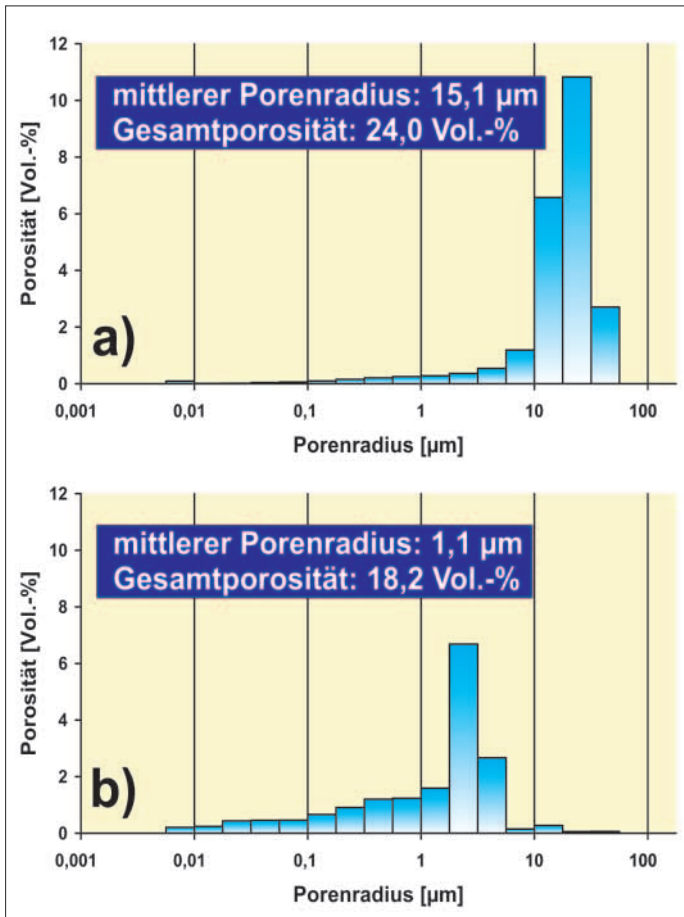


Abb. 5: Porenradienverteilungen, dargestellt (a) am Beispiel des bruchfrischen UMMENDORFER SANDSTEINS und (b) des verwitterten SOLLING-SANDSTEINS.

dargestellt. Der bruchfrische UMMENDORFER SANDSTEIN weist als fast reiner Quarzsandstein mit einem mittleren Porenradius von 15 µm große Porenradien auf (Abb. 5a), wohingegen der SOLLING-SANDSTEIN, dessen Kornzwischenräume mit tonigem Bindemittel verfüllt sind, mit einem mittleren Porenradius von 1 µm (Abb. 5b) wesentlich feinporiger ist.

Aus den Trocknungskurven (Wassergehalt versus Zeit) der einzelnen Sandsteinproben wurde die **kritische Feuchte** (W_{krit}) ermittelt. Sie gibt an, bei welchem Wassergehalt sich die Verdunstungsoberfläche während des Trocknungsvorgangs ins Gesteinsinnere zurückzieht und liefert einen Hinweis auf die Anfälligkeit für Frostschäden und Salzsprengung. Je schneller und gründlicher z. B. ein Naturstein trocknet, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit einer Frostsprengung (Weiss 1992). Der Quotient W_{krit}/W_{vak} zeigt an, wie hoch die Porenfüllung bei Erreichen der kriti-

schsen Feuchte relativ zur Sättigungsfeuchte ist. Hier fällt auf, dass die relative kritische Feuchte bei Sandsteinen mit einem Anteil an tonigem Bindemittel (COTTAER, SOLLING) am größten ist (vgl. Abb. 6). Der mittlere Porenradius variiert zwischen 0.35 µm und 15 µm und steht in engem Zusammenhang mit der relativen kritischen Feuchte sowie dem w-Wert: Feinkörnige Proben sind »kapillare Langsamsauger« mit relativ hoher kritischer Feuchte, wohingegen Proben mit hohem mittleren Porenradius »kapillare Schnellsauger« mit relativ niedriger kritischer Feuchte sind.

Bei Reihung nach der **Permeabilität** (Abb. 7) ergibt sich für die Proben die Reihenfolge SOLLING < UMMENDORFER < COTTAER. Die Tatsache, dass niedrig permeable Proben gleichzeitig kapillare »Langsamsauger« sind, deutet einen Zusammenhang zwischen Luftpermeabilität, kapillarem Saugvermögen und Porenradienverteilungen an. Bei allen Proben ist die Durchlässigkeit senk-

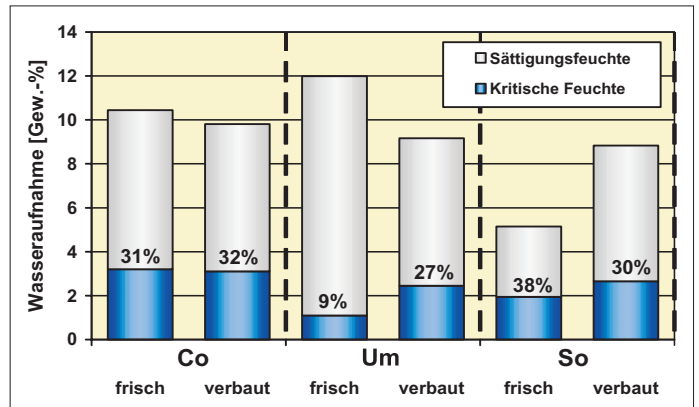


Abb. 6: Kritische Feuchte (W_{krit}) im Verhältnis zur Sättigungsfeuchte (W_{vak}). Die Quotienten W_{krit}/W_{vak} sind als Prozentzahlen in den Säulen angegeben.

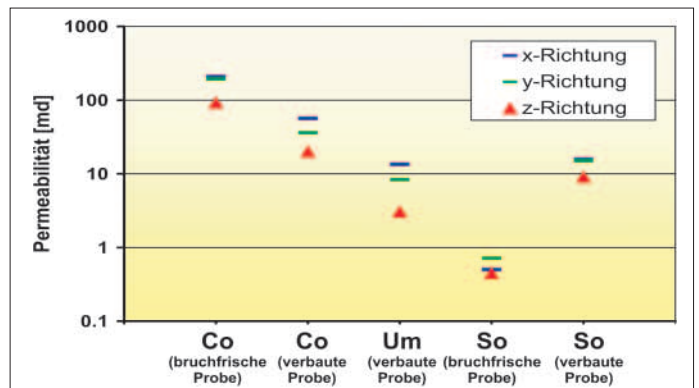


Abb. 7: Luftpermeabilitäten der untersuchten Proben in Abhängigkeit von der Raumrichtung.

recht zur Schichtung (z-Richtung) am geringsten. Unterschiede bei den Werten parallel zur Schichtung (x-, y-Richtung) an den einzelnen Proben beruhen wahrscheinlich auf Gesteinsinhomogenitäten.

Bewertung / Verwitterungsbeständigkeit

In porösen Gesteinen wie Sandsteinen spielen neben dem Mineralbestand und der Kornbindung häufig die Größe, Verteilung und Struktur des Porenraums eine entscheidende Rolle hinsichtlich der ablaufenden Verwitterungsprozesse (Fitzner 1988). Ein wesentliches Kriterium für die Verwendung eines Gesteins als Werkstein ist eine ausreichende Festigkeit. Aus der Materialprüfung ist bei Natursteinen eine direkte Abhängigkeit der Spaltzugfestigkeit von der Rohdichte bekannt. **Mit abnehmender Porosität bzw. zunehmender Rohdichte wird das Gestein dichter und gegenüber mechanischer Beanspruchung widerstandsfähiger.** Dies sollte ebenfalls für den E-Modul

und die Ultraschallgeschwindigkeiten gelten, da die Zahl und Qualität der Kornkontakte ansteigt. Die beobachteten Gefügeanisotropien bedingen konsequenterweise auch eine deutliche Richtungsabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften. Dies kann für die entsprechenden Gesteinstypen deutlich schwanken, aber auch innerhalb einer Gesteinsorte, wobei ja nach der Schnitttrichtung die ermittelten Parameter sehr deutlich differieren können. Für die Beurteilung des Langzeitverhaltens oder der Verwitterungsbeständigkeit ist das Hohlraumgefüge von besonderer Bedeutung. Hier haben vor allem die Porosität und die Porenradialen einen maßgeblichen Einfluss auf die Durchlässigkeit, die kapillare Wasseraufnahme und das Trocknungsverhalten. Über den Porenraum wird der Feuchtetransport und -haushalt im Gestein gesteuert. Die kapillare Wasseraufnahme ist für Naturwerksteine ein sehr wichtiger Schadensfaktor. Seine Bedeutung liegt nach Snethlage (1985) darin begründet, dass eine starke Saugfähigkeit gleichzeitig eine hohe Schadstoffaufnahme und Schadstoffverteilung im Porenraum bedingt. **Dichte Sandsteine verwittern deshalb eher oberflächlich, während saugfähige Sandsteine tiefgründig zerstört werden.** Wasser wirkt sowohl als Verwitterungsmittel sowie als Transportmechanismus für Salze. Die mit der Auskristallisation von Eis oder Salzen einhergehende Sprengwirkung infolge des Kristallisationsdrucks kann zu bekannten Phänomenen wie Absanden oder Auftreten von Schalen und Schuppen führen. Die Schadenswirkung von im Porenraum auskristal-

lisierenden Mineralien wird durch die Art und Verteilung der Poren im Gefüge bestimmt. **Alle Untersuchungen haben gezeigt, dass die Richtungsabhängigkeit der o.g. gesteintechnischen Eigenschaften durch die Gefügeanisotropie diktiert wird. Daher zeigen auch sehr häufig die Verwitterungsanriffe eine Richtungsanfälligkeit, da die Wagsamkeiten entlang der Schichtung in den Sandsteinen deutlicher ausgeprägt sind (Abb. 8).** Diese Beobachtung erklärt auch, dass ein schaliges Ablösen der Schichtflächen bei derartigen Gesteinen besonders häufig auftritt. Unterstützt werden diese Prozesse durch hygrische Schwellungs- und Schrumpfungsphänomene, die bei tonhaltigen Sandsteinen ausgeprägter sind. Phänomene wie Farbveränderungen, Feuchtflecken, Absanden (Ablösen von Einzelkörnern), Rückwintern, Auslaugungen und Abschuppungen, Schalenbildungen, Abplatzungen oder Rissbildungen sind keine Seltenheit bei der Verwitterung von Sandsteinen; sie sind wesentlich durch Gefügeanisotropien und Heterogenitäten im Gestein vorgezeichnet.

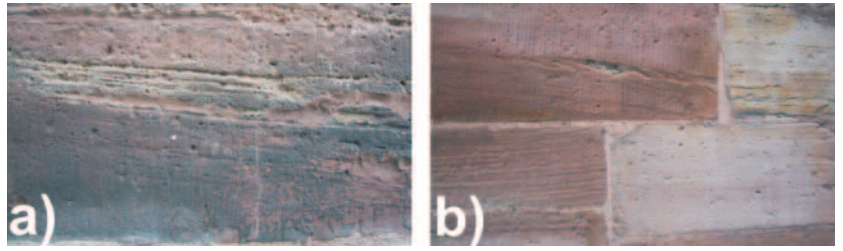


Abb. 8: Gefügekontrollierte Verwitterungsphänomene am Beispiel des Buntsandsteins (Roter Wesersandstein), verbaut in der St. Jacobi-Kirche in Göttingen.

KURZINFO:

Literatur

- Deppisch, J., 2001: Keine Angst vor europäischen Prüfvorschriften! NATURSTEIN 6/2001, ▷ S. 34 – 39.
- DIN 1988. DIN 52103 Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert. Beuth, Berlin.
- Fitzner, B., 1988: Untersuchungen der Zusammenhänge zwischen dem Hohlraumgefüge von Natursteinen und physikalischen Verwitterungsvorgängen. Mitteilungen der Ingenieur- und Hydrogeologie 29, 217 S.
- Füchtbauer, H., 1988: Sediment-Petrologie. Teil 2: Sedimente und Sedimentgesteine. Schweizerbart, Stuttgart.
- Schön, J., 1983: Petrophysik. Enke, Stuttgart.
- Snethlage, R., 1985: Natursteinkonservierung: Internationales Kolloquium, München. Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege 31, 191 S.
- Weiss, G., 1992: Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter. Münchner geowissenschaftliche Abhandlungen: Reihe B, Allgemeine und angewandte Geologie 9, 118 S.

**MAGNA
WESTFALIA.**

LaserGrip®

rutschsicher nach BGR-181



• **intelligente Lösungen**

Tel. 0 52 28 – 9 60 60
Magna Westfalia GmbH
Industriestr.14, 32602 Vlotho-Exter