

7. Prüfung von Werkstein

"Wenn aber gebaut werden soll, sollen die Steine zwei Jahre vorher nicht im Winter, sondern im Sommer gebrochen werden und sie sollen dauernd an offenen Stellen lagern.

Diejenigen aber, die in diesen zwei Jahren der Witterung ausgesetzt, beschädigt sein werden, die sollen in Grundmauern eingebaut werden.

Die übrigen, die nicht beschädigt sind, werden, als von der Natur selbst geprüft, oberhalb der Erde verbaut, Dauer haben können."

VITRUVIUS ca. 30 v. Chr.

Die Technische Gesteinskunde als Teilgebiet der Erdwissenschaften ist eine der ältesten Disziplinen der Materialwissenschaften. Schon bei der Herstellung von urgeschichtlichen Steinwerkzeugen mussten wesentliche physikalische Eigenschaften, wie Härte, Zähigkeit, Sprödigkeit und Bearbeitbarkeit eines Werkstoffes mit einfachen Methoden überprüft werden. Ein wesentlicher Schritt in Richtung systematischer Baustoffprüfung, der auch schriftlich überliefert ist, sind die grundlegenden Überlegungen von VITRUVIUS (ca. 30 v.Chr.) in seinen "10 Büchern über Architektur". Dieses Basiswissen dürfte aber nur in Ausnahmefällen auch angewandt worden sein, durchaus ähnlich wie rund 2000 Jahre später, da schon PLINIUS d. Ä. (70 n. Chr.) diese Grundlagen nur mehr stark rudimentär "zitiert". Erst in der späten Neuzeit mit dem Erblühen der Naturwissenschaften und dem letzten Aufflackern des Massivsteinbaues und der Steinpflasterstraßen wurden erstmals systematisch die physikalischen und chemischen Eigenschaften von Baustoffen und ihre Wechselwirkung mit Bauwerk, Mensch und Umwelt im Labor überprüft.

Die urzeitlichen Grundprinzipien, Gesteine durch Schleifen, Schlagen und Drücken zu prüfen, haben sich nicht geändert, lediglich die Methode, wie dies geschieht, wurde verfeinert und teilweise automatisiert, um die daraus erhaltenen Untersuchungsergebnisse reproduzierbar zu machen. Die Grundlage der Werksteinprüfung ist also die kontrollierte und kontrollierbare Zerstörung von Gesteinsproben. Die Überprüfung der Verwitterungsbeständigkeit eines Gesteines erfolgt in enger Anlehnung an natürliche Wechselbeanspruchungen, die im Labor einerseits durch kleine Prüfkörperdimensionen und andererseits durch extreme "Umweltbedingungen" (Frost, Hitze, Salzsprengung, etc.), wie mit einem Zeitraffereffekt, verschärft werden.

Die Technische Gesteinskunde versteht sich als Werkzeug, das dem ausführenden Bauingenieur, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetzen gesteinsphysikalische Kennwerte, wie zum Beispiel Rohdichte, Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten, Festigkeitseigenschaften, Härte, Abriebverhalten, Polierverhalten, Abrasivität, etc. liefert. Auch die Überprüfung und Prognose der Verwitterungsbeständigkeit (Frostbeständigkeit, Frostsicherheit, Hitzebeständigkeit, Tausalzbeständigkeit, etc.) eines Baustoffes unter verschiedenen Einsatzbedingungen im Hochbau und Verkehrswegebau zählen zur Aufgabe der technischen Gesteinskunde.

Die Prüfung von Werkstein bedient sich verschiedenster chemischer, physikalischer und petrologischer Methoden und dient zur Erfassung der Qualität sowie der Verwitterungsbeständigkeit von natürlichen Festgesteinen. Die Überprüfung dieser Eigenschaften ist von wesentlicher Bedeutung, da sie die Einsatzmöglichkeiten des Werksteines klar vorgeben, aber auch einschränken. Nicht jeder Werkstein ist gleichermaßen für Fassadenverkleidungen, Bodenplatten oder statische Elemente gleich gut geeignet, um so mehr als auch vorgegebene klimatische Rahmenbedingungen die Steinverwendung zusätzlich noch deutlich beeinflussen und meist auch einschränken.

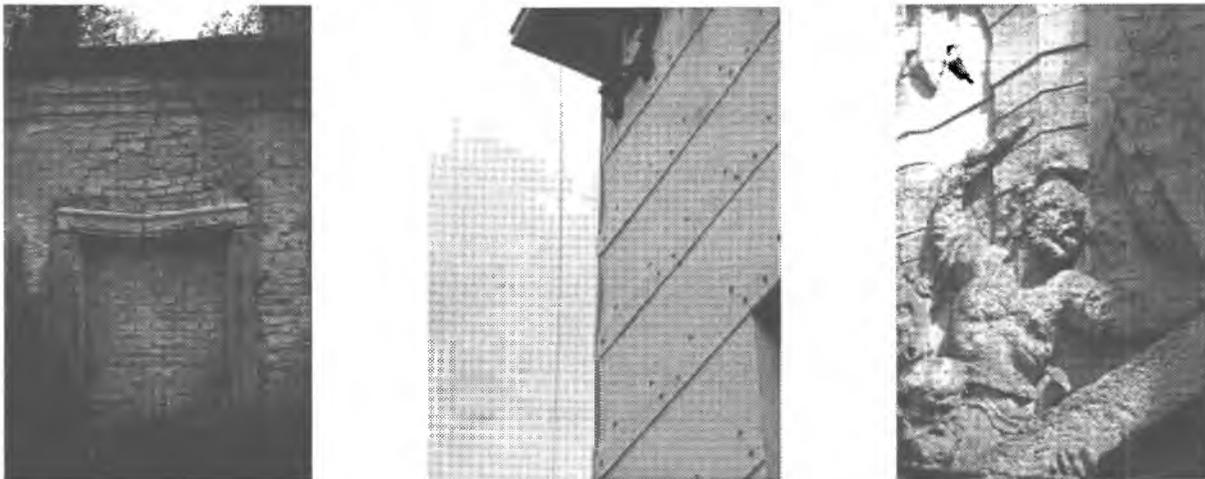


Abb. 43: Beispiele für unterschiedliche Schadensbilder und Schadensmechanismen.

Links: Versagen des Türsturzes (Zogelsdorfer Kalksandstein) durch Überschreitung der Biegezugfestigkeit (Kartause Mauerbach);

Mitte: Deformation der Marmorplattenverkleidung (Carrara-Marmor) durch Temperaturwechselbeanspruchung (Steinhofkirche in Wien)

Rechts: Schädigung einer barocken Kreuzwegstation (Zogelsdorfer Kalksandstein) durch Salzkristallisation (Stift Zwettl)

Der wichtigste Einstieg für die Beurteilung von Eignung und Verwitterungsbeständigkeit ist die Beobachtung des Gesteinsverhaltens in der Natur, in einem natürlichen Aufschluss, in einem Steinbruch oder an einem Bauwerk. Die Aussagequalität dieser Naturbeobachtungen hängt mit der Ausbildung und Erfahrung des Beobachtenden zusammen, muss von Fall zu Fall relativiert werden und spreizt sich aus diesem Grund auch gegen jede Normung.

Erste Untersuchungen erfolgen meist an drei am Gefüge orientierten Gesteinsdünnschliffen unter dem Binokular oder Polarisationsmikroskop zur Erfassung der mineralogischen Zusammensetzung, der Kornbindung und zur Beurteilung der Gefügeeigenschaften. Die Quantifizierung des Mineralbestandes erfolgt durch Auszählen. Eine erste rasche Übersicht über die mineralogische Zusammensetzung erhält man auch durch die Prüfung eines Gesteinspulvers mit dem Röntgendiffraktometer. Da die Auflösung eines Lichtmikroskopes stark eingeschränkt ist und viele Verwitterungsvorgänge bereits im submikroskopischen Bereich ansetzen, wird für Detailstudien auch häufig ein Rasterelektronenmikroskop mit angeschlossenen EDAX zur Erfassung der chemischen Zusammensetzung eingesetzt.

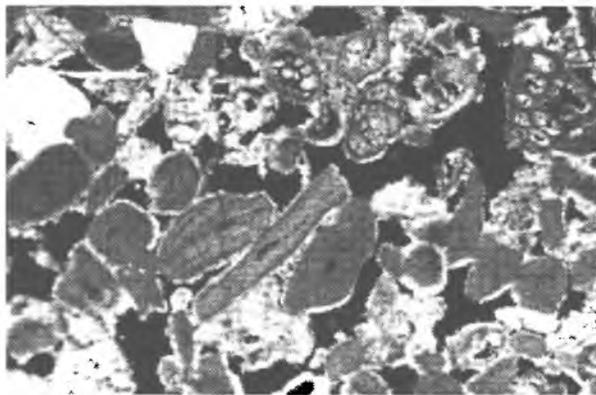


Abb. 44: Poröser St. Margrethener Kalksandstein (gekreuzte Polarisatoren, Länge des Bildausschnittes etwa 5 mm). Die Mikrofossilien (Foraminiferen und Kalkrotalgen) erlauben Aussagen über Alter und Ablagerungsraum des Gesteins.



Abb. 45: Überprüfung des Festigungserfolges bei Carrara - Marmor im Rasterelektronenmikroskop (Silikonharzbrücke zwischen Kalkspatkristallen).

Die für die physikalische Materialprüfung zum Einsatz gelangenden, meist genormten Methoden (ÖNORM, EN) werden häufig im Labor an definierten Probekörpern durchgeführt und simulieren, beispielsweise bei der Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit, natürliche Verwitterungsvorgänge, wie zum Beispiel Frost-Tau-Wechselbeanspruchung oder Salzsprengung in zeitgegraffter Form und unter exakt definierten Rahmenbedingungen, so dass die Resultate der Untersuchungen international vergleichbar werden.

Wesentliche physikalische Gesteinseigenschaften sind:

Dichte,
Härte und
Festigkeit.

Die **Dichte** wird bei Gesteinen, die ja mono- oder polymineralische Gemenge darstellen, unterschieden in Reindichte und Rohdichte. Die Reindichte, die mit einem Pyknometer ermittelt wird, ist die Dichte eines Gesteines ohne Porenanteil bei der Ermittlung der Rohdichte fließen auch die im Gestein enthaltenen Poren ein. Je weniger porös ein Gestein ist, desto näher liegen die Werte von Reindichte und Rohdichte beieinander, je poröser ein Gestein ist, desto stärker differieren diese beiden Werte. In engem Zusammenhang mit der Rohdichte steht, bei entsprechender Verbindung und Durchlässigkeit der Poren das Wasseraufnahme- und Austrocknungsverhalten eines Gesteines. Die effektive Porosität kann sehr exakt auch mit dem Quecksilberporosimeter bestimmt werden.

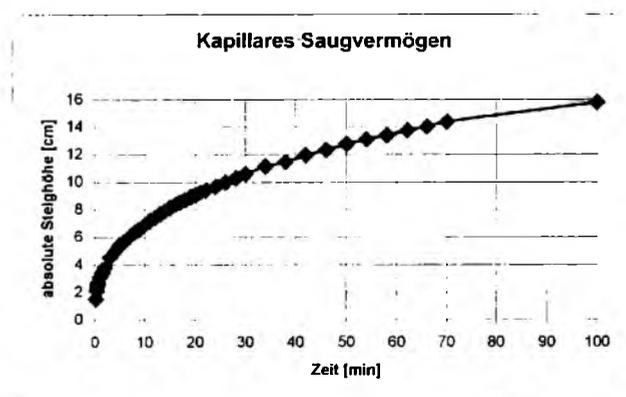
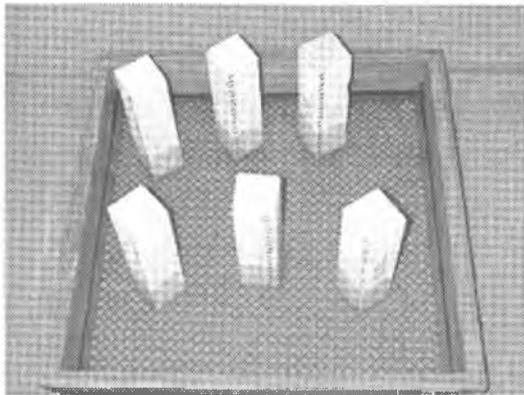


Abb. 46: Beispiel für Versuchsanordnung und Auswertung des kapillaren Saugvermögens.

Die Bestimmung der Gesteins**härte** ist auf direktem Wege nicht möglich. Die Härte, definiert als Eindringwiderstand, lässt sich bei Mineralen, also den Gesteinsgemengteilen, mit unterschiedlichen Methoden sehr exakt bestimmen (z.B. Ritzhärte nach MOHS, Eindruckhärte

nach VICKERS, BRINELL, KNOOP, etc.). Irrig ist jedoch die Ansicht, dass die Summe der Härte der Einzelminerale die Gesteinshärte darstellt! Die Gesteinshärte lässt sich nur indirekt als Funktion des Schleifwiderstandes ermitteln (z.B. Schleifscheibe nach BAUSCHINGER oder BÖHME, Bohrwiderstand, Cerchar Index, etc.).

Die **Gesteinsfestigkeit**, definiert als Widerstand gegen Versagen durch Bruch, wird mit Prüfpressen ermittelt, wobei definierte Probekörper (Zylinder, Würfel, Prismen) kontrolliert kraft-, weg- oder dehnungsgesteuert zusammengedrückt oder auseinandergezogen werden. Man unterscheidet bei den statischen Festigkeiten prinzipiell Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Biegezugfestigkeit und Scherfestigkeit. Bei Fassadenplatten ist die Ermittlung der "Last am Ankerdorn" von Interesse. Faustgroße Handstücke können direkt vor Ort, zum Beispiel in einem Steinbruch, mit dem Punktlastgerät auf ihre Festigkeit hin überprüft werden.

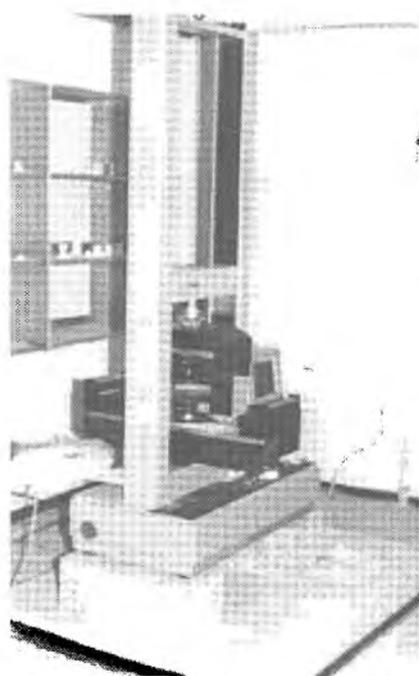


Abb. 47: Computergesteuerte Prüfpresse (Maximalkraft 100 KN) mit Biegebalken.

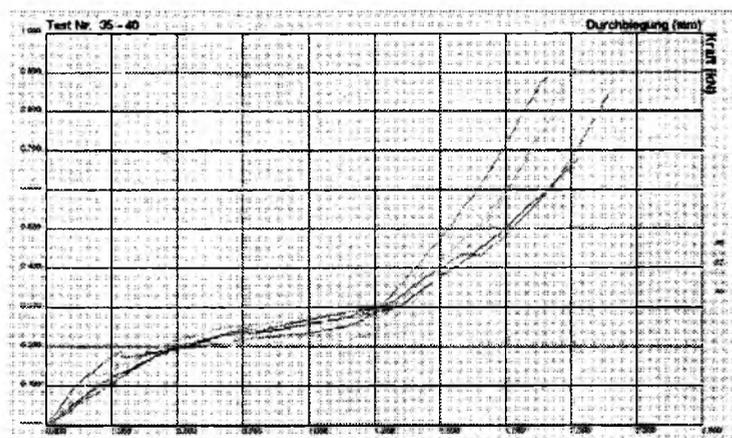


Abb. 48: Beispiel für Arbeitslinien von Biegezugversuchen.

Rahmenbedingungen, die zu unterschiedlichen oft auch nicht reproduzierbaren Versuchsergebnissen führen, sind die Prüfkörpergeometrie¹, nicht definierte Startpunkte der Rissfortpflanzung (z.B. bei Bestimmung der Biegezugfestigkeit), Korngrößeneffekte² und unterschiedliche Belastungsgeschwindigkeiten. Auch das unterschiedliche elastische Verhalten, das bei Gesteinen im allgemeinen eher gering ist, wirkt sich auf die Festigkeit aus. Das elastische Verhalten wird als statischer E-Modul ebenfalls auf einer Prüfpresse ermittelt.

Um die Verwitterungsbeständigkeit eines Gesteines zu beurteilen und eine Prognose über die Haltbarkeit eines Gesteines unter den jeweils gegebenen Rahmenbedingungen des Einsatzortes geben zu können, sind neben den unten angeführten Laboruntersuchungen auch Erfahrungswerte durch Langzeitbeobachtungen an Bauwerken und Steinbrüchen von großer Bedeutung, die sich nur in Einzelfällen verallgemeinern und normieren lassen. Auf die empirisch gewonnene Erfahrung des prüfenden Laboranten oder Geowissenschaftlers kann gerade bei der Beurteilung der Verwitterungsbeständigkeit eines Gesteines nicht verzichtet werden, da zudem die im Labor erhaltenen Zerstörungsmechanismen (z.B. bei FTW-Untersuchungen) den Erfahrungswerten immer wieder widersprechen können. Einerseits sind hier der Labormaßstab der Proben und andererseits die natürlich nicht vorkommenden, verschärften Untersuchungsbedingungen verantwortlich zu machen! Wichtige Ergebnisse hinsichtlich der Verwitterungsbeständigkeit liefern normierte Untersuchungen der Widerstandsfähigkeit gegenüber Frost-Tau-Wechselbeanspruchung, Frost-Tausalz- und Salzsprengtests sowie die Erfassung von Längen- und Volumsänderungen bei thermischer und hygrischer Beanspruchung.

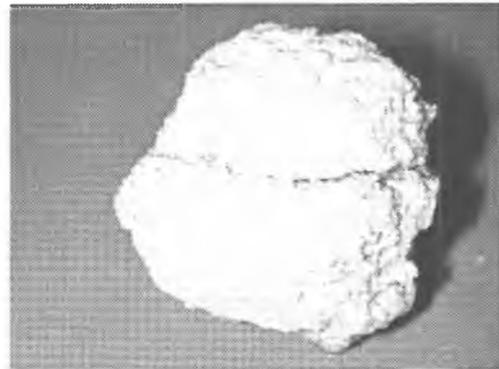
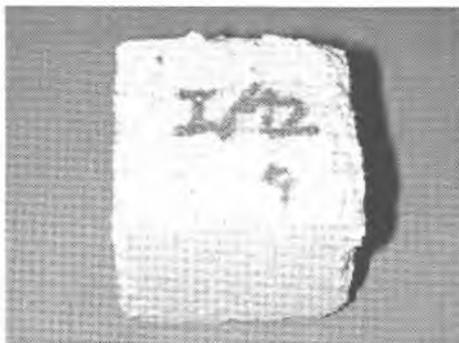


Abb. 49: Beispiel eines Salzkristallisationstests mit Natriumsulfat an Aflenz Kalksandstein.

Links: nach 3 Zyklen.

Rechts: nach Versuchsende (15 Zyklen)

¹ Eine ungünstige Prüfkörpergeometrie besitzt zum Beispiel der Würfel, da es an seinen Ecken zu Spannungsspitzen kommt.

² Bei sehr grobkörnigen Gesteinen, zum Beispiel Grobkorngraniten oder Konglomeraten, ist es häufig nicht möglich, die Prüfkörper als das mindestens 10-fache der Längsachse des größten Kornes herzustellen. Somit beeinflussen Festigkeitseigenschaften von einzelnen Gesteinskomponenten oder Mineralen (bei Graniten vor allem die gut spaltbaren Feldspate) die Prüfergebnisse derart, dass eigentlich von einer Gesteinsfestigkeit keine Rede mehr sein kann.

Bei den zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden zur Werkstoffprüfung gewannen Ultraschallmessungen in den letzten 10 Jahren an Bedeutung.

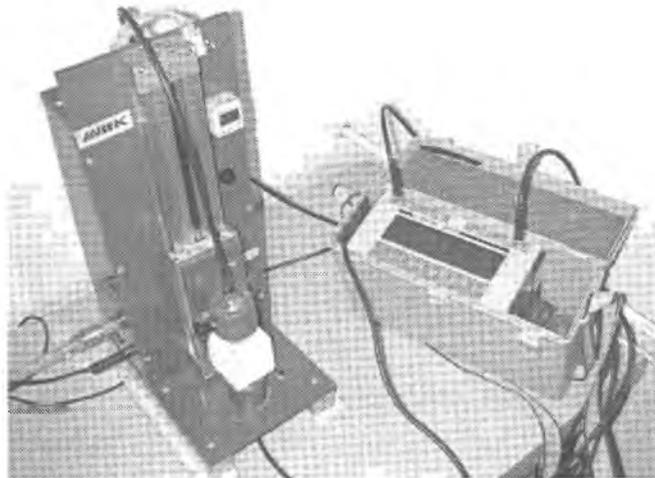


Abb. 50: Versuchsanordnung für Ultraschallmessungen.

Mit Hilfe von Ultraschall-Laufzeitmessungen können Aussagen über Dichte, Festigkeit, elastische Eigenschaften (dynamischer E-Modul, etc.) und Verwitterungszustand eines Gesteines getroffen werden. Auch die Qualität von Restaurierungsmaßnahmen an historisch wertvollen Objekten kann im Vergleich vorher – nachher überprüft werden.

In Sedimentgesteinen wie Sandsteinen oder Kalksteinen können auf Grund ihrer Entstehungsgeschichte quellfähige Tonminerale angereichert sein, die durch ihr Quellvermögen den Werkstein maßgeblich schädigen können. Dieses Schadensbild zeigen in Österreich häufig zum Beispiel feinkörnige Flyschsandsteine, Gosausandsteine, der Adneter und Hallstätter Rotkalk in Knollenkalkfazies. Eine einfache Laborprüfung auf empfindliche Tonminerale wäre der Kochversuch. Hierbei werden Gesteinsproben 36 Stunden in destilliertem Wasser gekocht. Diese Methode gelangt auch für den Nachweis des Sonnenbrennerzerfalls bei Basalten zur Anwendung.

Für Absolutmessungen der hygriech induzierten Dehnung reicht im Allgemeinen eine Messuhr mit der Ablesegenauigkeit von $1/1000$ mm, die in einem steifen Metallrahmen befestigt ist.

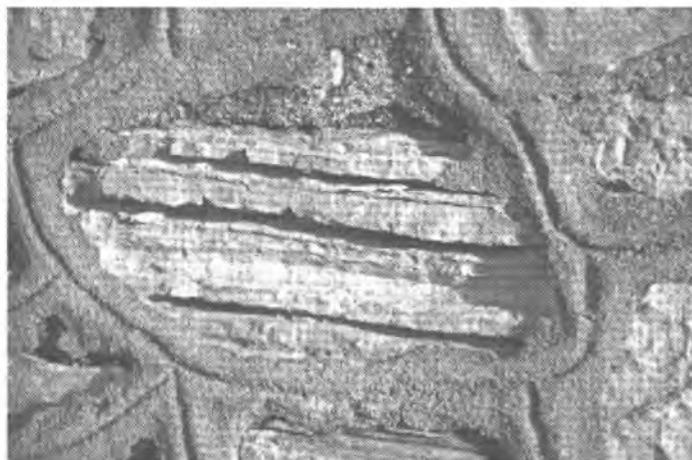


Abb. 51: Beispiel für das Verwitterungsverhalten tonmineralreicher Lagen in einer Kalk-Mergel-Wechselfolge (Bildausschnitt: 50 cm; Foto: W. Eppensteiner).

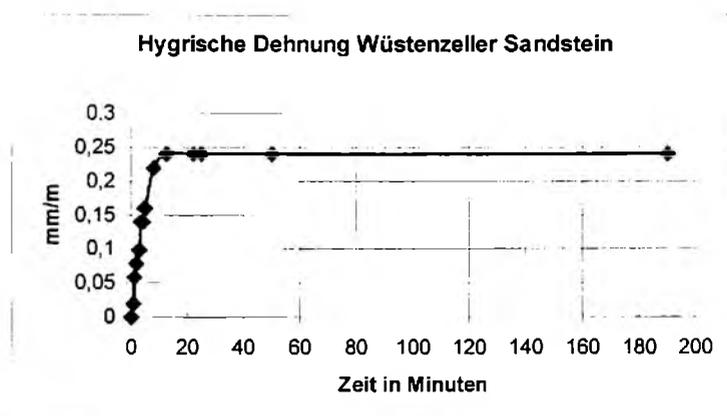


Abb. 52: Beispiel für die Auswertung einer Absolutmessung von hygri- sch induzierter Dehnung.

Einen derzeit sehr aktuellen Themenschwerpunkt bilden unerwünschte Verfärbungen bei Fußbodenbelägen aus Naturstein, wobei von Fall zu Fall abzuklären ist, ob es sich um Wechselwirkungen zwischen Verlegemörtel und Naturstein, rostende Minerale (z.B. Pyrit), eisenhaltigen Kalkspat, bituminöse Bestandteile, Reste von Stahlsand aus der Oberflächenbearbeitung oder eventuelle Imprägnierungen chemischer Natur handelt. Hier können einfache Prüfmetho- den, wie die Lagerung von Gesteinsproben im Feuchtraum zielführend sein, meist sind jedoch umfangreiche chemische Untersuchungen an Eluaten notwendig.

Als letzter Untersuchungsschwerpunkt der technischen Gesteinskunde sei noch die eventuell auftretende Gesundheitsgefährdung bei der Bearbeitung oder Verwendung von Natursteinprodukten erwähnt. Radioaktivität, Silikose und Asbestose sind Eigenschaften bzw. Erkrankungen, die im Umgang mit Steinprodukten die Gesundheit des Steinmetzen und Konsu-

menten gefährden können und somit einer entsprechenden Untersuchung und Berücksichtigung bedürfen.

Zusammenfassend muss nochmals festgestellt werden, dass für eine sinnvolle Interpretation der, unter Verwendung des im Anhang aufgelisteten Normenapparates, erarbeiteten gesteinsphysikalischen Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten von Naturstein die empirische Erfahrung des Prüfenden eine unabdingbare Voraussetzung ist.

Literatur

- DÜLLMANN, H. (1976): Die Ermittlung der elastischen Kennwerte von Gesteinen mittels Ultraschall-Laufzeitmessungen und einaxialer Druckversuche unter besonderer Berücksichtigung einer durch das Korngefüge bedingten mechanischen Anisotropie. - Mitt. Ing.- u. Hydrogeol., **1**, 244 S., 90 Abb., 15 Tab., Aachen
- FLEISCHER, G. (2002): Beurteilung von Ultraschalluntersuchungen an Natursteinobjekten in der Denkmalpflege. – Dissertation, Inst. f. Ingenieurgeologie der TU-Wien, Wien
- HANISCH, A. & SCHMID, H. (1901): Österreichs Steinbrüche. Verzeichnis der Steinbrüche, welche Quader, Stufen, Pflastersteine, Schleif- und Mühlsteine oder Dachplatten liefern.- Carl Graeser & Co, Wien
- HANISCH, A. (1912): Prüfungsergebnisse mit natürlichen Bausteinen. – Deuticke, 123 S., 10 Taf., Wien – Leipzig
- KARRER, F. (1886): Die Monumentalbauten in Wien und ihre Baumaterialien. - Monatsblätter des Wissenschaftlichen Club in Wien, **6**, vom 15. März 1886, Wien
- KIESLINGER, A. (1932): Zerstörungen an Steinbauten, ihre Ursachen und ihre Abwehr. – Deuticke, Leipzig und Wien
- KIESLINGER, A. (1951): Gesteinskunde für Hochbau und Plastik.- 200 S., Wien
- KIESLINGER, A. (1954): Erhitzung von Naturstein im Zuge technischer Verwendung. - Montan-Rdsch., **2/2**, 19-23, Wien
- KIESLINGER, A. (1956): Die nutzbaren Gesteine Kärntens. - Carinthia II, Naturwissenschaftliche Beiträge zur Heimatkunde Kärntens, Mitt. d. Naturwissenschaftlichen Vereines f. Kärnten, **17**, Sonderheft, Klagenfurt
- KIESLINGER, A. (1957): Feuchtigkeitsschäden an Bauwerken. - Zement u. Beton, **1957/9**, 7 S., Wien
- KIESLINGER, A. (1960): Gesteinsspannungen und ihre technischen Auswirkungen. - Z. dt. Geol. Ges., **112/1**, 164 - 170, Hannover
- KIESLINGER, A. (1964): Die nutzbaren Gesteine Salzburgs. - Mitt. Ges. Salz. Landeskunde, **1964/Ergänzungsbd. 4**, 436 S., Bergland-Buch, Salzburg - Stuttgart
- PETKOVSEK, J. (1897): Die Baugesteine Wiens in geologisch - bautechnischer Beleuchtung. - Pichler's Witwe & Sohn, Wien

- PLINIUS Secundus, d. Ä. (1992): *Naturalis Historiae Liber XXXVI* (Naturkunde Buch **36** - Die Steine). - Sammlung TUSCULUM (BAYER, K., FUHRMANN, M. & JÄGER, G. [Ed.]: „Die Steine“ herausgegeben und übersetzt von KÖNIG, R. & HOPP, J., 269 S., Artemis, München
- POLLACK, V. (1923): *Verwitterung in der Natur und an Bauwerken*. - Technische Praxis, 580 S., 120 Abb., 1 Taf., Waldheim – Eberle, Wien & Otto Klemm, Leipzig
- QUERVAIN, F. de (1967): *Technische Gesteinskunde*. - Birkhäuser, 261 S., 124 Abb., 56 Tab., Basel - Stuttgart
- ROHATSCH, A. & THINSCHMIDT, A. (1997): *Charakterisierung und Vorkommen historisch bedeutender Baugesteine im nördlichen Weinviertel*. - Exkursionsführer „Das Land um Laa an der Thaya“, Österr. Geol. Ges., **17**, 45 - 52, Wien
- ROHATSCH, A., NIMMRICHTER, J. & CHALUPAR, I. (2000): *Physical properties of fine grained marble before and after conservation*. - Proc. of the 9th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Venice 19 - 24 June 2000, pp. 453 - 458, Venice
- SCHMÖLZER, A. (1930): *Die Vorkommen nutzbarer Gesteine Österreichs unter besonderer Berücksichtigung der Bedürfnisse des Strassen- und Betonbaues*. - Verband der österreichischen Straßengesellschaften, Wien
- STINY, J. (1919): *Technische Gesteinskunde*. - Technische Praxis, 335 S., 27 Abb., Wien (Waldheim - Eberle) - Leipzig (Otto Klemm)
- STINY, J. (1930): *Die Bausteine Orvietos und ihre Verwitterung. Nebst Beobachtungen an Bausteinen in Rom, Florenz, Pisa und Venedig*. - Geologie und Bauwesen (Sonderabdruck), **1930/3**, 1 - 40, Wien
- SUANA, M. & PETERS, Tj. (1982): *The Cerchar Abrasività Index and its Relation to Rock Mineralogy and Petrography*. – Rock Mechanics, **15**, 1-7, Springer Verlag, Wien-Berlin-New York
- VITRUVIUS, P. M. (1991): *Vitruvii De architectura libri decem = Zehn Bücher über Architektur* (übers. mit Anmerk. versehen v. Curt FENSTERBUSCH).- 5. Aufl., Darmstadt (Wiss. Buchges. Darmstadt, Bibl. klass. Texte)
- WAGENBRETH, O. (1978): *Naturwissenschaftliches Grundwissen für Bauingenieure. Technische Gesteinskunde*. - 3 VEB., Aufl., 192 S., Berlin
- WIDHALM, C., TSCHEGG, E. K. & EPPENSTEINER, W. (1995): *Anisotropic thermal expansion causes deformation of marble claddings*. - Proceedings of the 5th Workshop EURO CARE - EURO-MARBLE Innsbruck 1994, Forschungsbericht **15/1995**, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege - Zentrallabor, 1 - 15, München
- WINKLER, E. M. (1994): *Stone in Architecture. Properties, Durability*. - 3rd edition, 313 pp., 219 figs., 63 tables, Springer, Berlin - Heidelberg - New York
- WIEDEN, P. (1979): *Physikalische Ursachen der Steinzerstörung*. - Restauratorenblätter, **3**, 162 - 169, Wien