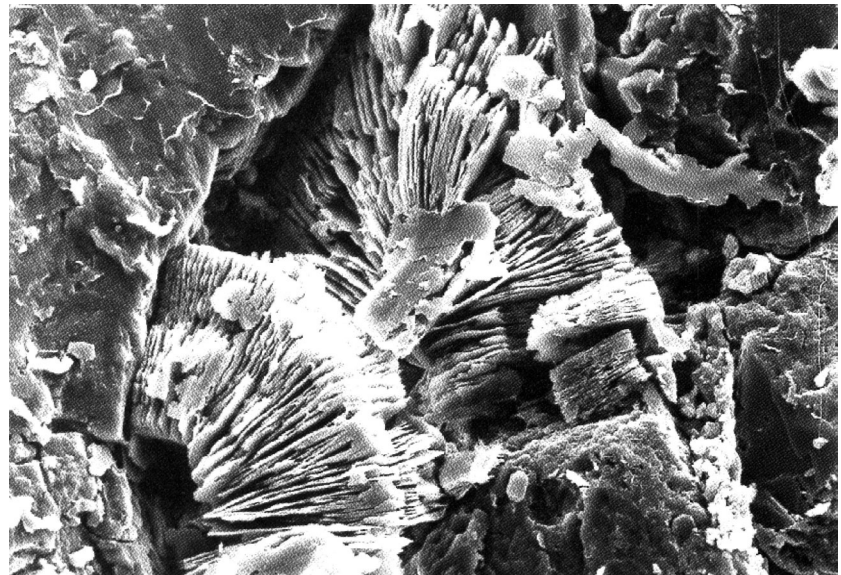


Dissertation  
der Fakultät für Geowissenschaften  
der Ludwig-Maximilians-Universität München

---

## **Quelldruckmessungen und thermische Druckmessungen an ausgewählten Sandsteinen**

von  
Mathias Kocher





Dissertation eingereicht am 14. Dezember 2004

1. Berichterstatter: Prof. Dr. R. Snethlage

2. Berichterstatter: Prof. Dr. W.-D. Grimm

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Mai 2005



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit wurde im Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege, Abt. ZV, Zentrallabor, durchgeführt. Allen Mitarbeitern der Abteilung, namentlich Herrn Chr. Gruber, Frau Ch. Hien, Herrn M. Mach, Frau I. Sanya, Herrn V. Tucic, Frau E. Woznik und meinem Mitdoktoranden Herrn R. Utz, sei für ihr geduldiges Verständnis herzlichst gedankt.

Die Anregung der Arbeit kam vom Leiter der Abteilung, Herrn Prof. Dr. R. Sneathlage. Ihm danke ich für das dadurch zum Ausdruck gebrachte Vertrauen, für die finanzielle Unterstützung, die Bereitstellung des Arbeitsmaterials und die stetige fachliche sowie menschliche Betreuung.

Herrn Prof. Dr. W.-D. Grimm gilt mein Dank für die Heranführung an das Thema "Naturwerkstein" und für sein anhaltendes und wohlwollendes Interesse an der Arbeit.

Herrn H. Plöckl, Leiter der Werkstätten des Mineralogischen Institutes, und seinem Nachfolger Herrn M. Sieber danke ich für den Bau der Triaxial-Quelldruck-Messzelle. Herrn Dr. G. Weiss gebührt Dank für die Durchsicht des Manuskripts. Den Herren Dr. H. Schuh und Dr. E. Wendler danke ich für zahlreiche theoretische und praktische Hilfestellungen.

"Last but not least", allen Mitarbeitern der beteiligten Institute (ETH Zürich, FhG Holzkirchen, BGLA München, LMU München, TU München, Uni. Karlsruhe), die zum Gelingen dieser Arbeit beitragen, herzlichen Dank.



---

## Quelldruckmessungen und thermische Druckmessungen an ausgewählten Sandsteinen

(114 Abbildungen, 30 Tabellen, 1 Tafel)

von  
Mathias Kocher  
2004

### Zusammenfassung

Der von häufigen Befeuchtungs- und Trocknungszyklen hervorgerufene physikalische Prozess des Quellens und Schwindens wird gegenwärtig als Hauptschadensursache für die Verwitterung von tonmineralreichen Sandsteinen angesehen (WENDLER, 1996 und SNETHLAGE & WENDLER, 1997). Hauptziel der Arbeit war deshalb die Messung des hierbei entstehenden Druckes. Die messtechnische Erfassung des Quelldruckes sollte unter möglichst realistischen Bedingungen (Belastungszustand, Ausgangsfeuchte und Temperatur der Probestkörper) erfolgen.

Die Untersuchungen wurden an 5 tonmineralreichen Sandsteinen (Cottaer, Ebenheider, Maulbronner, Rorschacher und Sander) sowie an einem tonmineralfreien (Oberkirchner Sandstein), der als Referenzmaterial diente, durchgeführt.

Da Tonmineralien aufgrund ihres schichtenförmigen Aufbaues einen sehr hohen Porenanteil  $< 5\text{\AA}$  haben, lässt sich anhand der Sorptionsisotherme eines Gesteins und deren Zuordnung zu Porenradialklassen eine qualitative Aussage über dessen Tonmineralanteil und den zu erwartenden Quelldruck treffen.

Diese Aussage lässt sich auch aus der Messung der hygrischen Längenänderung ableiten. Sandsteine mit Quellbeträgen von unter  $300\ \mu\text{m/m}$  sind als nicht quellend, solche mit bis zu  $1.500\ \mu\text{m/m}$  als deutlich quellend und Gesteine mit über  $1.500\ \mu\text{m/m}$  als stark quellend einzustufen. Im Extremfall konnten hygrische Längenänderungen von bis zu  $5.000\ \mu\text{m/m}$  beobachtet werden. Dieser Quellbetrag entspricht  $0,5\%$  der Ausgangslänge. Während sich die Quellbeträge der Tone und Schluffe im  $\%$ -Bereich bewegen, liegen die der Sandsteine um eine 10-er Potenz niedriger, also im  $\text{‰}$ -Bereich.

Nach Überwindung der messtechnischen Schwierigkeiten der Quelldruckmessung von Festgesteinen (Passgenauigkeit des Oedometerringes), waren die ermittelten Quelldruckwerte aller untersuchten Sandsteine in Relation zu deren Festigkeitskennwerten so gering, dass es zunächst so schien, dass eine Materialschädigung infolge von Quellen und Schwinden auszuschließen sei. Die eigenen Messergebnisse wurden sowohl in unterschiedlichen Versuchsdurchführungen (Oedometerversuch und Versuch mit einer Universalprüfmaschine) als auch in Form eines internationalen Ringversuches, an dem die auf diesem Gebiet maßgeblichen Institutionen beteiligt waren, verifiziert.

Die nähere Untersuchung des Einflusses der Probengeometrie auf das Ergebnis des Quelldruckversuches

brachte die Erkenntnis, dass die gängige Geometrie der Oedometerproben ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm) zur Quelldruckmessung von Sandsteinen aufgrund ihres Schlankheitsfaktor von  $\sim 0,3$  ungeeignet ist. Im Vergleich zu den Ergebnissen, ermittelt an Zylinderproben ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 160 mm, Schlankheitsfaktor  $\sim 2,3$ ), erreichen die Ergebnisse der Oedometerproben nur etwa 10 % des Wertes. Inwieweit der Einfluss des Formfaktors auf den allgemeinen Fall des Quelldruckversuches (Locker- sowie Festgestein) zu übertragen ist, lässt sich aus den durchgeführten Untersuchungen nicht ableiten. Die Vermutung der Übertragbarkeit des Ergebnisses liegt aber nahe.

Zur zeitgleichen Messung des Quelldruckes in alle drei Raumrichtungen wurde eine Triaxialquelldruckmesszelle konzipiert und in den Werkstätten des Mineralogischen Institutes der LMU München gebaut. Die Messzelle ist für würfelförmige Probekörper mit einer maximalen Kantenlänge von 50 mm und einer Maximalkraft von 2,5 kN ausgelegt. Da nach WESCHE (1983) würfelförmige Probekörper im Druckversuch bis zu einer Kantenlänge von 250 mm eine Geometrieabhängigkeit des Ergebnisses zeigen, ist auch bei den Triaxialquelldruckversuchen mit diesem Einfluss zu rechnen. Legt man den von WESCHE ermittelten Formfaktor der Druckversuche auch für die Quelldruckmessungen zu Grunde, so müssen die Ergebnisse dieser Versuchsreihe mit dem Faktor 1,6 multipliziert werden, um den geometrieunabhängigen Wert zu erhalten.

Die in den uniaxialen Quelldruckversuchen beobachtete Abhängigkeit der Messwerte von der Lage der Schichtungsebene (Verhältnis parallel zu senkrecht zur Schichtung von bis zu 1:3) gleicht sich in den Triaxialquelldruckversuchen an. Das Verhältnis geht auf nahezu 1:1 zurück. Damit verhält sich der Quelldruck, in dieser Versuchsreihe, entsprechend einem echten physikalischen Druck (Richtungsunabhängigkeit).

Mit Ausnahme der Quelldruckwerte des Sander Schilfsandsteins, Typ II und Typ III, sind die an Zylinderproben ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 160 mm) ermittelten Werte, in Relation zu deren Festigkeitskennwerten, allerdings immer noch so gering, dass dadurch eine Schädigung des Gefüges als eher unwahrscheinlich anzusehen ist.

Neuere Untersuchungen zur Festigkeit bringen eine mögliche Erklärung für dieses anfänglich verblüffende Paradox. Trotz sorgfältiger Bestimmung der Materialkennwerte und exakter statischer Festigkeitsberechnungen konnte in der Vergangenheit gelegentlich rätselhaftes Materialversagen beobachtet werden. Erklärt wurde dies bisher durch die Inhomogenität des Materials Naturwerkstein, was sicherlich auch für den einen oder anderen Fall zutreffend ist. Die Untersuchungen von SORACE (1996) zeigen, dass die Langzeitfestigkeitskennwerte von Gesteinen erheblich unter den Kurzzeitfestigkeitskennwerten liegen. Da die meisten Belastungszustände am Objekt Spannungen mit langer Einwirkungsdauer hervorrufen, empfiehlt es sich, zur Abschätzung der Auswirkungen von Druck-, Zug-, Torsions-, Biege-, Quell- und thermischen Druckspannungen auf die Dauerhaftigkeit des Materials diese Festigkeitskennwerte zu verwenden.

Bei weiterer Verwendung der Kurzzeitfestigkeitskennwerte für statische Berechnungen muss eine erhebliche Erhöhung des Sicherheitsbeiwertes gefordert werden. Die Langzeitzugfestigkeitswerte der untersuchten Sandsteine werden durch den Quelldruck nur beim Sander Sandstein, in allen drei Vorlaststufen, überschritten. Es ist aber anzunehmen, dass bei den anderen Sandsteinen, mit Ausnahme des Cottaer und Obernkirchner Sandsteins, Varietäten mit ähnlich hohen Quelldruckwerten existieren. Eine ausreichende hygrische Stabilität (Verhältnis Quelldruck/Langzeitzugfestigkeit von 1:6) ergibt sich nur beim Referenzgestein.

Zur Reduzierung der Quellwirkungen (hygrische Längenänderung und Quelldruck) wurde ein Tensid der Firma Remmers (Funcosil Antihygro) verwendet. Die Applikation des Schutzmittels brachte jedoch nicht den erwarteten Effekt. Während die hygrischen Längenänderungen in etwa um 10 % reduziert wurden, konnte bei den Quelldruckmessungen keine Reduktion festgestellt werden. Allerdings würde eine Quelldruckminderung von ca. 10 % des Ausgangswertes in dem untersuchten Quelldruckbereich innerhalb der Messungenauigkeit liegen und somit nicht zu detektieren sein.

Die Messungen des thermischen Druckes und der Vergleich mit den Quelldruckmessergebnissen brachte unerwartete Resultate. Obwohl die Temperaturverwitterung im ariden Klimabereich, mit tageszeitlichen Temperaturschwankungen von bis zu 80 K, als allgemein anerkannt anzusehen ist, maß man ihr in den gemäßigten Klimaten wegen der tageszeitlich geringeren Temperaturunterschiede (von bis zu 40 K) eher eine nicht so bedeutsame Rolle zu. Die Größenordnung dieses Druckes liegt jedoch im Bereich des Quelldruckes, meist sogar noch darüber. Diesem physikalischen Phänomen schenkte man bisher nicht die ihm gebührende Aufmerksamkeit, obwohl die jahreszeitlich bedingten Temperaturunterschiede im mitteleuropäischen Klima an Bauteiloberflächen auch bis zu 80 K betragen können.



## Inhaltsverzeichnis

	Vorwort	
	Zusammenfassung . . . . .	7
<b>I</b>	<b>Einführung</b> . . . . .	13
	1 Einleitung . . . . .	13
	2 Zielsetzung . . . . .	13
<b>II</b>	<b>Derzeitiger Kenntnisstand</b> . . . . .	14
	<b>1 Definitionen und Begriffe</b> . . . . .	14
	1.1 Tone . . . . .	14
	1.2 Tonmineralien . . . . .	16
	1.3 Porenraum und Porenhalt . . . . .	19
	1.4 Quellen . . . . .	21
	1.4.1 Hygrische Längenänderung . . . . .	21
	1.4.2 Innerkristalline (intrakristalline) Quellung . . . . .	24
	1.4.3 Interkristalline (osmotische) Quellung . . . . .	26
	1.4.4 Mechanische Quellung . . . . .	27
	1.5 Quelldruck . . . . .	28
	1.6 Thermische Längenänderung und thermischer Druck . . . . .	30
	1.7 Festigkeitskennwerte . . . . .	33
	1.7.1 Druckfestigkeit . . . . .	35
	1.7.2 Spaltzugfestigkeit . . . . .	39
	1.7.3 Zugfestigkeit . . . . .	41
	1.7.4 Biegefestigkeit . . . . .	43
	1.7.5 Scherfestigkeit . . . . .	45
	1.7.6 Torsionsfestigkeit . . . . .	45
	1.7.7 Haftfestigkeit, Haftzugfestigkeit und Oberflächenhaftzugfestigkeit . . . . .	46
	<b>2 Bisherige Ansätze zur Beschreibung des Quellens</b> . . . . .	47
	2.1 Experimentelle Ansätze . . . . .	47
	2.2 Theoretische Ansätze . . . . .	48
	2.3 Änderung der Festigkeitskennwerte . . . . .	49
	<b>3 Stand der Versuchstechnik</b> . . . . .	50
	3.1 Uniaxiale Quellversuche . . . . .	50
	3.1.1. Quellhebungsversuch . . . . .	51
	3.1.2. Quelldruckversuch . . . . .	54
	3.2 Biaxiale Quellversuche . . . . .	56
	3.3 Triaxiale Quellversuche . . . . .	57
<b>III</b>	<b>Eigene Untersuchungen</b> . . . . .	59
	<b>1 Probenmaterial</b> . . . . .	59
	1.1 Die untersuchten Sandsteine . . . . .	59
	1.1.1 Gesteinsbeschreibung . . . . .	59
	1.1.2 Technische Kennwerte . . . . .	61
	1.1.3 Prüfkörpergeometrie . . . . .	64

---

<b>2</b>	<b>Porosität und Wasseraufnahme</b>	65
<b>3</b>	<b>Hygrische Längenänderung</b>	69
3.1	Raumorientierte Versuche	69
3.2	Ergebnisse	70
<b>4</b>	<b>Quelldruck</b>	72
4.1	Vorversuche	72
4.1.1	Probendimension	72
4.1.2	Ausgangsfeuchte und Temperatur	75
4.1.3	Vorlast	77
4.2	Oedometerversuch	78
4.2.1	Messprinzip und Versuchsaufbau	78
4.2.2	Anpassung der Versuchsanordnung	79
4.2.3	Durchführung der Versuche	80
4.2.4	Ergebnisse	83
4.3	Versuch mit der Universalprüfmaschine	85
4.3.1	Messprinzip und Versuchsaufbau	85
4.3.2	Anpassung der Versuchsanordnung	85
4.3.3	Durchführung der Versuche	86
4.3.4	Ergebnisse	87
4.4	Triaxialquelldruckversuch	89
4.4.1	Quelldruckmesszelle	89
4.4.2	Messprinzip und Versuchsaufbau	91
4.4.3	Durchführung der Versuche	92
4.4.4	Ergebnisse	92
4.5	Vergleich der Messergebnisse der verschiedenen Versuchsdurchführungen	93
4.6	Ringversuch zur Reproduzierbarkeit der Messwerte	94
4.7	Quelldruck bei unterschiedlichen Vorlaststufen	95
<b>5</b>	<b>Tensid-Behandlung zur Quelldruckminderung</b>	97
5.1	Änderung der Wasseraufnahme	98
5.2	Änderung der hygrischen Dehnung	99
5.3	Quelldruckänderung	100
<b>6</b>	<b>Quelldruck und Festigkeit</b>	101
<b>7</b>	<b>Thermische Längenänderung und thermischer Druck</b>	106
7.1	Messprinzip und Versuchsaufbau	106
7.2	Durchführung der Versuche	108
7.3	Ergebnisse	111
<b>IV</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick</b>	117
<b>V</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	119
<b>Anhang</b>		125
	Tabellenverzeichnis	125
	Abbildungsverzeichnis	126
	Lebenslauf	133

## Liste der verwendeten Abkürzungen

Co	Cottaer Sandstein	DIN	Deutsches Institut für Normierung e. V.
Eb	Ebenheider Sandstein	DMS	Dehnmeßstreifen
Mau	Maulbronner Sandstein	ISO	International Standard Organisation
Ob	Obernkirchner Sandstein	REM	Rasterelektronenmikroskop
Ro	Rorschacher Sandstein	⊥	Senkrecht zur Schichtung
Sa	Sander Sandstein	∥	Parallel zur Schichtung
		∅	Durchmesser

## Abkürzung physikalischer Größen

A	Fläche [m <sup>2</sup> ]	c	Kohäsion [MPa]
A	Querschnittsfläche [m <sup>2</sup> ]	d	Durchmesser [m]
A	Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	e	Porenzahl [-]
A <sub>0</sub>	Ausgangsquerschnittsfläche [m <sup>2</sup> ]	h	Höhe [m]
A <sub>s</sub>	Scherfläche [m <sup>2</sup> ]	l	Länge [m]
A <sub>s</sub>	Spezifische Oberfläche [m <sup>2</sup> /g]	l <sub>0</sub>	Länge bei T = 0 ° C [m]
E <sub>B</sub>	Bindungsenergie [J]	l <sub>t</sub>	Länge bei T = T ° C [m]
E <sub>pot</sub>	Potentielle Energie [J]	m	Masse [kg]
E <sub>dyn</sub>	Dynamischer Elastizitätsmodul [MPa]	m <sub>d</sub>	Mindestprobenmenge [g]
E <sub>stat</sub>	Statischer Elastizitätsmodul [MPa]	n	Porenanteil [%]
F	Kraft [N]	n <sub>a</sub>	Porenanteil der mit Gas gefüllt ist [%]
F <sub>max</sub>	Maximalkraft [N]	n <sub>w</sub>	Porenanteil der mit Wasser gefüllt ist
Gew.-%	Gewichtsprozent [-]	p	Druck [MPa = N/mm <sup>2</sup> ]
K	Kelvin	r	Radius [m]
K	Kompressibilität [m <sup>3</sup> /N]	r. F.	Relative Feuchte [%]
KAK	Kationenaustauschkapazität [mval/100g]	t	Zeit [s]
M.-%	Masseprozent [-]	v	Belastungszunahmegeschwindigkeit [MPa/s]
Re	Streckgrenze [MPa]		
T	Temperatur [° C, K]		
V	Volumen [m <sup>3</sup> ]		
Vol.-%	Volumenprozent [-]		

$\alpha$	Formfaktor [-]	$\mu$	Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl) [-]
$\alpha_T$	thermischer Ausdehnungskoeffizient [1/K]	$\nu$	Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl) [-]
$\beta$	Volumenausdehnungskoeffizient [1/K]	$\pi$	Archimedische Zahl (3,14159) [-]
$\beta$	Festigkeit [MPa; früher N/mm <sup>2</sup> bzw. MN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi$	Winkel der inneren Reibung
$\beta_B$	Biegefestigkeit [MPa]	$\rho$	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]
$\beta_{BD}$	Biegedruckfestigkeit [MPa]	$\sigma$	Oberflächenenergie [J]
$\beta_{BZ}$	Biegezugfestigkeit [MPa]		Oberflächenspannung [N/m]
$\beta_{BZ, \text{biax}}$	Biaxiale Biegezugfestigkeit [MPa]	$\sigma$	Normalspannung [MPa]
$\beta_D$	Druckfestigkeit [MPa]	$\sigma_{1,2,3}$	Hauptspannung in x,y,z-Richtung [MPa]
$\beta_H$	Haftfestigkeit [MPa]	$\sigma_{ax}$	Axiale Spannung [MPa]
$\beta_{HZ}$	Haftzugfestigkeit [MPa]	$\sigma_q$	Quellspannung, Quelldruck [MPa]
$\beta_{OHZ}$	Oberflächenhaftzugfestigkeit [MPa]	$\sigma_{q, ax}$	Axiale Quellspannung [MPa]
$\beta_s$	Scherfestigkeit [MPa]	$\sigma_{q, r}$	Radiale Quellspannung [MPa]
$\beta_{SZ}$	Spaltzugfestigkeit [MPa]	$\sigma_{q, \ddot{A}}$	Quelldruckäquivalenzwert [MPa]
$\beta_T$	Torsionsfestigkeit [MPa]	$\sigma_r$	Radiale Spannung [MPa]
$\beta_Z$	Zugfestigkeit [MPa]	$\sigma_T$	Thermischer Druck, - Spannung [MPa]
$\beta_R$	Rechenfestigkeit [MPa]	$\sigma_{T, \ddot{A}}$	Thermischer Druckäquivalenzwert [MPa]
$\varepsilon$	Dehnung [m]	$\sigma_v$	Vergleichsspannung [MPa]
$\varepsilon_q$	Quelldehnung [m]	$\sigma_v$	Vorlast [MPa]
$\varepsilon_{q, ax}$	Axiale Quelldehnung [m]	$\tau$	Schubspannung [MPa]
$\varepsilon_{q, r}$	Radiale Quelldehnung [m]	$\zeta$	Zeta-Potential [V]
$\varepsilon_s$	Quellhebung [% , ‰, m]	$\zeta_s$	Korndichte [g/cm <sup>3</sup> ]
$\varepsilon_\sigma$	Quellhebung, elastischer Anteil		
$\varepsilon_{vol}$	Quellvolumen [m <sup>3</sup> ]	$\Delta l$	Längenänderung [m]
$\gamma$	Sicherheitsbeiwert [-]	$\Delta p$	Druckänderung [MPa]
$\eta$	Viskosität [Pa s]	$\Delta T$	Temperaturänderung [K]
$\eta$	Erweichungskoeffizient [-]	$\Delta t$	Zeitintervall [s]
$\lambda$	Schlankheitsgrad [-]	$\Delta V$	Volumenänderung [m <sup>3</sup> ]
$\lambda_1$	thermischer Zuwachskoeffizient [1/K]		

## Indizes

Ä	Äquivalenzwert	r	radial
ax	axial	stat	statisch
biax	biaxial	th	thermisch
dyn	dynamisch	tot	total
el	elastisch	triax	triaxial
ges	gesamt	uniax	uniaxial
max	maximal	x,y,z	kartesische Koordinaten
min	minimal	1,2,3	Richtungen im Bezugssystem
pl	plastisch	$\infty$	unendlich
q	quellen	Oed	Oedometer
		Uni	Universalprüfmaschine

---

## I Einführung

### Einleitung

Bereits Mitte des vorletzten Jahrhunderts wurde man im Zuge des Eisenbahnnetzausbaues - vor allem beim Bau von Tunneln - auf die Phänomene des Quellens, Schwellens und Schwindens von Gesteinen aufmerksam. Die Durchfahrung von quell- oder schwellfähigen Gesteinsformationen verursachte enorme technische Schwierigkeiten, und erhebliche Schäden blieben nicht aus.

In den letzten Jahrzehnten versuchte man, die Quell- und Schwellfähigkeit bestimmter Lockergesteine und -gesteinsformationen für natürliche, selbstabdichtende Barrieren bei der Endlagerung von Abfällen zu nutzen; zum einen bei der Standortauswahl, Projektierung und der Ausführung von Deponien, zum anderen zur Versiegelung von Schächten, Stollen und Kavernen mittels hochaktiver Bentonite. Es verwundert daher nicht, dass der Großteil der vorliegenden Untersuchungen zum Quellen, Schwellen und Schwinden aus den Bereichen der Felsmechanik, der Bodenkunde und dem Grundbau kommt.

Mitte der 70-er Jahre näherte man sich von anderer Seite diesen Erscheinungen. Nach Ende des Zweiten Weltkrieges wurde neben dem Schienenausbau verstärkt auf den Ausbau des Straßennetzes gesetzt. Damals stellte man an den vorwiegend aus Beton errichteten Straßenbauwerken beträchtliche Schäden fest, die nur mit erheblichem finanziellem Aufwand beseitigt werden konnten. Dies führte zu intensiven Nachforschungen über die Schadensursachen und -mechanismen. Die betonverarbeitende Industrie richtete dabei ihr Augenmerk auf die Quell- und Schwindvorgänge ihres Werkstoffs.

Auch die Naturwerkstein- und Denkmalpflegeforschung kam auf der Suche nach den Ursachen und Wirkungsprinzipien der Gesteinsverwitterung zu diesem Themenkomplex. Insbesondere im Rahmen des BMFT-Projekts "Steinzerfall und Steinkonservierung" widmete man sich ab 1985 verstärkt diesen Themen.

### Zielsetzung

Der sich häufig in Folge von Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe wiederholende Quell- und Schwindvorgang gilt mittlerweile als anerkannte Schadensursache für die zahlreichen Verwitterungserscheinungen von stark quellenden, tonmineralreichen Sandsteinen. Obwohl der physikalische Vorgang der Quellung in seinen theoretischen Grundlagen als weitestgehend erforscht anzusehen ist, fehlen bis dato systematische Untersuchungen, die den Nachweis als Schadensursache belegen.

Hauptaufgabe der vorliegenden Arbeit war deshalb die Messung des Quelldruckes an ausgewählten Sandsteinen und die Abschätzung seiner Wirkung auf das Materialgefüge. Die Messungen sollten unter möglichst realen, statischen Vorlastbedingungen durchgeführt werden. Hierzu wurden 4 unterschiedliche Belastungszustände gewählt. Da die Messungen der hygrischen Längenänderung eine eindeutige Abhängigkeit des Messwertes in Bezug auf die Lage der Schichtungsebene zeigen und die Festigkeitskennwerte ebenfalls richtungsabhängig sind, lag die Messung des Quelldruckes nicht nur im uniaxialen Versuch, sondern auch im Triaxialversuch nahe. Zur Reduzierung der Feuchtedehnung und des damit verbundenen Quelldruckes wurden ein handelsübliches Produkt der Fa. Remmers (Funcosil Antihydro) verwendet und die damit zu erzielenden Quellminderungen ermittelt.

Thermische Druckversuche sollten den Einfluß der Temperaturänderungen auf das Gefüge klären. Der Vergleich der Größenordnung des Quelldruckes mit dem des thermischen Druckes sollte die Abschätzung der Schädigung durch diesen physikalischen Vorganges erlauben.

Der Vergleich beider Drucke mit den für die Festigkeit relevanten Kennwerten sollte ein Qualitätskriterium für die Verwitterungsresistenz der Sandsteine ergeben.

## II Derzeitiger Kenntnisstand

### 1 Definitionen und Begriffe

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Ingenieuren, Geologen, Mineralogen, Chemikern, Physikern und Werkstoffwissenschaftlern an diesem Phänomen setzt eine Übereinkunft in der Handhabung von Definitionen und Begriffen voraus. Der unterschiedliche Gebrauch von bestimmten Termini hat in der Vergangenheit und auch in jüngster Zeit immer wieder zu Irritationen und zu Missverständnissen geführt (REINSCH, 1991, Seite V). Diese Schwierigkeit zeigt sich sehr deutlich bei der Definition des Begriffs Ton.

#### 1.1 Tone

Als Tone bezeichnet man nach der Korngrößensystematik sowohl weiche, plastisch verformbare Tone als auch harte Tonsteine, deren Bestandteile überwiegend im Korngrößenbereich  $< 2 \mu\text{m}$  liegen (s. Abb. 1).

Um aus dieser Definition Gesteine auszuschließen, die aufgrund sehr hohen Karbonatgehaltes oder sonstiger Komponenten in diesem Korngrößenbereich vollkommen andere Eigenschaften aufweisen als die hier zu betrachtenden Tone, werden im Folgendem unter einem Ton Gesteine verstanden, deren Korngröße  $< 2 \mu\text{m}$  ist und deren Komponenten überwiegend silikatischer Natur sind.

Der Unterschied zum Tonstein besteht darin, dass ein Ton in Wasser, gegebenenfalls unter Zusatz von Dispergierungsmitteln, zur Dispersion gebracht werden kann.

Die so definierten Tone besitzen im unverfestigten Zustand physikalische und chemische Eigenschaften, die sie grundlegend von anderen Gesteinen unterscheiden. Selbst zu den ihnen am nächsten stehenden Schluffen und Silten bestehen deutliche Unterschiede. Aus diesem Grund kommt der ursprünglichen Grenzziehung zwischen Schluffen  $> 0,002 \text{ mm}$  und Tonen  $< 0,002 \text{ mm}$  nach der Korngröße zusätzlich eine materialbedingte Bedeutung zu.

Die wichtigsten Eigenschaften der Tone sind:

#### 1. Hohe Wasseraufnahme

Tone können bis zu 100 Vol.-% Wasser aufnehmen. Ihre Permeabilität sinkt dabei auf nahezu Null. Das aufgenommene Wasser wird in den Poren festgehalten und immobilisiert.

#### 2. Große Volumenänderung

Tone unterliegen bei der Wasseraufnahme einer Volumenzunahme (Quellung) und umgekehrt bei Wasserentzug einer Volumenverminderung (Schwinden), die sich in Form von Trockenrisen äußert.

#### 3. Verformbarkeit und Plastizität

Bei entsprechendem Wassergehalt ist dieser Rohstoff sehr gut verformbar und leicht zu bearbeiten. Diese Eigenschaft macht sich die keramische Industrie bei der Herstellung ihrer Produkte zunutze.

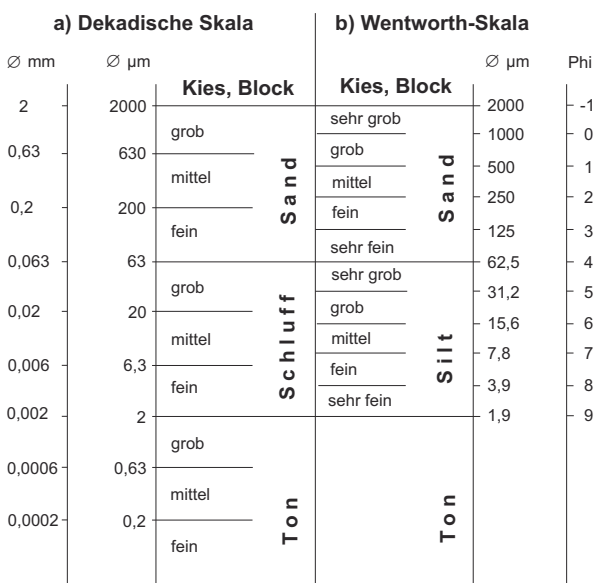


Abb. 1:

Die am häufigsten benutzten logarithmischen Korngrößenskalen für klastische Sedimente mit der deutschen Nomenklatur (nach HEIM, 1990).

#### 4. Ionenadsorption und Ionenaustausch

Tone können aus wässrigen Lösungen Kationen adsorptiv binden und diese bei Bedarf wieder abgeben. Die Pufferwirkung wird in der chemischen Industrie genutzt, in der ein breites Anwendungsspektrum, von der Lebensmittelchemie über die Pharmazie bis hin zur Bauchemie, existiert.

Diese spezifischen Merkmale der Tone können in unterschiedlichem Maß ausgeprägt sein. Allgemein treten sie mit sinkender Korngröße und wachsendem Anteil an silikatischen Komponenten (Silikate + Alumosilikate) hervor. Sie beruhen im wesentlichen auf den Oberflächeneigenschaften der Partikel und werden in erster Näherung um so effektiver, je größer die Oberfläche ist. Die Tonmineralien haben die Form von dünnen hexagonalen Blättchen.

Die Abb. 2 zeigt den Zusammenhang zwischen Partikelgröße (d) und Oberfläche / Volumen (A/V). Dabei zeigt sich, dass die spezifische Oberfläche ( $A_s$ ), d. h. die Oberfläche der Körner von einem Gramm Masse, von der Größe und von der Form der Partikel abhängt. Sie beträgt in  $m^2/g$ :

$$A_s = \frac{A}{m_d} = \frac{\alpha}{d \cdot \zeta_s}$$

A = Oberfläche ( $m^2$ )  
 $m_d$  = Mindestprobenmenge (g)  
 $\alpha$  = Formfaktor (-)  
 d = Durchmesser (m)  
 $\zeta_s$  = Korndichte ( $g/m^3$ )

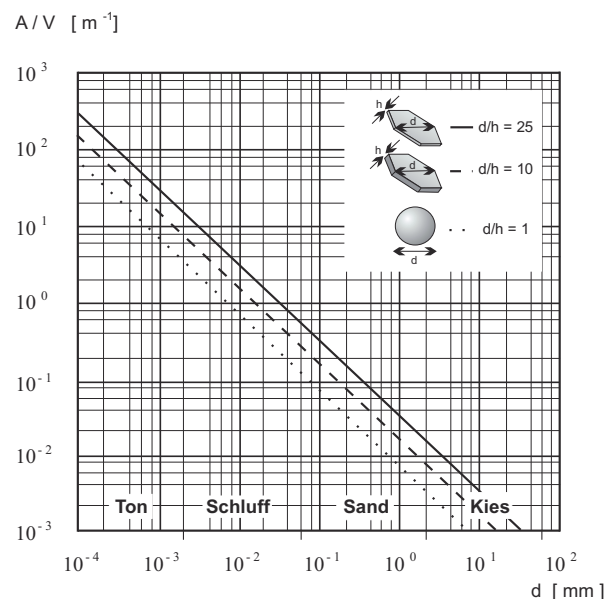
Die einzelnen Formfaktoren betragen:

für würfel- und kugelförmige Körner  
 (z. B. Quarz)  $\alpha = 6$ ,  
 für Plättchen der Dicke  $0,1 \cdot d$   
 (z. B. Kaolin, Illit)  $\alpha = 24$   
 und für Plättchen der Dicke  $0,01 \cdot d$   
 (z. B. Montmorillonit)  $\alpha = 240$ .

Diese Formel berücksichtigt lediglich die äußeren Oberflächen der Partikel.

Bei gegebenen Volumina nimmt die Kugel von allen geometrischen Körpern die kleinste äußere Oberfläche ein (s. Abb. 2). Da der energetisch günstigste Zustand eines Körpers durch die kleinst mögliche äußere Oberfläche und damit durch die geringste Oberflächenspannung gekennzeichnet ist, müsste diese Form in der Natur bevorzugt angetroffen werden. Tatsächlich beobachtet man bei vielen Stoffen diese Tendenz der Oberflächenverringerung. So vereinen sich viele kleine Tröpfchen einer Flüssigkeit, die zusammen eine größere Oberfläche als ein großer Tropfen gleicher Masse besitzen, innerhalb von Minuten zu einem großen Tropfen (POHL, 1969).

In Abb. 3 ist der Zusammenhang zwischen spezifischer Kornoberfläche ( $A_s$ ) und Korngröße (d) dargestellt, dabei sind zusätzlich zur Korngröße die verschiedenen Formfaktoren und die bei Tonen vorhandenen inneren Oberflächen der Mineralien berücksichtigt. Aus Abb. 3 ist auch der Wassergehalt (w) für eine adsorptiv an die Oberfläche gebundene Wasserschicht von  $1 \cdot 10^{-6} \text{ mm} = 10 \text{ \AA}$  Dicke zu entnehmen. Ein sehr feinkörniger Sandstein besitzt demnach bereits eine um ein bis zwei Zehnerpotenzen größere äußere Oberfläche als ein grobkörniger. Vergleicht man die Oberfläche pro Volumeneinheit eines Sandsteins mit dem Formfaktor  $h/d = 1$  mit der eines Tones gleichen Formfaktors, so ergibt sich bereits ein Unterschied um drei bis vier Zehnerpotenzen.



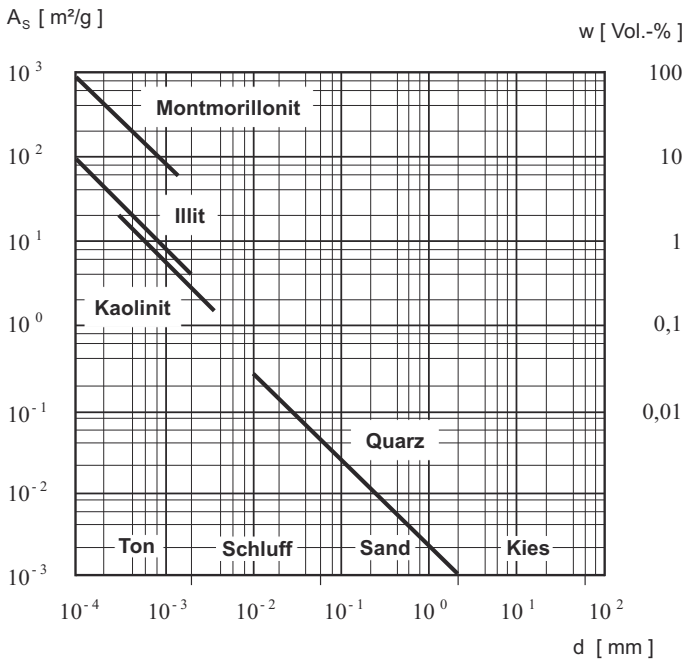
**Abb. 2:**

Äußere Oberfläche (A) pro Volumen (V) eines Partikels in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser (d) (nach PIMENTEL, 1996).

Der Unterschied der spezifischen Oberfläche eines grobkörnigen Sandsteines zu einem feinkörnigen Ton kann demnach bis zu sechs Zehnerpotenzen betragen. Während die wirksame Oberfläche eines zuckerwürfelgroßen (16 mm x 16 mm x 11 mm) Stückes aus grobem Sandstein (Körnung ~ 0,5 mm) in etwa die Fläche eines

DIN A 5 Blattes einnimmt, bedeckt diejenige eines ebenso großen Montmorillonitstückes ungefähr die Fläche eines Fußballfeldes (110 m x 75 m). Hieraus wird deutlich, dass schon geringe Mengen an tonigen Komponenten die Eigenschaften von Sandsteinen erheblich verändern. So würde sich die spezifische Oberfläche des zuckerwürfelgroßen Sandsteinstückes durch die Zugabe von nur einem Masseprozent Montmorillonit auf das 2.000 -fache erhöhen.

Die Oberflächeneigenschaften werden zum einen durch die Größe der spezifische Oberfläche, zum anderen durch ihre elektrische Ladung bedingt. Obwohl die Tonkomponenten nach außen hin elektrisch neutral sind, entsteht durch die räumliche Anordnung der Sauerstoffatome nach außen eine stark elektrisch negativ geladene Oberfläche. Da einerseits das Silizium als Kation und die Sauerstoffe als Anionen sich so nahe als möglich zu kommen versuchen (d. h. bis zur Wirksamkeit der Abstoßungskräfte ihrer Elektronenhüllen), andererseits die Sauerstoff-Ionen mit gleicher elektrisch negativer Ladung sich so weit als möglich von einander entfernen, ergibt sich als günstigste geometrische Konstellation ein gleichseitiger Tetraeder.

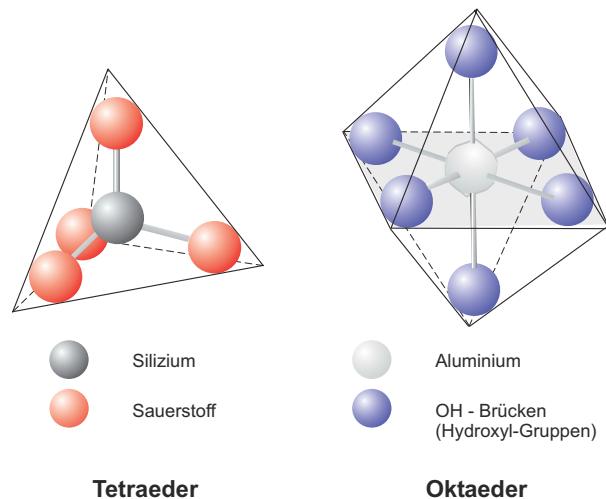


**Abb. 3:** Korngröße (d) und spezifische Oberfläche ( $A_s$ ) [äußere und innere Oberfläche] verschiedener Mineralien (nach VON SOOS, 1990).

### 1.2 Tonminerale

#### Die Tetraederschicht (T-Schicht)

Im Tetraeder betragen alle O-Si-O-Winkel 109,5°. Die  $SiO_4$ -Tetraeder können über ihre Sauerstoff-Ecken, also über drei Punkte in einer Ebene, miteinander verknüpft werden. Jedes Sauerstoff-Atom gehört somit zwei Tetraedern an. Das Silizium-Ion kann durch andere, ähnlich große Ionen ersetzt werden. Hierfür kommen  $Al^{3+}$  und  $Fe^{3+}$  in Betracht. Das durch die Substitution entstehende Ladungsdefizit muss durch die Anwesenheit von weiteren Kationen ausgeglichen werden. Die Substitution durch  $Fe^{3+}$  ist vergleichsweise gering. Häufiger tritt hingegen das Ersetzen des  $Si^{4+}$  durch  $Al^{3+}$  auf. Die Bedeutung der  $SiO_4$ -Tetraeder (T-Schicht) als Grundbausteine der silikatischen Minerale liegt in ihrer Vernetzbarkeit untereinander.



**Abb. 4:** Grundbausteine der Silikate.



Je nach der Anwesenheit von  $Al^{3+}$  in den T-Schichten unterscheidet man:

- **Silikate**, wenn nur  $Si^{4+}$  auftritt (z.B. Kaolinit, Halloysit, Illit, Serpentin, Muskovit und Glaukonit) und
  - **Alumosilikate**, wenn sowohl  $Si^{4+}$  als auch  $Al^{3+}$  in den Tetraederlücken vorhanden ist (Alumo-Serpentine).
- Die T-Schicht ist für sich allein nicht existenzfähig, sondern stellt nur ein fundamentales Bauelement dar.

### Die Oktaederschicht (O-Schicht)

Das zweite Bauelement der Schichtsilikate ist die Oktaederschicht. Im Gegensatz zu den T-Schichten können die O-Schichten eigenständige Minerale bilden. Ihre eigentlichen Bauelemente sind die (OH)-Ionen, die man sich als verzerrte Kugeln vorstellen kann. Durch die unterschiedliche Elektronegativität von Sauerstoff und Wasserstoff bildet dieses Ion einen Dipol. Ähnlich wie die T-Schichten sind die O-Schichten über ihre Eckpunkte miteinander verknüpft. Die Varianz des Zentralkations ist bei den Oktaederschichten größer als bei den Tetraederschichten. So kann das  $Al^{3+}$  durch  $Fe^{3+}$ ,  $Mg^{2+}$  oder  $Fe^{2+}$  ersetzt werden. In realen Strukturen herrscht meist ein bestimmtes Kation vor, gegen das die anderen deutlich zurücktreten. Insbesondere sind Mischungen von zwei- und dreiwertigen Kationen in einer O-Schicht äußerst selten. Nach der Belegung der Oktaederschichten unterscheidet man:

- **dioktaedrische** Strukturen, bei einer Belegung mit dreiwertigen Kationen und
- **trioktaedrische** Strukturen, bei einer Belegung mit zweiwertigen Kationen.

Die Verknüpfung von Tetraeder- und Oktaederschichten erfolgt über die noch freien Ecken (Spitzen) der Tetraeder. In den Oktaederschichten wird ein Hydroxyl-Ion durch ein Sauerstoff-Ion ersetzt, das selbst in einen weiteren Tetraeder eingebunden ist. In gleicher Weise lassen sich auch zwei T-Schichten mit einer O-Schicht verbinden. In diesem Fall sind die "freien Tetraederspitzen" einander zugekehrt (s. Abb. 5). Die so miteinander verknüpften Tetraeder- und Oktaeder-Schichten bilden für alle Tonminerale die wesentlichen Strukturelemente. Sie stellen die Elementarschichten dar:

die Zweischichtstruktur	T O	= 1:1 - Elementarschicht	= 7 Å Minerale (Kaolinite, Halloysite)
die Dreischichtstruktur	T O T	= 2:1 - Elementarschicht	= 10 Å Minerale (Glimmer, Illit, Smectit)
die Vierschichtstruktur	O T O T	= 1: (2:1) - Elementarschicht	= 14 Å Minerale (Chlorite)
die Wechsellagerungsstruktur		= (1:1): (2:1)-Elementarschicht	= 24 - 33 Å Minerale

### Die Zwischenschicht (Z-Schicht)

Die einzelnen Elementarschichten sind über die so genannte Zwischenschicht verbunden. Diese kann mit Kationen oder Wasser belegt sein oder auch leere Zwischenräume darstellen. Immer wirken aber in ihr die Kräfte, die den Zusammenhalt der Schichtpakete gewährleisten. Diese Kräfte sind sehr viel geringer als die Bindungskräfte in den Elementarschichten. Dies zeigt sich in der sehr guten Spaltbarkeit der Silikate parallel zur Basis.

Grundsätzlich wird zwischen

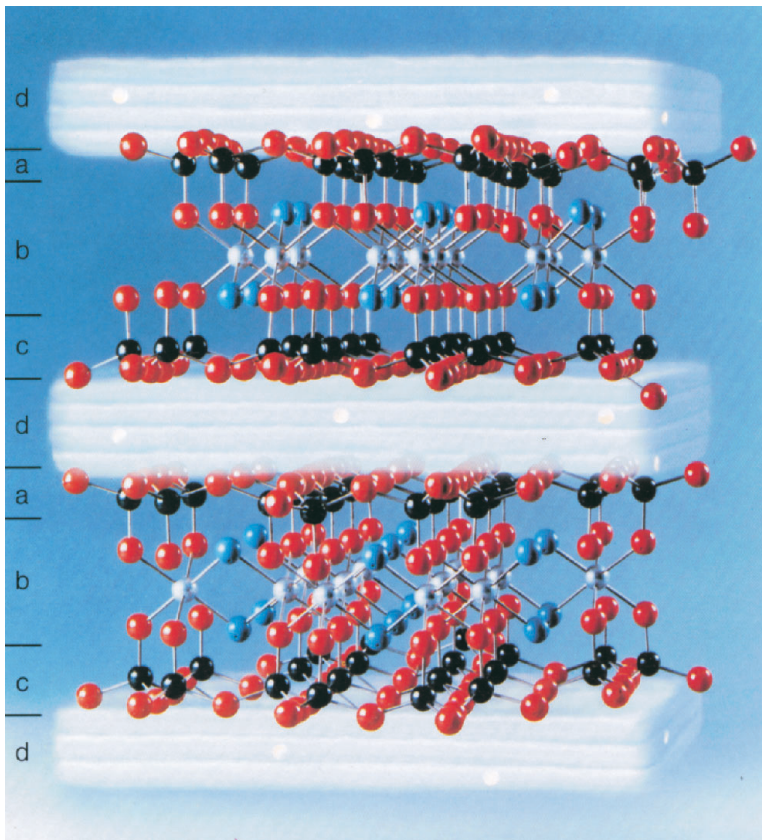
- polaren und
- nichtpolaren

Zwischenschichten unterschieden.

Bei den polaren Zwischenschichten handelt es sich meist um leere Zwischenräume oder um Wasser. Kationen treten hierbei nicht auf. Bei den nichtpolaren Zwischenschichten liegen sich die äußeren Sauerstoff-Ionen von zwei T- Schichten gegenüber (s. Abb. 5). Ihre zueinander gerichteten, negativen Ladungen sollten zunächst

eine Abstoßung zur Folge haben. Eine Verbindung dieser Elementarschichten kann hierbei nur durch den Einbau von Kationen erfolgen. Diese verknüpfen die negativen Enden der Tetraeder miteinander und kompensieren gleichzeitig ein eventuell durch Gitterfehler hervorgerufenen Ladungsdefizit. Realisiert sind solche Bindungen durch den Einbau von großen Alkali- oder Erdalkali-Ionen ( $K^+$ ,  $Na^+$  oder  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ). Unterhalb einer bestimmten Bindungsenergie kann es an den Kationen zu Wasseranlagerungen kommen. Man spricht dann von der Hydratisierung der Zwischenschicht oder von innerkristalliner Quellung.

Die innerkristalline Quellung ist stets mit der Aufweitung der Z-Schichten verbunden. Die Hydratisierung der Z-Schicht wird von der Bindungsstärke oder den Ladungen der Elementarschicht beeinflusst. Generell wird sie durch geringere Ladungen erleichtert. Die Kationen sind innerhalb der Z-Schichten beweglich und in einem Elektrolyt gegen äußere austauschbar. In einem Elektrolyt wird sich somit ein Gleichgewicht zwischen ein- und ausgetauschten Kationen einstellen. Die Kationenaustauschkapazität von Tonmineralen ist ebenso wie die innerkristalline Quellfähigkeit in erster Linie an nichtpolare Zwischenschichten gebunden.



**Abb. 5:**

Modell eines Montmorillonit-Kristalls.

Das Modell zeigt maßstabsgetreu zwei einzelne Aluminiumhydroxylsilikat-Lamellen. Jede Lamelle besteht aus einer oktaedrischen Aluminiumoxid-Schicht (b) zwischen zwei tetraedrischen Siliziumoxid-Schichten (a+c). Dazwischen sind hydratisierte, austauschfähige Kationen eingelagert (d).

rot = Sauerstoff, blau = Hydroxyl-Gruppen, schwarz = Silizium, silber = Aluminium, blass gelb = Calcium (in den Zwischenschichten [d]), Foto Fa. Süd-Chemie AG.

### 1.3 Porenraum und Poreninhalt

Die Naturwerksteine unterteilt man häufig in drei Gruppen mit unterschiedlicher Entstehungsgeschichte, da die physikalischen und chemischen Eigenschaften in starkem Maße mit ihrer geologischen Entstehungsgeschichte zusammenhängen.

- **Magmatische Gesteine**, wie Granite und Basalte,
- **Metamorphe Gesteine**, wie Gneise, Marmore und Quarzite und
- **Sediment-Gesteine**, wie Sandsteine und Karbonatgesteine (Kalksteine und Dolomite).

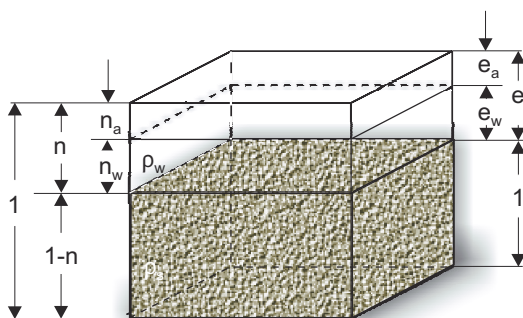
Die Diskussion der physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Naturwerksteinen wird oft übersichtlicher, wenn man sich dieser Einteilung anschließt.

Die Porosität der magmatischen Gesteine ist vor allem auf die unterschiedliche Kontraktion ihrer Komponenten während der Abkühlung der Schmelze zurückzuführen. Dadurch entstehen Mikrorisse entlang den Korngrenzflächen. Insgesamt ist die Porosität der meisten magmatischen Gesteine eher gering.

Bei den Metamorphen Gesteinen gibt es einige die ihrem Gefüge nach den magmatischen Gesteinen nahe stehen (Marmore und Quarzite) während andere, wie etwa die Gneise, eine deutliche Schieferung zeigen und deshalb in ihren Gefügeeigenschaften eher den Sediment-Gesteinen zuzurechnen sind.

Bei den Sediment-Gesteinen kann der Porenraum wegen der großen Variation ihrer Einzelbestandteile, ihrer Korngrößenverteilung und der unterschiedlichen Druck- und Temperaturbedingungen während der Entstehung in einem großen Bereich variieren.

Die Porosität oder der Porenanteil ist eine der wichtigsten Materialeigenschaften der Gesteine, und es gibt kaum eine physikalische Kenngröße, die nicht direkt oder indirekt von ihr abhängt (POSCHLOD, 1990). Viele Untersuchungen haben solche direkte Zusammenhänge nachgewiesen.



**Abb. 6:**

Definition von Porenanteil und Porenzahl (nach VON SOOS, 1990).

**Tabelle 1:**

Gesamtporosität einiger Natursteine (nach WITTMANN, 1979).

Gesteinsgruppe	Gesteinsart	Porosität [ Vol.-% ]
Magmatische Gesteine	Granite	0,5 - 1,5
	Basalte	0,1 - 1,0
Metamorphe Gesteine	Gneise	0,5 - 1,5
	Marmore	0,5 - 2,0
	Quarzite	0,1 - 0,5
Sediment-Gesteine	Sandsteine	5,0 - 25,0
	Kalksteine	5,0 - 20,0

Die Porosität, bzw. der Porenanteil ( $n$ ) bezeichnet den prozentualen Anteil der mit Flüssigkeiten (z.B. Wasser) oder Gasen (z.B. Luft) gefüllten Hohlräume in einem Gestein. Sie wird definiert als das Verhältnis von Porenvolumen zu Gesamtvolumen  $\times 100$ .

Es gilt:

$$n = \frac{V_p}{V_g} \cdot 100 = \frac{V_p}{V_s + V_p} \cdot 100 \quad [\text{Vol. - \%}],$$

mit  $V_p$  = Porenvolumen  $V_s$  = Feststoffvolumen und  $V_g$  = Gesamtvolumen.

Am deutlichsten lässt sie sich an der Raumeinheit (Würfel mit der Kantenlänge 1) veranschaulichen, wenn darin die Feststoffmasse zusammengedrückt dargestellt wird (s. Abb. 6).

Der mit Wasser gefüllte Teil des Porenanteils ist  $n_w$ , der Rest  $n_a$  enthält Gase.

Es gilt  $n = n_w + n_a$  und  $e = e_w + e_a$ .

Der Feststoff nimmt hierbei das Volumen  $(1-n)$  ein.

Das Verhältnis des Porenanteils zum Anteil des Feststoffes wird als Porenzahl ( $e$ ) bezeichnet.

Es gilt:

$$e = \frac{n}{1-n}$$

Das Porenvolumen ist von der Porengröße und der Zahl der Einzelporen abhängig.  
 Nach GRIMM (1990) existiert bisher keine einheitliche Nomenklatur zur Kennzeichnung der Porengröße.

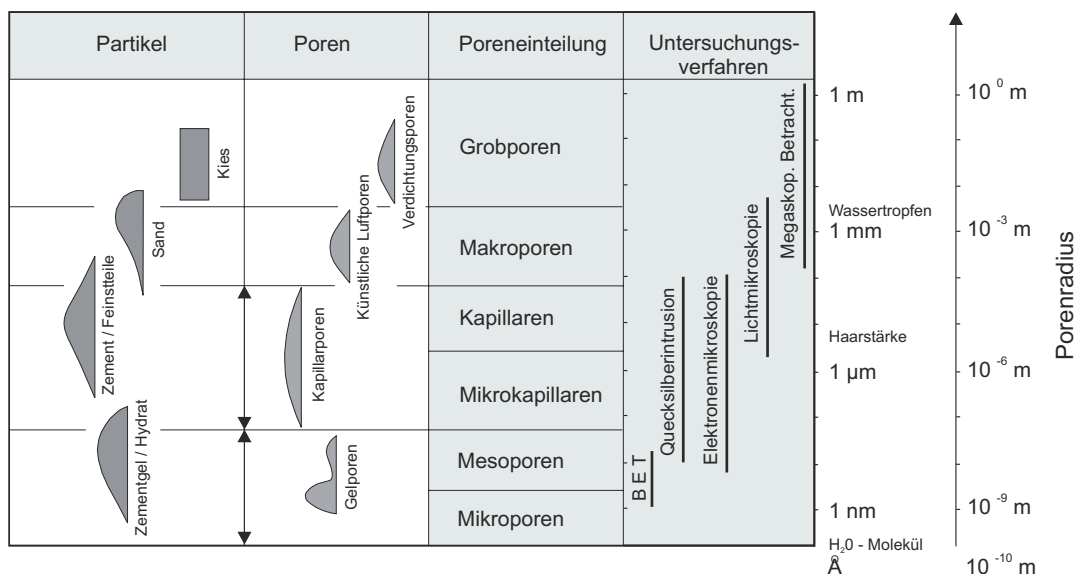
Nachfolgend ist die von SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1984) für bodenkundliche Untersuchungen vorgeschlagene Klassifikation mit den von KLOPFER (1985) vorgeschlagenen Bezeichnungen der Poren in Klammern dargestellt. Die Porengrößen werden hiernach in vier Porenklassen eingeteilt; diese sind:

- **weite Grobporen** (Makroporen) > 0,05 mm
- **enge Grobporen** (Makroporen) 0,01 - 0,05 mm
- **Mittelporen** (Mesoporen) 2 - 10  $\mu\text{m}$
- **Feinporen** (Mikroporen) < 2  $\mu\text{m}$ .

Neben der Gesamtporosität ist die Verteilung der Porengrößen von entscheidendem Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften eines Gesteines. So können Gesteine dieselbe Porosität haben, aber eine unterschiedliche Porengrößenverteilung zeigen und dadurch völlig unterschiedliche Eigenschaften besitzen.

Während die Druckfestigkeit, die Zugfestigkeit und die Wasseraufnahme eines Gesteines in erster Linie von dessen Porosität abhängen, ist die hygrische Längenänderung und der daraus resultierende Quelldruck eher von der Verteilung der Porengrößen abhängig. Je höher der Anteil an Mikroporen, also je größer der Anteil an Feinporen, desto größer die hygrische Längenänderung und der Quelldruck.

Die Abb. 7 aus dem Bereich der Betonindustrie zeigt eine Einteilung der Poren nach ihrem Durchmesser mit den in dem entsprechenden Größenbereich anzuwendenden Untersuchungsverfahren.



**Abb. 7:**

Partikelgrößen, Porenbezeichnung und Poreneinteilung am Beispiel des Betons (nach WITTMANN, 1979).

## 1.4 Quellen

Der Vorgang der Änderung von Volumen und Gestalt eines Festkörpers bei Einwirkung von Flüssigkeiten, Dämpfen und Gasen wird als **Quellung** bezeichnet (NEUMÜLLER, 1988, Römpps Chemie-Lexikon). Bei unbegrenzter Quellung geht die quellende Substanz schließlich in eine Suspension über, bei begrenzter Quellung bleibt sie dagegen kohärent. Die mineralogische Zusammensetzung des Feststoffes bleibt bei diesem Vorgang unverändert. Prinzipiell kommen als Fluide für die Quellung von Festkörpern verschiedene Substanzen in Frage (z.B. Benzol oder Wasser). Die aus der Zuführung des Fluids resultierende Volumenzunahme ist durch dessen Entzug vollständig reversibel. Dieser dem Quellen entgegengesetzte Vorgang wird als **Schwinden** bezeichnet. Schwinden und Quellen sind physikalische Prozesse.

Hiervon deutlich abzugrenzen ist der Vorgang der **Schwellung**, unter dem eine Volumenzunahme einer Substanz verstanden wird, die auf eine Mineralneubildung zurückzuführen ist (z.B. Umwandlung von Anhydrit in Gips). Das Schwellen ist unter normalen Bedingungen nicht reversibel.

### 1.4.1 Hygrische Längenänderung

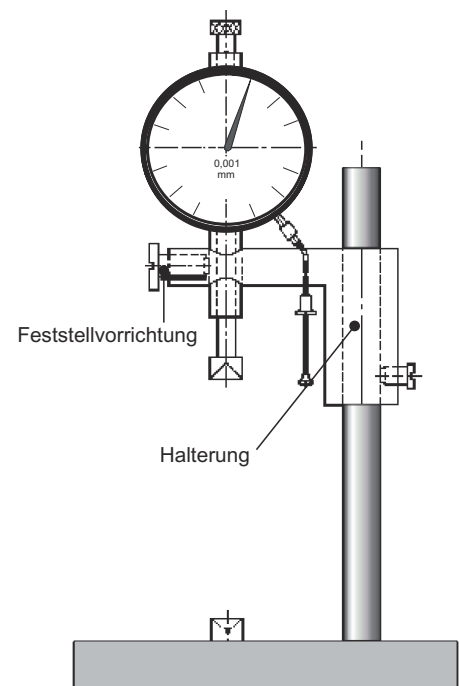
Eine Quantifizierung der Quellung kann auch durch die Messung der Volumenzunahme erfolgen. Reduziert man die Messung der Volumenzunahme auf die Messung in nur eine Raumrichtung und verwendet man als Fluid zur Quellung Wasser, so spricht man von hygrischer Längenänderung. Die "Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern" ist in der DIN 52 450 festgelegt.

Die Abb. 8 zeigt das Messgerät und den Messaufbau. Da große Teile des Messgerätes mit Wasser in Berührung kommen, muss ein korrosionsbeständiges Material verwendet werden, das eine entsprechend große Härte besitzt, um eine genügend hohe Steifigkeit des Messgerätes zu garantieren. Edelstahl ist ein diesen Anforderungen genügendes Material. Da sich die hygrische Längenänderung, aufgetragen als Funktion der Zeit, asymptotisch an einen Maximalwert annähert, ist es notwendig, den Zeitpunkt zu bestimmen, an dem der Versuch beendet und der Messwert abgelesen wird. Erst durch diese Übereinkunft wird es möglich, reproduzierbare und vergleichbare Messwerte zu erzielen.

Da die DIN 52 450 überwiegend Anwendung findet bei der Bestimmung des Schwindens und Quellens von Mörteln und Betonen, sind die darin festgelegten Messzeiten nicht ohne weiteres auf Naturwerksteine zu übertragen.

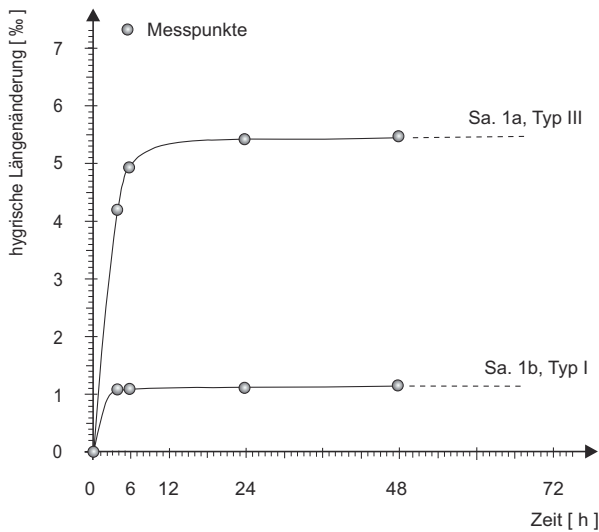
SNETHLAGE (1984, Seite 79, Abb. C-64) stellte an Schweizer Molassesandsteinen eine selbst nach 18 Monaten immer noch nicht abgeschlossene Feuchtedehnung fest.

Im Regelfall werden aber bei Sandsteinen 98 % der Längenänderung in den ersten 48 Stunden erreicht. Somit wird dieser Zeitpunkt als Versuchsende gewählt und der 48-Stunden-Wert als Endwert zur Berechnung der Feuchtedehnung verwendet (s. Abb. 9).



**Abb. 8:**

Gerät zur Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern (nach DIN 52 450, 1985).



**Abb. 9:**

Zeitliche Entwicklung der hygrischen Längenänderung am Beispiel des Sander Schilfsandsteins (beide Messungen senkrecht zur Schichtung).

für stark quellende (Sa. 1a) als auch für weniger stark quellende Sandsteine (Sa. 1b) verwendet werden kann. Beide Messwertkurven zeigen die hygrische Längenänderung des Sander Sandsteins. Deutlich lassen sich dabei zwei Varietäten dieses Sandsteins unterscheiden (Sa. 1b, Typ I und Sa. 1a, Typ III).

Die Abb. 10 gibt einen Überblick über die zu erwartenden Feuchte-dehnungen von verschiedenen Gesteinen. Die Grafik zeigt drei Gruppen von Gesteinen, die sich um jeweils ca. zwei Zehnerpotenzen in ihrem hygrischen Längenänderungsverhalten unterscheiden:

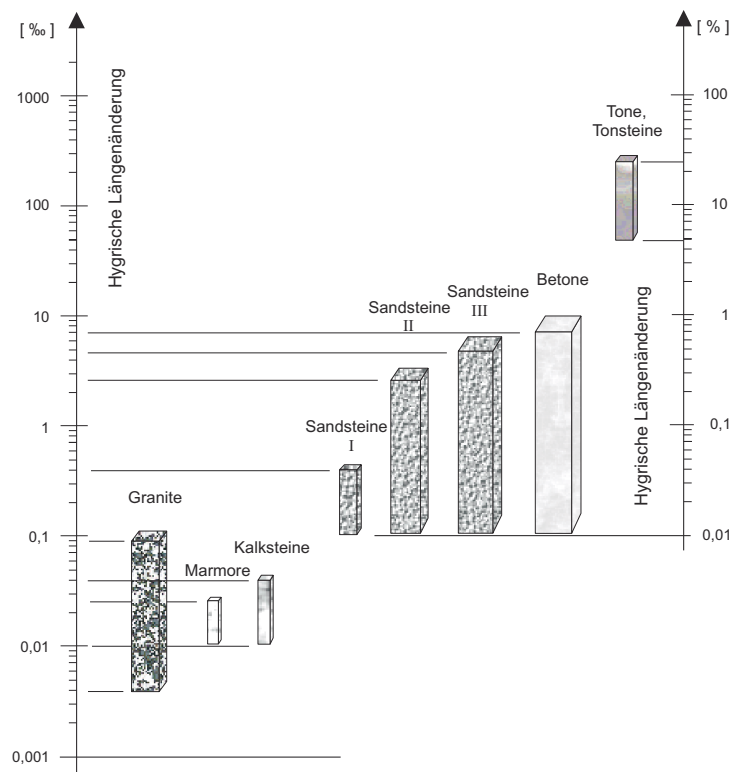
1. Die Gruppe der Granite, Marmore und Kalksteine mit Feuchte-dehnungen von bis zu 0,1 %.
2. Die Sandsteingruppe und die Betone mit Dehnungsbeträgen von nahezu 1 %.
3. Die Gruppe der Tone und Tonsteine, die eine Längenänderung von bis zu 25 % erreichen können.

Obwohl der 48-Stunden-Wert bisher weder in der DIN 52 103 "Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert" noch in der DIN 52 450 "Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern" Eingang fand, kommt ihm in der Praxis eine besondere Bedeutung zu.

So wird er zur Berechnung der Wasseraufnahme und zur Bestimmung des Quell- und Schwindmaßes von Naturwerksteinen verwendet.

Dennoch sollte bei keiner Prüfung die Angabe der Messzeitintervalle und der Gesamtdauer des Versuches fehlen, da erst dadurch die Messwerte nachvollziehbar und in einen größeren Zusammenhang einordbar werden.

Die Abb. 9 zeigt, dass der 48-Stunden-Wert als Endwert für die Feuchte-dehnung sowohl



**Abb. 10:**

Quell- und Schwellbeträge von verschiedenen Gesteinen, nach verschiedenen Autoren.

Granite, Marmore und Sandsteine I nach HOCKMANN & KESSLER (1950), aus SNETHLAGE (1984), Kalksteine nach LUKAS (1990), Sandsteine II nach SCHUH (1987), Sandsteine III nach SNETHLAGE & WENDLER (1997), Betone nach WESCHE (1981), Tonsteine nach MADSON (1976 und MADSON & NÜESCH, 1990).

Aufgrund intensiver Literaturrecherchen und unter Einbeziehung eigener Ergebnisse entwickelte WITTMANN (1977) sein so genanntes Münchner Modell. Hierin sind erstmals die physikalischen Vorgänge und Zusammenhänge bei der hygrischen Längenänderung von Zementstein beschrieben. Als treibende Kräfte identifizierte er die Oberflächenenergie und den Spaltdruck des Wassers.

Dieses Modell kann auf die Materialgruppe der Naturwerksteine übertragen werden.

Ausgehend von einem trockenen Material erfolgt bei kontinuierlicher Erhöhung der Luftfeuchtigkeit die Belegung der Oberfläche (äußere und innere Oberfläche) mit Wassermolekülen. Bis ca. 25% rel. Luftfeuchte kann eine monomolekulare Schicht angenommen werden. Durch die Wechselwirkung Wasser/ Mineraloberfläche wird die Oberflächenenergie des benetzten Materials reduziert (REHBINDER Effekt).

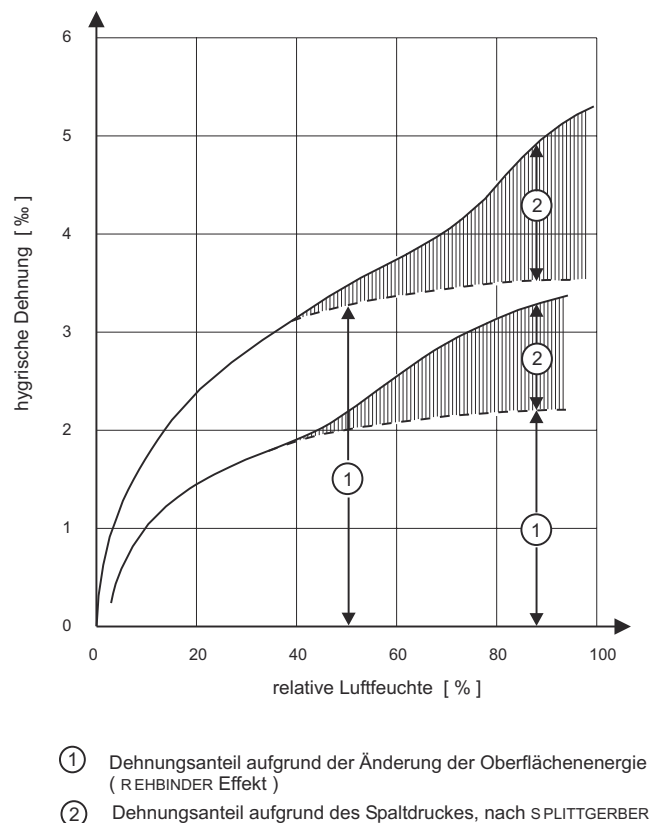
Unter Oberflächenenergie bzw. Oberflächenspannung versteht man die Grenzflächenspannung von Festkörpern oder Flüssigkeiten gegenüber der sie umgebenden Dampfphase bzw. Luft. Nach NEUMÜLLER (1988) wird die Oberflächenenergie, die auch als Oberflächenspannung bezeichnet wird, definiert als Kraft pro Längeneinheit in der Oberfläche und hat die Dimension  $[N/m]$ .

Der 1928 entdeckte REHBINDER Effekt beschreibt das Verhalten von Materialien im Kontakt mit Schmelzen oder grenzflächenaktiven Stoffen, am Beispiel von Metallen. So beschreibt REHBINDER dieses von ihm beobachtete Phänomen durch die Änderung einiger physikalischer, insbesondere mechanischer Eigenschaften (wie z.B. Herabsetzung von Festigkeit und Plastizität).

Bei ca. 25 % r.F. ist die Oberflächenenergie bereits auf ein Viertel ihres ursprünglichen Wertes reduziert (MÖLLER, 1993). Bei höheren Luftfeuchtigkeitswerten setzt in den kleineren Poren der Mechanismus der Kapillarkondensation ein. Dieser führt anfänglich nicht zu einer verstärkten hygrischen Längenänderung. Erst ab einer r.F. von ca. 40 bis 45 % kommt es durch die Ausbildung von dünnen Wasserfilmen an den Kornkontaktstellen zu einer Art "Wasserdruck", der auf die einzelnen Porenwänden wirkt.

Erstmals wurde dieser Vorgang von SPLITTGERBER an zwei Glasplättchen beobachtet. SPLITTGERBER hat die Adhäsion dieser beiden Gläser bei verschiedenen Luftfeuchten gemessen und festgestellt, dass ab 40% r.F. die Adhäsion so stark verringert war, dass es zum Aufschwimmen bzw. anschließend zum Abheben der oberen Glasplatte kam.

Den dabei entstehenden Druck bezeichnete er als Spaltdruck. Splittgerbers Versuchsanordnung kann man durchaus als einen Versuch in einem Einporensystem ansehen.

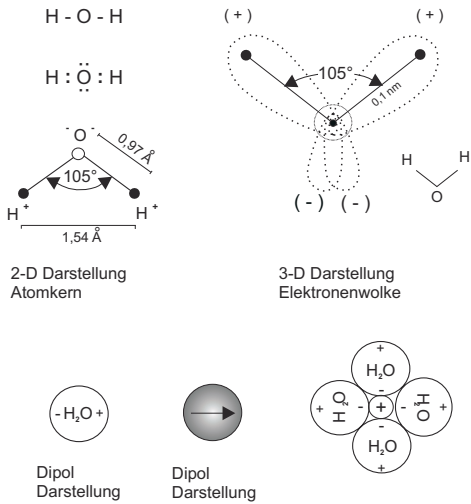


**Abb. 11:**

Hygrische Dehnung von Zementstein in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte, nach MÖLLER 1993 ("Münchner Modell für Zementstein nach WITTMANN"). Der mit 1 bezeichnete Kurvenast stellt den Dehnanteil aufgrund der Änderung der Oberflächenenergie dar. Ab ca. 40 % r. F. muss dazu der Dehnanteil aufgrund des Spaltdruckes (schraffierter Bereich) addiert werden.

### 1.4.2 Innerkristalline (intrakristalline) Quellung

Während das Phänomen der hygrischen Längenänderung bei fast allen porösen Baustoffen zu beobachten ist, ist die innerkristalline Quellung auf die Gruppe der Tone oder tonmineralhaltigen Stoffe begrenzt. Von wesentlicher Bedeutung für die innerkristalline Quellung ist die Polarität des Wassermoleküls.



Das Wassermolekül ist als Ganzes elektrisch neutral, seine Ladungen sind aber ungleich verteilt. Es hat zwei positive und zwei negative Zentren. Bei der Hydratation der Zwischenschichtkationen orientieren sich die Wassermoleküle mit dem negativen Teil ihrer Dipole zum Kation und schwächen dadurch die elektrostatische Wechselwirkung der negativen Schichten mit den Zwischenschichtkationen.

Aufgrund ihres strukturellen Aufbaues aus Tetraeder- und Oktaederschichten besitzen die Tonminerale eine stark negativ geladene Oberfläche (siehe Abb. 4). Zusätzlich lassen sich die Si-Zentralkationen der Tetraeder und der Oktaeder durch andere Kationen meist niedriger Valenz austauschen, wodurch sich das Ladungsdefizit an der Oberfläche zusätzlich vergrößert. Zum Ausgleich dieser Ladungen an den Tonoberflächen werden deshalb bis zur vier gerichtete monomolekulare Wasserschichten eingebaut.

Abb. 12:

Dipolmoment des Wassermoleküls und Anordnung von Wassermolekülen um ein Kation.

Geht man vom vollkommen trockenen Na-Montmorillonit aus, so liegen die austauschfähigen Zwischenschichtkationen direkt auf den Elementarschichten (Abb. 13 a). Die Teilchen liegen dabei so dicht aufeinander, dass sie sich fast berühren. Der Schichtabstand, d.h. der Abstand von der Unterseite einer Schicht bis zur Unterseite der darüber liegenden Schicht, beträgt 0,96 nm bis 1,0 nm, wobei eine Elementarschicht etwa 1,0 nm dick ist ( $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ ). In Kontakt mit Wasser hydratisierten die Zwischenschichtkationen und ordnen sich in der Mittelebene zwischen den Schichten an (Abb. 13 b). Dabei vergrößert sich der Schichtabstand auf 1,23 nm (Einbau der ersten monomolekularen Wasserschicht). Bei weiterer Wasserzufuhr kommt es zur Bildung der zweiten (Abb. 13 c) und schließlich zur Bildung der dritten und vierten Wasserschicht.

Aus der Wasser-Adsorptionsisotherme des Bentonits lässt sich der Quelldruck, der durch die Anlagerung der einzelnen Wasserschichten entsteht, berechnen (KAHR et al., 1986). Er beträgt für reinen Montmorillonit bis etwa 400 MPa für die Bildung der ersten Wasserschicht, bis 110 MPa für die zweite Wasserschicht und bis etwa 27 MPa für die Bildung der dritten und vierten Schicht. Dieser Vorgang wird auch als Hydratisierung der Zwischenschichtkationen bezeichnet.

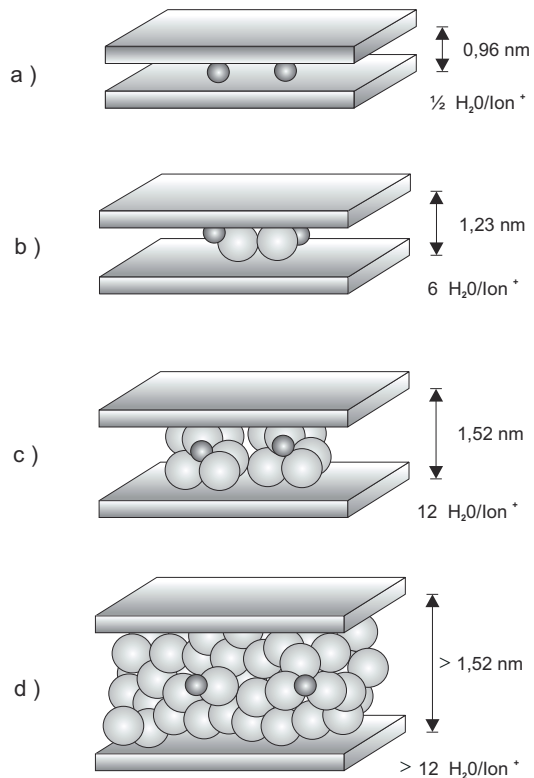


Abb. 13:

Innerkristalline Quellung von Natrium-Montmorillonit (nach MÜLLER-VONMOOS, 1988)



Auf diese Art und Weise werden bis zu vier monomolekulare Wasserschichten zum Ladungsausgleich an die Oberfläche der Elementarschicht angelagert.

In Abb. 14 entspricht die Sternschicht diesen vier Wasserschichten. Das Wasser dieser Schicht besitzt eine um ca. 50% erhöhte Dichte und die Viskosität ist etwa um das 100-fache erhöht.

Das Wasser der Sternschicht wird als feste Wasserhülle angesehen und ist weitestgehend immobil. Die Bindungsenergie dieser Wasserschichten ist so groß, dass im Regelfall ein Wasserentzug unter natürlichen Bedingungen nicht vorkommt und umgekehrt es dadurch auch nicht zur Wasseranlagerung, also zur Quellung kommt.

Als Begrenzung der Sternschicht zur GOUY-CHAPMAN-Lage hin wird häufig die Scherebene gewählt. Diese Ebene stellt die Grenzfläche von immobilem zu mobilem Wasser dar. Sie spielt zur Erklärung hydrodynamischer Vorgänge eine wichtige Rolle.

Von besonderer Bedeutung ist die Kationen-Austauschkapazität (KAK) der Tone. Sie wird gewöhnlich in mval/100g Trockensubstanz angegeben. Die KAK ist stark pH-Wert-abhängig und wird deshalb auf ein neutrales Milieu bezogen. Sie steigt mit der Zunahme der inneren Oberfläche und mit ihren negativen Ladungen an. Durch die unterschiedliche "Haftung" der Kationen in den Z-Schichten, also durch die unterschiedlich starke "Einbindung" in die Tonmineralstruktur, lässt sich eine Kationen-Reihe bilden.

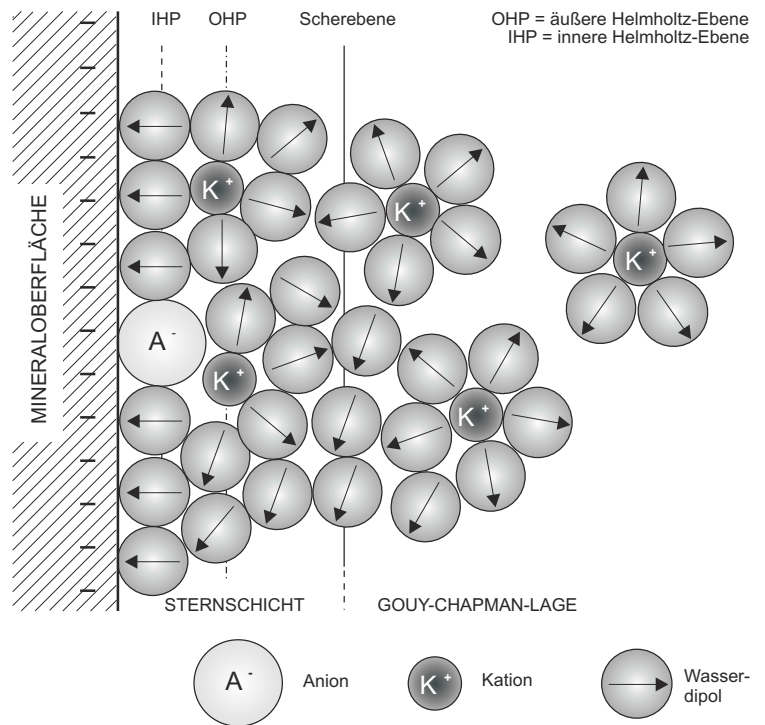


Abb. 14:

Aufbau der Hydrathüllen an den Kristallobereflächen (nach EAGLAND, 1975 in YARIV & CROSS, 1979).

Tab. 2:

Kationen-Austauschkapazität der häufigsten Tonminerale.

Mineral	KAK [mval / 100 g]
Kaolin-Minerale	3 - 15
Chlorite	10 - 40
Illite	20 - 50
Smectite	70 - 130
Vermiculite	150 - 200



In dieser lyotropen Reihe nimmt die Austauschbarkeit von links nach rechts zu. Das bedeutet, alle rechts von einem Kation stehenden Ionen können durch dieses ersetzt werden.

Die Kationen-Austauschkapazität und somit die innerkristalline Quellfähigkeit der Tonminerale (Hydratation) kann auch durch die Einlagerung organischer Verbindungen (Kohlenwasserstoffketten) reduziert werden. Solche Vorgänge sind von großer Bedeutung bei der Verwendung von Ton zur Abdichtung von Deponien, aber auch bei der Anwendung von Schutzmitteln, bzw. Quellminderern (den Tensiden) im Bereich Naturwerkstein und Denkmalpflege.

Die Tabelle 2 zeigt einige Kationen-Austauschkapazitäts-Werte verschiedener Tonminerale.

### 1.4.3 Interkristalline (osmotische) Quellung

Im Gegensatz zur innerkristallinen Quellung, die nur auf sehr kurze Distanz wirkt (Zwischenschichtabstände von 1 nm), werden durch die auf der Abstoßung der elektrischen Doppelschichten (Dicke der Doppelschicht bis etwa 100 nm) beruhende osmotische Quellung größere Bereiche beeinflusst. So kann die Aufweitung der Elementarschichten durch die Ausbildung der Doppelschichten beim Natrium-Montmorillonit zur völligen Trennung der Schichten des Montmorillonit-Teilchens führen.

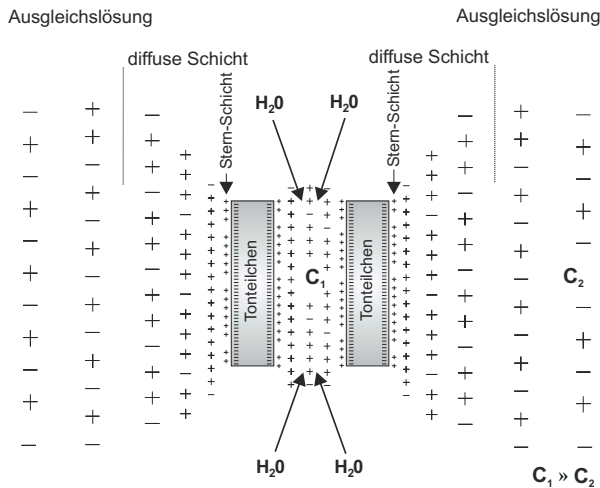


Abb. 15:

Zwei Tonteilchen mit negativen (äußeren) Oberflächenladungen und Gegenionen in einem Elektrolyt (Prinzip der osmotischen Quellung, nach HEIM, 1990).

Die treibende Kraft der osmotischen Quellung ist der Ionen-Konzentrationsunterschied der Lösung. Die Konzentration an Ionen zwischen den nahe der Tonoberfläche elektrostatisch zurückgehaltenen Ionen und den Ionen im Porenwasser des Gesteins ist sehr unterschiedlich.

Befinden sich beiderseits einer permeablen Trennwand (Membran, die allen Komponenten den Durchtritt gestattet) zwei verschieden konzentrierte Lösungen einer Substanz, so wird ein Konzentrationsausgleich der Lösungen nach dem Prinzip der freien Diffusion erfolgen (Osmose).

Um eine gleiche Konzentration der Lösung beiderseits der Membran herzustellen, wandern Lösungsmittelmoleküle vom Raum niedriger in den Raum höherer Konzentration ein. Anschaulich spricht man auch von einem Verdünnungsbestreben der konzentrierten Lösung. Dieser Vorgang setzt sich so lange fort, bis der Konzentrationsausgleich auf beiden Seiten der Membran erreicht ist. Befand sich die höher konzentrierte Lösung in einem abgeschlossenen System (d.h. aus diesem Raum können keine Moleküle diffundieren), so wird durch die Einwanderung des Lösungsmittels allmählich ein hydrostatischer Überdruck erzeugt, der dem Verdünnungsbestreben entgegenwirkt. Diesen Druck bezeichnet man als osmotischen Druck.

dem Verdünnungsbestreben entgegenwirkt. Diesen Druck bezeichnet man als osmotischen Druck.

In Abb. 15 ist die Konzentration an Kationen im Bereich zwischen den beiden Tonteilchen ( $c_1$ ) um ein vielfaches größer als in der Ausgleichslösung ( $c_2$ ). Die sich im Raum zwischen den Oberflächen der Elementarschichten befindlichen Kationen werden durch elektromagnetische Wechselwirkungen an ihrem Ort gehalten (abgeschlossenes osmotisches System). Das Konzentrationsgefälle der Lösung kann nur durch Hineindiffundieren von Lösungsmittelmolekülen (Wasser) ausgeglichen werden. Dadurch vergrößert sich der Abstand zwischen den beiden Elementarteilchen. Sie werden auseinander gedrückt.

Zusätzlich dazu bildet sich eine diffuse elektrische Doppelschicht. Unmittelbar an der Tonoberfläche besteht ein hohes negatives Potential. Es nimmt durch die elektrostatische Anziehung der Kationen mit zunehmender Entfernung von der Tonoberfläche ab und erreicht beim Übergang zur reinen Porenlösung den Wert null. Überlappen sich nun zwei negative Potentiale, so stoßen sie sich gegenseitig ab, die Teilchen vergrößern ihren Abstand, das Material nimmt an Volumen zu, es quillt.

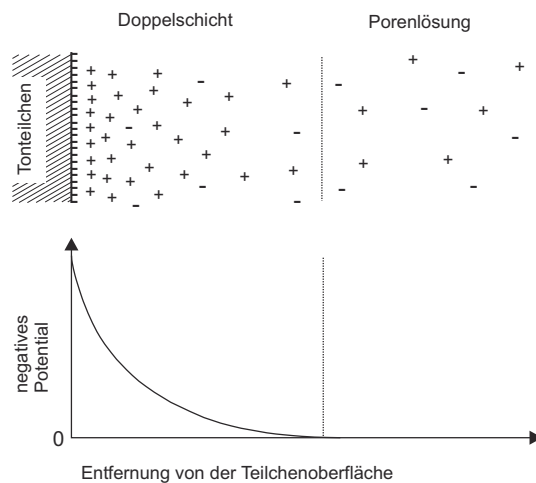


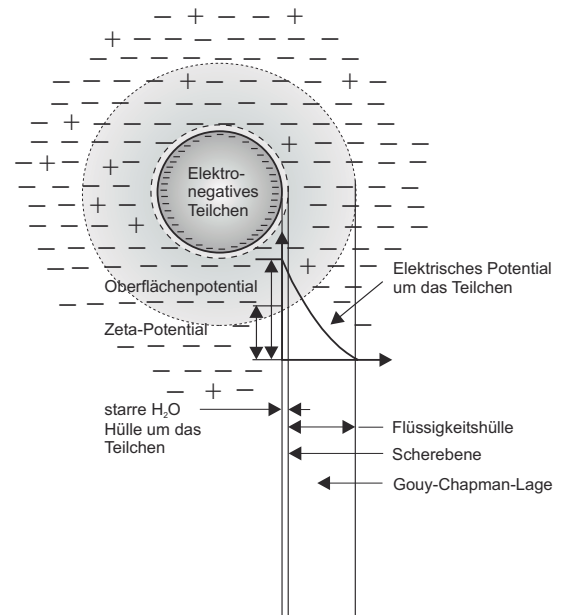
Abb. 16:

Verlauf des negativen Potentials einer diffusen Doppelschicht (nach MÜLLER-VONMOOS, 1988).

- Der Verlauf des negativen Potentials und damit der Quelldruck ändert sich
1. mit der Wertigkeit und der Größe der Gegenionen der Doppelschicht und
  2. mit der Elektrolytkonzentration in der Lösung.

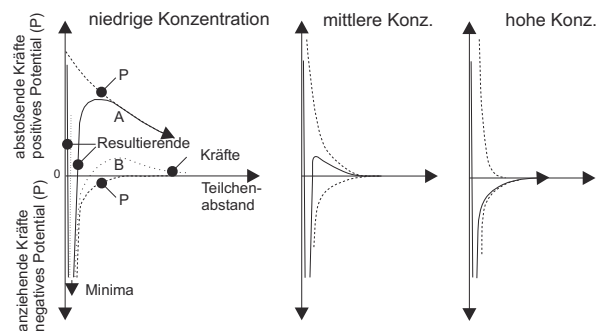
Das elektrokinetische Verhalten eines Gesteins wird aber nicht nur durch seine unmittelbar an den Teilchenoberflächen herrschenden Ladungen bestimmt, sondern überwiegend durch das elektrokinetische Verhalten seines gesamten oberflächennahen Bereiches. Dieses wird zum einen durch das Oberflächenpotential, zum anderen durch das Zeta-Potential bestimmt (s. Abb. 17).

Im Gegensatz zum Oberflächenpotential ist das Zeta-Potential messtechnisch erfassbar. Dadurch ist man in der Lage, auf zahlreiche physikalische Eigenschaften von Naturwerksteinen, wie etwa auf das Adsorptionsverhalten, zu schließen. Sehr hohe Zeta-Potentiale führen z.B. zu einer Verringerung der Fließgeschwindigkeit von Flüssigkeiten in engen Poren und somit zu einer scheinbar erhöhten Viskosität der Porenlösung.



**Abb. 17:**

Entstehung des Zeta-Potentials, dargestellt am Beispiel eines Kolloidteilchens (nach NÄGELE, 1984).



**Abb. 18:**

Schematische Darstellung der Potentiale (P) und der Kräfte zwischen zwei Teilchen einer Suspension in Abhängigkeit vom Teilchenabstand bei verschiedenen Lösungskonzentrationen (nach van OLPHEN, 1977).

Mit zunehmender Anzahl von negativen Ionen in der Lösung (Zunahme der Konzentration der Lösung) wird das positive Potential geringer. Die abstoßenden Kräfte werden kleiner, und die Anziehungskräfte zwischen den einzelnen Teilchen nehmen zu (s. Abb. 18).

Hierdurch wird der Quellbetrag reduziert, und der bei Ausdehnungsbehinderung entstehende Quelldruck nimmt ab.

#### 1.4.4 Mechanische Quellung

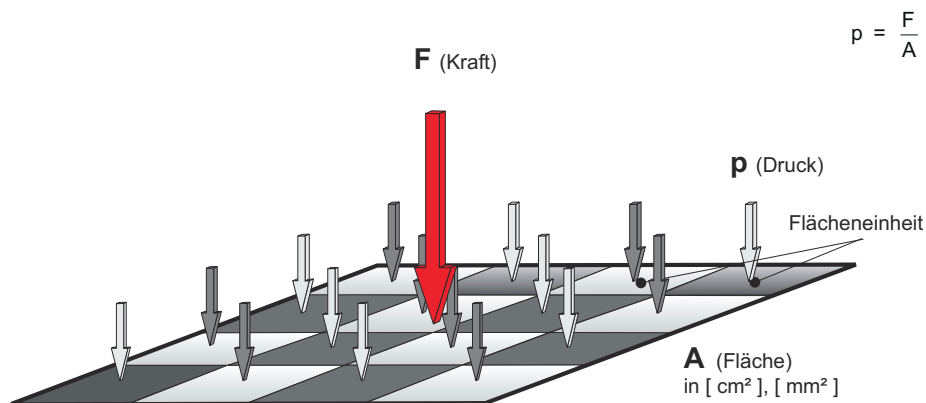
Unter mechanischer Quellung und Schrumpfung versteht man den Vorgang der Wasserzufuhr oder Wasserabgabe infolge von Porenwasserunter- oder Porenwasserüberdruck. Die Druckdifferenz entsteht in der Regel durch Be- oder Entlastung von gegenüber Wasser wenig durchlässigen Gesteinen. Der Druckausgleich erfolgt dann über Ansaugen oder Auspressen von Porenwasser, verbunden mit einer Volumenzunahme oder Volumenabnahme. Im letzteren Fall spricht man von der Konsolidierung. Da es sich im ersten Fall um eine Volumenzunahme handelt, spricht man auch hier von Quellen.

Dieses Phänomen spielt hauptsächlich im Bereich der Boden- und Felsmechanik eine Rolle. Der Betrag der Quellung ist im Regelfall wesentlich geringer als der der osmotischen Quellung.

## 1.5 Quelldruck

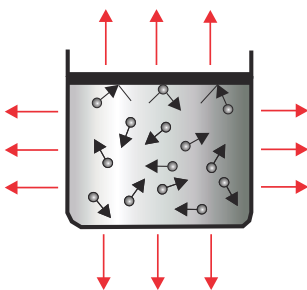
Setzt man der hygrischen Längenänderung, die durch die innerkristalline oder osmotische Quellung entsteht, eine mechanische Behinderung entgegen, so baut sich ein "Druck" auf, der als Quelldruck bezeichnet wird. Als Druck ( $p$ ) bezeichnet man den Quotient aus dem Betrag einer senkrecht auf eine Fläche wirkenden, gleichmäßig verteilten Kraft ( $F$  = Normalkraft) und der Größe dieser Fläche ( $A$ ). Der Druck ist somit die auf eine Flächeneinheit wirkende Kraft (s. Abb. 19).

Die Kraft pro Flächeneinheit ( $p$ ) ist an jedem Punkt der Fläche gleich groß. Der Druck ist somit richtungslos und volumenunabhängig (Abb. 20).



**Abb. 19:**  
Zusammenhang zwischen Kraft und Druck.

Im Gegensatz hierzu ist das Quellverhalten eines Gesteins sehr viel komplexer. Es ist u.a. vom mehrachsigen Spannungszustand des Gesteins, seiner evtl. vorhandenen Anisotropie und von der Zeit abhängig.



**Abb. 20:**

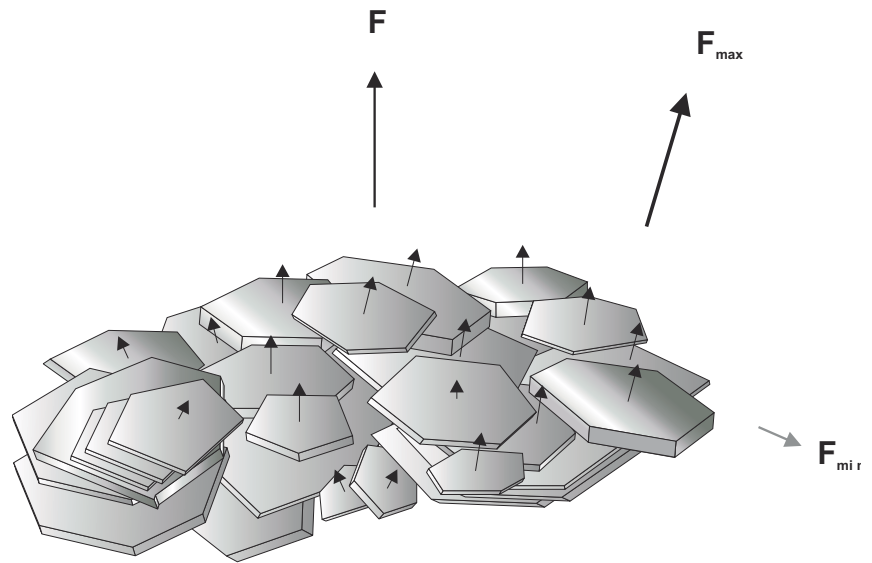
Nach außen wirksamer Druck einer abgeschlossenen Gasmenge als Summe der einzelnen Stöße der Gasmoleküle gegen die Behälteraußenwand.

Bisher existiert kein Stoffgesetz, das dieses Verhalten zufriedenstellend beschreiben oder gar vorhersagen kann. Alle bekannten Ansätze beschreiben den sog. Stagnationszustand, d.h. den Zustand, der sich nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes unter Annahme von bestimmten Randbedingungen einstellt. Prinzipiell kann dieses Ergebnis auf zwei unterschiedlichen Wegen erreicht werden: experimentell (empirisch) und theoretisch.

In beiden Fällen stellen die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen, bzw. die Randbedingungen der Versuche die Grenze der Gültigkeit der Gesetzmäßigkeit dar.

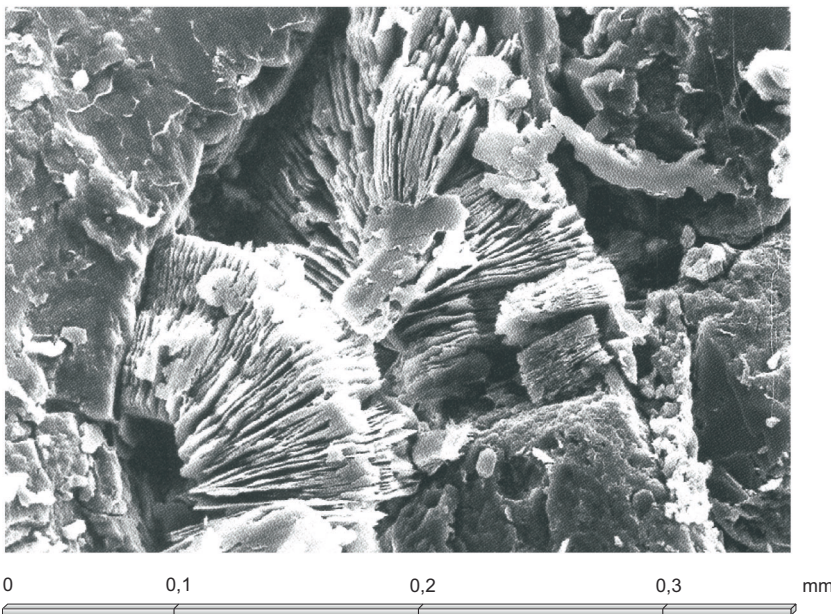
Alle bis dato vorliegenden Untersuchungen über den Quelldruck stammen aus dem Bereich der Bodenkunde oder der Felsmechanik und beschäftigen sich überwiegend mit Tonen oder tonhaltigen Gesteinen. Die Übertragung der hierbei gefundenen Gesetzmäßigkeiten auf andere Gesteinsarten dürfte zwar möglich sein, ist aber nicht ohne Verifizierung zulässig.

Die Abb. 21 verdeutlicht die Entstehung des “Quelldrucks” anhand einzelner Tonmineralpartikel. Jedes Schichtpaket vergrößert, bedingt durch die osmotische Quellung, seinen Schichtgitterabstand. Die Pfeile stellen hierbei die Flächennormalen der Schichtgitter dar. Je nach relativer Messrichtung innerhalb dieses Systems ergibt sich nun als Messwert eine Kraft, die zwischen  $F_{\min}$  und  $F_{\max}$  liegt. Da hierdurch bedingt die Kraft pro Flächeneinheit, also der Druck, nicht mehr richtungsunabhängig ist, dürfte man im physi-



**Abb. 21:**

Aufbau eines Tonminerals aus einzelnen Schichtpaketen und dessen Quellkraft als resultierende, richtungsabhängige Kraft seiner Einzelkomponenten (nach PIMENTELL, 1996).



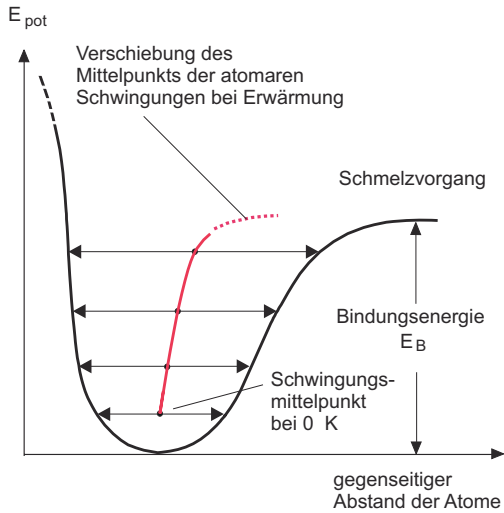
**Abb. 22:**

REM-Aufnahme des Cadolzheimer Sandsteins (Nürnberger Burgsandstein). Stapel von Kaolinit-Mineralen zwischen Gesteinsbruchstücken (Alkalifeldspäte) (aus GRIMM, 1990, Gesteinstafel Nr. 105).

kalischen Sinne streng genommen nicht mehr vom “Quelldruck” sprechen (vgl. Abb. 19 und Abb. 20). Der neuerdings immer häufiger anzutreffende Ausdruck “Quellspannung” trägt dieser Tatsache Rechnung. Der relativen Lage der einzelnen Tonminerale zur Messrichtung des Versuches kommt dadurch bedingt eine besondere Bedeutung zu.

Die Abb. 22 vermittelt die reale Vorstellung der Entstehung des “Quelldruckes”. Durch die Wasseranlagerung in den Zwischenschichten der Elementarschichten vergrößern diese ihren gegenseitigen Abstand und drücken bei Dehnungsbehinderung auf die benachbarten Teilchen. Die Summe all dieser Einzelkräfte ergibt die Quellspannung.

### 1.6 Thermische Längenänderung und thermischer Druck



**Abb. 23:** Schwingungszustände der Atome in einem Festkörper: "Potentialtopfmodell" (aus FEICHT, 1972).

größten Volumenänderungen statt. Die Asymmetrie der Mulde ist im Bereich geringerer Energie, also bei tieferen Temperaturen, nicht so stark ausgeprägt, dort ist die thermische Ausdehnung auch nicht so stark. Zwischen dem absoluten Nullpunkt und dem Schmelzpunkt vergrößert ein Festkörper sein Volumen nur um etwa 7%. Aus dem Verlauf der Kurve in Abb. 23 lässt sich auch ablesen, dass der thermische Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  nicht über das gesamte Temperaturintervall konstant ist. Bei der Bestimmung des thermischen Temperaturkoeffizienten ist deshalb stets das entsprechende Temperaturintervall, in dem der Temperaturkoeffizient bestimmt wurde und für das er gültig ist, anzugeben.

Die temperaturbedingte Längenänderung ist bei nicht zu hohen Temperaturen und nicht zu großen Temperaturdifferenzen in erster Näherung proportional zur ursprünglichen Länge  $l_0$  und zur Temperaturänderung  $\Delta T$ .

Die Länge  $l_T$  eines Stoffes bei der Temperatur  $T$  °C errechnet sich nach der Beziehung:

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot T$$

Dabei bedeuten  $l_0$  die Länge bei 0 °C und  $\alpha$  der lineare Ausdehnungskoeffizient. Durch entsprechende Umstellung der Formel lässt sich die Längenänderung berechnen, die eine Temperaturerhöhung um  $T$  °C nach sich zieht.

$$l_T = l_0 (1 + \alpha \cdot T)$$

Die meisten Stoffe reagieren auf Erhitzen mit Volumenzunahme und auf Abkühlung mit Volumenabnahme. Führt man einem Stoff Energie in Form von Wärme zu, so werden die Energiezustände der einzelnen Atome an deren Gitterplätzen verändert. Der Mittelpunkt der Schwingungsebene verschiebt sich, und dadurch wird der gegenseitige Abstand der Atome vergrößert.

In seiner Ruhelage befindet sich ein Atom im energieärmsten Zustand - gleichsam am Boden des Potentialtopfes. Die Höhe des Potentialtopfes ist durch die Bindungsenergie  $E_B$  gegeben. Mit dieser Energie sind die einzelnen Atome oder Moleküle aneinander gebunden. Wird nun die Schwingungsenergie der Einzelatome eines Kristalls größer als ihre Bindungsenergie, so löst sich der Kristallverband auf.

Wäre die Potentialtopfmulde symmetrisch, pendelten die einzelnen Atome auch gleichmäßig um ihre Ruhelage hin und her. Ihr Abstand voneinander und damit auch die Abmessungen des gesamten Kristalls blieben unverändert. Da die Potentialmulde aber asymmetrisch ist, verschiebt sich der Schwingungsmittelpunkt der einzelnen Atome; die Atome vergrößern ihren Abstand voneinander, der ganze Körper dehnt sich aus. Wie sich aus der Form der Kurve ersehen lässt, tritt die stärkste Verschiebung im Bereich des Schmelzvorganges, also bei sehr hohen Temperaturen auf. Hier finden auch die

**Tab. 3:** Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha$  und Volumenausdehnungskoeffizient  $\beta$  einiger Stoffe.

	Temperaturbereich	Linearer Längenausdehnungskoeffizient		Volumenausdehnungskoeffizient
		Min. / Max.	Mittelwert	
		[°C]	$\cdot 10^{-6}$ [1/K]	$\cdot 10^{-3}$ [1/K]
Glas	0 - 100	3 - 10	6,5	
Beton / Stein	0 - 100	5 - 14	9,5	
Eisen	0 - 100	10 - 17	13,5	
Aluminium	0 - 100	23 - 30	26,5	
Quecksilber				0,18
Wasser				0,21
Alkohol				1,10
alle Gase				3,67

Im Vergleich zur Längenausdehnung von stabförmigen Körpern, Bändern und Drähten spielt die Volumenausdehnung von großen massigen Körpern technisch meist eine untergeordnete Rolle. Ein Würfel der Kantenlänge  $l$  bei der Temperatur  $T$  hat das Volumen:

$$V(T) = l(T)^3 = l_0^3 (1 + \alpha T)^3 \\ \cong l_0^3 (1 + 3\alpha T) = V_0 (1 + \beta T)$$

In  $(1 + \alpha T)^3$  können die Glieder  $3\alpha^2 T^2$  und erst recht  $\alpha^3 T^3$  gegen  $3\alpha T$  vernachlässigt werden, weil  $\alpha T \ll 1$  ist.

Der Volumenausdehnungskoeffizient  $\beta$  ist also:

$$\beta = 3 \cdot \alpha$$

Häufig wird auch an Stelle des Volumenausdehnungskoeffizienten  $\beta$  für Feststoffe der Raumausdehnungskoeffizient  $\gamma$  verwendet. Die Volumenausdehnung spielt jedoch bei der Ausdehnung von Flüssigkeiten eine größere Rolle als bei den Feststoffen.

Die Tab. 3 gibt einen Überblick über die thermischen Ausdehnungskoeffizienten einiger Stoffe. Auffällig sind die relativ großen Volumenänderungen der Flüssigkeiten gegenüber den Feststoffen. Aus dem GAY-LUSSAC'schen Gesetz über Druck- und Temperaturverhalten von Gasen folgt, dass der Volumenausdehnungskoeffizient  $\beta$  für alle Gase gleich groß sein muss.

$$\beta = 3,67 \cdot 10^{-3} \text{ pro K}$$

Die Tabelle 4 zeigt die Ausdehnungskoeffizienten der häufigsten Gesteine. Auffällig ist hierbei, dass der Variationsbereich des Koeffizienten erstaunlich eng ist. So sind lediglich thermische Längenänderungen von  $4,5 \cdot 10^{-6}$  bis ca.  $12 \cdot 10^{-6}$  m gemessen worden.

Da sich die thermische Längenänderung der Gesteine als Summe der Änderung aller Einzelkomponenten ergibt, ist es unumgänglich, das thermische Verhalten der Minerale zu betrachten. Die Tab. 5 zeigt die Ausdehnungs- mit deren Zuwachskoeffizienten in deren jeweiligen Richtungen. Erstaunlich sind die großen Unterschiede in den einzelnen Richtungen. So besitzt Quarz parallel zur kristallographischen a- und b-Achse einen Ausdehnungskoeffizienten von ca.  $7 \mu\text{m/m/K}$  und parallel zur c-Achse ca.  $13 \mu\text{m/m/K}$ .

**Tab. 4:**

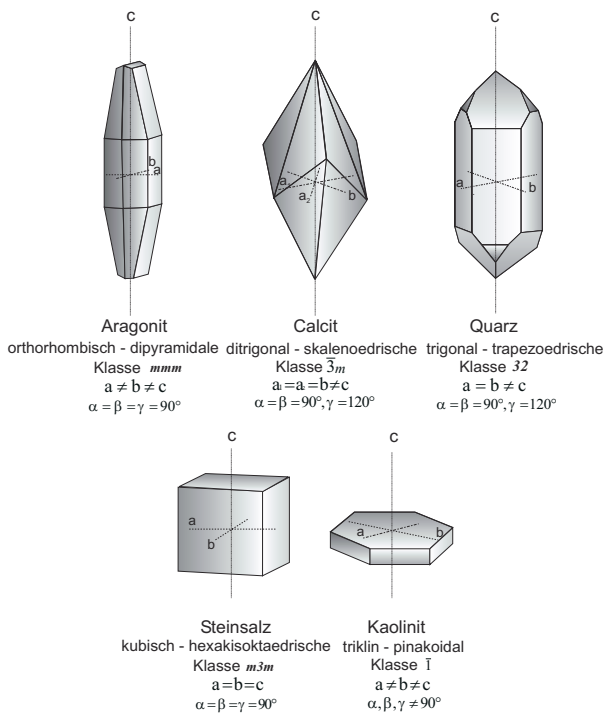
Linearer thermischer Längenausdehnungskoeffizient  $\alpha$  für verschiedene Gesteine (nach MÖLLER, 1993).

	Temperaturbereich [°C]	thermischer Längenausdehnungskoeffizient	
		Min. / Max.	Mittelwert
		$\cdot 10^{-6} [1/K]$	
Quarzite, Kieselschiefer, Feuersteine	0 - 60	11,0 - 12,5	11,8
Quarzitisch gebundene Sandsteine	0 - 60	10,5 - 12,0	11,8
Sonstige Sandsteine	0 - 60	10,0 - 12,5	11,0
Glimmerschiefer, Phyllite, Tonschiefer	0 - 60	9,5 - 11,0	10,4
Chlorit-, Talkschiefer	0 - 60	7,0 - 8,0	7,5
Granite, Quarzporphyre	0 - 60	6,5 - 8,5	7,4
Diorite, Porphyrite	0 - 60	5,5 - 8,0	6,5
reiner Kalkspat	0 - 30	3,5 - 6,0	4,5
Marmore	0 - 30	4,0 - 7,0	4,5
Dolomite, Magnesite	0 - 60	7,0 - 10,0	8,5

**Tab. 5:**

Linearer Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  und Zuwachskoeffizient  $\lambda$  einiger Kristalle (nach CORRENS, 1968).

	$\alpha_1$	$(\lambda_1)$	$\alpha_2$	$(\lambda_2)$	$\alpha_3$	$(\lambda_3)$
	a - Richtung		b - Richtung		c - Richtung	
	$\cdot 10^{-6} [1/K]$	$\cdot 10^{-8} [1/K]$	$\cdot 10^{-6} [1/K]$	$\cdot 10^{-8} [1/K]$	$\cdot 10^{-6} [1/K]$	$\cdot 10^{-8} [1/K]$
Aragonit	15,72	3,68	33,25	3,36	9,90	0,64
Quarz	13,24	2,38	-	-	6,99	2,04
Calcit	- 5,7	0,83	-	-	25,57	1,60
Steinsalz	38,59	4,48	-	-	-	-



**Abb. 24:** Habitus einiger Minerale mit deren kristallographischen Achsen.

tet worden, obwohl die dadurch bedingten Dehnungen und Schrumpfungen seit jeher im Konstruktionsbereich berücksichtigt wurden, ohne die tatsächlich auftretenden Spannungen zu kennen.

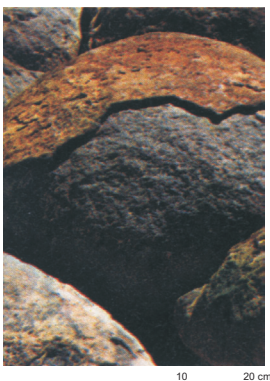
Die durch Temperaturerhöhung in einem Werkstoff entstehende Spannung lässt sich berechnen nach der Formel

$$\sigma = E \cdot \alpha \cdot \Delta T$$

(wobei  $\sigma$  = Spannung,  $E$  = E-Modul,  $\alpha$  = linearer Ausdehnungskoeffizient und  $\Delta t$  = Temperaturdifferenz bedeuten).

$$\Delta p = \frac{1}{K} \cdot \frac{\Delta V}{V}$$

Einen sehr ähnlichen Ansatz zeigt die Formel (mit  $\Delta p$  = Druckdifferenz,  $K$  = Kompressibilität,  $\Delta V$  = Volumendifferenz und  $V$  = Ausgangsvolumen).



**Abb. 25:** Desquamation an einem Gestein im ariden Klima-Bereich.



**Abb. 26:** Die Verwitterungsform des Kernsprunges. Häufige, rasche Temperaturwechsel ließen diesen riesigen Block zerbersten.

Die durchschnittliche thermische Ausdehnung von Quarz entspricht demnach ca.  $10 \mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$ . Bemerkenswert ist auch die große Anisotropie von Calcit, die sogar parallel a oder b negativ ist. Geht man allerdings von einer statistisch gleichmäßigen Verteilung der Calcit-Kristalle in einem Gestein aus, so ergibt sich als Durchschnittswert wieder ca.  $10 \mu\text{m}/\text{m}/\text{K}$ . Diese Werte werden durch die Messungen von MÖLLER (s. Tab. 4) bestätigt. Lediglich die Werte für reinen Kalkspat und Marmor erscheinen zu niedrig.

Die Temperaturverwitterung tritt in verschiedenen Erscheinungsformen auf.

So bezeichnet der **Kernsprung** ein oft mit einem lauten Knall erfolgendes Zerbersten von Felsblöcken, verursacht durch den schnellen Temperaturwechsel zwischen Tag und Nacht oder zwischen Sonneneinstrahlung und Abkühlung durch Regengüsse im ariden Klimabereich.

Unter **Desquamation** versteht man das Abschuppen oder Absprengen von Millimeter bis zu Meter dicken Schalen an Gesteinsoberflächen in ariden und semiariden Klimaten.

Die Abb. 25 und 26 lassen die immensen im Gestein auftretenden Spannungen erahnen.

Im Bereich der Naturwerksteine sind thermische Spannungsmessungen oder Spannungsberechnungen, hervorgerufen durch die natürlichen Temperaturschwankungen, bisher nur untergeordnet betrachtet worden.



### 1.7 Festigkeitskennwerte

Unter Festigkeit versteht man im Allgemeinen den Widerstand, den ein Material einer mechanischen Beanspruchung entgegensetzt. Wird die Beanspruchungsgrenze überschritten, so kommt es zum Materialversagen. Die Festigkeit wird von der Art des Stoffes, von der Form und Größe der Probekörper und meist auch durch deren Alterung und Lagerungsart beeinflusst. Die Formänderungsgeschwindigkeit und die Art des Lastzyklus, wie z.B. Wechsel- oder Schwingfestigkeit, sind zusätzliche Einflussfaktoren. Auch Feuchte, Temperatur und Textur beeinflussen die Ergebnisse.

Die Festigkeit ist daher keine physikalisch eindeutig definierbare Größe, sondern von Vereinbarungen abhängig, die in den entsprechenden Prüfnormen genau festzulegen sind, um die verschiedenen Ergebnisse von unterschiedlichen Prüfinstituten miteinander vergleichen zu können.

Die Festigkeit lässt sich auch als die Summe aller Bindungskräfte eines Stoffes definieren. Leider herrschen nur in den allerwenigsten Fällen reine "Bindungen" vor. Meist existiert ein Nebeneinander aller drei in Abb. 27 dargestellten Kontaktarten. Will man die wirkliche Tragfähigkeit einer Konstruktion ermitteln, so muss man deren mehrachsigen Spannungszustand rechnerisch auf einen einachsigen reduzieren und die dabei erhaltene Spannung mit der im Labor ermittelten Bruchspannung vergleichen. Zur Übertragung der im Labor ermittelten Festigkeitswerte auf reale Anwendungen sind daher verschiedene Festigkeitshypothesen im Gebrauch.

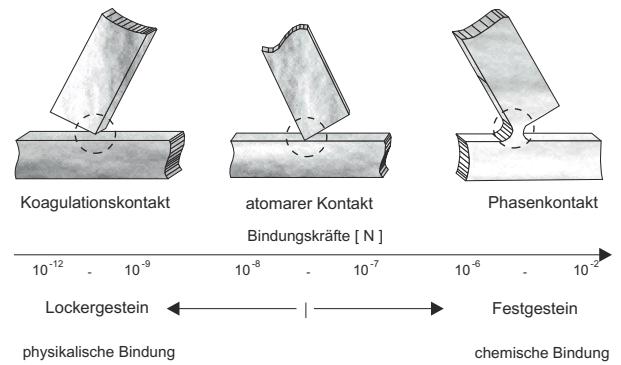


Abb. 27:

Verschiedene Kontaktarten mit deren Bindungskräften (in Anlehnung an REHBINDER, 1967).

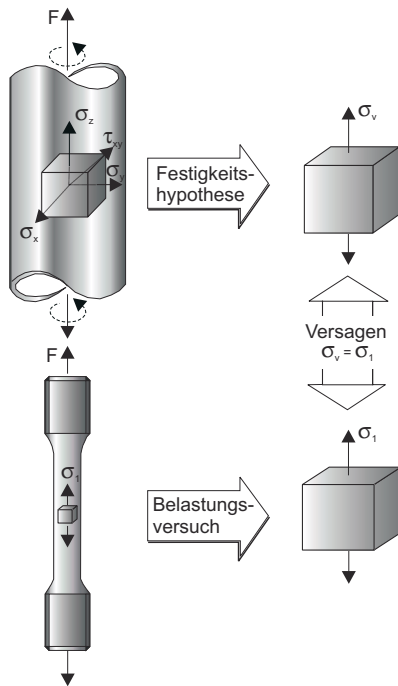


Abb. 28:

Prinzip des Festigkeitsnachweises (nach ISSLER, RUOSS u. HÄFELE, 1997).

#### - Die Hypothese der Normalspannung

(nach NAVIER, LAMÉ, CLAPEYRON und RANKINE).

Sie findet hauptsächlich Anwendung für spröde Stoffe (z.B. Glas, Gusseisen und Stein) mit einem reinen Trennbruch ohne bleibende Formänderungen. Danach tritt der Bruch ein, wenn eine der drei Hauptspannungen  $\sigma_1, \sigma_2$  oder  $\sigma_3$  die Vergleichsspannung  $\sigma_v$ , die die Zugfestigkeit  $\beta_z$  ist, überschreitet.

Für  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  gilt:

$$\sigma_v = \sigma_1 = \beta_z$$

#### - Die Hypothese der größten Dehnung

(nach MARIOTTE, NAVIER, ST. VENANT, GRASHOFF und BACH).

Auch sie findet überwiegend für spröde Stoffe Anwendung. Der Bruch findet bei Überschreitung der maximalen elastischen Dehnung ( $\epsilon_1$ ) statt. Nach dem HOOK'schen Gesetz gilt:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu (\sigma_2 + \sigma_3)]$$

mit  $\mu$  = Querkontraktionszahl (Poisson-Zahl) und  $E$  = Elastizitätsmodul (Young Modul).

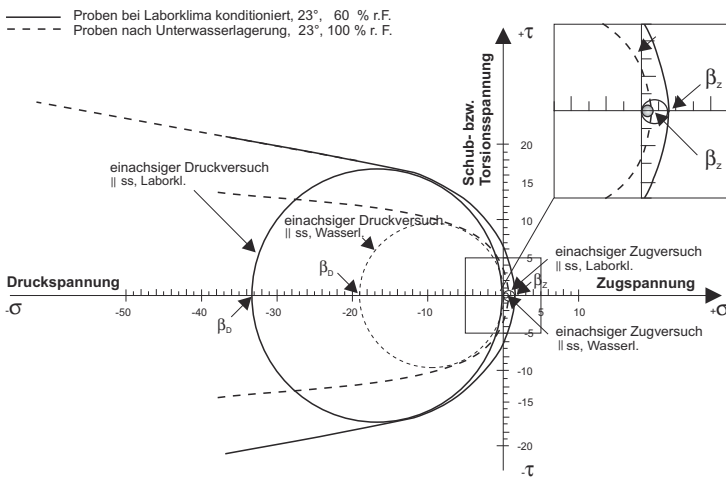


Abb. 29:

Grenzspannungskurven nach MOHR am Beispiel des Sander Schilfsandsteins (Probenkonditionierung im Labor [durchgezogene Linie] und unter Wasser [gestrichelte Linie]). Der Spannungsbereich für den Zugversuch ist nochmals vergrößert dargestellt.

**- Die Hypothese der Grenzkurven der Spannungen (nach COULOMB -MOHR).**

Sie wird vor allem bei nichtmetallisch-anorganischen Stoffen mit großer Druck- aber kleiner Zugfestigkeit angewandt. Sie stellt eine Verbindung von Normal- und Schubspannungen dar. Das Versagen des Stoffes erfolgt hierbei durch Gleiten. Zeichnet man für einen Stoff die durch verschiedene Versuche (Druck-, Zug-, Schub- oder Torsionsversuch) gewonnenen Mohrschen Spannungskreise, so lassen sich diese durch eine Hüllkurve umschließen.

Alle Spannungskreise, die diese Hüllkurve berühren oder schneiden, führen zum Bruch des Materials (s. Abb. 29).

Die Hüllkurve für Stoffe mit annähernd gleicher Zug- und Druckfestigkeit, wie etwa Stahl, sind zwei parallele Geraden, während sich für Stoffe mit einer Zugfestigkeit, die kleiner als die Druckfestigkeit ist, parabel-förmige Kurven ergeben.

Die Vergleichsspannung ist definiert als:

$$|\tau| = -\sigma \cdot \tan \varphi + c$$

mit  $\varphi$  als materialabhängiger Reibungswinkel und  $c$  als Kohäsion.

**- Die Hypothese der größten Schubspannung (nach COULOMB, GUEST, TRESCA und ST. VENANT).**

Sie beurteilt das Versagen des Materials durch Fließen und durch Schubbruch. Nach ihr ist die größte im Körper auftretende Schubspannung für das Versagen maßgebend. Die Fließschubspannung kann direkt im Zug- oder Torsionsversuch ermittelt werden.

$$\tau_{\max} = \frac{R_e}{2}$$

$R_e$  = Streckgrenze.

Die größte Schubspannung ergibt sich als Radius des größten Mohrschen Kreises:

$$\sigma_v = \tau_{\max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

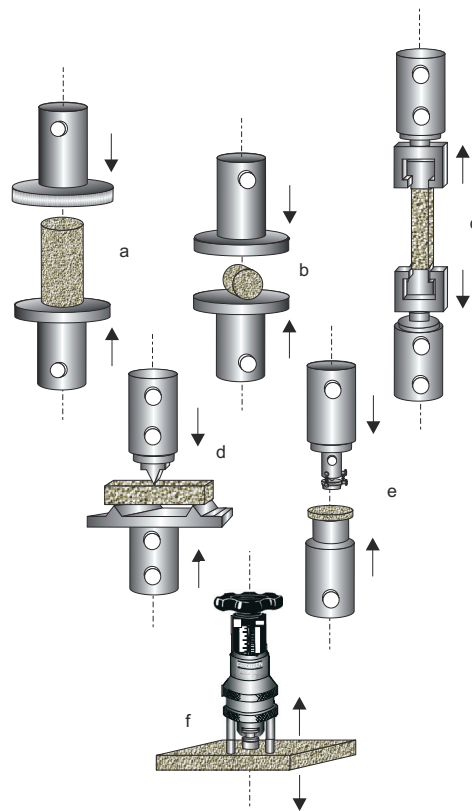


Abb. 30:

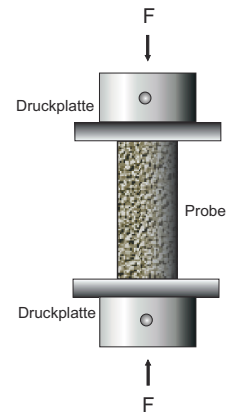
Die häufigsten Festigkeitsprüfungen und deren Versuchsanordnungen (a = Druckfestigkeit, b = Spaltzugfestigkeit, c = Zugfestigkeit, d = uniaxiale Biegezugfestigkeit, e = biaxiale Biegezugfestigkeit und f = Oberflächenhaftzugfestigkeit).

### 1.7.1 Druckfestigkeit $\beta_D$

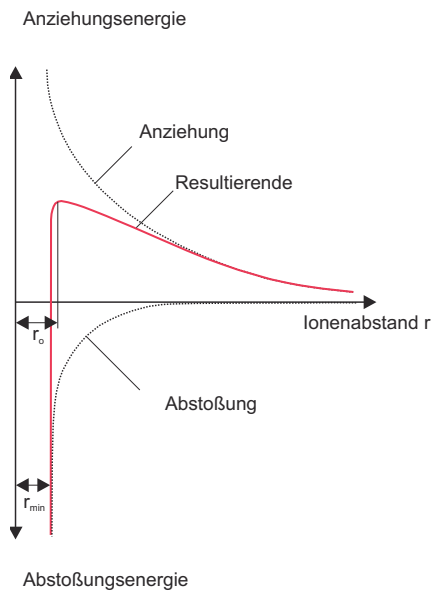
Die Druckfestigkeit ist wegen der relativ einfachen Versuchsdurchführung der am häufigsten ermittelte und verwendete Festigkeitskennwert. Die Abb. 31 zeigt den Versuchsaufbau. Zwischen den beiden Druckplatten wird der Prüfkörper bis zu seinem Bruch belastet. Aus der maximal aufgebracht Kraft und der Ausgangsquerschnittsfläche des Körpers lässt sich nach der Formel

$$\beta_D = \sigma_{D, \max} = \frac{F_{\max}}{A_0} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right]$$

(wobei  $\sigma_{D, \max}$  = größte Druckfestigkeit,  $F_{\max}$  = Höchstkraft und  $A_0$  = Ausgangsquerschnittsfläche) die Druckfestigkeit berechnen.



**Abb. 31:** Prüfanordnung zur Ermittlung der Druckfestigkeit.



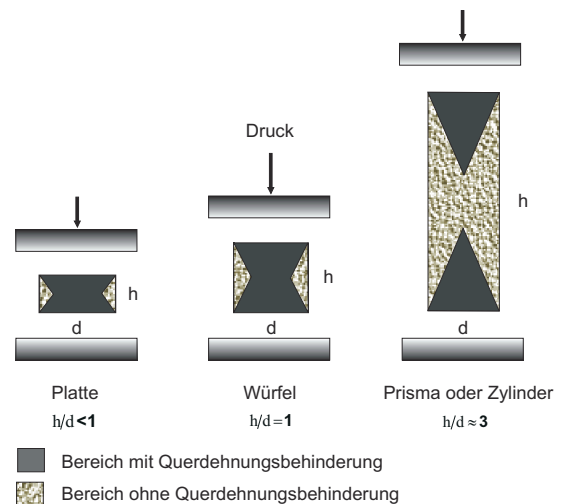
**Abb. 32:** Einfluss des Ionenabstandes auf die Ionenbindung (nach WESCHE, 1977).

Physikalisch gesehen ist der Begriff Druckfestigkeit eigentlich unrichtig, da die Bindungen zwischen den einzelnen Komponenten eines Stoffes durch eine reine Druckbeanspruchung nicht aufgehoben werden können (s. Abb. 32).

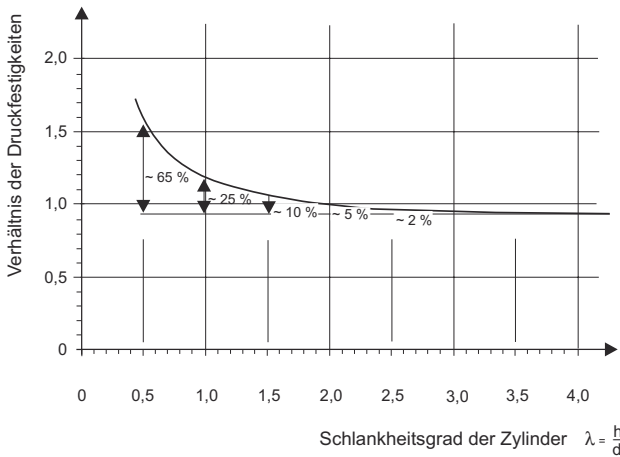
Der Abstand zwischen zwei Teilchen wird im Gleichgewichtszustand  $r_0$  sein. Verringert man nun durch Aufbringen einer äußeren Last diesen Abstand zunehmend, so wächst die Abstoßungsenergie. Je näher sich die einzelnen Bausteine kommen, desto größer wird diese Energie. Aus dem Verlauf der resultierenden Kurve der Abb. 32 lässt sich ablesen, dass die Unterschreitung eines bestimmten Abstandes ( $r_{\min}$ ) nicht möglich ist, da bei Annäherung an  $r_{\min}$  die Abstoßungsenergie unendlich groß wird. Das Versagen durch Druck wird erst dadurch verständlich, wenn man berücksichtigt, dass bei jeder Längsverformung auch eine Querverformung auftritt. Der Bruch wird dann eintreten, wenn die Querverformung die für diesen Stoff kritische Dehnung erreicht oder wenn die Querspannungen die Zugfestigkeit überschreiten.

Die Ursache für das Versagen des Stoffes liegt im Erreichen oder Überschreiten seiner Zugfestigkeit quer zur Belastungsrichtung.

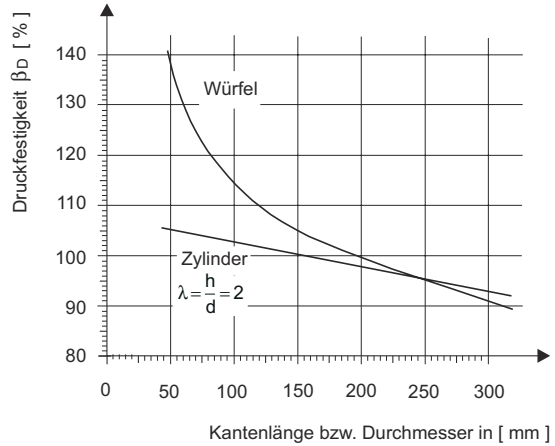
Wird die Querverformung gänzlich oder nur partiell behindert, so lässt sich die Druckfestigkeit entweder gar nicht ermitteln, oder es werden scheinbar höhere Festigkeiten bestimmt. Die Abb. 33 zeigt den Einfluss der Querdehnungsbehinderung in bezug auf die Geometrie des Probekörpers. Erst ab einem Schlankheitsgrad  $h/d$  von 2 - 3 existiert im mittleren Abschnitt des Prüfkörpers ein ausreichend großer Bereich, der sich unbehindert verformen kann. Die Druckfestigkeit sinkt dabei auf ihr Minimum.



**Abb. 33:** Einfluss der Querdehnungsbehinderung bei der Druckfestigkeitsprüfung (nach WESCHE, 1977).



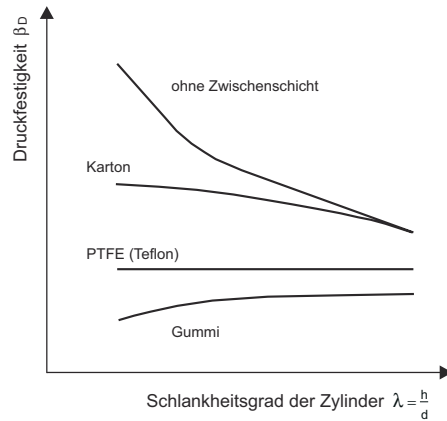
**Abb. 34:** Verhältnis der Druckfestigkeiten verschieden schlanker Zylinder (nach WESCHE, 1981).



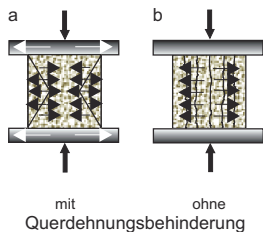
**Abb. 35:** Einfluss der Prüfkörpergeometrie auf die Druckfestigkeit (nach WESCHE, 1981).

Die Abb. 34 und 35 zeigen den Einfluss der Prüfkörpergeometrie auf die Messwerte. So liefert die Druckfestigkeitsprüfung an 50 mm x 50 mm x 50 mm großen Würfeln einen um 40 % höheren Messwert gegenüber dem Wert, der an einem Zylinder oder Prisma ermittelt wurde (Schlankheitsgrad ~ 3; Schlankheitsgrad = Verhältnis Höhe zu Durchmesser). Der Einfluss der Prüfkörpergeometrie beim Zylinder oder Prisma ist erst ab einem Schlankheitsgrad von 2,5 bis 3 zu vernachlässigen. Wird die geometrische Form des Würfels als Prüfkörper benutzt, so ist neben dessen Formfaktor (Schlankheitsgrad = 1) auch dessen Kantenlänge, also seine Größe, von Bedeutung. Erst ab einer Kantenlänge von 250 mm stimmt die am Würfel ermittelte Druckfestigkeit mit der am Zylinder oder Prisma (Schlankheitsgrad ~ 2) überein. Dies ist auch der Grund für die enorm großen Prüfkörper in der Betonindustrie (Würfel, Kantenlänge = 250 mm).

Die Vergrößerung des Prüfkörpers (beim Würfel) oder die Verwendung von Zylindern oder Prismen hat einzig das Ziel, einen ausreichend großen Bereich innerhalb des Prüfkörpers zu schaffen, der sich unbehindert verformen kann.



**Abb. 36:** Einfluss verschiedener Zwischenlagen auf die Querdehnungsbehinderung und dadurch auf die Druckfestigkeit (nach WESCHE, 1981).



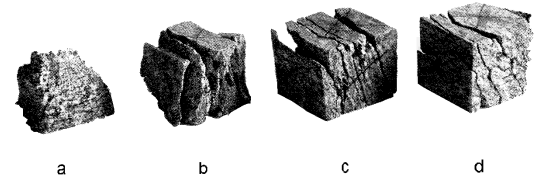
**Abb. 37:** Spannungszustand in einem Würfel während der Druckfestigkeitsprüfung (nach WESCHE, 1981).

Um denselben Effekt zu erzielen, werden auch verschiedene Zwischenlagen (zwischen Prüfkörper und Druckplatten) bei der Druckfestigkeitsprüfung verwendet. Diese sollen die Querdehnungsbehinderung an den Druckplatten aufheben. Als hierfür geeignetes Material hat sich die PTFE-Folie (Teflon-Folie, Stärke > 2 mm) erwiesen, die die Abhängigkeit des Messergebnisses von der Prüfkörpergeometrie aufhebt (s. Abb. 36). Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von sog. Bürstendruckplatten.

Die Abb. 37 verdeutlicht den Spannungszustand in einem Prüfkörper mit und ohne Querdehnungsbehinderung. In Abb. 37a erkennt man die dem Bruch entgegenwirkenden Scherspannungen, die die scheinbare Festigkeitserhöhung verursachen. Auch lassen sich anhand der Abbildung die unterschiedlichen Bruchbilder erkennen.

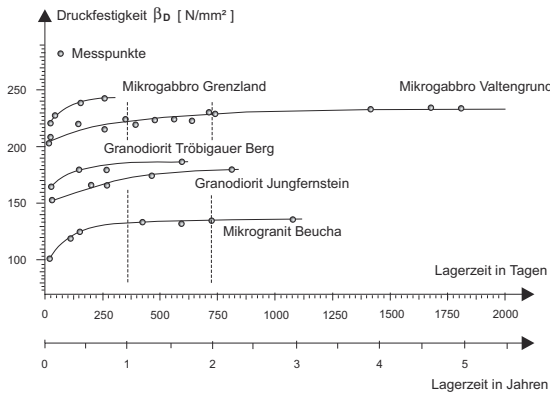
Zusätzlich zu den vorher beschriebenen Formfaktoren haben die Probenorientierung, die Lagerzeit der Proben vor der Prüfung und deren Konditionierung einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf das Ergebnis.

Die Abb. 38 zeigt sehr deutlich den Einfluss einer eventuell vorhandenen Schieferung. Es fällt auf, dass nicht die Druckfestigkeitsmessung parallel zur Schieferung, sondern die dazu im 45° Winkel stehende, den geringsten Wert liefert. Auch der Bereich der Messwerte (225 MPa senkrecht zur Schieferung und 103 MPa im Winkel von 45° zur Schieferung) ist sehr weit.



**Abb. 38:**

Druckversuche an Würfelpuben eines gerichteten Gesteins (Gneis), a = Belastung senkrecht zur Schieferung (225 MPa), b = parallel zur Schieferung (200 MPa), c = 22,5° zur Schieferung (112 MPa) und d = 45° zur Schieferung (103 MPa), (nach DE QUERVAIN, 1974).



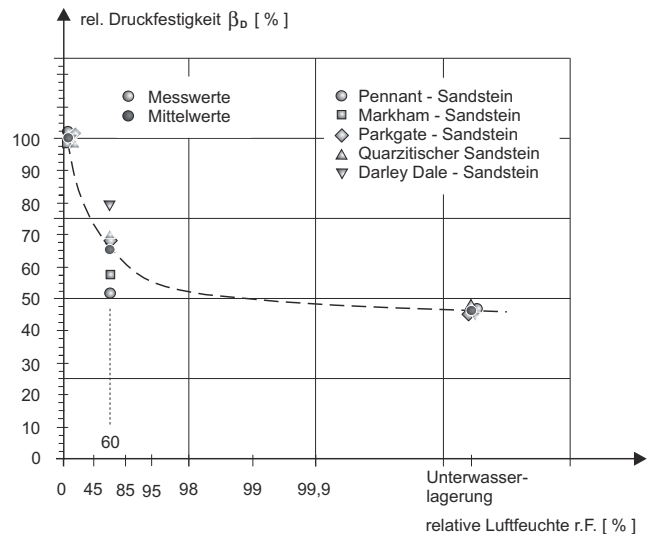
**Abb. 39:**

Veränderung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der "Alterung" (Lagerzeit zwischen Probengewinnung und Versuchsdurchführung) der Prüfkörper (nach PESCHEL, 1974).

Auch die Konditionierung der Proben ist für das Messergebnis von Bedeutung. Die Abb. 40 zeigt den Einfluss der Stofffeuchte auf das Ergebnis. Obwohl die Proben im Regelfall im Laborklima (21° C, 65% r.F.) vor der Prüfung konditioniert werden sollen, kann man sich durchaus die eine oder andere Messung bei einer Luftfeuchte von 15 %, oder im anderen Extrem von 90 % vorstellen, zumal die DIN 52 105 die Herstellung der Probekörper im Nasssägeverfahren empfiehlt. Bei Sandsteinen hoher Porosität können sich dadurch Abweichungen von bis zu 55 % ergeben. Zur Sicherstellung der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und zum gegenseitigen Vergleich der Werte der Druckfestigkeitsmessungen muss künftig der Probenvorkonditionierung erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet werden.

Ein weiterer Einflussfaktor auf die Ergebnisse der Prüfung ist in der sog. "Alterung" der Prüfkörper zu sehen. PESCHEL (1974) untersuchte eine Reihe von Plutoniten und stellte dabei eine Zunahme der Druckfestigkeit im Laufe der Zeit fest. Erst ab einer Lagerung der frisch aus dem Bruch entnommenen Gesteine von in etwa 1,5 bis 2 Jahren erreichten die Werte ihr Maximum und bleiben von da an annähernd konstant.

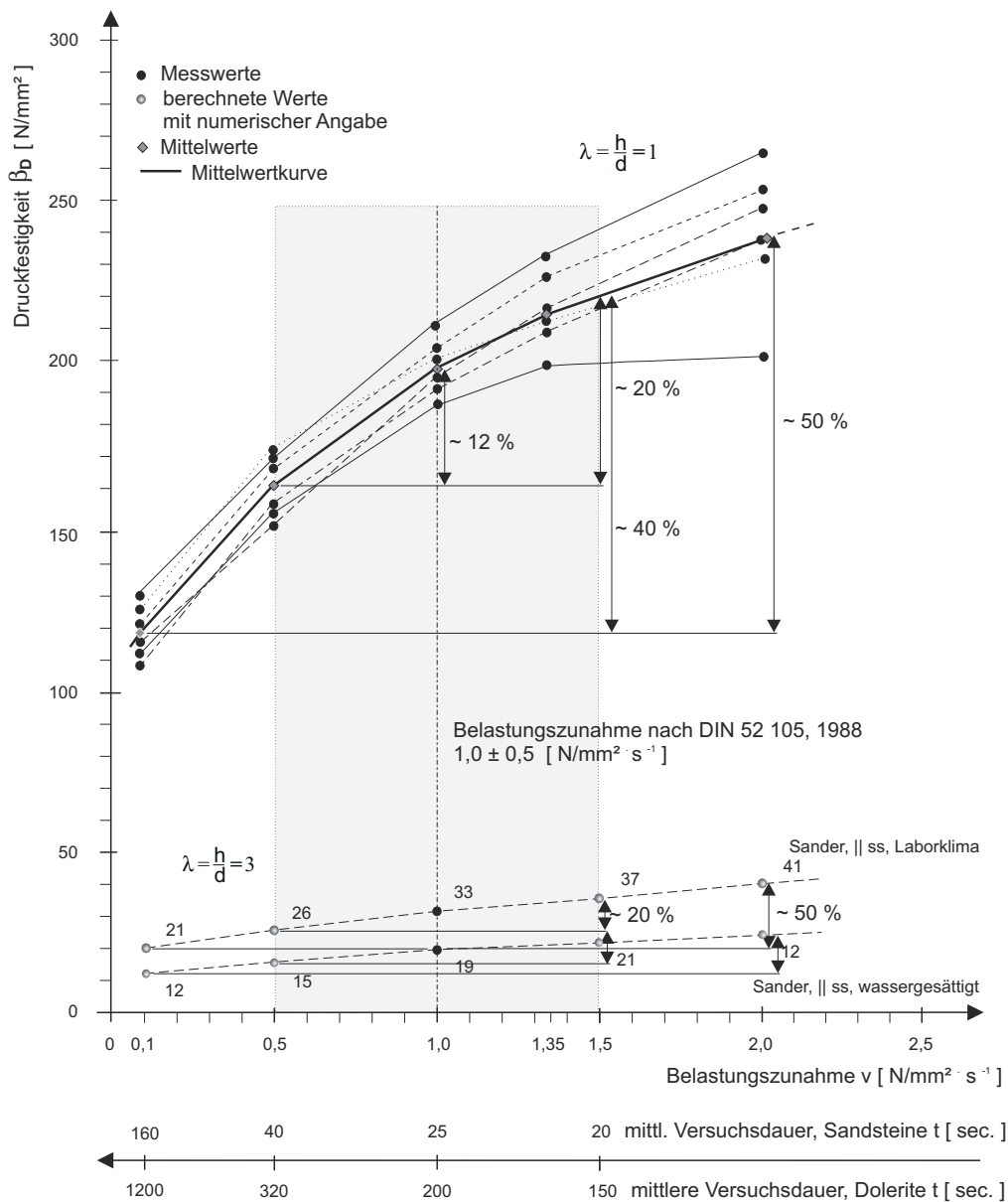
Erklärt werden kann dieses Phänomen mit einer Relaxationsreaktion der Gesteine auf die nach der Entnahme aus dem Bruch veränderten Umweltbedingungen (Druck, Temperatur und Feuchte) und einer eventuell erfolgenden "letzten Zementation" ihrer Bestandteile.



**Abb. 40:**

Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Stofffeuchte (nach PESCHEL, 1977).

Die DIN 52 105 regelt die Belastungsgeschwindigkeit während des Druckversuchs. Sie ist mit  $1,0 \pm 0,5 \text{ MPa} \cdot \text{s}^{-1}$  festgelegt. PESCHEL (1974) untersuchte den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf die Druckfestigkeitswerte (s. Abb. 41). Die von ihm ermittelten Daten zeigen, dass bei einer Druckfestigkeitsprüfung, durchgeführt nach DIN, Abweichungen der Resultate von bis zu 20 % auftreten können.



**Abb. 41:**

Zylinderdruckfestigkeiten von Doleriten der Lausitz in Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit (nach PESCHEL, 1974). Messwerte von Sander Schilfsandstein (nach ALFES, 1993).

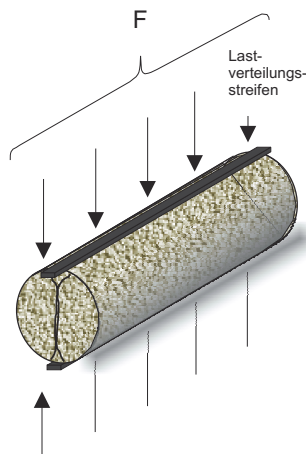
## 1.7.2 Spaltzugfestigkeit $\beta_{SZ}$

Spaltzugspannungen treten beim Einschlagen von Nägeln in Holz, bei der Verankerung der Bewehrung im Stahlbeton durch Haken oder bei der Verkleidung von Fassaden mit Natursteinplatten oder Fliesen an den Verankerungspunkten auf.

Zur Bestimmung der Spaltzugfestigkeit werden zylindrische Probekörper auf zwei gegenüberliegenden, parallelen Linien ihrer Oberfläche bis zum Bruch gedrückt (s. Abb. 43). Dabei treten in Richtung der Lastebene Druck-, senkrecht dazu Zugspannungen auf. Es wird ein zweiachsiger Spannungszustand im Prüfkörper induziert (s. Abb. 44).

Bei der Betrachtung einer sehr dünnen Scheibe des Prüfkörpers und unter der Voraussetzung eines exakt linienförmigen Lastangriffes auf der Prüfkörperoberfläche sind die Zugspannungen über den gesamten Durchmesser gleich und betragen:

$$\beta_{SZ} = \sigma_{SZ, \max.} = \frac{2 \cdot F_{\max.}}{\pi \cdot l \cdot d} \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right]$$



**Abb. 43:**

Krafteinleitung bei der Spaltzugfestigkeits-Prüfung (nach WESCHE, 1977).

mit  $F_{\max.}$  = Höchstkraft,  
 $l$  = Dicke der Scheibe und  
 $d$  = Durchmesser der Scheibe.

Die Druckspannungen in Richtung der Lastebene betragen in Scheibenmitte:

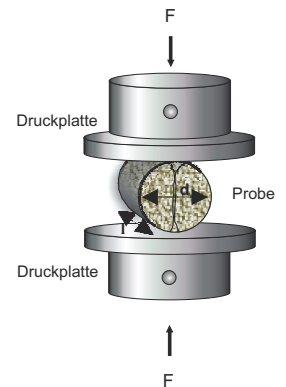
$$\sigma_D = \frac{6 \cdot F_{\max.}}{\pi \cdot l \cdot d} \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right]$$

Sie werden zum Rand hin unendlich groß. Der Prüfkörper versagt durch Druckbruch im Bereich der Krafteinleitung (s. Abb. 44).

Den gewünschten Zugbruch erreicht man durch die Verbreiterung des Lastangriffsbereiches durch Lastverteilungstreifen mit einer Breite von ca. 0,05 bis 0,1  $d$  der zu prüfenden Probe (s. Abb. 43). Die Streifen leiten die angreifende Last wesentlich gleichmäßiger in den Prüfkörper und bauen die Druckspannungsspitzen im oberen und unteren Lasteinleitungsbereich ab. Dadurch sind die reinen Zugspannungen auf den inneren Bereich von ca. 0,5 bis 0,7  $d$  beschränkt.

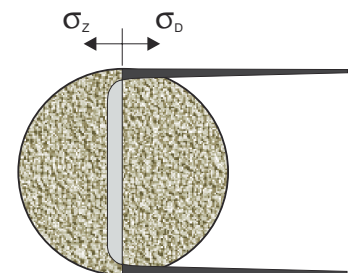
Das Prüfverfahren kann nur an Materialien mit einem Verhältnis von Druck-/ Zugfestigkeit  $> 10$  sinnvoll angewendet werden, da nur dann der gewünschte Zugbruch entsteht. Der Bruch beginnt in diesem Fall in der Scheibenmitte und setzt sich nach außen hin fort. Oberflächeneinflüsse der Probe (z.B. infolge der Bearbeitung) spielen dann eine untergeordnete Rolle. Durch die ungleiche Spannungsverteilung über den Probenquerschnitt kann die Spaltzugfestigkeit nicht gleich der reinen Zugfestigkeit sein, sondern muss stets größer als diese sein.

Wegen der relativ einfachen Probenvorbereitung (Bohrkerne = Zylinder) und der vergleichsweise einfachen Versuchsdurchführung wird die Spaltzugfestigkeit häufig als Ersatz für die Zugfestigkeitsbestimmung verwendet. Allerdings darf der Begriff "rechnerische Zugfestigkeit", der in diesem Zusammenhang auftaucht, nicht mit der tatsächlichen Zugfestigkeit verwechselt werden.



**Abb. 42:**

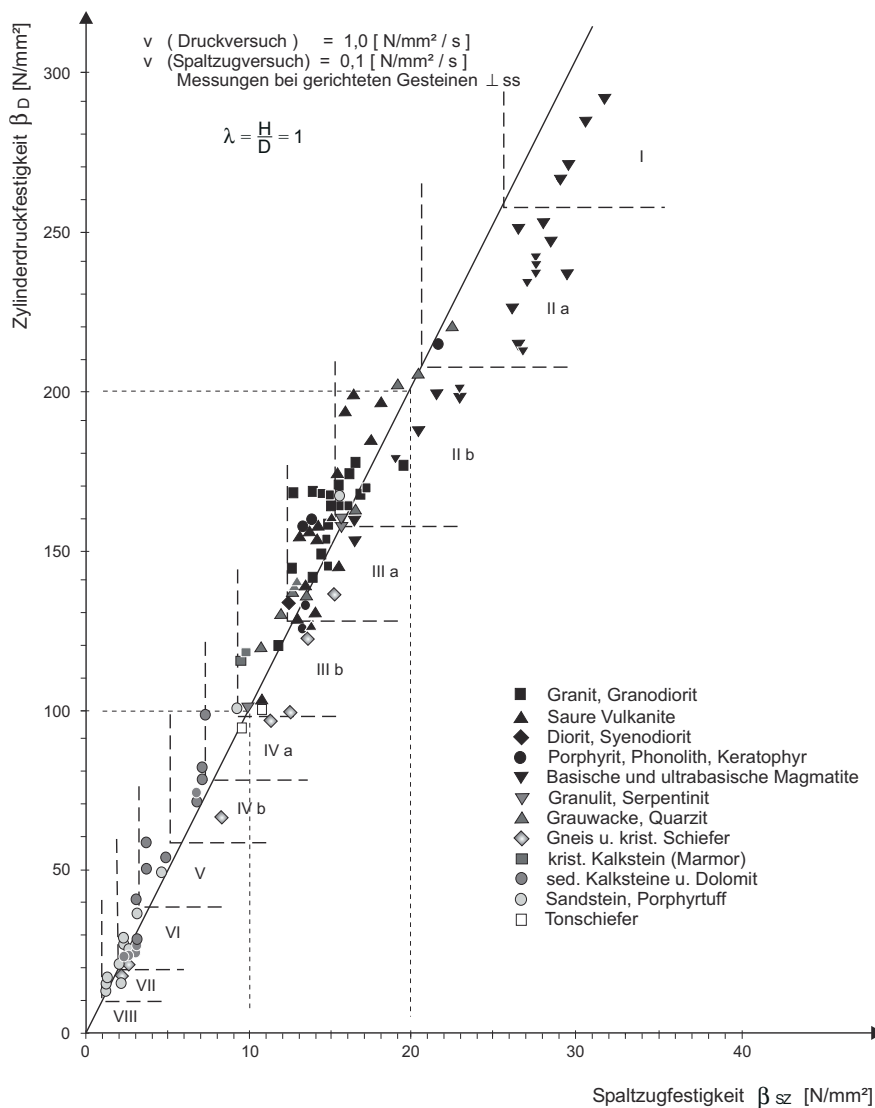
Prüfanordnung zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit (Brazilien-Test).



**Abb. 44:**

Spannungszustand in einer Scheibe des Prüfkörpers (nach WESCHE, 1977).

Die Abb. 45 zeigt den Zusammenhang zwischen der einaxialen Druckfestigkeit (ermittelt an zylindrischen Proben) und der Spaltzugfestigkeit von Zylindern. PESCHEL (1974) untersuchte, in einer enorm umfangreichen Versuchsreihe, verschiedenstes Probenmaterial und postulierte anhand seiner Ergebnisse ein nahezu konstantes Verhältnis von 1 : 10 (Druck- / Spaltzugfestigkeit) für den gesamten Bereich der Naturwerksteine.



**Abb. 45:**

Zusammenhang zwischen Zylinderdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit, ermittelt an verschiedenen Natursteinen, mit Festigkeitsklassifikation der Gesteine (aus PESCHEL, 1974).

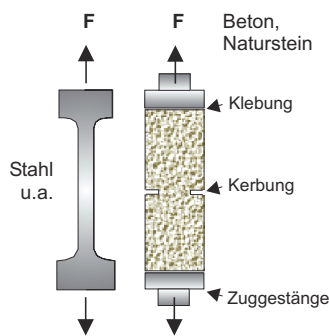


### 1.7.3 Zugfestigkeit $\beta_Z$

Die Zugfestigkeit wird im Allgemeinen an Probekörpern untersucht, die im mittleren Bereich einen verengten Querschnitt aufweisen (s. Abb. 47). Dadurch wird der Bruch in diesem Bereich erzwungen und es können die an den Endflächen auftretenden Dehnungsbehinderungen der Probe durch die Einspannvorrichtungen oder durch die Wirkung des Klebers vernachlässigt werden. In diesem mittleren Bereich des Probekörpers herrschen somit reine Zugspannungen. Die Zugfestigkeit berechnet sich dann nach der Formel:

$$\beta_Z = \sigma_{z, \max} = \frac{F_{\max}}{A_0} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right] \quad \begin{array}{l} \text{mit } \sigma_{z, \max} = \text{größte Zugfestigkeit,} \\ F_{\max} = \text{Höchstkraft und} \\ A_0 = \text{Ausgangsquerschnittsfläche.} \end{array}$$

Die während des Zugversuchs auftretende Querschnittsverringering des Probekörpers wird bei der Berechnung außer Acht gelassen. Bei Beton oder Naturwerkstein wird die Zugkraft über angeklebte Stahlplatten oder Zugstempel auf den Probekörper (Prisma oder Zylinder) übertragen. Den im mittleren Abschnitt der Probe gewünschten Bruch erhält man dabei durch eine Querschnittsverengung infolge von Kerbung (s. Abb. 47).

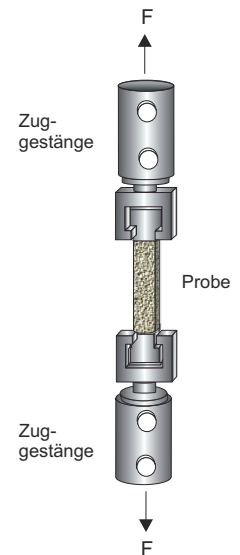


**Abb. 47:**  
Probengeometrie für die Zugfestigkeitsprüfung.

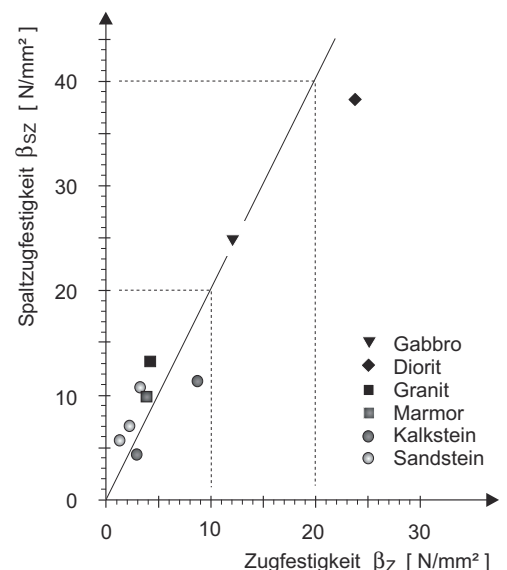
Die Abb. 48 zeigt, dass beide Festigkeitskennwerte innerhalb der Materialgruppe der Naturwerksteine in einem nahezu konstanten Verhältnis von 2 : 1 stehen. Es darf aber dennoch dabei nicht übersehen werden, dass es sich lediglich um eine Abschätzung der Größenordnung handelt und nicht um den exakten Wert der Zugfestigkeit.

Vergleicht man die Abb. 49 mit der Abb. 40 (Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Stofffeuchte), so fällt der weitestgehend identische Kurvenverlauf der Abbildungen auf. Beide Festigkeitskennwerte müssen demzufolge in einem nahezu konstanten Verhältnis zueinander stehen.

Die Relation Druckfestigkeit zu Spaltzugfestigkeit ist, lt. Abb. 45, 1:10, während sich für das Verhältnis Spaltzug-/Zugfestigkeit, lt. Abb. 48, 2:1 ergibt. Somit errechnet sich die Relation Druck-/Zugfestigkeit zu 1:20.



**Abb. 46:**  
Prüfanordnung zur Ermittlung der Zugfestigkeit.



**Abb. 48:**  
Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit (nach PESCHEL, 1977).

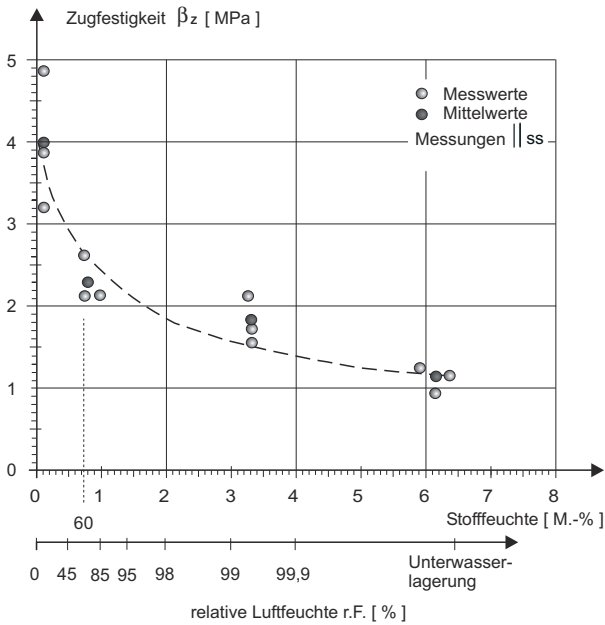


Abb. 49:

Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Stofffeuchte und der relativen Luftfeuchte am Beispiel des Sander Schilfsandsteins (Messwerte nach MÖLLER, 1993).

$$\frac{\beta_R}{\gamma} = \text{zul } \sigma \quad \text{bzw.}$$

$$\frac{\text{Bruchlast}}{\gamma} = \text{Gebrauchslast}$$

Trotz dieser enormen Reduzierung der Materialfestigkeitskennwerte ist in vereinzelten Fällen immer noch Materialversagen zu beobachten. Dies wurde bislang der Inhomogenität des Materials Naturwerkstein zugeschrieben. Sicherlich sind aber in diesen Fällen die für die Statik und Standsicherheit entscheidenden Festigkeitskennwerte immer noch zu hoch angesetzt worden.

Aus der Abb. 49 und der Abb. 50 lässt sich die große Sensibilität des Materialkennwertes gegenüber der Stofffeuchte ablesen.

So können die Zugfestigkeitswerte ein und desselben Materials um bis zu nahezu 400 % streuen, je nachdem, ob im nahezu trockenen oder eventuell wassergesättigten Zustand der Probe der Versuch durchgeführt wurde.

Vielleicht ist dieser mit zunehmender Stofffeuchte einhergehende Festigkeitsverlust der Grund dafür, dass Statiker und Bauingenieure bisher den von den Materialprüfern vorgegebenen Festigkeitskennwerten einen empirisch ermittelten Sicherheitsbeiwert ( $\gamma$ ) zuordnen (WESCHE, 1977). Für die betrachtete Materialgruppe liegt dieser zwischen 1,7 und 3,0. Die für ein Bauteil zulässige Gebrauchslast erhält man, indem man die im Versuch ermittelte Bruchlast auf die sogenannte Rechenfestigkeit  $\beta_R$  (Berücksichtigung bekannter Einflüsse wie Probenkörperform und Materiallangzeitverhalten der im Versuch gewonnenen Messwerte) zurückführt und diese durch den Sicherheitsbeiwert dividiert.

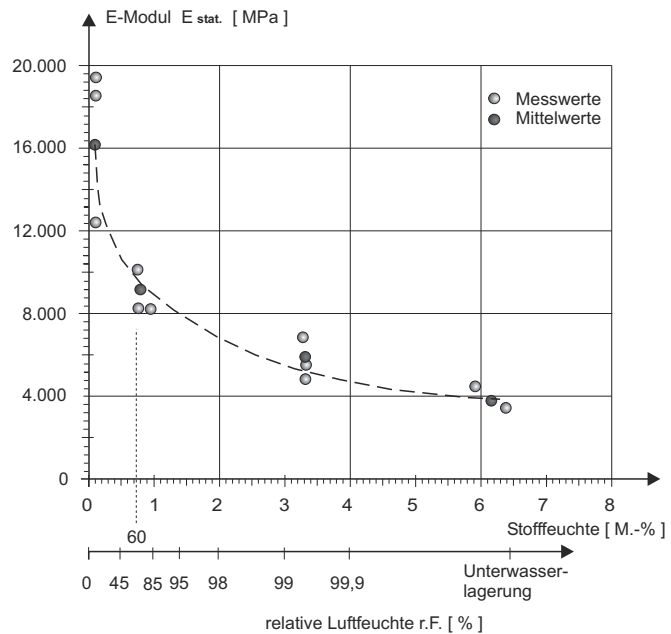


Abb. 50:

Statischer E-Modul (ermittelt im Zugversuch) in Abhängigkeit von der Stofffeuchte und der relativen Luftfeuchte am Beispiel des Sander Schilfsandsteins (Messwerte nach MÖLLER, 1993).

### 1.7.4 Biegefestigkeit $\beta_B$

Die Biegefestigkeit eines Stoffes ist die höchste zu erreichende Festigkeit eines Prismas, das, auf zwei Stützen gelegt, bis zum Bruch belastet wird. Die Belastung erfolgt entweder über eine mittige Einzellast (Dreipunkt-Biegeversuch, s. Abb. 52 a) oder über mehrere, meist jedoch zwei symmetrische Einzellasten (Vierpunkt-Biegeversuch, s. Abb. 52 b).

Bei ersterem tritt der Bruch in der Regel in Balkenmitte, an der Stelle der größten Biegespannung auf (einen weitestgehend homogenen Prüfkörper vorausgesetzt). Bei zwei Einzellasten hingegen kommt der Bruch zwischen diesen Lasten, an der Stelle, an der die Festigkeit am geringsten ist, zustande.

Der Biegefestigkeitsversuch eignet sich nur für spröde Werkstoffe, da bei zähen Stoffen kein Bruch zu erreichen ist. Bei Stoffen, bei denen die Druckfestigkeit größer als die Zugfestigkeit ist, erfolgt das Versagen des Prüfkörpers durch Überschreitung der Zugfestigkeit in der Zugzone.

In diesem Fall spricht man von der **Biegezugfestigkeit**  $\beta_{BZ}$ .

Im Gegensatz dazu ist die **Biegedruckfestigkeit**  $\beta_{BD}$  durch das Versagen des Prüfkörpers in der Druckzone gekennzeichnet. Der Bruch erfolgt hierbei durch Überschreitung der Druckfestigkeit. Dieses Materialverhalten ist für Stoffe typisch, bei denen die Zugfestigkeit gleich oder größer der Druckfestigkeit ist.

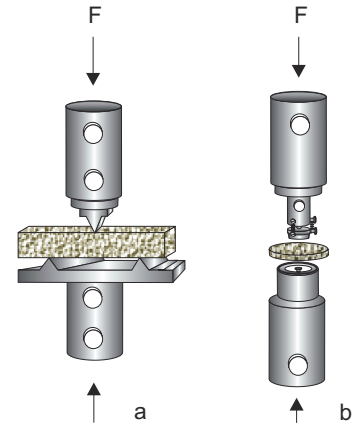


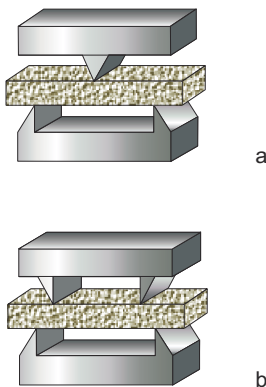
Abb. 51:

Prüfanordnungen zur Ermittlung der uniaxialen (a) und biaxialen (b) Biegefestigkeit.

Die Biegefestigkeit ist definiert als:

$$\beta_B = \sigma_{B, \max} = \frac{M_{B, \max}}{W_B} \left[ \frac{N}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right]$$

mit  $M_B$  = größtes zu erreichendes Biegemoment und  $W_B$  = Widerstandsmoment gegen Biegung.



Eine besonders sorgfältige Arbeitsweise und Beschreibung der Proben mit deren Orientierung während des Versuches ist bei der Prüfung von geschichtetem Material notwendig. Die Abb. 53 zeigt die drei Extremfälle bei der Bestimmung der Biegefestigkeit eines geschichteten Materials. Selbstverständlich sind alle zwischen diesen Extremen liegenden Zwischenstufen durch entsprechenden Probenschnitt möglich. Da sich durch die drei Extremfälle drei unterschiedliche Biegefestigkeitswerte ergeben, wird man bei einer normalen Messung meist einen nicht näher zu definierenden Kennwert erhalten. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der von verschiedenen Institutionen ermittelten Messwerte.

Abb. 52:

Dreipunkt- und Vierpunkt-Biegeversuch.

WITTMANN und PRIM (1983) entwickelten eine besondere Prüfanordnung zur Bestimmung der biaxialen Biegezugfestigkeit an Scheiben (s. Abb. 51 b). Als Prüfkörper werden Scheiben definierten Durchmessers verwendet. Die Krafteinleitung in den Probekörper erfolgt dabei nicht linear, sondern ringförmig.

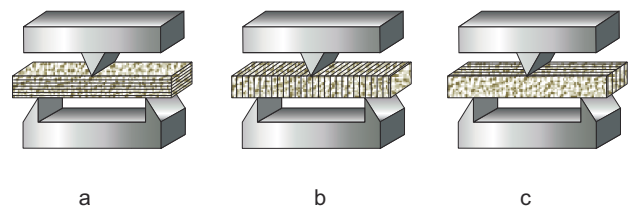
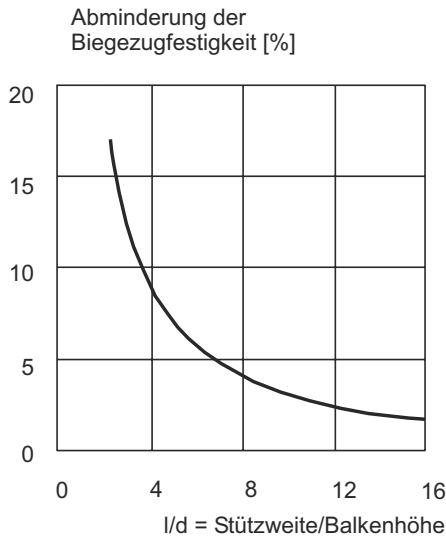


Abb. 53:

Die drei Extremfälle bei der Biegefestigkeitsprüfung eines geschichteten Materials.

Entsprechende Gesteinsscheiben werden mittels eines Belastungsringes (oben) auf einen Auflagering (unten) bis zum Bruch gedrückt. Die Durchmesser der beiden Ringe stehen dabei in einem festen Verhältnis von 1:3. Dies begrenzt die Dimension des oberen Belastungsringes auf  $d > 10$  mm, da bei noch kleineren Durchmessern des oberen Ringes die Krafteinleitung punktförmig werden würde.

Die biaxiale Biegezugfestigkeit errechnet sich nach der Formel:



**Abb. 54:**

Abminderung der Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom Verhältnis Stützweite/Balkenhöhe (nach WESCHE, 1977).

$$\sigma_{bz} = \frac{3 \cdot F_{\max}}{4 \cdot \pi \cdot d^2} \cdot \left[ 2 \cdot (1 + \nu) \cdot \ln \frac{a}{b} + \frac{(1 - \nu) \cdot (a^2 - b^2)}{a^2} \cdot \frac{a^2}{r^2} \right]$$

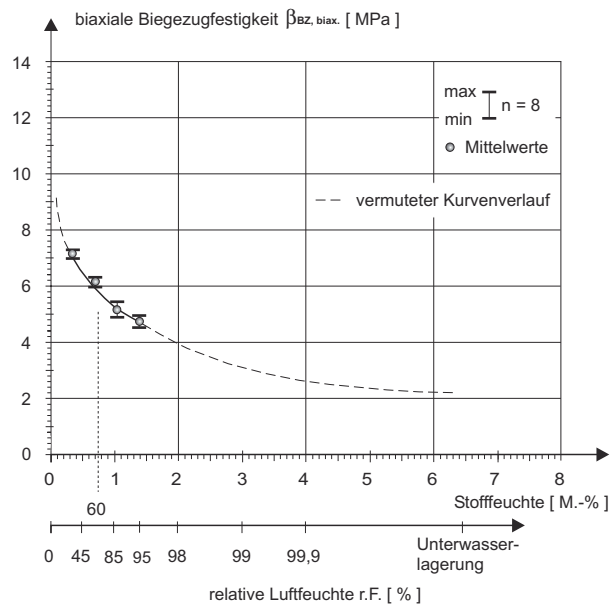
Mit

- $F_{\max}$  = Auf den Belastungsring aufgebraachte Maximalkraft [N]
- $d$  = Dicke der Gesteinsscheibe [mm]
- $\nu$  = Poissonzahl (Konstante f. Gestein  $\nu = 0,25$ )
- $a$  = Radius des Auflagering [mm]
- $b$  = Radius des Belastungsringes [mm]
- $r$  = Radius der Gesteinsscheibe [mm].

Auch bei dieser Prüfung ist bei geschichtetem Material auf die Probenorientierung (Lage der Schichtungsebene zur Krafteinleitung) zu achten. Besondere Bedeutung kommt dieser Methode bei der Ermittlung von Festigkeitsprofilen zu. Anhand eines Bohrkernes lässt sich der Festigkeitsverlauf von der Oberfläche her beginnend bis in das unverwitterte Kernmaterial bestimmen. Dadurch können der oberflächennahe Festigkeitsverlust quantifiziert und geeignete Maßnahmen ergriffen werden.

Wegen des relativ geringen Materialverbrauches zur Kennwertermittlung ist ein weit-verbreiteter Anwendungsbereich dieser Methode die Entwicklung und Überprüfung von Konsolidierungsmaßnahmen an denkmalgeschützten Objekten.

Wie alle Festigkeitskennwerte ist auch die Biegezugfestigkeit stark stofffeuchteabhängig (s. Abb. 55). Bei Durchführung einer solchen Prüfung muss deshalb besonders auf die vorherige Probenkonditionierung geachtet werden.



**Abb. 55:**

Abhängigkeit der biaxialen Biegezugfestigkeit von der Stofffeuchte (Messwerte nach SATTLER, 1992).

### 1.7.5 Scherfestigkeit $\beta_S$

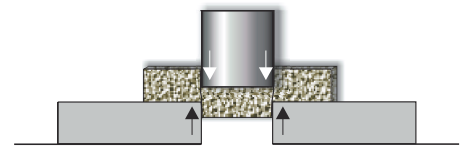
Scherbeanspruchungen treten überwiegend bei Verbundbaustoffen auf, die unterschiedliche Materialkennwerte besitzen. Sie können aber auch in Baustoffen, die nur aus einem Material bestehen, wie zum Beispiel Naturwerkstein, durch einseitige Erwärmung induziert werden. Bei dieser einseitigen Erwärmung eines Bauteils tritt eine Krümmung auf.

Die Scherfestigkeit ist die bis zum Bruch erreichte Höchstspannung. Sie wird definiert als:

$$\beta_S = \tau_S = \frac{F_{\max}}{A_S} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right]$$

mit  $F_{\max}$  = größte zu erreichende Kraft und  
 $A_S$  = Scherfläche.

Die beim Biegeversuch auftretenden Scherspannungen infolge unterschiedlicher Verformung der horizontalen Schichten werden als Schubspannungen bezeichnet.



**Abb. 56:**  
 Prüfanordnung zur Ermittlung der Scherfestigkeit.

### 1.7.6 Torsionsfestigkeit $\beta_T$

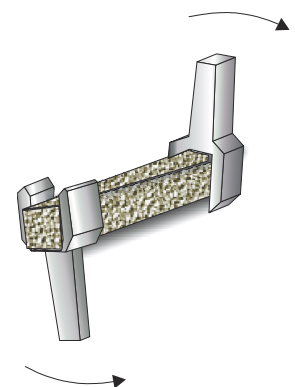
Die Ermittlung von Festigkeitskennwerten im Torsionsversuch ist nicht sehr verbreitet, da hierfür spezielle Versuchs- und Messeinrichtungen erforderlich sind und bisher keine Korrelationen der Kennwerte mit denen aus den anderen Festigkeitsprüfungen vorliegen.

Die Torsionsfestigkeit ist die höchste durch Verdrehen erreichbare Spannung. Das am Probestab angreifende Torsionsmoment  $M_t$  stellt dabei die Lastgröße dar, die Verformungsgröße ist der Verdrehwinkel  $\phi$ . Der Last-Verformungszusammenhang wird als Drehmoment-Drehwinkel-Diagramm dargestellt. Die Torsionsfestigkeit berechnet sich gemäß der Formel:

$$\beta_T = \tau_T = \frac{M_{T, \max}}{W_t} \left[ \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = \text{MPa} \right]$$

mit  $M_{T, \max}$  = größtes zu erreichendes Torsionsmoment  
 und  $W_t$  = Widerstandsmoment gegen die Torsion.

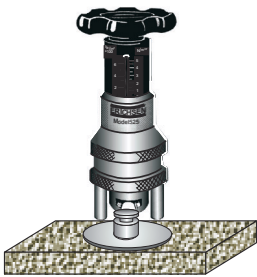
Eine Anwendung findet sich im Bereich der Betonspannstähle und im konstruktiven Metallbau (Antriebswellen, Kurbelwellen und Getriebewellen). Naturwerksteine werden so gut wie nie auf Torsionsfestigkeit hin untersucht, da kaum praktischer Bedarf existiert.



**Abb. 57:**  
 Prüfanordnung zur Ermittlung der Torsionsfestigkeit.

### 1.7.7 Haftfestigkeit $\beta_H$ , Haftzugfestigkeit $\beta_{HZ}$ und Oberflächenhaftzugfestigkeit $\beta_{OHZ}$

Als Haftfestigkeit bezeichnet man die höchste zu erreichende Haftspannung zwischen zwei Stoffen. Von besonderer Bedeutung ist dieser Festigkeitskennwert bei modernen Verbundbaustoffen, wie etwa wärmedämmenden Isolierbaustoffen, -putzen oder -anstrichen. Da die die Materialien trennenden Kräfte immer senkrecht zur Haftfläche wirken, erfolgt die Trennung durch Zugfestigkeitsversagen in der Ebene der geringsten Festigkeit. Aus diesem Grund spricht man auch von Haftzugfestigkeit.



**Abb. 58:**

Prüfanordnung zur Ermittlung der Oberflächenhaftzugfestigkeit

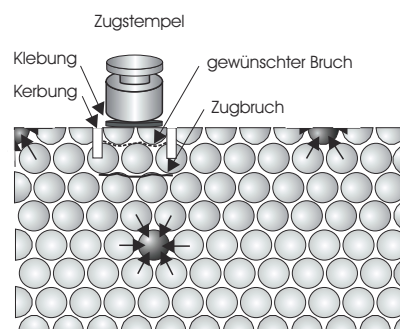
Findet die Prüfung der Festigkeit an der Oberfläche eines Einkomponentensystems statt, so spricht man auch von Oberflächenhaftzugfestigkeit.

Die Abb. 58 zeigt den Versuchsaufbau zur Ermittlung der Oberflächenhaftzugfestigkeit. Ein Metallstempel mit definiertem Durchmesser ( $d = 2 \text{ cm}$ ) wird mittels eines Methylacrylat-Klebers auf die zu untersuchende Probe geklebt. Der Kleber ist in seiner Viskosität so zu wählen, dass eine möglichst geringe Eindringtiefe erreicht wird. Bei zu niedriger Viskosität dringt der Kleber in das zu untersuchende Material ein und verursacht eine Festigung an der Oberfläche, die zu erhöhten Messwerten führt. Mit einer Hohlbohrkrone werden zum einen die über den Stempel hinausragenden Klebereste entfernt und zum anderen die horizontalen Materialbindungen entlang des Stempelrandes zerstört (s. Abb. 59).

Auf diese Weise versucht man, den Messwert auf die tatsächliche Oberflächenfestigkeit zu reduzieren. Besonderes Augenmerk ist auf die Abrissfläche und deren Tiefe, in der es zum Materialversagen kam, zu richten. Die Oberflächenhaftzugfestigkeit geht nämlich mit zunehmender Abrisstiefe in die Zugfestigkeit über.

Die bei der Ermittlung der Oberflächenhaftzugfestigkeit gewünschte homogene Trennung des Materials im Bereich der obersten Kornlagen erzielt man in den seltensten Fällen. Meist muß mit einem mehr oder weniger zu hoch liegenden Messwert gerechnet werden, der sich durch die Überlagerung des Kennwertes mit der Zugfestigkeit erklärt.

Die Abb. 59 versucht die verschiedenen Bindungszustände der Teilchen im Inneren eines Materials, wie auch an dessen Oberfläche und an dessen Kanten zu veranschaulichen. Die Pfeile stellen darin die Richtungen und die Beträge der Bindungskräfte dar. Deutlich zu erkennen ist der im Bereich der Oberfläche in etwa auf die Hälfte reduzierte Zusammenhalt der Teilchen (Oberflächenhaftzugfestigkeit) gegenüber einem Teilchen im Inneren des Materials (Zugfestigkeit). An den Ecken und Kanten reduziert sich diese Festigkeit nochmals um etwa die Hälfte. Der in diesem Bereich stark reduzierte Zusammenhalt der Teilchen dürfte der Grund dafür sein, dass die Verwitterung eines Quaders stets von dessen Ecken und Kanten her ansetzt. Auch der häufig zu Beginn der Verwitterung beobachtete Verlust von reliefartigen oder figürlichen Objektteilen dürfte auf dieses Phänomen zurückzuführen sein.



**Abb. 59**

Bindungszustände eines Teilchens im Inneren, an der Oberfläche und an den Kanten eines Materi-

## 2 Bisherige Ansätze zur Beschreibung des Quellens

“Das Quellverhalten von Stoffen ist ein komplexer Vorgang, der u.a. mehrachsig spannungsabhängig, anisotrop und zeitabhängig ist. Bisher ist kein Stoffgesetz vorhanden, das dieses Materialverhalten zufriedenstellend beschreibt oder gar vorhersagen könnte” (PIMENTELL, 1996).

Erste wissenschaftliche Beschreibungen des Phänomens und erste systematische Untersuchungen dazu finden sich zu Beginn des letzten Jahrhunderts. So beschreibt POSNJAK (1912) die Quellung von Kautschuk in verschiedenen organischen Flüssigkeiten und die Quellung von Gelatine in Wasser.

Prinzipiell bestehen zwei unterschiedliche Möglichkeiten, dieses Materialverhalten näher zu beschreiben und zu verstehen: der empirische Ansatz oder die theoretische Herleitung. Bei Ersterem wird, anhand von Messungen und deren Ergebnissen, versucht, die zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten zu erkennen und durch geeignete Variationen der Versuchsbedingungen, wie z.B. Feuchtigkeit, Temperatur und Geschwindigkeit (Versuchsdauer), zu bestimmen. Aus den Ergebnissen der unterschiedlichen Versuchsreihen wird ein all diese Abhängigkeiten enthaltendes Stoffgesetz entwickelt, das möglichst in Form einer Gleichung das Materialverhalten charakterisiert.

Bei der zweiten Vorgehensweise wird unter Zuhilfenahme von physikalischen und mathematischen Gesetzen eine entsprechende Gleichung für das Materialverhalten hergeleitet und diese über gezielte Versuche verifiziert. Das Problem besteht in der Herleitung der physikalischen Gleichung, die meist nicht ohne Annahme starker Vereinfachungen aufzustellen ist. In beiden Fällen stellen die getroffenen Annahmen und die Randbedingungen der Versuche die Grenze der Gültigkeit der Aussage dar.

### 2.1 Experimentelle Ansätze

Mitte der 70-er Jahre des 20. Jh. wurde dem Phänomen der Quellung erneut größere Aufmerksamkeit gewidmet. Durch die notwendige Erweiterung der Verkehrsnetze Straße und Schiene traten die Schwierigkeiten des Tunnelbaus in quellfähigem Gestein verstärkt ins Bewusstsein der Bauingenieure.

Anhand der von HUDER & AMBERG (1970) veröffentlichten Ergebnisse von zwei Quelldruckversuchen an Mergelproben aus der Schweiz postulierte GROB (1972) einen semilogarithmischen Zusammenhang zwischen der axialen Spannung  $\sigma$  [MPa] und der dazugehörigen Quellvolumenzunahme  $\varepsilon_{vol}$  [%].

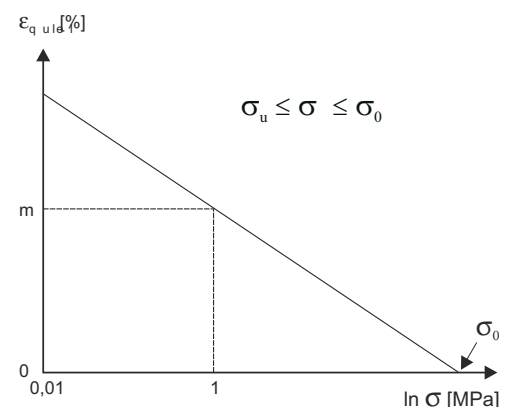
$$\varepsilon_{vol} = k - m \cdot \ln(\sigma)$$

wobei  $k$  und  $m$  Materialkonstanten sind. Die Proben waren schichtparallel in einem Ödometerring eingebaut, so dass keine radialen Dehnungen zugelassen wurden. Die Volumenzunahme kann daher mit der axialen Quelldehnung  $\varepsilon_{q,ax}$  gleichgesetzt werden. Der GROB sche Ansatz lässt sich folgendermaßen umformulieren.

$$\varepsilon_{q, ax} = -m \cdot \ln\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)$$

Darin stellt  $\sigma_0$  die axiale Grenzspannung dar, oberhalb derer kein Quellen mehr zu erwarten ist. Die Anwendung der Formel ist auf den Bereich zwischen der minimalen Spannung  $\sigma_u = 0,01$  MPa und der Grenzspannung  $\sigma_0$  beschränkt.

Der GROB sche Ansatz beschreibt den eindimensionalen Spannungszustand, die schichtparallelen Komponenten in x- und y-Richtung bleiben hierbei unberücksichtigt.



**Abb. 60:**

Semilogarithmischer Quellansatz  
(nach GROB, 1972).

WITKE & RIBLER (1976) versuchten, diesen Ansatz auf den dreidimensionalen Spannungszustand zu übertragen. Hierzu wurde angenommen, dass die Radialdrücke  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  nur von der Axialspannung  $\sigma_z$  und von der Querdehnungszahl (POISSON sche Zahl)  $\nu$  abhängig sind.

$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1 - \nu} \cdot \sigma_z$$

Das Verformungsverhalten des Materials wird als linear elastisch und isotrop betrachtet.

Die erste Spannungsinvariante ergibt sich zu:

$$I_\sigma = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \frac{1 + \nu}{1 - \nu} \sigma_z$$

Die quellbedingte Verformung wird als Volumenzunahme angenommen und mit der ersten Dehnungsinvariante  $I_\epsilon$  beschrieben:

$$I_\epsilon = \epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z$$

Da im Oedometerversuch  $\epsilon_x = \epsilon_y = 0$  ist, vereinfacht sich die Formel zu  $I_\epsilon = \epsilon_z$ .

Für die Verknüpfung der Verformung mit der Spannung wurde als Bezugsgröße die erste Spannungsinvariante und der Grobsche Ansatz gewählt.

Vereinfacht ergibt sich:

$$I_\epsilon = -m \cdot \ln \left( \frac{I_\sigma}{I_{\sigma_0}} \right)$$

KIEHL (1990) verallgemeinerte den GROBSchen Ansatz für den dreidimensionalen Spannungszustand unter Einbeziehung der Zeitabhängigkeit.

Er kam zu folgendem Ergebnis:

$$\epsilon_{\text{quell}}(t \rightarrow \infty) = -m \cdot \ln \left( \frac{\sigma_{01}}{\sigma} \right), \text{ für } (t \rightarrow \infty)$$

OVERBECK (1981) schlug für die zeitliche Entwicklung der Quellverformung folgende Exponentialfunktion (Sättigungsfunktion) vor:

$$\epsilon_{\text{quell}} = \epsilon_\infty \cdot (1 - e^{-bt}) \quad \text{wobei } \epsilon_\infty \text{ dem Endwert der Quellung entspricht und } b \text{ eine Materialkonstante ist.}$$

Alle bisher bekannten Ansätze beruhen letztlich auf denselben Annahmen und Voraussetzungen und ähneln sich sehr. Aufgrund der Oedometerversuche reduzieren sich fast alle Ansätze auf den eindimensionalen Spannungszustand.

## 2.2 Theoretische Ansätze

Die bisherigen Ansätze zur Beschreibung des Quellvorgangs beziehen sich einzig auf die osmotische Quellung (s. Abschn. 1.3.3) und basieren alle auf dem Modell der elektrischen Doppelschicht (s. Abb. 16). Dieses Modell wurde in den 20-er Jahren des letzten Jahrhunderts in der Kolloid-Chemie zur Beschreibung von Doppelschichten in Lösungen entwickelt. Anfang der 50-er Jahre entwickelten DERJAGUIN, LANDAU, VERWEY und OVERBEEK eine Theorie (DLVO-Theorie) zur Erklärung der Stabilität von Dispersionen. Ihre Theorie basiert auf dem Gleichgewicht zwischen den elektrisch abstoßenden Kräften und den van-der-Waalschen Anziehungskräften benachbarter Partikel. Das Modell beschreibt den eindimensionalen Fall. Ihm zur Folge hängt der Quelldruck vor allem von der Art und Menge der Tonminerale, ihrer Oberflächenladung und der Wertigkeit der Kationen in der Doppelschicht ab. Der Quelldruck berechnet sich gemäß der Formel:

$$p = 2 n k T (\cos u - 1)$$

mit

$p$  = osmotischer Druck (Quelldruck),

$n$  = Ionenkonzentration weit weg von der Tonoberfläche,

$k$  = BOLZMANN sche Konstante,

$T$  = Temperatur in Grad Kelvin und

$u$  = elektrisches Potential in der Mittelebene zwischen den Teilchen.



Die Ionenkonzentration ( $n$ ) im Porenwasser des Gesteins und die Temperatur ( $T$ ) lassen sich direkt messen. Das elektrische Potential ( $u$ ) muß aber berechnet werden.

Zur Berechnung von  $u$  sind folgende mineralogische Kennwerte zu bestimmen:

- Wertigkeit der Kationen in der Doppelschicht (Ionen-Chromatographie),
- Ionenkonzentration im Porenwasser der Probe (Ionen-Chromatographie),
- mineralogische Zusammensetzung der Probe (Röntgen-Diffraktometrie) und
- spezifische Oberflächenladung der Tonteilchen (Kationen-Austausch-Kapazität).

Zusätzlich müssen für die Berechnung des halben Teilchenabstandes ( $d$ )

- der Wassergehalt der gesättigten Probe (Gewichts-Messung) und
- die spezifische Oberfläche der Probe (Stickstoffadsorption, BET für die äußere und Glycerinadsorption für die innere Oberfläche) ermittelt werden.

Der enorme messtechnische Laboraufwand zur Berechnung des Quelldruckes ist im Gegensatz zur direkten Messung nur in Ausnahmefällen zu rechtfertigen. Dies ist der Grund dafür, dass diese Methode nicht sehr häufig zur Anwendung kam und kommt.

### 2.3 Änderung der Festigkeitskennwerte

HIRSCHWALD (1908) führte in seiner Abhandlung über “Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit” einen so genannten Erweichungskoeffizienten ( $\eta$ ) ein. Er definierte ihn als den Quotienten aus der Zugfestigkeit im wassergesättigten Zustand zur Zugfestigkeit im trockenen Zustand.

$$\eta = \frac{\beta_{z, \text{ gesättigt}}}{\beta_{z, \text{ trocken}}}$$

Dieser Faktor ist immer  $\leq 1$ . Seine “Erweichungsversuche” führte er an verschiedenen Sandsteinen durch und klassifizierte deren Bindemittel anhand ihrer “Erweichungsfähigkeit”. HIRSCHWALD führte den Festigkeitsverlust der Gesteine einzig auf die Erweichung des Bindemittels zurück. Seiner Meinung nach bleiben im Gegensatz dazu die mineralischen Komponenten der Sandsteine (Quarz, Feldspat und Gesteinsbruchstücke) von dieser Erweichung unberührt. Der von ihm festgestellte Verlust an Festigkeit der wassergesättigten Proben deckt sich mit den Ergebnissen der Untersuchungen von PESCHEL, SATTLER und von MÖLLER.

Während PESCHEL (1977) eine Abnahme der einaxialen Druckfestigkeit seiner Sandsteinproben von  $\sim 50\%$  bei Wassersättigung feststellte (s. Abb. 40), kam SATTLER (1992) auf eine Verminderung der biaxialen Biegezugfestigkeit von bis zu  $80\%$  mit zunehmender Stofffeuchte (s. Abb. 55). Seine Untersuchungen beziehen sich auf den Sander Schilfsandstein. MÖLLER (1993) untersuchte die Festigkeitsabnahme des selben Sandsteins im wassergesättigten Zustand anhand von Zugversuchen und stellte eine Abnahme der Zugfestigkeit von  $\sim 75\%$  fest (s. Abb. 49). Beide Untersuchungen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung ihrer Resultate.

Neuere Messungen an diagenetisch verfestigten Tonsteinen haben sogar Festigkeitsverluste von bis zu  $90\%$  ergeben (PIMENTELL, 1996). Pimentell untersuchte die Abnahme der einaxialen Druckfestigkeit, die Veränderung des Reibungsbeiwertes und die Verminderung der Kohäsion an zylindrischen Proben (Durchmesser 70 mm, Höhe 136,5 mm,  $h/d = 1,95$ ). Zusätzlich bestimmte er die elastischen Kennwerte E-Modul (Entlastungsmodul) und V-Modul (Verformungsmodul) sowie die POISSONZahl. Beide Moduli zeigen mit zunehmender Stofffeuchte eine Abnahme ihrer Werte in der Größenordnung der Festigkeitskennwerte (bis zu  $90\%$ ).

**Tab. 6:**

Erweichungskoeffizienten von Sandsteinen (nach HIRSCHWALD, 1908).

Erweichungs- koeffizient	Qualitätsklasse des Bindemittels
0,90	I
0,65	II
0,55	III
0,45	IV
0,40	V
0,30	VI

### 3 Stand der Versuchstechnik

Der Quelldruck wird durch eine Vielzahl von Einflussgrößen und Randbedingungen beeinflusst (PIMENTELL, 1996). Grundsätzlich kommen zur Bestimmung des Quellens und Schwindens und der daraus resultierenden Spannungen und Drücke in-situ-Messungen und Laboruntersuchungen in Frage. Wegen der äußerst schwierig zu definierenden Randbedingungen bei in-situ-Messungen und der damit verbundenen Unschärfe der Messwerte werden heute grundsätzlich Laboruntersuchungen zur Bestimmung des Quellverhaltens durchgeführt. Weitere Nachteile der in-situ-Messung sind die sehr hohen Ausführungskosten und die meist nicht gegebene Möglichkeit der Messwiederholung. Aus diesen Gründen wird die vor-Ort-Messung meist nur zur Überprüfung der im Labor postulierten Gesetzmäßigkeit verwendet. Die gängigen Laboruntersuchungen lassen sich in mikroanalytische und makroanalytische Methoden (nach der für die Untersuchung notwendigen Probenmenge) unterteilen.

Die **mikroanalytischen Untersuchungsmethoden** liefert die Mineralogie. Sie geben Auskunft über die mineralogische Zusammensetzung der Gesteine und deren Gefüge. Je nach Partikelgröße handelt es sich dabei um optische oder elektronenmikroskopische Untersuchungen. Die Röntgendiffraktometrie (X-RD) liefert Aussagen zu den einzelnen Mineralien und klärt deren Struktur. Prinzipiell ist die Quantifizierung der mineralogischen Zusammensetzung eines Gesteins mit ihr möglich. Die chemischen Untersuchungen beschränken sich in der Regel auf die Bestimmung der Kationenaustauschkapazität, der Glykolabsorption und der Methylenblauadsorption. Da alle diese Methoden materialcharakteristische Werte liefern, lassen sich dadurch die einzelnen Tonminerale bestimmen. Die thermischen Untersuchungsmethoden, die Thermogravimetrie und die Differentialthermoanalyse (DTA-TG) nutzen die Eigenschaft der Tonminerale, bei bestimmten Temperaturen Wassermoleküle oder Hydroxylionen abzugeben. Da diese Abgabe stoffspezifisch erfolgt, lässt sich hierdurch auch die Zusammensetzung der Tone bestimmen.

Die **makroanalytischen Untersuchungsmethoden** erfassen das Spannungs-Dehnungsverhalten der Gesteine unter definierten Randbedingungen. Hierbei wird versucht, die zu prüfende Probe in ihrem natürlichen Zustand zu belassen. Die Versuche sind zerstörungsfrei (sieht man von der Probenentnahme ab) und jederzeit wiederholbar. Wegen des anisotropen Quellverhaltens der Proben muss bei der Vorbereitung, beim Einbau und der anschließenden Prüfung die Lage der Schichtung berücksichtigt werden. Als Fluid wird in der Regel entmineralisiertes Wasser verwendet.

#### 3.1 Uniaxiale Quellversuche

Das Ausmaß der Quellung wird entscheidend durch den Spannungszustand der Probe beeinflusst. Die maximalen Quelldrücke treten bei allseitig behinderter Dehnung auf. Lässt man der Probe einen bestimmten Dehnbetrag, um den sie ungehindert quellen kann, bis sie auf Widerstand stößt, so reduzieren sich dadurch die auftretenden Spannungen und Quelldrücke erheblich. Diese Erkenntnis macht man sich im konstruktiven Baubereich in Form von Dehnungsfugen zunutze (s. Abb. 65).

Basierend auf obigen Überlegungen wurden Versuche zur Bestimmung der maximalen Quelldehnung, des maximalen Quelldrucks und des Spannungsdehnungsverhaltens konzipiert. Da sich die Versuchstechnik noch in der Entwicklungsphase befindet, fehlen allgemein gültige Normen, so dass die derzeit vorliegenden Empfehlungen nur vorläufigen Charakter besitzen. Änderungen oder Ergänzungen in der Versuchsdurchführung sind nicht nur möglich, sondern in bestimmten Fällen sogar notwendig. Unverzichtbar ist aber in diesen Fällen die sorgfältige und detaillierte Beschreibung der Änderungen in der Versuchsdurchführung.

### 3.1.1 Quellhebungsversuch

REINKE (1879) beschreibt erstmals einen **Oedometer** genannten Apparat. Er beschäftigte sich mit der Erforschung von Laminaria (Meeresalgen).

In einem fest montierten, massiven Metallzylinder war eine mehrere Zentimeter lange Bohrung vorhanden, in der sich ein gut passender Metallstempel hin und her bewegen ließ. Der Zylinder hatte außerdem noch eine seitliche Bohrung, die sich in der Mitte mit der ersten kreuzte. In diese Bohrung passte ein verschraubbares Verschlussstück. Die quellende Substanz wurde über diese Bohrung in den Metallzylinder gebracht. Der Metallstempel enthielt eine Anzahl von feinen, senkrechten Bohrungen. Durch diese konnte die Flüssigkeit (Wasser) zum darunter liegenden Prüfkörper gelangen. Der Stempel war am oberen Ende mit einer Platte versehen, auf die Gewichte gelegt werden konnten und die über eine Hebelvorrichtung mit einer Skala verbunden war. Nach Eichung der Skala konnte über die Hebung der Gewichtsplatte die Volumenvergrößerung des quellenden Körpers abgelesen werden.

Ein entsprechendes Laminaria-Plättchen wurde unter den Stempel gelegt. Auf die Belastungsplatte wurde das schwerste zur Belastung dienende Gewicht gelegt und dann Wasser auf die äußere Seite des Stempels gegossen. Das Wasser drang nun durch die Löcher des Stempels, und das Laminaria-Plättchen begann zu quellen, wobei es einen Druck auf den Stempel ausübte und diesen anhub. Nach einer gewissen Zeit stellt sich zwischen dem Quelldruck und der entgegengesetzt wirkenden Gewichtskraft ein Gleichgewichtszustand ein. Anschließend wurde der Versuch mit einem kleineren Belastungsgewicht erneut durchgeführt. Auf diese Weise bestimmte man zwei Kenngrößen: die aufgenommene Menge Flüssigkeit bei der definierten Vorlast des Versuches und die dazugehörige Quellhebung.

POSNJAK (1912) stellte die Methode von REINKE nach und konstruierte eine identische Apparatur (s. Abb. 61). Sein Untersuchungsobjekt war Kautschuk. Bereits bei den Vorversuchen musste er feststellen, dass der Kautschuk durch die Wasseraufnahme so elastisch wurde, dass er durch die Bohrungen des Stempels und an ihm vorbei gepresst wurde. Verwertbare Messungen der Quellhebung kamen auf diese Weise nicht zustande.

Es mußte daher nach einer anderen, geeigneteren Ausführungsmethode gesucht werden, wobei das Prinzip der Methode erhalten bleiben sollte.

Die Lösung wurde in der Verwendung von semipermeablen Tongefäßen gefunden. Diese lassen das Wasser von außen her kommend durch die halbdurchlässige Membran, halten aber gleichzeitig den quellfähigen Stoff innerhalb der Tonzelle. Der Versuchsaufbau bestand aus folgenden Teilen: dem Quellungsrohr, einem etwa 10 cm langen, senkrecht stehenden Glasrohr, das mittels eines

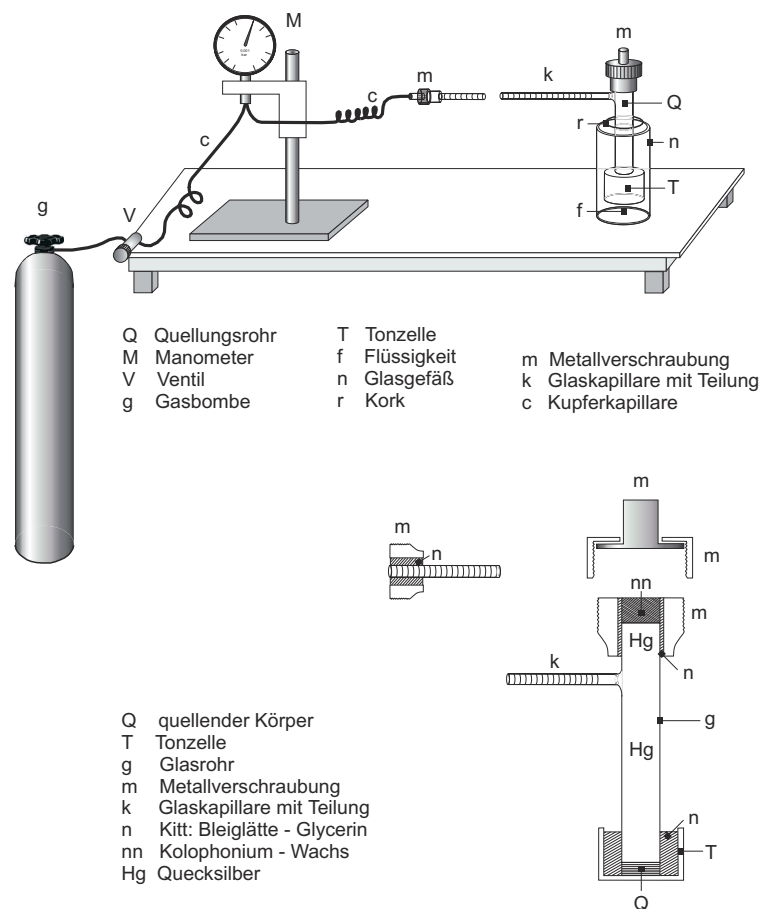


Abb. 61:

Quellmessers und Quellungsrohr (nach POSNJAK, 1912).

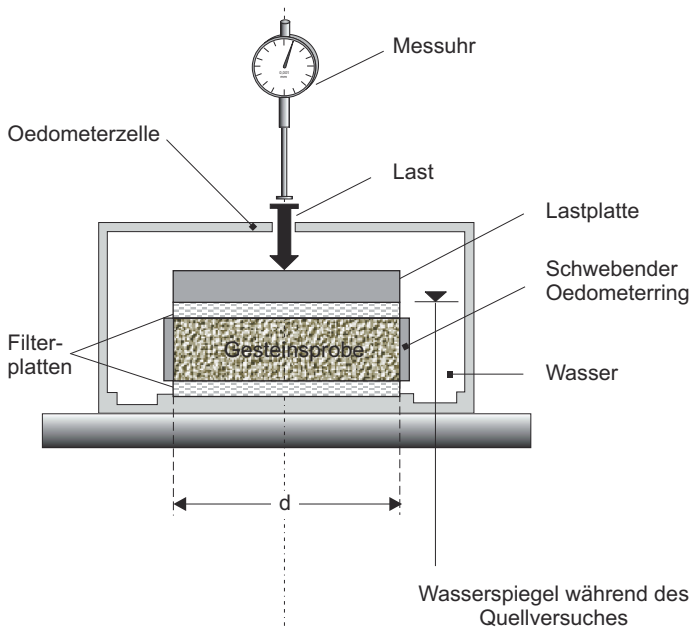
Manometers und eines Ventils mit einer Gasbombe verbunden war. Das Glasrohr trug an seinem unteren Ende eine etwa 25 mm breite und 15 mm hohe Tonzelle und stand direkt auf dem Boden der Zelle. Das zu untersuchende Material legte man in das senkrecht stehende Rohr und füllte dieses anschließend mit Quecksilber.

Die Tonzelle wurde dann in Wasser gebracht, und die Bewässerung der Probe erfolgte nun von unten her über den Boden der Tonzelle.

Die ganze Methode gründete darauf, dass durch den quellenden Körper Quecksilber aus dem stehenden Rohr in die Glaskapillare gedrückt wurde. Die Volumenzunahme des Materials konnte direkt aus der Verschiebung des Quecksilberfadens in der Glaskapillare abgeleitet werden.

Durch Öffnen des Ventils an der Gasbombe konnte zusätzlich, vor Beginn des Versuches, ein definierter Druck auf das quellende Material ausgeübt werden. Durch die Verwendung von Quecksilber war diese Versuchsanordnung besonders sensitiv für Temperaturänderungen. Es musste daher der Temperaturverlauf während des Versuches minutiös verfolgt werden.

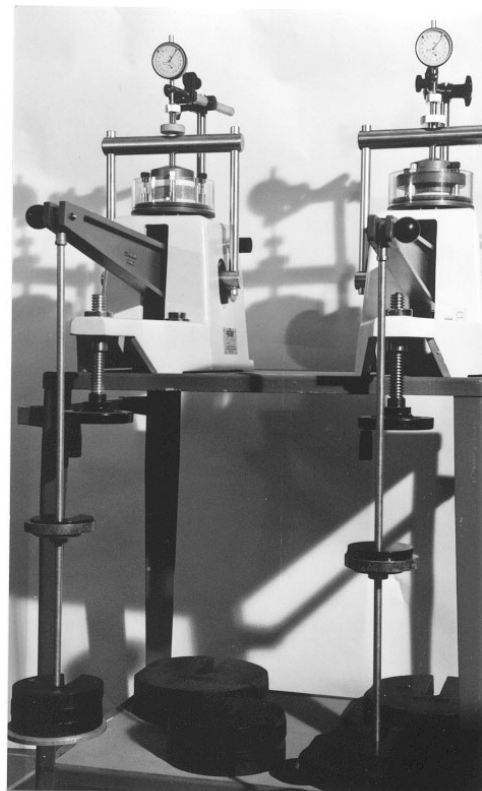
Die Anfangs- und die Endablesung des Quecksilberfadens mussten bei identischer Temperatur erfolgen.



**Abb. 62:**

Skizze der Oedometerzelle.

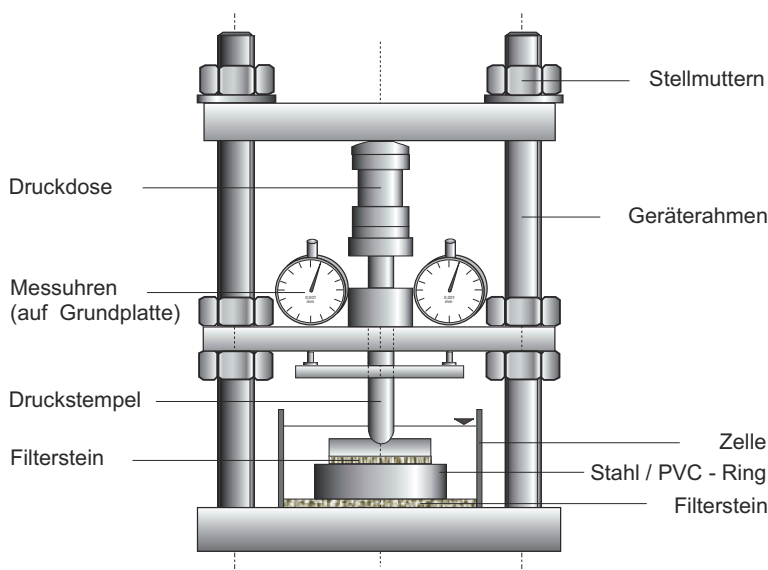
Das Prinzip dieser Methode ist bis heute unverändert geblieben. HUDER & AMBERG (1970) modernisierten die Versuchsanordnung zu dem heute standardmäßig verwendeten Oedometer und schlugen die beiden folgenden Versuchsdurchführungen vor. Die Abb. 62 zeigt den Versuchsaufbau, wie er in der Bodenmechanik zur Bestimmung des Quelldrucks zur Anwendung kommt. Die Oedometerzelle wird derart in das Belastungsgerät (Oedometer) eingebaut, dass verschiedene Belastungszustände des quellenden Körpers vor dem Versuchsbeginn realisiert werden können. Dies geschieht durch Auflegen von Gewichten, die ihre Last über einen Hebelarm auf den Prüfkörper übertragen. Die zu prüfende Bodenprobe wird passgenau in den Odometerring eingearbeitet. Dieser ist aus einem korrosionsbeständigen, ausreichend steifen Material gearbeitet und verhindert die Radialdehnung der Probe. Der Prüfkörper mit dem Ring wird zwischen zwei Filterplatten gebracht. Die Filterplatten müssen gegenüber der Quellflüssigkeit ausreichend durchlässig sein und dürfen ihrerseits keine Volumenzunahme infolge der Fluidaufnahme zeigen.



**Abb. 63:**

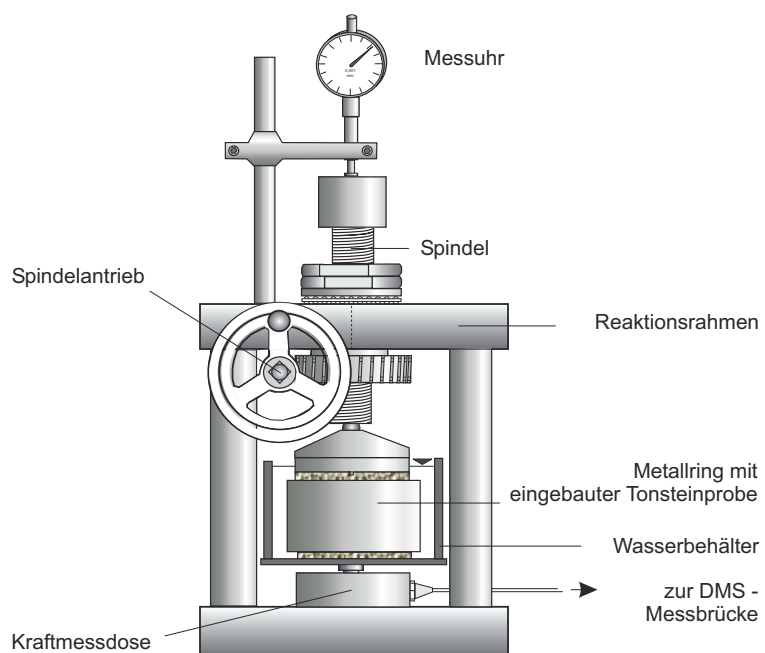
Das Oedometergerät.



**Abb. 66:**

Versuchsapparatur zur Ermittlung des maximalen Quelldruckes (nach MADSEN, 1976).

halb eine spezielle Versuchsanordnung für diesen Belastungsfall (s. Abb. 66). Die Probe wird in einem steifen Belastungsrahmen (zwei Säulen) mittels eines über Feststellmuttern zu justierenden Querbalkens eingebaut und bewässert. Die zeitliche Entwicklung des Quelldruckes wird mit einer elektrischen Kraftmessdose erfasst. Eventuelle Verformungen des Belastungsrahmens durch den sich entwickelten Quelldruck der Probe werden durch zwei mechanische Messuhren festgestellt und können durch Nachziehen der Stellmuttern des Reaktionsrahmens kompensiert werden. Die Genauigkeit der Nachregelung wird dabei von der Steigung der Gewindgänge vorgegeben. FECKER (1980) verbesserte die MADSENSche Versuchsanordnung dahingehend, dass er einen Viersäulen-Reaktionsrahmen verwendete. Durch diesen Rahmen wird die Steifigkeit der Apparatur entscheidend verbessert, so dass wesentlich höhere Quelldrucke gemessen werden können (s. Abb. 67). Zur Konstanthaltung der Last während der Vorbelastungsphase und zur exakten Ermittlung des Quelldruckes ist aber nach wie vor ein geringes Nachregeln über den Spindeltrieb erforderlich.

**Abb. 67:**

Versuchsapparatur für Quelldruckversuche (nach FECKER, 1980).

### 3.1.2 Quelldruckversuch

Prinzipiell ist das Oedometergerät zur Durchführung solcher Versuche geeignet. Die Messung des Quelldruckes erfolgt dabei aber indirekt. Die über die Messuhr erfasste Längenänderung wird unter Zuhilfenahme von Gewichten zurückgestellt. Dabei werden solange geeignete Gewichte auf die Probe gebracht, bis die Messuhr ihren Ausgangswert erreicht. Die Längenänderung der Probe ist nun Null, der Quelldruck der Probe entspricht der Last, die notwendig war, die Quelldehnung zurückzustellen. Über den Querschnitt der Probe gelangt man zum Quelldruck pro Flächeneinheit. Diese Versuchsanordnung bezeichnet man als weggesteuerten Quellversuch.

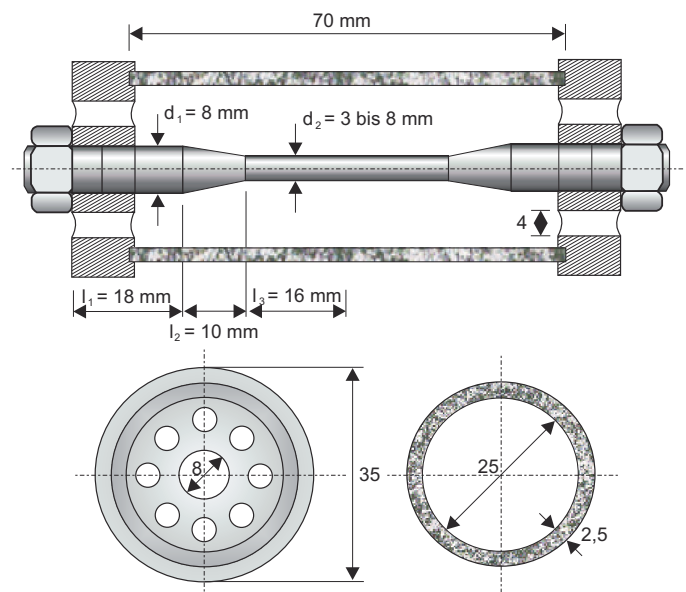
HUDER & AMBERG (1970) schlugen jedoch zur Durchführung ihres Versuches eine kraftgesteuerte Versuchsanordnung mit schrittweiser Entlastung der Probe vor.

MADSEN (1976) entwickelte deshalb

BEDDOE & LIPPOK (1995) beschreiben einen vollkommen anderen Weg zur Ermittlung des Quelldruckes von Zementstein. Aus Frischbeton wurden Hohlzylinder (Außendurchmesser 30 mm, Innendurchmesser 25 mm und Länge 70 mm) gegossen (s. Abb. 68). Diese wurden in eine eigens für diesen Versuch konstruierte Druckvorrichtung eingespannt und anschließend in Wasser gebracht. Dabei wurden die Hohlzylinder zwischen je zwei, mit Bewässerungslöchern versehenen Abdeckplatten fest am Zugstab verschraubt. Der sich aufbauende Quelldruck des Zementsteins dehnt nun den aus V2A hergestellten Zugstab. Befindet sich der Quelldruck des Betons mit der entgegenwirkenden Zugkraft, die nötig ist, den Stab zu dehnen, im Gleichgewicht, so kann bei bekanntem Dehnungskoeffizienten des Zugstabes und der Längenänderung des Stabes die für diese Dehnung notwendige Kraft errechnet werden. Diese ist identisch mit dem Quelldruck der Probe. Die verschiedenen Dehnungskoeffizienten der einzelnen Zugstäbe wurden zuvor mittels einer Universalprüfmaschine bestimmt. Durch die Verwendung verschiedener Zugstäbe (unterschiedliche Durchmesser) können mit dieser Versuchsanordnung Drucke von bis zu 20 MPa gemessen werden.

Einige Schwierigkeiten bereitet die Realisierung der möglichst immer identischen Ausgangsbedingungen. So ist es zwar möglich, die Verschraubungen der Haltemuttern an den Enden des Zugstabes mittels eines Drehmomentschlüssels immer gleich fest anzuziehen. Die Bestimmung der dadurch auf die Probe wirkenden Vorbelastung ist aber, zumindest im unteren Lastbereich, nur sehr ungenau möglich. Die Versuche wurden deshalb von BEDDOE & LIPPOK mit Vorlasten von  $\geq 2$  MPa durchgeführt.

Der wohl entscheidendste Nachteil des Verfahrens liegt in der präzisen Herstellung der Hohlzylinder. So ist es zwar möglich, die benötigten Betonzyylinder im Gussverfahren herzustellen. Entsprechend genau gearbeitete Hohlzylinder aus Naturstein sind aber nur mit unverhältnismäßig hohem Arbeitsaufwand zu realisieren. Die häufig auftretenden Inhomogenitäten des Materials Naturwerkstein erschweren zudem die Herstellung der Prüfkörper. Quelldruckprüfungen an Ton- oder Mergelproben mit dieser Form sind wegen der Fließfähigkeit des Materials bei Wasseraufnahme nicht denkbar.



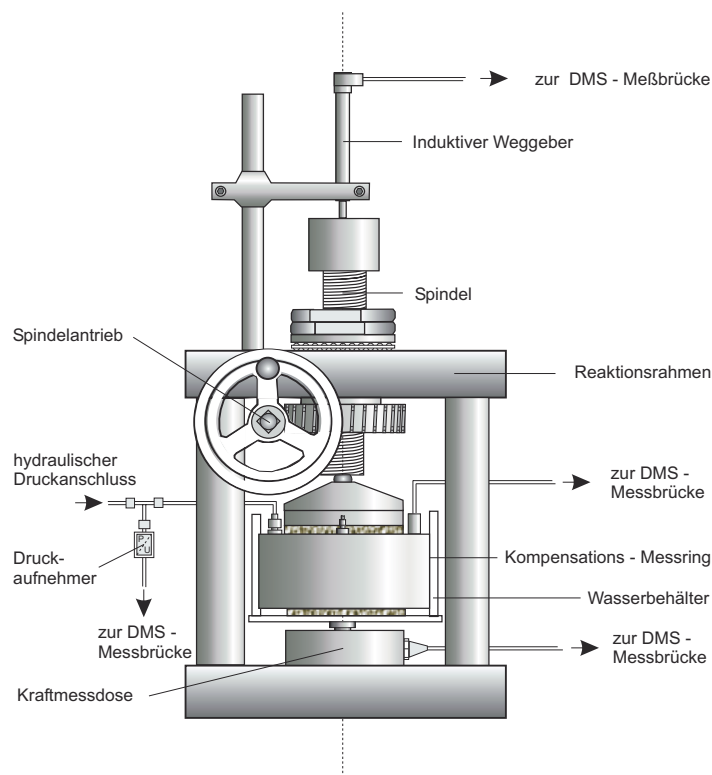
**Abb. 68:**

Skizze der Quelldruckmesszelle (nach BEDDOE & LIPPOK, 1995).

### 3.2 Biaxiale Quellversuche

Während sich die bislang beschriebenen Messmethoden vorwiegend mit der Bestimmung der hygrischen Dehnung bzw. des Quelldrucks in nur eine Raumrichtung beschäftigen, gibt es in jüngster Zeit Überlegungen, dieses Phänomen zwei- bzw. dreidimensional zu betrachten und zu erklären.

PIMENTEL (1996) kombinierte einen Messring für so genannte Seitendruckmessungen mit dem von FECKER (1980) entwickelten Viersäulen-Reaktionsrahmen. Der von OFER (1981) entwickelte Oedometerring arbeitet nach dem Kompensationsprinzip (TQV-Ring) auf hydraulischer Basis. Der Ring besteht aus einer kreisförmigen Druckkammer mit einer Innenwandstärke von 0,6 mm (Membranwand), einem lichten Innendurchmesser von 70 mm und einer Nutzhöhe von 40 mm, gearbeitet aus hochbeständigem V4A-Stahl. Auf der Membranwand sind Dehnmessstreifen (DMS) für die Erfassung der Radialverformungen angebracht.



**Abb. 69:**

Skizze des "Triaxialquelldruckmessgerätes" (nach PIMENTEL, 1996).

Die Membranwand wird mittels zweier Flansche in den aus massivem Edelstahl gearbeiteten Belastungsring angebaut. Am oberen Flansch befinden sich der elektrische Anschluss für die DMS, ein Entlüftungsventil sowie der hydraulische Anschluss der Druckkammer. Die Druckerzeugung erfolgt hydraulisch. Mit diesem Messgerät war es erstmals möglich, den Axial- und den Radialdruck derselben Probe in einem einzigen Versuchsdurchgang zu messen. Da bei der Probenvorbereitung mit extremer Sorgfalt und Genauigkeit auf die Probenorientierung und damit auf die horizontale Lage der Schichtung geachtet wurde, bezeichnete PIMENTEL sein Messgerät als Triaxialquelldruckmessgerät mit  $\sigma_1 = \sigma_2$  und  $\sigma_2 \neq \sigma_3$

Da dieser Versuch aber nur einen ganz speziellen Fall des allgemeinen Triaxialversuches ( $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ ) repräsentiert, sollte man, der Eindeutigkeit halber, besser die Bezeichnung "biaxial" wählen.

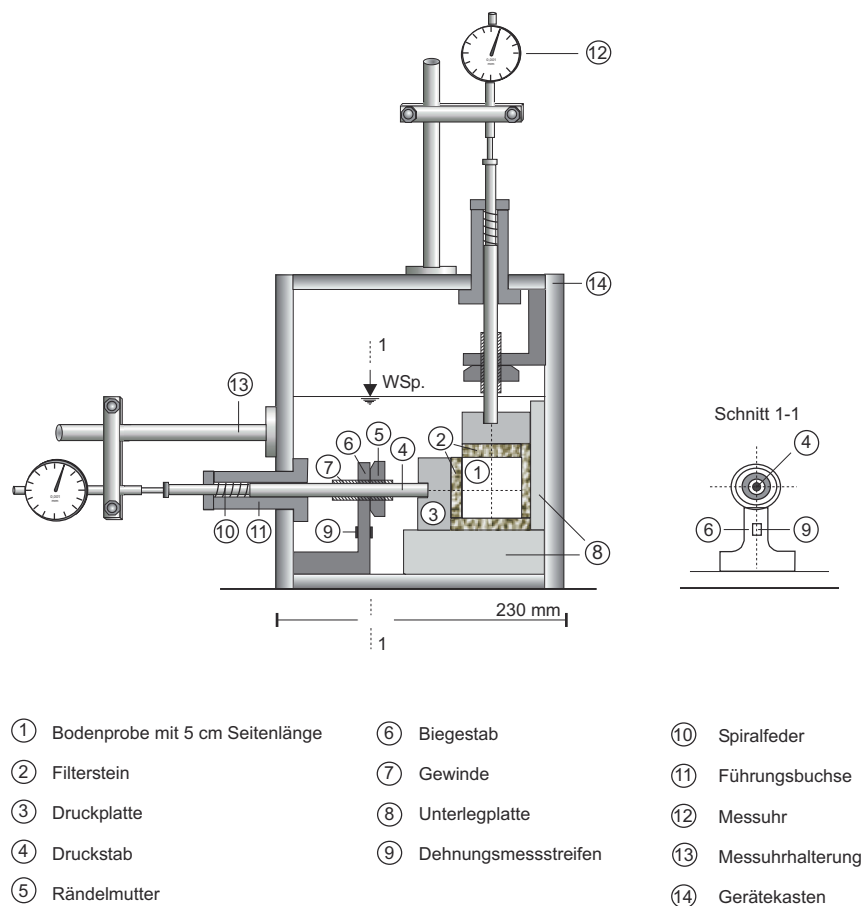


### 3.3 Triaxiale Quellversuche

PREGEL ET AL. (1980) beschreiben erstmals eine als echtes Triaxialquelldruckversuchs-Gerät anerkannte Apparatur. Als geometrische Form für ihre Prüfkörper wählten sie den Würfel.

Probekörper zwischen 3 und 5 cm Kantenlänge werden auf allen Seitenflächen mit Filtersteinen versehen und in eine Ecke eines ebenfalls würfelförmigen, steifen Rahmens eingebaut. Auf jede der drei freistehenden Filterplatten wird eine Druckplatte angelegt, die über einen Druckstab beaufschlagt werden kann. Der Druckstab ist entweder vollkommen frei beweglich (unbehinderte Quellung) oder wird mittels einer Feststellschraube gänzlich blockiert (Quelldruckversuch). Bei feststehendem Druckstab wird die quellende Probe den Biegestab, ihrem Quelldruck entsprechend, zurückdrücken. Diese Biegung wird durch die am Biegestab applizierten Dehnmessstreifen erfasst. Durch vorherige Eichung der zur Biegung notwendigen Kraft lässt sich nun der Quelldruck ermitteln.

Die Abb. 70 zeigt einen vertikalen Schnitt durch das Gerät.



**Abb. 70:**

Schema des Triaxialquellgerätes (nach PREGEL ET AL., 1980 ).



### III Eigene Untersuchungen

#### 1 Probenmaterial

##### 1.1 Die untersuchten Sandsteine

Zur genaueren Untersuchung wurden sechs Sandsteine ausgewählt. Dabei wurde zum einen auf eine möglichst breite Streuung der mineralogischen und mechanischen Eigenschaften der Gesteine geachtet, zum anderen ein besonderes Augenmerk auf deren Quellverhalten gerichtet. So kamen hauptsächlich Gesteine mit extrem großen Quell- und Schwindbeträgen zur näheren Untersuchung, deren Schadensbilder überwiegend den Quell- und Schwindeigenschaften zugeschrieben werden. Als Referenzmaterial wurde der "Obernkirchner Sandstein" in die Untersuchungen miteinbezogen, der in Bezug auf Quellen und Schwinden als weitestgehend unempfindlich angesehen wird. Die Tabelle 7 zeigt die untersuchten Sandsteine, die Tafel 1 deren regionale sowie stratigraphische Zuordnung.

**Tab. 7:**

Die untersuchten Sandsteine mit deren vorherrschender Bindungsart.

Sandstein	Geol. Formation	Bindungsart
COTTAER	Kreide (Turon)	tonig
EBENHEIDER	Trias (Buntsandstein)	tonig
MAULBRONNER	Trias (Keuper)	kieselig-tonig
OBERNKIRCHNER	Kreide (Wealden)	kieselig
RORSCHACHER	Tertiär	karbonat.-tonig
SANDER	Trias (Keuper)	tonig

##### 1.1.1 Gesteinsbeschreibung

Der **COTTAER** Sandstein, eine der zahlreichen Varietäten des Elbsandsteins, ist ein weicher, heller, durch toniges Zwischenmittel verkitteter Sandstein. Er besteht hauptsächlich aus Quarz-Partikeln ( $\varnothing$  0,2 - 0,4 mm) mit wenig Akzessorien. Seine Farbe variiert von nahezu reinweiß über grau und gelblich bis hin zu bräunlich. Durch eingelagerte Schlieren und wellige Häutchen aus kohligter Substanz wirkt das Gestein marmoriert. Besonders häufig wurde er wegen seiner geringen Härte und dadurch einfachen Bearbeitbarkeit für Bildhauerei-Arbeiten verwendet. Große Verbreitung findet er im Raum Dresden.

Der **EBENHEIDER** Sandstein, ein Vertreter der Roten Mainsandsteine, ist ein feinkörniger, sehr homogener Quarzsandstein ( $\varnothing$  der Quarzkörner im Mittel um 0,15 mm). Seine Farbe reicht von hellgrau über rotgrau zu hellrot und weiter bis zu dunkelrot. Einlagerungen von dunkleren Pflanzenhäckseln lassen z.T. eine wolkige Struktur entstehen. Die Bindung der Mineralkörner erfolgt neben den Korn-zu-Korn-Kontakten über tonig-ferritische Beläge um die Einzelkörner (Kornkontakte über ca. 50 % der Kornumfanglinie). Durch die lagenweise schichtparallel angereicherten Muskovitplättchen lässt sich die Schichtung megaskopisch erkennen (feine Parallelschichtung). Für weiterführende Informationen siehe W.-D. GRIMM, 1990, Gestein Nr. 086.

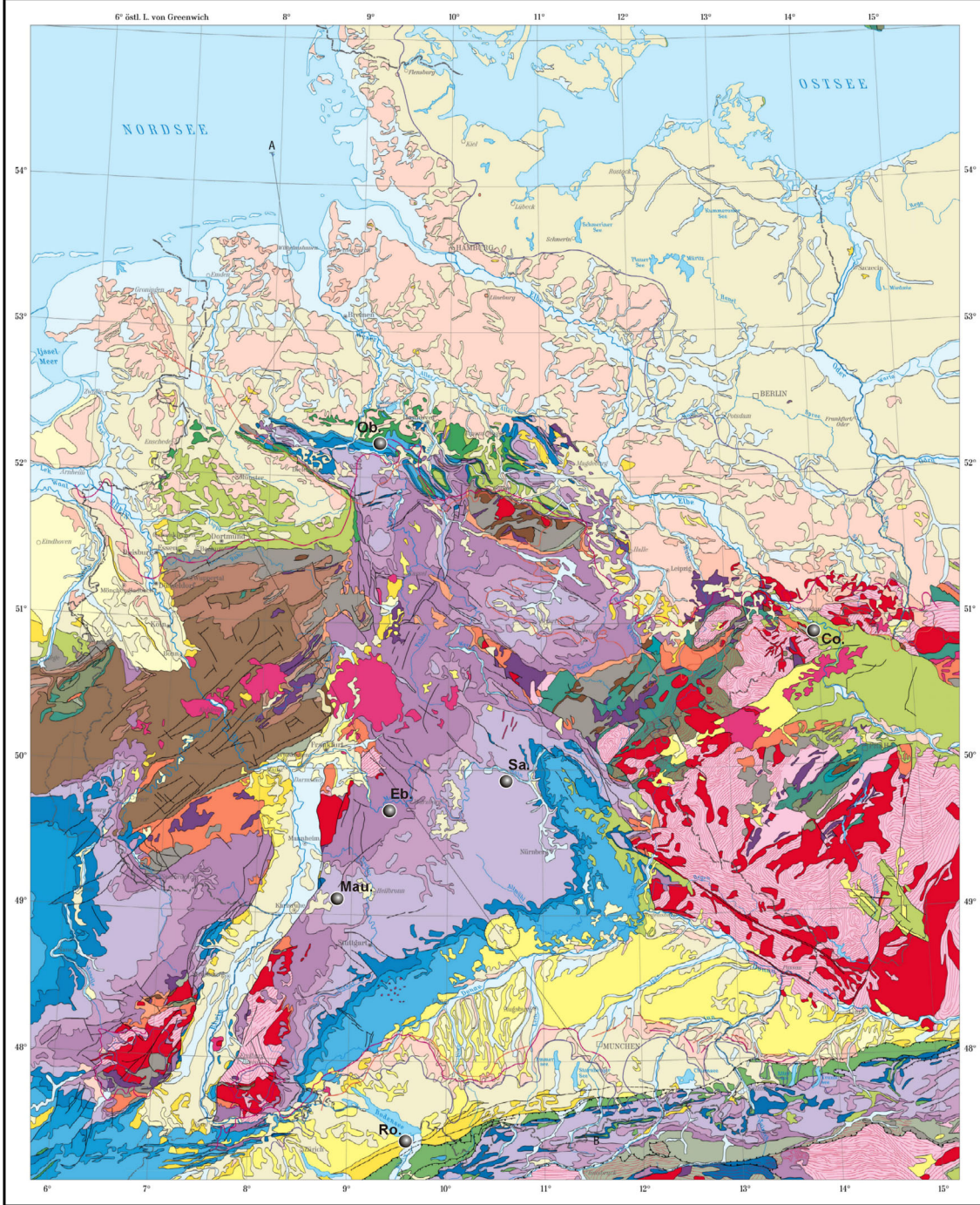
Der **MAULBRONNER** Sandstein ist ein fein- bis mittelkörniger (mittlere Korngröße 0,12 mm), feldspatführender Sandstein der schwäbischen Schilfsandsteinformation. Charakteristisch ist sein hoher Anteil (bis 50 %) an Gesteinsbruchstücken. Am verbreitetsten ist die violette Varietät, untergeordnet kommen grüngraue, gelbe und gelb geaderte Varietäten vor. Außer der homogen erscheinenden gelben Varietät ist allen anderen Varietäten eine charakteristische Wolkung gemeinsam. Diese Strukturen werden auf Rippelmarken zurückgeführt. Die Bindung (bis 70 % der Kornumfanglinie) erfolgt neben tonig-ferritischen Säumen (durch Eisenoxid gefärbte Illit- und Chloritlagen) auch über kieselige, sekundäre Anwachssäume. Die feine Parallelschichtung ist durch die Einregelung der Hellglimmer gut erkennbar. Für weiterführende Informationen siehe W.-D. GRIMM, 1990, Gestein Nr. 097.

# Geowissenschaftliche Karte der Bundesrepublik Deutschland 1 : 2 000 000

## Geologie

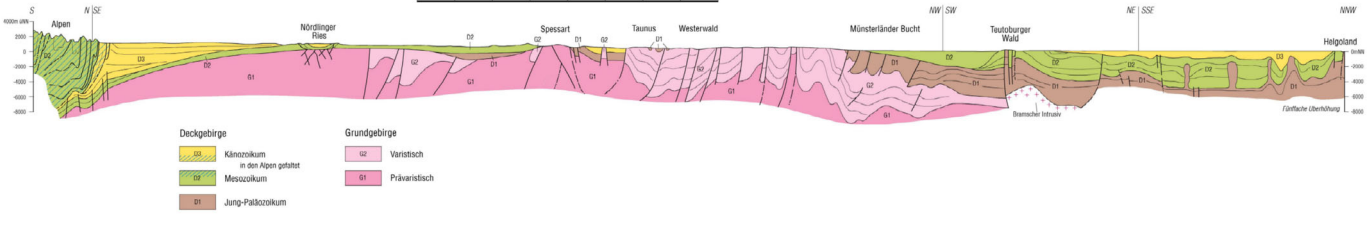
Wissenschaftliche Bearbeitung: L. LAHNER, M. TOŁOCZYKI

BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe



- Sedimentgesteine (Alter)**
- KÄNOZOIKUM**
    - Holozän, Postglacial
    - Weichsel-Würm-Kaltzeit
    - Saale-Riß-Kaltzeit
    - Elster-Kaltzeit
    - Pleistozän (ungegliedert)
    - Jungtertiär (Neogen)
    - Alttertiär (Paläogen)
  - MESOZOIKUM**
    - Oberkreide
    - Unterkreide
    - Kreide (ungegliedert)
    - Oberer Jura (Malm)
    - Mittlerer Jura (Dogger)
    - Unterer Jura (Lias)
    - Jura (ungegliedert)
    - Obere Trias (Keuper)
    - Mittlere Trias (Muschelkalk)
    - Untere Trias (Buntsandstein)
    - Trias (ungegliedert)
  - PALÄOZOIKUM**
    - Oberes Perm (Zechstein)
    - Unteres Perm (Rotliegend)
    - Karbon
    - Oberdevon
    - Mitteldeven
    - Unterdeven
    - Devon (ungegliedert)
    - Silur
    - Ordovizium
    - Kambrium
    - Paläozoikum (ungegliedert)
    - Präkambrium
- Magmatische Gesteine**
- Känozoische Vulkanite
  - Paläozoische Vulkanite / Ganggesteine
  - Plutonite
- Metamorphe Gesteine**
- Geologische Grenze
  - Störung
  - Störung, vermutet
  - Überschiebung
  - Überschiebung, vermutet
  - Meteoritenkrater (Nördlinger Ries)
- Eisrandlagen**
- Weichsel- / Würmeiszeit
  - Saale- / Risseiszeit
  - Elster- / Mindelzeiszeit
- Legend:**
- BERLIN: Orts > 1 Mio Einwohner
  - Hannover: Orts 500 000 - 1 Mio Einwohner
  - Dresden: Orts 250 000 - 500 000 Einwohner
  - Potsdam: Orts 100 000 - 250 000 Einwohner
  - Frankfurt: Orts < 100 000 Einwohner
  - Staatsgrenze der Bundesrepublik Deutschland
  - Andere internationale Staatsgrenzen

© Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, D-Hannover (2004)  
 Grundlage: Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland 1:1 000 000 von A. VOGES et al.; 1993  
 Winkelreue Schnittkeilprojektion (n. Lambert), mit zwei längentreuen Bezugsbreitengraden 49° 40' und 53° 40' (Ellipsoid: International 1900 (Hayford))  
 Kartographie: W. WEINMANN



**Tafel 1:** Geologische Karte der Bundesrepublik Deutschland mit den untersuchten Sandsteinen.

- Co. Cottaer Sandstein
- Eb. Ebenheider Sandstein
- Mau. Maulbronner Sandstein
- Ob. Obernkirchner Sandstein
- Ro. Rorschacher Sandstein
- Sa. Sander Sandstein

Der **OBERNKIRCHNER** Sandstein, auch als Bremer Stein bezeichnet, ist ein grobsiltiger bis feinsandiger Sandstein (Korngröße von 0,04 - 0,15 mm). Seine Farbe reicht von grauweiß über hellgrau bis gelblichweiß. Selten tritt eine blasse, zarte Bänderung durch Limonitfärbung auf. Die Bindung der Einzelkomponenten erfolgt fast ausschließlich über Kornzu-Korn-Kontakte und Quarz-Anwachssäume. Kaolinitische Porenfüllungen und Kornüberzüge treten nur untergeordnet auf. Der gut sortierte, dicht erscheinende Sandstein zeigt makroskopisch keinerlei Anzeichen von Schichtung. Die oben beschriebene Bänderung infolge von Limonitaustrittungen darf keinesfalls mit einer Schichtung verwechselt werden. Auch der Lichtreflex von Hellglimmern ist nur schwer erkennbar. Für weiterführende Informationen siehe W.-D. GRIMM, 1990, Gestein Nr. 120.

Der **RORSCHACHER** Sandstein ist ein typischer Molassesandstein mittlerer Körnung mit Varietäten von hellgrau bis grünlich. Neben der tonigen Verkittung der Komponenten gibt es auch sekundär gebildete Carbonatmatrix. Häufig hat er einen sehr hohen Anteil an Calcit- und Dolomitbruchstücken. Insgesamt ist er ein optisch sehr homogener und in der technischen Qualität sehr gleichmäßiger Sandstein. Schichtung ist nur am schwachen Lichtreflex der Hellglimmer erkennbar. Regionale Bedeutung hat er seit vielen Jahrhunderten im Raum um den Bodensee (Konstanz, Lindau, Nordschweiz bis Zürich).

Der **SANDER** Sandstein, auch als Grüner Mainsandstein bekannt, gehört zur Gruppe der Schilfsandsteine. Es handelt sich um einen fein- bis mittelkörnigen (Korngröße 0,1 - 0,4 mm), sehr homogen erscheinenden Sandstein. Auffällig ist sein hoher Anteil an Gesteinsbruchstücken. Farbgebend ist der hohe Cloritanteil (olivgrün). Neben den Korn-zu-Korn-Kontakten erfolgt die Verkittung der Einzelkörner (ca. 60 % der Kornumfanglinie) über das tonig-chloritische Bindemittel. Charakteristisch sind einzelne dunkle Tupfen und tonig-kohlige Zwischenlagen. Megaskopisch ist die feine Schichtung kaum sichtbar. Nur am Lichtreflex der Glimmerplättchen lässt sie sich erkennen. Für weiterführende Informationen siehe W.-D. GRIMM, 1990, Gestein Nr. 095.

### 1.1.2 Technische Kennwerte

Die Tab. 8 gibt einen Überblick über die technischen Kennwerte der untersuchten Sandsteine. Anhand des Umfangs der drei einzelnen Teilbereiche lassen sich die bisherigen Untersuchungsschwerpunkte ablesen. Demzufolge galt das Hauptaugenmerk den Kennwerten der Wasseraufnahme und Wasserabgabe. Während sich die Kennwerte bei den gesteinspezifischen Daten (Dichte, Wichte und Porosität) nahezu einheitlich homogen präsentieren (lediglich der Molassesandstein hat eine höhere Dichte), treten bei den Kennwerten der Wasseraufnahme deutliche Unterschiede auf.

Im Gegensatz dazu geben die Festigkeitskennwerte (unterer Teil der Tab. 8) ein noch wesentlich inhomogeneres Bild ab. So reicht die Druckfestigkeit der untersuchten Gesteine von 35 MPa beim Cottaer bis hin zu 94 MPa beim Obernkirchner Sandstein (ermittelt an würfelförmigen Probekörpern, 70 mm x 70 mm x 70 mm). Da die genaue Kenntnis dieser Werte zur Beurteilung der Auswirkung aller physikalischen Vorgänge notwendig ist, müssen sie hier näher betrachtet werden.

Die in Abschn. II. 1.7 erörterten Methoden der Festigkeitsermittlung von Gesteinen verdeutlichen die Schwierigkeiten, die einer einheitlichen Zusammenstellung zugrunde liegen. Die Tab. 9 zeigt den Versuch dieser Gegenüberstellung und offenbart die Probleme, die ein Vergleich der Kennwerte aufgrund ihrer Lückenhaftigkeit verursacht.

Dies liegt zum einen an der natürlichen Variationsbreite der untersuchten Sandsteine. So können diese Kennwerte durchaus innerhalb ein und derselben Bank eines Steinbruches schwanken. Zum anderen sind unter den hier verwendeten Sandsteinbezeichnungen auch Gesteine aus unterschiedlichen Abbaulokalitäten im Handel. Diese können meist nicht eindeutig bestimmt und einem speziellen Bruch zugeordnet werden. Es kann deshalb auch nicht ausgeschlossen werden, dass in der Vergangenheit unterschiedliches Datenmaterial miteinander verglichen wurde. Aus diesen Gründen ist die Eingrenzung der Festigkeitskennwerte mit großen Schwierigkeiten verbunden und häufig aus dem vorhandenen Datenmaterial auch nicht mehr zu rekonstruieren.

Da es sich bei Sandsteinen um sedimentär gebildetes Gestein handelt, muss der Einfluss der Schichtung berücksichtigt werden. Häufig kann diese anhand von Einschlüssen (Tonlinsen, Tonfasern oder Einregelung von Glimmern) im Handstück erkannt werden. Aber selbst bei augenscheinlich massigen Gesteinen, wie z.B.

dem Obernkirchner Sandstein, ist der Einfluss der Sedimentationsbedingungen auf die Struktur des Gesteins und damit auf dessen Festigkeit noch nachweisbar. Leider wurde diesem Phänomen in der Vergangenheit nicht entsprechende Aufmerksamkeit geschenkt, sodass viele Untersuchungsergebnisse wertlos sind. Für die Zukunft muss eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Probenorientierung während der Prüfung (Belastungsrichtung in Bezug zur Schichtungsebene, z.B. || oder  $\perp$  zur Schichtung) dringend gefordert werden.

**Tab. 8:**

Technische Kennwerte der untersuchten Sandsteine.

		Cottaer	Ebenheider (rot)	Maulbronner (gelb gebän.)	Obernkirchner	Rorschacher	Sander
Dichte, rein	[ g / cm <sup>3</sup> ]	-	2,66 <sup>*1</sup>	2,68 <sup>*1</sup>	2,66 <sup>*1</sup>	-	2,66 <sup>*1</sup>
Dichte, roh	[ g / cm <sup>3</sup> ]	-	2,10 <sup>*1</sup>	2,08 <sup>*1</sup>	2,11 <sup>*1</sup>	-	2,13 <sup>*1</sup>
Rohwichte	[ g / cm <sup>3</sup> ]	2,05 <sup>*2</sup>	2,08 <sup>*2</sup>	2,12 <sup>*2</sup>	2,26 <sup>*2</sup>	2,57 <sup>*2</sup>	2,20 <sup>*2</sup>
Porosität	[ Vol. % ]	-	21,10 <sup>*1</sup>	22,20 <sup>*1</sup>	20,56 <sup>*1</sup>	6,43 <sup>*2</sup>	19,99 <sup>*1</sup>
Wasseraufnahme unter Normaldruck	[ Vol. % ]	16,70	11,94	14,58	10,8	4,50	13,74
Wasseraufnahme unter Normaldruck	[ Gew. % ]	8,13	5,66 <sup>*1</sup>	7,26 <sup>*1</sup>	5,12 <sup>*1</sup>	2,04	6,45 <sup>*1</sup>
Wasseraufnahme unter Vakuum	[ Gew. % ]	-	10,00 <sup>*1</sup>	10,66 <sup>*1</sup>	9,72 <sup>*1</sup>	-	9,39 <sup>*1</sup>
Sättigungsgrad	[ - ]	-	0,57 <sup>*1</sup>	0,68 <sup>*1</sup>	0,72 <sup>*1</sup>	-	0,69 <sup>*1</sup>
Sättigungsbeiwert	[ koeff. max. ]	-	0,75 <sup>*2</sup>	-	-	-	-
Wasseraufnahmekoeff.	[ kg / m <sup>2</sup> h <sup>1/2</sup> ]	-	-	3,5 <sup>*3</sup>	2,4 <sup>*3</sup>	-	7,8 <sup>*3</sup>
Wassereindringkoeffizient	[ cm / h <sup>1/2</sup> ]	-	-	2,6 <sup>*3</sup>	2,8 <sup>*3</sup>	-	-
Wasserdampfdiffusions- Widerstandszahl	[ 0 - 50 r.F. ]	-	-	28 <sup>*3</sup>	47 <sup>*3</sup>	-	25 <sup>*3</sup>
Widerstandszahl	[ 50 - 100 r.F. ]	-	-	19 <sup>*3</sup>	20 <sup>*3</sup>	-	14 <sup>*3</sup>
Luftpermeabilität	[ mD ]	-	274.000 <sup>*1</sup>	1.440 <sup>*1</sup>	28.400 <sup>*1</sup>	-	-
Spezif. Oberfläche	[ m <sup>2</sup> / g ]	-	2,19 <sup>*1</sup>	-	1,23 <sup>*1</sup>	-	-
Spezif. Oberfläche	[ m <sup>2</sup> / g ]	4,60	2,61	3,45	0,93	3,15	5,22
Druckfestigkeit	[ N / mm <sup>2</sup> = MPa ]	35 <sup>*2</sup>	62 <sup>*2</sup>	72 <sup>*2</sup>	94 <sup>*2</sup>	74 <sup>*2</sup>	51 <sup>*2</sup>
Biegezugfestigkeit, uniax.	[ N / mm <sup>2</sup> = MPa ]	4,8 <sup>*2</sup>	5,9 <sup>*2</sup>	6,2 <sup>*2</sup>	10,4 <sup>*2</sup>	6,9 <sup>*2</sup>	-
Abriebfestigkeit	[ cm <sup>3</sup> / 50 cm <sup>2</sup> ]	73,9 <sup>*2</sup>	25,4 <sup>*2</sup>	-	26,2 <sup>*2</sup>	-	-
Ausbruchfestigkeit	[ N / 4 cm ]	-	1.540 <sup>*2</sup>	-	-	-	-

\*1 GRIMM, W.-D. (1990): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine

\*2 MÜLLER, F. (o.J): Internationale Natursteinkartei (INSK)

\*3 SNETHLAGE, R. (1984): Steinkonservierung 1979 - 1983  
eigene Daten ohne Kennung

Einen weiteren Unsicherheitsfaktor stellt die eigentliche Versuchsdurchführung dar. Obwohl die Zugfestigkeit den mit Abstand am besten geeigneten Wert zur Charakterisierung der Festigkeit eines Gesteins liefert, wird diese Prüfung, wegen ihrer schwierigen Durchführung, eher selten angewendet. Statt dessen wird sehr häufig die Spaltzugfestigkeitsprüfung oder die Druckfestigkeitsprüfung durchgeführt. Da hierbei neben den bekannten Einflussgrößen, wie Belastungszunahmegeschwindigkeit, Endplattenreibung und Probenkonditionierung auch noch die Probengeometrie und Probengröße einen Einfluss auf den Messwert haben, kann man sich die Schwierigkeit des Vergleiches der damit erzielten Werte vorstellen. Differenzen von bis zu 50 % sind daher keine Seltenheit.

Mit der Tabelle 9 wurde der Versuch unternommen, die Festigkeitskennwerte der untersuchten Sandsteine exakt zusammenzustellen. Trotz der geringen Anzahl an verlässlichen Daten lässt sich daraus zum einen der Einfluss der Prüfrichtung und zum anderen der Einfluss der Stofffeuchte auf die Festigkeit ablesen. Die meisten geschichteten Materialien setzen einer Belastung senkrecht zur Schichtung einen höheren Widerstand entgegen als parallel dazu (s. Abb. 38). Die untersuchten Sandsteine bestätigen dies. Wobei anzumerken ist, dass die in einer Ebene angereicherten Tonmineralien und Glimmer gleichsam als eine Art Gleitfilm wirken und eine Materialtrennung in dieser Ebene begünstigen.

Die Entfestigung der wassergesättigten Proben beträgt ca. 25% beim kieselig gebundenen Obernkirchner und reicht bis zu ca. 60% beim rein tonig gebundenen Sander Sandstein. Die Festigkeitsabnahme der tonig gebundenen Sandsteine Cottaer, Ebenheider und Sander ist generell größer als die der karbonatisch-tonigen, bzw. kieselig-tonigen oder die der rein kieselig gebundenen Sandsteine. Allgemein nehmen alle Festigkeitskennwerte mit zunehmender Stofffeuchte ab.

**Tab. 9:**

Festigkeitskennwerte der untersuchten Sandsteine.

				Cottaer	Ebenheider (rot)	Maulbronner (gelb geb.)	Obernkirchner	Rorschacher	Sander
Druckfestigkeit	$\beta_D$	Normalkl.	$\perp$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	38 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-
		Normalkl.	$\parallel$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	40 <sup>*2</sup>	54 <sup>*1</sup>	35 <sup>*1</sup>	93 <sup>*1</sup>	-	33 <sup>*1</sup>
		Wasserl.	$\perp$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	30 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-
		Wasserl.	$\parallel$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	25 <sup>*2</sup>	38 <sup>*1</sup>	-	70 <sup>*1</sup>	-	19 <sup>*1</sup>
Biegezugfestigkeit (uniaxial)	$\beta_{BZ, uniax.}$	Normalkl.	$\perp$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	4,2 <sup>*2</sup>	-	-	9,2 <sup>*2</sup>	-	5,2 <sup>*2</sup>
		Normalkl.	$\parallel$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	3,7 <sup>*2</sup>	-	-	9,2 <sup>*2</sup>	-	4,6 <sup>*2</sup>
		Wasserl.	$\perp$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	2,5 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-
		Wasserl.	$\parallel$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	2,4 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-
Biegezugfestigkeit (biaxial)	$\beta_{BZ, biax.}$	Normalkl.	$\perp$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	-	-	-	-	-	-
		Normalkl.	$\parallel$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	-	6,1 <sup>*3</sup>	7,0 <sup>*3</sup>	10,8 <sup>*3</sup>	7,0 <sup>*3</sup>	7,1 <sup>*3</sup>
		Wasserl.	$\perp$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	-	-	-	-	-	-
		Wasserl.	$\parallel$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	-	-	-	-	-	4,9 <sup>*3</sup>
Zugfestigkeit	$\beta_Z$	Normalkl.	$\perp$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	1,16 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-
		Normalkl.	$\parallel$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	1,13 <sup>*2</sup>	1,91 <sup>*1</sup>	2,03 <sup>*1</sup>	2,95 <sup>*1</sup>	-	1,47 <sup>*1</sup>
		Wasserl.	$\perp$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	0,67 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-
		Wasserl.	$\parallel$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	0,70 <sup>*2</sup>	0,93 <sup>*1</sup>	-	-	-	0,64 <sup>*1</sup>
Oberflächen- Haftzugfestigkeit	$\beta_{O-HFZ}$	Normalkl.	$\perp$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	-	-	-	-	-	0,77
		Normalkl.	$\parallel$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	-	-	-	-	-	1,29 <sup>*2</sup> / 1,11
		Wasserl.	$\perp$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	-	-	-	-	-	0,1
		Wasserl.	$\parallel$ ss [ N/mm <sup>2</sup> = MPa ]	-	-	-	-	-	0,3
E - Modul (dynamisch)	$E_{dyn.}$	Normalkl.	$\perp$ ss [ kN/mm <sup>2</sup> = GPa ]	13,5 <sup>*2</sup>	-	-	18,5 <sup>*2</sup>	-	-
		Normalkl.	$\parallel$ ss [ kN/mm <sup>2</sup> = GPa ]	14,6 <sup>*2</sup>	14,4 <sup>*1</sup>	9,7 <sup>*1</sup>	17,3 <sup>*1</sup>	-	16,0 <sup>*1</sup>
		Wasserl.	$\perp$ ss [ kN/mm <sup>2</sup> = GPa ]	12,0 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-
		Wasserl.	$\parallel$ ss [ kN/mm <sup>2</sup> = GPa ]	11,0 <sup>*2</sup>	10,5 <sup>*1</sup>	-	-	-	12,7 <sup>*1</sup>
E - Modul (statisch)	$E_{stat.}$	Normalkl.	$\perp$ ss [ kN/mm <sup>2</sup> = GPa ]	11,1 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-
		Normalkl.	$\parallel$ ss [ kN/mm <sup>2</sup> = GPa ]	13,1 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-
		Wasserl.	$\perp$ ss [ kN/mm <sup>2</sup> = GPa ]	7,9 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-
		Wasserl.	$\parallel$ ss [ kN/mm <sup>2</sup> = GPa ]	5,4 <sup>*2</sup>	-	-	-	-	-

Normalkl. = Normalklima, 23° C, 50 % r. F., oder 20°C, 65 % r.F.

Wasserl. = kapillares Saugen mit mind. 15 min. Unterwasserlagerung

\*1 Werte nach ALFES, 1993

\*2 Werte Fa. Pressbau, 1996 (BMBF-Datenbank)

\*3 Werte nach SATTLER, 1992

eigene Daten ohne Kennung

### 1.1.3 Prüfkörpergeometrie

Die Fa. Pressbau, Oberhausen, lieferte Prüfkörper der sechs Sandsteine, jeweils in unterschiedliche Raumrichtungen gebohrt und geschnitten. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die Lage der Schichtung gerichtet. Nachdem die Bestimmung der Schichtung im einzelnen Probekörper nicht immer zweifelsfrei möglich ist, wurden die Blöcke bereits im Steinbruch ihrer Schichtung entsprechend gekennzeichnet und anschließend entnommen (s. Abb 71).



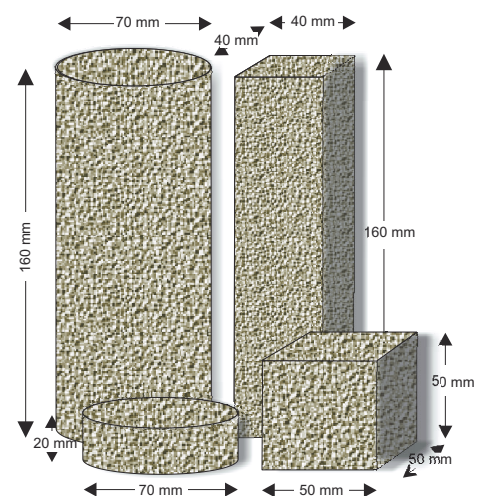
**Abb. 71:**

Übersichtsaufnahme des Schilfsandsteinbruches der Firma Gleußner in Sand am Main.

Alle Probekörper einer Varietät wurden aus einem einzigen Block entnommen, wobei die Zylinder zum einen parallel zur Schichtung und zum anderen senkrecht zur Schichtung gebohrt wurden. Das gleiche gilt für die Orientierung der Prismen. Die Lage der Schichtung in den würfelförmigen Probekörpern wurde vor dem Sägen gekennzeichnet.

Aus einem Teil der zylinderförmigen Prüfkörper wurden dann die zur Oedometer-Prüfung notwendigen Gesteinsscheiben hergestellt (Scheiben,  $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm).

Alle Prüfkörper wurden gemäß der Abb. 74 im Koordinatensystem orientiert und dauerhaft gekennzeichnet. Bei den glimmerreichen Sandsteinen (Hellglimmer = Muskovit) ist es möglich, über die Lichtreflexion der Glimmerplättchen den Bezug der Schnittebenen des Probekörpers zur Schichtungsfläche zu überprüfen. Beim weitestgehend tonmineralfreien Obernkirchner Sandstein erfolgt die Überprüfung über die Abfolge der verschiedenen Kornlagen. Alle von der Firma Pressbau gelieferten Prüfkörper entsprachen in Bezug auf deren Orientierung weitestgehend den Vorgaben. Lediglich beim Sander Schilfsandstein wurden offensichtlich verschiedene Blöcke und Varietäten zur Herstellung der Prüfkörper verwendet. Schon durch bloße Inaugenscheinnahme ließen sich drei unterschiedliche Varietäten erkennen. Die nachfolgenden Messreihen bestätigten diese Vermutung.



**Abb. 72:**

Geometrie der verwendeten Prüfkörper.



## 2 Porosität und Wasseraufnahme

“Wasser ist der größte Feind am Bau” (WESCHE, 1977).

Ein wichtiges Kriterium zur Beurteilung der hygrischen Längenänderung und somit zur Abschätzung des potentiellen Quellvermögens eines Gesteins ist die Menge an Wasser, die es aufzunehmen vermag. Das Wasseraufnahmevermögen steht in direktem Zusammenhang zur Porosität. Je größer die effektive Porosität, desto höher ist die Wasseraufnahmefähigkeit. Je höher die Wasseraufnahmefähigkeit, desto größer sind (bei gleicher mineralogischer Zusammensetzung) die zu erwartenden hygrischen Längenänderungen und damit der zu erwartende Quelldruck.

Um einen möglichst repräsentativen Überblick über das gesamte Spektrum der Naturwerksteine zu erhalten, wurden neben den beschriebenen Sandsteinen auch jeweils ein Vertreter der magmatischen und der metamorphen Gesteine sowie zwei Kalkgesteine in die Untersuchungen miteinbezogen.

**Tab. 10:**

Wasseraufnahme der wichtigsten Gesteinsgruppen und die der näher untersuchten Sandsteine (nach verschiedenen Autoren).

Gestein		Wasseraufnahme						
		Wg,a <sup>*1</sup>	Wg,a <sup>*2</sup>	Wg,a <sup>*3</sup>	Wg,a <sup>*4</sup>	Wg,a <sup>*5</sup>	Wg,a <sup>*6</sup>	
		[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %]	[Gew. %] (n)	[Gew. %] (n)	
Granit	KÖSSEINE	0,21	-	0,07	-	-	0,12 (1)	
Marmor	CARRARA	0,18	-	0,10	-	-	0,12 (3)	
Kalkstein	KELHEIMER	-	1,05	-	0,80	-	1,12 (2)	
	KRENSHEIMER M.	-	2,44	-	-	3,28 (3)	4,10 (1)	
Sandstein	tonig gebunden	COTTAER	-	-	7,04	-	8,13 (10)	7,84 (3)
		EBENHEIDER	-	5,66	2,98	-	5,75 (2)	5,12 (3)
		SANDER	-	6,45	-	-	6,77 (4)	6,77 (5)
	kieselig-tonig -	MAULBRONNER	-	7,26	7,97	7,50	7,26 (1)	8,08 (3)
	karbonatisch-tonig -	RORSCHACHER	-	-	2,50	-	-	2,04 (3)
	kieselig -	OBERNKIRCHNER	-	5,12	2,55	4,76	4,98 (7)	4,22 (3)

n = Anzahl der gemessenen Proben

<sup>\*1</sup> Werte nach POSCHLOD, 1990 (ermittelt nach DIN 52 103)

<sup>\*2</sup> Werte nach GRIMM, 1990 (ermittelt nach DIN 52 103)

<sup>\*3</sup> Werte nach MÜLLER, o.J.

<sup>\*4</sup> Werte nach SNETHLAGE, 1984

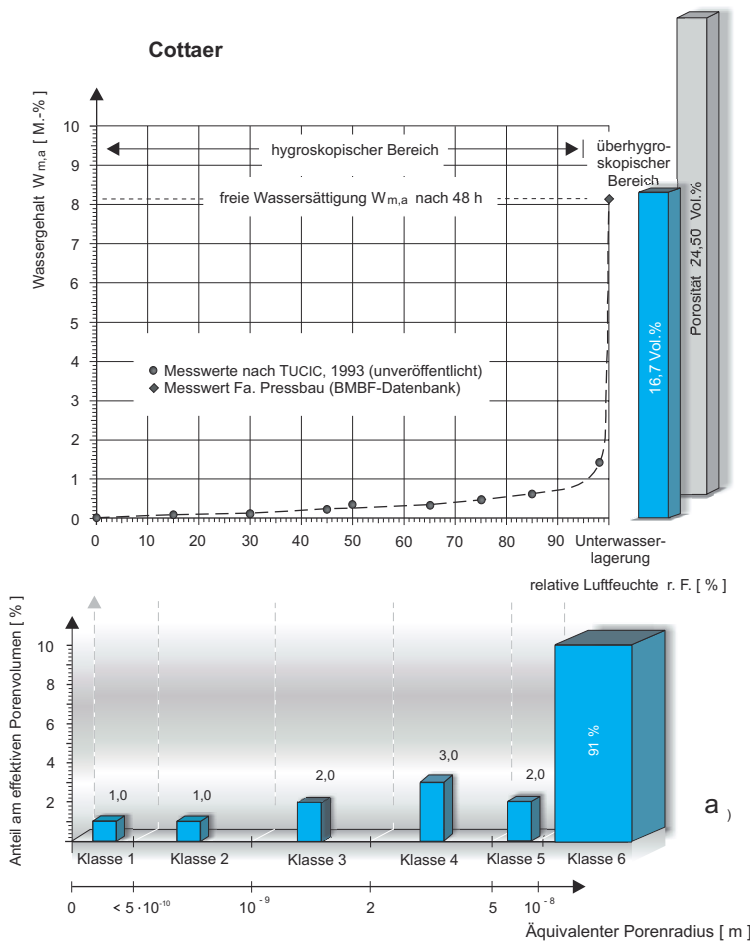
<sup>\*5</sup> Werte Fa. Pressbau (ermittelt nach DIN 52 103)

<sup>\*6</sup> eigene Messungen (ermittelt nach DIN 52 103)

Die Tab. 10 zeigt eine deutliche Dreigliederung.

Während die Vertreter der magmatischen und metamorphen Gesteine, der Kösseine-Granit und der Carrara-Marmor, lediglich 0,1 bis 0,2 Gew. % Wasser aufnehmen, nehmen die Kalkgesteine eine um eine Zehnerpotenz höhere Menge an Wasser auf (1 bis 4 Gew. %) und die Sandsteine noch einmal in etwa das zweifache davon (2 bis 8 Gew. %).

Die Wasseraufnahme eines Gesteines wird aber nicht durch dessen Gesamtporosität, sondern nur durch die für Wasser (unter Normalbedingungen) zugänglichen Poren bestimmt. Diese Porosität kann durchaus um bis zu 50 % niedriger sein. So würde sich die eher niedrige Wasseraufnahme des Obernkirchner Sandsteins (4,2 Gew. %) im Vergleich zum Maulbronner Sandstein (8,1 Gew. %) anhand der Gesamtporosität (20,6 / 22,2 Vol. %) nicht zufrieden stellend deuten lassen. Erst bei der Betrachtung der für Wasser zugänglichen Porosität (10,8 / 16,9 Vol. %) wird dieser Unterschied erklärbar.

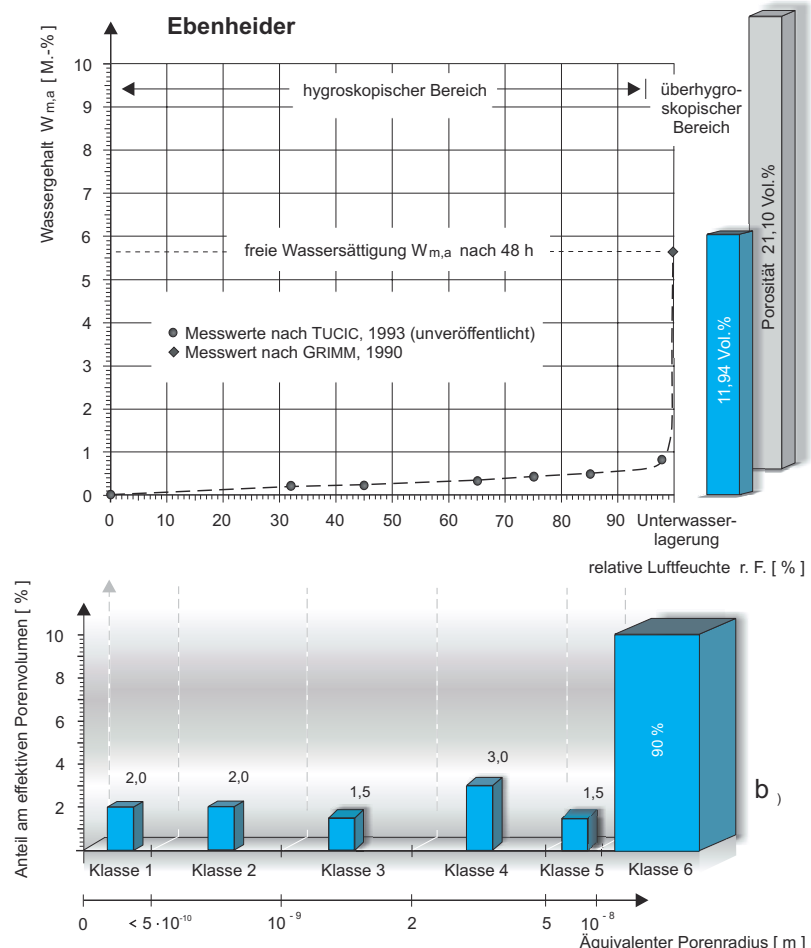


Die folgenden Abbildungen der untersuchten Sandsteine enthalten deshalb neben der Gesamtporosität (graue Balken) auch die wesentlich aussagekräftigere für Wasser zugängliche Porosität (effektive Porosität, blaue Balken). Neben der insgesamt aufgenommenen Menge an Wasser spielt die Verteilung im Porengefüge (Geometrie des Porenraumes) eine ebenso wichtige Rolle. Eine identische Menge an Wasser kann durchaus unterschiedlich im Porenraum eines Gesteins verteilt sein und dadurch unterschiedliches hygroskopisches Verhalten hervorrufen. Die Bestimmung der Porengeometrie erfolgt über die Messung der Porenradienverteilung, üblicherweise mittels der Quecksilberporosimetrie. Sie arbeitet nach dem Prinzip der Quecksilberintrusion. Hierbei wird unter z. T. sehr hohem Druck (0,15 bis 2.000 bar) Quecksilber in den Probekörper gepresst und aus der Intrusionsmenge, nach dem Modell der zylinderförmigen Kapillarporenräume, die diesem

Druck entsprechende Menge an Poren berechnet. Die auf diese Weise ermittelten Anteile an den jeweiligen Porenradien werden dann zu Porenradienklassen zusammengefasst. Auf diese Weise lassen sich etwa 90 % der Gesamtporosität erfassen. Porenradien unter 4 nm oder über 50 µm können mit dieser Methode nicht bestimmt werden.

Da aber gerade der Anteil an Mikroporen < 4 nm der entscheidende Hinweis für das Vorhandensein von quellfähigen Tonmineralien ist, wäre es wünschenswert, eine Methode zur Bestimmung dieses Porenanteils zur Verfügung zu haben.

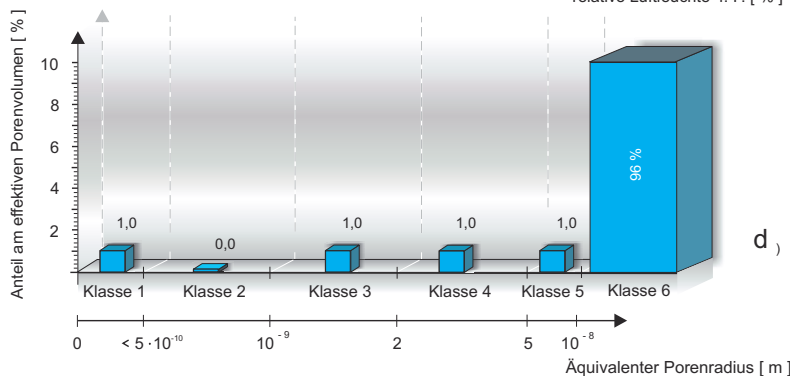
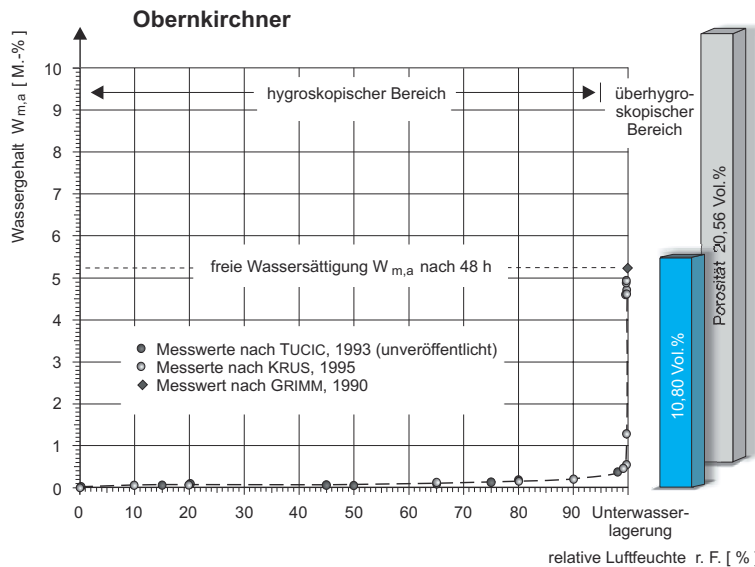
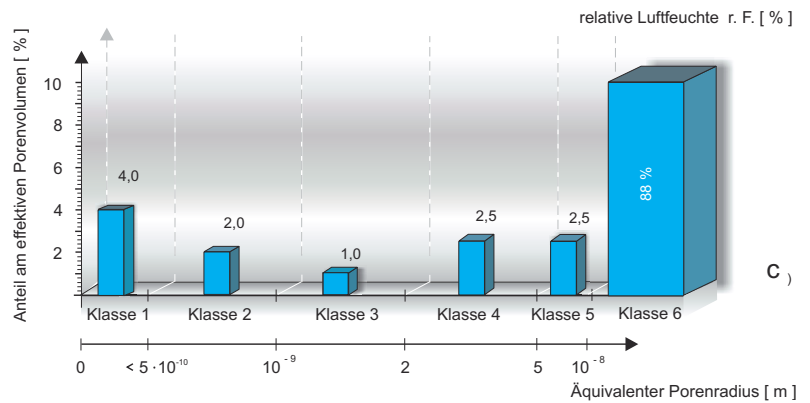
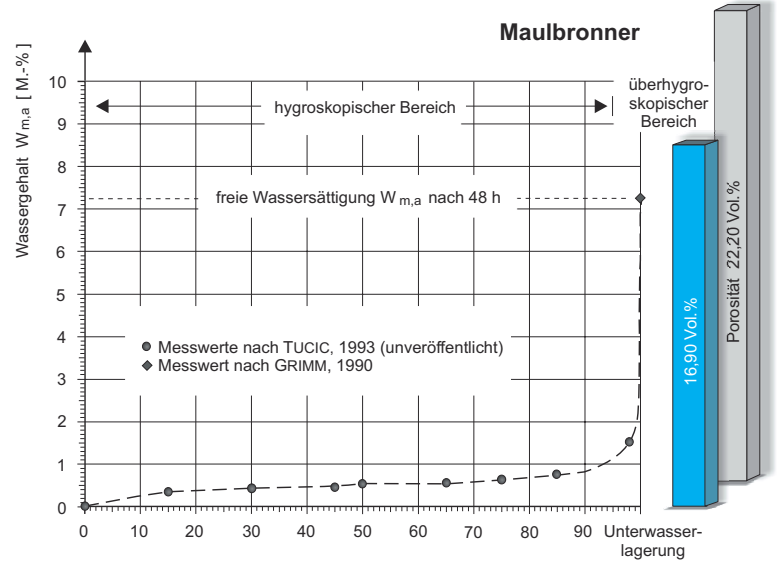
Da die Kelvin-Formel den Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und der bei dieser Luftfeuchte gefüllten Porengröße (Kapillarradius) beschreibt, kann unter Anwendung der Formel jedem Luftfeuchtegehalt eine maximal noch mit Wasser gefüllte Porengröße zugeordnet werden.



$$\varphi = \exp \left[ \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{r\rho_w R_D T} \right]$$

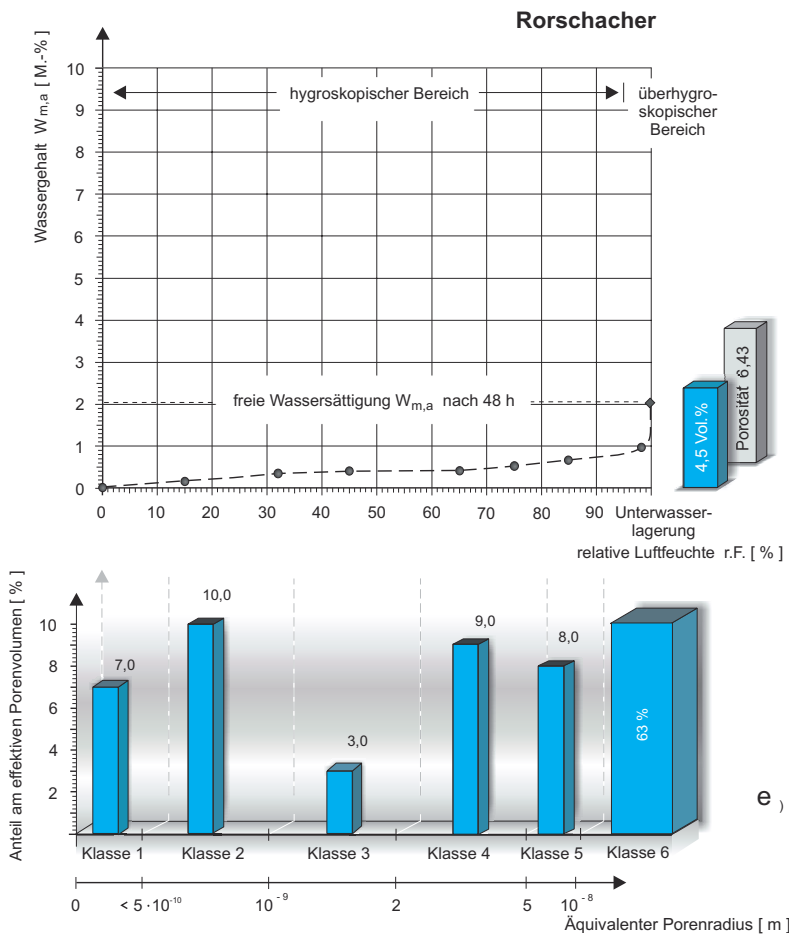
- $\varphi$  [-]            Relative Luftfeuchte
- $\sigma$  [N/m]        Oberflächenspannung des Wassers
- $\theta$  [grd]        Randwinkel
- $r$  [m]            Kapillarradius
- $R_D$  [J/kg K]    Gaskonstante für Wasserdampf
- $T$  [K]            absolute Temperatur
- $\rho_w$  [g/cm<sup>3</sup>]    Dichte des Wassers

Diese Zuordnung beruht auf der Voraussetzung, dass es sich um eine stetige Porenradienverteilung handelt und dass alle vom Wasser erreichbaren Poren miteinander in Verbindung stehen. Durch die höhere Saugspannung der kleineren Poren wird solange Wasser aus den größeren gesaugt, bis erstere gefüllt sind und ihr Kapillardruckgleichgewicht erreicht ist. Erst danach wird die nächst größere Pore mit Wasser gefüllt. Die Methode geht



genauso wie die Quecksilberdruckporosimetrie von zylinderförmigen Poren aus. Stellt man nun der über den gesamten hygroskopischen und überhygroskopischen Bereich ermittelten Sorptionsisotherme des zu untersuchenden Materials die nach der Kelvin-Formel berechneten Porenradien (Achse in logarithmischer Darstellung) gegenüber, so lässt sich jeder rel. Luftfeuchte eine entsprechende Menge an aufgenommenem Wasser zuordnen und der Radius der eben noch mit Wasser gefüllten Poren angeben. Die Sorptionsmesswerte im überhygroskopischen Bereich (nach KRUS, 1995) wurden mittels Saugspannungsmessungen ermittelt.

Zur Übersichtlichkeit der Darstellung wurden die Poren  $< 10^{-8}$  m in 5 Porenradienklassen mit annähernd identischem Bereich eingeteilt. In der 6. Porenradienklasse wurden die restlichen Poren ( $> 10^{-8}$  m)

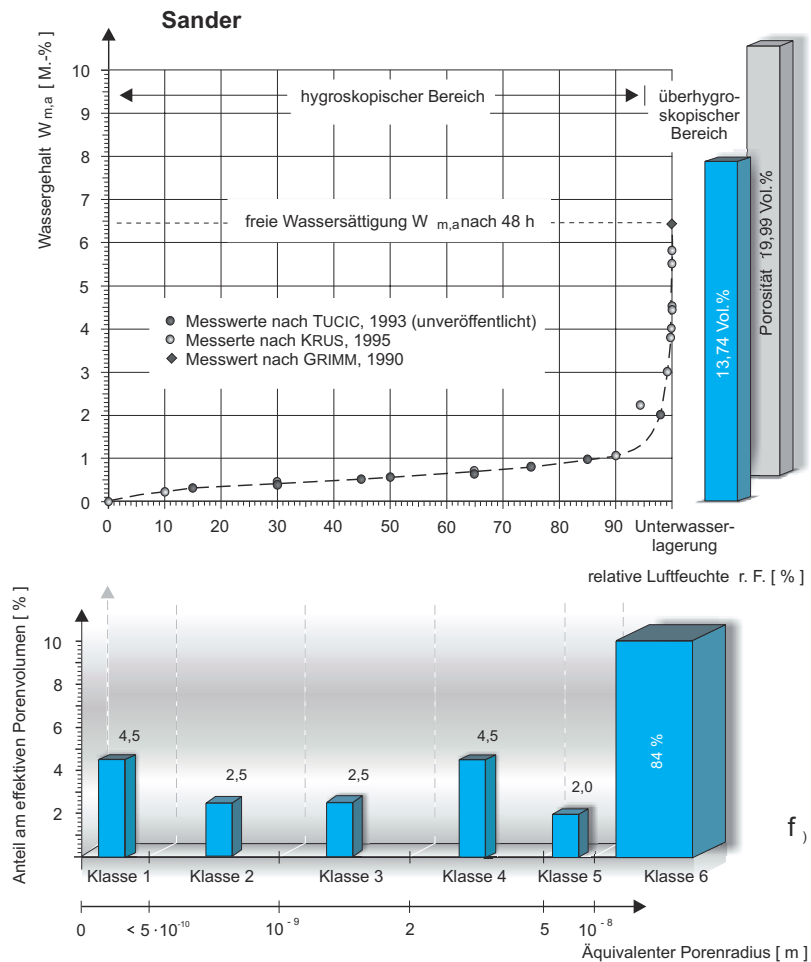


zusammengefasst. Vergleicht man den Anteil der Poren der Klassen eins und zwei der untersuchten Sandsteine, so fällt der geringe Anteil an diesen Porenradienklassen des Cottaer (Abb. 72 a) und der des Obernkirchner Sandsteins (Abb. 72 d) auf. Da diese beiden Porenradienklassen vor allem auf die Tonmineralfraktion zurückzuführen sind, kann bei gänzlichem Fehlen oder geringem Anteil auf weitestgehende Unempfindlichkeit gegenüber dem Einfluss von Wasser geschlossen werden. Dies bestätigen auch die nachfolgenden Untersuchungen. Einen Sonderfall stellt der Rorschacher Molassesandstein dar (Abb. 73e). Sein sehr hoher Anteil an den Porenradienklassen eins und zwei relativiert sich, wenn man die geringe Gesamtporosität von 6,43 Vol. % oder die für Wasser zugängliche Porosität von 4,5 Vol. % in Betracht zieht. Bei Umrechnung der prozentualen Porenanteile in absolute

Mengenanteile müssen diese in Beziehung zur Gesamtporosität gesetzt werden. Vergleicht man etwa die absoluten Porenanteile des Maulbronner Sandstein mit denen des Rorschacher Molassesandsteins, so reduzieren sich dessen dargestellte Anteile an den einzelnen Porenradienklassen etwa um den Faktor vier. Dies hätte einen Zahlenwert von ca. 2,0 in der Porenradienklasse eins und ca. 2,5 in der Porenradienklasse zwei zur Folge.

**Abb. 73 (a - f):**

Sorptionisotherme und Porenradienverteilung (nach der Kelvin-Formel) der untersuchten Sandsteine (Gesamtporosität graue Balken, effektive Porosität blaue Balken).



### 3 Hygrische Längenänderung

#### 3.1 Raumorientierte Versuche

Alle porösen anorganischen Baustoffe erfahren bei Kontakt mit Wasser eine Volumenzunahme. Diese beruht zum einen auf der Verringerung der Oberflächenenergie der einzelnen Partikel durch die Benetzung mit Wasser (Splittgeber-Effekt), zum anderen auf der physikalischen Eigenschaft einzelner Gemengteile (Tonminerale), Wasser in ihre Gitterstruktur einzubauen und dadurch an Volumen zuzunehmen.

Im ersten Fall ähnelt der Wirkungsmechanismus (Wasserfilm auf der Partikeloberfläche) dem Schmiereffekt von Wasser auf Gleitbahnen und Gleitebenen. Durch die Verringerung der Oberflächenenergie wird die Bindungsenergie zwischen den einzelnen Partikeln reduziert und dadurch der Gesamtzusammenhalt des Stoffes geschwächt. Die einzelnen Körner vergrößern ihren gegenseitigen Abstand, das Material entspannt sich gleichsam und nimmt dadurch an Volumen zu.

Im zweiten Fall werden Wassermoleküle in die Gitterstruktur von quellfähigen Tonmineralien eingebaut. Dadurch vergrößert sich der Elementargitterabstand dieser Minerale (s. Abb. 13). Sie nehmen an Volumen zu und üben bei Ausdehnungsbehinderung Druck auf ihre benachbarten Partikel aus (s. Abschn. II. 1.4.2).

Bei einer gleichmäßigen Verteilung der Tonpartikel innerhalb eines Materials und bei homogener Anordnung ihrer individuellen Lage im Raum ist die aus der Volumenzunahme resultierende Längenänderung in allen drei Raumrichtungen gleich groß. Da es sich bei Sandstein aber um ein sedimentär gebildetes Gestein handelt, ist eine gleichmäßige, räumlich homogene Verteilung der Partikel nicht zu erwarten. Ganz im Gegenteil, durch die während der Sedimentation vorherrschende Strömungsrichtung und durch das langsame Absinken der Tonpartikel muss eine mehr oder minder bevorzugte Einregelung der plättchenförmigen Tonminerale vorhanden sein. Deshalb wurden zur Untersuchung der hygrischen Längenänderung Gesteinswürfel verwendet, die im Koordinatensystem entsprechend orientiert wurden, und die hygrische Längenänderung in alle drei Raumrichtungen gemessen (s. Abb. 74).

Da in Einzelfällen selbst nach monate- ja jahrelangem Lagern der Prüfkörper unter Wasser kein endgültiger Messwert zur Längenänderung zu erzielen ist, musste eine überschaubare Zeitspanne festgelegt werden. Die 48-Stunden-Werte wurden als End-Werte der hygrischen Längenänderung verwendet. Im Regelfall sind in dieser Zeit mehr als 98 % der Quelldehnung erfolgt (s. Abschn. II. 1.4.1).

Bei parallelem Probenschnitt in Bezug zur Schichtung und überwiegender Einregelung der Tonmineralplättchen parallel zur Hauptschüttungsrichtung sind die hygrischen Längenänderungen in die Koordinatenrichtungen x und y annähernd gleich groß.

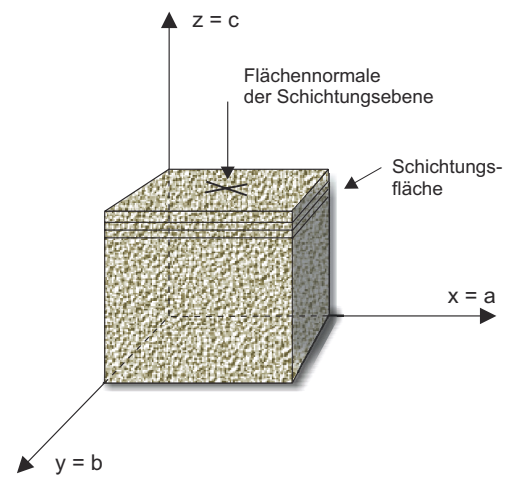
Somit gilt:

$$\Delta x = \Delta y, \quad \text{bzw.} \quad \frac{\Delta x}{\Delta y} = 1.$$

Der Quotient  $\Delta x$  zu  $\Delta y$  ist somit auch

ein Qualitätsmerkmal für die Präzision der Prüfkörperherstellung.

Die für diese Arbeit verwendeten Probekörper zeigten eine hohe Herstellungsgenauigkeit mit dem Quotienten von  $> \sim 0,9$  für nahezu 70 % der Prüfkörper.



**Abb. 74:**

Orientierung der Prüfkörper im Koordinatensystem.

### 3.2 Ergebnisse

Die Tabelle 11 zeigt die Ergebnisse der Messungen an 26 Würfeln (50mm x 50mm x 50 mm).

Zusätzlich zu den näher untersuchten Sandsteinen (Cottaer, Ebenheider, Maulbronner, Obernkirchner, Rorschacher und Sander Sandstein) wurden in diese Messreihe der Abtswinder Sandstein und der Regensburger Grünsandstein miteinbezogen.

Deutlich lassen sich drei unterschiedliche Bereiche erkennen: ein unterer mit Längenänderungen bis zu 300  $\mu\text{m}$ , ein mittlerer mit Dehnungen von 300 bis zu  $\sim 1.500 \mu\text{m}$  und ein oberer mit Werten von 1.500 bis  $\sim 6.000 \mu\text{m}$ . Dem ersten Bereich sind der Cottaer, der Obernkirchner und der Regensburger Sandstein zuzuordnen, dem zweiten der Maulbronner, Rorschacher und Sander, Typ I und dem dritten der Abtswinder, Ebenheider und Sander, Typ II und Typ III. Die hierbei gemessenen Längenänderungen der Würfel (Messlänge jeweils 50 mm) waren ca. 5  $\mu\text{m}$  beim Obernkirchner und etwa 300  $\mu\text{m}$  beim Sander, Typ III. Da die Genauigkeit der Messungen durch die Auflösung der Messuhren auf  $\pm 1 \mu\text{m}$  begrenzt ist, bewegt man sich bei der Messung der hygri-schen Längenänderung des Obernkirchner Sandsteins im Grenzbereich der Auflösung der Messmethode. Die Qualität der Messwerte ist mit einer Genauigkeit von  $\pm 20\%$  nicht mehr sehr hoch, während sie im Gegensatz dazu beim Sander, Typ III mit  $\pm 0,003\%$  als sehr gut einzustufen ist.

Die Dreiteilung des Wertebereiches wird auch bei der Betrachtung der jeweiligen Volumenänderungen bestätigt (0,3 bis 0,7 ‰ für den Cottaer, Regensburger und Obernkirchner Sandstein, 0,9 bis  $\sim 3,5 \text{ ‰}$  für den Maulbronner, Rorschacher und Sander, Typ I und 5 bis 12 ‰ für den Abtswinder, Ebenheider und Sander, Typ II und Typ III).

Das Verhältnis der Messwerte parallel zur Schichtung zu senkrecht zur Schichtung (x bzw. y zu z) steigt mit zunehmender hygri-scher Längenänderung an. Während es bei dem weitestgehend tonmineralfreien Obernkirchner Sandstein 1:1,3 ist, erreicht es beim Ebenheider Sandstein mit ca. 1:2,5 seinen Höchstwert.

**Tab. 11:**

Hygri-sche Längenänderung in Abhängigkeit von der Probenorientierung [Messwerte, (Messungen an Würfeln 50 mm x 50 mm x 50mm)].



Probe:	Hygri-sche Längenänderung			Volumenänderung		Volumenänderung $\emptyset$	x : y : z	Wasseraufnahme 1.V. / 2.V. / 3.V.
	x - Richtung	y - Richtung	z - Richtung					
	[ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]	[ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]	[ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]	[ ‰ ]	[ ‰ ]			
Abtswinder 1	1.578	1.446	2.713	5,74		1 : 0,92 : 1,72	5,37 / 6,22 / 6,46	
Abtswinder 1 a	1.590	1.366	2.317	5,27		1 : 0,86 : 1,46	6,17 / 6,17 / 6,11	
Abtswinder 1 b	725	688	1.096	2,51	4,51	1 : 0,95 : 1,51	8,37 / 8,34 / 8,32	
Cottaer 1	218	200	319	0,74		1 : 0,92 : 1,46	7,38 / 7,44 / 7,45	
Cottaer 1 a	178	119	220	0,52		1 : 0,67 : 1,24	8,26 / 8,21 / 8,06	
Cottaer 1 b	199	173	286	0,66	0,64	1 : 0,87 : 1,44	7,30 / 7,20 / 7,28	
Ebenheider 1	755	578	1.600	2,93		1 : 0,77 : 2,12	4,80 / 4,63 / 4,71	
Ebenheider 1 a	776	719	1.964	3,46		1 : 0,93 : 2,53	4,77 / 4,52 / 5,00	
Ebenheider 1 b	741	672	1.962	3,38	3,26	1 : 0,91 : 2,65	4,39 / 4,36 / 4,44	
Maulbronner 1	260	238	417	0,92		1 : 0,92 : 1,60	7,58 / 7,77 / 7,52	
Maulbronner 1 a	279	272	496	1,05		1 : 0,97 : 1,78	7,52 / 7,39 / 7,21	
Maulbronner 1 b	299	219	456	0,97	0,98	1 : 0,73 : 1,53	7,75 / 7,83 / 7,52	
Obernkirchner 1	139	80	159	0,38		1 : 0,58 : 1,14	3,98 / 4,02 / 3,93	
Obernkirchner 1 a	100	90	109	0,30		1 : 0,90 : 1,09	3,94 / 4,00 / 3,93	
Obernkirchner 1 b	89	80	160	0,33	0,34	1 : 0,90 : 1,80	4,23 / 4,24 / 4,18	
Regensburger 1	120	119	198	0,44		1 : 0,99 : 1,65	6,00 / 6,12 / 6,21	
Regensburger 1 a	103	100	121	0,32		1 : 0,97 : 1,17	5,95 / 6,37 / 6,10	
Regensburger 1 b	120	80	219	0,42	0,39	1 : 0,67 : 1,83	5,58 / 5,82 / 5,78	
Rorschacher 1	655	634	915	2,20		1 : 0,97 : 1,40	1,70 / 1,81 / 1,57	
Rorschacher 1 a	653	652	866	2,17		1 : 1,00 : 1,33	1,62 / 1,81 / 1,57	
Rorschacher 1 b	794	640	962	2,40	2,26	1 : 0,81 : 1,21	1,61 / 1,52 / 1,53	
Sander 1 b, Typ I	673	476	1.098	2,25	2,25	1 : 0,71 : 1,63	5,45 / 5,80 / 5,74	
Sander 1 c, Typ II	1.432	1.227	2.635	5,29		1 : 0,86 : 1,84	5,33 / 5,29 / 5,21	
Sander 1 d, Typ II	1.302	1.255	2.554	5,11	5,20	1 : 0,96 : 1,96	5,36 / 5,39 / 5,25	
Sander 1, Typ III	3.070	2.982	6.260	12,31		1 : 0,97 : 2,04	6,31 / 6,33 / 6,66	
Sander 1 a, Typ III	2.676	2.535	5.420	10,63	11,47	1 : 0,95 : 2,03	5,75 / 5,81 / 6,04	

Liegt die Schichtungsebene des Prüfkörpers nicht planparallel zu einer der Würfelflächen, so werden zumindest für zwei Raumrichtungen zu geringe Werte ermittelt. Da bei planparallelem Schnitt, in Bezug zur Schichtungsebene,  $x$  gleich  $y$  ist, lässt sich aus der Differenz zwischen  $x$  und  $y$  der Winkel der Abweichung der Messrichtung zum Idealfall berechnen (s. Abb. 75).

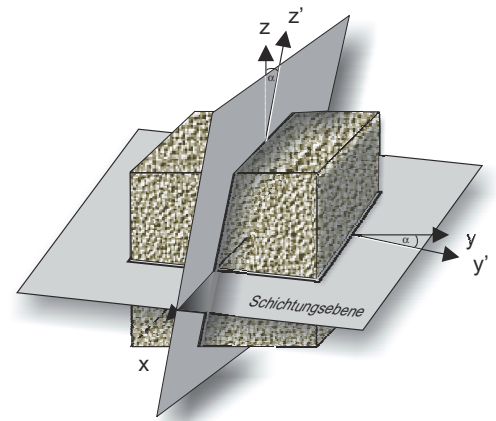
Unter Zuhilfenahme geometrischer Winkelbeziehungen (im rechtwinkligen Dreieck) lässt sich damit der Quelldehnungswert in  $y$ - und  $z$ -Richtung nach der Formel

$$\cos \alpha = \frac{y'}{y} \quad \text{bzw.} \quad y = \frac{y'}{\cos \alpha}$$

$$\cos \alpha = \frac{z'}{z} \quad \text{bzw.} \quad z = \frac{z'}{\cos \alpha}$$

korrigieren.

Die Tab. 12 zeigt die unter Anwendung dieser Formel ermittelten hygrischen Längenänderungen der untersuchten Sandsteine aus Tab. 11.



**Abb. 75:**

Korrektur der Messwerte in  $y$ - und  $z$ -Richtung.

**Tab. 12:**

Hygrische Längenänderung in Abhängigkeit von der Probenorientierung [korrigierte Werte, (Messungen an Würfeln 50 mm x 50 mm x 50 mm)].



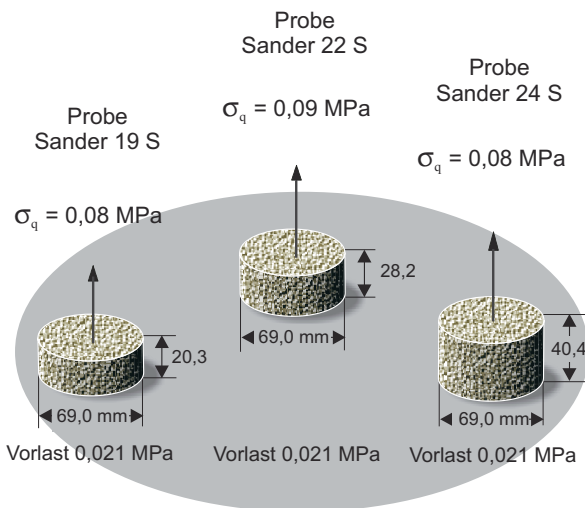
Probe:	Hygrische Längenänderung			Volumenänderung	Volumenänderung	Verhältnis	Verhältnis
	x - Richtung	y - Richtung	z - Richtung				
	(Messwert)	(kor. Messwert)	(kor. Messwert)	∅	∅	x : y : z	∥ : ⊥
	[ μm / m ]	[ μm / m ]	[ μm / m ]	[ % ]	[ % ]	[ - ]	[ - ]
Abtswinder 1	1.578	1.578	2.961	6,12		1 : 1 : 1,88	
Abtswinder 1 a	1.590	1.590	2.697	5,88		1 : 1 : 1,70	
Abtswinder 1 b	725	725	1.155	2,61	4,9	1 : 1 : 1,59	1 : 1,7
Cottaer 1	218	218	347	0,78		1 : 1 : 1,60	
Cottaer 1 a	178	178	328	0,68		1 : 1 : 1,84	
Cottaer 1 b	199	199	329	0,73	0,7	1 : 1 : 1,65	1 : 1,7
Ebenheider 1	755	755	2.078	3,59		1 : 1 : 2,75	
Ebenheider 1 a	776	776	2.112	3,66		1 : 1 : 2,72	
Ebenheider 1 b	741	741	2.156	3,64	3,6	1 : 1 : 2,91	1 : 2,8
Maulbronner 1	260	260	453	0,97		1 : 1 : 1,74	
Maulbronner 1 a	279	279	511	1,07		1 : 1 : 1,83	
Maulbronner 1 b	299	299	624	1,22	1,1	1 : 1 : 2,08	1 : 1,9
Obernkirchner 1	139	139	274	0,55		1 : 1 : 1,97	
Obernkirchner 1 a	100	100	121	0,32		1 : 1 : 1,21	
Obernkirchner 1 b	89	89	178	0,36	0,4	1 : 1 : 1,98	1 : 1,7
Regensburger 1	120	120	200	0,44		1 : 1 : 1,67	
Regensburger 1 a	103	103	125	0,33		1 : 1 : 1,21	
Regensburger 1 b	120	120	329	0,57	0,4	1 : 1 : 2,74	1 : 1,9
Rorschacher 1	655	655	943	2,25		1 : 1 : 1,44	
Rorschacher 1 a	653	653	866	2,17		1 : 1 : 1,33	
Rorschacher 1 b	794	794	1.188	2,78	2,4	1 : 1 : 1,50	1 : 1,4
Sander 1 b, Typ I	673	673	1.546	2,89	2,9	1 : 1 : 2,30	
Sander 1 c, Typ II	1.432	1.432	3.064	5,93		1 : 1 : 2,14	
Sander 1 d, Typ II	1.302	1.302	2.660	5,26	5,6	1 : 1 : 2,04	1 : 2,1
Sander 1, Typ III	3.070	3.070	6.454	12,59		1 : 1 : 2,10	
Sander 1 a; Typ III	2.676	2.676	5.705	11,06	11,8	1 : 1 : 2,13	1 : 2,1

## 4 Quelldruck

### 4.1 Vorversuche

Vor Beginn der eigentlichen Messreihen mussten die Randbedingungen und Gültigkeitsgrenzen der zur Anwendung kommenden Untersuchungsmethoden betrachtet werden. Ist der Quelldruck volumen- und richtungsunabhängig? Welchen Einfluss hat die Ausgangsfeuchte der Probe auf das Messergebnis und wie wird das Resultat durch unterschiedliche Vorbelastungen der Probe beeinflusst?

#### 4.1.1 Probendimension



**Abb. 76:**

Quelldruck ( $\sigma_q$ ) in Abhängigkeit von der Probendimension. Messungen senkrecht zur Schichtung. Die radiale Ausdehnung der Proben war nicht behindert (freie Quellung).

Die Dimension der Prüfkörper wird im Oedometerversuch durch den, die Radialdehnung verhindernden, Stahlring vorgegeben ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm). Ausgehend von den physikalischen Eigenschaften des Druckes (Flächen-, Volumen- und Richtungsunabhängigkeit) dürfte bei gleicher homogener Materialbeschaffenheit der Quelldruck nicht von der Probendimension abhängen. Da aber die Messergebnisse der hygrischen Längenänderung eine deutliche Richtungsabhängigkeit in Bezug auf die Schichtung der Gesteine zeigten und das selbe Ergebnis für die Quelldruckmessungen zu erwarten war, wurde die Volumenunabhängigkeit der Quelldruckmesswerte nicht von vorn herein als gesichert angenommen. Aus diesem Grunde wurden drei unterschiedlich dicke Gesteinsscheiben, aus einem senkrecht zur Schichtung gebohrten Zylinder, hergestellt. Die Messungen wurden exemplarisch am Sander Sandstein, Typ II durchgeführt. Die Abb. 76 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Eine Volumenabhängigkeit des Quelldruckes ist aus dieser Messreihe nicht ableitbar.

Allerdings zeigten weitere Messungen an anderen Zylindern ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 160 mm) des gleichen Sandsteinmaterials wesentlich höhere Quelldruckwerte (von bis zu 0,4 MPa). Diese unterschiedlichen Werte wurden anfänglich der Inhomogenität des Untersuchungsmaterials zugeschrieben. Dabei sind die Tonminerale nicht gleichmäßig im Sandstein verteilt, sondern lagenweise angereichert, und die Anzahl dieser einzelnen Tonlagen variiert sehr stark im Gestein. So könnten im oberen Teil eines Prüfzylinders diese Tonlagen vermehrt vorkommen, während sie im unteren Teil weitestgehend fehlen. Bei einer anschließenden Teilung dieses Zylinders und der Bestimmung des Quelldruckes würde der obere Teil einen höheren Messwert liefern als der untere. Damit ließen sich unterschiedliche Quelldruckwerte ein und desselben Materials erklären.

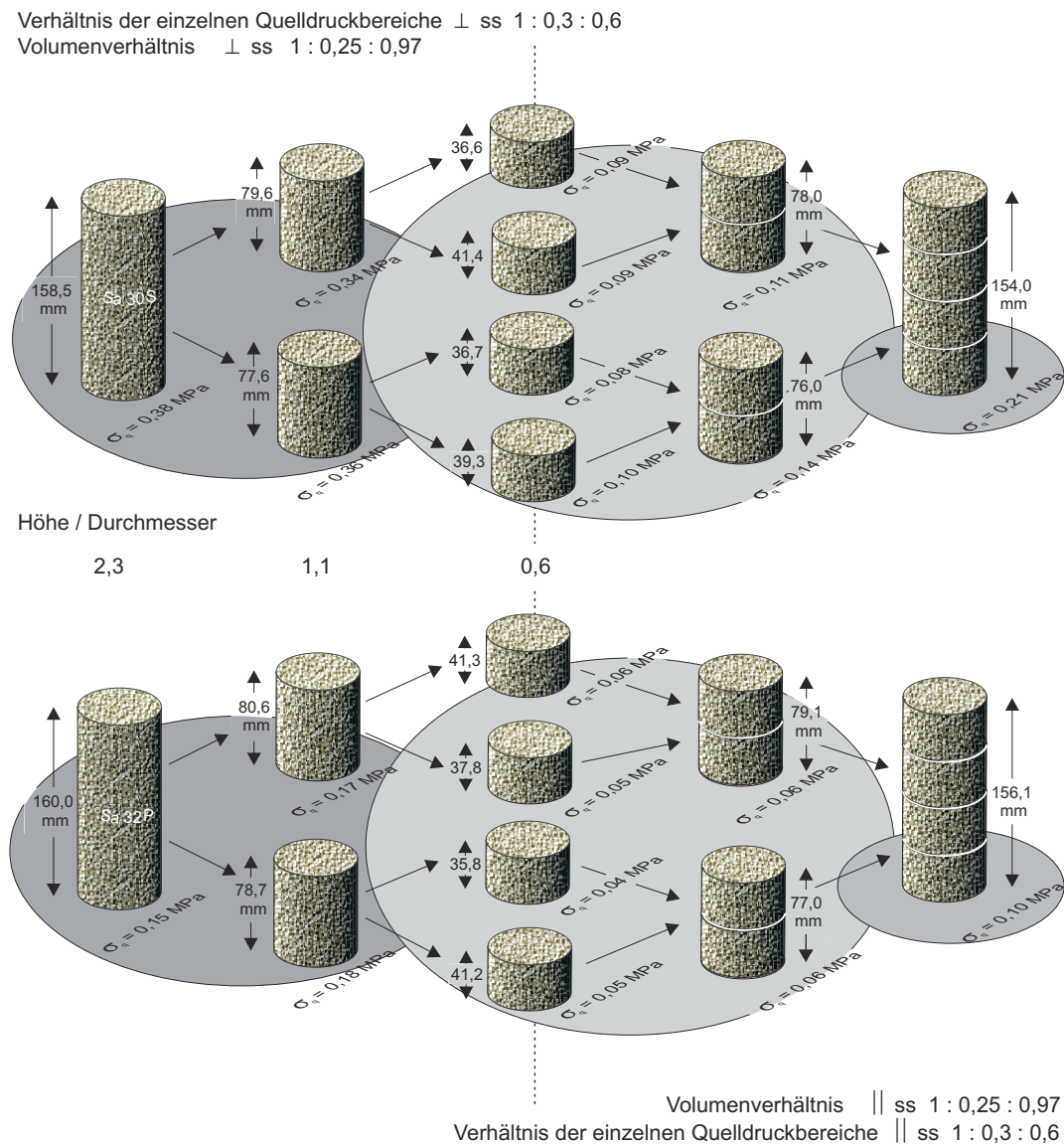
Die genauere Untersuchung zweier Bohrkerne (einmal senkrecht zur Schichtung und einmal parallel zur Schichtung gebohrt) brachte dann eine andere Erklärung dieses Phänomens (s. Abb. 77). Zu Beginn der Versuchsreihe wurde der Quelldruck beider Zylinder gemessen, anschließend wurden die Kerne mittig geteilt. An den beiden so entstandenen Hälften wurde wiederum der Quelldruck bestimmt. Anschließend wurden die Hälften nochmal geteilt und an den dabei entstandenen "Viertelkernen" erneut der Quelldruck gemessen (s. Abb. 77, linker Bereich). Alle Messungen wurden unter identischen Bedingungen durchgeführt (gleiche Vorlast für alle Prüfungen, dieselbe Temperatur während der Messungen und identische Ausgangsstofffeuchte der Probekörper).



In einer zweiten Messreihe wurden dann die Kerne wieder sukzessiv zusammengesetzt (s. Abb. 77, rechter Teil). Dabei erreichten die gemessenen Quelldruckwerte nicht mehr ihre Ausgangswerte. Dies liegt vor allem an der vollständigen Trennung der Kerne. Obwohl diese möglichst passgenau zusammengesetzt wurden, genügt die zugelassene Dehnung, im Bereich der Schnittebene den Quelldruck entscheidend zu reduzieren (s. Abb. 65). Am deutlichsten ist dies bei den beiden wieder komplett zusammengesetzten Kernen sichtbar. Die Reduzierung des Quelldruckes betrug in beiden Fällen (sowohl  $\perp$  ss als auch  $\parallel$  ss) ca. 40 %.

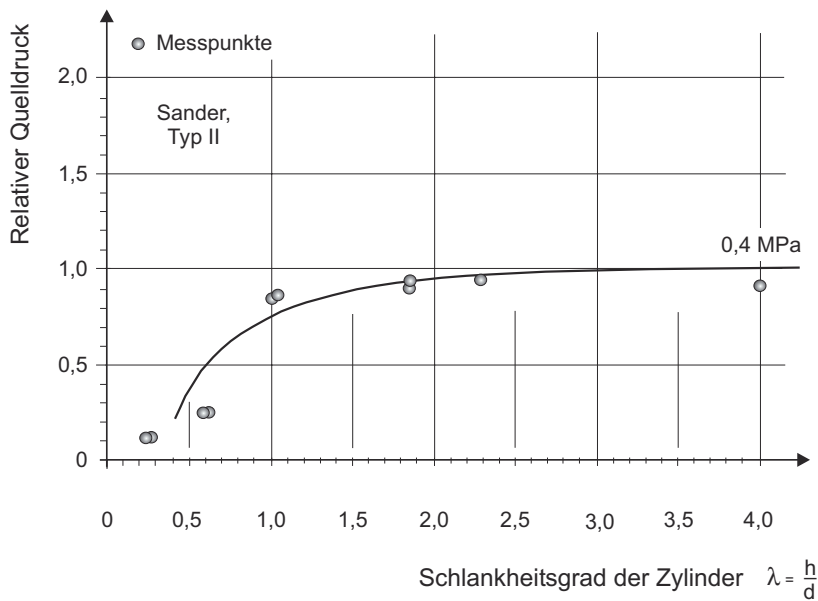
Auch durch das Zusammenfassen der einzelnen Messwerte zu Bereichen annähernd identischen Druckes und dem anschließenden Vergleich dieser Bereiche mit den gemittelten Volumina lässt sich kein Zusammenhang zwischen dem Quelldruck und dem dazugehörigen Volumen erkennen.

Da die einzige Übereinstimmung beider Bohrkerne in ihrer geometrischen Form liegt und die Verminderung des Quelldruckes sowohl senkrecht wie auch parallel zur Schichtung auftritt, also richtungsunabhängig zur Schichtung ist, muss es sich dabei um einen Formfaktor handeln.



**Abb. 77:**

Quelldruckmessergebnisse der Proben Sa 30 S (senkrecht zur Schichtung gebohrt) und Sa 32 P (parallel zur Schichtung gebohrt). Das Verhältnis  $h/d$  (Höhe / Durchmesser des Zylinders) beschreibt den Formfaktor der einzelnen Zylinder (Vorlast der Quelldruckversuche = 0,021 MPa, Temperatur während der Prüfung 23 °C und Probenkonditionierung der Zylinder bei 23 °C und 50 % r. F.).

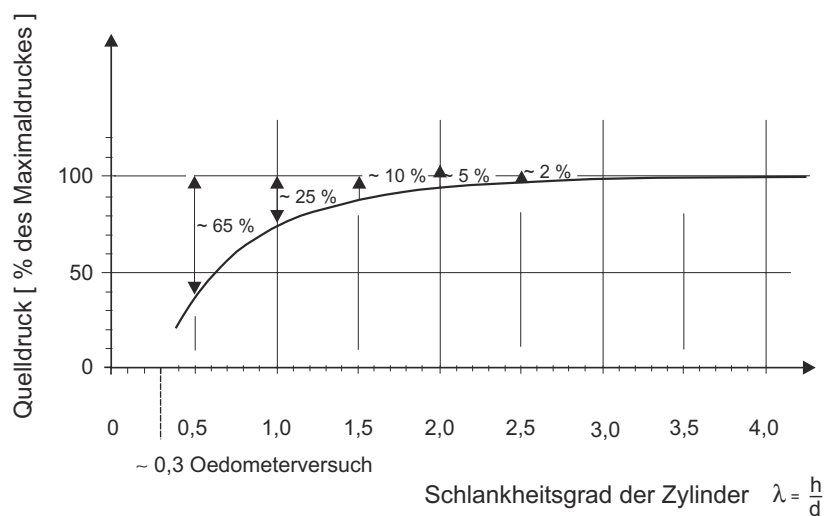


**Abb. 78:**

Quelldruck in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad der Prüfzylinder.

Die im Oedometerversuch verwendeten Proben ( $\varnothing 70$  mm, Höhe 20 mm) besitzen einen Schlankheitsgrad von  $\lambda \sim 0,3$ . Damit liegt der gemessene Quelldruck in etwa bei 10 % des Maximalwertes. Vergleicht man die Kurven der Abb. 78 und 79 mit denjenigen der Abb. 34 (s. Abschn. II. 1.7.1), so fällt deren weitestgehende Übereinstimmung auf. Spiegelt man die Messwertkurve der Abb. 34 horizontal, so gelangt man zur den Messwertkurven der Abb. 78 und 79. Da es sich beim Quelldruckversuch um eine Art Druckversuch handelt, sollten hierfür dieselben Abhängigkeiten wie im Druckversuch gelten. Es ist deshalb zu erwarten, dass der in Abb. 35 dargestellte Zusammenhang zwischen der Kantenlänge eines Würfels und dessen Druckfestigkeit auch bei der Durchführung des Quelldruckversuches Gültigkeit besitzt. Die Erklärung des Phänomens muss in der Dehnungsbehinderung der Prüfkörper im Bereich der Druckplatten gesehen werden. Erst bei ausreichend hohen Zylindern oder entsprechend großen Würfeln besitzen die Probekörper in ihrer Mitte einen ausreichend großen Bereich, in dem die radiale Quellung nicht behindert ist (s. Abschn. II 1.7.1, Abb. 33).

Obwohl die Untersuchungen der Radialdehnungsbehinderung im Oedometerversuch keinerlei Hinweise auf die wechselseitige Abhängigkeit von Radial- zu Axialdehnung und Druck liefern, muss dieser Zusammenhang gegeben sein. Wird die Radialdehnung an den Druckplatten behindert oder gar unterbunden, reduziert dies den Axialdruck entsprechend. Möglicherweise sind die Prüfkörper im Oedometerversuch, durch ihre Geometrie und den Versuchsaufbau bedingt, schon so stark in ihrer Radialdehnung behindert, dass die zusätzliche Behinderung mittels des Stahlrings zur Radialdehnungsbehinderung zu nicht mehr messbaren Veränderungen führt.



**Abb. 79:**

Quelldruck [in % des Maximaldruckes] in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad der Prüfzylinder.

Wird der Quotient Höhe zu Durchmesser der einzelnen Kerne (Schlankheitsgrad der Zylinder) gegen den Quelldruck aufgetragen, so ergibt sich die in Abb. 78 dargestellte Kurve. Ab einem Schlankheitsgrad der Proben von ungefähr  $\lambda \geq 2$  wird der maximale Quelldruck erreicht und erst ab diesem Verhältnis bleibt der Druck konstant. Die Abb. 79 zeigt die prozentuale Abhängigkeit der Quelldruckwerte vom Schlankheitsgrad. So ergibt sich für einen Zylinder mit dem Schlankheitsgrad  $\lambda = 1$  ein um 25 % niedrigerer Wert und für  $\lambda = 0,5$  ein um 65 % reduzierter Messwert.

#### 4.1.2 Ausgangsfeuchte und Temperatur

Gesteine nehmen durch Sorption Feuchtigkeit aus ihrer Umgebungsluft auf (s. Abschn. III. 2). Weil es zu erwarten war, dass der Quelldruck von der bereits im Gestein vorhandenen Wassermenge (Ausgangsfeuchte) abhängig ist, galt es für alle Prüfungen identische Anfangsbedingungen zu gewährleisten und den Einfluss der Materialfeuchte auf den Quelldruck näher zu bestimmen.

So wurde die zu messende Probe zusammen mit den für den Versuch notwendigen Filtersteinen für mindestens 48 Stunden im Trockenschrank, bei 50 °C, getrocknet und anschließend 48 Stunden, über Silikagel, im Exsikkator gelagert. Die Probe wurde gewogen und in das Quelldruckmessgerät eingespannt. Die Oedometerzelle wurde mittels einer PT-Folie luftdicht verschlossen und die Vorlastphase eingeleitet. Nach Einstellung des neuen Gleichgewichtszustandes wurde unmittelbar vor der Wasserzugabe die Folie entfernt und die Quellung eingeleitet. Damit war gewährleistet, dass die Ausgangsfeuchte der Probe nahezu null war (Ausgleichsfeuchte für Lagerung über Silikagel ~ 3 % r. F.). Durch entsprechende Probenkonditionierung konnte sodann jede beliebige Ausgangsfeuchte der Probe realisiert werden.

**Tab. 13:**

Quelldruck in Abhängigkeit von der Ausgangsfeuchte der Probe (Messungen an Oedometerproben, Ø 70 mm, Höhe 20 mm).



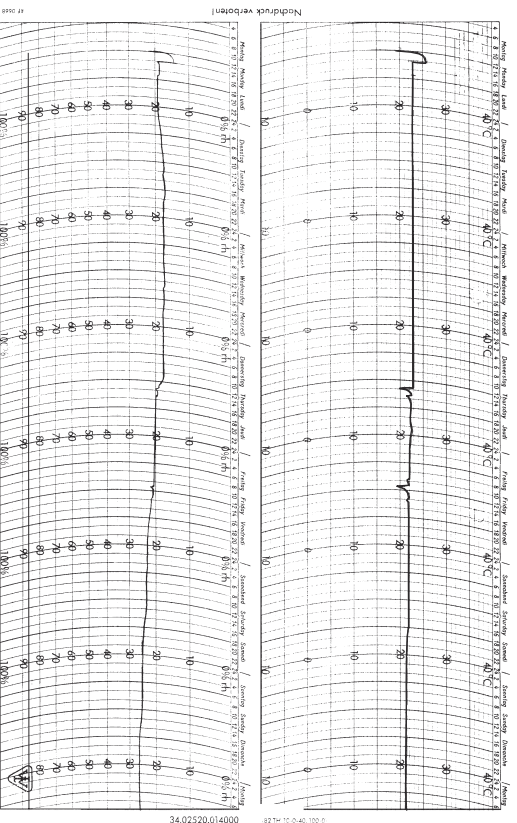
Probe: /Nr. d. Messung	relative Luftfeuchte [%]	Ausgangs- Stofffeuchte [%]	axialer Quelldruck bei $\sigma_v$ [MPa]	Wasser- aufnahme [M. - %]	Versuchs- dauer [d]
Sander 18 S /15 a	0	0,0	0,05	6,5	5
Sander 18 S /1	50	0,8	0,05	5,6	2
Sander 18 S /4	60	0,8	0,05	5,8	2
Sander 18 S /9	60	1,0	0,04	5,5	3
Sander 18 S /6	65	1,0	0,06	5,5	2
Sander 18 S /7	65	1,0	0,05	5,5	2
Sander 18 S /19	80	1,1	0,05	5,4	5
Sander 18 S /18	85	1,2	0,05	5,3	3
Sander 18 S /20	98	2,3	0,03	4,2	5

Vorlast  $\sigma_v = 0,021$  MPa

Die Tab. 13 zeigt eine Messreihe mit unterschiedlichen Ausgangsfeuchten der Probe. Da alle Messungen mit der selben Probe (Sa 18 S) durchgeführt wurden, konnte die Streuung der Ergebnisse infolge einer Variation des Materials weitestgehend ausgeschlossen werden. Der Einfluss der Ausgangsfeuchte der Probe ist erst ab einer Konditionierung in 85 % r.F. und höher signifikant feststellbar. Die Messungen, bei denen die Probe in einer Umgebungsfeuchte von weniger als 80 % r.F. konditioniert wurde, zeigen mehr oder weniger den gleichen Messwert. Die Messgenauigkeit bei der Bestimmung des Quelldruckes lag bei  $\pm 0,01$  MPa.

Die zweite Randbedingung für identische Messreihen war eine einheitliche Temperatur während der Prüfungen. Dies war vor allem für die überwiegend aus Eisen und Stahl bestehenden Prüfvorrichtungen (Universalprüfmaschine, Oedometer und Triaxialquelldruck-Messgerät) wichtig, die schon auf geringste Temperaturschwankungen mit Driften des Messwertes reagierten. Sogar das Öffnen der Labortüre im Winter hatte einen Abfall der Messwertkurve zur Folge. Zur Eliminierung dieses Einflussfaktors führt die ETH Zürich ihre Quelldruckversuche in vollklimatisierten Laborräumen durch. Es schien deshalb notwendig, die Klimabedingungen des Prüfraumes näher zu betrachten. Der Laborraum befindet sich im zentralen Bereich des Erdgeschosses des Gebäudes des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege. Keine seiner Außenmauern ist der direkten Sonnenbestrahlung ausgesetzt, und der Raum ist fensterlos. Die während eines Jahreszyklus durchgeführten Thermo-Hygometer-Messungen (s. Abb. 80) zeigen eine einheitliche Temperatur von 23 °C im Prüfraum. Lediglich Schwankungen der Feuchte von ~ 20 % r.F. im Winter bis zu ~ 80 % r.F. in den Sommermonaten waren feststellbar. Da die Ausgangsfeuchte der Proben durch entsprechende Konditionierung eingestellt werden konnte und die Raumtemperatur weitestgehend stabil war, genügte der Raum den zur Durchführung von Quelldruckversuchen zu fordernden Bedingungen.

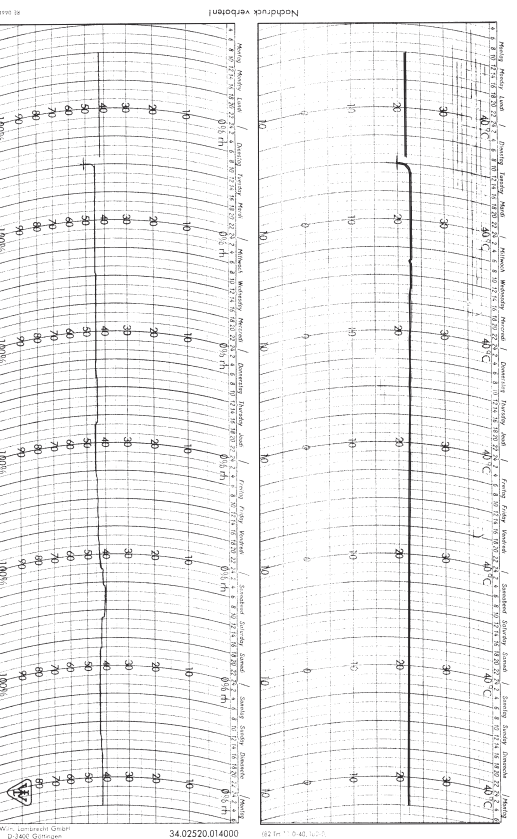
Montag, 11.03.1996 bis 18.03.1996



a)

a')

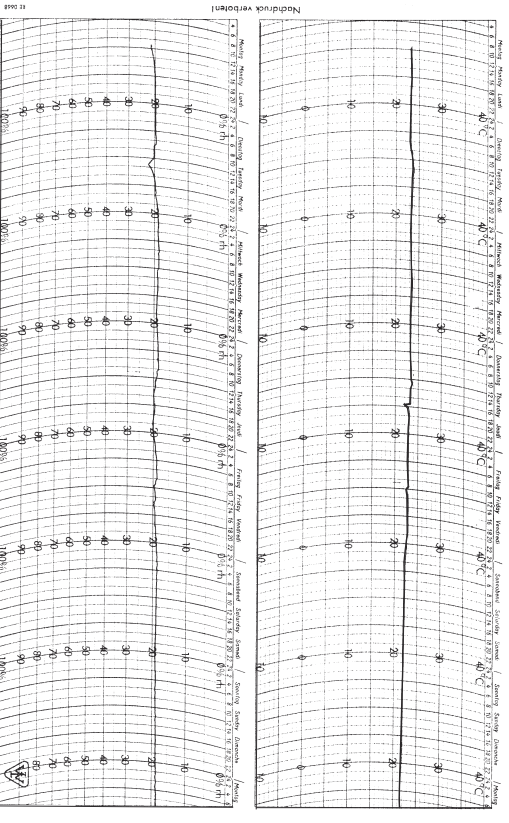
Dienstag, 06.06.1995 bis 13.06.1995



b)

b')

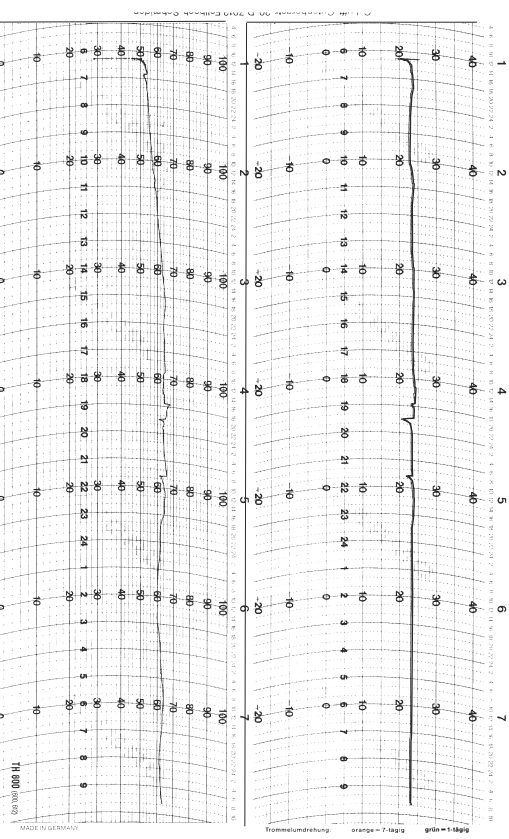
Montag, 23.09.1996 bis 30.09.1996



c)

c')

Montag, 02.12.1996 bis 09.12.1996



d)

d')

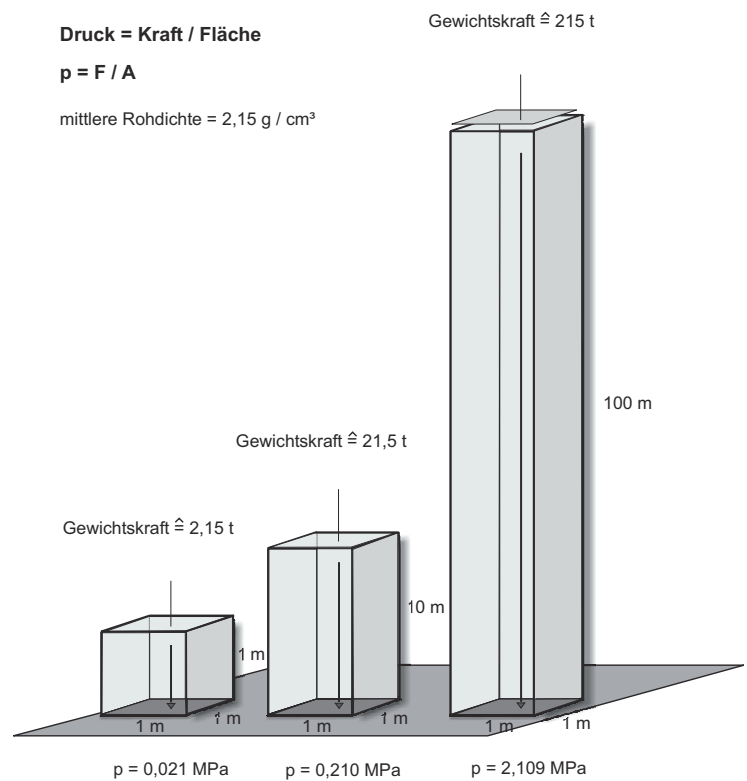
Abb.80:

Thermo-hygrimetrische Aufzeichnungen des Klimaverlaufes eines Jahreszyklus (Frühjahr, Sommer, Herbst und Winter) des Laborraumes, in dem die Quelldruckmessungen durchgeführt wurden (a, b, c und d = Temperatur, a', b', c' und d' = relative Feuchte).

### 4.1.3 Vorlast

Da Quellversuche sehr empfindlich auf eventuell zugelassene Dehnungen reagieren (s. Abschn. II. 3.1.1, Abb. 65), ist es notwendig, vor Beginn der Quellung einen vollständigen Kraftschluss der Versuchsapparatur herzustellen. Schon kleinste zugelassene Längenänderungen beeinflussen den erzielten Messwert erheblich. Der Kraftschluss der Messapparatur wird durch stufenweise Belastung des Probekörpers bis zu dessen Vorlast  $\sigma_v$  erreicht. Da eine Abhängigkeit des Quelldruckes von der Vorlast zu erwarten war, mussten alle Versuche unter definierten Vorlastbedingungen durchgeführt werden. Hierzu wurde der durch das Eigengewicht an der Basis eines 1 m hohen Quaders, eines 10 m und eines 100 m hohen Pfeilers entstehende Druck berechnet (s. Abb. 81). Diese drei Druckstufen repräsentieren die unter realistischen Verhältnissen am Bauwerk vorkommenden Belastungsdrucke.

Da Gesteine auf eine zusätzlich aufgebrachte Kraft mit Kriech- und Ausweichbewegungen ihrer Struktur reagieren, muss die auf die Probe wirkende Kraft solange konstant gehalten werden, bis sich ein neues Gleichgewicht im Prüfkörper eingestellt hat. Sehr deutlich war dieses Relaxationsverhalten der Gesteine im Versuch mit der Universalprüfmaschine zu beobachten. Wurde die Maschine nach dem Anfahren der entsprechenden Vorlaststufe nicht mehrmals nachjustiert, fiel der durch die aufgebrachte Last erzeugte Druck innerhalb von 24 Stunden um bis zu 50 % ab. Die zu frühe Einleitung des Quellvorgangs hätte einen undefinierten Ausgangszustand der Probe zur Folge und würde eine Vergleichbarkeit der gewonnenen Werte erheblich erschweren oder sogar gänzlich verhindern. So wurden alle Prüfkörper vor der eigentlichen Messung für mindestens 48 Stunden belastet und die durch Wasserzugabe erfolgende Quellung erst dann eingeleitet, wenn der neue Gleichgewichtszustand der Probe erreicht war. Die Messuhren des Oedometerversuches zeigten dann keinerlei Längenänderung der Probe mehr an.

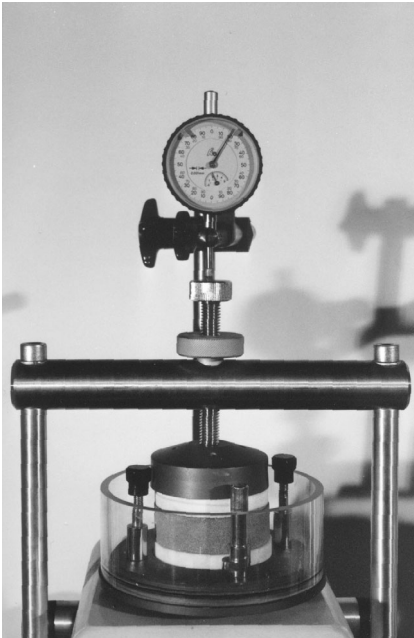


**Abb. 81:**

Berechnung der Vorlaststufen für die Quelldruckversuche.

## 4.2 Oedometerversuch

### 4.2.1 Messprinzip und Versuchsaufbau



**Abb. 82:**

Die Oedometer-Zelle mit dem Belastungsbalken und der Vorrichtung zur Längenänderungsmessung.

Der Oedometerversuch stammt aus dem Bereich der Bodenkunde/Baugrunduntersuchung und dient der Bestimmung von Sohldrücken verbunden mit evtl. Setzungen oder Hebungen. Da es sich bei den quellfähigen Gesteinsschichten meistens um sog. Weichgesteine (Tone, Schluffe oder Mergel) handelt, wurde eine speziell auf diese Gesteine hin abgestellte Probeentnahmemethode mit anschließender Versuchsdurchführung entwickelt. Der während des Versuches die Radialdehnung behindernde Odometerring (s. Abb. 62) ist auf seiner Unterseite als Stechring ausgebildet. Mit seiner Hilfe werden passgenaue Proben ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm) aus dem zu untersuchenden Material entnommen. Eventuell über den Ring hinausstehendes Material wird mittels eines Messers abgestreift. Da die Proben ohne Veränderung ihres natürlichen Feuchtigkeitsgehaltes zur Messung ins Labor gebracht werden, ist der exakte Sitz der Probe im Stahlring während der Messung gewährleistet.

Untersuchungen an Tonsteinen, also an Hartgesteinen, verdeutlichen die Schwierigkeiten, die bei der Probenherstellung zur Quelldruckmessung dieser Gesteine zu überwinden sind. Da selbst kleinste zugelegene Dehnungen das Messergebnis beträchtlich beeinflussen, muss der passgenaue Sitz des Odometerringes gewährleistet sein. PIMENTELL (1996) löste dieses Problem dadurch, dass er seine Proben mittels einer Gesteinsdrehbank in den Ring einarbeiten ließ. Dabei musste die Gesteinsscheibe ohne Schmiermittel, also trocken auf Maß gebracht werden.

Derselbe Ansatz wurde anfänglich auch bei dieser Arbeit verfolgt. So wurde in den Werkstätten des Mineralogischen Institutes der Lud-

wig-Maximilians-Universität München eine Gesteinsscheibe (Sander, Typ II) hergestellt, die sich gerade noch durch leichtes Drehen in den Odometerring einbringen ließ. Nach deren Quellung saß die Scheibe derart fest im Ring, dass sie in diesem Zustand nicht mehr heraus genommen werden konnte. Erst nach vollständiger Trocknung ließ sie sich wieder entfernen. Die Maßgenauigkeit dieser Scheibe lag etwa bei einem Zehntelmillimeter. Diese Genauigkeit stellt die Untergrenze der Bearbeitbarkeit von Sandsteinen dar, die durch ihre jeweilige Körnung vorgegeben wird. Wegen der hohen Abrasivität des Untersuchungsmaterials und dem damit verbundenen, hohen Verbrauch an Dreh- und Schneidestahl eignet sich diese Methode zur Herstellung von einzelnen Proben, nicht aber zur Prüfkörperherstellung für umfangreiche Messreihen.

Auch der Versuch, die Probekörper mittels Wasserstrahl zu schneiden, führte nicht zum gewünschten Erfolg. Die Schnittgenauigkeit dieser im Metallbereich bestens bewährten Methode wird mit 1/100 mm angegeben. Beim Versuch, aus einer 20 mm starken Gesteinsplatte die Probekörper auszuschneiden, zeigte sich allerdings, dass diese Genauigkeit nur an der Oberfläche der Gesteinsplatte erreicht wird und der Wasserstrahl mit zunehmender Tiefe im Material abweicht. Alle auf diese Weise gewonnenen Probekörper waren mehr oder weniger konisch, und damit war ein passgenauer Sitz der Proben im Stahlring nicht zu erreichen. Auch diese Methode wurde deshalb nicht weiter verfolgt.

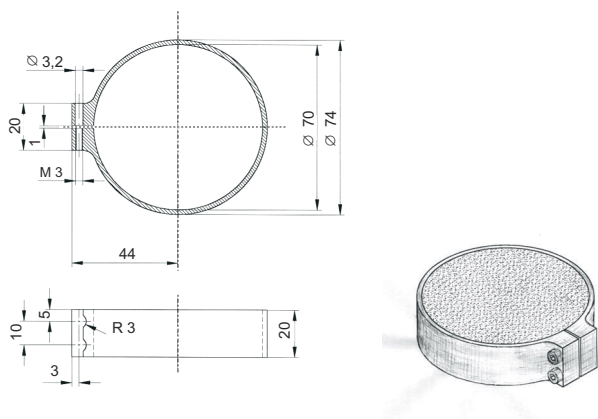
Einen anderen Ansatz stellt der Versuch dar, den zwischen Probekörper und Ring verbleibenden Spalt mittels Kunstharz (Technovit) oder Blei auszugießen. Hierbei muss darauf geachtet werden, dass die hygri-schen Eigenschaften des Untersuchungsmaterials nicht verändert werden und dass das verwendete Material nach Erhärtung steif genug ist, die Radialdehnungen zu unterbinden. Auch an die Verwendung von Steinersatzmasse als Ausgleichsmaterial wurde gedacht. Da die Anwendung all dieser Möglichkeiten umfangreiche Voruntersuchungen voraussetzt und der Erfolg nicht absehbar war, wurde auf deren Realisierung verzichtet.

## 4.2.2 Anpassung der Versuchsanordnung

Die Abb. 83 zeigt den hygrischen Längenänderungsbereich der untersuchten Sandsteine. Im unteren Bereich sind die Quellsbeträge einer senkrecht zur Schichtung gebohrten Oedometerprobe ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm) dargestellt. So ist es zwar möglich, durch sehr präzise Probenbearbeitung die radiale Dehnung des Sander Schilfsandsteines ( $\sim 0,1$  mm) mittels des Oedometerringes zu unterbinden. Die radialen Dehnungen des Obernkirchner Sandsteins ( $\sim 0,004$  mm) lassen sich aber auf diese Weise nicht verhindern.

Aus diesem Grund wurde schon nach kurzer Zeit der Versuch, die Proben passgenau in den vorhandenen Oedometerring einzuarbeiten, verworfen. Stattdessen wurde nun versucht den umgekehrten Weg zu beschreiten. Da sich der Metallring wesentlich einfacher und auch mit deutlich höherer Präzision (Bearbeitungsgenauigkeit von bis zu einem Tausendstel Millimeter auf modernen CNC gesteuerten Fräsmaschinen) bearbeiten lässt, wurde nun versucht, den Ring der Probe anzupassen. Für eine entsprechend gebohrte und geschnittene Gesteinsscheibe wurde ein Oedometerring so weit aufgedreht, bis sich die Probe passgenau in den Ring einschieben ließ.

Beide Möglichkeiten, den passgenauen Sitz des Oedometerrings um die Probe zu gewährleisten (Anpassung der Probe an den vorhandenen Oedometerring oder Adaption des Stahlringes auf die entsprechende Gesteinsscheibe) wären wegen ihres enormen Herstellungsaufwandes für eine Messserie von 5 bis 10 Queldruckversuchen vorstellbar gewesen, nicht aber für die Durchführung von hundert Versuchen dieser Art.



**Abb. 84:**

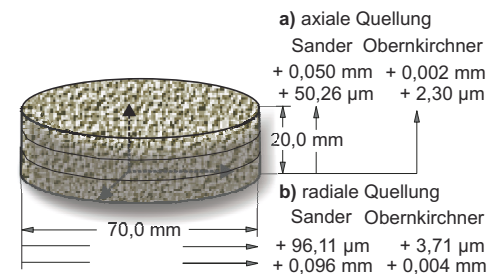
Konstruktionszeichnung des für die Messung von Hartgesteinen entwickelten Oedometerringes.

### Hygrische Längenänderung, Obernkirchner Sandstein

senkrecht zur Schichtung 115  $\mu\text{m}/\text{m}$   
parallel zur Schichtung 53  $\mu\text{m}/\text{m}$

### Hygrische Längenänderung, Sander Schilfsandstein

senkrecht zur Schichtung 2.513  $\mu\text{m}/\text{m}$   
parallel zur Schichtung 1.373  $\mu\text{m}/\text{m}$



**Abb. 83:**

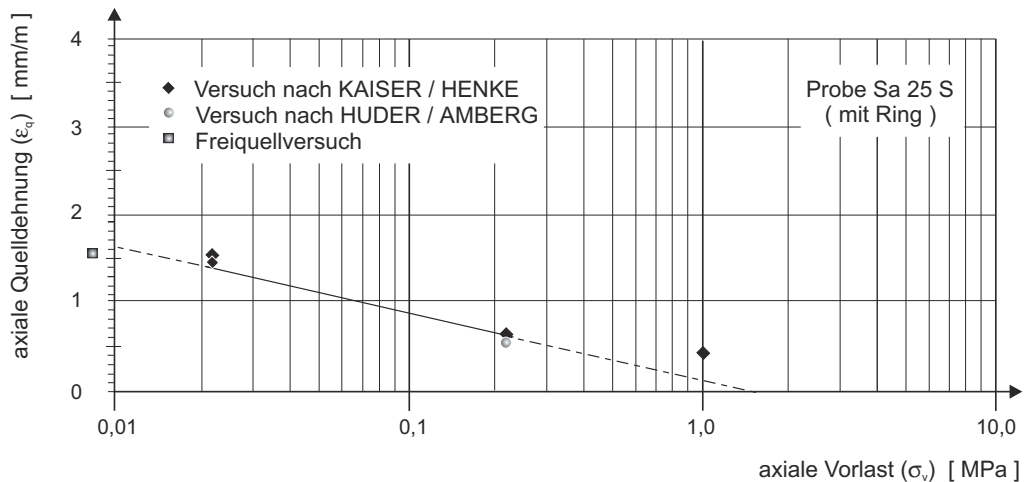
Der hygrische Längenänderungsbereich der untersuchten Sandsteine.

Deshalb wurde ein speziell für Hartgesteine zu verwendender Ring konstruiert (s. Abb. 84). Der aus einem Aluminiumblock gedrehte, 2 mm starke Ring kann über seine Spannvorrichtung um 1 mm im Umfang verändert werden. Dadurch kann sein Durchmesser um  $\sim 0,3$  mm variiert werden. Durch das Anziehen der Spannvorrichtung wird der passgenaue und kraftschlüssige Sitz des Ringes um die Probe gewährleistet. Mittels eines Drehmomentschlüssels lassen sich die Radialdruckverhältnisse bei jedem einzelnen Versuch definiert einstellen. Durch Beilegen von entsprechend langen Metallstreifen (V2A-Federstahl, Stärke 0,05 mm, 0,1 mm und 0,5 mm oder entsprechende Kombination) ließen sich auch Proben mit geringerer Größe messen. Radialdehnungsmessungen am Aluminiumring mit Probe zeigten, dass die Steifigkeit des Ringes ausreichend hoch ist. Die radialen Dehnungen der Prüfkörper werden vollständig unterbunden.





Trägt man die gemessenen Dehnungen in Abhängigkeit zur Vorlast in ein semilogarithmisches Netz ein, so lässt sich durch Extrapolation der Messpunktgerade der Schnittpunkt mit der Druck-Achse (x-Achse) bestimmen. Die Abb. 86 zeigt die graphische Ermittlung der Materialkonstante für die Probe Sa 25 S (Sander, Typ II) anhand von sechs Quellhebungsversuchen. Ab einer axialen Vorlast von  $\sim 1,3$  MPa sind keine Quellhebungen mehr zu erwarten.



**Abb. 86:**

Ermittlung des Auflastdruckes, ab dem keine Quelldehnung mehr stattfindet, für den Sander Schilfsandstein, Typ II.

Die zweite Versuchsdurchführung, die zur Anwendung kam, war der **Quelldruckversuch nach KAISER / HENKE** (s. Abb. 85, rechter Teil). Bei diesem Versuch wird neben der axialen Quellhebung  $\epsilon_{q(\sigma_v)}$  auch der axiale Quelldruck  $\sigma_{q(\sigma_v)}$  ermittelt. Die zu untersuchende Probe wird schrittweise bis zur Vorlast  $\sigma_v$  belastet. Nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes wird die Quellung durch Zugabe von destilliertem Wasser eingeleitet. Nach Abklingen der Quelldehnung wird die entstandene axiale Längenänderung durch Auflegen von zusätzlichen Gewichten rückgängig gemacht. Es wird so lange belastet, bis die Messuhren ihren ursprünglichen Wert (Anzeige vor der Wasserzugabe) erreichen. Der zur Eliminierung der Quelldehnung notwendige Druck wird als Quelldruckäquivalenzwert  $\sigma_{q,\ddot{A}}$  bezeichnet. Bei den Versuchsreihen mit unterschiedlichen Vorlaststufen zeigte sich, dass der Quelldruckäquivalenzwert auch eine Materialkonstante ist. Trotz der mit zunehmender Belastung kleiner werdenden Dehnbeträge ist der für die Rückstellung der Quellung notwendige Druck stets annähernd gleich groß.

Der axiale Gesamtdruck der Probe errechnet sich nach der Formel:

$$\sigma_{q(\sigma_v)} = \sigma_v + \sigma_{q,\ddot{A}}$$

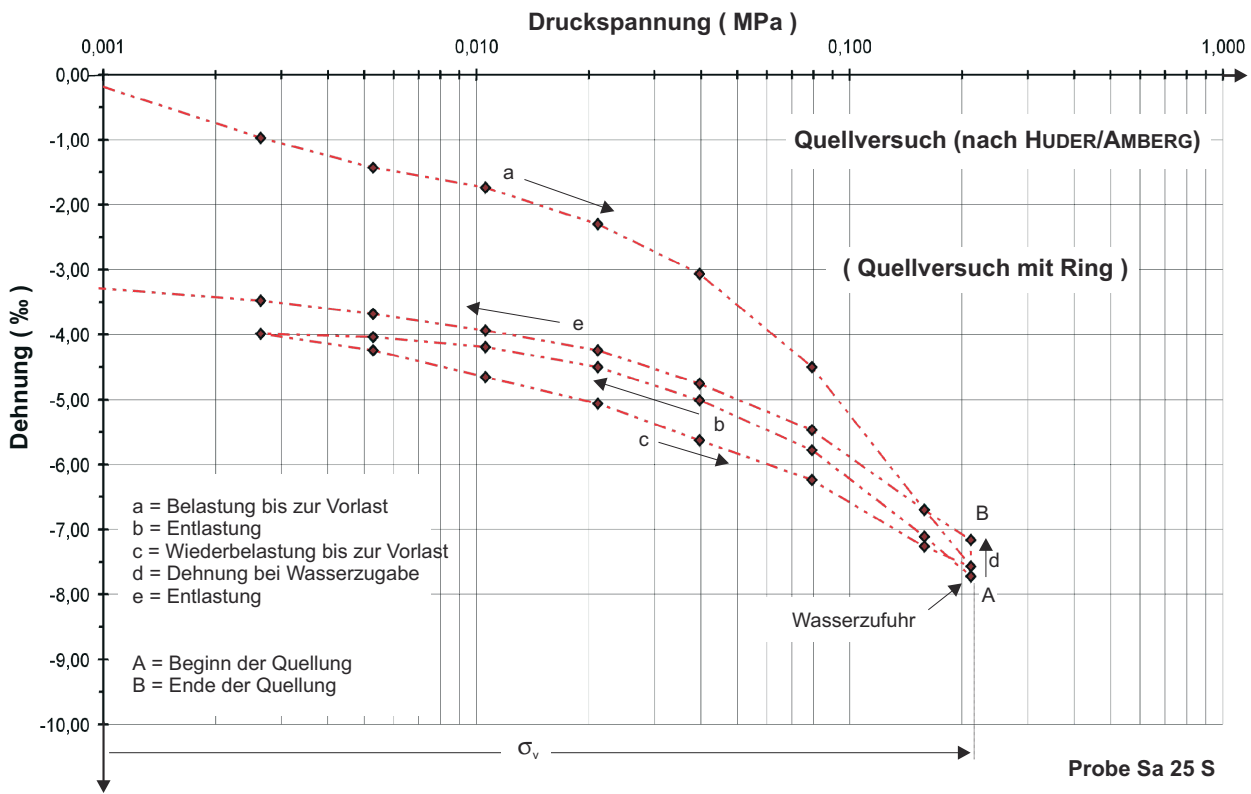
Mit

$\sigma_v$  = axiale Vorlast und

$\sigma_{q,\ddot{A}}$  = Quelldruckäquivalenzwert.

Die dritte Versuchsdurchführung war der **Quellversuch nach HUDER/AMBERG** (s. Abb. 87). Die Probe wird dabei in einem ersten Belastungszyklus schrittweise bis zur Vorlast  $\sigma_v$  belastet, anschließend bis zur geringst möglichen Auflast entlastet und dann wieder bis zur Vorlast  $\sigma_v$  belastet. Anschließend wird der Quellvorgang eingeleitet und nach dessen Abklingen die Quelldehnung bestimmt. Durch stufenweise Entlastung der Probe wird der Ausgangszustand ( $\sigma_v = 0,001$  MPa) erreicht.

Der erste Belastungszyklus dieses Versuches dient der Rückstellung von evtl. Auflockerungen der Probe während der Probengewinnung. Da die Durchführung eines solchen Versuches ca. 3 Monate in Anspruch nimmt, wird diese Methode eher selten angewendet. Auch ist die Egalisierung der Probenauflockerung bei Hartgesteinen nicht notwendig.



$\epsilon'_{q, (\sigma_v)} = -7,80 \text{ ‰}$  ( Setzung bei der Vorlast  $\sigma_v$  )

$\epsilon'_{q, (\sigma_v)} = 0,56 \text{ ‰}$  ( Quelldehnung bei der Vorlast  $\sigma_v$  )

$\epsilon_{q, (\sigma_v = 0)} = 1,54 \text{ ‰}$  ( Quelldehnung ohne Vorlast )

Vorlast  $\sigma_v = 0,210$  MPa

Wasseraufnahme (  $\sigma_v = 0,000$  MPa ) = 5,61 %

Wasseraufnahme (  $\sigma_v = 0,021$  MPa ) = 5,95 %

**Abb. 87:**

Quellversuch nach HUDER/AMBERG.

#### 4.2.4 Ergebnisse

Bei der Bestimmung der Quellkennwerte mit dem Oedometer werden lediglich die axiale Dehnung der Probe und der axiale Druck ermittelt. Die radialen Komponenten der Quellung bleiben unberücksichtigt. Durch die Verwendung des Oedometerringes wird die radiale Dehnung unterbunden, und es besteht keine Möglichkeit, den Radialdruck zu ermitteln. Dieser Spannungszustand entspricht demjenigen eines beliebigen Punktes einer unendlich ausgedehnten, quellfähigen Gesteinsschicht. Da in der Fels- und Bodenmechanik und in der Baugrundgeologie nur die durch den Quellvorgang hervorgerufenen vertikalen Hebungen und Setzungen mit deren Auswirkungen auf die Standsicherheit von Bauwerken eine Rolle spielen, sind die durch diese Messungen zu treffenden Aussagen ausreichend.

Betrachtet man hingegen einen im Mauerwerk verbauten Natursteinquader oder eine Säule, so wird die Notwendigkeit von Quelldruckmessungen in unterschiedlichen Raumrichtungen deutlich. Mit dem Oedometer ist es nicht möglich, den axialen und radialen Quelldruck an ein und derselben Probe zu messen. Hierzu müssen zwei entsprechend gebohrte und geschnittene Gesteinsscheiben (einmal  $\perp$  ss und einmal  $\parallel$  ss) hergestellt und geprüft werden. Bei Variation dieser Materialkennwerte innerhalb einer Gesteinsvariante ist deshalb eine eindeutige Aussage in Bezug auf Schichtungs- und damit auf Richtungsabhängigkeiten nur mit erheblichem Aufwand möglich.

Die Tab. 14 zeigt die Ergebnisse der Messungen für die näher untersuchten Sandsteine. Die ermittelten Quelldruckwerte sind als sehr gering einzustufen und zeichnen nur undeutlich die Unterschiede der hygrischen Längenänderung in die Raumrichtungen nach.

**Tab. 14:**

Quelldruckmessergebnisse der untersuchten Sandsteine  
(Messungen an Oedometerproben,  $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm, Co = Cottaer-, Eb = Ebenheider-, Mau = Maulbronner-, Ob = Obernkirchner-, Ro = Rorschacher- und Sa = Sander Sandstein, P = Messung  $\parallel$  ss, S = Messung  $\perp$  ss )



Probe		Quelldruck [ MPa ]	Quelldruck- äquivalenzwert [ MPa ]	hygrische Längenänderung [ $\mu$ m ]
Vorlast		$\sigma_v = 0,021$ MPa		freie Quellung
Co 11 S	+	0,02	0,00	6
Co 16 P	+	0,02	0,00	4
Eb 11 S	+	0,03	0,01	37
Eb 16 P	+	0,02	0,00	14
Mau 11 S	+	0,02	0,00	9
Mau 16 P	+	0,02	0,00	5
Ob 11 S	+	0,02	0,00	3
Ob 16 P	+	0,02	0,00	2
Ro 11 S	+	0,02	0,00	19
Ro 16 P	+	0,02	0,00	13
Sa 11 S, Typ II	+	0,04	0,02	52
Sa 16 P, Typ II	+	0,03	0,01	26

+ = mit radialer Behinderung

Bei der Gegenüberstellung der Messungen mit und ohne Radialdehnungsbehinderung (s. Tab. 15) zeigt sich, dass keinerlei Beeinflussung der Messwerte in axialer Richtung durch die Behinderung festzustellen ist (beide Messungen mit identischen Ausgangsbedingungen an der gleichen Probe).

Da die Wirksamkeit des verwendeten Ringes (vollständige Unterbindung der Dehnung in radialer Richtung) vor der Durchführung der Messungen geprüft und bestätigt wurde, lässt dieses Ergebnis nur zwei Schlussfolgerungen zu: Entweder ist der axiale Quelldruck vollkommen unabhängig von der Radialdehnungsbehinderung, d.h. eine gegenseitige Abhängigkeit und wechselseitige Beeinflussung der Quelldruckwerte ist nicht gegeben, oder die radiale Dehnung der Probe ist während des Versuches ohne Ring bereits soweit behindert, dass die zusätzliche Verwendung des Aluminiumringes keinerlei weitere Dehnungsbehinderung bewirkt und dadurch keine messbaren Veränderungen des Quelldruckwertes auftreten.

Da die erste Schlussfolgerung allen bisherigen Untersuchungsergebnissen auf dem Gebiet der Quelldruckmessungen widersprechen würde und die Untersuchungen zur Prüfkörpergeometrie bereits erste Indizien für eine Radialdehnungsbehinderung der Probe lieferte, ist wohl die zweite Annahme am wahrscheinlichsten. Durch die geringe Höhe der Probe (20 mm) und die zweifelsohne vorhandene Reibung an den Druckplatten der Messanordnung ist die Radialdehnung der Probe, auch ohne Ring, bereits weitestgehend unterbunden. Aus diesen Gründen wurde bei den folgenden Untersuchungen zum größten Teil auf die Verwendung des Ringes verzichtet.

Bei Verzicht auf den die Radialdehnungen verhindernden Oedometerring ist die dadurch bedingte Probendimension ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm) nicht mehr zwingend notwendig. Bei einem Teil der nachfolgenden Messungen (mit dem Oedometer und der Universalprüfmaschine) wurde deshalb die geometrische Form des Würfels (50mm x 50mm x 50 mm) als Prüfkörper gewählt. Diese Prüfkörperform bietet den Vorteil, sowohl senkrecht wie auch parallel zur Schichtung an ein und derselben Probe messen zu können.

**Tab. 15:**

Vergleich der Quelldruckmessergebnisse mit und ohne radialer Behinderung der Probe (Messungen an Oedometerproben,  $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm, P = Messung || ss, S = Messung  $\perp$  ss ).

Probe	radiale Behinderung	axialer Quelldruck [ MPa ]	axialer Quelldruck [ MPa ]	axialer Quelldruck [ MPa ]	axialer Quelldruck [ MPa ]
Vorlast		$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 0,210$ MPa	$\sigma_v = 0,525$ MPa	$\sigma_v = 2,10$ MPa
Ebenheider 11 S	+	0,03			
Ebenheider 11 S	-	0,03			
Ebenheider 11 S	+		0,21		
Ebenheider 11 S	-		0,21		
Maulbronner 11 S	+	0,02			
Maulbronner 11 S	-	0,03			
Sander 11 S	+	0,04			
Sander 11 S	-	0,04			
Sander 11 S	+		0,24		
Sander 11 S	-		0,26		
Sander 16 P	+	0,03			
Sander 16 P	-	0,03			
Sander 18 S	+	0,05			
Sander 18 S	-	0,06			
Sander 18 S	+		0,24		
Sander 18 S	-		0,24		
Sander 18 S	+			0,62	
Sander 18 S	-			0,62	
Sander 18 S	+				2,22
Sander 18 S	-				2,16

+ = mit radialer Behinderung  
- = ohne radiale Behinderung



## 4.3 Versuch mit der Universalprüfmaschine

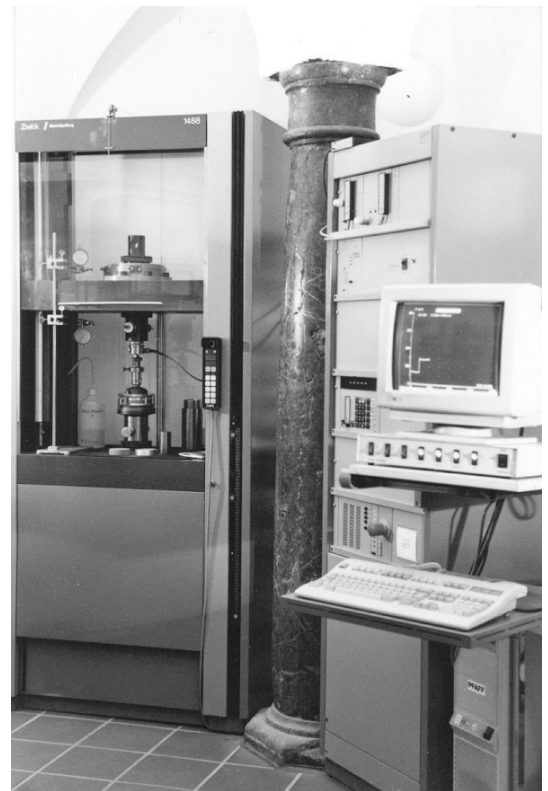
### 4.3.1 Messprinzip und Versuchsaufbau

Universalprüfmaschinen kommen bei der Ermittlung von Materialfestigkeitskennwerten (Druck-, Zug- oder Biegefestigkeit) zum Einsatz. Je nach Ausstattungsvariante und Konfiguration der Maschine kann zwischen zwei Prüfvarianten gewählt werden: dem kraftgesteuerten Versuch oder dem weggesteuerten Versuch. Im ersten Fall wird der Probekörper mit einer gleichmäßigen Zunahme der Auflast/Zeiteinheit bis zum Bruch belastet. Im zweiten Fall wird die Probe mit gleichbleibender Verformungsgeschwindigkeit (mm/s) bis zum Versagen des Prüfkörpers belastet. In beiden Fällen ist das Resultat das gleiche, ein Kraft/Deformations- oder ein Druck/Weg-Diagramm. Meist wird gleichzeitig neben der maximal zulässigen Auflast und der bis zum Bruch der Probe erfolgten Deformation die Elastizitätskonstante (E-Modul) des Materials bestimmt. All diese Versuche sind dynamische Prüfverfahren, d.h. während des Versuches wird der Druck auf die Probe kontinuierlich erhöht.

Quelldruckversuche hingegen sind statische Prüfverfahren, bei denen während des Versuches keine Druckzunahme auf die Probe von Seiten der Prüfmaschine erfolgen darf.



**Abb. 89:**  
Belastungseinheit der Universalprüfmaschine.



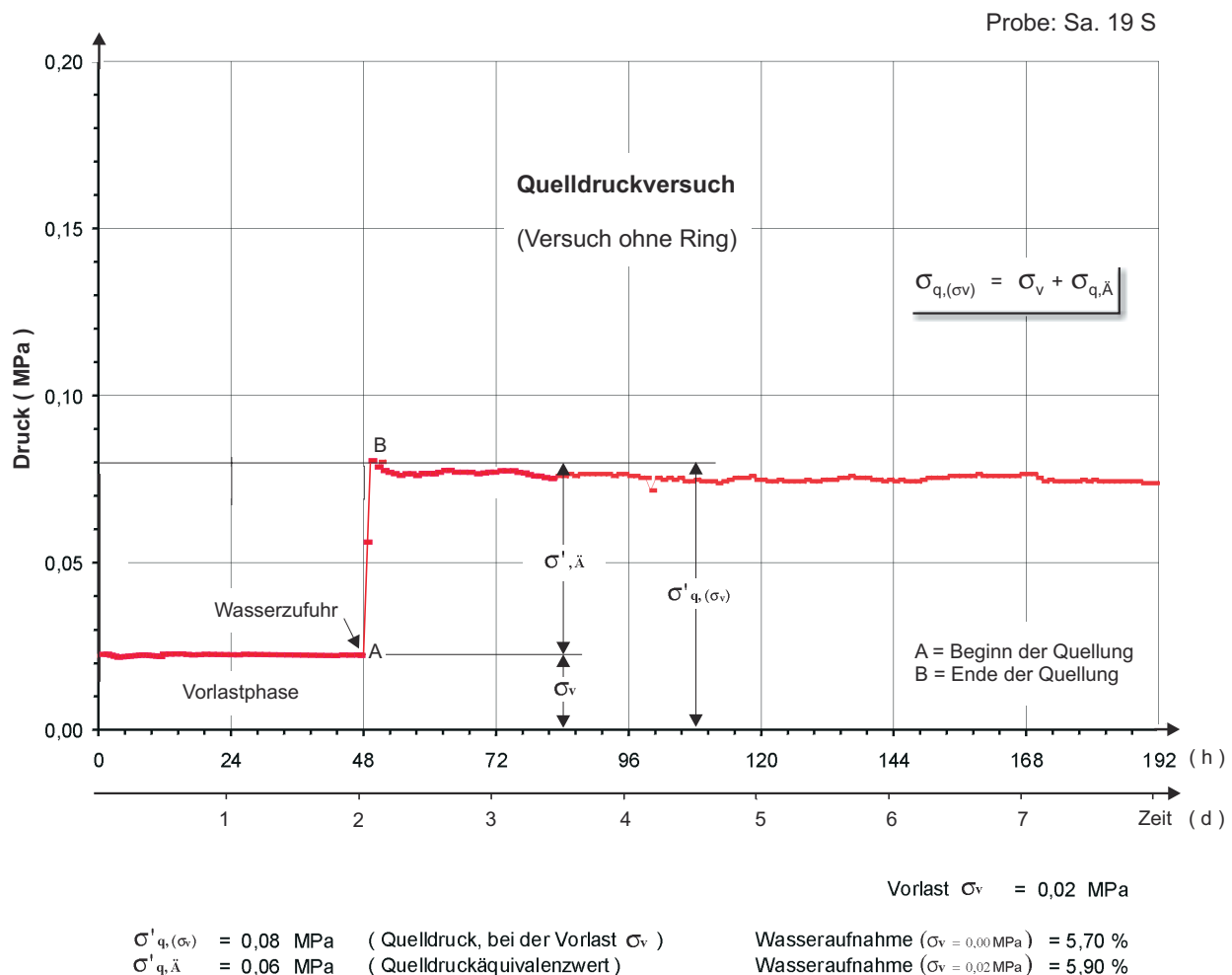
**Abb. 88:**  
Komponenten der Universalprüfmaschine (links die Belastungseinheit mit dem Antrieb, Mitte die elektronische Steuereinheit und rechts die Auswerteeinheit).

### 4.3.2 Anpassung der Versuchsanordnung

Während es sich bei den standardmäßig mit Universalprüfmaschinen durchgeführten Festigkeitsversuchen um dynamische Kurzzeitversuche mit Messzeiten von 30 Sekunden bis zu einigen Minuten handelt, sind Quelldruckversuche statische Langzeitversuche mit Messzeiten von 3 Tagen bis zu mehreren Wochen, Monaten, ja sogar Jahren. Da die Prüfmaschinen zum einen nicht für statische Versuche und zu anderen nicht für derart lange Messzeiten konzipiert sind, ist eine Adaption der Maschinen notwendig. Beim weggesteuerten Versuch muss bei Erreichen der Vorlast die weitere Druckzunahme auf die Probe verhindert werden, während gleichzeitig die Aufzeichnung der Messwerte fortgesetzt wird. Zu diesen Zweck wurde ein zusätzlicher Schalter eingebaut, der die Spannung des elektrischen Antriebs unterbricht. Damit konnte die gesamte Antriebseinheit während des Versuches spannungsfrei geschaltet werden, so dass lediglich die elektronische Steuereinheit und die Auswerteeinheit in Betrieb waren.

### 4.3.3 Durchführung der Versuche

Vor Einleitung des eigentlichen Quellvorganges durch Wasserzugabe wurde jeder Prüfkörper für mindestens 48 Stunden konstant vorbelastet. Dies ist notwendig, weil das Untersuchungsmaterial auf eine zusätzlich aufgebrachte Last mit Ausweich- und Kriechvorgängen reagiert und dadurch den Auflastdruck reduziert. Die Relaxationsvorgänge sind nach 48 Stunden soweit abgeschlossen, dass ab diesem Zeitpunkt keine weiteren Veränderungen der Probe mehr stattfinden. Bei der kraftgesteuerten Versuchsdurchführung regelt die Prüfmaschine die vorgegebene Auflast automatisch nach. Beim weggesteuerten Quelldruckversuch muss die Nachjustierung während der Vorlastphase manuell erfolgen.



**Abb. 90:**

Quelldruckversuch mit der Universalprüfmaschine.

### 4.3.4 Ergebnisse

Nachdem die Verwendung von scheibenförmigen Prüfkörpern (Oedometerproben, Ø70 mm, Höhe 20 mm) nicht mehr zwingend notwendig war, wurden für die nachfolgenden Messungen würfelförmige Gesteinsproben (50 mm x 50 mm x 50 mm) verwendet. Die Tab. 16 zeigt die Ergebnisse dieser Messungen. Die Quelldruckwerte zeichnen die Resultate der hygrischen Längenänderungs-Messungen nach (s. Tab. 11 und Tab 12), d.h. die Gesteine mit geringen Quelldehnungen weisen die niedrigsten Quelldrucke auf und diejenigen mit den größten hygrischen Dehnungen zeigen die höchsten Quelldrucke.

Die Dreiteilung der Tab. 11 (hygrische Längenänderung in Abhängigkeit von der Probenorientierung) findet sich auch in der Tab. 16 wieder. Es ist ein unterer Druckbereich (bis ~ 0,03 MPa) mit den Gesteinen Cottaer, Obernkirchner und Regensburger, ein mittlerer Bereich (von 0,03 MPa bis ~ 0,10 MPa) mit Ebenheider, Maulbronner, Rorschacher und Sander Typ I und ein oberer Bereich (von 0,10 MPa bis ~ 0,60 MPa) mit Abtswinder und Sander, Typ II und Typ III zu unterscheiden.

Die dargestellten Messwerte sind nicht um die Vorlast korrigiert. Um den tatsächlichen Druckanstieg bei Wasserzugabe (Quelldruckäquivalenzwert) zu erhalten, muss vom Quelldruckwert entsprechend der Formel

$$\sigma_q(\delta_v) = \sigma_v + \sigma_q, \text{ \AA}$$

die Vorlast abgezogen werden.

**Tab. 16:**

Quelldruckwerte der untersuchten Sandsteine (Messungen an würfelförmigen Proben, 50 mm x 50 mm x 50 mm, Vorlast 0,021 MPa, Werte der hygrischen Längenänderung in Klammern [freie Quellung in µm/m]).

Probe:	Quelldruck			x : y : z	Wasseraufnahme 1.V. / 2.V. / 3.V.
	x - Richtung   ss	y - Richtung   ss	z - Richtung ⊥ ss		
	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ - ]	[ M - % ]
Vorlast	$\sigma_v = 0,021 \text{ MPa}$	$\sigma_v = 0,021 \text{ MPa}$	$\sigma_v = 0,021 \text{ MPa}$		
Abtswinder 1	0,20 (1.578)	0,14 (1.446)	0,20 (2.713)	1 : 0,70 : 1,03	6,48 / 6,14 / 6,24
Abtswinder 1 a	0,22 (1.590)	0,21 (1.366)	0,35 (2.317)	1 : 0,93 : 1,58	6,49 / 6,36 / 6,39
Abtswinder 1 b	0,11 (725)	0,06 (688)	0,30 (1.096)	1 : 0,54 : 2,80	8,63 / 7,96 / 8,53
Cottaer 1	0,02 (218)	0,02 (200)	0,03 (319)	1 : 1,00 : 1,25	7,53 / 7,40 / 7,33
Cottaer 1 a	0,02 (178)	0,02 (119)	0,03 (220)	1 : 0,96 : 1,17	8,10 / 8,04 / 8,12
Cottaer 1 b	0,03 (199)	0,03 (173)	0,03 (286)	1 : 1,00 : 1,15	7,23 / 7,08 / 7,23
Ebenheider 1	0,08 (755)	0,05 (578)	0,19 (1.600)	1 : 0,68 : 2,50	5,29 / 5,13 / 5,83
Ebenheider 1 a	0,05 (776)	0,03 (719)	0,16 (1.964)	1 : 0,70 : 3,20	4,75 / 4,93 / 5,22
Ebenheider 1 b	0,06 (741)	0,06 (672)	0,09 (1.962)	1 : 0,97 : 1,42	5,10 / 4,76 / 4,52
Maulbronner 1	0,04 (260)	0,03 (238)	0,07 (417)	1 : 0,86 : 1,91	7,56 / 7,84 / 8,08
Maulbronner 1 a	0,04 (279)	0,03 (272)	0,07 (496)	1 : 0,92 : 1,92	7,88 / 7,99 / 8,00
Maulbronner 1 b	0,04 (299)	0,03 (219)	0,07 (456)	1 : 0,70 : 1,92	7,94 / 7,55 / 7,84
Obernkirchner 1	0,02 (139)	0,02 (80)	0,02 (159)	1 : 1,00 : 1,00	4,12 / 4,17 / 4,25
Obernkirchner 1 a	0,02 (100)	0,02 (90)	0,02 (109)	1 : 1,00 : 1,00	3,98 / 4,02 / 4,24
Obernkirchner 1 b	0,02 (89)	0,02 (80)	0,02 (160)	1 : 1,00 : 1,00	4,15 / 4,38 / 4,35
Regensburger 1	0,02 (120)	0,02 (119)	0,03 (198)	1 : 1,00 : 1,43	5,59 / 5,98 / 6,11
Regensburger 1 a	0,02 (103)	0,02 (100)	0,03 (121)	1 : 1,00 : 1,21	6,61 / 6,22 / 6,50
Regensburger 1 b	0,02 (120)	0,02 (80)	0,03 (219)	1 : 0,88 : 1,17	5,71 / 6,16 / 5,97
Rorschacher 1	0,09 (655)	0,09 (634)	0,10 (915)	1 : 1,00 : 1,09	2,00 / 1,94 / 1,90
Rorschacher 1 a	0,04 (653)	0,03 (652)	0,05 (866)	1 : 0,73 : 1,07	1,92 / 1,91 / 1,92
Rorschacher 1 b	0,03 (794)	0,03 (640)	0,04 (962)	1 : 0,85 : 1,12	1,92 / 1,88 / 1,67
Sander 1 b, Typ I	0,05 (673)	0,04 (476)	0,11 (1.098)	1 : 0,91 : 2,40	6,28 / 6,29 / 6,15
Sander 1 c, Typ II	0,07 (1.432)	0,06 (1.227)	0,14 (2.635)	1 : 0,87 : 2,09	5,48 / 5,78 / 5,57
Sander 1 d, Typ II	0,08 (1.302)	0,05 (1.255)	0,17 (2.554)	1 : 0,68 : 2,14	5,79 / 5,54 / 5,48
Sander 1, Typ III	0,34 (3.070)	0,20 (2.982)	0,53 (6.260)	1 : 0,59 : 1,58	6,84 / 6,91 / 6,35
Sander 1 a, Typ III	0,28 (2.676)	0,22 (2.535)	0,59 (5.420)	1 : 0,78 : 2,08	5,95 / 6,38 / 5,99



**Tab. 17:**

Quelldruckwerte der näher untersuchten Sandsteine (Messungen an zylinderförmigen Proben,  $\varnothing$  70 mm, Höhe 160 mm, Vorlast 0,021 MPa, P = || ss, S =  $\perp$  ss).

Vorlast	Mess- richtung	Quelldruckäquivalenzwert		
		[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]
	$\sigma_v = 0,210$ MPa	$\perp$ ss	ss	
Cottaer 30 S	$\perp$ ss	0,04	0,04	
Cottaer 32 P	ss	0,02		0,03
Cottaer 33 P	ss	0,03		
Ebenheider 30 S	$\perp$ ss	0,09	0,09	
Ebenheider 32 P	ss	0,05		0,05
Ebenheider 33 P	ss	0,04		
Maulbronner 30 S	$\perp$ ss	0,25	0,25	
Maulbronner 32 P	ss	0,11		0,11
Maulbronner 33 P	ss	0,10		
Obernkirchner 30 S	$\perp$ ss	0,02	0,01	
Obernkirchner 31 S	$\perp$ ss	0,04		0,02
Obernkirchner 32 P	ss	0,02		
Rorschacher 30 S	$\perp$ ss	0,22	0,22	
Rorschacher 32 P	ss	0,09		0,19
Rorschacher 33 P	ss	0,29		
Sander 30 S, Typ II	$\perp$ ss	0,65	0,65	
Sander 32 P, Typ II	ss	0,12		0,17
Sander 33 P, Typ II	ss	0,22		



Da die Ergebnisse der Quelldruckmessungen an Oedometerproben einen sehr großen Korrekturfaktor für diese Probengeometrie ergaben (s. Abb. 78 und Abb. 79) und die Druckfestigkeit, ermittelt an würfelförmigen Prüfkörpern, ebenfalls von einem Formfaktor beeinflusst wird (s. Abb. 35), lag die Überprüfung der erhaltenen Ergebnisse auf geometrische Abhängigkeiten nahe.

Von den sechs näher untersuchten Sandsteinvarietäten wurden jeweils 3 Zylinder hergestellt (einer senkrecht zur Schichtung und zwei parallel,  $\varnothing$  70 mm, Höhe 160 mm, Schlankheitsgrad  $\sim 1 : 2,3$ ) und im uniaxialen Quelldruckversuch geprüft. Die Messreihe wurde unter der Vorlaststufe  $\sigma_v = 0,210$  MPa durchgeführt.

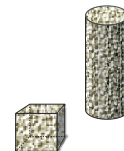
Die Tab. 17 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Die erhaltenen Quelldruckwerte sind deutlich höher als die der vorangegangenen Versuche. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse wurden deshalb alle Quelldruckwerte um die Vorlast reduziert und die erhaltenen Quelldruckäquivalenzwerte beider Versuchsreihen (würfelförmige und zylinderförmige Proben) gegenüber gestellt (s. Tab. 18). Der Quotient, sowohl senkrecht wie auch parallel innerhalb einer Varietät,

wurde gebildet und zum Schluß das Gesamtverhältnis von würfelförmigen zu zylinderförmigen Proben ermittelt. Läßt man den Quotienten des Obernkirchner Sandsteins außer Betracht, so ergibt sich ein Bereich von 1 : 4 bis 1 : 8 für den Quotienten (im Mittel 1 : 6).

**Tab. 18:**

Verhältnis des Quelldruckäquivalenzwertes würfelförmiger (50 mm x 50 mm x 50 mm) zu zylinderförmiger ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 160 mm) Prüfkörpern.

		Quelldruck- äquivalenz- wert	Quelldruck- äquivalenz- wert	Verhältnis	Verhältnis
		Würfelproben [ MPa ]	Zylinderproben [ MPa ]	Würfel/Zylinder -	Würf./Zylind. $\varnothing$ -
Cottaer	$\perp$ ss	0,007	0,048	1 : 6,86	
	ss	0,004	0,026	1 : 6,50	
Maulbronner	$\perp$ ss	0,049	0,247	1 : 5,04	
	ss	0,013	0,107	1 : 8,23	
Obernkirchner	$\perp$ ss	0,002	0,021	(1 : 10,0)	$\sim 1 : 4$
	ss	0,002	0,018	(1 : 9,00)	bis 1 : 8
Rorschacher	$\perp$ ss	0,040	0,222	1 : 5,55	
	ss	0,033	0,190	1 : 5,76	
Sander, Typ II	$\perp$ ss	0,133	0,651	1 : 4,89	
	ss	0,043	0,169	1 : 3,93	





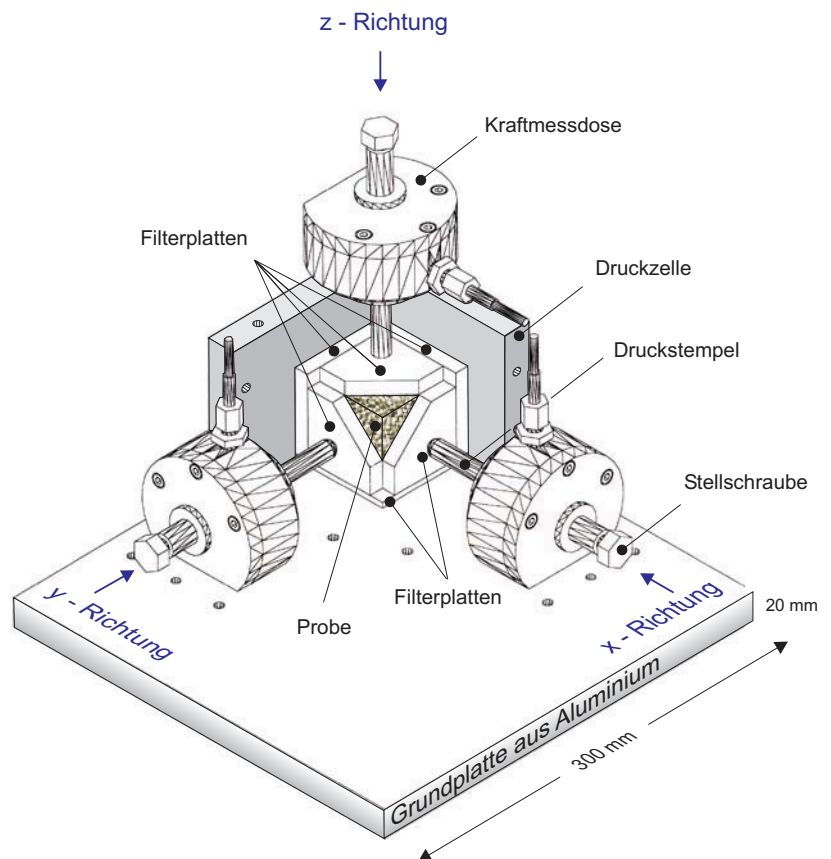
#### 4.4 Triaxialquelldruckversuch

Triaxialversuche sind seit einigen Jahrzehnten aus den Bereichen der Materialprüfung, der Baugrunduntersuchung und der Bodenkunde bekannt. Zur Anwendung kommt hierbei ausschließlich der Kompressionsversuch. Bei den am Markt verfügbaren "Triaxialdruckzellen" handelt es sich allerdings um keine echten Triaxialzellen, da die Steuerung der Druckzellen lediglich über die Radial- und die Axial-Richtung erfolgt. Die dabei vorgenommene Generalisierung  $x = y$  gilt zwar für den Idealfall eines Probenschnittes parallel zur Schichtungsebene, ist aber ansonsten nicht ohne weiteres auf den allgemeinen dreidimensionalen Spannungszustand zu übertragen.

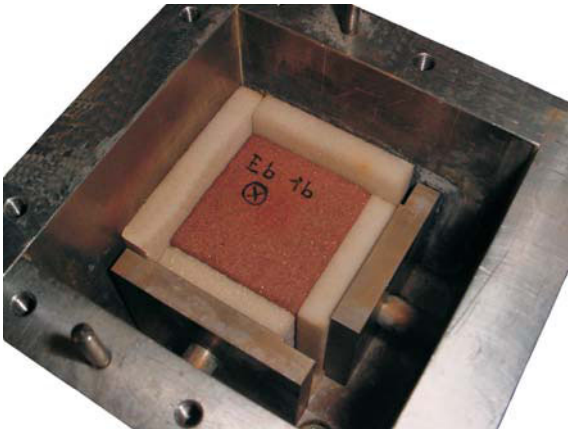
##### 4.4.1 Quelldruckmesszelle

Da die standardmäßig verfügbaren Triaxialdruckzellen nicht für Messungen im feuchten Milieu geeignet sind, musste nach einer Möglichkeit der Durchführung der Messungen direkt im Wasser gesucht werden. Nach umfangreichen Marktrecherchen reifte der Entschluss, ein neues Triaxialdruckgerät zu konzipieren, das die speziellen Anforderungen der Messungen des Quelldruckes erfüllt. Die Realisierung des Projektes erfolgte maßgeblich durch die Werkstätten des Mineralogischen Institutes der LMU München, unter der damaligen Leitung von Herrn Heinz Plöckl. Lediglich die drei Kraftmessdosen wurden zugekauft.

Da die Genauigkeit der Kraftmessung ( $\sim 0,5\%$  von  $F_{\max}$ ) von der maximal aufnehmbaren Kraft der Messdose abhängt, musste ein Kompromiss zwischen der Anzeigegenauigkeit und der Maximalkraft gefunden werden. Zum Einsatz kamen Kraftmessdosen mit  $F_{\max} = 2.500\text{ N}$ . Die Anzeigegenauigkeit liegt somit bei ca.  $10\text{ N}$ . Diese entspricht der Genauigkeit des Oedometerversuchs (kleinste Gewichtsscheibe  $1\text{ N} \times 10$  [Übertragungsfaktor] =  $10\text{ N}$ ). Durch die Begrenzung des Maximaldruckes auf  $2.500\text{ N}$  konnte für den Bau der Druckzelle anstelle von V<sub>2</sub>A-Stahl Aluminium Verwendung finden. Der Vorteil liegt in der wesentlich leichteren Bearbeitbarkeit (Schneiden, Fräsen, Drehen und Bohren) des Materials. Das Kernstück des Triaxialquelldruck-Messgerätes ist dessen Druckzelle. Die Zelle wurde aus fünf 20 Millimeter starken Aluminiumplatten in Form eines Würfels (Außenmaß  $140 \times 140\text{ mm}$ , Innenmaß  $100 \times 100\text{ mm}$ ) konzipiert. Die vier Seitenteile des Druckkäfigs wurden mit jeweils zwei Passtiften und zwei hochfesten Edelstahlschrauben (M 8, Zugfestigkeit =  $29\text{ MN}$ ) von unten her auf der Grundplatte verschraubt.



**Abb. 91:**  
CAD-Zeichnung der Triaxialquelldruck-Messzelle.

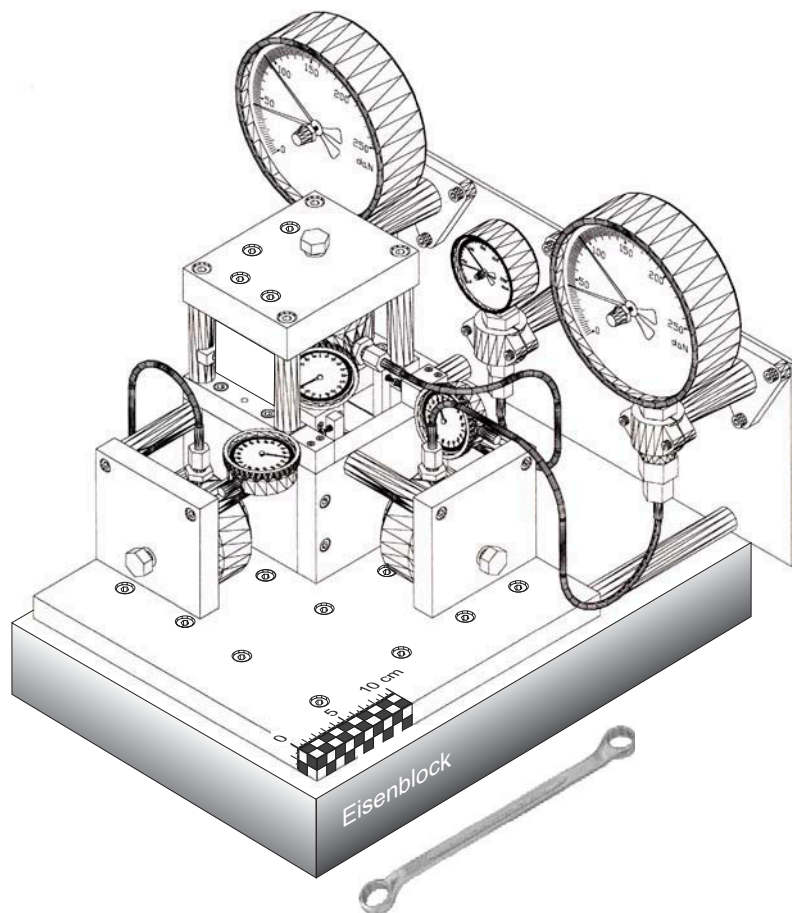


**Abb. 92:**

Foto der Messdruckzelle mit Prüfkörper.

nen. Diese entspricht der Anzeigegenauigkeit der Dehnmessuhren und kann somit ohne Qualitätsverlust für die Messergebnisse akzeptiert werden. An drei Seiten des Druckzellenwürfels wurden Käfige angebaut. Diese Druckkäfige dienen zur Aufnahme der Kraftmessdosen. Ihre Seitenteile wurden ebenfalls in der Grundplatte verstiftet und jeweils mittels zweier Schrauben von unten her fixiert. Zusätzlich werden sie mit zwei bzw. vier Bolzen ( $\varnothing 20$  mm, Länge 73 mm) an der inneren Zelle gehalten. Bei der Prüfung der Steifigkeit zeigte sich, dass die 20 mm starke Aluminium-Grundplatte unterdimensioniert war und kleine Dehnungen zuließ. Zur Steifigkeitserhöhung wurde sie deshalb mit einem massiven Eisenblock (320 mm x 470 mm x 80 mm, Gewicht nahezu 1 kN) mittels 16 M-8-Schrauben verschraubt. Die Steifigkeitsüberprüfung der Apparatur erfolgt mit einem Stahl- bzw. Aluminiumwürfel (50 mm x 50 mm x 50 mm), jeweils einzeln in alle drei Messrichtungen. Nach Verstärkung des Druckkäfiges der Messdose in z-Richtung (s. Abb. 93 und Abb. 94) waren die drei Messwerte nahezu identisch und stimmten mit den Materialkennwerten der verwendeten Metallwürfel überein.

Zusätzlich wurden alle Seitenteile an den vier Kanten mit jeweils 2 Schrauben versehen und gegeneinander verschraubt. Die fünfte Platte wurde als Deckel auf den Kubus gesetzt und in drei der Seitenteile verschraubt. Über drei Bohrungen in den Seitenteilen werden die aus V<sub>2</sub>A-Stahl bestehenden Druckstempel ( $\varnothing 12$  mm, Länge 70 mm) mittig auf die jeweilige Probenfläche geführt. Diese Druckstempel dienen gleichzeitig als außenliegendes Längenänderungs-Messsystem. Unter Anwendung des Hook'schen Gesetzes und unter Verwendung der Materialkennwerte von V<sub>2</sub>A-Stahl (Druckfestigkeit  $\sigma_D = 1.000$  MPa, E-Modul = 210.000 MPa), lässt sich die bei Maximaldruck auftretende Stauchung der Druckstempel berechnen. Für  $F = 2.500$  N liegt sie bei  $\Delta l = 6,3$   $\mu\text{m}$ . Im Arbeitsbereich des Queldruckmessgerätes ( $\sim 300$  bis 600 N) ist mit einer Stauchung der Druckstempel von  $\sim 1$   $\mu\text{m}$  zu rech-



**Abb. 93:**

CAD-Zeichnung des Triaxialqueldruck-Messgerätes.

#### 4.4.2 Messprinzip und Versuchsaufbau

Das Messprinzip beruht auf dem Oedometerversuch nach KAISER/HENKE. Während der Quellung der Probe wird deren Dehnung nicht unterbunden. Erst nach vollständigem Abschluss der Quelldehnung und nach Einstellung des neuen Gleichgewichtszustandes wird die entstandene Längenänderung mittels Rückstellung der Dehnung (Auflegen von zusätzlichen Gewichten) egalisiert.

Bei dem Versuch mit dem Triaxialquelldruck-Messgerät wird die durch die Bewässerung der Probe entstehende Quelldehnung auf die innere Druckplatte übertragen. Diese drückt über den Druckstempel auf die außenliegende Druckplatte, die ihrerseits den Druck auf die Kraftmessdose weiterleitet. Diese zeigt dann den entsprechenden Messwert an. Da eine Kraft- oder Druckmessung nur über eine zugelassene Längenänderung an der Aufnahmekalotte der entsprechenden Messdose möglich ist, ist der angezeigte Messwert nur bedingt zu verwenden. Zwar wird versucht, die Längenänderungen an den Messdosen so gering wie möglich zu halten, gänzlich unterbinden kann man sie aber nicht.

Da Quelldruckversuche äußerst sensitiv auf kleinste zugelassene Dehnungen reagieren, ist es notwendig, diese vollständig zu unterbinden. Aus diesem Grund wurde an der äußeren Druckplatte ein Längenänderungsmesssystem in der Grundplatte verankert. Über die Druckstempel war nun die direkte Messung der Längenveränderungen an der Probe möglich. Durch den Vergleich der Anzeigewerte der Dehnmessuhren vor und nach der Quellung können diese Längenänderungen erfasst und anschließend zurückgestellt werden. Die Rückstellung auf den Ausgangswert erfolgt mittels Stellschrauben, die in einen mittigen Konus an der Rückseite der Kraftmessdosen geführt sind. Diese drücken die Kraftmessdosen gegen das Druckgestänge und diese wiederum die Probe in ihre Ausgangslage zurück. Zur Realisierung kleinster Längenänderungen an der Stellschraube wurde ein extrem feines Gewinde mit niedriger Gewindesteigung verwendet. Dadurch war eine Feindosierung der an den Messdosen angreifenden Kräfte möglich.

Die bei Erreichen des Ausgangszustandes im System Probekörper, Druckstempel und Kraftmessdose herrschende Spannung entspricht der Quellspannung in dieser Prüfrichtung. Die jeweilige Kraft kann an der Messdose direkt abgelesen und über die entsprechende Probenfläche zur Quellspannung umgerechnet werden.

Für die x-Richtung gilt:

$$\sigma_x = \frac{F_x}{A_x} .$$



**Abb. 94:**

Foto des Triaxialquelldruck-Messgerätes.

### 4.4.3 Durchführung der Versuche

Die Vorbelastungsdauer betrug mindestens 48 Stunden. Während dieser Phase war wiederholtes Nachregeln der Vorlast notwendig. Erst nachdem sich der Probekörper stabil im neuen Gleichgewichtszustand befand, begann der Quellvorgang durch die Zugabe von destilliertem Wasser. Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen erfolgte die Bewässerung der Probe kapillar, d. h. mit Hilfe einer kontinuierlichen Anpassung der zugeführten Wassermenge an den aufsteigenden Kapillarsaum. Nach dem Abklingen der Quellung (stabile Kraft- und Längenänderungsanzeige über mindestens 24 Stunden hinweg) konnte mit der Rückstellung der Längenänderung begonnen werden. Zu Beginn wurde die in x-Richtung erfolgte Längenänderung um ca. 10 % der Dehnung zurückgestellt, dann die in y-Richtung erfolgte und zum Schluss die in z-Richtung. Dieser Vorgang wiederholte sich innerhalb von 48 Stunden so oft, bis die Ausgangslänge der Probe erreicht war. Blieb der neue Gleichgewichtszustand für mindestens 24 Stunden stabil (Kraft- und Längenkonstanz), wurde der Versuch als abgeschlossen betrachtet.

### 4.4.4 Ergebnisse

Wegen der relativen langen Dauer eines Einzelversuches (durchschnittlich ca. 8 Tage) musste innerhalb des Untersuchungsmaterials eine sinnvolle Vorauswahl der zur Prüfung kommenden Gesteine getroffen werden. Aus diesem Grund wurden die durch die vorangegangenen uniaxialen Quelldruckversuche eher als gering oder gar nicht quellend einzustufenden Gesteine (Cottaer, Rorschacher und Obernkirchner Sandstein) nicht in diese Untersuchungen miteinbezogen.

Insgesamt wurden 35 Triaxialquelldruck-Versuche durchgeführt.

Die Tab. 19 zeigt die Ergebnisse der unbehandelten Proben. Dargestellt sind die Quellspannungswerte (Gesamtspannung der jeweiligen Richtung) nach der Bewässerung der Probe. Subtrahiert man von diesen die bei Versuchsbeginn herrschende Vorlast, so gelangt man zum Quelldruckäquivalenzwert. Dieser Wert entspricht dem durch die Quellung hervorgerufenen Druckanstieg. Auffällig ist die Homogenität der Messwerte in Bezug zur Schichtung. Während das Verhältnis parallel zu senkrecht zur Schichtung bei den uniaxialen Quelldruckversuchen in etwa 1 : 2 war, reduziert es sich bei den Triaxialquelldruck-Versuchen auf ungefähr 1 : 1,2. Weniger erstaunlich ist die Tatsache, dass die Quelldruckwerte in x- und y-Richtung um ca. das Doppelte gegenüber den uniaxialen Ergebnissen erhöht sind. Die Prüfkörper haben im Triaxialdruck-Versuch keinerlei Möglichkeit, dem durch die Quellung entstehenden Druck durch Kriechbewegungen auszuweichen.

**Tab. 19:**

Triaxialquelldruck-Messergebnisse der ausgewählten Gesteine (Untersuchungen an würfelförmigen Proben, 50 mm x 50 mm x 50 mm).



Probe:	Quelldruckäquivalenzwert			x : y : z	Wasseraufnahme
	x - Richtung    ss	y - Richtung    ss	z - Richtung ⊥ ss		1.V. / 2.V.
	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]		[ M - % ]
Vorlast	$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 0,021$ MPa		
Ebenheider 1	0,09	0,08	0,11	1 : 0,93 : 1,12	4,99 / 5,09
Ebenheider 1 a	0,12	0,11	0,14	1 : 0,92 : 1,14	4,63 / 4,79
Ebenheider 1 b	0,08	0,06	0,14	1 : 0,79 : 1,61	4,42 / 4,55
Maulbronner 1	0,07	0,05	0,08	1 : 0,80 : 1,15	7,75 / 7,88
Maulbronner 1 a	0,05	0,05	0,08	1 : 0,92 : 1,40	7,71 / 7,85
Maulbronner 1 b	0,06	0,05	0,07	1 : 0,79 : 1,09	7,77 / 7,89
Sander 1 b, Typ I	0,09	0,09	0,11	1 : 1,00 : 1,14	6,10 / 6,18
Sander 1 c, Typ II	0,13	0,11	0,13	1 : 0,92 : 1,05	5,57 / 5,69
Sander 1 d, Typ II	0,13	0,12	0,18	1 : 0,98 : 1,32	5,26 / 5,38

#### 4.5 Vergleich der Messergebnisse der verschiedenen Versuchsdurchführungen

Wegen des Einflusses der Prüfkörpergeometrie (s. Abschn. III. 4.1.1, Abb. 77, 78 und 79) auf den Quelldruckmesswert und der Heterogenität des Untersuchungsmaterials ist es notwendig, vergleichende Untersuchungen nicht nur unter identischen Versuchsbedingungen (Feuchte, Temperatur und Vorlast) und an identischen Prüfkörperformen, sondern am besten am identischen Prüfkörper durchzuführen.

Die Tab. 20 zeigt die Ergebnisse von 24 Messungen an drei verschiedenen Sandsteinen (12 Messungen mit der Universalprüfmaschine und 12 Oedometer-Messungen).

Die Versuche wurden an 5 Proben, unter drei unterschiedlichen Vorlastbedingungen, jeweils mit Radialdehnungsbehinderung durchgeführt. Nahezu alle Vergleichspaare zeigen identische Quelldruckwerte (Ausnahme das Wertepaar Sa 25 S, Vorlast 0,210 MPa). Somit führen beide Versuchsdurchführungen zum selben Resultat und können gleichwertig nebeneinander zur Anwendung kommen. Der geringfügig höhere Messwert des Versuches mit der Universalprüfmaschine (durchschnittlich 7 %) lässt sich mit Hilfe der Messwertkurve aus Abb. 90 erklären. Während im Versuch mit der Universalprüfmaschine der maximal auftretende Druck während der gesamten Versuchsdauer erfasst wird, lässt sich im Oedometerversuch nur der Quelldruck nach Einstellung des Gleichgewichtszustandes (konstanter Ast der Messwertkurve nach der Quellung) ermitteln.

Da die Messgenauigkeit der Ergebnisse in beiden Versuchsdurchführungen bestenfalls mit  $\pm 5\%$  angegeben werden kann, liegt diese systematische Ungenauigkeit nahezu innerhalb dieser Variation. Sie kann deshalb vernachlässigt werden.

**Tab. 20:**

Vergleich der Quelldruck-Messergebnisse des Oedometerversuches mit denen aus dem Versuch mit der Universalprüfmaschine (Untersuchungen an Oedometerproben,  $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm, alle Messungen  $\perp$  ss).



Probe	Quelldruck				
	axial	axial	axial		
	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]		
<b>Vorlast</b>	$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 0,210$ MPa	$\sigma_v = 0,525$ MPa		
Ebenheider 11 S	UPM	+	0,03		
Ebenheider 11 S	Oed.	+	0,03		
Ebenheider 11 S	UPM	+		0,21	
Ebenheider 11 S	Oed.	+		0,19	
Ebenheider 11 S	UPM	+			0,49
Ebenheider 11 S	Oed.	+			0,48
Maulbronner 11 S	UPM	+	0,02		
Maulbronner 11 S	Oed.	+	0,02		
Maulbronner 11 S	UPM	+		0,21	
Maulbronner 11 S	Oed.	+		0,19	
Maulbronner 11 S	UPM	+			0,52
Maulbronner 11 S	Oed.	+			0,49
Sander 18 S, Typ II	UPM	+	0,04		
Sander 18 S, Typ II	Oed.	+	0,04		
Sander 18 S, Typ II	UPM	+		0,25	
Sander 18 S, Typ II	Oed.	+		0,24	
Sander 18 S, Typ II	UPM	+			0,62
Sander 18 S, Typ II	Oed.	+			0,57
Sander 25 S; Typ II	UPM	+	0,06		
Sander 25 S; Typ II	Oed.	+	0,05		
Sander 25 S; Typ II	UPM	+		0,22	
Sander 25 S; Typ II	Oed.	+		0,25	
Sander 26 S; Typ II	UPM	+	0,04		
Sander 26 S; Typ II	Oed.	+	0,04		

UPM = Quelldruckversuch mit der Universalprüfmaschine  
+ = mit radialer Behinderung der Probe (Oedometerring)

Oed. = Quelldruckversuch mit dem Oedometer

#### 4.6 Ringversuch zur Reproduzierbarkeit der Daten

Nachdem die Überprüfung der Ergebnisse beider Versuchsdurchführungen zufriedenstellend abgeschlossen wurde, galt es die erzielten Resultate mit denen anderer Forschungsinstitute zu vergleichen.

Der Quelldruck von 6 Oedometer-Proben ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm) wurde mit beiden Versuchsdurchführungen ermittelt. Alle Versuche wurden mit Radialdehnungsbehinderung, unter Verwendung des Aluminiumringes, durchgeführt (Ausnahme: die beiden Hohlzylinder Sa 35 S und Sa 36 S). Anschließend wurden sowohl die Proben wie auch die Aluminiumringe zu Vergleichsmessungen an einschlägige Forschungseinrichtungen (Baustoffinstitut der Technischen Universität München; Bayer. Geologisches Landesamt, München; Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen; Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe; Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich) weitergeleitet. Alle Institutionen beschäftigen sich seit Jahrzehnten mit den verschiedenen Phänomenen des Schwindens und Quellens von tonhaltigen Gesteinsschichten, Tonsteinen und Betonen, und ihre Kompetenz auf diesem Gebiet ist unumstritten.

Die Tab. 21 zeigt die Ergebnisse dieser Vergleichsmessungen. Alle Resultate liegen in einem eng begrenzten Bereich ( $\pm 10\%$ ), wobei die Genauigkeit des Messwertes mit steigender Vorlaststufe zunimmt (bis max.  $\pm 5\%$ ). Insgesamt ist festzustellen, dass sich alle Werte in hervorragender Übereinstimmung befinden.

**Tab. 21:**

Quelldruck-Messwerte des Ringversuches.

Messungen an Oedometerproben ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm) und an Hohlzylindern

(Außen  $\varnothing$  38 mm, Innen  $\varnothing$  10 mm, Höhe 70 mm). - P = Messung || ss; S = Messung  $\perp$  ss .



Probe:			BLfD	FhG	Uni	GLA	ETH	TU
			München	Holzkirchen	Karlsruhe	München	Zürich	München
			$\sigma_{q, ax} (\sigma_v)$	$\sigma_{q, ax} (\sigma_v)$	$\sigma_{q, ax} (\sigma_v)$	$\sigma_{q, ax} (\sigma_v)$	$\sigma_{q, ax} (\sigma_v)$	$\sigma_{q, ax} (\sigma_v)$
			[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]
Vorlast			$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 2,100$ MPa
Ebenheider 11 S	UPM	+	0,03	0,03				
Ebenheider 11 S	Oed.	+	0,03		0,03			
Maulbronner 11 S	UPM	+	0,02	0,03				
Maulbronner 11 S	Oed.	+	0,02		0,02			
Sander 11 S, Typ II	UPM	+	0,04	0,04				
Sander 11 S, Typ II	Oed.	+	0,04		0,03	0,04		
Sander 16 P, Typ II	UPM	+	0,03					
Sander 16 P, Typ II	Oed.	+	0,03					
Sander 16 P, Typ II	UPM*	+					0,03	
Sander 19 S; Typ II	UPM	+	0,06					
Sander 19 S; Typ II	Oed.	+	0,05					
Sander 19 S; Typ II	UPM*	+					0,04	
Sander 26 S; Typ II	UPM	+	0,04					
Sander 26 S; Typ II	Oed.	+	0,04					
Sander 26 S; Typ II	UPM*	+					0,05	
			$\sigma_v = 2,100$ MPa					
Sander 35 S, Typ III	UPM	-	2,80					
Sander 35 S, Typ III	Verf.	-						2,94
Sander 36 S, Typ III	UPM	-	3,05					
Sander 36 S, Typ III	Verf.	-						2,80

UPM = Quelldruckversuch mit der Universalprüfmaschine

UPM\* = Quelldruckversuch mit der Apparatur nach MADSEN

Oed. = Quelldruckversuch mit dem Oedometer

Verf. = Quelldruckversuch mit der Apparatur nach Beddoe und Lippok

+ = Versuch mit Radialdehnungsbehinderung der Probe,

- = Versuch ohne Radialdehnungsbehinderung der Probe.

#### 4.7 Quelldruck bei unterschiedlichen Vorlaststufen

Zur Reproduzierbarkeit und zum Vergleich von Quelldruckwerten ist die genaue Kenntnis der Vorlast notwendig, bei der die Quellung eingeleitet wurde (s. Abschn. III. 4.2 und 4.3). Da nach Abb. 86 ab einer bestimmten Belastung der Probe deren Quelldehnung vollständig unterbunden ist, somit der Druckanstieg durch die Quellung gleich 0 ist, war es notwendig, den Verlauf des Quelldruckwertes über diesen Druckbereich hinweg ( $0 < \sigma_v \leq \sigma_0$ ) zu verfolgen.

Die Untersuchungen wurden exemplarisch am Sander Sandstein, Typ II durchgeführt. Verwendet wurden eine Oedometerprobe (Sa 18 S) und drei Zylinderproben (Sa 30 S, Sa 32 P und Sa 33 P). Zur Ermittlung des Schichtungseinflusses auf den Messwert waren jeweils zwei Proben senkrecht zur Schichtung und zwei parallel dazu gebohrt. Die Tab. 22 zeigt die Quelldruckäquivalenzwerte (durch die Quellung hervorgerufener Druckanstieg) und den Quelldruckwert der vier untersuchten Proben unter sechs verschiedenen Vorbelastungen. Obwohl die Vorlast um mehr als den Faktor  $10^3$  gesteigert wurde, bleibt der durch die Quellung hervorgerufene Druckanstieg mehr oder weniger konstant (Sa 30 S, Sa 32 P und Sa 33 P). Bei nicht durch Formfaktoren beeinflussten Prüfkörpergeometrien gilt in erster Näherung die Formel aus Abschn. III. 4.4.3.

$$\sigma_{q(\sigma_v)} = \sigma_v + \sigma_{q,\ddot{A}}$$

- mit  $\sigma_{q(\sigma_v)}$  = Quelldruck bei der Vorlast  $\sigma_v$   
(Gesamtdruck des Systems nach Quellung),  
 $\sigma_v$  = konstante Vorlast bei Versuchsbeginn,  
 $\sigma_{q,\ddot{A}}$  = Quelldruckäquivalenzwert  
(durch die Quellung hervorgerufener Druckanstieg).

Bei der Probe Sa 18 S sind die Messwerte in den niedrigen Vorlaststufen (bis ca. 1,0 MPa) durch die Überlagerung des Ergebnisses mit dem Formfaktor der Oedometerprobe ( $\lambda = h/d \approx 0,3$ , Quelldruckverhältnis gegenüber einer ausreichend großen Probe ca. 1 : 10) gekennzeichnet. Erst ab einer Vorlast von  $\sim 1$  MPa nähert sich der Messwert dem unter Idealbedingungen zu ermittelnden Quelldruckäquivalenzwert an.

**Tab.22:**

Quelldruckäquivalenzwert in Abhängigkeit von der Vorlast  
[Untersuchungen an Oedometerproben (Sa 18 S,  $\varnothing$  70 mm, Höhe 20 mm) und an Zylindern (Sa 30 S, Sa 32 P und Sa 33 P,  $\varnothing$  70 mm, Höhe 160 mm)].

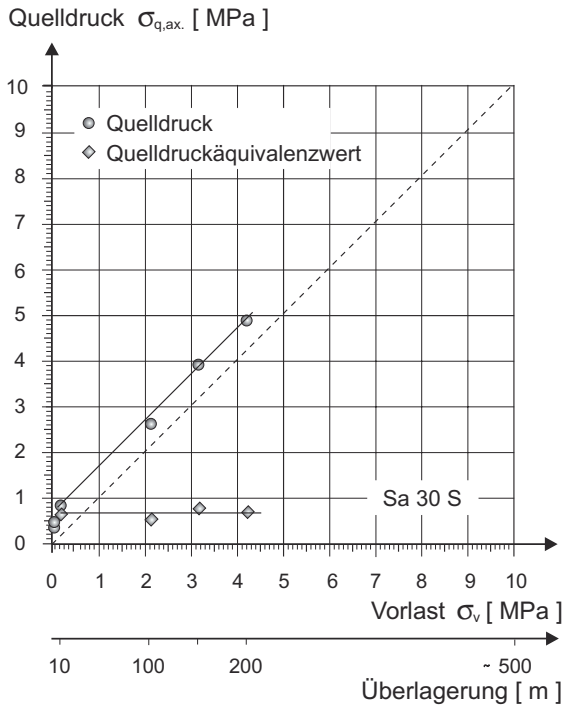


Probe:	axialer Quelldruck- äquivalenzwert	axialer Quelldruck- äquivalenzwert	axialer Quelldruck- äquivalenzwert	axialer Quelldruck- äquivalenzwert	axialer Quelldruck- äquivalenzwert	axialer Quelldruck- äquivalenzwert
	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]
Vorlast	$\sigma_v = 0,002$ MPa	$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 0,210$ MPa	$\sigma_v = 2,100$ MPa	$\sigma_v = 3,150$ MPa	$\sigma_v = 4,200$ MPa
Überlagerung	0,1 m	1 m	10 m	100 m	150 m	200 m
Sander 18 S, Typ II $\perp$ ss +	0,03 (0,04)	0,03 (0,05)	0,03 (0,24)	0,12 (2,22)	0,08 (3,22)	- (-)
Sander 30 S, Typ II $\perp$ ss -	0,51 (0,51)	0,36 (0,37)	0,65 (0,86)	0,54 (2,64)	0,78 (3,93)	0,71 (4,91)
Sander 32 P, Typ II $\parallel$ ss -	0,21 (0,21)	0,12 (0,14)	0,13 (0,33)	- (-)	- (-)	- (-)
Sander 33 P, Typ II $\parallel$ ss -	0,19 (0,19)	0,09 (0,11)	0,23 (0,11)	0,28 (0,11)	- (-)	- (-)

( ) = Quelldruckwert

+ = Versuch mit radialer Behinderung der Probe  
- = Versuch ohne radiale Behinderung der Probe

$\perp$  ss = Messrichtung senkrecht zur Schichtung  
 $\parallel$  ss = Messrichtung parallel zur Schichtung



**Abb. 95:** Zusammenhang von Quelldruck, Quelldruckäquivalenzwert und Vorlast am Beispiel der Probe Sa 30 S.

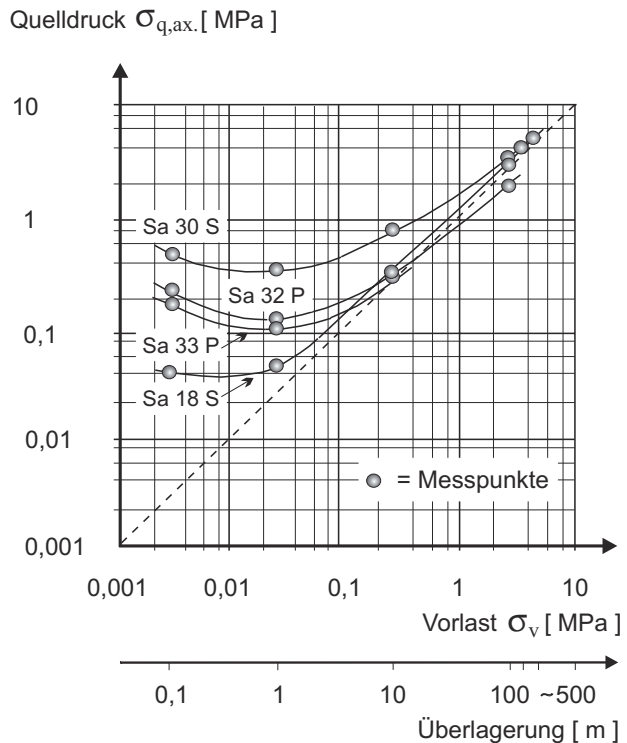
In der logarithmischen Darstellung zeigt sich im Bereich von 0,06 bis 0,10 MPa eine für den Quelldruck energetisch günstige Mulde.

Eine mögliche Erklärung für dieses Phänomen kann in der Form der Poren gesehen werden, die bei dieser Vorbelastung einen größeren Teil der Quellung aufnehmen können als im übrigen Vorlastbereich. Oder aber es werden bei diesem Druck zusätzliche Porenräume geöffnet, die für die Aufnahme eines Teils des Quelldruckes zur Verfügung stehen. Sowohl unterhalb wie auch oberhalb dieses Bereiches stehen diese Poren nicht zur Verfügung. Der Quelldruck und der Quelldruckäquivalenzwert sind entsprechend größer.

Deutlich lässt sich der Einfluss des Oedometeringes bei der Probe Sa 18 S erkennen. Durch die Behinderung der Seitendehnung werden die Veränderungen im Porenraum unterbunden und die Ausbildung der energetischen Mulde verhindert.

Die Abb. 95 zeigt den Verlauf des Quelldruckes und des Quelldruckäquivalenzwertes über den an Bauwerken realisierten Belastungsbereich hinweg. Sie bestätigt die Konstanz des Quelldruckäquivalenzwertes für den entsprechenden Sandstein. Dieser kann somit als Materialkonstante bzw. als Materialkennwert beschrieben werden.

Mit zunehmender Vorlast bewegt sich der Quelldruck entlang einer um den Betrag des Quelldruckäquivalenzwertes aus dem Ursprung verschobenen zur Winkelhalbierenden parallel verlaufenden Geraden. Er folgt damit der vorher beschriebenen Formel. Erst bei Annäherung an die Grenzbelastung  $\sigma_0$  nähert er sich der Winkelhalbierenden. Bei Überschreitung dieser Vorlast kommt es, bei Bewässerung der Probe, zum spontanen Kollaps. Dabei wird der Porenraum des Materials verändert, und irreversible Materialumlagerungen finden statt. Nach Trocknung der Probe und erneuter Quellung wird der ursprüngliche Quelldruckäquivalenzwert nicht mehr erreicht.



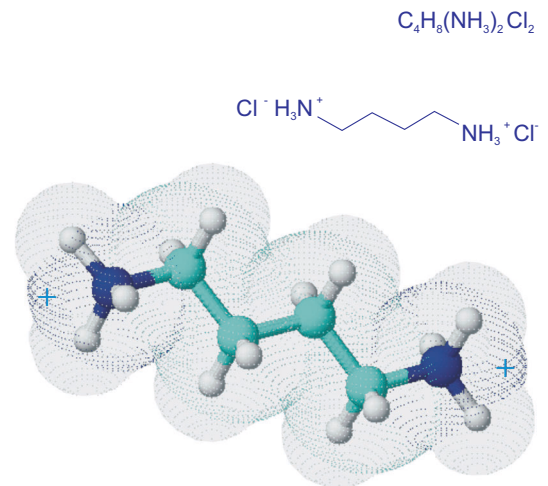
**Abb. 96:** Zusammenhang von Quelldruck und Vorlast am Beispiel des Sander Schilfsandsteins, Typ II.



## 5 Tensid-Behandlung zur Quelldruckminderung

Der sich infolge von Durchfeuchtung und Trocknung des Gesteins häufig wiederholende Quell- und Schwindvorgang ist inzwischen allgemein als Hauptschadensursache für die Verwitterung von tonmineralreichen Sandsteinen anerkannt. Daher erschienen in jüngster Zeit einige Schutzmittel am Markt, die sich die Reduzierung des hygrischen Quellmaßes ohne entscheidende Beeinflussung der sonstigen physikalischen Kennwerte der Gesteine zur Aufgabe machen (SNETHLAGE, WENDLER & KLEMM, 1996).

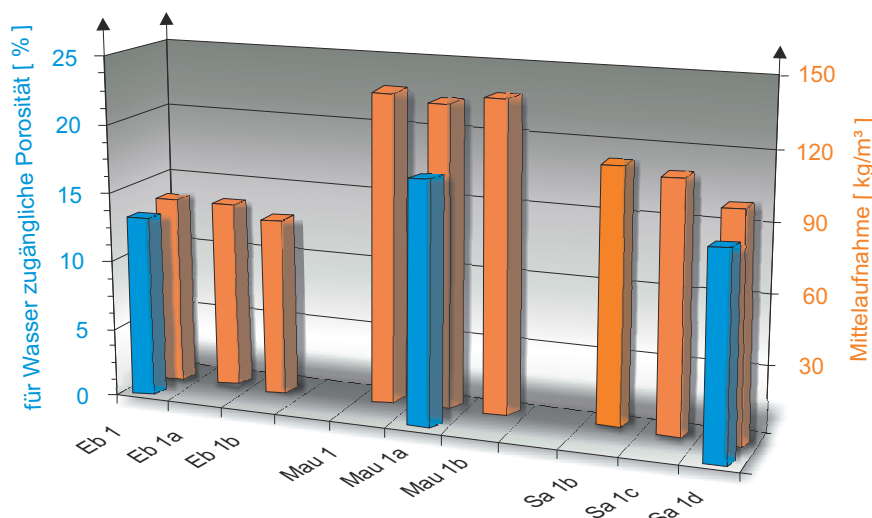
Unter Tensid wird eine bifunktionelle Verbindung mit mindestens einem hydrophoben und einem hydrophilen Molekülteil verstanden. Der hydrophobe Teil ist zumeist eine möglichst lineare Kohlenwasserstoffkette mit acht bis 22 Kohlenstoff-Atomen (NEUMÜLLER, 1988). Zur Anwendung kam Funcosil, Antihygro, ein Produkt der Firma Remmers, eine 0,2 molare Alkyldiammoniumverbindung in wässriger Lösung. Seine Wirkungsweise wird mit der Blockade der quellfähigen Zentren in den Schichtsilikaten beschrieben. Hierunter ist der dauerhafte Austausch der hydratisierungsfähigen Zwischenschichtkationen zu verstehen. Das Ammoniumion kompensiert die durch Gitterfehler entstandenen negativen Oberflächenladungen der Tonminerale permanent, ohne bei Wasserzugabe Hydrathüllen auszubilden. Die osmotische Quellung unterbleibt. Dem technischen Merkblatt nach werden Quellmaßreduzierungen von ca. 50 % erreicht, ohne die für die Wasseraufnahme und -abgabe relevanten Kennwerte entscheidend zu verändern.



**Abb. 97:**

Alkyldiammonium-Molekül mit seiner Ladungsverteilung.

Die Schutzmittelbehandlung der Prüfkörper wurde durch das Fachlabor für Konservierungsfragen in der Denkmalpflege, Dr. E. Wendler, München, durchgeführt. Nach Konditionierung der Probekörper bei Normalklima (20 °C, 60 % r.F.) wurden die Proben kapillar getränkt und kurze Zeit unter Schutzmittelbedeckung in der Lösung gelagert. Anschließend wurden sie abgetupft und feucht gewogen.

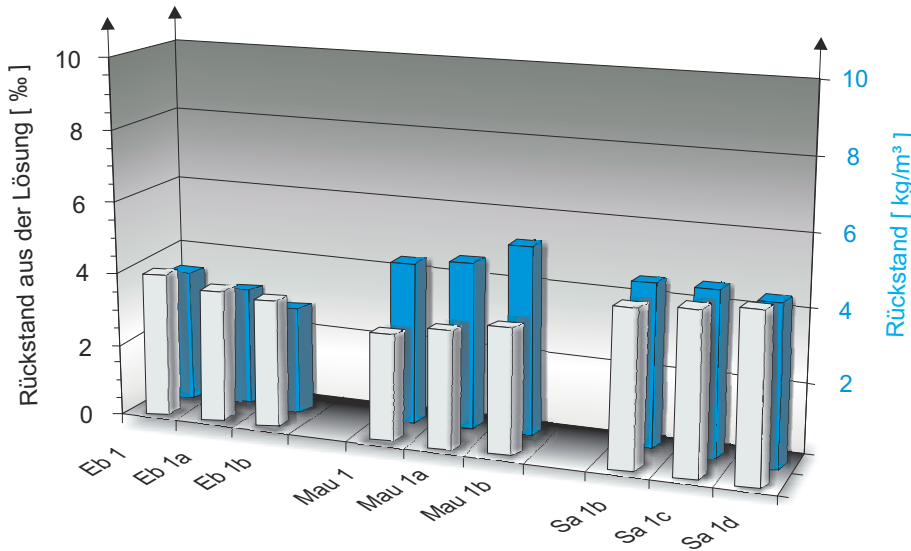


**Abb. 98:**

Mittelaufnahme der behandelten Gesteine (Messungen im feuchten Zustand, unmittelbar nach kapillarer Aufnahme und kurzzeitiger Lagerung unter Schutzmittelbedeckung).

Die Abb. 98 zeigt die Ergebnisse dieser Wägung. Die Menge des aufgenommenen Schutzmittels folgt dabei der effektiven Porosität des Gesteins. Je höher diese ist, desto größer ist die Mittelaufnahme und umgekehrt. Zur Verdeutlichung ist die für Wasser zugängliche Porosität des jeweiligen Gesteins in die Abb. 98 mit aufgenommen (s. blaue Balken).

Die Abb. 99 zeigt die nach 30 Tagen, im Gestein verbliebene Menge an Wirkstoff (Rückstand), ausgedrückt in % der unmittelbar nach der Tränkung im Gestein vorhandenen Lösungsmittelmenge bzw. in kg Wirkstoffgehalt pro Kubikmeter Stein.



Die Menge des im Gestein verbleibenden Schuttmittels liegt zwischen 2 % (Maulbronner Sandstein) und 4 % (Ebenheider und Sander Sandstein). Da diese Menge sehr gering ist, kommt der exakten Gewichtsbestimmung mit ausreichend langen Konditionierungszeiten im Normklima (Klimakammer oder Klimabox) vor und nach der Tränkung besondere Bedeutung zu. Bei der verwendeten Probengröße (50 mm x 50 mm x 50 mm) betrug der Wirkstoffrückstand für den Ebenheider Sandstein durchschnittlich 0,8 g, bei einem Tockengewicht von 273 g.

Abb. 99:

Wirkstoffaufnahme aus der Schuttmittellösung [Messungen nach 30-tägiger Konditionierung der Prüfkörper im Normklima (20 °C, 60 % r.F.).]

### 5.1 Änderung der Wasseraufnahme

Ein Kriterium zur Beurteilung von Schuttmittelbehandlungen ist die Reduzierung der Wasseraufnahme. Wünschenswert ist eine Verringerung der Menge an aufgenommenem Wasser bei gleichzeitig unveränderter Porenstruktur des Gesteins. Das Wasseraufnahmeverhalten des Gesteins (Sorptions), vor allem aber das Austrocknungsverhalten (Desorption), sollte unter keinen Umständen negativ verändert werden.

Tatsächlich reduzieren zwar alle Hydrophobierungsmittel die Wasseraufnahmefähigkeit entscheidend, halten aber gleichzeitig durch verlangsamte Wasserabgabe diese geringere Wassermenge länger im Gestein fest.

Wie verlangt, reduzieren Tenside die Wasseraufnahme eines Gesteins nur mäßig bis gar nicht. Dies belegen auch die Messwerte der Tab. 23.

Eine Wasseraufnahmereduktion von 2 % (Maulbronner und Sander Sandstein, Typ II) ist äußerst gering, und auch eine Reduktion von 7 % (Ebenheider und Sander Sandstein, Typ I) ist als sehr gering einzustufen (Wasseraufnahme vor der Behandlung = 100 %).

Tab. 23

Wasseraufnahmewerte der unbehandelten und der behandelten Gesteine (Messungen an würfelförmigen Proben, 50 mm x 50 mm x 50 mm)



Probe:	Wasseraufnahme					Reduktion [%]
	vor der Behandlung		Ø	nach der Behandlung		
	1.V. / 2.V. / 3.V.	Ø		1.V. / 2.V. / 3.V.	Ø	
	[ M. - % ]	[ M. - % ]		[ M. - % ]	[ M. - % ]	
Ebenheider 1	4,80 / 4,63 / 4,71			4,41 / 4,41 / 4,46		
Ebenheider 1 a	4,77 / 4,52 / 5,00			4,22 / 4,15 / 4,41		
Ebenheider 1 b	4,39 / 4,36 / 4,44	4,6		4,13 / 4,24 / 4,32	4,3	7
Maulbronner 1	7,58 / 7,77 / 7,52			7,24 / 7,54 / 7,67		
Maulbronner 1 a	7,52 / 7,39 / 7,21			7,22 / 7,20 / 7,34		
Maulbronner 1 b	7,75 / 7,83 / 7,52	7,6		7,28 / 7,53 / 7,69	7,4	2
Sander 1 b, Typ I	5,45 / 5,80 / 5,74	5,7		5,26 / 5,23 / 5,26	5,3	7
Sander 1 c, Typ II	5,33 / 5,29 / 5,21			5,20 / 5,13 / 5,18		
Sander 1 d, Typ II	5,36 / 5,39 / 5,25	5,3		5,26 / 5,19 / 5,23	5,2	2

## 5.2 Änderung der hygrischen Dehnung

Zur Beurteilung der Wirksamkeit des verwendeten Schutzmittels wurde die Reduktion der hygrischen Längenänderung untersucht. Die hygrischen Längenänderungen der Prüfkörper wurden vor der Behandlung mit dem Schutzmittel in alle drei Raumrichtungen bestimmt, die sich daraus ergebende Volumenänderung berechnet und der Durchschnitt pro Gesteinsvarietät ermittelt. Nach der Applikation des Tensids erfolgte eine Wiederholung der Untersuchungen.

Die Tab. 24 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Während beim Maulbronner Sandstein keine die Quelldehnung reduzierende Wirkung nachweisbar ist, werden die Quellwerte des Ebenheider und Sander Sandsteins um ca. 15 % bzw. 20 % reduziert. Das Schutzmittel wirkt dabei gleichmäßig, d. h. die prozentuale Reduzierung der Quellung ist in alle drei Raumrichtungen gleich groß, das Verhältnis  $x : y : z$  bleibt erhalten.

Die Quelldehnungsreduzierungen des Ebenheider und Sander Sandsteins sind deutlich erkennbar, sie liegen außerhalb des Streubereiches der Messgenauigkeit. Allerdings werden die lt. Datenblatt der Fa. Remmers zu erreichenden Quellmaßreduzierungen von ca. 50 % in keiner Messung nachgewiesen.

**Tab. 24:**

Änderung der hygrischen Dehnungen (Untersuchungen an würfelförmigen Proben, 50 mm x 50 mm x 50 mm).



Probe:	Hygrische Längenänderung			Volumenänderung	Volumenänderung	Reduktion	x : y : z
	x - Richtung	y - Richtung	z - Richtung	∅	∅	∅	
	[ μm / m ]	[ μm / m ]	[ μm / m ]	[ ‰ ]	[ ‰ ]	[ % ]	[ - ]
Werte vor der Behandlung							
Ebenheider 1	755	578	1.600	2,93			1 : 0,77 : 2,12
Ebenheider 1 a	776	719	1.964	3,46			1 : 0,93 : 2,53
Ebenheider 1 b	741	672	1.962	3,38	3,26	-	1 : 0,91 : 2,65
Maulbronner 1	260	238	417	0,92			1 : 0,92 : 1,60
Maulbronner 1 a	279	272	496	1,05			1 : 0,97 : 1,78
Maulbronner 1 b	299	219	456	0,97	0,98	-	1 : 0,73 : 1,53
Sander 1 b, Typ I	673	476	1.098	2,25	2,25	-	1 : 0,71 : 1,63
Sander 1 c, Typ II	1.432	1.227	2.635	5,29			1 : 0,86 : 1,84
Sander 1 d, Typ II	1.302	1.255	2.554	5,11	5,20	-	1 : 0,96 : 1,96
Werte nach der Behandlung							
Ebenheider 1	734	578	1.400	2,71			1 : 0,79 : 1,91
Ebenheider 1 a	602	543	1.660	2,81			1 : 0,90 : 2,76
Ebenheider 1 b	620	556	1.697	2,87	2,80	14	1 : 0,90 : 2,74
Maulbronner 1	319	204	416	0,94			1 : 0,64 : 1,30
Maulbronner 1 a	239	225	417	0,88			1 : 0,94 : 1,74
Maulbronner 1 b	337	269	485	1,09	0,97	1	1 : 0,80 : 1,44
Sander 1 b, Typ I	476	438	817	1,73	1,73	23	1 : 0,92 : 1,72
Sander 1 c, Typ II	1.274	1.068	2.138	4,48			1 : 0,84 : 1,68
Sander 1 d, Typ II	1.054	1.022	2.000	4,08	4,28	18	1 : 0,97 : 1,90

### 5.3 Quelldruckänderung

Neben der Untersuchung zur Reduzierung der hygrischen Längenänderung wurde die Wirkung des Schutzmittels auch durch Messungen der Veränderung des Quelldruckes überprüft. Hierfür am besten geeignet ist der Triaxialquelldruckversuch, der in einer Messung die Werte aller drei Raumrichtungen ermittelt. Die Messungen wurden an den identischen Proben der hygrischen Längenänderungsmessungen durchgeführt. Die Vorlast war für alle Versuche 0,021 MPa.

Die Tab. 25 zeigt die Ergebnisse der Messungen. Die Resultate des Vergleiches der Längenänderungsmessungen werden bestätigt, wenngleich die Ergebnisse nicht so deutlich sind. Quelldruckminderungen von 10 bis 20 % liegen, bei diesem Druckbereich, im Bereich der Messgenauigkeit und können daher nicht mehr eindeutig interpretiert werden. Dies betrifft vor allem die niedrigeren Werte parallel zur Schichtung in x- und y-Richtung. Hingegen zeigen die senkrecht zur Schichtung gemessenen z-Werte eine deutlichere Reduktion des Quelldruckes (im Mittel ca. 20 %).

**Tab. 25:**

Änderung des Quelldruckes (Triaxialquelldruckversuche an Würfeln 50 mm x 50 mm x 50 mm, Vorlast 0,021 MPa).



Probe:	Quelldruck			Ø	Reduktion	x : y : z
	x - Richtung	y - Richtung	z - Richtung			
	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]	[ % ]	[ - ]
Werte vor der Behandlung						
Ebenheider 1	0,11	0,11	0,13	0,12	-	1 : 0,93 : 1,12
Ebenheider 1 a	0,14	0,13	0,16			1 : 0,92 : 1,14
Ebenheider 1 b	0,10	0,08	0,16			1 : 0,79 : 1,61
Maulbronner 1	0,09	0,07	0,10	0,08	-	1 : 0,80 : 1,15
Maulbronner 1 a	0,07	0,07	0,10			1 : 0,92 : 1,40
Maulbronner 1 b	0,09	0,07	0,09			1 : 0,79 : 1,09
Sander 1 b, Typ I	0,11	0,11	0,13	0,12	-	1 : 1,00 : 1,14
Sander 1 c, Typ II	0,15	0,13	0,15			1 : 0,92 : 1,05
Sander 1 d, Typ II	0,15	0,15	0,20			1 : 0,98 : 1,32
Werte nach der Behandlung						
Ebenheider 1	0,09	0,08	0,08	0,11	8	1 : 0,89 : 0,89
Ebenheider 1 a	0,19	0,10	0,16			1 : 0,53 : 0,84
Ebenheider 1 b	0,11	0,05	0,15			1 : 0,45 : 1,36
Maulbronner 1	0,09	0,07	0,07	0,08	0	1 : 0,78 : 0,78
Maulbronner 1 a	0,08	0,06	0,07			1 : 0,75 : 0,78
Maulbronner 1 b	0,09	0,09	0,07			1 : 1,00 : 0,78
Sander 1 b, Typ I	0,11	0,11	0,10	0,11	8	1 : 1,00 : 0,91
Sander 1 c, Typ II	0,19	0,18	0,14			1 : 0,95 : 0,74
Sander 1 d, Typ II	0,15	0,16	0,14			1 : 1,06 : 0,94

## 6 Quelldruck und Festigkeit

Zur Abschätzung der Auswirkung des Quelldruckes auf das Gefüge der Sandsteine und auf dessen Zusammenhalt müssen deren Festigkeitskennwerte näher betrachtet werden. Die Festigkeitswerte können in formabhängige und formunabhängige Kennwerte eingeteilt werden (s. Abschn. II. 1.7). Zu den geometrieabhängigen gehören die Druck- und Biegefestigkeit mit dem Spezialfall des Biegezugversuches, zu den geometrieunabhängigen zählen die Zug-, Haftzug- und Oberflächenhaftzugfestigkeit. Alle Festigkeitskennwerte sind von der Belastungsgeschwindigkeit der Versuche abhängig. Eine hohe Geschwindigkeit führt zu höheren Werten, eine niedrige Geschwindigkeit zu geringeren Ergebnissen. Bis dato fehlen aber systematische Untersuchungen dieser Abhängigkeit. Die standardmäßig ermittelten Festigkeitskennwerte sind Kurzzeitfestigkeiten, bei deren Ermittlung die Dauer eines Versuches einige Minuten nicht überschreitet. Diese Festigkeiten sind für spontane Ereignisse von Bedeutung (z.B. Stoß oder Schlag, Anlaufbelastungen oder Drehmomentbelastungen von Motoren). An Bauwerken spielen sie nur in Katastrophenfällen eine Rolle (z.B. Brand, Explosion oder Erdbeben). Der Bauingenieur und der Statiker tragen dieser Unschärfe der Bestimmung der Festigkeitskennwerte von Baumaterialien durch Hinzufügen eines empirisch festgelegten Sicherheitsbeiwertes Rechnung ( $\gamma \approx 2-3$  für Naturwerksteine, s. Abschn. II. 1.7.3).

Da bei allen Versuchen zur Festigkeitsermittlung das Versagen des Prüfkörpers durch Zugbruch erfolgt und die Zugfestigkeit als formunabhängiger Festigkeitskennwert anzusehen ist, ist dieser Wert am besten geeignet, die Auswirkung des Quelldruckes auf das Gefüge der Gesteine zu beurteilen. Neben der Zugfestigkeit können sowohl die Haftzugfestigkeit wie auch die Oberflächenhaftzugfestigkeit zur Beurteilung herangezogen werden.

Betrachtet man den Quellvorgang als einen in seinen Auswirkungen dem inneren Zusammenhalt der Gesteine entgegengesetzt wirkenden Vorgang, so lässt sich die Quellspannung als Differenz der Festigkeit im trockenen Zustand abzüglich der Festigkeit im wassergesättigten Zustand ausdrücken. Dabei ist bei der Ermittlung der Festigkeitskennwerte penibel auf die Orientierung der Prüfkörper in Bezug zur Schichtungsebene zu achten. Prinzipiell sind alle formunabhängigen Festigkeitskennwerte zur Ermittlung geeignet. Da aber die Bestimmung der Haftzug- und Oberflächenhaftzugfestigkeit im wassergesättigten Zustand der Proben mit großen Schwierigkeiten verbunden ist, empfiehlt es sich, die Zugfestigkeit zu verwenden. Wegen der Lückenhaftigkeit der richtungsgebundenen und feuchtigkeitsabhängigen Festigkeitskennwerte (s. Abschn. III, 1.1.2) lässt sich die Berechnung nur exemplarisch für den Sander Sandstein, Typ II, durchführen.

Alle drei Berechnungen führen zu einem sehr ähnlichen Ergebnis ( $\sim 0,8$  MPa). Die Größenordnung des Quelldruckes entspricht dabei dem von SCHUH, 1987, am "grünen Mainsandstein" ermittelten Wert ( $\sim 0,5$  MPa, Vorlast 0,210 MPa) und deckt sich mit den eigenen Ergebnissen (0,4 MPa parallel bis 0,8 MPa senkrecht zur Schichtung, Vorlast 0,021 MPa) für den Sander Sandstein, Typ II.

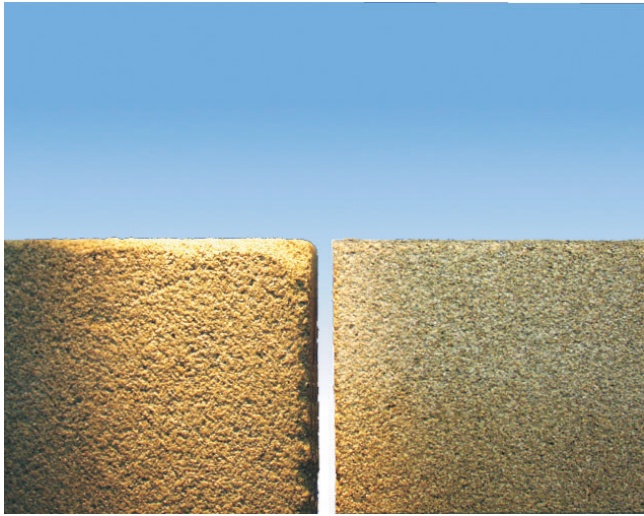
**Tab. 26:**

Berechnung des Quelldruckes aus der Festigkeitsdifferenz zwischen trockenem und wassergesättigtem Zustand.

	Messrichtung	Zugfestigkeit Oberflächenhaftzugfestigkeit		Quelldruck	
		$\sigma_z$	$\sigma_{OHZ}$	$\sigma_Q$	$\sigma_Q$
Probenkonditionierung		[ MPa ]	[ MPa ]	*1 [ MPa ]	*2 [ MPa ]
20 °C, 60 % r.F.	⊥ ss	-	0,77		
20 °C, 60 % r.F.	ss	1,47	1,11		
Wasserlagerung	⊥ ss	-	0,1		0,67
Wasserlagerung	ss	0,64	0,3	0,83	0,81

\*1 = berechnet aus der Zugfestigkeitsabnahme

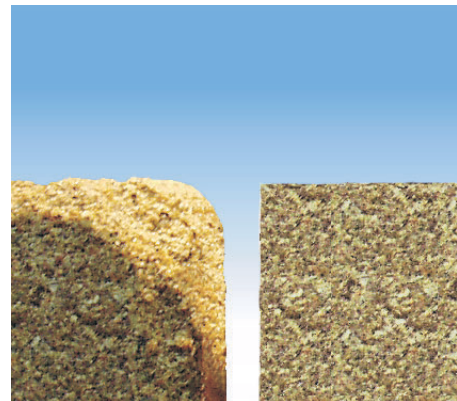
\*2 = berechnet aus der Haftzugfestigkeitsabnahme

**Abb. 100:**

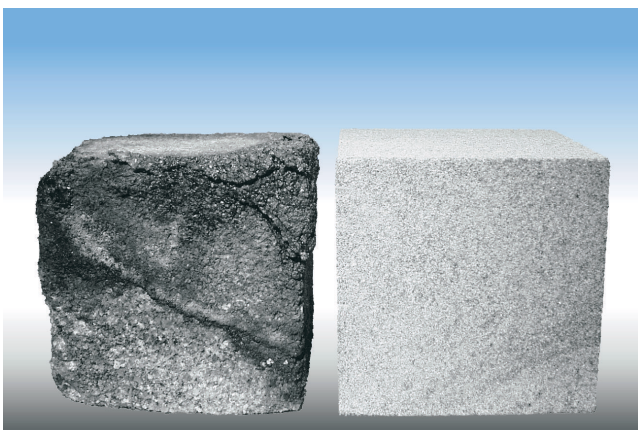
Kantenverwitterung hervorgerufen durch Quellen und Schwinden, am Beispiel des Sander Sandsteins, Typ II (Würfelgröße 5 cm x 5 cm x 5 cm).

Betrachtet man den Bindungszustand eines einzelnen Mineralkorns an der Oberfläche (Oberflächenhaftzugfestigkeit) oder an der Kante eines Gesteins (s. Abb. 59) und setzt den in alle Richtungen gleichmäßig wirkenden Quelldruck dagegen, so wird das als “Kanten-” oder “Konturverlust” bekannte Verwitterungsphänomen verständlich. Durch den der Festigkeit entgegenwirkenden Quelldruck wird die Haftzugfestigkeit der oberflächen- oder kantennahen Partikel auf nahezu Null oder Null reduziert, der Zusammenhalt geht verloren und die Mineralkörner lösen sich aus dem Verbund. Die Abb. 100 und die Abb. 101 zeigen diese Erscheinung. In beiden Fotos ist, jeweils links im Bild, ein ca. 20 mal durch Quellen und Schwinden gestresster Sander Sandstein einem bruchfrischen Würfel gegenübergestellt (jeweils rechts im Bild). Der Ausgangszustand beider Würfel war identisch.

Die in der Abb. 102 dargestellte, tiefgründige Verwitterung eines Gesteinswürfels (Maulbronner Sandstein) lässt sich aber nicht durch die Überschreitung der Oberflächenhaftzugfestigkeit erklären. Dieser Gesteinswürfel wurde über nahezu 10 Jahre einer periodischen Durchfeuchtung mit anschließender Trocknung unterzogen (Wassersättigung mit anschließender 6-tägiger Trocknungsphase). Betrachtet man die Festigkeit eines Materials als Summe aller Bindungen seiner Einzelkomponenten (s. Abschn. II. 1.7, Abb. 27) und zieht man die Beeinflussbarkeit der verschiedenen Bindungsarten durch Wasser in Betracht, so lässt sich die allmähliche Gefügauflockerung infolge von Quellen und Schwinden auch im Inneren eines Materials erklären. Der physikalische Vorgang der Quellung wurde bisher als reversibel betrachtet. Das Material erreicht demnach nach seiner Austrocknung wieder seine Ausgangsfestigkeit. Dies ist aber nur mit Einschränkungen richtig, da unbestritten häufig wiederkehrende Befeuchtungs- und Trocknungszyklen im Laufe der Zeit die Festigkeit erheblich reduzieren.

**Abb. 101:**

Detailaufnahme zur Abb. 100 (Kantenverwitterung).

**Abb. 102:**

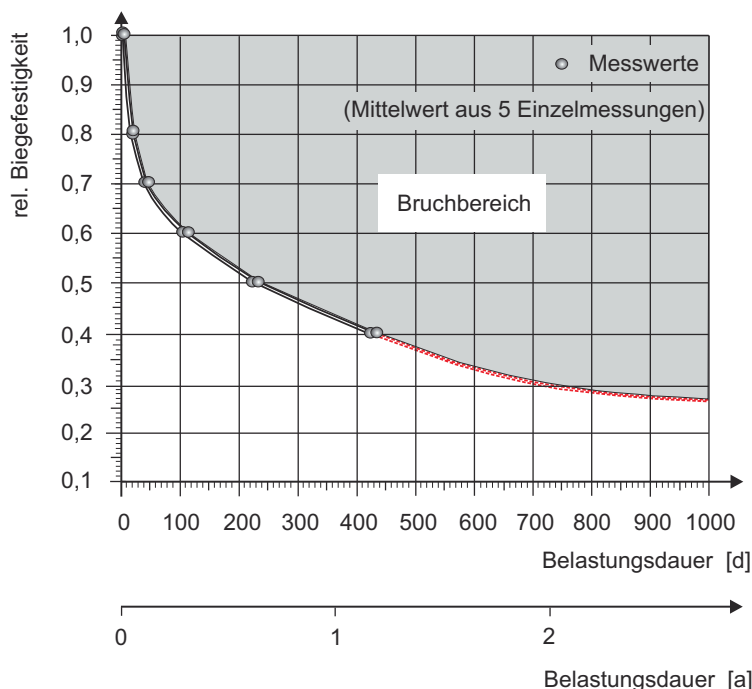
Tiefgründige Verwitterung infolge von Quellen und Schwinden. (Würfelgröße 5 cm x 5 cm x 5 cm).

Durch den Quellvorgang bildet sich im Material eine der Festigkeit entgegengesetzt wirkende Spannung aus. Bei Anwesenheit von Wasser im Porenraum werden die sehr schwachen physikalischen Bindungen (Koagulationskontakte) infolge der Reduzierung der Oberflächenenergie der Partikel gelöst (s. Abschn. II. 1.7 und Abb. 27). Dadurch beschränken sich die der Auflösung des Materials entgegenwirkenden Bindungskräfte auf die verbleibenden atomaren Kontakte und auf die Phasenkontakte (chemische Bindung) der Körner. Durch diese zusätzlich wirkenden Kräfte werden nun als nächstes die schwächsten atomaren Kontakte aufgebrochen, was zu einer weiteren Spannungserhöhung

auf die verbleibenden Kontakte (Bindungen) führt. Bei Trocknung des Materials bilden sich die Koagulationskontakte neu. Dagegen sind die auf diese Weise zerstörten atomaren Kontakte endgültig verloren und bilden sich nicht mehr neu. Diese Schwächung der Festigkeit durch einen einzigen Befeuchtungs- und Trocknungszyklus lässt sich messtechnisch nicht erfassen, weil die Festigkeitsveränderungen zu gering sind und eine Prüfung nicht an der identischen Probe durchgeführt werden könnte. Im Laufe der Zeit führen diese kleinsten Festigkeitsveränderungen aber zu der in Abb. 102 gezeigten Situation.

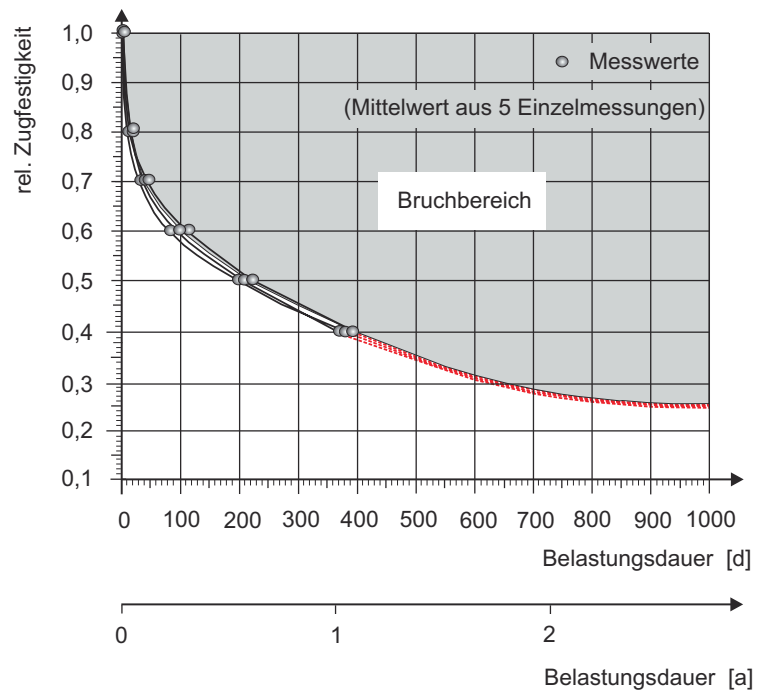
Prinzipiell lässt sich festhalten, dass alle Festigkeitskennwerte mit abnehmender Belastungsgeschwindigkeit abnehmen und nur noch einen Bruchteil ihres ursprünglichen Wertes erreichen. Auch Langzeitversuche mit statischen Lasten bestätigen dies.

SORACE (1996) untersuchte zwei italienische Sandsteine (Pietra Serena und Pietraforte), einen Kalkstein (Piobbico-Cesana) und einen weiß gebänderten Marmor (Carrara) auf deren Festigkeit im Langzeitversuch. Durch die Herstellung der Proben einer Varietät aus einem einzigen Block konnten größere Streuungen der Ergebnisse infolge von Materialinhomogenität weitestgehend vermieden werden. Er untersuchte nahezu 100 Prüfkörper auf deren Langzeitfestigkeitsverhalten. Durchgeführt wurden Zugfestigkeits- und Dreipunkt-Biegefestigkeitsversuche. Jeweils 5 Proben einer Gesteinsvarietät wurden mit 0,8, 0,7, 0,6, 0,5 und 0,4



**Abb. 104:**

Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Belastungsdauer (nach SORACE, 1996).

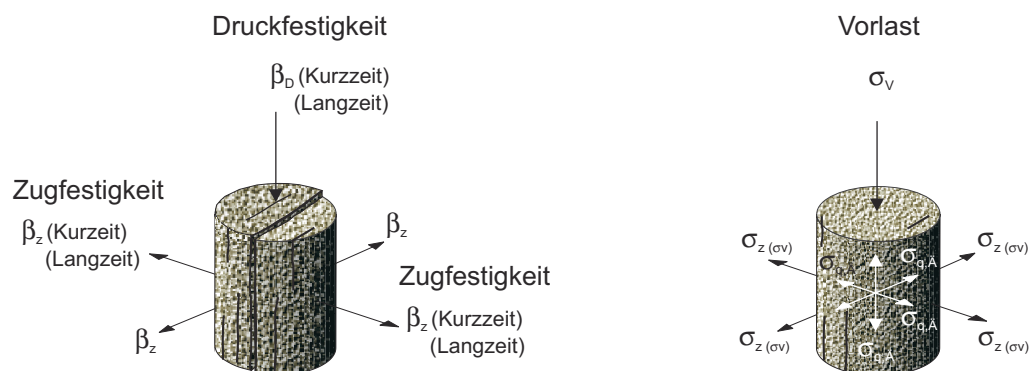


**Abb. 103:**

Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Belastungsdauer (nach SORACE, 1996).

der vorher im Zug- bzw. Biegeversuch ermittelten Bruchlast statisch belastet. Die 5 Ergebnisse einer Belastungsstufe einer Varietät wurden zu einem Mittelwert zusammengefasst und der Belastungsdauer gegenüber gestellt. Die Abb. 103 zeigt die Ergebnisse der Zugversuche an den beiden Sandsteinen und an dem Kalkstein. Der Carrara Marmor wurde wegen der Übersichtlichkeit der Darstellung weggelassen. Die Grafik zeigt aber denselben Verlauf der Messwertkurve. Die Ergebnisse der Langzeitbiegefestigkeitsversuche, Abb. 104, sind nahezu identisch mit den Zugfestigkeitsergebnissen. In Abb. 104 sind lediglich die beiden Sandsteine dargestellt, die Messwertkurven des Kalksteins und des Marmors zeigen einen ähnlichen Verlauf. In beiden Abbildungen ist der rot gepunktete Ast der Kurven extrapoliert, der dargestellte Endwert somit zahlenmäßig nicht belegt. Da sowohl Sandsteine wie auch

Kalksteine und Marmore einen identischen Verlauf der Kurven sowohl im Zug- wie auch im Biegeversuch zeigen, kann aus diesen Untersuchungen auf die allgemeine Gültigkeit dieser Gesetzmäßigkeit für Gesteine geschlossen werden. Der dargestellte Festigkeitsverlust ist erheblich und dürfte über einen noch längeren Zeitraum hinweg noch größer sein. Das in einigen Fällen beobachtete Materialversagen der Naturwerksteine erscheint damit in einem anderen Zusammenhang. Die häufig hierfür verwendete Erklärung (Festigkeitsversagen infolge von Materialinhomogenität) behält zwar nach wie vor ihre Gültigkeit, muss aber nicht für alle Einzelfälle zutreffend sein. Bei weiterer Verwendung der bisherigen Prüfmethodik muss die Forderung der Erhöhung des bisherigen Sicherheitsbeiwertes für Naturwerksteine von  $\gamma = 2-3$  auf künftig  $\gamma = 10-15$  erhoben werden.



- 1)  $\beta_z$  (Langzeit)  $\gg \sigma_{Z(\sigma_V)} + \sigma_{q,A}$  , stabil
- 2)  $\beta_z$  (Langzeit)  $\leq \sigma_{Z(\sigma_V)} + \sigma_{q,A}$  , instabil

**Abb. 105:**

Abschätzung des Einflusses des Quelldruckes auf die Festigkeit eines Gesteines.

Da das Versagen eines Gesteins im Druckversuch stets durch Zugbruch erfolgt (s. Abschn. II. 1.7.1), ist das Erreichen oder gar die Überschreitung dieses Festigkeitskennwertes ein eindeutiger Nachweis für Materialschädigung. Beide Festigkeitskennwerte (Druckfestigkeit und Zugfestigkeit) stehen in einem konstanten Verhältnis von 1 : 20 (s. Abb. 45 und Abb. 48). Demzufolge bedingt eine senkrecht auf einen Körper aufgebrachte axiale Drucklast von  $\sigma_V$  eine im rechten Winkel dazu wirkende Zugspannung von  $\sigma_{Z(\sigma_V)}$ , gemäß der Formel:

$$\sigma_Z = \frac{\sigma_V}{20}$$

Betrachtet man den Quelldruckäquivalenzwert als einen über den gesamten Vorlastbereich hinweg mehr oder minder konstanten Materialkennwert, der in alle Raumrichtungen gleichmäßig wirkt, so addiert sich dieser Druck in Radialrichtung zu der bereits vorhandene Zugkraft  $\sigma_{Z(\sigma_V)}$ .

Die Abb. 105 versucht, die Spannungszustände eines Zylinders im Druckversuch und im Quelldruckversuch zu visualisieren. Verwendet man nun als Festigkeitskennwerte die Langzeitfestigkeiten des entsprechenden Gesteins, so lassen sich nach erfolgter Quellung zwei unterschiedliche Spannungszustände definieren: der stabile und der instabile Zustand. Bei letzterem erreicht oder übersteigt die Spannung in radialer Richtung die Zugfestigkeit. Es kommt zum Versagen des Materials.



Die Tab. 27 stellt die zur Beurteilung der Auswirkung des Quelldruckes auf die Widerstandsfestigkeit eines Gesteins relevanten Festigkeitskennwerte dem ermittelten Quelldruck gegenüber. Das Verhältnis Kurzzeitfestigkeit /Langzeitfestigkeit wurde mit 0,25 angenommen (s. Abb. 103 und Abb. 104) und es wurden die Quelldruckäquivalenzwerte der Sandsteine der Zylinderproben verwendet (Tab. 17). Die durch die Vorlast verursachte Radialspannung  $\sigma_{v(\sigma_v)}$  wurde für alle Vorlaststufen entsprechend dem vorher beschriebenen Verhältnis ( $\sigma_{v(\sigma_v)} = \sigma_v / 20$ ) berechnet. Die gesamte Radialspannung  $\sigma_z$  wurde nach der Formel

$$\sigma_z = \sigma_{z(\sigma_v)} + \sigma_{q,\ddot{A}}$$

bestimmt.

**Tab. 27:**

Vergleich von Kurzzeitzugfestigkeit (Versuchsdauer bis zu einigen Minuten), Langzeitzugfestigkeit (Versuchsdauer bis zu drei Jahren) und Quelldruck (Quelldruckäquivalenzwerte von Tab. 17, Messungen an Zylindern,  $\varnothing$  70 mm, Höhe 160 mm).

Vorlast	Kurzzeit- Zugfestigkeit    ss	Langzeit- Zugfestigkeit    ss	Quelldruck- äquivalenzwert $\varnothing$	$\sigma_z$ (gesamte Radialspannung)		
	[ MPa ]	[ MPa ]	[ MPa ]	$\varnothing$ [ MPa ]	$\varnothing$ [ MPa ]	$\varnothing$ (% $\beta_z$ ) [ MPa ]
				$\sigma_v = 0,021$ MPa	$\sigma_v = 0,210$ MPa	$\sigma_v = 2,100$ MPa
Cottaer	1,13	0,28	0,03	0,03	0,04	0,14 (50)
Ebenheider	1,91	0,48	0,07	0,07	0,08	0,18 (38)
Maulbronner	2,03	0,51	0,18	0,18	0,19	0,29 (57)
Obernkirchner	2,95	0,74	0,02	0,02	0,03	0,13 (18)
Rorschacher	-	-	0,21	0,21	0,22	0,32 (-)
Sander, Typ II	1,47	0,38	0,41	0,41	0,42	0,52 (111)



Die Berechnung wurde für drei Vorlaststufen durchgeführt ( $\sigma_v = 0,021$  MPa,  $\sigma_v = 0,210$  MPa und  $\sigma_v = 2,100$  MPa). Die erste Vorlaststufe entspricht dem Sockeldruck, hervorgerufen durch eine statische Belastung einer 1 m hohen Gesteinssäule, die zweite einer von einer 10 m hohen Säule und die dritte einer von einer 100 m hohen Säule (s. Abschn. III. 4.1.3). Die Quelldruckwerte sind jeweils Mittelwerte aus den Messungen senkrecht und parallel zur Schichtung.

Bei keiner Sandsteinvarietät erreicht die Radialspannung den Kurzzeitzugfestigkeitswert (Maximum 27 % beim Sander Sandstein, Typ II). Betrachtet man hingegen die Langzeitzugfestigkeit, so wird diese vom Sander Sandstein in allen Vorlaststufen überschritten, erreicht beim Maulbronner und Cottaer Sandstein über 50 % der Festigkeit und bleibt lediglich beim Referenzgestein (Obernkirchner Sandstein) deutlich unterhalb seiner Langzeitzugfestigkeit (Radialspannung  $\sim 18$  % der Festigkeit).

Die häufig zu beobachtenden Schäden am Cottaer Sandstein und dessen Sensibilität gegenüber Umwelteinflüssen werden erst durch diese Betrachtungsweise verständlich, da dieses Gestein aufgrund seiner sehr geringen hygrischen Dehnung und des praktisch nicht vorhandenen Quelldruckes als weitestgehend verwitterungsresistent einzustufen wäre. Die hygrischen Kennwerte (Dehnmaß und Quelldruck) entsprechen denen des Obernkirchner Sandsteins. Erst die Berücksichtigung der sehr niedrigen Langzeitzugfestigkeit (0,28 MPa) erklärt dessen große Verwitterungsanfälligkeit.

## 7 Thermische Längenänderung und thermischer Druck

Die infolge häufiger Temperaturwechsel ausgelösten Volumenänderungen (Ausdehnung und Kontraktion) üben einen Druck auf den Gefügeverband der Gesteine aus und können vor allem im mehrfachen und raschen Wechsel das Gefüge in seinem Zusammenhalt beeinträchtigen. Hauptsächlich große Kontraste der Tages- und Nachttemperatur bedingen eine periodische Ausdehnung und Kontraktion des Gesteins und führen im Laufe der Zeit zur Lockerung des Gefügeverbandes. Davon besonders betroffen sind Gesteine, die aus unterschiedlichen Mineralien mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten bestehen. Aber auch die auf den ersten Blick recht homogen wirkenden Kalksteine und Marmore reagieren auf häufige Temperaturschwankungen mit Festigkeitsverlust. Bedeutsam ist dabei, dass die Wärmeleitfähigkeit der Gesteine sehr gering ist und dadurch die durch Sonneneinstrahlung auf der Oberfläche erzeugte Wärme nur schwer in das Gesteinsinnere abfließen kann.

Phänomenologisch kennt man diese Verwitterungserscheinungen vor allem aus den ariden Klimagebieten. In den gemäßigten Klimazonen tritt dieses Phänomen nicht so deutlich in Erscheinung, und daher misst man ihm dort eher eine untergeordnete Bedeutung bei.

### 7.1 Messprinzip und Versuchsaufbau

Die bisherigen thermischen Längenänderungsmessungen wurden hauptsächlich mittels der Applikation von Dehnmessstreifen (DMS) durchgeführt. Hierbei wird eine Wheatstone'sche Brückenschaltung auf den Prüfkörper geklebt und über die Änderung des Widerstandes der Schaltung auf die erfolgte Längenänderung zurückgeschlossen. Geeicht wird dieses Verfahren mit einer Vergleichsmessung an einem thermisch bekannten Material (Duranglas) mit bekannter Dehnung ( $\alpha = 3,25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ). Gemessen wird über eine Distanz von 10 mm. Diese Methode ist eine indirekte Bestimmung, bei der über eine andere physikalische Kenngröße auf die zu bestimmende Messgröße zurückgeschlossen wird.

Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde die Methode der direkten Messung der thermischen Ausdehnung bevorzugt. Um die Schwierigkeiten, die mit der Erwärmung des Messsystems (Dehnmessständer und Dehnmessuhr) verbunden sind, zu umgehen, wurden die Proben nicht aufgeheizt, sondern abgekühlt. Die Prüfzylinder ( $\varnothing 70 \text{ mm}$ , Höhe 160 mm) wurden im Trockenschrank für mindestens 48 Stunden auf  $+ 52 \text{ }^\circ\text{C}$  aufgeheizt. Unmittelbar nach der Entnahme aus dem Schrank wurden sie in den Dehnmessständer einge-



**Abb. 106:**

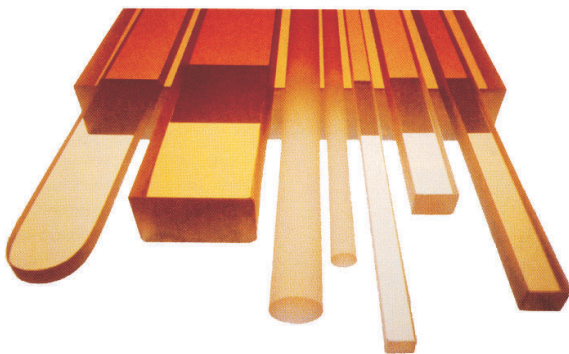
Messanordnung zur Ermittlung der thermischen Längenänderung (s. auch Abb. 8).

spannt und die Dehnmessuhr (Anzeigegenauigkeit = 0,001 mm) auf ihren Ausgangswert gestellt. Die Temperatur des Dehnmessständers entsprach der Raumtemperatur ( $+ 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Anschließend wurden die Proben auf Raumklima abgekühlt und nach 12 Stunden der Wert der Messuhr abgelesen. Damit war die Kontraktion der Probe bestimmt (Ausgangstemperatur  $+ 52 \text{ }^\circ\text{C}$ , Endtemperatur  $+ 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Da sich nach dem Einspannen der heißen Probe der Dehnmessständer erwärmte, während sich die Probe langsam abkühlte, konnten die aufgezeichneten Zwischenwerte nicht zur Auswertung verwendet werden. Überlagert wurde die Kontraktion der Probe durch die Quelldehnung infolge von Feuchtigkeitsaufnahme aus der Luft. Der Feuchtigkeitsgehalt der Prüfkörper ändert sich dabei von nahezu 0 Massenprozent zu Beginn der Messung bis zu seiner Ausgleichsfeuchte bei Raumklima. Bei der gewählten Probendimension (Zylinder  $\varnothing 70 \text{ mm}$ , Höhe 160 mm) benötigt der Prüfkörper 4 - 6 Wochen, bis er sich im Gleichgewichtszustand von ca. 0,5 Masseprozent befindet.

Bei den Messungen der quellfähigen Gesteine (Ebenheider, Maulbronner und Sander Sandstein) konnte der Beginn dieser Phase durch die allmähliche Zunahme der Probenlänge beobachtet werden. Die Längenänderungszunahme der verwendeten Proben durch die hygroskopische Quellung betrug nach Abkühlung der Probe maximal  $3 \text{ } \mu\text{m}$  (innerhalb der ersten 24 Stunden), bei einer thermischen Kontraktion von ca.  $50 \text{ } \mu\text{m}$ .

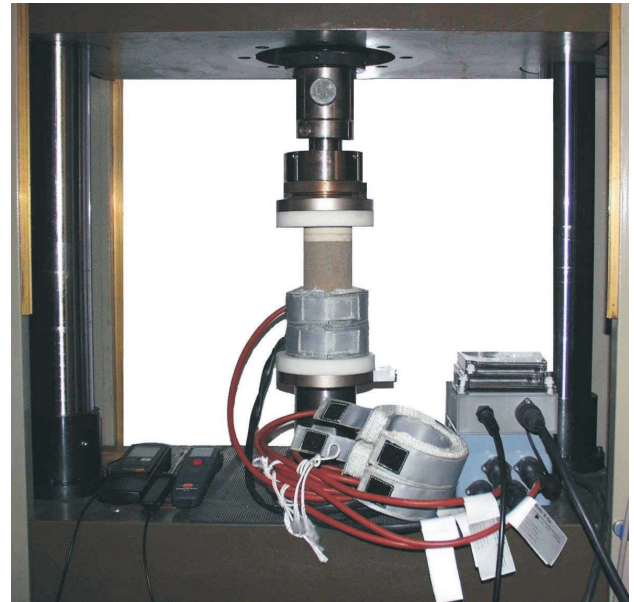
Da die hygroskopische Feuchtigkeitsaufnahme eines Sandsteins sehr langsam erfolgt, kann der der thermischen Kontraktion entgegengesetzte physikalische Vorgang der hygrischen Quellung innerhalb des betrachteten Zeitraums (12 Stunden) vernachlässigt werden. Vergleichsmessungen, die zur Vermeidung der hygroskopischen Quellung in einer Klimabox über Silikagel (Ausgleichsfeuchte  $\sim 3\%$ ) durchgeführt wurden, bestätigten dies.

Die Ermittlung des thermischen Druckes erfolgte mit der Universalprüfmaschine. Der Prüfkörper wurde vor der Erwärmung für mindestens 24 Stunden gleichmäßig vorbelastet. In dieser Phase war wiederholtes Nachregeln der Auflast notwendig, da die Prüfkörper mit Relaxationsvorgängen auf die zusätzlich aufgebrachte Last reagierten (s. Abs. III. 4.1.3). Nach Erreichen des neuen Gleichgewichtszustandes wurde die Probe über vier Heizmanschetten (Spannung 230 V, Leistung 35 Watt) auf die Prüftemperatur gebracht. Die Steuerung der Heizmanschetten erfolgte über ein elektronisches Regelgerät (Fa. Mohr & Co, Laborhandelsgesellschaft mbH, 69181 Leimen). In einer der Heizmanschetten befand sich ein Temperaturfühler (Pt 100), der die an der Oberfläche der Probe herrschende Temperatur mit der am Regler eingestellten abglich. Die Temperaturbegrenzung am Regelgerät wurde auf  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$  eingestellt. Die Aufzeichnung des Kraft- bzw. Druckmesswertes erfolgt über die Universalprüfmaschine. Da die Versuche nicht in einer temperierten Kammer durchgeführt werden konnten, wurde ein Versuch erst dann als abgeschlossen betrachtet, wenn sich die erwärmte Probe im Gleichgewichtszustand mit ihrer Umgebungsluft befand. Erkennbar war dies an der konstanten Kraft- bzw. Druckanzeige der Messwertkurve nach ca. 12 Stunden. Dieser Zustand ist dadurch gekennzeichnet, dass die zugeführte Wärmeenergie gleich der durch die Oberfläche der Probe abgestrahlten Wärmemenge ist. Die Temperatur der Probe entsprach aber nicht der am Regelgerät eingestellten. Sie wurde separat mit einem zusätzlichen Oberflächentemperaturfühler (Pt 100) bestimmt. Zur weitestgehenden Vermeidung der Aufheizung der Druckplatten der Universalprüfmaschine wurden diese durch entsprechende Glasfritten abgedeckt. Weil sich die partielle Erwärmung der Maschine aber nicht vollständig verhindern ließ, wurde nach einer Möglichkeit der Quantifizierung dieses Einflusses gesucht. Wird ein thermisch stabiles Material auf die Prüftemperatur erhitzt, so ist die gesamte Zunahme des registrierten Druckanstieges der Erwärmung der einzelnen Maschinenkomponenten zuzuschreiben.



**Abb. 108:**

Stäbe und Platten, als Substrat für Skalen und Normale in der Präzisionsmesstechnik (Foto: Fa. Schott Glas).



**Abb. 107:**

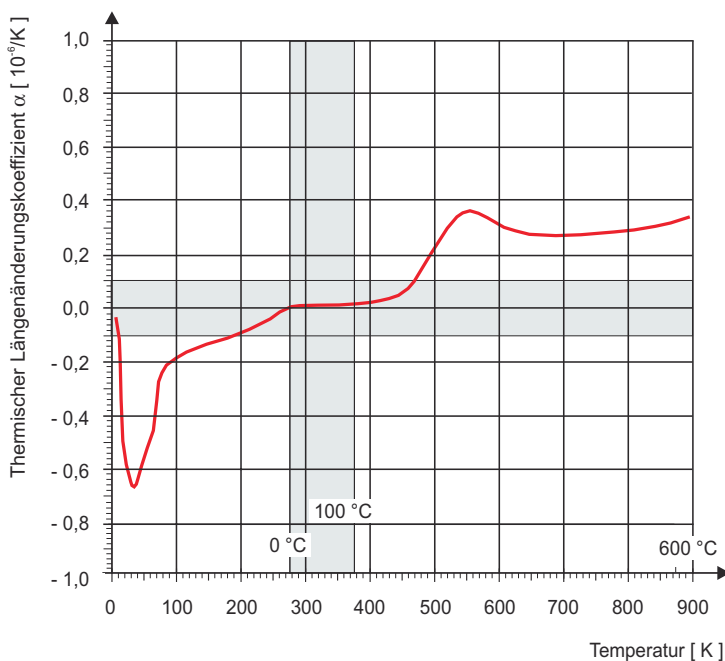
Messanordnung zur Ermittlung des thermischen Druckes.

Verwendet wurde Zerodur, ein glaskeramischer Werkstoff der Fa. Schott Glas, Mainz. Dieser wird hauptsächlich für optische, opto-elektronische und feinmechanische Anwendungen verwendet. Spiegelträger für astronomische Großteleskope und Satelliten-Röntgenteleskope, optische Elemente für Kometen- und Wettersonden sowie formstabile Abstandhalter und Maßstäbe in der Präzisionsmechanik sind die Hauptanwendung. Die hohe Homogenität des Werkstoffes lässt selbst bei tonnenschweren Stücken mit Abmessungen von mehreren Metern kaum messbare Schwankungen der physikalischen Eigenschaften erkennen. Zerodur ist nicht porös, besitzt eine richtungsfreie Struktur und hat eine porenfreie Oberfläche. Die Glaskeramik besteht zu

70-80 % aus kristalliner Hochquarzstruktur. Diese hat eine negative, die Glasphase eine positive thermische Längenausdehnung. Durch geeignete Zusammensetzung der Matrix (Grundglas) mit der Glaskeramik lässt sich ein Werkstoff herstellen, dessen thermische Ausdehnung im Temperaturbereich von 0 °C bis 100 °C nahezu Null ist. Die Abb. 109 zeigt den thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Zerodur im Bereich von 0 bis 900 K. Über die Fa. Schott wurde ein zylinderförmiger ( $\varnothing$  70 mm, Höhe 160 mm) Zerodurkörper bezogen. Dieser diente als Referenzkörper für die Null-Messungen des thermischen Druckes. Der bei der jeweils eingestellten Temperatur oder der entsprechenden Belastungsstufe erhaltene Druckanstieg bei Erwärmung des Referenzkörpers wurde von den entsprechenden Messwerten der Sandsteine abgezogen. Dadurch konnten die durch die Erwärmung der verschiedenen Maschinenkomponenten hervorgerufenen Überlagerungen des Messwertes eliminiert werden.

## 7.2 Durchführung der Versuche

Von den untersuchten Sandsteinvarietäten wurden jeweils 3 Prüfkörper ausgewählt. Um einen eventuell vorhandenen Schichtungseinfluss des Messwertes zu erfassen, waren ein Prüfkörper senkrecht zur Schichtung und zwei parallel dazu gebohrt. Die Prüfkörper entsprachen denen des uniaxialen Quelldruckversuches an zylinderförmigen Proben. Die Vorbelastungsphase der Messungen wurde identisch zu den Quelldruckversuchen gestaltet (s. Abschn. III. 4.3.1). Anschließend wurden die Proben erwärmt und die Einstellung des neuen Gleichgewichtszustandes abgewartet. Die für eine Messung benötigte Zeit waren ca. 4 Tage. Anschließend wurden die Proben für mindestens 2 Wochen bei Laborbedingungen gelagert, bevor ein erneuter Versuch durchgeführt wurde. Werden zu rasch aufeinander folgende Messungen an ein und derselben Probe durchgeführt, so kommt es zu einer Kompaktion des Prüfkörpers, die sich in erhöhten thermischen Druckwerten äußert.

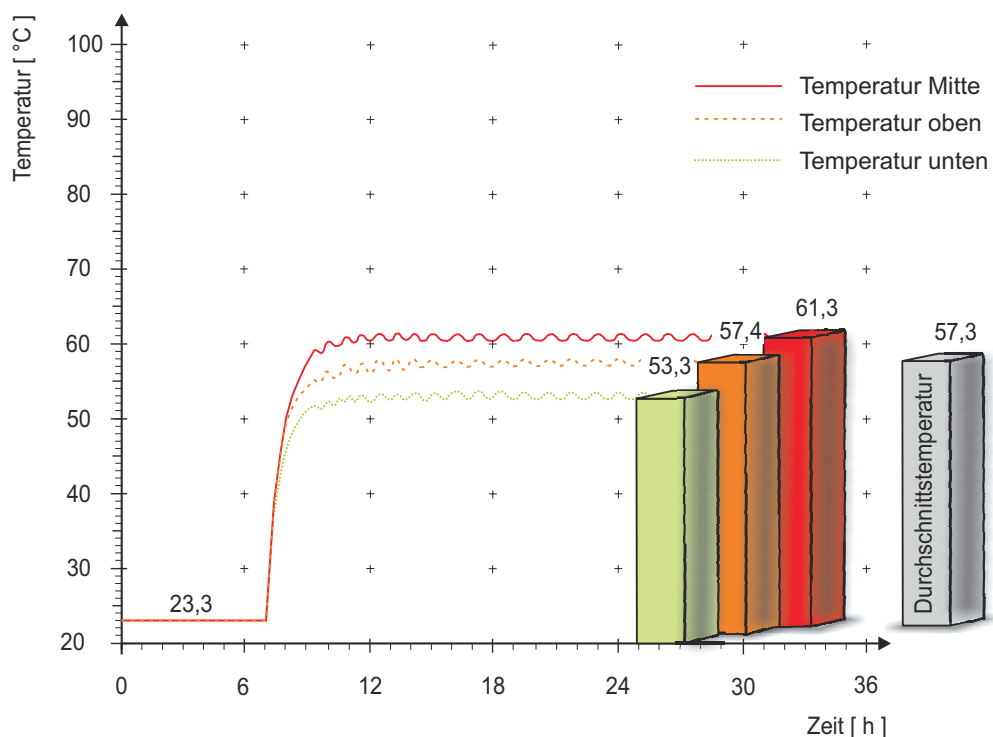


**Abb. 109:**

Thermische Ausdehnung von Zerodur (nach Firmenangaben von Schott Glas).

Diese Ergebnisse lassen sich nicht mehr eindeutig interpretieren, und ein Vergleich mit anderen Messungen ist nicht mehr möglich. Da die Ausgangsbedingungen (Vorlast) nicht mehr eindeutig definiert sind, lassen sich die Ergebnisse auch nicht mehr reproduzieren. Während die Temperaturbedingungen bei den thermischen Längenänderungsuntersuchungen homogen und eindeutig bestimmbar waren (Ausgangstemperatur + 52 °C einheitlich für die gesamte Probe, Endtemperatur + 23 °C auch gleichmäßig für die gesamte Probe), musste bei den thermischen Druckversuchen nach Erwärmung ein Temperaturgradient der Probe festgestellt werden. Obwohl die Druckplatten der Universalprüfmaschine zur Wärmeisolation mit 30 mm dicken Glasfritten abgedeckt wurden, konnte deren geringfügige Erwärmung nicht verhindert werden. Da die vier Heizmanschetten parallel gesteuert waren (jede Manschette führt der Probe die gleiche Energiemenge pro Zeiteinheit zu), genügte der an den Kontakten zu den Druckplatten leicht

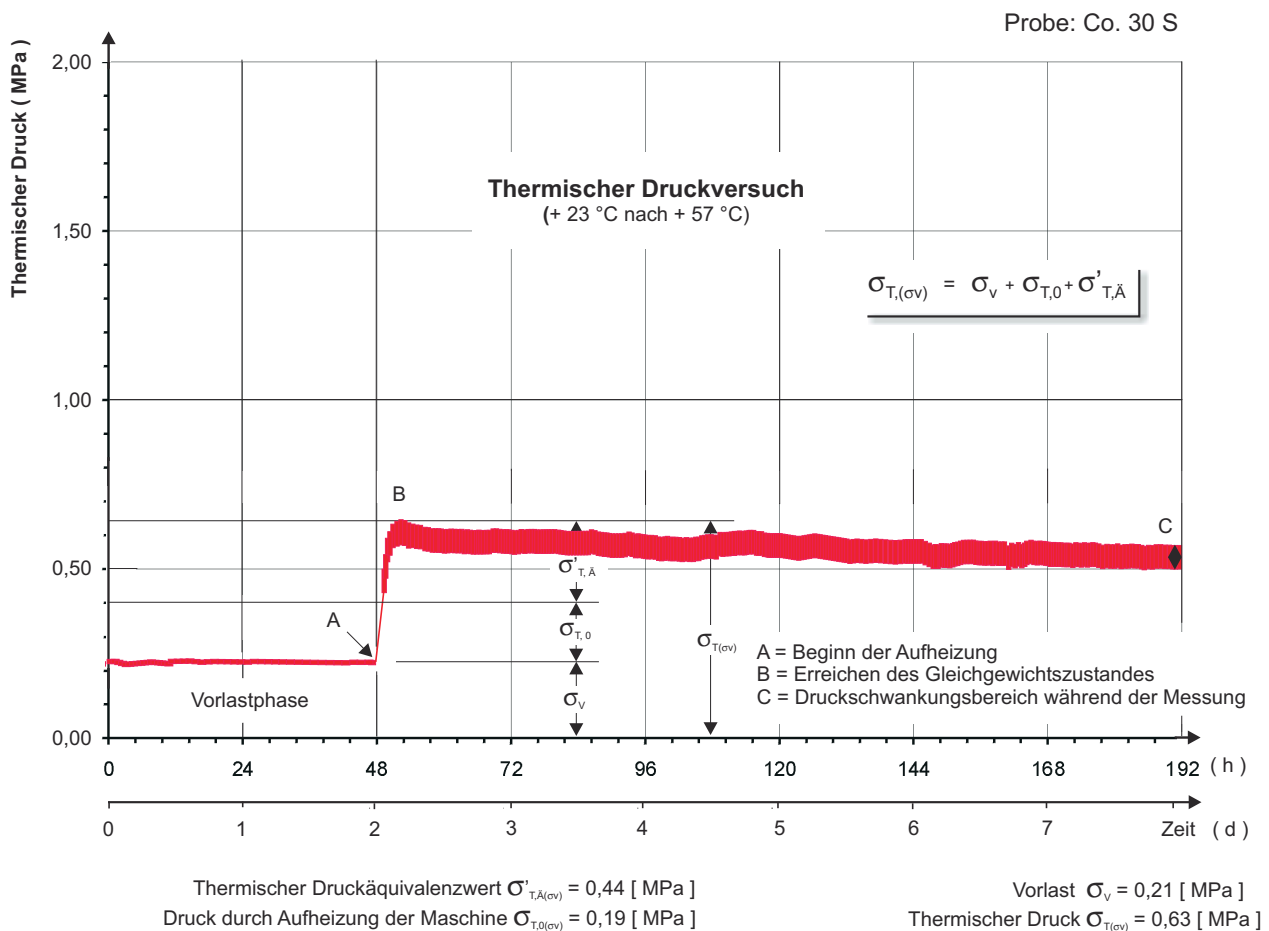
erhöhte Wärmeabfluss zur Ausbildung eines Temperaturgradienten. Zur exakten Bestimmung des Temperaturverlaufes der Probe wurden deshalb drei Pt-100-Temperaturfühler an der Probe fixiert und deren Werte im Minutentakt über einen Datenlogger aufgezeichnet. Die Fühler wurden unten, in der Mitte und im oberen Bereich der Probe angebracht. Die Abb. 110 zeigt den aufgezeichneten Temperaturverlauf dieser drei Fühler. Die Dauer der Vorlastphase ist stark verkürzt wiedergegeben. Die höchsten Temperaturen wurden im mittleren Bereich der Probe gemessen, während die Probe im oberen und unteren Bereich, am Kontakt zu den Druckplatten, deutlich kühler war. Zudem war der obere Bereich der Probe auch wärmer als der untere, was durch den Auftrieb von warmer Luft zu erklären ist. Die drei Temperaturkurven zeichnen zudem auch die Schaltzyklen des Steuergerätes der vier Heizmanschetten deutlich nach (erkennbar am sinusförmigen Verlauf der Temperaturkurven). Aus den drei unterschiedlichen Temperaturen wurde der Mittelwert gebildet und als Durchschnittstemperatur der Probe weiter verwendet. Wegen der Unschärfe der Durchschnittstemperatur sind die auf diese Weise ermittelten thermischen Druckwerte nicht auf die letzte Dezimalstelle genau, können aber sicherlich als ein erster Näherungswert verstanden werden.



**Abb. 110:**

Temperaturverlauf einer Probe während des thermischen Druckversuches.

Die Abb. 111 zeigt exemplarisch eine Messwertkurve des thermischen Druckversuches. Die Dicke der Kurve (rechter Bereich der Graphik, C = Druckschwankung) spiegelt die Schaltzyklen des Steuergerätes wider. Nach dem Einschalten der Steuereinheit wird die Probe über die vier Heizmanschetten so lange erhitzt, bis der eingestellte Begrenzungswert erreicht wird. Anschließend kühlt die Probe langsam bis zum unteren Begrenzungswert ab. Wird dieser erreicht, schaltet das Steuergerät den Stromfluss wieder frei. Die Abschaltwerte lagen jeweils  $1^\circ\text{C}$  über bzw. unterhalb der eingestellten Temperatur. Identisch zu den Quelldruckversuchen wird als thermischer Druck der Gesamtdruck des Systems nach Erwärmung bezeichnet. Damit sind sowohl die Vorlast als auch der Druck, der durch die Erwärmung der Maschinenkomponenten entsteht, mit enthalten. Subtrahiert man vom thermischen Druck die Vorlast und die Anteile, die von der Maschine stammen, entsprechend der in der Graphik angegebenen Formel, so kommt man, analog zum Quelldruckversuch, zu dem thermischen Druckäquivalenzwert ( $\sigma_{T,\ddot{A}}$ ).



**Abb. 111:**

Messwertkurve eines thermischen Druckversuches, am Beispiel der Probe Co 30 S.

### 7.3 Ergebnisse

Die Tab. 28 zeigt die Ergebnisse der Messungen der thermischen Dehnung. Alle Resultate liegen in einem eng begrenzten Wertebereich (210  $\mu\text{m}$  - 330  $\mu\text{m}$ ). Die großen Längenänderungs-Unterschiede, wie sie bei der Messung der hygrischen Dehnung auftreten, sind nicht zu beobachten (bis zu 2.500 %). Eine Richtungsabhängigkeit der Messwerte lässt sich nicht feststellen. Somit ist die thermische Ausdehnung, im Gegensatz zur Quellung, nicht von der Lage der Schichtungsebene abhängig. Der thermische Längenänderungskoeffizient liegt zwischen 7  $\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}^{-1}$  (Ebenheider Sandstein) und 11  $\mu\text{m}/\text{m} \cdot \text{K}^{-1}$  (Obernkirchner Sandstein), wobei die Dehnkoeffizienten der tonmineralreichen, quellfähigen Sandsteine niedriger sind, während die tonmineralfreien oder tonmineralarmen Gesteine einen deutlich höheren Dehnkoeffizienten besitzen.

Führt man die thermische Dehnung eines Gesteins auf die Ausdehnung seiner Einzelminerale zurück und betrachtet die Gesamtdehnung als Summe aller Einzeldehnungen, so kann der höhere Längenänderungskoeffizient des reinen Quarzsandsteins (Obernkirchner) durch den relativ hohen Ausdehnungskoeffizienten von Quarz erklärt werden. Aber auch die Art der Kornbindung und das Bindemittel müssen berücksichtigt werden. Ist das Korngerüst überwiegend durch Phasen- und atomare Kontakte verbunden, wird die Ausdehnung der Einzelminerale direkt an den Kornverband weitergegeben. Erfolgt die Bindung der Komponenten hingegen über tonige Zwischenlagen oder über eine tonige Matrix, so nimmt diese einen Teil der thermischen Dehnung auf. Der Dehnkoeffizient dieser Gesteine ist damit niedriger.

**Tab. 28:**

Thermischer Dehnkoeffizient der untersuchten Sandsteine (Messungen an zylinderförmigen Proben,  $\varnothing$  70 mm, Höhe 160 mm).

Probe:			Thermische	Thermischer	Thermischer
			Längenänderung	Dehnkoeffizient	Dehnkoeffizient
	Mess-		52 °C → 23 °C	$\alpha_T$	$\alpha_T$
	richtung		Probenlänge ~ 160 mm		$\varnothing$
			[ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m} / \text{K}$ ]	[ $\mu\text{m}/\text{m} / \text{K}$ ]
Cottaer 30 S	⊥	ss	268	9	
Cottaer 32 P		ss	321	11	
Cottaer 33 P		ss	273	9	10
Ebenheider 30 S	⊥	ss	331	11	
Ebenheider 32 P		ss	291	10	
Ebenheider 33 P		ss	271	9	10
Maulbronner 30 S	⊥	ss	237	8	
Maulbronner 32 P		ss	216	7	
Maulbronner 33 P		ss	206	7	7
Obernkirchner 30 S	⊥	ss	309	11	
Obernkirchner 31 S		ss	324	11	
Obernkirchner 32 P		ss	281	10	11
Rorschacher 30 S	⊥	ss	286	10	
Rorschacher 32 P		ss	297	10	
Rorschacher 33 P		ss	274	9	10
Sander 30 S, Typ II	⊥	ss	231	8	
Sander 32 P, Typ II		ss	228	8	
Sander 33 P, Typ II		ss	223	8	8



Systematische Untersuchungen der thermischen Längenänderung an Sandsteinen liegen bis dato nicht vor. Die Tab. 29 stellt die derzeit verfügbaren Daten dreier Untersuchungen nebeneinander. Obwohl der thermische Längenänderungskoeffizient aller drei Untersuchungen in drei unterschiedlichen Temperaturintervallen ermittelt wurde und zwei verschiedene Bestimmungsmethoden (direkte und indirekte Messung) zur Anwendung kamen, stellen sich die Messwerte doch sehr einheitlich dar. Der Wertebereich von  $\alpha_T$  ( $7 \leq \alpha_T \leq 13$ ) entspricht auch dem von WESCHE (1977) angegebenen.

Eine eindeutige Einteilung der Sandsteine bezogen auf ihr Bindemittel lässt sich, mit Ausnahme der reinen Quarzsandsteine, anhand dieser Daten nicht vornehmen. Die eigenen Messwerte liegen im Mittel etwa  $1 \mu\text{m}/\text{m} / \text{K}$  niedriger als die Werte von SCHUH, 1987, und WEISS, 1992. Beiden Untersuchungen liegt die Methode der Messung des thermischen Längenänderungskoeffizienten mit der indirekten Bestimmung zu Grunde.

**Tab. 29:**

Thermische Längenänderung von Sandsteinen, nach verschiedenen Autoren.

		mittlerer thermischer Längenausdehnungskoeffizient					
		n. SCHUH, 1987		n. WEISS, 1992		eigene Ergebnisse	
Temperaturbereich		-20 → +60		-30 → +20		+52 → +23	
		[ $\mu\text{m}/\text{m} / \text{K}$ ] ( n )		[ $\mu\text{m}/\text{m} / \text{K}$ ] ( n )		[ $\mu\text{m}/\text{m} / \text{K}$ ] ( n )	
Lechbrucker Sandstein	karbonatisch	8	( 3 )				
Regensburger Grünsandstein	karbonatisch	8	( 5 )				
Rorschacher Sandstein	karb.-tonig					10	( 3 )
Roter Mainsandstein	tonig	10	( 5 )				
Ebenheider Sandstein	tonig					10	( 3 )
Maulbronner Sandstein	tonig					7	( 3 )
Heilbronner Sandstein	tonig			10	( 3 )		
Lossburger Sandstein	tonig			11	( 7 )		
Seedorfer Sandstein	tonig			11	( 3 )		
Grüner Mainsandstein	tonig	10	( 4 )				
Sander Sandstein	tonig					8	( 3 )
Weißer Mainsandstein	tonig	10	( 2 )				
Cottaer Sandstein	tonig					10	( 3 )
Lindlarer Grauwacke	kieselig-tonig			11	( 7 )		
Bucher Sandstein	kieselig	12	( 2 )				
Obernkirchner Sandstein	kieselig					11	( 3 )
Velpker I Sandstein	kieselig			12	( 3 )		
Velpker II Sandstein	kieselig			13	( 3 )		

( n ) = Anzahl der Einzelmessungen



Zwei Messreihen wurden zur Untersuchung des Einflusses der Prüfkörpergeometrie auf das Ergebnis des thermischen Druckes durchgeführt. Die Abb. 112 zeigt deren Resultate. Eine Abhängigkeit des Messwertes vom Probenvolumen oder vom Schlankheitsgrad der Prüfzylinder ( $\lambda = h/d$ ) kann nicht festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen auch deutlich, dass der thermische Druck nicht schichtungsabhängig wirkt. Die senkrecht zur Sedimentationsebene gemessenen Werte sind mit denen parallel dazu identisch. Der thermische Druck verhält sich somit wie ein Druck im physikalischen Sinn (Volumen- und Richtungsunabhängigkeit).

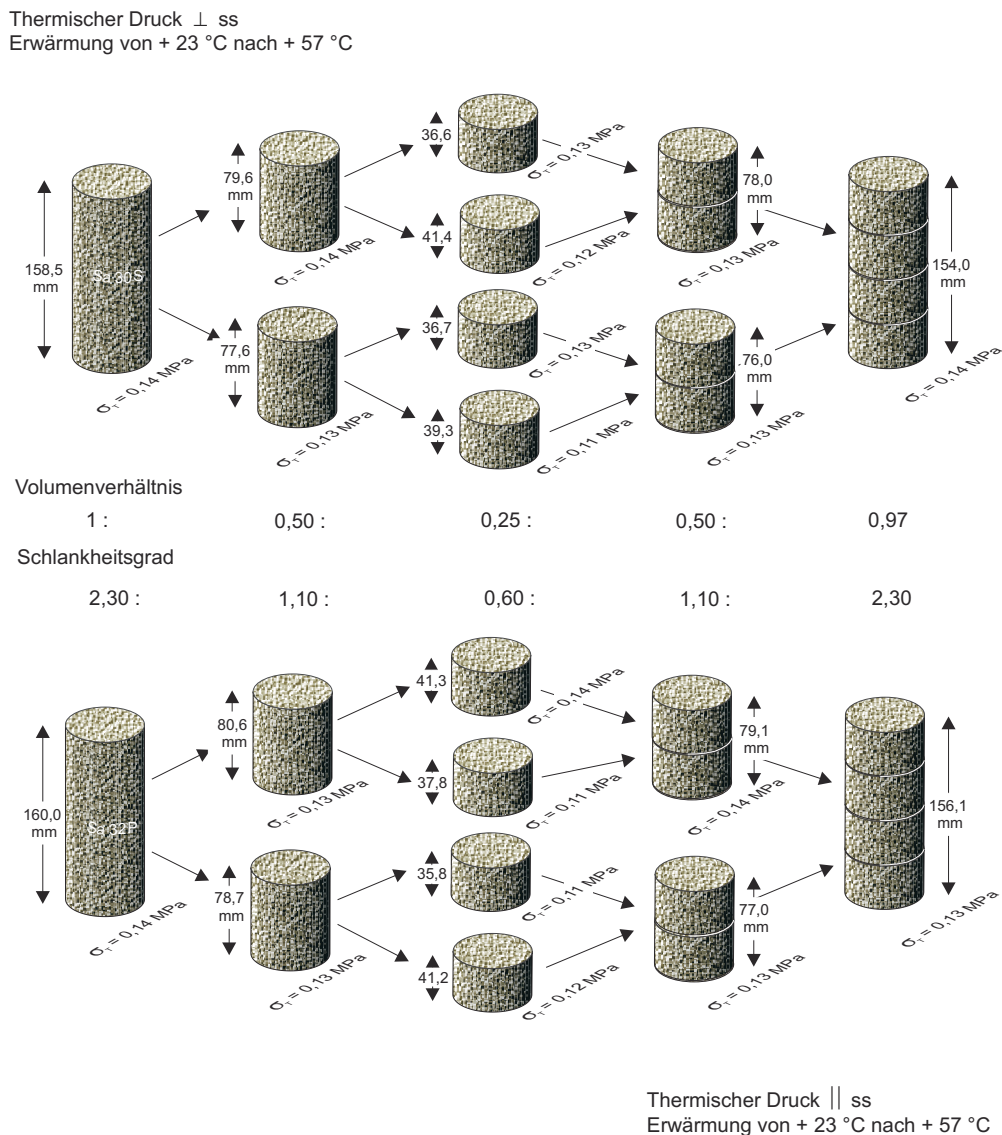
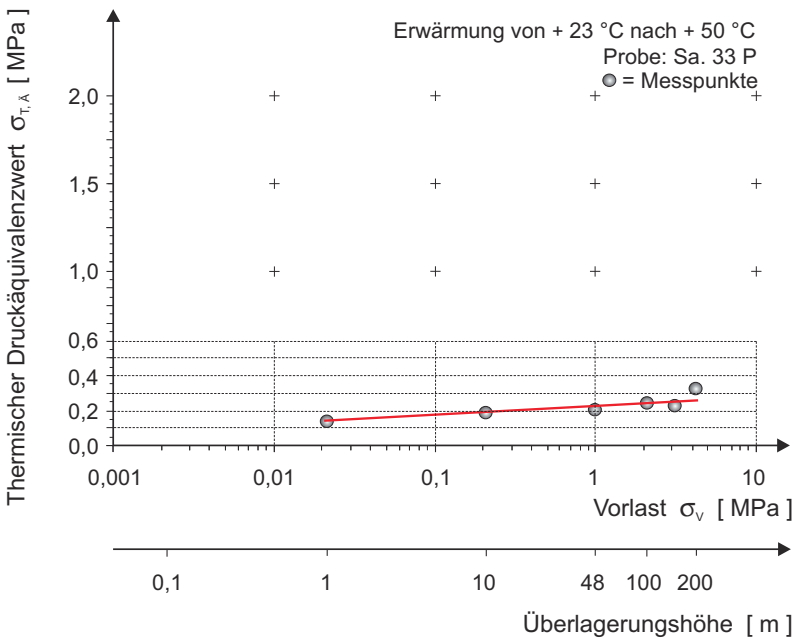


Abb. 112:

Ergebnisse der thermischen Druckmessungen der Proben Sa 30 S (senkrecht zur Schichtung) und Sa 32 P (parallel zur Schichtung). Vorlast für alle Versuche 0,021 MPa, Erwärmung von + 23 °C nach + 57 °C.

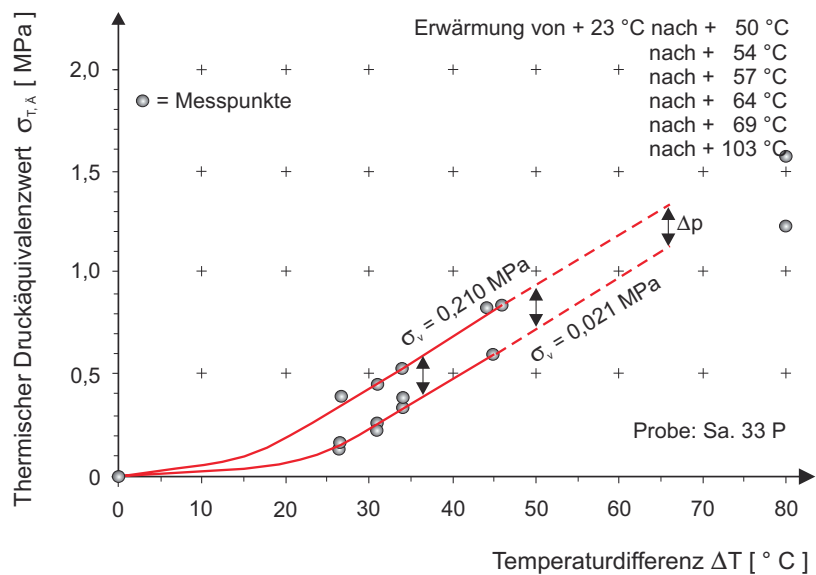


**Abb. 113:**  
Thermischer Druckäquivalenzwert in Abhängigkeit von der Vorlast, am Beispiel der Probe Sa. 33 P (Zylinder, Ø 70 mm, Höhe 160 mm).

In Analogie zu den Quelldruckversuchen wurde der thermische Druck einer Probe exemplarisch in Abhängigkeit von der jeweiligen Vorlast des Versuches bestimmt. Die Vorlaststufen entsprachen denen der Quelldruckversuche. Nach Erreichen des Gleichgewichtszustandes der Probe wurde diese von Raumtemperatur (+ 23 ° C) auf + 50 ° C erhitzt ( $\Delta T = 27 \text{ K}$ ). Der gemessene thermische Druck ( $\sigma_T$ ) wurde sowohl um die Anteile, die von der Erwärmung der Maschinenkomponenten stammen ( $\sigma_{T,0}$ ), als auch um die jeweilige Vorlast ( $\sigma_v$ ) reduziert. Die Abb. 113 zeigt die Ergebnisse dieser Messreihe. Obwohl die Vorlast der Versuche um das 200-fache gesteigert wurde, erhöht sich der thermische Druckäquivalenzwert nur um ca. 100 %. Erklärbar wird dieser Anstieg durch den erhöhten Auflastdruck, der das Material zusätzlich komprimiert. Dadurch werden die

einzelnen Komponenten des Gesteins stärker zusammengedrückt und die gegenseitigen Abstände verkürzt. Der energetische Gleichgewichtszustand des Gesteins wird verändert, und bei Energiezufuhr versucht das Material, seinen ursprünglichen Zustand wieder herzustellen. Dies äußert sich in erhöhtem thermischen Druck.

Neben dem Einfluss der Vorlast auf das Ergebnis des thermischen Druckäquivalenzwertes wurde dessen Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz bestimmt. Diese Versuche wurden unter zwei verschiedenen Vorlaststufen ( $\sigma_v = 0,021 \text{ MPa}$  und  $\sigma_v = 0,210 \text{ MPa}$ ) durchgeführt. Die Abb. 114 zeigt die Ergebnisse dieser Messreihen. Der Versatz der Messwertkurven spiegelt den Anstieg des thermischen Druckäquivalenzwertes bei erhöhter Vorlast wider. Die Druckdifferenz ( $\Delta p$ ) der Messwertkurven entspricht dabei in etwa der Vorlastdifferenz der Messreihen.



**Abb. 114:**  
Thermischer Druckäquivalenzwert in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz, am Beispiel der Probe Sa. 33 P (Zylinder, Ø 70 mm, Höhe 160 mm).

$$\Delta p = \sigma_{v,1} - \sigma_{v,2}$$


Zur Abschätzung der Auswirkungen des thermischen Drucks auf den Zusammenhalt des Kornverbandes der untersuchten Sandsteine wurde der Quelldruck herangezogen. Die Tab. 30 stellt beide Messwerte gegenüber. Zusätzlich zeigt sie die thermische Längenänderung und das hygrische Quellmaß. Alle korrespondierenden Wertepaare wurden unter identischen Versuchsbedingungen ermittelt (gleiche Vorlast bei Versuchsbeginn und identische Ausgangsfeuchte sowie Ausgangstemperatur der Probe).

Obwohl die thermische Längenänderung bei allen untersuchten Sandsteinen (mit Ausnahme des nicht quellfähigen Referenzgesteins [Obernkirchner Sandstein]) entweder annähernd gleich (Cottaer) oder geringer als das hygrische Quellmaß war (Ebenheider, Maulbronner, Rorschacher und Sander), ist der aus der Erwärmung resultierende thermische Druck in nahezu allen Fällen (Ausnahme der sehr stark quellende Sander Schilfsandstein) höher als der Quelldruck. Bei stärkerer Erwärmung der Proben ( $\Delta t = 40 - 80 \text{ K}$ ) oder höherer Auflast vor Beginn des Versuches liegt das Ergebniss des thermischen Druckes sogar deutlich über dem des Quelldruckes.

Die Auswirkungen der tages- ( $\Delta t_{\text{max.}} = 40 \text{ K}$ ) und jahreszeitlich ( $\Delta t_{\text{max.}} = 80 \text{ K}$ ) bedingten Temperaturschwankungen in den gemäßigten Klimazonen müssen demzufolge als Verwitterungsfaktor als mindestens ebenso bedeutsam, wenn nicht sogar bedeutsamer, als die Wirkungen der Feuchteschwankungen eingestuft werden.

**Tab. 30:**

Gegenüberstellung des thermischen Druckes und des Quelldruckes, (Messungen an zylinderförmigen Proben,  $\varnothing 70 \text{ mm}$ , Höhe  $160 \text{ mm}$ ).



Probe:			Thermische	Thermischer	Hygrische	Quell-
			Längenänderung	Druck	Längenänderung	Druck
	Mess-		52 °C → 23 °C	23 °C → 52 °C	$\sigma_v = 0,001 \text{ MPa}$	$\sigma_v = 0,210 \text{ MPa}$
	richtung		$\sigma_v = 0,001 \text{ MPa}$	$\sigma_v = 0,210 \text{ MPa}$	$\sigma_v = 0,001 \text{ MPa}$	$\sigma_v = 0,210 \text{ MPa}$
			[ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]	[ MPa ]	[ $\mu\text{m} / \text{m}$ ]	[ MPa ]
Cottaer 30 S	⊥	ss	268	0,44	228	0,25
Cottaer 32 P		ss	290	0,53	204	0,23
Cottaer 33 P		ss	273	0,44	136	0,24
Ebenheider 30 S	⊥	ss	290	0,31	528	0,30
Ebenheider 32 P		ss	291	0,43	189	0,26
Ebenheider 33 P		ss	271	0,43	205	0,25
Maulbronner 30 S	⊥	ss	237	0,35	663	0,46
Maulbronner 32 P		ss	216	0,37	253	0,32
Maulbronner 33 P		ss	206	0,40	304	0,31
Obernkirchner 30 S	⊥	ss	309	0,48	250	0,27
Obernkirchner 31 S		ss	324	0,52	165	0,25
Obernkirchner 32 P		ss	290	0,56	130	0,23
Rorschacher 30 S	⊥	ss	286	0,41	754	0,42
Rorschacher 32 P		ss	297	0,30	448	0,30
Rorschacher 33 P		ss	274	-	624	0,50
Sander 30 S, Typ II	⊥	ss	231	0,38	1.608	0,87
Sander 32 P, Typ II		ss	228	0,40	944	-
Sander 33 P, Typ II		ss	223	0,40	1.014	0,50



## IV Schlussfolgerungen und Ausblick

Zur Abschätzung des Quellpotentials eines Gesteines können dessen innere Oberfläche, dessen Sorptionsisotherme oder dessen Quellmaß herangezogen werden.

Bei der Messung der hygrischen Längenänderung der ausgewählten Sandsteine konnten im Extremfall Quellbeträge von bis zu  $5.000 \mu\text{m/m}$  ( $= 0,5 \%$  der Ausgangslänge) bestimmt werden (Sander Sandstein, Typ III). Bei Dehnungsbehinderung entwickelt dieser Sandstein einen Quelldruck von bis zu  $1,0 \text{ MPa}$  (senkrecht zur Schichtung). Die anderen Sandsteine lagen mit ihren Quelldruckwerten deutlich unterhalb dieses Bereiches. Es ist aber auch innerhalb dieser Sandsteine mit Varietäten zu rechnen, die ähnlich hohe Quelldrucke wie der Sander Sandstein, Typ III besitzen.

Da Quelldruckmessungen, ebenso wie Druckmessungen, erst ab einer bestimmten Probengröße geometrieunabhängige Ergebnisse liefern, ist für jede Messung neben der Angabe der Messrichtung (senkrecht oder parallel zur Schichtung) auch die Angabe der Probengröße und der Probenform zwingend notwendig. Bei der Verwendung von kleineren Probekörpern (Würfel  $\leq 250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ ) oder von Prismen/Zylindern mit einem niedrigen Schlankheitsfaktor ( $\lambda = h/d \leq 2,5$ ) sind die erzielten Ergebnisse entsprechend zu korrigieren. Die aus der Bodenkunde bekannte "Oedometerprobe" ( $\varnothing 70 \text{ mm}$ , Höhe  $20 \text{ mm}$ , Schlankheitsgrad  $\sim 0,3$ ) ist zur Messung des Quelldruckes von Festgesteinen nicht geeignet.

Die sich aus den uniaxialen Quelldruckversuchen ergebende Richtungsabhängigkeit des Messwertes in Bezug zur Schichtungsebene relativiert sich bei den Triaxialquelldruckmessungen. In erster Näherung kann mit dem Mittelwert aus den Messungen senkrecht und parallel zur Sedimentationsebene gerechnet werden. Der Quelldruckäquivalenzwert stellt einen von der Vorlast unabhängigen Materialkennwert dar, mit dessen Hilfe die Gesamtspannung in einem Gestein bei Befeuchtung und gegebener Vorlast berechnet werden kann.

Zur Beurteilung der Auswirkung des Quelldruckes auf den Zusammenhalt des Korngefüges der untersuchten Sandsteine wurden deren Festigkeitskennwerte näher betrachtet. Während bislang für derartige Abschätzungen immer die Kurzzeit-Festigkeitskennwerte verwendet wurden, brachte der Vergleich des Quelldruckes mit den Langzeit-Festigkeitskennwerten erstaunliche Ergebnisse. Demzufolge muss der für statische Berechnungen bisher verwendete Sicherheitsbeiwert von  $\gamma = 2 - 3$  für Gesteine künftig drastisch erhöht werden auf  $\gamma = 10 - 15$ .

Gesteine sind gegenüber Belastungen wesentlich weniger widerstandsfähig als bisher angenommen. Systematische Untersuchungen zu den Festigkeitskennwerten von Sandsteinen, insbesondere in Bezug zur Schichtungsebene, liegen bis dato nicht vor. Die auf freiwilliger Basis von Seiten der Naturwerksteinproduzenten vorgelegten Gesteinskenndatenblätter mit den jeweiligen physikalischen Kennwerten reichen sowohl qualitativ als auch quantitativ zur Kennzeichnung der Festigkeit nicht aus und erschweren häufig aufgrund unterschiedlicher Prüfmethodik die Vergleichbarkeit der Daten.

Der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit während der Versuchsdurchführung auf das Ergebnis der Druck- und Zugfestigkeit wurde bereits von PESCHEL, 1974, erkannt, bis dato aber nicht abschließend bearbeitet. Die Anbindung der Biegezugfestigkeit an die Druck- bzw. Zugfestigkeit ist noch nicht realisiert und das Problem der "Elastizität" (E-Modul) von Gesteinen noch nicht zufriedenstellend gelöst. Da das Verständnis der Festigkeit der Gesteine die Grundlage zur Bewertung der verschiedenen Verwitterungsfaktoren bildet, sind weiterführende Untersuchungen auf diesem Gebiet notwendig.

Die Auswirkungen der tages- und jahreszeitlich bedingten Temperaturänderungen auf die Widerstandsfähigkeit der Gesteine wurden bisher nur untergeordnet beachtet, obwohl die Verwitterungserscheinung der Desquamation und Abschuppung sehr stark an die der Feuchtwirkung zugeschriebenen Schalenbildung und an das Absanden der Sandsteine erinnert. Systematische Untersuchungen zur Temperaturverwitterung liegen nicht vor.

Erste thermische Druckversuche zeigen, dass der Einfluss der Temperatur auf die Verwitterung von Gesteinen auch in unseren Breiten erheblich ist und der Feuchtwirkung in seiner Zerstörungskraft gleichkommt.



## V Literaturverzeichnis

- ALFES, C. (1993): Bruchmechanisches Werkstoffverhalten von Sandstein unter Zugbeanspruchung. – Aachener Beiträge zur Bauforschung; **1**: 250 S.; Aachen (Augustinus Buchhandlung).
- BEDDOE, R. E. & LIPPOK, R. (1995): Quellspannung des Zementsteins. – Jahresmitteilungen d. TU München, Baustoffinstitut; **2**: S. 18; München.
- BRUNAUER, S., EMMETT, P.H. & TELLER, E. (1938): Adsorption of gases in multimolecular layers. – J. Am. Chem. Soc.; **60**; S. 309 – 319; Easton.
- CORRENS, C. W. (1968): Einführung in die Mineralogie. – 2. Aufl.; 458 S.; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- DERJAGUIN, B., LANDAU, L.D. (1941): Acta physicochim. - URSS 14,; 635 S.; J. Exp. Theor. Phys. URSS 11,; 802 S.
- FECKER, E. (1980): Quantitative Zusammenhänge zwischen der mineralogischen Umwandlung von Anhydrit in Gips und der Volumenvergrößerung im Tunnelbau. – Forschungsbericht 15.062 R77E des BMV.
- FEICHT, E. & GRAF, U. (1972): Das große Buch der Physik. – 755 S.; München (Lexikographisches Institut).
- GARRECHT, H. (1992): Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk. – Diss. Univ. Karlsruhe.
- GRIMM, W.-D. (1984): Zur Verwitterung von Naturwerksteinen insbesondere bayerischer Provenienz. – Geol. Bav.; **86**; S. 507 – 550; München.
- (wiss. Leitung) (1990): Bildatlas wichtiger Denkmalgesteine der Bundesrepublik Deutschland. – Arbeitsheft **50** des Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege; 255 S. + 200 Gesteinstaf. Mit 200 Erläut.-S.; München (Lipp).
- GRIMM, W.-D. & SCHWARZ, U. (1985): Naturwerksteine und ihre Verwitterung an Münchner Bauten und Denkmälern. – Arbeitsheft **31** des Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege; S. 28-118; München (Lipp).
- GROB, H. (1972): Schwelldruck im Belchentunnel. – Proc. Int. Symp. f. Untertagebau; S. 99-119; Luzern.
- GRÜNDER, J. (1978): Struktureller Aufbau und geomechanische Eigenschaften eines stark überkonsolidierten Tones - am Beispiel eines Feuerletzens. – Veröffentl. d. Grundbauinst. d. LGA Bayern; H. **31**: 100 S.; Nürnberg (Eigenverlag LGA).
- HEIM, D. (1990): Tone und Tonminerale: Grundlagen der Sedimentologie und Mineralogie. – 157 S.; Stuttgart (Enke).
- HENKE, K. F., KAISER, W., NAGEL, D. (1975): Geomechanische Untersuchungen im Gipskeuper. - Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft **184**, S.149-169.
- HIRSCHWALD, J. (1908): Die Prüfung der natürlichen Bausteine auf ihre Wetterbeständigkeit. – 675 S.; Berlin (Wilhelm Ernst & Sohn).
- (1912): Handbuch der bautechnischen Gesteinsprüfung. – 923 S.; Berlin (Borntraeger).
- HUDER, J. & AMBERG, G. (1970): Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit. – Schweizerische Bauzeitung, Jg. 83; **43**: S. 975-980; Zürich.

- 
- ISSLER, L., ROUSS, H., HÄFELE, P. (1997): Festigkeitslehre – Grundlagen. – 2. Aufl.; 621 S.; Berlin, Heidelberg, New York (Springer).
- KAHR et al. (1986): Wasseraufnahme und Wasserbewegung in hochverdichtetem Bentonit. – NAGRA Technischer Bericht: S. 14-86.
- KIEHL, J. R. (1990): Ein dreidimensionales Quellgesetz und seine Anwendung auf den Felshohlraumbau. – Nat. Felsmechanik Symposium Aachen; Proc. **9**: S. 185-207; Aachen.
- KLOPFER, H. (1985): Feuchte. – In: LUTZ ET AL.: Lehrbuch der Bauphysik, S. 265-434; Stuttgart (Teubner).
- KRUS, M. (1995): Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. – Diss. Univ. Stuttgart; 106 S. + Anl.; Stuttgart.
- LUKAS, R. (1990): Die Naturwerksteine Baden-Württembergs und ihre Wetterbeständigkeit sowie Verwitterungsprofile ausgewählter Carbonatgesteine. – Diss. Univ. München; 220 S. + 33 Gesteinstaf. mit 33 Erläut.-S.; München.
- MADSON, F. T. (1976): Quelldruckmessungen an Tongesteinen und Berechnung des Quelldrucks nach der DLVO-Theorie. – Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich; **108**: 65 S.; Zürich.
- MADSON, F. T. & MÜLLER-VONMOOS, M. (1988): Das Quellverhalten der Tone. – Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich; **133**: S. 39-50; Zürich.
- MADSON, F. T. & NÜESCH, R. (1990): Langzeitquellverhalten von Tongesteinen und tonigen Sulfatgesteinen. – Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, ETH Zürich; **140**: 51 S.; Zürich.
- MÖLLER, U. (1993): Thermo-hygrische Formänderungen und Eigenspannungen von natürlichen und künstlichen Mauersteinen. – Diss. Univ. Stuttgart; 85 S. + Anl.; Stuttgart.
- MÜLLER, F. (o.J.): Internationale Natursteinkartei (INSK). – **1-10**; Ulm (Ebner).
- NÄGELE, E. (1984): Elektrische Transporterscheinungen in porösen Baustoffen. – Bautenschutz & Bausanierung; **7**: S. 74-82; Köln.
- NEUMÜLLER, O.-A. (1988): Römpps Chemie-Lexikon. – 8. Aufl., 4.835 S.; Stuttgart (Frankh'sche).
- OFER, Z. (1981): Laboratory instrument for measuring lateral soil pressure and swelling pressure. – Geotechnical Testing Journal; GTJODJ, Vol. **4**: S. 177-182.
- PESCHEL, A. et al. (1973): Die basischen Intrusivgesteine der Lausitz und ihre industrielle Nutzung. – Freiburger Forschungshefte, C283, Leipzig.
- (1974): Zur Ermittlung und Bewertung von Festigkeitseigenschaften bei Natursteinen. – Z. Angew. Geologie; **20**: S. 118 – 128; Berlin
- (1977): Natursteine. – 1. Aufl., 390 S.; Leipzig (VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie).
- PIMENTEL, E. (1996): Quellverhalten von diagenetisch verfestigtem Tonstein. – Heft **139**: 184 S.; Karlsruhe (Universität Karlsruhe).



- 
- POHL, R. W. (1969): Einführung in die Physik: Band I, Mechanik, Akustik und Wärmelehre. – 17. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York, (Springer).
- POSCHLOD, K. (1990): Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluß auf die Verwitterung. –Münchner Geowiss. Abh. (B), **7**: 62 S.; München (Pfeil).
- POSNJAK, E. (1912): Ueber den Quelldruck. – Kolloidchemische Beihefte **12**: S. 417-456; Dresden u. Leipzig (Theodor von Steinkopf).
- PREGEL et al. (1980): Dreiaxiale Schwellversuche an Tongesteinen. – Geotechnik; **1**: S. 1-7.
- QUERVAIN, F. De (1967): Technische Gesteinskunde. – 261 S.; Basel (Birkhäuser).
- REHBINDER, P. A. & SCHUKIN, E. D. (1973): Surface phenomena in solids during deformation and fracture process. – Progress in surface science, Vol **3**: S. 97 – 188; Oxford (Pergamon).
- REINKE, J. (1879): Hanstein's botanische Abhandlungen **4**.
- REINSCH, D. (1991): Natursteinkunde: Eine Einführung für Bauingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Steinmetze. – 315 S.; Stuttgart (Enke).
- SATTLER, L. (1992): Untersuchungen zu Wirkung und Dauerhaftigkeit von Sandsteinfestigungen mit Kieselsäureester. – Diss. Univ. München; 156 S. + Anhang; München.
- SCHEFFER, F., SCHACHTSCHABEL, L. P. ET AL. (1984): Lehrbuch der Bodenkunde. – 11. Aufl., 442 S.; Stuttgart (Enke).
- SCHUH, H. (1987): Physikalische Eigenschaften von Sandsteinen und ihren verwitterten Oberflächen. – Münchner Geowiss. Abh. (B), **6**: 66 S.; München (Pfeil).
- SNETHLAGE, R. (1984a): Steinkonservierung. – Arbeitsheft Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege; **22**: 143 S.; München (Lipp).
- (1984b): Konservierungsmöglichkeiten von Natursteinen. – Geol. Bav.; **86**: S. 551-563; München.
- (Hrsg.) (1991): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 1989. – Bd. **1**: 360 S.; Berlin (Ernst & Sohn).
- (Hrsg.) (1992): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 1990. – Bd. **2**: 441 S.; Berlin (Ernst & Sohn).
- (Hrsg.) (1993): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 1991. – Bd. **3**: 275 S.; Berlin (Ernst & Sohn).
- (Hrsg.) (1995): Natursteinkonservierung in der Denkmalpflege. – Arbeitsheft Bayer. Landesamt f. Denkmalpflege; **80**: 364 S.; Berlin (Ernst u. Sohn).
- (Hrsg.) (1995): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 1993. – Bd. **5**: 388 S.; Berlin (Ernst & Sohn).
- (Hrsg.) (1998): Jahresberichte Steinzerfall – Steinkonservierung 1994 – 1996. – Bd. **6**: 398 S.; Stuttgart (Fraunhofer IRB Verlag).

- 
- SNETHLAGE, R. & WENDLER, E. (1997): Moisture Cycles and Sandstone Degradation. –  
In: BAER, N. & SNETHLAGE, R. (eds) Saving our architectural heritage, the conservation of  
historic stone structures, Dahlem Workshop Reports ES20. pp 7-24;  
Chichester, New York, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto (John Wiley & Sons).
- SNETHLAGE, R., WENDLER, E., KLEMM D.D. (1996): Tenside im Gesteinsschutz - Bisherige Resultate  
mit einem neuen Konzept zur Erhaltung von Denkmälern aus Naturstein. – In: Denkmalpflege und  
Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung I: pp. 127-146; Berlin (Ernst und Sohn).
- SOOS, P. V. (1990): Grundbau Taschenbuch: Eigenschaften von Boden und Fels; ihre Ermittlung im Labor. –  
4. Aufl., Teil 1: 713 S.; Berlin (Ernst & Sohn).
- SORACE, S. (1996): Long-term tensile and bending strength of natural building stones. –  
Materials and Structures/Matériaux et Constructions, Vol. 29: S. 426-435.
- SPLITTGERBER, H. (1976): Spaltdruck zwischen Festkörpern und Auswirkungen auf Probleme in der  
Technik. – Cement and Concrete Research, Vol. 6: S. 29-34.
- STOCKHAUSEN, N. (1981): Die Dilatation hochporöser Festkörper bei Wasseraufnahme  
und Eisbildung. – Diss. TU München; 163 S.; München.
- VERWEY, E. J. W. & OVERBEEK, J. Th. G. (1948): Theory of the stability of lyophobic colloids. –  
S. 22-76, Amsterdam (Elsevier).
- WEISS, G. (1992): Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkungen auf  
das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter. –  
München Geowiss. Abh. (B), 9: 118 S.; München (Pfeil).
- WENDLER, E., CHAROLA, E.A. & FITZNER, B. (1996): Easter Island tuff:  
Laboratory studies for its consolidation. –  
In Proceedings of the 8<sup>th</sup> International Congress on Deterioration and Conservation of Stone;  
(ed. J. Riederer); 2: pp 1159-1170; Berlin.
- WESCHE, K. (1977): Baustoffe für tragende Bauteile. –  
2. Aufl., Bd. 1: 135 S.; Wiesbaden und Berlin (Bauverlag).
- (1981): Baustoffe für tragende Bauteile. –  
2. Aufl., Bd. 2: 408 S.; Wiesbaden und Berlin (Bauverlag).
- WINKLER, E. M. (1975): Stone: Properties, Durability in Man's Environment. –  
2. Aufl., Applied Mineralogy, Vol. 4: 230 S.; Wien-New York (Springer).
- WITTKE, W. & RIBLER, P. (1976): Bemessung der Auskleidung von Hohlräumen in quellendem Gebirge  
nach der Finite Element Methode. – Veröff. d. Inst. f. Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik  
und Verkehrswasserbau d. RWTH Aachen; 2: Aachen.
- WITTMANN, F. H. (1979a): Physik poröser Natursteine. –  
In Bautenschutz & Bausanierung, 1-79; S. 4-7; Filderstadt (edition lack +chemie).
- (1979b): Feuchtigkeitstransport in porösen Baustoffen. –  
In Bautenschutz & Bausanierung, 4-79; S. 115-124; Filderstadt (edition lack+chemie).
- WITTMANN, F. H. & PRIM, P. (1983): Mesures de l'effet consolidant d'un produit de traitement. –  
Materiaux et Constructions; 1; S. 235 – 242; Paris.
- YARIV, H. & CROSS (1979): Geochemistry of colloid systems.

---

ZEHNDER, K. (1982): Verwitterung von Molassesandsteinen an Bauwerken und in Naturaufschlüssen. – Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geotechnische Serie; **61**: 130 S.; Bern (Kümmerly & Frey).

### **Folgende Normvorschriften bzw. Richtlinien fanden Verwendung**

- DGEG** (1986): Empfehlung Nr. 11 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels - der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Quellversuche an Gesteinsproben. – Bautechnik **3**; S. 100 - 104.
- DGEG** (1987): Empfehlung Nr. 12 des Arbeitskreises 19 - Versuchstechnik Fels - der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Mehrstufentechnik bei dreiaxialen Druckversuchen und direkten Scherversuchen. – Bautechnik **11**; S. 382-385.
- DIN 52 102** (1988): Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen. Bestimmung von Dichte, Trockenrohddichte, Dichtigkeitsgrad und Gesamtporosität. – 10 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 52 103** (1988): Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen. Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert. – 4 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 52 105** (1988): Prüfung von Naturstein. Druckversuch. – 2 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 52 112** (1988): Prüfung von Naturstein. Biegeversuch. – 3 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 52 450** (1985): Prüfung anorganischer nichtmetallischer Baustoffe. Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern. – 8 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 52 615** (1987): Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Bau- und Dämmstoffen. – 5 S.; Berlin (Beuth).
- DIN 52 617** (1984): Bestimmung des Wasseraufnahmekoeffizienten. – 4 S., Berlin (Beuth).
- ISRM** (1989): Suggested methods for laboratory testing of argillaceous swelling rocks. – Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.; Vol. **26**; pp. 415-426.



## Anhang

### Tabellenverzeichnis:

Tab. 1:	Gesamtporosität einiger Natursteine (nach WITTMANN, 1979) . . . . .	19
Tab. 2:	Kationen-Austauschkapazität der häufigsten Tonminerale . . . . .	25
Tab. 3:	Längenausdehnungskoeffizient $\alpha$ und Volumenausdehnungskoeffizient $\beta$ einiger Stoffe . . . . .	30
Tab. 4:	Linearer, thermischer Ausdehnungskoeffizient $\alpha$ für verschiedene Gesteine (nach MÖLLER, 1993) . . . . .	31
Tab. 5:	Linearer Ausdehnungskoeffizient $\alpha$ und Zuwachskoeffizient $\lambda$ einiger Kristalle (nach CORRENS, 1968) . . . . .	31
Tab. 6:	Erweichungskoeffizient von Sandsteinen (nach HIRSCHWALD, 1908) . . . . .	49
Tab. 7:	Die untersuchten Sandsteine mit deren vorherrschender Bindungsart . . . . .	59
Tab. 8:	Technische Kennwerte der untersuchten Sandsteine . . . . .	62
Tab. 9:	Festigkeitskennwerte der untersuchten Sandsteine . . . . .	63
Tab. 10:	Wasseraufnahme der wichtigsten Gesteinsgruppen und die der näher untersuchten Sandsteine (nach verschiedenen Autoren) . . . . .	65
Tab. 11:	Hygrische Längenänderung in Abhängigkeit von der Probenorientierung (Messwerte) . . . . .	70
Tab. 12:	Hygrische Längenänderung in Abhängigkeit von der Probenorientierung (korrigierte Messwerte) . . . . .	71
Tab. 13:	Quelldruck in Abhängigkeit von der Ausgangsfeuchte der Probe . . . . .	75
Tab. 14:	Quelldruck-Messergebnisse der untersuchten Sandsteine (Messungen an Oedometerproben) . . . . .	83
Tab. 15:	Vergleich der Quelldruck-Messergebnisse mit und ohne radialer Behinderung der Probe . . . . .	84
Tab. 16:	Quelldruckwerte der untersuchten Sandsteine (Messungen an würfelförmigen Proben) . . . . .	87
Tab. 17:	Quelldruckwerte der untersuchten Sandsteine (Messwerte an zylinderförmigen Proben) . . . . .	88
Tab. 18:	Verhältnis des Quelldruckäquivalenzwertes würfelförmiger zu zylinderförmiger Proben . . . . .	88
Tab. 19:	Triaxialquelldruck-Messergebnisse der ausgewählten Gesteine . . . . .	92
Tab. 20:	Vergleich der Quelldruck-Messergebnisse des Oedometerversuches mit denen aus dem Versuch mit der Universalprüfmaschine . . . . .	93
Tab. 21:	Quelldruck-Messwerte des Ringversuches . . . . .	94
Tab. 22:	Quelldruckäquivalenzwert in Abhängigkeit von der Vorlast . . . . .	95
Tab. 23:	Wasseraufnahme der unbehandelten und der behandelten Gesteine . . . . .	98
Tab. 24:	Änderung der hygrischen Dehnungen, durch Tensid Behandlung . . . . .	99
Tab. 25:	Änderung des Quelldruckes durch Tensid Behandlung . . . . .	100
Tab. 26:	Berechnung des Quelldruckes aus der Festigkeitsdifferenz zwischen trockenem und wassergesättigtem Zustand . . . . .	101
Tab. 27:	Vergleich von Kurzzeitfestigkeit, Langzeitfestigkeit und Quelldruck . . . . .	105
Tab. 28:	Thermischer Dehnkoeffizient der untersuchten Sandsteine . . . . .	111
Tab. 29:	Thermische Längenänderung von Sandsteinen . . . . .	112
Tab. 30:	Gegenüberstellung des thermischen Druckes und des Quelldruckes . . . . .	115

**Abbildungsverzeichnis:**

Abb. 1:	Die am häufigsten benutzten logarithmischen Korngrößenskalen für klastische Sedimente mit der deutschen Nomenklatur (nach HEIM, 1990)	14
Abb. 2:	Oberfläche (A) pro Volumen (V) eines Partikels in Abhängigkeit vom Partikeldurchmesser (d) (nach PIMENTEL, 1996)	15
Abb. 3:	Korngröße (d) und spezifische Oberfläche ( $A_s$ ) verschiedener Mineralien (nach VON SOOS, 1980)	16
Abb. 4:	Grundbausteine der Silikate	16
Abb. 5:	Modell eines Montmorillonit-Kristalls	18
Abb. 6:	Definition von Porenanteil und Porenzahl (nach VON SOOS, 1990)	19
Abb. 7:	Partikelgrößen, Porenbezeichnungen und Poreneinteilung am Beispiel des Betons (nach WITTMANN, 1979)	20
Abb. 8:	Gerät zur Bestimmung des Schwindens und Quellens an kleinen Probekörpern (nach DIN 52 450, 1985)	21
Abb. 9:	Zeitliche Entwicklung der hygrischen Längenänderung am Beispiel des Sander Schilfsandsteins	22
Abb. 10:	Quellbeträge von verschiedenen Gesteinen (nach verschiedenen Autoren)	22
Abb. 11:	Hygrische Dehnung von Zementstein in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte („Münchener Modell“ für Zementstein nach WITTMANN, 1977)	23
Abb. 12:	Dipolmoment des Wassermoleküls und Anordnung von Wassermolekülen um ein Kation	24
Abb. 13:	Innerkristalline Quellung von Natrium-Montmorillonit (nach MÜLLER-VONMOOS, 1988)	24
Abb. 14:	Aufbau der Hydrathüllen an den Kristalloberflächen (nach EAGLAND, 1975)	25
Abb. 15:	Zwei Tonteilchen mit negativen (äußeren) Oberflächenladungen und Gegenionen in einem Elektrolyt (Prinzip der osmotischen Quellung, nach HEIM, 1990)	26
Abb. 16:	Verlauf des negativen Potentials einer diffusen Doppelschicht (nach MÜLLER-VONMOOS, 1988)	26
Abb. 17:	Entstehung des Zeta-Potentials, dargestellt am Beispiel eines Kolloidteilchens (nach NÄGELE, 1984)	27
Abb. 18:	Schematische Darstellung der Potentiale (P) und der Kräfte zwischen zwei Teilchen einer Suspension in Abhängigkeit vom Teilchenabstand bei verschiedenen Lösungskonzentrationen (nach van OLPHEN, 1977)	27
Abb. 19:	Zusammenhang zwischen Kraft und Druck	28
Abb. 20:	Nach außen wirksamer Druck einer abgeschlossenen Gasmenge als Summe der einzelnen Stöße der Gasmoleküle gegen die Behälteraußenwand	28
Abb. 21:	Aufbau eines Tonminerals aus einzelnen Schichtpaketen und dessen Quellkraft als resultierende, richtungsunabhängige Kraft seiner Einzelkomponenten	29
Abb. 22:	REM-Aufnahme des Cadolzheimer Sandsteins (Nürnberger Burgsandstein). Stapel von Kaolinit-Mineralen zwischen Gesteinsbruchstücken (Alkalifeldspäte) (aus GRIMM, 1990, Gesteinstafel Nr. 105)	29
Abb. 23:	Schwingungszustände der Atome in einem Festkörper „Potentialtopfmodell“ (aus FEICHT 1972)	30
Abb. 24:	Habitus einiger Minerale mit deren kristallographischen Achsen	32
Abb. 25:	Desquamation an einem Gestein im ariden Klima-Bereich	32
Abb. 26:	Verwitterungsform des Kernsprunges	32
Abb. 27:	Verschiedene Kontaktarten mit deren Bindungskräften (in Anlehnung an REHBINDER, 1967)	33
Abb. 28:	Prinzip des Festigkeitsnachweises (nach ISSLER, RUOSS u. HÄFELE, 1997)	33
Abb. 29:	Grenzspannungskurven nach MOHR am Beispiel des Sander Schilfsandsteins	34

Abb. 30:	Die häufigsten Festigkeitsprüfungen und deren Versuchsanordnungen . . . . .	34
Abb. 31:	Prüfanordnung zur Ermittlung der Druckfestigkeit . . . . .	35
Abb. 32:	Einfluss des Ionenabstandes auf die Ionenbindung (nach WESCHE, 1977) . . . . .	35
Abb. 33:	Einfluss der Querdehnungsbehinderung bei der Druckfestigkeitsprüfung (nach WESCHE, 1977) . . . . .	35
Abb. 34:	Verhältnis der Druckfestigkeiten verschieden schlanker Zylinder (nach WESCHE, 1981) . . . . .	36
Abb. 35:	Einfluss der Prüfkörpergeometrie auf die Druckfestigkeit (nach WESCHE, 1981) . . . . .	36
Abb. 36:	Einfluss verschiedener Zwischenlagen auf die Querdehnungsbehinderung und dadurch auf die Druckfestigkeit (nach WESCHE, 1981) . . . . .	36
Abb. 37:	Spannungszustand in einem Würfel während der Druckfestigkeitsprüfung (nach WESCHE, 1981) . . . . .	36
Abb. 38:	Druckversuche an Würfelproben eines gerichteten Gesteins (nach DE QUERVAIN, 1974) . . . . .	37
Abb. 39:	Veränderung der Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der „Alterung“ der Prüfkörper (nach PESCHEL, 1974) . . . . .	37
Abb. 40:	Druckfestigkeit in Abhängigkeit von der Stofffeuchte (nach PESCHEL, 1977) . . . . .	37
Abb. 41:	Zylinderdruckfestigkeiten von Doleriten der Lausitz in Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit (nach PESCHEL, 1970) . . . . .	38
Abb. 42:	Prüfanordnung zur Ermittlung der Spaltzugfestigkeit (Brasilien-Test) . . . . .	39
Abb. 43:	Krafteinleitung bei der Spaltzugfestigkeits-Prüfung (nach WESCHE, 1977) . . . . .	39
Abb. 44:	Spannungszustand in einer Scheibe des Prüfkörpers (nach WESCHE, 1977) . . . . .	39
Abb. 45:	Zusammenhang zwischen Zylinderdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit ermittelt an verschiedenen Natursteinen, mit Festigkeitsklassifikation der Gesteine (aus PESCHEL, 1974) . . . . .	40
Abb. 46:	Prüfanordnung zur Ermittlung der Zugfestigkeit . . . . .	41
Abb. 47:	Probengeometrie für die Zugfestigkeitsprüfung . . . . .	41
Abb. 48:	Zusammenhang zwischen Zugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit (nach PESCHEL, 1977) . . . . .	41
Abb. 49:	Zugfestigkeit in Abhängigkeit von der Stofffeuchte und der relativen Luftfeuchte am Beispiel des Sander Schilfsandsteins (Messwerte nach MÖLLER, 1993) . . . . .	42
Abb. 50:	Statischer E-Modul (ermittelt im Zugversuch) in Abhängigkeit von der Stofffeuchte und der relativen Luftfeuchte am Beispiel des Sander Schilfsandsteins (Messwerte nach MÖLLER, 1993) . . . . .	42
Abb. 51:	Prüfanordnung zur Ermittlung der uniaxialen und biaxialen Biegezugfestigkeit.. . . .	43
Abb. 52:	Dreipunkt- und Vierpunkt-Biegeversuch . . . . .	43
Abb. 53:	Die drei Extremfälle bei der Biegefestigkeitsprüfung eines geschichteten Materials . . .	43
Abb. 54:	Abminderung der Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit vom Verhältnis Stützweite/Balkenhöhe (nach WESCHE, 1977) . . . . .	44
Abb. 55:	Abhängigkeit der biaxialen Biegezugfestigkeit von der Stofffeuchte (Messwerte nach SATTLER, 1993) . . . . .	44
Abb. 56:	Prüfanordnung zur Ermittlung der Scherfestigkeit . . . . .	45
Abb. 57:	Prüfanordnung zur Ermittlung der Torsionsfestigkeit . . . . .	45
Abb. 58:	Prüfanordnung zur Ermittlung der Oberflächenhaftzugfestigkeit . . . . .	46
Abb. 59:	Bindungszustände eines Teilchens im Inneren, an der Oberfläche und an den Kanten eines Materials . . . . .	46
Abb. 60:	Semilogarithmischer Quellansatz (nach GROB, 1972) . . . . .	47
Abb. 61:	Quellungsmesser und Quellrohr (nach POSNJAK, 1912) . . . . .	51
Abb. 62:	Skizze der Oedometerzelle . . . . .	52
Abb. 63:	Das Oedometergerät . . . . .	52

Abb. 64:	Setzung und Hebung einer Mergelprobe als Funktion der Last (nach HUDER und AMBERG, 1970)	53
Abb. 65:	Quelldruck in Funktion einer zugelassenen axialen Deformation (nach HUDER und AMBERG, 1970)	53
Abb. 66:	Versuchsapparatur zur Ermittlung des maximalen Quelldruckes (nach MADSEN, 1976)	54
Abb. 67:	Versuchsapparatur für Quelldruckversuche (nach FECKER, 1980)	54
Abb. 68:	Skizze der Quelldruckmesszelle (nach BEDDOE & LIPPOK, 1999)	55
Abb. 69:	Skizze des "Triaxialquelldruckmessgerätes" (nach PIMENTEL, 1996)	56
Abb. 70:	Schema des Triaxialquelldruckmessgerätes (nach PREGEL ET AL., 1980)	57
Abb. 71:	Übersichtsaufnahme des Schilfsandsteinbruches der Firma Gleußner in Sand am Main	64
Abb. 72:	Geometrie der verwendeten Prüfkörper	64
Abb. 73a:	Sorptionsisotherme und Porenradienverteilung des Cottaer Sandsteins	66
Abb. 73b:	Sorptionsisotherme und Porenradienverteilung des Ebenheider Sandsteins	66
Abb. 73c:	Sorptionsisotherme und Porenradienverteilung des Maulbronner Sandsteins	67
Abb. 73d:	Sorptionsisotherme und Porenradienverteilung des Obernkirchner Sandsteins	67
Abb. 73e:	Sorptionsisotherme und Porenradienverteilung des Rorschacher Sandsteins	68
Abb. 73f:	Sorptionsisotherme und Porenradienverteilung des Sander Sandsteins	68
Abb. 74:	Orientierung der Prüfkörper im Koordinatensystem	69
Abb. 75:	Korrektur der Messwerte in y- und z-Richtung	71
Abb. 76:	Quelldruck in Abhängigkeit von der Probandimension	72
Abb. 77:	Quelldruckmessergebnisse der Proben Sa 30 S und Sa 32 P	73
Abb. 78:	Quelldruck in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad der Prüfzylinder	74
Abb. 79:	Quelldruck (in Prozent des Maximaldruckes) in Abhängigkeit vom Schlankheitsgrad der Prüfzylinder	74
Abb. 80:	Thermo-hygrometrische Aufzeichnungen des Klimaverlaufes eines Jahreszyklus des Laborraumes in dem die Quelldruckmessungen durchgeführt wurden	76
Abb. 81:	Berechnung der Vorlaststufen für die Quelldruckversuche	77
Abb. 82:	Die Oedometer Zelle mit dem Belastungsbalken und der Vorrichtung zur Längenänderungsmessung	78
Abb. 83:	Der hygriische Längenänderungsbereich der untersuchten Sandsteine	79
Abb. 84:	Konstruktionsskizze des für die Messung von Hartgesteinen entwickelten Oedometerringes	79
Abb. 85:	Quellhebungsversuch und Quellversuch nach KAISER/HENKE	80
Abb. 86:	Ermittlung der Materialkonstante für den Sander Schilfsandstein, Typ II (nach GROB, 1972)	81
Abb. 87:	Quellversuch nach HUDER/AMBERG	82
Abb. 88:	Komponenten der Universalprüfmaschine	85
Abb. 89:	Belastungseinheit der Universalprüfmaschine	85
Abb. 90:	Quelldruckversuch mit der Universalprüfmaschine	86
Abb. 91:	CAD Zeichnung der Triaxialquelldruck-Messzelle	89
Abb. 92:	Foto der Messdruckzelle mit Prüfkörper	90
Abb. 93:	CAD-Zeichnung des Triaxialquelldruck-Messgerätes	90
Abb. 94:	Foto des Triaxialquelldruck-Messgerätes	91
Abb. 95:	Zusammenhang von Quelldruck, Quelldruckäquivalenzwert und Vorlast	96
Abb. 96:	Zusammenhang von Quelldruck und Vorlast	96
Abb. 97:	Alkydiammonium-Molekül mit seiner Ladungsverteilung	97
Abb. 98:	Mittelaufnahme der behandelten Gesteine	97



Abb. 99: Wirkstoffaufnahme aus der Schutzmittellösung . . . . .	98
Abb. 100: Kantenverwitterung hervorgerufen durch Schwinden und Quellen . . . . .	102
Abb. 101: Detailaufnahme der Kantenverwitterung. . . . .	102
Abb. 102: Tiefgründige Verwitterung infolge von Quellen und Schwinden . . . . .	102
Abb. 103: Abhängigkeit der Zugfestigkeit von der Belastungsdauer (nach SORACE, 1996) . . . . .	103
Abb. 104: Abhängigkeit der Biegefestigkeit von der Belastungsdauer (nach SORACE, 1996) . . . . .	103
Abb. 105: Abschätzung des Einflusses des Quelldruckes auf die Festigkeit eines Gesteins . . . . .	104
Abb. 106: Messanordnung zur Ermittlung der thermischen Längenänderung . . . . .	106
Abb. 107: Messanordnung zur Ermittlung des thermischen Druckes . . . . .	107
Abb. 108: Stäbe und Platten aus Zerodur als Substrat für Skalen und Normale . . . . .	107
Abb. 109: Thermische Ausdehnung von Zerodur . . . . .	108
Abb. 110: Temperaturverlauf einer Probe während des thermischen Druckversuches . . . . .	109
Abb. 111: Messwertkurve eines thermischen Druckversuches . . . . .	110
Abb. 112: Ergebnisse der thermischen Druckmessungen der Proben Sa 30 S und Sa 32P . . . . .	113
Abb. 113: Thermischer Druckäquivalenzwert in Abhängigkeit von der Vorlast. . . . .	114
Abb. 114: Thermischer Druckäquivalenzwert in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz . . . . .	114

Tafel 1: Geologische Karte der BRD Deutschland mit den untersuchten Sandsteinen . . . . .	60
---	----







### **Persönliche Daten:**

Name: Kocher  
Vorname: Mathias  
Wohnort: Gernlindner Str. 17, 82216 Maisach

Geburtsdatum: 03.07.1954  
Geburtsort: Olching  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Familienstand: ledig

### **Schulbildung:**

09.1960 – 07.1968 Volksschule, Gernlinden  
09.1971 – 06.1973 Städt. Carl-von-Linde Realschule, München  
09.1973 – 06.1976 Wittelsbacher-Gymnasium, München

### **Studium:**

09.1976 – 02.1977 Geophysik, LMU München  
03.1977 – 06.1987 Geologie, LMU München

### **Zivildienst:**

08.1983 – 11.1984 Umweltschutzreferat der Stadt München

### **Berufstätigkeiten:**

06.1987 – 12.1988 wissenschaftl. Hilfskraft,  
Inst. f. Allg. u. Angewandte Geologie  
Prof. Dr. W.-D. Grimm, FuE-Vorhaben, BAU 5015E

01.1989 – 2004 wissenschaftl. Mitarbeiter,  
Bayerisches Landesamt f. Denkmalpflege, ZV, Zentrallabor  
Prof. Dr. R. Snethlage



