



CSC

Conservation Science Consulting Sàrl

Materialeigenschaften

Christine Bläuer

Stein und Mauer / Materialeigenschaften / 1

Chemische und physikalische Eigenschaften der Materialien

Chemische Eigenschaften

Zusammensetzung

- organisch – z.B. Holz, Plastik, Ölfarbe, etc.
- anorganisch – z.B. Silikat, Karbonat, Kalkfarbe, etc.

Löslichkeit in Wasser

- Salze, gut löslich – grosse Mobilität im Porengefüge
- Kalkstein besser löslich als Granit – Lösungsverwitterung resp. Karstbildung beim Kalkstein
- nur einzelne Bestandteile löslich bei Beton, Zementmörtel oder Kunststein

Stein und Mauer / Materialeigenschaften / 2

Salze - löslich



Stein und Mauer / Materialeigenschaften / 3



Stein und Mauer / Materialeigenschaften / 4



http://www.rotary-zuerich-bellerive.ch/portrait_seefeld.asp

ZH, Zürich, Villa Patumbah

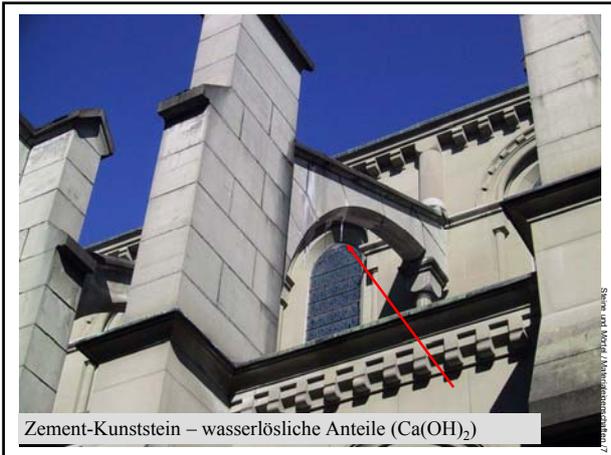
Kalkstein Rosso di Verona
mit Gipskrusten
Gips löslicher als Kalk



Granit - unlöslich



Stein und Mauer / Materialeigenschaften / 5



Physikalische Eigenschaften der Materialien (1)

Aggregatzustand: Fest – flüssig – gasförmig

Festkörper

Isotropie/Anisotropie – z.B. thermische Längenänderung im Marmor

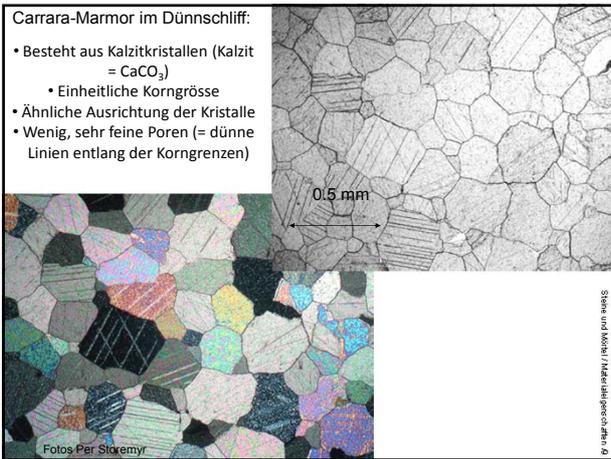
Homogenität – abhängig vom Massstab (Kalkstein – Marmor)

Optische – Reflexionsvermögen, Farbe

Mechanische – Spaltbarkeit (Gneis/Granit), Sprödigkeit, Härte, Elastizität, Druckfestigkeit, etc.

Schmelzpunkt – v.a. bei Metallen wichtig

Verhalten gegenüber Flüssigkeiten und Gasen - Porosität, Benetzbarkeit, Löslichkeit, etc.



Marmortyp	Proben-Zustand	Porosität [Vol.-%]
Carrara	frisch	0,20
	verwittert stark	0,43
	verwittert	2,12

- **Anisotrope thermische Dehnung** des Kalzit → Gefügelockerung durch Temperaturschwankungen
- Kalzit ist teilweise wasser- und gut säurelöslich
- Carrara-Marmar hat viele Poren < 1 μm → Kapillarkondensation
- Wassersättigungswerte bis 0.9 möglich → Gefügelockerung durch Frost

Abb aus: J. M. Rüdlich 2003 Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Diss. Uni Göttingen.





Conservation Science Consulting S&P

Porosität

Gesamtporosität (= totale verbundene Porosität)
 = Anteil des Porenvolumens (effektiv oder nicht) am Gesamtvolumen einer repräsentativen Probe

$$Pt (\%) = 100 \times \frac{V_v}{V_t} = 100 \times \frac{V_v}{V_v + V_s}$$

Pt = Gesamtporosität Vt = Gesamtvolumen
 Vv = Volumen Leerräume Vs = Vol. Festbest.

Steine und Mauerwerk / Mauerwerksgeschichten / 16

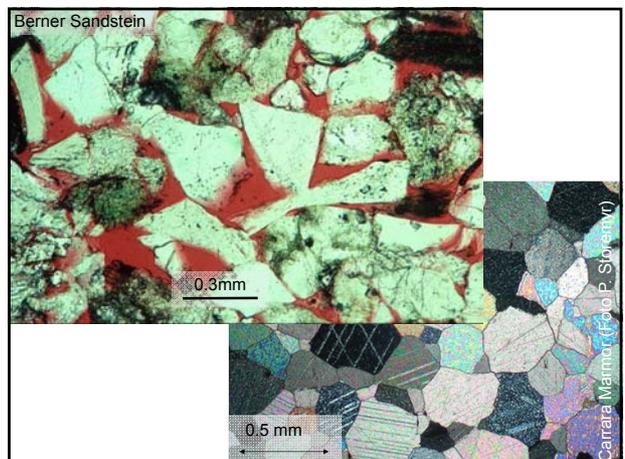
Porosität

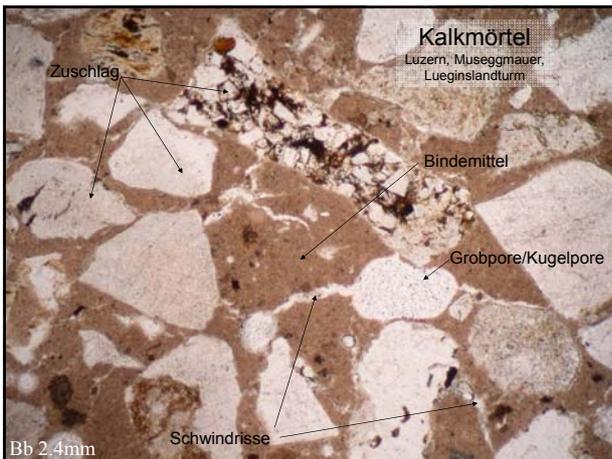
Gesamtporositäten für versch. Natursteine

Gesteinstyp	Porosität (%)
Sandsteine	5 – 50
Kalksteine	5 - 55
Krystallingesteine	0 – (10)
vulkanische Gesteine	0 – (90)
metamorphe Gesteine	0 – (50)

Quellen: Freeze and Cherry (1979); McWorter and Sunada (1977).

Steine und Mauerwerk / Mauerwerksgeschichten / 17





Porenstrukturen

Porenstrukturen:

- **verbundene** (= effektive) oder **gefangene**
- **primäre** oder **sekundäre**
- **intergranular** oder **intragranular**
- **Mikroporosität** ($r < 0.1 \mu\text{m}$ / adsorbiertes Wasser)
- **Mesoporosität** (= Kapillarporosität; $r = 0.1 \mu\text{m}$ to 2.5mm / kapillares und Druckwasser)
- **Makroporosität** ($r > 2.5 \text{mm}$ / Sickerwasser)

Stiene und Mohr / Materialwissenschaften 20

Physikalische Eigenschaften der Materialien (2)

Flüssigkeiten
z.B. Polarität, Siedepunkt, dynamische Viskosität, Oberflächenspannung
Verhalten gegenüber Festkörpern und Gasen – Benetzbarkeit, etc.

Gase
Kondensation bei entsprechendem Druck
Verhalten gegenüber Festkörpern und Flüssigkeiten – Aggressivität, Löslichkeit, etc.

Stiene und Mohr / Materialwissenschaften 21

Flüssiges Wasser im Porenraum – Oberflächenspannung

Ursache der Oberflächenspannung einer Flüssigkeit: ein Molekül im Kontakt mit gleichartigen Nachbarmolekülen ist in einem niedrigeren Energiezustand, als ohne gleichartige Nachbarmoleküle. Im Innern der Flüssigkeit haben alle Moleküle so viele Nachbarn wie sie nur haben können. An der Grenzfläche haben die Moleküle weniger Nachbarn als die Innen-Moleküle und sind daher in einen höheren Energiezustand. Zum Minimieren der Energie einer Flüssigkeit, muss die Anzahl der Grenz-moleküle und damit ihre Oberfläche minimiert werden.

Stiene und Mohr / Materialwissenschaften 22

Oberflächenspannung γ

wenn $r_a > r_b$, ist auch $\gamma_a > \gamma_b$

13

Benetzung und Benetzungswinkel θ

perfekte Benetzung $\theta = 0^\circ$

gute Benetzung $0^\circ \leq \theta < 90^\circ$

keine Benetzung $\theta = 90^\circ$

keine Benetzung $\theta > 90^\circ$

14

Kapillarität

Kapillarkraft:
 $F_k = 2\pi r \cos\theta \cdot \gamma$

Kapillarzug:
 $P_k = \frac{F_k}{r \cdot \pi} = \frac{2\gamma \cos\theta}{r}$

γ = Oberflächenspannung A/B
 θ = Benetzungswinkel
 r = Kapillarradius

- je dünner die Röhre desto grösser der Kapillarzug
- Phase A verdrängt Phase B
- horizontales Saugen und ununterbrochener Nachschub: Eindringtiefe theoretisch unendlich
- vertikales Saugen h_{max} bei Kapillarkraft = Schwerkraft

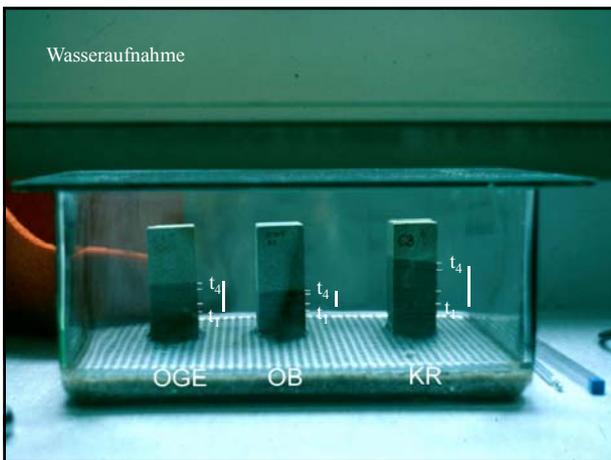
Stene und Körner / Materialgeschichte / ZH

Flüssigkeit im Porenraum – Kapillarität

Kapillares Saugen

Die Kinetik der spezifischen und linearen Wasseraufnahme eines porösen Materials, zeigt die Komplexität des Porennetzwerks.

Stene und Körner / Materialgeschichte / ZH



Eindringverhalten von Flüssigkeiten in Porenräume verläuft linear zur Wurzel der verstrichenen Zeit.
 z.B. bei ständigem Wasserkontakt und ohne Verdunstung (100% Luftfeuchtigkeit)

Zeit	feinkörniger BESSt Korngrösse ca. 0.25mm	grobkörniger BESSt Korngrösse ca. 0.4mm
nach 10 Min	0.93 cm	2.40 cm
nach 20 Min	1.32 cm	3.39 cm
nach 30 Min	1.61 cm	4.16 cm
nach 40 Min	1.86 cm	4.80 cm
nach 2 Stunden	3.22 cm	8.32 cm

Zhu / ZH

Flüssigkeit im Porenraum – Kapillarität

Beim kapillaren Saugen:

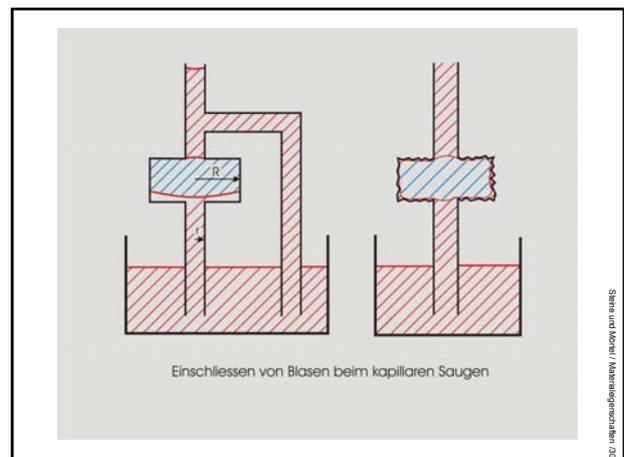
Für Wasser frei zugängliche Porosität = offene Porosität
 Unzugänglicher Teil der Poren = gefangene Porosität

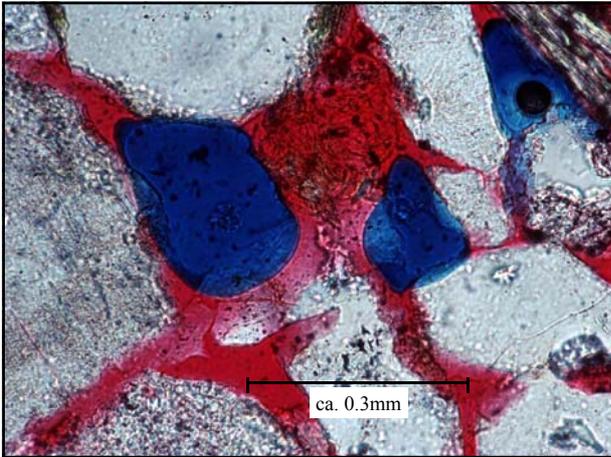
Die gefangene Porosität wird durch den kapillaren Sättigungs- oder Hirschwaldkoeffizienten (S%) charakterisiert.

$$S\% = \frac{P_i}{P_t} \times 100 \quad \text{where} \quad P_i (\%) = \frac{M_i - M_1}{M_2 - M_3} \times 100$$

P_i = beim kapillaren Saugen gefüllte Porosität
 M = Gewicht der Probe nach dem Saugen

Stene und Körner / Materialgeschichte / ZH





Flüssigkeit im Porenraum – Frostanfälligkeit

Die Fähigkeit des Porenraums sich mehr oder weniger mit Wasser zu füllen (resp. weniger oder mehr Luft einzuschließen) ist einer der Faktoren die die Frostanfälligkeit des Materials kontrollieren.

Abschätzung der Frostanfälligkeit:

- vereinfachend kann gesagt werden, dass ein Stein
- frostgefährdet ist, wenn $S\% > 0,85$ ist
 - nicht frostgefährdet ist, wenn $S\% < 0,75\%$ ist

Steine mit hohen Wassersättigungskoeffizienten sind frostempfindlich (da Wasser beim Gefrieren eine Volumenausdehnung von etwa 9% resp. eine lineare Ausdehnung von 3% erfährt)

Steine und Mörtel / Materialigenschaften / 22

Porenstrukturen

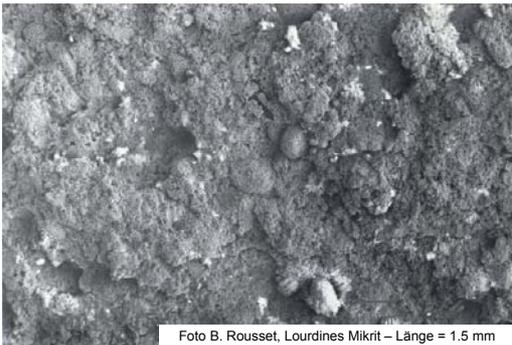


Foto B. Rousset, Lourdines Mikrit – Länge = 1.5 mm

Steine und Mörtel / Materialigenschaften / 23

Porenstrukturen

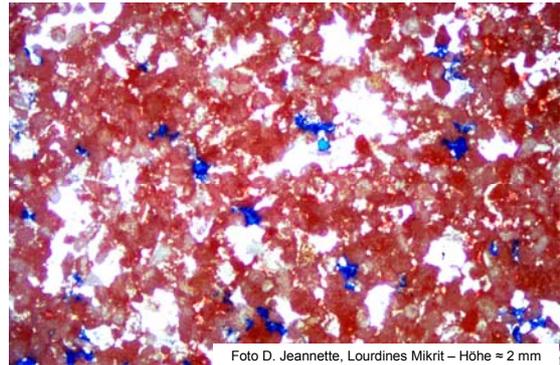


Foto D. Jeannette, Lourdines Mikrit – Höhe ≈ 2 mm

Steine und Mörtel / Materialigenschaften / 24

Porenstrukturen

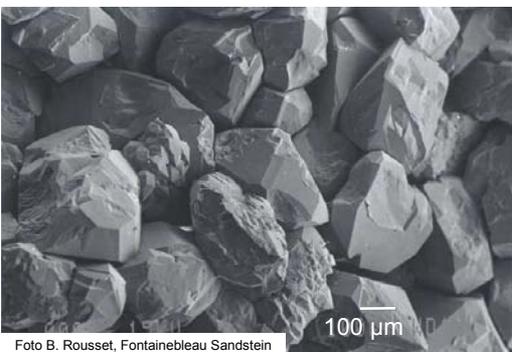


Foto B. Rousset, Fontainebleau Sandstein

Steine und Mörtel / Materialigenschaften / 25

Porenstrukturen

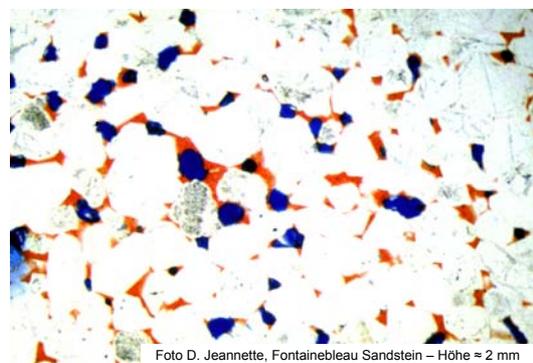
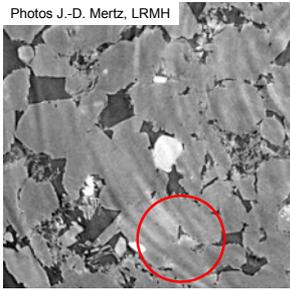


Foto D. Jeannette, Fontainebleau Sandstein – Höhe ≈ 2 mm

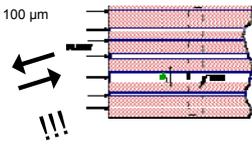
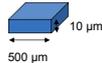
Steine und Mörtel / Materialigenschaften / 26

Modellierung der Gesteinsporosität

Photos J.-D. Mertz, LRMH



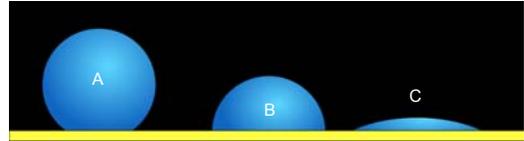
Buntsandstein
« Grès à Meules »
Micro computed tomography
(x ray - synchrotron)



Trotz der Komplexität von Porenstrukturen, sieht es so aus, als ob ein Bündel von parallelen Kapillaren, jede mit einem anderen Durchmesser, in einem Festkörper ein perfektes Morphologiemodell für einen Porenraum darstellt !!!

Stene und Köster / Materialwissenschaften / 07

Flüssigkeit im Porenraum – Oberflächenspannung



Netzfähigkeit von Flüssigkeiten. A zeigt eine Flüssigkeit mit grosser Oberflächenspannung (geringe Netzfähigkeit), während C eine solche mit einer sehr geringen Oberflächenspannung (gerössere Netzfähigkeit) zeigt. A hat einen grossen und C einen kleinen Kontaktwinkel.

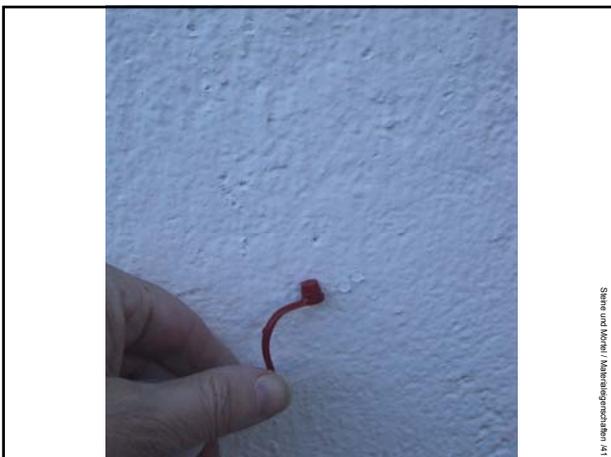
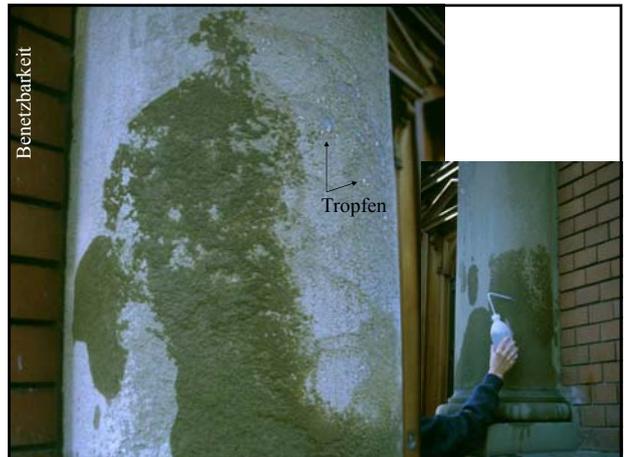
Stene und Köster / Materialwissenschaften / 08

Flüssigkeit im Porenraum – Oberflächenspannung

z.B. Anorganische Salze erhöhen die Oberflächenspannung von Lösungen, aber Alkohol oder Netzmittel erniedrigen die Oberflächenspannung von Lösungen

Wirkung bestimmter Behandlungen:
Hydrophobierungen und Festigungen erniedrigen die Benetzbarkeit von Fassaden wohingegen Reinigungsprodukte sie erhöhen

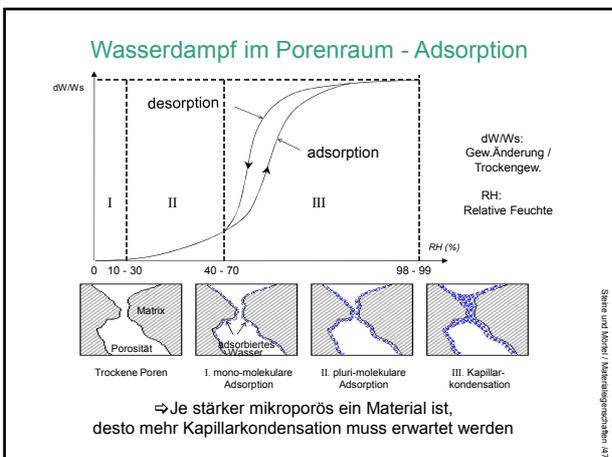
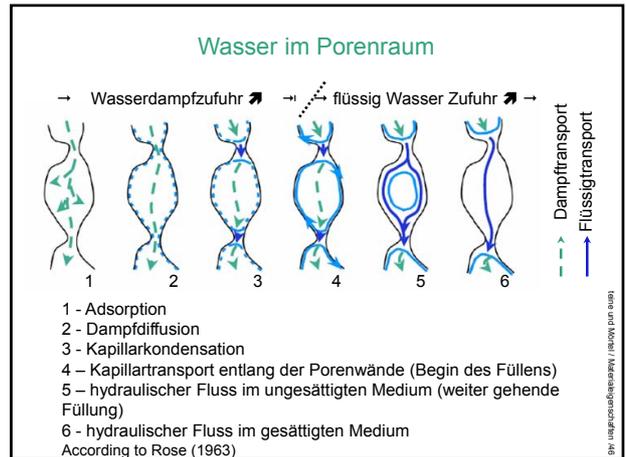
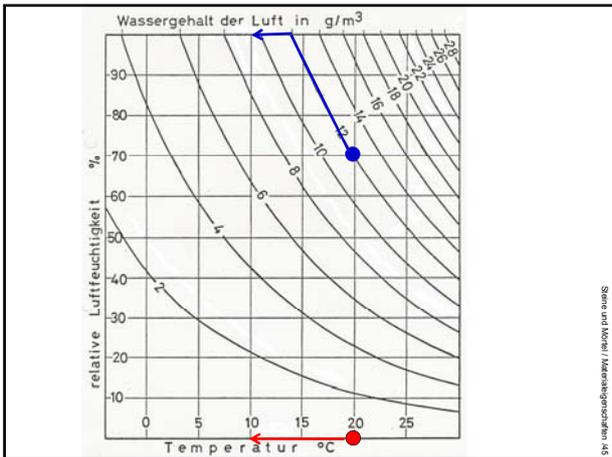
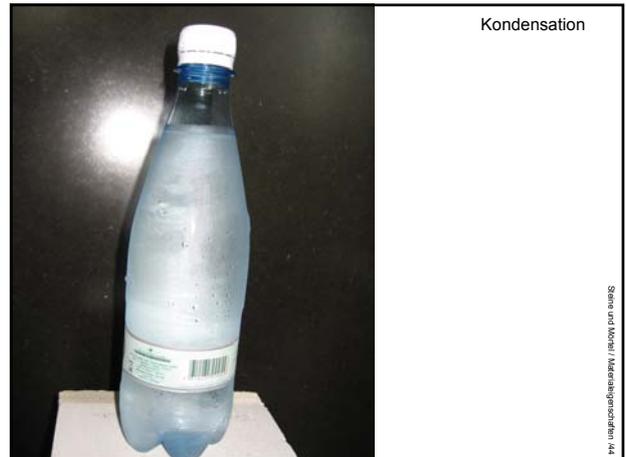
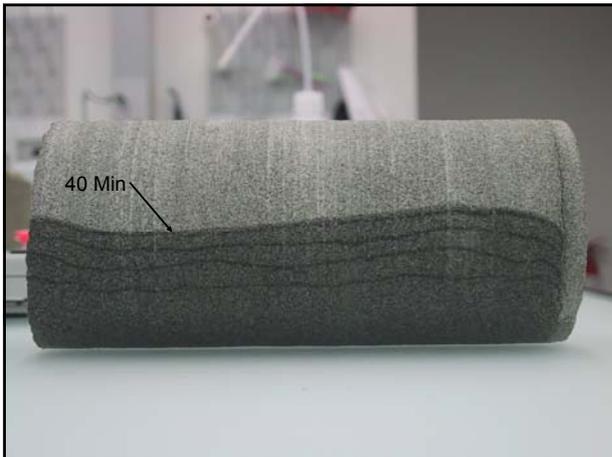
Stene und Köster / Materialwissenschaften / 09



Stene und Köster / Materialwissenschaften / 41

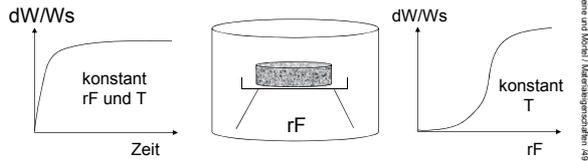


Stene und Köster / Materialwissenschaften / 42



Wasserdampf im Porenraum - Adsorption

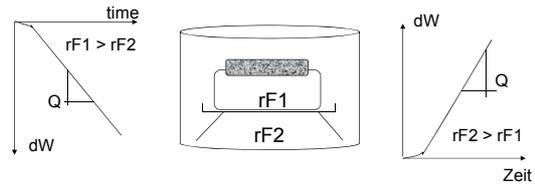
Bestimmung der Adsorptionsgeschwindigkeit und Adsorptionsisotherme: Proben getrocknet bei 60° C, dann in einem geschlossenen Behälter bei best. T/rF bis zur Gewichtskonstanz, dann in nächst grössere rF.



Stene und Kober / Materialgeschichten 48

Wasserdampf im Porenraum - Permeabilität

Bestimmung der Wasserdampfdiffusion: Proben getrocknet bei 60° C, dann so eingepackt, dass nur zwei gegenüber liegende Seiten offen bleiben und je mit einer unterschiedlichen rel. Feuchte (rF) im Kontakt stehen.



Stene und Kober / Materialgeschichten 50

Flüssiges Wasser im Porenraum – Kapillarität

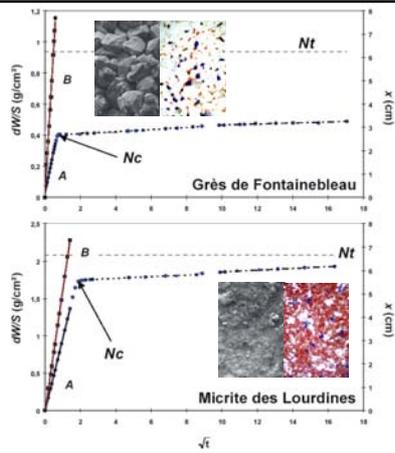
kapillares Saugen (rF 100%, T 23° C)

dW = Gewichtszunahme

S = saugende Oberfläche

Nc = kapillare Porosität

Nt = totale Porosität

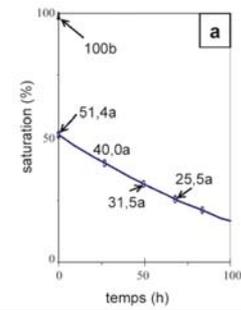
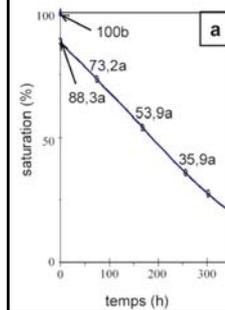


Stene und Kober / Materialgeschichten 51

Trocknen bei 37.2% rel. Feuchtigkeit und 23° C

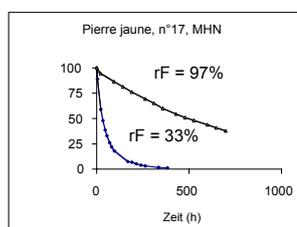
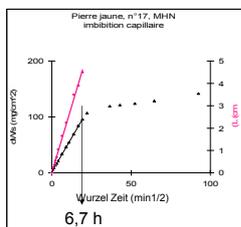
Mcl5

Ft4a5



Figuren aus Rousset Tournier, B. (2001): Transferts par capillarité et évaporation dans des roches - rôle des structures de porosité. - Dissertation Université Louis Pasteur, Strasbourg, Sciences de la Terre et de l'Univers, spécialité: pétrophysique, Pages 158 et 159.

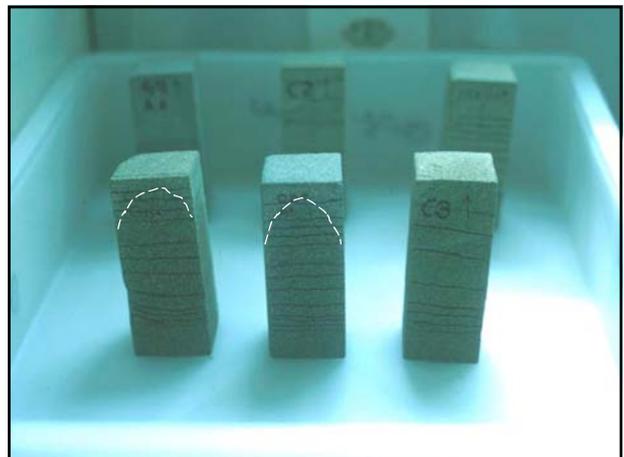
Flüssiges Wasser in Baustoffen – Trocknen



Stene und Kober / Materialgeschichten 53

Trocknen eines spezifischen Materials ist immer viel langsamer als sein kapillares Saugen

Generell gilt, je grösser die Poren eines Materials sind, desto schneller trocknet es



Begriff der R.V.E.

Steine und Mörtel sind **heterogene Materialien** (Zusammensetzung, Porosität) im Massstab:

- Poren
- Proben
- Aufschlüsse

deshalb müssen repräsentative Messungen von physikalischen, chemischen oder mechanischen Eigenschaften an **repräsentativen Volumenelementen** durchgeführt werden.

Steine und Mörtel / Materialgeschichte / 56

Untersuchungsmethoden

Steine und Mörtel / Materialgeschichte / 56

