

Bauphysikalische Prozesse vs. Schadensprozesse

DI Tobias Steiner

Bauphysikalische Prozesse vs. Schadensprozesse

- Relevante Prozesse
- Komponente Zeit
- Auffeuchtungsverhalten und Trocknungsverhalten von Baustoffen und Konstruktionen

Übersicht

- Allgemeines
- Porenstruktur von Baustoffen und ihre Eigenschaften
- Verwitterungsprozesse
- Kondensationsprozesse
- Befeuchtungsprozesse
- Deformationsprozesse

Allgemeines

- Schädigungsprozesse in und an Baustoffen
- Ursachen von Feuchteanreicherung in Bauteilen
- Hygrische Prozesse in und an Außenwandkonstruktionen
- Schadensschwerpunkte

Übersicht über Schädigungsprozesse in und an Baustoffen

- Hygrische Einwirkungen
- Thermische Einwirkungen
- Statische Einwirkungen
- Einwirkung aus Herstellung und Gebrauch

Physikalische Schädigungen

■ Hygrische Einwirkungen

- Luftfeuchtigkeit
- Kapillarwasser
- Kondenswasser

Physikalische Schädigungen

■ Thermische Einwirkungen

- Hitze
- Kälte
- Frost

Physikalische Schädigungen

■ Statische Einwirkungen

- Belastung aus Eigengewicht
- Belastung aus Auflast
- Belastung aus Wind

Physikalische Schädigungen

- **Einwirkungen aus Herstellung und Gebrauch**
 - Heizung
 - Reinigung
 - Wurzelsprengung
 - Beschädigung
 - Falsche Materialwahl

Chemische Schädigungen

- Schadstoffbelastung
- Bindemittellösung
- Bindemittelumwandlung
- Salzschädigung

Biologische Schädigungen

- Mikro-Organismen
- Algen und Flechten
- Schimmelpilz
- Pilze

Ursachen von Feuchteanreicherung in Bauteilen

- Oberflächenkondensat
- Kernkondensation
- Hygroskopische Feuchteanreicherung
- Feuchtigkeit aus Bewitterung
- Feuchtigkeitszufuhr durch aufsteigende Feuchtigkeit

Oberflächenkondensat

- Taupunktunterschreitung
- Überhöhte Feuchteproduktion
- Geringe Lüftung
- Geringe Wärmedämmwerte
- Wärmebrücken
- Verminderung der Wärmedämmung durch Baufehler (Durchfeuchtung, Lufteintritt)

Kernkondensation

- Taupunktunterschreitung in Bauteilen
- Ungünstige Baustoffauswahl
- Ungünstiger Schichtenaufbau
- Luftkonvektion in Bauteile hinein
- Dampfdichte Beschichtungen
- Fehlende Hinterlüftung

Hygroskopische Feuchteanreicherung

- Hygroskopische Stoffe
- salzhaltige Materialien
- Einwanderungen von hygroskopischen Stoffen durch Bewitterung, Bodenfeuchtigkeit und Nutzungsprozesse
- Kapillarkondensation

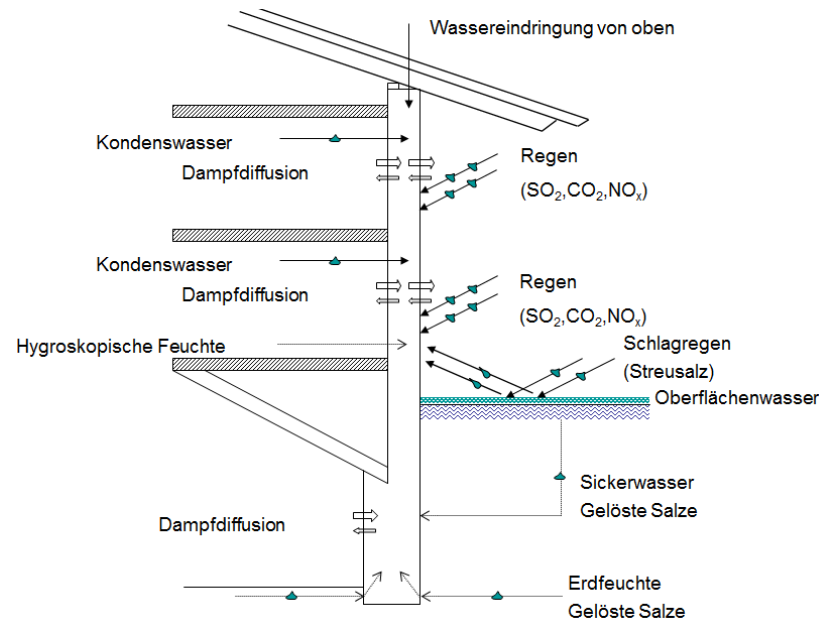
Feuchtigkeit aus Bewitterung

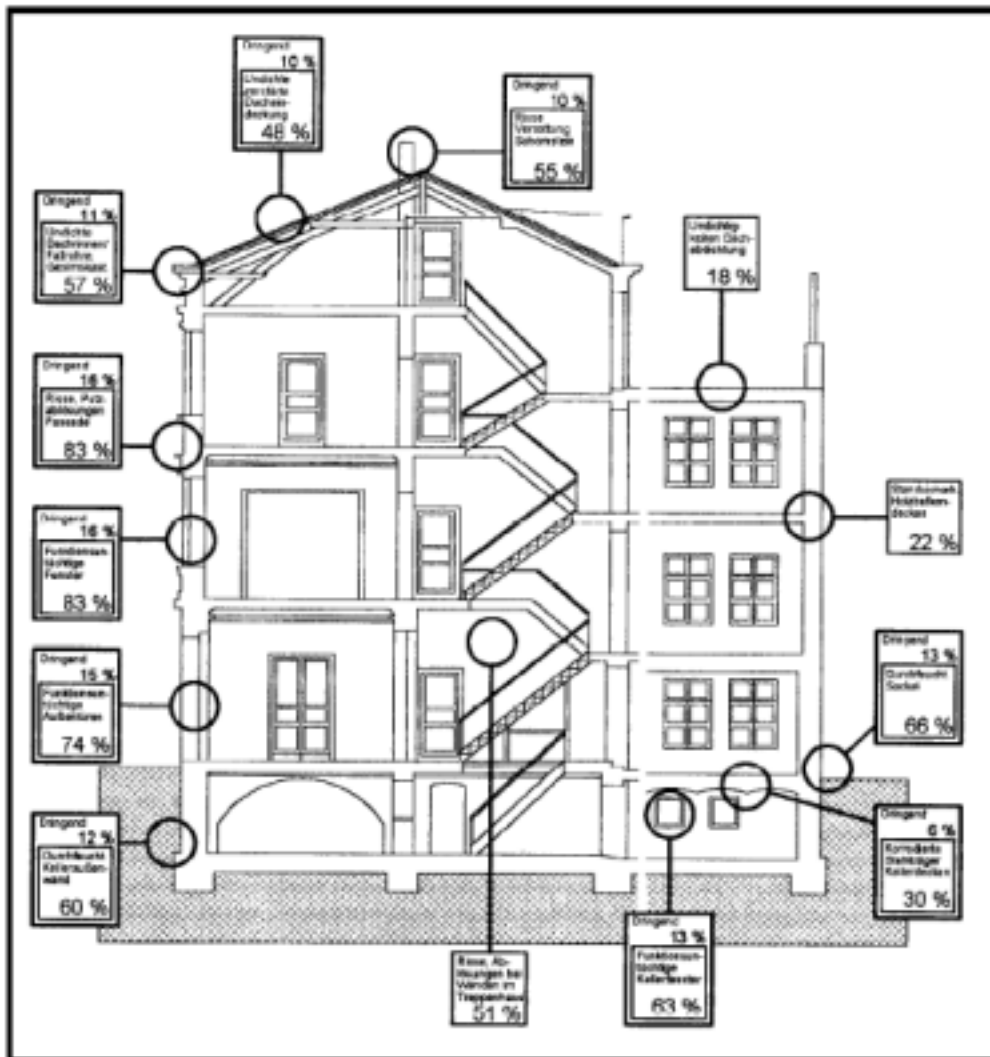
- Schlagregenbelastung
- Windbelastung
- geringe Besonnung
- schlechte Feuchtigkeitsabgabe
- ungeeignete Oberflächensysteme (keine wasserabweisenden bzw. wasserhemmenden Oberflächenschichten)

Feuchtigkeitszufuhr durch aufsteigende Feuchtigkeit

- keine oder defekte Feuchtigkeitssperren
- hohe Bodenfeuchtigkeit
- Belastung durch zeitweise drückendes Wasser oder drückendes Wasser
- Hangwasser

Hygrische Prozesse in und an Außenwandkonstruktionen





Schadensschwerpunkte am nicht industriell errichteten Mehrfamilienhaus (bis 1960),
Quelle: AIBAU

und Revitalisierung Modulo 3 – Bautechnik– Bauschadendiagnose

Übersicht

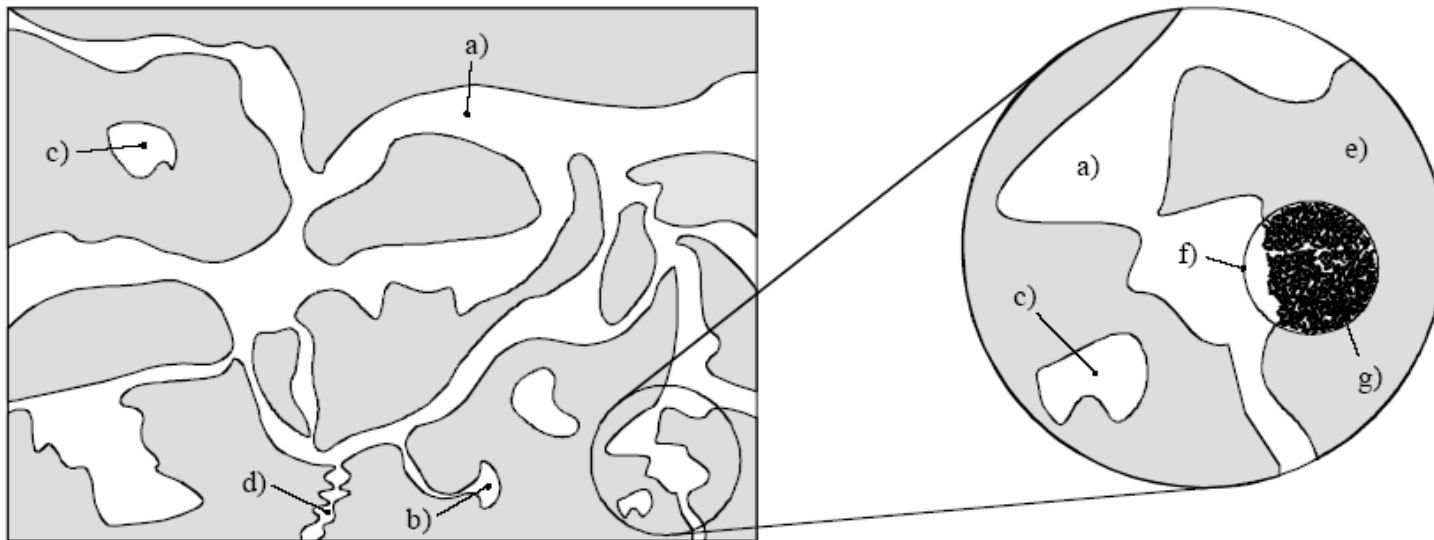
- Allgemeines
- **Porenstruktur von Baustoffen und ihre Eigenschaften**
- Verwitterungsprozesse
- Kondensationsprozesse
- Befeuchtungsprozesse
- Deformationsprozesse

Porenstruktur von Baustoffen und ihre Eigenschaften

- Hygroskopische Feuchtigkeit
- Transportmechanismen
- Einfluss von Salzen auf den Feuchtehaushalt
- Praktischer Feuchtigkeitsgehalt von Baustoffen
- Kapillare Eigenschaften
- Wasseraufnahmekoeffizient
- Wassereindringkoeffizient

Porenstruktur von Baustoffen und ihre Eigenschaften

- Wasserkapazität
- Kritischer Feuchtigkeitsgehalt
- maximaler Wassergehalt
- Trocknungsverlauf
- Wasserdampfdiffusion durch poröse Baustoffe
- Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit



a) Makropore (offene Pore)
b) Sackpore
c) isolierte Pore

d) „Ink-Bottle“-Pore
e) Baustoffgerüst
(Strukturverband)

f) Vergrößerungsausschnitt
g) Mikroporen (Gelporen, ca.
10.000-fach vergrößert)

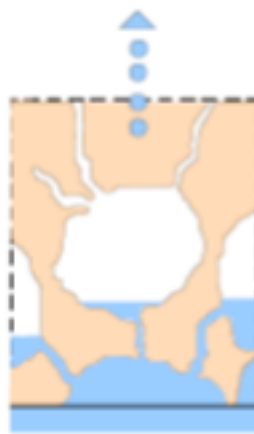


A

großes Wasseraufnahme-
vermögen

großes Feuchtigkeits-
abgabevermögen

z.B.: Ziegel, Gips



B

großes Wasseraufnahme-
vermögen

geringes Feuchtigkeits-
abgabevermögen

z.B.: Gasbeton



C

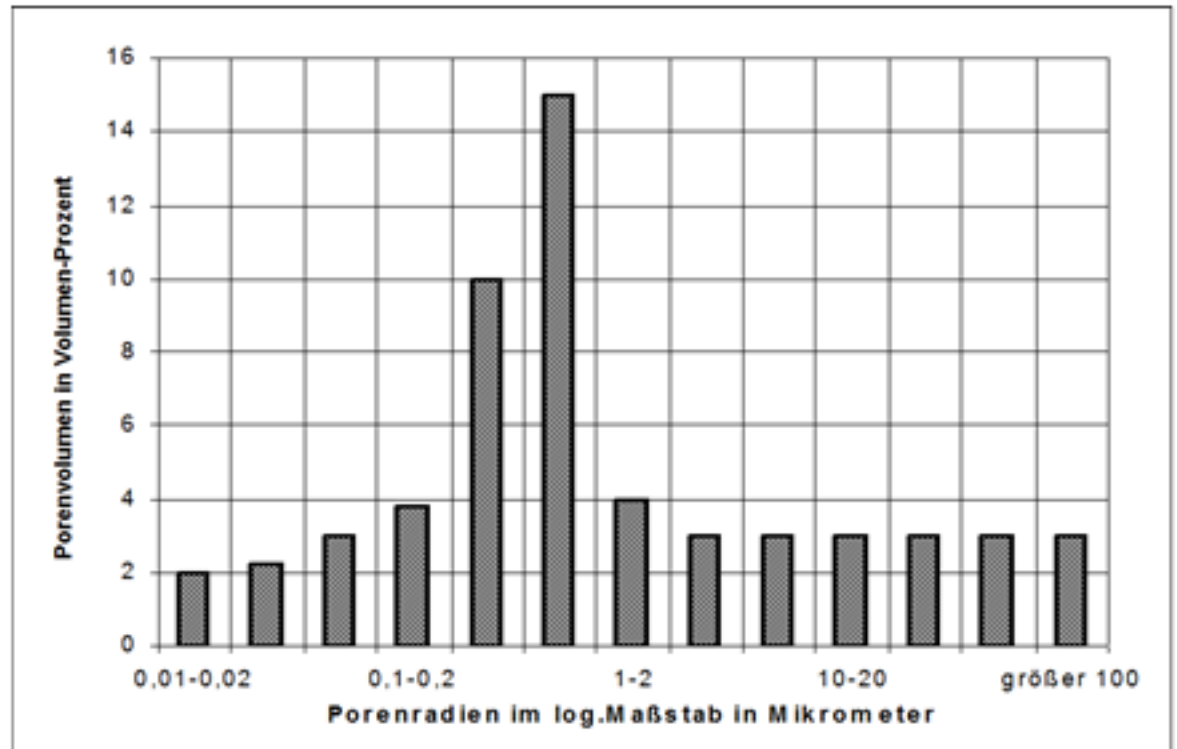
geringes Wasseraufnahme-
vermögen

geringes Feuchtigkeits-
abgabevermögen

z.B.: Schwerbeton, Blähbeton

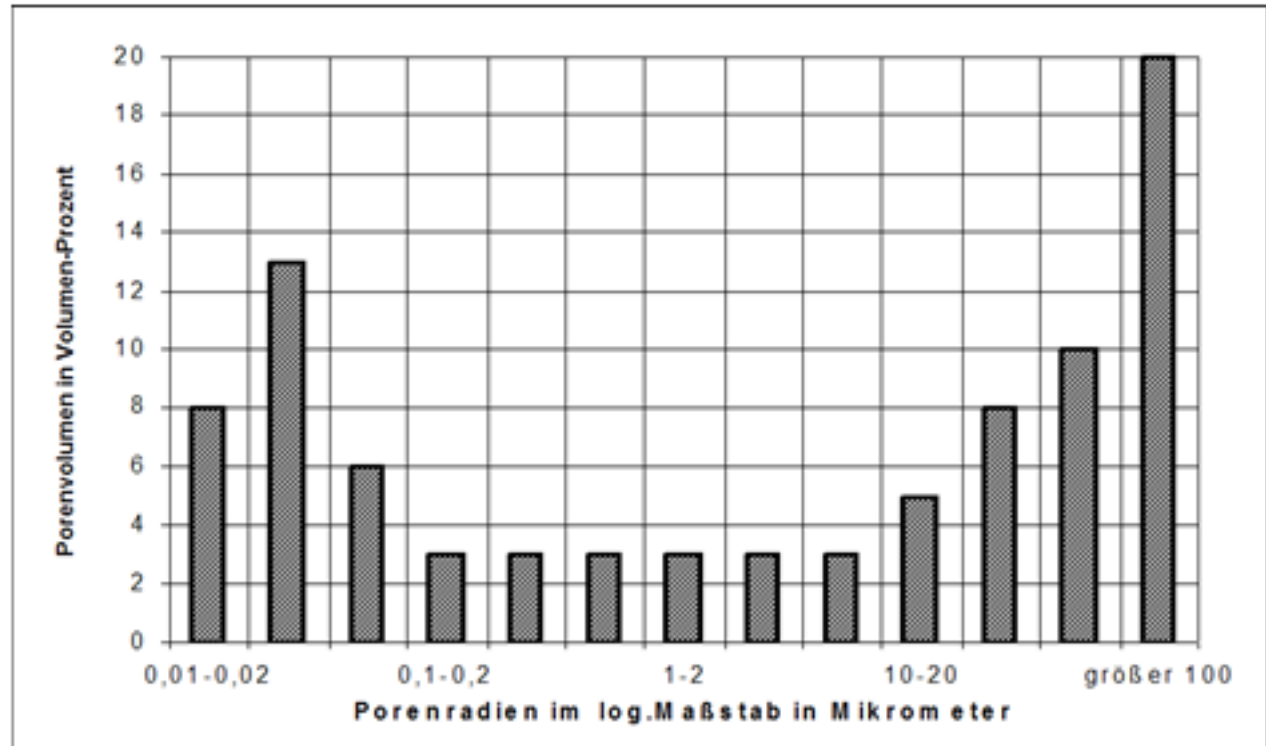
Porenradienverteilung von Ziegel

- Kapillarer Wassertransport



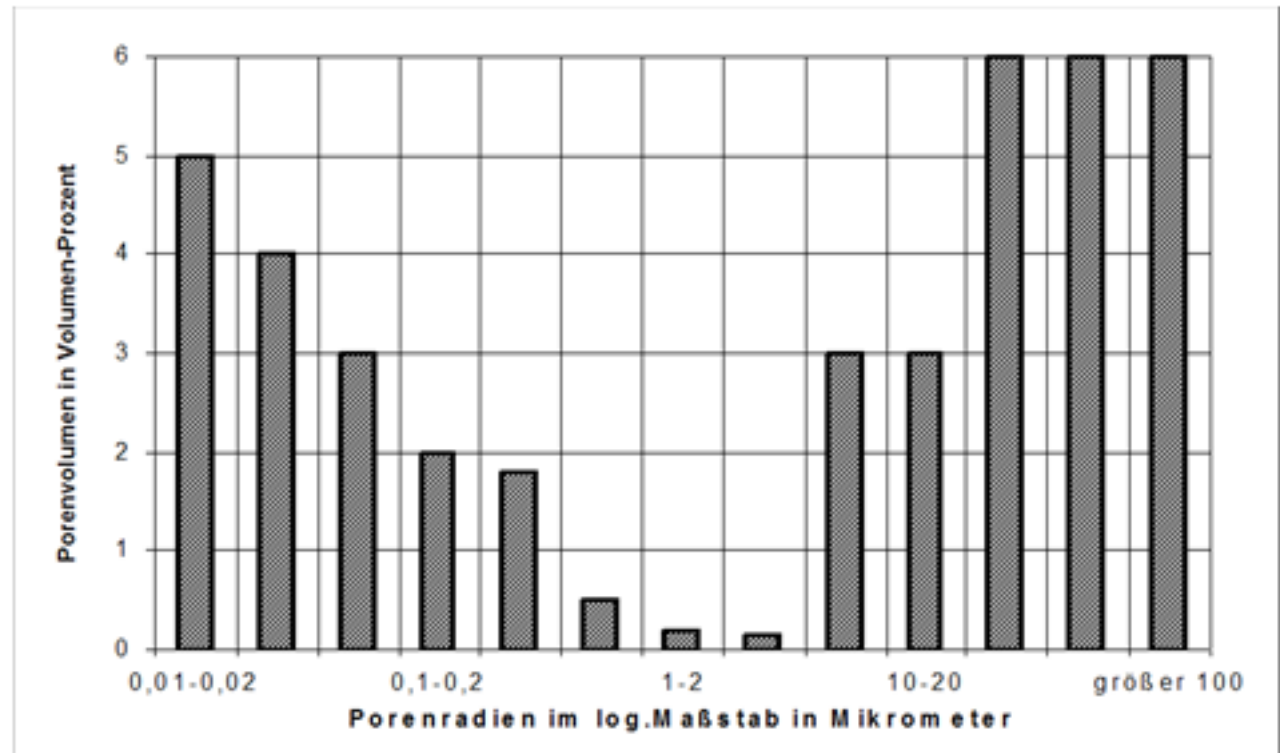
Porenradienverteilung von Porenbeton

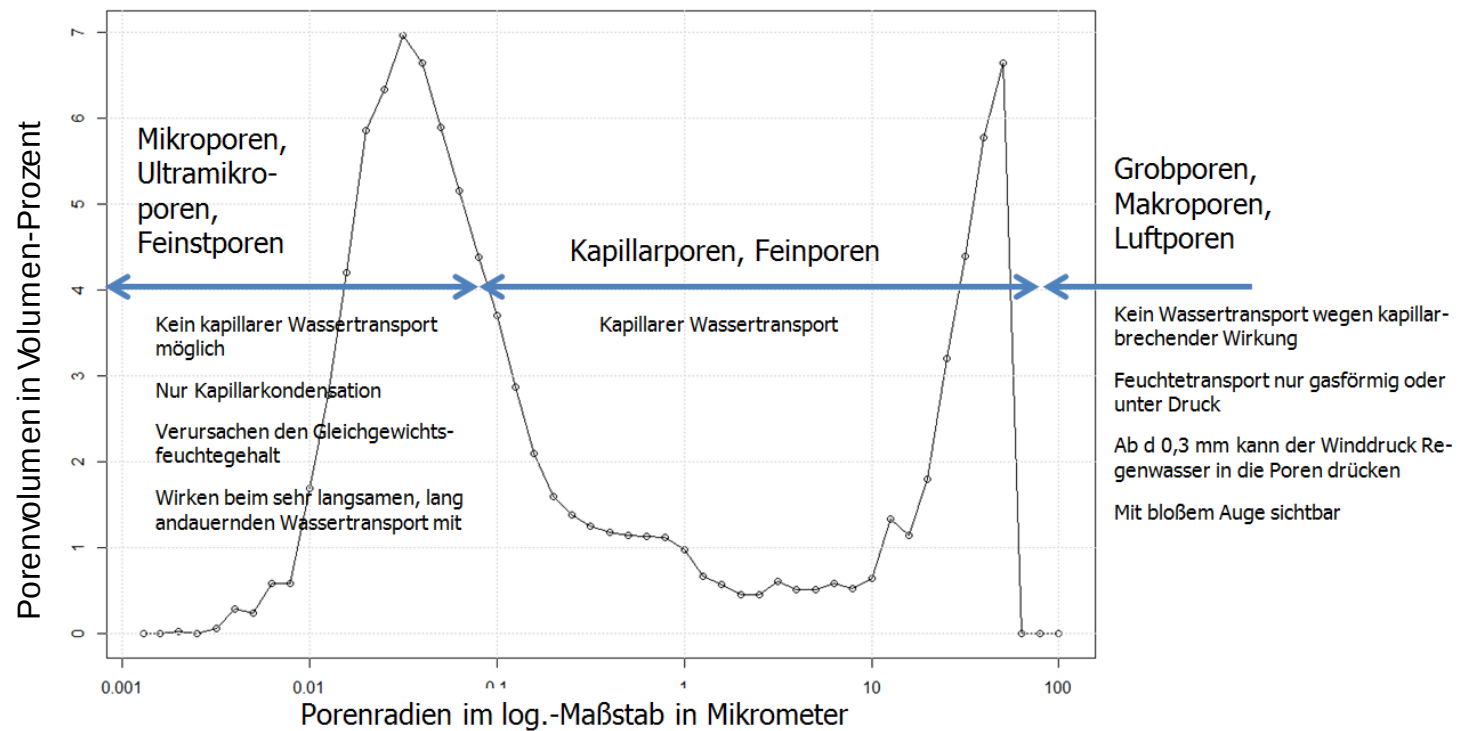
- Sorption
- Regenaufnahme



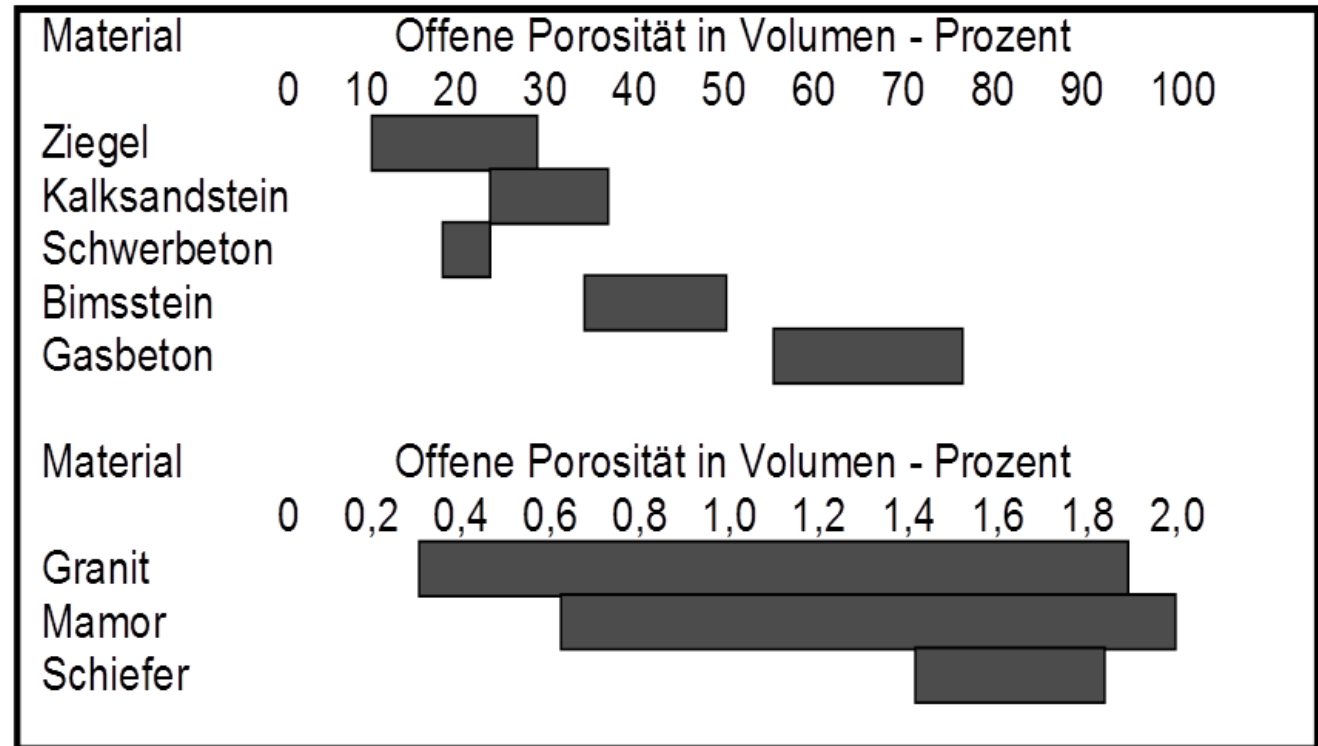
Porenradienverteilung von Kalksandstein

- Sorption
- Regenaufnahme



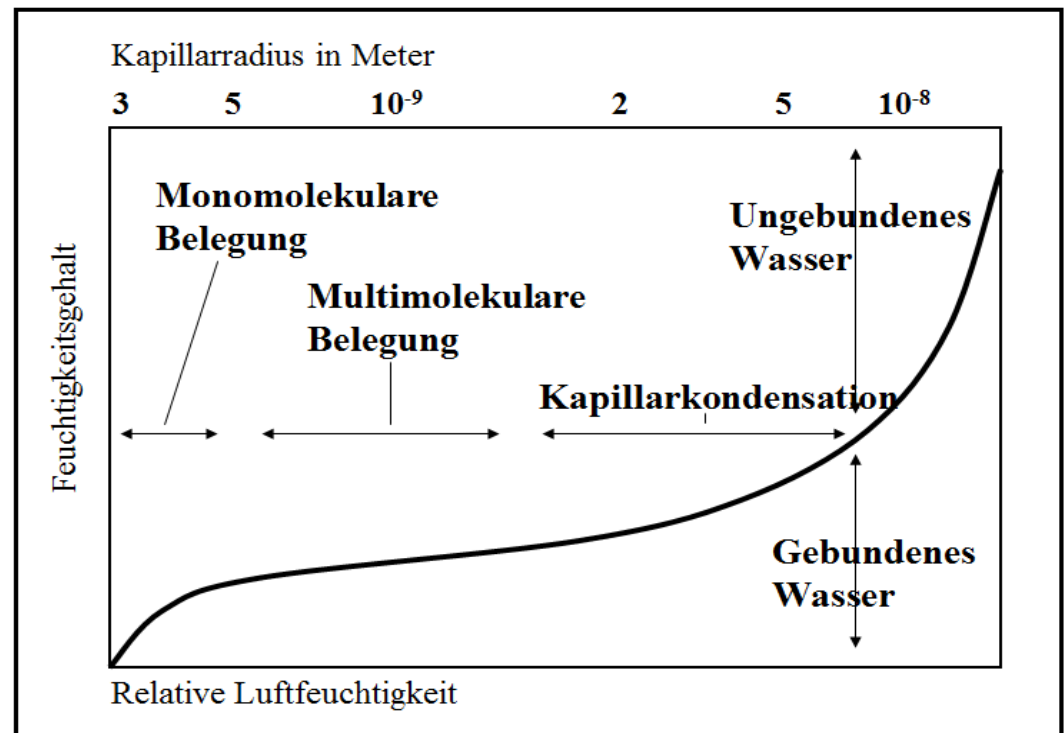


Offene Porosität unterschiedlicher Materialien



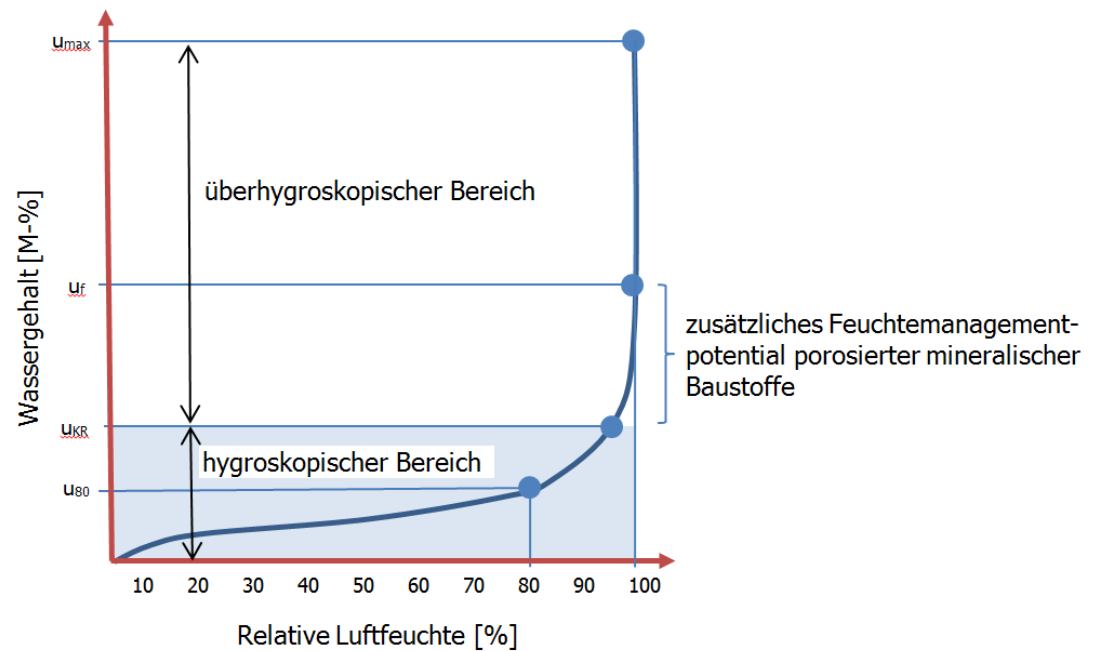
Hygroskopische Feuchtigkeit

- Kapillarkondensation
- Sorptionsprozesse
- Adsorption
- Hydratation



Sorptionsisotherme

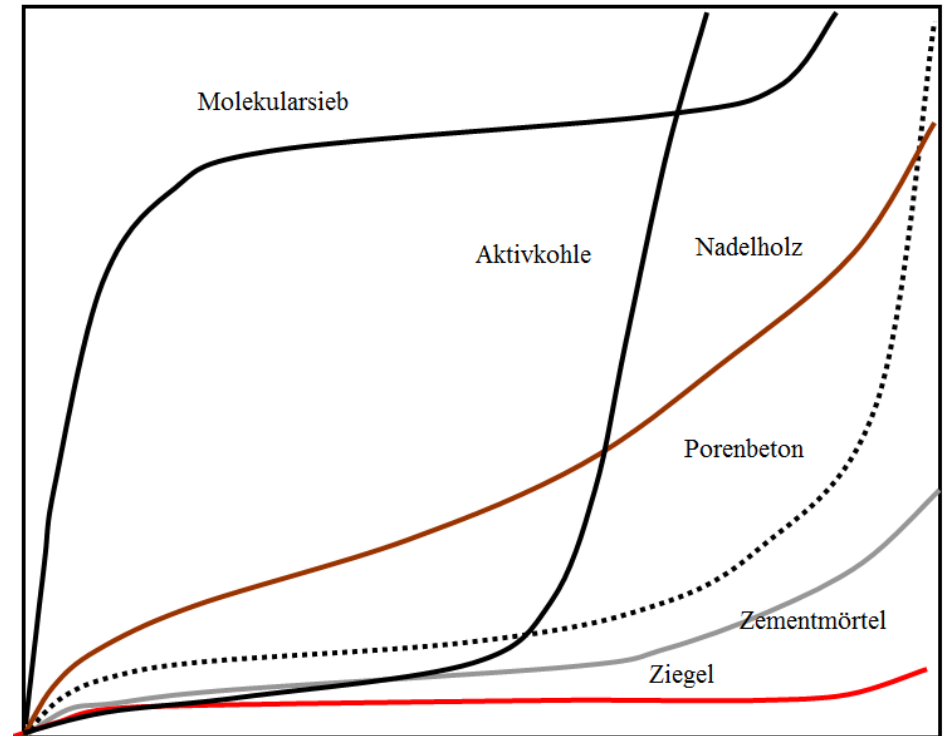
Schematische Darstellung einer typischen Sorptionsisotherme eines porierten mineralischen Baustoffs



Sorptionsisotherme

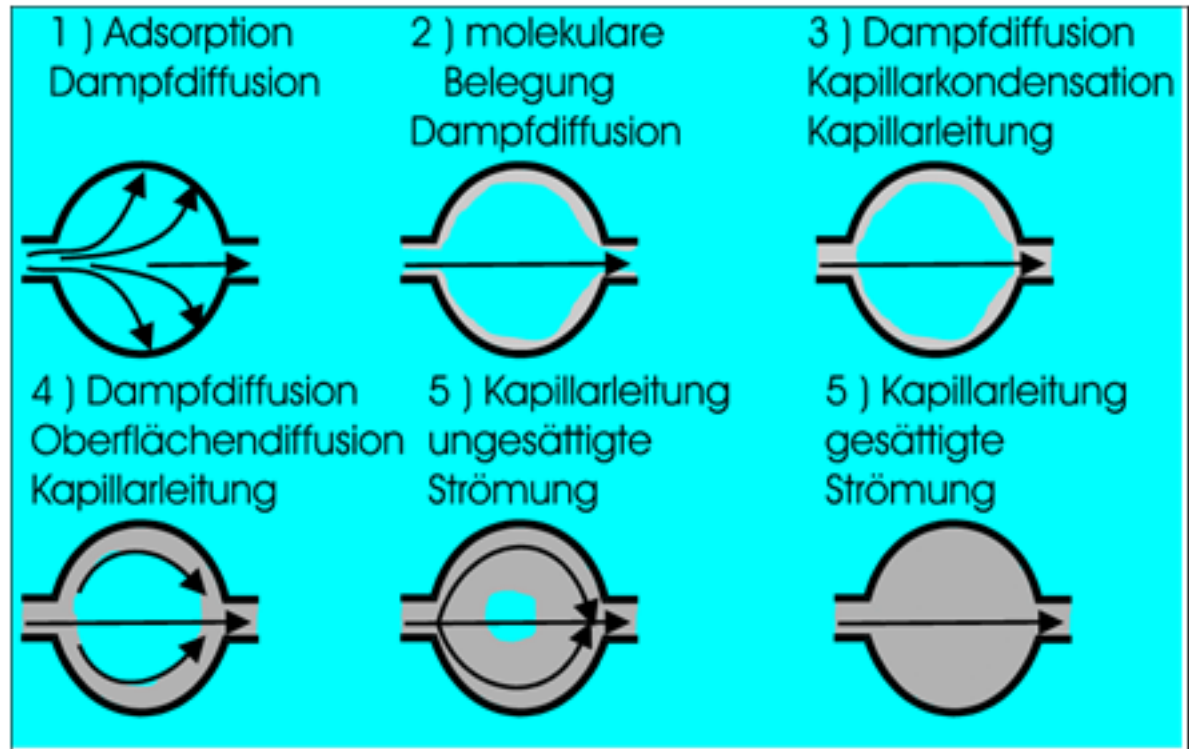
- Zementmörtel
- Mauerziegel
- Porenbeton

im Vergleich zu zwei Stoffen mit monodispersen Porensystemen (= eine Größenklasse)

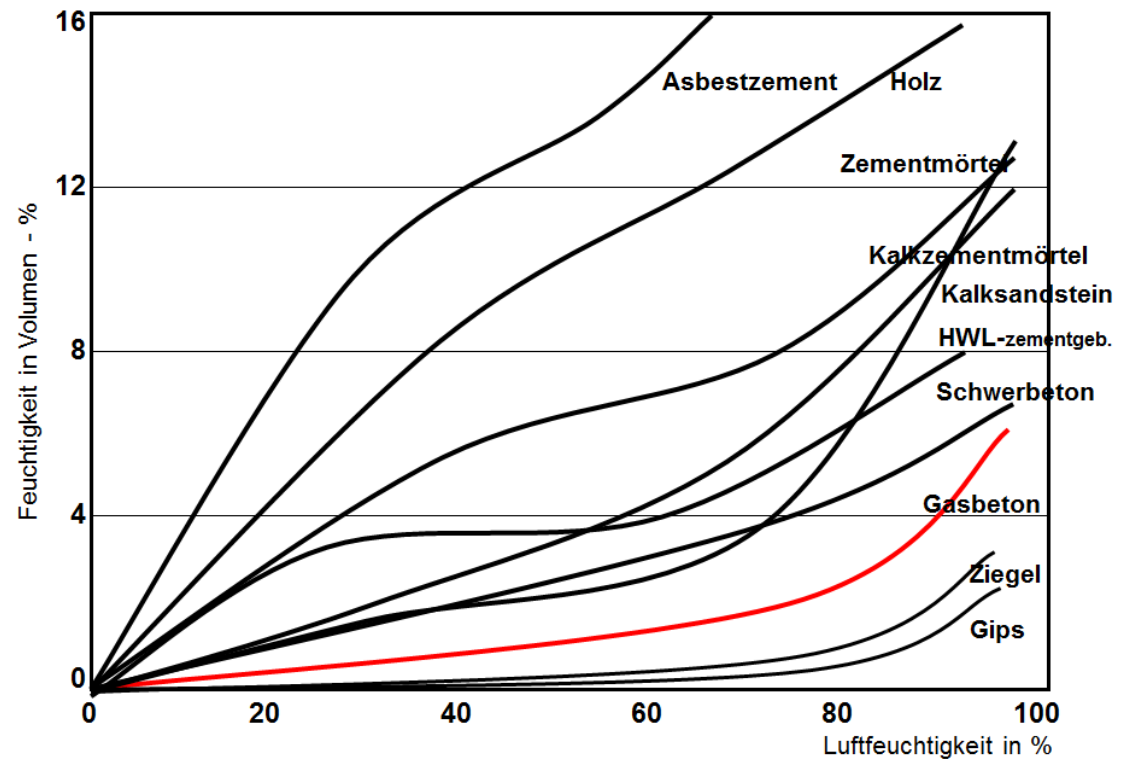


Sorptionsstadien & Transportmechanismen

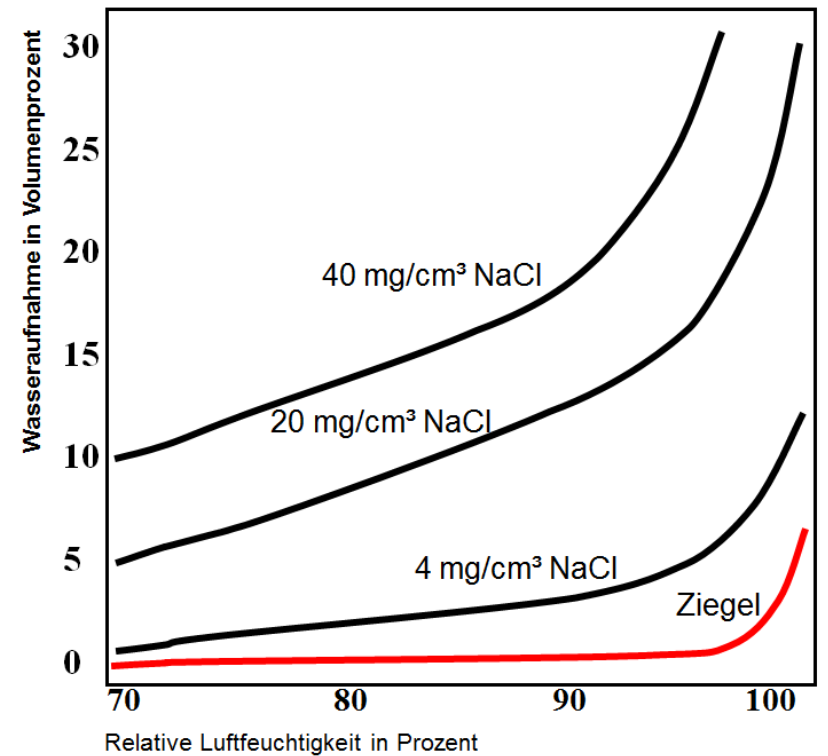
Darstellung der Sorptionsstadien und Der Transportmechanismen bei zunehmender Befeuchtung eines porösen Stoffes



Feuchtigkeitsgleich- gewichtszustände Sorptionsisotherme



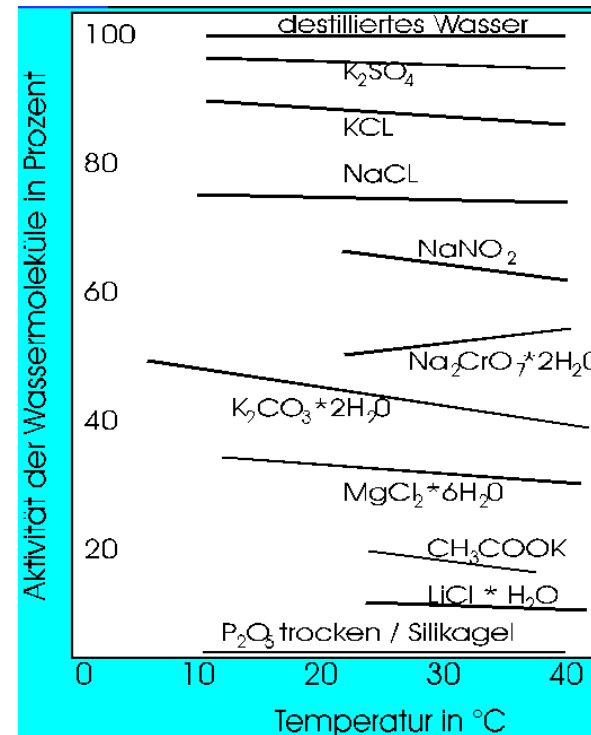
Einfluss von Salzen auf den Feuchtigkeitshaushalt



Aktivität von Salzen

Salze können Wasser anlagern und Lösungen bilden.

Je geringer das Aktivitätsniveau ist, umso stärker ist der hygroskopische Effekt



Hygroskopische Eigenschaften von Salzen

Salz	Löslichkeit g /100 ml	Aktivität - ab einer rel. LF
Na ₂ CO ₃ * 10 H ₂ O Soda	21	92
Na ₂ SO ₄ * 10 H ₂ O Glaubersalz	11	87
NaCl Kochsalz	36	75
Mg(NO ₃) ₂ * 6 * H ₂ O Magnesiumnitrat	125	53
Ca(NO ₃) ₂ * 4 * H ₂ O Calciumnitrat	266	50
K ₂ CO * 2 * H ₂ O Pottasche	147	43
MgCl * 6 * H ₂ O Magnesiumchlorid	167	33
CaCl * H ₂ O Calciumchlorid	75	29

Hygroskopische Wasseraufnahme von Ziegelsteinen mit und ohne Versalzung

Hygroskopische Wasseraufnahme von Ziegelsteinen mit und ohne Versalzung					
Salzart	Versalzungs-grad in mg/g Ziegel	Wasseraufnahme in M-%			
		20 Tage 65%r.F.	20 Tage 86%r.F.	20 Tage 97%r.F.	180 Tage 83%r.F.
		0,1	0,2	0,3	0,3
NaCl	29	1,0	5,5	9,3	9,5
NaCl	43	1,6	6,2	11,1	13,2
MgSO ₄	55	2,3	3,1	4,1	4,5
MgSO ₄	28	1,3	2,8	2,2	2,9
Ca(NO ₃) ₂	82	5,1	7,2-	10,8	12,3
Ca(NO ₃) ₂	107	5,2	9,4	12,1	12,5

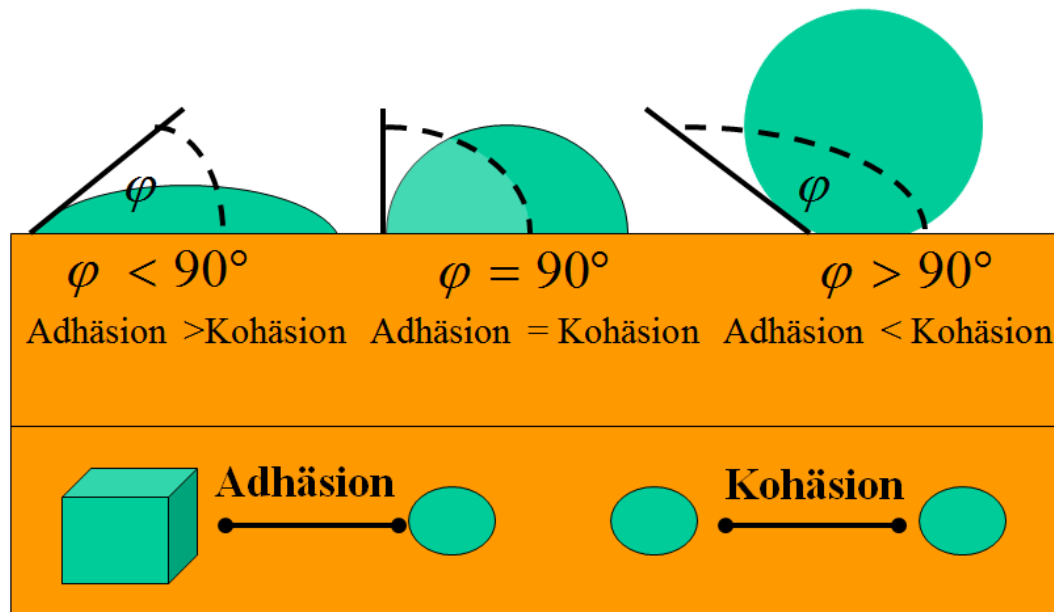
Praktischer Wassergehalt nach Cammerer

Material	Wassergehalt in Volumen-Prozent
Vollziegelwände	1,0 - 2,5
Hohlziegelwände	1,5 - 4,0
Kalksandstein	3,5 - 13,0
Bimsbaustoffe	3,5 - 13,0
Gas- u. Schaumbeton	3,5 - 13,0
Kies- u. Splittbeton	3,5 - 13,0
Innenputze	1,0 - 10,0
Außenputze	1,0 - 7,0

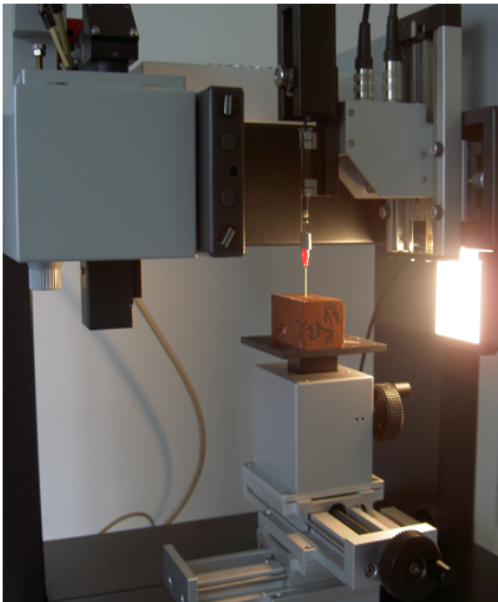
Praktische Feuchtigkeitsgehalte von Baustoffen

Baustoffe	Feuchtegehalt in V - %	Feuchtegehalt in M - %
Ziegel	1,5	-
Kalksandstein	5	-
Beton mit dichten Zuschlägen	5	-
Beton mit porigen Zuschlägen	15	-
Leichtbeton	5	-
Porenbeton	3,5	-
Gips, Anhydrit	2	-
Gußasphalt, Asphaltmastix	0	0
Mineralische Faserdämmstoffe	-	1,5
Schaumglas	0	0
Holz und Holzwerkstoffe	-	15
Schilfrohrmatten, Organische Dämmstoffe.	-	15
Pflanzliche Faserdämmstoffe	-	15
Korkdämmstoffe	-	10
Schaumkunststoffe (Polystyrol, Polyurethan)	-	5

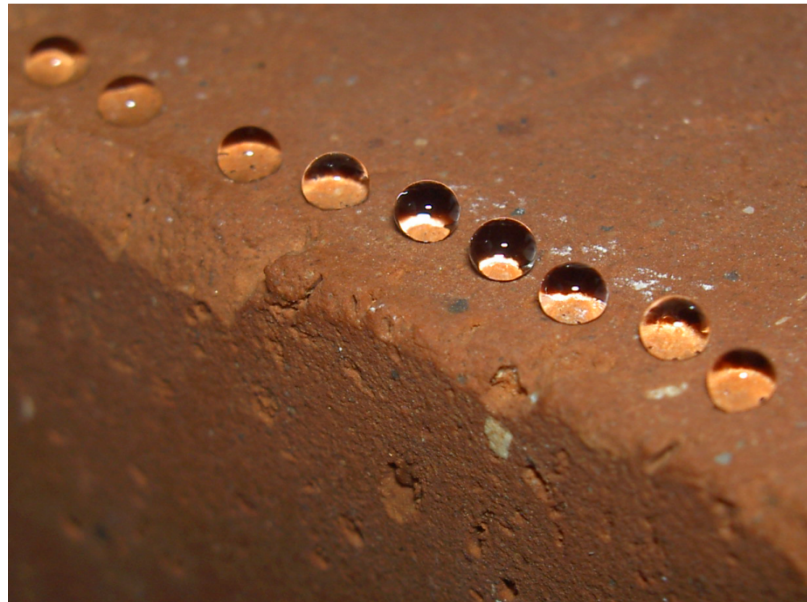
Verhalten von Flüssigkeit an der Oberfläche von Baustoffen



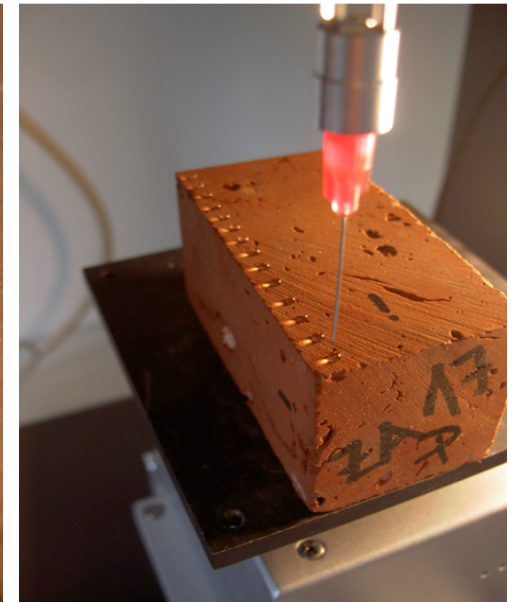
Verhalten von Flüssigkeit an der Oberfläche von Baustoffen



Messgerät DAS 100 ‚Krüss‘



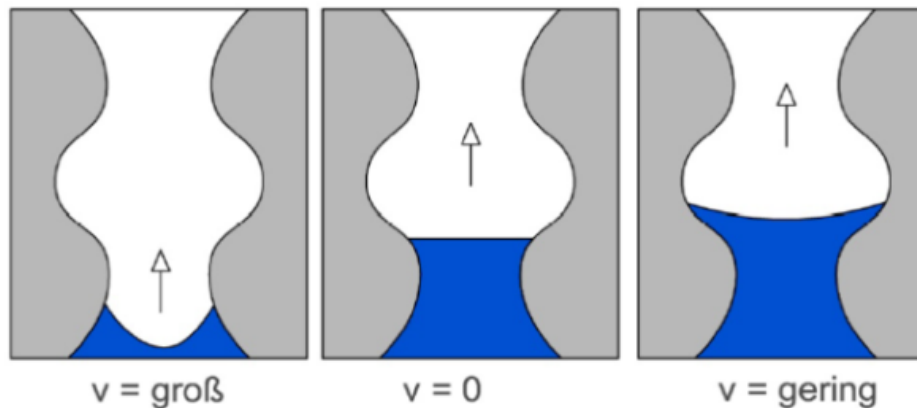
Wassertropfen auf behandelter Ziegelprobe



Dosiersystem setzt Tropfen mit definiertem Volumen ab

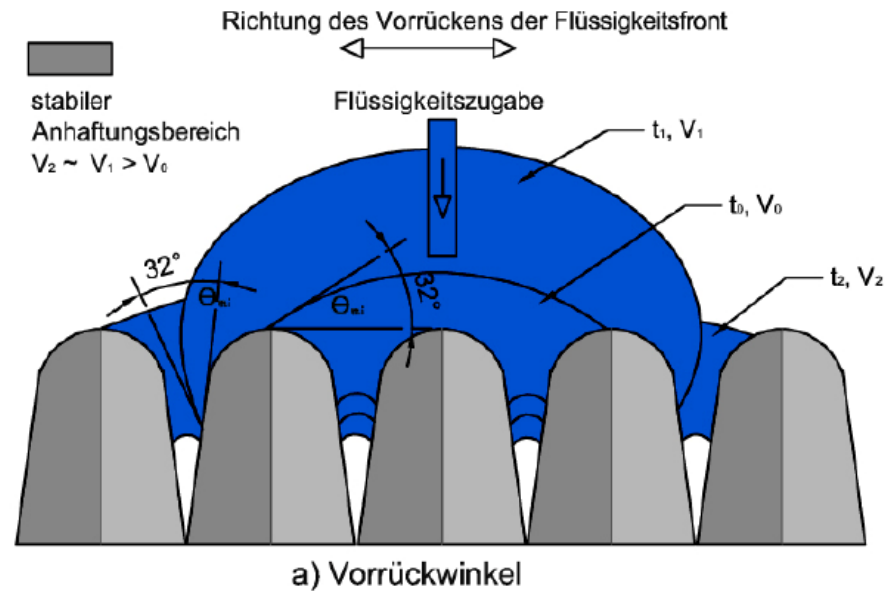
Flüssigkeit - Feststoff

Oberflächenspannung, Rauhigkeit, Porosität,
Kapillarität, Homogenität, Chemische Zusammensetzung, ..



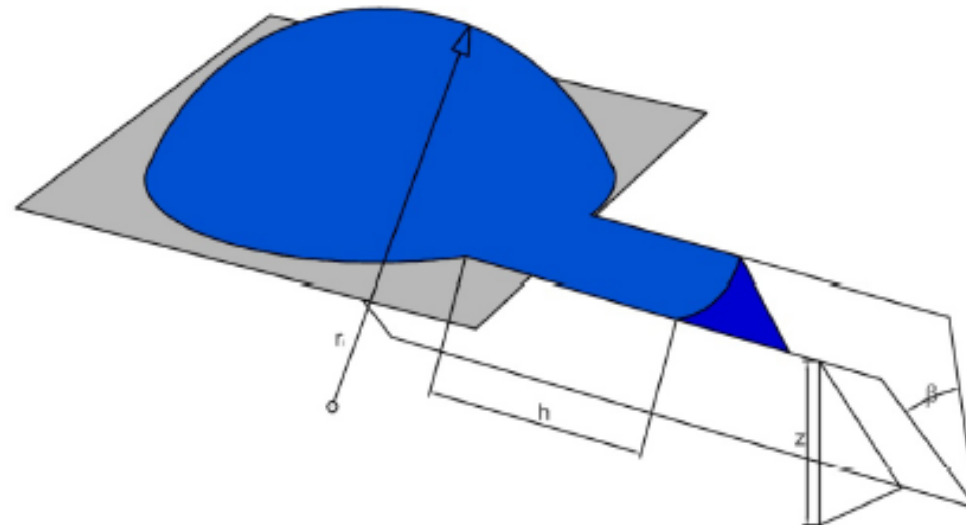
Kapillare
Steiggeschwindigkeit bei
unterschiedlicher Neigung
der Kapillarwand

Flüssigkeit - Feststoff



Rauhigkeitseinflüsse
auf den
makroskopischen
Vorrückwinkel

Flüssigkeit - Feststoff



Kapillare Kraft- und Druckverhältnisse und Steighöhe

Kapillarkraft

$$F_{\text{kapillar}} = 2 \cdot \pi \cdot r_{\text{kapillar}} \cdot \sigma \cdot \cos(\vartheta)$$

ϑ – Benetzungswinkel

σ – Oberflächenspannung

Kapillardruck

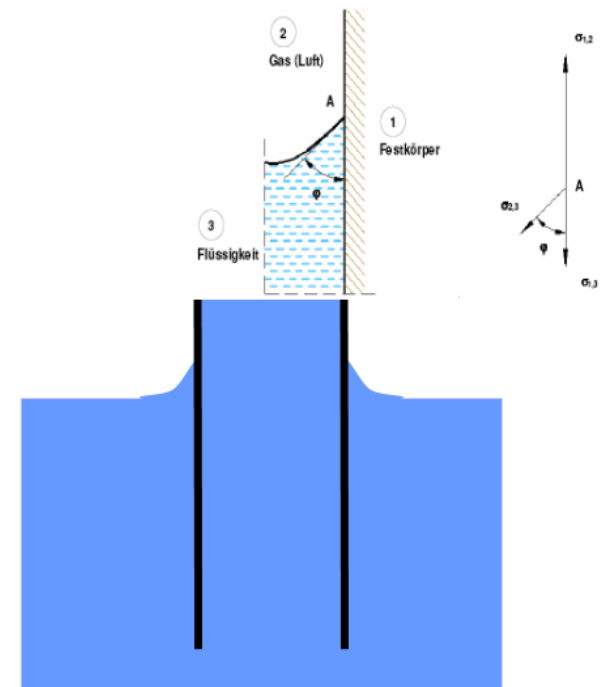
$$p_{\text{kapillar}} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos(\vartheta)}{r_{\text{kapillar}}}$$

Kapillare Steighöhe

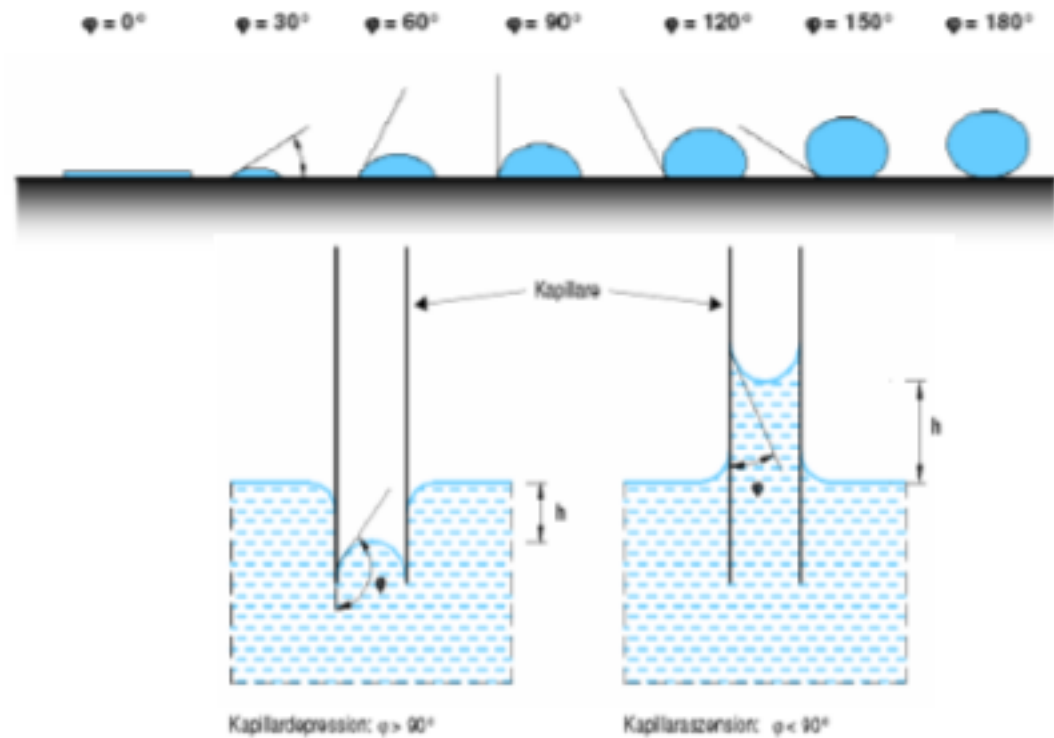
$$h_{\text{kapillar}} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos(\vartheta)}{r_{\text{kapillar}} \cdot \rho \cdot g}$$

ρ – Dichte des Wassers

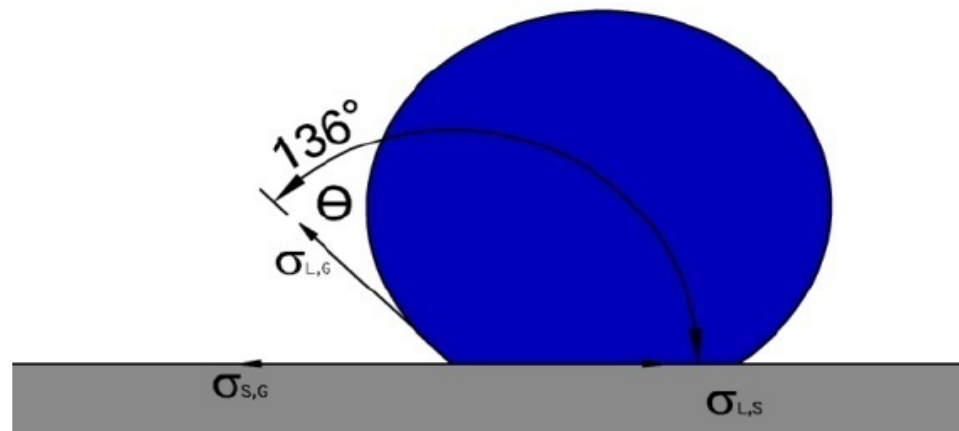
g – Erdbeschleunigung



Kapillare Kraft- und Druckverhältnisse und Steighöhe

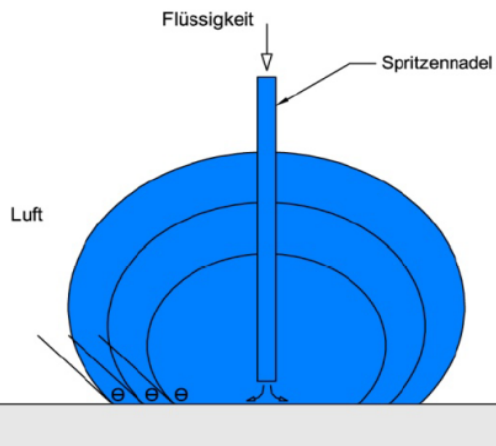


Statische Messung

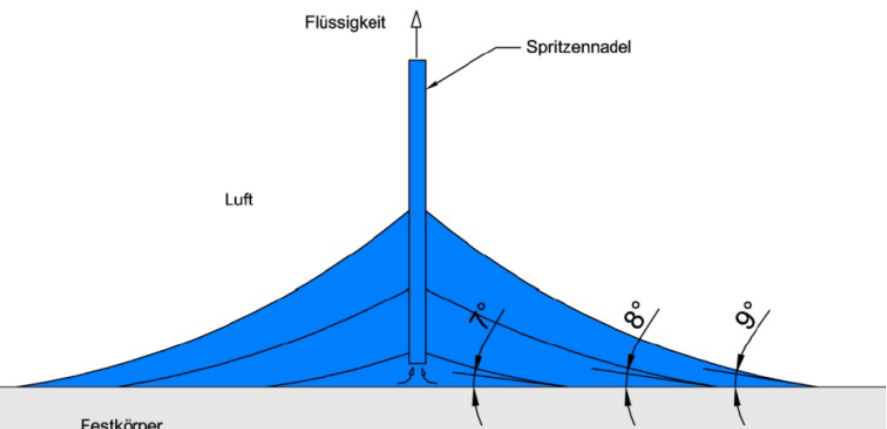


Dynamische Messung

Vorrückwinkel



Rückzugswinkel



Auswertung

- 1) Fotografische Erfassung des Tropfens
- 2) grafisch-mathematische Analyse der Tropfenkontur
- 3) mathematische Modelle zur Berechnung des Kontaktwinkels

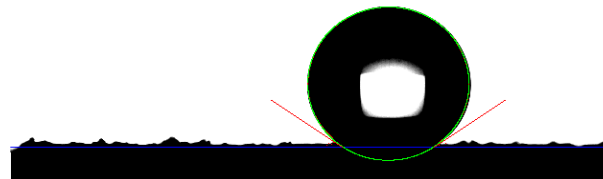
Auswertung

CA [L] 146.5
CA [R] 146.6

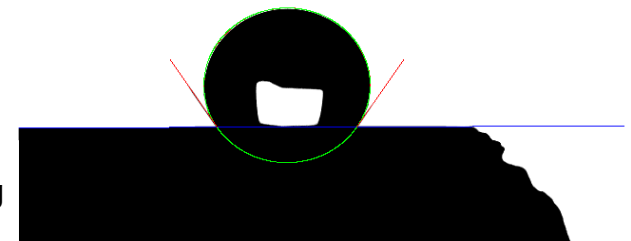
CA [L] 123.3
CA [R] 123.5



Anwendung des Kreissegmentverfahren zur Kontaktwinkelermittlung sinnvoll



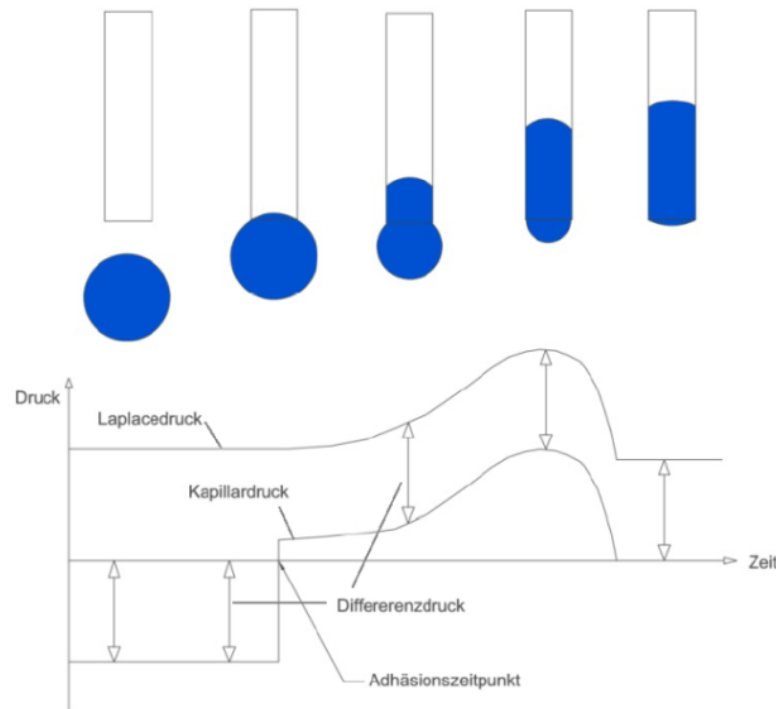
Höchste Genauigkeit durch die Anwendung des Young-Laplace Verfahrens



Auswertung anhand des Tangenten-, Höhen-Breiten- oder Young-Laplace-Verfahrens sinnvoll

Kapillare Kraft- und Druckverhältnisse und Steighöhe

Druckverläufe beim Eindringen einer nicht benetzenden Flüssigkeit in eine Kapillare





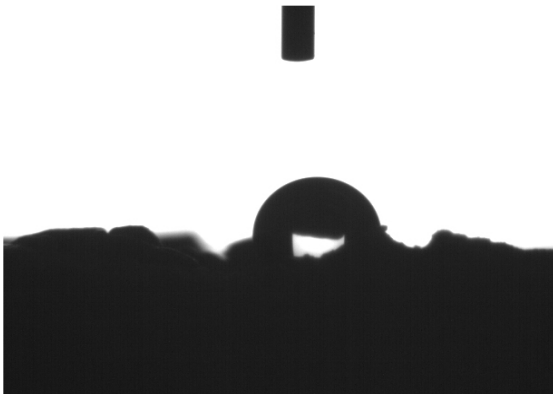
Kräftegleichgewicht zwischen Nadel und Feststoffoberfläche bei zu kleinem Tropfen



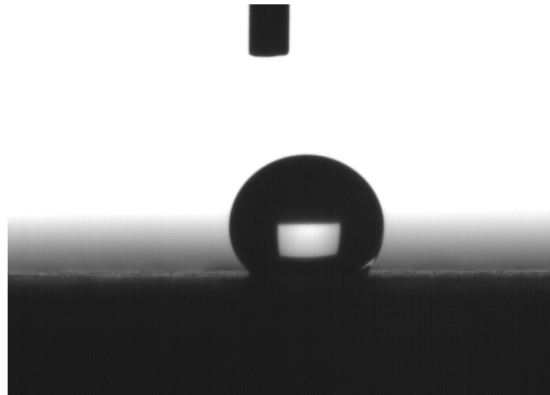
Verhältnis Tropfengröße zu Bohrmehlschichtstärke



Auswertbarkeit auch bei nicht horizontalen Probenoberflächen gegeben



Extreme Oberflächenrauigkeiten
beeinflussen die Messgenauigkeit



Typische Tropfenausbildung



Migration von Bohrmehl in die Flüssigkeits-
oberfläche beim Absetzen des Tropfens

Kapillare Steighöhen

$$h_{\text{kapillar}} = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos(\vartheta)}{r_{\text{kapillar}} \cdot \rho \cdot g}$$

$$\sigma = 72 \cdot 10^{-3} \frac{\text{N}}{\text{m}}$$

$$\vartheta = 90^\circ$$

$$\rho = 1000 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m} / \text{s}^2$$

$$h_{\text{kapillar}} = \frac{1,468 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2}{r_{\text{kapillar}}}$$

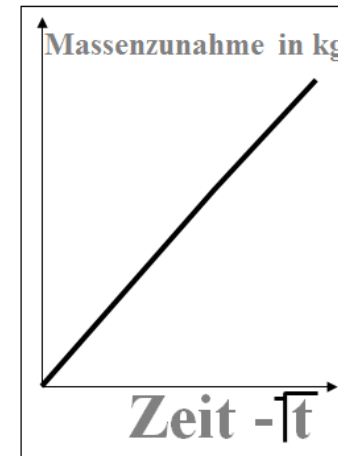
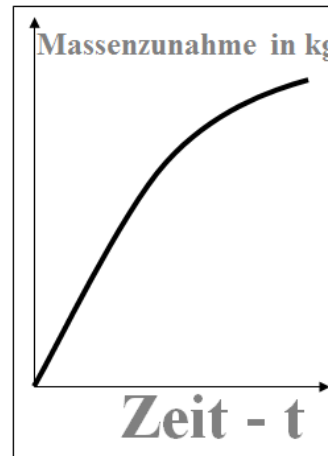
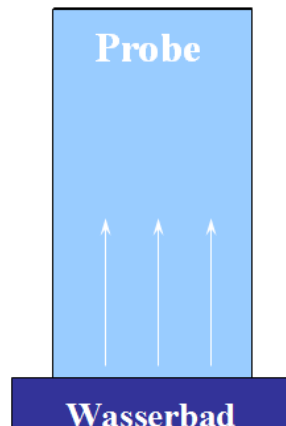
$$h_{\text{kapillar}} = \frac{0,01469 \text{ m} \cdot \text{mm}}{r_{\text{kapillar}}}$$

h_{kapillar}	r_{kapillar}	
1,46 mm	10 mm	
1,46 cm	1 mm	Porenbeton
14,6 cm	0,1 mm	Porenbeton
1,46 m	0,01 mm	Mörtel
14,6 m	0,001 mm	Ziegel
146 m	0,0001 mm	Beton
1,460 km	0,00001 mm	

Wassertransport durch kapillar aktive Bauteile

Wasseraufnahmekoeffizient

$$\frac{\text{Masse}(H_2O)}{A} = w * \sqrt{t}$$



Wassertransport durch kapillar aktive Bauteile Wasseraufnahmekoeffizient



Flüssigkeitstransport durch kapillar aktive Bauteile



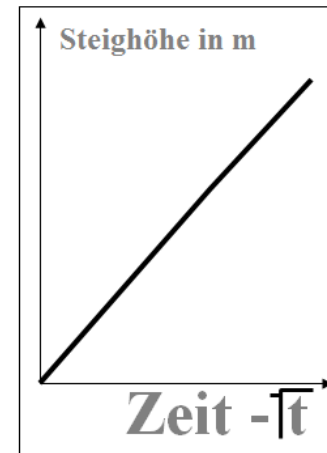
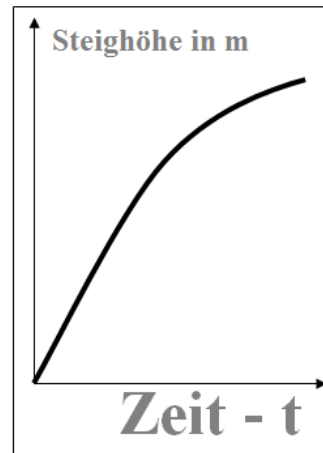
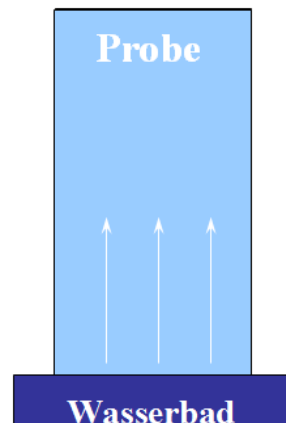
Wasseraufnahmekoeffizient von Baustoffen

Tabelle Wasseraufnahmekoeffizient von Baustoffen	
Baustoffe	Wasseraufnahmekoeffizient in $\text{kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0,5}$
Ziegel (1700 kg/m^3)	25
Ziegel (2200 kg/m^3)	3
Kalksandstein (1600 kg/m^3)	8
Kalksandstein (1900 kg/m^3)	3
Schwerbeton	1 – 2
Porenbeton	4 – 8
Gipsbauplatten (900 kg/m^3)	70
Gipsbauplatten (600 kg/m^3)	35
Kalkzementputz	2 – 4
Zementputz	1 – 3
Kunststoffdispersionsbeschichtung	0,05 - 0,2

Wassertransport durch kapillar aktive Bauteile

Wassereindringkoeffizient

$$h = B * \sqrt{t}$$



Wassereindringkoeffizient von Baustoffen

Wassereindringkoeffizient von Baustoffen	
Baustoff	Wassereindringkoeffizient in $\text{m} / \text{h}^{0,5}$
Ziegel (1700 kg/m^3)	0,14
Ziegel (2200 kg/m^3)	0,005
Kalksandstein (1600 kg/m^3)	0,065
Kalksandstein (1900 kg/m^3)	0,02
Schwerbeton	0,005
Porenbeton	0,05
Gipsbauplatten (900 kg/m^3)	0,13
Gipsbauplatten (600 kg/m^3)	0,11
Kalkzementputz	0,08
Zementputz	0,02

Hygrische Kennwerte von Baustoffen für Speicherung und Transport

Unter Wasserspeicherung versteht man den Gehalt an Wasser oder Feuchtigkeit, den ein Baustoff durch unterschiedliche Prozesse aufgenommen hat und der in Masse- oder Volumenprozent angegeben wird. **Der Feuchtigkeitsgehalt** wird angegeben in

$$u \text{ in Masse} - \% = \frac{m_{H_2O}}{m_{TrockenmassedesBaustoffs}}$$

und

$$u \text{ in Volumen} - \% = \frac{V_{H_2O}}{V_{Baustoff}}$$

Hygroskopischer Feuchtigkeitsgehalt

- Kommt ein Baustoff in Kontakt mit der in der Luft enthaltenen Luftfeuchtigkeit, so sorbiert er den **hygroskopischen Feuchtigkeitsgehalt**.

Wasserkapazität

- Kommt ein Baustoff mit Wasser in Berührung, so können die Kapillaren auf Grund der ihnen eigenen Kapillarkräfte Wasser aufsaugen. Der Baustoff nimmt nach ausreichend langer Zeit einen Feuchtigkeitsgehalt an, der als freie Wassersättigung oder als **Wasserkapazität**.

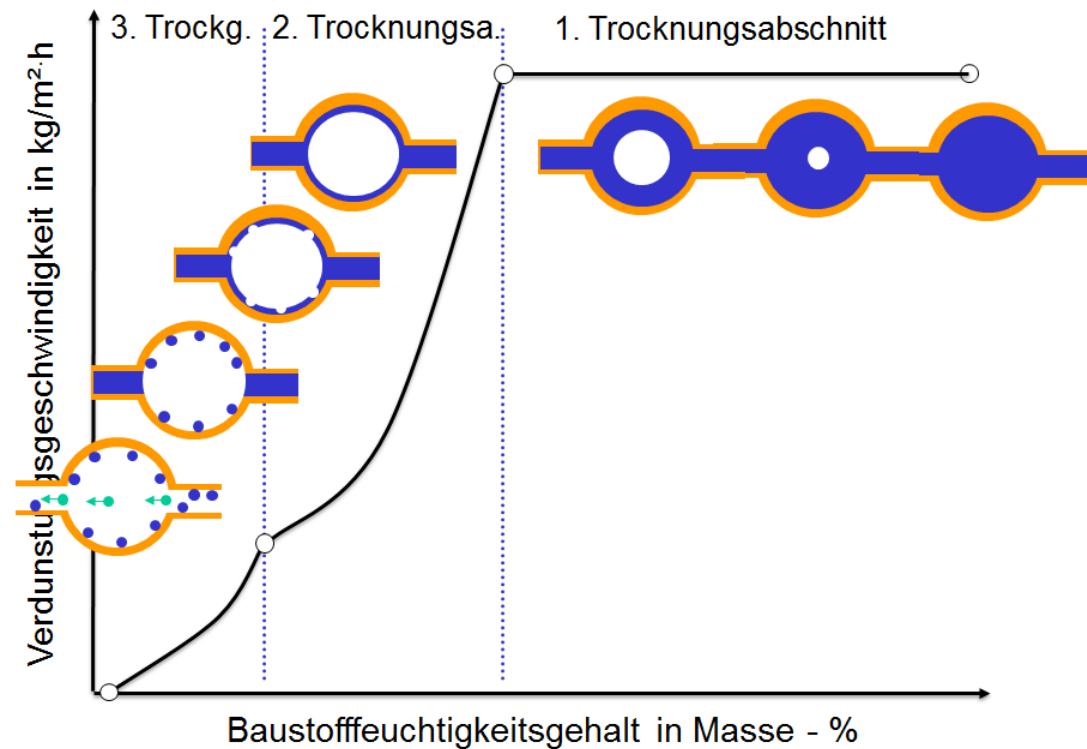
Maximaler Wassergehalt

- Lagert man eine Baustoffprobe sehr lange unter Wasser, erzeugt man über der Wasseroberfläche einen Unterdruck oder erhitzt man bei der Wasserlagerung das Wasserbad auf Siedetemperatur, so kann man die verbleibende Luft austreiben und der Baustoff nimmt den Sättigungsfeuchtigkeitsgehalt, den sogenannten **maximalen Wassergehalt** an.
- Dieser Wert entspricht in etwa dem gesamten freien , d.h. von außen zugänglichen Porenraum eines Baustoffs.

Kritischer Feuchtigkeitsgehalt

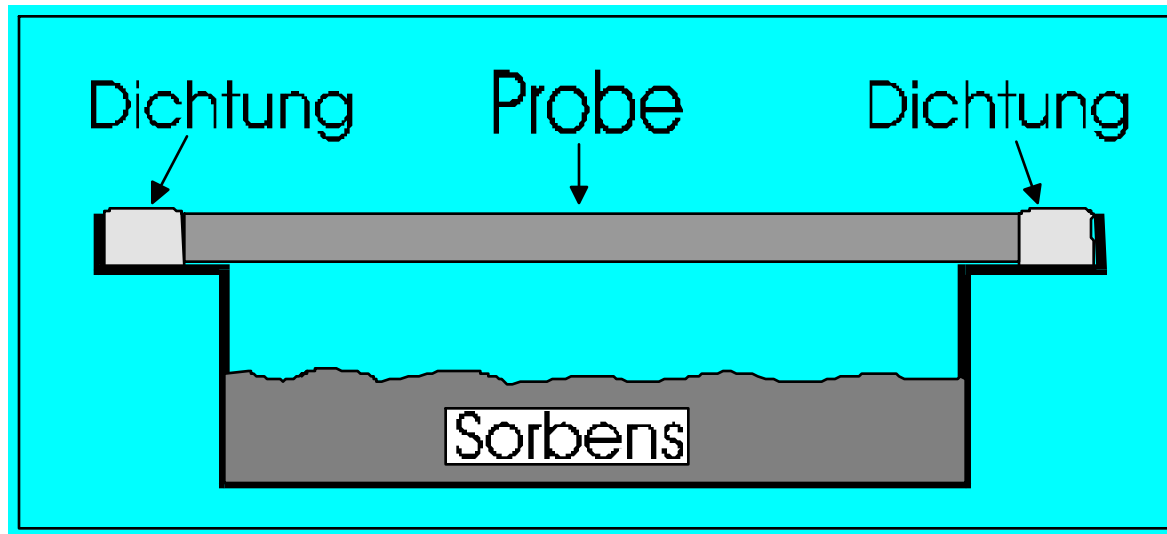
- Eine weitere wichtige Größe ist der sogenannte **kritische Feuchtigkeitsgehalt**.
- Es sind durchgehende, Wasser gefüllte Kapillaren vorhanden.
- Unter diesem Feuchtegehalt ist kein kapillarer Feuchtetransport möglich.
- Ein Baustoff mit einem kleinen kritischen Feuchtigkeitsgehalt trocknet schneller aus als ein Baustoff mit einem hohen kritischen Feuchtigkeitsgehalt.

Trocknungsverlauf eines Baustoffs

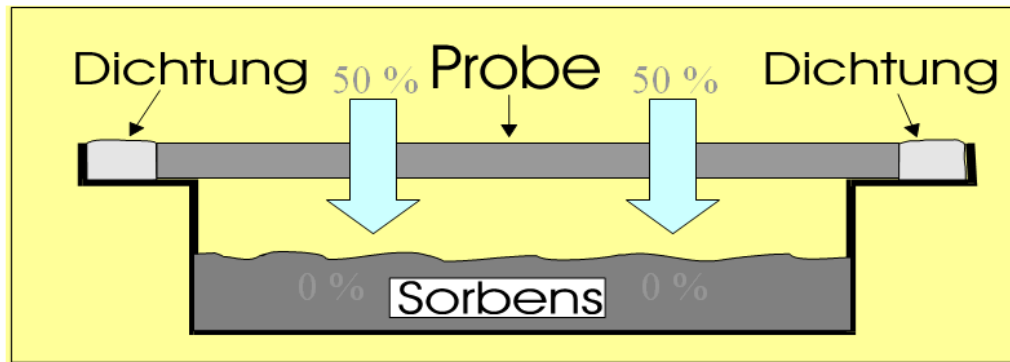


Material	Maximaler Wassergehalt in V-%	Wasserkapazität in V-%	Kritischer Wassergehalt in V-%
Ziegel	42	30	5
Porenbeton	73	34	18
Kalksandstein	25	21	14
Kalkzementputz	30	20	12
Beton(Kies)	14	11	7
Beton(calcitisch)	19	13	9

Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit von Dämmstoffen

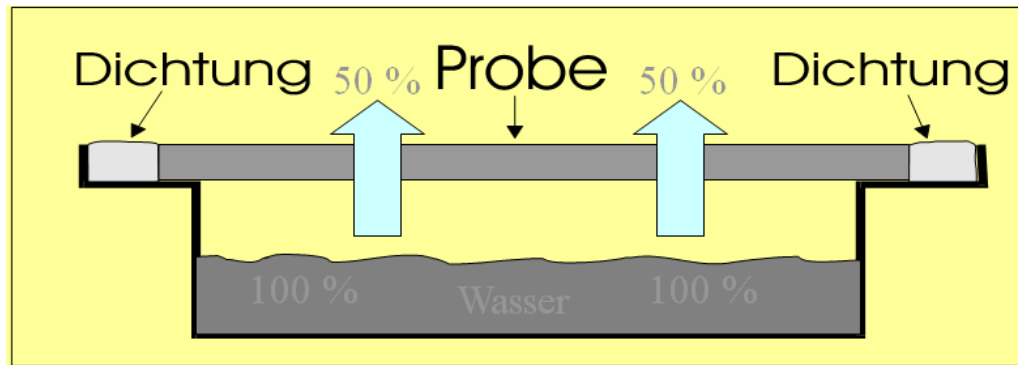


Dry cup - Methode



	Keramik	Klinker	Fliesen
Diffusions- widerstands- koeffizient	50...100.....200	5.....10.....30	50...200....3000

Wet cup - Methode

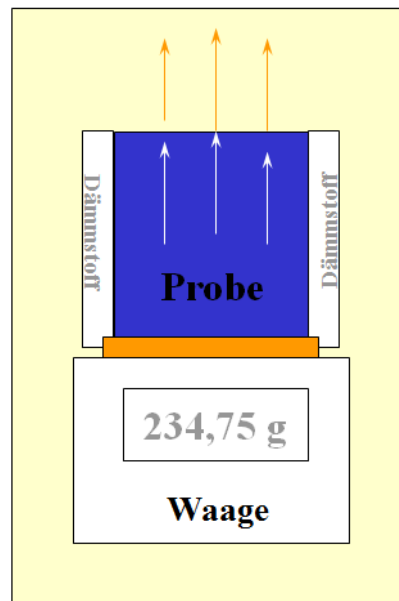


	Keramik	Klinker	Fliesen
Diffusions- widerstands- koeffizient	50...100.....200	5.....10.....30	50...200....3000

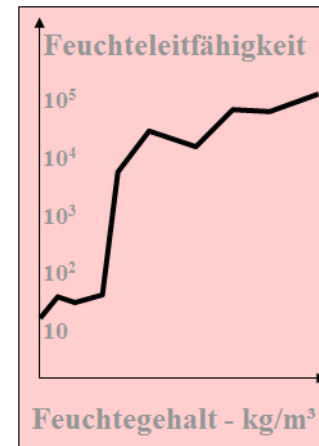
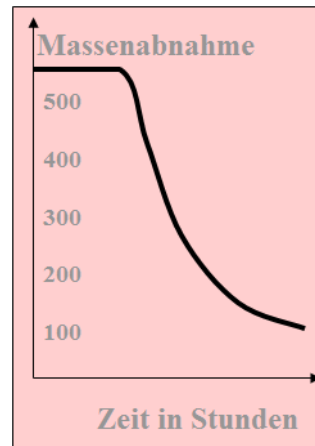
Baustoff	Diffusions- widerstandszahl	Übliche Schichtstärke	Äquivalente Luftschichtdicke
Aluminiumfolie	2000000	0,0002 m	400 m
Öllackfilm	23000	0,00015 m	3,45 m
Dispersionsfilm	6000	0,0002 m	1,2 m
Klinker	420	0,25 m	100,8 m
Kunstharzputz	140	0,002 m	0,28 m
Holz	30	0,025	0,75 m
Beton	30	0,15 m	4,5 m
Polystyrol	30	0,06 m	1,8 m
Zementputz	20	0,025 m	0,5 m
Kalkputz	11	0,025 m	0,275 m
Ziegel	9	0,25 m	2,16 m
Porenbeton	6	0,30 m	1,8 m
Bimsbeton	5	0,24 m	1,2 m
Mineralwolle	1	0,06 m	0,06 m

Diffusionswiderstandszahl von Sandsteinen	
Sandstein	-
Eichenbühler Roter Mainsandstein – senkrecht zur Schichtung	45
	47
	49
Eichenbühler Roter Mainsandstein – parallel zur Schichtung	30
	31
	31
Bucher Sandstein - senkrecht zur Schichtung	11,8
	11,8
	12,0
Bucher Sandstein - parallel zur Schichtung	8,9
	13,5
	9,2

Wasserverdunstung durch Diffusion und kapillaren Wassertransport



$$\frac{\text{Masse (H}_2\text{O)}}{\text{Fläche}} = F(u, t)$$



Verdunstung von Feuchtigkeit an Oberflächen poröser Stoffe

Übergangs- bedingung	Wasserdampf- übergangskoeffizient in g / dyn · s	Verdunstungsmenge in g/cm ² *s 20 °C / 100 % bis 20 °C / 50 %
Innenräume	$0,30 \times 10^{-6}$	$2,9 \times 10^{-6}$
Windstille im Freien	$0,92 \times 10^{-6}$	$8,7 \times 10^{-6}$
Wind von 5 m/s	$1,75 \times 10^{-6}$	$17,0 \times 10^{-6}$
Wind von 25 m/s	$7,9 \times 10^{-6}$	$70,0 \times 10^{-6}$

Übersicht

- Allgemeines
- Porenstruktur von Baustoffen und ihre Eigenschaften
- **Verwitterungsprozesse**
- Kondensationsprozesse
- Befeuchtungsprozesse
- Deformationsprozesse

Verwitterungsprozesse

- Mechanische Verwitterung
- Chemische Verwitterung
- Metallische Verwitterung
- Biologische Verwitterung

Mechanische Verwitterung

- Frost - Tau – Wechsel
- Kristallisation von Salzen
- Hydratationsdruck
- Spannungen durch thermisches und hygrisches Dehnen
- Auswaschen und Ausspülen

Chemische Verwitterung

- Umwandlung von wasserunlöslichen Salzen in wasserlösliche durch Feuchte und Fremdstoffe
- Schichtenbildung durch chemische Prozesse

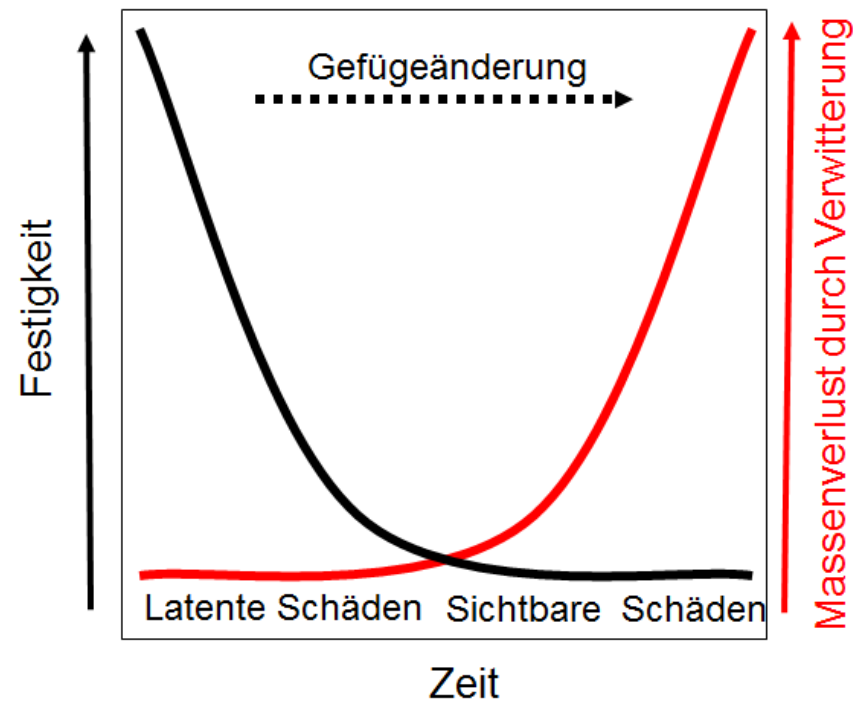
Metallische Verwitterung

- Carbonatisierung
- elektrochemische Prozesse durch minimale Materialunterschiede, Umgebungsbedingungen und Belüftungsverhältnisse

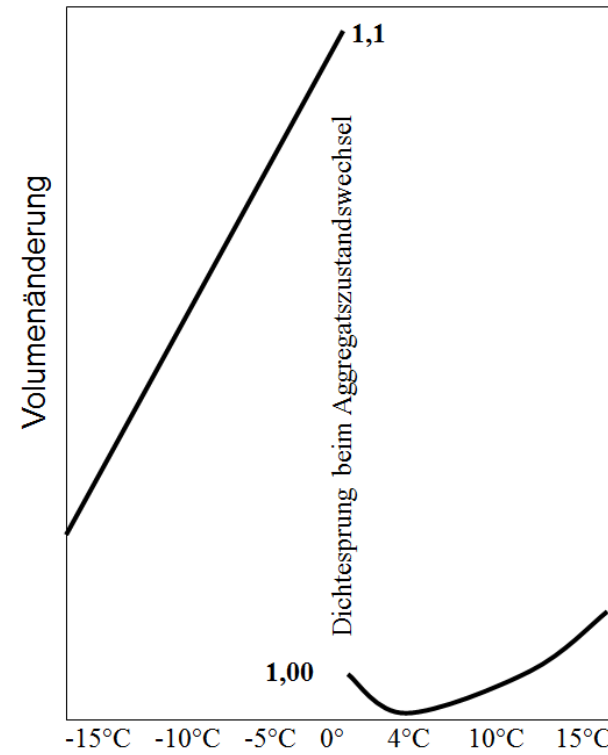
Biologische Verwitterung

- Veränderung des Feuchtehaushaltes durch Bewuchs und Besiedelung
- Wurzeldruck und Schadstoffeintrag durch pflanzliche und tierische Ausscheidungen
- Stoffzersetzung und -umwandlung durch Algen, Pilze, und Bakterien

Ablauf einer Gesteins- schädigung im Verlauf von Jahrzehnten und Jahrhunderten

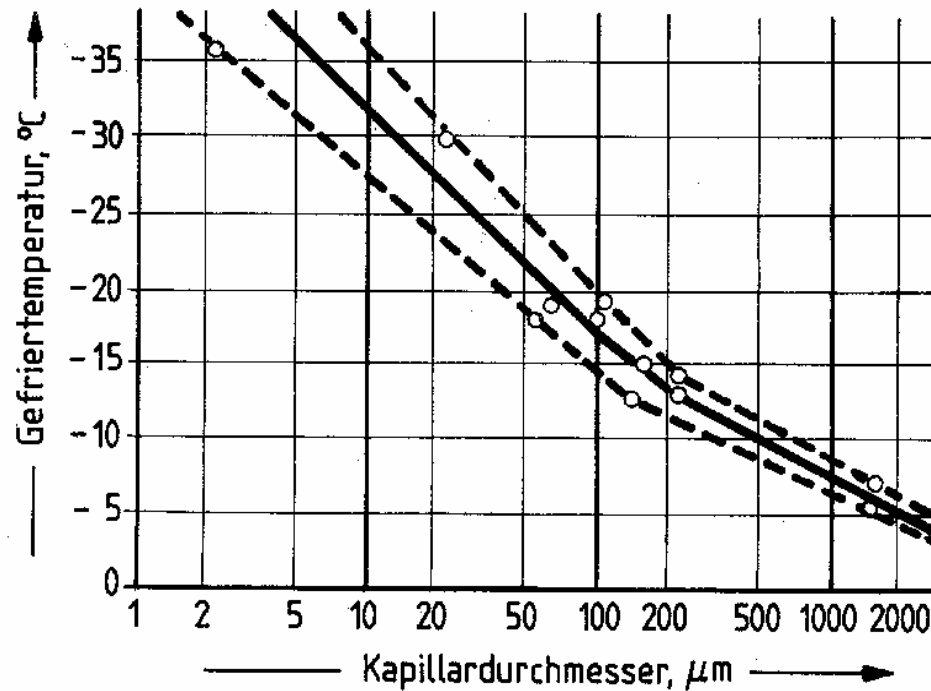


Volumenänderung bei einem Frost-Tau-Wechsel

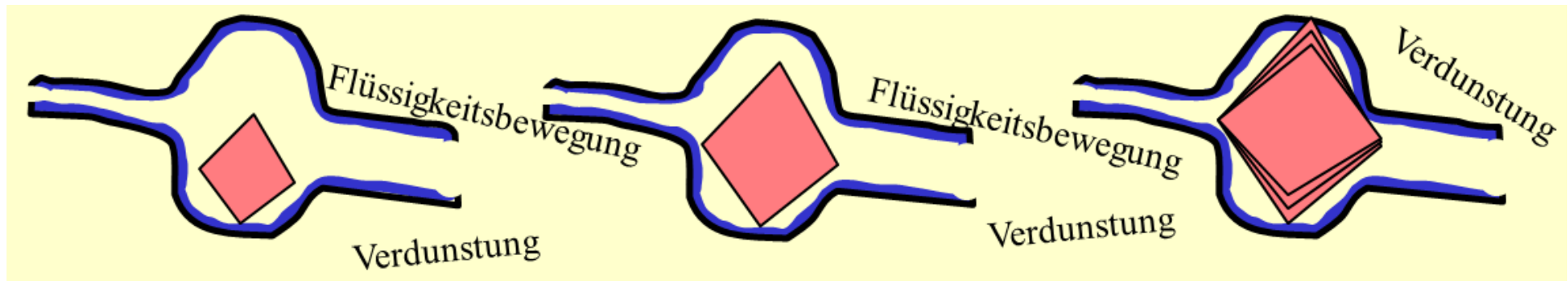


Frost-Tau-Wechsel

Abhängigkeit des
Gefrierpunktes vom
Porendurchmesser

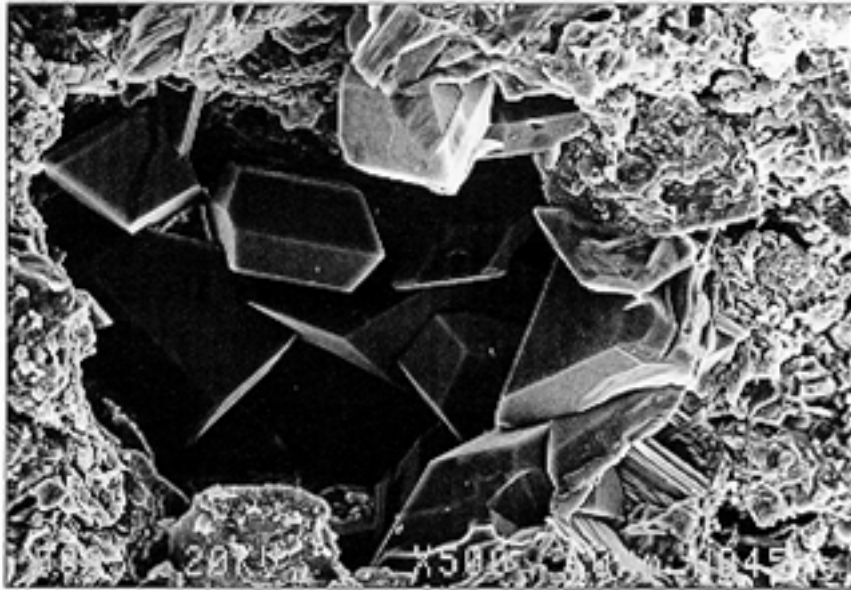


Kristallwachstum und Entwicklung von Kristallisationsdruck



Salzausblühungen



Anhydrit	 REM-Aufnahme des Gipskristallwachstums in der Pore eines bewitterten Ziegelsteins	38,9 N/mm ² (20°C)
Dodekahydrat		8,0 N/mm ² (20°C)
Epsomit		12,5 N/mm ² (20°C)
Gips		33,4 N/mm ² (20°C)
Halit		65,4 N/mm ² (20°C)
Heptahydrat		11,9 N/mm ² (20°C)
Hexahydrat		14,1 N/mm ² (20°C)
Kieserit		32,4 N/mm ² (20°C)
Natron		9,2 N/mm ² (20°C)
Thermonatrit		33,3 N/mm ² (20°C)

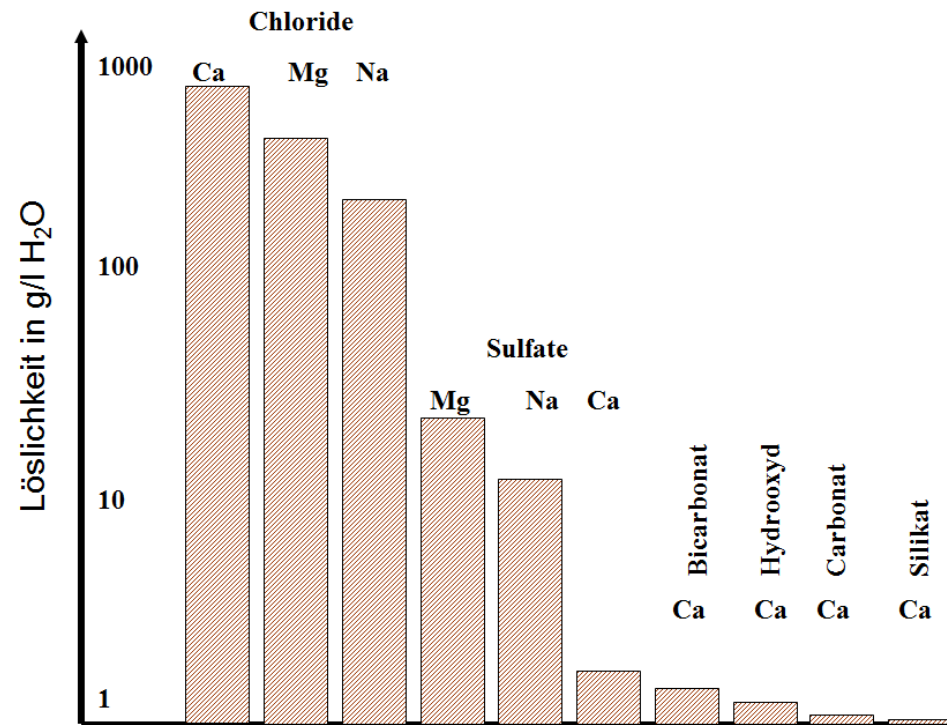
wichtige bauschädliche Salze

Salzgruppe	Chem. Formel	Name	Löslichkeit in g/l	Kristallisations- druck in N/mm ²
	$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	Bittersalz	710	41,5
Sulfate	$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Gips	2,4	111
	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	Glaubersalz	110	27,7
	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$	Ettringit		
	$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	Magnesiumnitrat	1250	
Nitrate	$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	Calciumnitrat	2660	
	$5\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{NH}_4\text{NO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Kalksalpeter	266	
Chloride	$\text{CaCl}_2 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	Calciumchlorid	750	
	NaCl	Kochsalz	360	65,4
	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Soda	210	30,8
Carbonate	K_2CO_3	Pottasche	1120	
	CaCO_3	Kalk	0,015	

Löslichkeit von Salzen in Wasser

Löslichkeit von Salzen in Wasser			
		100 ml Wasser (kalt)	100 ml Wasser (warm)
CaCO_3	Calciumcarbonat, Kalk	0,0015 g	0,0019 g
CaCl_2	Calciumchlorid	75 g	159 g
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4 \text{H}_2\text{O}$	Calciumnitrat, Salpeter	266 g	660 g
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	Calciumnitrat	121 g	376 g
$\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Calciumsulfat, Gips	0,24 g	0,22 g
CaF_2	Calciumfluorid	0,002 g	0,002 g
K_2CO_3	Kaliumcarbonat, Pottasche	112 g	156 g
$\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$	Kaliumcarbonat, Dihydrat	147 g	331 g
$2 \text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 3 \text{H}_2\text{O}$	Kaliumcarbonat, Trihydrat	129 g	268 g
$\text{MgSO}_4 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$	Magnesiumsulfat, Bittersalz	71 g	91 g
$\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	Magnesiumchlorid	167 g	367 g
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$	Magnesiumnitrat	125 g	---
$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	Natriumsulfat, Glaubersalz	11 g	92 g
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$	Natriumcarbonat, Soda	21 g	420 g
NaCl	Natriumchlorid, Kochsalz	96 g	39 g
NaF	Natriumfluorid	4 g	---
BaSO_4	Bariumsulfat	0,0002 g	0,0004 g
PbSO_4	Bleisulfat	0,004 g	0,005 g
PbCl_2	Bleichlorid	1 g	3 g

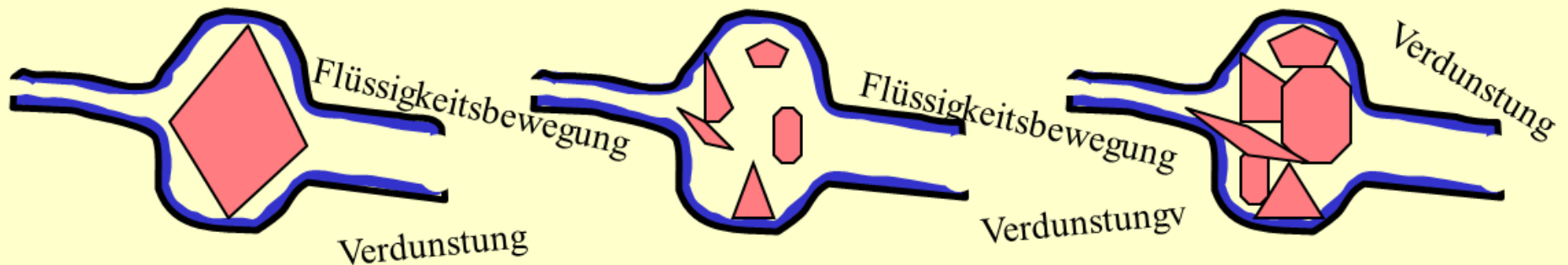
Löslichkeit von Salzen in Wasser



Kristallisationsdruck der wichtigsten bauschädlichen Salze

Kristallisationsdruck der wichtigsten bauschädlichen Salze					
Chemische bezeichnung	Mol- volumen	Kristallisationsdruc k bei C/Cs = 2		Kristallisationsdruck bei C/CS = 10	
		0 ° C	50 ° C	0 ° C	50 ° C
CaSO ₄ *1/2*H ₂ O	46	33,5	39,8	112,0	132,5
CaSO ₄ *2*H ₂ O	55	28,2	33,4	93,8	111,0
MgSO ₄ *7*H ₂ O	147	10,5	12,5	35,0	41,5
MgSO ₄ *6*H ₂ O	130	11,8	14,1	39,5	49,5
MgSO ₄ *1*H ₂ O	57	27,2	32,4	91,0	107,9
NaSO ₄ *10*H ₂ O	220	7,2	8,3	23,4	27,7
NaSO ₄	53	29,2	34,5	97,0	115,0
NaCl	28	55,4	65,4	184,5	219,0
Na ₂ CO ₃ *10*H ₂ O	199	7,8	9,2	25,9	30,8
Na ₂ CO ₃ *7*H ₂ O	154	10,0	11,9	33,4	36,5
Na ₂ CO ₃ *1*H ₂ O	55	28,0	33,3	93,5	110,9

Kristallwachstum und Entwicklung von Hydratationsdruck



Kristallbildung
unter Einbau von
Kristallwasser

Dehydration in
einer Trocknungsphase

Hydrationsdruck
durch H₂O-Anlagerung
bei Befeuchtung

Hydratationsdrücke

Salz	50 % Luftfeuchtigkeit	70% Luftfeuchtigkeit	100% Luftfeuchtigkeit
Gips	57,5 N/mm ²	114,5N /mm ²	175,5 N/mm ²
Magnesiumsulfat	1,9 N/mm ²	6,8 N/mm ²	11,7 N/mm ²
Natriumcarbonat	0 N/mm ²	28,4 N/mm ²	61,1 N/mm ²

Hydratationsdrücke - Calciumsulfat

Salz – Calciumsulfat $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0 °C	20 °C	60 °C
100 %	219,0 N/mm ²	175,5 N/mm ²	92,6 N/mm ²
70 %	160,0 N/mm ²	114,5 N/mm ²	25,4 N/mm ²
50 %	107,2 N/mm ²	57,5 N/mm ²	0,0 N/mm ²

Hydratationsdrücke - Magnesiumsulfat

Salz – Magnesiumsulfat $\text{MgSO}_4 \cdot 6 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MgSO}_4 \cdot 7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0 °C	20 °C	60 °C
100 %	14,6 N/mm ²	11,7 N/mm ²	9,2 N/mm ²
70 %	9,7 N/mm ²	6,8 N/mm ²	4,0 N/mm ²
50 %	5,0 N/mm ²	1,9 N/mm ²	0,0 N/mm ²

Hydratationsdrücke - Natriumcarbonat

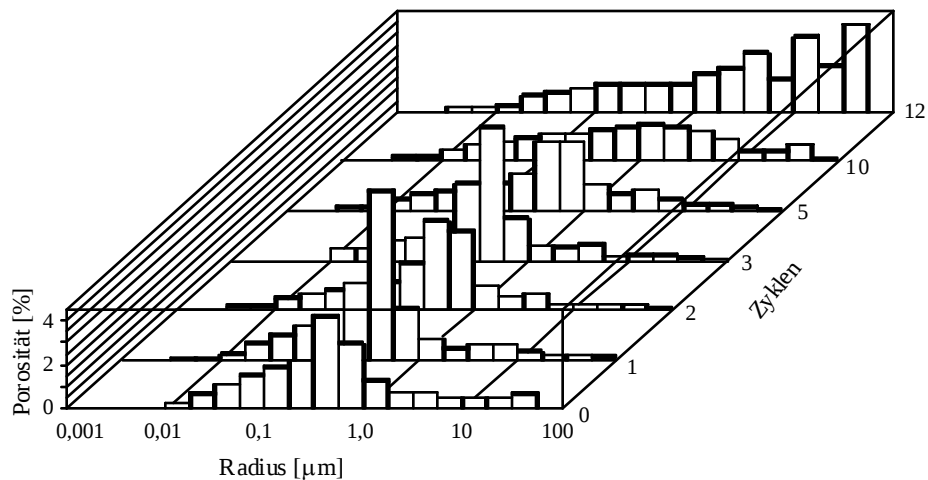
Salz – Natriumcarbonat $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 7 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0 °C	20 °C	60 °C
100 %	93,8 N/mm ²	61,1 N/mm ²	43,0 N/mm ²
70 %	63,7 N/mm ²	28,4 N/mm ²	9,4 N/mm ²
50 %	24,3 N/mm ²	0,0 N/mm ²	0,0 N/mm ²

Schädigung von Mauerwerk durch Salze

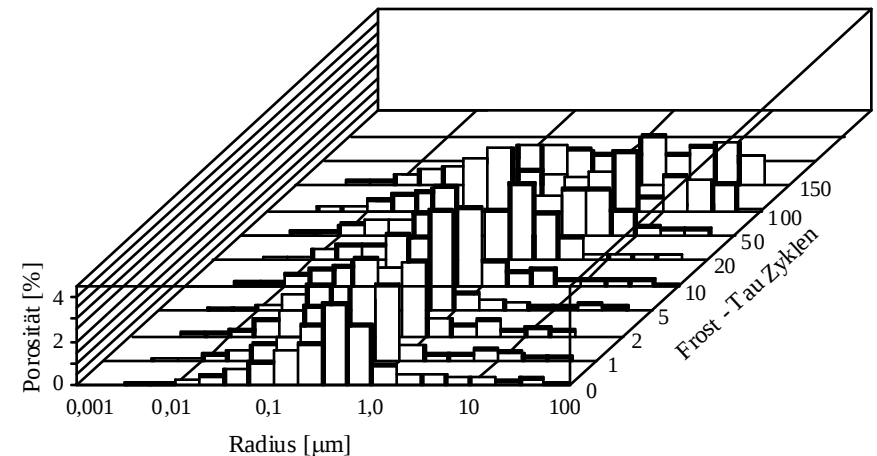


Salzkristallisation vs. Frost-Tau-Wechsel

Porenbildung während eines
Salzkristallisationstests

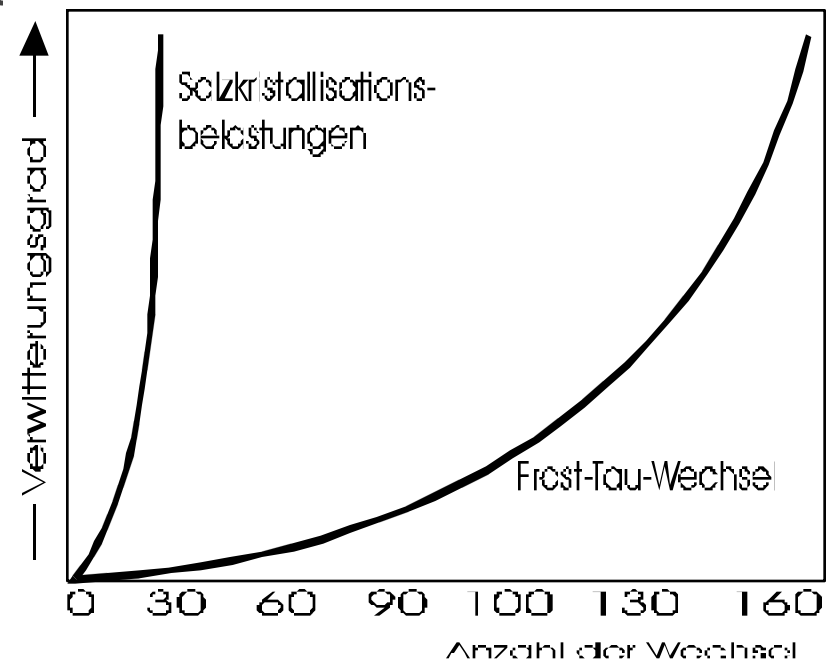


Porenbildung während eines
Frost-Tau-Wechsel-Tests



Salzkristallisation vs. Frost-Tau-Wechsel

- Verwitterungsgrad eines Baustoffs durch Frost-Tau-Wechsel oder durch Salzkristallisationsbelastungen
- Veränderungen der Porenstruktur, Gefügelockerungen, Absanden, Abplatzen



Schadenswirkung von Salzen

Salzart	Salzkonzentrationen [M-%]			
Sulfate	0 - 0,030	0,030 - 0,08	0,08 - 0,25	0,25 - 0,8
Nitrate	0 - 0,018	0,018 - 0,05	0,05 - 0,16	0,16 - 0,5
Chloride	0 - 0,010	0,010 - 0,03	0,03 - 0,09	0,09 - 0,3
Schadens- wirkung	keine Beeinträchti- gung	keine akute Beeinträchtigung, aber bei baulichen Maßnahmen berücksichtigen	Erhöhte Hygroskopische Wasseraufnahme, Baustoffzer- Mürbung	Starke Ausblühungen Dauerhafte Durchfeuchtung

Bewertung von Salzen

Salzart	Gering [M-%]	Mittel [M-%]	Hoch [M-%]
Gesamtsalzgehalt	< 0,10	0,10 - 0,25	> 0,25
Sulfat	< 0,10	0,10 - 0,25	> 0,25
Nitrat	< 0,05	0,05 - 0,15	> 0,15
Chlorid	< 0,03	0,03 - 0,10	> 0,10

Orientierungshilfe für die Bewertung oberflächennaher Proben bei 3 cm Bohrtiefe

Bewertung von Salzen

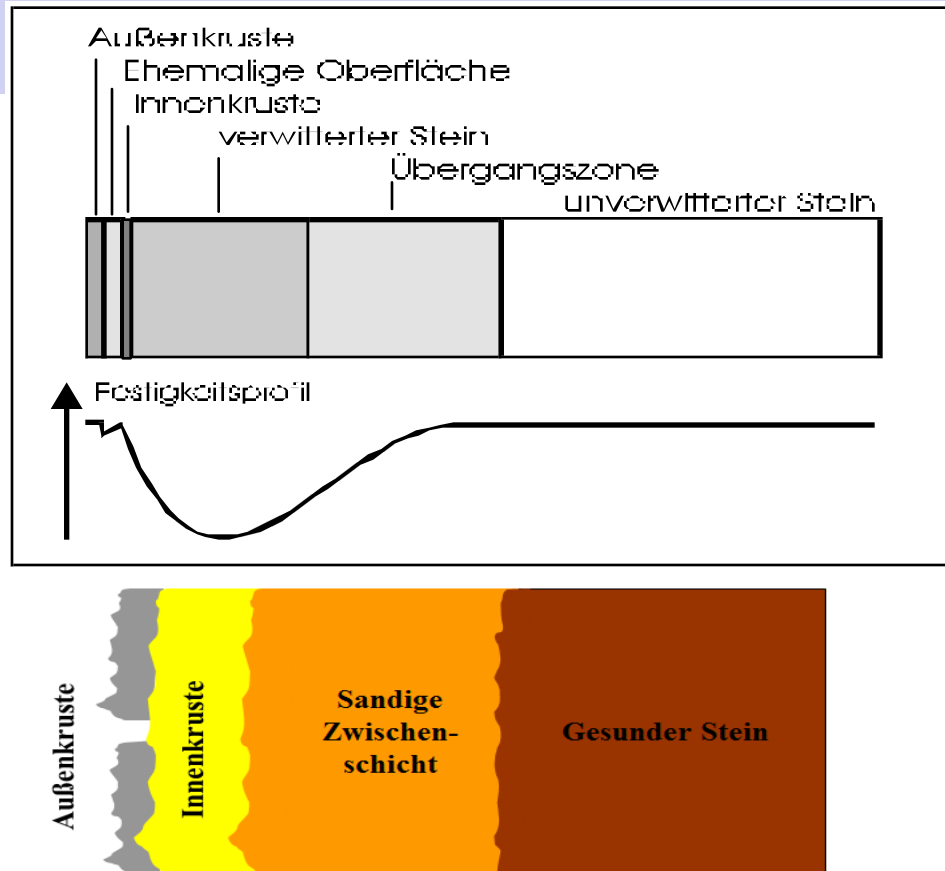
Chloride ¹	< 0,2 M-%	0,2 - 0,5 M-%	> 0,5 M-%
Nitrate	< 0,1 M-%	0,1 - 0,3 M-%	> 0,3 M-%
Sulfate ²	< 0,5 M-%	0,5 - 1,5 M-%	> 1,5 M-%
Bewertung ³	Belastung gering Maßnahmen im Ausnahmefall erf.	Belastung mittel Weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindung, Kationenbestimmung) erforderlich Maßnahmen im Einzelfall erforderlich	Belastung hoch Weitergehende Untersuchungen zum Gesamtsalzgehalt (Salzverbindung, Kationenbestimmung) erforderlich Maßnahmen erforderlich

Bewertung von Salzen

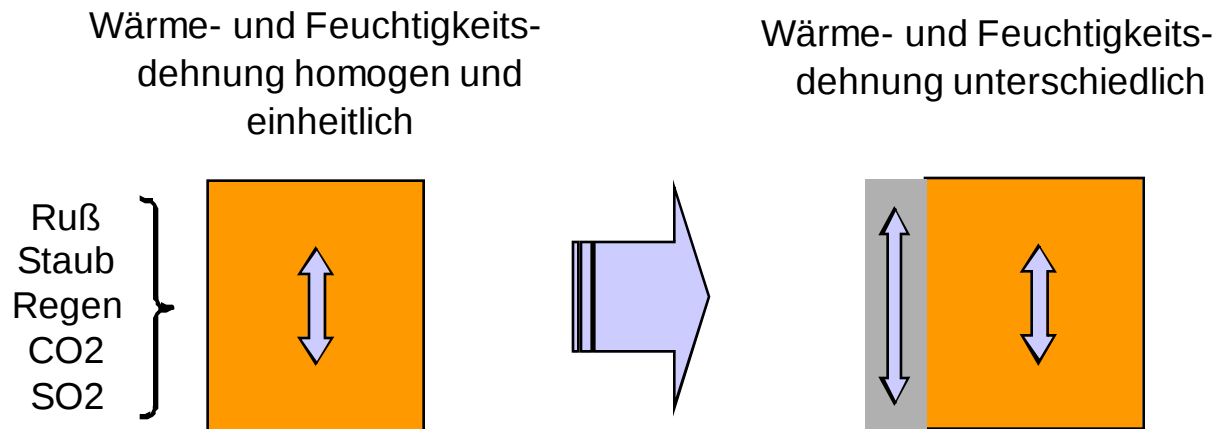
Bewertung der schadensverursachenden Wirkung verschiedener Salzionen in Mauerwerkskörpern nach [Wta99]

- 1 Bei tragwerksichernden Maßnahmen, wie dem Einbau von Ankern/Nadeln, ist bei Chloridbelastungen $> 0,1$ M-% auf die Auswahl besonderer Stahlgüten und speziell rezeptierter Verpreß-/Verfüllmörtel zu achten*
- 2 Beurteilung bezogen auf leicht lösliche Sulfate; besonders zu bewerten sind sulfathaltige Baustoffe*
- 3 Für die Entscheidung über das Erfordernis von Maßnahmen sind nicht allein die Ergebnisse der Salzuntersuchungen ausschlaggebend
Für einfache Rückschlüsse zum Gesamtsalzgehalt ist der ermittelte höchste Gehalt von Salzionen, unabhängig ob Chlorid, Nitrat oder Sulfat und die Bewertung o.a. Tabelle maßgebend*

Entstehen von Verwitterungsprofilen

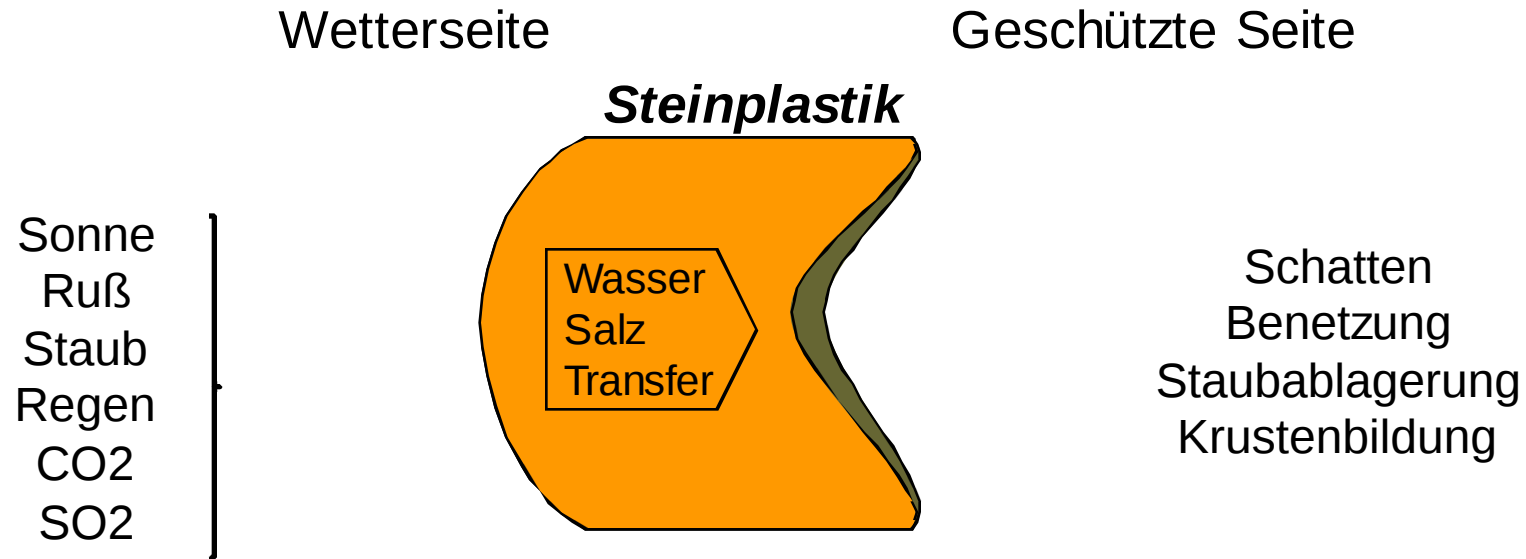


Verwitterungsprofil



Krustenbildung: Staub- und Rußteilchen werden an die Gesteinsschicht angelagert und durch Kristallbildung (Kalzit, Gips) fixiert. Durch die dadurch bedingte Verdichtung und chemische Veränderung entsteht eine Oberflächenschicht mit abweichenden Eigenschaften im Vergleich zum homogenen Ausgangsmaterial.

Darstellung einer Rückseitenverwitterung



Rückseitenverwitterung

- Auf der Wetterseite werden Staub und Schmutz durch häufiges Beregnen ab- und ausgewaschen, die Trocknung erfolgt rasch und das Temperatur und Dampfdruckgefälle ist zur geschützten Seite gerichtet.
- An der geschützten Seite kann sich Staub ablagern, es herrscht kein Abwascheffekt und es können sich Krusten bilden.
- Durch den Wassertransport werden gelöste Stoffe in die Kruste transportiert. Der erhöhte Salz- und Wassergehalt führt zur Steinschädigung.

Porenkennwerte

Effektive Porosität



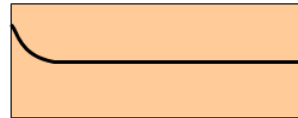
Gesamtporosität



Luftpermeabilität



Spezifische Oberfläche



Feuchtekenwerte

Wasseraufnahme



W - Wert



Diffusionswiderstandsfaktor



Sorptionsfeuchte



Mech. Kennwerte

Biegezugfestigkeit



Haftzugfestigkeit



Elastizitätsmodul



Thermische Dehnung



Übersicht

- Allgemeines
- Porenstruktur von Baustoffen und ihre Eigenschaften
- Verwitterungsprozesse
- **Kondensationsprozesse**
- Befeuchtungsprozesse
- Deformationsprozesse

Kondensationsprozesse

- Einflussgrößen
- Oberflächenkondensation und erhöhte Luftfeuchtigkeit
- Oberflächentemperaturen
- Wärmetransportkennwerte
- Wärmebrücken
- Instationäre Kondensationsprozesse
- Kernkondensation

Kondensationsprozesse

- Bauphysikalische Beschreibung von Kondensationserscheinungen und Zuständen mit erhöhter Luftfeuchtigkeit

Oberflächenkondensation und erhöhte Luftfeuchtigkeit

- Zur Schimmelpilzbildung kommt es, wenn sich auf inneren Oberflächen Kondenswasser bildet.
- Es kann aber ebenfalls bereits bei höheren Luftfeuchtigkeiten im Bereich der Wandoberfläche zur Schimmelpilzbildung kommen.
- Eine genaue Grenze ist nicht anzugeben, da verschiedene Zustände und deren Häufigkeit eine Rolle spielen.

Einflussgrößen

- Luftfeuchtigkeit (absolute, relative, Wasserdampfpartialdruck, Taupunkttemperatur)
- Wärmetransportgrößen (Wärmeleitfähigkeit, Oberflächentemperaturen, Wärmebrücken)
- Feuchteproduktion (Arbeiten, Wohnen, Schlafen, Zimmerpflanzen, feuchte Bauteile, Möblierung)

Beschreibung der Luftfeuchtigkeit in der Bauphysik

- Die absolute Luftfeuchtigkeit in Gramm Wasserdampf pro Kubikmeter Luft f in g / m^3
- Der Wasserdampfpartialdruck in Pascal p in Pa
- Die relative Luftfeuchtigkeit in Prozent

$$\varphi = \frac{f}{f_{\text{Sättigung}}} \cdot 100\% \quad , \quad \varphi = \frac{p}{p_{\text{Sättigung}}} \cdot 100\%$$

Taupunkttemperatur für verschiedene Luftzustände

$$t_{Taupkt} = \left(109,8^{\circ}C + t_i\right) \cdot \left(\frac{\varphi_i}{100\%}\right)^{0,1247} - 109,8^{\circ}C$$

Berechnung von Oberflächentemperaturen

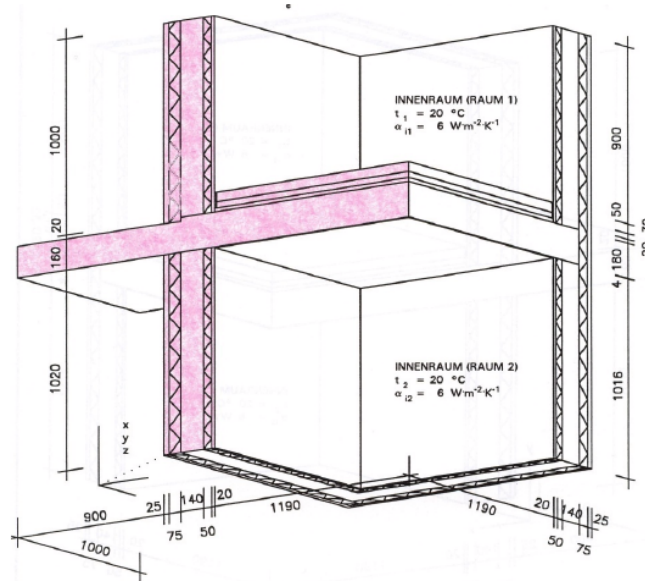
$$\frac{\Delta t}{t_i - t_a} = \frac{R}{R_T} \quad , \quad \Delta t = \frac{R}{R_T} \cdot (t_i - t_a)$$

Die Oberflächentemperatur auf inneren Bauteiloberflächen berechnet sich nach folgender Gleichung:

$$t_{oi} = t_i - \frac{R_{si}}{R_T} \cdot (t_i - t_a), \quad t_{oi} = t_i - \frac{0,13 \cdot \frac{m^2 \cdot K}{W}}{R_T} \cdot (t_i - t_a),$$

$$t_{oi} = t_i - U \cdot 0,13 \frac{m^2 \cdot K}{W} \cdot (t_i - t_a).$$

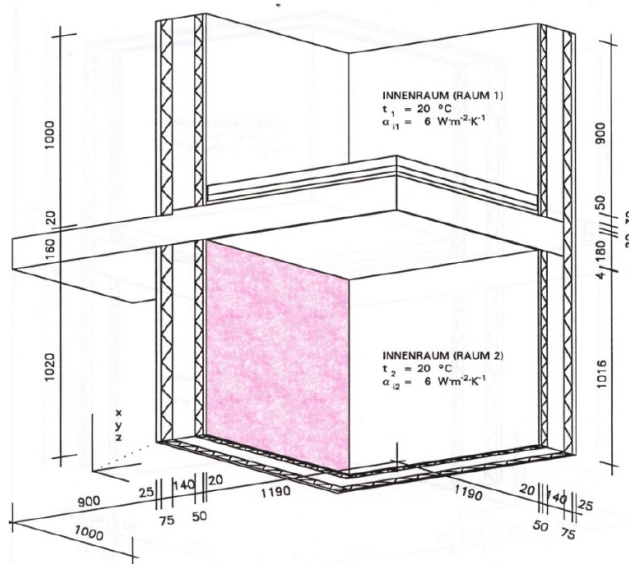
Wärmeverluste



Auswirkungen auf

- Heizlast
- Baukosten
- Heizwärmebedarf
- Schadstoffemissionen
- Betriebskosten

Oberflächentemperaturen



Auswirkungen auf

- Gesundheit (Schimmelbildung)
- Behaglichkeit
- Lebensdauer
- Betriebskosten (bei Sanierungserfordernis)

Wärmetransportmechanismen

- **Wärmestrahlung**

Wärmetransport durch (langwellige) elektromagnetische Strahlung ohne Beteiligung eines Mediums

- **Konvektion**

Wärmetransport in Verbindung mit Massentransport (Wärmeträgermedium z. B. Wasser, Luft, ...)

- **Wärmeleitung**

Wärmetransport als Ausgleichsmechanismus in einem Medium (Festkörper, Flüssigkeit, Gas)

Wärmestrahlung

Jeder Körper strahlt in Abhängigkeit von seiner Temperatur Wärme ab. Der Wärmetransport durch Wärmestrahlung erfolgt ohne Vermittlung eines materiellen Mediums.

Stefan-Boltzmann'sches Gesetz

Die Gesamtemission des schwarzen Körpers ist proportional zur 4. Potenz der absoluten Temperatur der Oberfläche.

Themenkreise: Strahlungsfeld im Raum (Behaglichkeit),
 Wärmeübergang an den Oberflächen,
 Flächenheizsysteme, Wärmedurchgang durch Hohlräume, ..

Konvektion

Mit der Strömung eines Gases oder einer Flüssigkeit wird Masse transportiert. Gleichzeitig wird auch die aufgrund der Temperatur im bewegten Medium enthaltene Wärme transportiert.

Themenkreise: Lüftungswärmeverluste,
 Wärmeübergang an den Oberflächen,
 Wärmetransport mit Heiz- und Kühlmedien,
 Wärmedurchgang durch Hohlräume, ..

Wärmeleitung

In einem Medium fließt Wärme immer von Orten höherer Temperatur zu Orten niedrigerer Temperatur (**Ausgleichsvorgang**).

Fourier'scher Wärmestromansatz

Die Wärmestromdichte – d. h. der flächenbezogene Wärmestrom – ist proportional zum Temperaturgefälle.

Der Proportionalitätsfaktor ist die Wärmeleitfähigkeit.

Themenkreise: Wärmeströme durch Baukonstruktionen,
 Transmissionswärmeverluste, Temperaturverteilungen,
 Oberflächentemperaturen, Kondensationsrisiko, ..

Oberflächentemperaturen

Für jeden Punkt jeder Oberfläche einer Baukonstruktion kann ein **Satz von Temperaturgewichtungsfaktoren** angegeben werden.

Die Oberflächentemperatur am Punkt (x,y,z) errechnet sich gemäß

$$\Theta_s^*(x, y, z) = \sum_j g_j(x, y, z) \cdot \Theta_j$$

Nach Norm (national: **ONorm B8110-2**; international **EN ISO 10211**) sind u. a. als Ergebnis einer Wärmebrückenberechnung die Sätze von Temperaturgewichtungsfaktoren für die Punkte tiefster Oberflächentemperatur für alle Innenräume anzugeben.

Anmerkung: Für den stationären Fall gilt: $\sum_j g_j = 1$

Kondensationsrisiko

Bei bekannter Oberflächentemperatur kann unmittelbar Θ_s^* angegeben werden, bei welcher relativen Feuchtigkeit der Raumluft es zur Bildung von Kondensat kommen wird.

Jener Wert der relativen Feuchtigkeit der Raumluft, bei dessen Überschreitung es zur Kondensatbildung kommt, wird **Grenzfeuchtigkeit** genannt.

In der **ÖNorm B8110-2:2003** wird ein „Norm-Innenraum-Klima“ definiert und gefordert, dass unter diesen Verhältnissen es an keiner Stelle der inneren Oberflächen zu Kondensatbildung kommen darf.

Zudem wird ein weiteres Kriterium zur „**Hintanhaltung von Schimmelbildung**“ eingeführt.

Beschreibung von Wärmeleitungsvorgängen

- Eindimensionales Modell
- Zweidimensionales Modell
- Dreidimensionales Modell

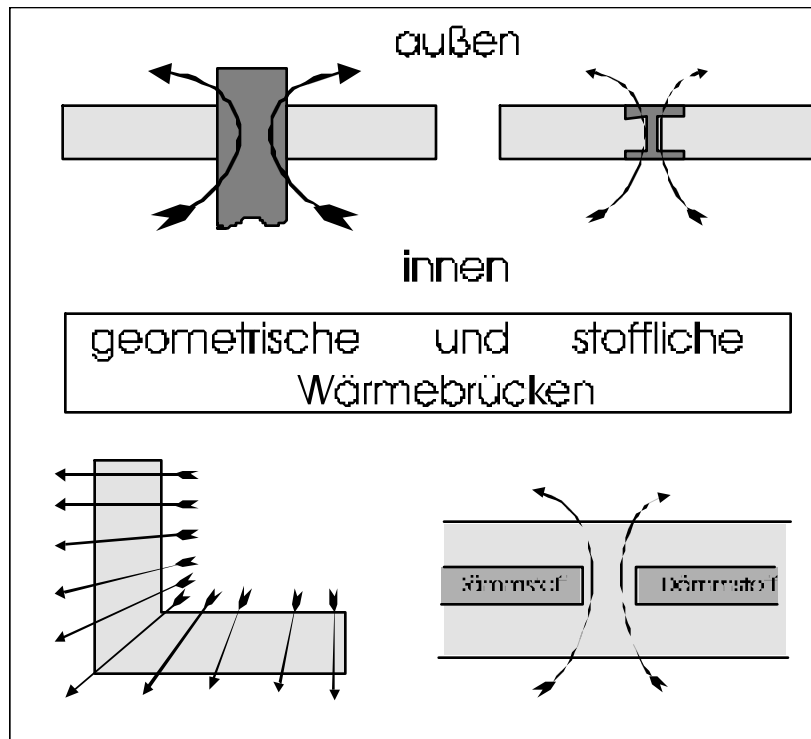
Das eindimensionale Modell

- Von **eindimensionaler Wärmeleitung** wird dann gesprochen, wenn die Wärmeleitungsvorgänge **mit einer Ortskoordinate** allein beschreibbar sind.
- Ein Beispiel für eindimensionale Wärmeleitung ist der Wärmedurchgang durch einen **plattenförmigen, homogen geschichteten Bauteil** (Wand, Fußboden, Decke, ...).
- Das Verwenden des eindimensionalen thermischen Modells hat den Vorteil, dass Ergebnisse **per Handrechnung** erhalten werden können.

Das zweidimensionale Modell

- Von **zweidimensionaler Wärmeleitung** wird dann gesprochen, wenn zur Beschreibung der Wärmeleitungsvorgänge **zwei Ortskoordinaten** notwendig sind.
- Berechnet werden Wärmeströme und Temperaturverteilungen für jeweils **eine Ebene**.
- In Richtung der dritten Koordinate (senkrecht zur betrachteten Ebene) bleibt die Temperaturverteilung unverändert; entlang dieser Koordinatenachse fließt kein Wärmestrom.
- Die **Berechnungen** können **nur numerisch** unter Verwendung eines Wärmebrückenprogramms durchgeführt werden

Wärmebrücken



Das dreidimensionale Modell

- Von **dreidimensionaler Wärmeleitung** wird dann gesprochen, wenn zur Beschreibung der Wärmeleitungsvorgänge **alle drei Ortskoordinaten** notwendig sind.
- Die **Berechnungen** können **nur numerisch** unter Verwendung eines Wärmebrückenprogramms durchgeführt werden

Anschlussdetail

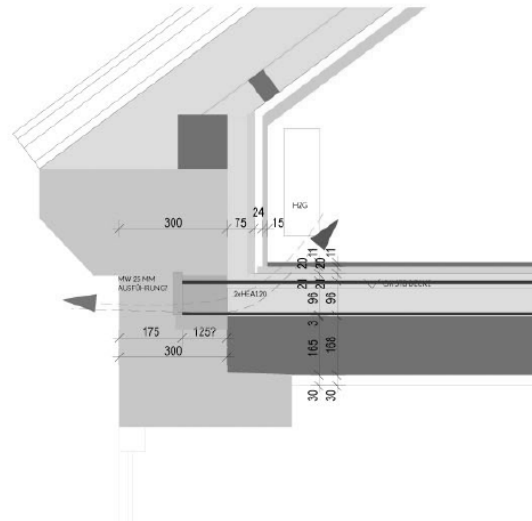


Abbildung 10: Detail C (o.M.)

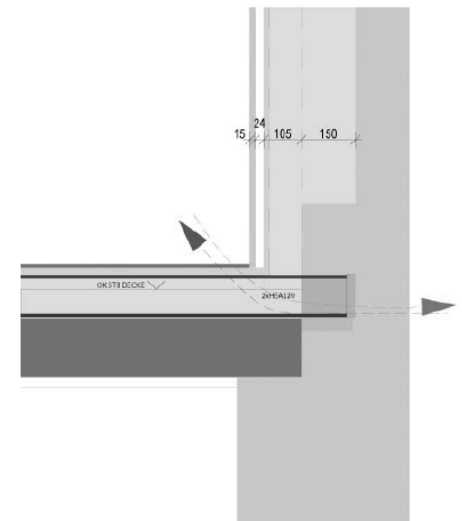
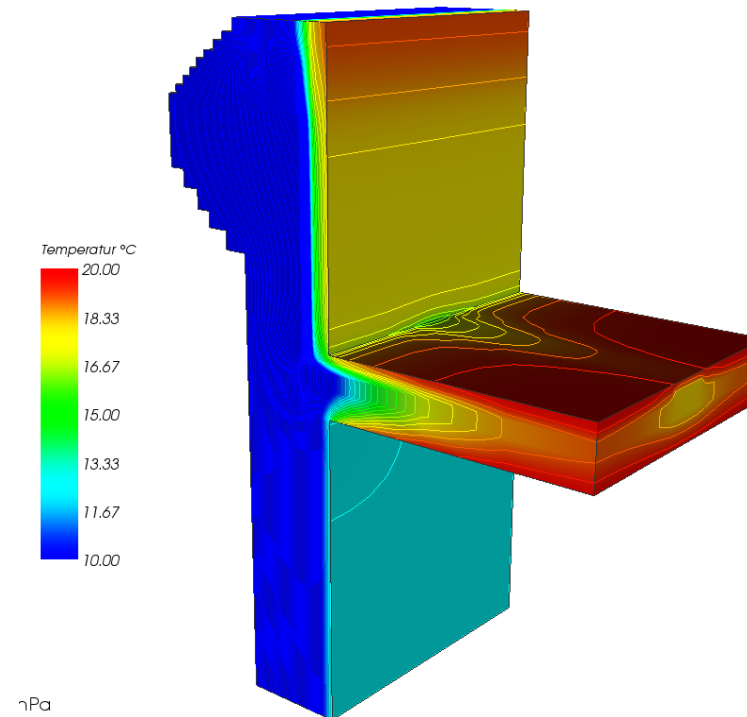
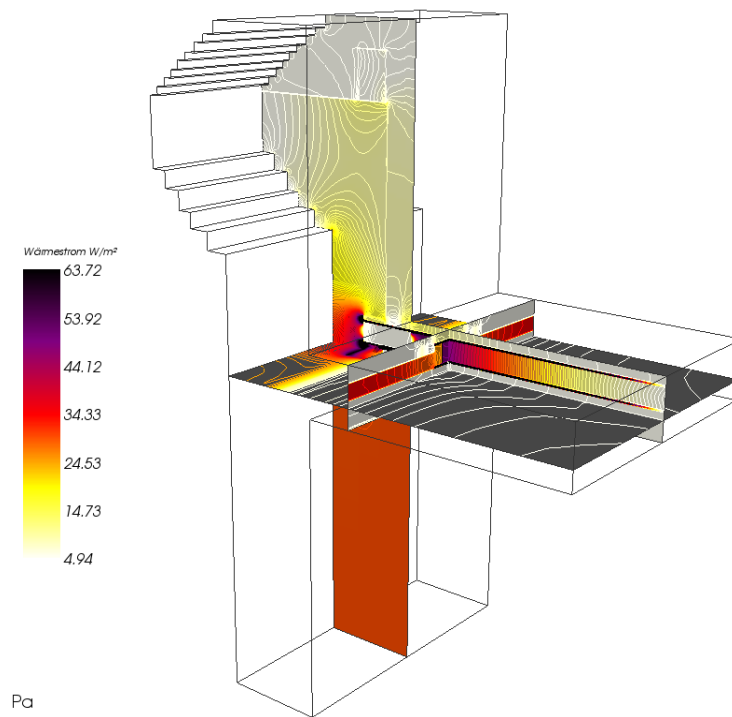
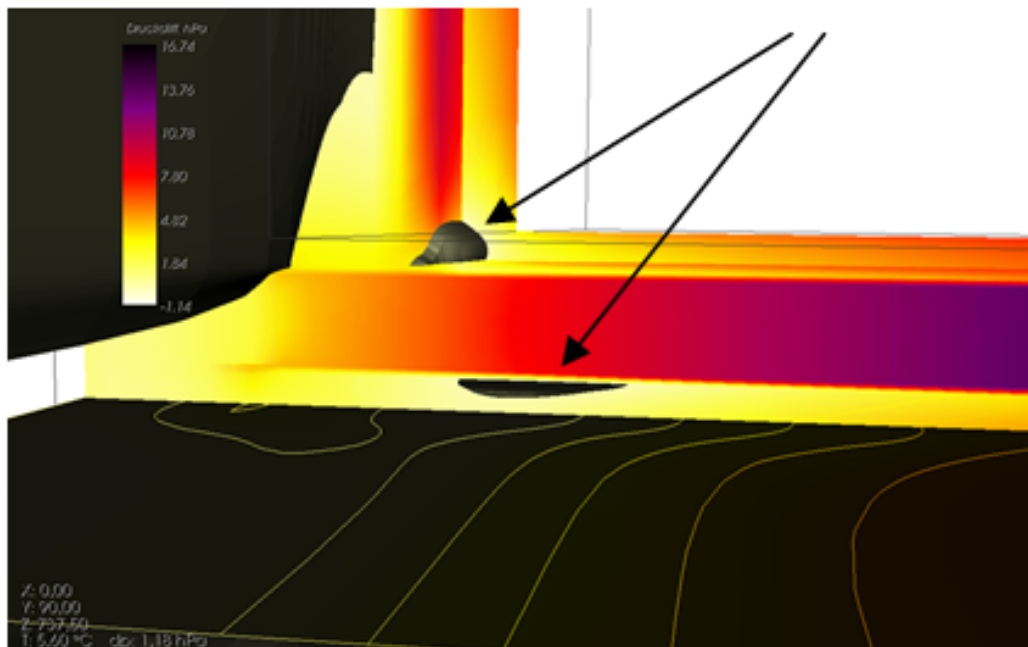


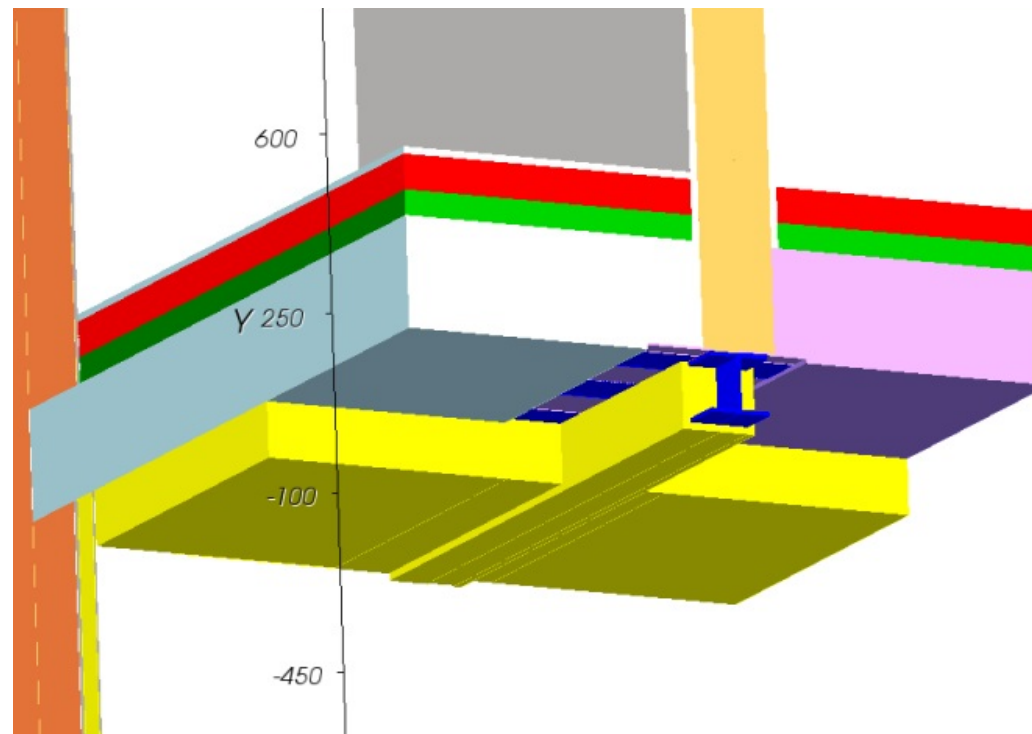
Abbildung 11: Detail D (o.M.)



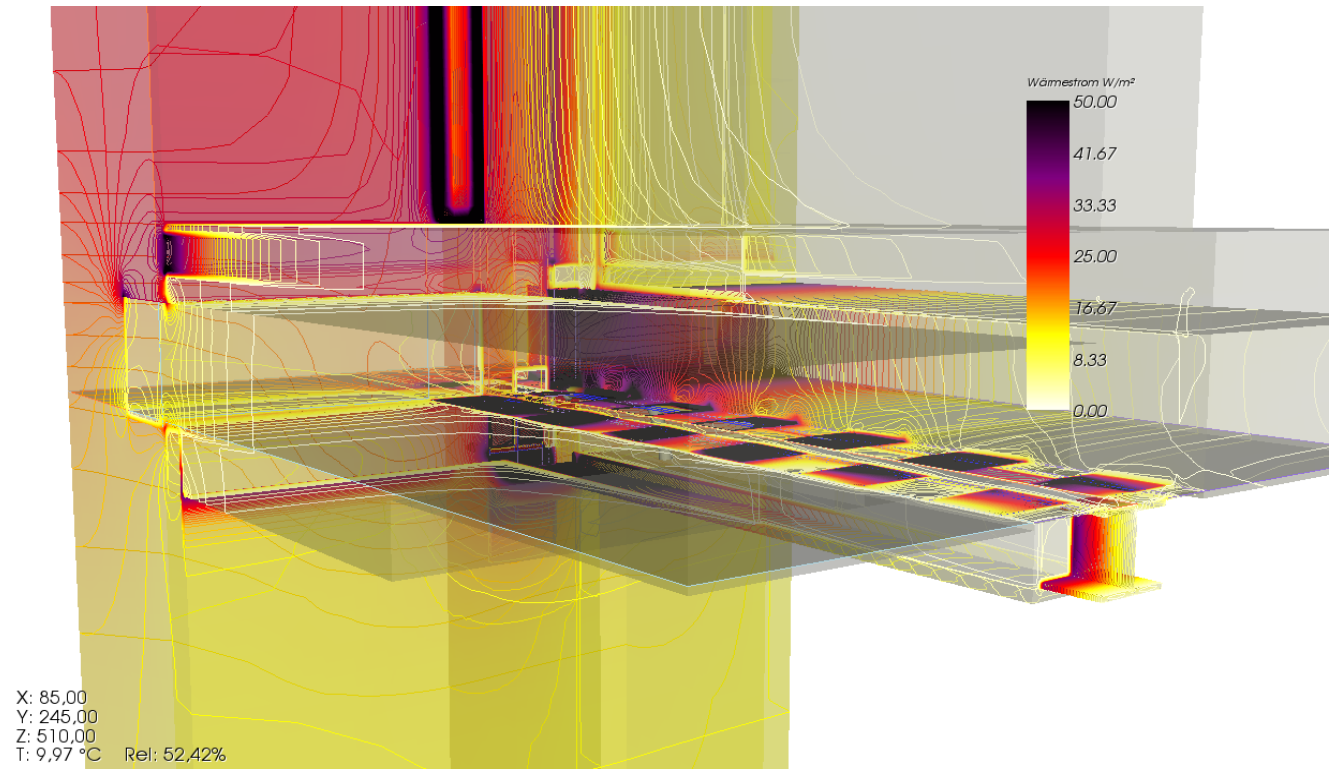


Kondensatbildung im Bereich Fußboden zu aufgehender Innendämmkonstruktion, sowie Kondensatbildung zwischen Stahlträger und Doppelbaumdecke

Anschlussdetail



Anschlussdetail



Berechnung von Wärmetransportkennwerten

$$R = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\alpha_e}$$

$$\frac{1}{U} = R_T = \frac{1}{\alpha_i} + R + \frac{1}{\alpha_e}$$

$$U = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} + R + \frac{1}{\alpha_e}}$$

s_j Schichtstärke

λ_j Wärmeleitfähigkeit

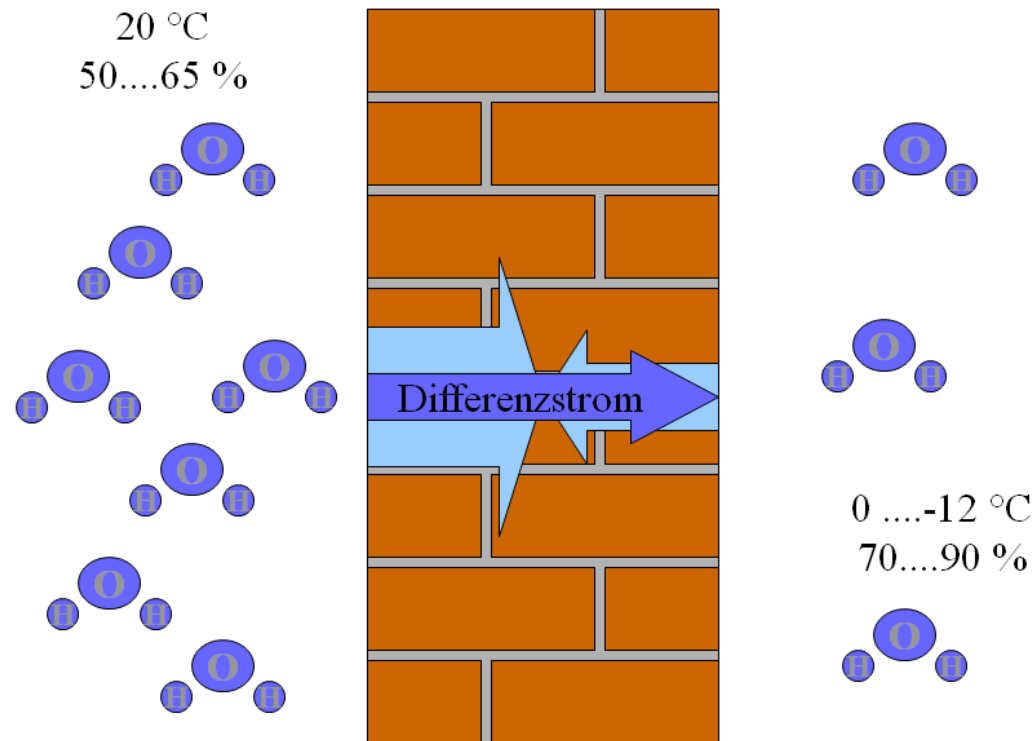
$\frac{1}{\alpha_e} \quad \frac{1}{\alpha_i}$ Übergangswiderstand

Kernkondensation

- Kernkondensat ist Kondenswasser, das in einem Bauteil auftritt.
- Die Wasserdampfdiffusion durch einen porösen Körper ist die Ursache für diese Art der Feuchtigkeitsanreicherung in Bauteilen.
- Der Transport des Wasserdampfes erfolgt vom höheren zum niedrigeren Wasserdampfdruck.

Kernkondensation

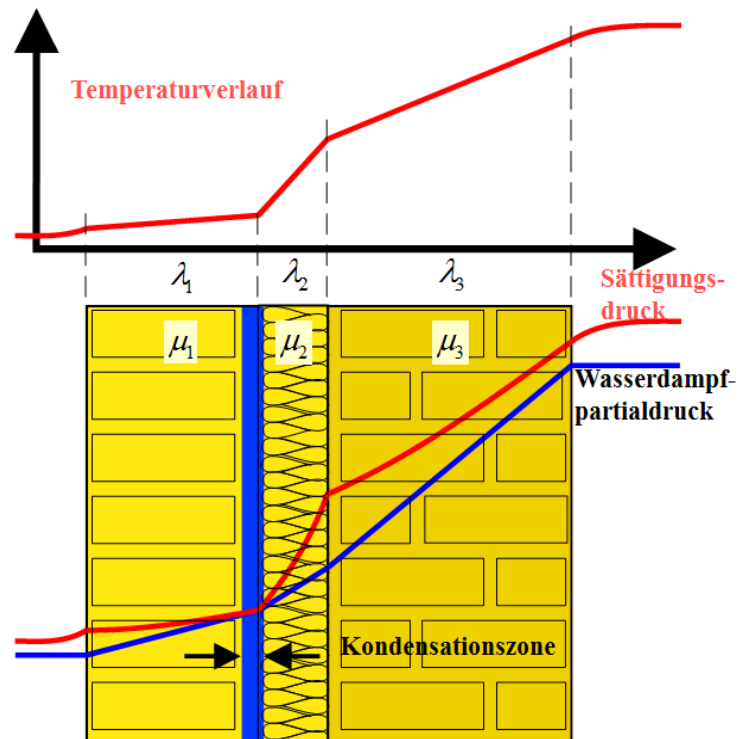
- Im Winter treten durch die Raumbeheizung relativ große Partialdruckdifferenzen zwischen der Innen- und Außenluft auf.
- Zur Kondensation von Wasserdampf kommt es jedoch nur, wenn der Wasserdampfteildruck an einer Stelle im Bauteil den Wasserdampfsättigungsdruck erreicht.



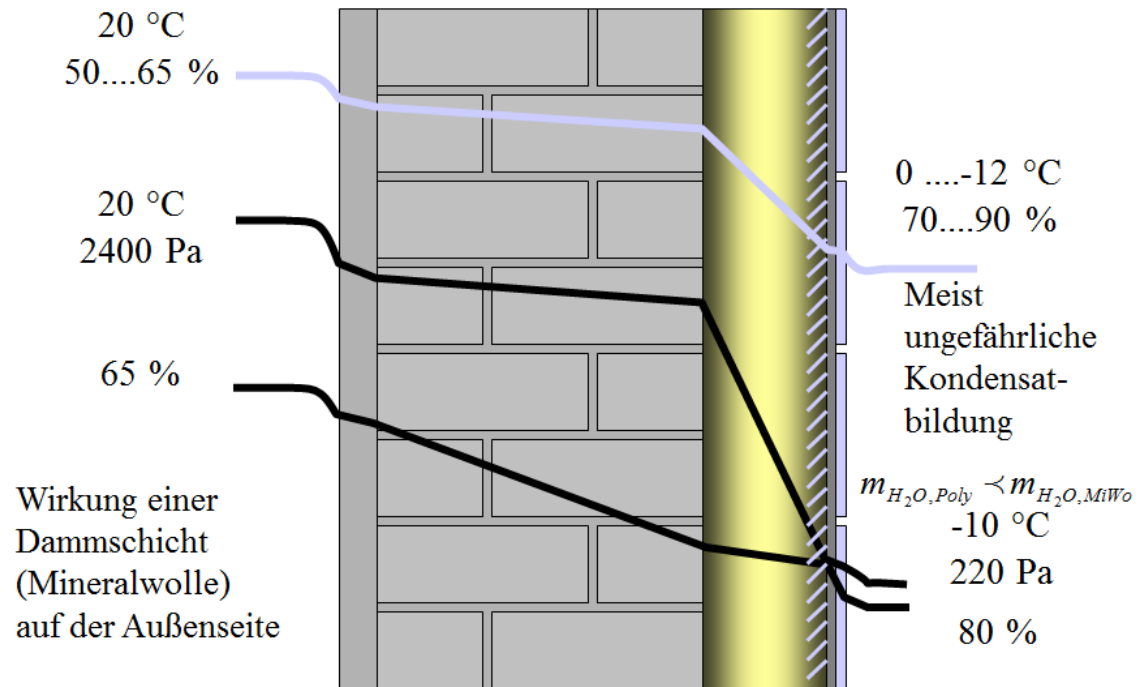
Einflussgrößen

- Wasserdampfdiffusion (Diffusionswiderstandszahl, äquivalente Luftschichtstärke)
- Kapillarer Wassertransport (Wasseraufnahme-, Wassereindringkoeffizient, kapillare Leitfähigkeit, Feuchtespeicherung, Sorptionsisotherme)
- Wärmetransport (Wärmeleitfähigkeit einzelner Schichten, Eigenschaftsänderung durch Feuchteinfluss)

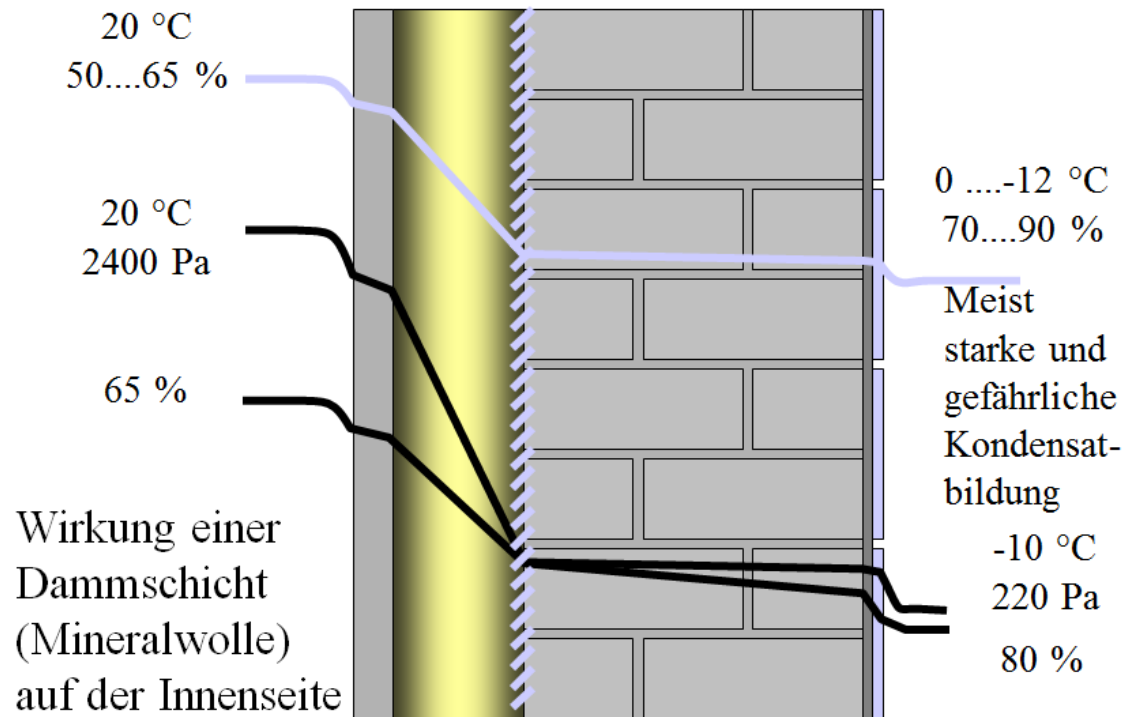
Glaserdiagramm



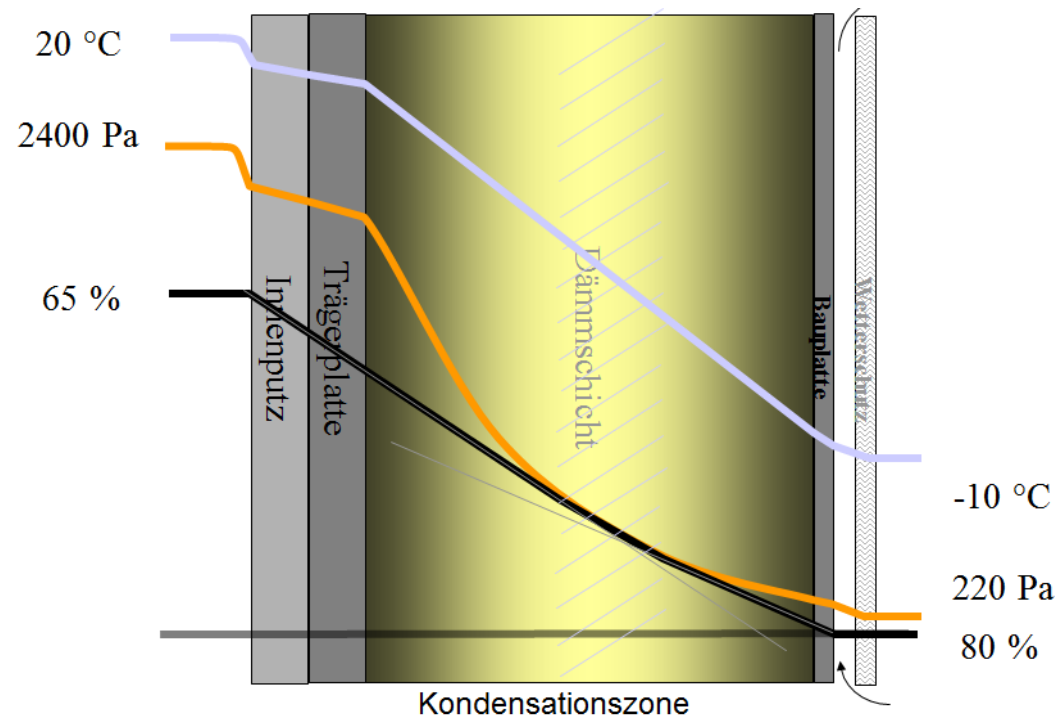
Temperatur und Dampfdruckverlauf



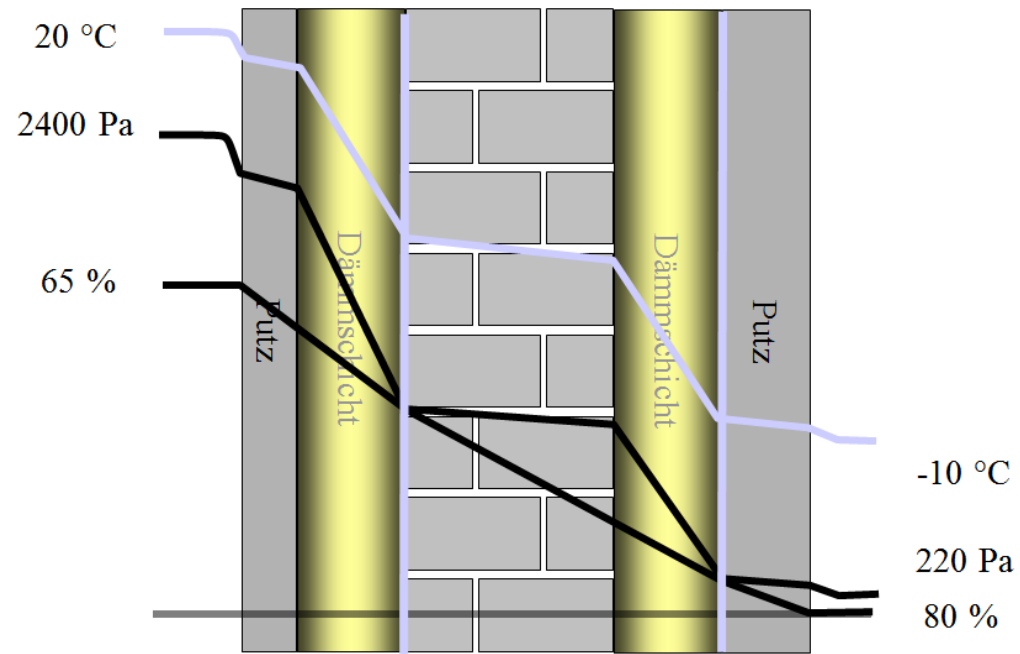
Temperatur und Dampfdurchverlauf



Temperatur und Dampfdruckverlauf



Temperatur und Dampfdurckverlauf



Tauwasserbildung mit zwei Kondensationsebene

Übersicht

- Allgemeines
- Porenstruktur von Baustoffen und ihre Eigenschaften
- Verwitterungsprozesse
- Kondensationsprozesse
- **Befeuchtungsprozesse**
- Deformationsprozesse

Befeuchtungsprozesse

- Befeuchtungsmechanismen
- Oberflächentemperaturen
- Kapillare Wasseraufnahme
- Wasseraufnahme durch drückende Feuchtigkeit
- Wasseraufnahme durch Kondensation
- Wasseraufnahme durch Sorption
- Hygroskopische Wasseraufnahme
- Bewitterung

Befeuchtungsmechanismen

- Kapillare Wasseraufnahm
- Wasseraufnahme durch drückende Feuchtigkeit
- Wasseraufnahme durch Kondensation
- Wasseraufnahme durch Sorption
- Hygroskopische Wasseraufnahme

Schädigung von Mauerwerk durch aufsteigende Feuchtigkeit



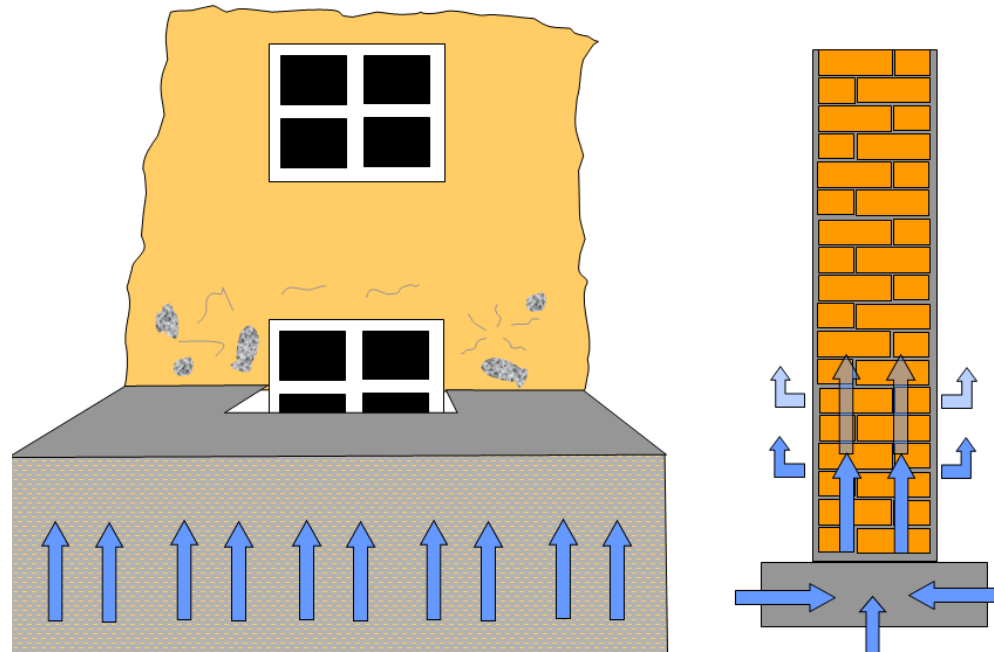
Schädigung von Mauerwerk durch aufsteigende Feuchtigkeit



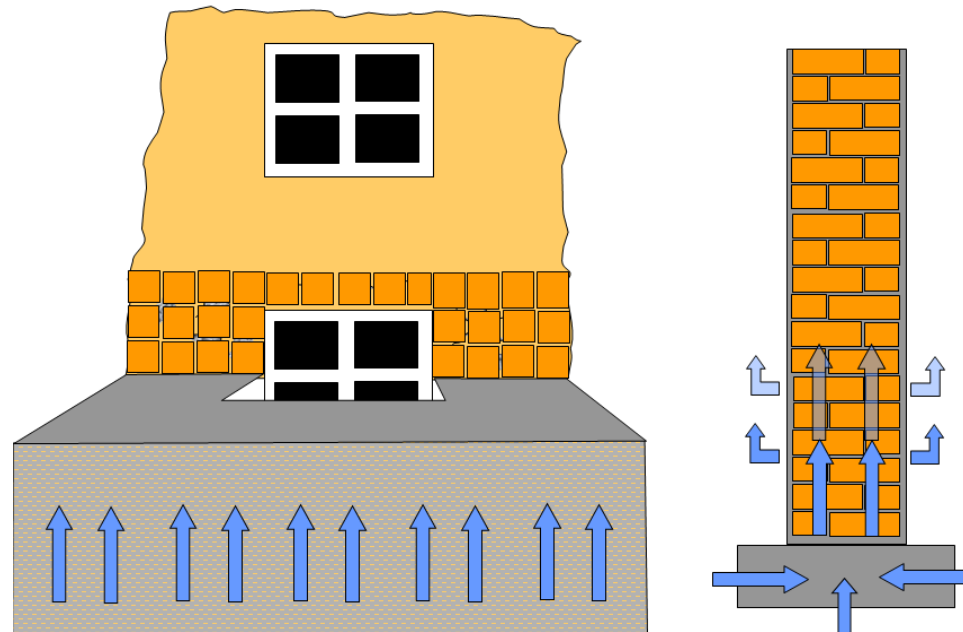
Schädigung von Mauerwerk durch aufsteigende Feuchtigkeit



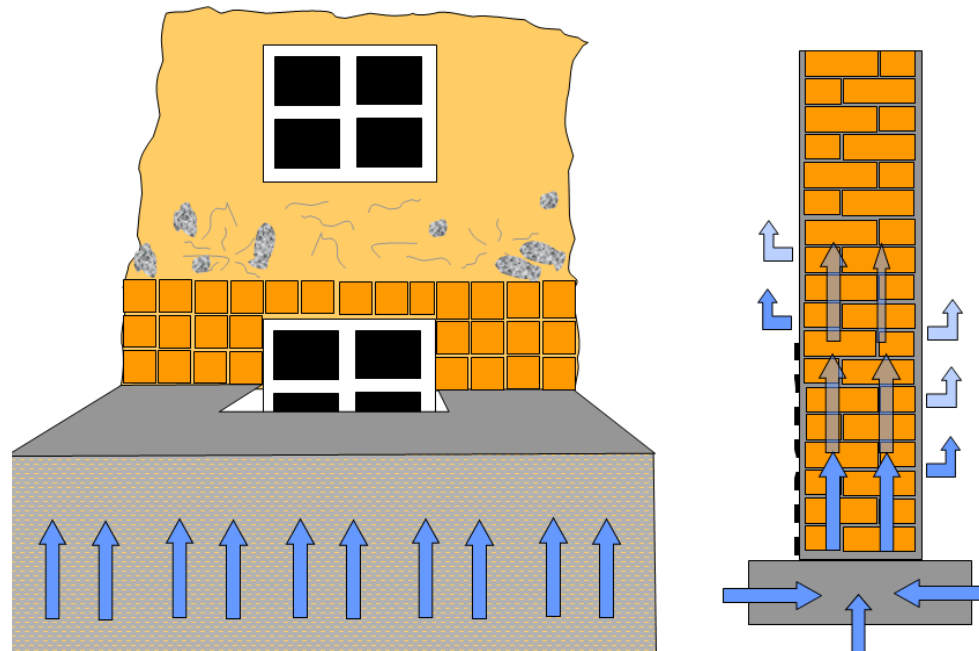
Schädigung von Mauerwerk durch aufsteigende Feuchtigkeit



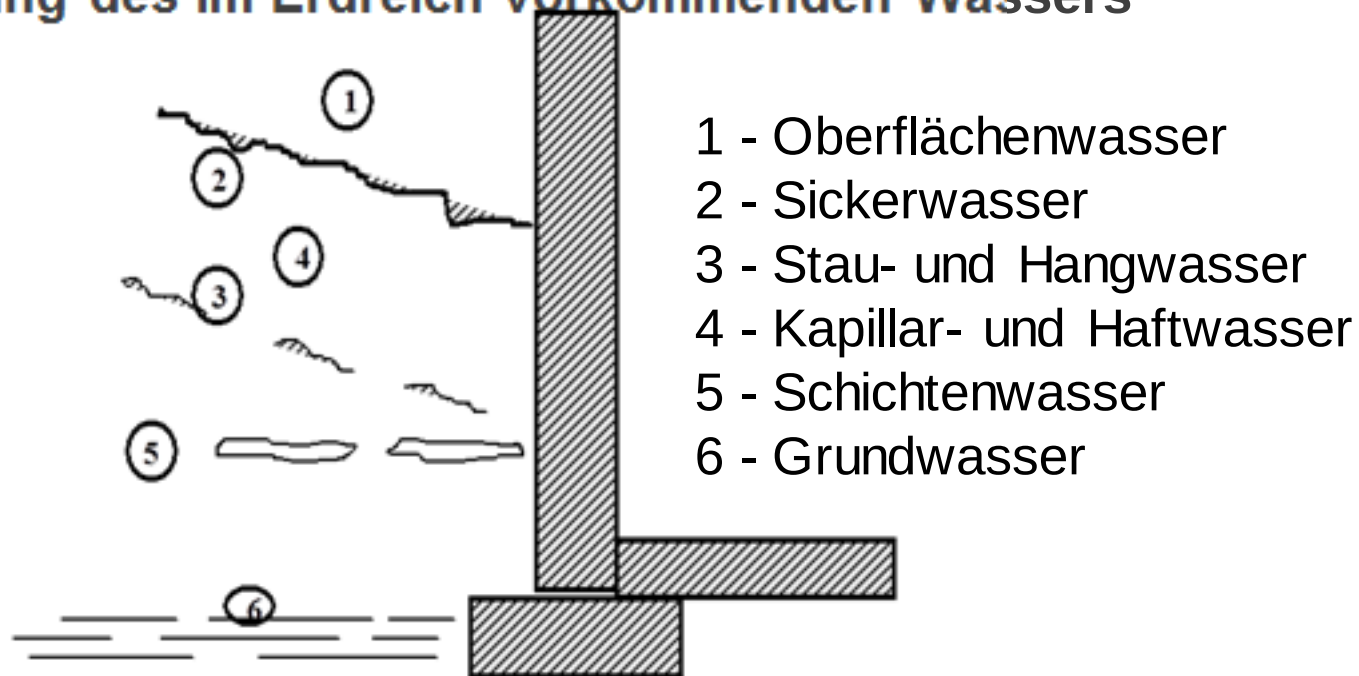
Schädigung von Mauerwerk durch aufsteigende Feuchtigkeit



Schädigung von Mauerwerk durch aufsteigende Feuchtigkeit

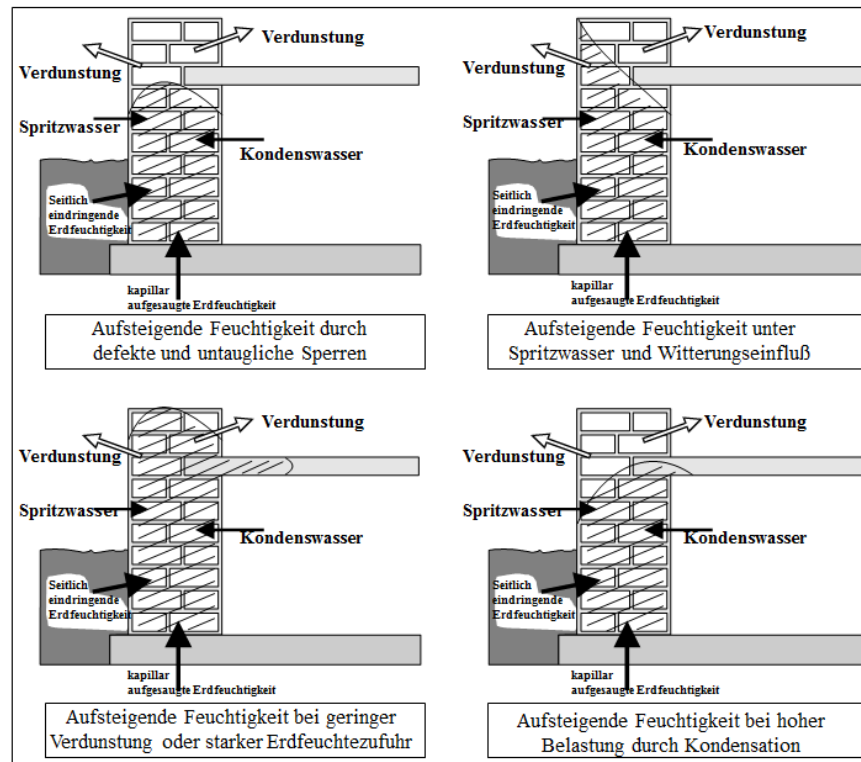


Darstellung des im Erdreich vorkommenden Wassers

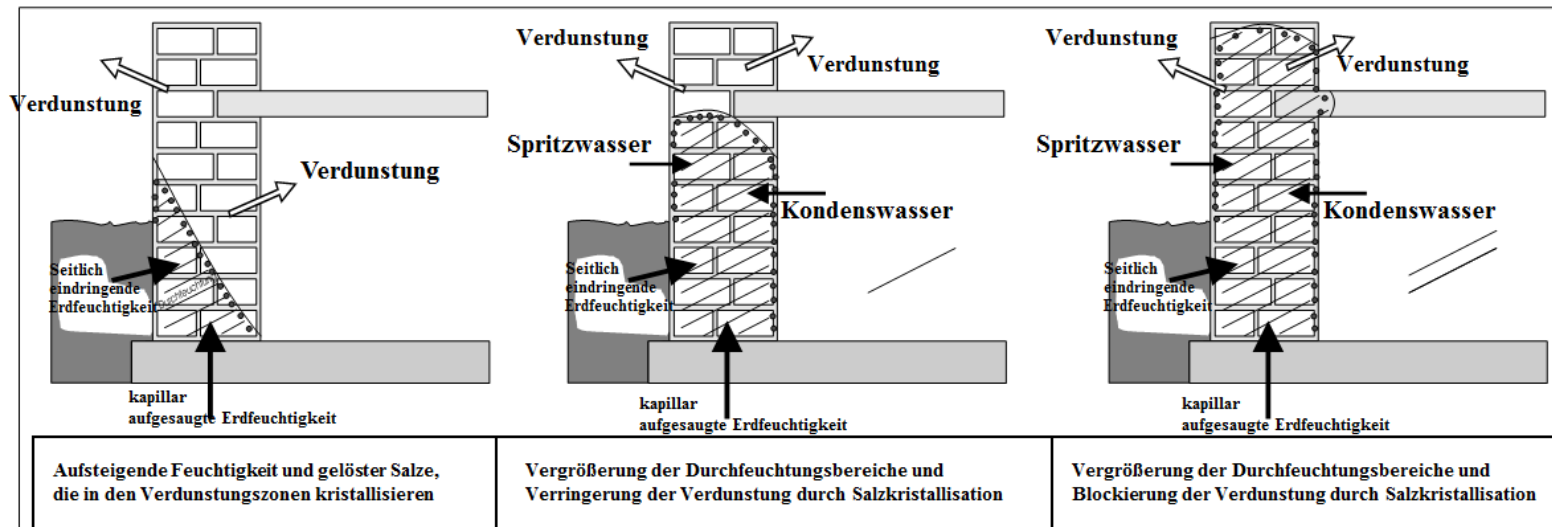


Seitlich ins Mauerwerk eindringende Feuchte



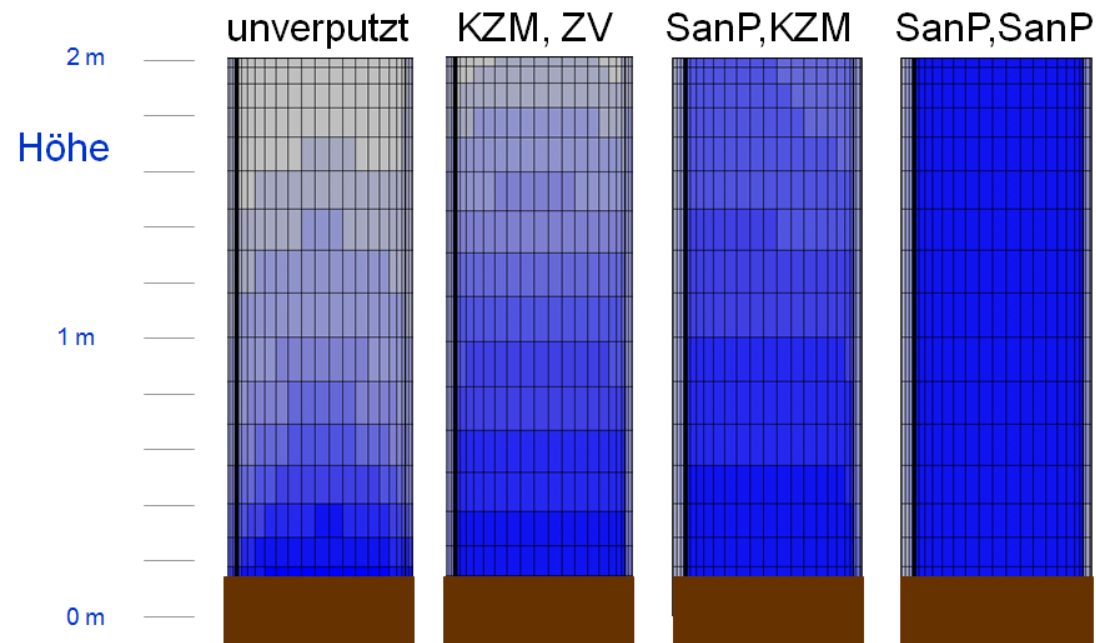


Schadensentwicklung – Feuchtigkeits- und Salztransport

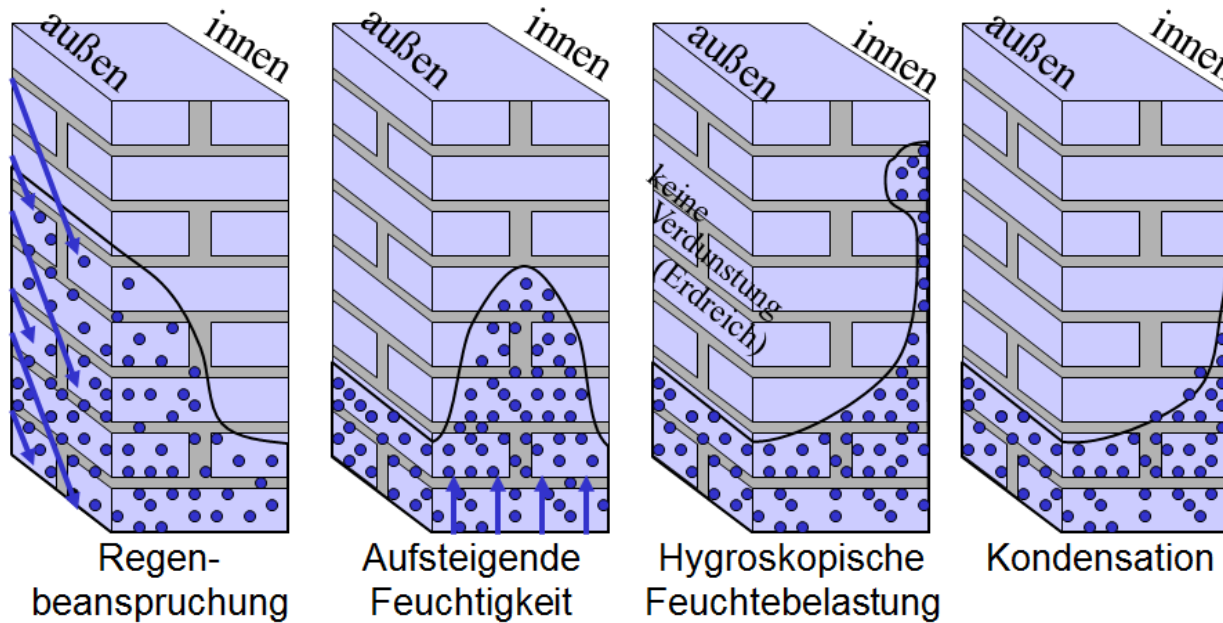


Schematische Darstellung der Schadensentwicklung durch die Wechselwirkung von Feuchtigkeits- und Salztransport in der Wand

Beispiel: Aufsteigende Mauerfeuchte

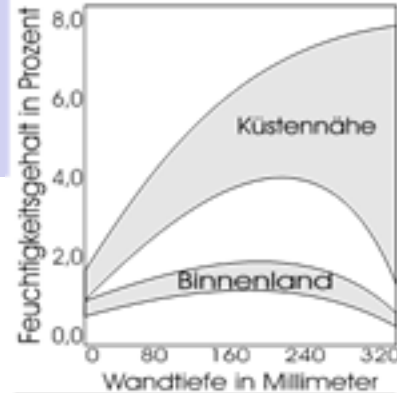


Beispiel: Aufsteigende Mauerfeuchte

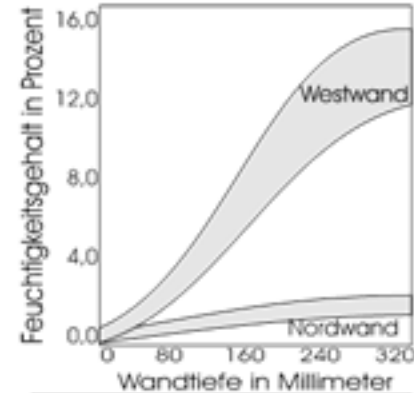


Bewitterung

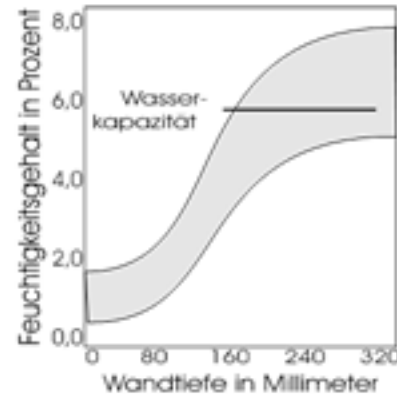
- Ursachen und Erscheinungsform von eindringendem Regenwasser
- Wasseraufnahme
- Wasserabgabe durch Verdunstung und Diffusion



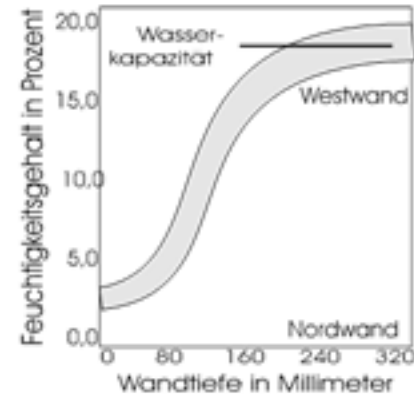
Feuchtigkeitsverteilung
in Kalksandsteinwänden



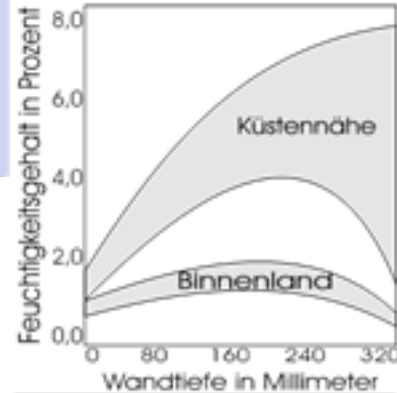
Feuchtigkeitsverteilung
in HL - Ziegelwänden



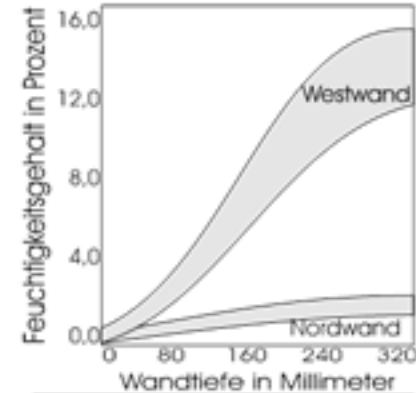
Feuchtigkeitsverteilung
in Vollziegelwänden



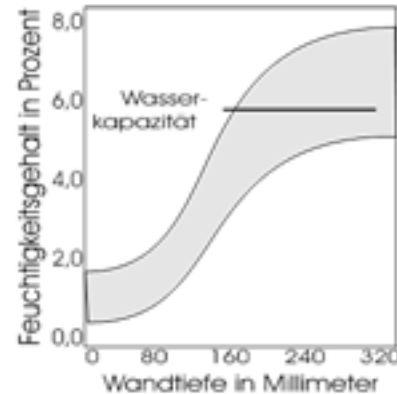
Feuchtigkeitsverteilung
in Gasbetonwänden



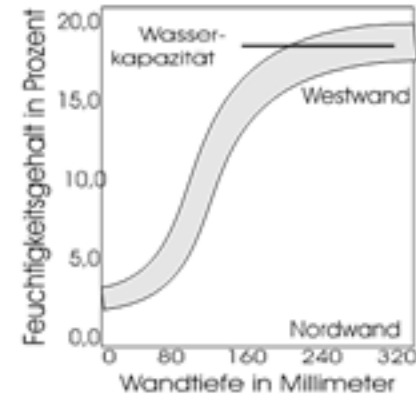
Feuchtigkeitsverteilung
in Kalksandsteinwänden



Feuchtigkeitsverteilung
in HL - Ziegelwänden

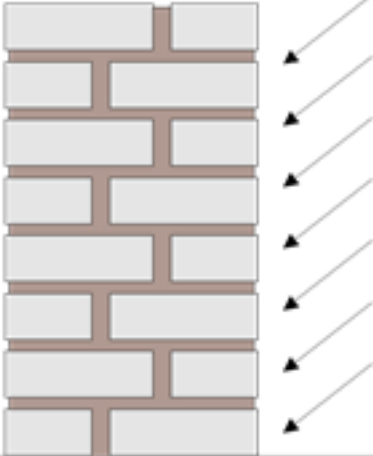
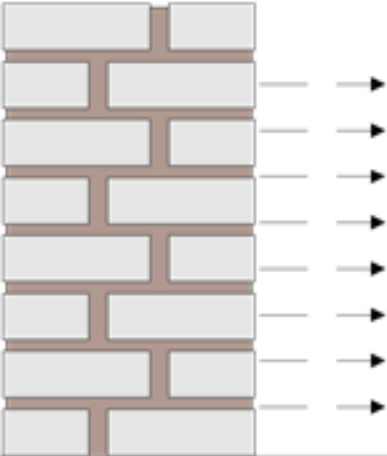


Feuchtigkeitsverteilung
in Vollziegelwänden

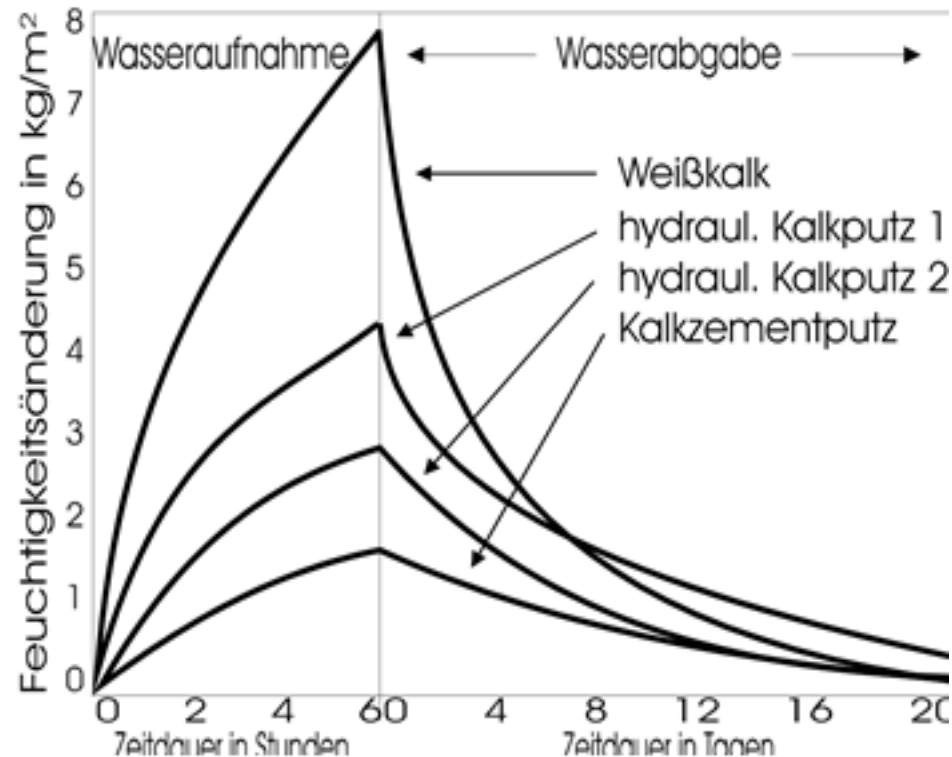


Feuchtigkeitsverteilung
in Gasbetonwänden

Feuchtebilanz von Fassaden

	
Befeuchtung durch Bewitterung	Trocknung durch Verdunstung
$\frac{m_{H_2O}}{A} = w * \sqrt{t_R}$	$\frac{m_{H_2O}}{A} = \beta * k * \Delta p * t_{v1}$ $\frac{m_{H_2O}}{A} = \frac{\Delta p}{\delta * \mu * s} * t_{v2}$

Wasseraufnahme und Feuchtigkeitsabgabe von Außenputzen



Wasseraufnahme und Feuchtigkeitsabgabe von Außenputzen

Zusammenfassend ergeben sich daraus für die Kennzeichnung der Wasseraufnahmefähigkeit von Baustoffen folgende Gruppeneinteilung

$$w \leq 2,0 \text{ kg} / (m^2 \cdot \sqrt{h}), \quad s_d \leq 2,0 \text{ m} \quad \textbf{wasserhemmend},$$

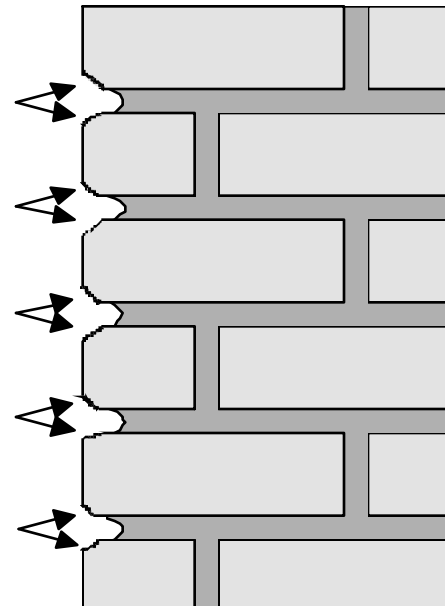
$$w \leq 0,5 \text{ kg} / (m^2 \cdot \sqrt{h}), \quad s_d \leq 2,0 \text{ m} \quad \textbf{wasserabweisend},$$

$$w \leq 0,001 \text{ kg} / (m^2 \cdot \sqrt{h}) \quad \textbf{wasserdicht}.$$

Für fassadentaugliche Beschichtungen sollten folgende Bedingungen erfüllt sein

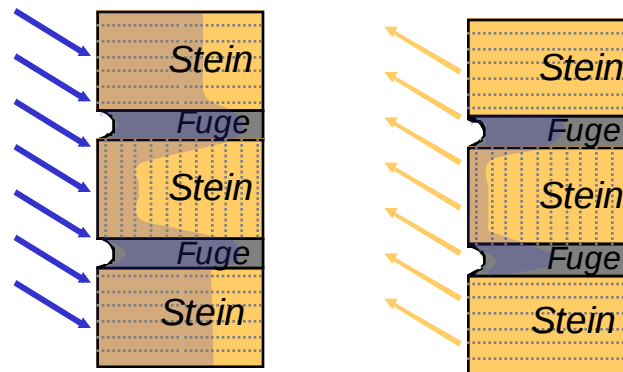
$$w \leq 0,5 \text{ kg} / (m^2 \cdot \sqrt{h}), \quad s_d \leq 2,0 \text{ m} \quad s_d \cdot \mu = 0,1 \frac{\text{kg}}{m \cdot \sqrt{h}}$$

Kantenverwitterung



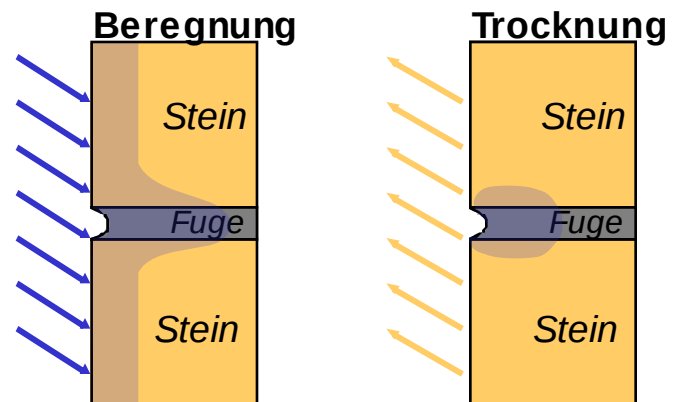
Schematische Darstellung der Kantenverwitterung an Mauerwerk als Folge der hygrischen Belastung im Bereich Stein-Fuge

Feuchtigkeitsverteilung und Bildung von Feuchtigkeitsnestern



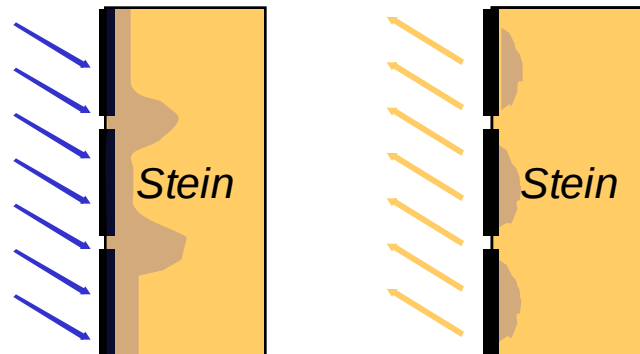
Anisotropie bei Sandsteinen und Bildung von Feuchtigkeitsnestern

Feuchtigkeitsverteilung und Bildung von Feuchtigkeitsnestern



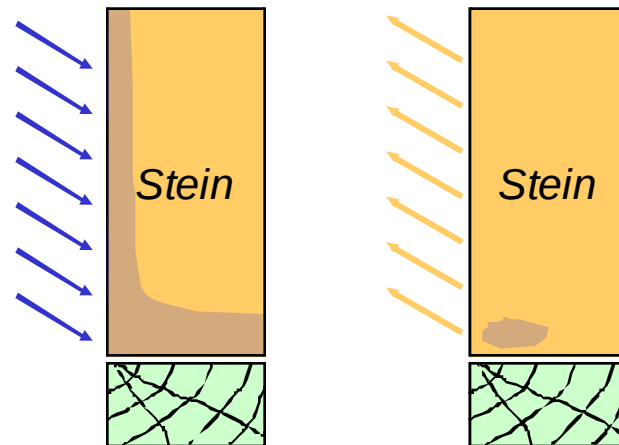
**Fugenwirkung und Bildung
von Feuchtigkeitsnestern**

Feuchtigkeitsverteilung und Bildung von Feuchtigkeitsnestern



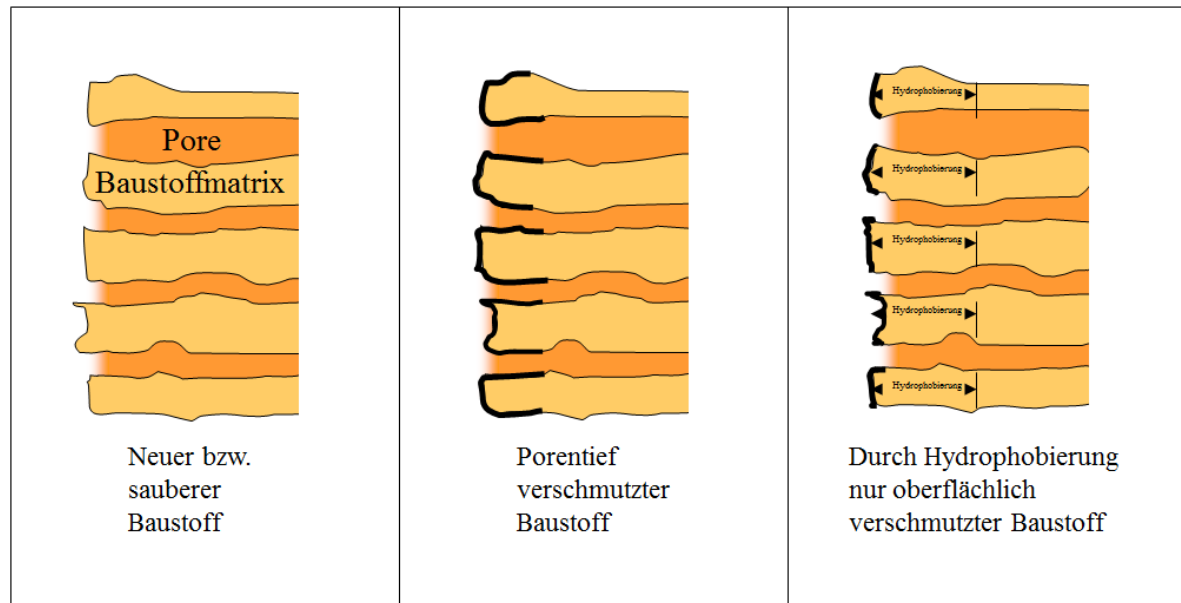
Oberflächenverkleidung und Bildung von Feuchtigkeitsnestern

Feuchtigkeitsverteilung und Bildung von Feuchtigkeitsnestern

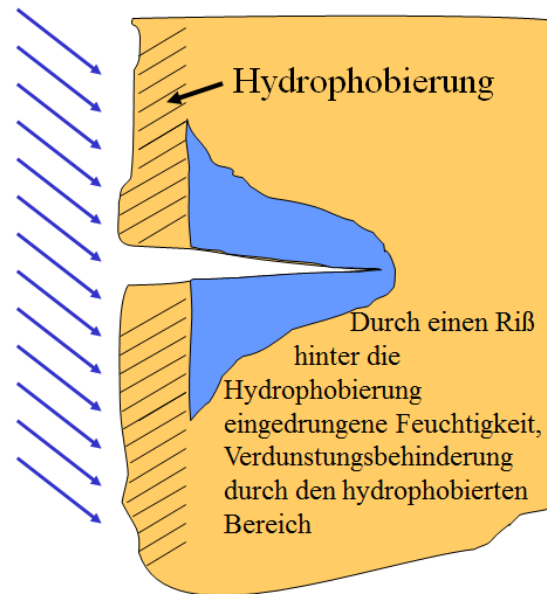


Wasseraufnahme bei Fachwerk und Bildung von Feuchtigkeitsnestern

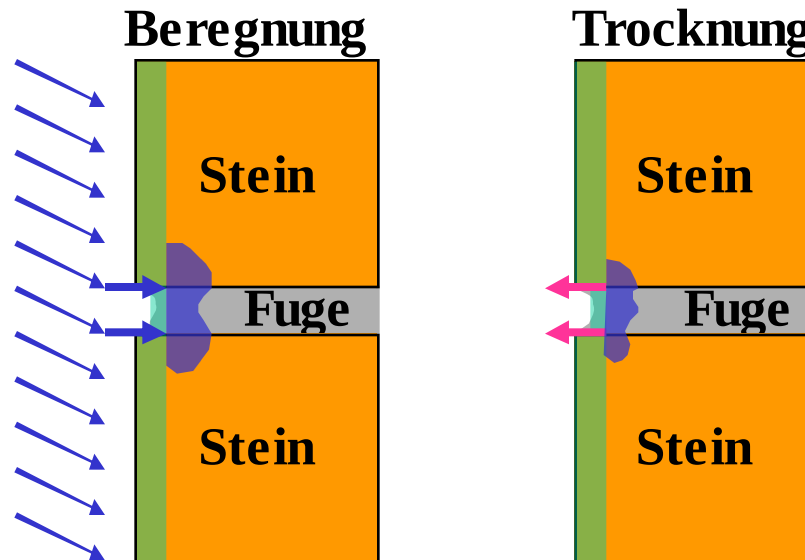
Verschmutzung eines nicht hydrophobierten und eines hydrophobierten Baustoffs



Hinterwanderung einer Hydrophobierung durch einen Riss bei Schlagregenbelastung



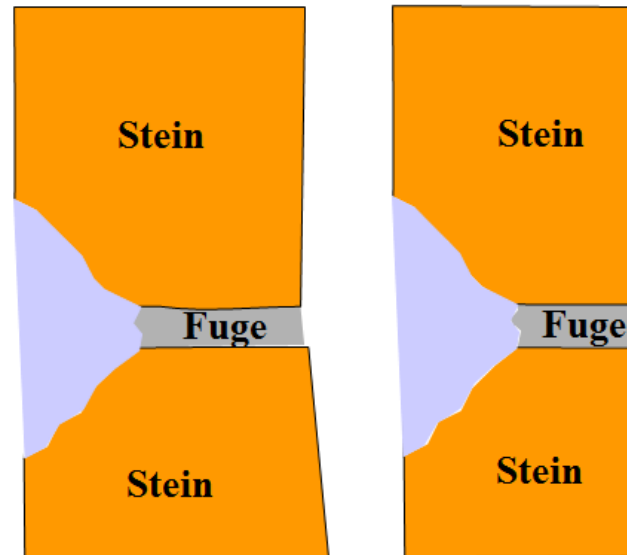
Feuchtigkeitsschutz an steinsichtigen Fassaden und Fugensystemen



Ausbildung von Feuchtigkeits-
Anreicherungen im Bereich von
Fugen bei einer Oberflächen-
Hydrophobierung

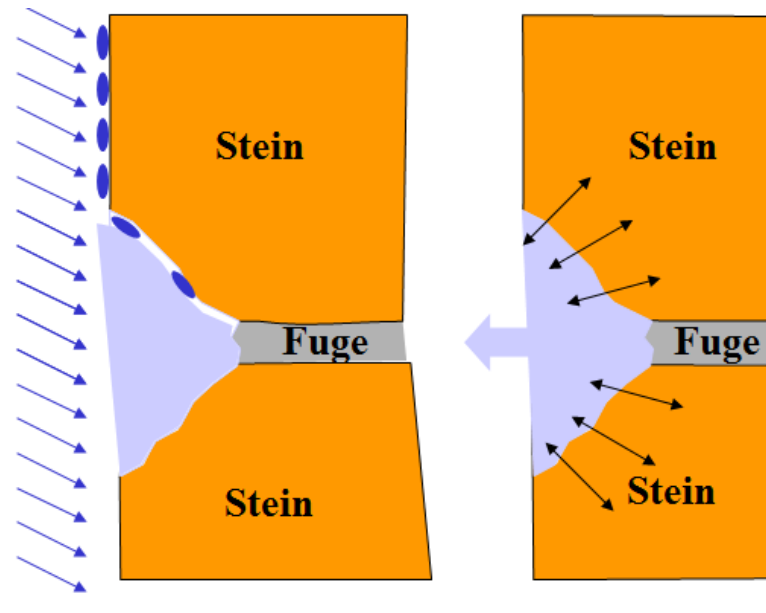
Feuchtigkeitsschutz an steinsichtigen Fassaden und Fugensystemen

Wasseranreichernde Wirkung
einer unrichtig sanierten Fuge



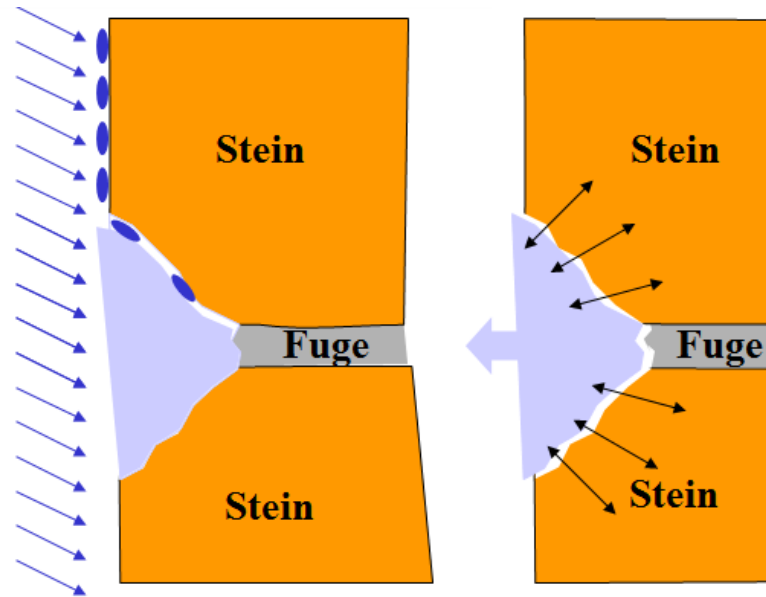
Feuchtigkeitsschutz an steinsichtigen Fassaden und Fugensystemen

Wasseranreichernde Wirkung
einer unrichtig sanierten Fuge



Feuchtigkeitsschutz an steinsichtigen Fassaden und Fugensystemen

Wasseranreichernde Wirkung
einer unrichtig sanierten Fuge



Übersicht

- Allgemeines
- Porenstruktur von Baustoffen und ihre Eigenschaften
- Verwitterungsprozesse
- Kondensationsprozesse
- Befeuchtungsprozesse
- **Deformationsprozesse**

Deformationsprozesse

- Thermische Formänderungsprozesse
- Hygrische Formänderungsprozesse

Thermische Formänderungsprozesse

- Verändert sich die Temperatur eines Bauteils, so verändern sich durch die thermische Ausdehnung und Kontraktion die geometrischen Maße, die Längen und die Form des Bauteils. Die thermische Ausdehnung wird durch die folgenden beiden Gleichungen beschrieben:

$$\Delta l = \alpha \cdot l_0 \cdot \Delta t \qquad l = l_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta t)$$

α linearer Ausdehnungskoeffizient

l_0 Ausgangslänge

Δt Temperaturveränderung

Thermische Formänderungsprozesse

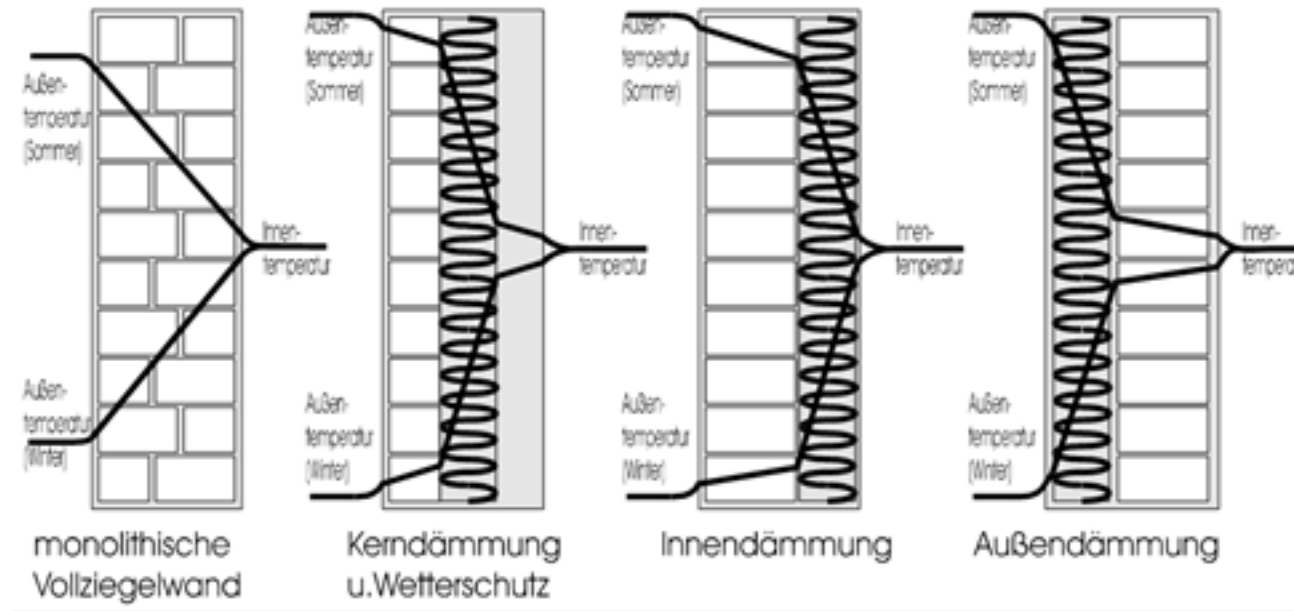
- Kann diese thermische Ausdehnung als Folge des eingebauten Zustandes nicht kräftefrei erfolgen, so können sogenannte thermische Spannungen auftreten. Wenn keine Ausdehnung möglich ist, erreichen diese einen Maximalwert von

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

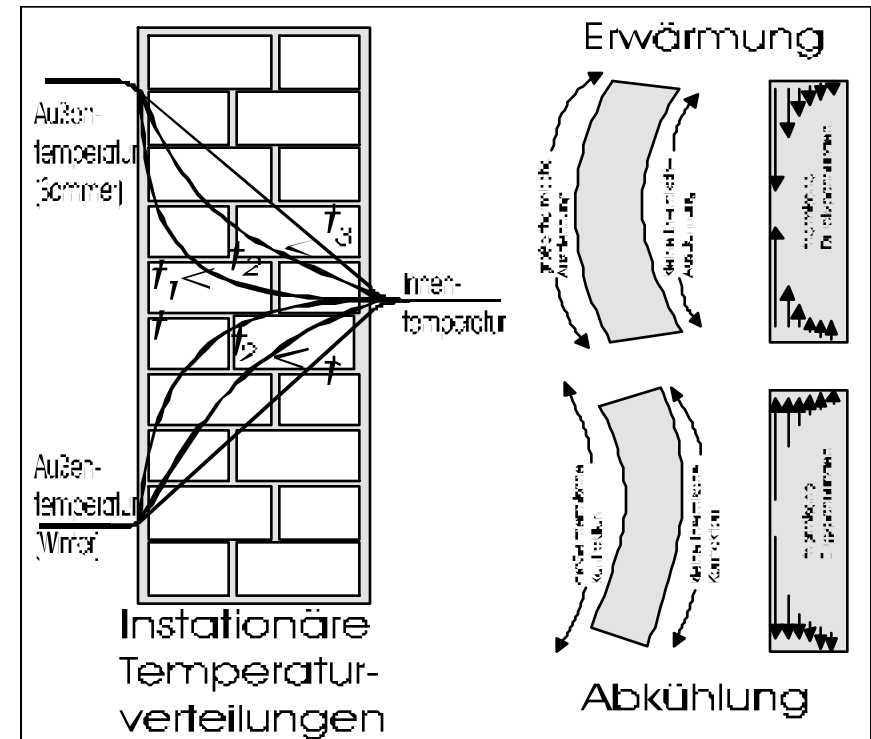
- E - Elastizitätsmodell

Baustoff	Ausdehnungskoeffizient in K^{-1}	Elastizitätsmodul E in N/mm^2
Kalkmörtel	0,000012	6000
Zementmörtel	0,000010	20000
Vollklinker	0,000006	15000
Klinker	0,000005	30000
Beton	0,000012	30000
Porenbeton	0,000008	1000
Kalksandstein	0,000008	15000
Sandstein	0,000012	40000
Kalkstein	0,000006	30000
Granit	0,000007	20000

Stationäre Temperaturverteilung von Außenwänden



Verstärkung der Deformationswirkung durch instationäre Einflüsse



Wirkungen

Außenwandtyp	thermische Ausdehnung	therm. Verwölbnungsverh.
monolithische Wand	etwas gemäßigte (durch Wärmeableitung) thermische Ausdehnung und Kontraktion der Außenseite der Wand	relativ starke Verwölbung der tragenden Schicht durch große Temperaturdifferenzen
Kerndämmung	starke Erwärmung und Abkühlung der Wetterschutzschicht, geringe Temperaturbelastung der tragenden Schicht, große Längendifferenzen zwischen tragender Schicht und Wetterschutzschicht	Geringe Verwölbung der tragenden Schicht und der Wetterschutzschicht
Innendämmung	starke Erwärmung und Abkühlung der tragenden Schicht, starke Temperaturbelastung und starkes thermische Arbeiten	Geringe Verwölbung der tragenden Schicht
Außendämmung	starke Erwärmung und Abkühlung der Putzschichten und starke Temperaturbelastung und starkes thermische Arbeiten, geringe Temperaturbelastung der tragenden Schicht	Geringe Verwölbung der tragenden Schicht

Hygrische Formänderungsprozesse

- Analog zu der thermischen Belastung und der dadurch hervorgerufenen Formveränderung bzw. Spannungsbelastung ruft auch die Einlagerung von Feuchtigkeit und die Trocknung Quell- und Schwindvorgänge hervor. Zur Beschreibung der hygrischen Formveränderungsvorgänge benutzt man folgenden Zusammenhang:

$$\Delta l = \varepsilon_F \cdot l_0$$

ε_F .. relative Dehnung bei Sättigung des Baustoffs mit Feuchtigkeit

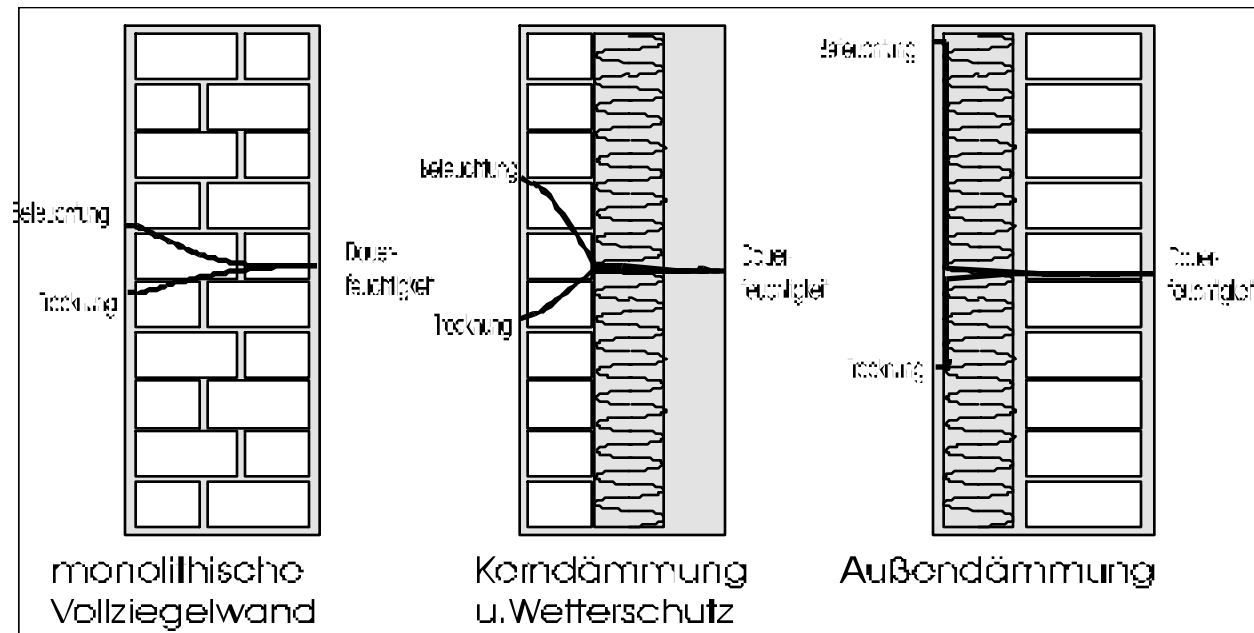
Hygrische Formänderungsprozesse

- Im allgemeinen wird nur die Dehnung bei Sättigungsfeuchtigkeit verwendet. Ein vom Feuchtigkeitsgehalt abhängigen hygrischen Ausdehnungskoeffizienten wird weniger benutzt.

Quell- und Schwindmaße für Baustoffe

Baustoff	Quell- und Schwindmaß ε_F in mm/m
Beton	0,050,14.....0,2
Leichtbeton	0,2..0,3.....0,8...1,0
Gassilikatbeton	0,2
Gips	0,08 . 0,5
Holzbeton	3,0.....5,0
Sandstein	0,03 6,0
Ziegel	0,12
Epoxidharz	0,01.....0,02
Polyesterharz	0,02 0,025

Feuchtigkeitsverteilung von Außenwänden



Wirkungen

Außenwandtyp	hygrische Ausdehnung	hygr. Verwölungsverhalten
monolithische Wand	gemäßigte (durch Feuchtigkeitsableitung) hygrische Ausdehnung und Kontraktion der Außenseite der Wand	geringfügige Verwölbung der tragenden Wand
Kerndämmung	stärkere Befeuchtung und Trocknung der Wetterschutzschicht, da durch die Wärmedämmschicht die Feuchtigkeitslast nicht mehr „abgepuffert“ wird.	Geringe Verwölbung der Wetterschutzschicht
Außendämmung	starke Befeuchtung und Trocknung der Putzschichten und Bekleidungen, da durch die Wärmedämmschicht keine „Abpufferung“ mehr erfolgt.	

Maximale Druck- und Zugfestigkeit von Baustoffen

Baustoff	Elastizitätsmodul in N/mm ²	Druckfestigkeit in N/mm ²	Zugfestigkeit in N/mm ²
Mauerziegel	15000 - 20000	10 - 35	2
Klinker	20000 - 40000	45 - 75	5 - 10
Beton	20000 - 40000	45	3,5
Zementmörtel	20000	10	1 - 2
Mörtelgruppe III	8000 - 15000	10	1 - 2
Mörtelgruppe II	6000	2 - 5	0,3
Mörtelgruppe I	6000	1	≈ 0

Maximalspannung - Temperatur

- Unterliegen Baustoffe einer Temperaturveränderung ohne dass sie sich thermisch ausdehnen können, da sie im Gebäude oder Steinverband eingebaut sind, entwickeln sich laut Gleichung die Maximalspannung

$$\sigma_{\Delta t} = E \cdot \alpha \cdot \Delta t$$

Maximalspannung - Feuchtigkeit

- Ist ein Baustoff mit Feuchtigkeit gesättigt ohne dass sich der hygrische Quellvorgang durch einen eingebauten Zustand vollziehen kann, so entwickeln sich die folgende hygrischen Spannungen:

$$\sigma_F = \varepsilon_F \cdot E$$

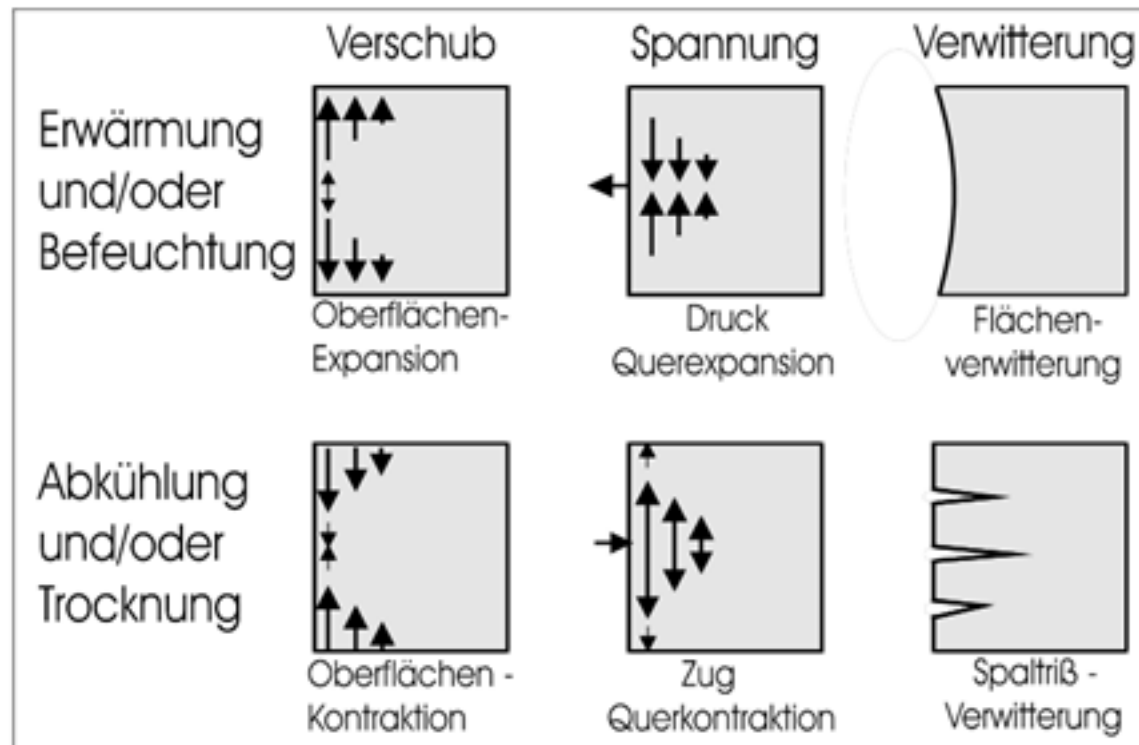
Maximalspannung – Kombination Temperatur und Feuchtigkeit

- Wirken sowohl Temperatur- als auch Feuchte-Belastungen zur gleichen Zeit, können sich beide Effekte überlagern:

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\Delta t} + \sigma_F = E \cdot (\alpha \cdot \Delta t + \varepsilon_F)$$

Maximale Spannungen in Baustoffen - Verwitterungsverhalten

Baustoff	Zugf.in N/mm ²	E-Modul in N/mm ²	α in mm/m*K	$\alpha \cdot 10^\circ$ in mm/m	ε_F in mm/ m	$E \cdot (\alpha \Delta T + \varepsilon_F)$ in N/mm ²	Verwitterung
Kalkmörtel	0,3	6000	0,012	0,12	0,40	3,1	stark
Zementm.	1,5	20000	0,010	0,10	0,20	6	stark
Gasbeton	0,3	1000	0,008	0,08	0,40	0,48	stark
Ziegel	2	15000	0,006	0,06	0,07	2	gering
Beton	3,5	30000	0,012	0,12	0,14	7,8	mittel
Kalksand- stein	0,8	10000	0,008	0,08	0,10	1,8	mittel
Sandstein	6	30000	0,011	0,11	0,30	13	mittel
Kalkstein	8	30000	0,006	0,06	0,10	5	gering
Granit	10	10000	0,007	0,07	0,08	1,5	gering



Schadensbilder von Putzschichten

