

Základy stavební fyziky s důrazem na vzlínající vlhkost ve stavebních konstrukcích

Karol Bayer

Klasická stavební fyzika z hlediska uživatelských vlastností stavby zahrnuje především tepelně-vlhkostní parametry a dále i akustiku budov a místností. V širším slova smyslu sem patří i požární ochrana a osvětlení.

Lze ji rozdělit do několika klíčových oblastí:

1. Teplo a tepelné vlastnosti materiálů
2. Vlhkost a klima
3. Zvuk a akustika
4. Světlo a osvětlení
5. Energetické bilance budovy

Stavební materiály a jejich vlastnosti

Základy stavební fyziky

Fyzikální principy

Stavební fyzika se opírá o několik fyzikálních disciplín, přičemž klíčovou roli hrají termodynamika, akustika a mechanika tekutin. Tyto disciplíny popisují základní procesy, které probíhají v rámci stavebních konstrukcí a jejich interakce s vnějším prostředím:

- **Termodynamika:** Popisuje přenos energie ve formě tepla. Ústřední význam zde mají jevy vedení tepla, konvekce a tepelného záření.
- **Akustika:** Přenos a pohlcování zvuku hrají ústřední roli ve stavební fyzice, aby byla zajištěna ochrana proti hluku a příjemné akustické podmínky.
- **Mechanika tekutin:** Zabývá se pohybem vzduchu a vody, což je důležité pro ventilaci a transport vlhkosti v budovách.

Parametry

Teplota

Vlhkost vzduchu

Světlo (záření)

Proudění vzduch (ventilace)

Složení vzduchu

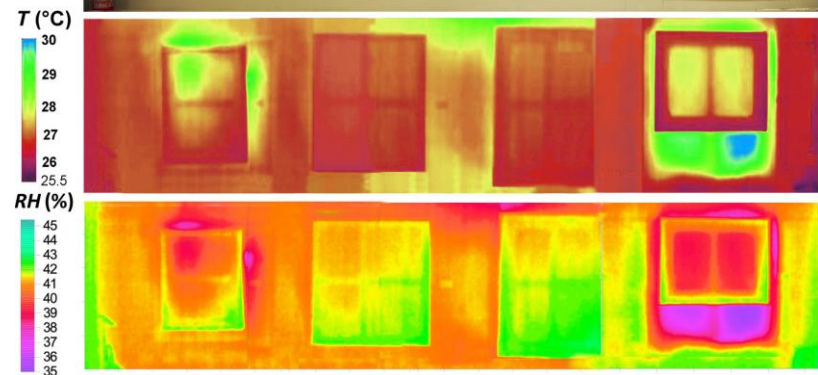
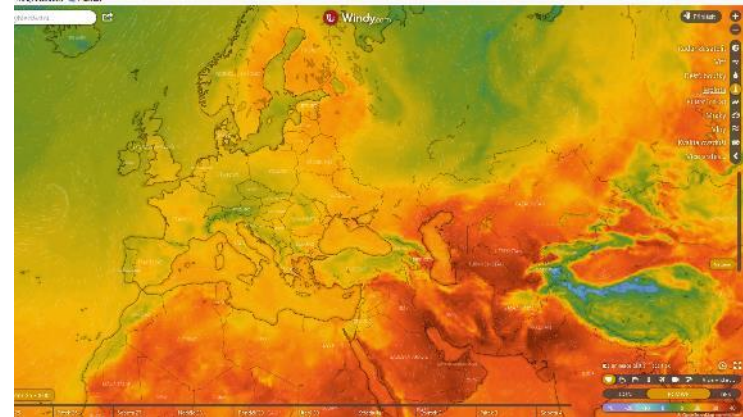
Mikroklima – klimatické podmínky v
definované, ohraničené oblasti

širší zeměpisná oblast – kontinent, část
kontinentu ...

region nebo jeho specifická část – pohoří,
ostrov, jeskyně, zahrada ...

budova nebo její části

archeologická lokalita



Vliv teploty

Tvarové změny – rozpínání / smršťování

Změny relativní vzdušné vlhkosti

Změny fyzikálních vlastností

Biologické napadení

Urychlení stárnutí

Extrém – havarijní stavy (požáry)



Tepelná roztažnost

změna rozměrů (objemu) se změnou teploty

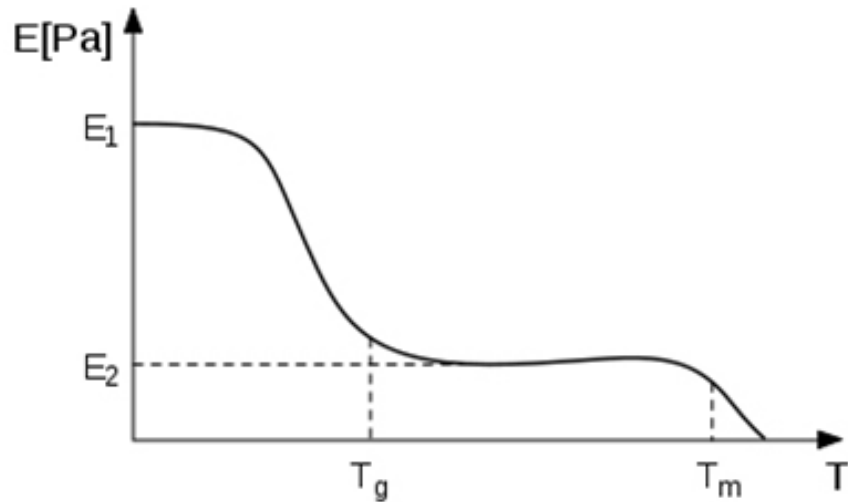
$$\Delta l = \alpha \cdot l_1 \cdot \Delta t$$

α ... Lineární koeficient tepelné roztažnosti (1/K)

Materiál	$\alpha \cdot 10^6$ (1/K)	Změna délky při zahřátí o 10°C (mm/m)
Bronz	18	0,18
Hliník	24	0,24
Chrómová ocel	10	0,10
Niklová ocel	12	0,12
Měkká ocel	13	0,13
Měď	17	0,17
Mosaz	18	0,18
Olovo	29	0,29
Zinek	36	0,36
Železo	12	0,12
Cihla	5	0,05
Beton	7	0,07
Sádra	25	0,25
Sklo	10	0,10
Porcelán	4	0,04
Křemen	1	0,01
Pískovec	12	0,12
PVC	80	0,80

Materiál	$\alpha \cdot 10^6$ (1/K)	Změna délky při zahřátí o 10°C (mm/m)
Dřevo (dub)	50-60	0,50-0,60
Polyamid	60-150	0,60-1,50
Polyethylen	150-200	1,50-2,00
PMMA	75-80	0,75-0,80
Vlna	20-30	0,20-0,30
Acetát celulózy	130	1,30

Vliv teploty – polymery, elasticita, T_g



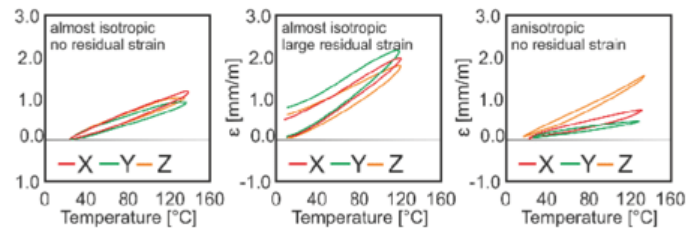
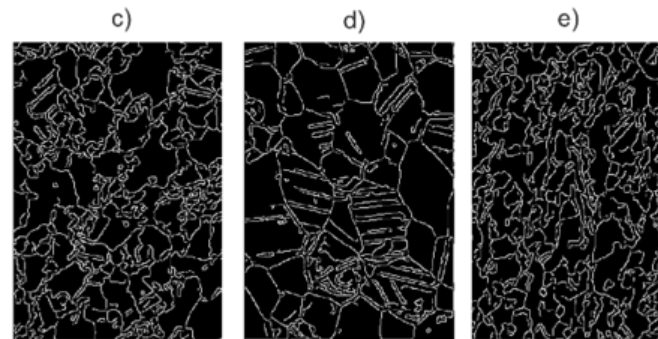
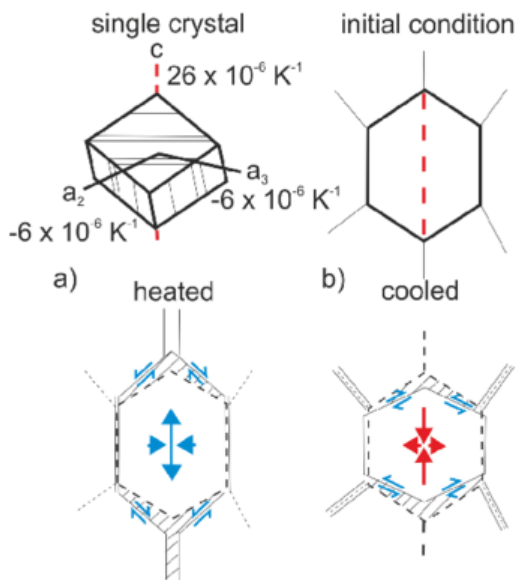
Material	T_g (°C)
Tire rubber	-70
Polyvinylidene fluoride (PVDF)	-35
Polyvinyl fluoride (PVF)	-20
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	115
Polysulfone	185
Polystyrene (PS)	95
Polypropylene (PP isotactic)	0
Polypropylene (PP atactic)	-20
Polynorbornene	215
Poly(lactic acid) (PLA)	60–65
Polyethylene terephthalate (PET)	70
Polychlorotrifluoroethylene (PCTFE)	45
Polyamide (PA)	47–60
Poly(vinyl chloride) (PVC)	80
Poly(vinyl alcohol) (PVA)	85
Poly(vinyl acetate) (PVAc)	30
Poly(methyl methacrylate) (PMMA atactic)	105
Poly(carbonate) (PC)	145
Poly-3-hydroxybutyrate (PHB)	15
Acrylonitrile butadiene styrene (ABS)	105



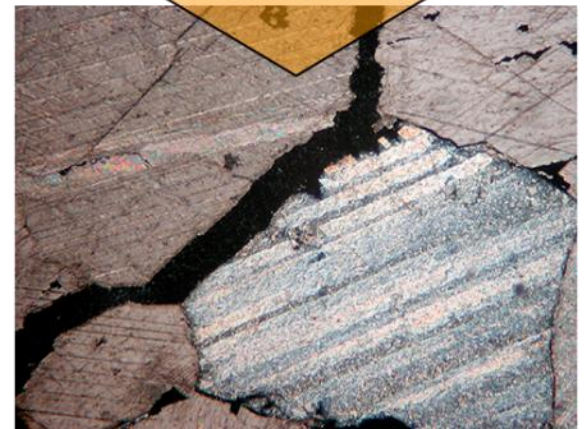
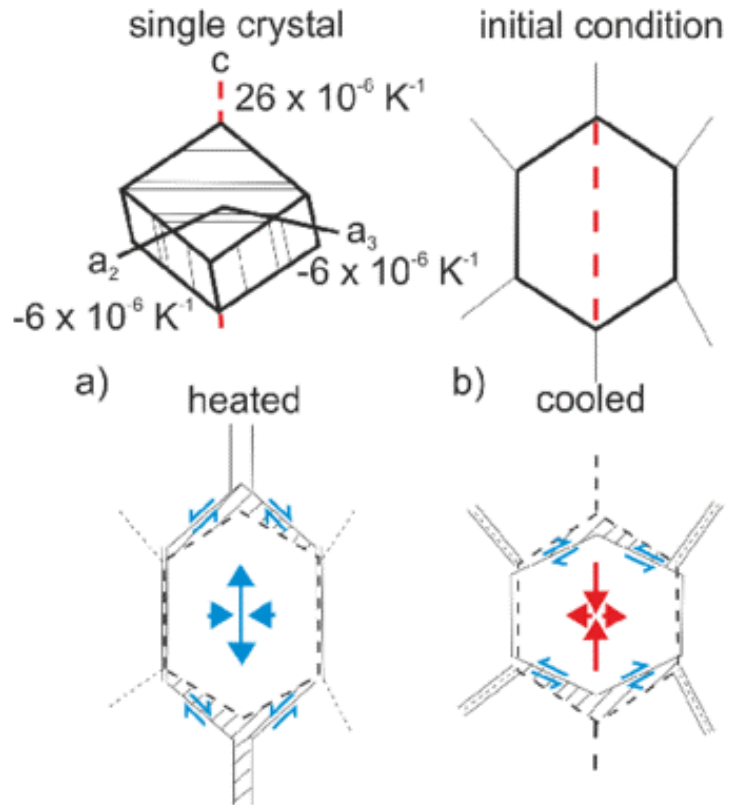
Vliv teploty

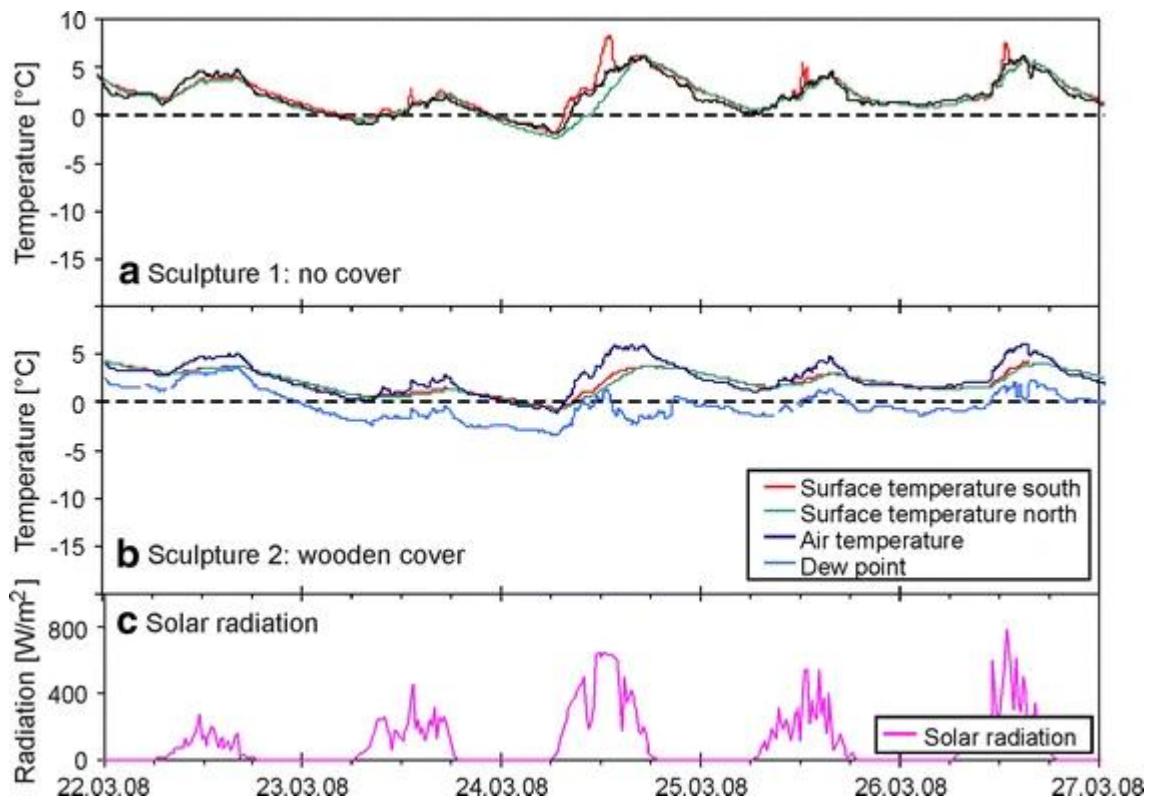
Kolísání teploty

Mrazové cykly

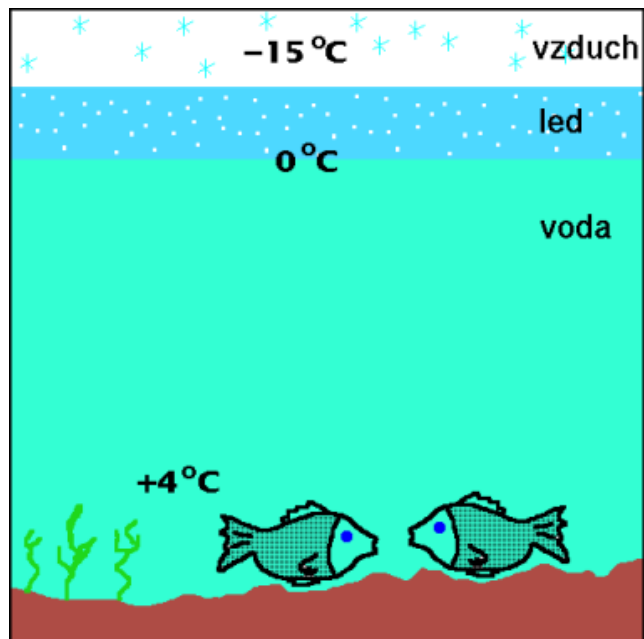


Kolísání teploty – krystal kalcitu





Kolísání teploty – anomálie vody



Kolísání teploty – anomálie vody

Teplota

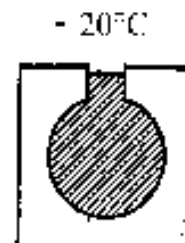
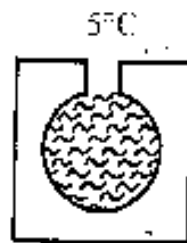
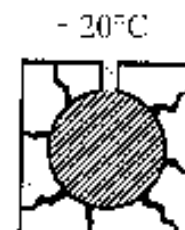
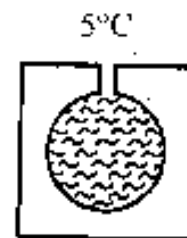
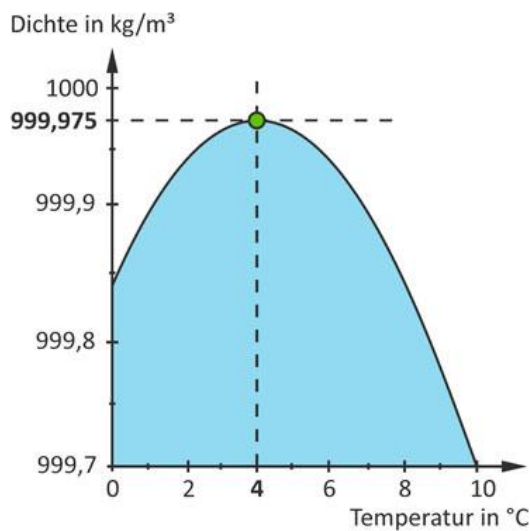
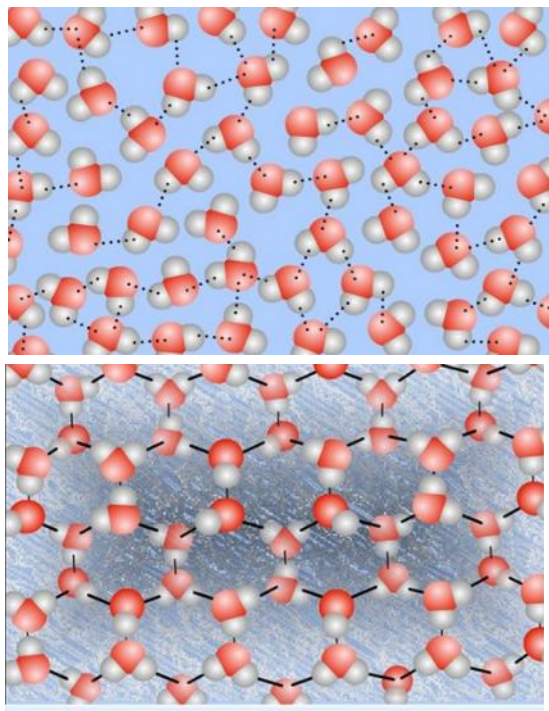
0°C (led)

+4°C (maximum)

Hustota [g/cm³]

0,918

0,999975



Vliv vlhkosti

Tvarové změny – rozpínání / smršťování

Změny fyzikálních vlastností

Transport a migrace vodorozpustných sloučenin

Urychlení stárnutí

Biologické napadení

Extrém – havarijní stavy

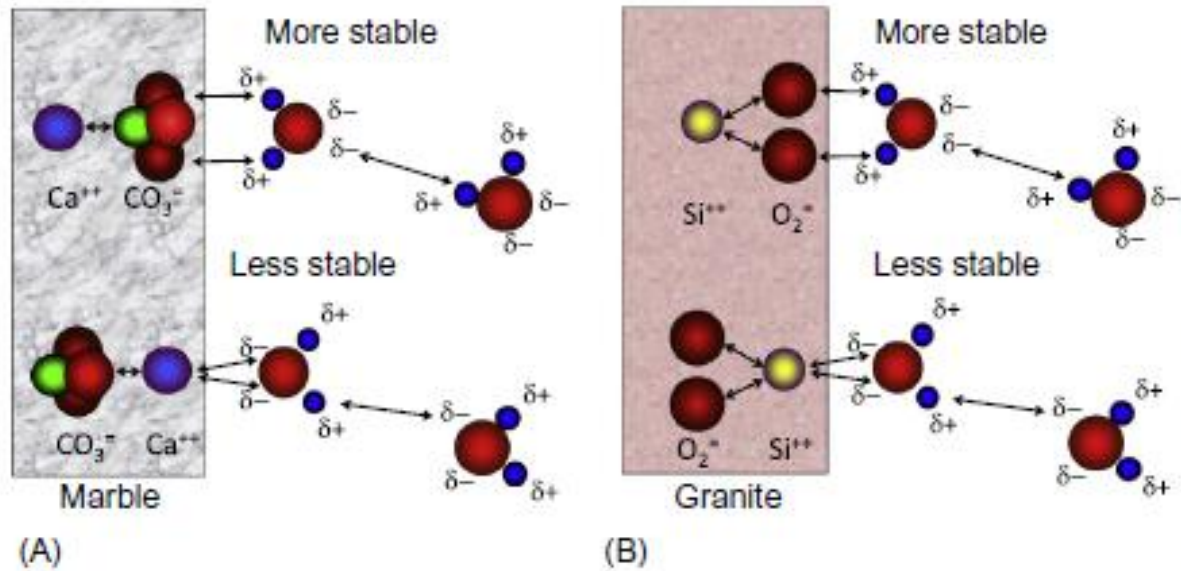
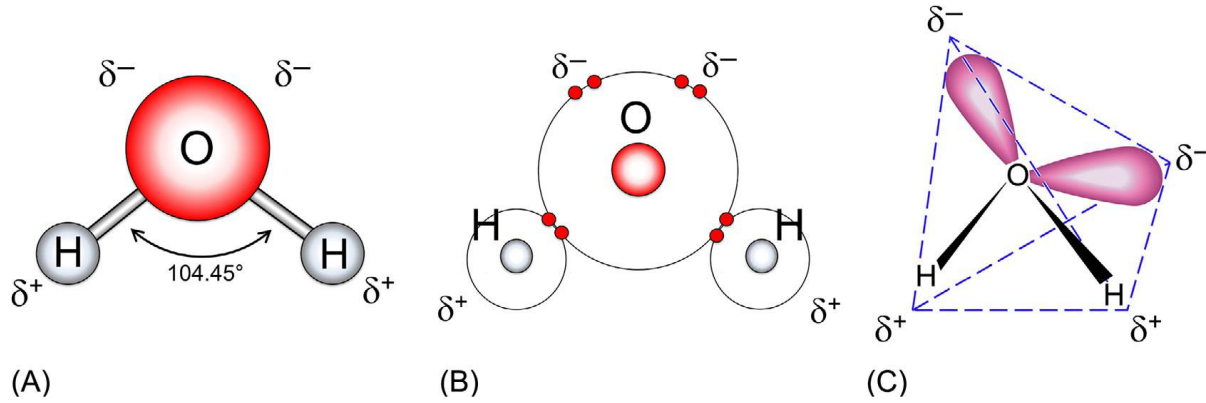
Vlhkost (voda)

Přímý kontakt s kapalnou vodou

- Srážky
- Vzlínání
- Kondenzace
- Havarijní stavy – průsaky, poruchy, povodně, zásahy při požárech

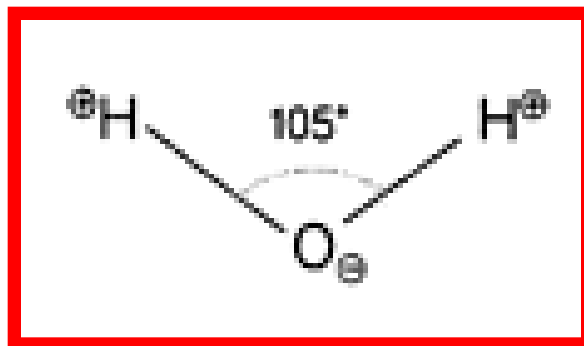
Vzdušná vlhkost – voda v plynném skupenství

Vliv vlhkosti

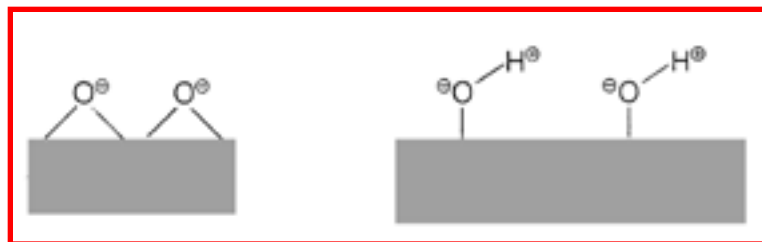


Transport a migrace vody v porézních anorganických materiálech.

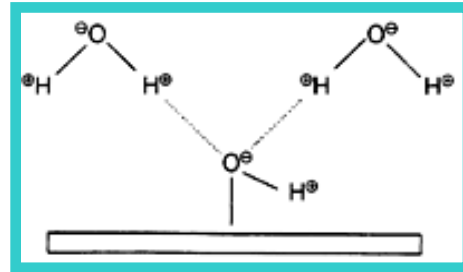
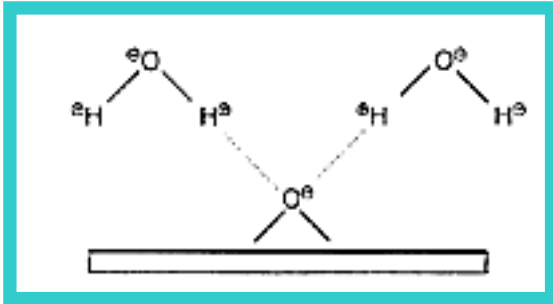
Molekula vody – H_2O – polární molekula



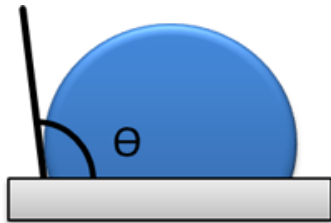
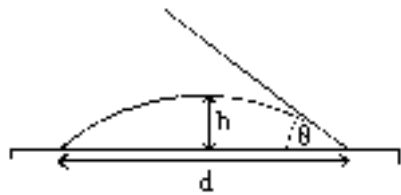
Povrch anorganického porézního materiálu – polární



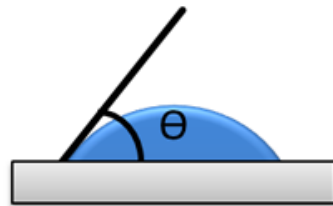
Voda na povrchu porézného anorganického materiálu



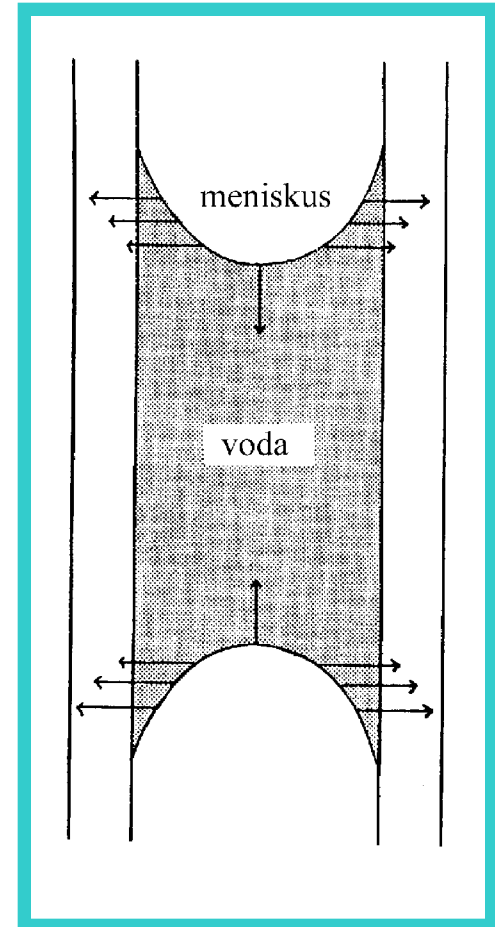
$$\theta = 2 \arctg (2h/d)$$



hydrophob



hydrophil



$h = 2\sigma \cdot \cos\theta / r \cdot \rho \cdot g$ (rovnováha mezi kapilárními a gravitačními silami)

h ...výška vzlínání (m)

σ ...povrchové napětí vzlínající kapaliny (N/m)

θ ... kontaktní úhel mezi kapalinou a povrchem kapiláry

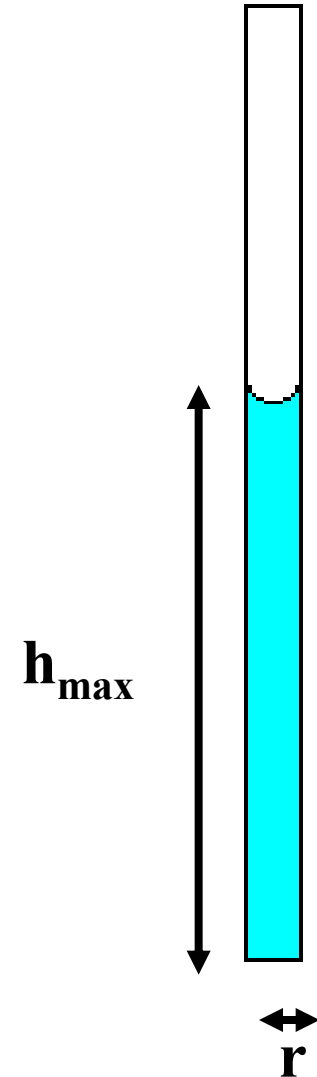
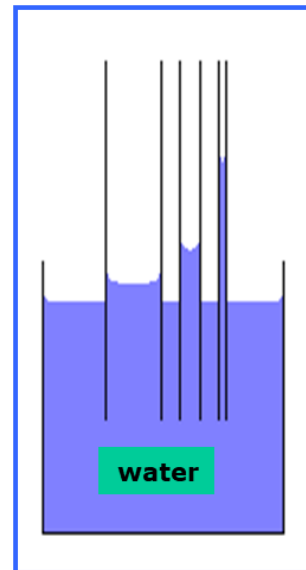
r ... poloměr kapiláry (m)

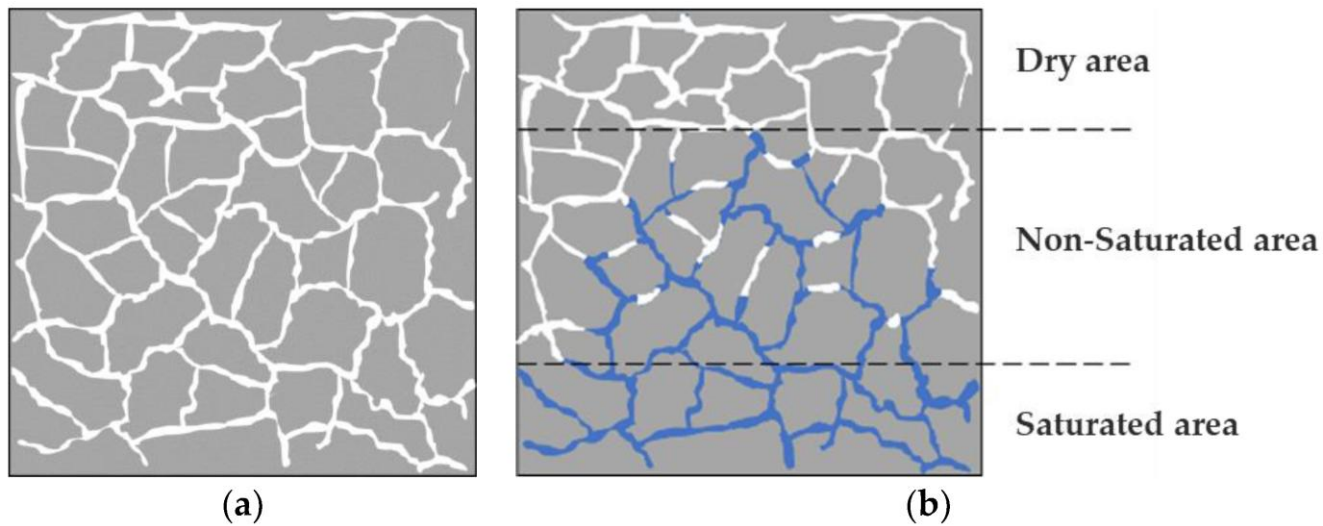
ρ ...hustota vzlínající kapaliny (kg/m^3)

g ...gravitační zrychlení ($9,8 \text{ m/s}^2$)

pro vodu - $h_{\text{max}} = 15 \cdot 10^{-6} / r$ (m)

Průměr kapiláry	Výška vzlínání
1 mm	15 mm
0,1 mm	150 mm
0,01 mm	1,5 m
0,001 mm	15 m





Vzlínání kapalné vody v anorganických porézních materiálech – kapilárně aktivní póry (průměr 0,10 μm až 1 mm)

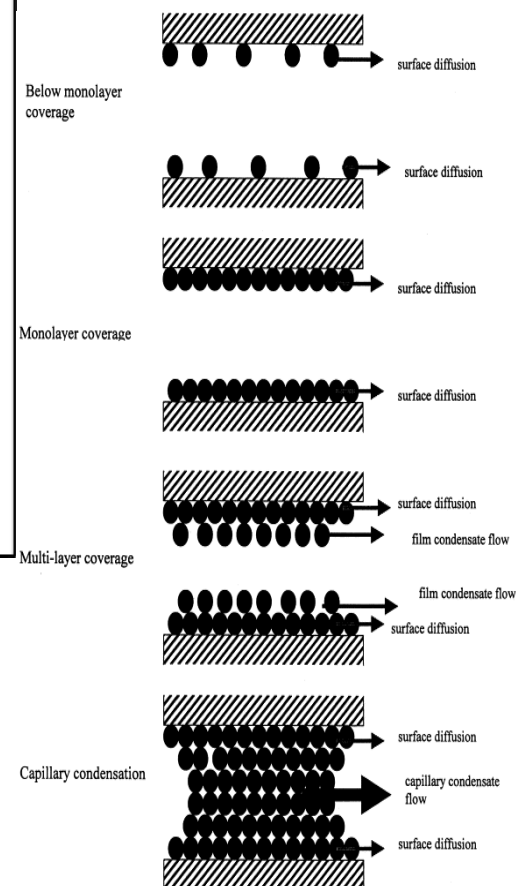
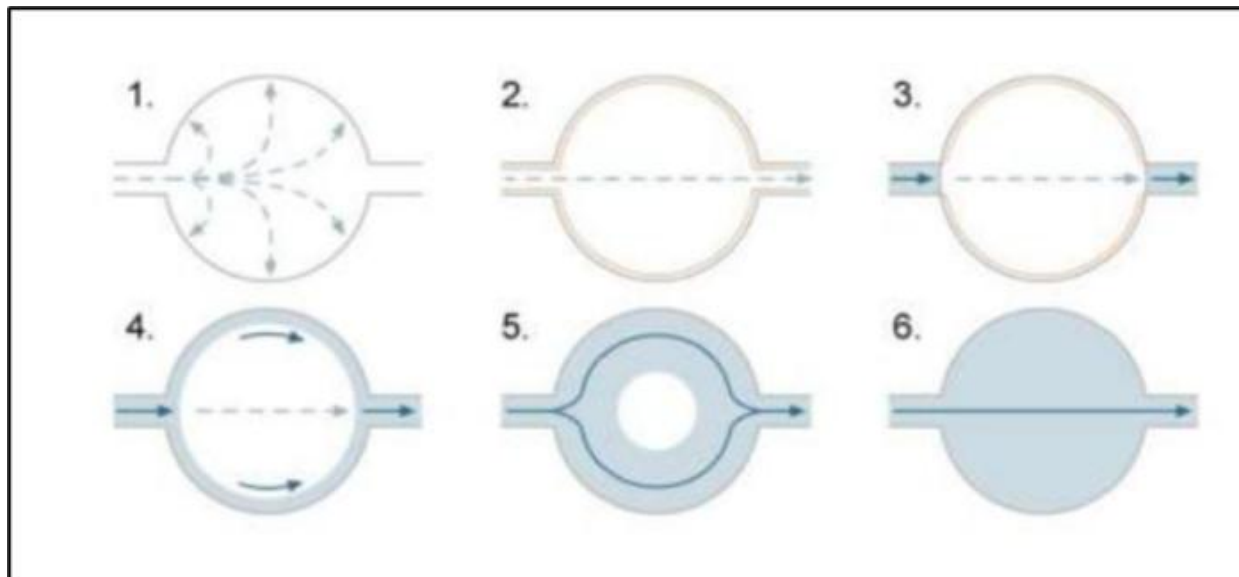
Větší póry – převáží gravitace

Menší póry – piliš pomalý transport

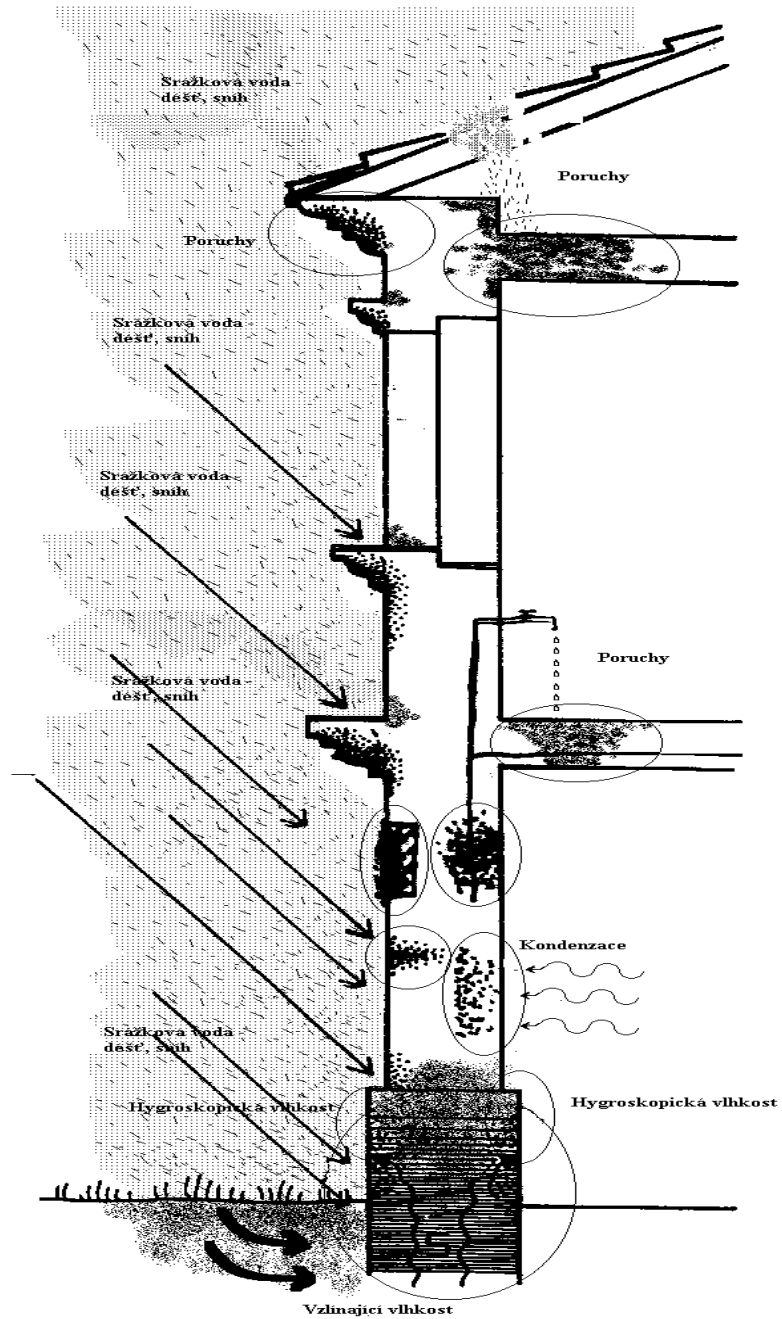
Příjem a transport kapalné vody porézními anorganickými materiály

- **kapilární vzlínání**
- **kondenzace** – vylučování kapalné vody z vodních par ve vzduchu
- **kapilární kondenzace** – vylučování kapalné vody z vodních par kapilárním systémem daného materiálu (před dosažením rosného bodu) větší význam má až při vyšších relativních vlhkostech vzduchu
- **hygroskopicitá** – vázání vody ze vzdušné vlhkosti tzv. hygroskopickými látkami (hlavně soli)
- **osmóza a difuze** – vyrovnání koncentrací
- elektrokinetické síly – při působení elektrického pole
- tepelný gradient – migrace vody do míst s nižší teplotou

Příjem vlhkosti z okolní atmosféry



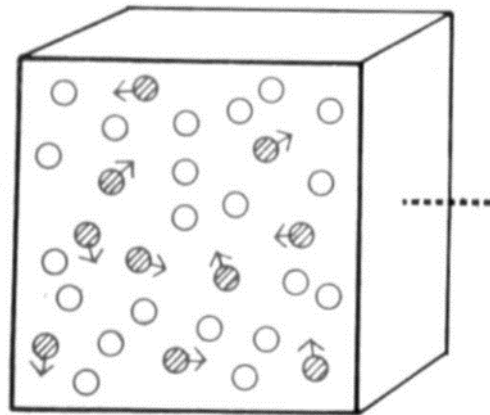
Zdroje vlhkosti



Absolutní vlhkost vzduchu

Absolutní vlhkost vzduchu - hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu.

$$AH = m_w / V \quad (\text{g/m}^3)$$



Relativní vzdušná vlhkost

Poměr aktuálního množství vodní páry ve vzduchu (absolutní vlhkosti) ke stavu nasycení při dané teplotě

$$RH = AH / S (\%) \quad \Phi - \text{fí}$$

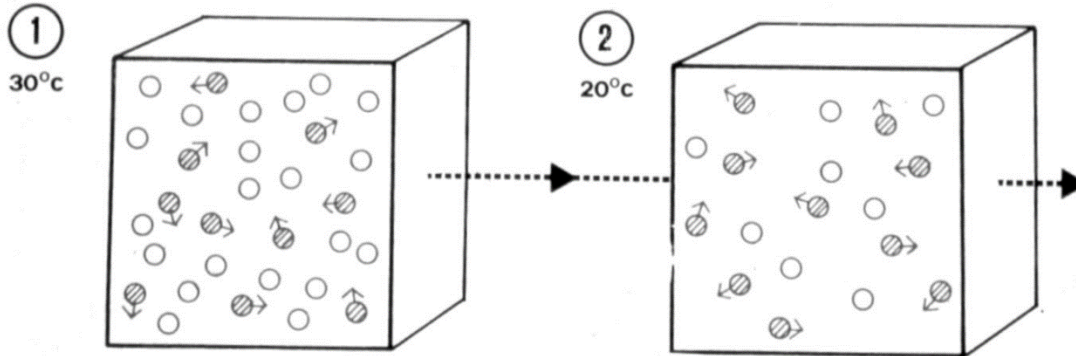
● RELATIVE HUMIDITY (R.H.)

Relative humidity in a given volume of air is the ratio of absolute humidity to saturation at the same temperature.

$$R.H. = \frac{A.H.}{S} \times 100 \quad (\text{or}) \quad \frac{\text{Actual}}{\text{Possible}} \times 100$$

Relative humidity is expressed as a percentage and therefore varies from 0% to 100%.

Let us take the previous examples and represent them below.

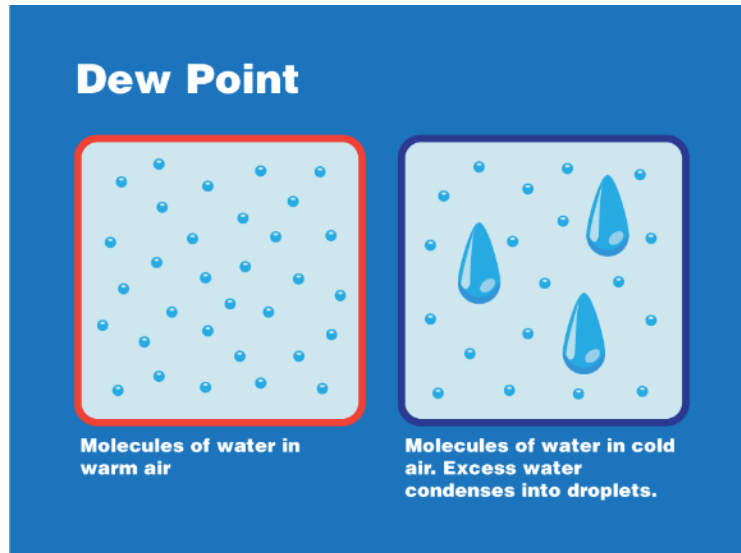


$$H.R. = \frac{10}{31} \times 100 = 33\%$$

$$H.R. = \frac{10}{18} \times 100 = 55\%$$

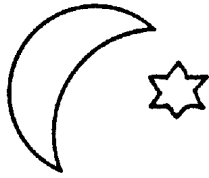
Nasycení vodních par - vzduch je nasycen tehdy, obsahuje-li maximální možné množství páry aniž by došlo k její kondenzaci.

Rosný bod - teplota, na kterou musí být ochlazen vzduch, aby došlo k saturaci (nasycení) vodních par. (konstantní tlak a konstantní obsah vodních par

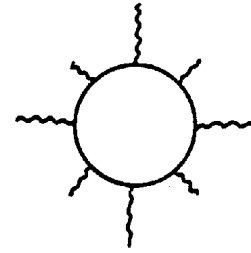
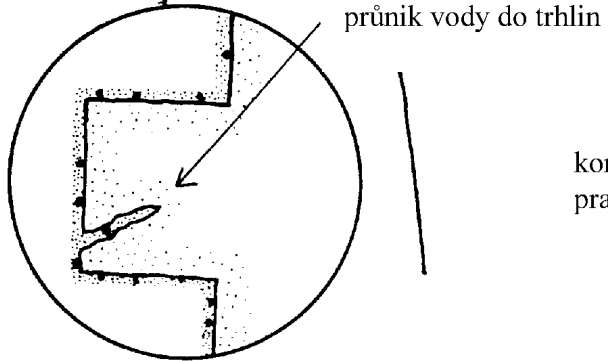
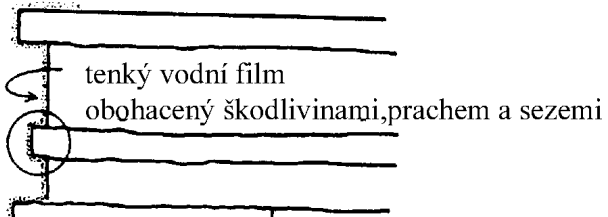


Kondenzace

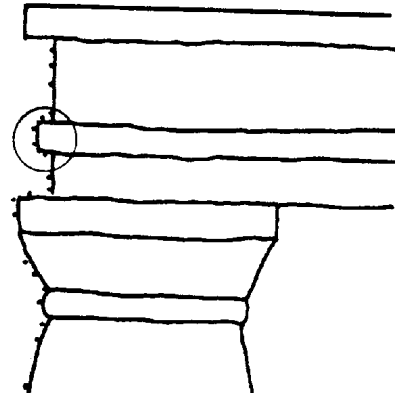




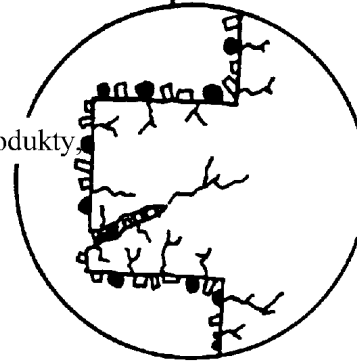
kondenzace



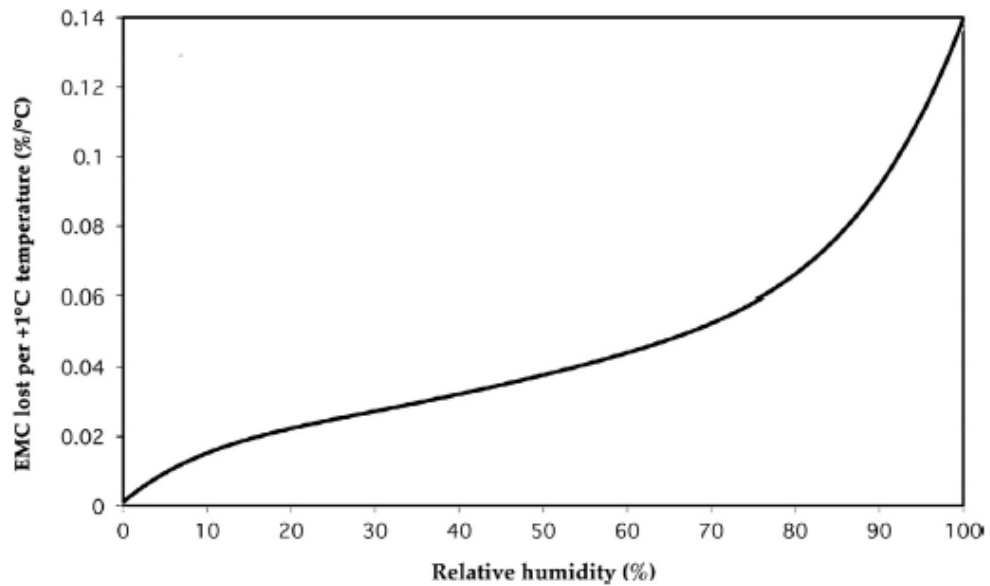
vysychání



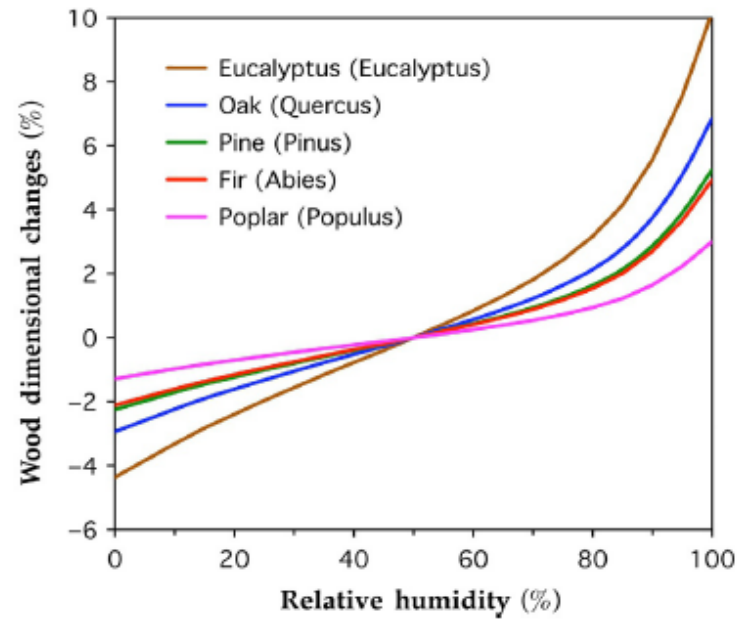
korozní produkty
prach, saze



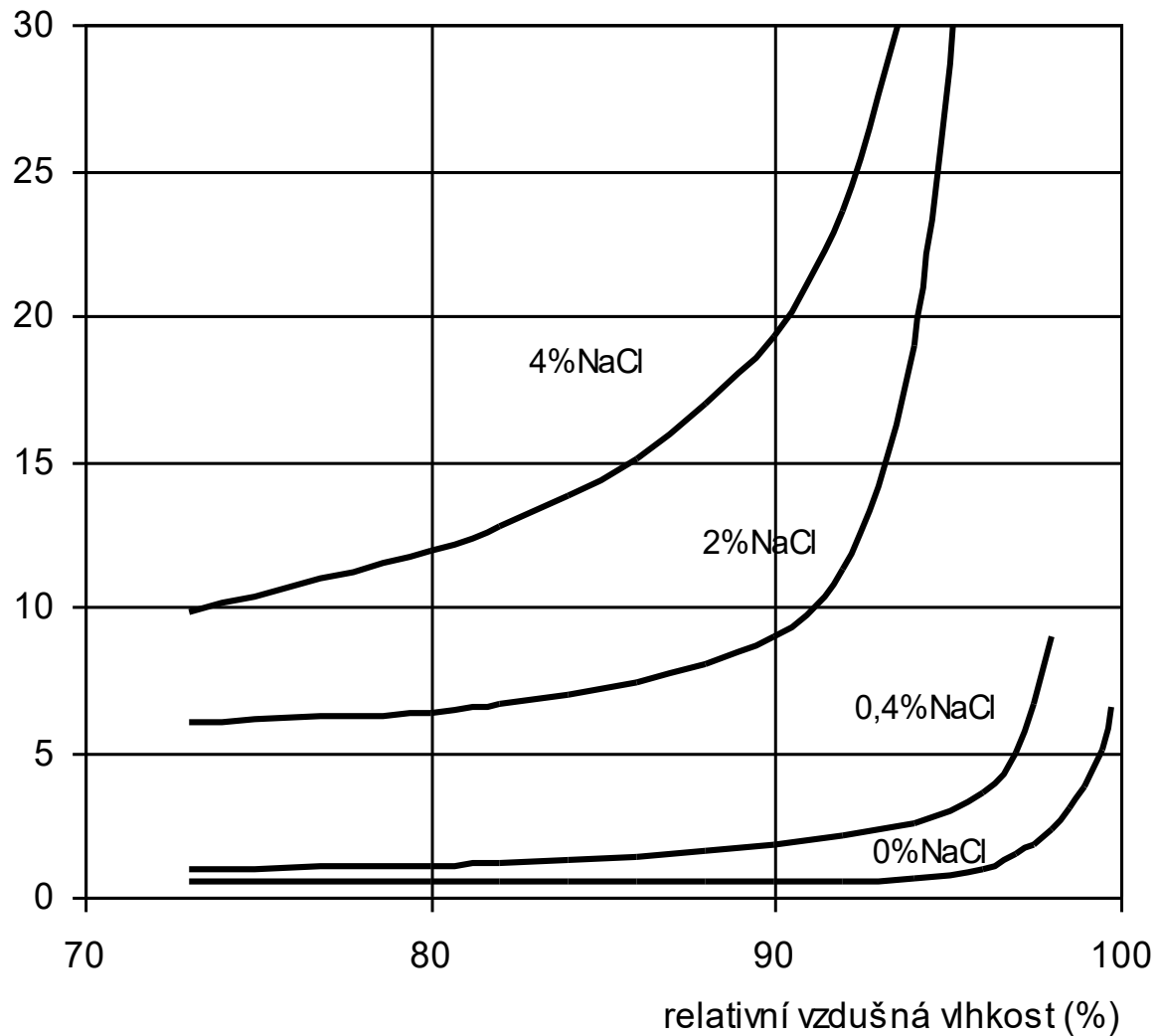
Sorpční izoterma



Dilatace



hygroskopická nasákavost (%obj.)



1. Konstantně vysoká R. V. (vyšší než 70 %)

- optimální prostředí pro růst hub a plísní,
- koroze železných kovů a slitin mědi (možné rozšíření chloridové koroze, sorpce aerosolů oxidů síry),
- mobilizace solí v porézních materiálech, devitrifikace některých typů skla,
- kondenzace vody na povrchu předmětů, pokud teplota klesne pod teplotu rosného bodu.

2. Konstantně nízká R. V. (nižší než cca 35 %)

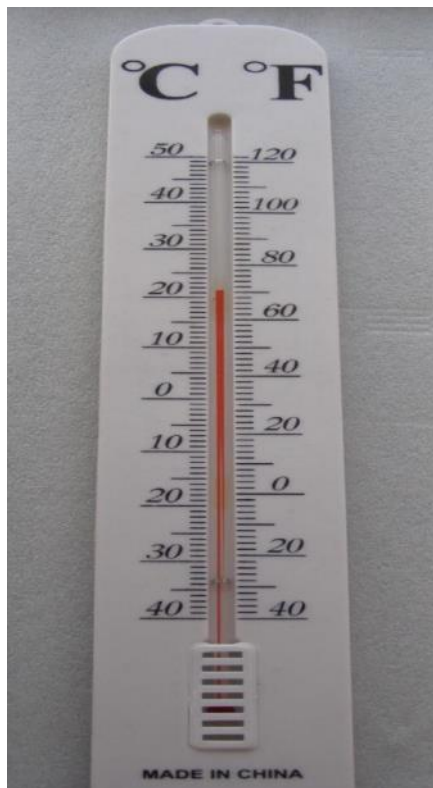
- vysušení a zkřehnutí organických materiálů, následně vnitřní pnutí a praskání laků, malby, kůže aj.,
- sesychání a deformace, posléze praskání a štěpení dřeva,
- výkvěty solí na povrchu porézních materiálů,
- objemové změny, praskání a degradace lepidel a pojiv.

3. Náhlé výkyvy R. V. (5 % nebo vyšší změny vlhkosti během několika hodin)

pro většinu materiálů nejnebezpečnější !!!

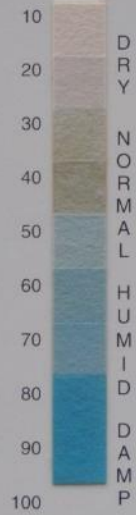
- objemové změny některých materiálů a jejich strukturální poškození,
- změny vnitřního pnutí nebo bobtnání organických materiálů mohou způsobit strukturální poškození předmětu (dřevo, malba, přírodovědné sbírky),
- mobilizace solí v porézních materiálech, změna stupně hydratace solí a jejich rekrystalizace, obě spojené s významnými objemovými změnami solí. V důsledku těchto objemových změn působí ve struktuře porézního materiálu (kamene, keramiky) silné kapilární tlaky, které mohou způsobit jeho vážné poškození,
- pravidelné střídání odpařování a kondenzace vody na povrchu předmětů (zejména při teplotě okolo rosného bodu), v důsledku toho pak dochází např. ke korozi kovových materiálů či zničení nástěnné malby.

Měření / kontrola



HUMIDITY %

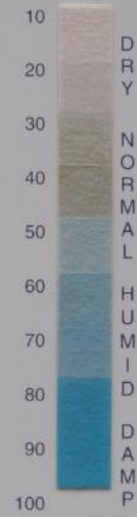
READ TOP OF BLUE
BETWEEN BLUE & PINK



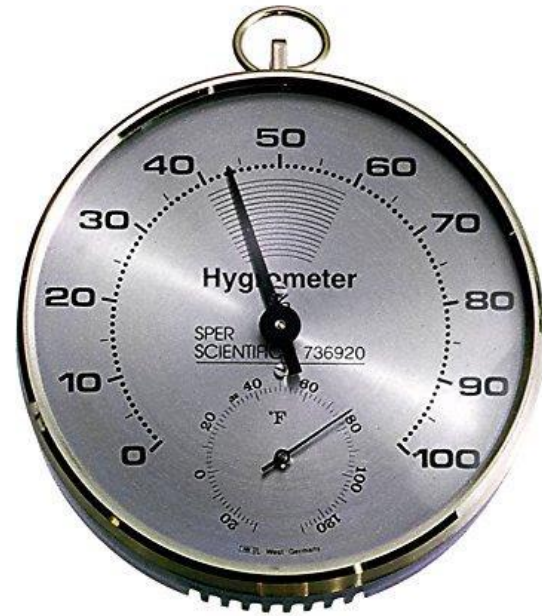
SUD-CHEMIE PERFORMANCE PACKAGING, COLTON, CA

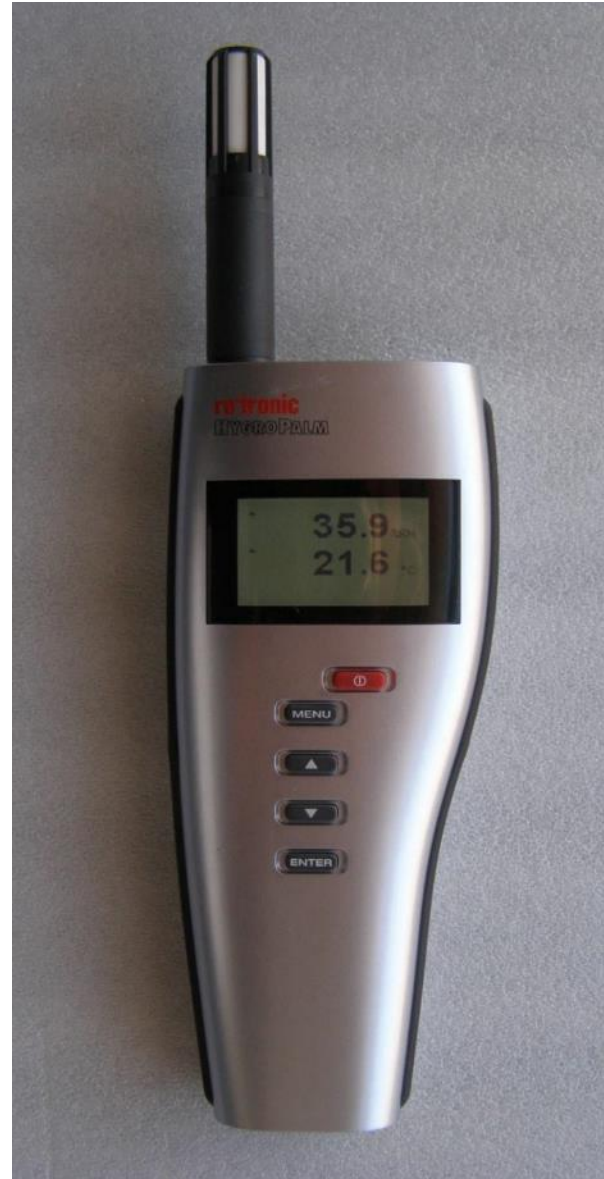
HUMIDITY %

READ TOP OF BLUE
BETWEEN BLUE & PINK



SUD-CHEMIE PERFORMANCE PACKAGING, COLTON, CA





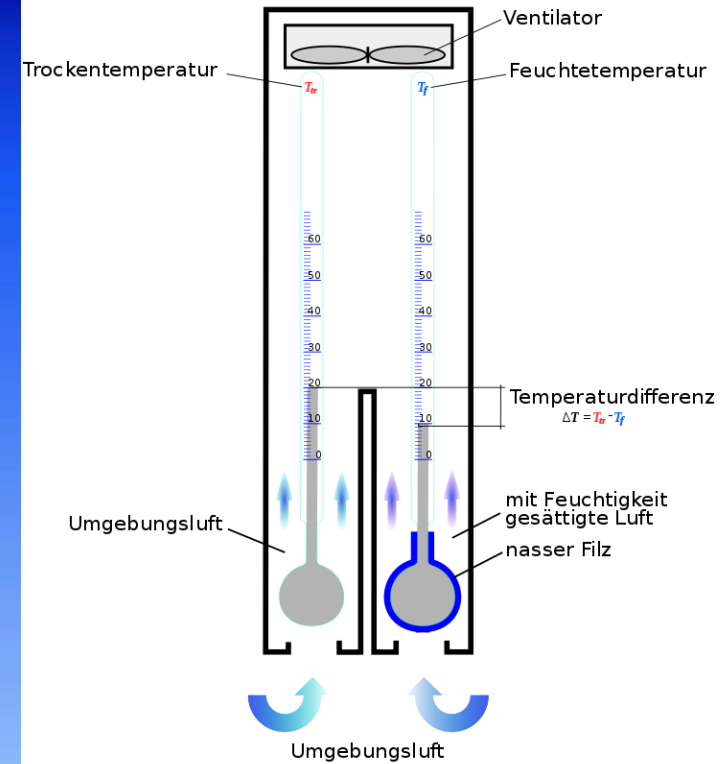
Psychrometr

Dvojitý teploměr

- suchý
- vlhký pokryt navlhčenou látkou

Odpar vody - odnímání tepla

Vlhký teploměr vždy nižší teplota než suchý



relative humidity.

(see exercise 17.5)

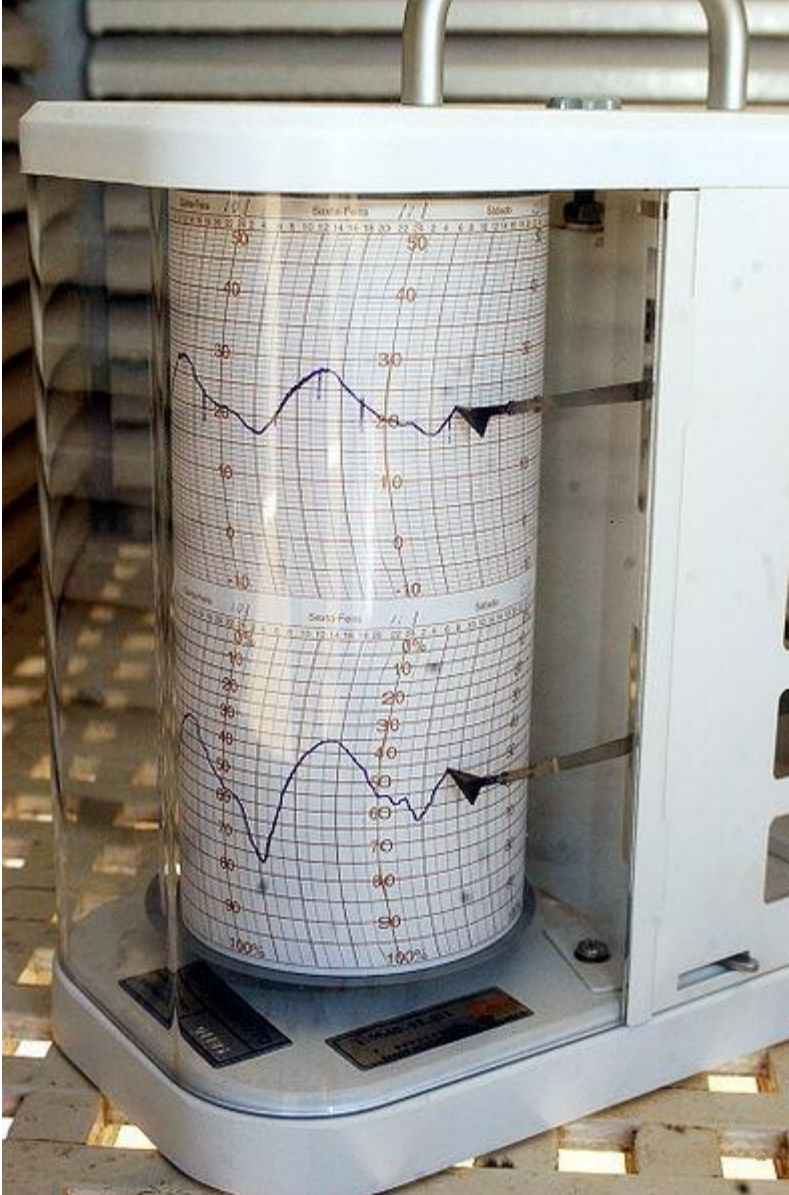
Différence de temperature: Tbs - Tbh

Différence in temperature: Dbt - Wbt

Temperature of otry bulbe Dbt

Température du bulbe sec: Tbs

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
10	100	88	77	65	54	44	34	24	14							
11	100	88	77	66	56	46	36	26	17							
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20							
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14						
14	100	90	79	70	60	51	42	33	25	17						
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20						
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15					
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17					
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20					
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22	15				
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24	18				
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26	20				
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28	22	16			
23	100	92	84	76	69	62	55	48	42	36	30	24	18			
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31	26	20	15		
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33	27	22	17		
26	100	92	85	78	71	64	58	51	46	40	34	29	24	19		
27	100	92	85	78	71	65	59	52	47	41	36	30	25	21	16	
28	100	93	86	79	72	65	59	53	48	42	37	32	27	22	18	
29	100	93	86	79	72	66	60	54	49	43	38	33	28	24	19	15
30	100	93	86	79	73	67	61	55	50	44	39	34	30	25	21	17
31	100	93	86	80	73	67	62	56	51	45	41	36	31	27	22	18
32	100	93	86	80	74	68	62	57	52	46	42	37	32	28	24	20
33	100	93	87	80	74	69	63	58	52	47	43	38	34	29	25	21
34	100	93	87	81	75	69	64	58	53	48	44	39	35	30	26	23
35	100	93	87	81	75	70	64	59	54	49	44	40	36	32	28	24
36	100	94	87	81	76	70	65	60	55	50	45	41	37	33	29	25
37	100	94	87	82	76	70	65	60	55	51	46	42	38	34	30	26
38	100	94	88	82	76	71	66	61	56	51	47	43	39	35	31	27
39	100	94	88	82	77	71	66	61	57	52	48	44	40	36	32	28
40	100	94	88	82	77	72	67	62	57	53	48	44	40	37	33	29
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15



Waterproof!
RS232 interface!
Collect data for QC!
Start by Program or Magnet!

Data Logger



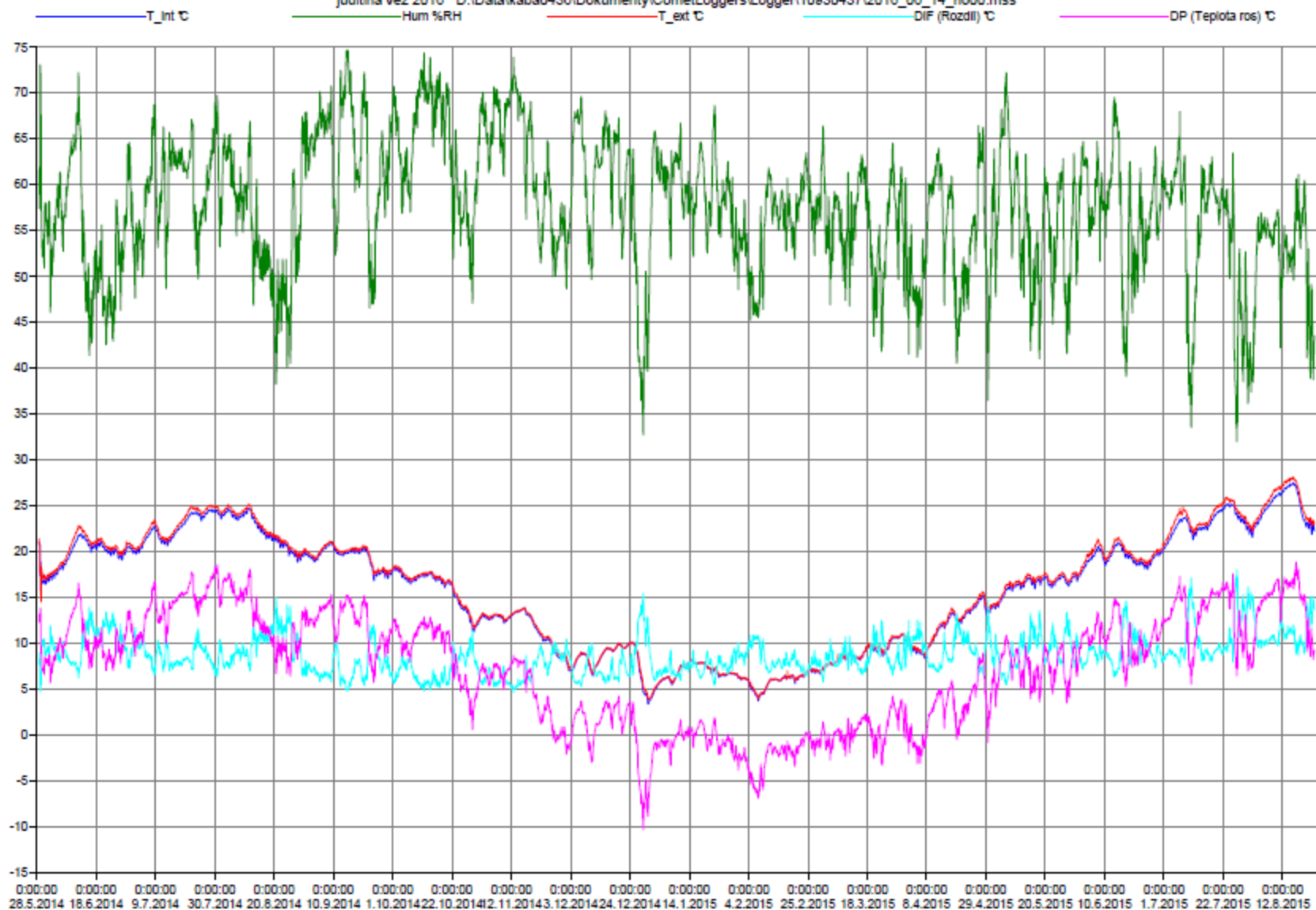
- 8818
- 88128
- 88124

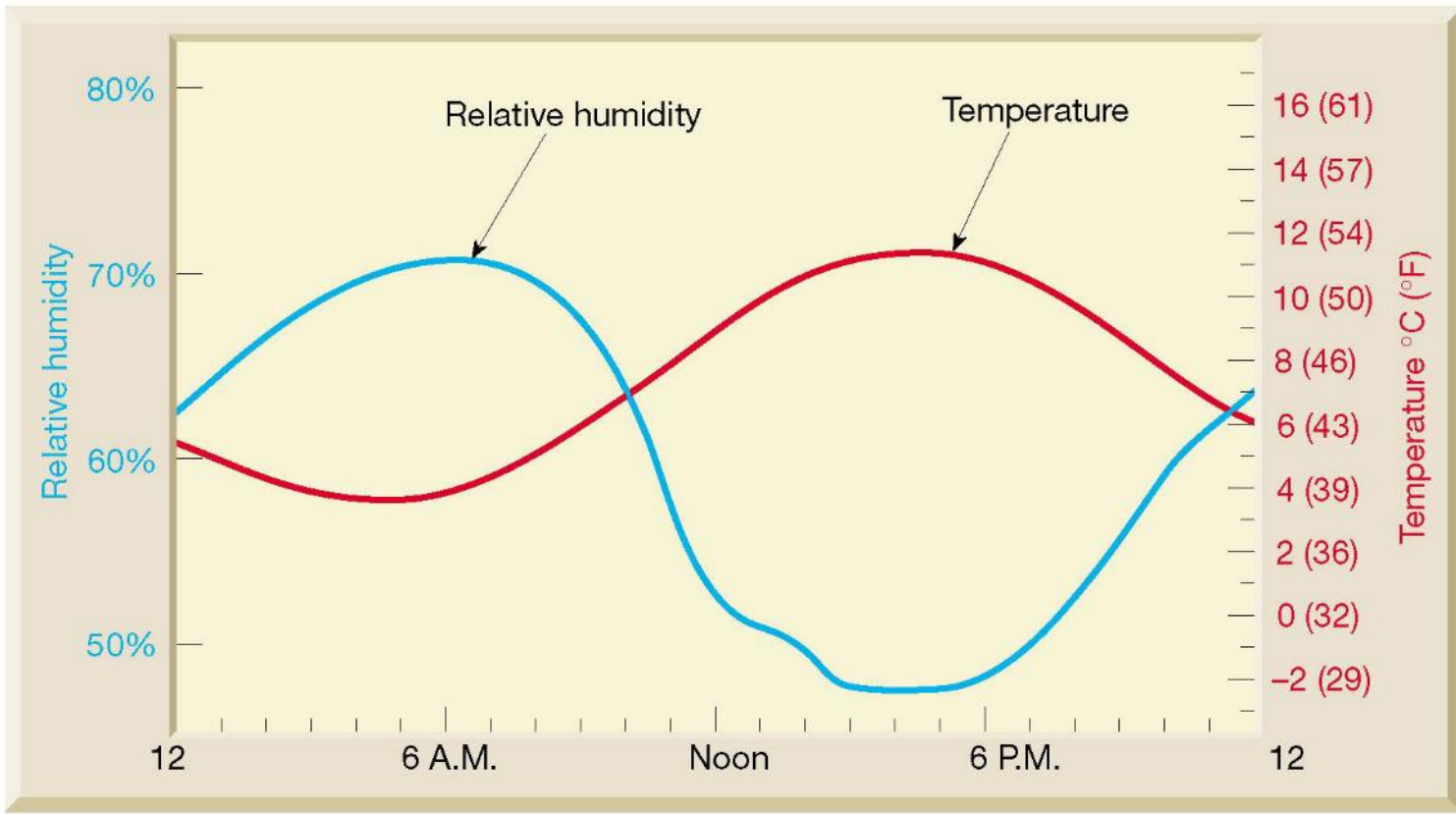


- 8828
- 8829



juditina vez 2016 D:\Data\kaba0436\Dokumenty\CometLoggers\Logger\10930437\2016_06_14_no00.mss





Hlavní veličiny související s transportem vlhkosti

Nasákavost/vlhkost – transport vody v kapalném skupenství

Hmotnostní nasákavost $X = (m_v - m_s / m_v) \cdot 100$ [%hm]

Objemová nasákavost $X = (V_v - V_s / V_v) \cdot 100$ [%obj]

Obsah vlhkosti $V = (m_v - m_s / m_v) \cdot 100$ [%hm]

Koeficient nasákavosti w [kg/(m²·√h)]

Hlavní veličiny související s transportem vlhkosti

Propustnost pro vodní páry / paropropustnost – transport vody plynném skupenství

Faktor propustnosti pro vodní páry μ relativní schopnost materiálu propouštět vodní páry difuzí

Ekvivalentní difuzní tloušťka (Difusní odpor) S_d [m] - ekvivalentní vrstva vzduchu

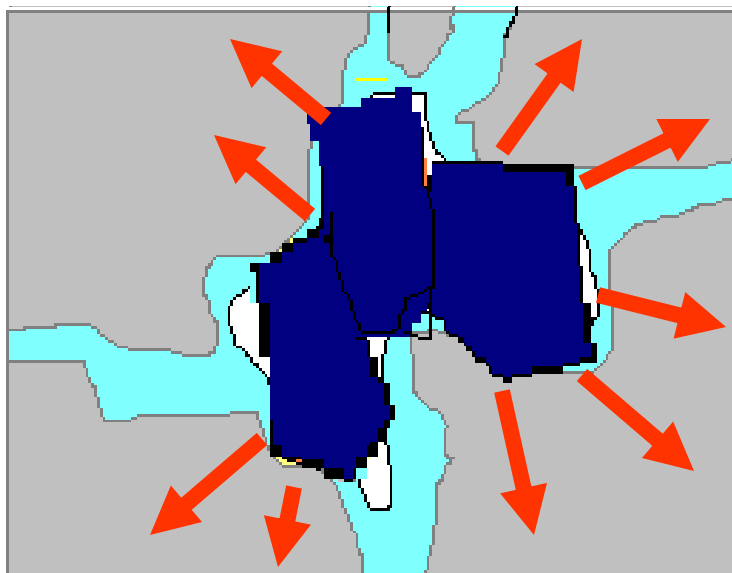
$$S_d = \mu \cdot d$$

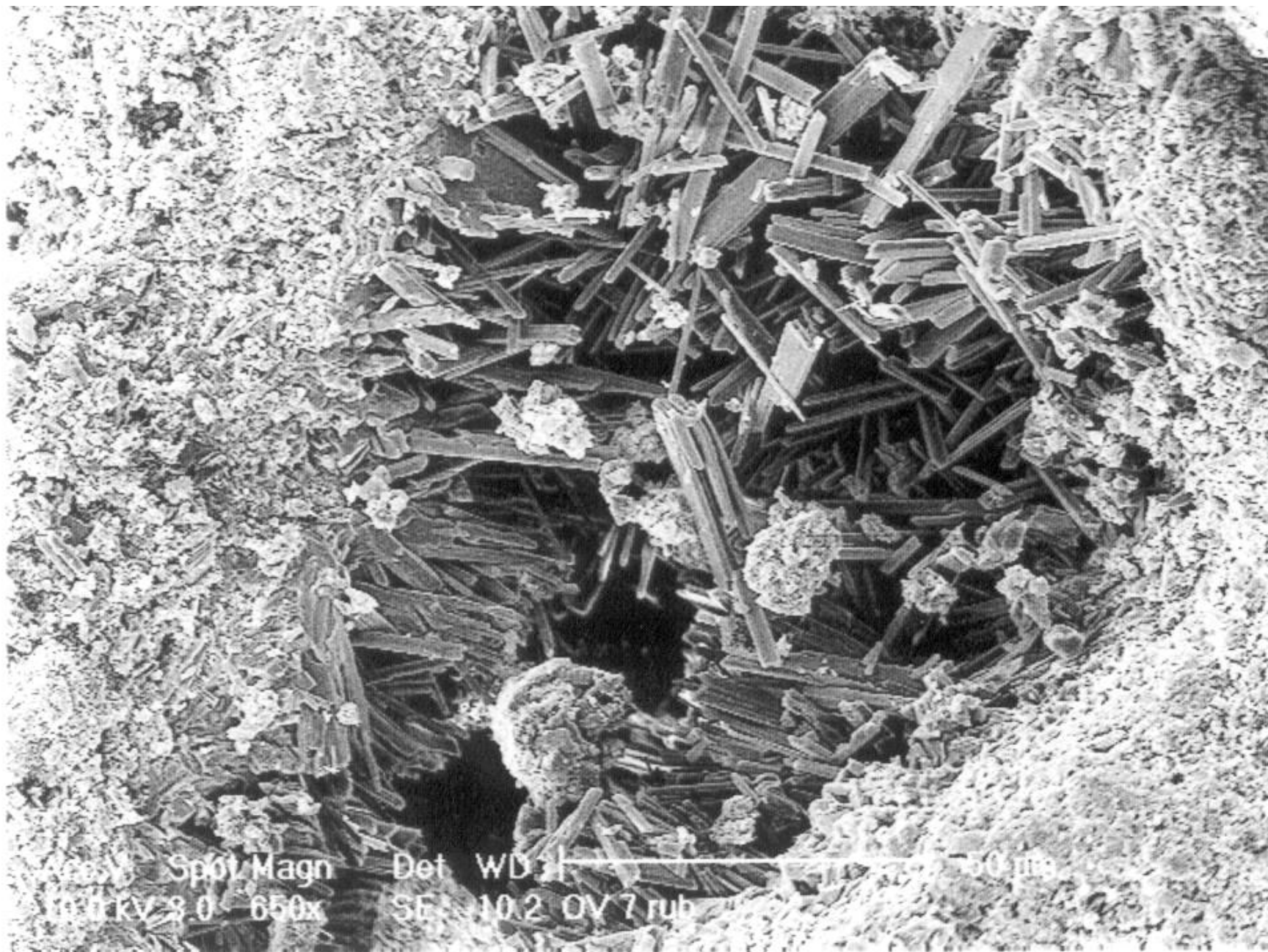
Poškození porézních materiálů v důsledku působení vodorozpustných solí

Korozní pochody vyvolané hlavně v důsledku nárůstu krystalů solí, nebo objemových změn při hydrataci

1.krystalizace solí – krystalizace z roztoků solí v porézním systému daného materiálu

➔ krystalizační tlak na stěny pórů



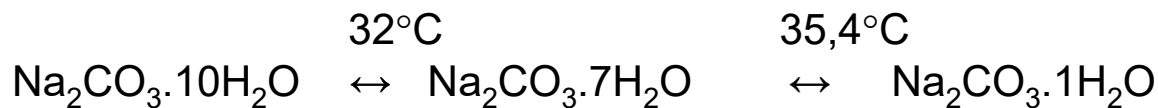
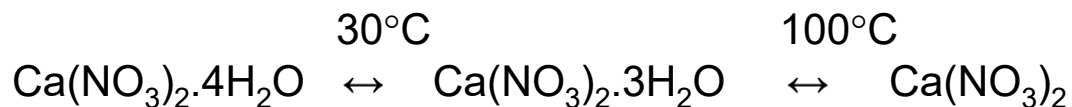
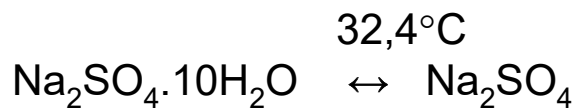
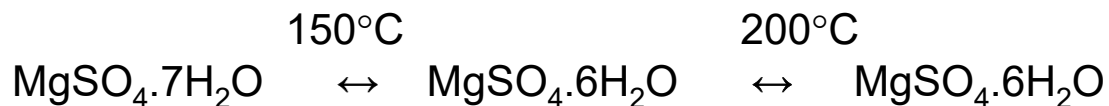
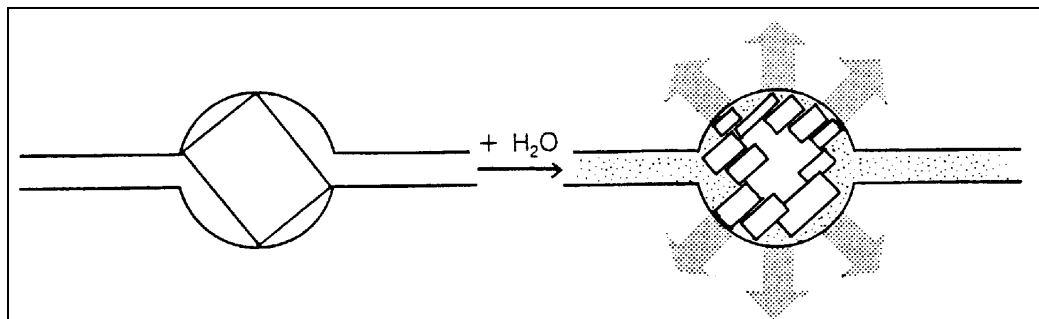
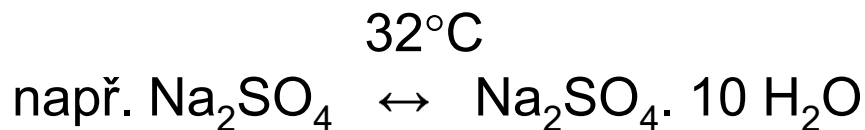


Area Spot Magn
10.0 kV 8.0 650x

Det WD |
SE: 10.2 0V 7 rub

100 μm

2. hydratace solí

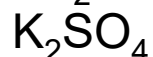
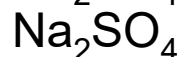
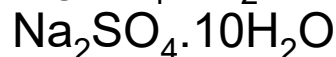
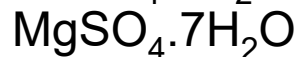
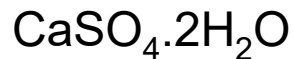


Eric Doehne

Getty Conservation Institute

© 2002 J. Paul Getty Trust

Sírany



síran vápenatý dihydrát, sádrovec

síran hořečnatý heptahydrát,

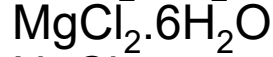
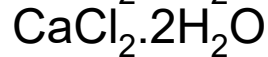
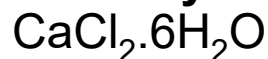
síran sodný dekahydrát, thenardit

síran sodný bezvodý, mirabilit

síran draselný

ettringit

Chloridy



chlorid vápenatý hexahydrát, antarkticit

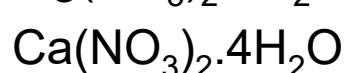
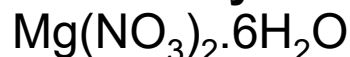
chlorid vápenatý dihydrát

chlorid hořečnatý, bischofit

chlorid sodný, halit

chlorid draselný, sylvit

Dusičnany



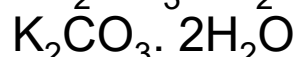
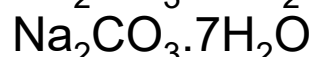
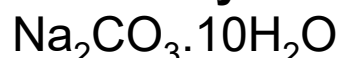
dusičnan hořečnatý hexahydrát, nitromagnesit

dusičnan vápenatý tetrahydrát, nitrokalcit

dusičnan sodný

dusičnan draselný

Uhličitany



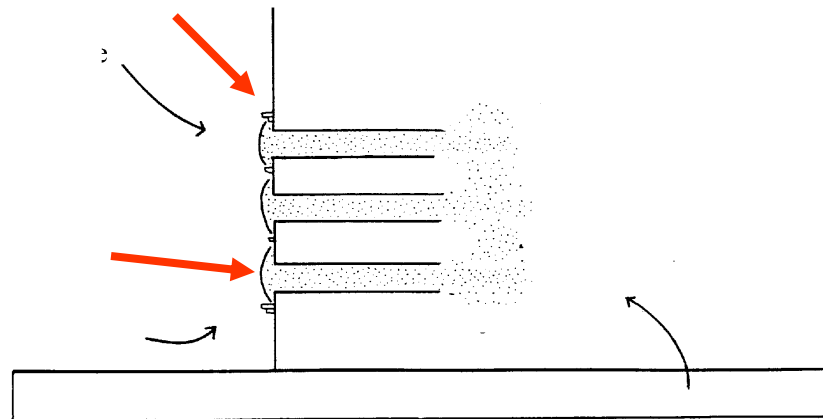
uhličitan sodný dekahydrát

uhličitan sodný heptahydrát

uhličitan draselný

Krystalizace na povrchu

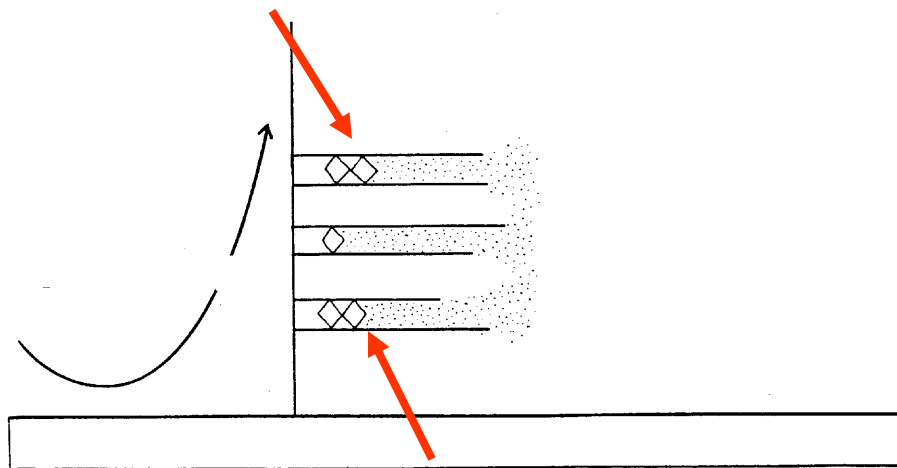
- při pomalém vysychání
resp. pomalém proudění vzduchu
- vznik výkvětů na povrchu
eflorescence



Krystalizace pod povrchem

- při rychlém vysychání
resp. intenzivním proudění vzduchu
- sublorescence**

! větší destrukce



Hygroskopicitá solí – schopnost vázat vodu ze vzdušné vlhkosti

– za určitých podmínek dochází k vázání vody ze vzdušné vlhkosti (parná fáze) a vzniku roztoku soli (kapalná fáze)

Rovnovážná vlhkost – hodnota relativní vzdušné vlhkosti, při které je roztok soli v rovnováze s okolím – vlhkost nepřijímá, ani neuvolňuje

Vzorec soli	Rovnovážná relativní vlhkost (%)	T (°C)
K_2SO_4	97	25
KNO_3	92,5	25
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	92	18,5
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	87	25
KCl	84,3	25
Na_2SO_4	81	25
NaCl	75,3	25
$NaNO_3$	73,9	25
NH_4NO_3	61,8	25
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	52,9	25
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	50,0	25
$K_2CO_3 \cdot 2H_2O$	42,8	25
$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	33,0	25
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	29,0	25

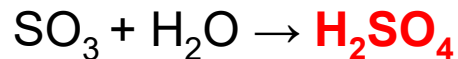
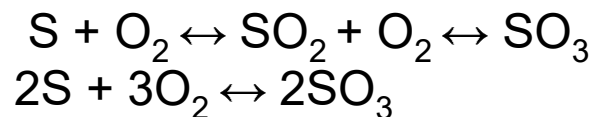
Vznik sádrovce – obvykle důsledek chemické koroze

Oxidy síry – SO_2 , SO_3 – vedlejší produkt při spalování fosilních paliv

např. topné oleje, uhlí – 1 až 4% síry (vázaná v pyritu, organických sloučeninách a síranech)

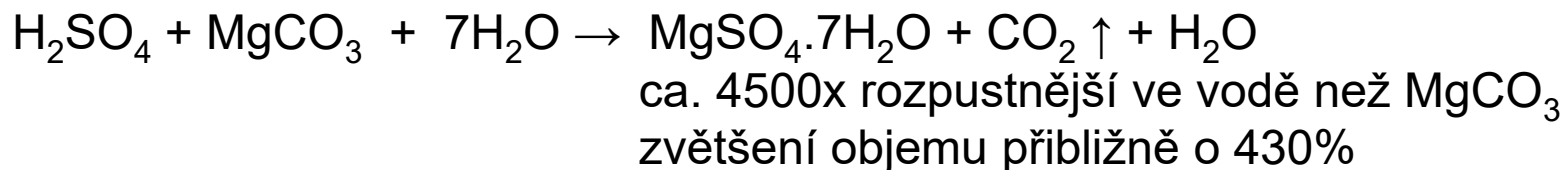
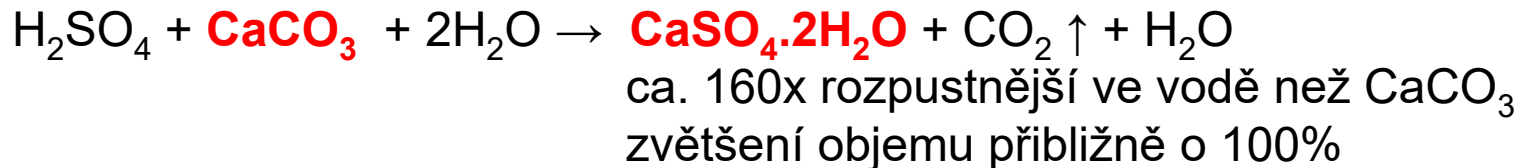
tj. 20 až 50 kg SO_2 na tonu paliva

Zjednodušené schéma vzniku :



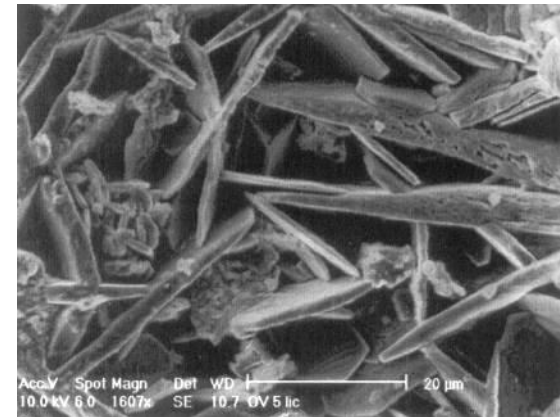
- hlavní příčina kyselých dešťů (nízké pH)

- nejvíce postižené – materiály obsahující karbonáty



Důsledky: změna fyzikálních vlastností zasoleného materiálu

- ▷ zhoršení až úplná ztráta pevnosti
- ▷ tvorba povlaků až tvrdých nepropustných krust
- ▷ deformace povrchu
- ▷ změna barevnosti
- ▷ zvyšování obsahu vlhkosti

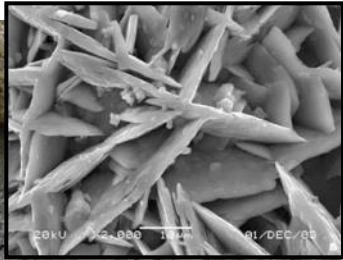
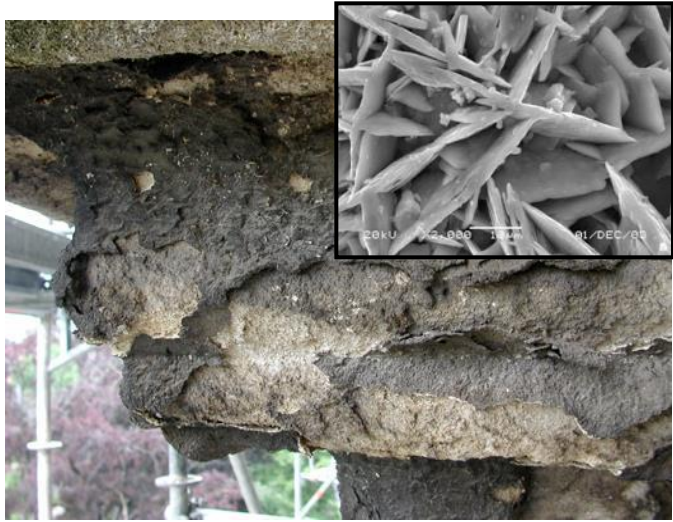


Typ a rozsah poškození závislý od:

- ▶ typu solí
- ▶ koncentrace solí
- ▶ klimatických podmínek
- ▶ vlastností substrátu (pevnost, porosita, distribuce velikosti pórů, ...)

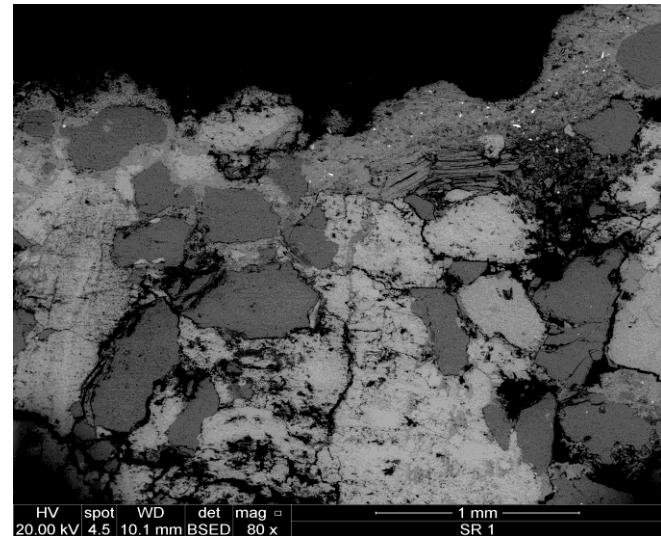
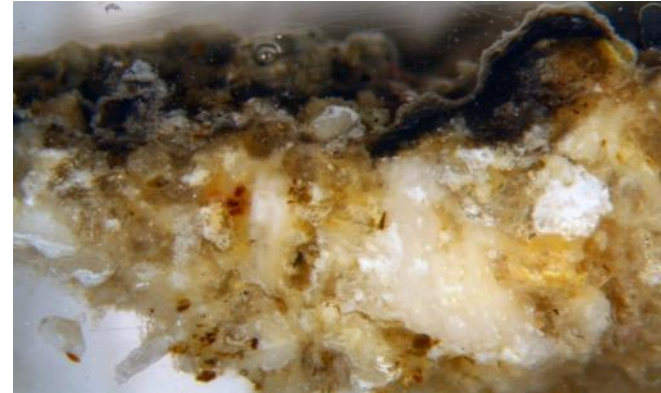


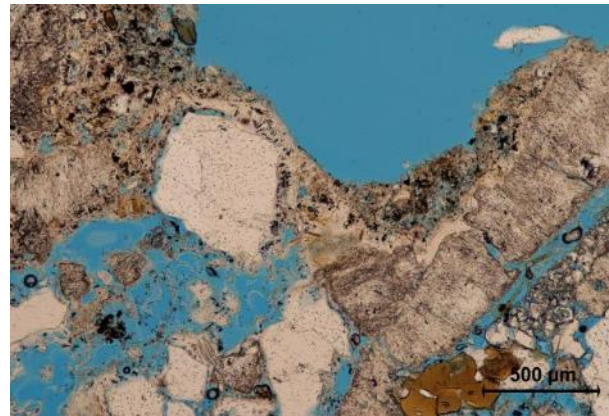
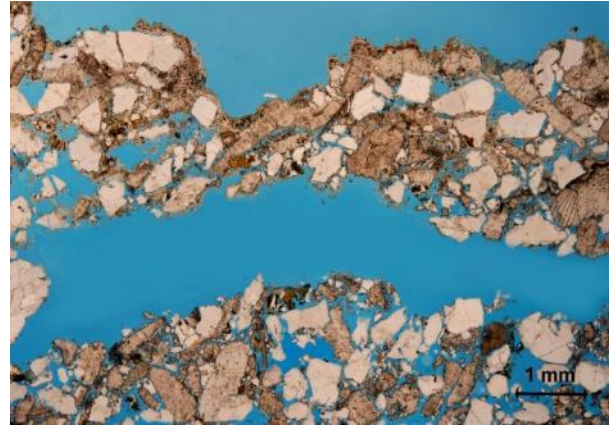


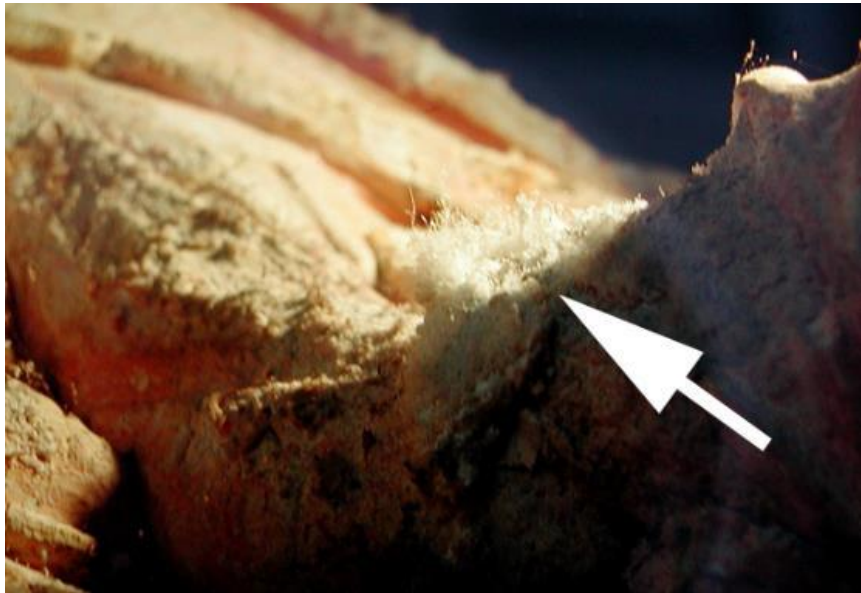


Examples of damages caused by salt attack

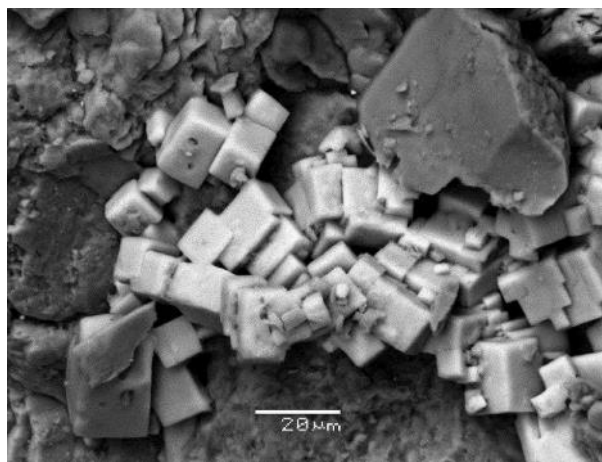
Crust formation due to limestone sulfation

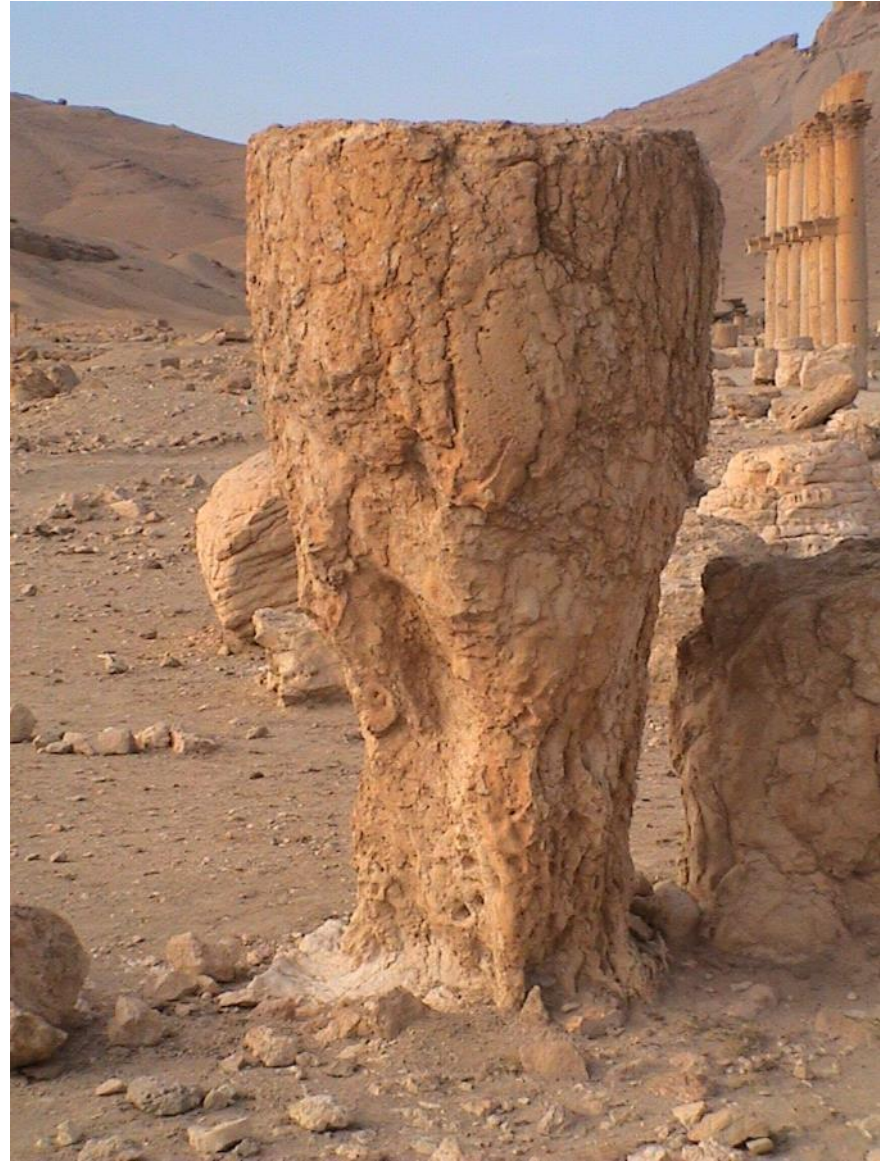














Hodnocení míry zasolení

ČSN P 73 0610 (730610) Hydroizolace staveb - Sanace vlhkého zdiva –

The classification of degree of salinity in the materials, according to the Czech Standard ČSN 730610 is presented in the following table.

Degree of salinity of the materials	Sulphates (% w.)	Chlorides (% w.)	Nitrates (% w.)
Low	<0,5	< 0,075	<0,1
Medium	0,5 – 2,0	0,075 – 0,2	0,1 – 0,25
High	2,0 – 5,0	0,2 – 0,5	0,25 – 0,5
Very high	> 5,0	>0,5	>0,5

Podle rakouské normy Önorm B 3355-1

Hodnocení stupně zasolení	Sírany (%hm.)	Chloridy (%hm.)	Dusičnany (%hm.)
Nejsou nutná žádná opatření	< 0,10	< 0,03	< 0,05
Je nutné zvážit dílčí opatření	0,10 – 0,25	0,03 – 0,10	0,05 – 0,15
Opatření jsou nezbytná	> 0,25	> 0,10	> 0,15

„Zustandsanalyse von Mauerwerk mit aufsteigender Feuchtigkeit“; Friese, Pohlmann; Bauphysik 1 (1986)

Hodnocení je zde uváděno jen pro chloridy.

Obsah chloridů	Vliv na zdivo
< 3 mmol/kg	Prakticky žádné zasolení; žádný vliv na zdivo
3-8 mmol/kg	Mírně zvýšený obsah solí ve zdivu; vlhké skvrny v důsledku hygroskopicity se ještě neobjevují
8-80 mmol/kg	Silné zasolení zdiva; obsah solí má negativní vliv na účinnost některých odvlhčovacích metod (elektrokinetické); i po zabudování horizontálních clon můžou na povrchu vznikat vlhké skvrny způsobené hygroskopicitou chloridů, hlavně při vyšších relativních vzdušných vlhkostech; ve zdivu zůstává zbytková vlhkost 2-5% (i když vzlínající vlhkost už není přítomná)
Nad 80 mmol/kg	Extrémně vysoké zasolení, hygroskopická zbytková vlhkost je často kolem 5%, i při horizontálních clonách proti vzlínající vlhkosti dochází k rychlému poškozování omítek i nově nanesených

„Altbauten zerstörungsarm untersuchen - Bauaufnahme, Holzuntersuchung, Mauerfeuchtigkeit“; M. Dzierzon; J. Zull; Müller Verlag, Köln 1990

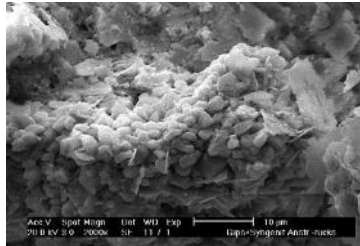
Stupeň zasolení	Koncentrace solí	Vliv na materiál
I.	0-2,5 mmol/kg	Jen stopy solí, poškození lze vyloučit
II.	2,5-8 mmol/kg	Malé zatížení; při nepříznivých okolnostech už může docházet k poškozením
III.	8-25 mmol/kg	Střední zatížení, při hygroskopických solích může docházet ke zvyšování zavlhčení zdiva; životnost omítek i povrchových úprav je už zkrácená
IV.	25-80 mmol/kg	Vysoké zatížení; životnost omítek i nátěrů je značně omezená; i přes účinná opatření proti vztlínající vlhkosti nedojde k úplnému vysušení zdiva
V.	nad 80 mmol/kg	Extrémní zatížení; poškození vznikají v průběhu krátké doby; vysoká míra hygroskopického zavlhčení

Tabelle 1: Bewertung der Salzbelastung nach WTA-Merkblatt 2-9-04/D. Angaben in M.-%.

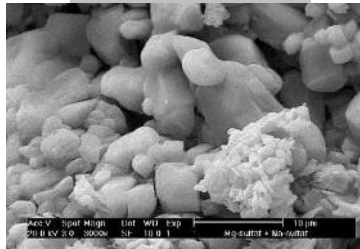
Belastungsstufe	Chloride	Nitrate	Sulfate
Geringe Belastung	< 0,2	< 0,1	< 0,5
Mittlere Belastung	0,2 bis 0,5	0,1 bis 0,3	0,5 - 1,5
Hohe Belastung	> 0,5	> 0,3	> 1,5

Zjištění stavu objektu z hlediska obsahu vodorozpustných solí – průzkum

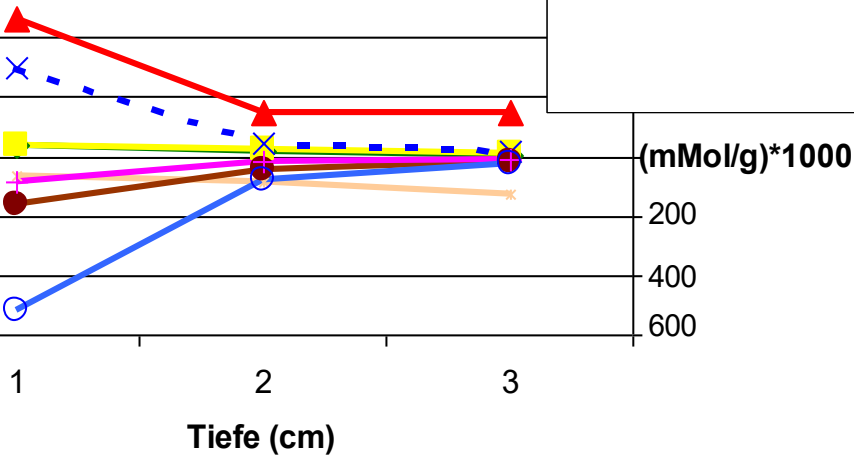
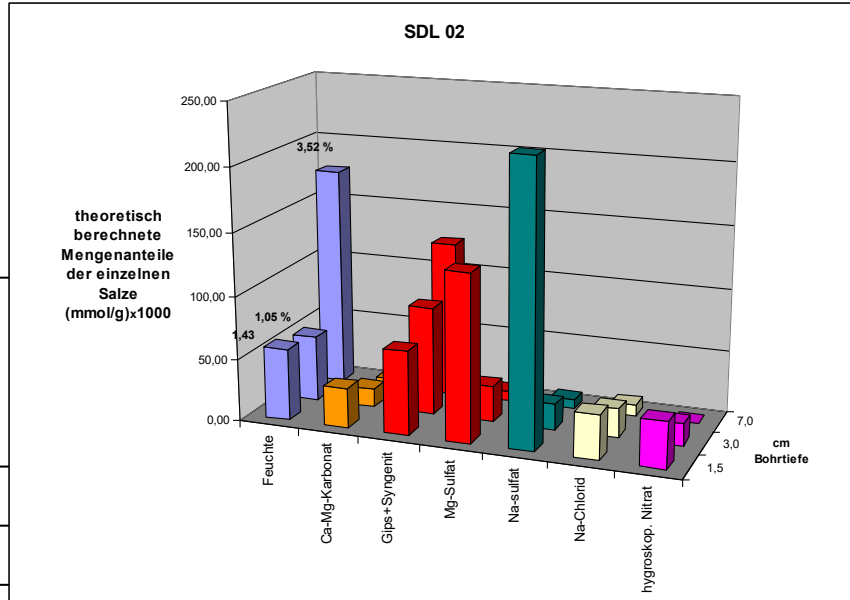
- **Koncentrace** vodorozpustných solí (nejčastěji aniony – sírany, chloridy, dusičnany)
- **Distribuce** vodorozpustných solí – rozdělení koncentrace v hloubkovém profilu
- Přesná **identifikace** solí
- Vlastnosti zasoleného materiálu – hygroskopická nasákavost, sorpční izoterma,...)



$\text{CaSO}_4 + \text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$

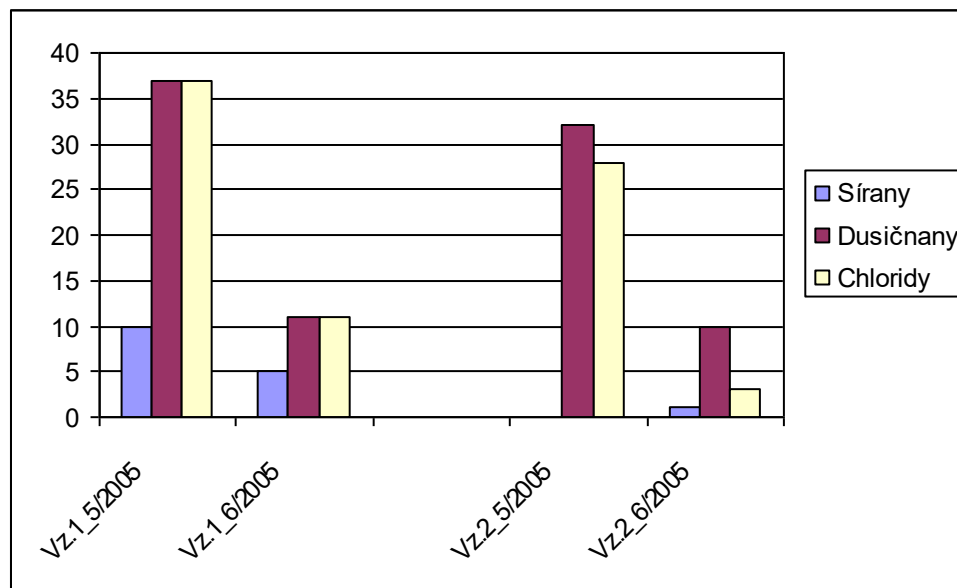
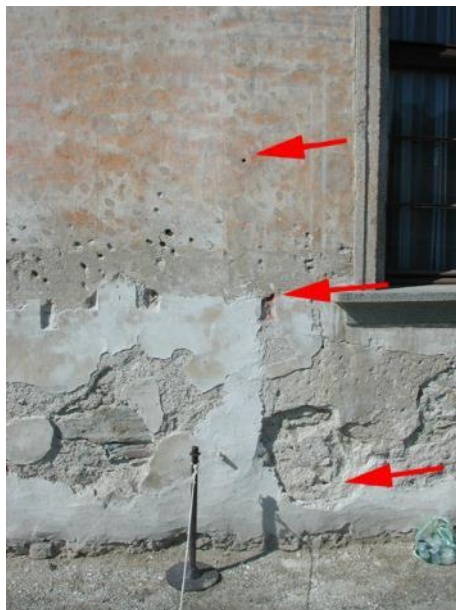


$\text{MgSO}_4 + \text{Na}_2\text{SO}_4$



- ◆ NO3
- Cl
- ▲ SO4
- ✕ CO3
- ✕ Ca
- Mg
- + K
- Na

Stanovení vodorozpustných solí na fasádách zámku Kratochvíle u Netolic



Opatření - přehled

Metody omezení vzlínající vlhkosti

1. Omezení příjmu vlhkosti

Odvádění srážkové vody

Drenáže

2. Hydroizolační clony

Mechanická clona

Chemické clona / injektáž

3. Zvýšení odparu vlhkosti

1. Odvětrávací systémy ve zdivu např. tzv. Knapenovy sifony / kanálky

2. Odvětrávací systémy – podlaha, pata zdiva

3. Speciální omítkové systémy

4. Elektrokinetické metody

1. elektroosmóza

2. jiné systémy

Metody omezení důsledků: Speciální omítky; Předsazené / obkladové stěny



EU project EMERISDA
D 2_1 Summary report on existing methods against rising damp



EU project EMERISDA
D 2_1 Summary report on existing methods against rising damp

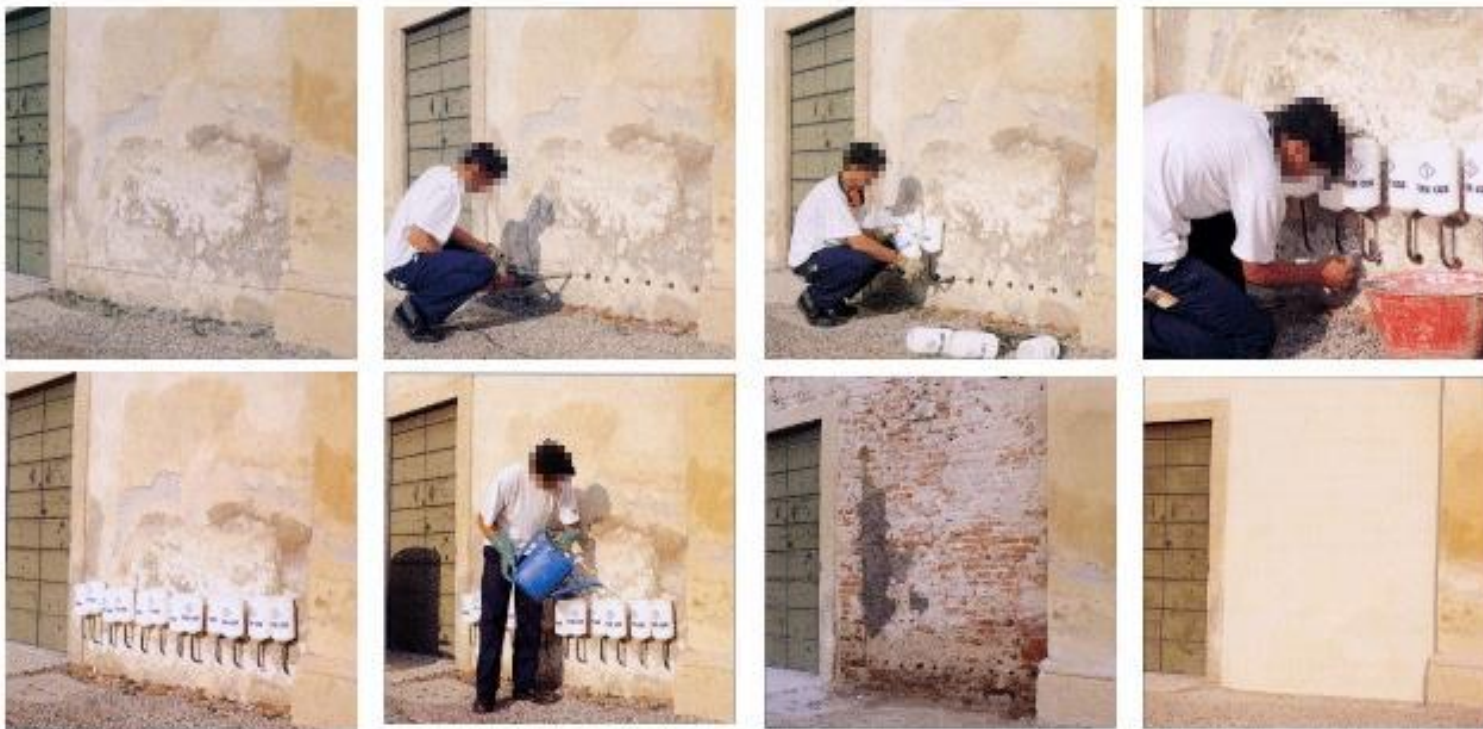


Table 1. Class of products classified according to their working principle

Working principle	Product
Pore filling	Silicates (water-glass based products) Acryl-amide gel Paraffin
Pore filling & water repellent	Silane-based gel Silicate/siliconate mixtures
Water repellent	Silicone Silane Siloxane Siliconate Stearate



Figure 2, Different types of Knapen Siphons in a wall (Lubelli, B.)

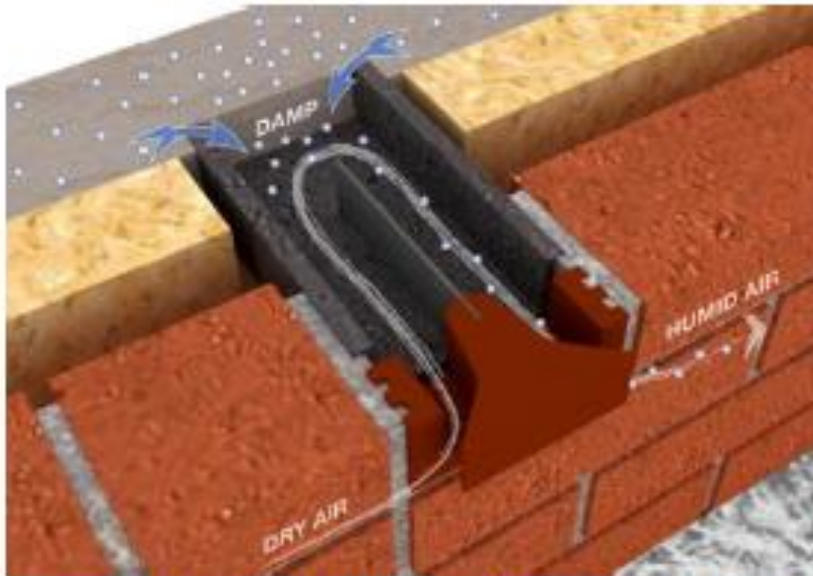


Figure 13 Schrijver System principle (www.schrijversysteem.nl)

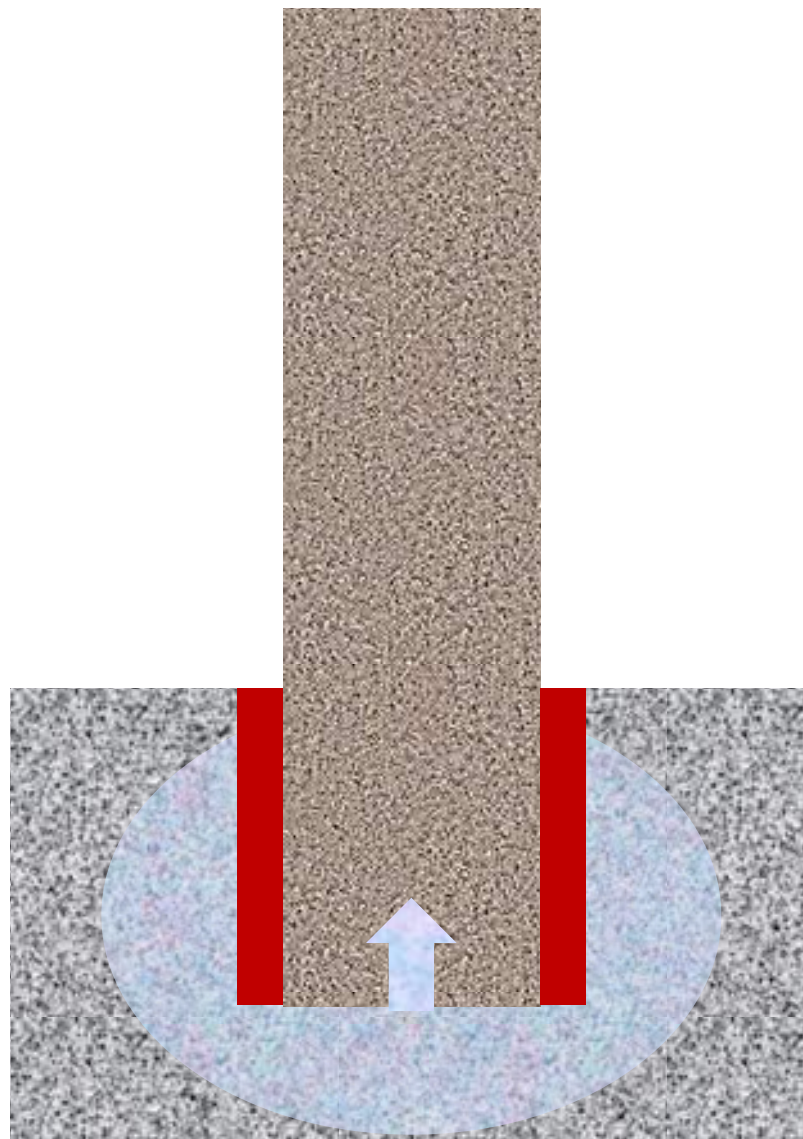


Figure 14 Schrijver system in the past (Van Hunen, M.)

Vertikální izolace

omezení množství přijímané vlhkosti z terénu

- jílové izolace
- speciální fólie





Elektrokinetické metody

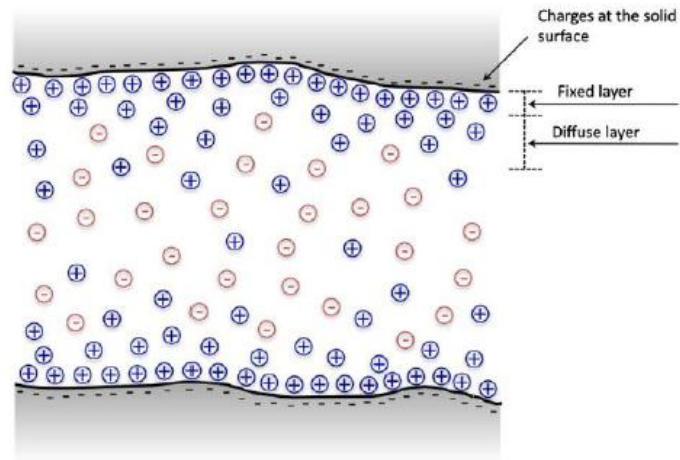


Figure 18. Schematic representation of the double layer at the pore surface [1]

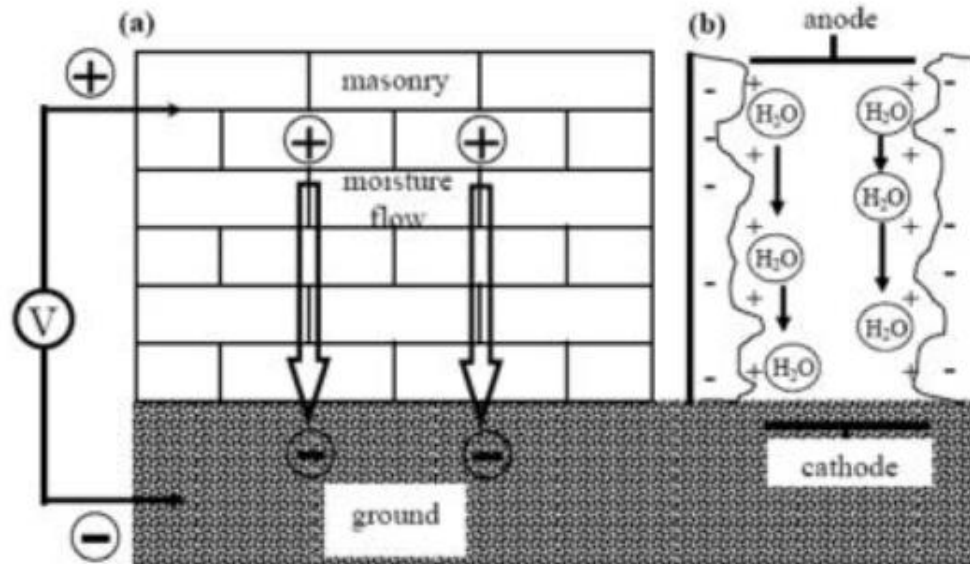


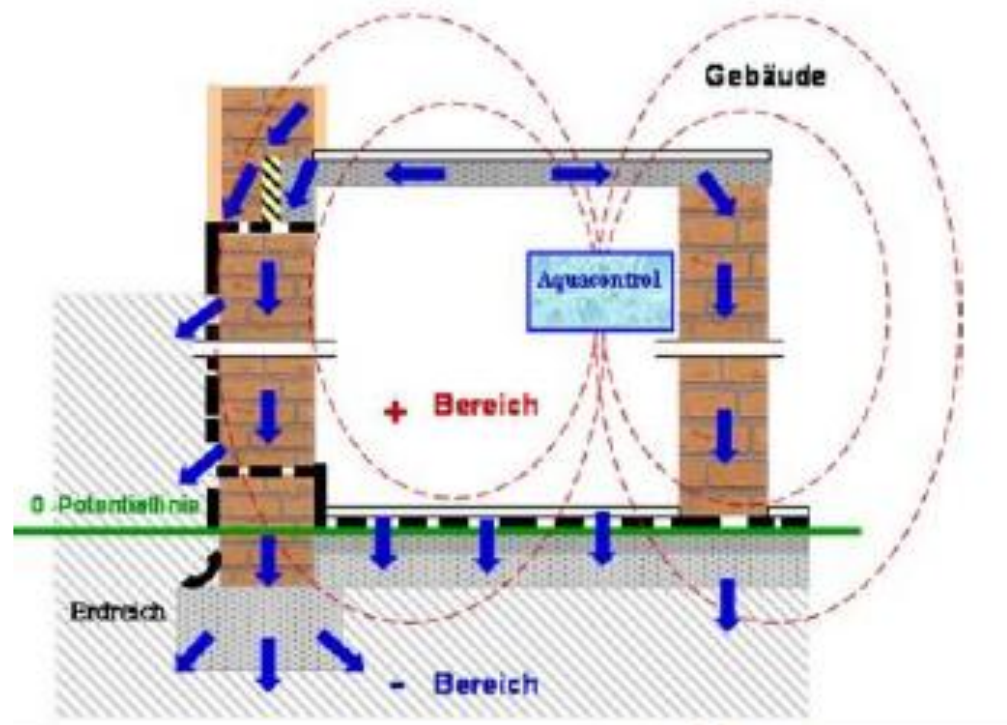
Figure 19. Schematic of an electro osmosis setup used on a masonry wall [16]

„Parafyziální“ metody

Fyzikální princip – neznámý / nejasný /
vysvětlení často zavádějící

Aktivní zařízení - vyzařující
elektromagnetické vlnění

Pasivní zařízení - využívající již existující
záření a pole



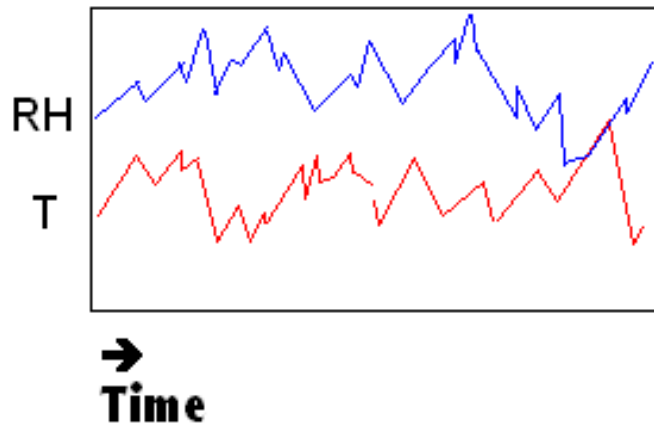
Opatření k omezení negativního vlivu vodorozpustných solí

- Regulace klimatu
- Stabilizace rozpustných solí – přeměna na nerozpustné / málo rozpustné formy solí
- Odsolování – snížení obsahu solí
- Aplikace speciálních – tzv. obětní omítky nebo sanační omítky
- Elektrokinetické metody
- Inhibice krystalizace
- Biokonverze

Kontrola klimatu – omezení kolísání teploty a vlhkosti

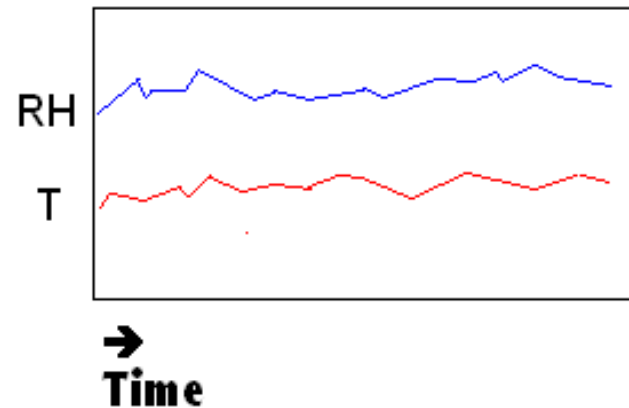
Poškození

- ◆ krystalizace při určitých klimatických podmínkách
- ◆ větší kolísání klimatu – více krystalizačních cyklů



Omezení poškození

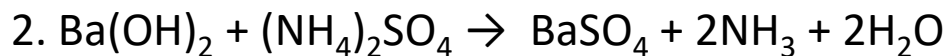
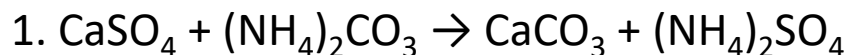
- ◆ kontrola a stabilizace klimatu
- ◆ snížení kolísání teploty a vlhkosti – nižší počet krystalizačních cyklů



2. Stabilizace vodorozpustných solí – konverze na nerozpustné resp. málo rozpustné soli

- ♦ nebezpečné jsou pouze vodorozpustné soli
- ♦ omezení poškození – snížení rozpustnosti solí přeměnou na nerozpustné resp. málo rozpustné

Konverze síranu vápenatého



Konverze reakcí s hexafluorokřemičitanem olovnatým

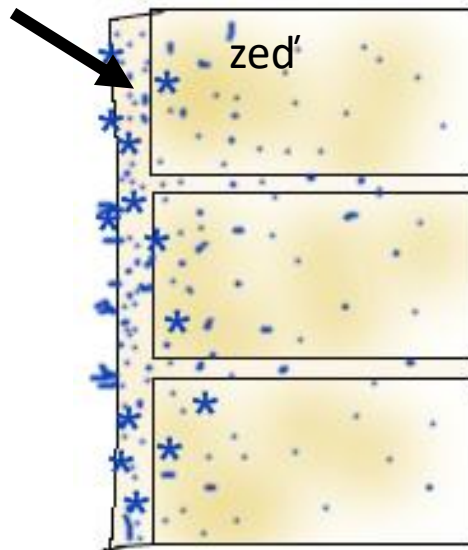


Odsolování – redukce obsahu solí

Extrakce pomocí obkladů (Komprese, poultice)

- ♦ materiály: celulóza, papírovina, jílové materiály (kaolin, bentonit,...), piliny, ...příp. jejich směsi
- ♦ aplikace: ručně, omítací stroje
- ♦ doba: několik hodin až několik týdnů

omítka



Mokrý obklad

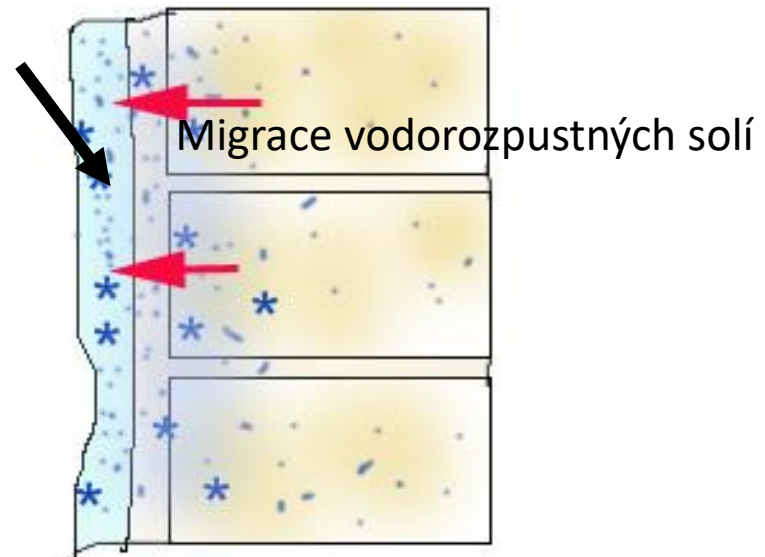
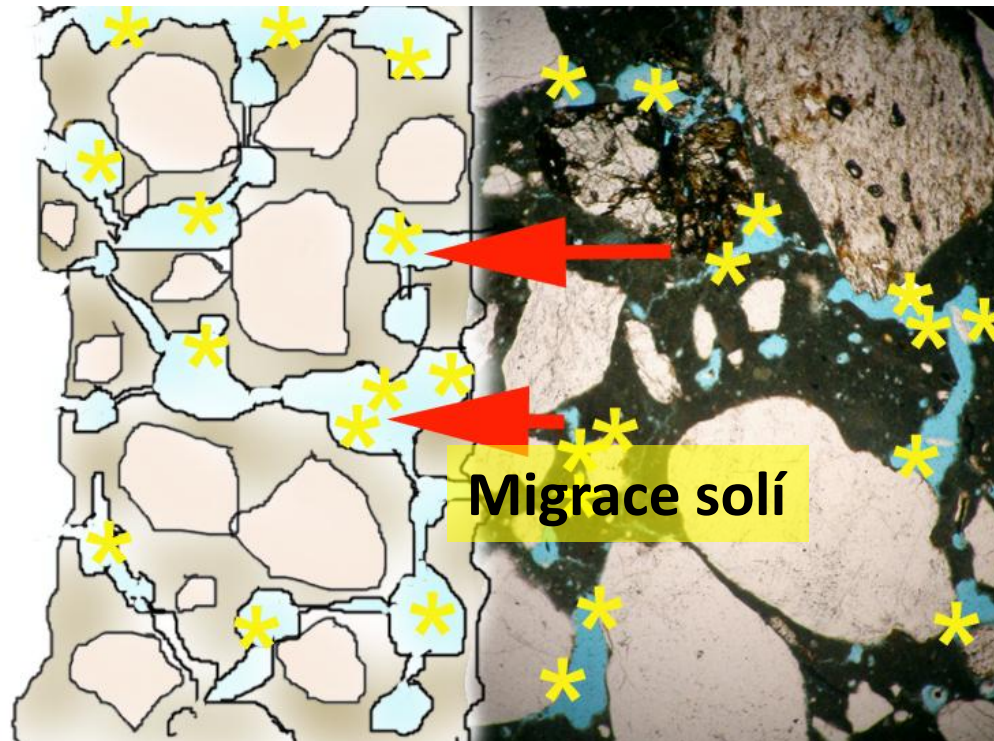




Foto: Mgr.Christian Gurtner

Aplikace speciálních – tzv. obětní omítky nebo sanační omítky



Obětní vrstva

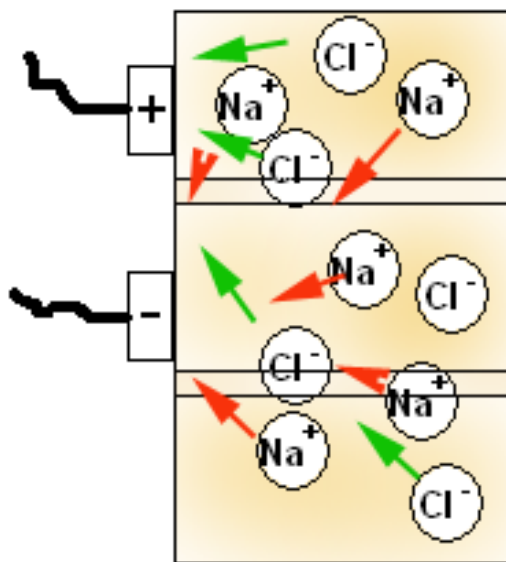
Zasolený materiál



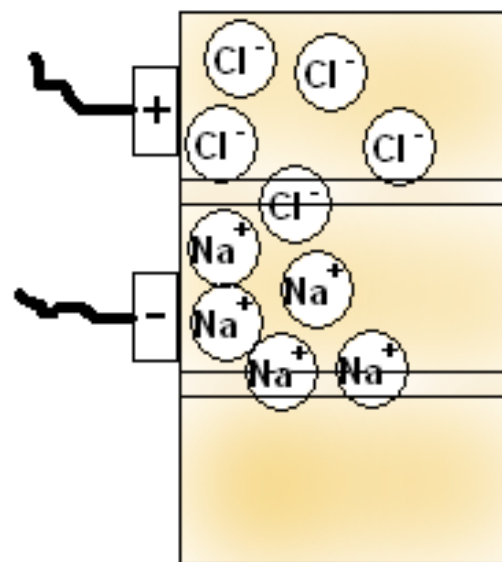
Sacrificed plaster (**Formula 6**) applied on the freestanding sandstone block - material loss at the surface is recognizable.

Elektrokinetické metody

elektrody



zdivo



zdivo

Inhibitory krystalizace

- velmi malý přídavek látek umožňujících existenci tzv. přesycených roztoků
- ke krystalizaci dochází až při podstatně vyšších koncentracích roztoků, v reálných podmínkách to znamená menší počet krystalizačních cyklů

„Biokonverze“ - konverze pomocí bakterií

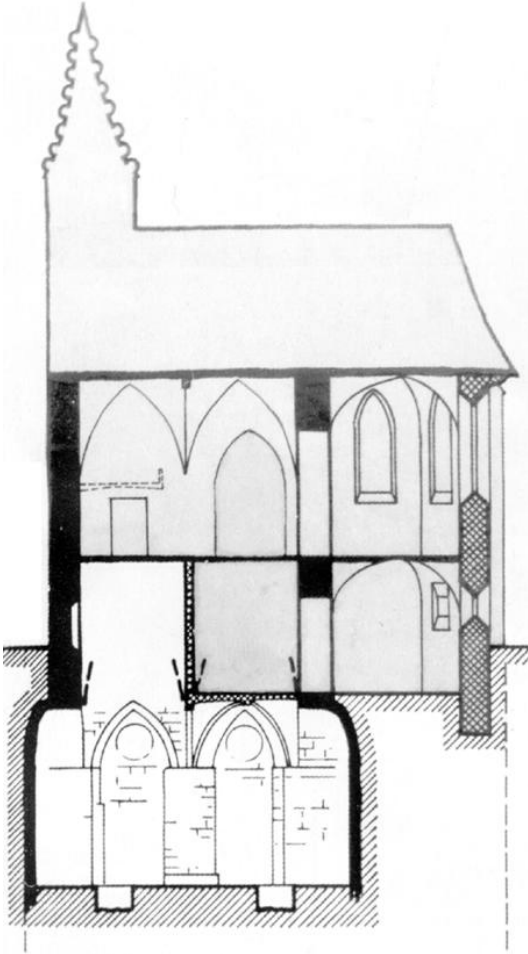
- Přeměna solí pomocí bakteriální činnosti (denitrifikační, desulfurikační bakterie)

Vergilius Chapel / Vienna

originated around 1230-46 as "capella subterranea" of the Magdalenen Chappel.

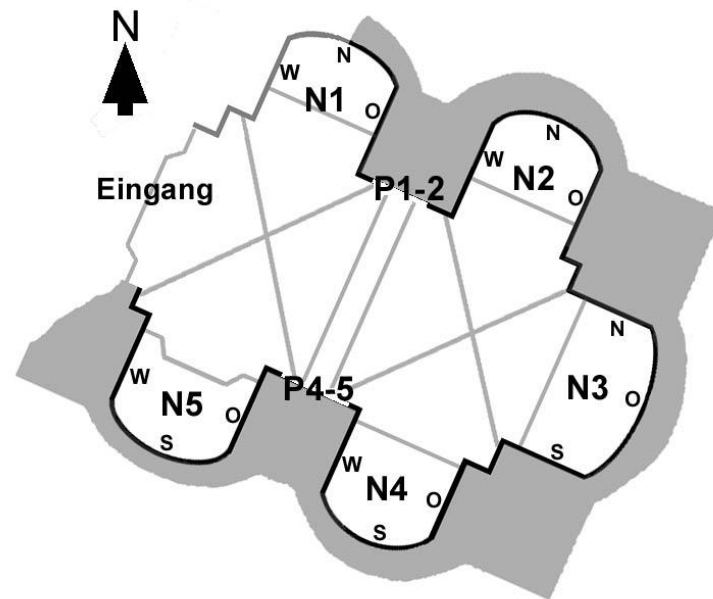
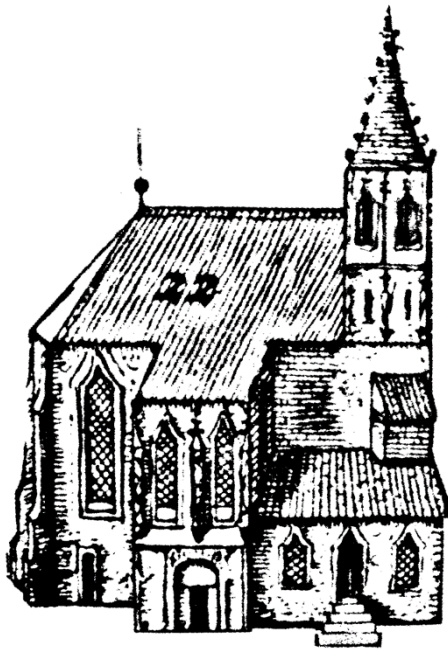
- Abandoned and filled in 1781.
- Uncovered in 1973

Since 2002 – survey and monitoring focused on impact of water soluble salts conducted by prof. Johannes Weber, University of applied arts, Vienna



<https://www.kulturundwein.com/virgilkapelle.htm>

Vergilius Chapel / Vienna



Vergilius Chapel / Vienna – restoration history

Year	Consolidation	Other Treatment	Indoor climate
1978-79	SAE	Poultices	Drying from „humid“ to 40-70 %RH
1981	SAE	Poultices (up to 6)	?
1987-88	Paraloid B 72	Poultices	?
1994	?	Poultices	From (≤ 40 - ≥ 80 %RH) to 60-85 %RH
2002	Primal	Poultices (3)	60-80 %RH
2005	SAE	Poultices (3)	40-75 %RH

Refurbishment proposals (Arch. F. Hueber, 1982)

- masonry drainage through a ventilated shaft
- sustainable increase in RH above equilibrium humidity

Vergilius Chapel in Vienna – survey and monitoring of water soluble salt impact

1. Efflorescences



Image: Johannes Weber

Vergilius Chapel in Vienna – survey and monitoring of water soluble salt impact

1. Efflorescences

Stereomicroscope

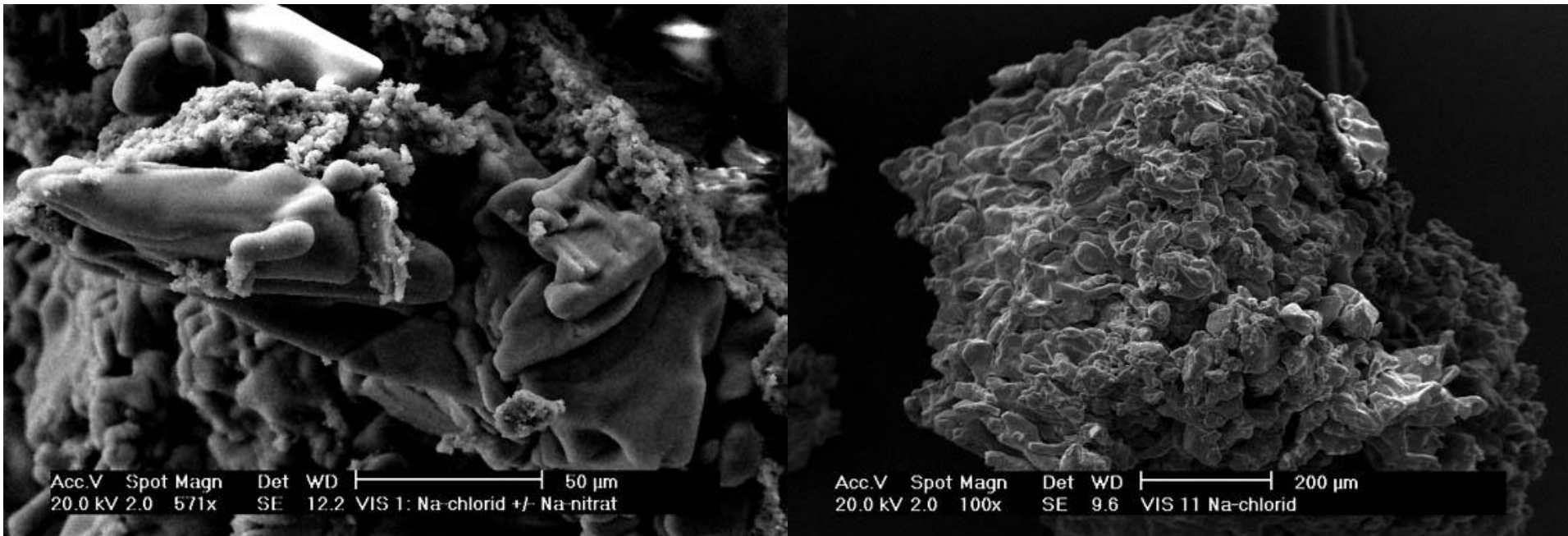


Images: Johannes Weber

Vergilius Chapel in Vienna – survey and monitoring of water soluble salt impact

1. Efflorescences

SEM



Images: Johannes Weber

Vergilius Chapel in Vienna – survey and monitoring of water soluble salt impact

2. Deliquescence moisture

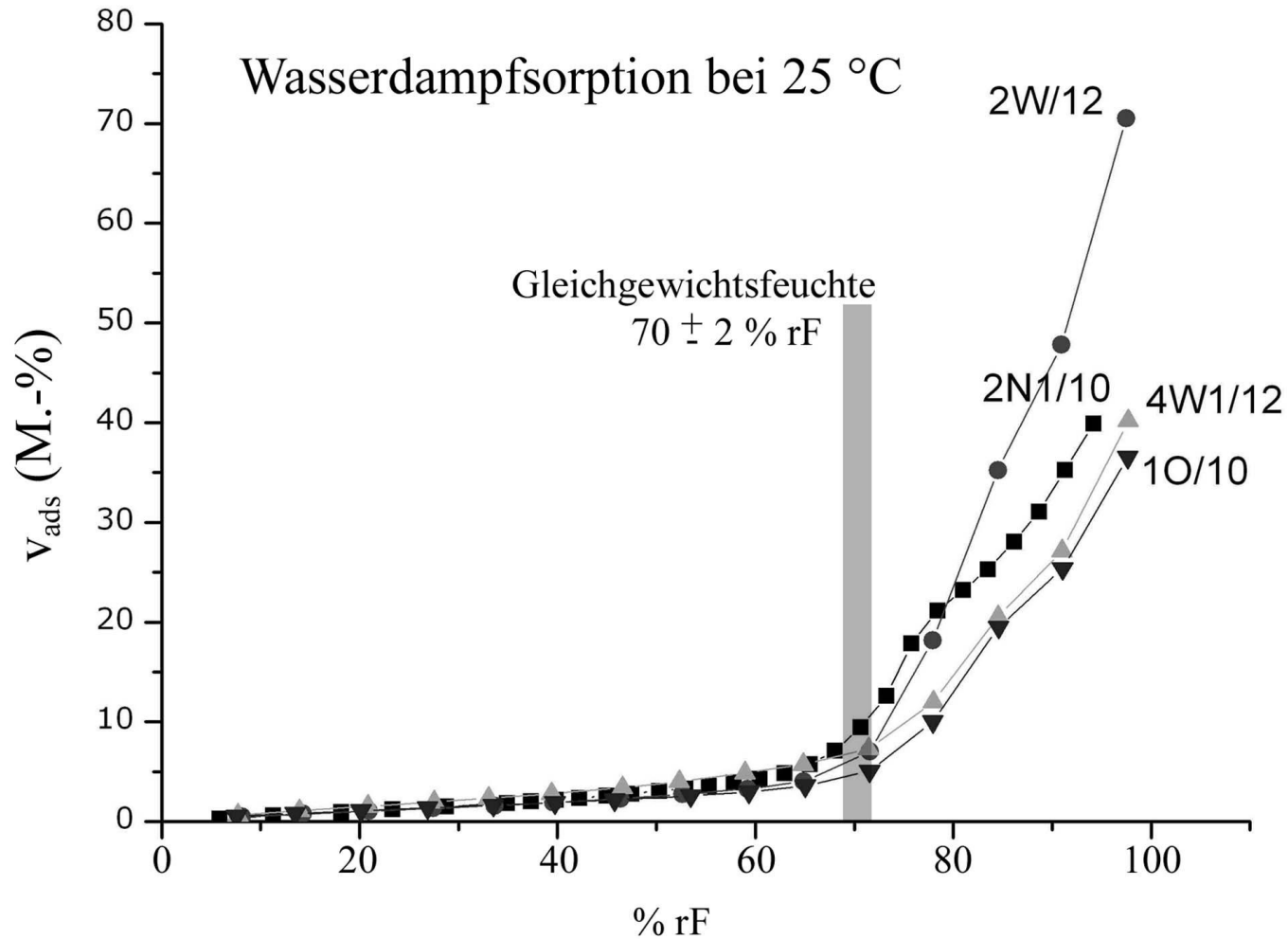
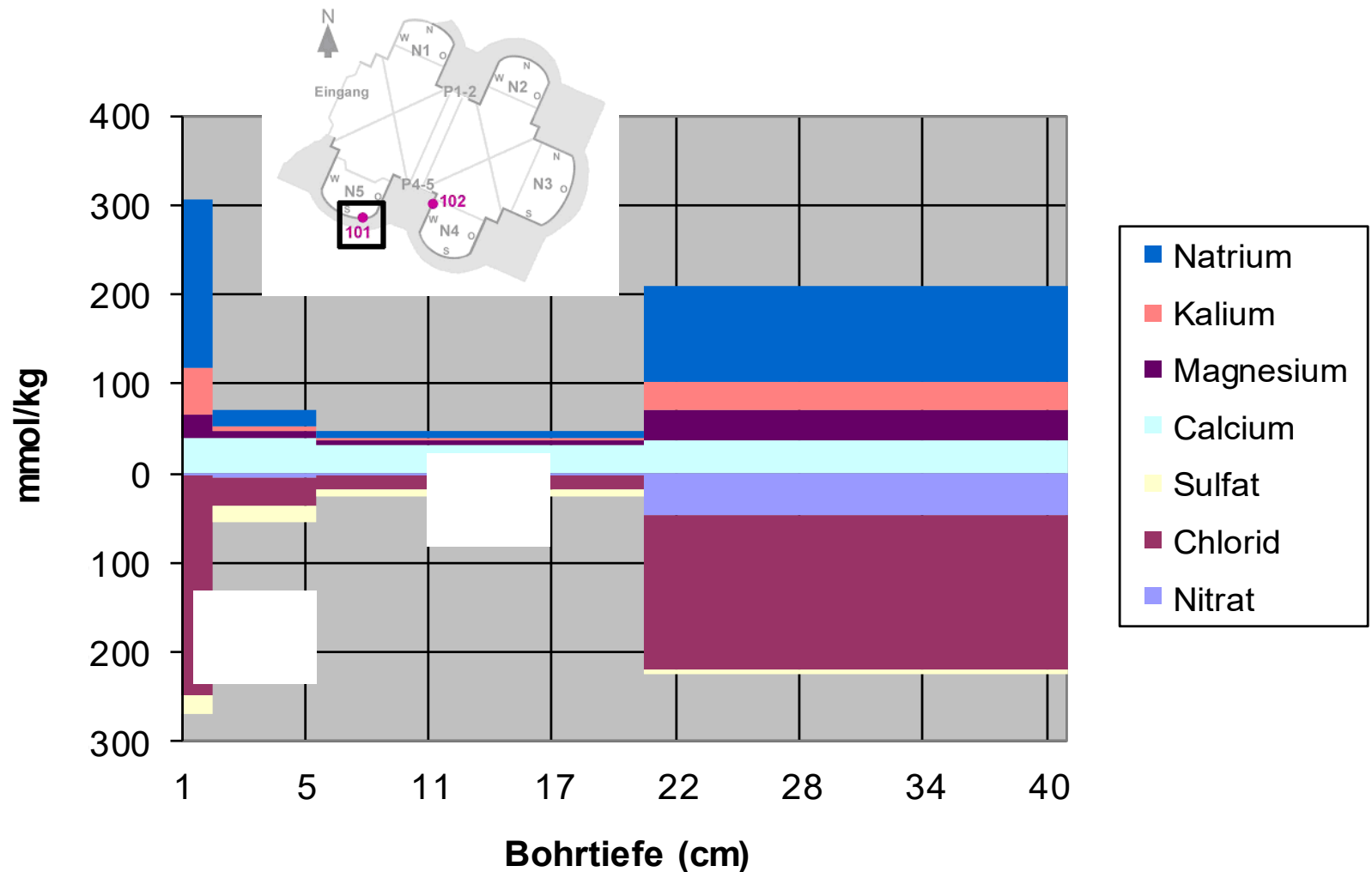


Image: Johannes Weber

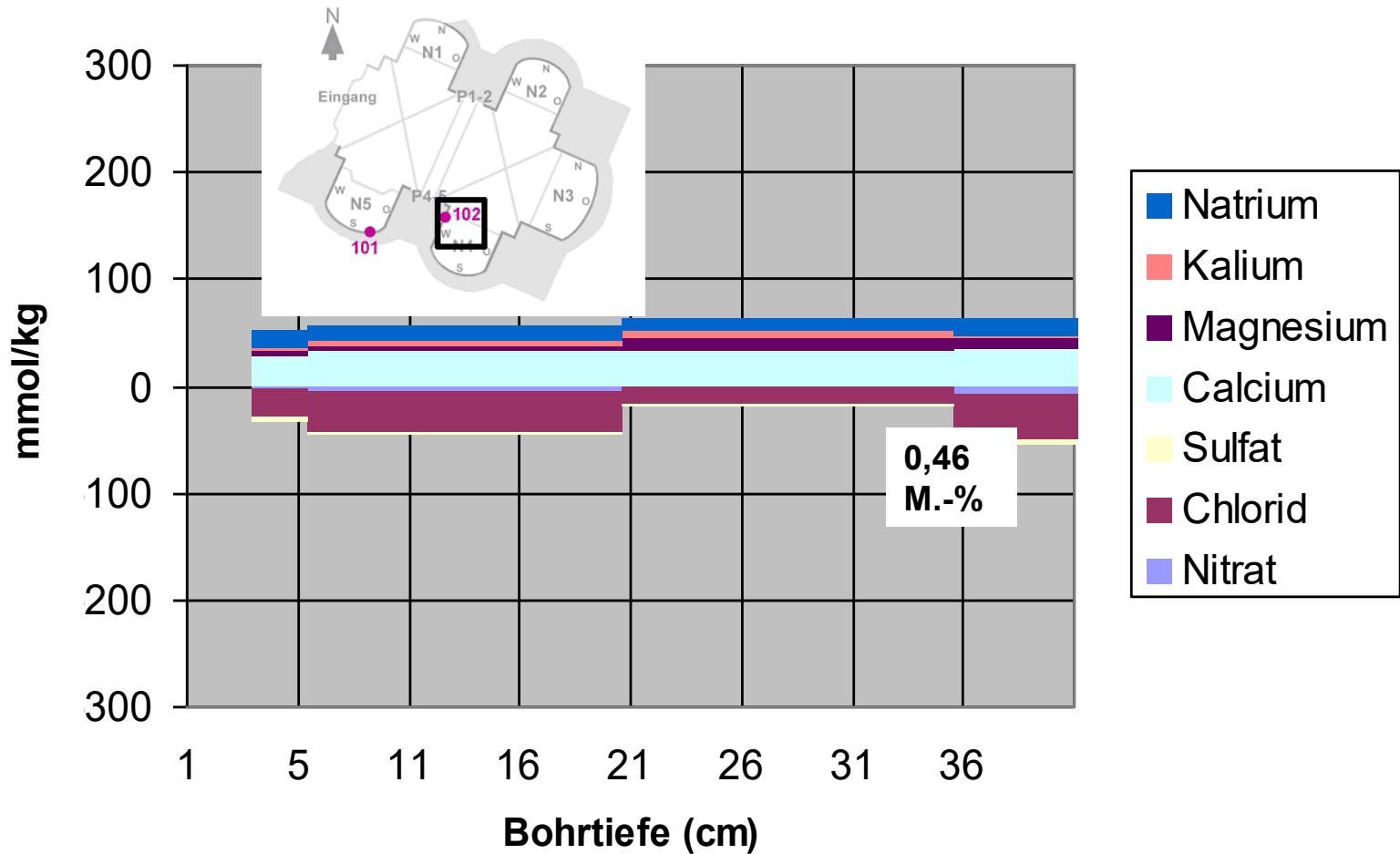
Vergilius Chapel in Vienna – survey and monitoring of water soluble salt impact

3. Quantitative salt analysis on drilling samples



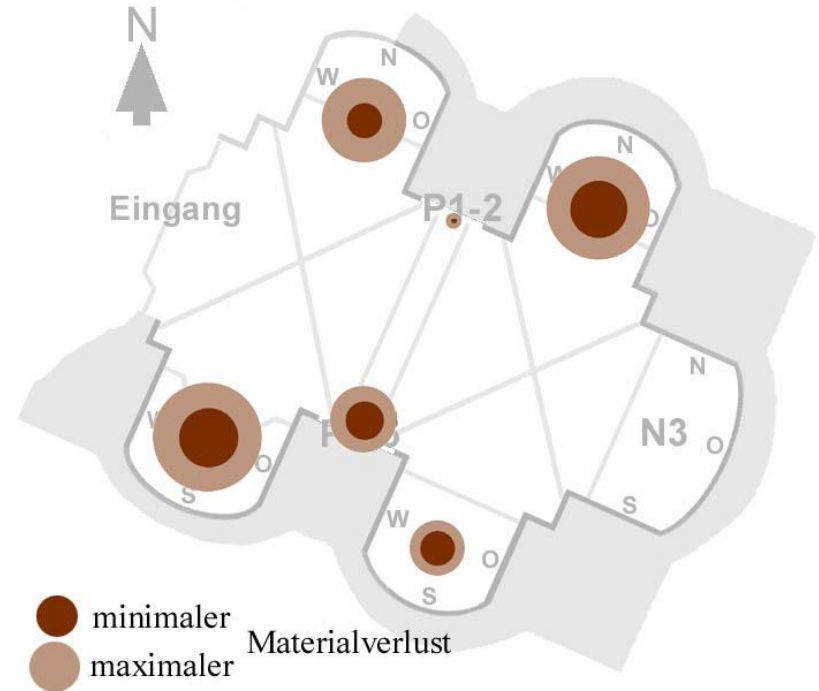
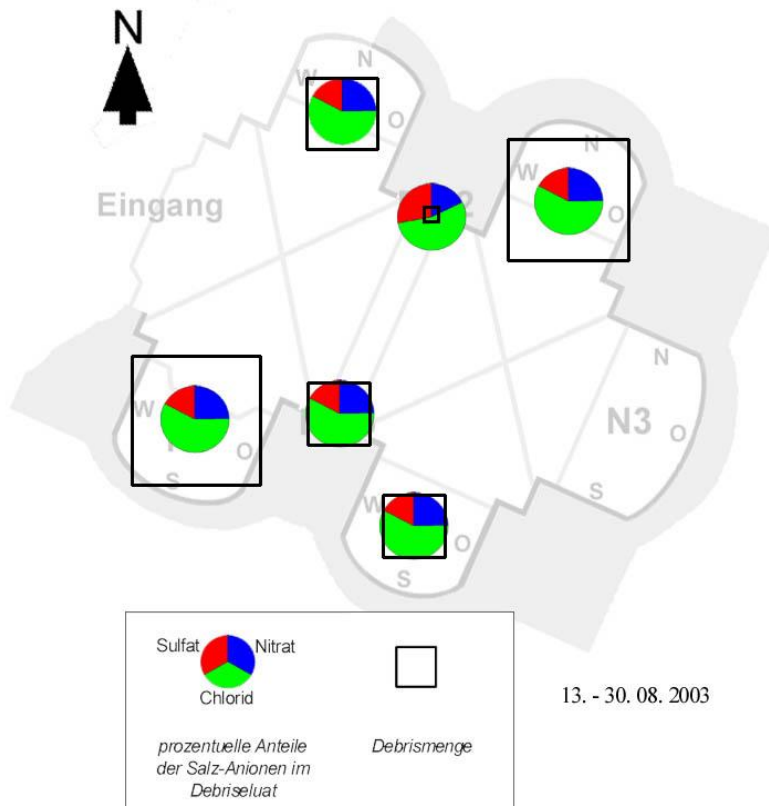
Vergilius Chapel in Vienna – survey and monitoring of water soluble salt impact

3. Quantitative salt analysis on drilling samples



Vergilius Chapel in Vienna – survey and monitoring of water soluble salt impact

2. Loss of material - monitoring



Vergilius Chapel in Vienna – survey and monitoring of water soluble salt impact

2. Loss of material - monitoring

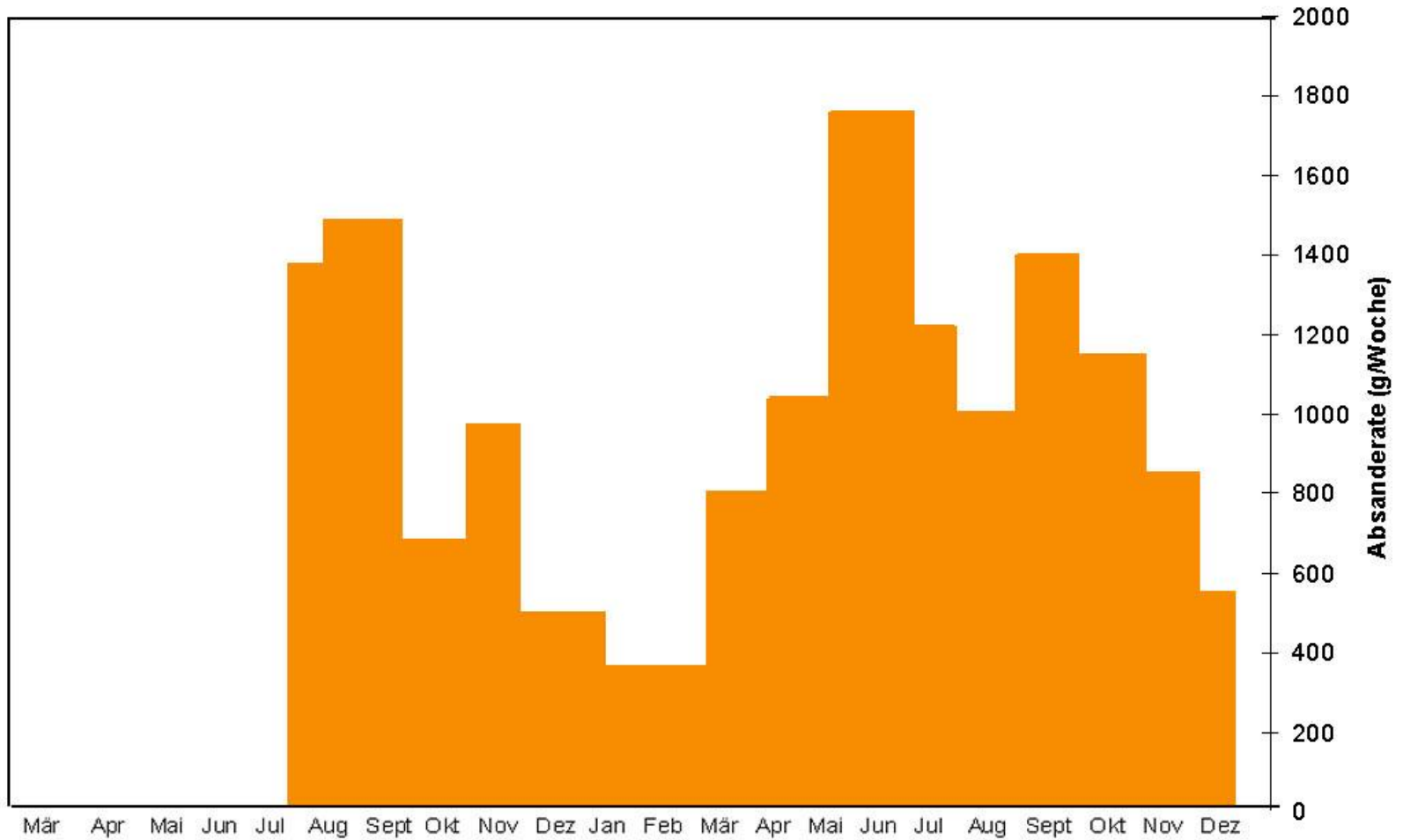


Image: Johannes Weber

Vergilius Chapel in Vienna – survey and monitoring of water soluble salt impact

Photomonitoring

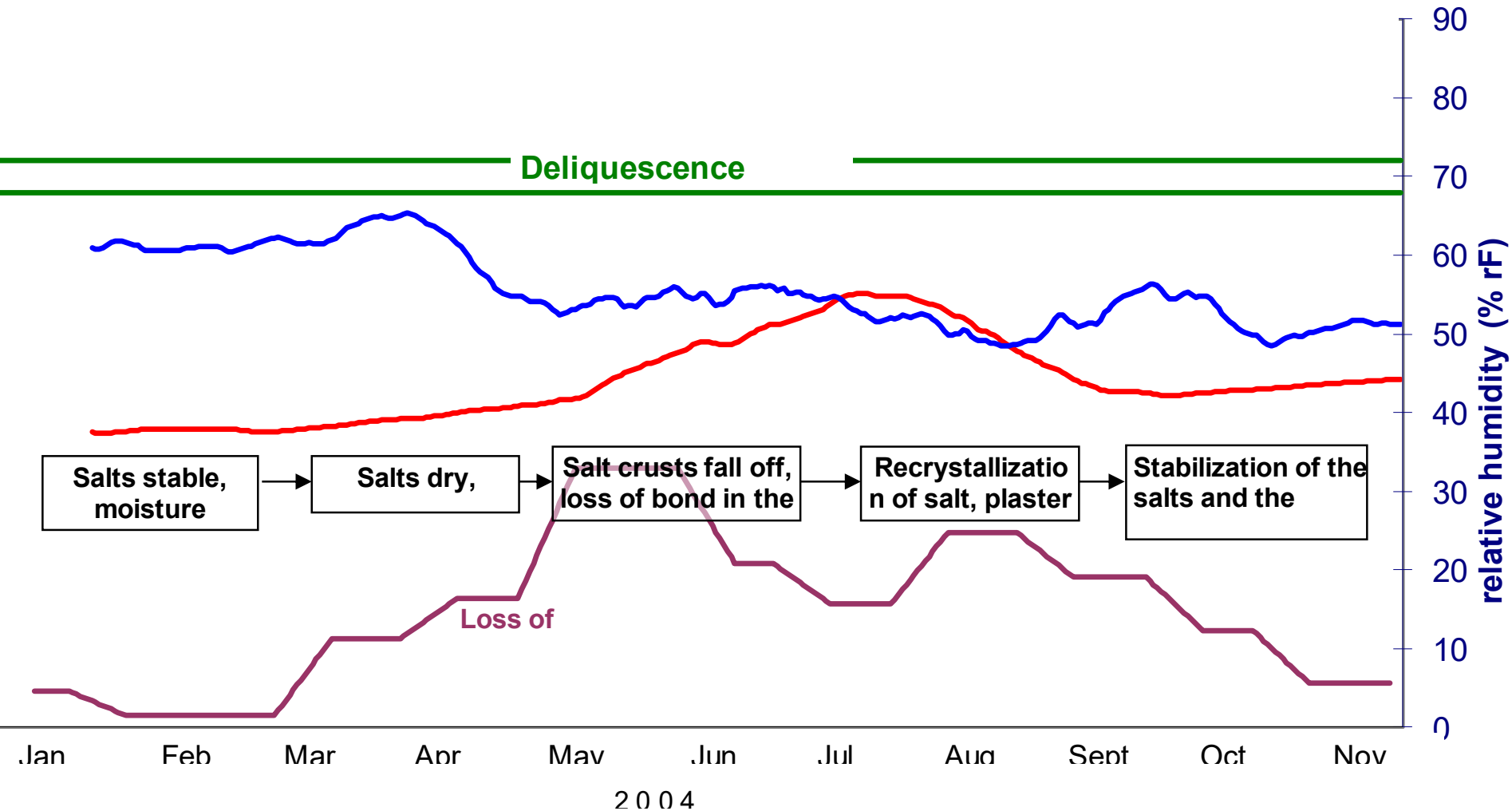
November



Image: Johannes Weber

Vergilius Chapel in Vienna – survey and monitoring of water soluble salt impact

Conclusion



Castle Landštějn / castle ruins





Complex reconstruction in the seventies in the 20th century
Structural repair using also cement grouting







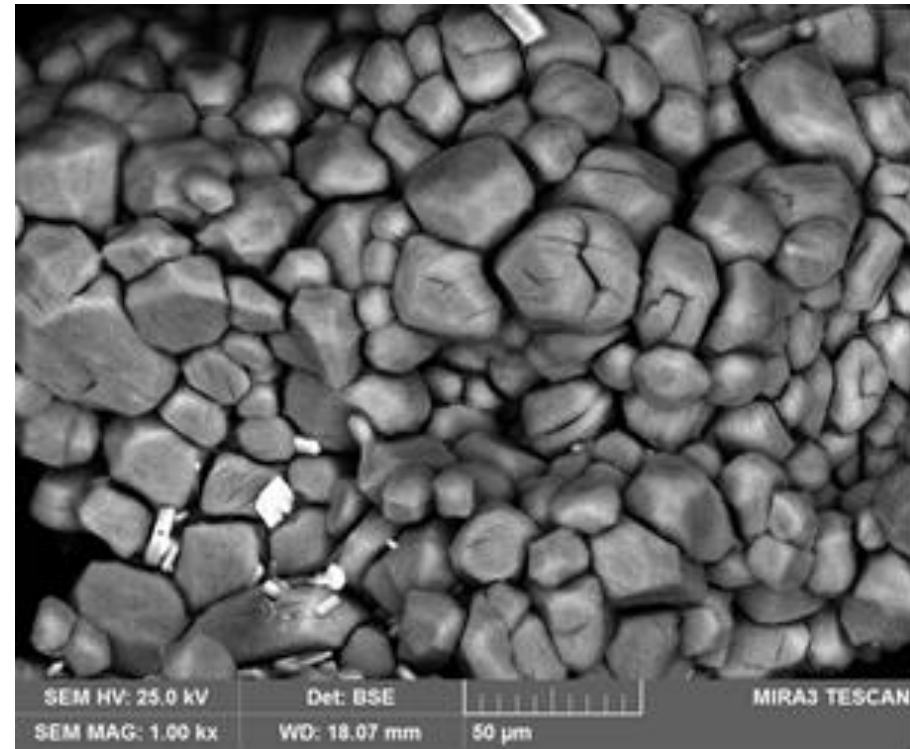
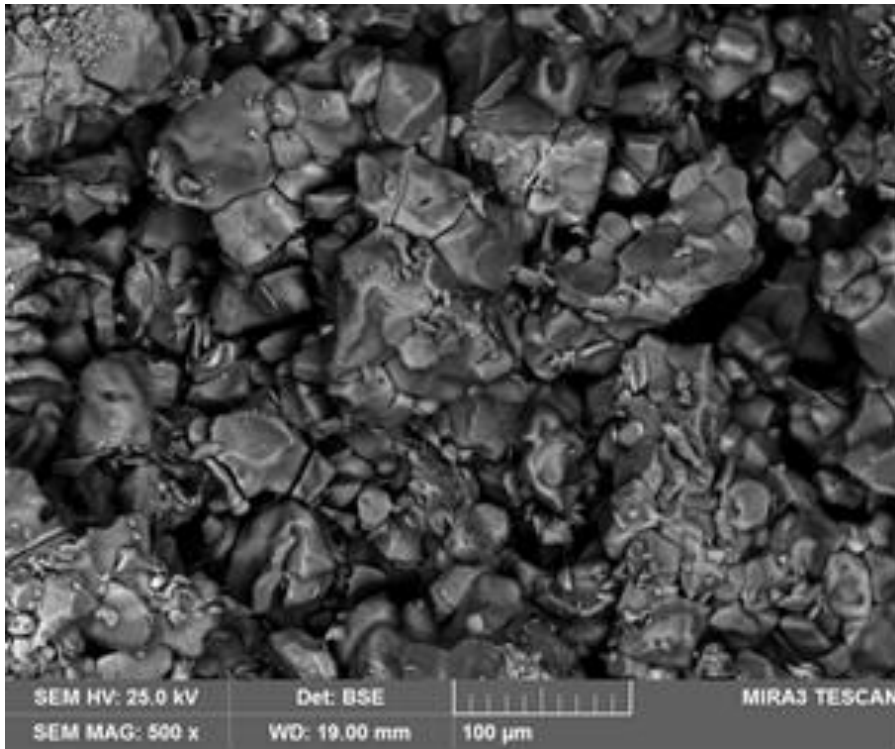












- predominantly potassium carbonate and potassium sulphate
- lesser extent sodium carbonate and sodium sulphate
- low amount of sodium chloride and potassium nitrate

- main source of potassium and sodium salts is the Portland cement used in the grouting mortar
- Portland cement, or other types of cement, may contain water-soluble alkalis (alkalies in Portland cement in average $K_2O / Na_2O \sim 0,6 - 3\%$)

NEW CASTLE WALL OF THE FRENCH GARDEN OF THE LITOMYŠL STATE CASTLE



NEW ENCLOSURE WALL OF THE FRENCH GARDEN OF THE LITOMYŠL STATE CASTLE



Wall reconstruction / rebuilding 2019/2020



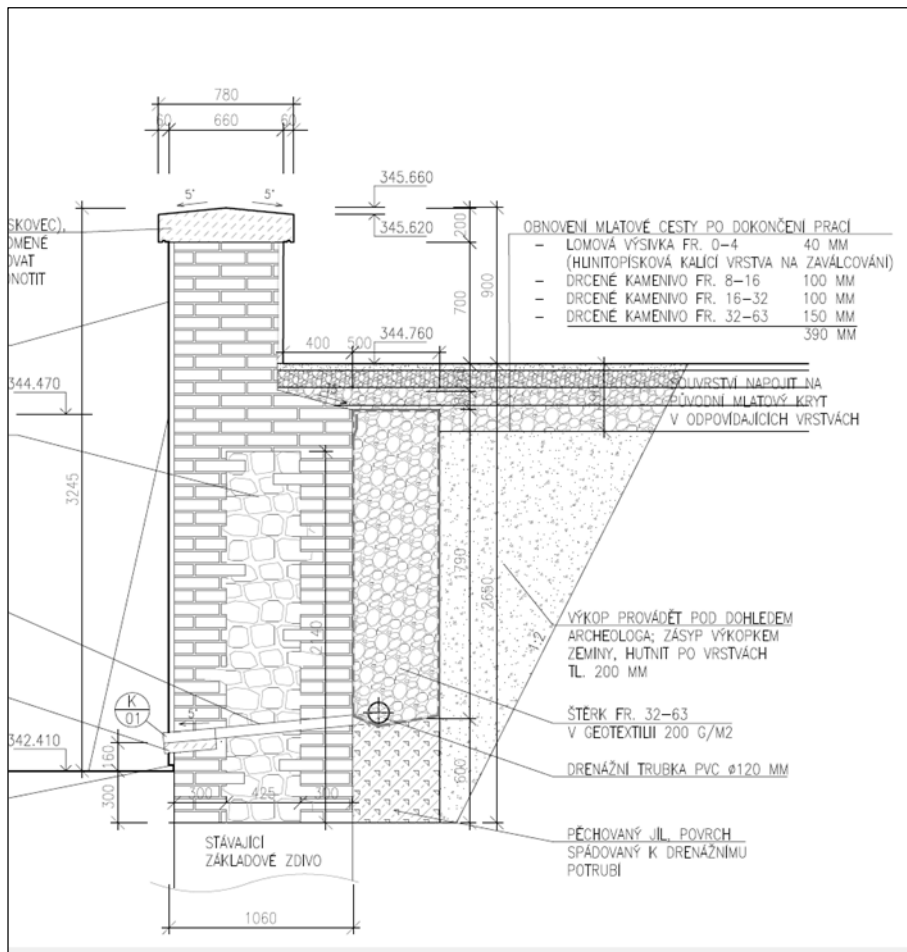
Wall reconstruction / rebuilding 2019/2020



Wall reconstruction / rebuilding 2019/2020



Wall reconstruction / rebuilding 2019/2020



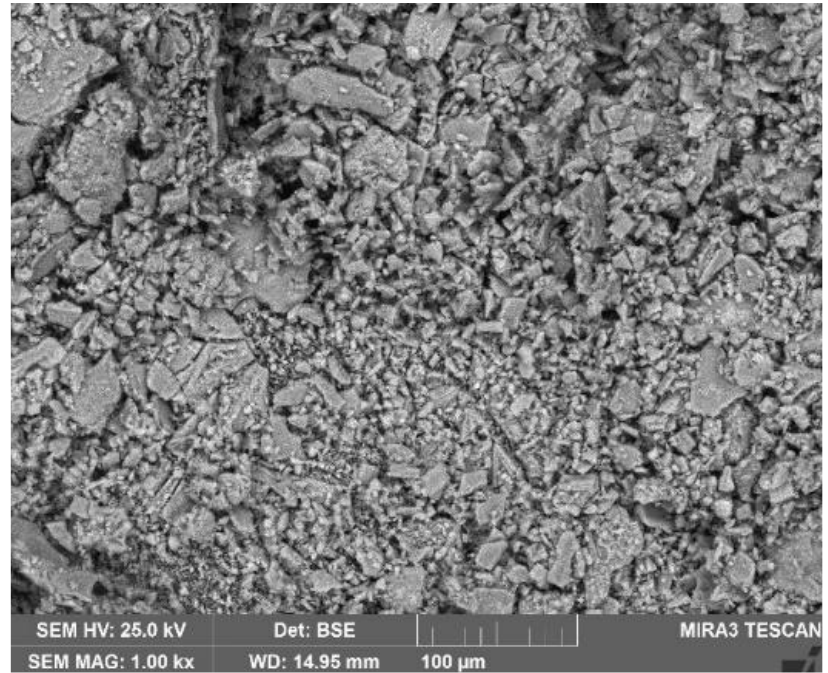
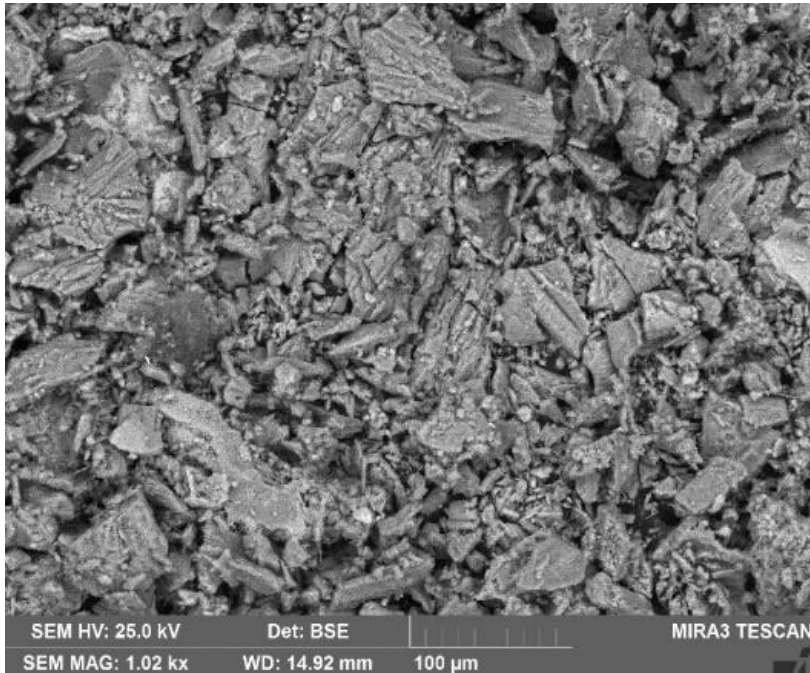
Cross section of the structure



Damage several months after completion



Damage several months after completion



Analysis of the efflorescence by SEM/EDS – mainly sodium sulfate / Na_2SO_4

<https://www.conservationphysics.org/>

<https://www.researchgate.net/publication/261703858> [Microclimate for Cultural Heritage](#)
[- Conservation Restoration and Maintenance of Indoor and Outdoor Monuments](#)

<https://www.saltwiki.net/index.php/Home>