

Základy stavební fyziky s důrazem na vzlínající vlhkost ve stavebních konstrukcích

Karol Bayer

Klasická stavební fyzika z hlediska uživatelských vlastností stavby zahrnuje ochranu proti teplu a vlhkosti a také akustiku budov a místností. V širším slova smyslu sem patří i požární ochrana a osvětlení.

Lze ji rozdělit do několika klíčových oblastí:

1. Teplota 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.

Základní pojmy

- Vedení tepla: Přenos tepla materiálem
- Konvekce: Přenos tepla pohybem vzduchu nebo kapaliny.
- Tepelné záření: Přenos energie prostřednictvím elektromagnetického záření
- Přenos zvuku: Šíření zvuku vzduchem nebo stavebními prvky.
- Difúze: Transport vody ve formě páry materiálem. Řízení vlhkosti je zásadní ve stavební fyzice, aby se zabránilo poškození konstrukce.

Parametry

Teplota

Vlhkost vzduchu

Světlo (záření)

Proudění vzduch (ventilace)

Složení vzduchu

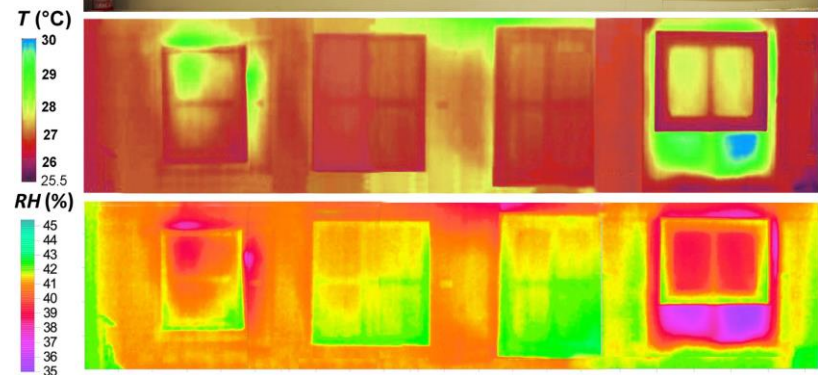
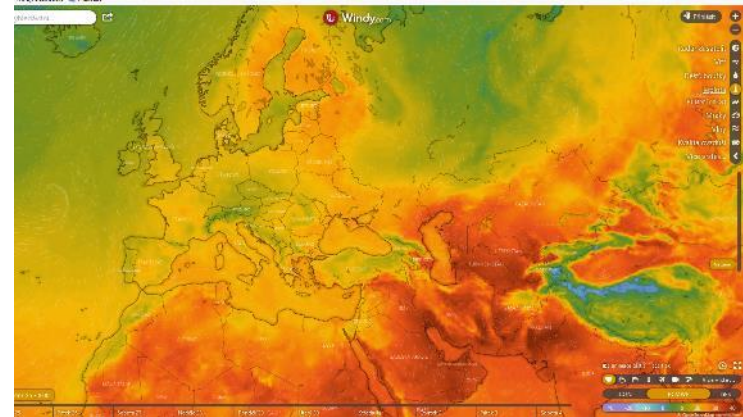
Mikroklima – klimatické podmínky v
definované, ohraničené oblasti

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

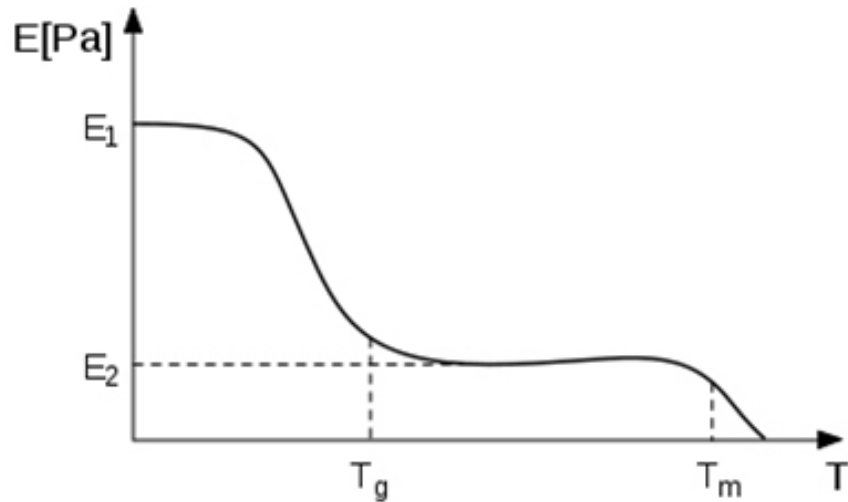
$$\Delta l = \alpha \cdot l_1 \cdot \Delta t$$

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



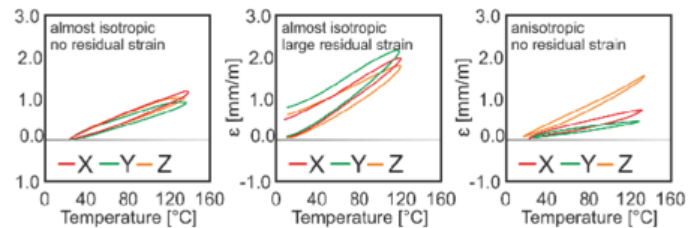
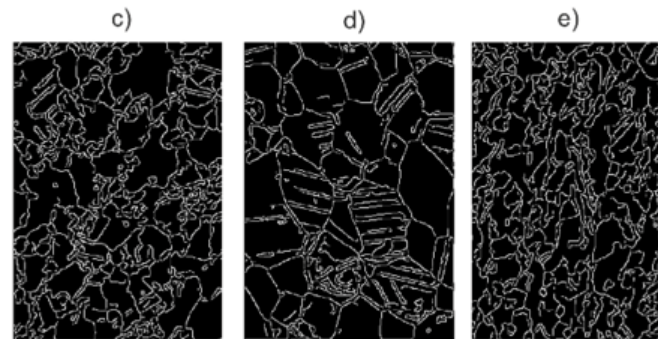
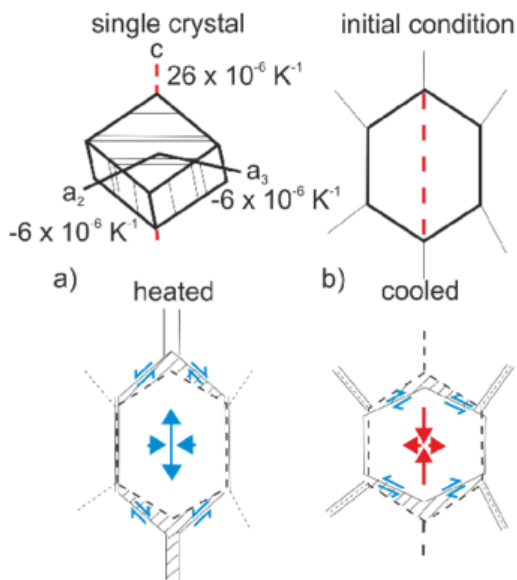
Material	T_g (°C)
Tire rubber	-70
Polyvinylidene fluoride (PVDF)	-35
Polyvinyl fluoride (PVF)	-20
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	115
Polysulfone	185
Polystyrene (PS)	95
Polypropylene (PP isotactic)	0
Polypropylene (PP atactic)	-20
Polynorborene	215
Poly(lactic acid) (PLA)	60–65
Polyethylene terephthalate (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

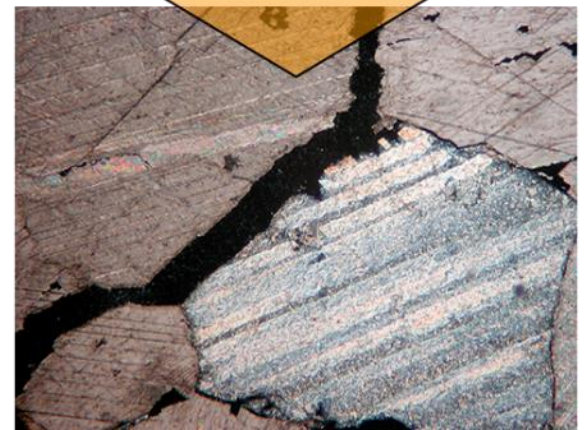
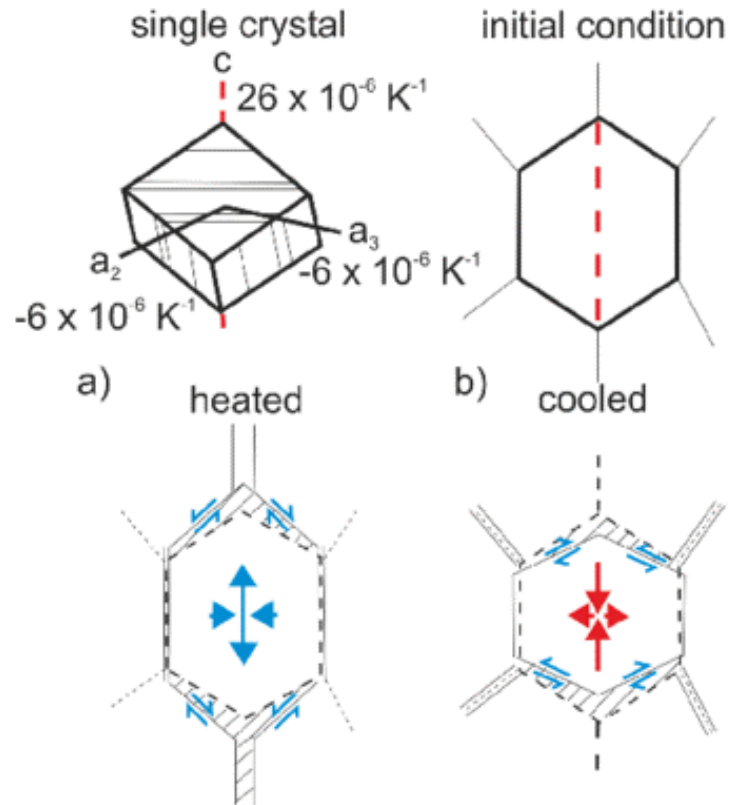
Kolísání teploty

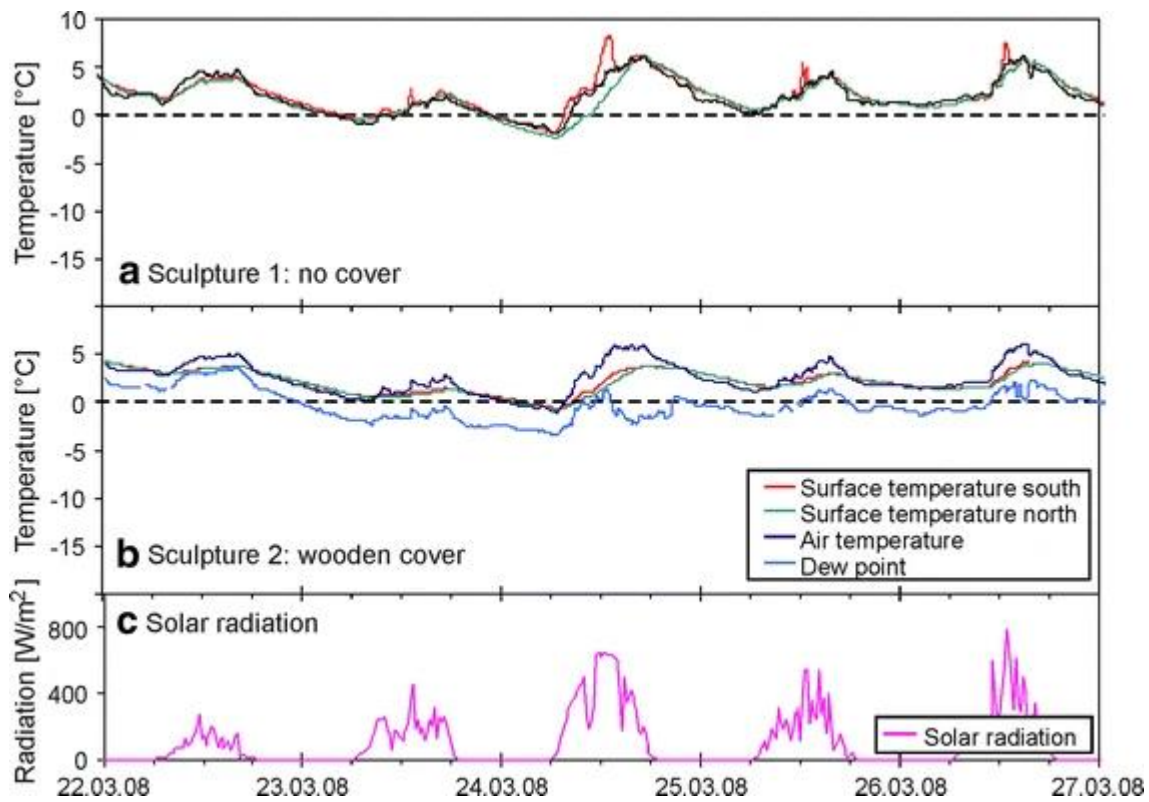
Cyklické změny teploty

Mrazové cykly

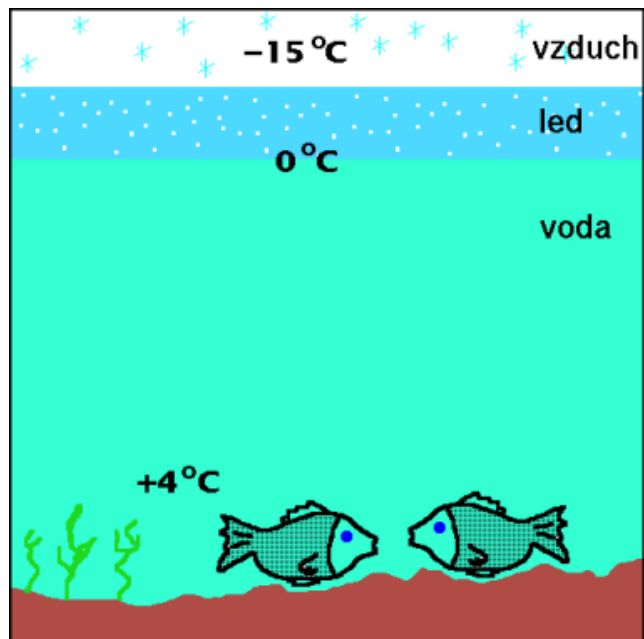


Kolísání teploty – krystal kalcitu





Kolísání teploty – anomálie vody



Kolísání teploty – anomálie vody

Teplota

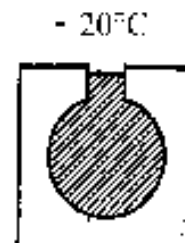
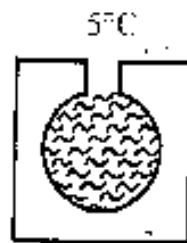
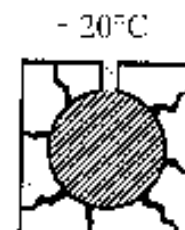
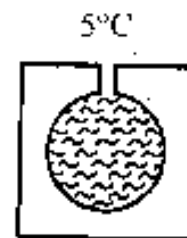
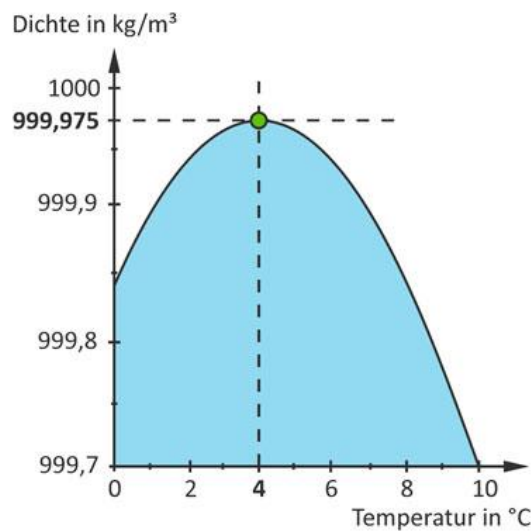
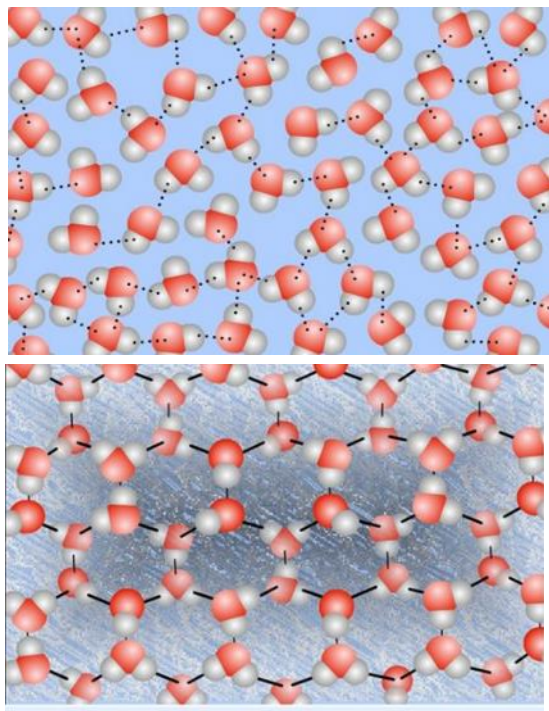
0°C (led)

+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

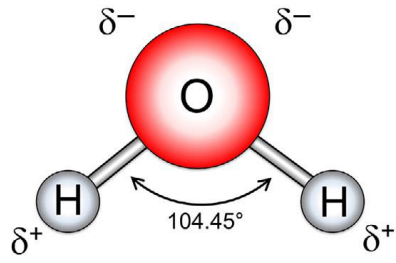
Vlhkost (voda)

Přímý kontakt s kapalnou vodou

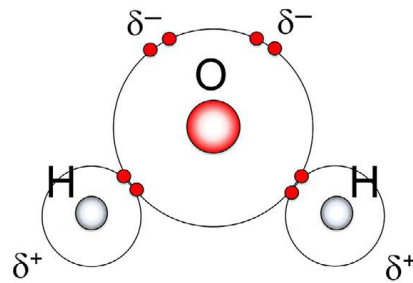
- Srážky
- Vzlínání
- Kondenzace
- Havarijní stavy – průsaky, poruchy, povodně, zásahy při požárech

Vzdušná vlhkost – voda v plynném skupenství

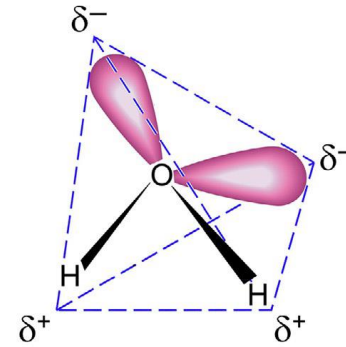
Vliv vlhkosti



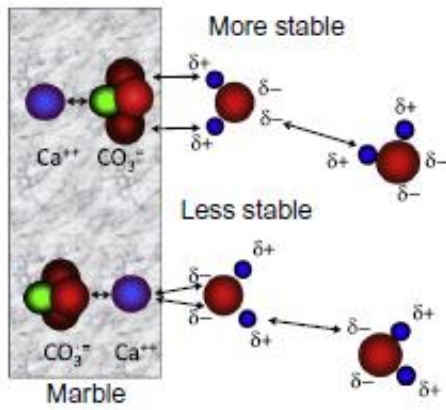
(A)



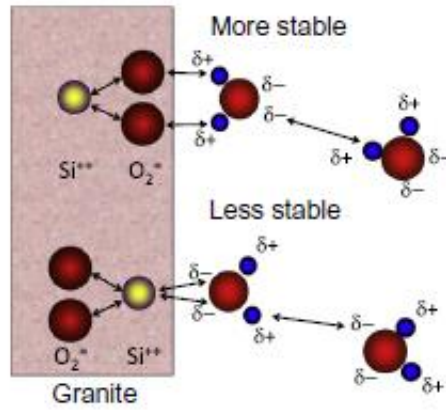
(B)



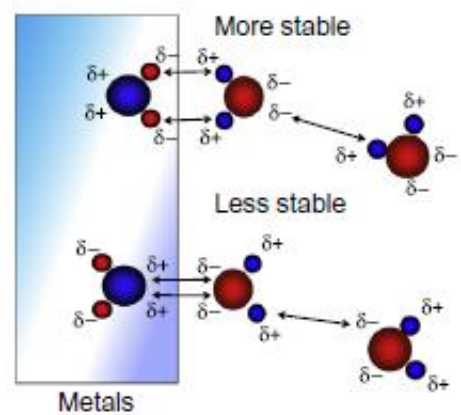
(C)



(A)



(B)

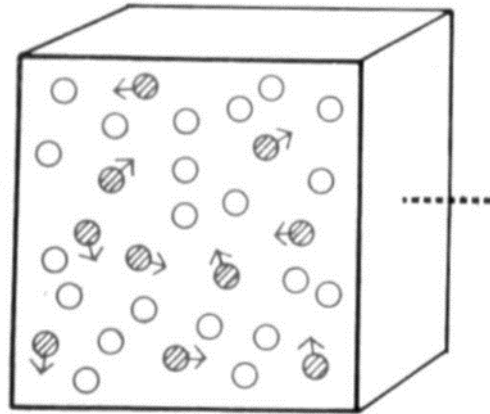


(C)

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

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

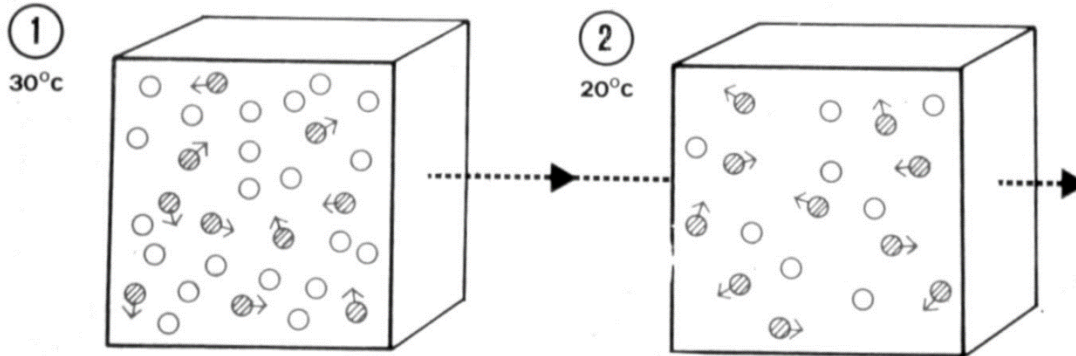
● RELATIVE HUMIDITY (R.H.)

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.

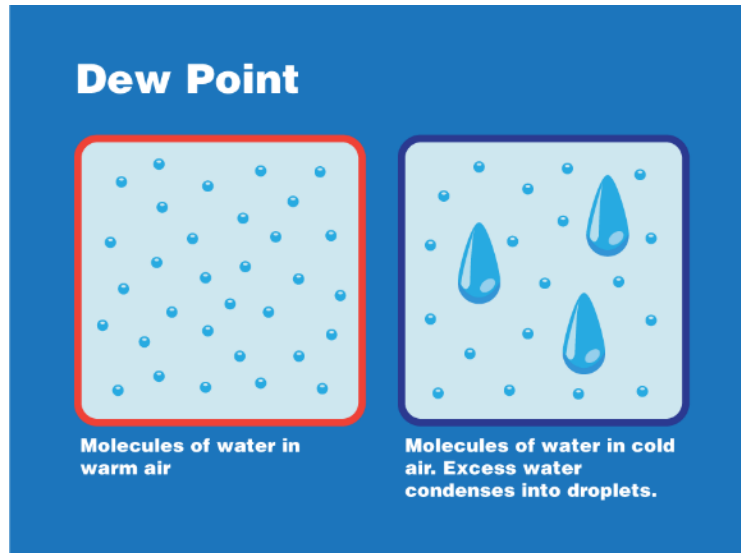


$$H.R. = \frac{10}{31} \times 100 = 33\%$$

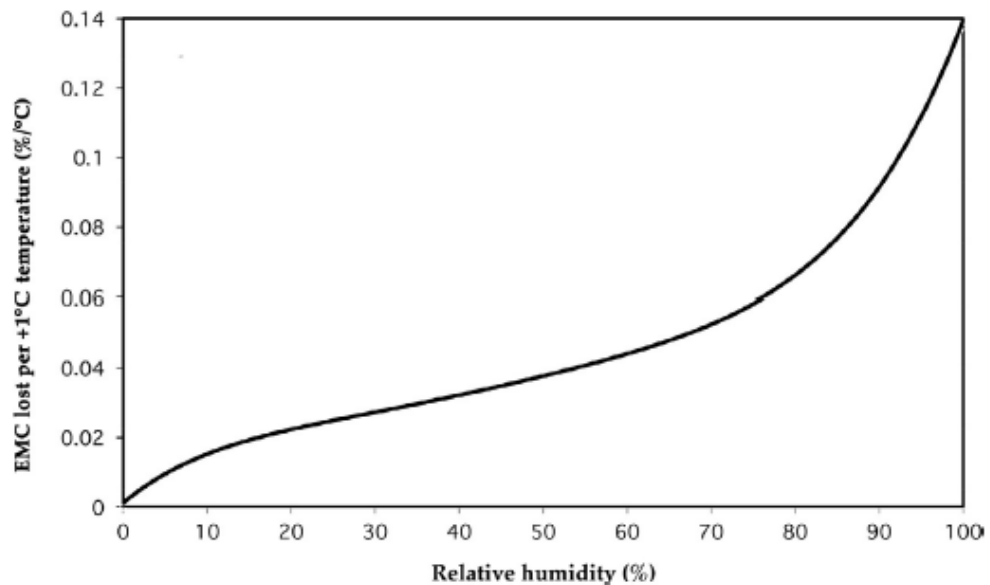
$$H.R. = \frac{10}{18} \times 100 = 55\%$$

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

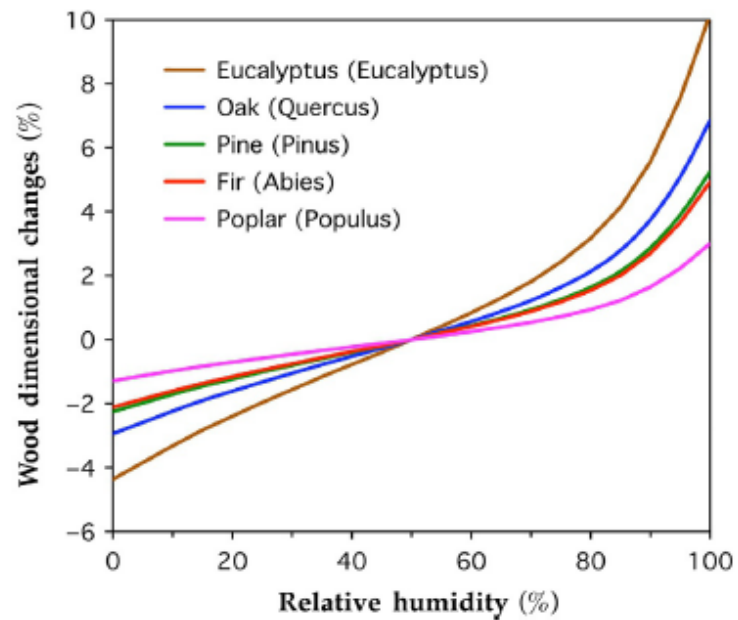
Rosný bod - teplota, na kterou musí být ochlazen vzduch, aby došlo k saturaci (nasycení) vodních par. (konstantní tlak a konstantní obsah vodních par



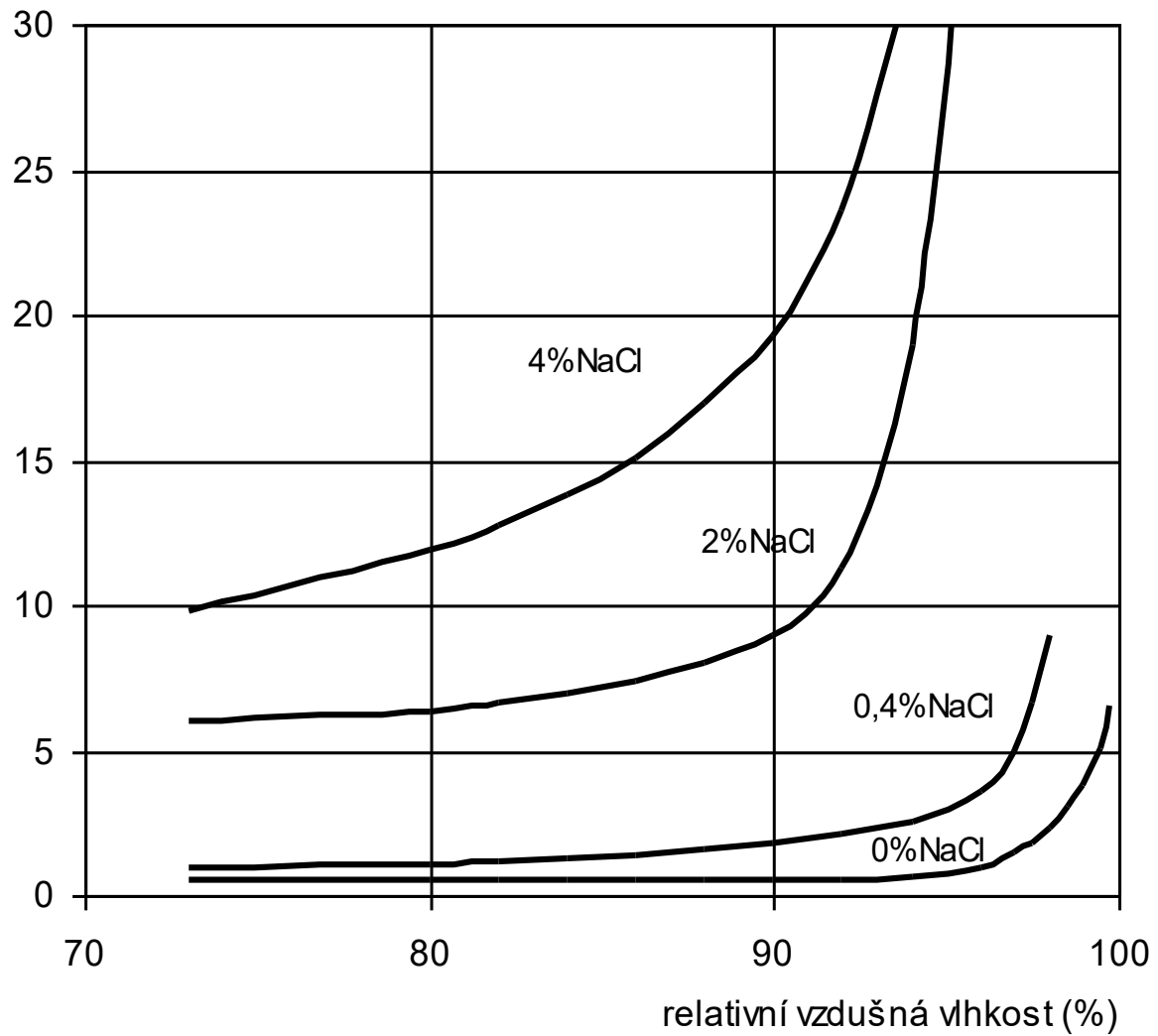
Sorpční izoterma



Dilatace



hygroskopická nasákavost (%obj.)



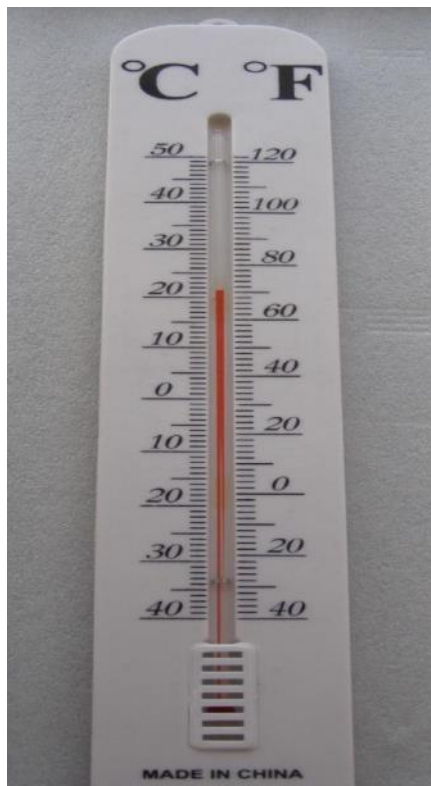
Hygroskopicitá solí – schopnost vázat vodu ze vzdušné vlhkosti

– 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

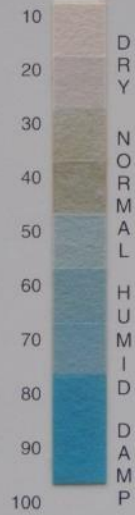
Vzorec soli	Rovnovážná relativní vlhkost (%)	T (°C)
K_2SO_4	97	25
KNO_3	92,5	25
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	92	18,5
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	87	25
KCl	84,3	25
Na_2SO_4	81	25
NaCl	75,3	25
$NaNO_3$	73,9	25
NH_4NO_3	61,8	25
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	52,9	25
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	50,0	25
$K_2CO_3 \cdot 2H_2O$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

Měření / kontrola



HUMIDITY %

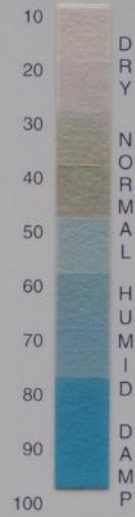
READ TOP OF BLUE
BETWEEN BLUE & PINK



SUD-CHEMIE PERFORMANCE PACKAGING, COLTON, CA

HUMIDITY %

READ TOP OF BLUE
BETWEEN BLUE & PINK



SUD-CHEMIE PERFORMANCE PACKAGING, COLTON, CA





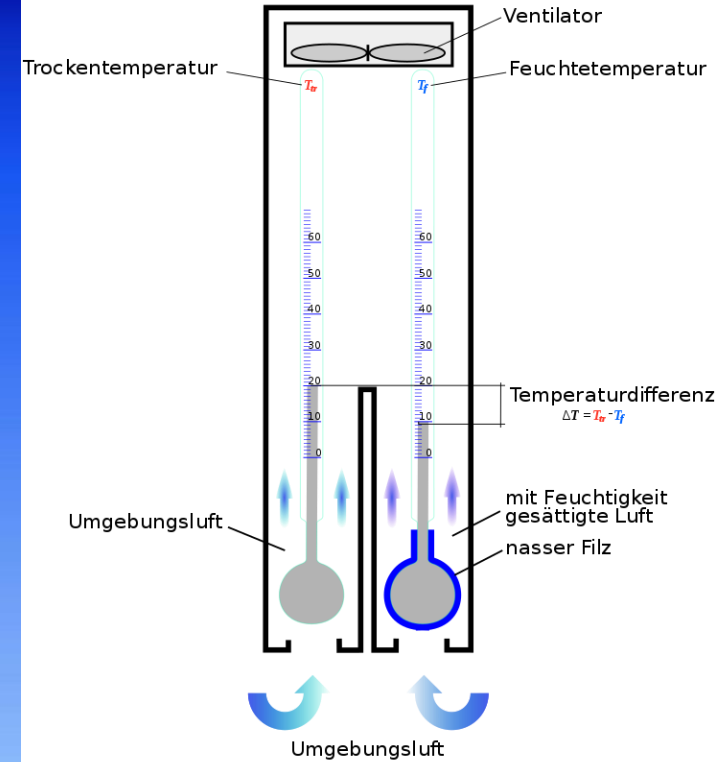
Psychrometr

Dvojitý teploměr

- suchý
- vlhký pokryt navlhčenou látkou

Odpar vody - odnímání tepla

Vlhký teploměr vždy nižší teplota než suchý



relative humidity.

(see exercise 17.5)

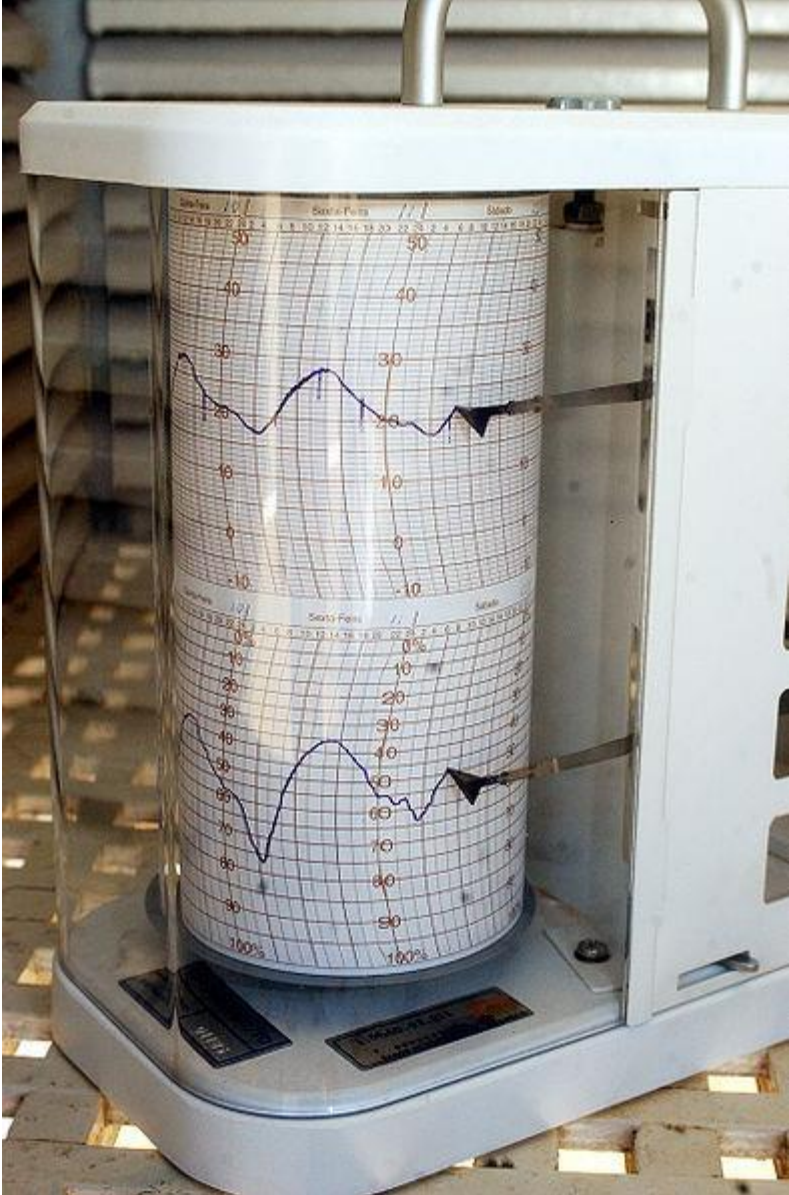
Temperature of dry bulbe Dbt

Température du bulbe sec: Tbs

Différence de temperature: Tbs - Tbh

Différence in temperature: Dbt - Wbt

	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



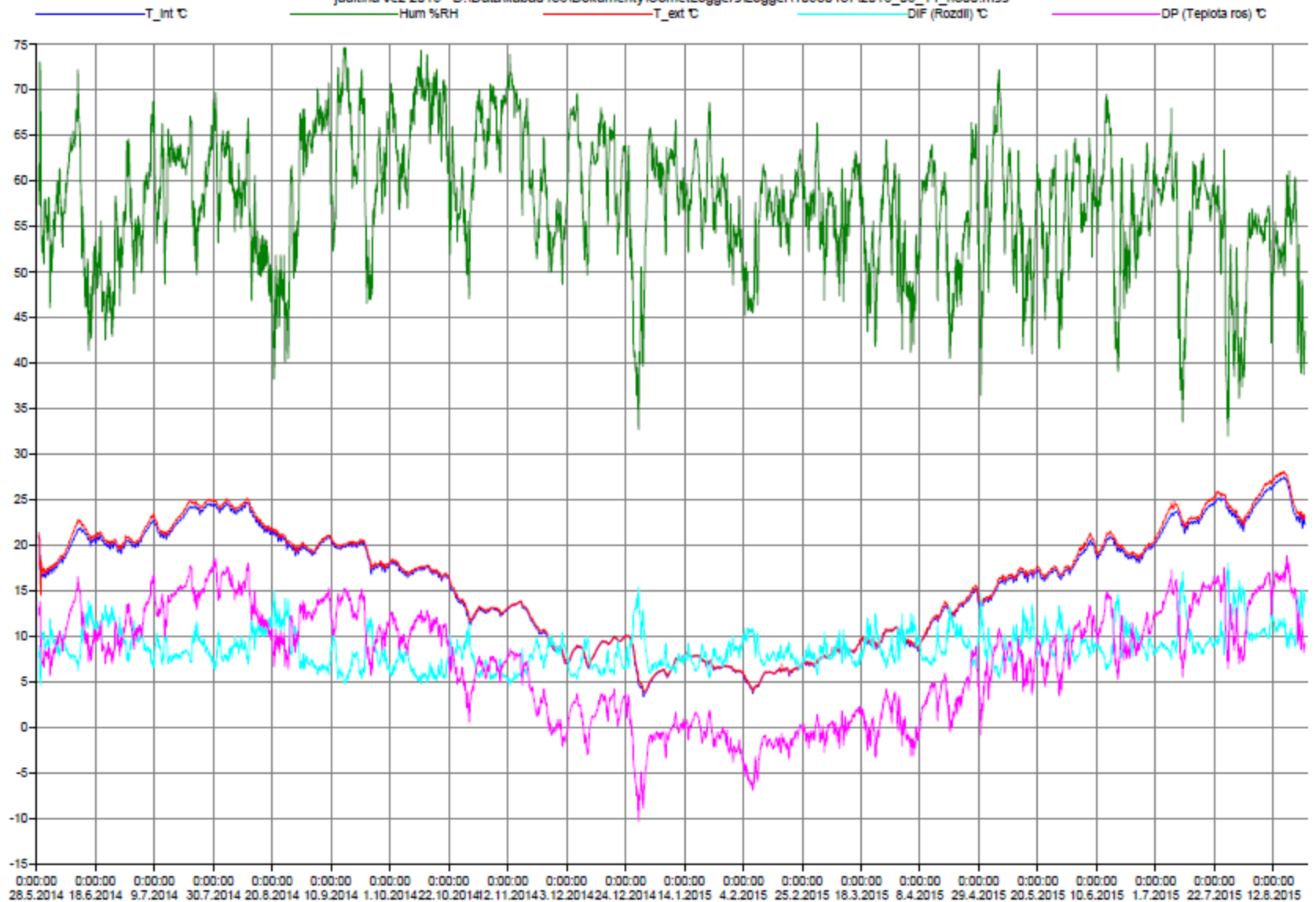
- 8818
- 88128
- 88124



- 8828
- 8829



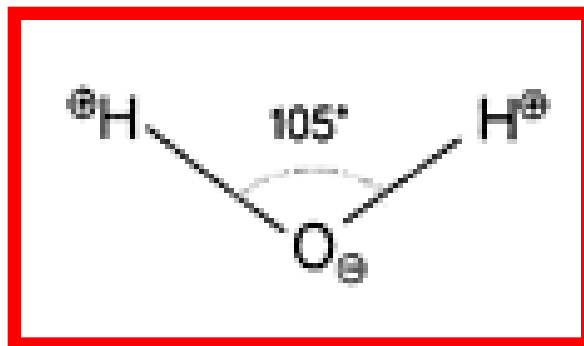
juditina vez 2016 D:\Data\kaba0436\Dokumenty\CometLoggers\Logger\10930437\2016_06_14_no00.mss



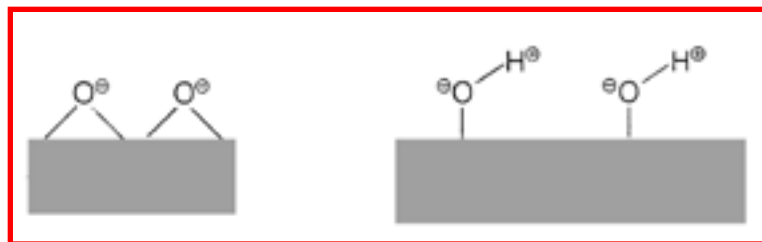
Vzlínající vlhkost a transport kapalné vody v stavebních materiálech

Transport a migrace vody v porézních anorganických materiálech.

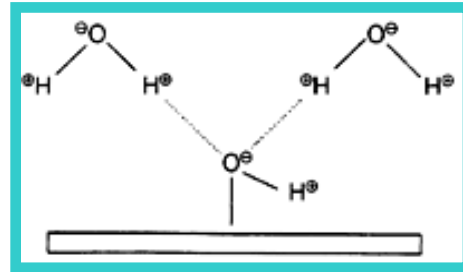
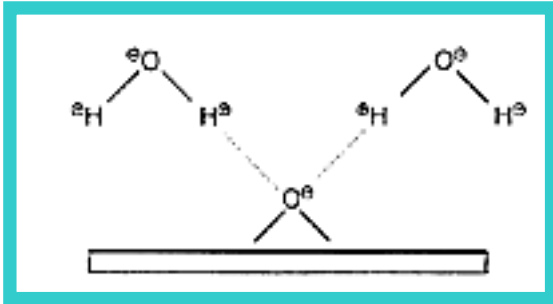
Molekula vody – H_2O – polární molekula



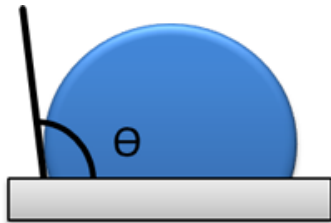
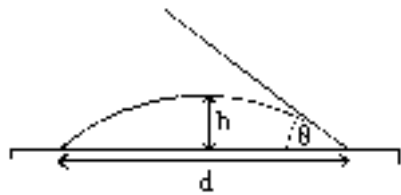
Povrch anorganického porézního materiálu – polární



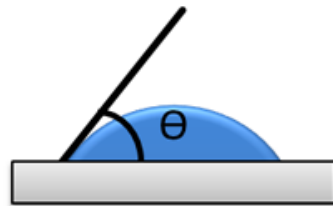
Voda na povrchu porézného anorganického materiálu



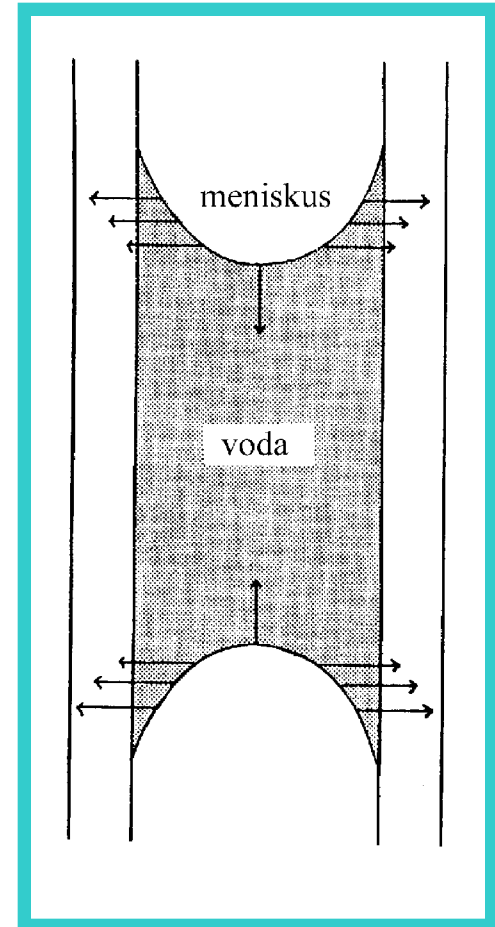
$$\theta = 2 \arctg (2h/d)$$



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

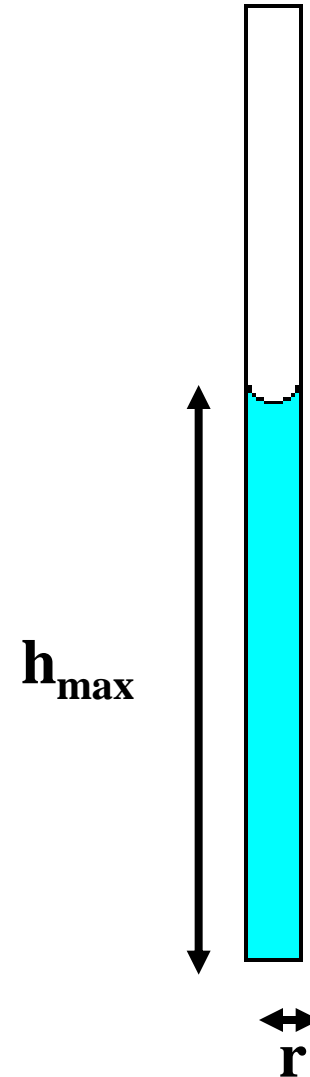
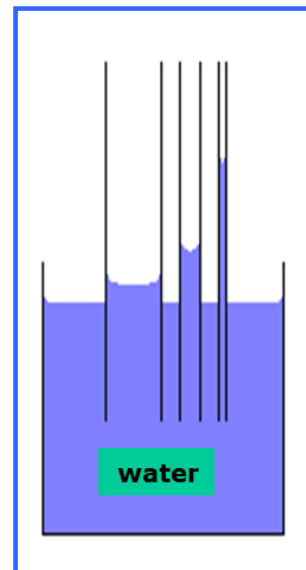
r ... poloměr kapiláry (m)

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

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

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



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

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

$$S_d = \mu \cdot d$$



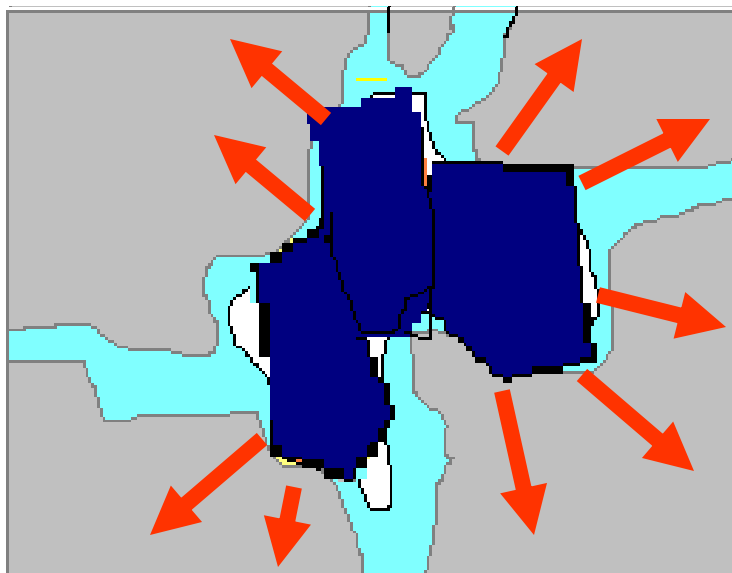


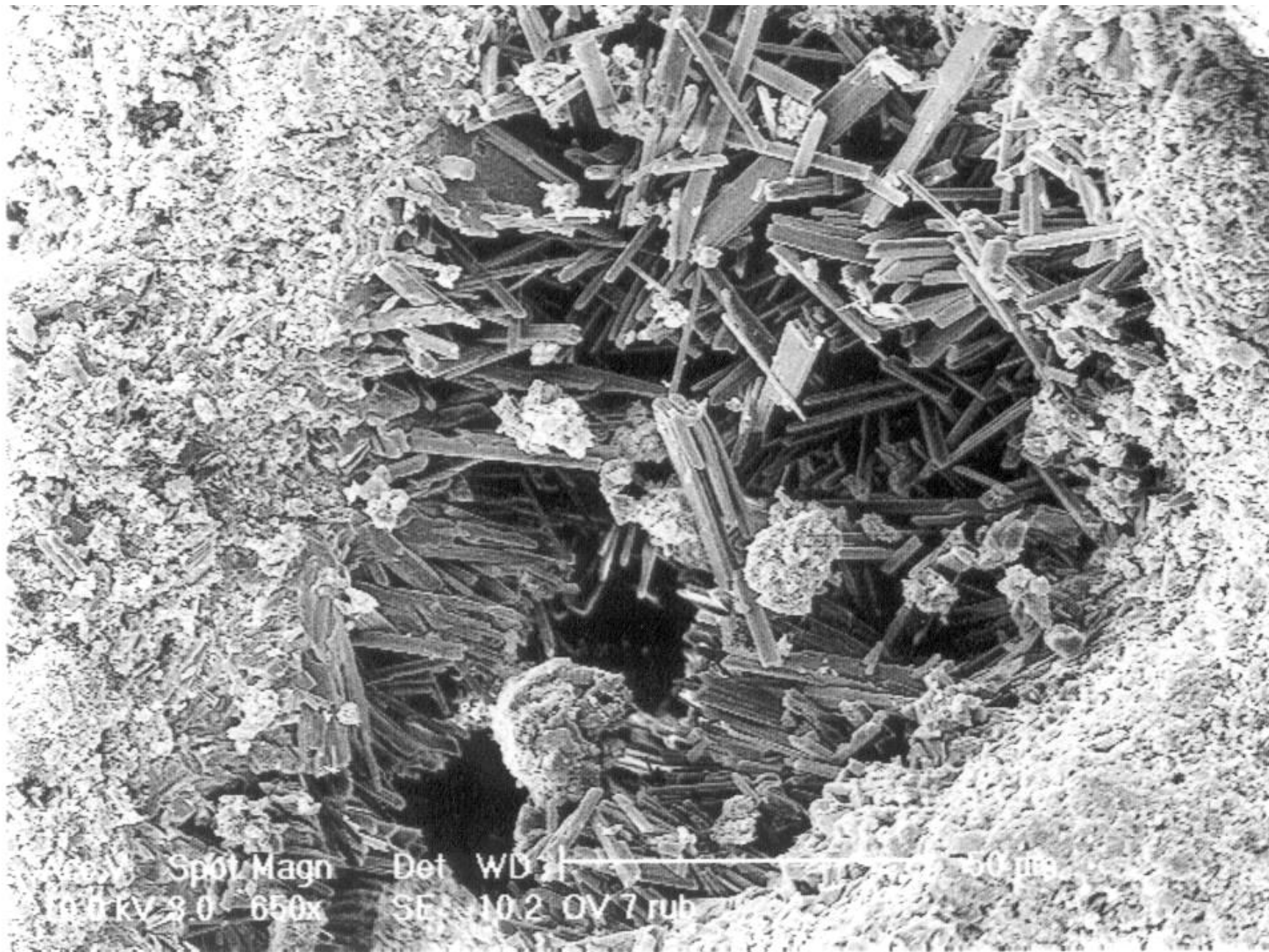
Poškození porézních materiálů v důsledku působení vodorozpustných solí

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



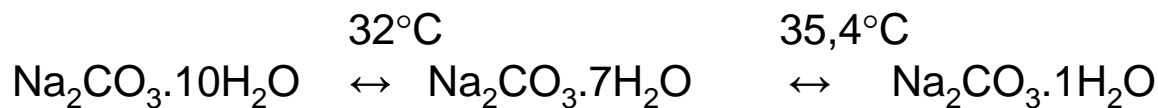
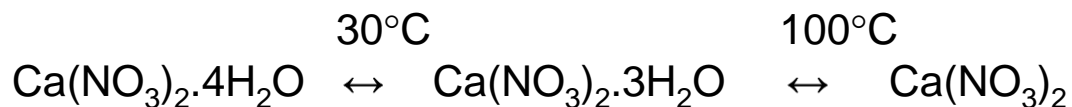
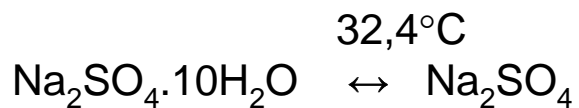
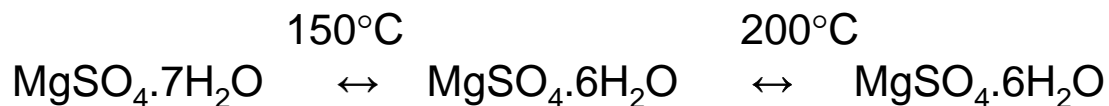
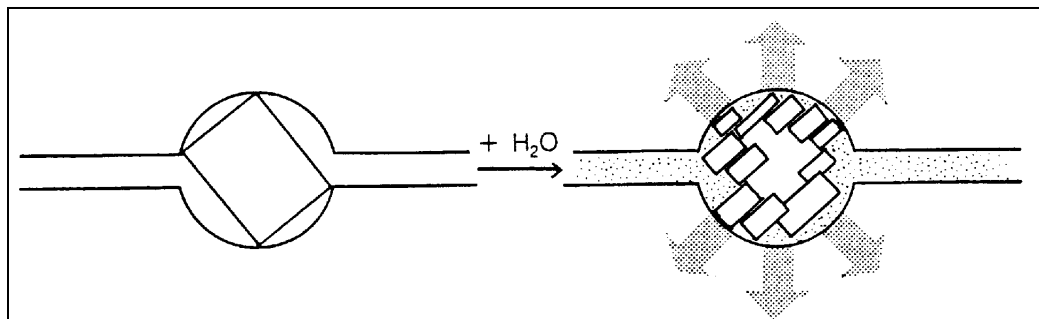
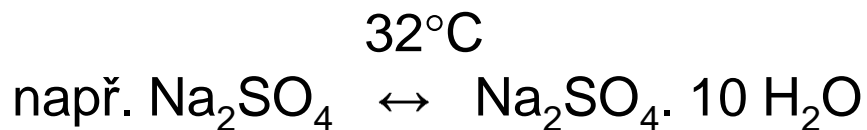


Area Spot Magn
10.0 kV 8.0 650x

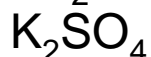
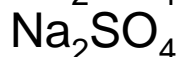
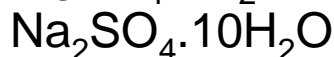
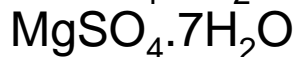
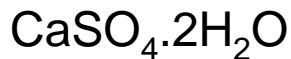
Det WD
SE: 10.2 OV 7 rub

100 μm

2. hydratace solí



Sírany



síran vápenatý dihydrát, sádrovec

síran hořečnatý heptahydrát,

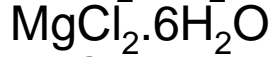
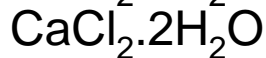
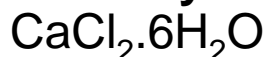
síran sodný dekahydrát, thenardit

síran sodný bezvodý, mirabilit

síran draselný

ettringit

Chloridy



chlorid vápenatý hexahydrát, antarkticit

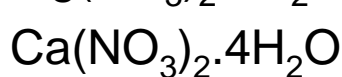
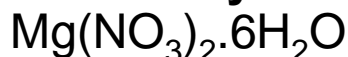
chlorid vápenatý dihydrát

chlorid hořečnatý, bischofit

chlorid sodný, halit

chlorid draselný, sylvit

Dusičnany



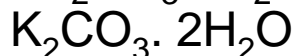
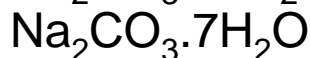
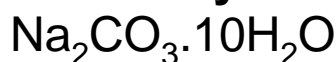
dusičnan hořečnatý hexahydrát, nitromagnesit

dusičnan vápenatý tetrahydrát, nitrokalcit

dusičnan sodný

dusičnan draselný

Uhličitany



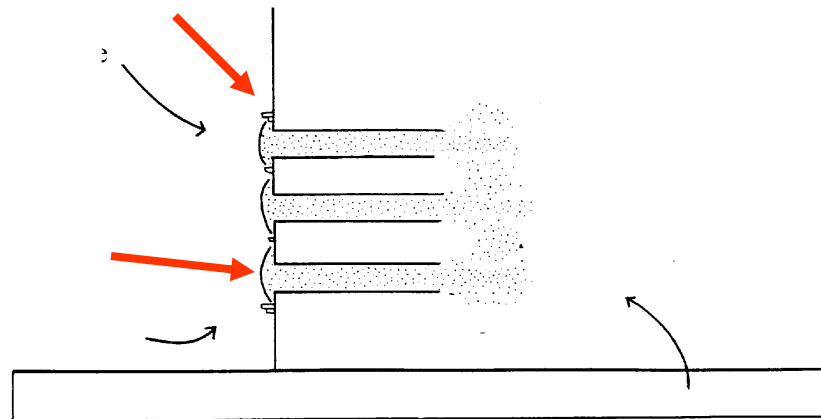
uhličitan sodný dekahydrát

uhličitan sodný heptahydrát

uhličitan draselný

Krystalizace na povrchu

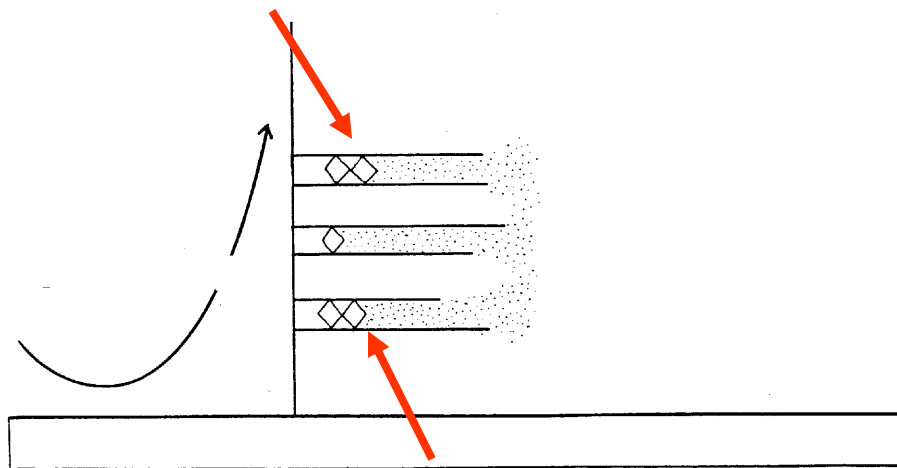
- při pomalém vysychání
resp. pomalém proudění vzduchu
- vznik výkvětů na povrchu
eflorescence



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

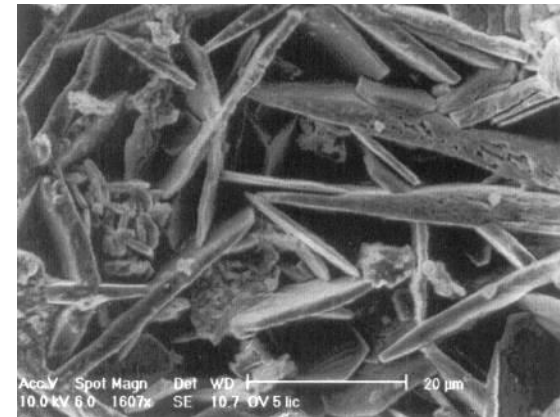
Vzorec soli	Rovnovážná relativní vlhkost (%)	T (°C)
K_2SO_4	97	25
KNO_3	92,5	25
$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$	92	18,5
$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$	87	25
KCl	84,3	25
Na_2SO_4	81	25
NaCl	75,3	25
$NaNO_3$	73,9	25
NH_4NO_3	61,8	25
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	52,9	25
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	50,0	25
$K_2CO_3 \cdot 2H_2O$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

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, ...)



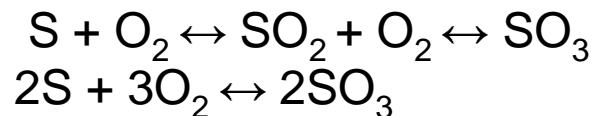
Vznik sádrovce – obvykle důsledek chemické koroze

Oxidy síry – SO₂, SO₃ – vedlejší produkt při spalování fosilních paliv

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

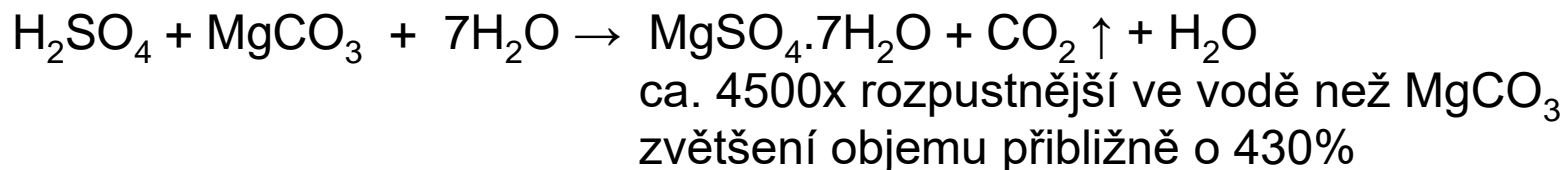
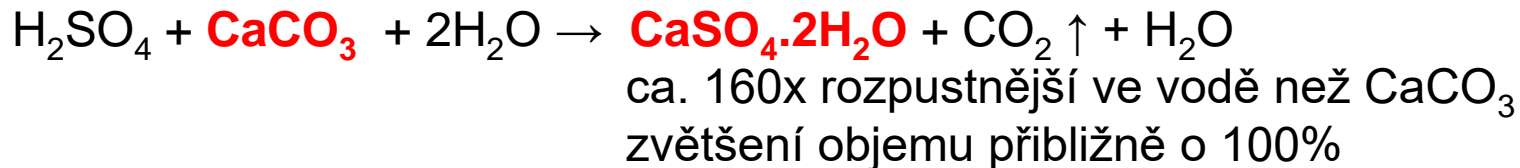
tj. 20 až 50 kg SO₂ na tonu paliva

Zjednodušené schéma vzniku :



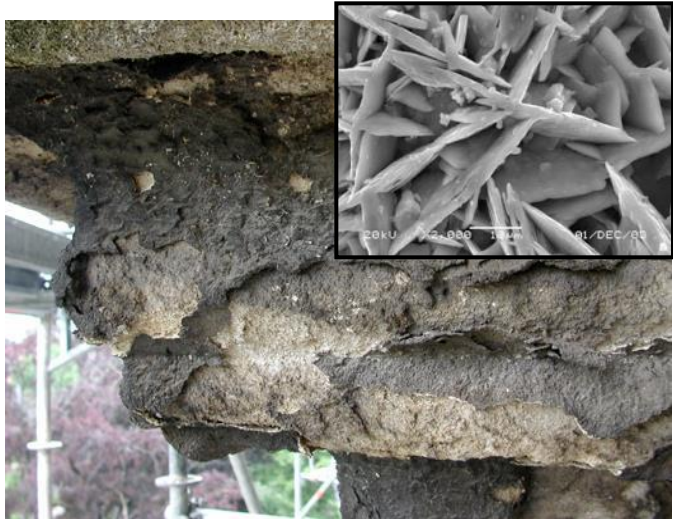
- hlavní příčina kyselých dešťů (nízké pH)

- nejvíce postižené – materiály obsahující karbonáty



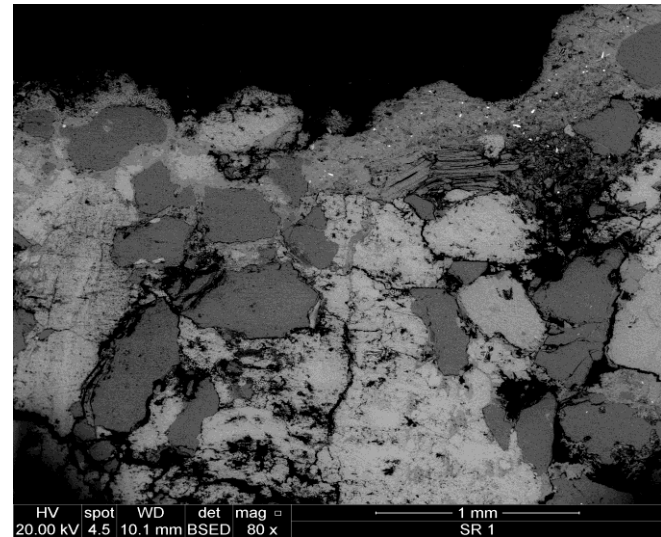
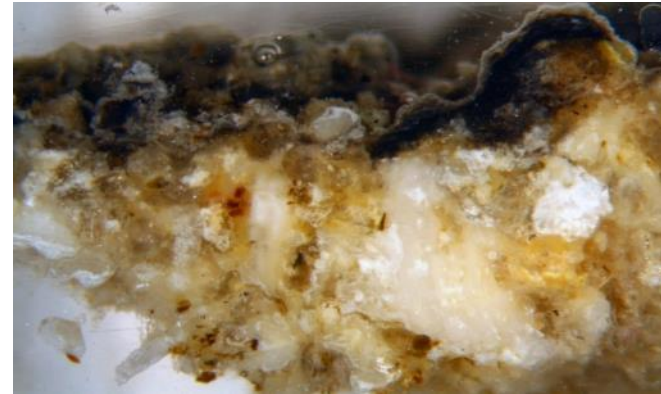
Zjištění stavu objektu z hlediska obsahu vodorozpustných solí – průzkum

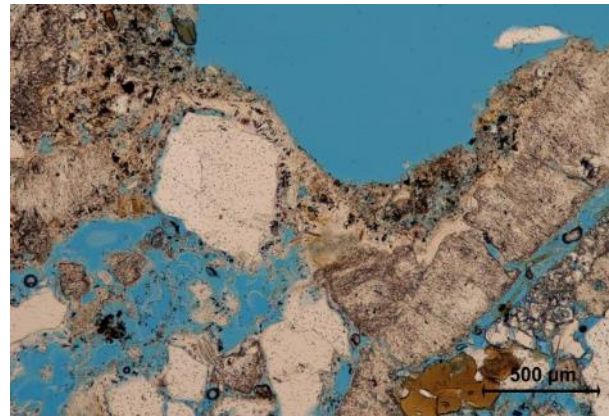
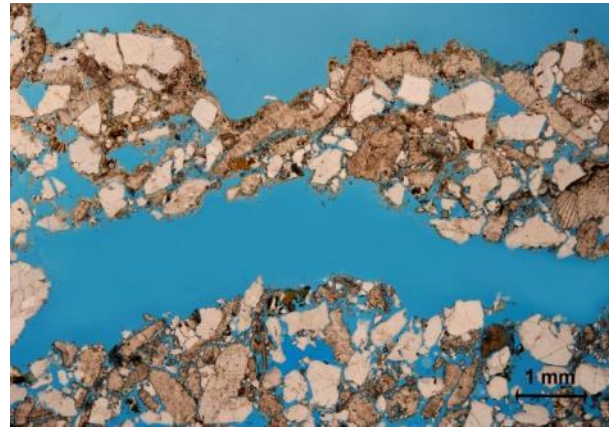
- **Koncentrace** vodorozpustných solí (nejčastěji aniony – sírany, chloridy, dusičnany)
- **Distribuce** vodorozpustných solí – rozdělení koncentrace v hloubkovém profilu
- Přesná **identifikace** solí
- Vlastnosti zasoleného materiálu – hygroskopická nasákavost, sorpční izoterma,...)

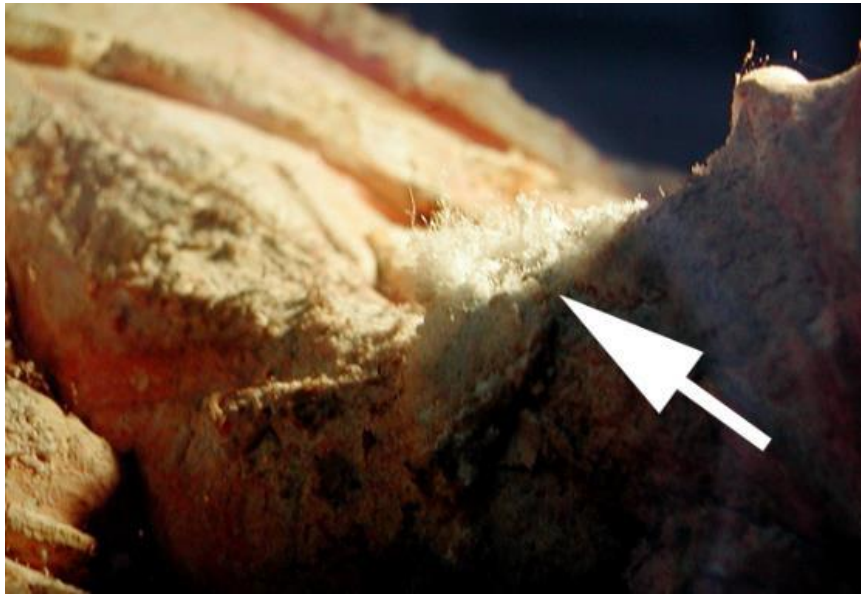
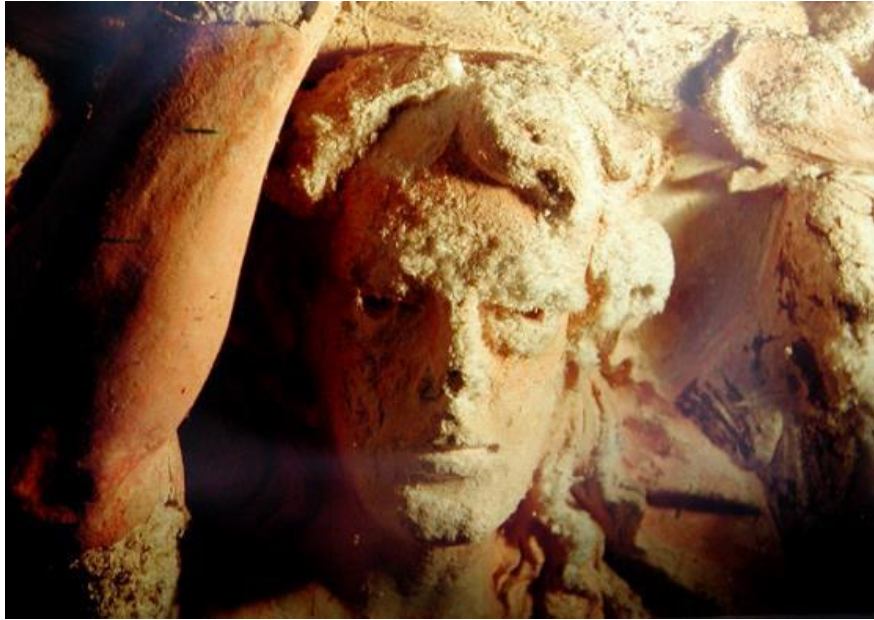


Examples of damages caused by salt attack

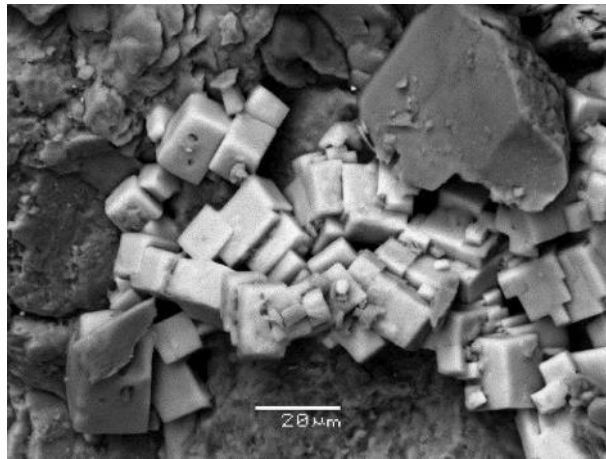
Crust formation due to limestone sulfation

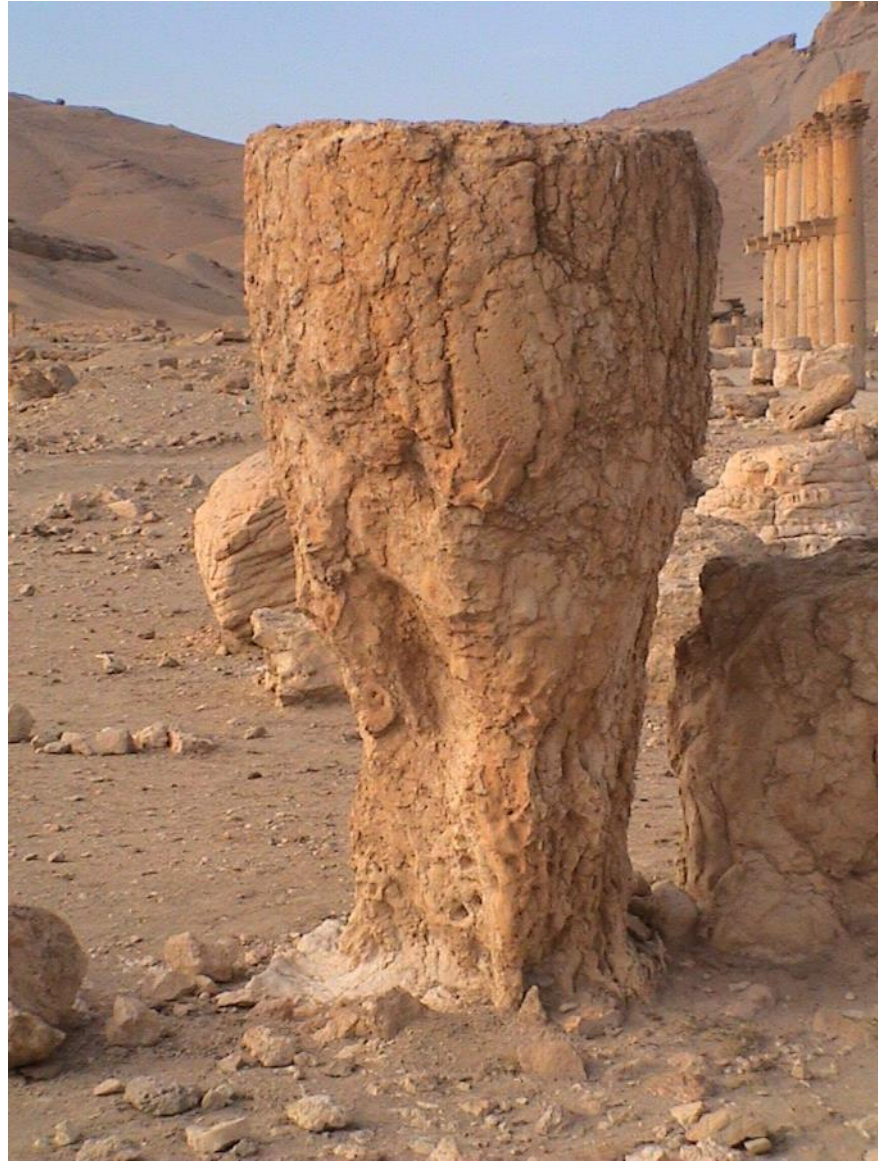














Hodnocení míry zasolení

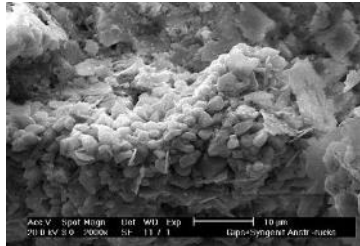
ČSN P 73 0610 (730610) Hydroizolace staveb - Sanace vlhkého zdiva –

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

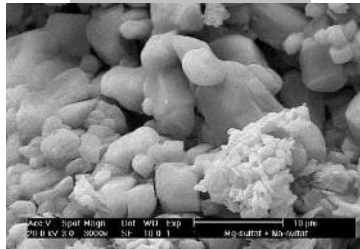
Degree of salinity of the materials	Sulphates (% w.)	Chlorides (% w.)	Nitrates (% w.)
Low	<0,5	< 0,075	<0,1
Medium	0,5 – 2,0	0,075 – 0,2	0,1 – 0,25
High	2,0 – 5,0	0,2 – 0,5	0,25 – 0,5
Very high	> 5,0	>0,5	>0,5

Podle rakouské normy Önorm B 3355-1

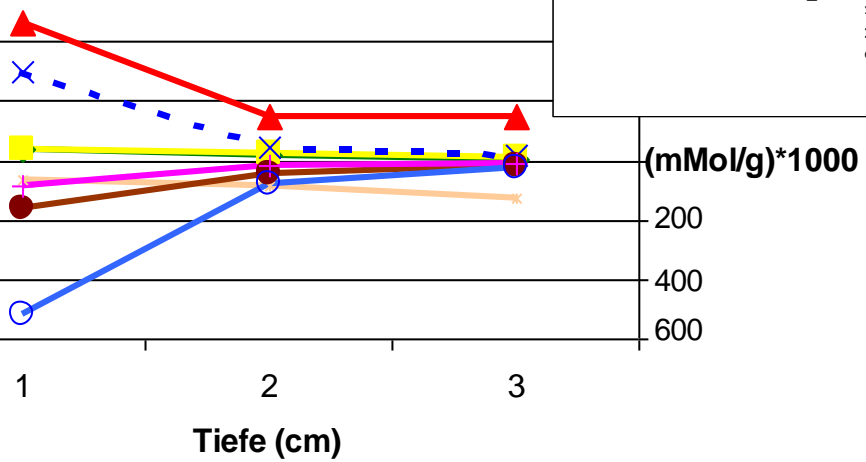
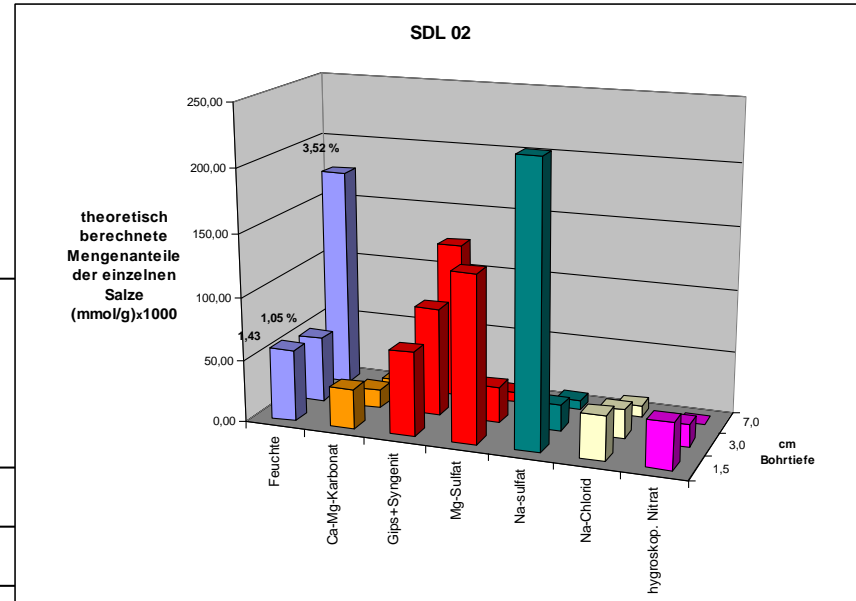
Hodnocení stupně zasolení	Sírany (%hm.)	Chloridy (%hm.)	Dusičnany (%hm.)
Nejsou nutná žádná opatření	< 0,10	< 0,03	< 0,05
Je nutné zvážit dílčí opatření	0,10 – 0,25	0,03 – 0,10	0,05 – 0,15
Opatření jsou nezbytná	> 0,25	> 0,10	> 0,15



CaSO₄+K₂Ca(SO₄)₂



MgSO₄+Na₂SO₄



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

<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>