

Teplota a vlhkost



KURZ PREVENTIVNÍ KONZERVACE
METODICKÉHO CENTRA KONZERVACE
TECHNICKÉHO MUZEA V BRNĚ
ING. ALENA SELUCKÁ

Teplota - definice



- V obecném významu teplota určuje, jak horké nebo chladné materiály jsou - teplota vyjadřuje pohyb molekul v materiálu.
 - Se vzrůstající teplotou se pohyb molekul zvyšuje – materiál se roztahuje; s klesající teplotou se jejich pohyb zmenšuje a materiál se zkracuje.
- Teplota (T) se měří ve stupních Celsia ($^{\circ}\text{C}$), v USA a VB ve stupních Fahrenheita ($^{\circ}\text{F}$); ve fyzice se používá Kelvin (K).



Vliv teploty na muzejní sbírky

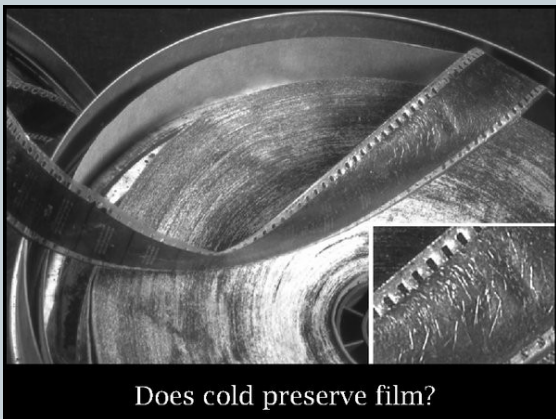


- Rychlost chemických reakcí se zvyšuje s teplotou.
 - Každé navýšení teploty o 10°C zdvojnásobí rychlost většiny chemických reakcí
- Biologická aktivita se zvyšuje se vzrůstající teplotou.
- Teplota vždy souvisí s relativní vlhkostí (RV) – pokud se mění T, mění se i RV.
- V expozicích, depozitářích, pracovnách – pohoda pracovníků, návštěvníků :
 - T = 18 – 21°C (max. 25 °C), tolerovaná odchylka ± 3 °C (± 5 °F)
- **Vysoká teplota** – pro mnoho materiálů je běžná pokojová teplota příliš vysoká (chemické, fyzikální a biologické aspekty poškozování)
- **Nízká teplota** – obecně je nízká teplota pro většinu sbírek prospěšná (polymerní materiály však mohou křehnout)
- **Výkyvy teploty** - souvisí se změnami RV

Vysoká teplota

- **Nejvíce chemicky citlivé materiály** ($T > 30^{\circ}\text{C}$)

- Magnetická média (např. video pásky, diskety) přestávají být funkční, nitrát celulózy žloutne, rozpadá se; tištěný **fotografický materiál bledne** (i v tmavém prostředí), **acetátové filmy** (označ. safety film) podléhá zvýšené autodegradaci; guma a polyuretanové pěny křehnou, slepují se;
- **Kyselý papír** (např. novinový papír, knihy s nízkou kvalitou papíru) žloutne, přírodní materiály (textil, ušň) okyselené polutanty se zeslabují a mohou se rozpadat.
 - ✦ Každý pokles teploty o 5°C zhruba zdvojnásobuje životnost těchto materiálů (acetátové filmy: při 21°C a RV 60 % životnost 30 let; při 13°C a RV 30 % životnost 300 let).
 - ✦ Velmi poškozené **celuloidové filmy** se mohou samovznítit při teplotě nad 38°C !



Autodegradace acetátových filmů – octový syndrom

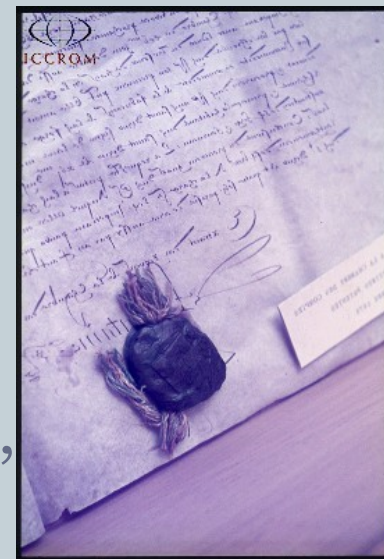
- **A-D strips:** Indikační pásky (barvená změna – stupeň poškození) pro detekci kyselých par v blízkosti hodnocených filmů (ale i dřeva, lepidel, textilu apod.)



Vysoká teplota



- **Fyzikální změny:**
 - Měknutí vosků a pryskyřic (např. parafinový vosk 44 – 65°C, včelí vosk 60 °C, karnaubský vosk 80 °C)
- **Biologické poškození:**
 - Při teplotě nad 4°C začínají být aktivní plísně, nad 10 °C hmyz



Měknutí pečetního vosku pergamenové listiny vlivem vysoké teploty, foto ICCROM, r. 1985

Nízká teplota



- Fyzikální změny ($T < 5^{\circ}\text{C}$):
 - Zejména polymerní materiály (moderní barvy a nátěry) tuhnou a křehnou, např. akrylové barvy křehnou při teplotě pod 5°C , tyto předměty jsou velice citlivé pro manipulaci.
 - Cínové předměty by neměly být dlouhodobě vystavovány teplotě pod 13°C (fázová přeměna $\beta\text{-Sn} \rightarrow \alpha\text{-Sn}$, cínový mor)
 - Při teplotě pod bod mrazu hrozí zamrzání vody např. v dutinách, pórech materiálů.
 - ✦ Nicméně mnoho muzejních sbírkových předmětů např. (např. sbírky z textilu, usně, kožešin) snášejí extrémně nízké teploty – 30 až -40°C (vymrazování biologických škůdců)

*Cínový mor na
křtitelnici,
foto I. Eisler*



Výkyvy teploty



- Náhlé výkyvy teploty mohou způsobit mechanické změny materiálů.
 - Předměty kombinované z více materiálů s různou tepelnou roztažností např. obrazy (dřevo + anorg. pigmenty, kov + smalt)

*Poškození malby vlivem nesprávné
teploty, Muzeum umění, Budapešť,
ICCROM r.1978*



Koeficient délkové roztažnosti pro různé materiály malby



Materiál	Teplotní koeficient dédkové roztažnosti [ppm/°C]
Bílý dub, <i>Quercus alba</i> , příčný řez	0, 3
Bílý dub, <i>Quercus alba</i> , radiální řez	32
Bílý dub, <i>Quercus alba</i> , tangenciální	40
Oil paint, white lead	44
Oil paint, yellow ochre	64
Oil paint, Naples yellow	52
Rabbit skin glue	29
Copper	17
Aluminum T-2024	23

*Museum
Microclimates, The
National Museum of
Denmark, Copenhagen
2007*

Možné příčiny nesprávné teploty



- **Sluneční světlo**

- teplota povrchu materiálů obrácených vůči přímému světlu může dosáhnout 40 – 75 °C (i vyšších hodnot v uzavřených vitrínách); většina vitrín je z materiálů (sklo, ocel), které mají špatnou tepelnou izolaci.

- **Umělé osvětlení**

- zejména žárovky, některé halogenové lampy (vysoký podíl IČ záření)

- **Budovy a jejich systém regulace klimatu**

- Lokální zdroje tepla, ventilátory, chladné stěny a podlahy ... (platí zejména v prostorách s nízkou cirkulací vzduchu)

- **Transport předmětů**

- V letních měsících může být teplota uvnitř dopravních prostředků mnohem vyšší než venkovní, v zimě může teplota klesnout na nízkou hodnotu – nebezpečné zejména pro obrazy.

Opatření pro regulaci nesprávné teploty



- Nevystavovat předměty **přímému slunečnímu záření**.
- Správná teplota by měla být udržována zejména **kvalitní izolací** než vytápěním a ochlazováním.
- Depozitáře by měly být pouze **temperovány** a ne vytápěny.
- Předměty umisťovat **alespoň 10 cm** od obvodových stěn, chladných podlah.
- Přesun předmětů přizpůsobit **aktuálním klimatickým podmínkám**.

Vlhkost

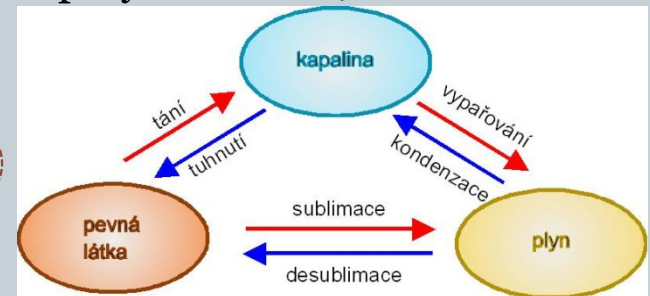
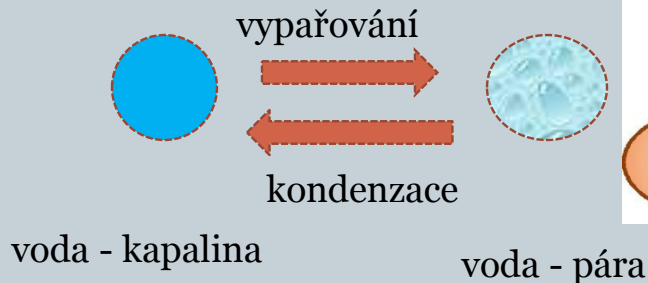


- **Vlhkost vzduchu**

Vlhkost vzduchu je základní meteorologický prvek popisující množství vodní páry ve vzduchu.

- Zdroje vlhkosti ve vzduchu

- ✦ Déšť, vodní zdroje
- ✦ Vlhká půda
- ✦ Vlhké zdi
- ✦ Lidské tělo (člověk v klidu vyprodukuje cca 50 g vodní páry za hodinu)
- ✦ Organické materiály (rostliny)
- ✦ Uklízečí práce
- ✦ Kondenzace vody



Charakteristiky vlhkosti



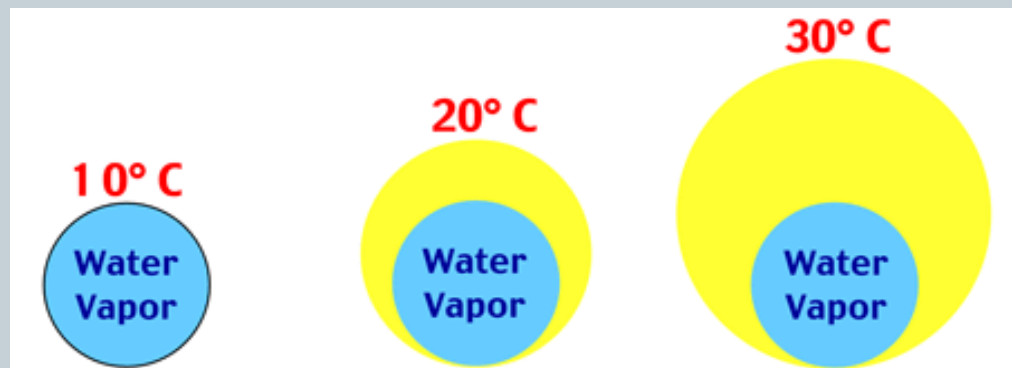
- **Rosný bod** (teplota rosného bodu) je teplota, při které je vzduch maximálně nasycen vodními parami (RV 100 %). Pokud teplota klesne pod tento bod, nastává **kondenzace**.
 - ✦ Při teplotě 30°C obsahuje vzduch max. 31 g/m³ vodní páry; při 20°C max. 18 g/m³; při 10°C max. 10 g/m³; při 5°C max. 7 g/m³
 - ✦ Jestliže se m³ nasyceného vzduchu při teplotě 30 °C ochladí na 20 °C, zkondenzuje 13 g vody (31 - 18 = 13 g)



Charakteristiky vlhkosti



- **Absolutní vlhkost (AV)** - udává hmotnost vodní páry obsažené v jednotce objemu vzduchu (g/m^3) (vzduch není vždy nasycený).
 - ✦ **Příklad:** Vitrína o objemu m^3 obsahuje při 30°C 10 g vodní páry, ochlazená na 20°C obsahuje stále 10 g vodní páry, stejně tak při 10°C . Pokud dojde ale k ochlazení na 5°C , bude vitrína obsahovat 7 g vodní páry a 3g zkondenzované vody (max. množství vodní páry obsažené ve vzduchu při 5°C je $7\text{ g}/\text{m}^3$).



RV 100 %
AV 10 g

RV 55 %
AV 10 g

RV 33 %
AV 10 g

Teplejší vzduch pojme větší množství vodní páry než chladný objem vzduchu

Relativní vlhkost



Relativní vlhkost (RV), poměrná vlhkost - je mírou nasycení vzduchu vodní parou. Udává se v procentech a patří k nejčastěji používaným charakteristikám vlhkosti vzduchu.

$$\mathbf{RV = (absolutní\ vlhkost / obsah\ vodní\ páry\ při\ nasycení) \cdot 100 [\%]}$$

Relativní vlhkost



- Relativní vlhkost je vždy závislá na teplotě. V uzavřeném systému pokud teplota stoupá, RV klesá; opačně se snižující se teplotou roste RV.
 - Při teplotě 30°C má vitrína o objemu m³ obsahující 10 g vodní páry RV 33 % ($RV = (10 / 31) \cdot 100 \%$)
 - Při teplotě 20°C má tato vitrína RV 55 % ($RV = (10 / 18) \cdot 100 \%$)
 - Při 10 °C je RV 100 % ($RV = (10/10) \cdot 100 \%$)
 - Při 5 °C je RV 100 % (+ kondenzace 3 g vody)
- Jak udržet konstantní RV při měnící se teplotě?
 - Přidávat do systému vodu při zvyšování teploty; odebírat vodu ze systému při snižování teploty.

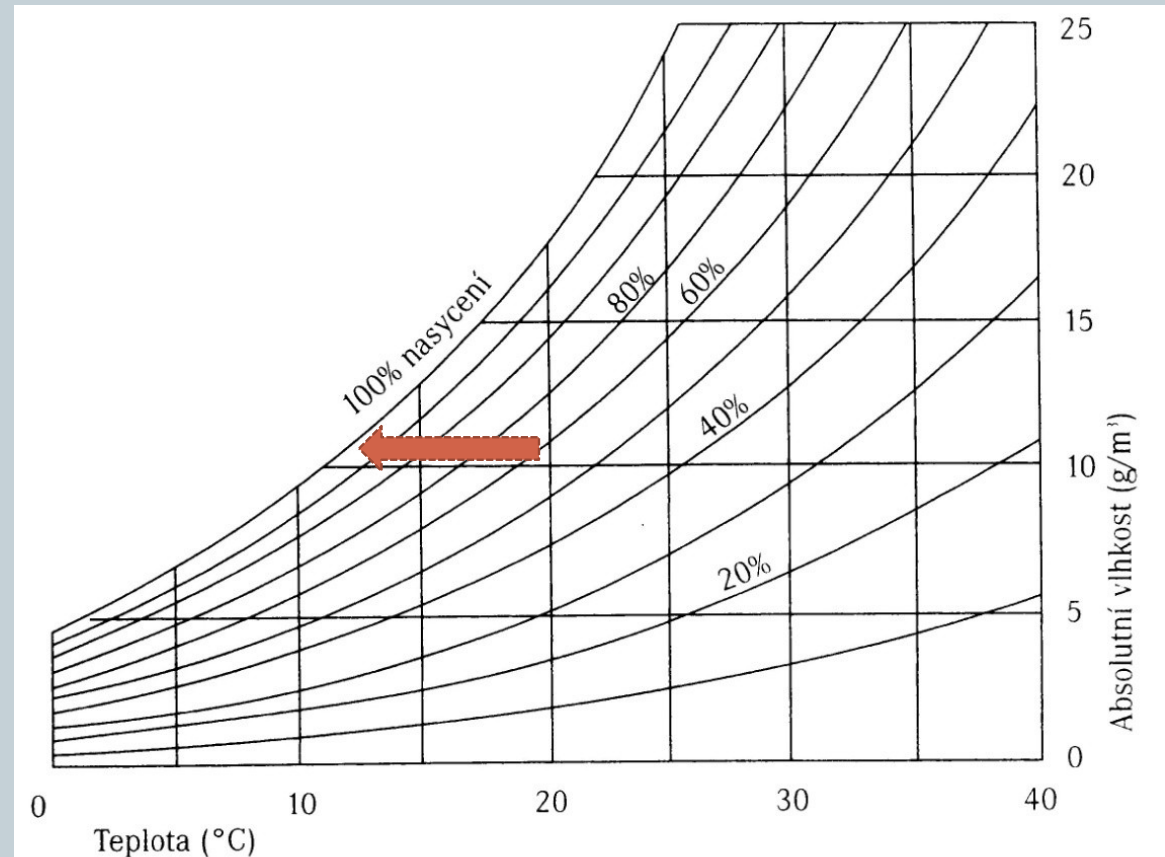
Psychrometrické tabulky hygrometrický graf



- Vzájemnou závislost mezi RV, AV a teplotu udává hygrometrický graf (Mollierův graf).

Příklad:

Větrání v jarních teplých měsících (např. $T\ 20^{\circ}\text{C}$, RV 50 %) v nevytápěných objektech – teplý venkovní vzduch se v blízkosti chladných stěn ochladí (např. na 10°C) a přebytečná vodní pára zkondenzuje – stěny se orosí.

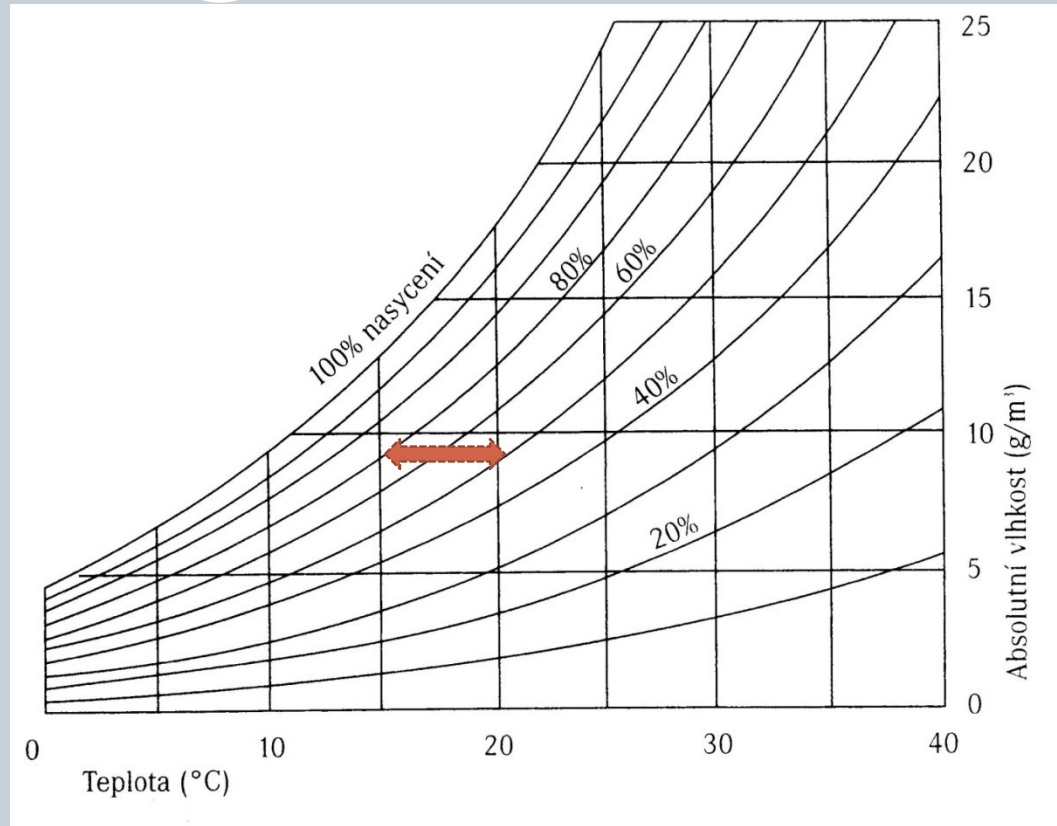


Hygrometrický graf



Příklad:

Změna RV vlivem denního vypínání a zapínání topení – expozice je vytápěna na 20°C (v m³ je 8,5 g vodní páry tzn. RV 50 %), během večera se teplota ochladí na 15°C a RV se zvýší na 65% - tzn. denní výkyv RV je ±15 %!



Vliv vlhkosti na vlastnosti materiálů



- **Organické materiály** jsou **hygroskopické** - mají schopnost přijímat vodu z okolí nebo ji naopak do něj odevzdávat. K této výměně dochází tak dlouho, dokud se neustaví difuzní rovnováha mezi přirozeným obsahem vody v materiálu a okolním prostředím (rovnovážný obsah vlhkosti).
 - Je-li vlhkost prostředí stálá a neměnná, organický materiál dosáhne určitý stupeň rovnováhy a je relativně stálý.
 - Je-li vlhkost prostředí příliš vysoká či nízká nebo dochází k jejímu kolísání, organický materiál reaguje změnou fyzikálních parametrů až do stadia poškození (deformace, praskání, zvlnění, změna mechanických vlastností apod.)



*letokruhy
dřeva*

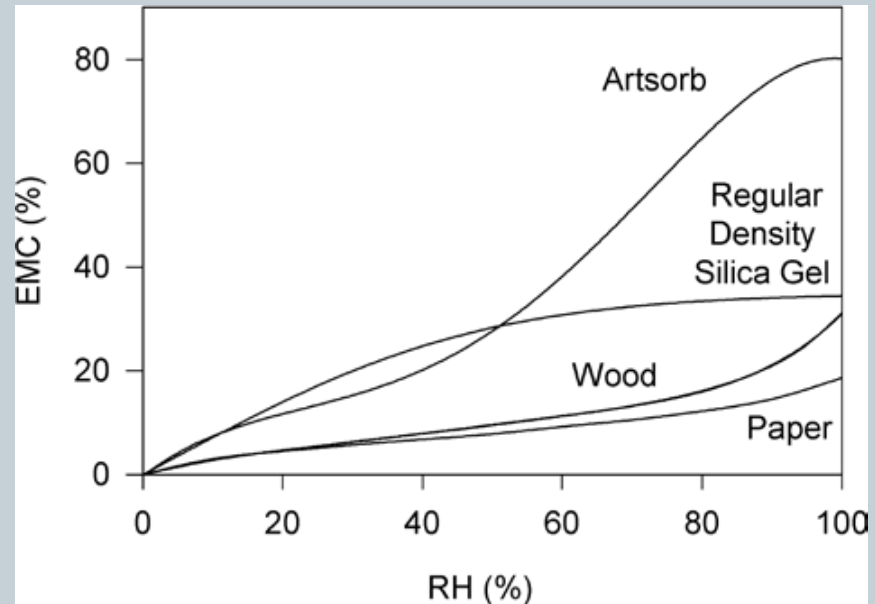
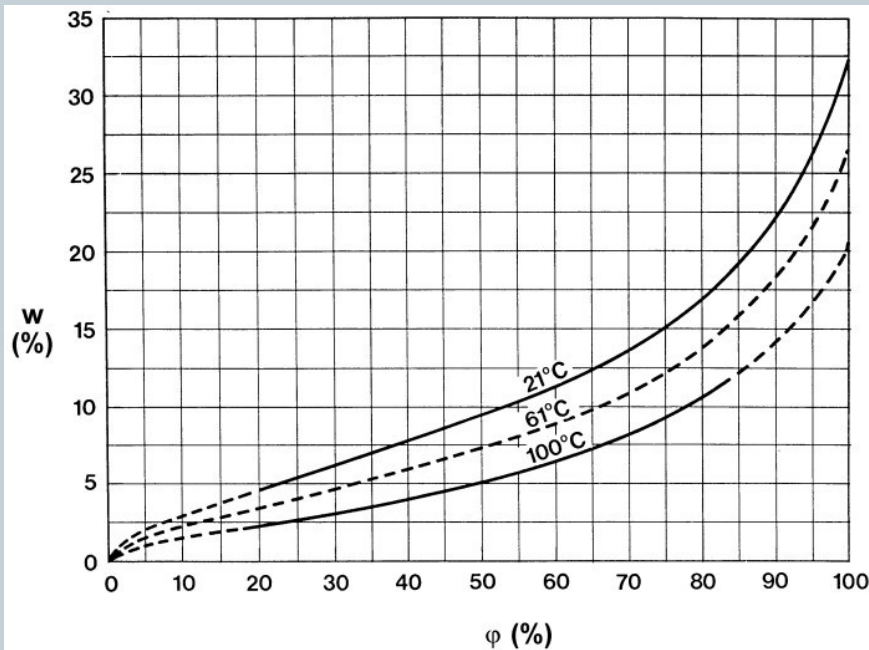
Vliv vlhkosti na vlastnosti materiálů



- **Obsah vlhkosti** v materiálu je dán poměrem hmotnosti obsažené vody k celkové hmotnosti vlhkého vzorku (popř. hmotnosti sušiny)

$$w = m_v/m \cdot 100 [\%]$$

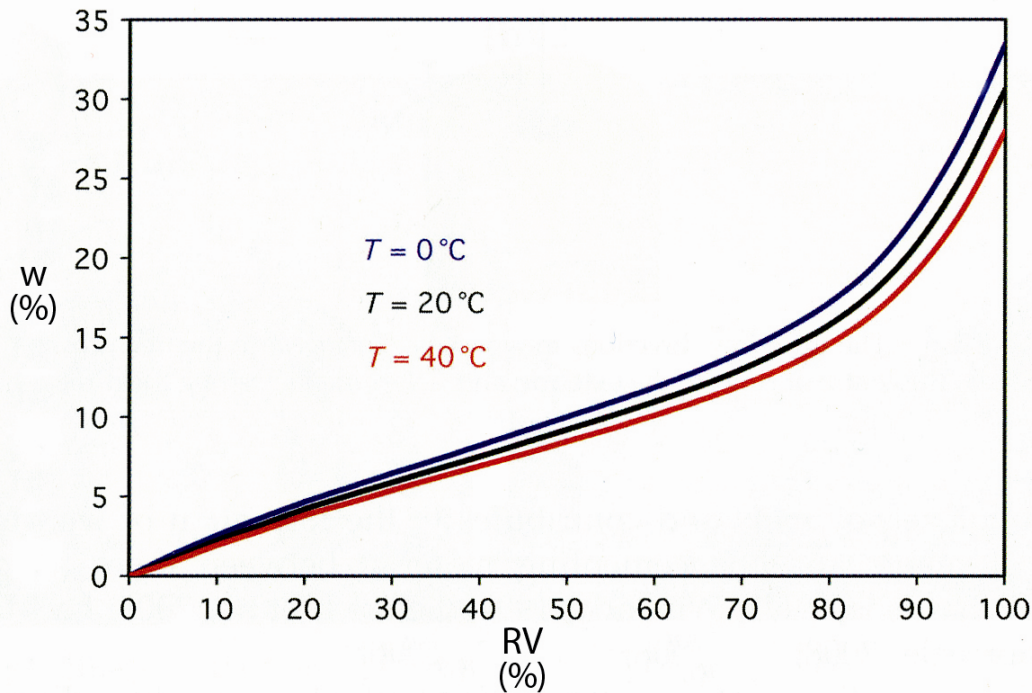
- **Rovnovážná vlhkost materiálu** – vlhkost materiálu odpovídající obsahu vlhkosti v okolním vzduchu – tato závislost je vyjádřena **sorpční izotermou**.



Sorpční izoterma dřeva
při různých teplotách

Jaké jsou mezní hodnoty pro přijatelné fluktuace?

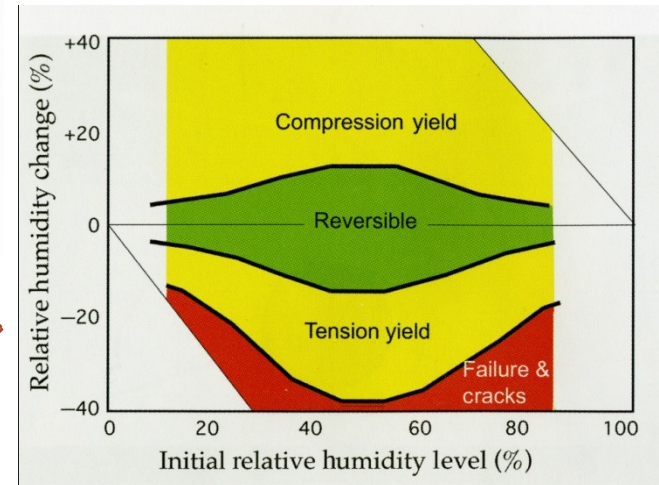
- Organické hygroscopické materiály (dřevo, textil, papír, useň, ...) – pohlcují nebo uvolňují vlhkost s



Sorpční izotermy dřeva:

- přijatelná **pozvolná** fluktuace RV 40 – 60 % při T cca 20 °C
- zvýšení rovnovážné vlhkosti dřeva při RV > 70 % a T <

- Krátkodobé fluktuace > ± 15 % od RV 50 % vyvolávají trvalá poškození! na základě **laboratorních testů** (Camuffo, 2014)



Vliv vlhkosti na vlastnosti materiálů



- **Anorganické materiály** – vlhkost ovlivňuje celou řadu fyzikálně-chemických reakcí: významnější reakce s oxidy síry a jinými polutanty, koroze kovů, hydratace skla, pohyb solí uvnitř porézní keramice a kameni, rozpad minerálů apod.
 - Některé anorganické materiály (zejména porézní) jsou také značně hygroskopické např. minerály - chlorid sodný, sklotvorné látky oxid draselný a sodný, minerál akaganeit apod.

krystal halitu – NaCl
(sůl kamenná)



Vliv vlhkosti



- U většiny materiálů dochází k jejich poškození vlivem nesprávné relativní vlhkosti (RV) pokud:
 - ✦ RV je vyšší než 75 %
 - ✦ RV je konstantně nízká cca pod 30 %
 - ✦ náhlé výkyvy RV (± 5 % během několika hodin)
- Obecným kompromisem pro uložení většiny muzejních sbírek je RV 50 ± 5 % a teplota 18 – 21°C (tyto hodnoty však nejsou vhodné pro všechny materiály viz tab. 1 !).
 - ✦ Tolerovaná odchylka RV 45 – 55 % během měsíce
 - ✦ Výkyvy RV během několika hodin by neměly přesáhnout 5 %

Trvale vysoká RV nad 75 %



- růst plísní (rozklad a barevné změny usně, textilu, papíru, dřeva, malby, skla); zvýšení aktivity hmyzu
 - nejcitlivější jsou materiály obsahující proteiny, škrob, cukr (useň, kůže, pergamen); škrobený textil, prachem zanesený papír
- koroze kovů
 - zejména slitiny železa a mědi obsahující chloridové soli - poškození patiny, lesklé povrchy s otisky prstů, kontakt různých kovů, slitiny Pb, Zn, Bi v přítomnosti organických kyselin
- rozpad nestabilního skla
 - koroze skla – vznik irizujícího zakaleného povlaku, bílé šupinkovité krusty
 - nejvíce bývají poškozená skla z období 17. stol. a středověká skla s vysokým podílem alkalických oxidů Na_2O a K_2O – vymývání alkalických složek; koroze skla, devitrifikace skla (odskelnění – krystalizace skla)

Trvale vysoká RV nad 75 %

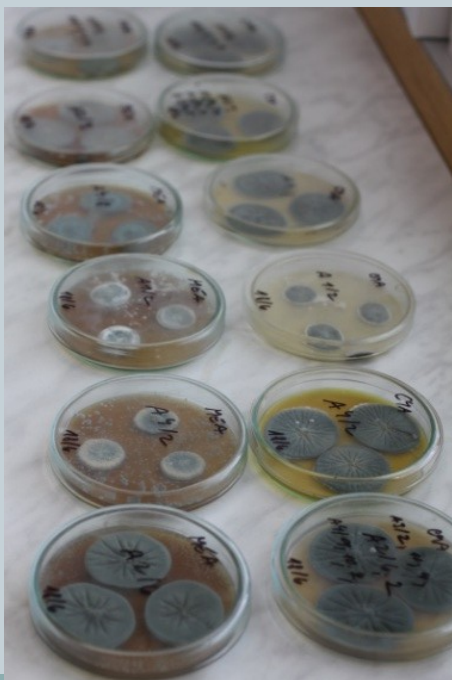


- **mechanické změny**
 - bobtnání želatinových vrstev – nebezpečí slepení filmů a fotografických záznamů
 - poškození dýhovaných vrstev na nábytku, bobtnání dřeva
- **chemické poškození (např. kyselá hydrolýza, nestabilita barviv, zbytků chemikálií)**
 - zkřehnutí, hnědnutí kyselého papíru (zejména novější méně kvalitní papír)
 - zkroucení acetátových filmů, odpadávání obrazové vrstvy
 - poškození magnetických záznamů (video, audio, data, diskety)
- **kondenzace vody na povrchu předmětů při poklesu teploty**

Biologické poškození



Chléb - <http://plisen.info/>

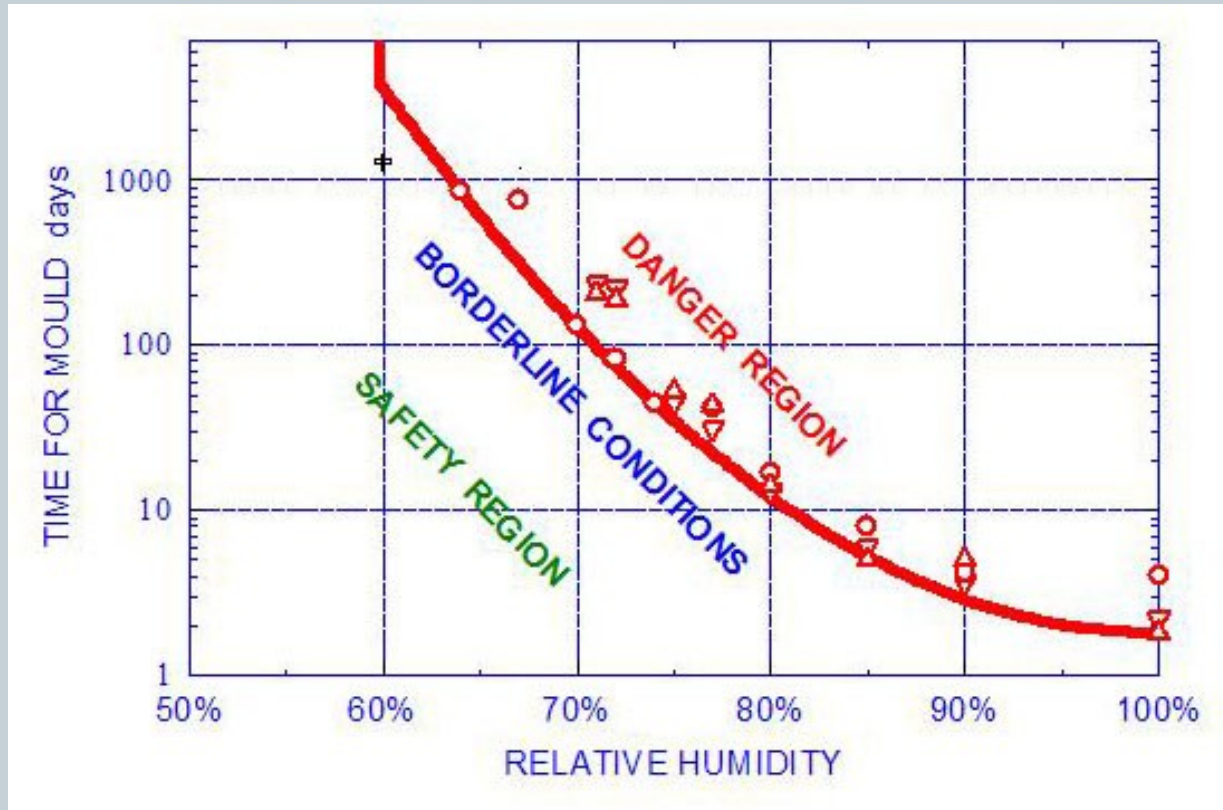


*plísň z muzejního
depozitáře*



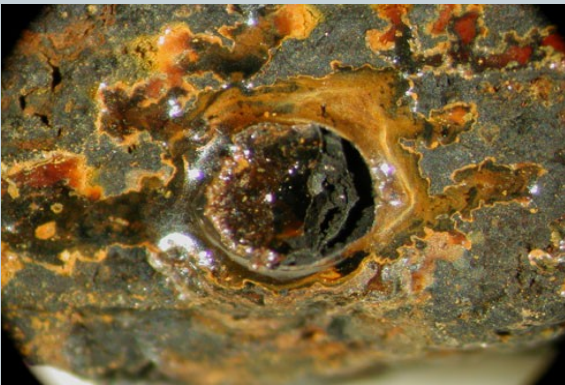
*Staročeský měch ze sbírek NTM,
poškozený plísněmi po povodních v
r. 2002*

Biologické poškození



Časová závislost viditelného růstu plísní na
RV, dle CCI, www.cci-icc.gc.ca

Koroze kovů



chloridová koroze železa



*poškození nemocí bronzu,
databáze ICCROM, Varanasi
Indie, 2004,*

*rezivění železných částí šicího
stroje při vysoké RV*

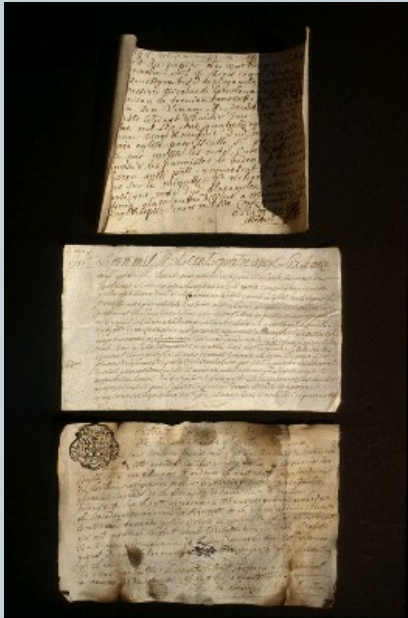
Poškození nestabilního skla



*Koroze
historického skla*



Mechanické změny



Poškození papíru vlivem nízké a vysoké vlhkosti (ve srovnání se střední hodnotou RV), ICCROM, 1980



Krabatění kresby na papíře, ICCROM

deformace dřeva, poškozená dýhovaná vrstva, šicí stroj po povodních,, 2002



Mechanické změny

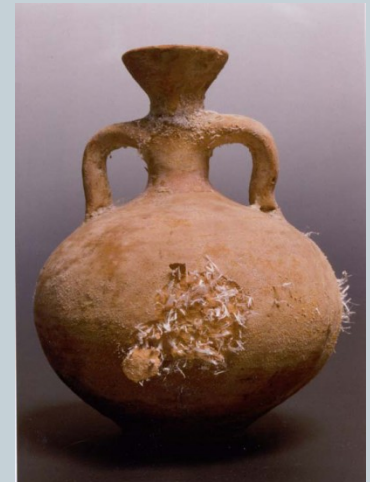


Trvalé nízká RV pod 30 %



- vysušení a zkřehnutí organických materiálů
 - sesychání a praskání dřeva, usně, pergamenu, slonoviny, proutěných košíků apod.
 - sesychání papíru a lepidel
- praskání a odpadávání laků, malby, fotografické emulze
- výkvěty solí na povrchu porézních materiálů

*Výkvěty solí na keramice,
zdroj: IAP Copenhagen,
2001*



Výkyvy RV



- ± 5 % RV během několika hodin (??? reálné pouze v regulovaném prostředí)
- Objemové změny a strukturní poškození hygroskopických materiálů
 - Bobtnání, praskání dřeva, odlupování polychromie, intarzií, zlacení
 - Smršťování vláken (poškození tapisérií)
 - Poškození vrstvených materiálů - knižní vazby, fotografií, negativů, magnetických záznamů; odlupování malby

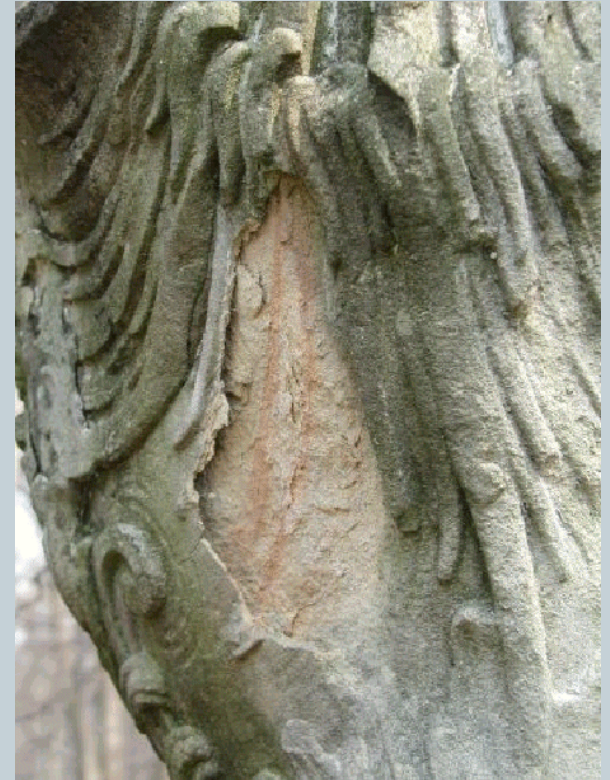


*poškození usně vlivem
kolísání RV, foto: I. Berger*

Výkyvy RV



- Mobilizace solí uvnitř porézních materiálů
 - krystalizace (výkvěty) solí na povrchu kamene, keramiky
 - poškození nástěnných maleb



*krystalizací solí odtržená
povrchová křusta na kamenné
plastice, foto: I. Berger*

Poškození vlivem výkyvů RV/T



Poškození malby (krakely) vlivem kolísání RV a T, foto I. Fogaš



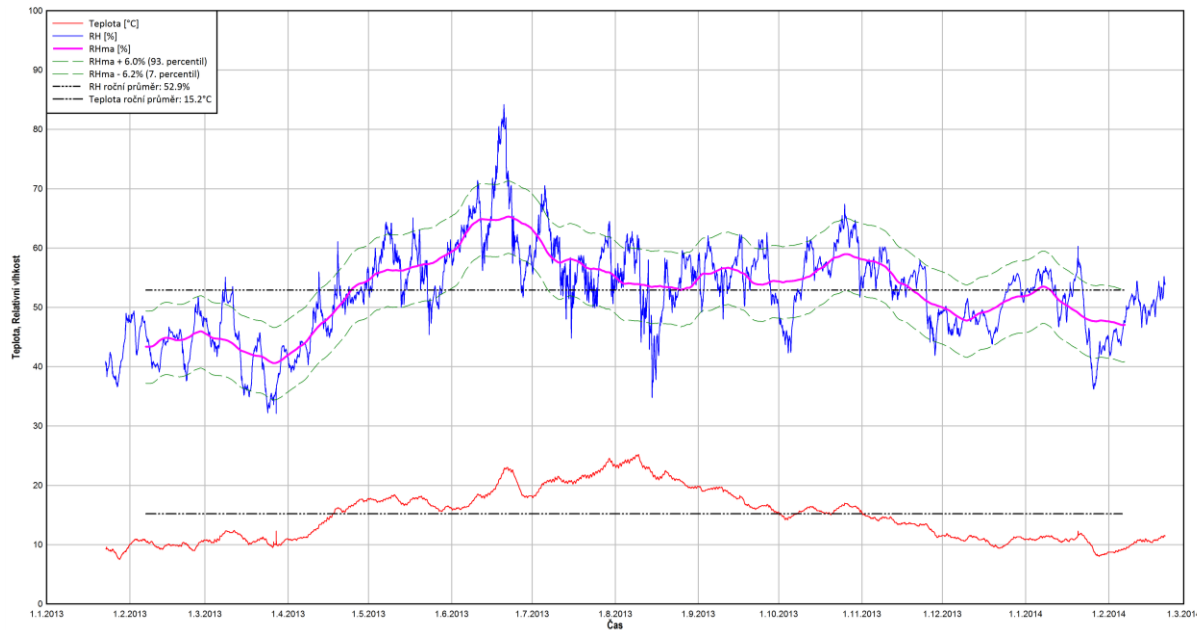
Krakely malby na dřevě vzniklé nesprávnou technologií malby, foto I. Fogaš

Doporučené hodnoty RV/T

materiál	teplota [°C]	relativní vlhkost [%]
papír	15 - 18	45 - 55
dřevo, kůže, pergamen, textil, slonovina, kosti, zuby	15 - 18	45 - 60
malba na plátně	16 - 18	50 - 55
biologické přírodovědné sbírky	15 - 18	40 - 60
paleontologické sbírky	18 - 20	45 - 55
mineralogické sbírky z pyritu	18 - 20	pod 30
keramika, sklo, kámen	18 - 20	40 - 55
kovy samotné	18 - 20	30 - 40
kovy vykazující aktivní korozi		pod 20
kovy v kombinaci s organickým materiálem	18 - 20	40 - 55
papírové fotografie černobílé	15 - 20	30 - 50
papírové fotografie barevné	do 2	30 - 50
černobílé filmy	do 20	30
barevné filmy	do 2	30
gramofonové desky	10 - 21	40 - 55
fonografické válečky	okolo 15	40 - 60
zvukové a audiovizuální magnetické záznamy	18	30
datové magnetické záznamy (diskety, magnetické pásky)	18 - 22	35 - 45
optické kompaktní disky	15 - 18	45 - 55

- **ČSN EN 15757: Ochrana kulturního dědictví – Požadavky na teplotu a relativní vlhkost prostředí s cílem zamezit mechanickému poškození organických hygroscopických materiálů, k němuž dochází důsledkem klimatu:**
 - **Nový koncept tzv. historického klimatu:** *„klimatické podmínky prostředí, ve kterém byly objekty kulturního dědictví vždy drženy, nebo v něm byly ponechány delší dobu (minimálně po dobu jednoho roku) a jsou v něm aklimatizovány.“*
 - **Charakteristiky historického klimatu:**
 - **stanovení průměrné roční RV a T**
 - **sezónního cyklu**
 - **krátkodobých výkyvů RV a T**

- **Způsob výpočtů:**
 - **sezónní cyklus – střední měsíční klouzavý průměr (MA)**
 - **krátkodobý výkyv – 7. a 93. percentil od MA**



Depozitář TMB, temperovaný, pasivní T 10 – 20% °C, RV
40 – 65 %

Klasifikace klimatu depozitáře dle ASHRAE

T °C	RV %	Změny RV, T		Rizika /Výhody
Roční průměr	Roční průměr nebo historický roční průměr	Sezónní nastavení	Krátkodobá fluktuaace	
15 - 20 °C	50 %	± 5 °C	± 5 %; ± 2 °C	AA – bez rizik mechanického poškození většiny hygroskopických materiálů, mimo nestabilní kovy a minerály
		+ 5 °C; -10 °C RH beze změny	± 10 %; ± 2 °C	A – malá rizika mechanického poškození pro vysoce citlivé materiály, bez rizik pro většinu materiálů
		+ 10 %; - 10 % + 5 °C, - 10 °C	± 5 %; ± 2 °C	
		+10 % -10 % +10°C (pod 30°C a dolní hranice tak, aby byla udržena požadovaná hodnota RV)	± 10 %; ± 5 °C	B – střední rizika mechanického poškození pro vysoce citlivé materiály, malá rizika pro většinu materiálů
		25 - 75 % T zřídka přes 30 °C, většinou pod 25 °C		C – vysoké riziko mechanického poškození pro vysoce citlivé materiály střední rizika pro většinu materiálů
	0 – 30 %	pod 75 %		D – vysoké riziko náhlého/kumulativního mechanického poškození pro většinu materiálů
	0 – 30 %			Suché prostředí - specifické podmínky pro ukládání kovů

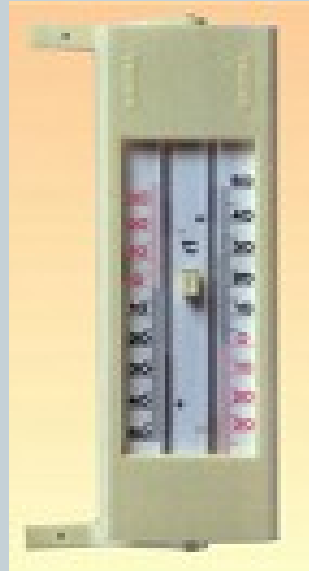
- **Mikroklima depozitáře TMB – kategorie B**
- **ASHRAE - The American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Handbook 2007, Chapter 21.**

Měření T



- **teploměry**

- *bimetalové*
- *kapalinové (rtuťové, lihové)*
- *křemíkové (elektronické)* - reagují na změnu elektrického odporu teplotního čidla, způsobenou změnou teploty okolí.



Měření RV



- Psychrometr
 - staniční Augustův
 - aspirační Assmanův
 - přesnost $\pm 1 \%$
 - ověření přesnosti měřících přístrojů RV



*psychrometr
Assmanův*



*psychrometr staniční
Augustův*

Měření RV



• vlhkoměry (hygrometry):

○ indikátory vlhkosti

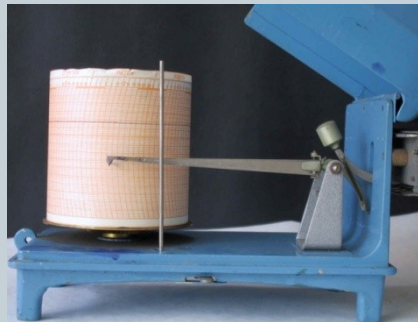
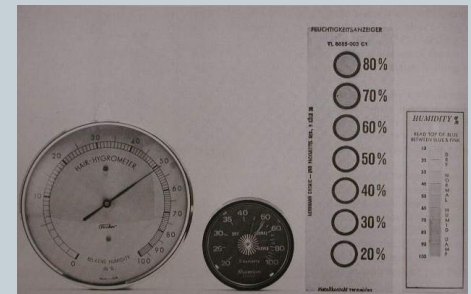
- ✦ Indikační papírky – impregnováno solemi kobaltu, rozsah 20 – 80 %, menší přesnost ve vlhkém prostředí, jednoduchá a levná aplikace.

○ vlasový vlhkoměr

- ✦ dilatační vlhkoměr, přesnost 5 %, nepřené při nízké RV (< 40 %) a vysoké RV > 80 %

○ termohygrograf

- ✦ kontinuální záznam, přesnost 3 – 5 %, nejlepší přesnost v rozmezí 30 – 60 %



termohygrograf



*vlasový
hygrometr*

Měření RV/T



- **digitální termohygrometry**

- pro okamžité změření teploty a relativní vlhkosti, hodnoty nejsou registrovány (možnost zapamatování maxima a minima). Slouží převážně pro upřesnění hodnot a zjištění charakteristického místa pro umístění dlouhodobého měření.
- běžný rozsah měření $T = -20$ až 50 C a $RV = 20-80\%$.
- přesnost přístrojů je cca 1 C a 5% .

- **měřicí sondy napojené na datalogger**

- elektronický sběrač dat - mohou, ale nemusí ukazovat aktuální hodnotu a dopočítávat rosný bod, automaticky ukládají ve zvoleném časovém intervalu data, která jsou dodatečně zpracována na PC formou tabulek nebo grafů.
- tato měřidla lze libovolně přenášet, instalovat do vitrín



Měření RV/T



- **měřicí sondy spojené s řídicím počítačem radiově**
 - na PC lze pomocí instalovaného přijímače sledovat jak aktuální hodnoty, tak zpětně hodnoty naměřené dříve; Čidla (vysílače) lze libovolně přenášet v dosahu cca 300 m (obvykle stačí na rozsah budovy) bez jakýchkoli kabelů a instalací
 - elektronická čidla stabilně instalovaná v místnostech spojená s řídicím počítačem – obvykle jako součást centrálního systému klimatizace



*telemetrický systém
Hanwell*



Umístění měřících přístrojů



- **Nevhodné umístění:** blízkost oken, dveří, topných těles, vzduchotechniky – působení proměnlivého proudění (limitem může být např. dosah rádiového signálu)
- **Vhodná výška** – cca 1,5 – 1,8 m nad podlahu
- Nutné **temperování přístroje** na dané měřené prostředí (min. 1 hod.)
- Možné měření **uvnitř regálů**, skříní či sledovaných míst (chladné stěny apod.)



Regulace RV/T

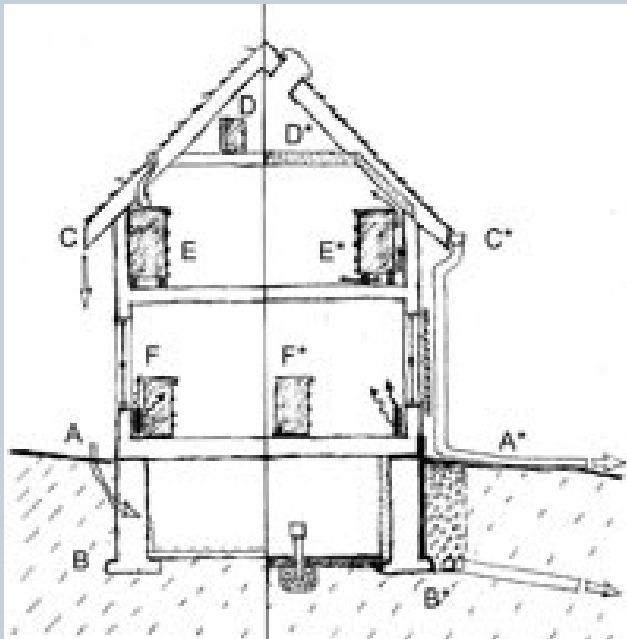


- Obecně je vhodné využívat **pasivních regulačních prvků**:
 - Omezit tepelné ztráty budovy (popř. tepelné dotace v létě) – kvalitní izolace budovy ! (**součinitel prostupu tepla zdiva – U hodnota cca 0,3 !!!**)
 - Sedlová střecha s izolovaným podkrovím
 - Krytá okna (žaluzie, energetické fólie)
 - Omezení množství lidí v místnosti!
 - Umístění citlivých předmětů mimo dosah přímého světelného záření, oken, obvodových zdí, ventilátorů vzduchu, vstupních chodeb a prostor
 - Snížení teploty vytápění během zimních měsíců (lepší regulace RV) – nastavení sezónních cyklů
 - Ukládání předmětů v boxech, obalech, skříních ... (lepší vyrovnávání výkyvů RV/T)
 - Důsledná kontrola RV/T pro citlivé materiály (např. textilie, některé kovy, minerály apod.)

Možnosti regulace RV/T



- údržba budovy – eliminace zdrojů vysoké popř. nízké vlhkosti
 - Zatékání střechy, oken, těsnění
 - Poškozené žlaby, svody vody
 - Trhliny ve zdech, podlaze, vlhké zdivo, špatná kanalizace
 - Otevřené zdroje vody (toalety, dřezy)



A – povrchová drenáž

B – půdní drenáž

C – dešťová voda

D – vysoká teplota v podkroví

E – obvodové zdi

F – vytápění

Zdroj: CCI: S. Michalski, Incorrect Relative Humidity

Možnosti regulace RV/T



- řízené vytápění (chlazení)
- řízené větrání
- odvlhčovací přístroje
- zvlhčovací přístroje
- stabilní vzduchotechnická zařízení (VZT)
- klimatizační jednotky
- užití látek modifikujících RV (silikagel, molekulární síta)

Řízené větrání



- **Výhody** - nic nestojí, rychlá výměna vzduchu
- **Nevýhody** - omezené možnosti regulace, nebezpečí velkých výkyvů RV a T - kondenzace vody na chladnějším povrchu, proniknutí vnějších znečišťujících látek do interiéru
 - Nezbytná kontrola teploty a relativní vlhkosti v interiéru a exteriéru!!!
 - ✦ Příklad: Větrání v chladných zimních měsících při T 0°C a RV 50% je AV = 2 g/m³; při zahřátí vzduchu uvnitř místnosti na 20°C dojde k poklesu RV na 11 %.

Vytápění



- **výhody** – relativní nenáročnost na vybavení
- **nevýhody** – vhodná spíše ke snižování úrovně RV, ekonomická zátěž
 - Může dojít k nebezpečnému snížení RV ve vytápěném prostoru (např. v zimních měsících v kombinaci s větráním venkovním vzduchem)
- **nastavit sezonní cyklus** - letní (např. deponitář 18 – 20 °C) a zimní režim (16 – 18 °C)
- standardní ovládání **termostaty** (v expozicích možnost blokovat nastavenou polohu)

Vytápění



- ovládání topení na základě regulátoru vlhkosti (**hygrostatem**) – např. topení se spouští na základě změny okolní vlhkosti – „**conservation heating**“
 - **ČSN 961507, EN 15759-1 : Ochrana kulturního dědictví - Vnitřní prostředí - Pokyny pro vytápění kostelů a kaplí; účinnost od 1. 5. 2012**
- **stěnové topení** – topné trubky pod omítkou



Možnosti zvlhčování



- **odpařování** (adiabatické zvlhčování) – suchý vzduch prochází smáčenou plochou (navlhčenou rohoží, rotačním bubnem nebo lamelami), pohlcuje vlhkost a vrací se zpět do prostoru – rozptyl jemných kapek vody:
 - ekonomické zvlhčování s nízkou energetickou náročností
 - nejběžnější typ zvlhčování v expozicích, depozitářů
 - nevýhodou je možnost růstu mikroorganismů v nádrži, usazování solí, polutantů

Možnosti zvlhčování



- **parní** – elektrický vyvíječ páry přivádí pomocí elektrod vodu do varu a pára je při atmosférickém tlaku odváděna do místa zvlhčování do rozvodného kanálu
 - při zvlhčování nedochází k šíření mikroorganismů ani pachů;
 - vhodné pro klimatizace.
 - vyšší energetická náročnost
 - POZOR na přímé ofukování předmětů!

Odvlhčovací přístroje



- **kondenzační:** vymrazování vlhkosti pomocí výparníku, vzniklý kondenzát se odvádí do nádržky (možný přímý odtok do kanalizace)
 - Nevýhoda – omezení výkonu při nižší teplotě pod cca 6 °C
- **parní:** používá pro odvlhčení vzduchu fyzikální vazbu molekul vody na adsorbent
 - vydatné sušení, není nutný odvod kondenzátu
 - vysoká výkonnost při nízkých teplotách a nízké úrovni relativní vlhkosti
 - cenově náročnější

Stabilní vzduchotechnická zařízení



- **Stabilní zařízení pro úpravu vzduchu VZT** (ventilátory, filtry, ohřívání a chlazení vzduchu, (ventilátory, filtry, ohřívání a chlazení vzduchu, zvlhčování/odvlhčování) – záleží na zvolené kombinaci:
 - Pro deponitáře postačuje pouze cirkulace vzduchu (bez přísunu vnějšího upraveného vzduchu)
 - Optimální kombinace – cirkulace vzduchu + zvlhčování/odvlhčování
 - **Centrální klimatizace** – stabilní klima:
 - Vhodné pro dobře tepelně izolované objekty , bez oken
 - Nutné garantovat dlouhodobý a spolehlivý provoz
 - Nebezpečí výpadku – náhradní generátor popř. klimatizační jednotka

Ukládání předmětů do obalů



- Obaly (např. PE fólie) zmírňují účinky fluktuací RV, chrání předměty před prachem, polutanty, hmyzem.
 - Obaly však mohou být také příčinou zvýšené RV uvnitř obalu – např. umístění zabaleného předmětu do prostředí s výrazně nižší teplotou než je uvnitř obalu (u chladných stěn, během transportu, hubení hmyzu při nízké T apod.) – hrozí kondenzace vlhkosti !
 - Závisí to na objemu a hygroskopičnosti předmětu i těsnosti obalu.



Aklimatizace předmětů

- **Klimabedny** - zhotoveny z pevného materiálu uvnitř s izolačním materiálem (ochrana proti otřesům a výkyvům RV/T):
 - Před zabalením (hedvábný papír, bublinková fólie) bednu nechat min. 24 hod. aklimatizovat na místě exponátu
 - Po příjezdu na místo – opět 24 hod. aklimatizace, po té otevřít
 - ✦ **ČSN 961507, EN 15946: Ochrana kulturního dědictví - Zásady balení pro přepravu, účinnost: 1. 3. 2012**



Klimabox



Sorpční materiály



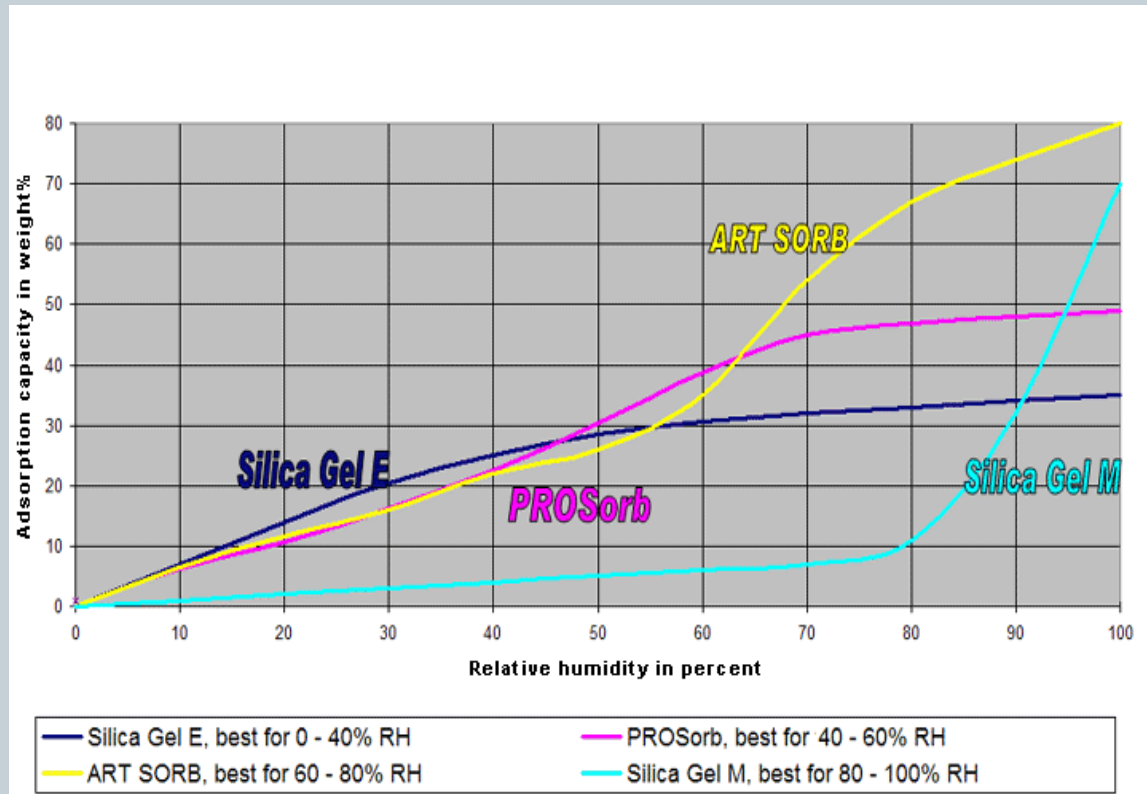
- Materiál adsorbující na svém povrchu vlhkost :
 - oxid křemíku (silikagel, ProSORB ap,) - chemicky inertní, netoxická, objemově stabilní a nekorozivní látka
 - zeolity – molekulární síta (hlinitokřemečitany kovů)
- Jejich adsorpční kapacita je dána velikostí pórů a RV prostředí
- Mají schopnost vlhkost pohlcovat i uvolňovat v závislosti na okolní RV



Typy silikagelu



- Silikagel E – čirý (0 – 35 %)
- Silikagel M (macroporous – 80 – 100 % RV)
- ART Sorb (60 – 80 %)
- PROSorb (40 - 60 % RV, pro kombinovaný materiál)



Výrobce: Long Life for Art -Christoph Waller, Hauptstrasse 47,D-79356 Eichstetten (dodává volné granule i kazety)

Sorpční materiály



- Adjustace silikagelu do kazet s vyznačenou hmotností a stupněm kondicionace (cca 1 kazeta/m³)



Používání silikagelu



- Účinek silikagelu jako vysoušedla nebo pufru je podmíněn dostatečným utěsněním kontrolovaného prostoru
 - Vitríny splňující nejvyšší nároky na těsnost spojů vykazují max. 10% výměnu vzduchu za den. (kontrola měřením úbytku CO₂, který je pumpou dodán do vitríny)
- Pro stabilizaci vnitřního mikroklimatu je potřeba několik dní, pokud prostor obsahuje ve větším množství organické materiály např. dřevo (obdobně jako silikagel reagují tyto materiály jako pufr pro tlumení výkyvů RV)
- Silikagel nesmí být v přímém kontaktu s muzejními předměty (zejména kovy – adsorbovaná voda se nachází na povrchu granulátu)
 - Nepoužívat silikagely obsahující korozivní složky (barevné indikátory) - chloridy, bromidy, fluoridy, kyseliny!
- Při přesypávání volného granulátu je nutné pracovat s ochrannou maskou a rukavicemi – uvolňovaný prach může poškodit plíce, vysušuje povrch kůže!

Dávkování silikagelu



- Odhadnutí potřebného množství silikagelu je ovlivněno těmito faktory:
 - Těsností vitríny (boxu)
 - Vlhkostním spádem mezi vitrínou a okolím (rozdíl mezi RV uvnitř a vně)
 - Objemem vitríny
 - Charakterem předmětů uvnitř vitríny (organické materiály)⁴
- Zpravidla se počítá s 3 – 7 kg/m³ vitríny (dle druhu silikagelu – až 20 kg/m³)
 - Dávkování je vhodné zkontrolovat s výrobcem
 - Průběžně je nutné monitorovat RV a popřípadě přidat/ubrat potřebné množství silikagelu.

Kondicionování silikagelu



- **Standardní silikagel je dodáván ve vysušené formě**
 - Re-kondicionování se provádí vysušením v sušárně při teplotě cca 130°C po dobu cca 4 hod.
 - Zkontroluje se hmotnost silikagelu, která by měla odpovídat standardní hmotnosti při dané RV z kalibračních tabulek
- **Kondicionovaný silikagel na požadovaný rozsah RV**
 - Zkontroluje se hmotnost silikagelu, která by měla odpovídat standardní hmotnosti při dané RV z kalibračních tabulek
 - Silikagel se umístí nejlépe do klimatizované komory s požadovanou hodnotou RV a nechá se po dobu několika hodin stabilizovat
 - Silikagel je možné také utěsnit do PE sáčku s vodou nasávkavým materiálem (houbou) a hygrometrem – během několika hodin se silikagel stabilizuje



Shrnutí

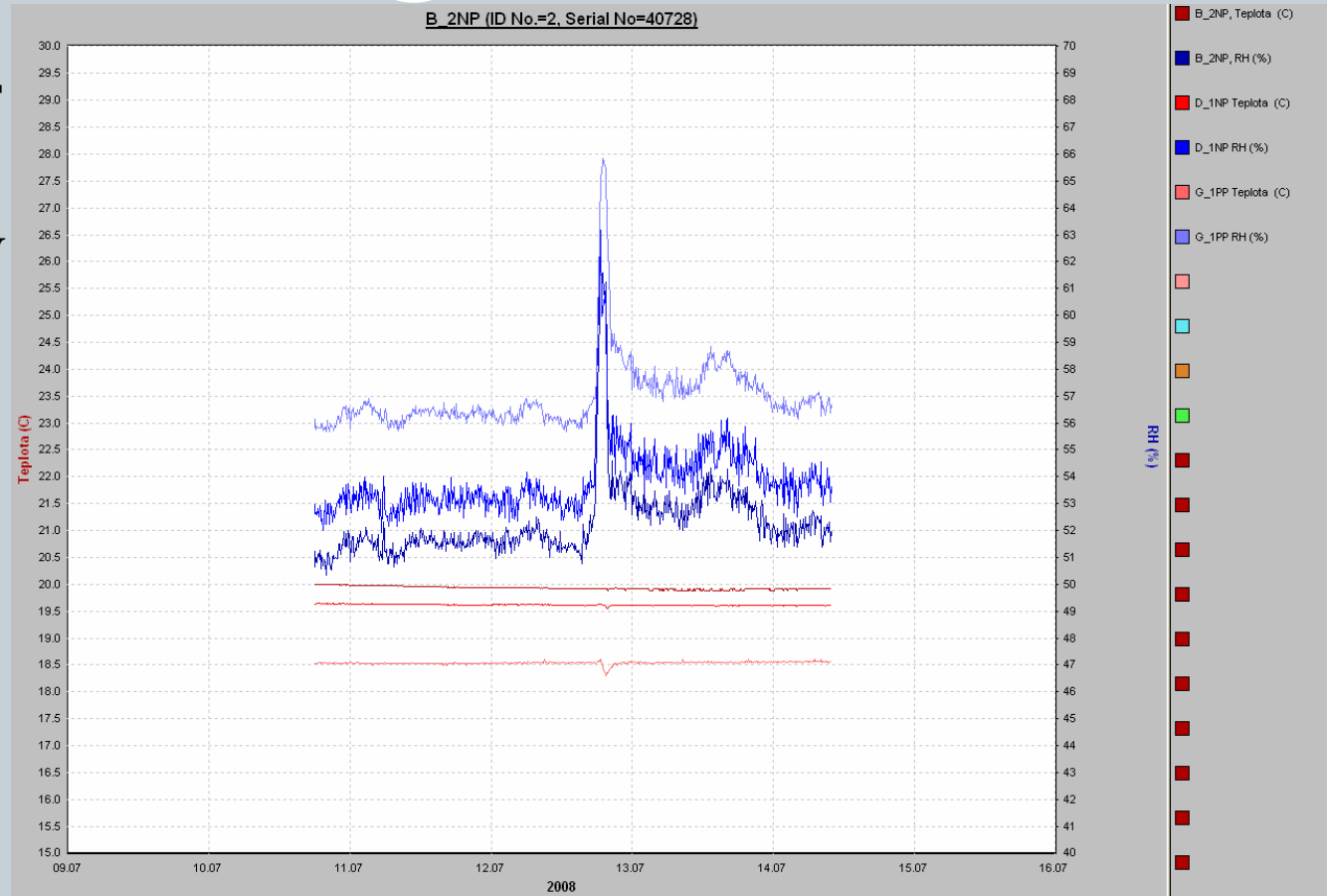


- Zajištění spolehlivých stavebních a interiérových prvků s dobrou odolností proti vlhkosti – stěny, střecha, okna, dveře.
 - U nových budov se zaměřit na nízko energetické projekty, vysokou teplotní kapacitu budov, kvalitní izolaci, ...
- Vytipovat a eliminovat zdroje vlhkosti (např. špatné svody vody a žlaby v blízkosti budovy muzea)
- Používání obalů, pouzder, obálek pro ukládání předmětů citlivých na RV
- Použití jednoduchých boxů (vitrín) pro prezentaci nejcitlivějších předmětů (popř. aplikace silikagelu)

Příklady – výpadek klimatizace



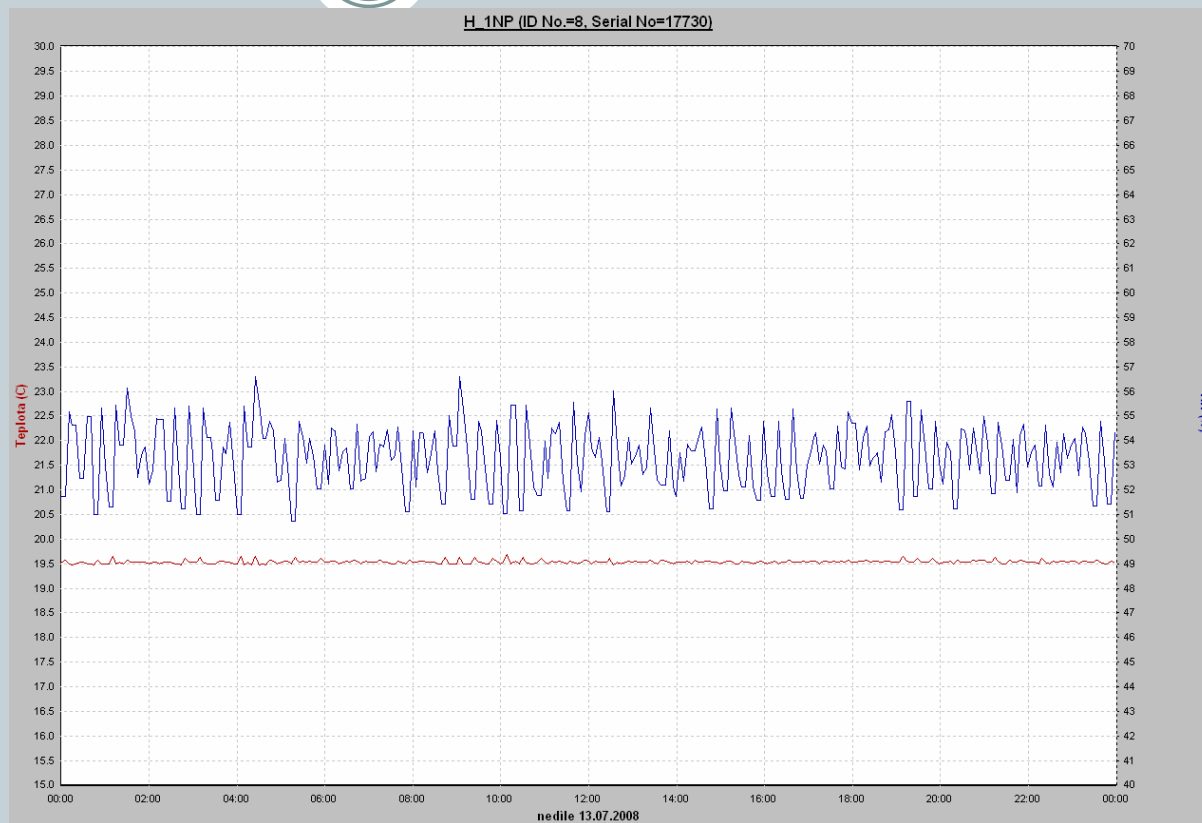
Grafický záznam RV a T
z deponitáře zahrnující
situaci s výpadkem
klimatizace – nárůst RV
až o + 10 % za 1 hod.
Záznam: TR
Instruments, s.r.o.



Příklady – klimatizovaný depozitář



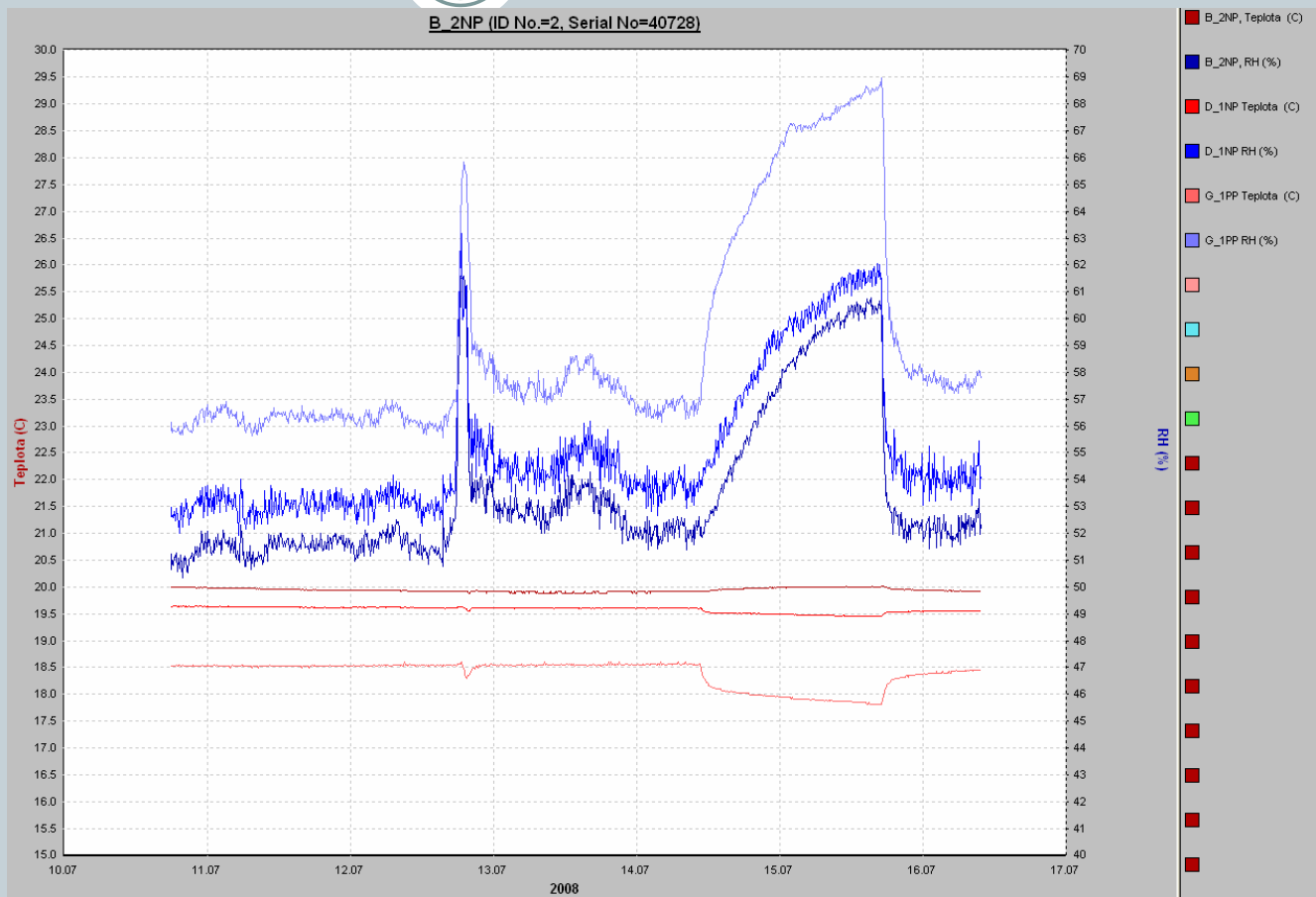
Grafický záznam RV a T
ze stejného depozitáře
po opravě klimatizace.
Záznam: TR
Instruments, s.r.o.



Příklady – simulovaný výpadek klimatizace



Grafický záznam
RV a T ze stejného
depozitáře
(prázdném) při
simulovaném
výpadku
klimatizace (31
hod.) – záznamy ze
tří pater – nárůst
RV více jak 10 %
během 12 hod.
*Záznam: TR
Instruments, s.r.o.*



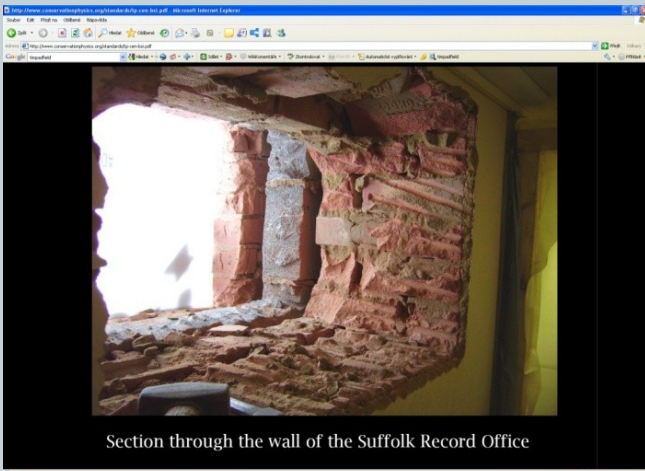
Příklady – přirozené mikroklima



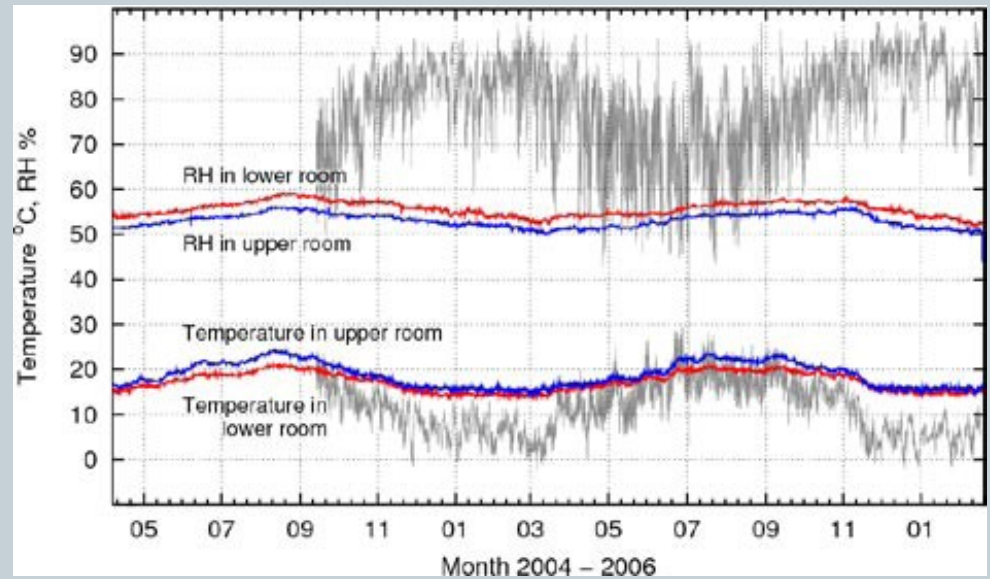
The Suffolk Record Office, Ipswich UK.

Stěny mají tloušťku 630 mm (cihla, izolace, ventilační dutiny), postaveno v r. 1990.

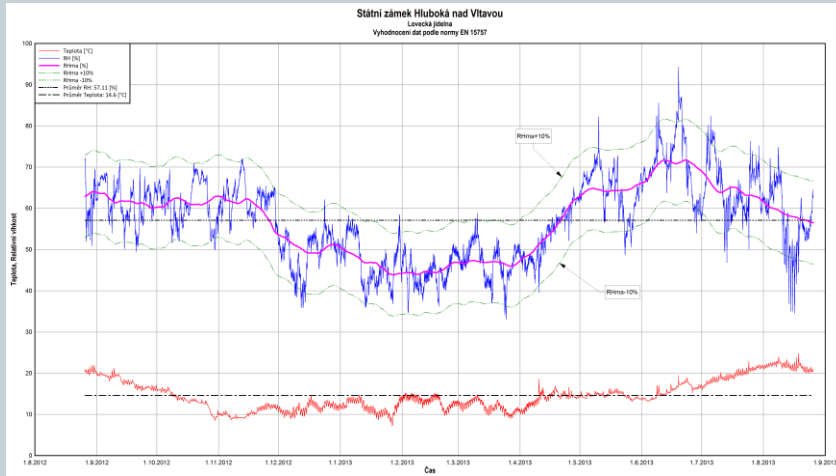
Zdroj: T. Padfield: *The potential and limits for passive air conditioning of museums, stores and archives*, In. *Museum Microclimates*, Copenhagen, 2007.



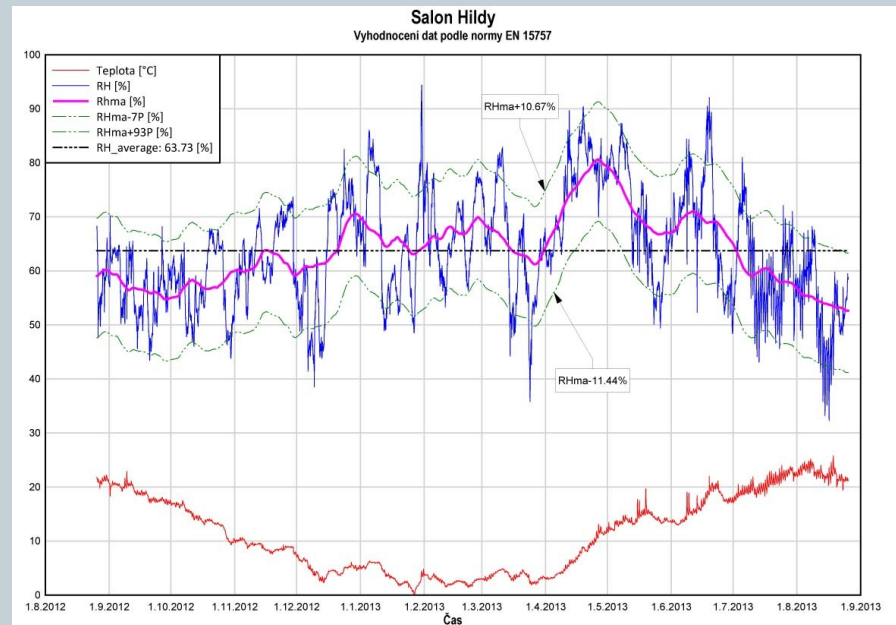
Section through the wall of the Suffolk Record Office



Příklady – Historické klima



Zimní trasa, přízemí:
vytápěno na cca 15 °C, pokles
RV na 35 %



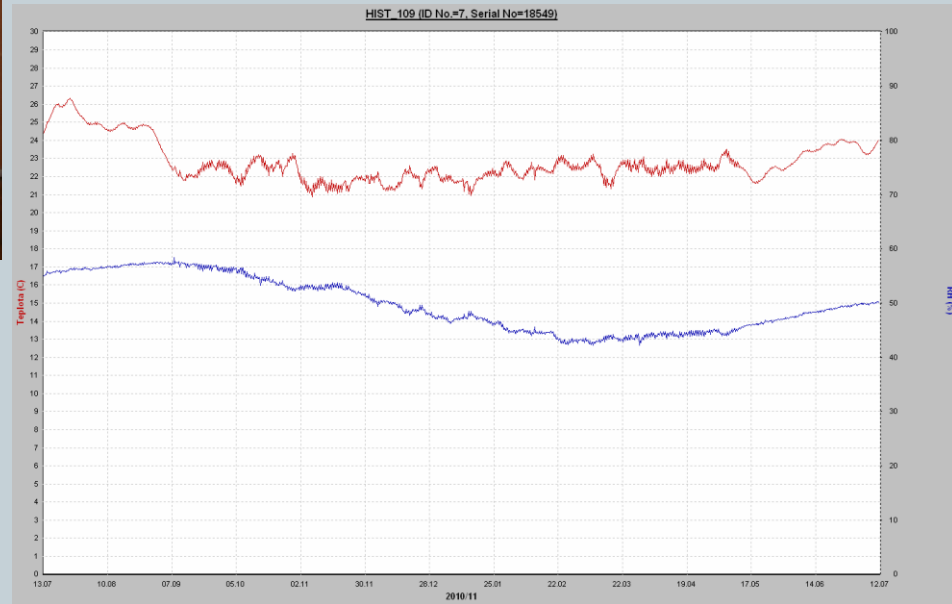
2. Patro zámku, nevytápěný prostor,
zima T 0 °C, RV 65 %

Příklady – Depozitář



Depozitář Slováckého muzea v Uherském Hradišti - etnografie

2010/2011 depozitář historie
(RV 45 – 50 %; T 20 – 24 °C)



Příklady – Depozitář



Depozitář Muzea m. Prahy – Stodůlky, textil

Klimatizovaný depozitář, RV
50 +/- 5 %; T 18 °C



KHM – centrální depozitáře Himberg



Rok stavby 2010 – 2011; 12 000 m² (4 patra); investice 9, 7 mil. EUR



Podlahy z betonové aktivovaného jádra (topení/chlazení) → 20 °C ; stěny – betonový sendvič 35 cm tl.

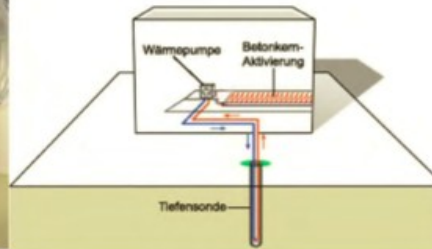


KHM - Himberg

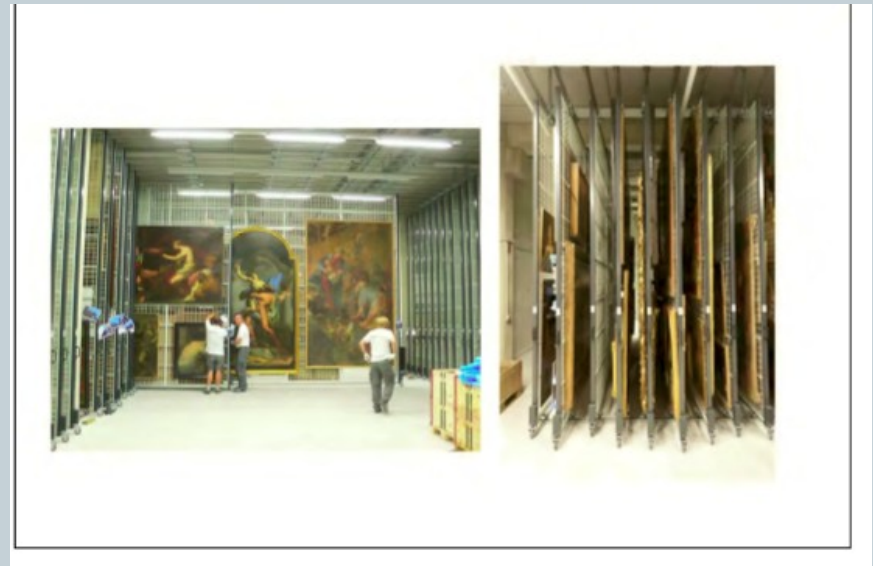


AIR CONDITIONING PLAN:
Recirculated-air operation

32 deep probes (each with a length of 100 m) were inserted until the strata of groundwater to use the geothermal energy keeping stable climatic conditions of 20°C and 50 %RH, delivery rooms



Tepelná čerpadla – 32 sond v
hloubce 100 m:
Stabilní klima: RV 50 %
T 20 °C



Literatura



- ČERVENÁK, J.: Prvky ovlivňující optimální parametry mikroklimatu památek. In: Památky a vnitřní klima. Seminář STOP, Praha 1998, s.14-18.
- DROZENOVÁ, J.: Vliv návštěvnosti na klima v hlavní budově Národního muzea. In: Sborník z konzervátorského a restaurátorského semináře konaného ve dnech 16-18. září 2003. Brno 2003, s. 46 – 48.
- DVOŘÁK, M.: Negativní faktory působící na muzejní a galerijní exponáty. In: Sborník přednášek z odborného semináře konaného ve dnech 6.-8. března 2000 v Národním muzeu, Praha 2000, s. 19-24.
- FÁRA, P.: Vybrané možnosti úpravy klimatu staveb. In: Památky a vnitřní klima. Seminář STOP, Praha 1998, s. 11-13. JOSEF, J.: Mikroklimatické podmínky prostředí a vlhkost sbírkových předmětů. In: Sborník z konference konzervátorů a restaurátorů. Brno 2007, s. 64 – 67.
- JAKUBEC, P.: Autonomní systémy monitorování prostředí, In: Bezpečnost práce při provádění konzervátorsko-restaurátorských prací, Metodický list. Brno 1996, s. 34 - 37.
- Kol.: Preventivní ochrana sbírkových předmětů, Praha 2000, 68 s.
- KOPECKÁ, I. a kol.: Preventivní péče o historické objekty a sbírky v nich uložené. SÚPP, Praha 2002, 106 s.
- Michalski S.: Incorrect Temperature and Relative Humidity, CCI, 2010.
- Padfield T.: Conservation Physics, <http://www.conservationphysics.org/appx/pubs.php>
- STRAKA, R. Preventivní péče. In ĎUROVIČ, M. a kol.: Restaurování a konzervování archiválií a knih. Praha 2002, s. 79 – 198.
- THOMSON, G.: The Museum Environment. Oxford 2002, 293 s.