



123TVVM – Měření vlhkosti porézních stavebních materiálů

Voda ve všech svých fázích vykazuje celou řadu anomálních vlastností, které výrazně ovlivňují také vlastnosti materiálů ve kterých je obsažena – z tohoto důvodu existuje celá řada metod pro její měření stejně jako celá řada měřících zařízení a senzorů.

- **METODY ABSOLUTNÍ (PŘÍMÉ)**

- stanovení obsahu vody na základě odstranění vlhkosti z testovaného vzorku (vysoušení, extrakce)

- **METODY RELATIVNÍ (NEPŘÍMÉ)**

- obsah vlhkosti je stanoven na základě měření jiné fyzikální veličiny, jejíž hodnoty je závislá na množství vody ve vzorku obsažené – tato závislost musí být jasně známa a definována



• METODY ABSOLUTNÍ (PŘÍMÉ)

1. Gravimetrická metoda

- voda je ze vzorku odstraněna pomocí vysoušení za přesně definovaných podmínek, a její obsah je určen na základě měření hmotnostní ztráty po sušení případně titraci
- voda může být ze vzorku odstraněna také zahříváním horkým suchým vzduchem a jejím zachytáváním v komoře s vysoušecím činidlem
- tato metoda je považována za standardní pro stanovení vlhkosti a je velmi často používána pro kalibraci ostatních měřících metod

2. Extrakční metoda

- voda je extrahována z materiálu do vhodného rozpouštědla kde je její obsah stanoven pomocí titrace

3. Azeotropická destilace

- voda je destilována s organickým rozpouštědlem do kalibrovaného receiveru



• METODY RELATIVNÍ (NEPŘÍMÉ) II

5. Absorpce a reflexe infračerveného záření (IR methods)

- měřením reflexe infračerveného záření může být provedeno stanovení množství vody v povrchových oblastech materiálu

6. Chemické metody

- metody založené na chemické reakci vody obsažené v materiálu se specifickou chemickou látkou – např. CaC_2

7. Ultrazvukové metody

- je měřena rychlost ultrazvukových vln v závislosti na obsahu vody



STANOVENÍ VLKHOSTNÍ FUNKCE, VLHKOSTNÍCH POMĚRŮ BUDOV A MATERIÁLŮ

Průzkum stavby

- odběr vzorků z vyšetřovaného objektu – podrobná laboratorní analýza materiálových vlastností – vlhkostní vodivost, sorpční a desorpční parametry, retence vlhkosti, chemické složení materiálů, mechanické parametry
- stanovení distribuce vlhkosti v konstrukci – návrh sanačních opatření
- analýza výskytu anorganických solí – kvantitativní a kvalitativní chemická analýza
- posouzení inženýrsko-geologických a hydrogeologických poměrů objektu a jeho blízkého okolí

Průzkumné práce lze dělit do několika dílčích fází:

přípravná fáze (získávání informací o budově, projektová dokumentace, apod.), **průzkum stavby** (prohlídka objektu a zjištění základních technických údajů o budově a okolí), **průzkum stavby na základě zjišťování charakteristických veličin měřením** – měření vlhkosti, pH, chemismus materiálů, směr přenosu vody – elektroosmotická aktivita, el. vodivost, apod.



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

■ FAKULTA STAVEBNÍ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ A CHEMIE

STANOVENÍ VLKHOSTNÍ FUNKCE, VLHKOSTNÍCH POMĚRŮ BUDOV A MATERIÁLŮ II

Na základě průzkumu stavby, konstrukcí a materiálů je možné stanovit aktuální stav konstrukcí a provést hrubé odhady jejich další funkce, trvanlivosti a životnosti.

Aplikace počítačového modelování – simulace tepelně vlhkostní funkce konstrukce v delším časovém horizontu – možno provést simulaci kritických detailů konstrukce či jejího kritického zatížení – optimalizace návrhu budov či rekonstrukčních prací.

Dostatečné množství materiálových charakteristik a parametrů.



DEFINICE A KLASIFIKACE OBSAHU VLHKOSTI

Hmotnostní vlhkost

$$w_h = \frac{m_w - m_d}{m_d} \cdot 100\% = \frac{m_k}{m_d} \cdot 100\%$$

- m_w hmotnost vlhkého vzorku materiálu [kg, g], m_d hmotnost vysušeného materiálu [kg, g], m_k hmotnost vody [kg, g], w_h hmotnostní vlhkost [%hm.]

Objemová vlhkost

$$w_v = \frac{V_w}{V_d} \cdot 100\% \text{vol.} = \frac{(m_w - m_d)}{\rho_w \cdot V_d} \cdot 100\% \text{vol.} = \frac{w_h \rho_d}{\rho_w} \cdot 100\% \text{vol.}$$

- V_w objem vody [m^3], V_d objem suchého materiálu [m^3], ρ_w objemová hmotnost vody [kgm^{-3}], ρ_d objemová hmotnost suchého materiálu [kgm^{-3}]



DEFINICE A KLASIFIKACE OBSAHU VLHKOSTI II

Parciální hustota vody

$$\phi_w = \frac{m_w}{V} \quad [\text{kg/m}^3]$$

- m_w je hmotnost vody v měřeném vzorku [kg], V je objem vzorku [m³]

Stupeň nasycení

$$\psi = \frac{w_h}{w_{sat}} \quad [\%, -]$$

- w_h je hmotnostní vlhkost a w_{sat} je hmotnostní vlhkost v saturevaném stavu (při plném nasycení)



DEFINICE A KLASIFIKACE OBSAHU VLHKOSTI III

Hmotnostní vlhkost w_h (%)	Klasifikace
$w_h < 3.0$	Velmi nízký obsah vlhkosti
$3.0 \leq w_h \leq 5.0$	Nízký obsah vlhkosti
$5.0 \leq w_h \leq 7.5$	Zvýšený obsah vlhkosti
$7.5 \leq w_h \leq 10.0$	Vysoký obsah vlhkosti
$10.0 < w_h$	Velmi vysoký obsah vlhkosti

(ČSN P 73 0610, 2000)



GRAVIMETRICKÁ METODA

- patrně nejčastěji používaná metoda ve stavební praxi
- pro pochopení výsledků získaných gravimetrickými měřeními je nezbytné získat informace o **vazebné energii vody** na porézní matici materiálu
- základní klasifikace vody obsažené v porézním materiálu na vodu vázanou a volnou nevystihuje přesně fyzikálně-chemickou realitu – **kapilárně porézní materiál nemůže obsahovat volnou vodu, neboť molekuly vody přítomné v materiálu jsou vždy vázány jistými silami k jeho matici**
- tyto vazebné síly jsou vždy nejvíce intenzivní na počátku sorpční izotermy (nízká RH, formování monomolekulární vrstvy) a následně slábnou s nárůstem vlhkosti v materiálu
- vazebnou energii vody v porézním materiálu můžeme definovat jako **práci nezbytnou ke konverzi jistého specifického množství vody vázané na vodu volnou**
- **Leroy (1954)** formuloval vztah pro vaz. energii vody, který je analogický vztahu pro **osmotický tlak**



VAZEBNÁ ENERGIE VODY KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ A CHEMIE

$$e = \frac{RT}{M} \ln \frac{p_s}{p}$$

- p_s (Pa) - tlak nasycených vodních par při teplotě T (K)
- p (Pa) - parciální tlak vodních par při teplotě T (K)
- M (g/mol) - molární hmotnost vody 18.0152
- R (J/K mol) – univerzální plynová konstanta 8.31447 J/K mol

OSMOTICKÝ TLAK

- tlak indukovaný penetrací rozpouštědla do roztoku – spontánní ředění roztoku – měřen např. pomocí membrány, která odděluje rozpouštědlo a roztok (umožňuje prostup rozpouštědla, ale ne rozpouštěné látky)

$$\Pi = \frac{RT}{V_A} \ln \frac{p_A^*}{p_A}$$

V_A (m³/mol) parciální molární objem rozpouštědla

p_A^* parciální tlak vodní páry nad čistým, rozpouštědlem (látka A)

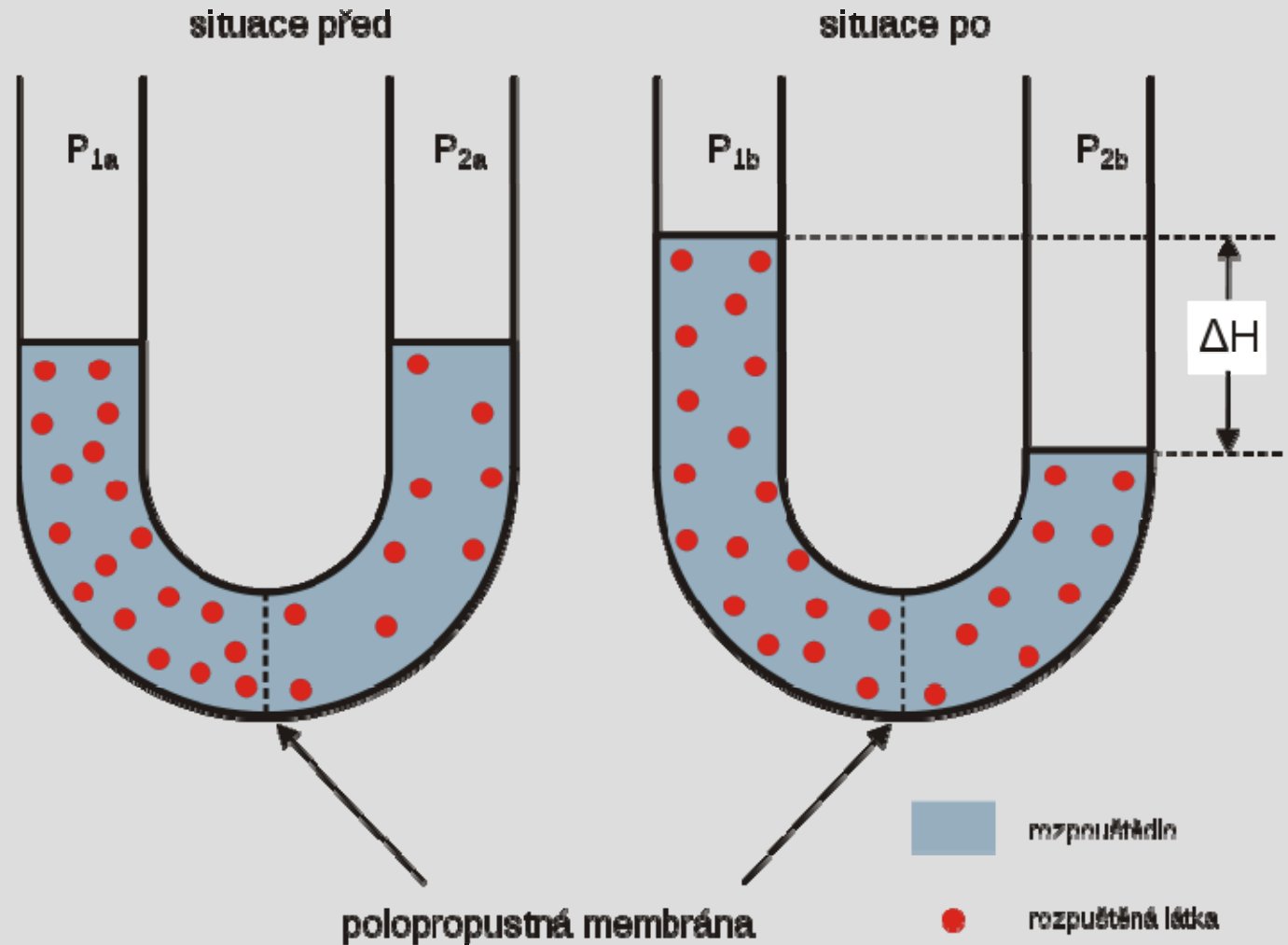
p_A par. tlak vodní páry nad roztokem látky B v rozpouštědle A



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

■ FAKULTA STAVEBNÍ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■ ■

KATEDRA MATERIÁLOVÉHO INŽENÝRSTVÍ A CHEMIE



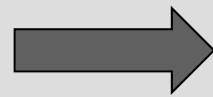


Specifická energie e korespondující s osmotickým tlakem Π může být vyjádřena vztahem

$$e = \frac{\Pi}{\rho_A} = \frac{RT}{\rho_A V_A} \ln \frac{p_A^*}{p_A} = \frac{RT}{M_A} \ln \frac{p_A^*}{p_A}$$

ρ_A je hustota rozpouštědla A a M_A jeho molární hmotnost

vazebná energie – energie nezbytná k odstranění vody z materiálu



dle Leroyovy analogie představuje energii nezbytnou k nárůstu parciálního tlaku vodní páry na jeho nasycenou hodnotu při specifické teplotě

voda - uvažována jako rozpouštědlo A

pevná matrice materiálu – látka B „rozpuštěná substance“



Dosadíme-li do rovnice pro výpočet vazebné energie $p = 0$ (velmi malý tlak vodní páry) dostáváme $e \rightarrow \infty$

je tedy evidentní, že s poklesem obsahu vody narůstá její vazebná energie, díky níž není možné odstranit veškerou vodu obsaženou v materiálu

Specifickou vazebnou energii vody je však možné zapsat také vztahem

$$e = aw_{r,s} + b$$

a , b jsou konstanty a $w_{r,s}$ popisuje sušivost materiálu

$$w_{r,s} = \frac{m_d}{m_{w,b}}$$

m_d [kg] je hmotnost suchého materiálu a $m_{w,b}$ [kg] je hmotnost vázané vody



Stanovení celkového obsahu vody v porézním materiálu v rámci gravimetrického experimentu:

- 1) Provede se řada experimentů s různými teplotami vysoušení, přičemž se stanoví celková ztráta vody Δm_T jako funkce teploty

dle

$$e = \frac{RT}{M} \ln \frac{p_s}{p}$$

se vypočte **vazebná energie e jako funkce teploty**


- 2) Předpokládá se, že po vysoušení na nejvyšší teplotu T_{max} zůstane v materiálu zbytkové množství vazebné vody, které může být popsáno spodní Δm_1 a horní Δm_2 mezí

vypočte se sušivost pro všechny teploty gravimetrického experimentu, pro $T = T_{max}$ platí

$$m_{w,b} = \Delta m_1 \quad m_{w,b} = \Delta m_2$$



pro $T_x < T_{max}$ platí


$$m_{w,b} = \Delta m_1 + \Delta m T_{max} - \Delta m T_x$$

respektive

$$m_{w,b} = \Delta m_2 + \Delta m T_{max} - \Delta m T_x$$

- 3) Vypočte se vazebná energie pro všechny teploty gravimetrického experimentu a vytvoří se pro Δm_1 a Δm_2 funkce $e(w_{r,s})$, kde každý bod $[w_{r,s,i}, e_{i...}]$ koresponduje s teplotou T_i
- tato závislost měla být lineární
 - jestliže Δm_1 a Δm_2 byly opravdu dolní a horní mez, budou zakřivení funkcí $e(w_{r,s})$ odpovídající Δm_1 a Δm_2 odlišné
 - **správná hodnota Δm leží mezi hodnotami Δm_1 a Δm_2 a může být jednoduše stanovena postupem popsaným výše**



- běžnými podmínkami pro vysoušení stavebních materiálů jsou teploty v rozmezí 105 – 110°C bez dalšího vysoušecího činidla
- vysoušení probíhá řádově od několika hodin do několika dní v závislosti na obsahu vlhkosti, typu materiálu a rozměru vzorku
- některé stavební materiály, zejména obsahující organické sloučeniny, mohou být za těchto teplot chemicky a fyzikálně rozloženy - v tomto případě se volí vysoušecí teplota v intervalu 60-70 °C a měření probíhá za sníženého tlaku – vakuové zařízení (dostačující podtlak je cca 15 kPa)
- v případě, že materiály nesnesou teplotní zatížení 60°C může být obsah vlhkosti určen pomocí sušení v exsikátoru za normálních teplotních podmínek s použitím vysoušecího činidla (silica gel, apod.) – rychlost vysoušení je velice pomalá (řádově týdny až měsíce) a je ovlivněna **vysoušecí schopností použitého činidla** – vyjádřena nejčastěji v mg zbytkové vody na jeden litr vzduchu, patrně nejlepším vysoušecím činidlem je z tohoto hlediska P₂O₅ 0.000025mg/dm³



- další důležitou vlastností vysoušecího činidla je jeho měrný povrch – z tohoto pohledu je velmi výhodné použití BaO – rychle absorbuje vodu a tvoří Ba(OH)_2 s 16 molekulami vody na jednu molekulu Ba(OH)_2
- přesnost ve stanovení obsahu vlhkosti gravimetrickou metodou je velmi důležitá, jelikož je často užívána jako metoda pro kalibraci jiných měřidel vlhkosti
- kromě zanedbání vlivu zbytkové vody stojí za zmínku také vážení vzorku venku, kde sušárna může přivodit značné chyby, protože **sorpční vlhkost z okolního prostředí** je velice rychlá pro teplé vzorky zrovna vyndané ze sušárny (vhodné umístit teplé vzorky do předem připraveného exsikátoru s vysoušecím činidlem)



ODPOROVÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI I

- změna obsahu vody v materiálu je doprovázena také změnou jeho elektrických vlastností – **elektrického odporu**, který může být změněn v rozsahu několika řádů (vlhký materiál můžeme považovat za polovodivý nehomogenní materiál)
- typický elektrický odpor suchého porézního materiálu je v rozsahu $10^8 - 10^{13} \Omega\text{m}$
- **přítomnost vody může snížit hodnotu el. odporu materiálů až na hodnotu $10^{-4} \Omega\text{m}$**
- materiál není možné považovat pouze za jednoduchou směs matrice a vody – **na el. vlastnosti má vliv vázání vody v materiálu a také přítomnost iontů anorganických solí rozpuštěných ve vodě**
- nutné je také zohlednit vliv teploty na změnu el. vlastností

Vztah pro závislost el. odporu na vlhkosti při specifické teplotě:

(a, b jsou empirické konstanty)
$$R = a \cdot u^{-b}$$



ODPOROVÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI II

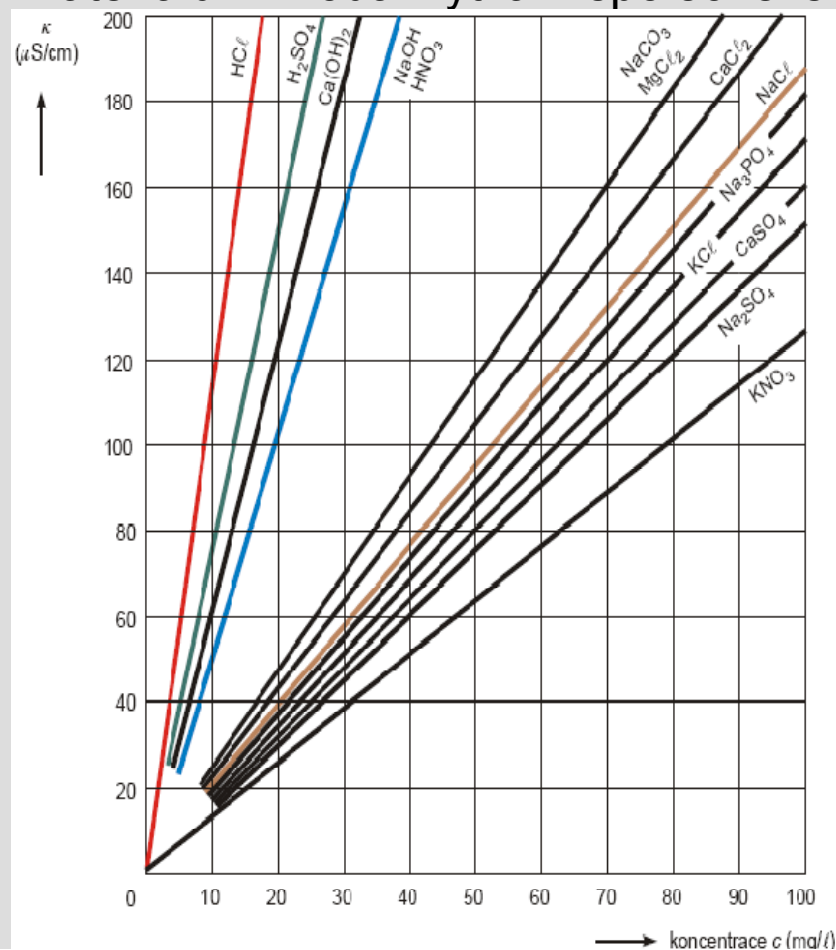
- tento vztah je platný pouze v limitovaném obsahu vlhkosti – typicky pro hygroskopickou vlhkost odpovídající relativní vlhkosti 30 – 90%
- pro vyšší obsah vlhkosti klesá el. odpor více pomalu
- v praxi jsou pro měření nejčastěji používány **jehlové elektrody**, které je však nutné instalovat do měřeného materiálu – nutno zajistit dobrý kontakt elektrod s materiálem (nejčastěji se používá 2 či 4 elektrody)





ODPOROVÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI III

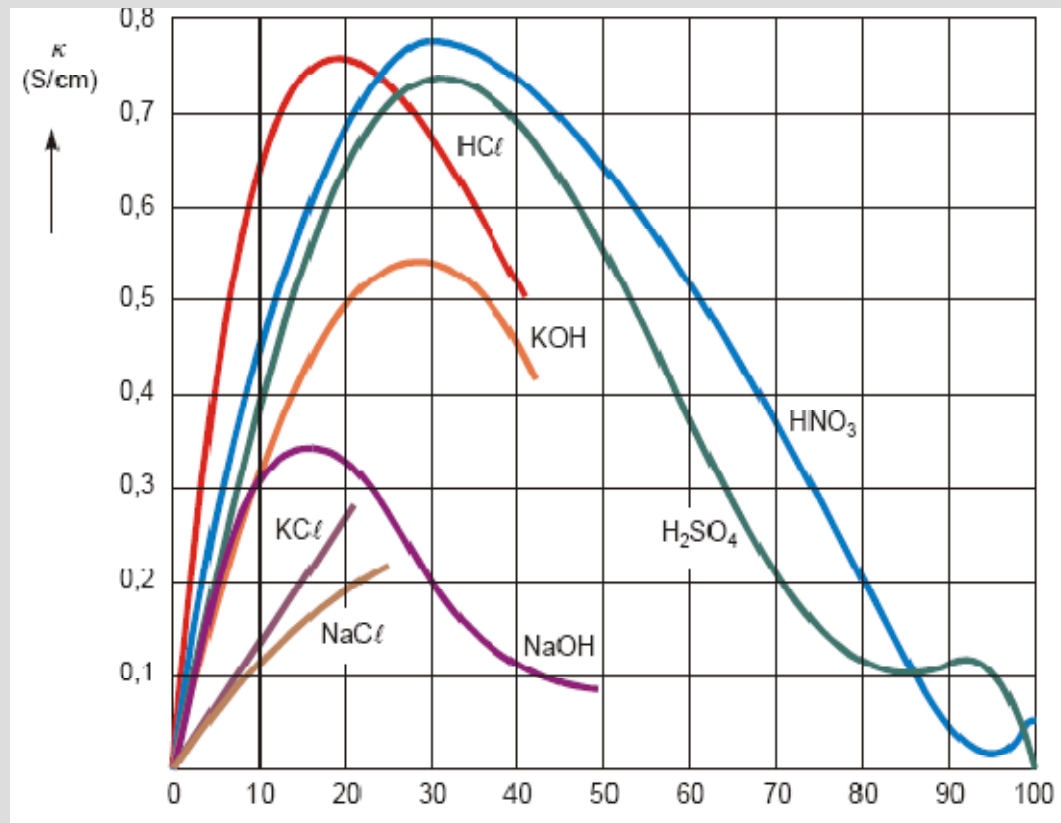
- největším problémem odporových vlhkoměrů je přítomnost solí v měřeném materiálu – voda vytváří společně s ionty solí vodivý elektrolyt





ODPOROVÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI III

- elektrická vodivost elektrolytu je závislá na obsahu iontů rozpuštěných ve vodě
- je však výrazně limitována také umožněním volné migrace iontů





ODPOROVÉ METODY MĚŘENÍ VLHKOSTI III

- při vyšším obsahu solí jsou odporové metody nepoužitelné, neboť chyby měření výrazně narůstají s nárůstem vlhkosti
- dalším problémem je také **měření velkých odporů**, které je značně nepřesné – snížení přesnosti odporových senzorů v oblasti nižších vlhkostí
- problémem může být také polarizace elektrod (měřené odpory jsou vyšší než reálné)
- **individuální kalibrace pro jednotlivé měřené materiály**

V praxi se odporové metody používají pouze pro **hrubý odhad obsahu vlhkosti**, **sledování vysychání konstrukce** či ke **zjištění hranice mezi zavlhlým a suchým zdivem** v případě sanace vlhkých stavebních konstrukcí.



DIELEKTRICKÉ METODY

- dielektrické metody stanovení obsahu vlhkosti spočívají v analýze chování dielektrika (měřený vlhký materiál) v časově proměnném elektrickém poli

- hustota el. proudu je vyjádřena jako:

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \hat{\varepsilon} \frac{d\vec{E}}{dt}$$

E je intenzita el. pole, σ el. vodivost, $\hat{\varepsilon}$ komplexní permitivita (reálná a imaginární část)

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon' - i\varepsilon''$$

Vlastnosti dielektrika tedy můžeme charakterizovat el. vodivostí a permitivitou – závislost na složení dielektrika, jeho struktuře, frekvenci elektrického pole, teplotě a tlaku.



DIELEKTRICKÉ METODY II

- dielektrické vlastnosti materiálů jsou nejčastěji vyjadřovány pomocí relativní permitivity ($\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m – permitivita vakua)

$$\epsilon'_r = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} \quad \epsilon''_r = \frac{\epsilon''}{\epsilon_0}$$

- stanovení obsahu vlhkosti dielektrickými metodami je založeno na skutečnosti, že **relativní permitivita čisté vody je při 20°C cca 80**, přičemž většina stavebních porézních materiálů vykazuje hodnoty relativní permitivity v rozsahu od **2 do 6**

- permitivita materiálů je silně ovlivněna možností orientovat molekuly materiálu v elektrickém poli – **tato schopnost je velmi vysoká pro vodu v plynné a kapalně fázi, ale je výrazně nižší pro vodu vázanou různými vazebnými a sorpčními silami**

- pomocí permitivity můžeme rozlišit jednotlivé typy vázané vody X
vliv obsahu vody na přesnost měřící metody



DIELEKTRICKÉ METODY III

- permitivita vody vázané v monomolekulární vrstvě je cca 2.5 – v dalších vrstvách však dochází k jejímu vysokému nárůstu

- závislost relativní permitivity materiálu na obsahu vlhkosti je obvykle charakterizována náhlou změnou při přechodu vody z pouze monomolekulární vrstvy na vrstvu polymolekulární

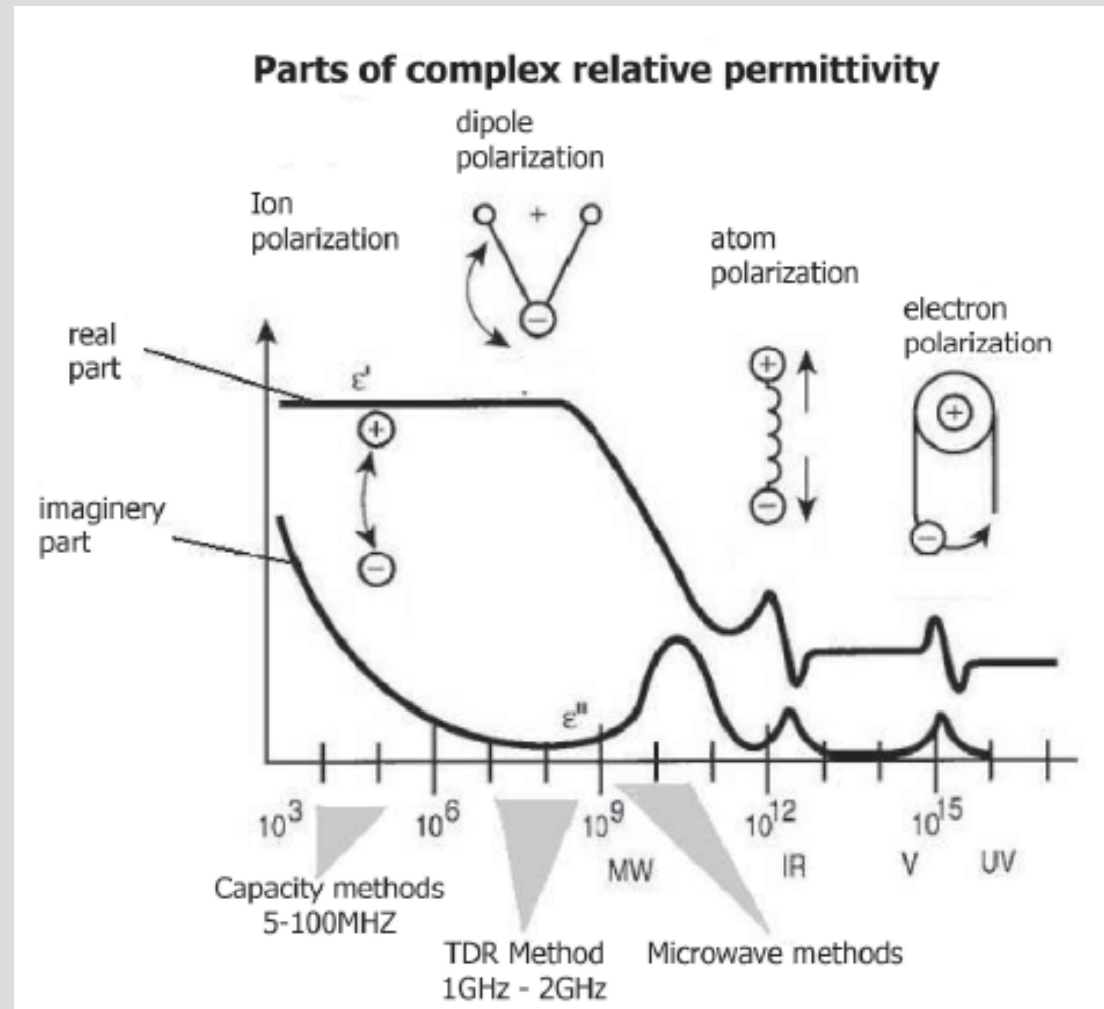
➔ metody měření vlhkosti založené na měření relativní permitivity mají nízkou přesnost v oblasti nízkých vlhkostí a jejich aplikace pro takováto měření není příliš vhodná

V závislosti na frekvenci aplikovaného elektrického pole dělíme dielektrické metody na:

1. Kapacitní
2. Mikrovlnné




DIELEKTRICKÉ METODY IV





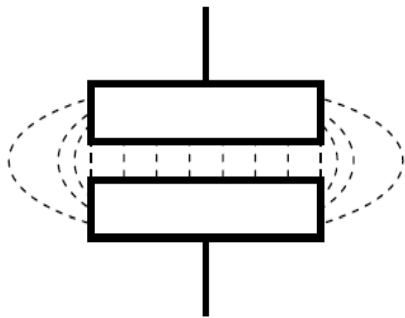
KAPACITNÍ METODY

- tyto metody jsou používány v rozsahu nižších frekvencí 100KHz – 100 MHz
- kapacitní vlhkoměry pracují jako kondenzátor (stanovení relativní permitivity) a měřený materiál je jeho dielektrikem
- pro měření se nejčastěji používá deskový kondenzátor, jehož kapacita je dána vztahem


$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \frac{S}{d}$$

kde S je plocha elektrod a d jejich vzdálenost – dle tohoto vztahu je možné stanovit relativní permitivitu z naměřené kapacity při známé geometrii kondenzátoru (S/d)

Tento vztah je přesný a platný pouze pro nekonečně velké plochy desek, jinak je nutné vzít v potaz také vliv okrajového pole, které zvyšuje celkovou kapacitu kondenzátoru.



Obr.1: K celkové kapacitě deskového kondenzátoru přispívá kromě homogenního pole mezi jeho deskami také okrajové elektrické pole



KAPACITNÍ METODY II

- relativní permitivita udává, kolikrát je intenzita elektrického pole E v dielektriku menší než E_0 ve vakuu, resp. kolikrát je kapacita C kondenzátoru s dielektrikem větší než kapacita C_0 kondenzátoru vakuového (vzduchového)

$$\rightarrow \varepsilon_r = \frac{E_0}{E} = \frac{C}{C_0}$$



KAPACITNÍ METODY II

- kapacitní vlhkoměry jsou o něco přesnější než odporové, ale přesto nejsou zcela schopny eliminovat odchylku elektrické kapacity v závislosti na koncentraci iontů solí
- další nevýhodou je poměrně malá hloubka měření – dle literatury je maximální hloubka měření cca 5cm
- kapacitní vlhkoměry je optimální používat v přesně definovaných laboratorních podmínkách, či u materiálů a konstrukcí kde zjišťujeme pouze povrchovou vlhkost
- uplatnění kapacitních vlhkoměrů není možné v konstrukcích a materiálech obsahujících vodivé součásti a složky (např. vyztužený beton)