

Hydropedologie

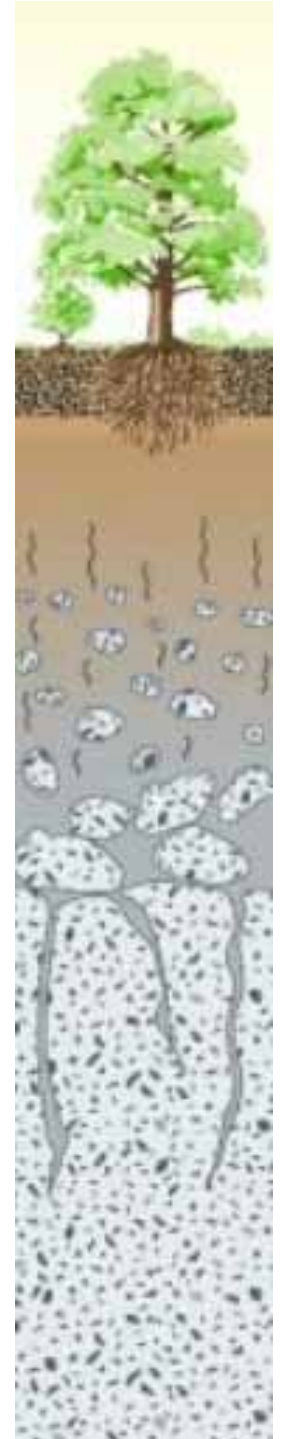
Přednáška 7

Adsorbce vody

izoterma, charakteristické hodnoty

Měření vlhkosti půdy

metody přímé, nepřímé



Adsorpce vody

Výměna molekul vody mezi **povrchem tuhé fáze a vodními párami obsaženými v půdním vzduchu**. Uplatňuje se při velmi nízké vlhkosti půdy. Pohlcování vodní par půdou se nazývá **hygroskopičnost**.

Množství adsorbovaných vodních par je závislé na:

- **parciálním tlaku vodních par** ve vzduchu,
- **teplotě a na charakteru půdních** částic, především na specifickém (měrném) povrchu půdy

Parciální tlak

$$p_A = x_A p_{\text{celk}}$$

kde x_A je molární podíl složky A ve směsi plynů a P_{celk} je celkový tlak

Adsorpční izoterma (velmi suchá půda)

je vztah mezi relativním
parciálním tlakem p/p_0
a gravimetrickou
vlhkostí půdy

kde

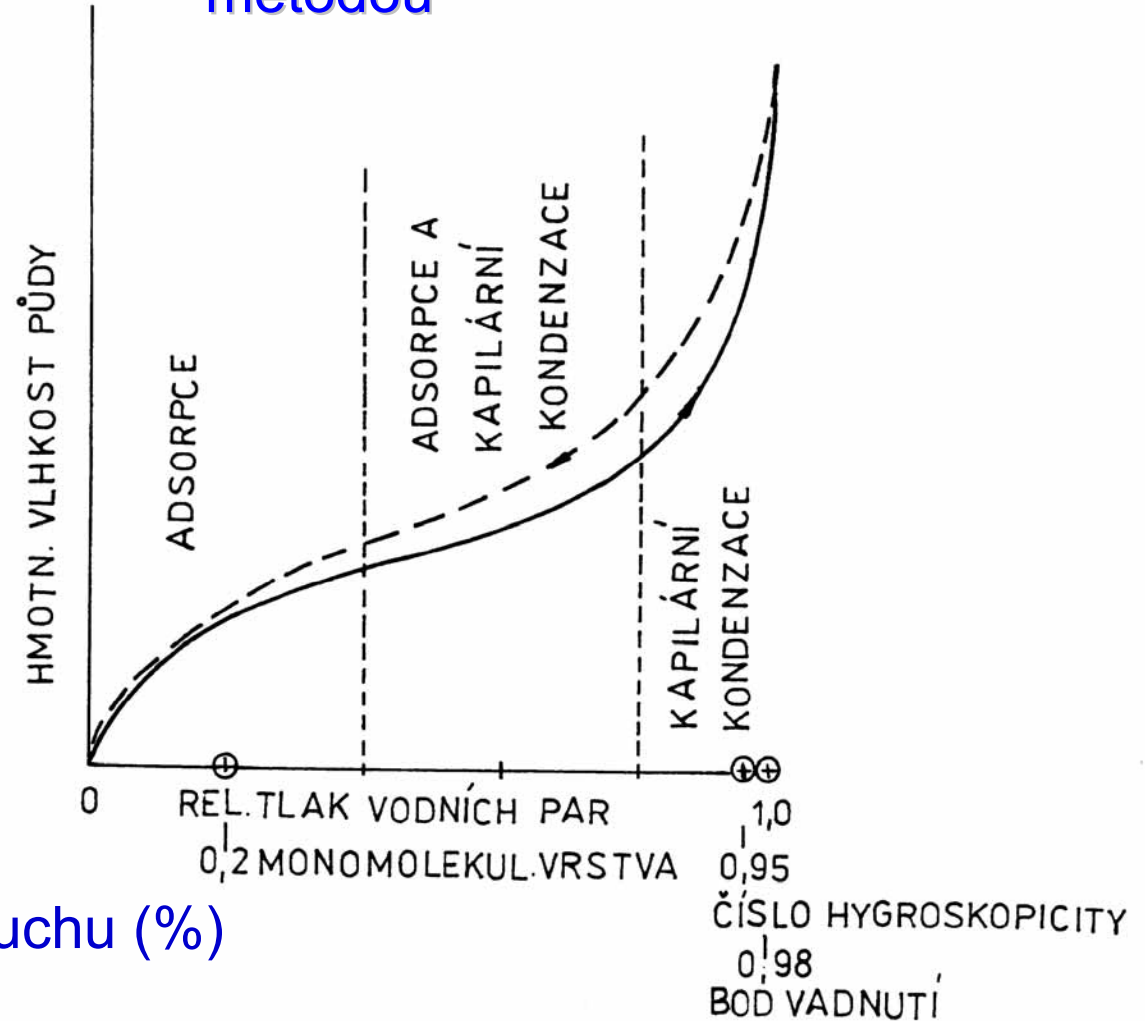
p ... parciální tlak
vodních par

p_0 ... odpovídá
parciálnímu tlaku
vodních par při
nasycení

Platí že:

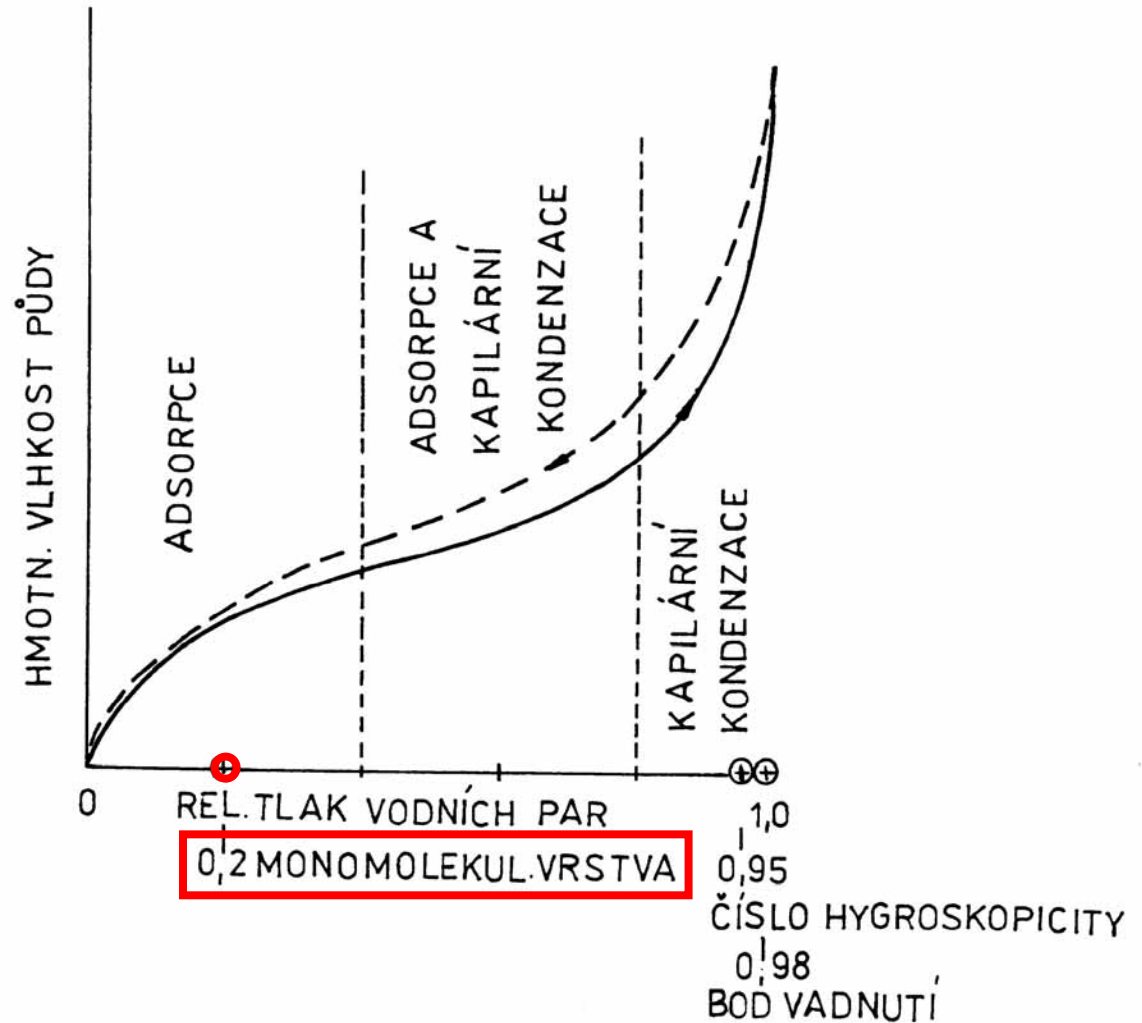
$p/p_0 \cdot 100 = \text{rel. vlhkost vzduchu (\%)}$

Zjišťuje se exsikátorovou
metodou



Adsorpční izoterma – charakteristické hodnoty

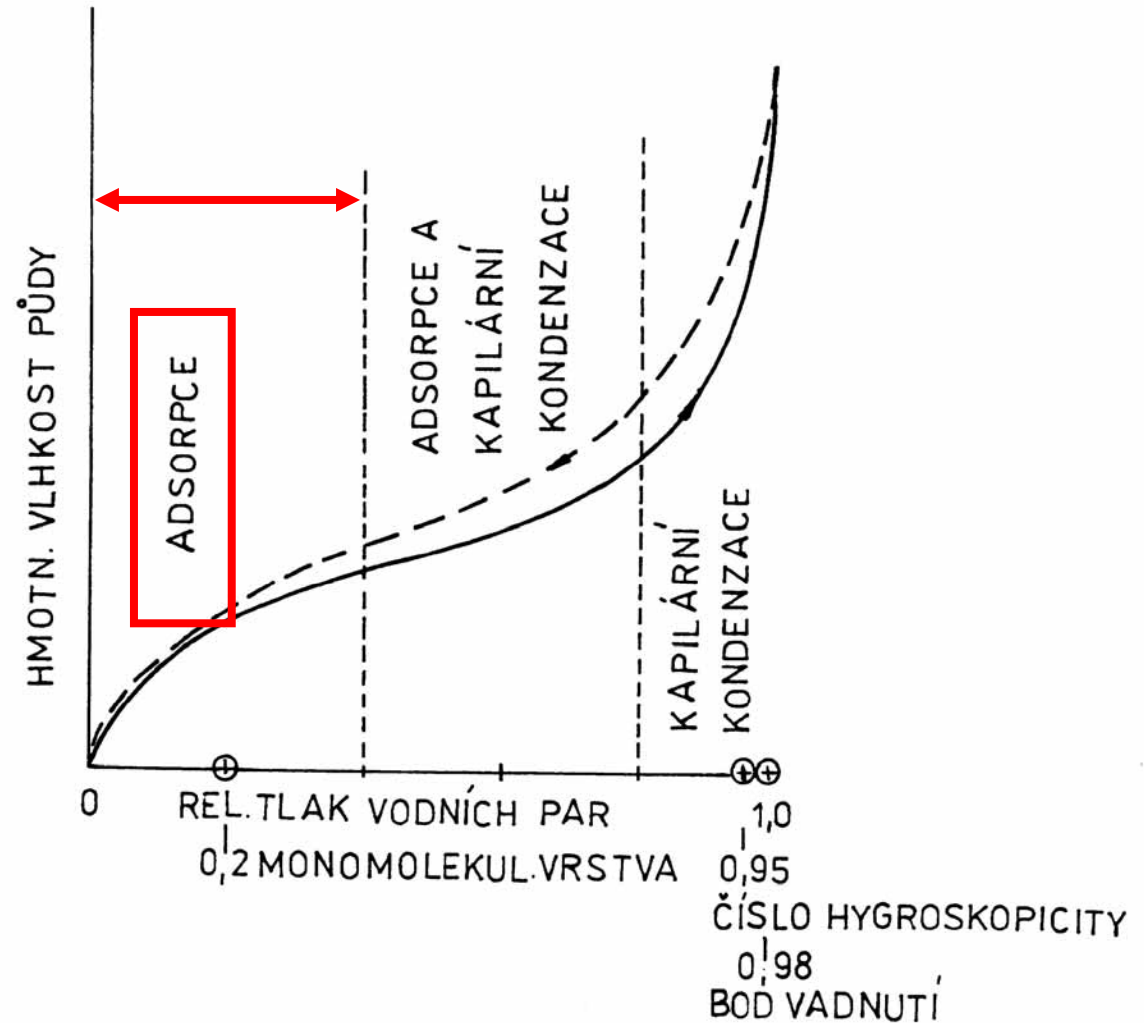
- **Monomolekulární vrstva ...** voda pokrývá povrch tuhé fáze v **průměrné** tloušťce 1 molekuly. Tuto hodnotu lze použít ke stanovení měrného povrchu. Plocha zaujímaná 1 molekulou H_2O se uvažuje $0,108 \text{ nm}^2$, potom měrný povrch $S_A = 3610 w_{mono}$, kde w_{mono} je hmotnostní vlhkost při dosažení monomolekulární vrstvy



Adsorpční izoterma – charakteristické hodnoty

- Oblast adsorpce ...

$0 < p/p_0 < 0.4$ Adsorpce se nasycuje silové pole povrchu, snižuje se jeho energie. Molekuly vody ztrácejí při adsorpci svou pohyblivost. Uvolňuje se adsorpční teplo, které je totožné se smáčecím teplem adsorbentu, zvětšeným o výparné teplo.



Adsorpční izoterma – charakteristické hodnoty

- Oblast adsorpce a kapilární kondenzace ...

$$0.4 < p/p_0 < 0.8$$

Kapilární kondenzace se uplatňuje při poloměru pórů od 0.1 nm do 100 nm, jestliže modelujeme póry jako válcové trubice.

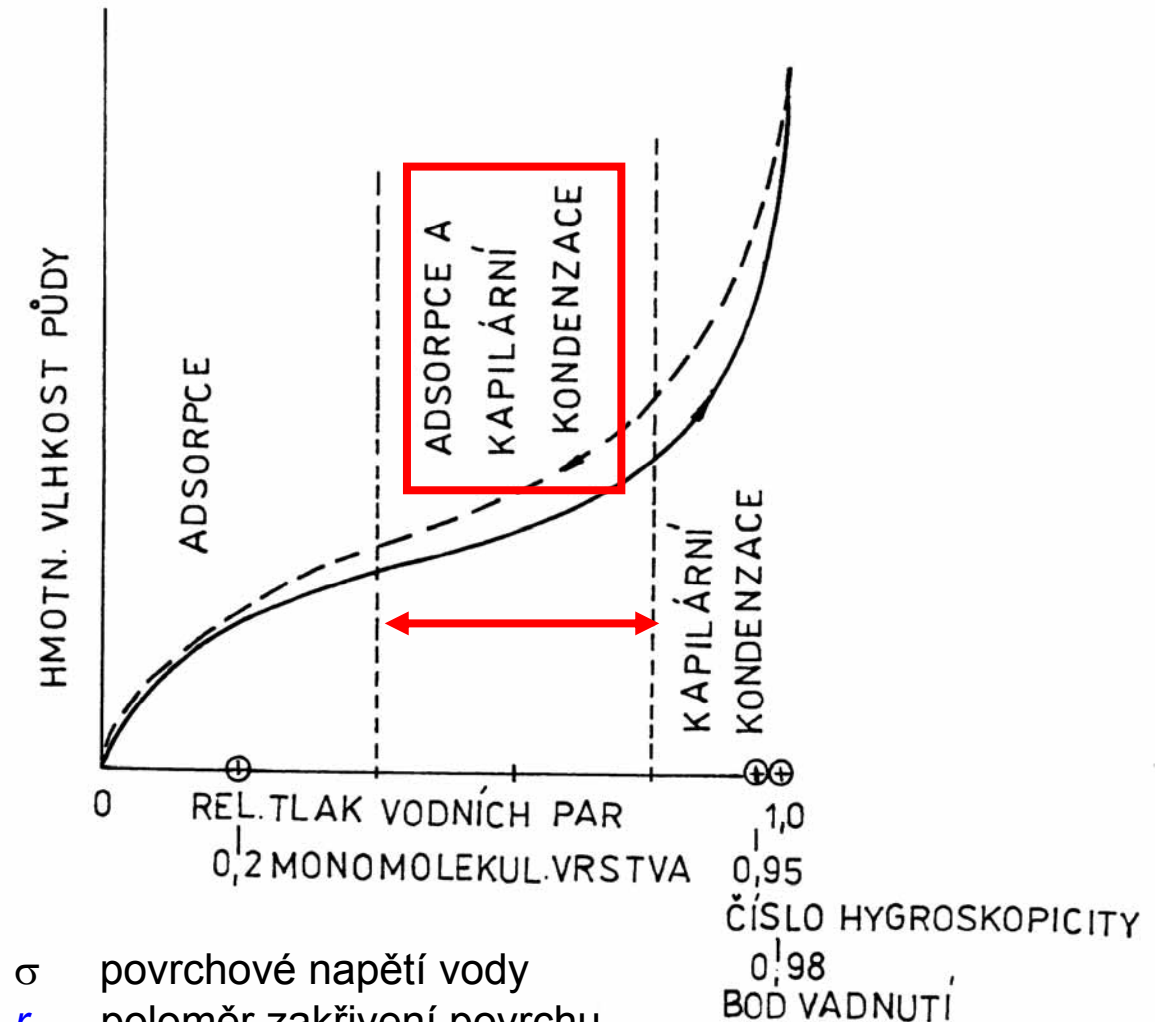
popisuje se Kelvinovou rovnicí

$$\ln p / p_0 = \frac{M}{RT} \cdot \frac{2\sigma}{r\rho_w} \cdot \cos \gamma$$

M ... je molekulová hmotnost vody při teplotě

T ... Teplota

R je plynová konstanta



σ povrchové napětí vody
 r poloměr zakřivení povrchu vody
 ρ_w hustota vody
 γ smáčecí úhel.

Adsorpční izoterma – charakteristické hodnoty

- Oblast kapilární kondenzace ...

$$0.8 < p/p_0 < 1$$

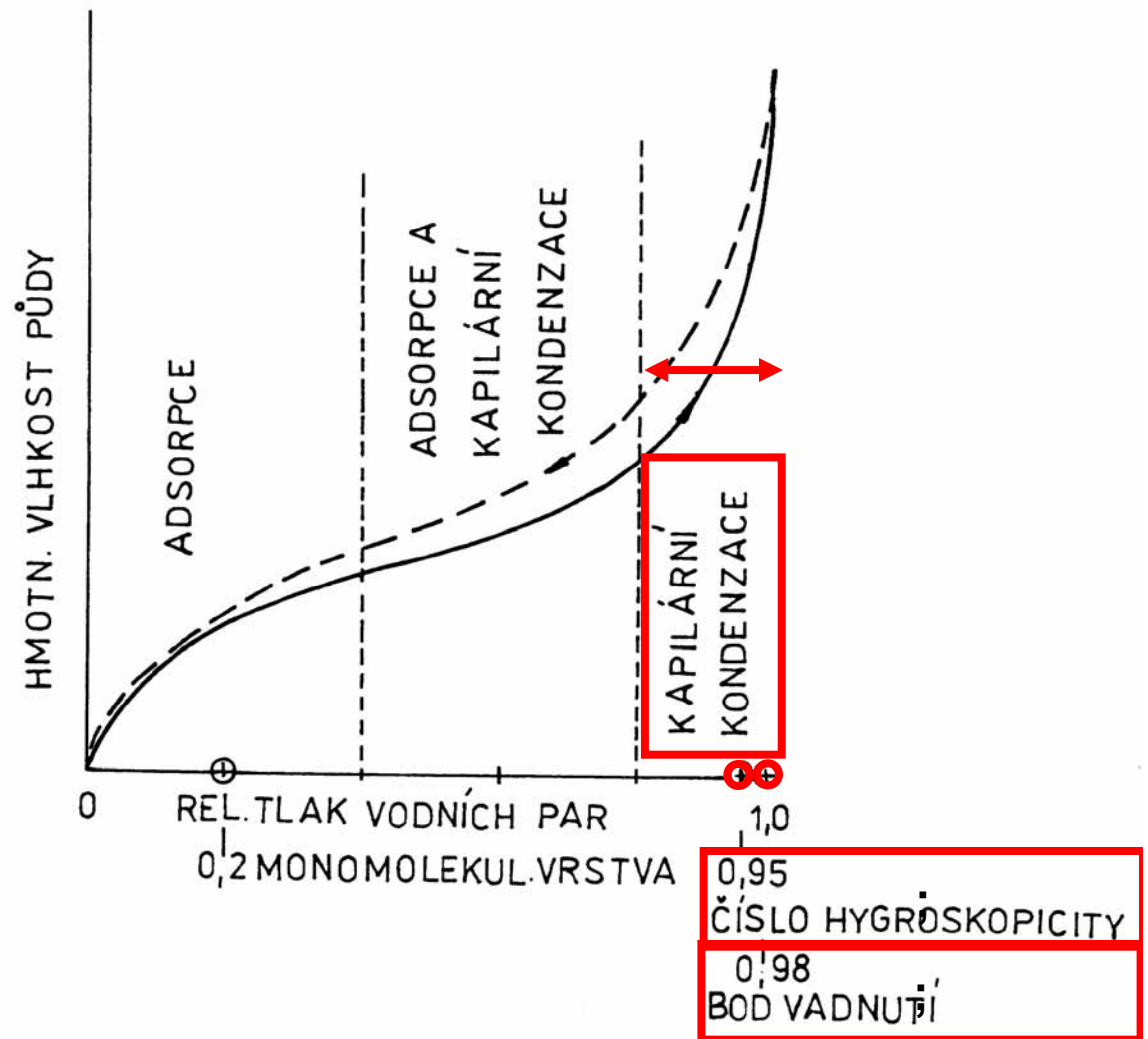
- Číslo hygroskopicity

$$p/p_0 = 0.95$$

- Bod vadnutí

$$p/p_0 = 0.98$$

hranice pro vodu
využitelnou kulturními
rostlinami.



Proč měřit půdní vlhkost

- **remediace, sanace:** vlhkost půdy je určujícím faktorem pro mobilitu a rychlost degradace znečišťujících látek
- **zemědělství:** okamžitý stav půdní vlhkosti je podkladem pro rozhodnutí o provádění závlahy nebo odvodnění
- **hydrologie:** zjišťování stavu zásoby vody v povodí, předpověď povodní

Slide 8

M.S.1

V rovnovážném stavu jsou si potenciály rovny ve všech bodech systému. Gradient potenciálu je roven nule.

Michal Snehota; 26.10.2005

Měření vlhkosti - metody

Přímá metoda

Gravimetrická metoda

Metody s měřením potenciálu

Odporová metoda

Tenzometrická metoda

Elektromagnetické metody

Kapacitní metody (také FDR)

Reflektrometrické metody TDR

Radiometrické metody

Neutronová sonda

Gamaskopická metoda

Metody dálkového průzkumu Země

Gravimetrická metoda

Přímá metoda, měří se přímo **hmotnost vody** ve vzorku

– Gravimetrická vlhkost w

$$w = (m - m_s) / m_s \quad [-]$$

kde m ... hmotnost měřeného vzorku

m_s ... hmotnost vysušeného vzorku

– Objemová vlhkost θ

$$\theta = \frac{V_w}{V} = \frac{m_w}{\rho_w V} \approx \frac{(m - m_s)}{1 \text{ g/cm}^3 V} \quad [-]$$

kde V objem vzorku

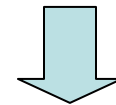
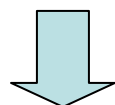
ρ_w ... hustota vody 1 g/cm^3

Gravimetrická metoda - postup

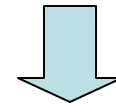
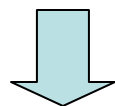
Porušený vzorek

Neporušený vzorek objemu V

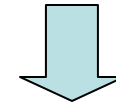
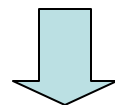
Zjištění hmotnosti vlhkého půdního vzorku m vážením



Vysušení při 105° C (60 ° C pro půdy s vysokým obsahem organické hmoty)



Zjištění hmotnosti vysušené půdy m_s



Výpočet w

Výpočet θ

Gravimetrická metoda - vlastnosti

Výhody:

- Přesná metoda, slouží jako kalibrace pro všechny ostatní metody
- Není závislá na druhu půdy
- Nenáročná na vybavení, jednoduchý výpočet

Nevýhody:

- Destruktivní metoda. Při odběru vzorku dojde k porušení půdního profilu a měření nelze ve stejném místě zopakovat
- Nelze automatizovat
- Časově náročná (cca 24h)

Odporová metoda

Nejčastěji sádrové bločky

*Princip: elektrický odpor pórovitého prostředí se mění **s vlhkostí**. Po instalaci se vyrovná **sací tlak** v půdě a porézním materiálu čidla. **Sacímu tlaku** odpovídá určitá **vlhkost** (s účinkem hystereze). Kalibrací lze získat vztah **vlhkost půdy vs. el. odpor**.*

Výhody: relativně nízká cena čidel a přístroje

Nevýhody: malá přesnost (ideálně 2%), pomalá reakční doba



Tenzometrická metoda

*Princip: měří se sací **tlaková výška** **tenzometrem**, přepočet na vlhkost použitím **retenční čáry***

Výhody:

- relativně nízká cena vybavení
- snadná automatizace
- poměrně dobrá rychlost reakce (1-3h)

Nevýhody:

- vliv hystereze
- nutnost zjištění retenční čáry (pro místo měření)
- omezený rozsah (do cca 800 cm tlakové výšky)



Kapacitní metody (také FDR)

Princip: měří se *elektrická kapacitní reaktance* půdy mezi dvěma elektrodami. Z kapacitní reaktance se odvozuje *dielektrická konstanta* a následně *vlhkost*
- *princip kondenzátoru*

Vybavení:

- Sondy umístěny ve výpažnici např. **EnviroScan (Sentek)** nebo **Adcon C-probe**



- Trvale instalovány v půdě např. **ECHO (Decagon)**



- Jiné typy jsou přenosné např. Theta probe (**Delta T Devices**)



Kapacitní metody (také FDR)

Výhody kapacitních metod:

- Dobrá citlivost 1-3%
- Relativně nízká cena
- Snadno automatizovatelné měření

Nevýhody kapacitních metod:

- Nutnost kalibrace pro konkrétní půdu – bez kalibrace značně nepřesné
- Závislost výsledku měření na teplotě
- Potřeba kalibrace v půdách s vysokým obsahem jílu a organické hmoty

Reflektometrie v časové doméně (Time Domain Reflectometry) TDR

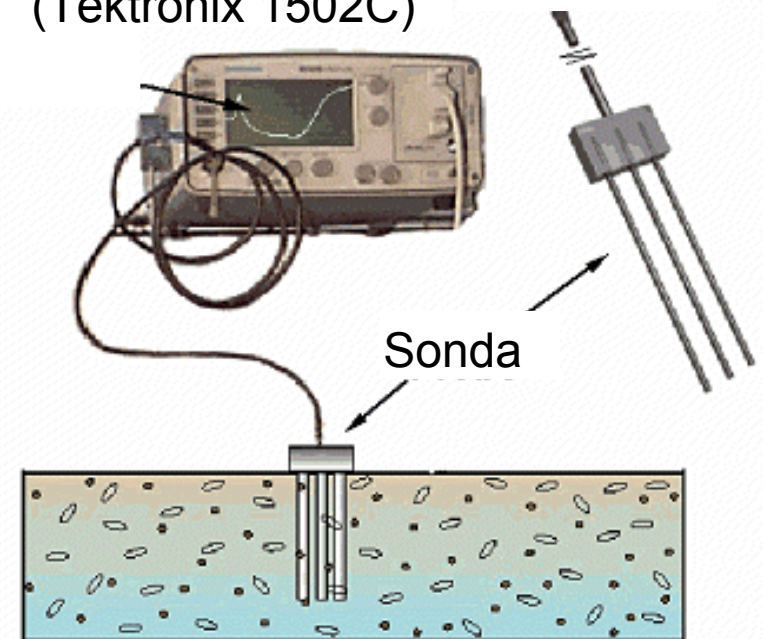
*Princip: měří se **rychlost postupu** elektromagnetického pulsu (MHz, GHz) **podél vodiče** uloženého v půdě. Rychlost postupu je zjištěna z průběhu **signálu odraženého koncem vodiče**. Z rychlosti postupu je vyhodnocena **dielektrická konstanta a následně vlhkost**.*

Vybavení:

- Přístroj (reflektometr) kombinující generátor pulsů a osciloskop. Přístroj původně vyvinutý pro zjištění polohy poruchy kabelů
- Sondy (dvouvodičové, třívodičové) obvykle min 15 – 30 cm dlouhé

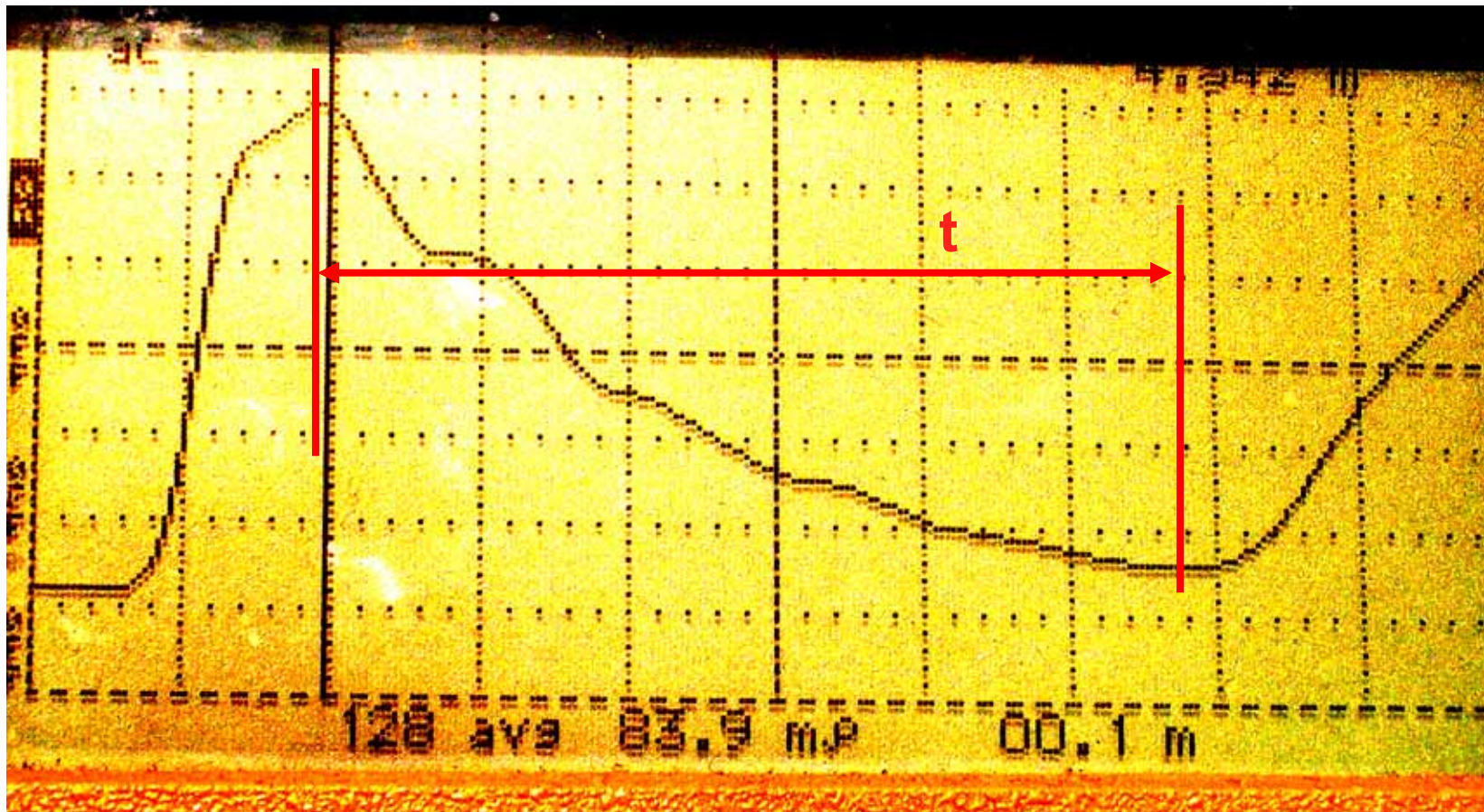
Reflektometr

(Tektronix 1502C)



Reflektometrie v časové doméně (Time Domain Reflectometry) TDR

Tvar odraženého TDR signálu



Reflektometrie v časové doméně (Time Domain Reflectometry) TDR

Dielektrická konstanta

$$\varepsilon = \left(\frac{c \cdot t}{2L} \right)^2$$

kde:

**c ... je rychlost světla
($3 \cdot 10^8$ m/s)**

t ... čas postupu pulsu

**L ... délka sondy v
půdě**

Dielektrická konstanta pro:

vzduch = 1

minerály = 3 – 5

vodu = 80

**(Semi)empirický vztah
mezi vlhkostí a ε
(Sumner, 1998):**

$$\varepsilon = \left(\frac{\varepsilon - (2 - \theta)}{8} \right)^2$$

Reflektometrie v časové doméně (Time Domain Reflectometry) TDR

V současnosti používané
přístroje:



Trase

firma: Soil
Moisture



Tektronix 1502C
firma: Tektronix



TDR100 firma: Campbell Sci.

Další např. na

http://www.specmeters.com/Soil_Moisture/TDR_300_Soil_Moisture_Probe.html

Reflektometrie v časové doméně (Time Domain Reflectometry) TDR

Použití TDR v terénu



Sondy



Reflektometrie v časové doméně (Time Domain Reflectometry) TDR

Výhody TDR:

- Vysoká přesnost 1 – 2%
- Pro některé půdy není třeba kalibrovat
- Snadno opakovatelné a automatizovatelné měření

Nevýhody TDR:

- Vysoká cena vybavení – velmi přesná elektronika
- Omezená použitelnost v půdách s vysokou koncentrací solí
- Potřeba kalibrace v půdách s vysokým obsahem jílu a organické hmoty

Time domain transmission TDT

Princip: podobný TDR, sondy nejsou zakončeny volným koncem s odrazem pulsu. Puls je *vysílán* do vodiče sondy, prostupuje okolním půdním prostředím, *je zpomalen a transformován a přijat a digitalizován na opačném konci vodiče*. V některých konstrukcích dochází k několika oběhům signálu sondou. Z tvaru signálu je vypočítána *dielektrická konstanta* následně *vlhkost půdy*.

Typy sond:

VIRRID



ACCLIMA
DIGITAL TDT

www.acclima.com



AQUAFLEX

www.streatsahead.com



Time domain transmission TDT

Výhody TDT:

- Přesnost o málo menší než u TDR
- Pro některé půdy není třeba kalibrovat
- Snadno opakovatelné a automatizovatelné měření
- Velký objem měřené oblasti – **Může být i nevýhodou**

Nevýhody TDT:

- **Cena nižší než pro systém TDR – jednodušší elektronika**
- **Omezená použitelnost v půdách s vysokou koncentrací solí**
- **Potřeba kalibrace v půdách s vysokým obsahem jílu a organické hmoty**

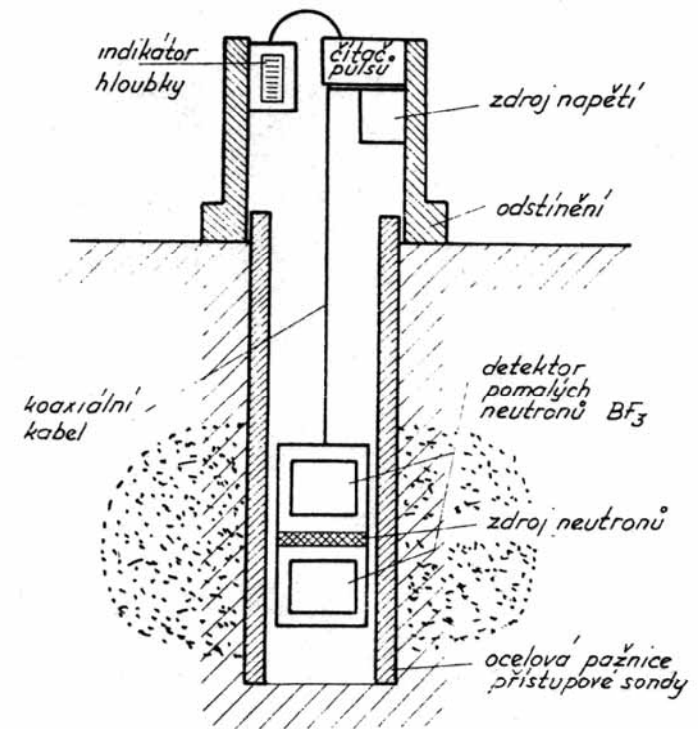
Neutronová metoda

Princip: měří se *zpomalení* rychlých neutronů

Zdroj emituje rychlé neutrony o energii v jednotkách MeV, které při “srážkách” s (především) jádry vodíku snižují svou energii na úroveň termálních neutronů (setiny, tisíce KeV).

Použití: především v terénu, měření z povrchu nebo ve vrtu s výpažnicí

Dosah měření: suchá půda až ~70cm, vlhká půda ~15 cm



Neutronová metoda

Vybavení:

- Neutronová sonda

Zdroj záření Am-Be

[Campbell Pacific Nuclear International](http://www.campbellnuclear.com)



Troxler <http://www.troxlerlabs.com/>

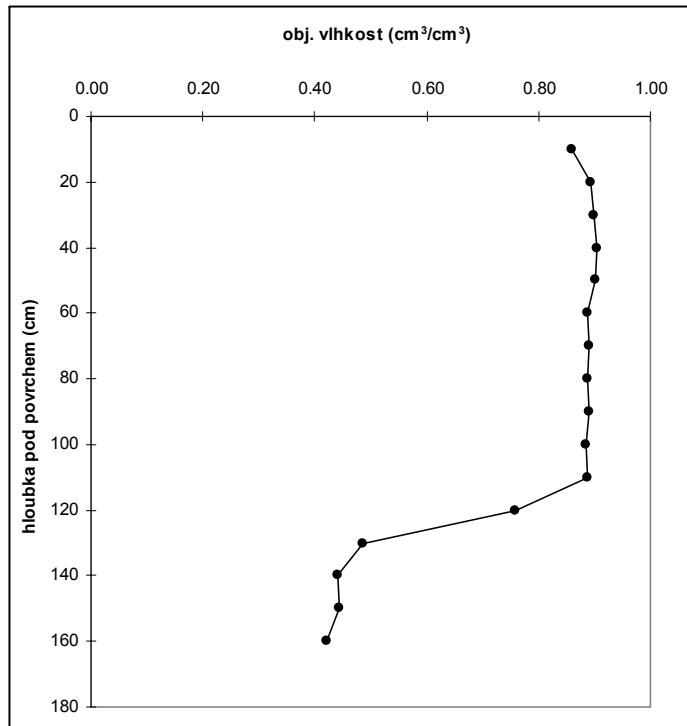
Kalibrace
neutronové sondy
ve vodě



Neutronová metoda

Výhody :

- **Vysoká přesnost**
- **Měření vertikálních profilů vlhkosti**
- **Možnost automatizovaného měření v jedné lokalitě**



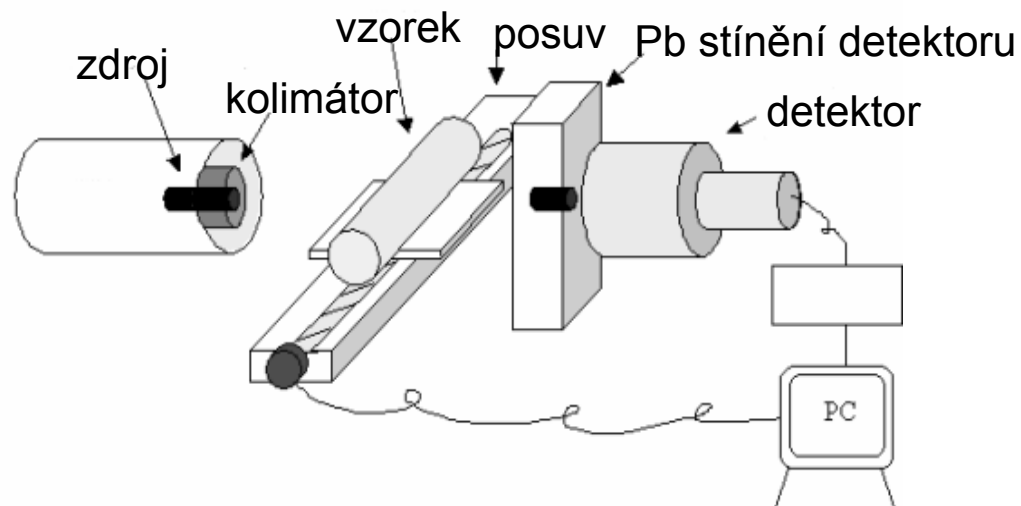
Nevýhody:

- **Vysoká cena vybavení (srovnatelná s TDR)**
- **Nutnost dodržování zásad s radiaktivním zářičem**
- **Změna oblasti měření v závislosti na vlhkosti půdy**
- **Nutno kalibrovat pro specifickou půdu**

Gamaskopická metoda

*Princip: měří se **útlum** (absorpce a rozptyl) γ záření při průchodu půdním vzorkem. Útlum závisí na **hustotě prostředí**. Při konstantní objemové hmotnosti změny útlumu závisí pouze na **změnách vlhkosti**. Zdroj záření Am^{241} .*

Využití v laboratoři, měření vlhkostních profilů na vzorcích malého průměru



Gamaskopická metoda

Výhody :

- Vysoká přesnost
- Měření vertikálních profilů vlhkosti s vysokým rozlišením
- Možnost opakovaného automatizovaného měření
- Možnost měření objemové hmotnosti (suchého vzorku)

Nevýhody:

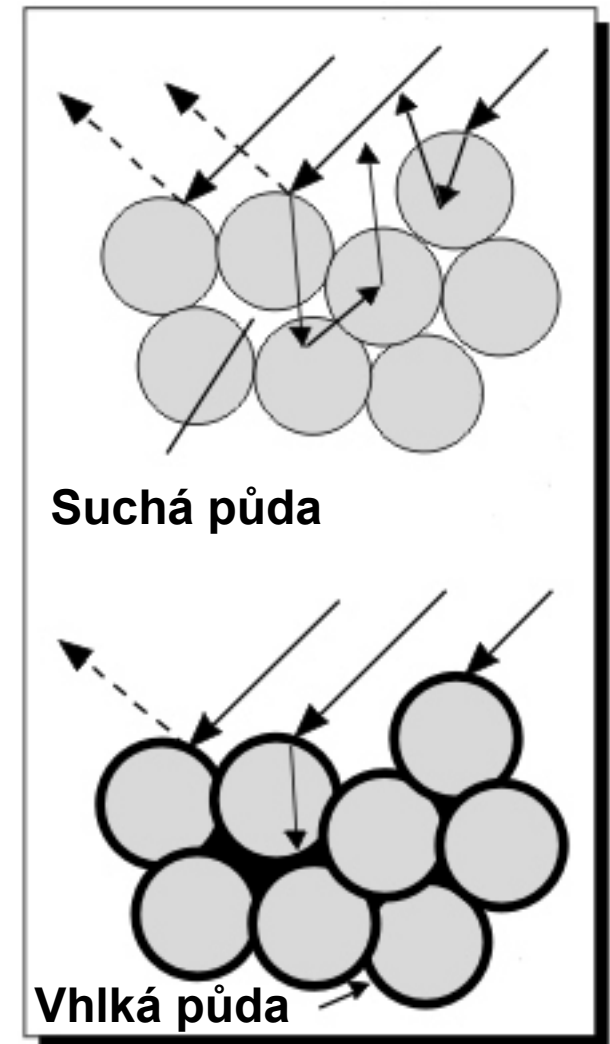
- Vysoká cena vybavení (srovnatelná s TDR)
- Nutnost dodržování zásad s radiaktivním zářičem
- Je nezbytné znát objemovou hmotnost zkoumané půdy

Metody dálkového průzkumu (Remote sensing)

Rozvíjející se metoda

Princip: měření prováděná senzory umístěnými v bodu který není v kontaktu s půdou (družice, letadlo, stožár). Využívá se několik technik:

1) Snímkování ve **viditelné** a **IR** oblasti spektra: se zvýšením vlhkosti se snižuje odrazivost (tmavší obraz)



Metody dálkového průzkumu (Remote sensing)

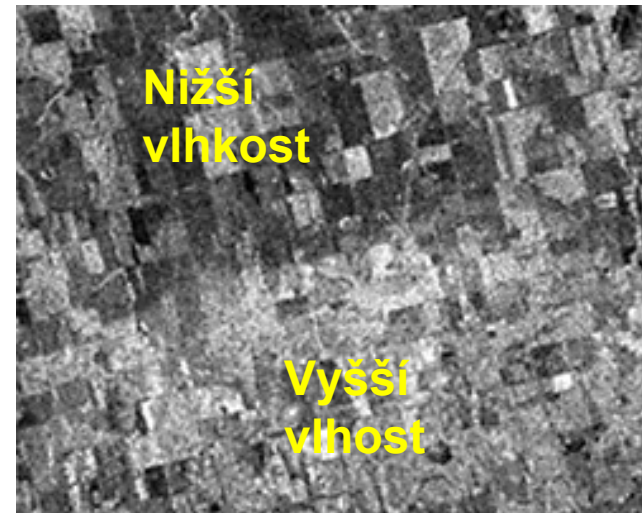
2) V **mikrovlnné oblasti** $\lambda =$
1mm až 1m (frekvence GHz)
jsou optické charakteristiky
funkcí **dielektrické konstanty** ϵ .

Platí:

**vyšší ϵ = vyšší vlhkost = vyšší
odrazivost.** Odraz obsahuje
informaci do **hloubky**
odpovídající λ

Používají se pasivní i aktivní
systémy

ERS-1 satelit



Zdroj V. Vanderbilt www.cstars.ucdavis.edu



Slide 31

M&H1

$$\lambda = c/f = 300\,000\,000/f$$

M&H; 2.11.2005

Metody dálkového průzkumu (Remote sensing)

Výhody :

- **Prostorová informace**
- **Měření pokrývá velkou plochu**

Nevýhody:

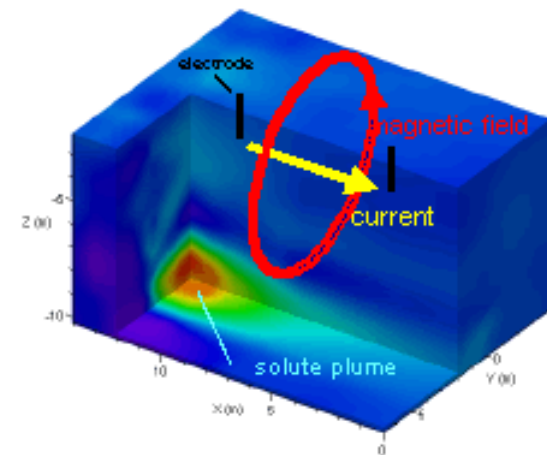
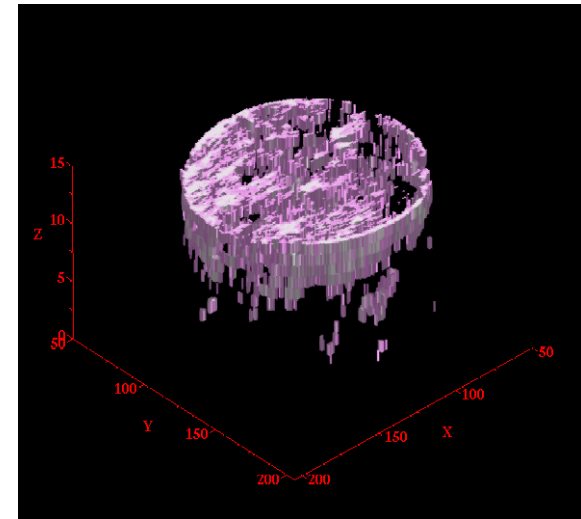
- **Velmi vysoká cena vybavení**
- **Velmi komplexní systém**
- **Měří se pouze vlhkost svrchní vrstvy půdy (několik cm)**
- **Vliv vlhkosti vegetace**

Vyvíjející se metody prostorového měření vlhkosti

Cílem je získání prostorové informace o distribuci vlhkosti ve vzorcích a především v terénu.

Nadějné metody:

- ground penetrating radar (GPR)
- multielektrodová odporová tomografie (ERT)
- spektrální indukovaná polarizace (SIP)
- počítačová tomografie (CT)
- nukleární magnetická rezonance (MRI)
- a další.....



Použitá literatura

Kutílek, M., Kuráž, V., Císlerová, M. Hydropedologie, skriptum ČVUT 1994

Císlerová, M. Inženýrská hydropedologie, skriptum ČVUT 2001

Císlerová M., Vogel T. Transportní procesy, skriptum ČVUT

<http://www.sowacs.com/sensors/> web věnovaný sensorům vlhkosti

M. E Sumner, Handbook of Soil Science 1998

<http://edis.ifas.ufl.edu/AE266> Field devices for monitoring soil water content.
University of Florida

*Přednášky kurzu Hydropedologie vznikly v autorském kolektivu:
Ing. Martin Šanda, PhD a Ing. Michal Sněhota, PhD
Kat. hydromeliorací a krajinného inženýrství, F. stavební ČVUT*