

Sít' výzkumných institucí a podniků pro infrastrukturu

Forschungs- und Unternehmensnetz für Infrastrukturen

RENI-100686680

Otevřené síťové kolokvium

Využití přirozeného neutronového pozadí k určení vlhkosti půdy

Netzwerk-Kolloquium

Nutzung des natürlichen Neutronenhintergrundes zur Bestimmung der Bodenfeuchte

3. března 2025, Albertov 6, Praha 2 a online

3. März 2025, Albertov 6, Prag 2 und online





CTU
CZECH TECHNICAL
UNIVERSITY
IN PRAGUE



DEPARTMENT OF LANDSCAPE
WATER CONSERVATION

Interreg



Kofinanciert von
der Europäischen Union
Spolufinancováno
Evropskou unií

Sachsen – Tschechien | Česko – Sasko

VYUŽITÍ PŘIROZENÉHO NEUTRONOVÉHO POZADÍ K URČENÍ VLHKOSTI PŮDY

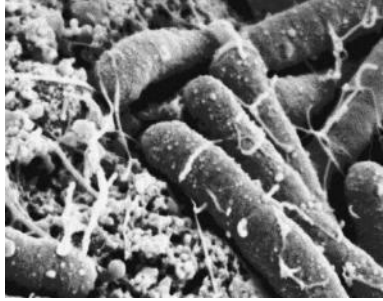
(ZKUŠENOSTI Z POVODÍ NUČICE)

David Zumr

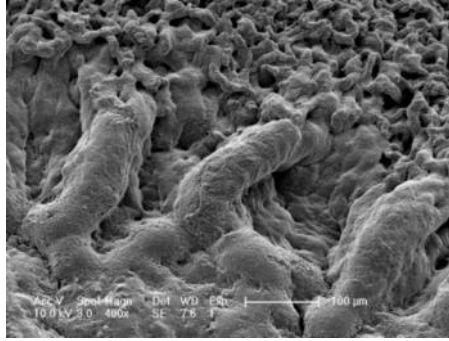


3.3.2025, PŘF UK

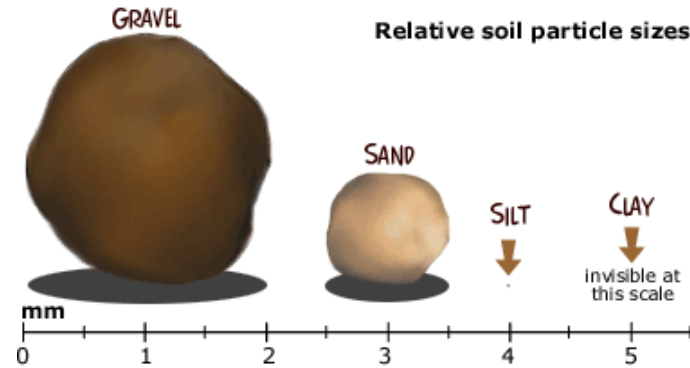
Komplikované



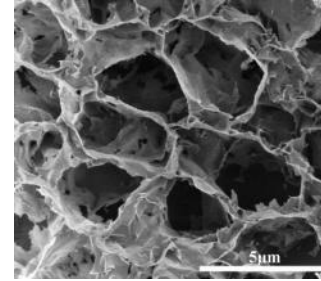
(Sandra Silvers, USDA-ARS)



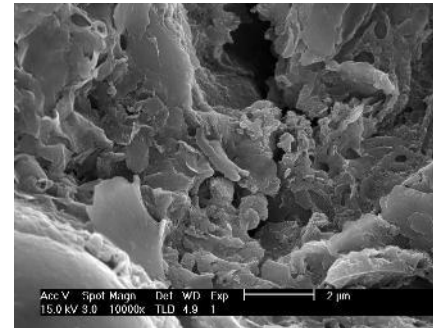
(Kolodkin Gal lab, weizmann.ac.il)



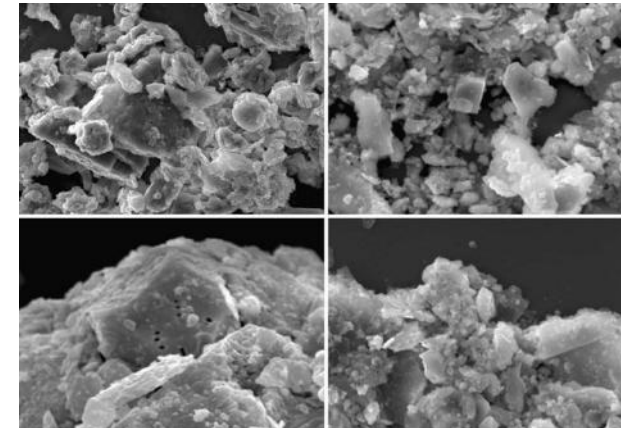
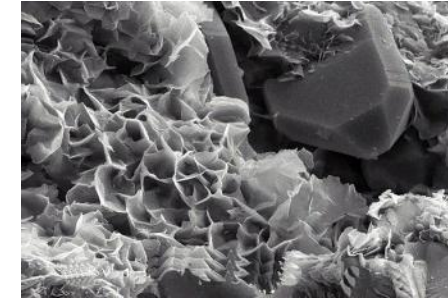
půdní



prostředí



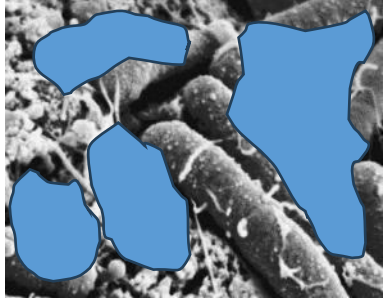
(Credit: SoilNet)



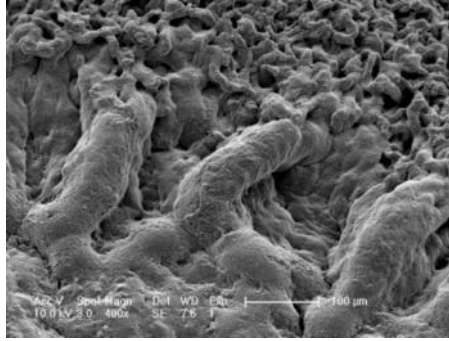
(Credit: Juan Carlos Fernández-Caliani et al., 2009)



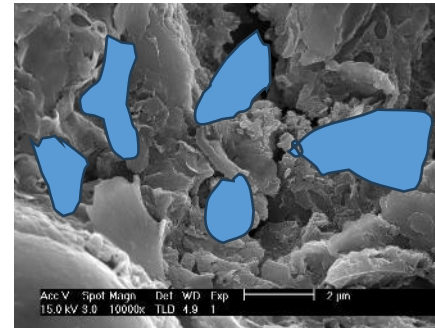
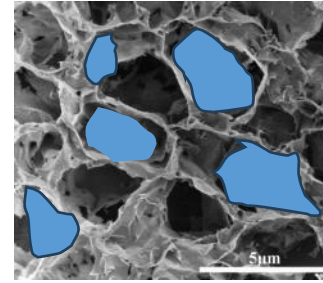
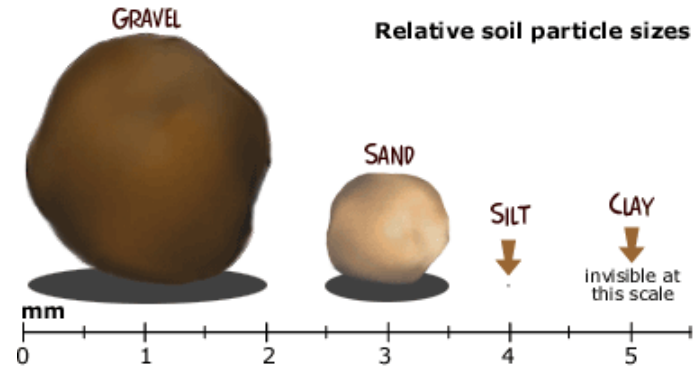
(Credit: Geisen et al., 2019)



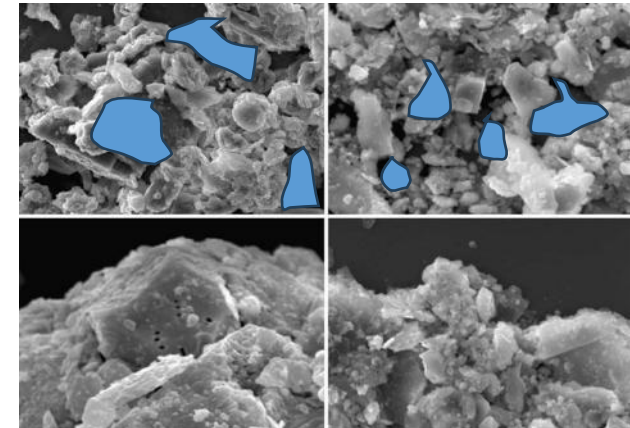
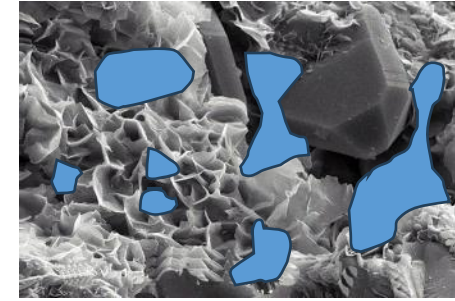
(Sandra Silvers, USDA-ARS)



(Kolodkin Gal lab, weizmann.ac.il)



(Credit: SoilNet)

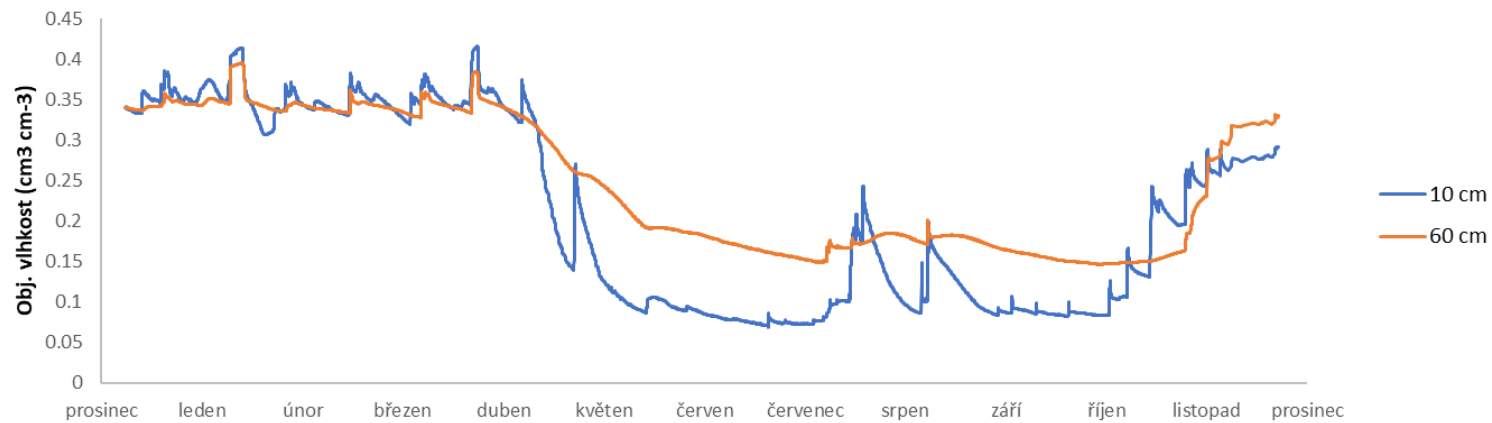


(Credit: Juan Carlos Fernández-Caliani et al., 2009)

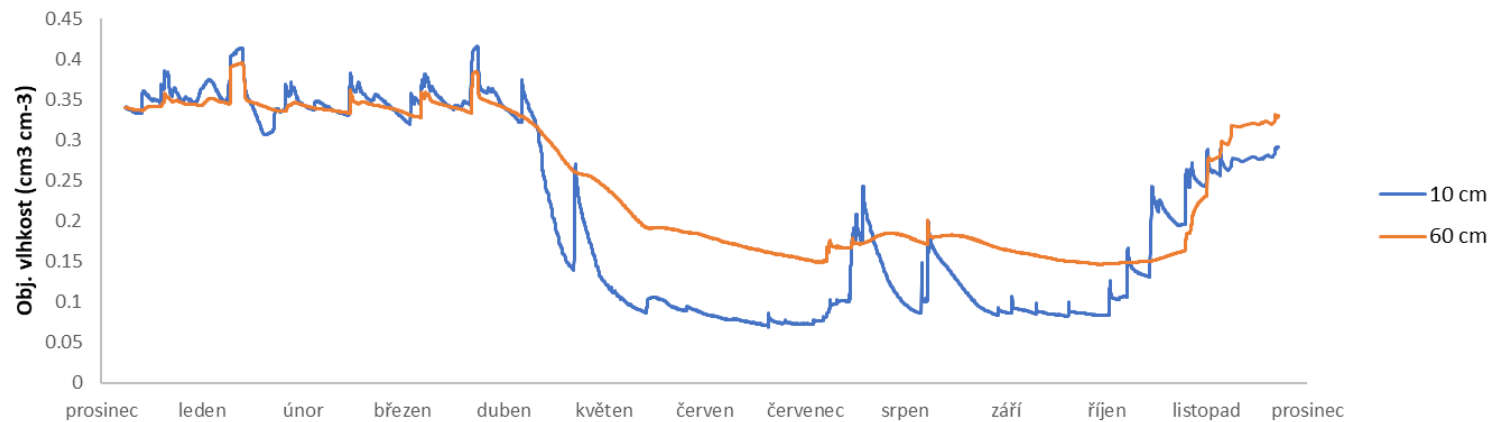


(Credit: Geisen et al., 2019)

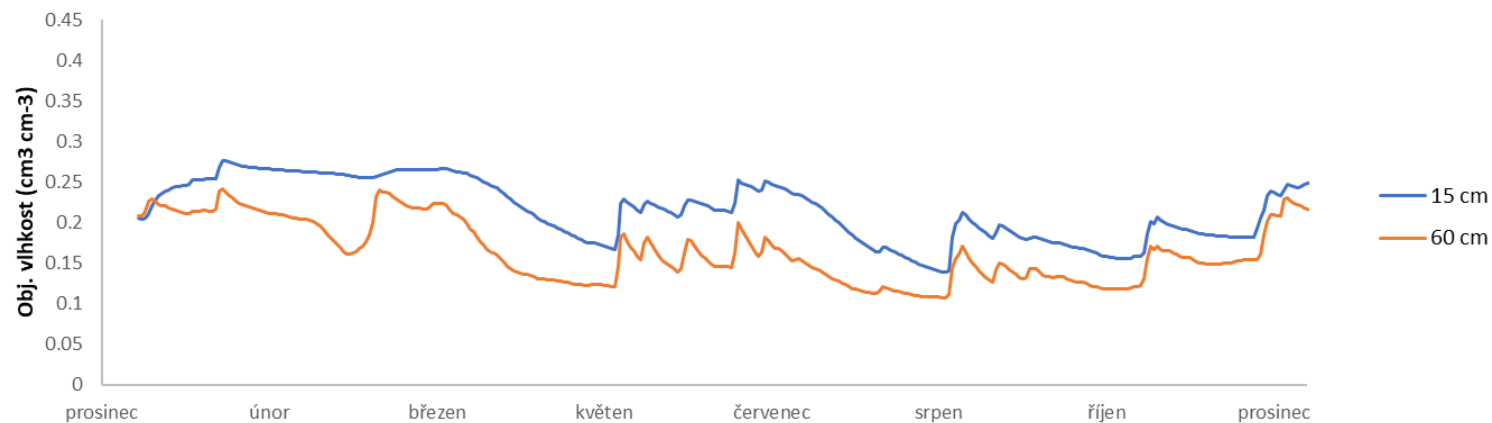
Nučice - zemědělské povodí



Nučice - zemědělské povodí



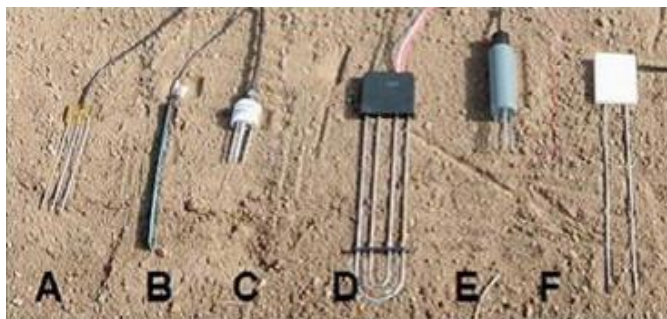
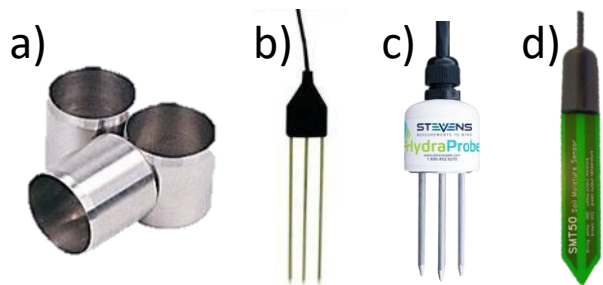
Liz - horské povodí



(data: Václav Šípek, UH AV ČR)

Měření půdní vlhkosti

- Gravimetrická metoda (referenční)
- Relativní dielektrická permitivita (TDR, FDR, TDT)



(Romano, JH, 2014)

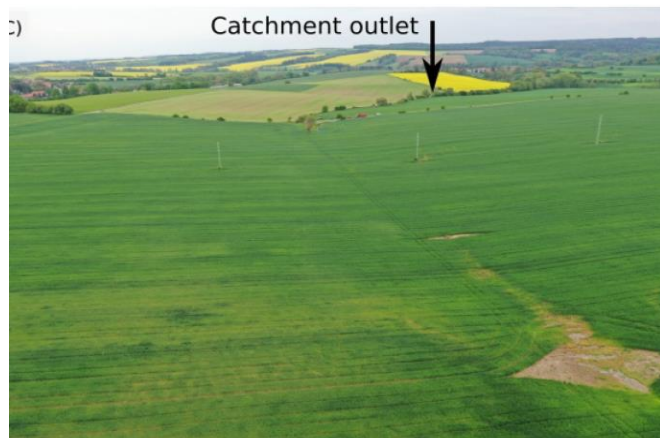
Instalace čidel v terénu

- Horizontálně do vybraných hloubek
- Problematické (nemožné) měření vlhkosti u povrchu (problematické srovnání s DPZ)
- Pro reprezentativní data nutno mnoho čidel (bodový charakter měření)
- Destruktivní, porušený půdní profil
- Korekce na teplotu, salinitu
- Ignoruje zmrzlou vodu
- Praktické problémy



Experimentální povodí Nučice

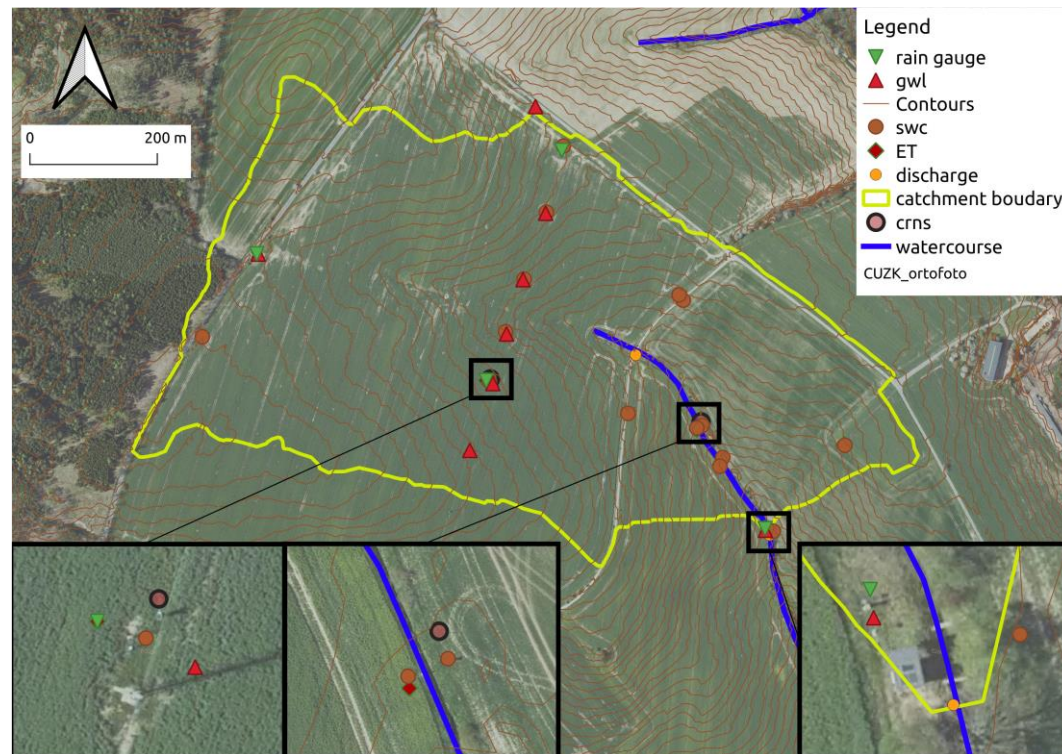
- Založeno 2011/12
- u Kostelce nad Černými lesy
- Typické intenzivní zemědělství
- 50 ha, sklony do 12 %, 96 % orná půda



Vybavení

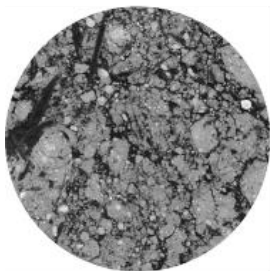
- Standardní meteorologické stanice
- Průtok v uzávěrovém profilu
- Odnos sedimentu
- Vlhkost a sací tlak v půdním profilu
- Hladina podzemní vody
- + hydraulické charakteristiky, DPZ, izotopová hydrologie, různé experimenty

Li, T., Jeřábek, J., Noreika, N., Dostál, T., & Zumr, D. (2021). An overview of hydrometeorological datasets from a small agricultural catchment (Nučice) in the Czech Republic. *Hydrological Processes*, 35(2), e14042.

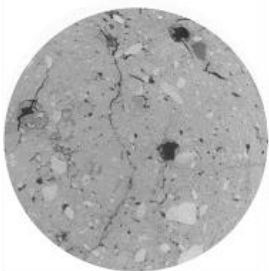


Půdní profil

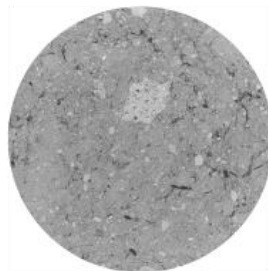
- Zhutnělé podorničí
- Jasně rozhraní mezi orníci a nekypřenou půdou



Topsoil (-5 cm)



Subsoil (-35 cm)



Wheel track (-5 cm)



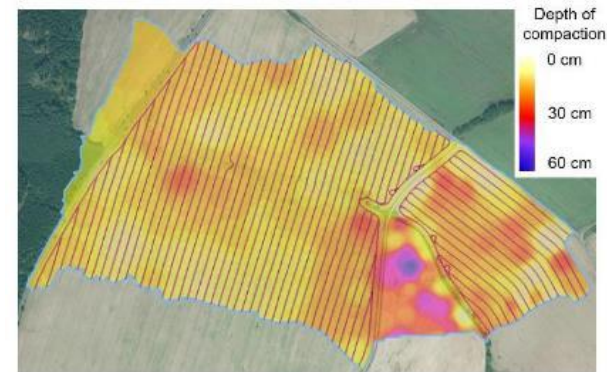
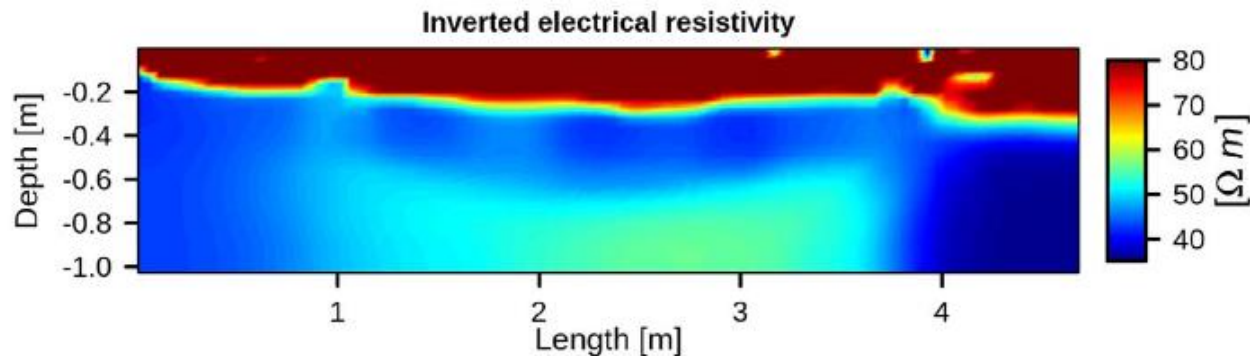
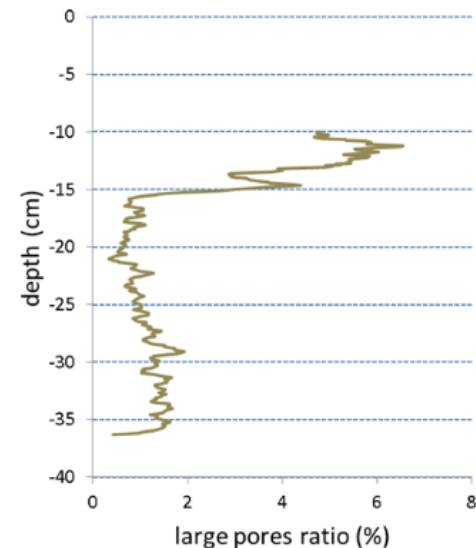
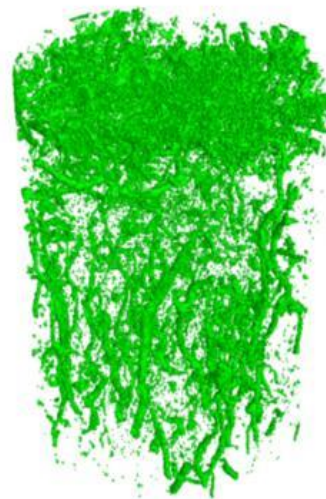
Zumr, D., Jeřábek, et al. (2019). Estimates of tillage and rainfall effects on unsaturated hydraulic conductivity in a small central European agricultural catchment. *Water*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/w11040740>

Zhutnělé podorníčí

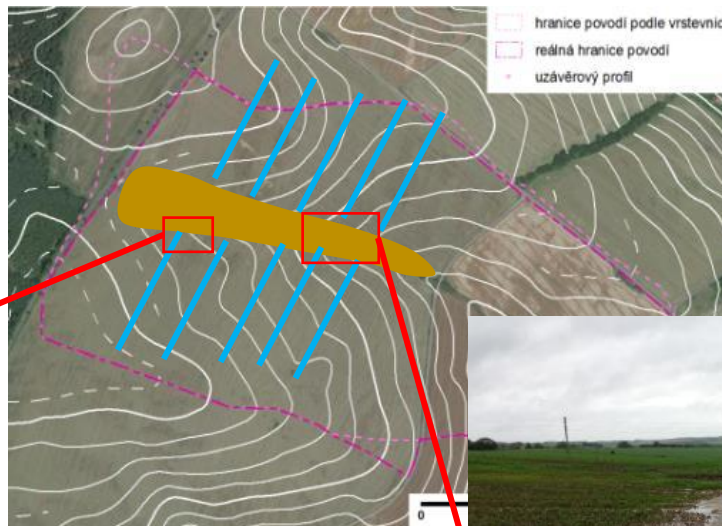
- Elektrická rezistivní tomografie
- CT scanning
- Mechanical resistance to penetration

Jeřábek, J., Zumr D., & Dostál, T. (2017). Identifying the plough pan position on cultivated soils by measurements of electrical resistivity and penetration resistance. *Soil & Tillage Research*, 174.

Jeřábek, J., & Zumr, D. (2021). Geophysical survey as a tool to reveal subsurface stratification at a small agriculture catchment. *CIVIL ENGINEERING JOURNAL*, 30(3), 766–778. <https://doi.org/10.14311/CEJ.2021.03.0059>

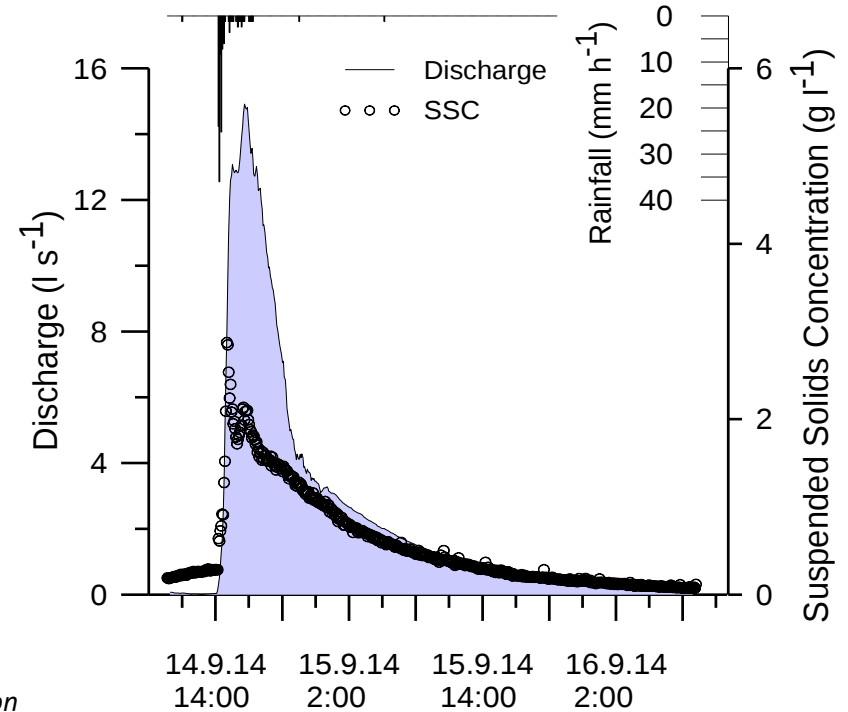


Formování rychlého odtoku



Zumr, D., Dostál, T., & Devátý, J. (2015). Identification of prevailing storm runoff generation mechanisms in an intensively cultivated catchment. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(3). <https://doi.org/10.1515/johh-2015-0022>

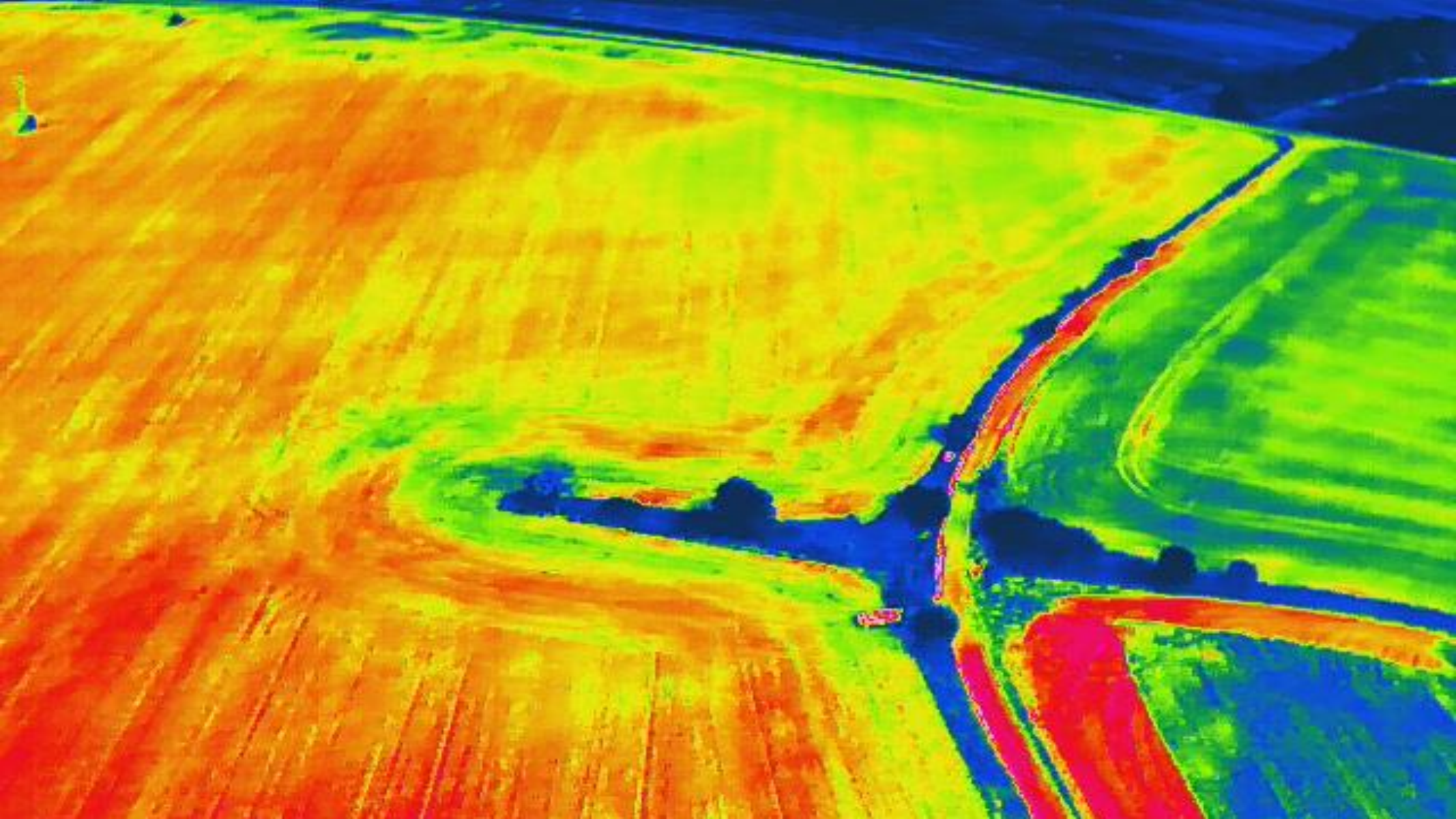
Formování rychlého odtoku



Zumr, D., Dostál, T., & Devátý, J. (2015). Identification of prevailing storm runoff generation mechanisms in an intensively cultivated catchment. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 63(3). <https://doi.org/10.1515/johh-2015-0022>







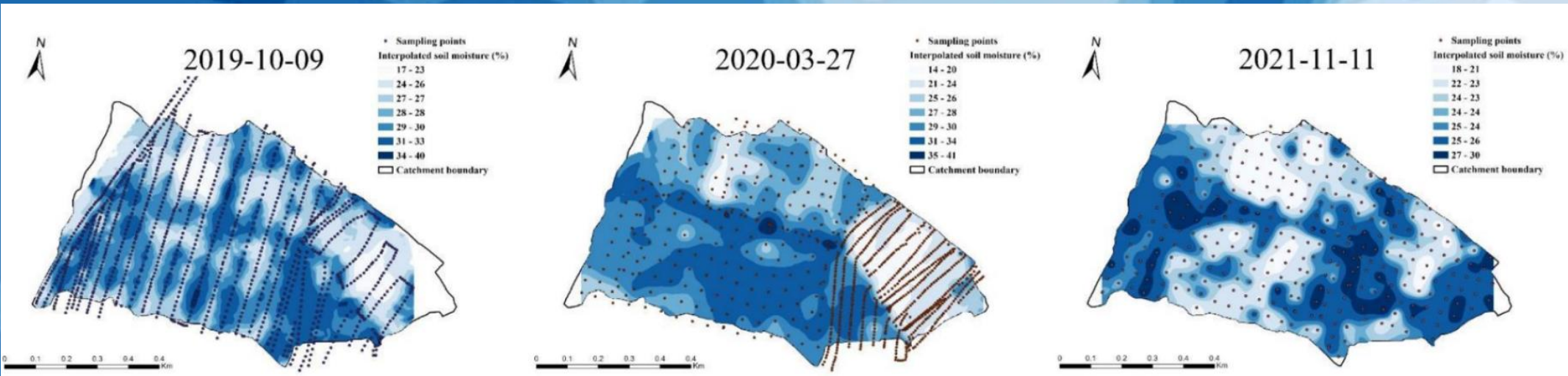
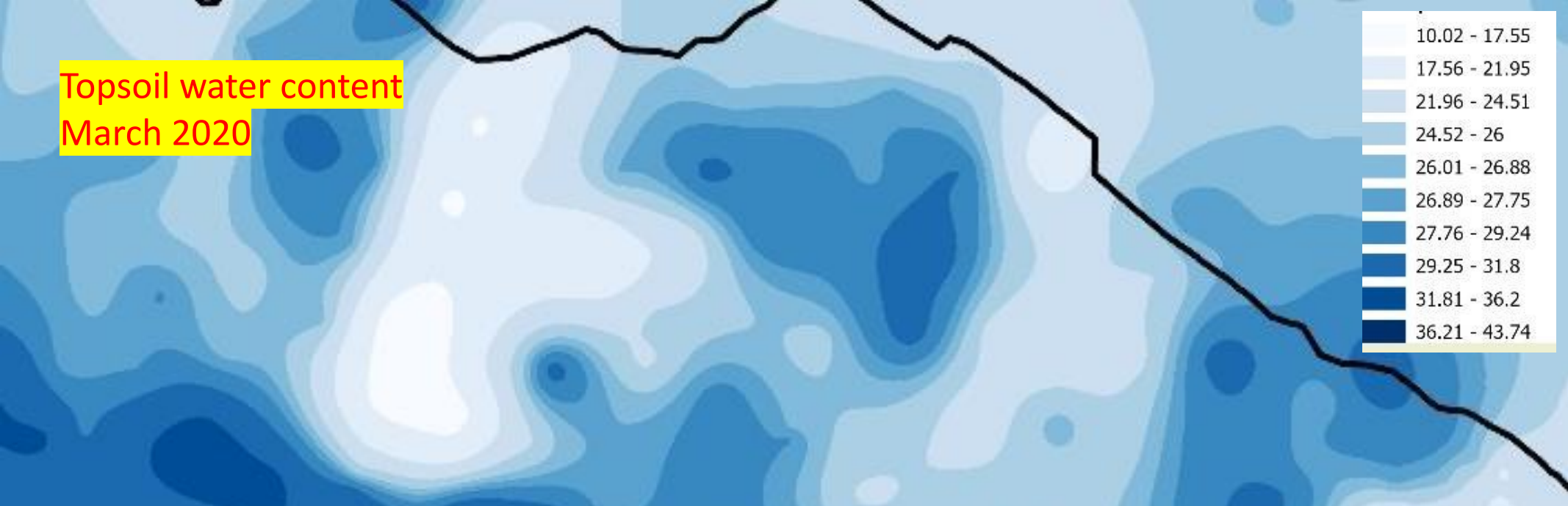
Topsoil water content
October 2019



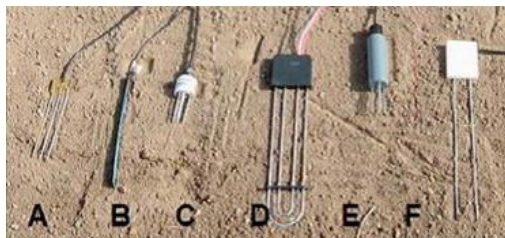
Topsoil water content
March 2020



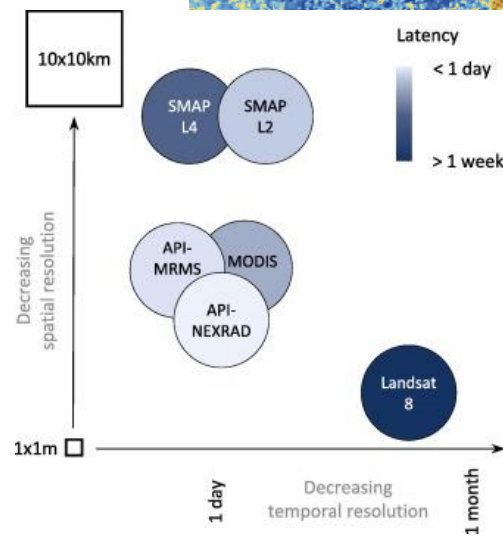
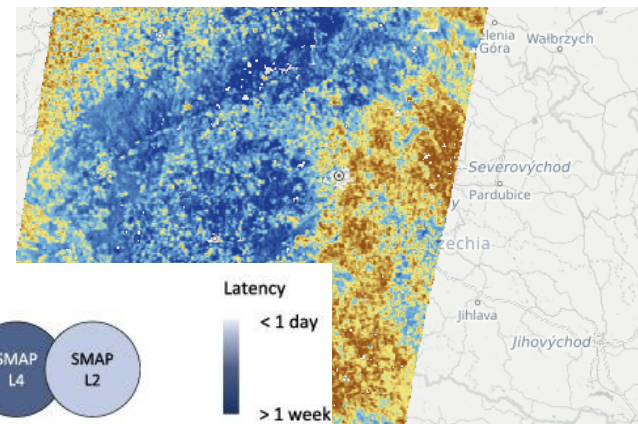
Topsoil water content
March 2020



Měření půdní vlhkosti na různých měřítkách



(Romano, JH, 2014)



(Schoener & Stone, JH, 2020)

bodové

Pozemek / pole

Komplexní část
krajiny

dm³

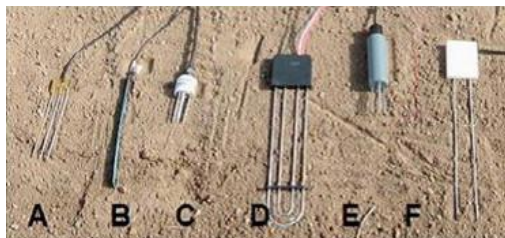


~ ha



km²

Měření půdní vlhkosti na různých měřítkách



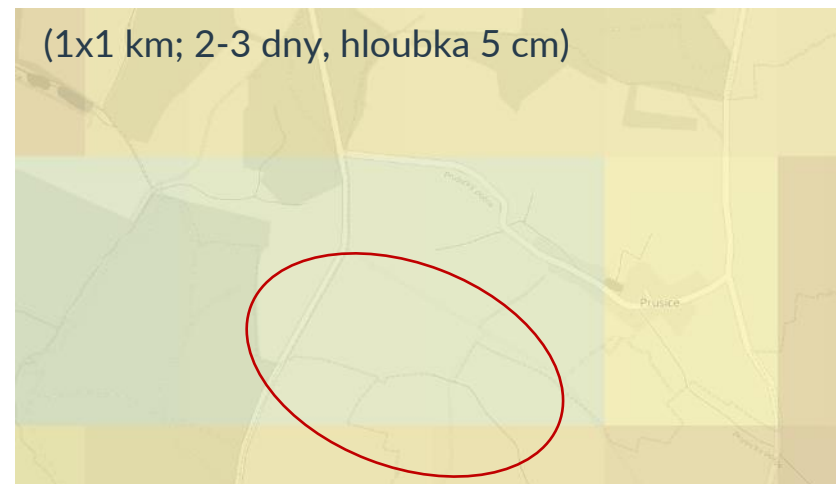
(Romano, JH, 2014)

Cosmic rays
neutrons
sensing



Copernicus Land Monitoring Service (Sentinel-1)

(1x1 km; 2-3 dny, hloubka 5 cm)



bodové

dm³



Pozemek / pole

~ ha



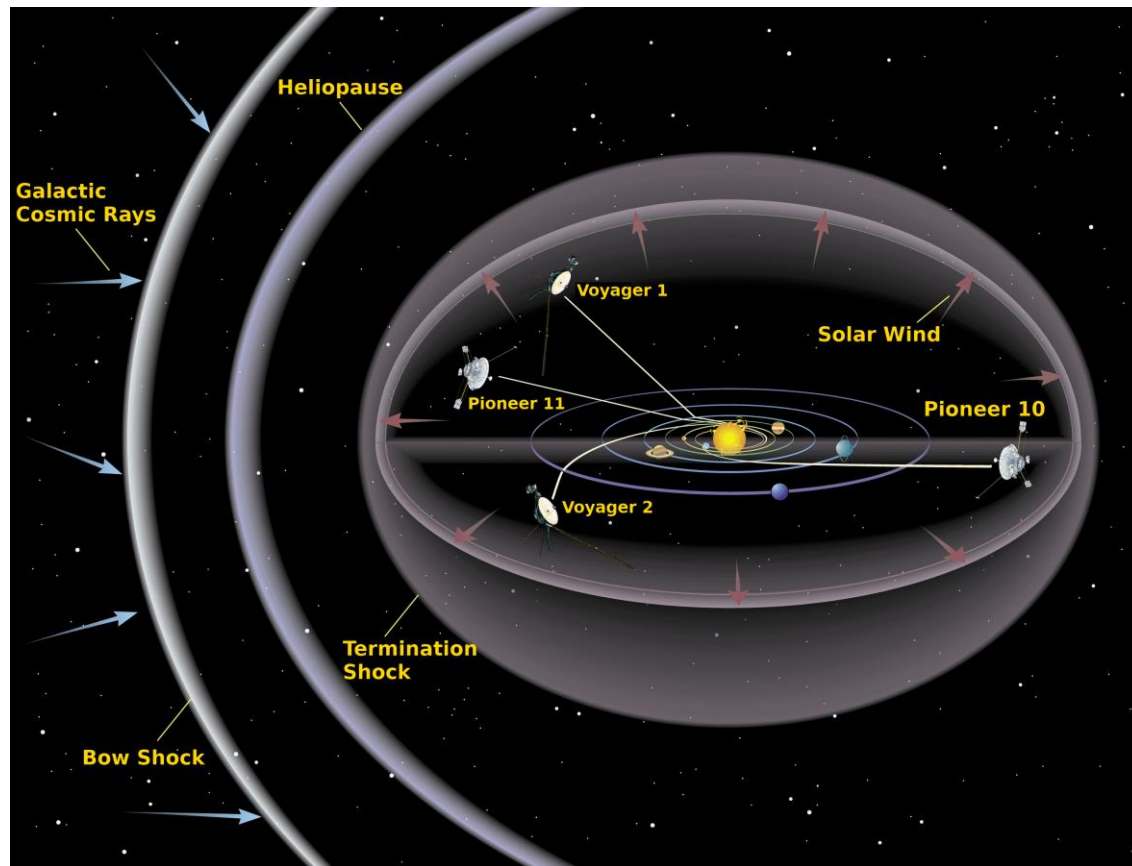
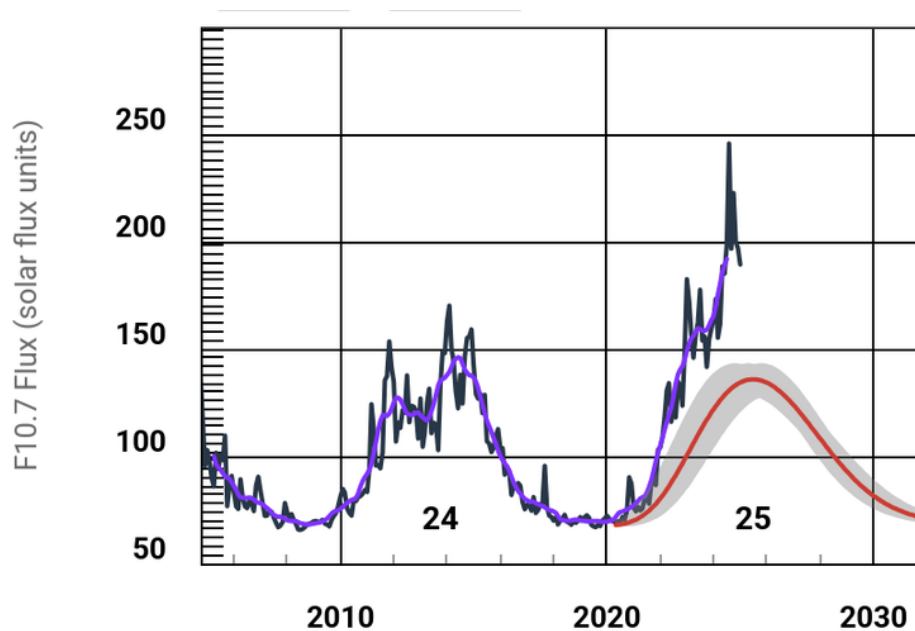
Komplexní část
krajiny

km²

Kosmické záření

- primární kosmické záření
 - Hlavní zdroj je galaktické kosmické záření (supernovy, pulzary, aktivní galaktická jádra)
 - Sluneční kosmické záření (nižší energie)
- Nabité částice - k Zemi ze všech směrů
- jádra atomů: H = protony (89 %), He (10%), těžší jádra (1%)
- vysoká rychlost, vysoká energie (1 GeV – 10^8 TeV)

Sluneční aktivita



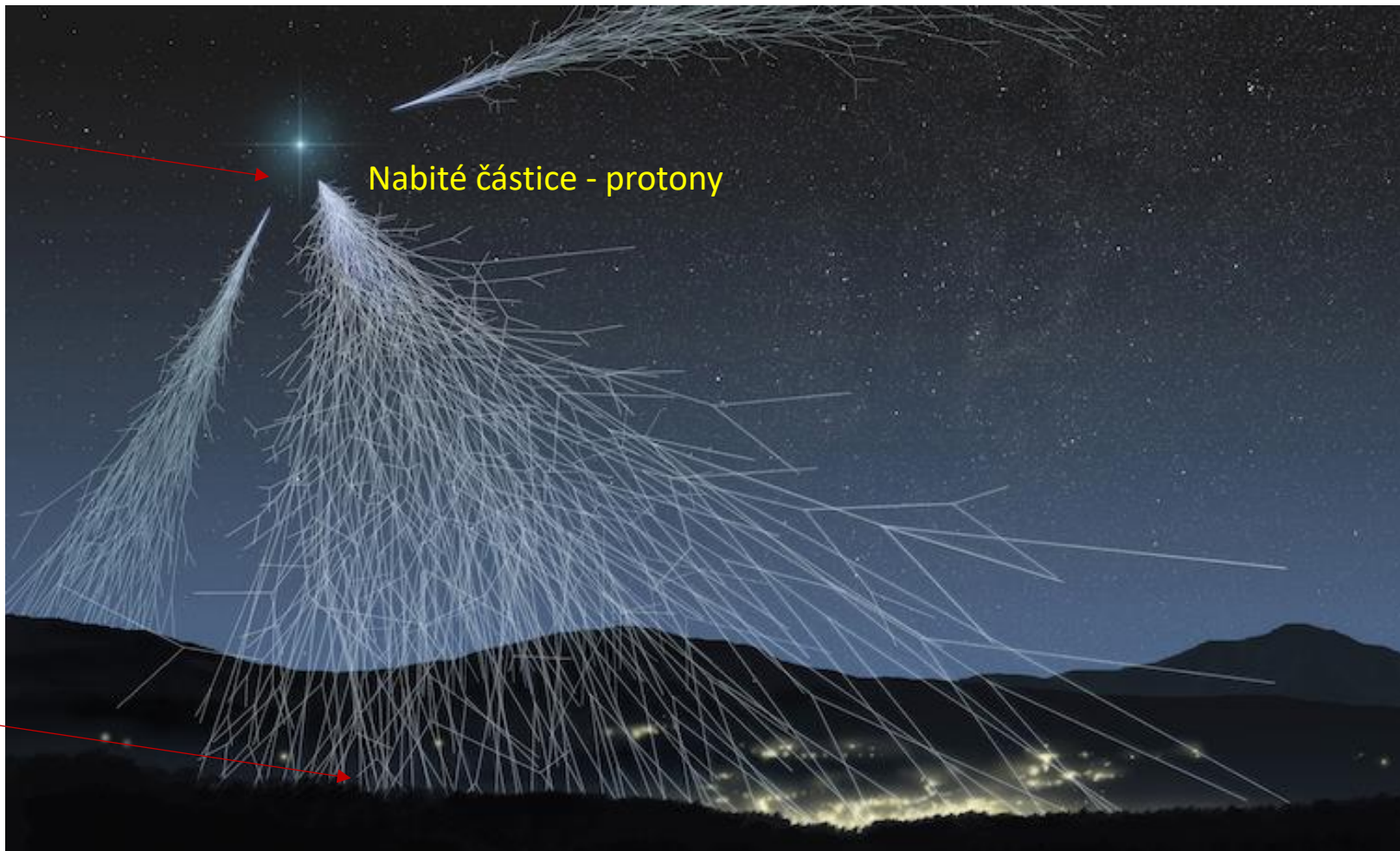
(Schwadron et al.)

Sekundární kosmické záření

$10^8 - 10^9 \text{ p/s/km}^2$

Nabité částice - protony

10^{13} p/s m^2



Sekundární kosmické záření

$(10^9 \text{ p/s} - 1 \text{ p/century})/\text{km}^2$

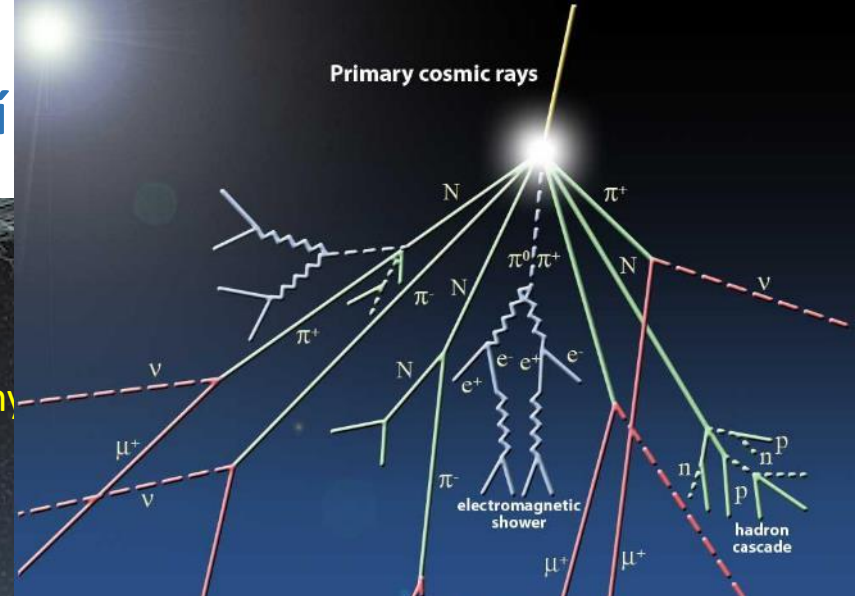
Nabité částice - protony

ca 150 p/s m^{-2}

Miony, neutrony, neutrina...

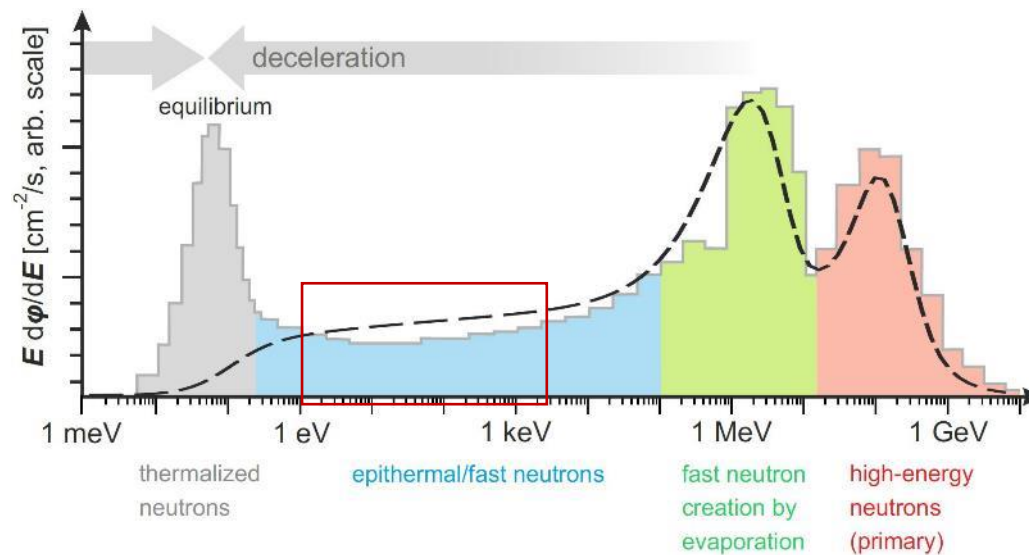
Sekundární kosmické záření

Piony, miony, neutrina, elektrony, pozitrony, fotony...



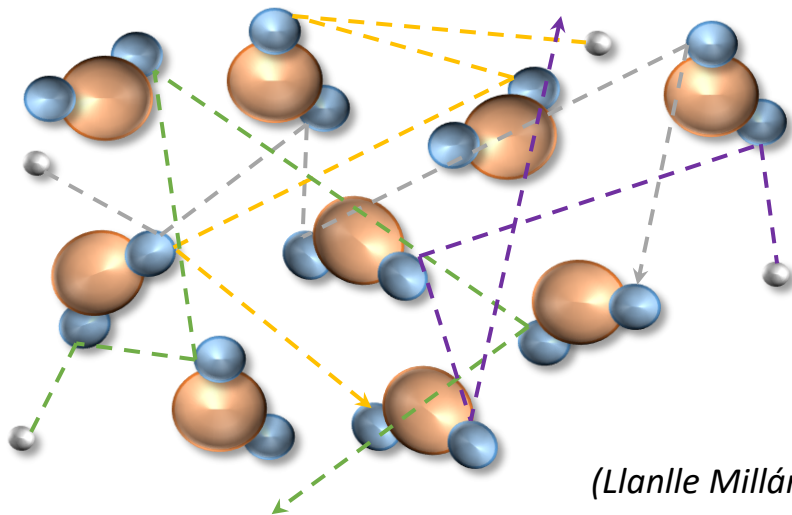
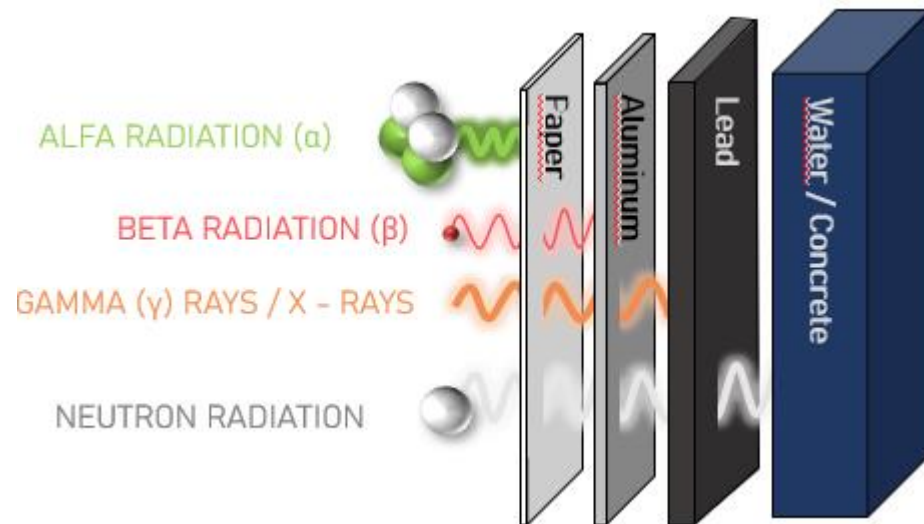
Interakce neutronů s vodíkem

- Tok neutronů na zemi koreluje s množství vody (vodíku) v okolí
- SUCHO: Neutrony se odrazí
- VLHKO: Neutrony jsou absorbovány



NEUTRON

- Částice **bez náboje** s přibližně stejnou hmotností jako má proton
- Nepociťuje elmag. pole => vysoká míra penetrace
- Interaguje jen s jádry atomů, ne s elektronovým obalem



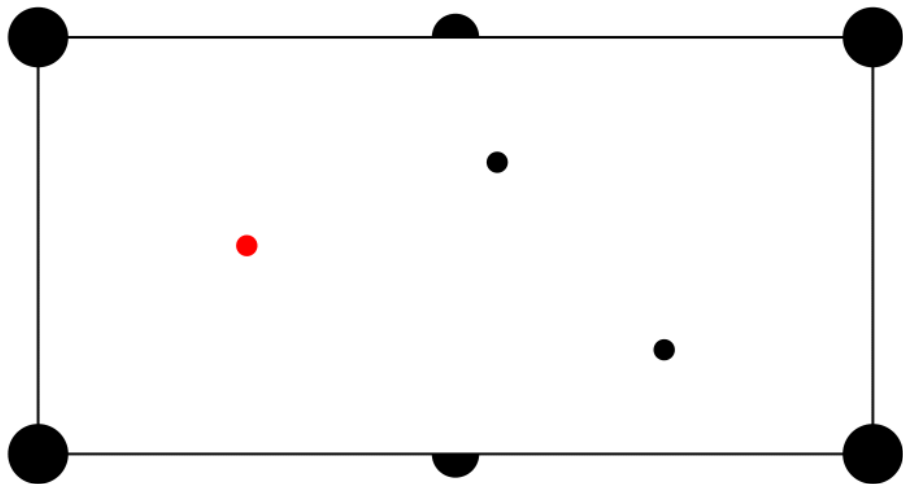
Elastický rozptyl (neutron se odrazí jako biliárová koule)

Cca po 25 kolizích s H získá neutron rovnovážnou energii (je pohlcen prostředím).

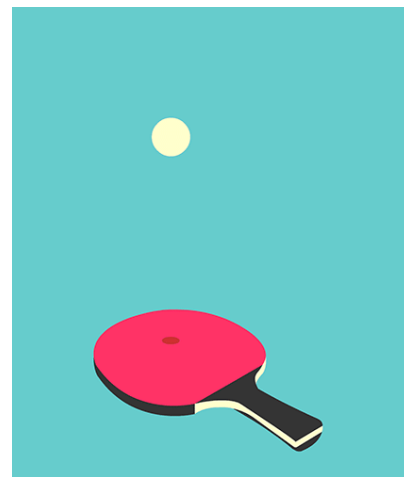
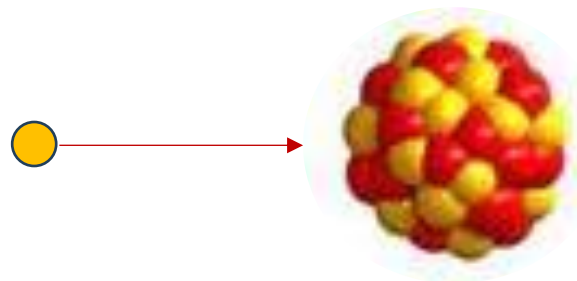
Případně 116 kolizí s C, 150 kolizí s O.

(Llanlle Millán-Callado)

Interakce s vodíkem (1 proton)

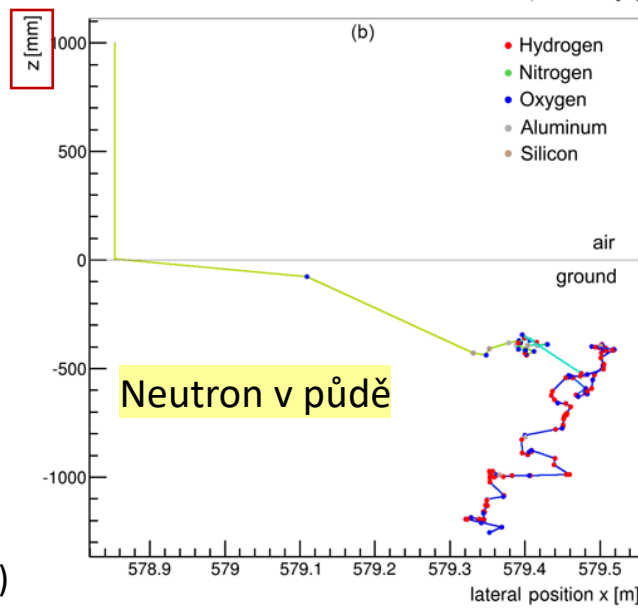
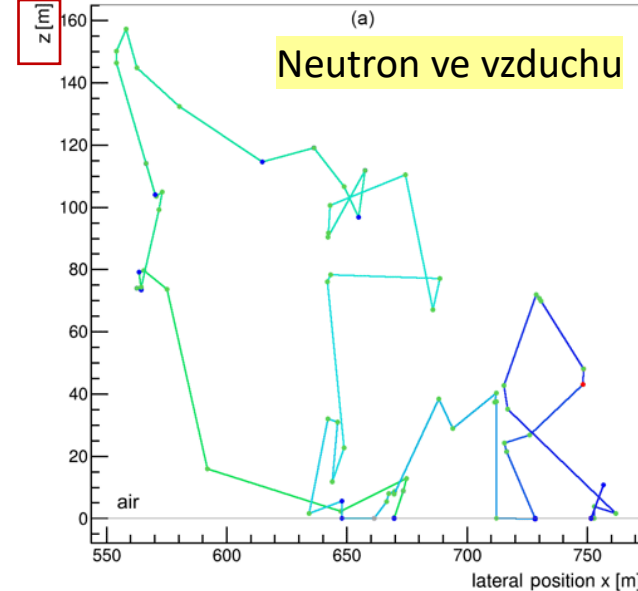
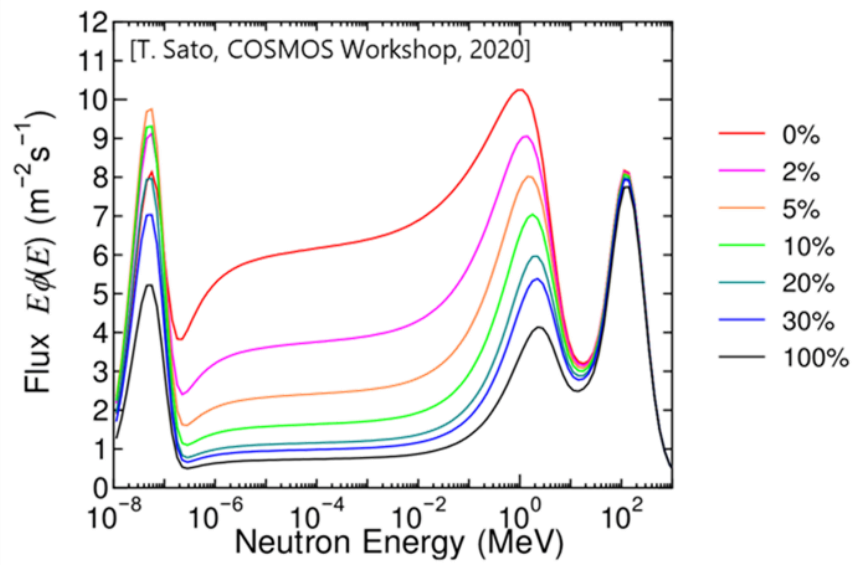


Interakce s těžším prvkem



Interakce neutronů s vodíkem

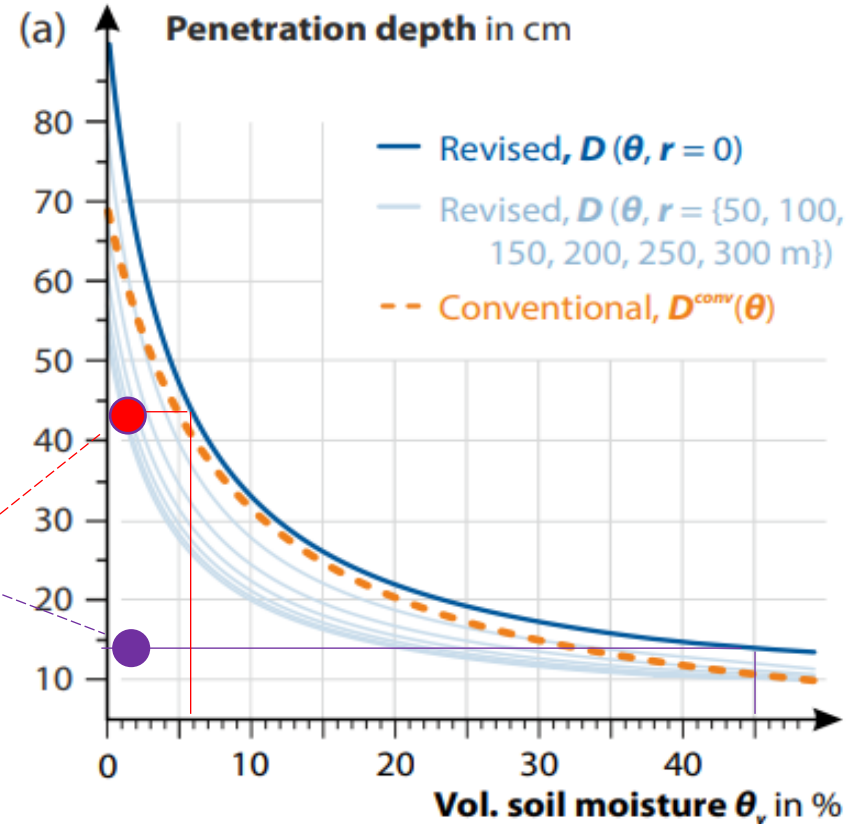
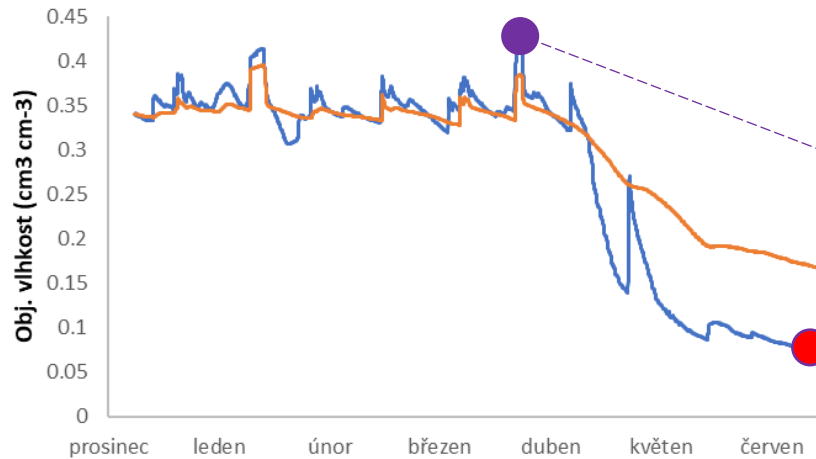
- Ve vzduchu urazí neutron stovky metrů
- V půdě cca 15 – 70 cm



(Koehli et al., 2023)

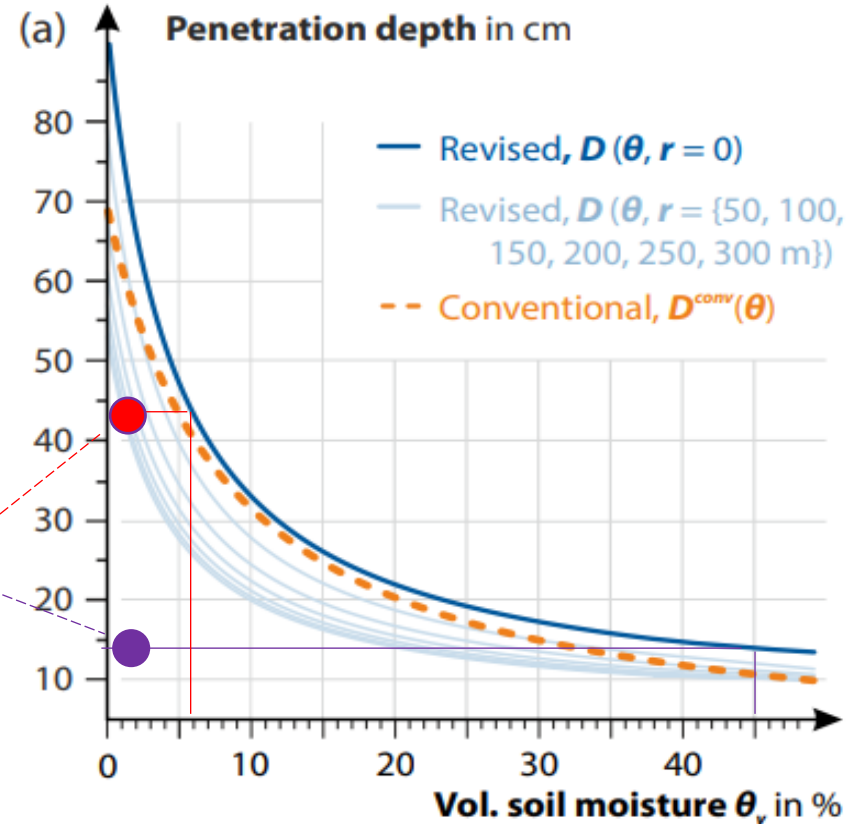
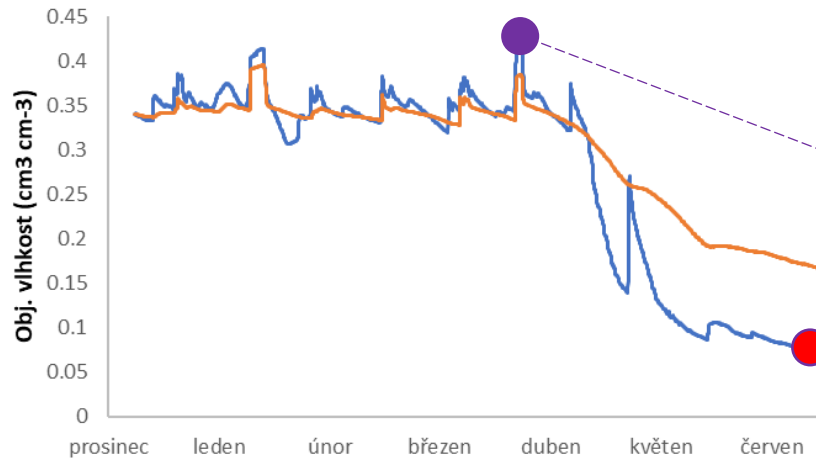
Hlubkový dosah

- Ve vzduchu urazí neutron stovky metrů
- V půdě cca 15 – 70 cm

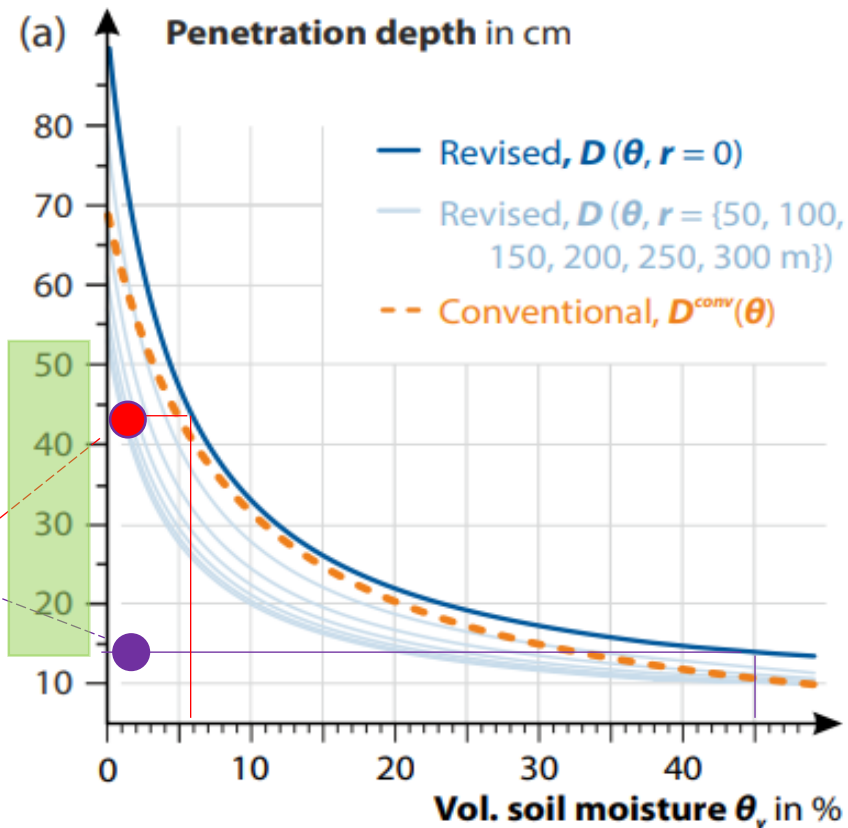
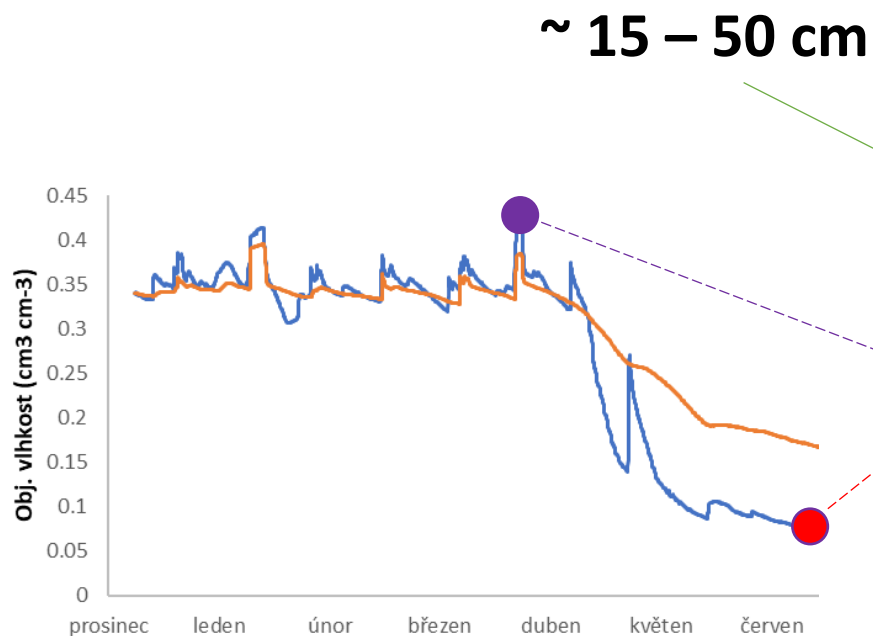


Hlubkový dosah

- Ve vzduchu urazí neutron stovky metrů
- V půdě cca 15 – 70 cm

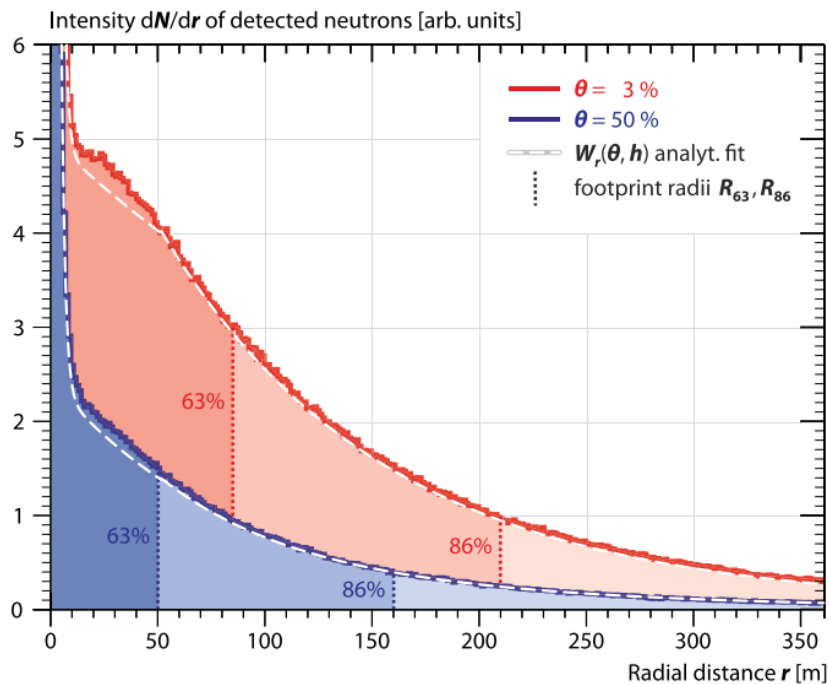


Hlubkový dosah

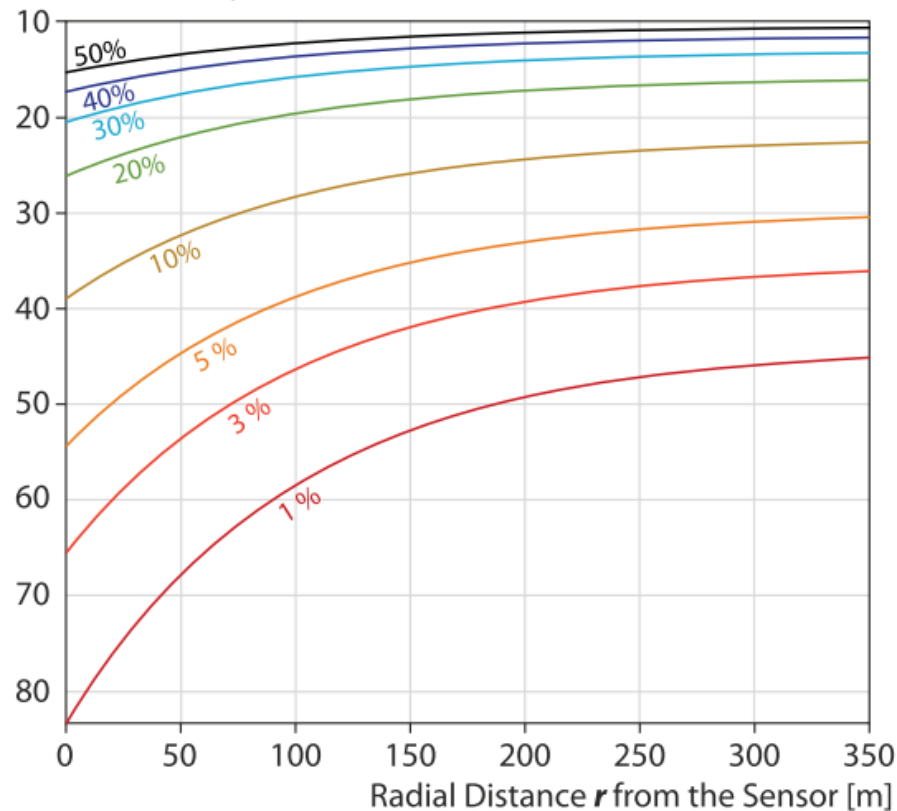


Reprezentativní plocha

- Plocha ca 10 - 15 ha (kruh s poloměrem ca 150 - 250 m)



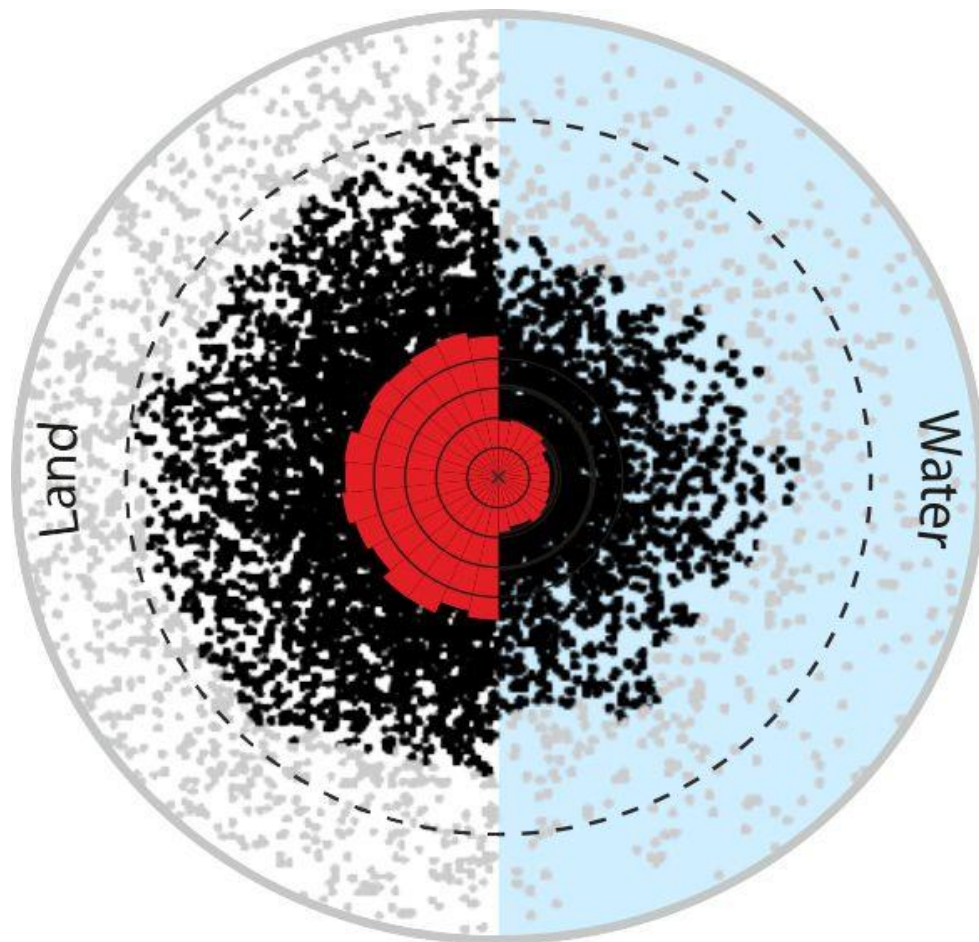
Penetration Depth D_{86} [cm]



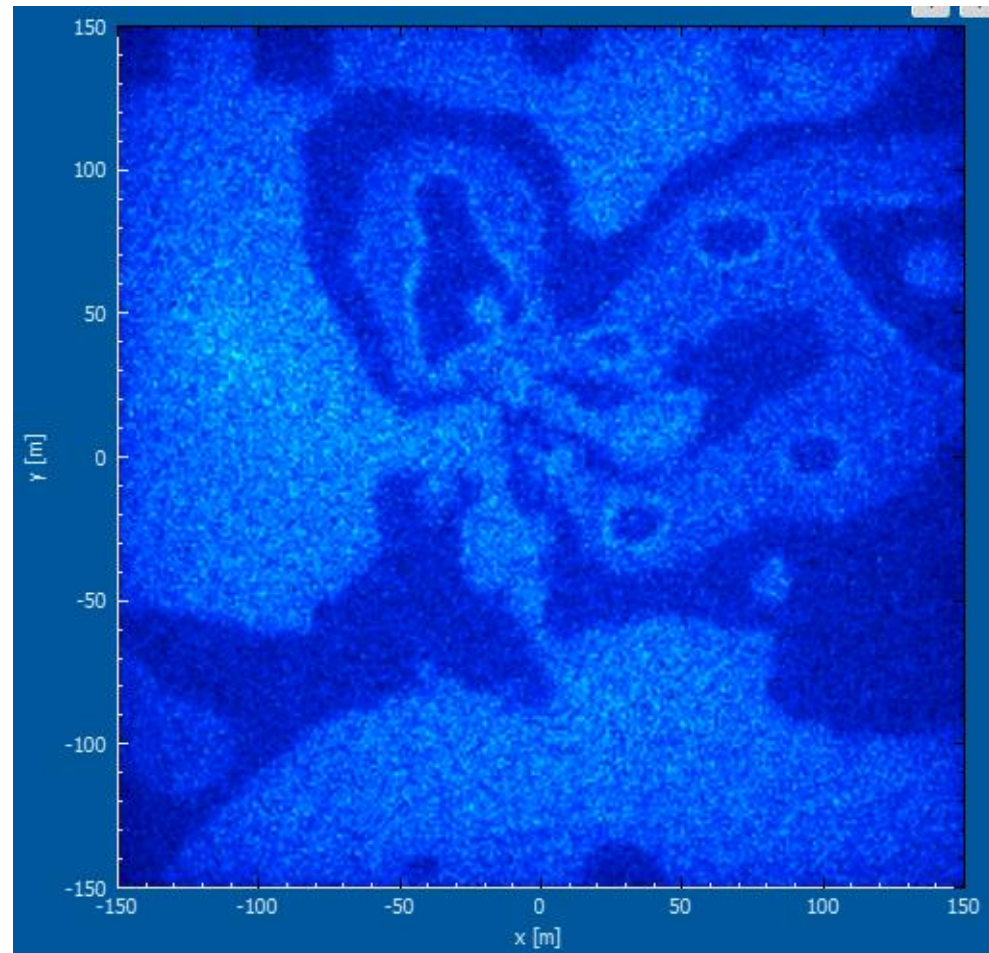
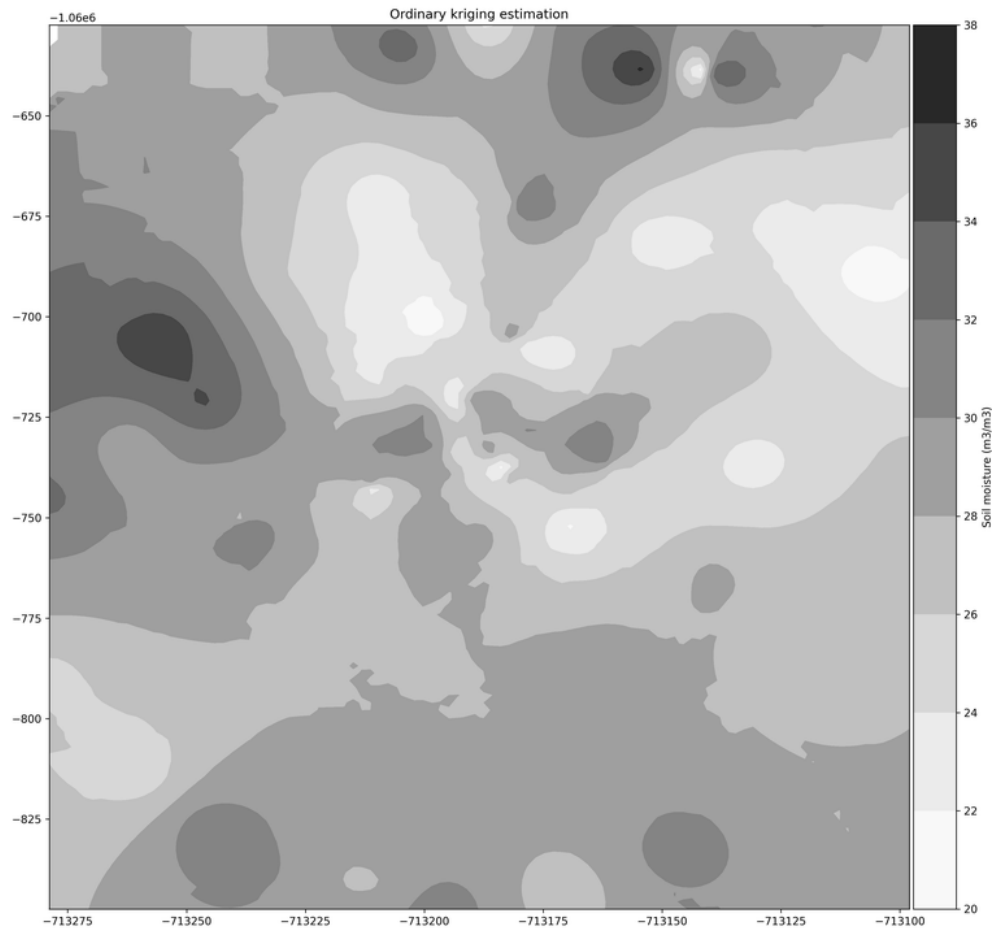
(Koehli et al., 2015)

Interakce neutronů s vodíkem

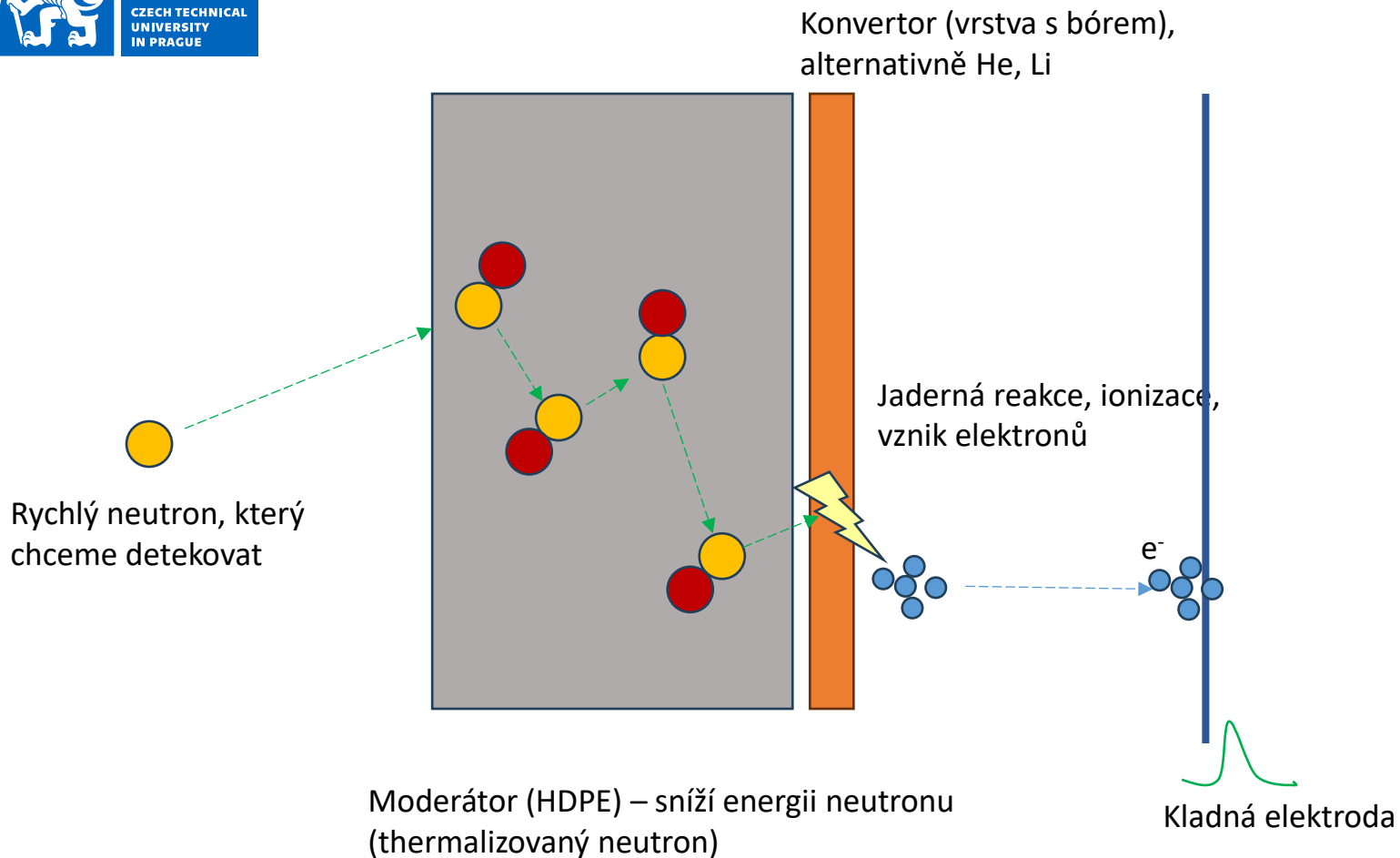
- Tok neutronů nepřímo úměrně závisí na množství vody (vodíku) v okolí
 - SUCHO: Neutrony se “odrazí”
 - VLHKO: Neutrony jsou absorbovány atomy H
- Tok neutronů nad povrchem závisí na:
 - **Vlhkost půdy**
 - Voda v atmosféře
 - Voda v biomase
 - Aktuální sluneční aktivita



Monte Carlo simulace transportu neutronů (URANOS)



Detekce neutronů



Detekce termalizovaných neutronů

- Rychlé neutrony jsou zpomaleny vrstvou HDPE
- Termalizované neutrony jsou konvertovány v He nebo B
- Ionizace – detekce změny napětí v čítači



Hydroinnova (USA)



Hydroinnova (USA)



Finapp (Itálie)



Styx Neutronica (Německo)

CRNS (Styx Neutronica)



HDPE moderátor



Trubice s B konvertorem a
elektrodou

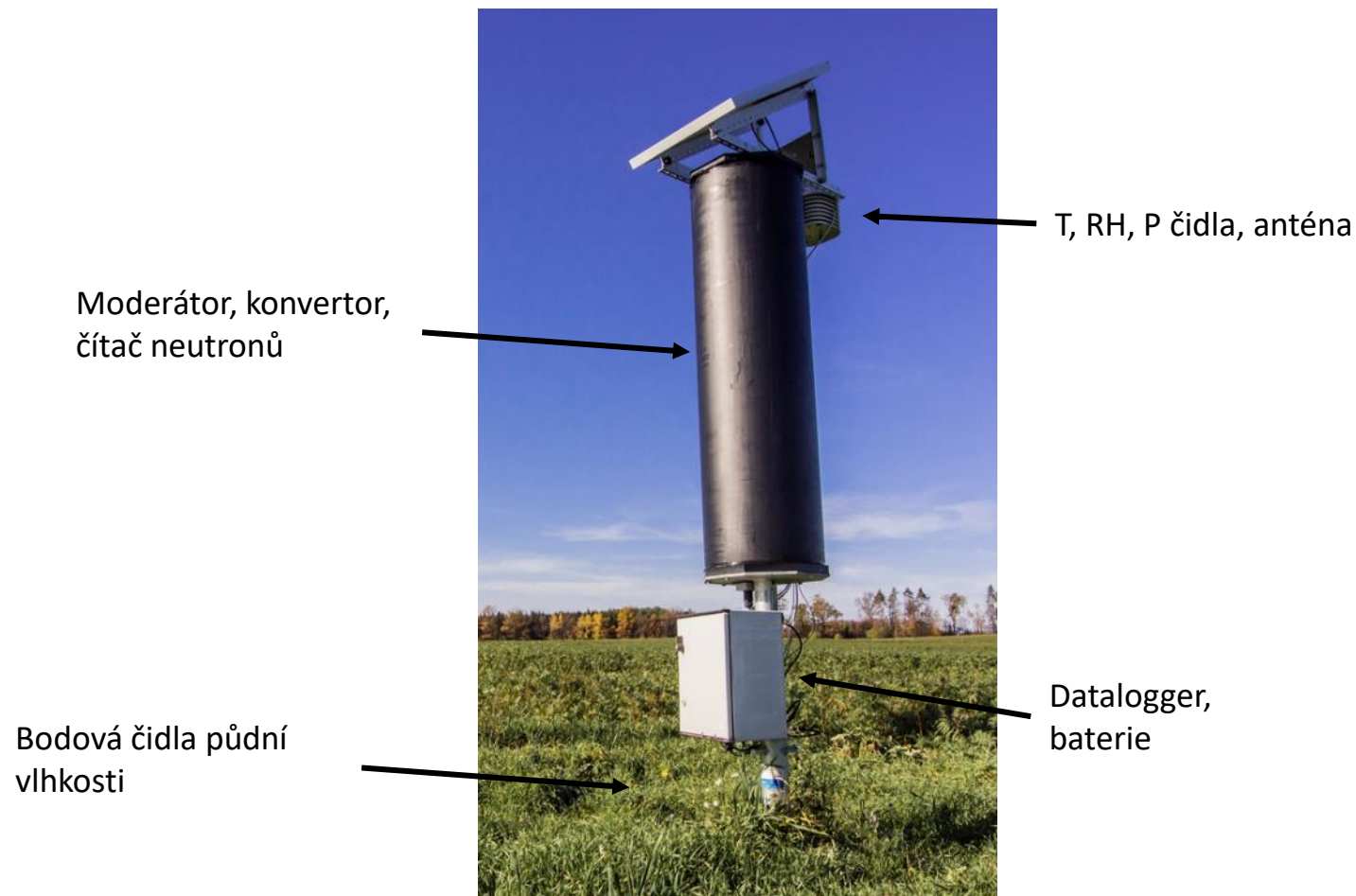


Elektronika pro počítání
pulsů

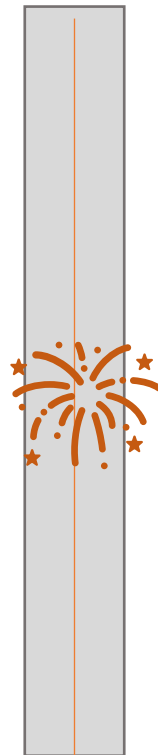


Datalogger

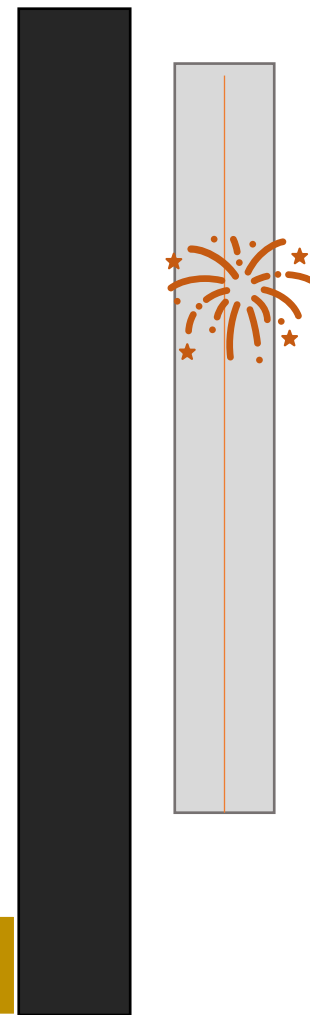
CRNS (Styx Neutronica)



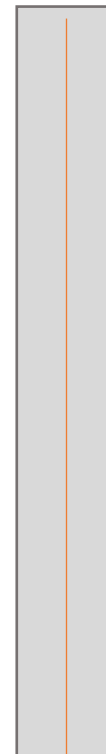
Neutrons detection



Neutrons detection



Neutrons detection



Cílovou proměnnou je objemová vlhkost

$$\theta(N, p, h, i) = \rho \left[\frac{a_0}{\left(\frac{N}{N_0}\right) - a_1} - a_2 \right] * f_p * f_h * f_i$$

Měříme:

- N: neutronový tok nad zemským povrchem
- p: atmosférický tlak
- h: absolutní vzdušná vlhkost
- i: intenzita příchozího kosmického záření

Korekce na tlak, vlhkost a
aktuální kosmické záření

Kalibrace: teoretické neutronové
pozadí při nulové vlhkosti

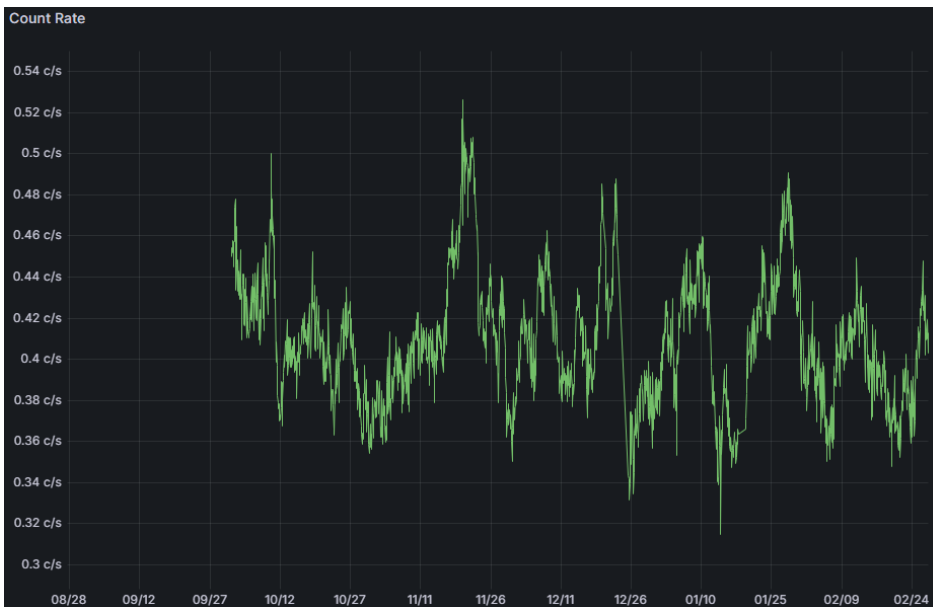
Cílovou proměnnou je objemová vlhkost

$$\theta(N, p, h, i) = \rho \left[\frac{a_0}{\left(\frac{N}{N_0}\right) - a_1} - a_2 \right] * f_p * f_h * f_i$$



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

Cílovou proměnnou je objemová vlhkost

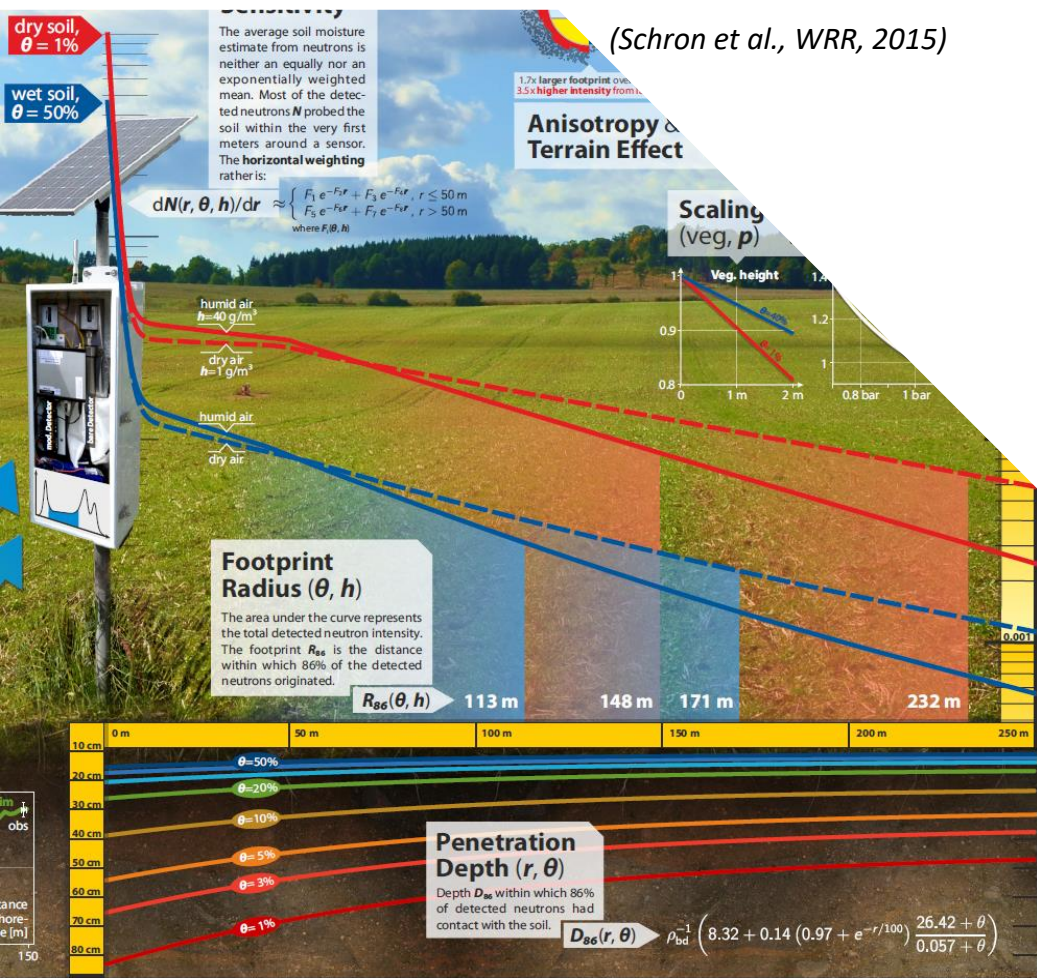


Shrnutí



- Pasivní, neinvazivní senzor
- (často) data z reprezentativní oblasti
- Překlenuje měřítko mezi bodovými čidly a DPZ
- Neměří přímo vlhkost, ale množství rychlých neutronů v atmosféře
- Neutrony korelují s množstvím vodíku
- Není ovlivněno složením půdy, texturou, salinitou, teplotou, drsností půdy, barvou povrchu, topografií...

CRNS – potenciální nevýhody



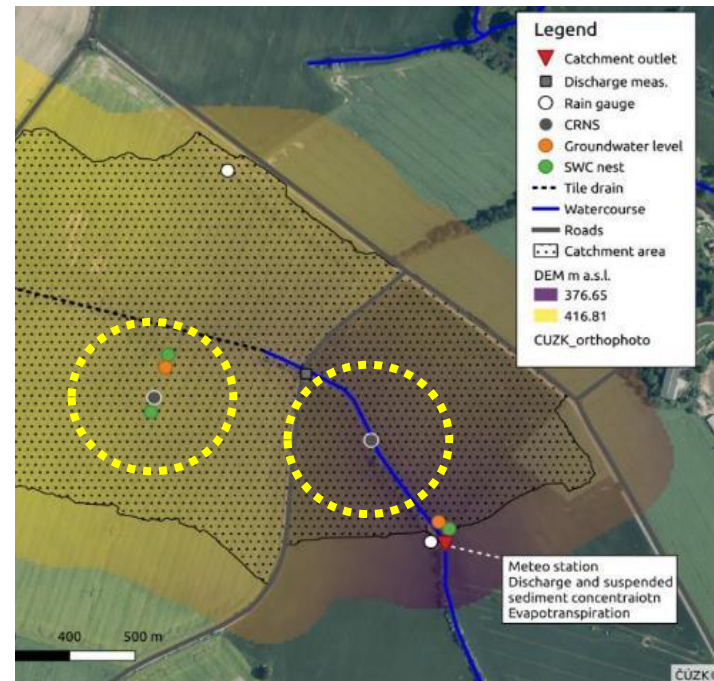
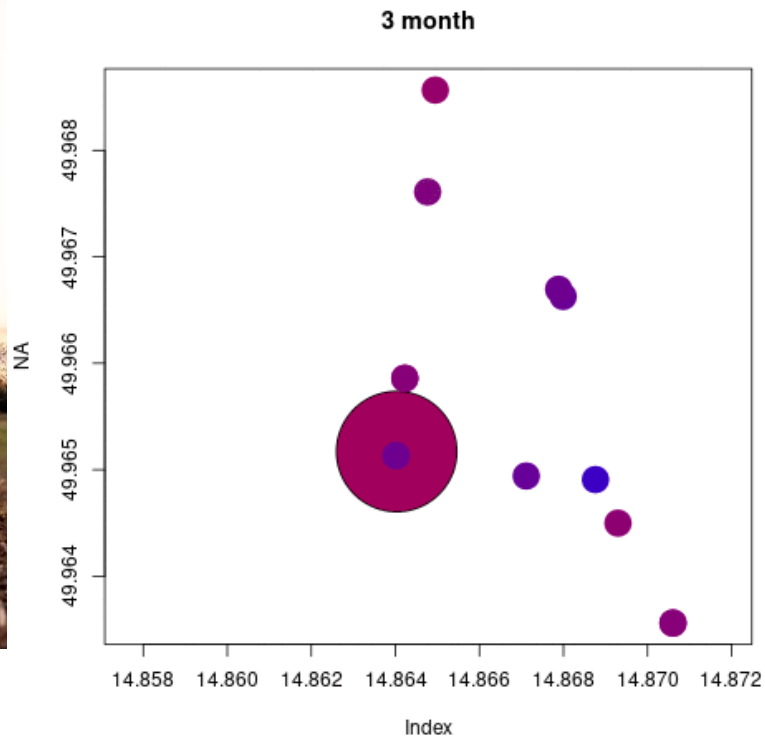
(Schron et al., WRR, 2015)

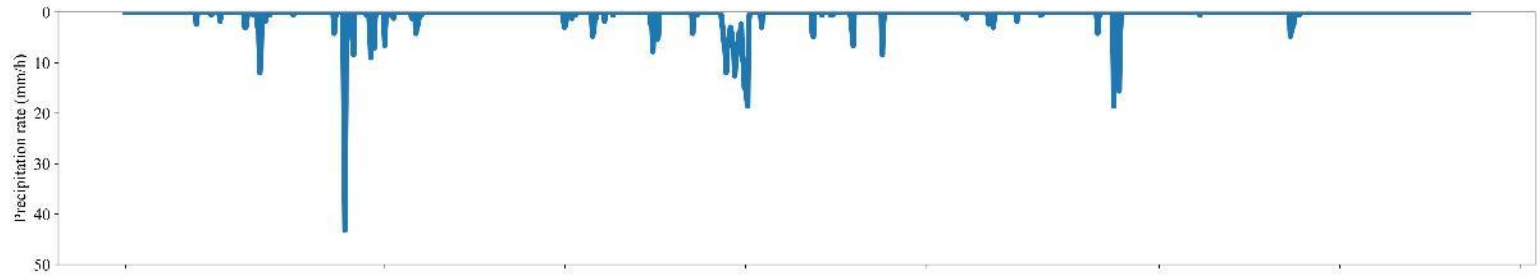
- Stále relativně nová technologie (články od 2008)
- Cena (cca 5000 – 10000 eur)
- Se vzdáleností/hloubkou klesá citlivost
- Proměnlivá oblast detekce v závislosti na aktuální vlhkosti
- Nutná kalibrace
- Nutné korekce na vodík mimo půdní vodu a aktuální intenzitu kosmického záření
- Harmonizace s ostatními metodami měření půdní vlhkosti
- Problematický sníh, výtopa, déšť
- Horší časové rozlišení (cca 6h při standardním rozměru senzoru)

Navíc občas náročná údržba

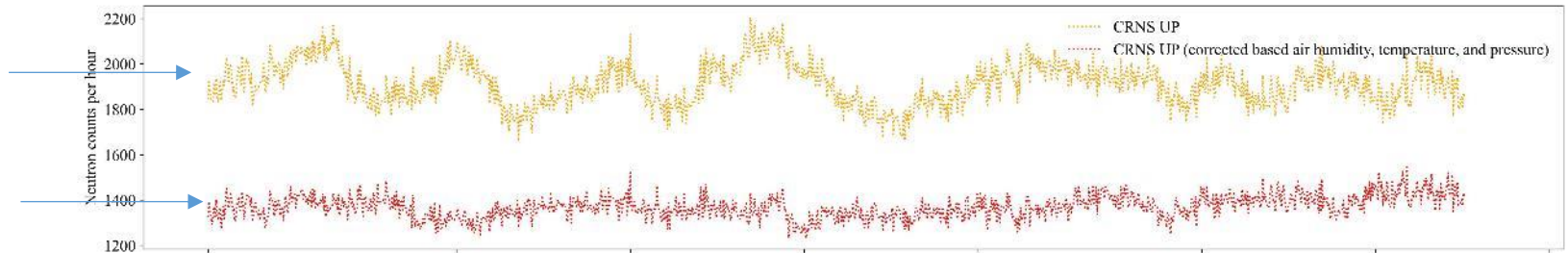


Nučice



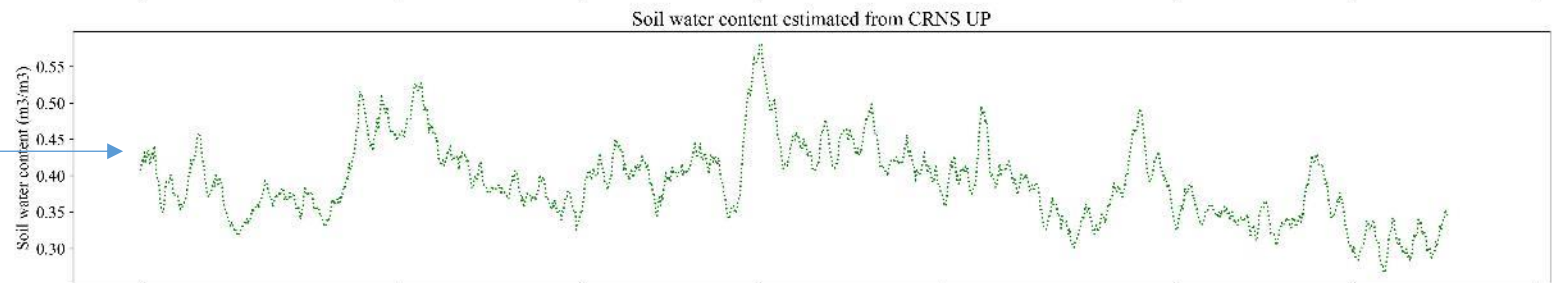


Neutrons count rate

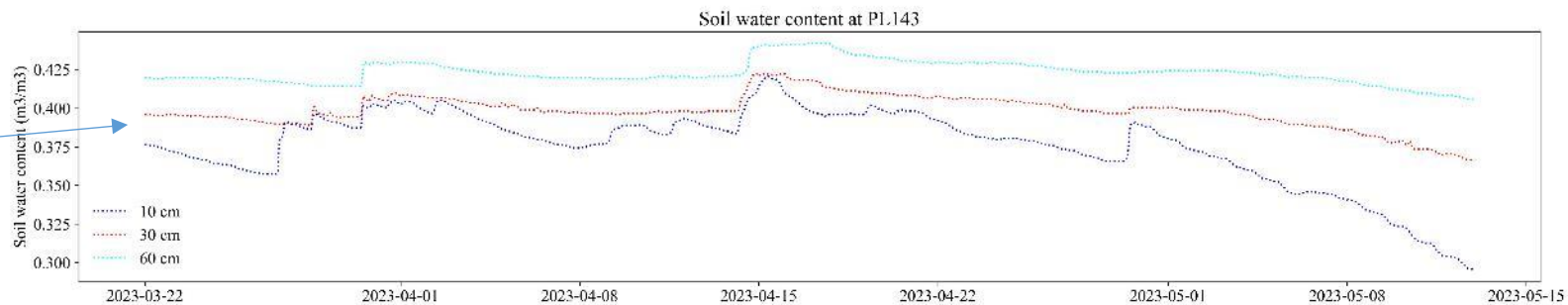


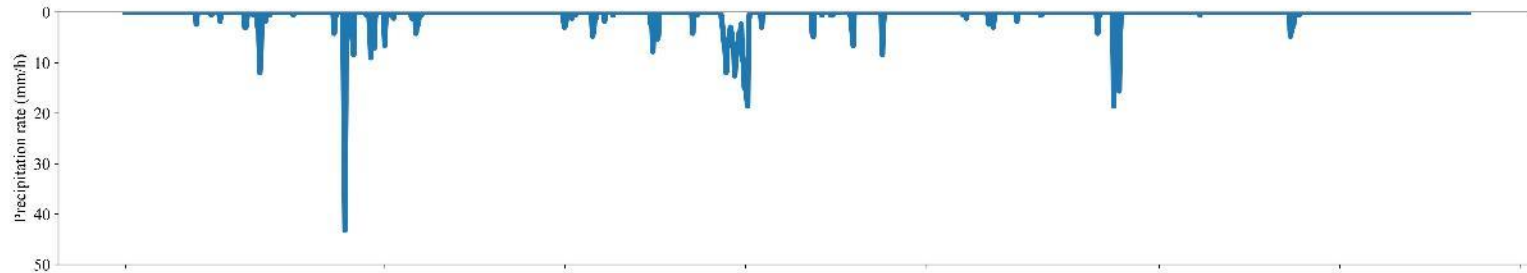
Korigovaný count rate

Objemová vlhkost

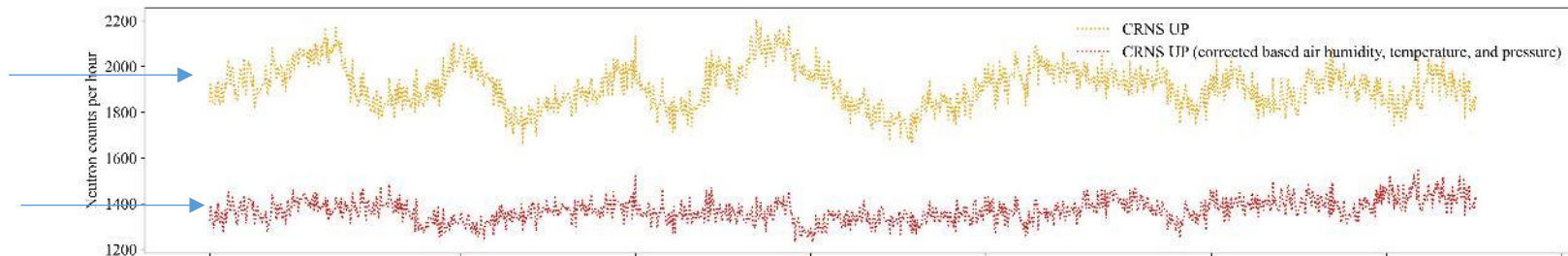


Objemová vlhkost
z bodových čidel

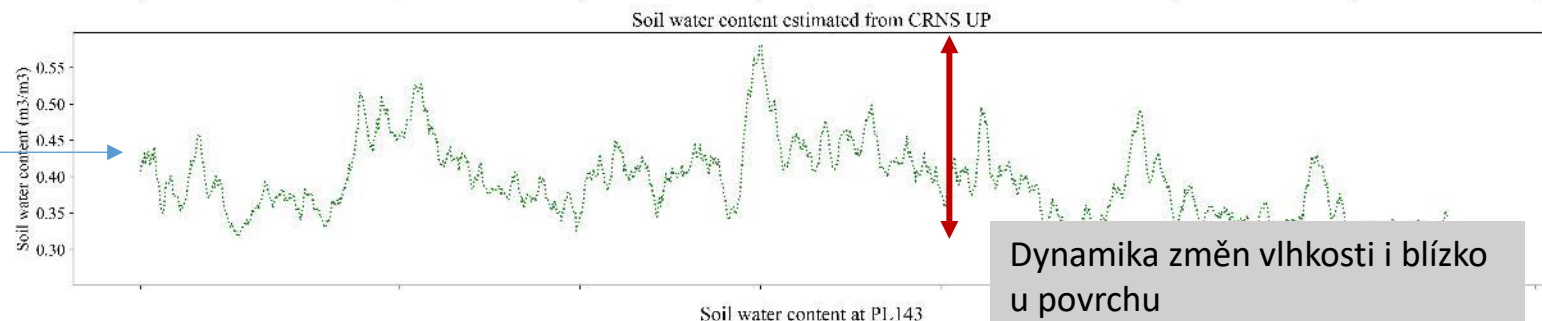




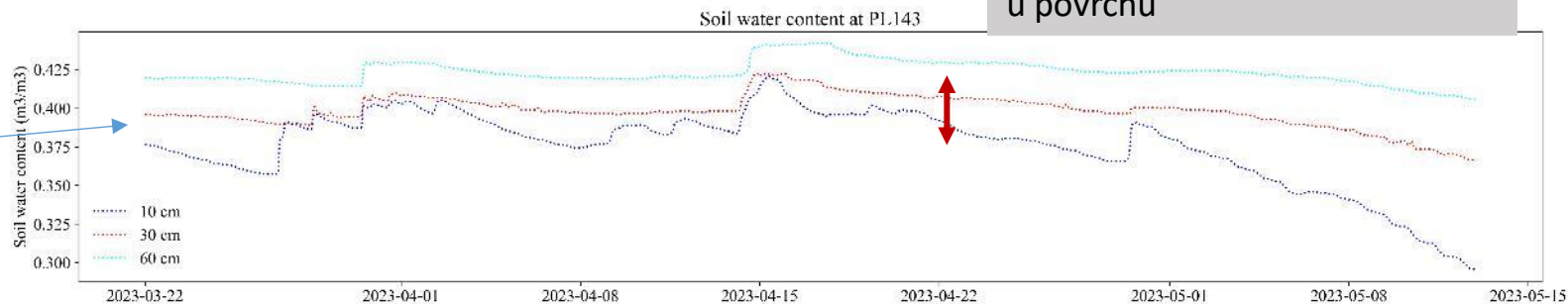
Neutrons count rate



Objemová vlhkost

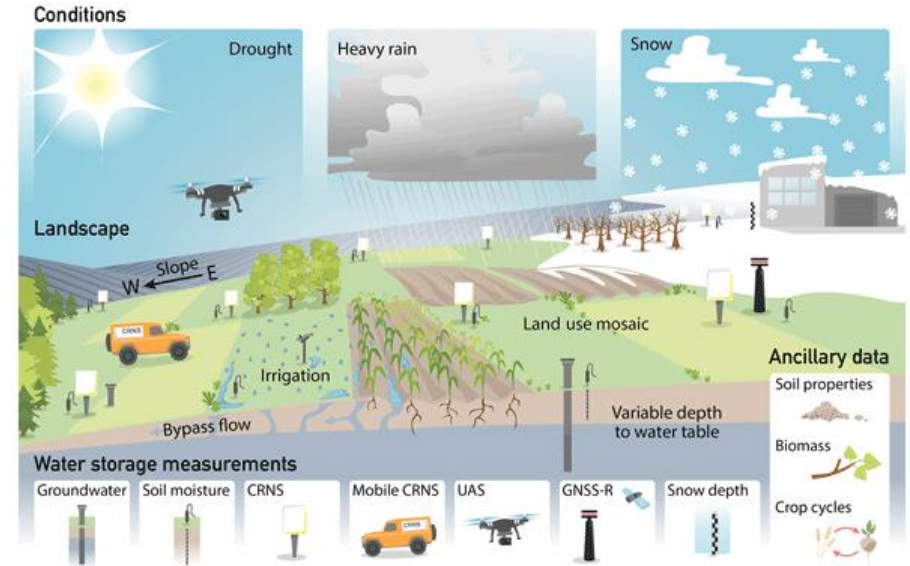
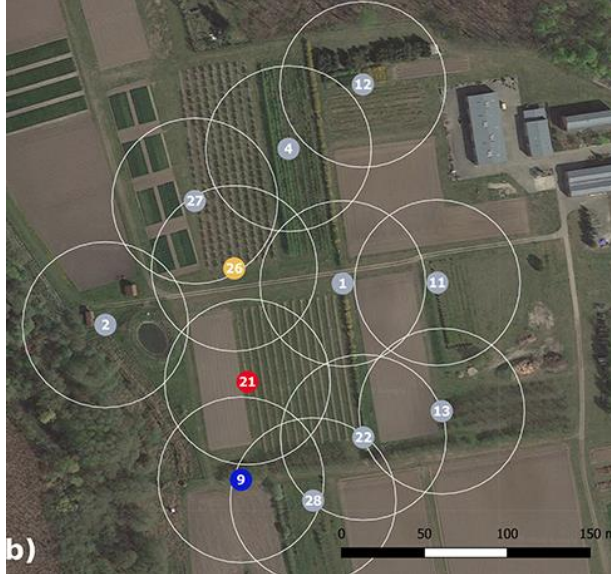


Objemová vlhkost
z bodových čidel



- 2 CRNS v Nučicích (Styx Neutronica)
- Tokáň, České Švýcarsko, PřF UK (Hydroinnova)
- Povodí Amálie, ČZU (plánováno)
- ???

- Tereno network (terrestrial environmental observatories)
- Marquardt test field site (University of Potsdam)
- FZ Juelich
- ...

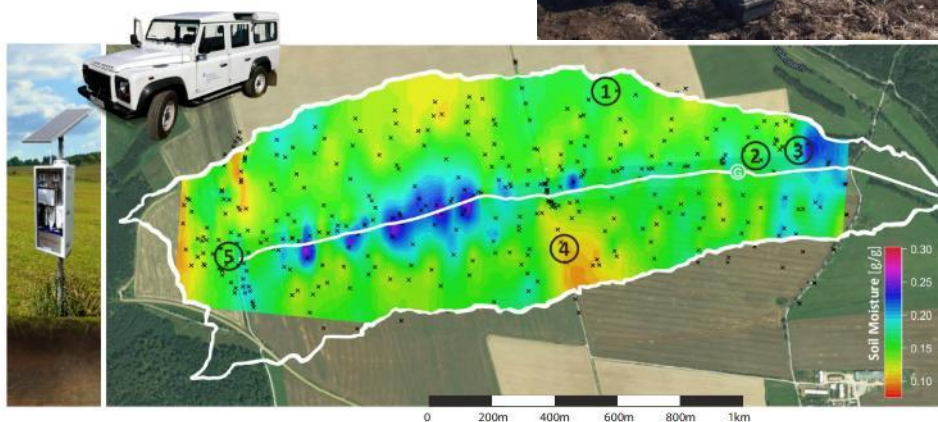


Heistermann, et al. 2023. Three years of soil moisture observations by a dense cosmic-ray neutron sensing cluster at an agricultural research site in north-east Germany, Earth Syst. Sci. Data, 15, 3243–3262, <https://doi.org/10.5194/essd-15-3243-2023>.

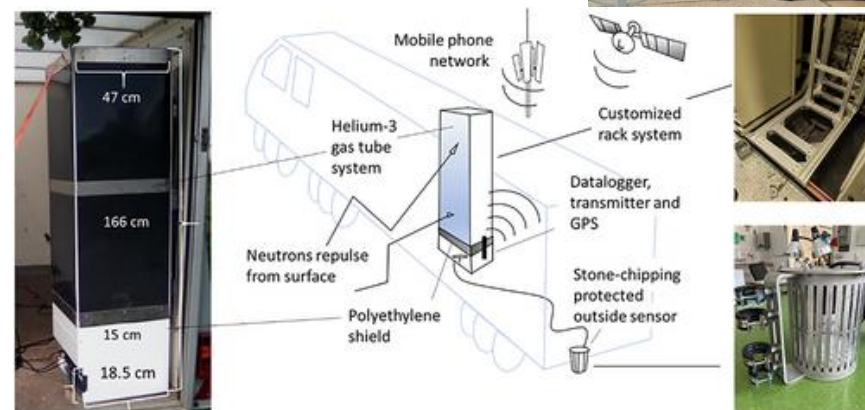
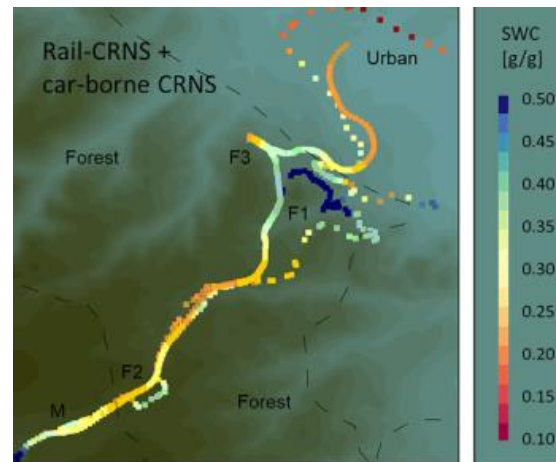
Weimar, et al. 2020.

Německo - roving

- Mobilní CRNS pro ještě větší pokrytí



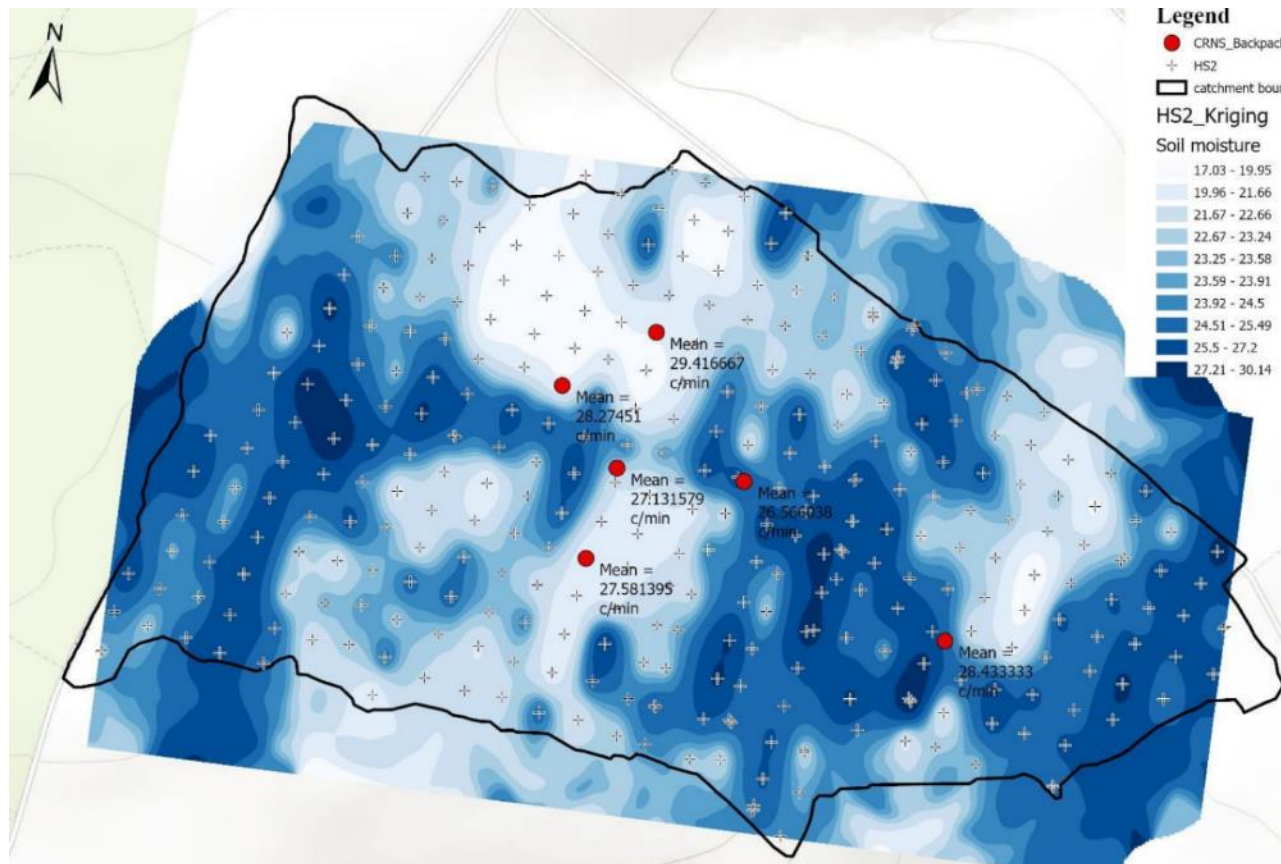
(M. Schron, UFZ)



(Altdorff et al., 2023)

(Roving v Nučicích)

- Mobilní CRNS pro ještě větší pokrytí

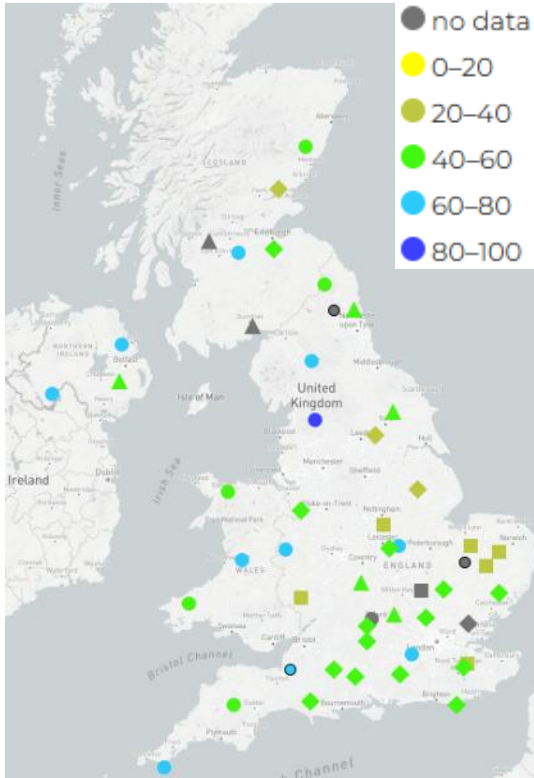


UK, Austrálie, USA, ...



47 sites
(Cooper et al., 2021)

CosmOz



M. Zreda et al. (2008)

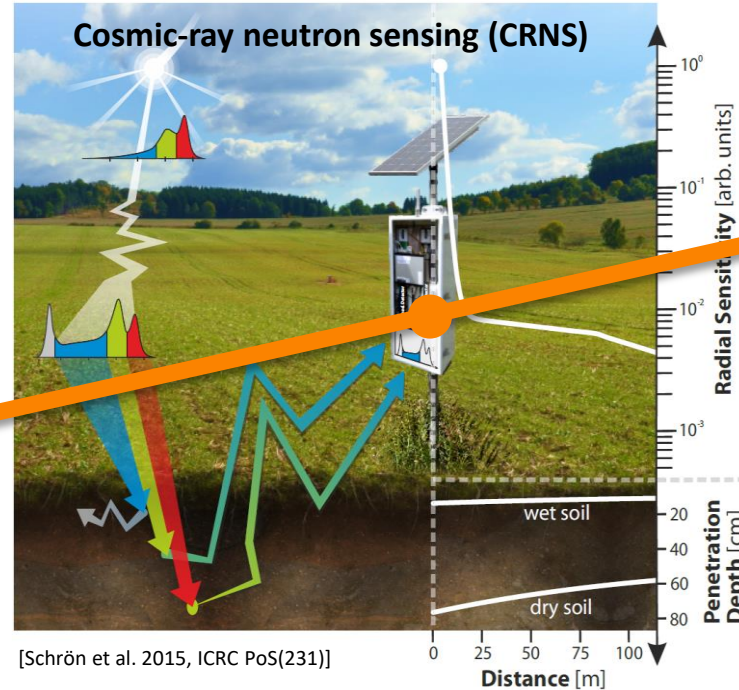
SoMMet project

Calibration establishes **traceability** which in turn improves **comparability** of different methods across scales.

Point-scale sensors



[<https://soilsensor.com>]



Satellite-based remote sensing



WP1: **Traceability**
WP2: **Validation**
WP3: **Harmonization**
WP4: **Data fusion**
WP5: **Impact**
WP6: **Coordination**

$(10^{-1} - 10^1) \text{ m}$

$(10^2 - 10^3) \text{ m}$

Horizontal scale

$(10^3 - 10^4) \text{ m}$



Děkuji

Interreg



Kofinanciert von
der Europäischen Union
Spolufinancováno
Evropskou unií

Sachsen – Tschechien | Česko – Sasko



CRNS potenciál:

Kontinuální vlhkostní data z reprezentativní části území

- Identifikace prahové vlhkosti pro vznik rychlého odtoku
- Reprezentativní hodnoty vlhkosti pro kalibraci hydrologického modelu
- Detekce vodního stresu plodin
- ...



**Metrology for multi-scale
monitoring of soil moisture**

www.sommet-project.eu