

Sít' výzkumných institucí a podniků pro infrastrukturu

Forschungs- und Unternehmensnetz für Infrastrukturen

RENI-100686680

Open Research Institute Day

Osol to aneb Využití rezistivimetrie ve vrtu

Einsatz von Widerstandsmessungen im Bohrloch

21. září 2026, Albertov 6, Praha 2 a online

21. September 2026, Albertov 6, Prag 2 und online





Univerzita  
Karlova



# *Osol to aneb využití rezistivimetrie ve vrtu*

## *Open Research Institute Day RENI*

*Tomáš Weiss, 21. 9. 2026*

*podklady Martin Lanzendörfer, Kateřina Šabatová*



**Přírodovědecká fakulta**  
**Univerzita Karlova**

Geologie



# Proč rezistivimetrie

- Tradiční hydrodynamické zkoušky stanovují parametry pro širší okolí, ale nedokážou popsat vertikální variabilitu ani přesně lokalizovat přítoky.
- Mezivrtové stopovací zkoušky ověřují hydraulickou komunikaci, jsou však časově i logisticky náročné.
- Rezistivimetrie vody ve vrtu (borehole tracer/dilution tests) měří fyzikálně-chemické vlastnosti vody (nikoliv horniny).
- Hlavní výhody
  - nízká technická a finanční náročnost
  - vysoká citlivost
  - možnost měření za přirozeného stavu i během čerpání



# Princip metody a její cíl

- Vytvoření kontrastu měrné elektrické vodivosti (konduktivity v  $\mu\text{S/cm}$ ) injektáží stopovače (nejčastěji NaCl).
- Sledují se časoprostorové změny vodivosti vlivem ředění čistou podzemní vodou nebo posunu stopovače.
- Dostupný nástroj pro komunální hydrogeology k odhalení reálného proudění ve vrtu.



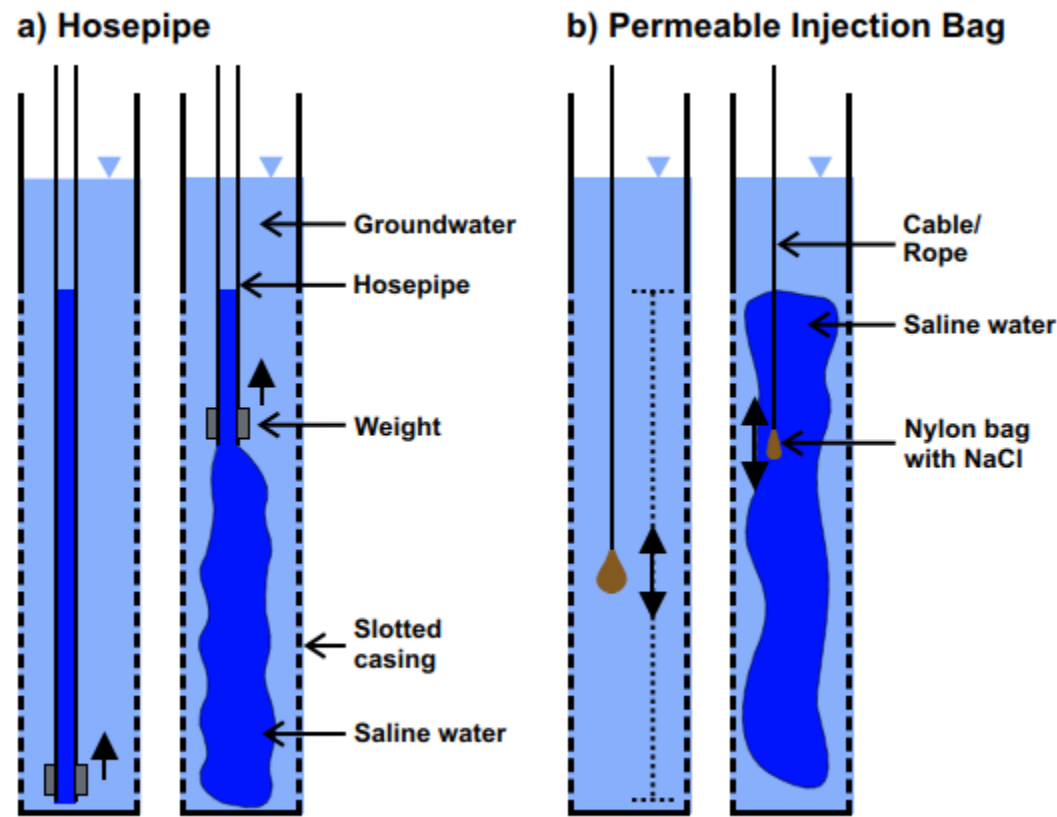
# Základní typy injecktáže stopovače

- Plošná (rovnoměrná) injecktáž
  - Stopovač je homogenně rozpuštěn v celém vodním sloupci.
  - Slouží k identifikaci horizontálního proudění a určení zdánlivé rychlosti / objemového toku.
- Bodová injecktáž:
  - Stopovač je aplikován do konkrétní hloubky nebo na hladinu.
  - Slouží ke sledování vertikálního proudění a detailní charakteristice lokálních přítoků.



# Metoda ředění označené kapaliny ve vrtu - metodika

- Aplikace pevné fáze
  - Použití perforovaného válce („solničky“) nebo nylonového sáčku s krystaly či tabletami.
  - Plynulý pohyb nahoru a dolů konstantní rychlostí po celé délce sloupce.
- Aplikace kapalné fáze
  - Spuštění flexibilní hadice na dno zájmového úseku a její naplnění roztokem o známé koncentraci.
  - Rovnoměrné uvolňování stopovače při plynulém vytahování hadice k ústí.



| Performance criterion     | Hosepipe method | Permeable injection bag method |
|---------------------------|-----------------|--------------------------------|
| Required personnel        | 0               | ++                             |
| Preparation time          | +               | ++                             |
| Duration of Injection     | ++              | +                              |
| Flexibility (depth range) | –               | ++                             |
| Deep GMWs or boreholes    | –               | ++                             |
| Handling                  | +               | ++                             |
| Homogeneous injection     | ++              | +                              |
| Costs                     | +               | ++                             |

# Bodová injektáž a alternativy

- Injektáž na hladinu podzemní vody
  - Přímé vylití - riziko vzniku turbulencí a indukovaného proudění dopadem kapaliny.
  - Aplikace těsně nad hladinou / hadicí – omezuje ovlivnění hladiny, naráží však na ulpívání roztoku v hadici (ztráta kvantifikace).
- Bodová injektáž do hloubky
  - specializované dálkově ovládané přístroje (např. tlakové injektory) či plynulou dávkovací kapiláru.
- Alternativní indikační média
  - Deionizace – použití destilované/deionizované vody namísto soli (Pitrak et al., 2007).
  - Termický kontrast – využití vody o odlišné teplotě oproti přirozenému pozadí (Fahrmeier et al., 2021).



# Režimy proudění identifikovatelné ve vrtu

- Jaké mohou být?
- Vertikální proudění ve stvolu – pohyb vody nahoru/dolů  
vlivem rozdílných hydraulických výšek kolektorů
  - posun stopovače
- Horizontální proudění – příčné proudění přes perforaci
  - pokles koncentrace stopovače v čase
- Vertikální proudění obsypem – pohyb vody mezi zárubnicí a stěnou vrtu (odhaluje netěsnost cementace).
- Gravitační stékání – volný tok vody po výstroji z výše uložených přítoků na hladinu.

náčrt na tabuli



# Způsob měření

## 1 konduktometr

- Kontinuální profilování – pohyb sondou nahoru a dolů konstantní rychlostí.
  - Nevýhoda – riziko mechanického promíchávání vody.
- Měření v jedné konstantní hloubce.
  - Pro získání celkového profilu je nutné pokus opakovat.

## Více sond

- Instalace senzorů do fixních hloubek bez pohybu sond.
- Zcela eliminuje mechanické ovlivnění vodního sloupce a umožňuje kontinuální monitoring.

## 1. Přípravná fáze:

- Kalibrace konduktometrů na očekávané rozsahy.
- Měření přirozeného pozadí (baseline profilu konduktivity a teploty v celé hloubce).

## 2. Injektážní fáze:

- Volba metody injektáže podle cílů měření a konstrukce vrtu.
- Výsledná konduktivita by neměla překročit 5násobek pozadí, aby nedocházelo k umělému klesání soli vlivem vyšší hustoty (Lamontagne et al., 2002).

## 3. Monitorovací fáze:

- Kontinuální sledování změn konduktivity v čase a hloubce bezprostředně po injektáži.
- Sledování vývoje indikačního mraku pro následné hydrodynamické výpočty.



# *Jak proudí voda do/z vrtu?*

- z vrtů se odebírá voda s představou, že v určité hloubce beru vodu z určitého horizontu
- v mnoha vrtech ale přetékání – hydraulický zkrat
- Příklad? Vrt s 2 puklinami:
  - puklina A – s vyšší hydraulická výškou, méně propustná
  - puklina B – s nižší hydraulickou výškou, více propustná

Odkud je voda ve vrtu dominantně?

1) Za přirozeného stavu?

2) Během čerpání?



# Horizontální proudění

- Homogenní izotropní kolektor bez vrtu

$$v_{\infty} = -K(\nabla h)_{\infty}$$

objemový tok

hydraulická vodivost

hydraulický gradient

- Rádi bychom určili velikost konstantního vektoru  $v_{\infty}$ , ale vrt proudění naruší - kombinace prázdného prostoru vrtu, zárubnice, obsypu a ovlivněného okolního prostředí

# Horizontální proudění – zdánlivá rychlost

- Ve stvolu vrtu pozorujeme horizontální proudění blízké proudění konstantní “zdánlivou rychlostí” (apparent velocity)

$$v_a = a v_\infty$$

zdánlivá rychlost

objemový tok

koeficient deformace proudění\*

**$\alpha=2.0$**

Přesná teoretická hodnota pro pouhý vrt v nezměněném prostředí. Hodnota nijak nezávisí na okolní vodivosti ani na poloměru vrtu. Používá se často jako odhad (což ale nemusí odpovídat situaci).

**$\alpha>2.0$**

Pokud je navíc přítomen obsyp propustnější než okolní prostředí. Obsyp k sobě stáhne proudění z okolního prostředí s teoretickým faktorem blízkým dvěma, samotný vrt pak do sebe stáhne i proudění z obsypu. Výsledný faktor se takto může přiblížit až hodnotě  $\alpha=4.0$ .

**$\alpha<1.0$**

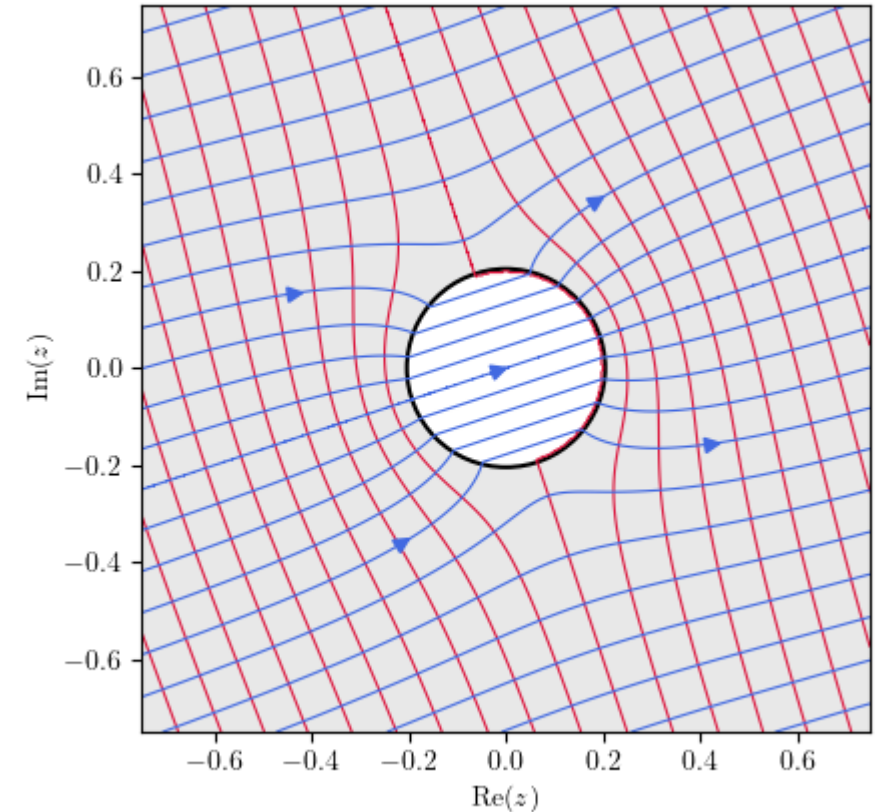
Vrt působí celkově jako překážka – typicky kvůli kolmataci. Dolní mezí je  $\alpha=0.0$ , kdy vrt s okolím nekomunikuje a horizontální proudění v kolektoru jej obtéká.

$$v_\infty = -K(\nabla h)_\infty$$

objemový tok

hydraulická vodivost

hydraulický gradient

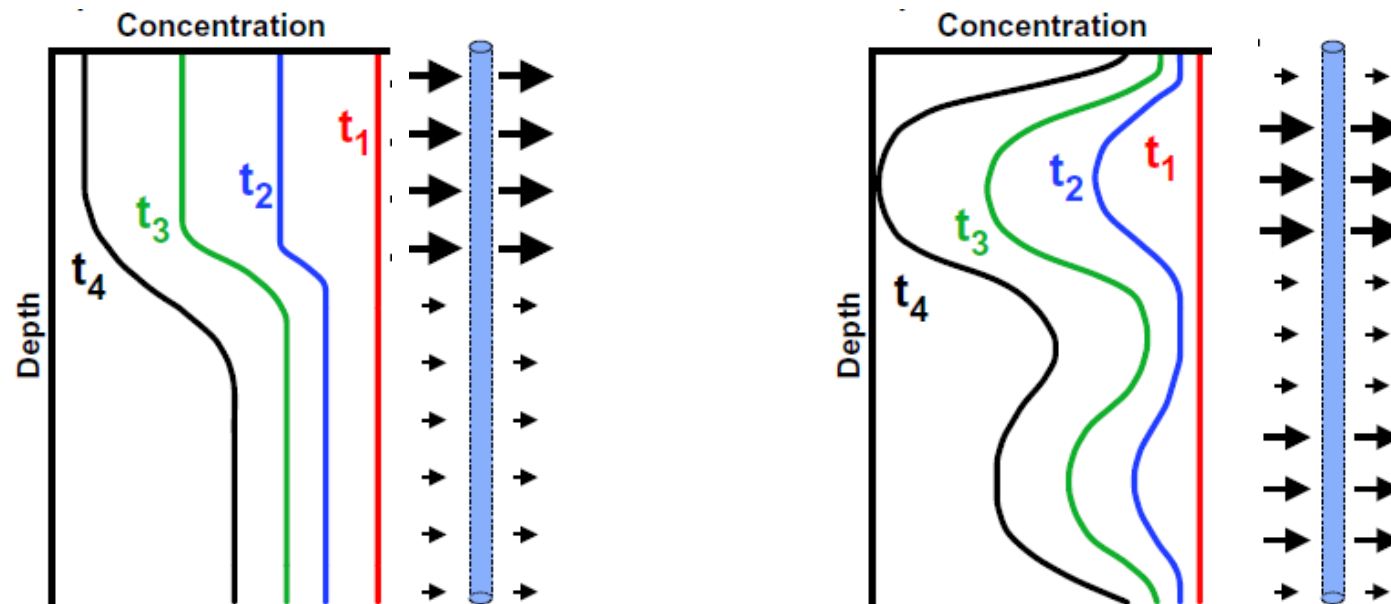


Proudové pole v případě  $\alpha=2.0$ . Analytické řešení, červeně izohypsy, modře proudnice.



# Metoda ředění označené kapaliny ve vrtu - výsledky

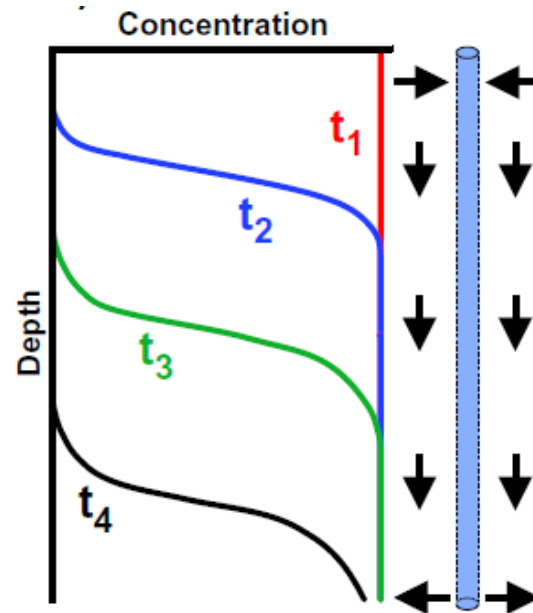
- typický znak horizontálního proudění



Fahrmeier et al. (2020)

# Metoda ředění označené kapaliny ve vrtu - výsledky

- typický znak vertikálního přetékání
- posun charakteristického bodu za jednotku času (pístové vytlačování objemu)



Fahrmeier et al. (2020)



## *Příklad 1 – Nad Šlejfernou plošná injektáž*

# Metodika

- 4.6.2025
- ustálená HPV 16,16 m pod o.b., teplota 9,5°C
- 200 g NaCl v nylonovém vaku, se kterým se rovnoměrně pohybovalo v celé části vrtu pod HPV po dobu cca 20 min.
- konduktivita měřena WTW TetraCon na 100 m dlouhém kabelu
  - před začátkem injekece
  - po jejím konci – po ca 20 min.
- konduktivita zaznamenávána po 0,5 m
- mezi 20 a 22 m bylo měření zahuštěno na 0,25 m
- jedno měření jedním směrem (nahoru nebo dolů) trvalo přibližně 5-10 min.
- časy měření dále odpovídají vždy danému začátku měření (nahore pro směr dolů, dole pro směr nahoru)

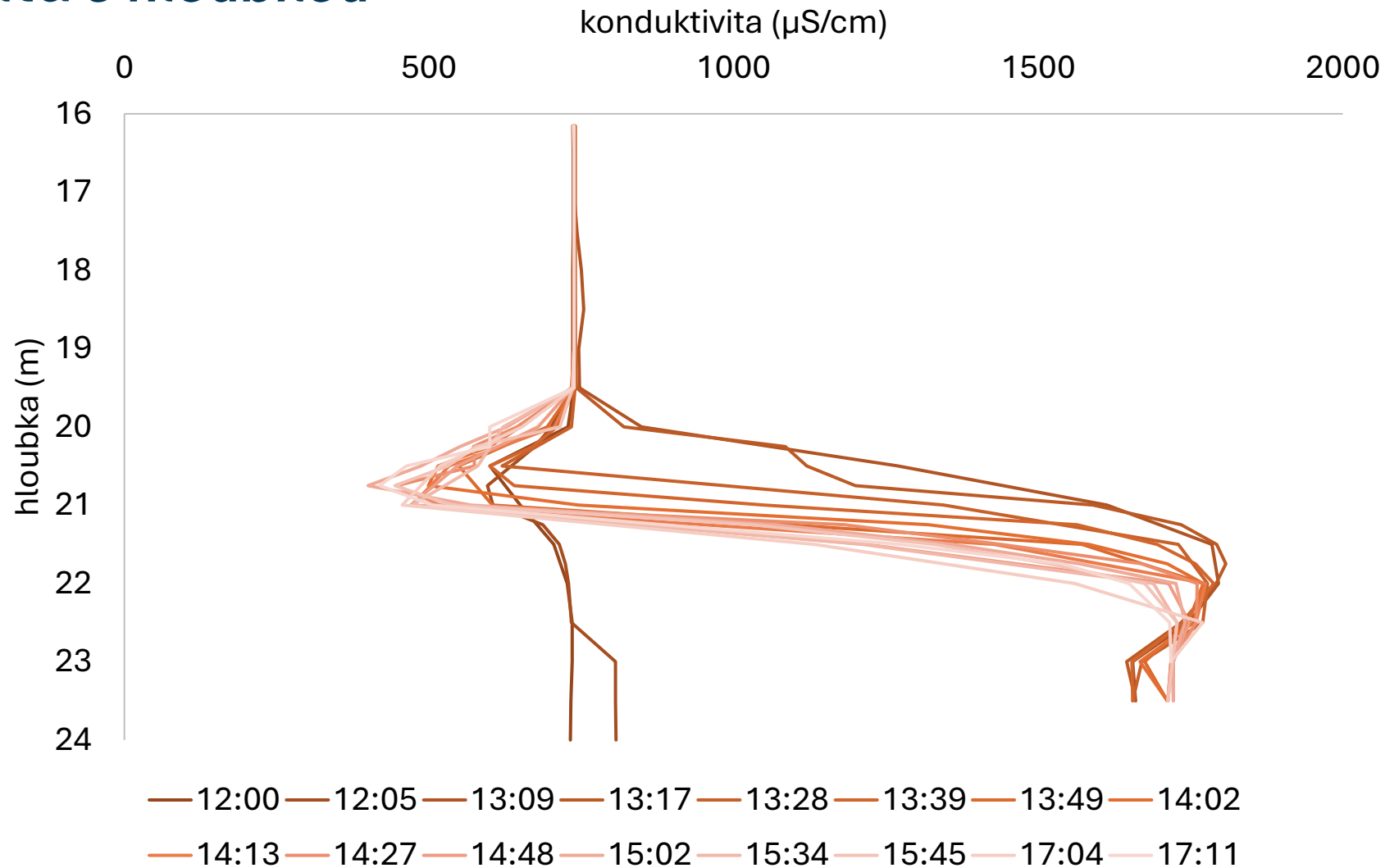


# Čistá data

| čas 1  |        |         | 13:09  | 13:17 | 13:28  | 13:39 | 13:49  | 14:02 | 14:13  | 14:27 | 14:48  | 15:02 | 15:34  | 15:45 | 17:04  | 17:11 |
|--------|--------|---------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|        | 0 down | 0 up    | 1 down | 1 up  | 2 down | 2 up  | 3 down | 3 up  | 4 down | 4 up  | 5 down | 5 up  | 6 down | 6 up  | 7 down | 7 up  |
| 16.155 | 737    | 736     | 738    | 740   | 740    | 739   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 737    | 738   |
| 16.5   | 738    | 737     | 738    | 740   | 740    | 739   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   |
| 17     | 738    | 737     | 738    | 740   | 740    | 739   | 739    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   |
| 17.5   | 738    | 737     | 743    | 740   | 740    | 739   | 739    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   |
| 18     | 738    | 736     | 750    | 740   | 740    | 739   | 739    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   |
| 18.5   | 738    | 736     | 754    | 740   | 740    | 740   | 739    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   |
| 19     | 738    | 736     | 746    | 740   | 740    | 740   | 739    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   | 738    | 738   |
| 19.5   | 738    | 735     | 747    | 742   | 740    | 740   | 738    | 734   | 738    | 738   | 736    | 735   | 738    | 736   | 738    | 738   |
| 20     | 728    | 701     | 849    | 820   | 734    | 710   | 694    | 650   | 706    | 644   | 679    | 628   | 622    | 715   | 653    | 600   |
| 20.25  |        | 674     |        | 1085  |        | 670   |        | 600   |        | 573   |        | 551   |        | 577   |        | 600   |
| 20.5   | 600    | 460-620 | 1270   | 1120  | 620    | 600   | 549    | 515   | 533    | 575   | 547    | 487   | 580    | 531   | 518    | 463   |
| 20.75  |        | 596     |        | 1200  |        | 640   |        | 499   |        | 447   |        | 400   |        | 444   |        | 419   |
| 21     | 650    | 605     | 1613   | 1590  | 1345   | 1050  | 604    | 745   | 473    | 518   | 470    | 568   | 472    | 537   | 456    | 505   |
| 21.25  |        | 687     |        | 1735  |        | 1564  |        | 1320  |        | 1182  |        | 1071  |        | 1031  |        | 884   |
| 21.5   | 705    | 714     | 1785   | 1793  | 1730   | 1695  | 1572   | 1583  | 1428   | 1439  | 1217   | 1358  | 1212   | 1330  | 1133   | 1274  |
| 21.75  |        | 724     |        | 1808  |        | 1758  |        | 1712  |        | 1670  |        | 1568  |        | 1519  |        | 1539  |
| 22     | 727    | 729     | 1796   | 1792  | 1778   | 1788  | 1771   | 1771  | 1775   | 1761  | 1714   | 1726  | 1689   | 1675  | 1560   | 1649  |
| 22.5   | 735    | 734     | 1747   | 1735  | 1770   | 1738  | 1746   | 1755  | 1759   | 1760  | 1748   | 1741  | 1728   | 1728  | 1770   | 1716  |
| 23     | 735    | 806     | 1655   | 1645  | 1670   | 1654  | 1675   | 1667  | 1718   | 1718  | 1722   | 1720  | 1720   | 1720  | 1718   | 1718  |
| 23.5   | 733    | 806     | 1660   | 1660  | 1655   | 1655  | 1712   | 1712  | 1713   | 1713  | 1722   | 1722  | 1713   | 1713  |        |       |
| 24     | 732    | 807     |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |        |       |
| čas 2  |        |         | 13:13  |       | 13:34  |       | 13:53  |       | 14:19  |       | 14:54  |       | 15:40  |       | 17:06  |       |



# Konduktivita s hloubkou



# TDS-konduktivita

- Vztah mezi množstvím celkových rozpuštěných látek (TDS – Total Dissolved Solids) a elektrickou konduktivitou vody přímo úměrný.
- Není dokonale lineární v celém rozsahu (závisí na konkrétním složení iontů a teplotě), pro běžné hydrogeologické účely a mineralizace se vyjadřuje pomocí empirického lineárního koeficientu:

$$TDS [m g/l] = k \cdot \gamma \cdot EC [\mu S/cm]$$

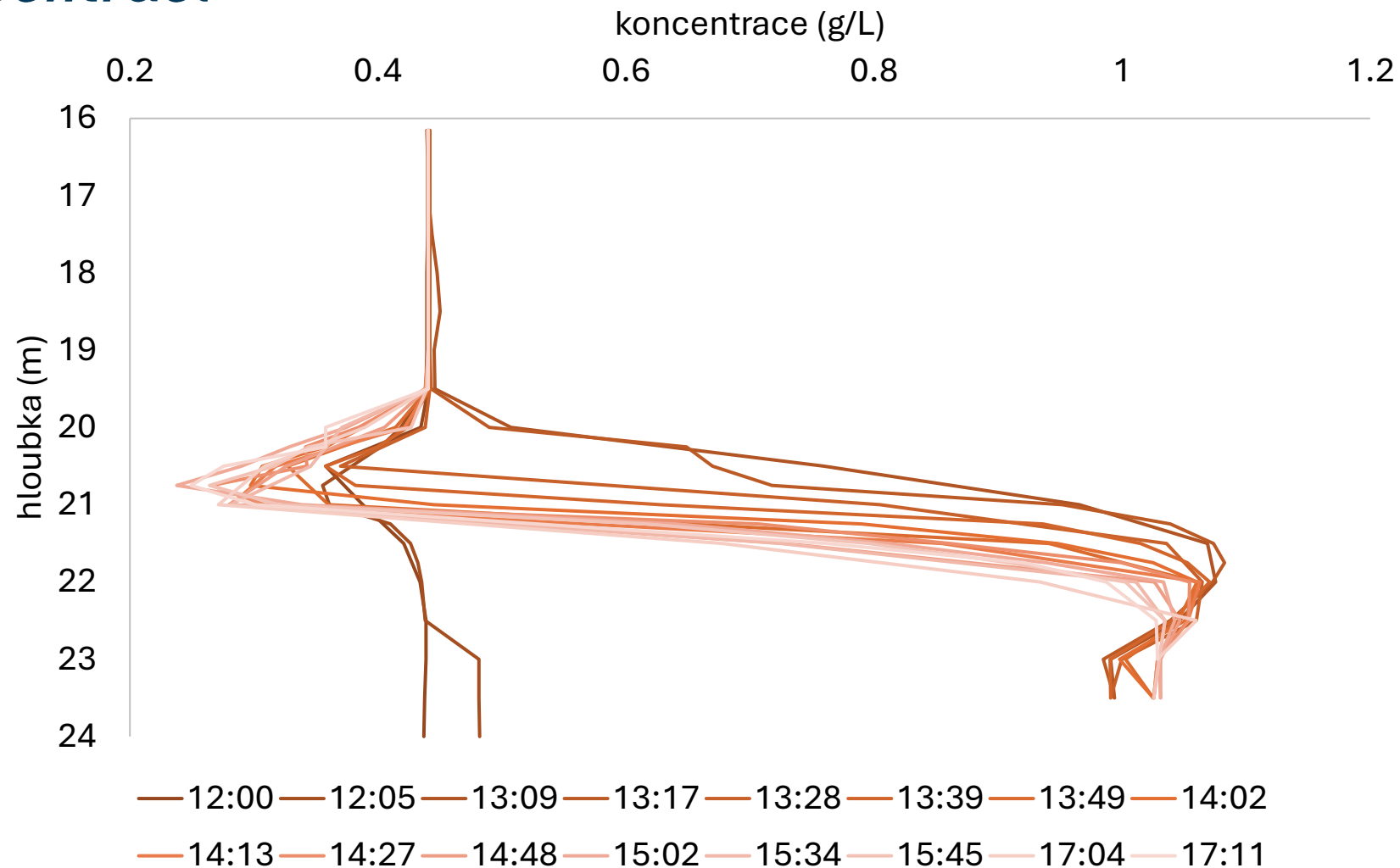
elektrická konduktivita při referenční teplotě 25°C

Total Dissolved Solids

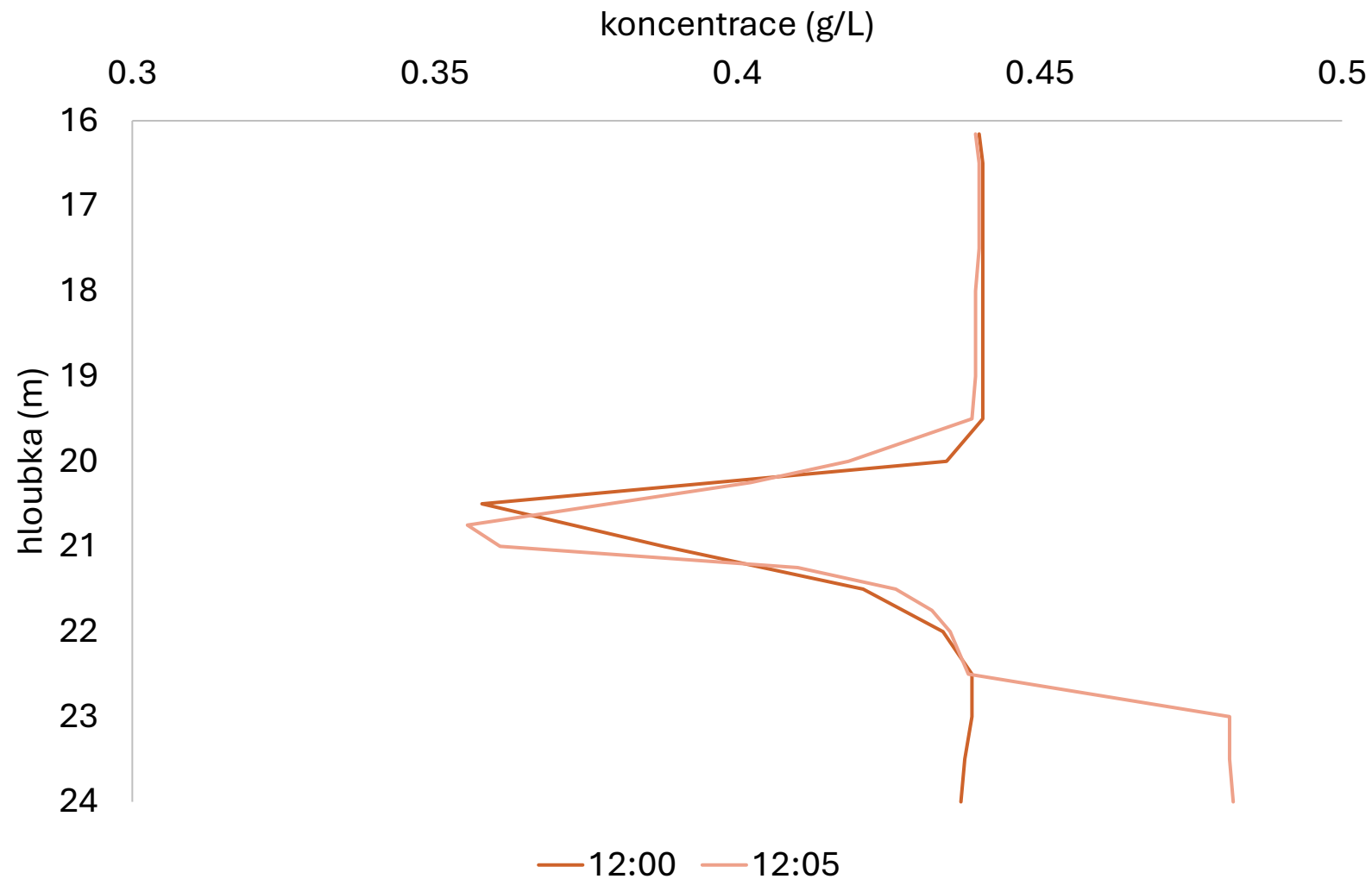
teplotní korekční faktor (měření bývá ale už kompenzováno přístrojem)

empirický koeficient – v přírodních podzemních vodách nejčastěji v rozmezí 0,55 až 0,72 (Marandi et al., 2013; Thorslund and Vliet, 2020)

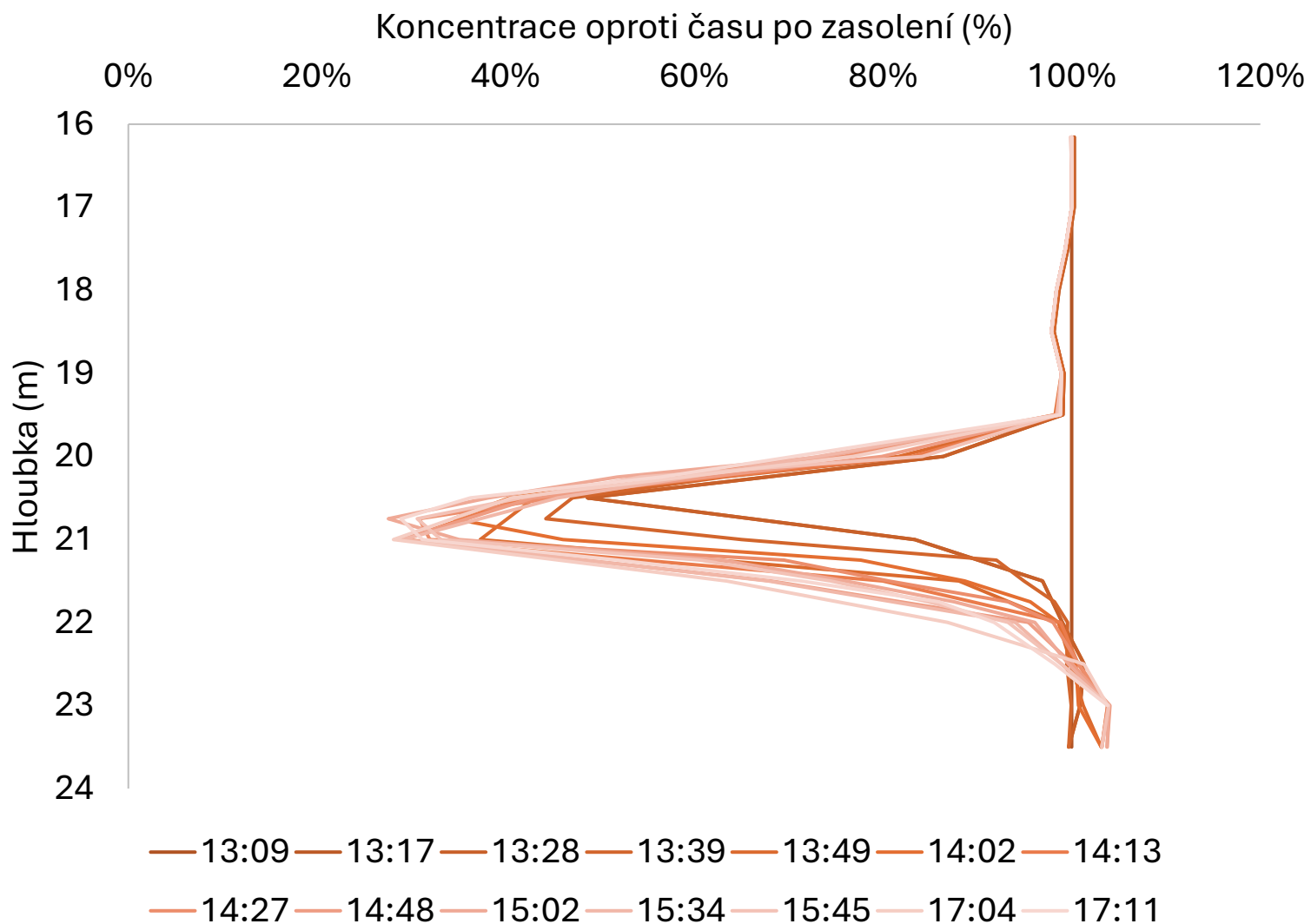
# Převedení na koncentraci



## Podrobnější pohled – před injekcí



# Vykreslení procentuálně oproti měření po zasolení



# Zdánlivá horizontální rychlost a pozorované ředění

- založena na závislosti ředění za čas
- předpoklady: nereaktivní stopovač, okamžitou injektáž, ředění stopovače je způsobeno pouze horizontálním prouděním podzemní vody – bez difuze, dokonalé mísení

$$\frac{dc}{dt} = -\frac{2 v_a}{\pi r} (c - c_\infty)$$

Diagrammatic annotations for the equation above:

- koncentrace ve vrtu (points to  $c$ )
- zdánlivá filtrační rychlost (points to  $v_a$ )
- koncentrace v okolí (points to  $c_\infty$ )
- poloměr vrtu (points to  $r$ )

$$\ln(c(t) - c_\infty) = -\left(\frac{2 v_a}{\pi r}\right) t + \ln(c(0) - c_\infty)$$

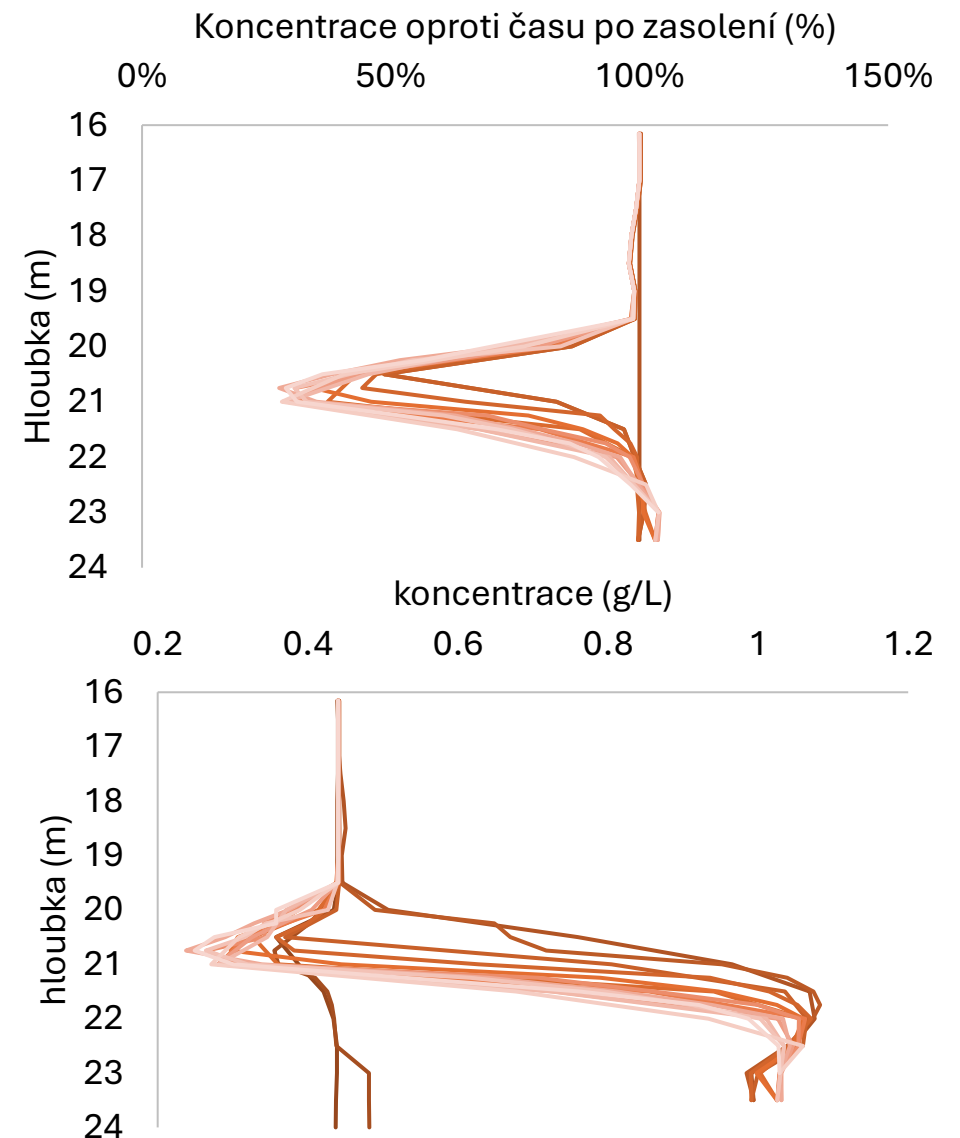
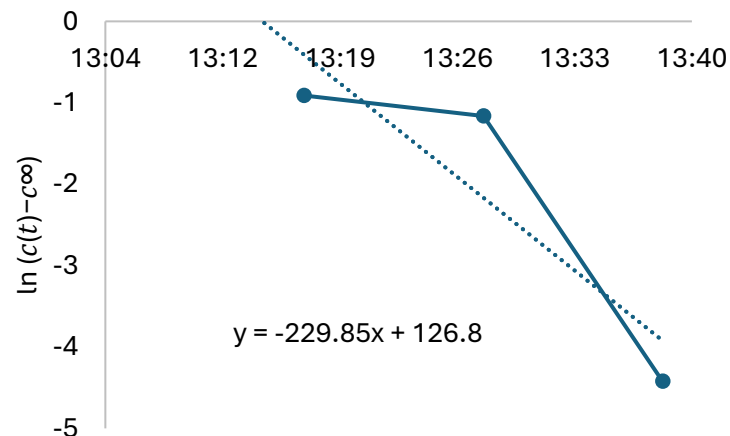
# Zdánlivá horizontální rychlost a pozorované ředění

$$\ln(c(t) - c_{\infty}) = -\left(\frac{2 v_a}{\pi r}\right) t + \ln(c(0) - c_{\infty})$$

- $c$  se tedy exponenciálně přibližuje  $c_{\infty}$  a při známém  $r$  určíme  $v_a$  ze sklonu koncentrace  $c - c_{\infty}$  na semilogaritmickém grafu:

$$y = -mx + b$$

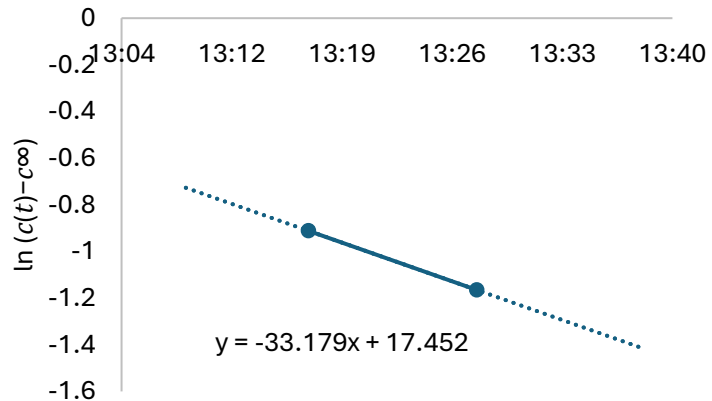
$$v_a = \frac{m \pi r}{2}$$



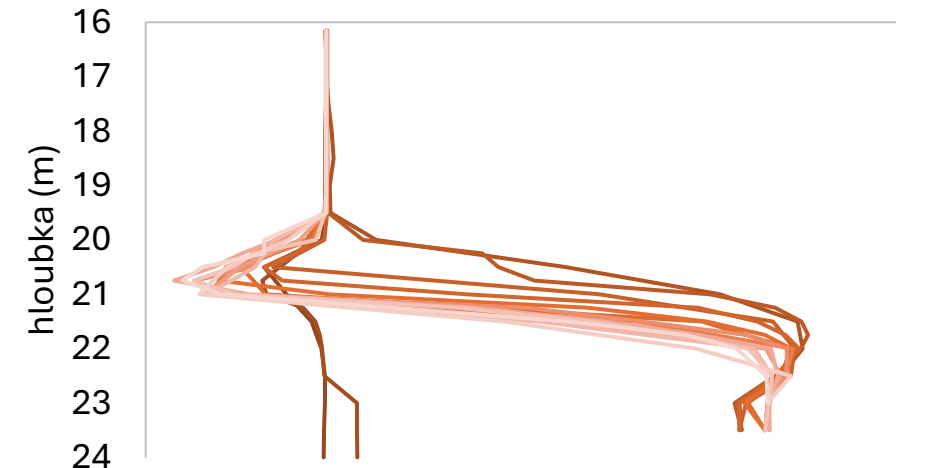
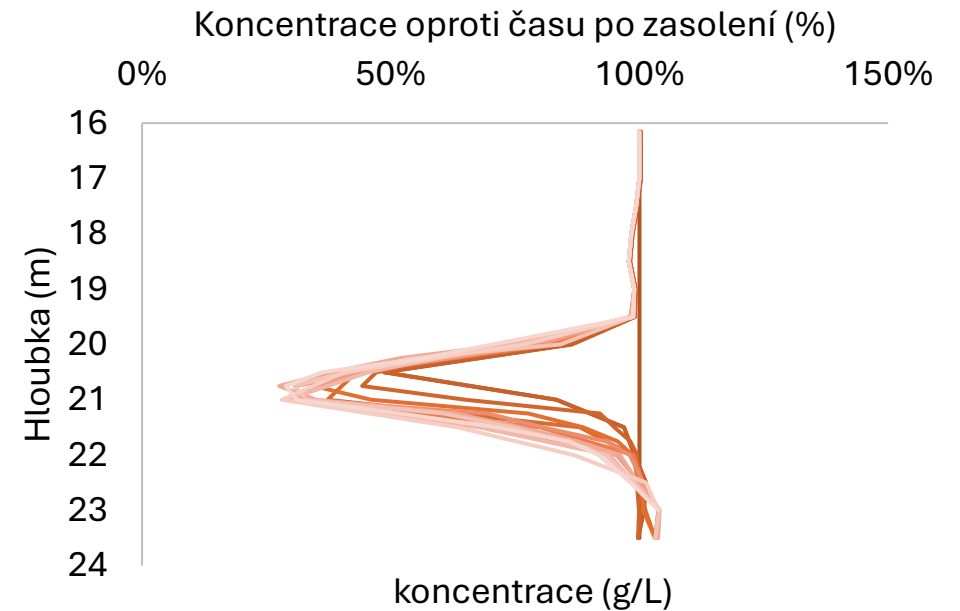
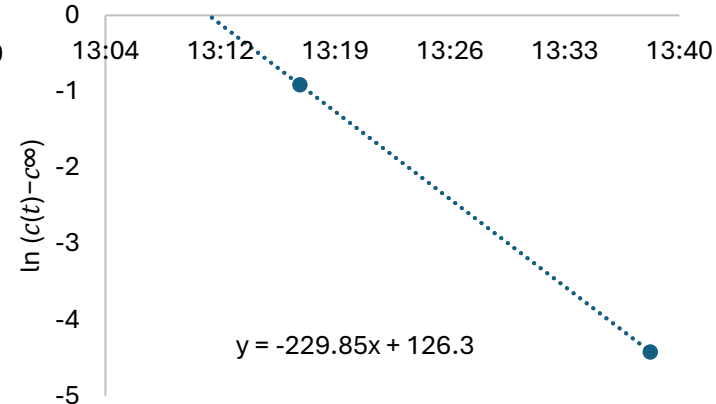
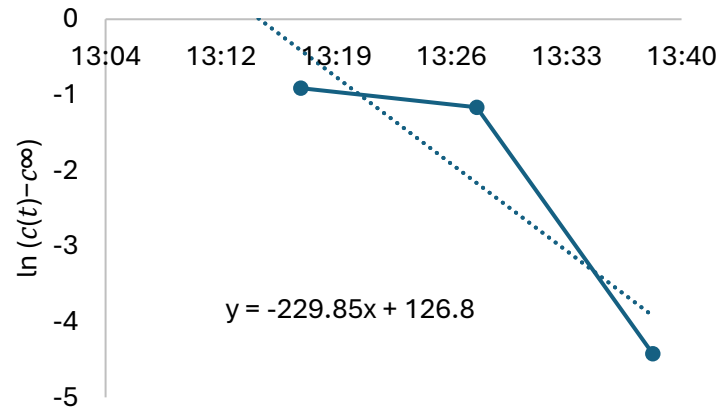
# Zdánlivá horizontální rychlost a pozorované ředění

$$v_a = \frac{m \pi r}{2}$$

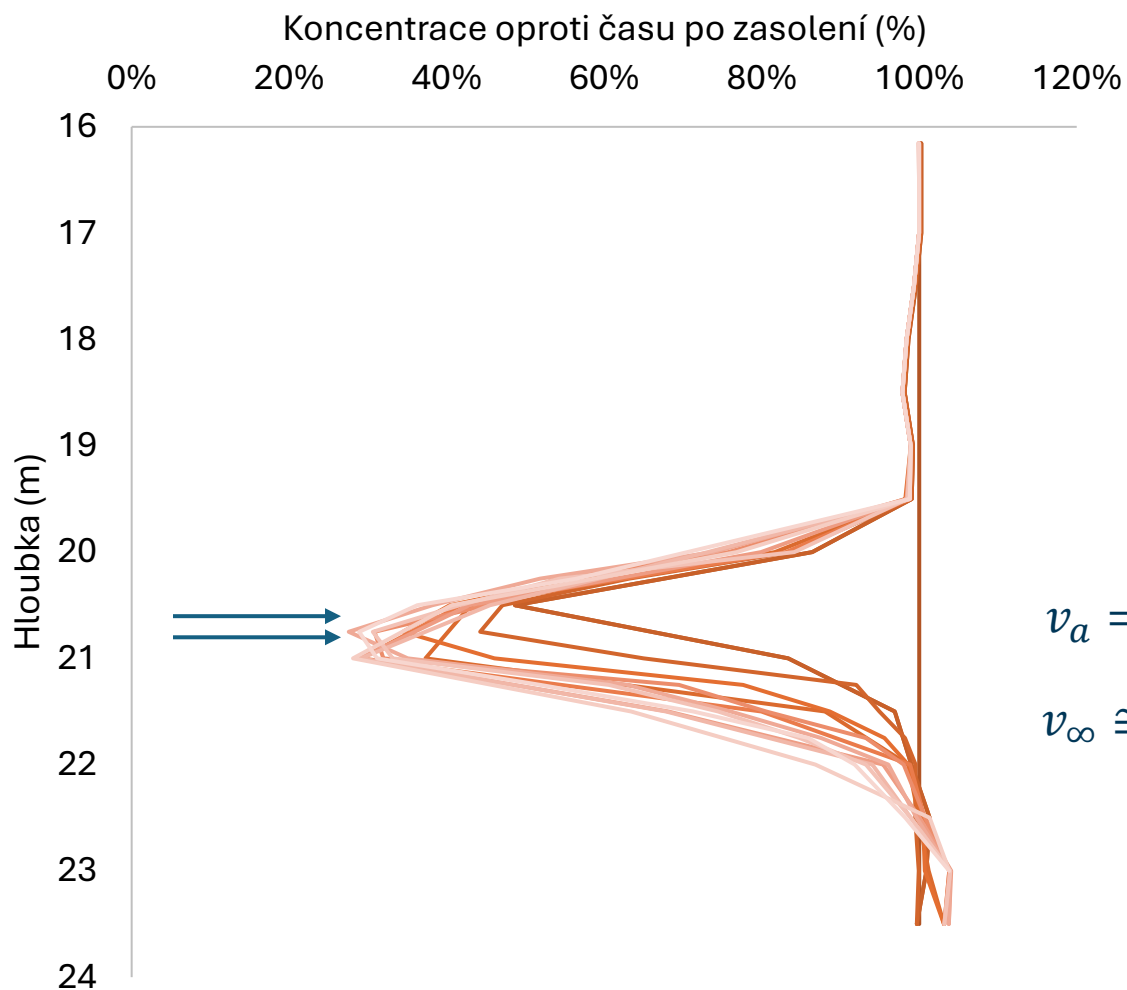
|    |         |
|----|---------|
| m  | 33      |
| va | 7 m/den |



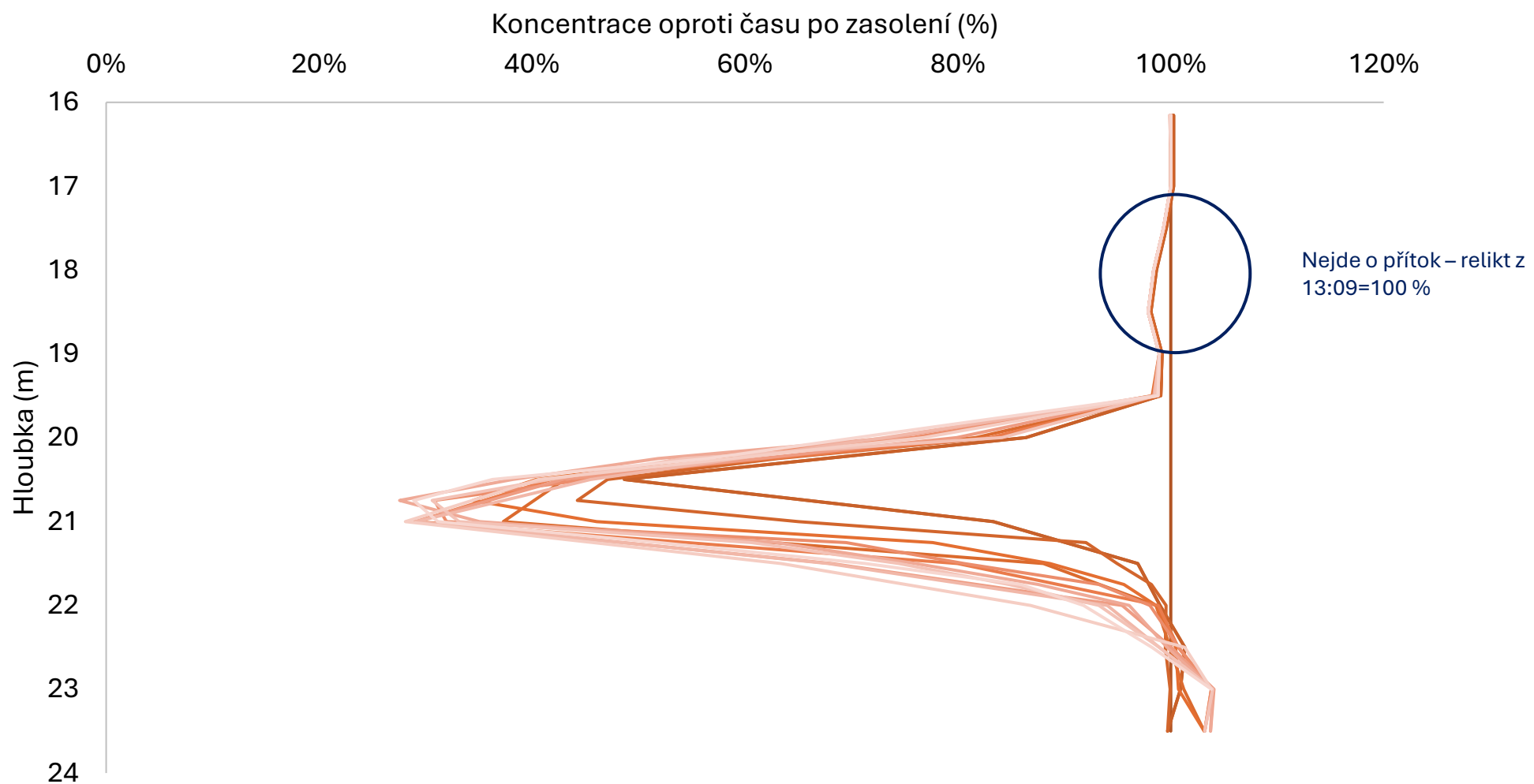
|    |          |
|----|----------|
| m  | 230      |
| va | 45 m/den |



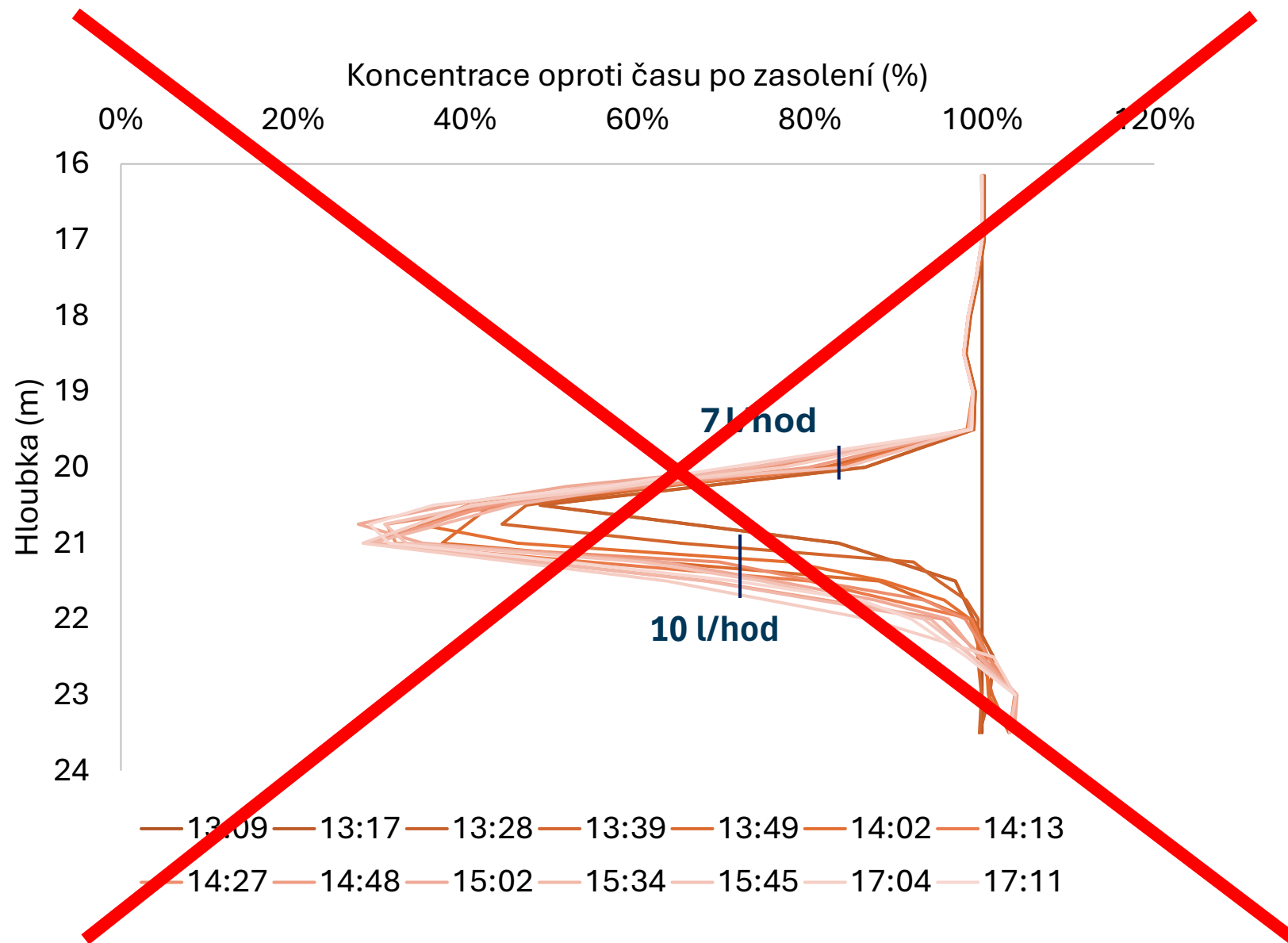
# Horizontální proudění



# Horizontální proudění

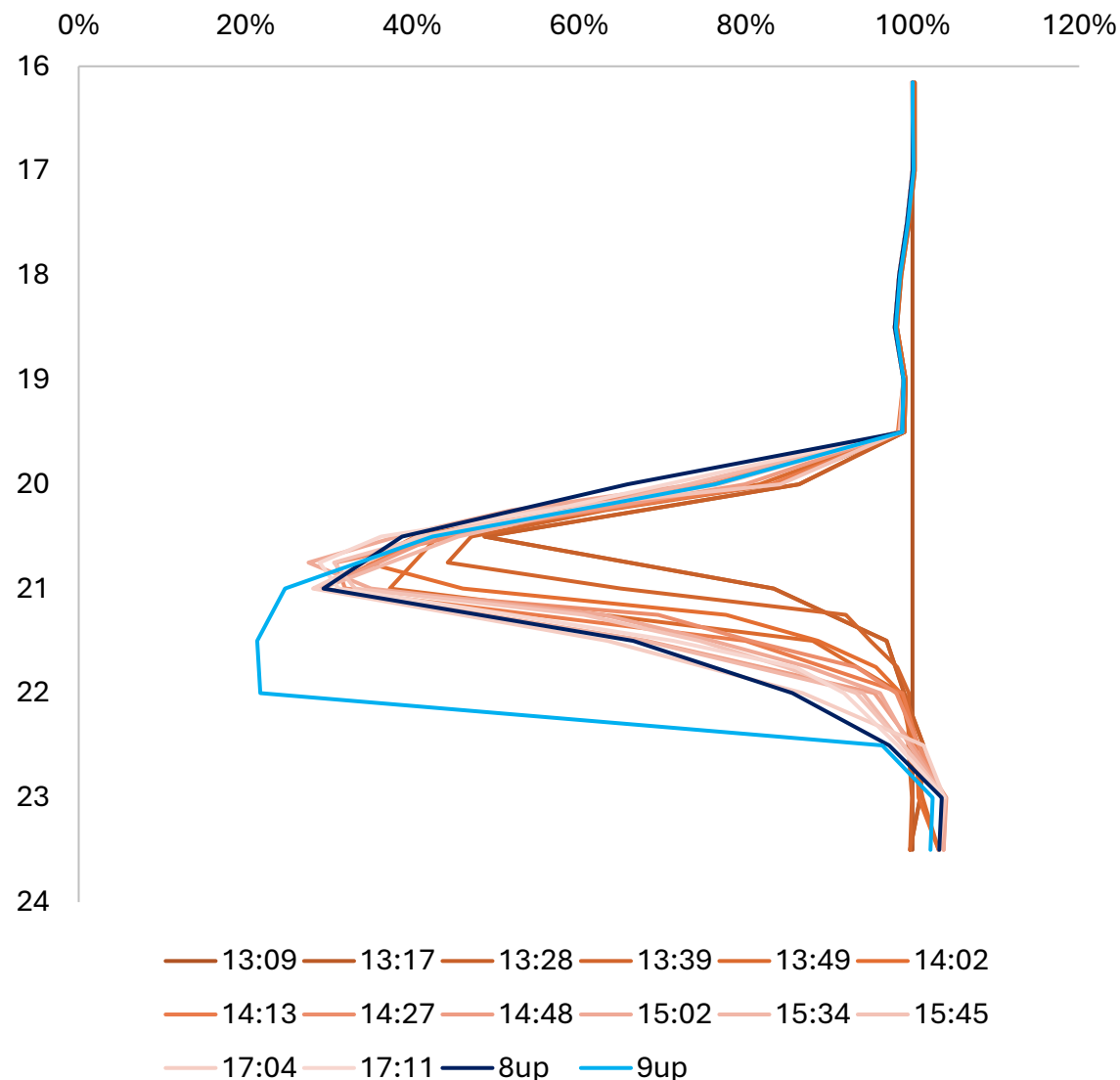


# Vertikální proudění



# Čerpání další den

- Další informace z dalšího dne 8up=další den ráno, pak čerpák a 9up po čerpáku
- U 8up je vidět, že nedošlo k žádné změně od posledního měření v 1711.
- Čerpání vody způsobilo, že se posunula křivka konduktivity níž a rozšířilo se množství odčerpané vody – prostor, kde byla voda s nižší konduktivitou.
- Návrh co dál?
  - kvantifikace přetoku pomocí vrtulky/kamery, příp. rezistivimetrie velmi krátká, aby se zachytil úplný začátek.





## ***Příklad 2 – Nad Šlejfernou bodová injektáž***

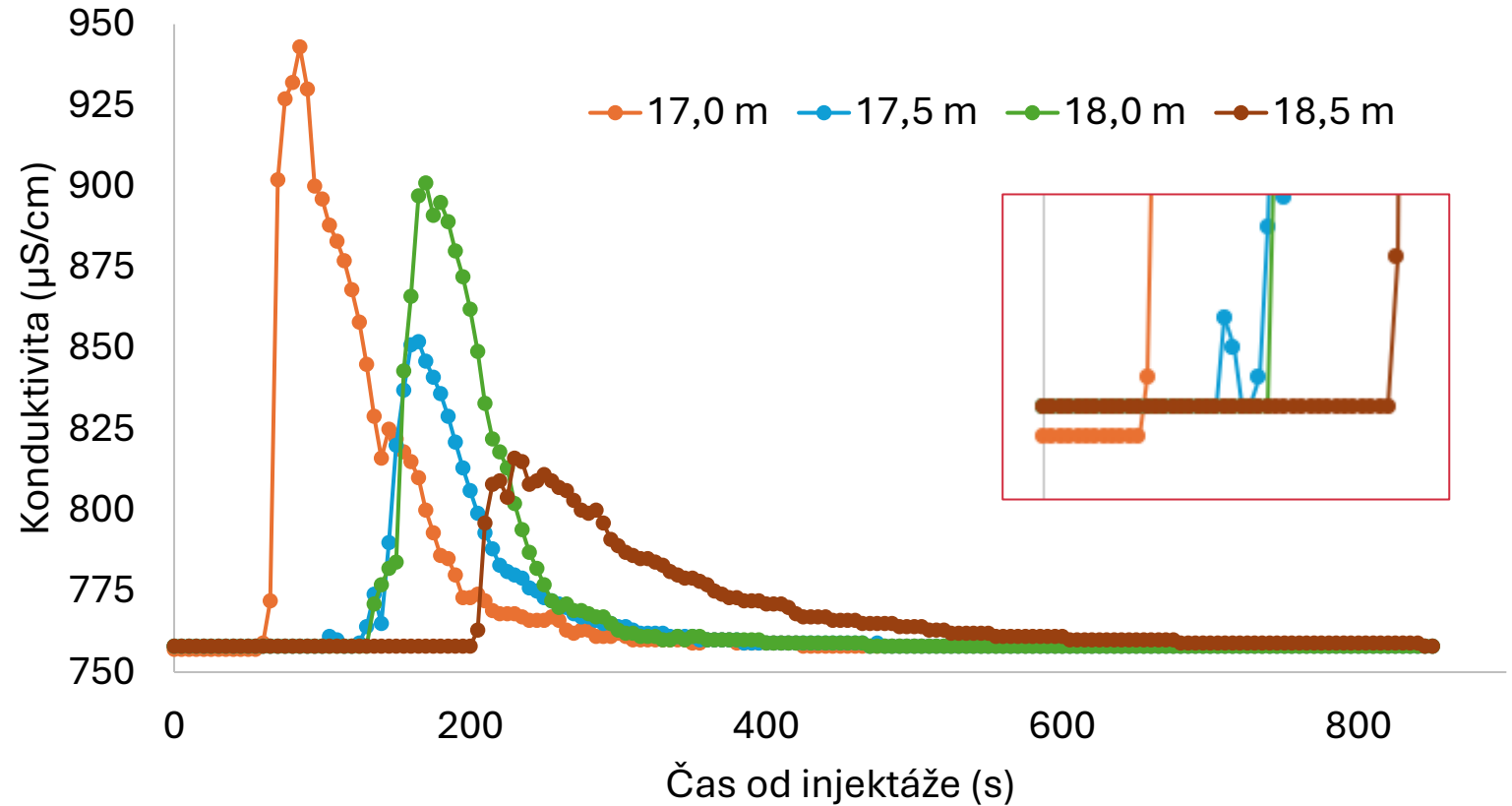
# Metodika

- 7.6.2026
- ustálená HPV 16,24 m pod o.b., teplota 9,5°C
- 100 ml 5,8 g/l roztoku vylitím těsně nad hladinou
- 4 opakování totožného pokusu
- konduktivita měřena WTW TetraCon ve 4 hloubkách
  - 17,0 m
  - 17,5 m
  - 18,0 m
  - 18,5 m
- délka od injeckáže do poklesu na pozad'ovou hodnotu 7-14 min.



# Konduktivita v čase pro jednotlivé hloubky

- S rostoucí hloubkou by měl vrchol konduktivity nastávat později, a také být nižší kvůli disperzi roztoku
- Časový rozdíl mezi hloubkami 17,5 a 18,0 m krátká, max. konduktivita v 17,5 m je nižší. Jak je to možné?
- 1) Metodika – nedostatečné promíchání
- 2) Metodika - rozlití malého množství roztoku při spouštění nádoby pro injektáž do vrtu, které se projevilo malým vzestupem konduktivity před nástupem hlavního peaku



# Výpočet rychlosti A – kinematický přístup

- Výpočet advekční rychlosti postupu
- Přímá informace o rychlosti pohybu vody, konceptuálně jednodušší a rychlejší na vyhodnocení (v případě využití maxim)
- V tomto případě hloubky 17,0 a 18,5 m
  - vertikální rychlost proudění plnou pažnicí
  - 900 m/den, tj.  $1 \times 10^{-2}$  m/s
  - odpovídá přetoku ze svrchního perforovaného úseku do spodního 11 m<sup>3</sup>/den
  - z naměřeného průběhu koncentrace návratnost stopovače 90 %
  - zbývajících 10 % pravděpodobně horizontální proudění ve svrchní zvodni (svrchním perforovaném úseku)

vertikální rychlost  
proudění plnou  
pažnicí

$$v_s = \frac{L}{t}$$

vzdálenost mezi maximy  
koncentrace ve dvou  
hloubkách (zde 17,0 a 18,5 m)

čas mezi maximy koncentrace ve  
dvou hloubkách (zde 17,0 a 18,5 m)

průtok

$$Q = v_s \pi r^2$$

návratnost

$$N = \frac{m_n}{m_i}$$

hmotnost  
zachyceného  
stopovače

hmotnost  
injektovaného  
stopovače

# Výpočet rychlosti B – hmotnostní bilance

- Vychází ze zákona zachování hmoty
- Sleduje, do jakého celkového objemu vody se v daném profilu rozptýlila přesně známá injektovaná hmotnost stopovače
- Spočítat průtok (Q) na základě měření konduktivity (EC) a injektáže definovaného množství NaCl.
- Postup
  - Stanovit požad'ovou konduktivitu (tj. konduktivitu před měřením).
  - Vykreslit graf koncentrace Na<sup>+</sup> a Cl<sup>-</sup> v čase s tím, že požad'ové konduktivitě bude odpovídat 0 g/l NaCl.
  - Vypočítat integrál křivky (A).
  - Vypočítat průtok (Q) v l/s.

průtok  $Q = \frac{m}{A}$  hmotnost stopovače

$A = \int_{t_0}^{t_1} C \cdot dt$  koncentrace stopovače

# Porovnání metod výpočtu vertikálního proudění

## KINEMATICKÝ PŘÍSTUP

- Sledování advekce stopovače v čase
- Obecně přesnější
- Vysoká závislost na geometrii vrtu – vyžaduje přesný poloměr  $r$
- Vysoká citlivost vlivu proudění – zachycuje nejrychlejší proudění v ose vrtu, což vede k nadhodnocení
- Ignoruje vliv disperze
- Nižší citlivost na promíchání (stačí zachytit průchod maxima)

### Vliv obsypu

- Podhodnocení celkového průtoku (ignoruje průtok obsypem)
- Pokud se měří v perforovaném úseku (filtru), dochází k neustálé výměně vody a stopovače mezi vnitřkem pažnice a obsypem. To deformuje polohu maxima  $C_{\max}$

## HMOTNOSTNÍ BILANCE

- Integrovaná látková bilance rozptylu známé hmotnosti stopovače
- Nulová závislost na geometrii vrtu
- Nízká citlivost vlivu proudění
- Zahrnuje vliv disperze (integrál přes celou křivku)
- Vysoká citlivost – vyžaduje homogenní promíchání stopovače

### Vliv obsypu

- Falešné nadhodnocení průtoku (při úniku stopovače)
- Obsyp znemožňuje zajistit a ověřit podmínku dokonalého promíchání v celém účinném průřezu



# Groundwater

Methods Note/

---

## DISOLV: A Python Package for the Interpretation of Borehole Dilution Tests

by Sarah L. Collins<sup>1</sup> and Marco Bianchi<sup>2</sup>

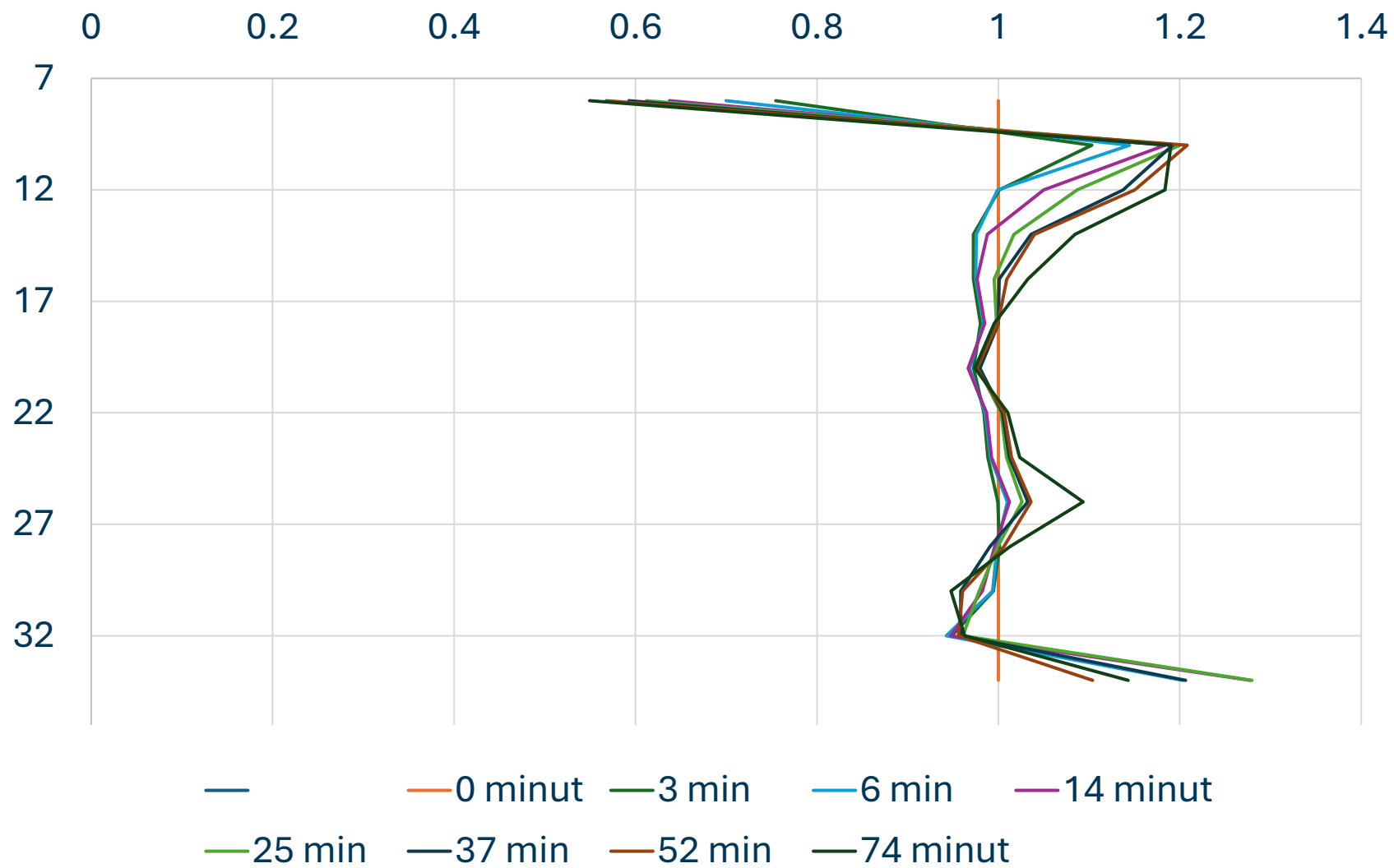
---

### Abstract

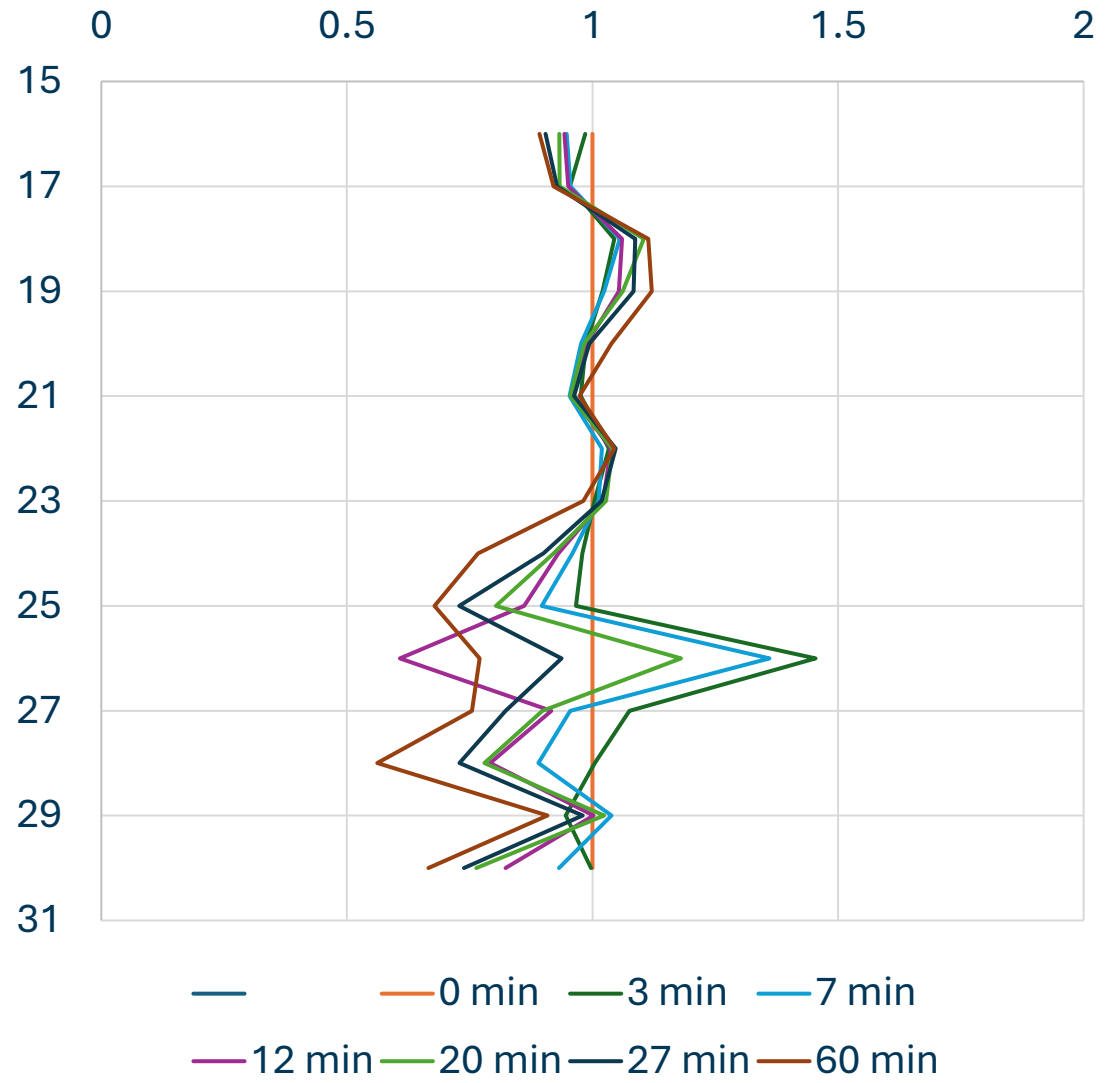
Single borehole dilution tests (SBDTs) are an inexpensive but effective technique for hydrogeological characterization of hard-rock aquifers. We present a freely available, easy-to-use, open-source Python package, DISOLV, for plotting, analyzing, and modeling SBDT data. DISOLV can significantly reduce the time spent interpreting field data by helping to identify flowing fractures intersecting the borehole and estimate the corresponding flow rates. DISOLV is successfully benchmarked against two analytical solutions. We also present an example application to real data collected in a borehole in a crystalline basement aquifer in southern India.

---

4



5



Interreg



Kofinanciert von  
der Europäischen Union  
Spolufinancováno  
Evropskou unií

Sachsen – Tschechien | Česko – Sasko



*Díky za pozornost.*



Přírodovědecká fakulta  
Univerzita Karlova

  
Univerzita  
Karlova

*Díky Martinu Lanzendörferovi, Kateřině Šabatové za pomoc s přípravou workshopu; Tomášovi Ondovčínovi, Jakubovi Marešovi a Martinu Slavíkovi za supervizi realizace plošné injektáže, následného měření a přátelskou spolupráci; studentstvu hydrologického a hydrogeologického kurzu PŘF UK (Jana Brožová, Petra Cíchová, Liliia Zuzuk, Elias Zagyi, Julie Žaliová a další) za realizaci většiny měření; Jiřímu Bruthansovi za komentář k první verzi článku; Interregu a Martinu Slavíkovi za financování a Olze Běhounek za administrativní a gastrologickou podporu.*