

Stárnutí vrtů, jejich diagnostika a regenerace

Ing. Daniel KAHUDA, PhD.

VODNÍ ZDROJE, a.s.

Česká zemědělská univerzita v Praze



O AUTOROVI

Daniel Kahuda, PhD.

daniel.kahuda@vodnizdroje.cz

kahuda@fzp.czu.cz

Tel.: +420 605 262 739

PROFESE

hydrogeolog, 24let praxe

1. VODNÍ ZDROJE, a.s. - hydrogeolog

2. Česká zemědělská univerzita v Praze, Fakulta životního prostředí, Katedra Vodního Hospodářství a Environmentálního modelování – externí výzkumník, pedagog

SPECIALIZACE

Testování a regenerace vrtaných studní

Terénní hydrogeologie



PROJEVY STÁRNUTÍ VRTŮ



STÁRNUTÍ VRTŮ A JEHO VÝZNAM

CO JE STÁRNUTÍ VRTŮ

- přirozený proces probíhající po vybudování a provozu studny
- lokální narušení původní rovnováhy proudění podzemní vody
- komplexní příčiny a důsledky

HLAVNÍ PŘÍČINY STÁRNUTÍ VRTŮ

- KOROZE
 - (elektro)chemická
 - biologická
- KOLMATACE (ucpávání) + tvorba sraženin a oxidace
 - Mechanická: zanášení jemnými sedimenty
 - Chemická: tvorba sraženin a oxidace
 - Biologická: biofouling

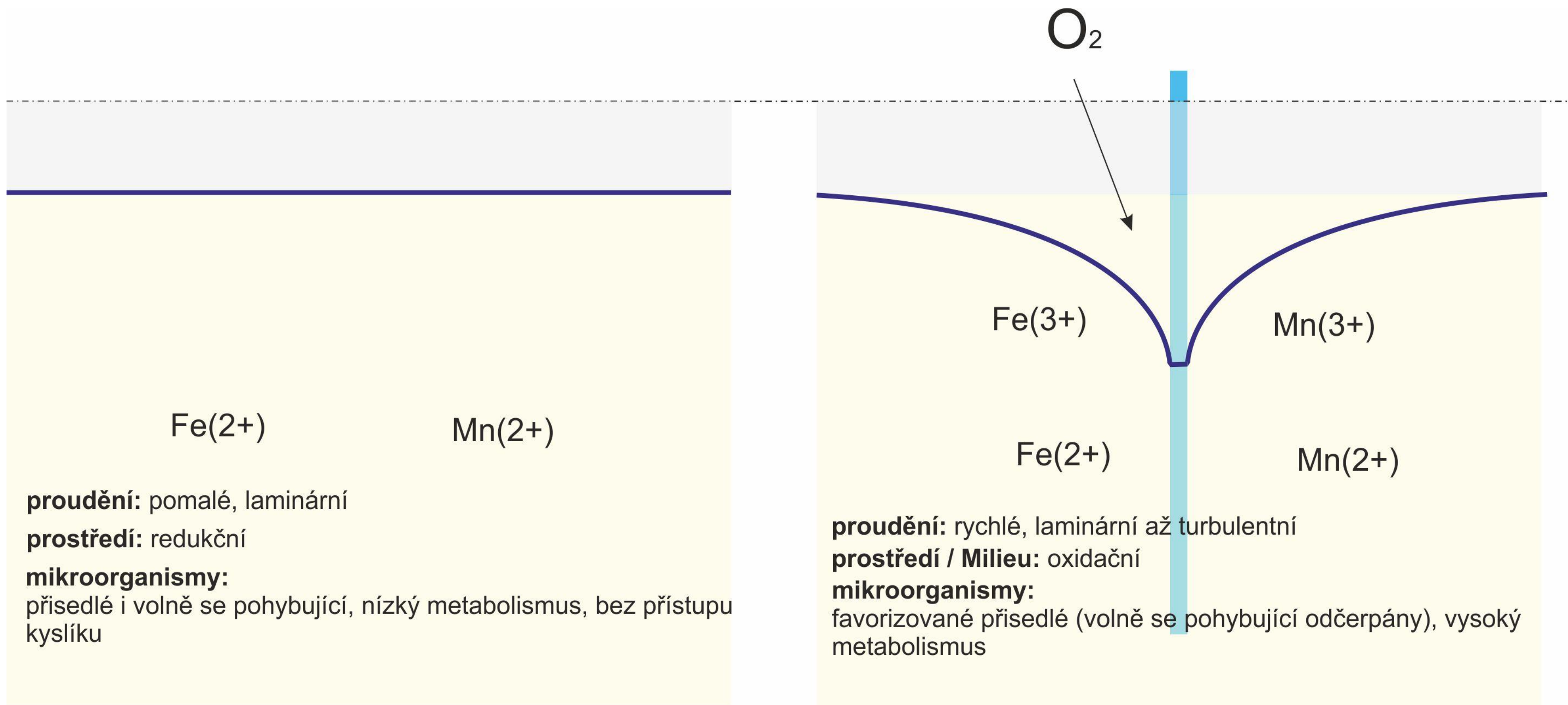
PROJEVY STÁRNUTÍ VRTŮ

- progresivní snižování vydatnosti vrtu (přítoku vody)
- degradace konstrukce vrtu
- snižování specifické kapacity a nárůst hydraulických ztrát

PŘEDPOKLAD DLOUHODOBÉHO PROVOZU JÍMACÍCH ZAŘÍZENÍ:

pravidelný a včasný monitoring vývoje vlastností vrtů pomocí vhodných diagnostických metod

ZMĚNY V KOLEKTORU PODZEMNÍ VODY PO REALIZACI A PROVOZU VRTU



KOROZE v objektech podzemní vody

koroze kovových materiálů = degradace ocelových součástí výstroje, pažení a čerpací kolony

◦ (elektro)chemický proces ~ galvanických článků, propojený vodivým elektrolytem.

oxidačně-redukční reakce: Kov (M) se oxiduje na ionty (M^{n+}) a přechází do roztoku, zatímco jiná složka (např. rozpuštěný kyslík, H^+ ionty) se redukuje.

◦ Rychlost koroze: dle chemického složení podzemní vody.

◦ Agresivní faktory: nízké pH, vysoká mineralizace (zvyšuje elektrickou vodivost), agresivní plyny jako oxid uhličitý (CO_2) a sirovodík (H_2S). Chloridy mohou ničit pasivační vrstvy (např. na nerezové oceli).

TYPY KOROZE VE VRTANÝCH STUDNÍCH:

- kontaktní: kontakt různých kovů (např. šrouby a příruba), více korozivní kov působí jako anoda a je degradován
- lokalizovaná (pitting): na malé ploše, při porušení ochranné (pasivační) vrstvy (např. oxid železa na oceli, oxidy kovů na nerezové oceli, barva, plast).
- mikrobiálně indukovaná koroze (MIC): anaerobní koroze železa způsobená sulfát-redukujícími bakteriemi, v přítomnosti SO_4 , produktem je H_2S

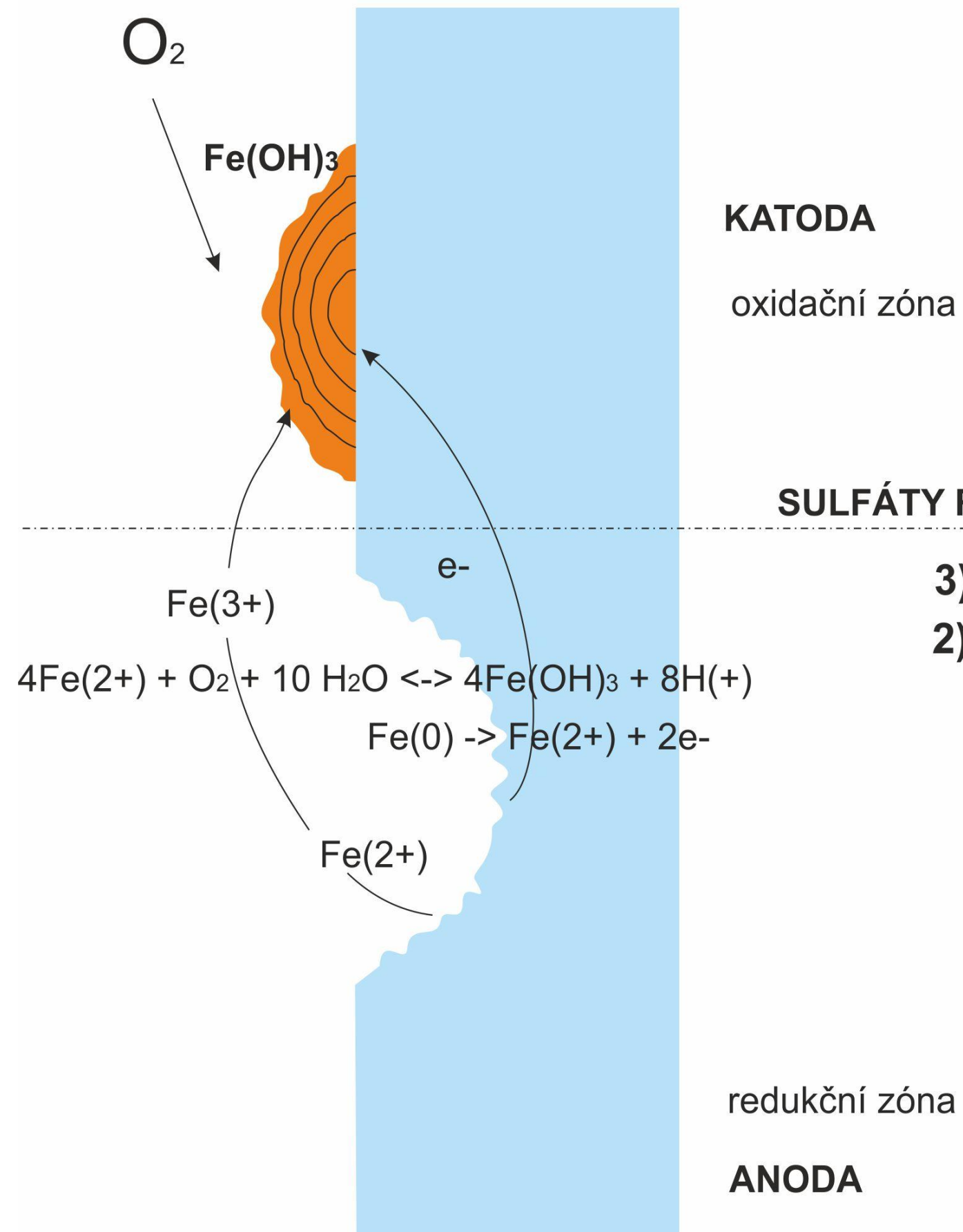
PRODUKTY KOROZE (oxidy/hydroxidy Fe, FeS) - směs minerálů, částečně magnetických (vč. Goethit, Lepidokrokit, Magnetit a Maghemit), přispívají ke kolmataci (ucpávání vrtů)

KOROZE NEKOVOVÝCH MATERIÁLŮ:

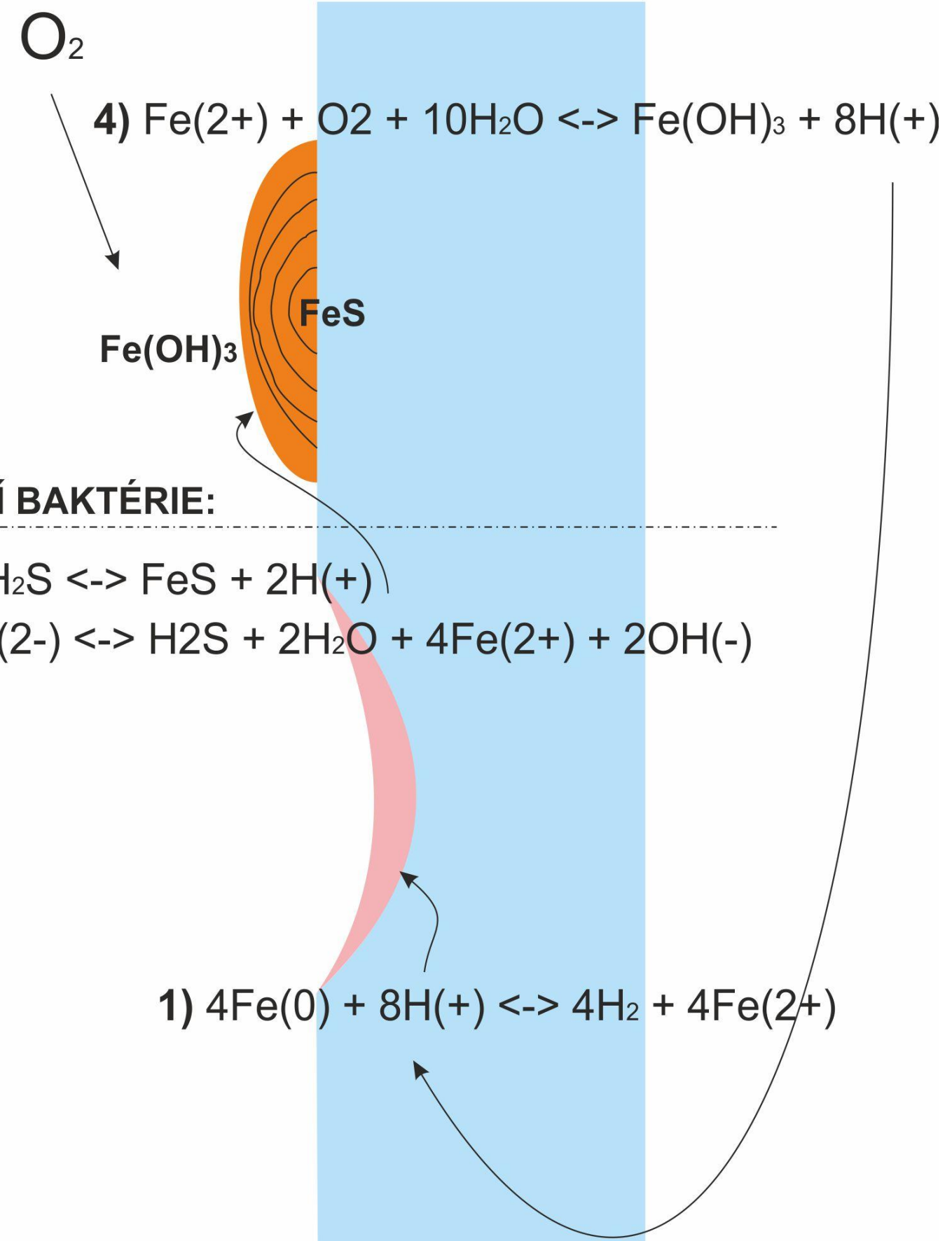
Proces chemicky definován pouze pro kovy, nicméně i nekovové materiály (např. plasty, těsnění, filtrační obsyp) podléhají stárnutí, tj. interakcím s jejich prostředím, které mohou negativně změnit jejich vlastnosti a funkčnost.

Hlavní mechanismy stárnutí vrtů: KOROZE

ELEKTRO-CHEMICKÁ KOROZE



MIKROBIÁLNÍ KOROZE



KOLMATACE – chemická/biologická = TVORBA SRAŽENIN A OXIDACE

KOLMATACE (ucpávání pórů sraženinami)

- mechanická (sufose)
- chemická (oxidace)
- mikrobiální (biofouling)

OXIDAČNÍ PROCESY V PODZEMNÍ VODĚ - hlavní příčina chemické a biologické kolmatace

- **OXIDACE Fe:** $\text{Fe}^{2+} + \text{O}_2 + \text{H}^+ \rightarrow \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O}$, následně $\text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_3$ (ferrihydrit) – nerozpustná sraženina, amorfní
→ sukcesivní tvorba starších inkrustací: Ferrihydrit-→Lepidokrokit($\gamma\text{-FeOOH}$)-→Goethit ($\alpha\text{-FeOOH}$)-→Hematit ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) - **REZAVÉ**
- **OXIDACE Mn:** $\text{Mn}^{2+} + \text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{MnO}_2$ (oxid manganičitý) – nerozpustná sraženina + H^+
→ Tvorba inkrustací: amorfni (Todorokit, Birnessit) i krystalické minerály (MnOOH , MnO_2) – **ČERNÉ**



MIKROBIÁLNÍ KOLMATACE - činnost železitých a manganových bakterií (Gallionella, Leptothrix)

- katalýza oxidačních reakcí
- produkce slizovitých biopolymerů (šlemů) s autokatalytickou funkcí (šlemy často kyselé s negativním nábojem), železité obaly
- biofilmy – komplexní společenství bakterií s různými metabolickými funkcemi (anaerobní bakterie skryté pod aerobními)

TVORBA SRAŽENIN:

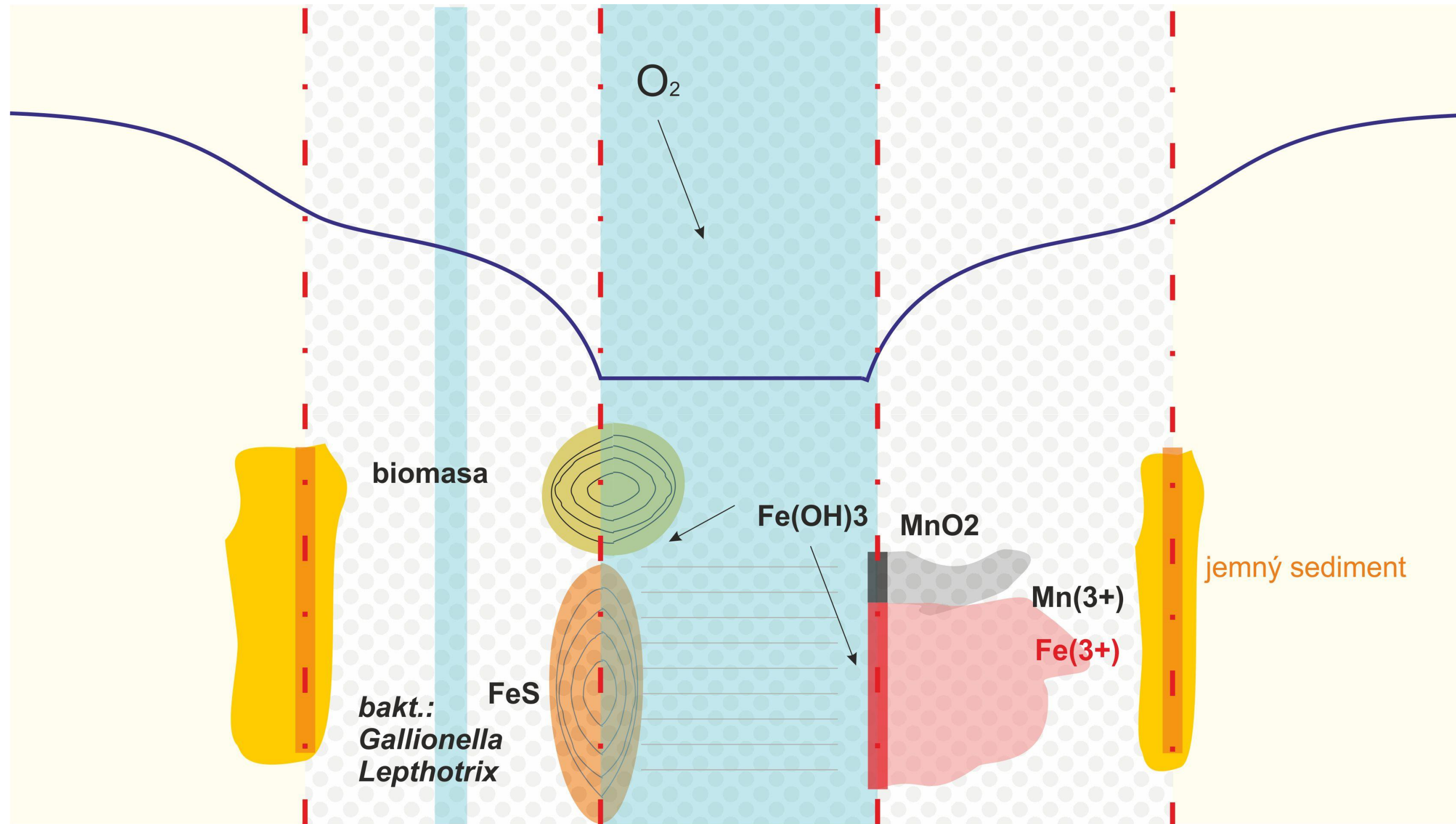
- **SULFIDY** - v redukčních podmínkách za činnosti sulfát-redukujících bakterií, redukce SO_4^{2-} na (H_2S) za využití organické hmoty -
reakce: $\text{H}_2\text{S} + (\text{Fe}^{2+}) \rightarrow \text{FeS}$ (Mackinawit, Greigit) -> Pyrit a Markasit (FeS_2)
- **KARBONÁTY** - kalcit a aragonit (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), v prostředí Fe^{2+} (a bez sulfidů) siderit (FeCO_3)
- **SÁDROVCE / SULFATE** - ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
- **V (GEO)TERMÁLNÍCH VRTECH:** silikáty, halogenidy (NaCl), elementární kovy...

KOLMATACE – mechanická = zanášení jemnými sedimenty

- mechanické opotřebení (abraze).
- sufoze (pískování vrtu) - vyplavování jemných částic

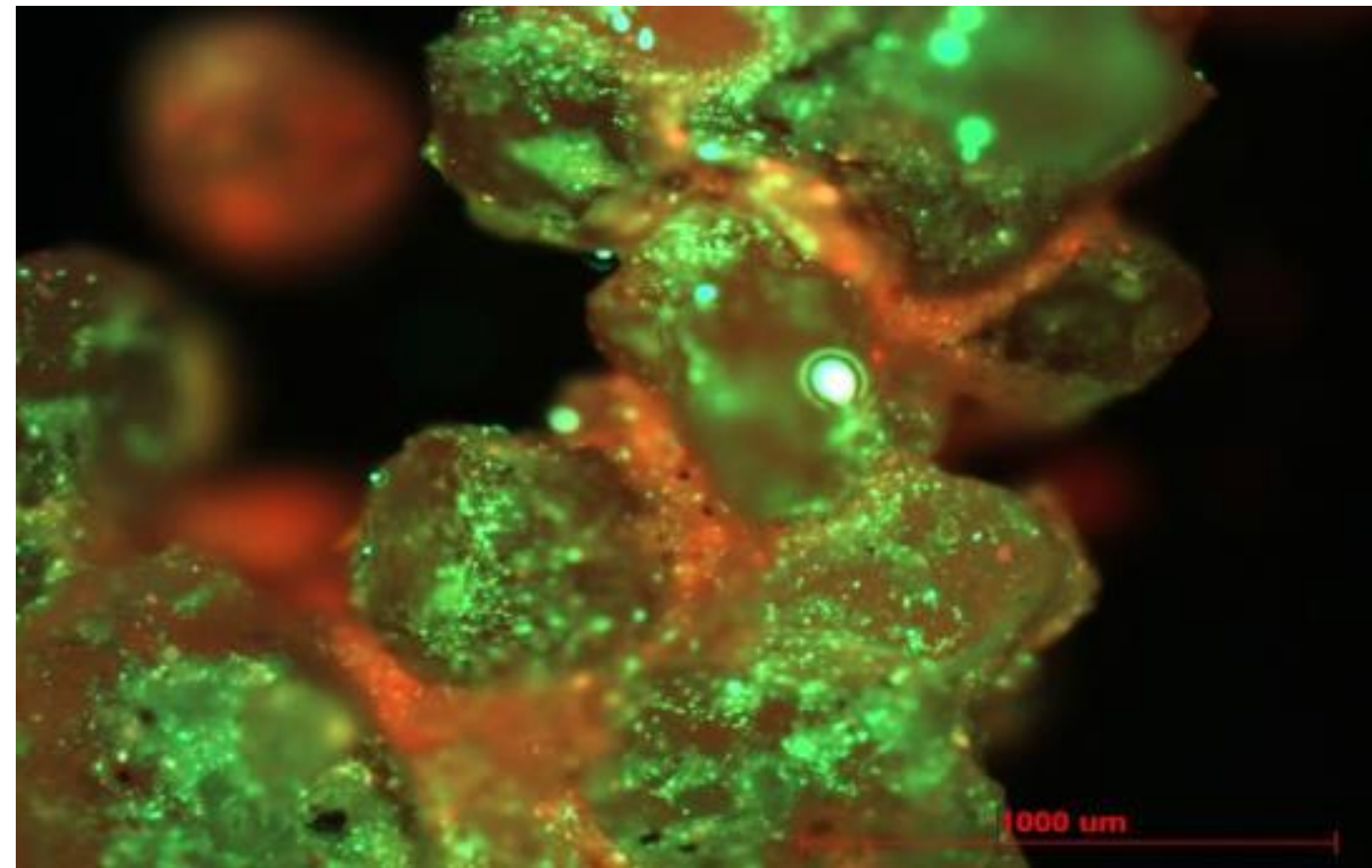
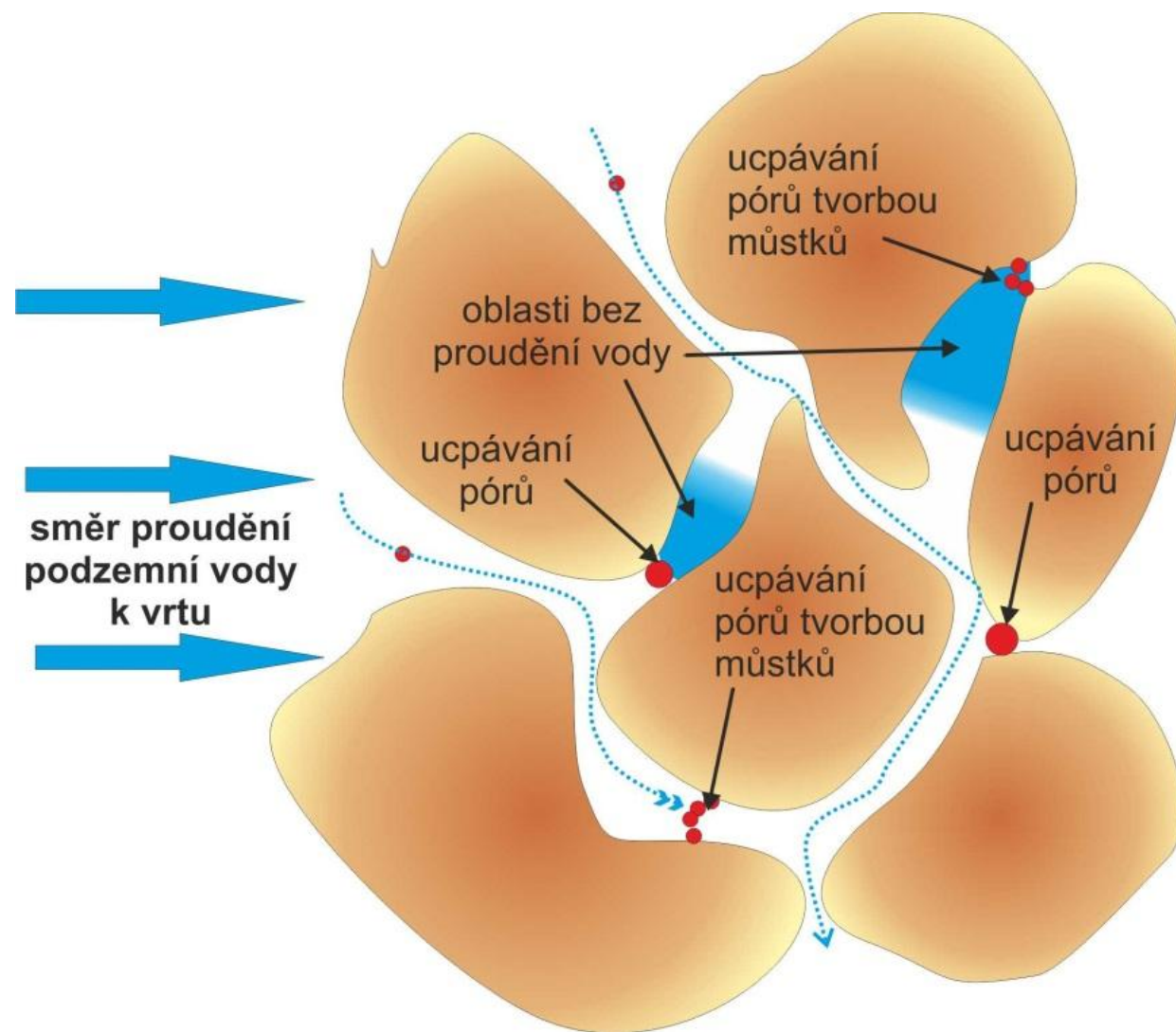
ŠKODY NA ZAPLÁŠŤOVÉ ÚPRAVĚ VRTU

- akumulace částic nebo kolmatace filtračního obsypu jemnější frakcí
- sedání filtračního obsypu - trhliny ve filtrech a těsnění, dutiny v mezikruží

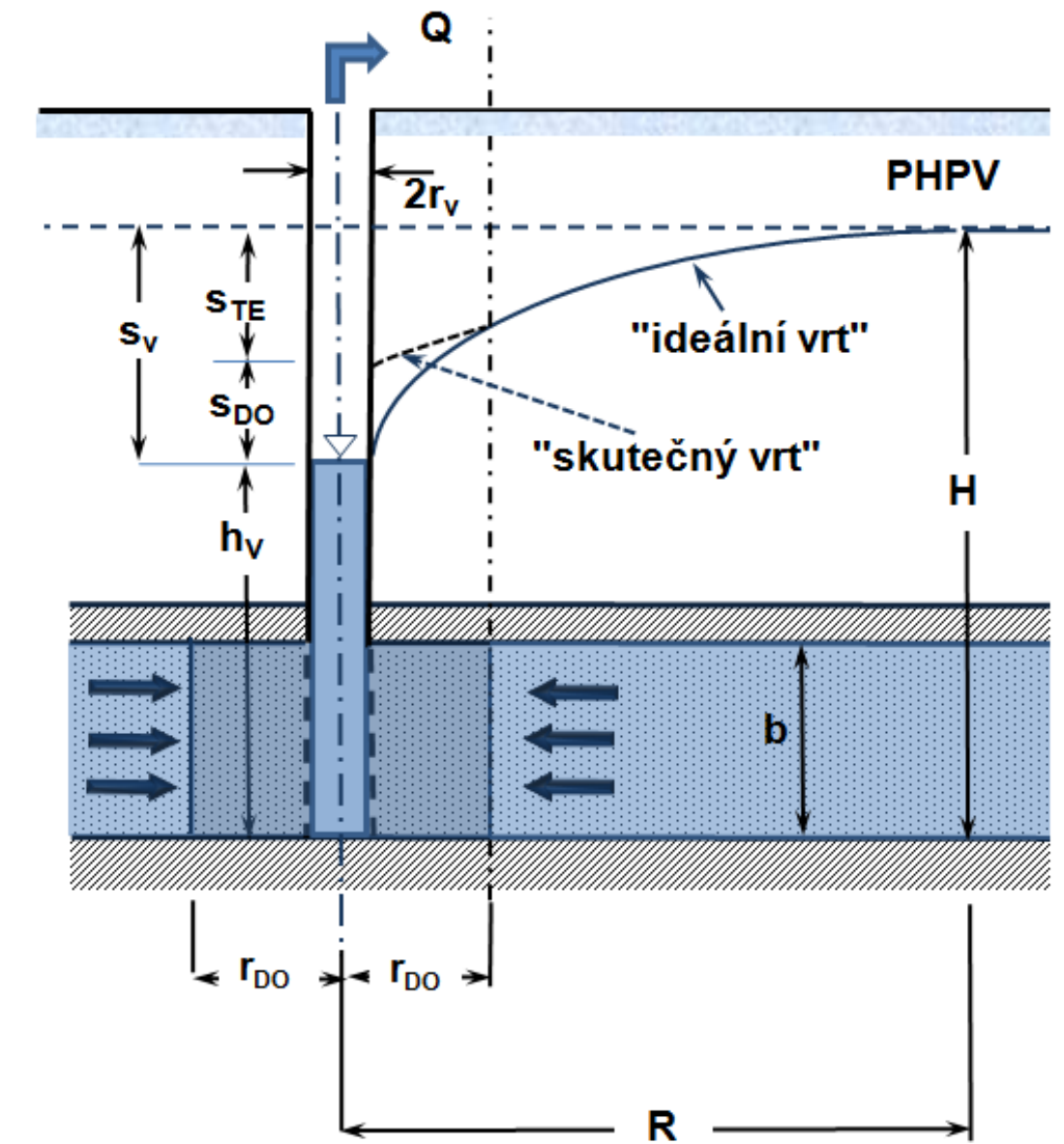
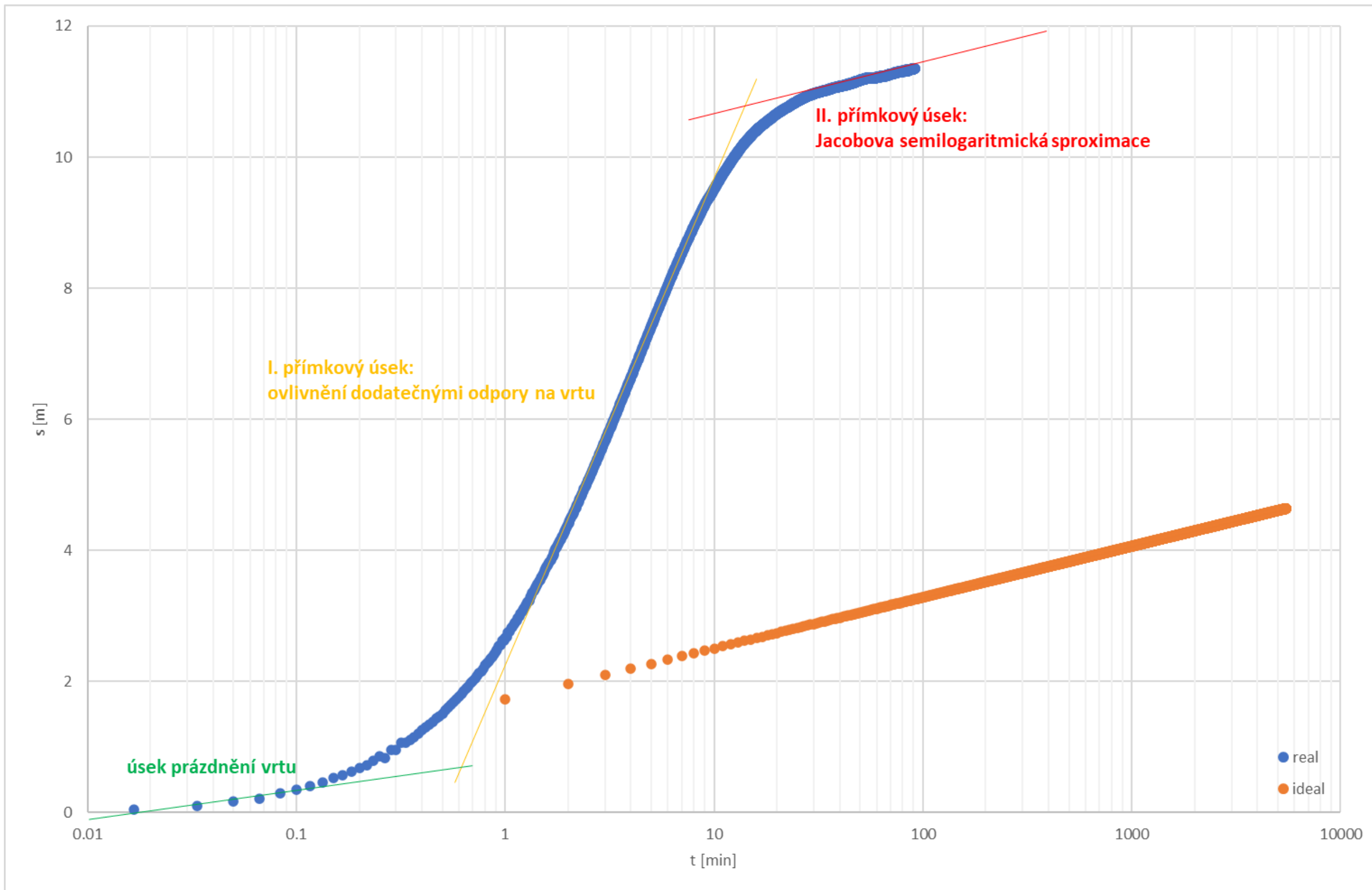


STÁRNUTÍ VRTU – vliv na hydraulické parametry

- Snížení specifické vydatnosti (jímací kapacity) – vyhodnocení z provozních hladin nebo čerpacích zkoušek
 - Nižší úroveň provozní hladiny pro dosažení stejného čerpaného množství
- Nárůst turbulentních ztrát při proudění vody do vrtu (dle Waltona) – vyhodnocení ze stupňovitých čerpacích zkoušek
- Zvýšení dodatečných odporů (skin efekt, W) – vyhodnocení z počátečního úseku čerpacích zkoušek



koncept IDEÁLNÍ vs. REÁLNÝ vrt



VLIV VLASTNÍHO OBJEMU VRTU ~ STORATIVITA VRTU

VLIV DODATEČNÝCH TLAKOVÝCH ODPORŮ ~ SKIN EFFECT

kvantifikace DODATEČNÝCH ODPORŮ

souhrn tlakových odporů – lineárních i nelineárních:

a) *kolmatací* (s_1) tj. ucpáváním pórů obsypu, rozhraní horninového prostředí a perforačních otvorů

I. *mechanická kolmatace* ($s_{1,1}$): zanášení porézního prostředí zejména jemnozrnným sedimentárním materiálem. Dochází k ní přirozeně zejména na rozhraní horninové prostředí/obsyp vrtu v závislosti na gradientu hladiny při vtoku vody do jímacího vrtu, nebo vlivem reziduí vrtného výplachu či těsnění vrtu.

II. *chemická kolmatace vrtu* ($s_{1,2}$): zanášení porézního prostředí produkty oxidace (zpravidla Fe, Mn a Ca), tvorba tvrdých minerálních nárůstů (inkrust). Projevuje se zejména v perforačních otvorech na rozhraní obsyp vrtu/výstroj vrtu.

III. *biologická kolmatace vrtu* ($s_{1,3}$): doprovodný efekt oxidačně-redukčních procesů a jeho produktem jsou polotekuté šlemy (biofilm).

b) *zmenšením aktivního průřezu stěny vrtu* pro přítok vody (s_2) tam, kde je stěna vrtu tvořena filtrem, perforovanou pažnicí apod.

c) *neúplným průnikem* (s_3) - neúplným otevřením mocnosti zvodnělé vrstvy vrtem (tzv. neúplné vrty)

d) *třením* (s_5) vody o stěny vrtu a jejím vnitřním třením (do této skupiny zařazujeme i dodatečné odpory vznikající turbulencí uvnitř vrtu)

e) *turbulentním režimem proudění* (s_6) ve zvodnělé vrstvě, zejména v blízkosti odběrového vrtu

f) dalšími druhy dodatečných odporů (s_n)

výsledné snížení ~ součet všech vlivů:

$$s_{DO} = s_{skin} = \sum_{i=1}^n s_i$$

$$s_V = s_{TE} + s_{DO}$$

kde: s_{TE} - je teoretické snížení hladiny vody na “ideálním” vrtu (nulové dodatečné odpory) [L], s_W - dodatečné snížení vody ve vrtu způsobené vlivem dodatečných odporů [L]

kvantifikace DODATEČNÝCH ODPORŮ

při zanedbání části snížení, které připadá na působení nelineárních odporů je velikost dodatečného snížení závislá na odebírané vydatnosti (van Everdingen, 1953):

$$s_{DO} = \frac{Q}{2\pi T} W$$

kde: W – bezrozměrný koeficient dodatečných odporů [-]; s_{DO} – snížení způsobené dodatečnými odpory [L]

zahrnutí s_{DO} do celkového snížení na „skutečném“ vrtu v kolektoru s napjatou hladinou:

a) STACIONÁRNÍ PROUDĚNÍ (dle Thiema):

$$s_V = \frac{Q}{2\pi T} \left(\ln \frac{R}{r_V} + W \right) \longrightarrow W = \frac{2\pi T s_V}{Q} - \ln \frac{R}{r_V}$$

kde: R – dosah depresního kuželu [L]; r_V – poloměr vrtu [L]; W – koeficient dodatečných odporů [-]

b1) NESTACIONÁRNÍ PROUDĚNÍ (dle Theise):

$$s_V = \frac{Q}{4\pi T} (W(u) + 2W) \longrightarrow W = \frac{2\pi T s_V}{Q} - W(u)$$

kde: $W(u)$ je Theisova studňová funkce a W je bezrozměrný koeficient dodatečných odporů.

b2) NESTACIONÁRNÍ PROUDĚNÍ (dle Jacoba):

$$s_V = \frac{Q}{4\pi T} \left(\ln \frac{2,246 T t}{r_V^2 S} + 2W \right) \longrightarrow W = \frac{2\pi T s_V}{Q} - \frac{1}{2} \left(\ln t + \ln \frac{T}{r_V^2 S} + 0.8091 \right)$$

vyhodnocení dodatečných odporů ze sklonu počátečního úseku hydrodynamické zkoušky (Agarwal, R.G., 1970, Pech, P. 2010)

a) převedení na bezrozměrné parametry (Lee, 1982) - redukce počtu neznámých, nezávislost řešení na použitém systému jednotek:

bezrozměrné snížení:

bezrozměrný čas:

bezrozměrný koeficient storativity vrtu:

bezrozměrný sklon prvního přímkového úseku:

$$s_D(r_D, t_D) = \frac{2 \pi T}{Q} (H - h(r, t))$$

$$t_D = \frac{T t}{r_v^2 S}$$

$$C_D = \frac{C}{2 \pi r_v^2 S}$$

$$I_{1PD} = \frac{2 \pi T I_{1P}}{Q}$$

b) počáteční a okrajové podmínky – v bezrozměrných parametrech:

$$s_D(r_D, 0) = 0 \quad s_D(r_D, t_D) = 0 \text{ pro } r_D \rightarrow \infty$$

c) řešení v Laplaceově prostoru:

$$\overline{s_D} = \frac{K_0 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) + W p^{\frac{1}{2}} K_1 \left(p^{\frac{1}{2}} \right)}{p \left[p^{\frac{1}{2}} K_1 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) + C_D p^{\frac{1}{2}} \left(K_0 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) + W p^{\frac{1}{2}} K_1 \left(p^{\frac{1}{2}} \right) \right) \right]}$$

d) aplikací algoritmu Stehfest 368 a úpravou pro závislost $W(I_{1PD}, C_D)$ (Pech, 2010):

$$W = \frac{1}{0,86} \left(\frac{2 \pi T I_{1P}}{Q} - 1,027 \log C_D - 1,0237 \right)$$

diagnostické metody STÁRNUTÍ VRTŮ

A) NEPŘETRŽITĚ:

- záznam PROVOZNÍCH DAT: monitoring dynamické hladiny, čerpaného množství a spotřeby energie + odborné vyhodnocení dat

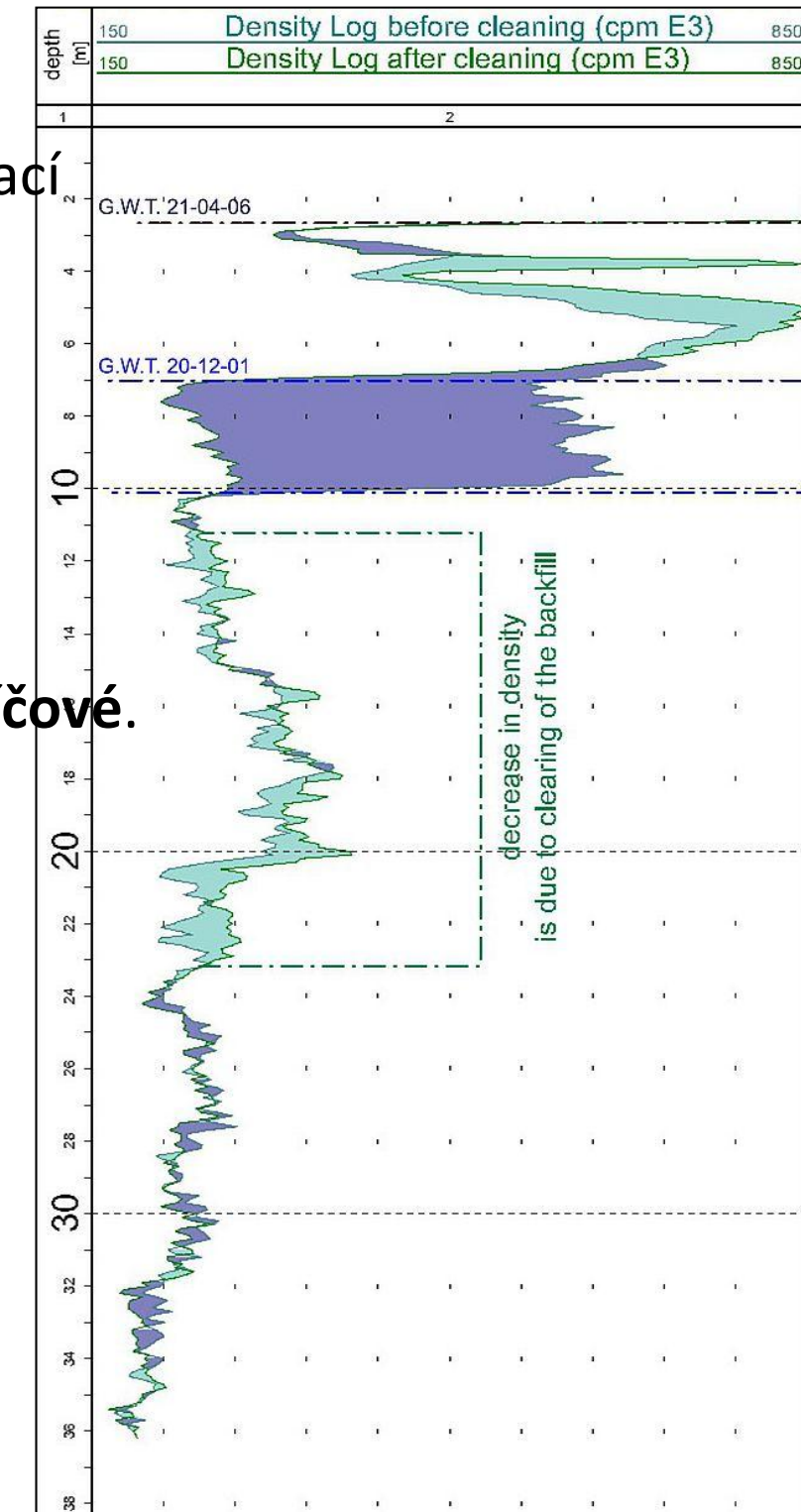
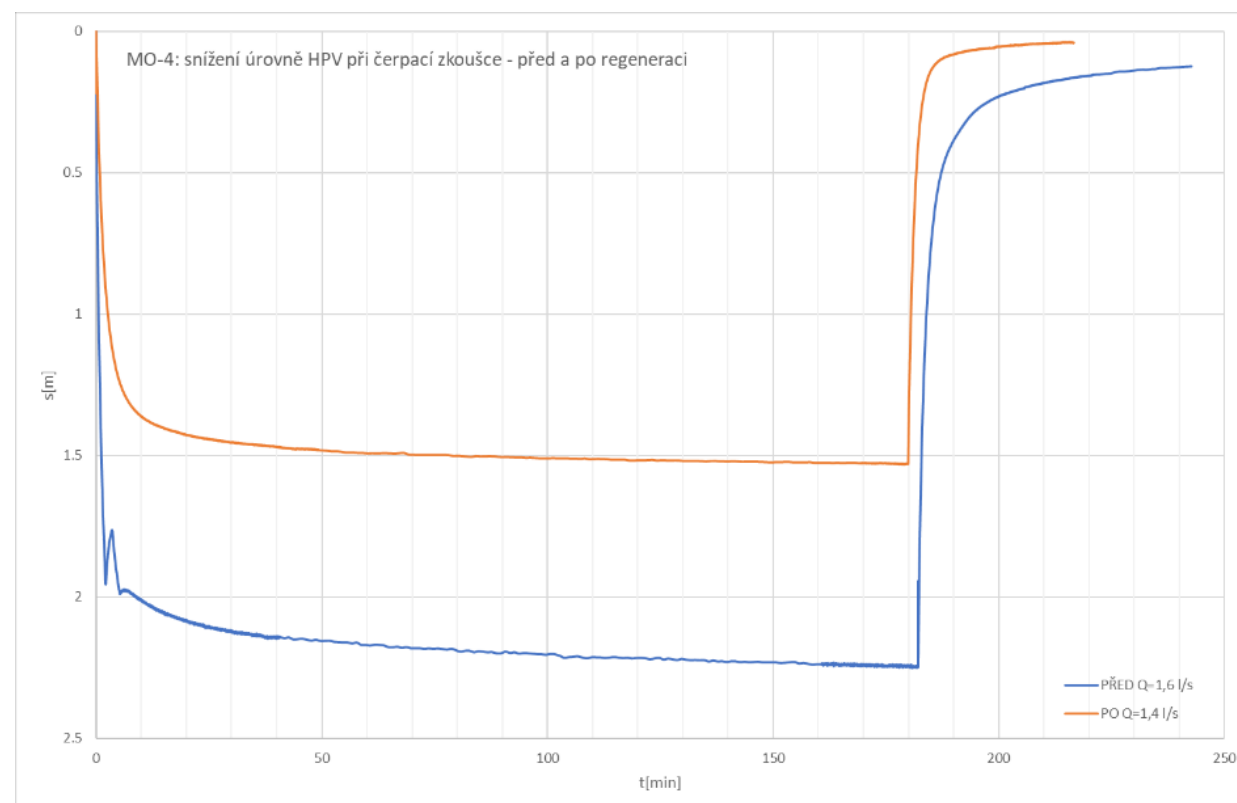
B) PRAVIDELNĚ:

- ověřovací ČERPACÍ ZKOUŠKY - posouzení vývoje hydraulických parametrů (W skin efekt, C faktor)
- kamerové prohlídky - vizuální kontrola stavu výstroje a projevů koroze/inkrustací/kolmatace
- geofyzikální metody (KAROTÁŽE): kontrola stavu výstroje a těsnění mezikruží, identifikace jílovitých kolmatací nebo těsnících jílových zón. Magnetometrická lokalizace těsnění či koroze.

C) PŘÍLEŽITOSTNĚ:

- odběr a analýza vzorků inkrustací/sedimentů - identifikace typu stárnutí dle mineralogického složení
- analýzy vzorků vody

CÍLE: kvalifikovaná prognóza životnosti, návrhy regenerace nebo náhrady vrtů. **Včasné rozpoznání závad je klíčové.**



REGENERACE VRTŮ - METODY

opatření při snížené vydatnosti v důsledku kolmatace, vhodné kombinovat co nejvíc metod

CÍLE: prodloužení životnosti a obnova původní kapacity; ČETNOST: pravidelně (cca 1x/ 5-10 let dle podmínek)

MECHANICKÉ METODY ~ ČIŠTĚNÍ VRTŮ – odtěžení sedimentu uvnitř výstroje vrtu

- **air-lift** (mamutkové čerpadlo), kartáčování, (pístování – swabbing)
- **vysokotlaké čištění** (jetting)

VÝHODY: univerzální použitelnost, bez následků pro kvalitu vody

NEVÝHODY: účinek většinou pouze uvnitř výstroje

CHEMICKÉ METODY - rozpouštění konkrétních typů inkrustací, je možné je kombinovat:

- **Kyseliny** (HCl, octová, citronová...): rozpouštějí karbonáty a oxidy, korozivní účinek (poškození pasivačních vrstev), účinnost dle pH a krystalinity minerálů
- **Redukční činidla** ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$): převod nerozpustných oxidované formy (Fe^{3+} , Mn^{3+} , Mn^{4+}) na rozpustné redukované (Fe^{2+} , Mn^{2+})
- **Oxidační činidla** (H_2O_2 , NaClO): degradace biomasy (šlemu) - mineralizace organické hmoty, dezinfekce

VÝHODY: specifický účinek s ohledem na původ inkrustace, účinek vně výstroje vrtu

NEVÝHODY: toxická odpadní voda (možný obsah těžkých kovů), ovlivnění REDOX potenciálu

FYZIKÁLNÍ METODY

- **ULTRAZVUKOVÁ** – účinek i v obsypu vrtu
- **Seismické - HYDROPULS**
- Termické
- Kryogenní
- Impulsní (detonační šňůra)



STÁRNUTÍ VRTŮ – PREVENTIVNÍ OPATŘENÍ

KONSTRUKCE:

- umístění s ohledem na hydrogeologické, hydraulické a hydrochemické podmínky – nespojovat přítoky s různou oxidací a mineralizací
- vhodné materiály výstroje, těsnění a filtrační obsypu - ohled na agresivitu vody, zamezení kontaktní korozi
- správná dimenze vrtu a obsypu, zajištění mechanické stability – s cílem zpomalení proudění, prostoru pro srážení

PROVOZ:

- omezení provzdušňování, limitace maximální deprese.
- pravidelná mechanická údržba a čištění čerpací techniky
- pravidelná regenerace (omezení autokatalytické funkce)

KONTROLA – NEZBYTNÁ: záznam a zpracování provozních dat, čerpací zkoušky, kamerové prohlídky, geofyzikální (karotážní) měření

INHIBICE:

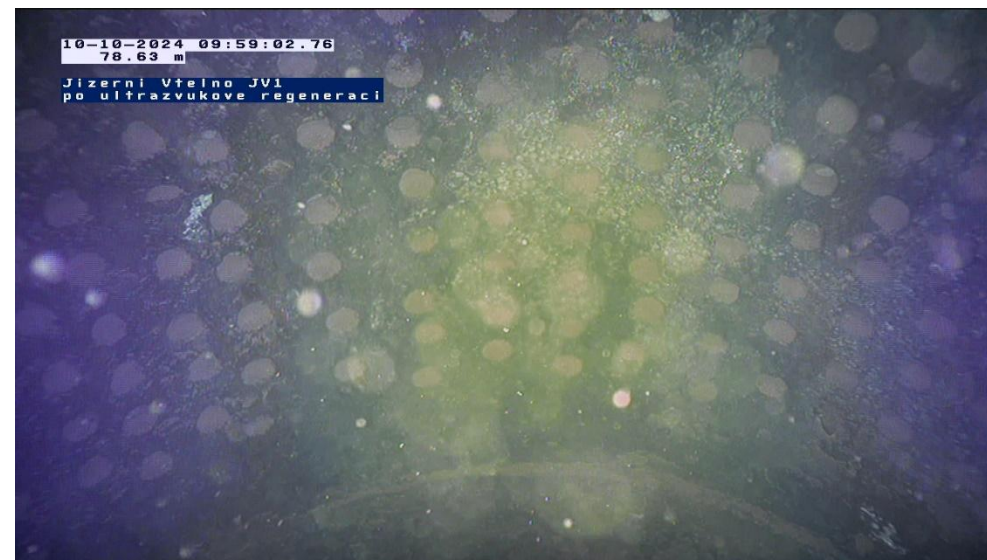
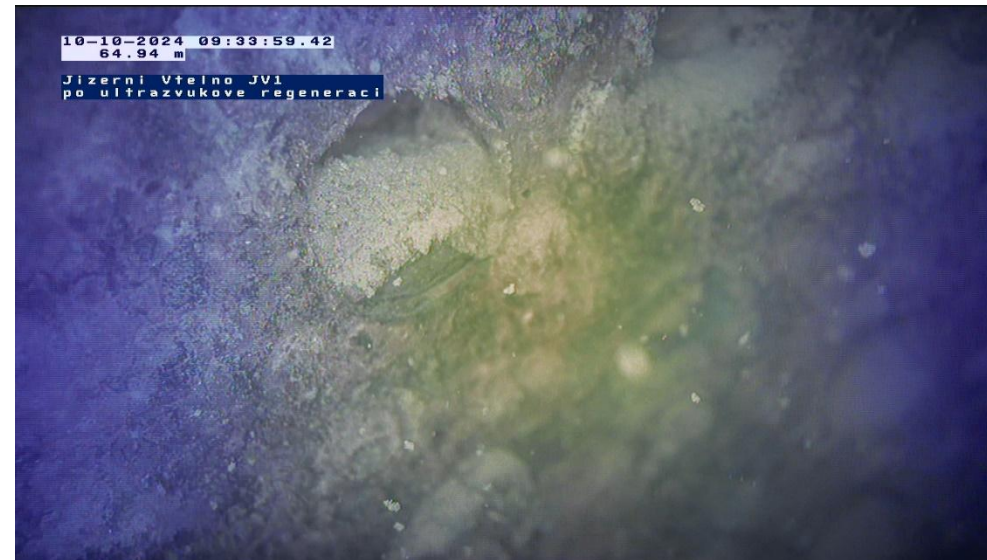
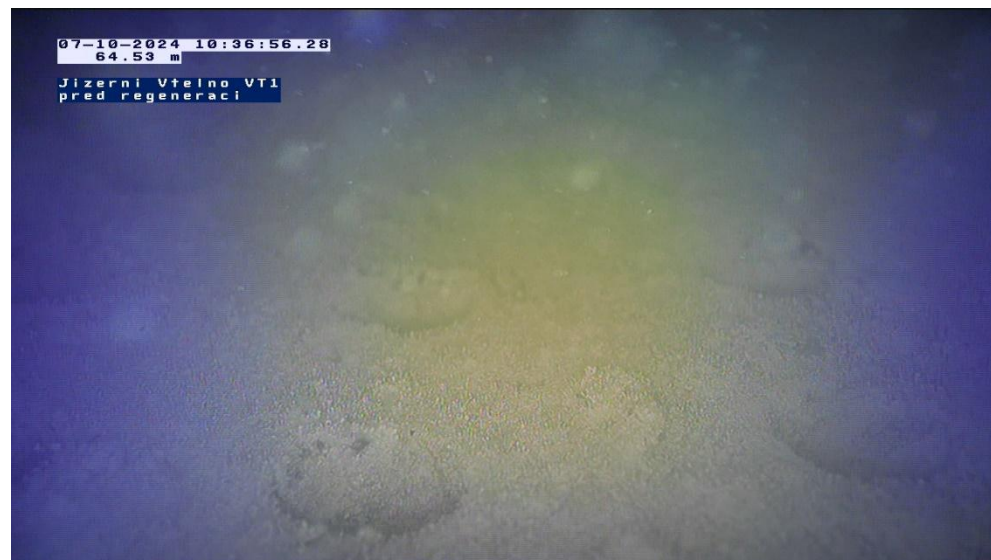
- chemická: tvorba komplexů s kovovými ionty (Fe^{2+} , Mn^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+}), zábrana srážení (humínové kyseliny, $(\text{NaPO}_3)_6$)
- elektrická: katodová ochrana

DEZINFEKCE: chemická (H_2O_2 , NaClO), zahřívání ("pasteurizace"), záření -> rychlá obnova

PŘÍPADOVÁ STUDIE – regenerace vodárenského vrtu JV-1 Jizerní Vtelno

METODICKÝ POSTUP:

1. Úvodní hydrodynamická zkouška
2. Úvodní kamerová prohlídka
3. MECHANICKÁ REGENERACE:
 1. Očištění kartáči
 2. Odtěžení kalu ze dna air-liftem
 3. Vysokotlaké tryskání (jetting)
 4. Ultrazvuková regenerace (SONIC Technologies, GmbH.)
4. Ověřovací kamerová prohlídka
5. Ověřovací hydrodynamická zkouška





air-lift



kartáčování



tryska



ultrazvuk



PŘÍPADOVÁ STUDIE – regenerace vodárenského vrtu JV-1 Jizerní Vtelno

