Hydrogeologické příčiny zvýšeného obsahu železa a redoxní zonace v systému umělé infiltrace vodárny Káraný

MAREK SKALICKÝ, PETR KOHOUT

Klíčová slova: umělá infiltrace – hydrogeochemie podzemních vod – železo v podzemní vodě – mobilizace železa – redoxní zonace – oxidačně-redukční potenciál – mezivrstevní přetok – hydraulická komunikace zvodní – bakterie oxidující železo – zanášení vrtů – zásobování pitnou vodou

Accepted for print

ABSTRAKT

V systémech umělé (řízené) infiltrace podzemních vod (Managed Aquifer Recharge – MAR) vznikají v důsledku hydraulické interakce mezi mělkými oxickými a hlubšími zvodněmi s napjatou hladinou komplexní redoxní prostředí, která zásadně ovlivňují chování a mobilitu železa. Lokální obohacení podzemní vody železem je v takových heterogenních systémech často výsledkem specifických hydrogeologických mechanismů. Tato studie se zabývá původem rozpuštěného železa a procesy řídícími redoxní zonaci ve kvartérní zvodni vodárny Káraný, jež představuje jeden z nejvýznamnějších zdrojů pitné vody ve střední Evropě.

V letech 2019–2025 byl realizován komplexní hydrogeologický průzkum zahrnující hydrochemické analýzy, měření redoxního potenciálu, geofyzikální průzkum, hydraulické zkoušky, mikrobiologická šetření, numerické modelování proudění podzemní vody a dlouhodobý provozní monitoring. Výsledky naznačují, že zvýšené koncentrace rozpuštěného železa nevznikají primárně v důsledku geochemických reakcí probíhajících přímo ve kvartérní zvodni. Jsou naopak spojeny s lokálním vzestupným mezivrstevním přetokem redukční podzemní vody z cenomanské zvodně prostřednictvím porušené izolační vrstvy a nedokonale utěsněných artéských vrtů. Tento mezivrstevní přetok vytváří prostorově stabilní redoxní zonaci, která řídí speciaci železa, mikrobiální oxidaci železa a zanášení vrtů. Koncentrace rozpuštěného dvojmocného železa vykazovaly výraznou inverzní závislost na redoxním potenciálu a hydraulická pozorování i výsledky numerického modelování byly v souladu s uvažovaným mechanismem přetoku.

Navržený hydrogeochemický koncepční model byl ověřen v provozních podmínkách vodárny zavedením selektivního režimu odběru podzemní vody založeného na redoxních charakteristikách vrtů namísto jejich hydraulické vydatnosti. Vyřazení vrtů ovlivněných prouděním redukční podzemní vody vedlo k dlouhodobému snížení koncentrací rozpuštěného železa, zákalu vody, intenzity zanášení vrtů i nároků na jejich údržbu, aniž bylo nutné zavádět nové technologie úpravy vody nebo provádět stavební zásahy do vodárenské infrastruktury.

Výsledky studie ukazují, že lokální mezivrstevní přetok mezi zvodněmi může představovat dominantní faktor ovlivňující koloběh železa a kvalitu podzemní vody v systémech řízené infiltrace. Současně potvrzují význam integrace hydrogeologických, hydrochemických, geofyzikálních, mikrobiologických a provozních dat při identifikaci redoxně podmíněné heterogenity podzemních vod a optimalizaci odběru pitné vody ve složitých vícevrstvých hydrogeologických systémech.

1. ÚVOD

Železo patří mezi nejvýznamnější složky podzemních vod ovlivňující jejich využitelnost pro zásobování pitnou vodou. Jeho mobilita je úzce spojena s oxidačně-redukčními podmínkami prostředí a přeměnami mezi dvojmocnou a trojmocnou formou železa. Tyto procesy jsou řízeny vzájemným působením hydrogeologických, geochemických a mikrobiologických faktorů, které ovlivňují rozpouštění, transport i precipitaci železa v horninovém prostředí [3, 4].

Systémy umělé (řízené) infiltrace (Managed Aquifer Recharge – MAR) představují významný způsob zajištění zdrojů pitné vody. Hydraulická interakce mezi mělkými a hlubšími zvodněmi však může vytvářet složité hydrogeochemické podmínky, jež ovlivňují mobilitu železa, prostorové rozložení redoxních podmínek i procesy zanášení jímacích objektů. Dosavadní studie ukazují, že redoxní zonace představuje jeden z hlavních faktorů řídících transport rozpuštěných látek, biogeochemické reakce i dlouhodobou funkci infiltračních systémů [6, 11].

Vodárna Káraný využívá kombinaci tří zdrojů: břehové infiltrace, umělé infiltrace a odběru podzemní vody z hlubší zvodně. V jižní části jímacího území umělé infiltrace, v násoskovém systému R38, se dlouhodobě vyskytovaly zvýšené koncentrace železa doprovázené zanášením vrtů a provozními problémy, jejichž příčina nebyla doposud uspokojivě objasněna.

Cílem studie bylo identifikovat původ železa, objasnit úlohu hydraulických, hydrochemických a mikrobiologických procesů a ověřit možnost omezení výskytu železa prostřednictvím selektivního řízení odběru podzemní vody z kvartérní zvodně. Za tímto účelem byla v letech 2019–2025 realizována komplexní hydrogeologická studie zahrnující hydrochemická měření, geofyzikální průzkum, hydraulické zkoušky, mikrobiologické analýzy, numerické modelování a dlouhodobý provozní monitoring.

Přestože je studie zaměřena na lokalitu vodárny Káraný, získané poznatky mohou být využity i v dalších vícevrstvých hydrogeologických systémech, kde hydraulická komunikace mezi zvodněmi významně ovlivňuje kvalitu podzemní vody.

Význam břehové i umělé infiltrace pro zlepšování kvality surové vody byl popsán také v řadě zahraničních studií zaměřených na samočisticí procesy probíhající během průsaku vody horninovým prostředím [7, 13].

2. METODIKA

2.1 Studovaná oblast a hydrogeologické poměry

Vodárna Káraný představuje jeden z nejvýznamnějších zdrojů pitné vody v České republice, zásobující část hlavního města Prahy a Středočeského kraje. Odběr pitné vody je zde založen na využití kvartérní zvodně v kombinaci břehové a umělé infiltrace a odběru podzemní vody z hlubší cenomanské zvodně.

Geologickou stavbu území tvoří kvartérní štěrkopískové sedimenty uložené na horninách České křídové pánve turonského a cenomanského stáří [15]. Z hydrogeologického hlediska jsou v území využívány kvartérní a cenomanská zvodeň. Pro cenomanskou zvodeň je charakteristická redukční podzemní voda, zatímco oxická kvartérní zvodeň představuje hlavní zdroj vody systému umělé infiltrace.

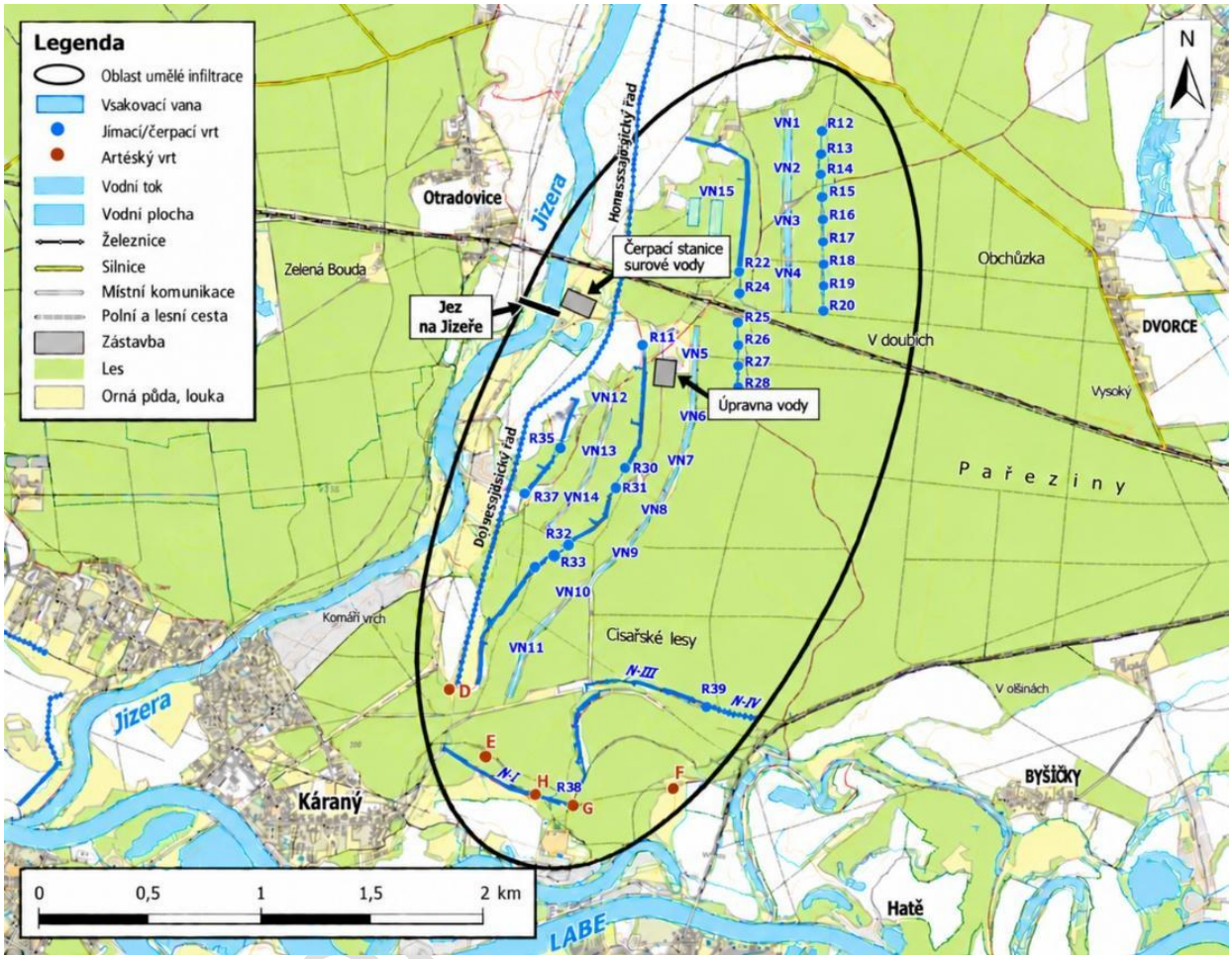
Cenomanská zvodeň je vyvinuta v pískovcovém souvrství. Podzemní voda se zde nachází pod tlakem a zvodeň vykazuje puklinovo-pórovou propustnost. Odběr vody je na lokalitě zajišťován sedmi vrty tzv. artéské řady. Kvartérní zvodeň je vázána na pleistocenní štěrkopískové sedimenty říčních teras Jizery a Labe o mocnosti od 5 do 20 m. Hladina podzemní vody je volná a prostředí vykazuje pórovou propustnost s koeficientem hydraulické vodivosti v řádu 10^{-4} m · s^{-1} a efektivní pórovitostí 5–20 %. Dotace kvartérní zvodně je zajišťována infiltrací srážkových vod, přítokem z hlubších zvodní a v prostoru vodárny Káraný také břehovou infiltrací z řek Jizery a částečně Labe.

Accepted for print

Významný vliv na režim podzemních vod má rovněž provoz systému umělé infiltrace. Přirozenou drenážní bázi představují řeky Jizera a Labe.

Systém umělé infiltrace Káraný využívá vsakovací nádrže, do nichž je po mechanickém předčištění přiváděna povrchová voda z řeky Jizery. Podzemní voda je následně jímána soustavou čerpacích vrtů, včetně vrtů násoskových.

Pro základní orientaci je situace umělé infiltrace znázorněna na *obr. 1*.



Obr. 1. Situace areálu umělé infiltrace vodárny Káraný (zdroj: Mapy.cz)

Fig. 1. Map showing the artificial infiltration complex of the Káraný waterworks (source: Mapy.cz)

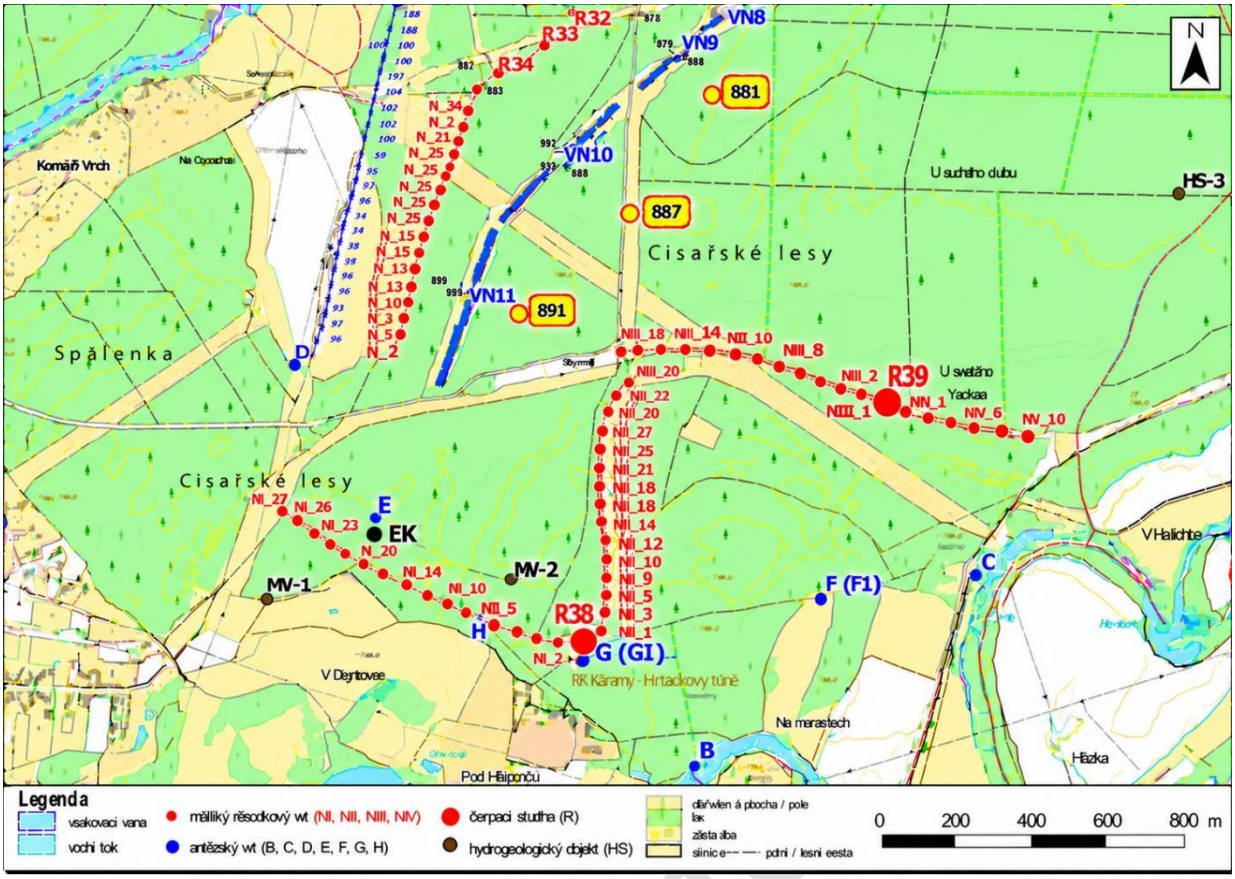
Studie byla zaměřena na násoskový jímací systém R38 v jižní části areálu umělé infiltrace Káraný, kde se dlouhodobě vyskytovaly zvýšené koncentrace železa v podzemní vodě doprovázené zvýšeným zákalem a výrazným mechanickým zanášením vrtů. Tyto jevy negativně ovlivňovaly provozní spolehlivost a účinnost jímacího systému. Dříve realizovaná technická opatření, včetně výměny původního ocelového potrubí za potrubí z inertních materiálů, nevedla k odstranění problémů. Tato skutečnost naznačovala, že jejich příčina nesouvisí primárně s použitými konstrukčními materiály, ale pravděpodobně vyplývá z hydrogeologických a hydrogeochemických podmínek lokality.

2.2 Popis násoskového systému R38

Násosková řada R38 byla společně s řadou R39 vybudována v devadesátých letech 20. století jako doplňkový zdroj pitné vody v rámci systému umělé infiltrace vodárny Káraný.

Schéma násoskové řady R38 je uvedeno na *obr. 2*, její pohled zachycuje *obr. 3*.

ACCEPTED



Obr. 2. Situace jižní části areálu umělé infiltrace s vyznačením násoskových řad R38, R39 (zdroj: autoři na základě monitoringu Vodárny Káraný)

Fig. 2. Map of the southern part of the artificial infiltration complex, wells of siphon lines R38, R39 (source: authors, based on monitoring by Káraný waterworks)



Obr. 3. Násosková řada R38

Fig. 3. Siphon line R38

Ke stanici R38 jsou připojeny dvě násoskové řady označené NI a NII. Jímací vrty jsou situovány v písčitých kvartérních terasových sedimentech o mocnosti od 5 do 15 m a jsou zahloubeny až k méně propustnému podloží tvořenému křídovými horninami turonského stáří. Studny násoskových řadů NI a NII jsou situovány ve vzájemných vzdálenostech 20 až 30 m. Celkový počet studní systému R38 je 59.

2.3 Koncepce studie a použité metody

V letech 2019–2025 byla realizována komplexní hydrogeologická studie zaměřená na objasnění původu železa v systému R38.

Vyhodnocení vycházelo z kombinace:

- dlouhodobého provozního monitoringu,
- hydrochemických analýz,
- měření oxidačně-redukčního potenciálu,
- stanovení forem železa,
- hydraulických zkoušek,
- geofyzikálního průzkumu,
- kamerových prohlídek vrtů,
- mikrobiologických analýz,
- numerického modelování proudění podzemní vody.

Výsledky jednotlivých metod byly následně integrovány do jednotného hydrogeologického koncepčního modelu.

2.4 Hydraulické zkoušky vrtů

Hydraulické vlastnosti byly ověřovány čerpacími zkouškami, které byly prováděny na vybraných vrtech násoskové řady R38 za běžných provozních podmínek. V průběhu zkoušek byly sledovány změny hladiny podzemní vody, ustálené vydatnosti vrtů a jejich vzájemné hydraulické ovlivnění. Vyhodnoceny byly jak reakce jednotlivých vrtů na vlastní čerpání, tak změny hydraulických parametrů při provozu sousedních jímacích objektů.

Současně byla posuzována proměnlivost hydraulických parametrů jednotlivých vrtů ve vztahu k hydrochemickému složení podzemní vody, zejména koncentraci rozpuštěného kyslíku, oxidu uhličitého, hodnotám Eh a prostorovému rozložení oxických a redukčních podmínek.

2.5 Geofyzikální průzkum

Geofyzikální průzkum byl zaměřen na zpřesnění geologické stavby svrchní části horninového prostředí v okolí jímací řady NI a na identifikaci geologických heterogenit v podloží kvartérní zvodně, které by mohly představovat preferenční cesty proudění podzemní vody z cenomanské do kvartérní zvodně.

Na základě interpretace měření bylo vyhodnoceno:

- poloha rozhraní mezi kvartérními sedimenty a turonským podložím,
- diskontinuity málo propustných struktur turonských hornin,
- možné cesty přetoku podzemní vody, zejména v okolí artéských vrtů.

K průzkumu byla využita geoelektrická metoda elektrické odporové tomografie (ERT). Měření byla provedena na dvou profilech o celkové délce 835 m.

2.6 Kamerové prohlídky vrtů a mikrobiologické analýzy

Accepted for print

V rámci výzkumu byly provedeny kamerové prohlídky vrtů násoskové řady R38, zejména vrtů řady NI, jejichž cílem bylo posoudit technický stav výstroje vrtů a ověřit přítomnost inkrustací a biomasy.

Současně byly provedeny kvalitativní mikrobiologické analýzy založené na mikroskopickém hodnocení vzorků vody a sedimentů. Sledovány byly také změny biologické aktivity během období čerpání i odstávek násoskového systému.

2.7 Odběr vzorků podzemní vody a stanovení forem železa

Pro hydrogeochemické hodnocení původu železa byly z jímacích objektů řady NI a NII systému R38 odebrány vzorky podzemní vody.

Vzorkování bylo v rámci 1. etapy prací prováděno za tří různých hydraulických režimů, ve statickém stavu (odběr bez předchozího čerpání), v dynamickém stavu I (odběr po 18 hodinách čerpání z řady NI, během kterých bylo odčerpáno přibližně 750 m³ podzemní vody) a v dynamickém stavu II (odběr po odčerpání přibližně 10–12 m³ vody z jednotlivých vrtů). V dalším období se vzorkování provádělo po krátkém pročištění vrtu (cca 20–30 minut).

Pro porovnání byly využity také výsledky monitoringu cenomanské zvodně, zejména z artéského vrtu E, včetně stanovení redoxního potenciálu a jednotlivých forem železa.

Na základě prvních výsledků byl následně zaveden systematický monitoring prostorového rozložení oxidačně-redukčního potenciálu ve všech vrtech řad NI a NII. Monitoring byl doplněn o pravidelné stanovení jednotlivých valenčních forem železa a mikrobiologické analýzy při různých režimech odběru podzemní vody.

2.8 Terénní měření fyzikálně-chemických parametrů

Oxidačně-redukční podmínky byly hodnoceny terénním měřením Eh pomocí platinové elektrody s referenční elektrodou Ag/AgCl. Měření byla prováděna v průtočné cele během čerpání a hloubkovým profilováním vrtů. Výsledné hodnoty byly využity ke stanovení prostorového rozložení redoxních podmínek a jejich časové stability při různých režimech provozu.

2.9 Vyhodnocení hydraulické interakce mezi zvodněmi a numerické modelování

Součástí metodického postupu bylo rovněž hodnocení hydraulické interakce mezi kvartérní a cenomanskou zvodní v prostoru společného odběru podzemní vody.

Výzkum zahrnoval:

- numerické modelování proudění podzemní vody při různých variantách odběru,
- simulace různých režimů provozu systému umělé infiltrace,
- vyhodnocení tlakových poměrů mezi oběma zvodněmi prostřednictvím piezometrických hladin,
- posouzení možnosti mezivrstevního přetoku.

Pro výpočty byl použit kalibrovaný model proudění podzemních vod. Detailní model areálu umělé infiltrace vycházel z aktualizovaného regionálního modelu širší oblasti vodního zdroje Káraný. Původní model byl převeden do prostředí MODFLOW-USG, jež umožňuje pokročilejší diskretizaci výpočetní sítě, flexibilnější definici okrajových podmínek a přesnější modelování lokálních hydrogeologických poměrů.

Accepted for print

V prostoru vlastního vodního zdroje byla výpočetní síť lokálně zjemněna na velikost buněk 10 × 10 m, přičemž každý jímací vrt byl reprezentován samostatnou výpočetní buňkou. Toto řešení umožnilo detailně simulovat odstavení jednotlivých vrtů i změny provozních režimů.

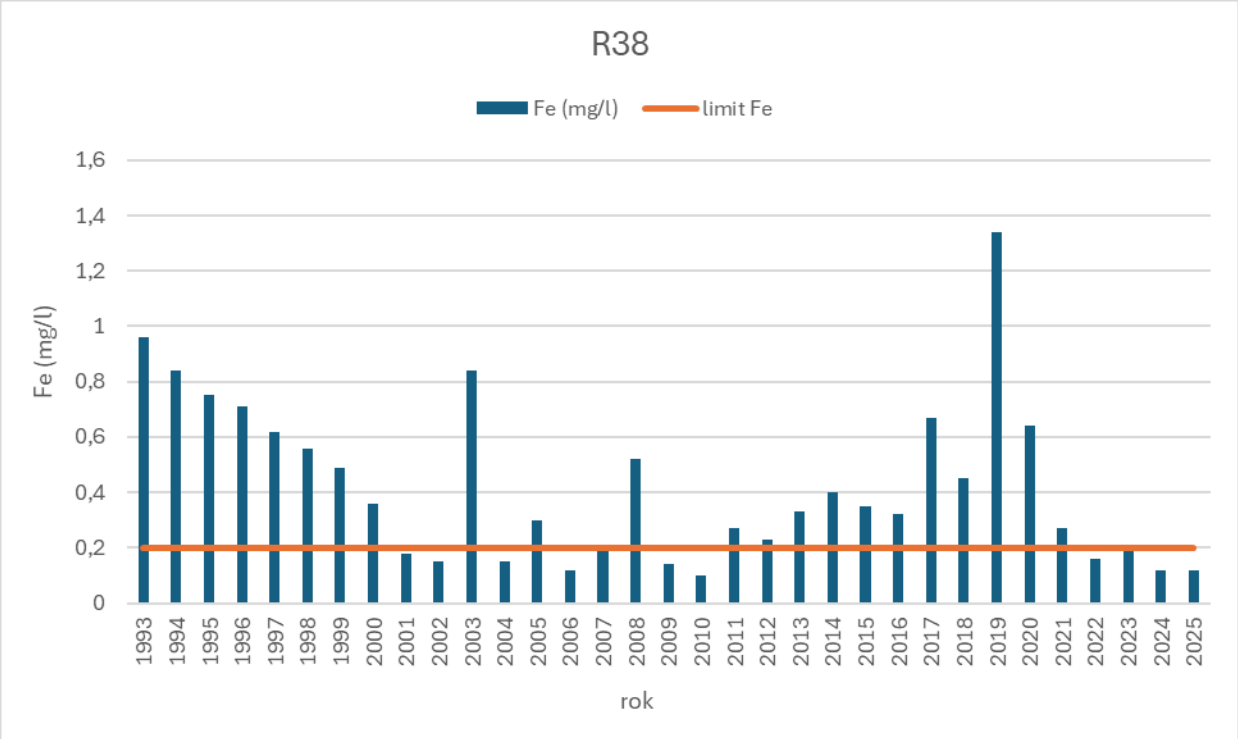
Do modelu byly zahrnuty okrajové podmínky reprezentující infiltrační nádrže, radiální studny a násoskové řady. V aktualizovaném modelu byly násoskové řady i infiltrační nádrže reprezentovány pomocí prvků CLN (Connected Linear Network), které umožňují zadat odběr nebo infiltraci pro celý prvek při současném zachování rozdílných hydraulických podmínek v jeho jednotlivých úsecích.

3. VÝSLEDKY STUDIE A JEJICH VYUŽITÍ V PROVOZU VODÁRNY

3.1 Dlouhodobý vývoj koncentrací železa v systému R38

Dlouhodobý monitoring kvality vody v jímacím systému R38 prokázal, že koncentrace železa v podzemní vodě opakovaně překračovaly hygienický limit a jejich výskyt byl výrazně nepravidelný.

Vývoj koncentrací železa v období 1993–2025 je znázorněn na *obr. 4*. Výsledky ukazují, že ani po realizaci technického opatření v roce 2016, spočívajícího ve vložkování původního ocelového potrubí inertním plastovým materiálem, nedošlo k odstranění zvýšených koncentrací železa v podzemní vodě násosky R38.



Obr. 4. Vývoj koncentrací celkového Fe v systému R38 v letech 1993–2025

Fig. 4. Fe(tot) concentrations at R38 in 1993–2025

Naproti tomu po změně režimu odběru podzemní vody, zavedené v dubnu 2021, byl v podzemní vodě čerpací stanice R38 zaznamenán zřetelný a trvající pokles koncentrací železa.

Tyto výsledky silně podporují interpretaci, že zvýšené koncentrace železa nesouvisejí s materiálovým provedením potrubního systému, nýbrž mají hydrogeologický a hydrogeochemický původ.

3.2 Hydraulické vlastnosti vrtů

Čerpací zkoušky prokázaly výraznou heterogenitu hydraulických vlastností kvartérní zvodně. Některé vrty byly při čerpání rychle odvodňovány, zatímco jiné vykazovaly jen minimální pokles hladiny podzemní vody. Transmisivita se pohybovala od vysokých po nízké hodnoty, což potvrzuje významnou prostorovou proměnlivost hydraulických poměrů v prostoru obou jímacích řad násosky R38.

3.3 Výsledky geofyzikálního průzkumu

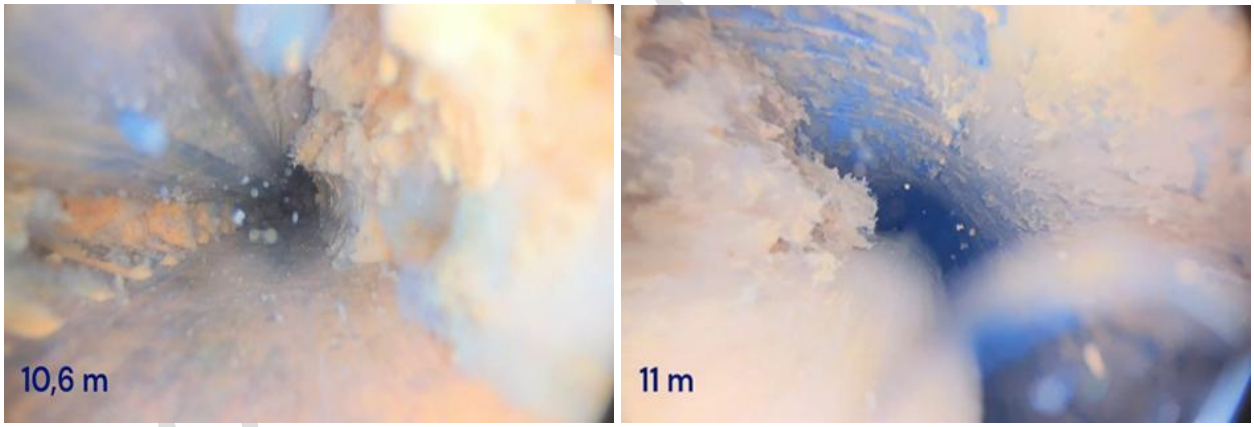
Geofyzikální měření zpřesnila geologickou stavbu území v prostoru násosky NI a identifikovala diskontinuity v turonském podloží, jež mohou představovat preferenční cesty proudění mezi cenomanskou a kvartérní zvodní.

Geofyzikální interpretace potvrdila, že málo propustná vrstva turonského izolátoru netvoří striktně souvislou hydrogeologickou bariéru; zároveň ověřila i předpoklad, že v okolí/podél některých artéských vrtů mohou existovat podmínky umožňující vzestupný přetok tlakové cenomanské vody do kvartérní zvodně.

3.4 Kamerové prohlídky vrtů a mikrobiologické nálezy

Kamerové prohlídky vrtů řady NI prokázaly vysoký stupeň zanesení pažnic. Ve značné části kontrolovaných vrtů byly pozorovány souvislé železité povlaky pokrývající perforované úseky i odběrné potrubí. Mocnost těchto usazenin dosahovala místy i několika centimetrů.

Příklady kamerových záznamů násoskové řady NI jsou uvedeny na *obr. 5*.



Obr. 5. Kamerové prohlídky vrtů NI-2 a NI-24

Fig. 5. Camera inspections in wells NI-2 and NI-24

Chemické a mikroskopické hodnocení sedimentů prokázalo přítomnost jemnozrnných pevných fází bohatých na železo, tvořených především hydroxidy a oxyhydroxidy železa $Fe(OH)_3$ a FeOOH, společně s významným podílem mikrobiální biomasy.

Biomasa byla tvořena převážně **aerobními bakteriemi oxidujícími železo** (a mangan), tedy **chemolitotrofními mikroorganismy.** Tyto bakterie získávají energii oxidací dvojmocného železa na trojmocné a uvolněné elektrony využívají pro metabolismus a růst. Vznikající nerozpustné hydroxidy železa ukládají do svých buněčných obalů a vláken, čímž vytvářejí pevné rezavohnědé povlaky charakteristické pro železité inkrustace vrtů.

Mikroskopické analýzy dále prokázaly bohatou biologickou aktivitu v kalových usazeninách násoskových řad NI i NII. Dominantní složku biofilmu tvořily vláknité bakterie rodu **Crenothrix**,

Accepted for print

doprovázené drobnými kokovitými bakteriemi o velikosti přibližně 1 µm. Kromě biologických struktur byly ve vzorcích přítomny také ostré úlomky anorganických částic o velikosti 5–20 µm.

Ve všech vrtech systému R38 byla po odstavení čerpání na počátku září 2020 zaznamenána výrazná změna biologické aktivity. Během běžného provozu byly ve vrtech zjišťovány téměř výhradně bakterie oxidující železo, zatímco při odstávkách docházelo k rozvoji podstatně pestřejších mikrobiálních společenstev včetně vyšších organismů. Tyto výsledky naznačují, že období bez čerpání vytvářejí příznivější podmínky pro rozvoj komplexních mikrobiálních společenstev. Vyšší obsah rozpuštěného kyslíku, omezené proudění vody a dostatek bakteriální biomasy podporují rozvoj organismů. Základní podmínkou rozvoje železitých bakterií je přítomnost rozpuštěného dvojmocného železa ve vodě, což bylo potvrzeno v některých vrtech řady NI. Toto železo je následně – úměrně intenzitě provzdušnění – oxidováno mikroorganismy na nerozpustné sloučeniny trojmocného železa. Výsledkem je tvorba biofilmů a akumulace hydratovaných sraženin železa, které postupně zanášejí jímací vrty.

3.5 Oxidačně-redukční poměry v kvartérní zvodni

Terénní měření oxidačně-redukčního potenciálu ve vybraných vrtech jímací řady NI **prokázala výraznou laterální i vertikální heterogenitu redoxních podmínek** v kvartérní zvodni. Rozložení hodnot Eh v jednotlivých vrtech je znázorněno na *obr. 8*.

Na základě naměřených hodnot bylo možné vrty rozdělit do tří skupin:

- vrty s převážně negativními hodnotami Eh, charakteristickými pro redukční prostředí,
- vrty s převážně pozitivními hodnotami Eh, odpovídajícími oxickým podmínkám,
- vrty s přechodným charakterem, v nichž docházelo ke změně Eh vertikálně.

Dlouhodobý monitoring současně ukázal, že rozložení redoxních podmínek je v čase mimořádně stabilní. Přestože byly sledovány různé režimy čerpání (plný provoz, omezený odběr i odstávky části vrtů, havárie na vrtech), nedocházelo k významným změnám absolutních hodnot Eh ani k výraznějšímu posunu hranic mezi oxickými a redukčními oblastmi.

Dlouhodobá měření naznačují existenci prostorově stabilní redoxní zonace v jímacím území, **která představuje jeden z hlavních faktorů ovlivňujících chemické složení podzemní vody kvartérní zvodně.**

3.6 Formy železa v kvartérní zvodni a jejich vztah k redoxním podmínkám

Ve vybraných vrtech řady NI byly stanoveny koncentrace celkového železa, dvojmocného železa a trojmocného železa. Současně byl v každém vrtu změřen oxidačně-redukční potenciál. Výsledky jedné sady monitoringu z roku 2020 jsou uvedeny v *tab. 1*.

Tab. 1. Výsledky stanovení forem železa a hodnot Eh ve vybraných vrtech řady NI (05/2020)

Tab. 1. Results of Eh and iron form determinations in selected wells of line NI (05/2020)

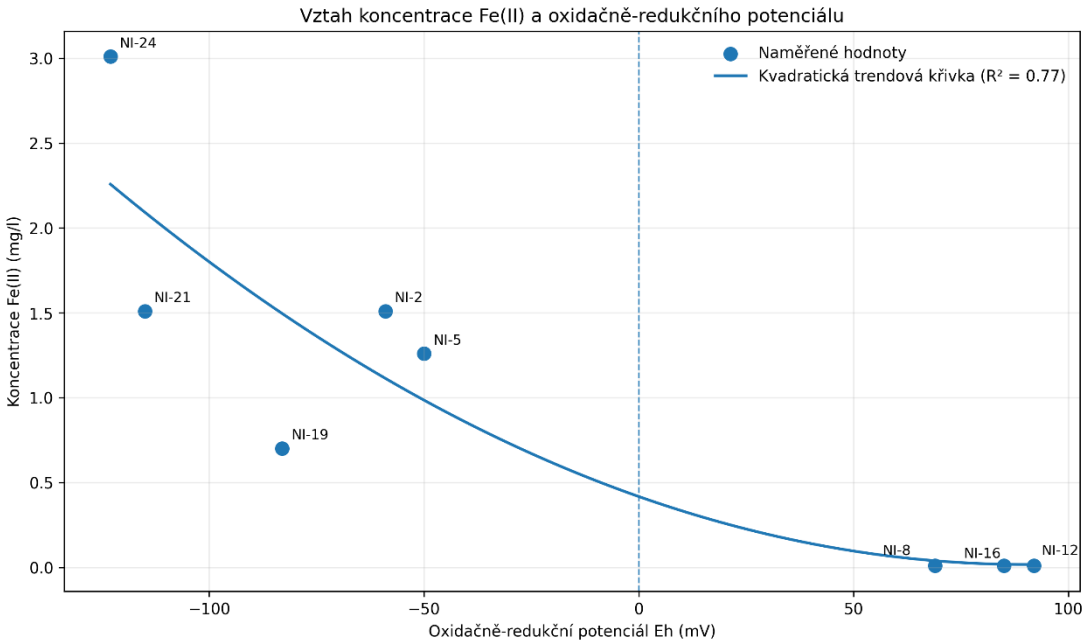
Parametr	**Jednotka**	**NI-2**	**NI-5**	**NI-8**	**NI-12**	**NI-16**	**NI-19**	**NI-21**	**NI-24**
	datum	04.05.2020	04.05.2020	04.05.2020	04.05.2020	04.05.2020	04.05.2020	04.05.2020	04.05.2020
Pozice odběru vzorku	m.o.b.	9	10	11	11	11	11	11	11
Fe celkový	mg/l	**1,66**	**1,66**	0,013	0,02	0,004	**1,07**	**1,59**	**2,96**
Fe (III)	mg/l	0,01	0,17	0,012	<0,01	<0,01	0,1	<0,01	<0,01
Fe (II)	mg/l	**1,64**	**1,49**	<0,01	0,014	0,04	**0,98**	**1,64**	**3,01**
Redox potenciál	mV	-59	-50	69	92	85	-83	-115	-123

Accepted for print

Vysvětlivky k tab. 1: červeně označené pole – koncentrace nad hygienickým limitem pro pitnou vodu (dle vyhlášky č. 252/2004 Sb.) – Fe > 0,2 mg/l, modře označené pole – záporné hodnory Eh, oranžově označené pole – kladné hodnoty Eh.

Poznámka k tab. 1: Stanovená koncentrace Fe(II) mírně převyšuje koncentraci celkového Fe, což z hlediska hmotnostní bilance není fyzikálně možné. Rozdíl je proto interpretován jako důsledek analytické nejistoty a rozdílného postupu jednotlivých stanovení. Hodnoty jsou uvedeny v původní podobě a pro další interpretaci je rozhodující zejména dominantní zastoupení rozpuštěného Fe(II), nikoli přesný rozdíl mezi uvedenými koncentracemi.

Nejvyšší koncentrace Fe byly zjištěny ve vrtech s negativními hodnotami Eh, kde převažovala forma Fe(II). Naopak ve vrtech s pozitivními hodnotami Eh byly koncentrace železa nízké nebo pod mezí stanovitelnosti. Mezi koncentrací Fe(II) a Eh byla zjištěna výrazná inverzní závislost (*obr. 6*), která potvrzuje úzkou vazbu mezi redoxními podmínkami a mobilitou železa v podzemní vodě.



Obr. 6. Vztah mezi koncentrací Fe(II) a oxidačně-redukčním potenciálem ve vybraných vrtech řady NI

Fig. 6. Graphical representation of the relationship between Fe(II) concentration and oxidation-reduction conditions in the Quaternary aquifer in the area of line NI

Statické vyhodnocení vztahu mezi koncentrací Fe(II) a oxidačně-redukčním potenciálem Eh potvrdilo silnou negativní závislost mezi oběma parametry. Na základě osmi sledovaných vrtů byl zjištěn vysoký záporný korelační vztah, který podporuje předpoklad, že mobilita železa je v daném systému primárně řízena redoxními podmínkami prostředí. Výsledky ukazují, že s poklesem hodnot Eh dochází k výraznému nárůstu koncentrací rozpuštěného dvojmocného železa.

Tento vztah podporuje hypotézu, že **mezivrstevní přetok redukční vody z cenomanské zvodně významně ovlivňuje chemické složení podzemní vody v kvartérní zvodni.**

3.7 Charakteristika cenomanské zvodně

Pro ověření předpokládaného zdroje železa byly vyhodnoceny výsledky měření provedených ve vrtu E, který jímá vodu z cenomanské zvodně.

Stanovení Eh i jednotlivých forem železa prokázalo, že cenomanská podzemní voda má výrazně redukční charakter a obsahuje vysoké koncentrace rozpuštěného dvojmocného železa. Výsledky jsou uvedeny v *tab. 2*.

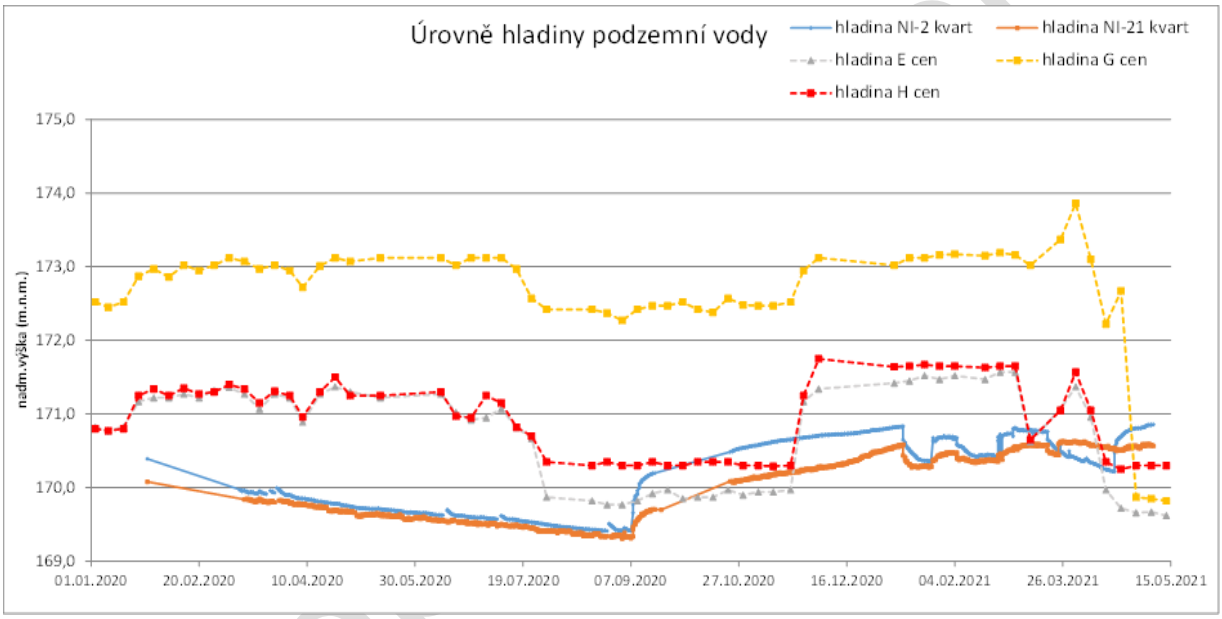
Accepted

Tab. 2. Oxidačně-redukční potenciál a formy železa ve vrtu E (cenomanská zvodeň) (8/2020)
Tab. 2. Results of Eh measurement and iron form determinations in the Cenomanian aquifer – well E (8/2020)

Parametr	Jednotka	Vrt E (cenoman)
	datum	26.08.2020
Fe celkový	mg/l	**4,94**
Fe(III)	mg/l	<0,01
Fe(II)	mg/l	**5,46**
Redox potenciál	mV	-90

Vysvětlivky k tab. 1: červeně označené pole – koncentrace nad hygienickým limitem pro pitnou vodu (dle vyhlášky č. 252/2004 Sb.) – Fe > 0,2 mg/l, modře označené pole – záporné hodnoty Eh, oranžově označené pole – kladné hodnoty Eh. Rozdíl mezi stanovenou koncentrací Fe(II) mírně převyšující koncentraci celkového Fe, je interpretován jako důsledek analytické nejistoty a rozdílného postupu jednotlivých stanovení.

Současně byly vyhodnoceny piezometrické hladiny cenomanské zvodně a hladiny podzemní vody v kvartérní zvodni za období leden 2020 až květen 2021 (*obr. 7*).



Obr. 7. Piezometrické hladiny cenomanského horizontu a hladiny podzemní vody kvartérního horizontu

Fig. 7. Piezometric levels of the Cenomanian aquifer and groundwater levels of the Quaternary aquifer

Dlouhodobý monitoring i výsledky numerického modelování ukázaly, že piezometrická hladina cenomanské zvodně zůstává i při odběrech převyšujících 40 $l \cdot s^{-1}$ nad úrovní hladiny kvartérní zvodně. Za těchto podmínek může v místech porušení izolační vrstvy docházet k **vzestupnému proudění tlakové cenomanské vody do kvartérní zvodně**, odkud je následně společně s kvartérní vodou zachycována vrty systému R38.

Chemické složení cenomanské vody vykazuje velmi podobné charakteristiky jako voda odebíraná ze železem bohatých vrtů řady R38, zejména vysoké koncentrace Fe(II) a nízké hodnoty Eh. Na základě těchto výsledků se jako nejpravděpodobnější zdroj rozpuštěného železa ve sledované části kvartérní zvodně jeví lokální přítok redukční vody z cenomanské zvodně přes turonský izolátor.

Pro orientační posouzení rozsahu tohoto přítoku byl použit jednoduchý dvousložkový směšovací model založený na koncentracích rozpuštěného železa v cenomanské a kvartérní vodě. Výpočet vychází z předpokladu, že koncentrace železa v jímané vodě představuje směs obou složek podle vztahu:

Accepted manuscript

$$c_{R38} = f \cdot c_{cen} + (1 - f) \cdot c_{kv}$$

kde:

f je podíl cenomanské vody,

c_{R38} koncentrace železa v jímané vodě,

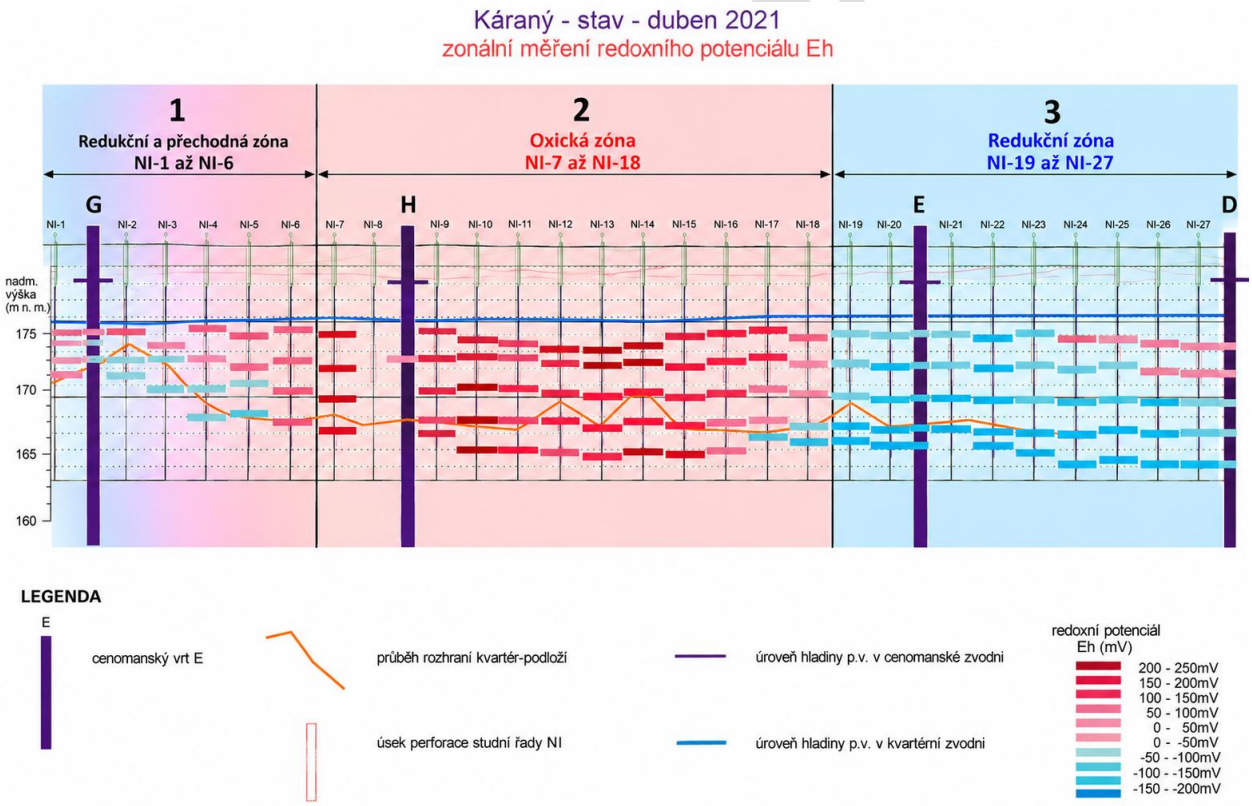
c_{cen} koncentrace železa v cenomanské vodě,

c_{kv} koncentrace železa v kvartérní vodě.

Při průměrné koncentraci železa přibližně 0,5 mg · l^{-1} v systému R38 a koncentraci přibližně 5 mg · l^{-1} v cenomanské vodě vychází podíl cenomanské složky v kvartérní zvodni řádově kolem **10 %**. Při celkovém odběru přibližně 20 l · s^{-1} by tomu odpovídal přítok cenomanské vody ve výši zhruba **2 l · s^{-1}.**

3.8 Vymezení redoxních zón a návrh režimu odběru podzemní vody

Na základě plošného monitoringu Eh, doplněného o výsledky hydrochemických analýz a stanovení forem železa, byly v jímací řadě NI vymezeny tři hydrogeochemické zóny lišící se redoxními podmínkami i obsahem rozpuštěného železa (*obr. 8*).



Obr. 8. Vymezení redoxních zón v jímací řadě NI při plném provozu (4/2021)

Fig. 8. Division of areas according to Eh distribution in groundwater of wells in line NI during full pumping (4/2021)

Jednotlivé zóny lze charakterizovat následovně:

- **oxická zóna** s převážně kladnými hodnotami Eh a nízkými koncentracemi železa (2),

- **přechodná (smíšená) zóna**, v níž dochází ke střídání oxických a redukčních podmínek (1),
- **redukční zóna** charakterizovaná zápornými hodnotami Eh a vysokými koncentracemi Fe(II) (3).

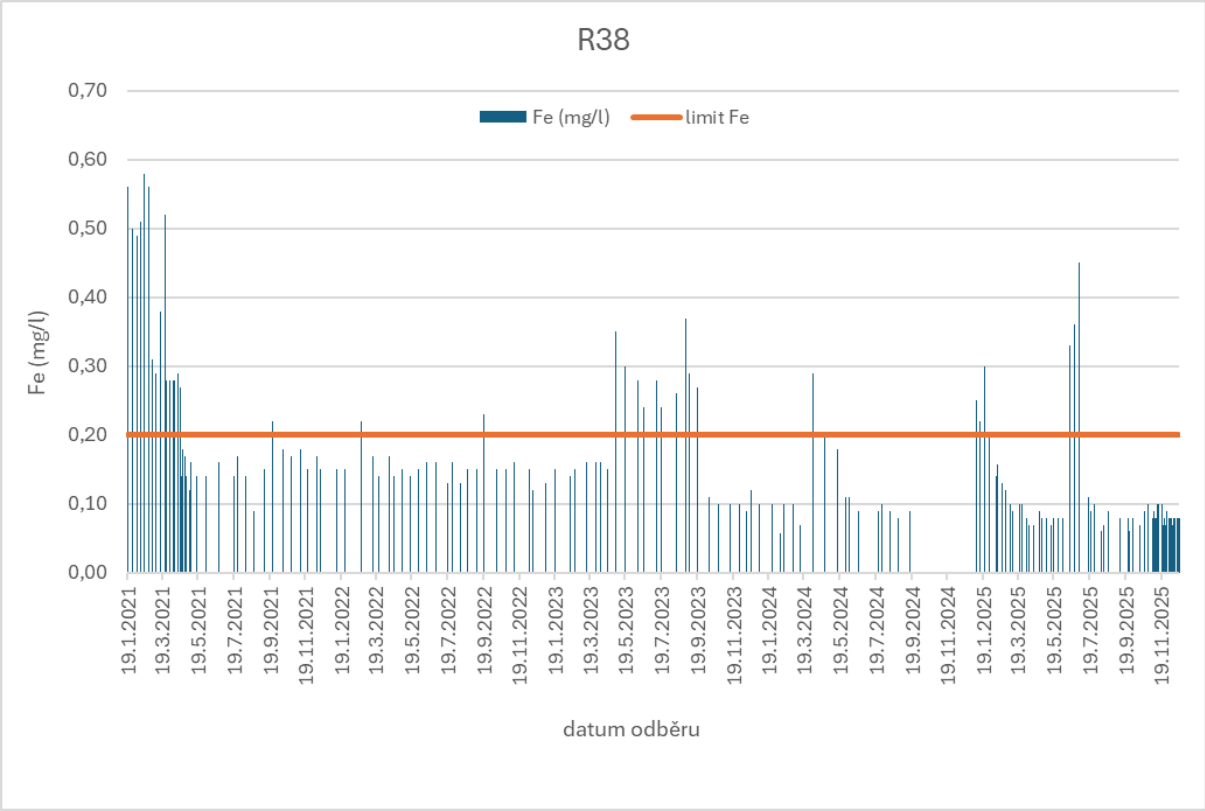
Obdobným způsobem byly vymezeny hydrogeochemické zóny také v jímacím řadu NII.

Na základě hodnot Eh a hydrochemických ukazatelů byly vymezeny oxické, přechodné a redukční zóny. Toto rozdělení umožnilo hodnotit vrty nejen podle hydraulické vydatnosti, ale také podle hydrogeochemické kvality jímané vody. Na základě zjištění byly od roku 2021 z provozu jímání vyřazeny vrty dlouhodobě zachycující redukční podzemní vodu s vysokými koncentracemi železa.

Tento způsob řízení odběru představuje zásadní změnu oproti původnímu provozu, jelikož kritériem pro zařazení vrtu do provozu již není pouze jeho vydatnost, ale především jeho hydrogeochemická charakteristika.

3.9 Provozní ověření navrženého režimu odběru

Po zavedení selektivního provozu vrtů došlo k výraznému snížení koncentrací železa a zákalu v podzemní vodě násoskového systému R38 vodárny Káraný. Výrazně se tím omezilo zanášení systému a poklesl počet provozních odstávek této čerpací stanice. Dlouhodobý monitoring tak potvrdil účinnost navrženého způsobu řízení odběru podzemní vody (*obr. 9*).



Obr. 9. Vývoj koncentrací železa v systému R38 v období 2021–2025

Fig. 9. Fe concentrations at R38 from 2021 to 2025

Neméně významné bylo omezení provozních odstávek čerpací stanice R38. Před změnou provozního režimu dosahovala celková doba odstávek způsobených zvýšeným obsahem železa a zanášením systému až několika stovek dní ročně. Po zavedení selektivního odběru podzemní vody poklesla doba odstávek na pouhé jednotky dní za rok.

3.10 Provozní ověření koncepčního modelu

Navržený hydrogeologický koncept byl ověřen úpravou strategie odběru podzemní vody. Vrty charakterizované trvale redukčním prostředím a zvýšenými koncentracemi rozpuštěného železa byly provozovány odlišně od vrtů s příznivější hydrogeochemickou charakteristikou. Dlouhodobý provozní monitoring po zavedení nového režimu prokázal výrazné zlepšení kvality čerpané podzemní vody. Ve srovnání s předchozím stavem došlo k poklesu koncentrací železa, ke snížení zákalu, omezení četnosti odstávek čerpací stanice R38 a snížení nároků na údržbu vrtů.

Významným zjištěním je skutečnost, že těchto výsledků bylo dosaženo **bez jakýchkoli stavebních úprav vodárenského systému a bez zavedení nových technologií úpravy vody**.

Provozní zkušenosti tak poskytují nezávislou podporu navrženému hydrogeologickému modelu.

Přestože samotná změna provozu nemůže být považována za přímý důkaz existence přetoku mezi zvodněmi, jednoznačně dokládá, že **řízení odběru podzemní vody založené na hydrogeologickém poznání může účinně eliminovat provozní problémy spojené se zvýšeným obsahem železa ve vodě určené k pitným účelům**.

4. DISKUZE A PRAKTICKÉ VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ

Výsledky získané na lokalitě umělé infiltrace Káraný mají širší význam než pouze pro hodnocený vodárenský systém. Zjištěné mechanismy lze očekávat i v dalších systémech umělé infiltrace, kde dochází k hydraulické interakci mezi mělkými kvartérními a hlubšími tlakovými zvodněmi s odlišnou hydrochemickou charakteristikou.

4.1 Hydrogeologické faktory řídící mobilizaci železa

Výsledky ukazují, že rozložení koncentrací železa ve zvodni je primárně řízeno hydraulickými poměry, a nikoli pouze lokálními geochemickými procesy. Výrazná variabilita kvality podzemní vody mezi sousedními vrty naznačuje existenci rozdílných proudových drah. Kombinace hydrochemických, geofyzikálních, hydraulických a provozních dat podporuje interpretaci lokálního hydraulického propojení mezi cenomanskou a kvartérní zvodní.

Obdobné vazby mezi proudovými drahami podzemní vody, redoxními podmínkami a výslednou kvalitou vody byly popsány v řadě studií zaměřených na břehovou i umělou infiltraci do podzemních vod [1, 6, 11, 13]. Su et al. ukázali, že redoxní zonace je citlivá na typ dotace podzemní vody a že regionální přítok redukční podzemní vody může významně měnit redoxní podmínky v okolí jímacích objektů [11]. Tento poznatek je v souladu s interpretací popsanou pro lokalitu Káraný.

Studie potvrzuje, **že hydraulické poměry a hydrochemické procesy nelze posuzovat odděleně**, ale jako vzájemně propojený systém, v němž změny proudění podzemní vody přímo ovlivňují hydrogeochemické podmínky ve zvodni.

4.2 Redoxní zonace jako hlavní mechanismus řízení výskytu železa

Význam redoxní zonace pro kvalitu podzemních vod byl opakovaně potvrzen v systémech umělé i břehové infiltrace. Zahraniční studie ukazují, že vznik prostorově odlišných redoxních zón ovlivňuje migraci železa, mikrobiální aktivitu, transformaci rozpuštěných látek i tvorbu kolmatačních vrstev [1, 5, 6, 9, 11]. Obdobný význam redoxní zonace byl popsán také při břehové infiltraci v Číně, kde bylo zjištěno, že prostorové uspořádání redoxních zón je úzce spojeno s proudovými drahami podzemní vody a významně ovlivňuje mobilitu železa a dalších redoxně citlivých prvků [6]. Wang et al. prokázali, že prostorový rozsah redoxních reakcí je řízen nejen

Accepted for print

chemismem vody, ale také hydraulickými vlastnostmi prostředí, zejména propustností sedimentů a dobou zdržení vody ve zvodni [5].

Silná korelace mezi koncentrací Fe(II) a hodnotami Eh potvrzuje, že redoxní zonace nepředstavuje pouze deskriptivní charakteristiku systému, nýbrž přímo ovlivňuje chemickou speciaci železa a jeho transport ve zvodni. Získané výsledky jsou v souladu s publikovanými studiemi, které uvádějí redoxní potenciál jako jeden z hlavních faktorů řídících mobilitu železa v systémech břehové a umělé infiltrace [5, 6, 11].

Význam prostorově proměnlivých redoxních podmínek byl popsán rovněž v evropských systémech břehové infiltrace, kde redoxní zonace ovlivňuje nejen chování železa a manganu, ale i transformaci organických látek a osud stopových kontaminantů [7, 13].

Výsledky získané na lokalitě Káraný jsou s těmito poznatky v souladu a naznačují, že obdobné mechanismy mohou probíhat v prostředí hydraulicky propojených vícevrstvých zvodní.

4.3 Mikrobiologické procesy a zanášení vrtů

Přítomnost mikrobiálních společenstev v železitých usazeninách je v souladu s dosavadními poznatky o úloze mikroorganismů v koloběhu železa. V této studii byly mikrobiologické nálezy úzce spojeny s vrty postiženými intenzivní tvorbou železitých usazenin a postupným zanášením jímacích objektů.

Výsledky naznačují, že mikroorganismy se nepodílejí na primární mobilizaci železa, ale především urychlují procesy vedoucí k oxidaci Fe(II) a následnou tvorbu biofilmů po vstupu železem obohacené vody do oxického prostředí. Tento závěr odpovídá současným poznatkům o biogeochemii železa, podle nichž mikroorganismy často urychlují oxidaci a precipitaci železa po vzniku vhodných redoxních podmínek [3, 4]. Tyto poznatky ukazují, že bakterie nepředstavují primární zdroj zvýšených koncentrací železa, ale významně přispívají k tvorbě pevných železitých fází, které následně zanášejí perforace vrtů a snižují jejich hydraulickou účinnost. Tyto závěry mají zásadní praktický význam pro provoz vodárenských systémů. Obdobné mechanismy byly popsány i v dalších systémech umělé infiltrace, kde přítomnost rozpuštěného železa v kombinaci s vhodnými redoxními podmínkami vedla k tvorbě biologických a minerálních inkrustací s negativním dopadem na hydraulickou účinnost jímacích objektů [10].

Pokud není odstraněna hydrogeologická příčina přísunu rozpuštěného Fe(II), **opatření zaměřená pouze na odstraňování biofilmů nebo biologických inkrustací nemohou představovat trvalé řešení problému**. Účinná eliminace železitých usazenin proto vyžaduje současné povědomí o proudění podzemní vody, redoxních podmínkách a mikrobiálních procesech probíhajících ve vrtech.

Souvislost mezi redoxními poměry, mikrobiální aktivitou a procesy zanášení byla popsána rovněž v experimentech zaměřených na systémy umělé infiltrace, kde vývoj redoxních zón významně ovlivňoval intenzitu biologického zanášení a změny hydraulických vlastností prostředí. Liu et al. prokázali úzkou vazbu mezi vývojem redoxních podmínek a vznikem biologického zanášení v systémech MAR. Výsledky ukazují, že změny redoxního prostředí přímo ovlivňují mikrobiální aktivitu a následně hydraulickou funkci infiltračního systému [9]. Vliv chemického složení doplňované vody na rychlost zanášení infiltračních systémů byl popsán též při ukládání vody do zvodní prostřednictvím vrtů, kde kvalita doplňované vody významně ovlivňovala rychlost kolmatace i dlouhodobou funkčnost systému [2, 10]. Experimentální práce Qin et al. potvrdila, že změny redoxního prostředí během umělé infiltrace vedou ke změnám mikrobiálních společenstev a navazujících hydrochemických reakcí ve zvodni [12].

4.4 Provozní význam pro systémy umělé infiltrace

Accepted for print

Jedním z nejvýznamnějších výsledků studie je praktické ověření využitelnosti hydrogeologického modelu pro optimalizaci provozu vodárenského systému v Káraném. Selektivní využívání vrtů na základě hydrogeochemických charakteristik vedlo ke zlepšení kvality surové vody a zvýšení provozní spolehlivosti bez potřeby technologických nebo stavebních zásahů. Význam hydrogeochemicky orientovaného řízení provozu je v souladu se současnými trendy správy systémů umělé infiltrace, jež stále častěji využívají provozní monitoring chemického složení podzemní vody jako nástroj optimalizace provozu a prevence zanášení zařízení [1].

Navržený přístup je potenciálně využitelný i v dalších systémech umělé infiltrace. Zahraniční studie opakovaně prokázaly význam hydrogeologických a hydrochemických podmínek pro vznik zanášení infiltračních systémů a změny kvality podzemní vody, což podporuje přenositelnost navrženého způsobu řízení odběru také na jiné lokality s obdobnými hydrogeologickými poměry [1, 13, 14]. Současně bylo prokázáno, že procesy zanášení a změny kvality vody během umělé infiltrace úzce souvisejí s geochemickými podmínkami infiltračního prostředí a chováním kovů v podzemní vodě [8].

4.5 Omezení studie a další směry výzkumu

Při interpretaci výsledků je třeba zohlednit několik omezení této studie. Přestože navržený koncepční model podporuje několik na sobě nezávislých souborů dat, přesná geometrie a hydraulické vlastnosti všech preferenčních cest propojujících cenomanskou a kvartérní zvodeň nejsou dosud zcela známy. Další výzkum využívající např. environmentální stopovače, detailní hydraulické zkoušky či cílený průzkum novými vrty by mohl významně zpřesnit poznání mechanismů mezivrstevního přetoku.

Obdobně, ačkoli mikrobiologické analýzy jednoznačně prokázaly přítomnost mikroorganismů podílejících se na koloběhu železa, nebylo možné za provozních podmínek kvantifikovat relativní význam biologické a abiotické oxidace železa. Budoucí výzkum kombinující moderní metody molekulární mikrobiologie s podrobnou hydrogeochemickou charakterizací by mohl přispět k lepšímu pochopení těchto procesů.

Důležitou součástí dalšího výzkumu zůstává také dlouhodobý monitoring. Pouze dlouhodobé sledování vývoje kvality podzemní vody, hydraulických poměrů a provozu vodárenského systému umožní ověřit, zda navržená strategie odběru zůstane účinná i při změnách infiltračních podmínek, klimatických poměrů nebo provozních požadavků.

4.6 Důkazy podporující hypotézu mezivrstevního přetoku

Pozorování	Podpora hypotézy
Redoxní zonace	silná
Vysoké koncetrace Fe(II)	střední/silná
Vyšší piezometrická hladina cenomanu	silná
Geofyzikálně zjištěné diskontinuity turonského izolátoru	střední/silná
Provozní ověření	silná

4.7 Koncepční model mezivrstevního přetoku řídícího redoxní zonaci

Výsledky studie podporují model, podle něhož lokální vzestupný mezivrstevní přetok redukční cenomanské vody může vytvářet stabilní redoxní zonaci v kvartérní zvodni.

Accepted for print

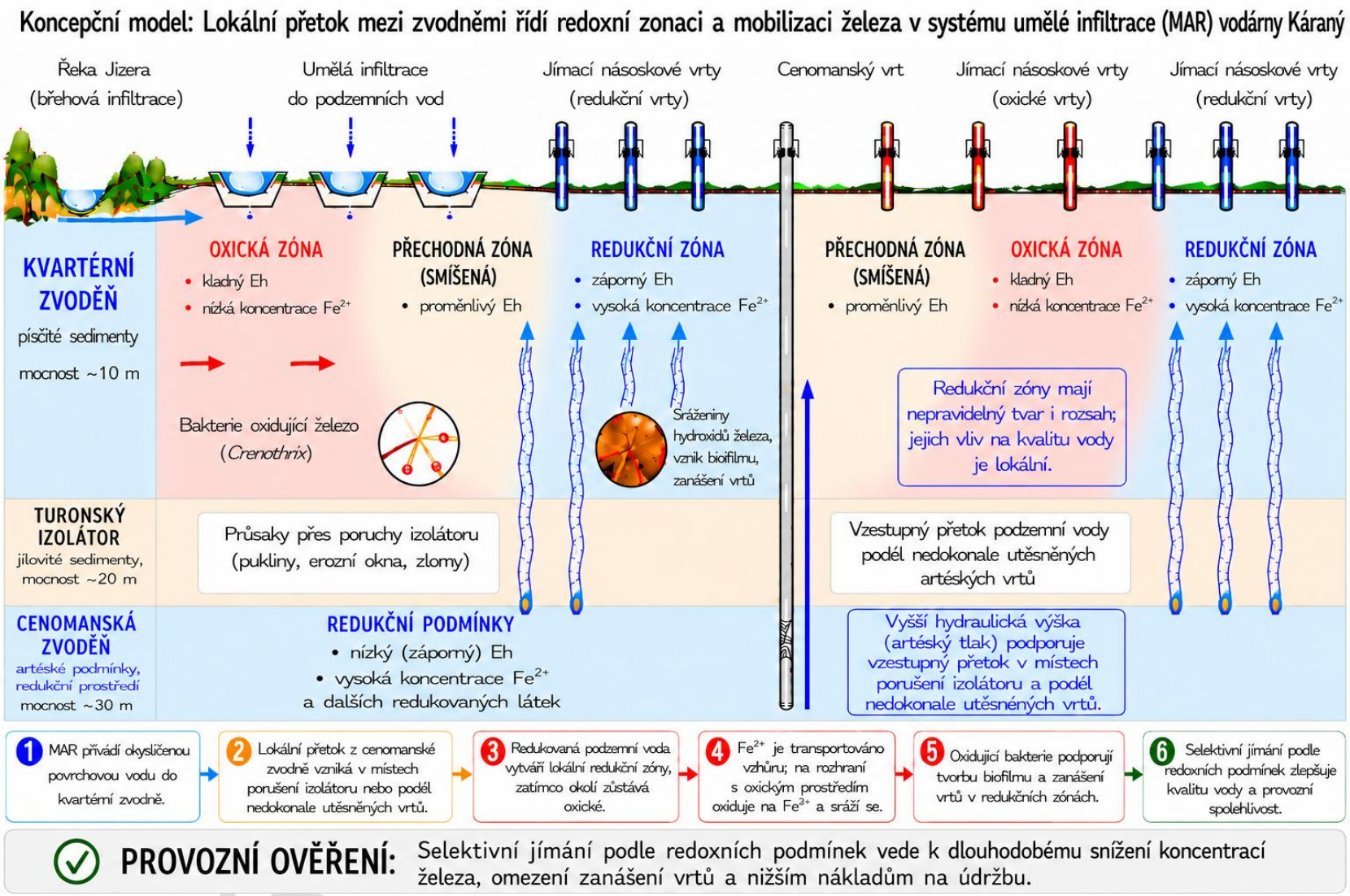
Navržený mechanismus lze shrnout do jednoduchého schématu:

mezivrstevní přetok → redoxní zonace → mobilizace Fe^{2+} → mikrobiální oxidace → tvorba inkrustací → provozní důsledky

Navržený koncepční model syntetizuje výsledky hydrochemických, hydraulických, geofyzikálních, mikrobiologických a provozních pozorování a znázorňuje předpokládaný mechanismus, kterým mezivrstevní přetok redukční vody z cenomanské zvodně ovlivňuje vznik redoxní zonace a distribuci železa v kvartérní zvodni jižní části umělé infiltrace Káraný.

Schéma navrženého modelu je uvedeno na *obr. 10*.

Accepted for print



Obr. 10. Koncepční model procesů probíhajících při přetoku redukční vody z cenomanské zvodně do oxické kvartérní zvodně

Fig. 10. Conceptual model of the processes occurring during the overflow of reducing water from the Cenomanian aquifer into the oxic Quaternary aquifer

Souhrnně lze konstatovat, že výsledky studie podporují současné pojetí systémů umělé infiltrace jako hydrogeologicky a hydrogeochemicky heterogenních prostředí, jejichž kvalita podzemní vody je významně ovlivňována prostorovým rozložením redoxních podmínek. V souladu se zahraničními studiemi se ukazuje, že porozumění vazbám mezi prouděním podzemní vody, redoxní zonací, mobilitou železa a mikrobiálními procesy může představovat účinný nástroj pro optimalizaci provozu jímacích systémů a dlouhodobou ochranu zdrojů pitné vody.

5. ZÁVĚR

Komplexní hydrogeologický průzkum realizovaný v letech 2019–2025 prokázal, že zvýšené koncentrace železa v jímacím systému R38 vodárny Káraný nejsou způsobeny procesy probíhajícími přímo v kvartérní zvodni ani konstrukčním provedením jímacího systému. Soubor hydrochemických, hydraulických, geofyzikálních, mikrobiologických a provozních dat konzistentně podporuje interpretaci, že dominantním zdrojem rozpuštěného železa v kvartérní zvodni je lokální vzestupný mezivrstevní přítok redukční vody z cenomanské zvodně.

Přítok vody bohaté na Fe(II) vytváří prostorově stabilní redoxní zonaci, která řídí speciaci železa, rozvoj bakterií oxidujících železo i vznik železitých inkrustací. Silná vazba mezi koncentrací Fe(II) a hodnotami oxidačně-redukčního potenciálu potvrzuje, že monitoring Eh představuje účinný nástroj pro identifikaci vrtů ovlivněných redukční podzemní vodou.

Praktickým přínosem studie bylo ověření nového způsobu řízení odběru podzemní vody založeného na hydrogeochemických charakteristikách jednotlivých vrtů. Selektivní odstavení vrtů zachycujících redukční vodu vedlo k dlouhodobému snížení koncentrací železa a zákalu, k omezení zanášení vrtů i výraznému zvýšení provozní spolehlivosti systému, aniž bylo nutné realizovat nové technologie úpravy vody nebo stavební zásahy.

Studie ukazuje, že propojení hydrogeologických poznatků s dlouhodobým provozním monitoringem představuje účinný nástroj pro optimalizaci provozu systémů umělé infiltrace i dalších vícevrstvých hydrogeologických systémů s hydraulickou komunikací mezi zvodněmi. Získané výsledky jsou v souladu s poznatky získanými v jiných systémech umělé i břehové infiltrace, podle nichž jsou redoxní procesy a lokální hydrogeologická heterogenita významnými faktory ovlivňujícími kvalitu podzemní vody i dlouhodobou spolehlivost jímacích systémů [1, 7, 13].

Pro obdobné vodárenské systémy lze doporučit začlenění hydrogeochemických charakteristik vrtů, zejména monitoringu Eh a forem železa, do provozního řízení odběru podzemní vody.

Přestože byla studie realizována na lokalitě Káraný, navržený přístup může být využitelný i v dalších vícevrstvých hydrogeologických systémech s hydraulickou komunikací mezi zvodněmi.

Hlavní přínosy studie:

- byl identifikován pravděpodobný původ železa spojený s přítokem vody z cenomanské zvodně do zvodně kvartérní,
- byla doložena dlouhodobá stabilita redoxní zonace v monitorované části systému,
- byl navržen hydrogeologický model přetoku mezi zvodněmi,
- byla ověřena účinnost selektivního provozu vrtů,
- byly odstraněny problémy se železem v pitné vodě bez investic do technologie úpravy vody či stavebních opatření.

Accepted for print

Literatura

1. DILLON, P., STUYFZAND, P., GRISCHEK, T., LLURIA, M., PYNE, R. D. G., JAIN, R. C., BEAR, J., SCHIMMELPFENNIG, W., SHAMSUDDUHA, M. et al. Sixty Years of Global Progress in Managed Aquifer Recharge. *Hydrogeology Journal*. 2019, 27, s. 1–30. Zdroj: [springer.com]

2. PYNE, R. D. G. *Aquifer Storage Recovery: A Guide to Groundwater Recharge Through Well*s. 2nd ed. Gainesville, Florida: ASR Systems LLC, 2005.

3. XIA, X., TENG, Y., ZHAI, Y. Biogeochemistry of Iron Enrichment in Groundwater: An Indicator of Environmental Pollution and Its Management. *Sustainability*. 2022, 14, 7059. Zdroj: [mdpi.com]

4. APPELO, C. A. J., POSTMA, D. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. 2nd ed. Rotterdam: A. A. Balkema, 2005.

5. WANG, J., YAN, Y., BAI, J., SU, X. Influences of Riverbed Siltation on Redox Zonation During Bank Filtration: A Case Study of Liao River, Northeast China. *Hydrology Research*. 2020, 51(6), s. 1 478–1 489. Zdroj: [iwaponline.com]

6. SU, X., LU, S., YUAN, W. et al. Redox Zonation for Different Groundwater Flow Paths During Bank Filtration: A Case Study at Liao River, Shenyang, Northeastern China. *Hydrogeology Journal*. 2018, 26(5), s. 1 573–1 589. Zdroj: [springer.com]

7. RAY, C., MELIN, G., LIKERMO, J. (eds.). *Riverbank Filtration: Improving Source-Water Quality*. Kluwer Academic Publishers, 2002. Zdroj: [springer.com]

8. MA, S., SONG, Y., YE, X., DU, X., MA, J. Clogging and Water Quality Change Effects of Typical Metal Pollutants Under Intermittent Managed Aquifer Recharge Using Urban Stormwater. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2021, 18, 13272. Zdroj: [mdpi.com]

9. LIU, J., YOU, H., ZHANG, W. et al. Redox Zonation and Bioclogging Interaction in Managed Aquifer Recharge Systems: A Laboratory-Scale Investigation. *Environmental Technology & Innovation*. 2025, 40, 104344. Zdroj: [scixplorer.org]

10. PAVELIC, P., DILLON, P. J., BARRY, K. E., VANDERZALM, J. L., CORNWELL, S. M., MERRICK, N. P. Water Quality Effects on Clogging Rates During Recycled Water Aquifer Storage and Recovery. *Water Research*. 2007, 41, s. 4 539–4 550. Zdroj: [scispace.com]

11. SU, X., CHEN, Y., LYU, H. et al. Response of Redox Zonation to Recharge in a Riverbank Filtration System: A Case Study of the Second Songhua River, Northeast China. *Hydrology Research*. 2020, 51(5), s. 1 104–1 119. Zdroj: [iwaponline.com]

12. QIN, M., YOU, H., ZHANG, W. et al. Effects of Redox Condition on Bacteria-Mediated Hydrochemical Processes and Bacterial Community During Managed Aquifer Recharge. *Sustainability*. 2025, 17(1), 64. Zdroj: [mdpi.com]

13. HISCOCK, K. M., GRISCHEK, T. Attenuation of Groundwater Pollution by Bank Filtration. *Journal of Hydrology*. 2002, 266, s. 139–144. Zdroj: [research-portal.uea.ac.uk]

14. HRKAL, Z., ADOMAT, Y., ROZMAN, D., GRISCHEK, T. Efficiency of Micropollutant Removal Through Artificial Recharge and Riverbank Filtration: Case Studies of Káraný, Czech Republic and Dresden-Hosterwitz, Germany. *Environmental Earth Sciences*. 2023. Zdroj: [springer.com]

15. KRÁSNÝ, J. et al. *Podzemní vody České republiky*. Praha: Český geologický úřad, 2012.

Accepted for print

Neveřejné odborné podklady

16. PATKA, J. *Regenerace násoskových řadů NI až NIV R-stanic R38 a R39 v areálu umělé infiltrace Káraný. Závěrečná zpráva*. Aquatest a. s., Praha, 2016.

17. KOHOUT, P., SKALICKÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M. *Geochemické a hydraulické vyhodnocení původu Fe v surové vodě (s aktualizací hydraulického modelu proudění podzemní vody) – I. etapa*. MS PROGEO. 2019.

18. KOHOUT, P., SKALICKÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M. *Geochemické a hydraulické vyhodnocení původu Fe v surové vodě (s aktualizací hydraulického modelu proudění podzemní vody) – II. etapa*. MS PROGEO. 2021.

19. KOHOUT, P., SKALICKÝ, M., GVOŽDÍK, L., MILICKÝ, M., POLÁK, M. *Geochemické a hydraulické vyhodnocení původu Fe v surové vodě (s aktualizací hydraulického modelu proudění podzemní vody) – III. etapa*. MS PROGEO. 2023.

20. KOHOUT, P., SKALICKÝ, M. *Geochemický monitoring železa v surové vodě – IV. etapa. Interní zpráva.* 2025.

21. KOHOUT, P., SKALICKÝ, M. *Geochemický monitoring železa v surové vodě – V. etapa. Interní zpráva*. 2026.

22. EICHLER, F. *Hydrochemická analýza podzemní vody čerpané ze zdroje pitné vody pro Prahu. Káraný*. 2020.

23. EICHLER, F. *Kvalitativní a kvantitativní stanovení složení sedimentů z vrtů pro odběr pitné vody v lokalitě Káraný*. 2019.

Autoři

Mgr. Marek SKALICKÝ[1]

e-mail: skalicky@vodarnakarany.cz

ORCID: 0009-0004-9096-2314

RNDr. Petr KOHOUT[2]

e-mail: petr.kohout@forsapi.cz

[1]Vodárna Káraný, a. s., Praha (Česká republika)

[2]Forsapi, s. r. o., Praha (Česká republika)

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2026.11.001

ISSN 0322-8916/© 2027 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

Accepted for print

HYDROGEOLOGICAL CAUSES OF ELEVATED IRON CONTENT AND REDOX ZONATION IN THE ARTIFICIAL INFILTRATION SYSTEM OF THE KÁRANÝ WATERWORKS

SKALICKÝ, M.[1]; KOHOUT, P.[2]

[1]Káraný Waterworks, Prague (Czech Republic)

[2]Forsapi, Prague (Czech Republic)

Keywords: managed aquifer recharge – artificial infiltration – groundwater hydrogeochemistry – iron in groundwater – iron mobilization – redox zonation – redox potential – inter-aquifer leakage – hydraulic connection between aquifers – iron-oxidizing bacteria – well clogging – groundwater management

Managed Aquifer Recharge (MAR) systems develop complex redox environments as a result of hydraulic interactions between shallow oxic aquifers and deeper confined aquifers, which fundamentally influence iron behavior and mobility. In such heterogeneous systems, localized iron enrichment of groundwater is often associated with specific hydrogeological mechanisms. This study investigates the origin of dissolved iron and the processes controlling redox zonation in the Quaternary aquifer of the Káraný Waterworks, one of the most important drinking water sources in Central Europe.

Between 2019 and 2025, a comprehensive hydrogeological investigation was conducted, including hydrochemical analyses, redox potential measurements, geophysical surveys, hydraulic testing, microbiological investigations, numerical groundwater flow modeling, and long-term operational monitoring. The results indicate that elevated concentrations of dissolved iron do not primarily originate from geochemical reactions occurring within the Quaternary aquifer itself. Instead, they are associated with localized upward inter-aquifer leakage of reducing groundwater from the Cenomanian aquifer through discontinuities in the confining layer and inadequately sealed artesian wells. This inter-aquifer leakage establishes a spatially stable redox zonation that controls iron speciation, microbial iron oxidation, and well clogging. Dissolved ferrous iron concentrations exhibited a pronounced inverse relationship with redox potential, while hydraulic observations and numerical modeling results were consistent with the proposed leakage mechanism.

The proposed hydrogeochemical conceptual model was validated under actual operating conditions at the waterworks through the implementation of a selective groundwater abstraction strategy based on the redox characteristics of individual wells rather than their hydraulic yields. Excluding wells affected by the inflow of reducing groundwater resulted in sustained reductions in dissolved iron concentrations, water turbidity, well clogging intensity, and maintenance requirements, without the need to introduce new water treatment technologies or undertake structural modifications to the water supply infrastructure.

The findings demonstrate that localized inter-aquifer leakage can represent a dominant factor controlling iron cycling and groundwater quality in Managed Aquifer Recharge systems. They also highlight the importance of integrating hydrogeological, hydrochemical, geophysical, microbiological, and operational data to identify redox-controlled groundwater heterogeneity and optimize drinking water abstraction in complex multilayered hydrogeological systems.

Accepted for print