



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



KRYCÍ LIST – VÝSTUPY

Název výstupu	Monitorovací systém podzemních vod mělkého a středně hlubokého oběhu
Výzkumný program	Hydrogeologie, hydrochemie a termohydraulické modelování
Partner/partneři	Česká geologická služba
Termín zpracování	5/2020

Název projektu	Modernizace výzkumné infrastruktury RINGEN (RINGEN+)
Registrační číslo	CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_013/0001792
Žadatel	Univerzita Karlova – Přírodovědecká fakulta



ČESKÁ
GEOLOGICKÁ
SLUŽBA



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Monitorovací systém podzemních vod mělkého a středně hlubokého oběhu

Autoři: Lenka Rukavičková, Jaroslav Řihošek, Jiří Burda, Svatopluk Kořalka, Jan Holeček

Česká geologická služba

Praha, květen 2020



ČESKÁ
GEOLOGICKÁ
SLUŽBA



Obsah

1	Úvod	3
2	Chemické složení podzemních vod v okolí Litoměřic	3
2.1	Úvod, metodika	3
2.2	Vnitřní polygon	5
2.3	Střední polygon	6
2.4	Velký polygon	7
3	Monitoring chemického složení podzemních vod ve vrtu LT-1.....	13
3.1	Odběry vzorků podzemních vod.....	13
3.2	Profilová měření fyzikálně-chemických parametrů ve vrtu LT1	17
4	Odběry povrchových vod z řeky Labe	26
5	Vodní zdroje a hydrogeologické vrty.....	28
5.1	Vodní zdroje města Litoměřice (PVK Ústecký kraj)	28
5.2	Registrované zdroje podzemních vod v okolí vrtu LT-1	29
5.3	Hydrogeologické vrty a studny v databázi České geologické služby	30
6	Závěr	32
7	Literatura	34



Seznam obrázků:

Obr. 1: Rozsah vnitřního (oranžová linie), středního (červená linie) a velkého (černá linie) polygonu zahrnujících zpracovaná hydrochemická data s vyznačením hydrogeologických vrtů s dostupnými úplnými a správnými analýzami.	4
Obr. 2: Durovův diagram chemického složení podzemních vod z vnitřního polygonu.	6
Obr. 3: Durovův diagram chemického složení podzemních vod ze středního polygonu.	7
Obr. 4: Durovův diagram chemického složení podzemních vod v kolektoru A; velký polygon.	9
Obr. 5: Durovův diagram chemického složení podzemních vod v kolektoru AB; velký polygon.	10
Obr. 6: Durovův diagram chemického složení podzemních vod v kolektoru BC, C a D; velký polygon.	11
Obr. 7: Durovův diagram chemického složení podzemních vod z permokarbonu a z krystalinika v jeho podloží.	12
Obr. 8: Durovův diagram chemického složení podzemní vody ve vrtu LT-1.	14
Obr. 9: Vývoj chemického složení hlavních kationtů v podzemní vodě odebírané z vrtu LT-1.	15
Obr. 10: Vývoj chemického složení hlavních aniontů a TDS v podzemní vodě odebírané z vrtu LT-1.	15
Obr. 11: Durovův diagram chemického složení podzemních vod z vrtu LT-1 a z hlubokých vrtů zasahujících do permokarbonu a okolního krystalinika z okolních hydrogeologických rajonů.	16
Obr. 12: Profilové měření chemicko-fyzikálních parametrů podzemních vod ve vrtu LT-1 dne 26.9.2017.	18
Obr. 13: Profilové měření chemicko-fyzikálních parametrů podzemních vod ve vrtu LT-1 dne 16.8.2018.	19
Obr. 14: Profilové měření chemicko-fyzikálních parametrů podzemních vod ve vrtu LT-1 dne 25.10.2018.	20
Obr. 15: Profilové měření chemicko-fyzikálních parametrů podzemních vod ve vrtu LT-1 dne 14.5.2019.	21
Obr. 16: Výsledky karotážního měření metodou rezistivimetrie, doplněné o měření měrné elektrické vodivosti sondou YSI ze srpna 2018.	22
Obr. 17: Vývoj chemického složení povrchové vody v Labi, hlavní kationty.	26
Obr. 18: Vývoj chemického složení povrchové vody v Labi, hlavní anionty a celkový obsah rozpuštěných látek (TDS).	27
Obr. 19: Mapa registrovaných odběrů a hydrogeologických vrtů v okolí vrtu LT-1.	30

Seznam tabulek:

Tab. 1: Procentuální zastoupení plynů ve vzorcích z vrtu LT-1.	17
Tab. 2: Chemické složení povrchových vod v řece Labe – 1. část	27
Tab. 3: Chemické složení povrchových vod v řece Labe – 2. část	27
Tab. 4: Srovnání průměrných obsahů složek z odebíraných vzorků a průměru ČHMÚ	28



1 Úvod

Monitoring podzemních vod, zařazený do Výzkumné infrastruktury Ringen, byl původně koncipován z velké části jako nástroj pro sledování kvality a kvantity podzemních a povrchových vod v okolí nově hloubeného hlubokého geotermálního vrtu. Jeho cílem mělo být sledování dopadů plánovaných výzkumných aktivit (hloubení vrtu, testy ve vrtu a mezi vrtů) na okolní životní prostředí, vodní zdroje a místní obyvatelstvo. Vrt měl být vyhlouben v rámci podaného projektu Degree (OP VVV). S ohledem na public relations je třeba věcně prokázat, že nedochází k ovlivnění podzemních i povrchových vod a využití potenciálu hlubokých geotermálních vrtů je bezpečné.

Vzhledem k tomu, že projekt nového hlubokého vrtu nezískal finanční podporu a k jeho realizaci nedošlo, monitorovací práce v předpokládaném rozsahu pozbyly smysl. Monitoring se proto zaměřil na druhý plánovaný cíl – na získání referenčních údajů o složení povrchových vod, mělkých podzemních i hlubokých podzemních vod (stávající vrt PVGT-LT-1, dále jen LT-1) ve studované oblasti. Terénní měření a odběry vzorků vod byly doplněny rozsáhlou rešerší chemického složení podzemních vod v oblasti a dále rešerší zaměřenou na využívané vodní zdroje v širším okolí vrtu LT-1. Provedené výzkumné aktivity je možné shrnout do čtyř okruhů:

- rešerše a zhodnocení chemického složení podzemních vod v různých hloubkových úrovních v okolí vrtu LT-1;
- monitoring chemického složení podzemních vod ve vrtu LT-1 (chemické složení a profilová měření);
- monitoring chemického složení povrchové vody v řece Labi;
- rešerše veškerých vodních zdrojů a hydrogeologických vrtů v okolí výzkumného vrtu LT-1.

2 Chemické složení podzemních vod v okolí Litoměřic

2.1 Úvod, metodika

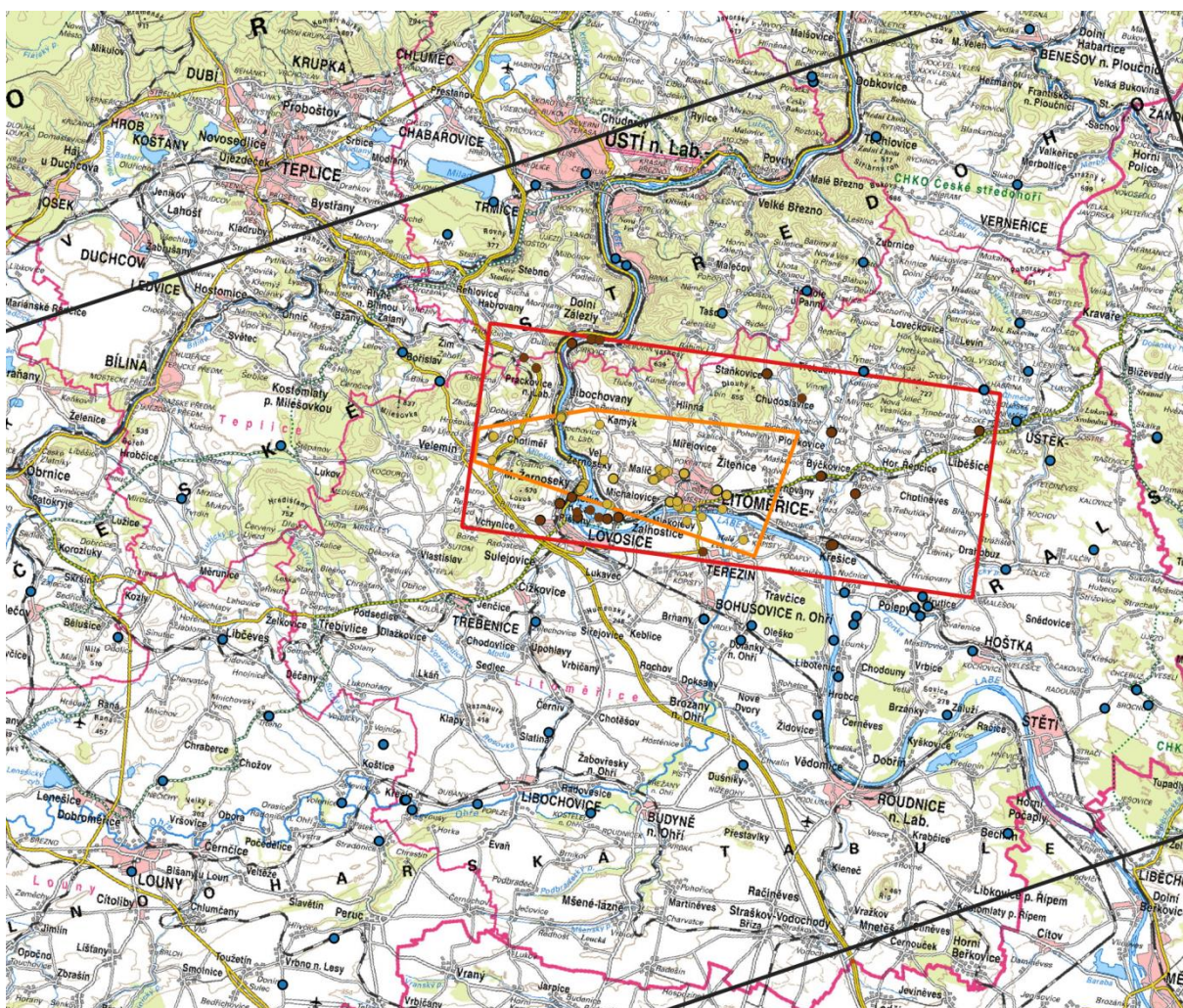
Zhodnocení chemického složení podzemních vod bylo zpracováno s cílem získat základní představu o hydrogeologických poměrech v okolí geotermálního vrtu v Litoměřicích a jejich vývoji v prostoru. Získaná data následně sloužila jako podklad pro srovnání s daty z geotermálního vrtu LTV-1 a budou dále využita při vrtných a dalších technických pracích v rámci následných výzkumných programů.

Zpracována byla veškerá data z hydrogeologické databáze České geologické služby, Geofondu a to ve třech oblastech (polygonech):

1. Vnitřní polygon (na Obr. 1 znázorněn oranžovou linií) odpovídá rozsahu 3D geologického modelu oblasti, který vznikl v rámci projektu Ringen. Z toho polygonu byla zpracována data ze všech hydrogeologických vrtů nezávisle na hloubce. Polygon 3D geologického modelu je s ohledem na možnost získání a zahrnutí strukturních dat rozšířen z Litoměřic zejména směrem na západ – do Opárenského údolí, část východně od Litoměřic do něj není zahrnuta. Datový soubor z vnitřního polygonu zahrnuje vrtů s hloubkou do 200 m, hlubší vrtů s hydrogeologickými daty se zde nevyskytují. Výběry hydrogeologických dat byly proto rozšířeny na další dvě větší oblasti s hlubšími vrtů.



2. Střední polygon má protáhlý obdélníkový tvar se středem přibližně v obci Žitenice (cca 3 km sv. od centra Litoměřic; na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** znázorněn červenou linií) a zahrnuje oblast, kde jsou shromažďována a ověřována povrchová hydrogeologická data pro účelovou hydrogeologickou mapu. Ze středního polygonu byly vybrány vrty hlubší než 30 m.
3. Velký polygon zahrnuje vrty hlubší než 100 m z hydrogeologických rajonů, které zasahují do okolí města Litoměřice a hluboké vrty z jejich blízkého okolí vymezeného černým obdélníkem na Obr. 1.



Obr. 1: Rozsah vnitřního (oranžová linie), středního (červená linie) a velkého (černá linie) polygonu zahrnujících zpracovaná hydrochemická data s vyznačením hydrogeologických vrtů s dostupnými úplnými a správnými analýzami.

Zpracování hydrochemických dat předcházela kontrola úplnosti a správnosti dostupných chemických analýz. Chemický rozbor byl považován za úplný, pokud zahrnoval stanovení K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} a Cl^- .

Chyba analýzy byla stanovována podle vzorce (1) (Domenico a Schwartz, 1998):



$$\% \text{ chyba} = (\Sigma kationtů - \Sigma aniontů) / (\Sigma kationtů + \Sigma aniontů) \quad (1)$$

Pokud byla chyba (sumy uváděny v mmol·l⁻¹) nižší než 5 %, výsledky chemické analýzy byly považovány za správné.

Hydrochemický typ podzemní vody byl určen na základě ekvivalentního procentuálního zastoupení jednotlivých složek v sumě všech stanovených kationtů či aniontů. Do hydrochemického typu podzemní vody byly zařazovány ionty se zastoupením větším než 40 meq % mezi anionty a mezi kationty. Pokud se takový iont v dané vodě nevyskytuje, byly do názvu zařazeny dva ionty s největším poměrným zastoupením.

2.2 Vnitřní polygon

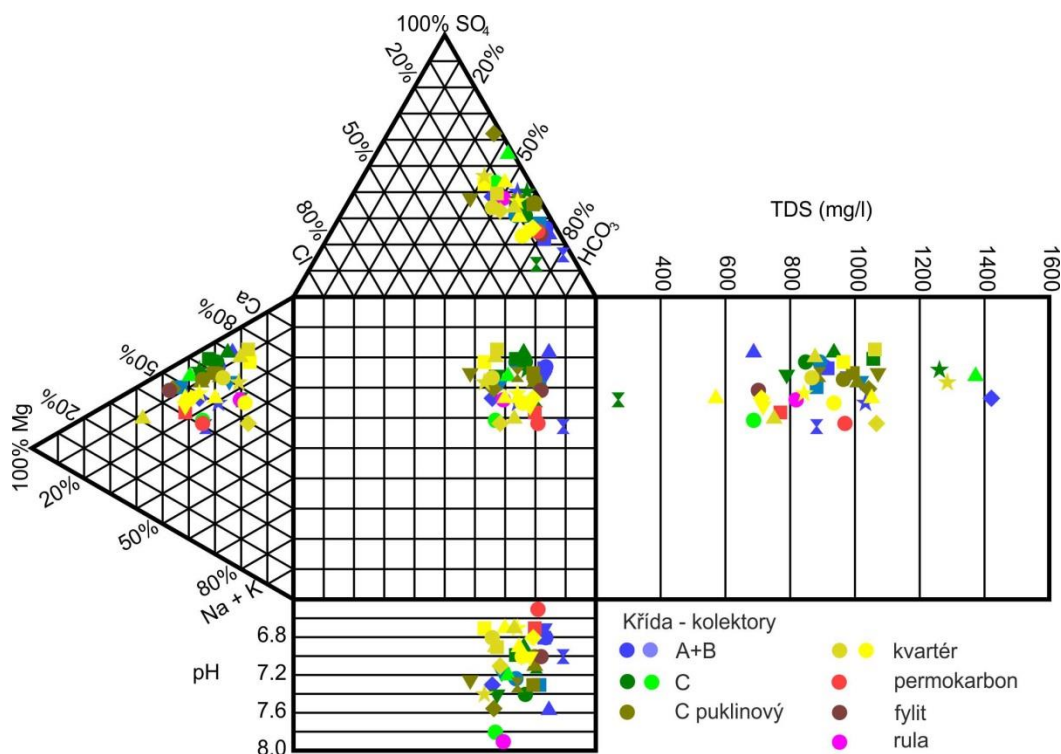
Hodnocení chemického složení podzemních vod vnitřního polygonu zahrnovalo celkem 44 vrtů a studní s průměrnou hloubkou vrtu 57 m. Převažují mělké vrtý do 50, medián hloubek vzorkovaných vrtů je 30 m. Pouze 10 vrtů bylo vzorkováno v otevřeném intervalu, který zasahoval do hloubek pod 100 m (maximální hloubka 184 m).

Chemické analýzy byly zařazeny do hydrogeologických jednotek shodně s členěním využívaným pro zhodnocení hydraulických vlastností hornin. Data jsou zobrazena formou Durovova diagramu na Obr. 2. Z diagramu je zřejmé, že mezi podzemními vodami z různých hydrogeologických jednotek nejsou zásadní rozdíly. Důvodem je pravděpodobně vzájemná komunikace mezi jednotlivými kolektory. Křídové kolektory jsou často odvodňovány do kvartérních sedimentů. Mělkým vrtem v kvartéru proto může být jímána voda z podložního křídového kolektoru. Podzemní voda byla často jímána z mělké části křídového kolektoru a od podzemních vod z kvartéru se proto prakticky neliší.

Mezi kationty převažuje vápník, zvýšený podíl hořčíku – nad 50 meq% byl zaznamenán pouze u jednoho vrtu ve fluvialních sedimentech Labe u Libochovan. Vrt pravděpodobně leží poblíž skrytého výskytu terciérních vulkanitů, které jsou zdrojem hořčíku v podzemní vodě.

Mezi anionty u většiny podzemních vod z vrtů převažují hydrogenuhličitan, výraznější podíl síranů byl zaznamenán pouze u dvou vrtů situovaných v blízkosti štolý Richard. Oba vrtý leží po spádnicí (ve směru odtoku podzemních vod) od důlního díla, zvýšený podíl síranů svědčí o kontaminaci vrtů důlními vodami. Výrazná převaha hydrogenuhličitanů mezi anionty je typická pro hlubší vrtý v kolektoru AB a v permokarbonu.

Podzemní vody vnitřního polygonu jsou převážně typu Ca-HCO₃, méně se vyskytuje smíšený typ Ca-HCO₃-SO₄, případně Ca-Mg-HCO₃. Hodnota pH se pohybuje nejčastěji v rozmezí 6,6 do 7,6, nižší pH uvedeného rozsahu mají vody z permokarbonu a kvartéru. Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS) je u většiny vzorkovaných vod v rozmezí od 600 do 1100 mg·l⁻¹. Vyšší obsahy rozpuštěných látek jsou převážně způsobeny znečištěním; u těchto vod byly zaznamenány zvýšené obsahy sodíku, dusičnanů, a chloridů.



Obr. 2: Durovův diagram chemického složení podzemních vod z vnitřního polygonu.

2.3 Střední polygon

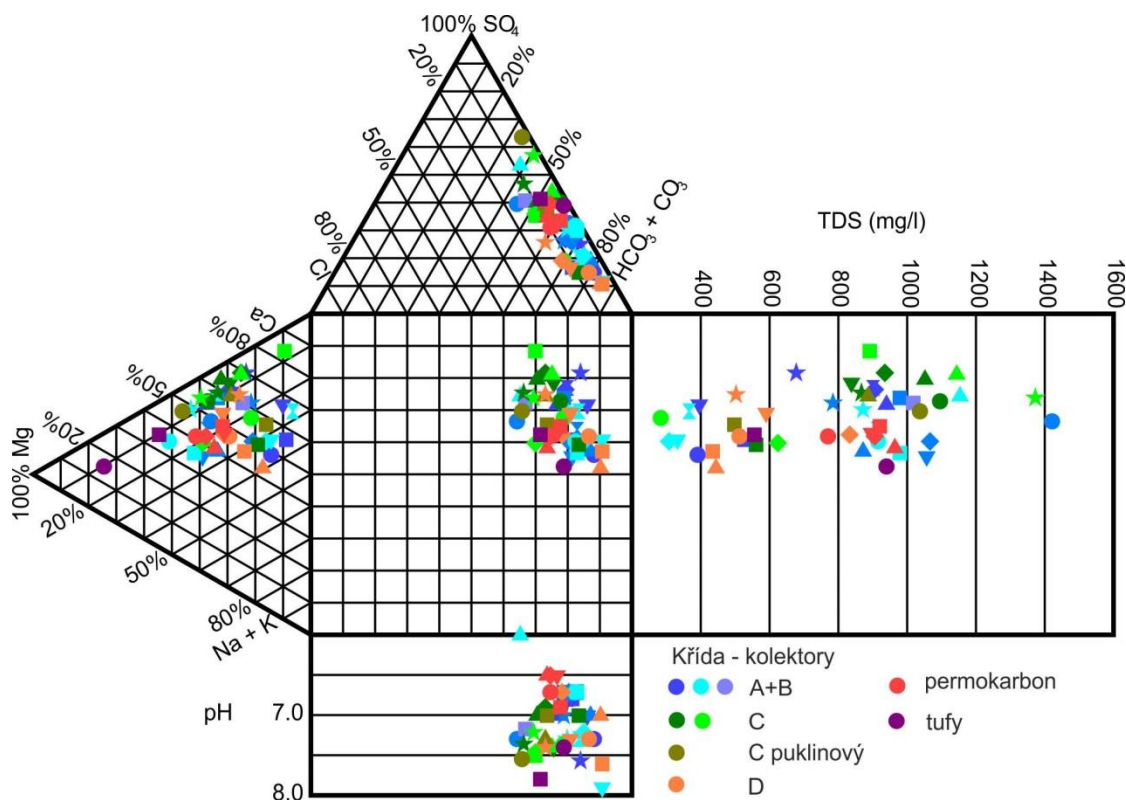
Na území středního polygonu byly k dispozici údaje s úplnými analýzami podzemních vod z celkem 51 vrtů dosahujících hloubky větší než 30 m. Průměrná hloubka vrtů v datové sadě je 127 m. Nejhlubší vrt dosáhl hloubky 394 m.

Chemické složení podzemní vody hodnocených vrtů se příliš neliší od chemického složení podzemních vod z vnitřního polygonu. Mezi podzemními vodami z různých hydrogeologických jednotek nejsou zásadní rozdíly (Obr. 3), pouze vody z terciérních vulkanitů se vyznačují vyšším zastoupením hořčíku mezi kationty, což je dáno chemickým složením horninového prostředí, kterým voda protéká.

U ostatních jednotek mezi kationty převažuje vápník. Zvýšený podíl hořčíku nebo sodíku – nad 40 meq% je ojedinělý.

Mezi anionty u většiny podzemních vod z vrtů převažují hydrogenuhličitan. Výraznější podíl síranů byl zaznamenán pouze u několika vrtů napříč hydrogeologickými jednotkami.

Podzemní vody středního polygonu jsou převážně typu Ca-HCO₃, méně se vyskytuje smíšený typ Ca-HCO₃-SO₄. U vod z terciérních tufů se jedná o vody Mg-HCO₃ až Mg-SO₄-HCO₃ až případně Ca-Mg-HCO₃. Hodnota pH se pohybuje nejčastěji v rozmezí 6,5 do 7,5, nižší hodnoty v uvedeném rozmezí mají vody z permokarbonu. Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS) je u většiny vod v rozmezí od 400 do 1200 mg·l⁻¹. Časté jsou výskyty vod s TDS v rozmezí 400 až 600 mg·l⁻¹ a 800 až 1100 mg·l⁻¹.



Obr. 3: Durovův diagram chemického složení podzemních vod ze středního polygonu.

2.4 Velký polygon

Pro oblast velkého polygonu byla shromážděna data z chemických analýz z vrtů, jejichž hloubka přesahuje 100 m, vrtů respektive intervalů vrtů s odběrem vzorku as výslednou úplnou a správnou analýzou bylo nalezeno 148. Hloubkový dosah vrtů byl velmi široký, od 100 do 1665 m. Řada hlubokých vrtů byla vzorkována etážově, v několika úsecích, které spadají do různých hydrogeologických jednotek. Pro hodnocení závislosti chemického složení vod na hloubce odběru vzorku pod zemským povrchem byla použita střední hloubka otevřeného intervalu vrtu. Tento parametr je třeba brát jako orientační hodnotu. U vrtů není zpravidla známa hloubka skutečného přítoku podzemní vody do vrtu, některé vzorkované intervaly byly o délce stovek metrů, jinde se jednalo o první desítky metrů.

Výsledky analýz byly rozčleněny do několika skupin podle hlavních hydrogeologických jednotek. Vzhledem k velkému počtu analýz se díky tomuto členění zvýšila přehlednost vynesných dat v Durovových diagramech.



Kolektor A

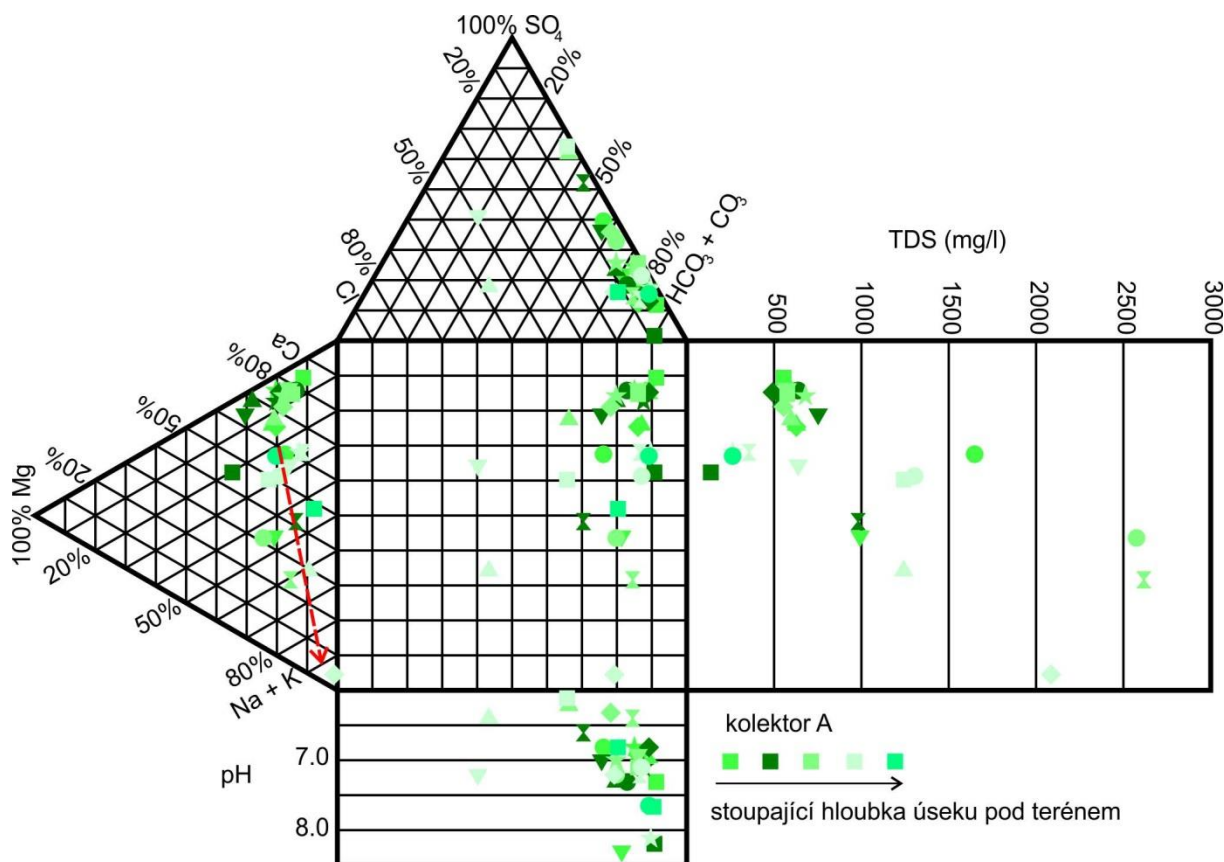
Pro kolektor A je k dispozici celkem 40 analýz. Střední hloubky vzorkovaných intervalů se pohybují od 53 do 570 m. Poměrné zastoupení hlavních iontů podzemních vod je znázorněno na Durovově diagramu na Obr. 3. Barvy jednotlivých značek na diagramu jsou dány průměrnou hloubkou intervalu pod terénem.

U mělkých vrtů se střední hloubkou intervalu do 110 m (první dvě barevné kategorie) jednoznačně převažuje hydrochemický typ Ca-HCO_3 , pH přibližně 7 a celkový obsah rozpuštěných látek 500 až 700 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

S hloubkou vzorkovaného intervalu se zvyšuje celkový obsah rozpuštěných látek a poměrné zastoupení sodíku mezi kationty. Největší celkové obsahy rozpuštěných látek přibližně 2,6 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ byly zaznamenány u vrtů Že-2 v Čížkovicích (vzorkovaný interval 125 až 170 m) a Tř-1 Třtěno (vzorkovaný interval 110 až 129 m). Podzemní voda z obou vrtů je typu Na-HCO_3 .

Úplná převaha sodíku mezi kationty – nad 90 meq % byla zaznamenána u vzorkovaného intervalu 305 až 400 m ve vrtu HB-1 v Brné nad Labem s celkovým obsahem rozpuštěných látek 2,1 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$.

Významnější podíl chloridů mezi anionty měly podzemní vody z vrtu DB-2 v Dubanech (122 až 200 m) a v horní vzorkované etáži vrtu Br-1 v Brňanech (148 až 200 m). Podzemní voda z vrtu DB-2 je typu Na-Ca-Cl s celkovým obsahem rozpuštěných látek 1,2 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, podzemní voda z vrtu Br-1 je typu $\text{Ca-SO}_4\text{-Cl}$ s celkovým obsahem rozpuštěných látek 0,64 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$.



Obr. 4. Durovův diagram chemického složení podzemních vod v kolektoru A; velký polygon.

Kolektor AB

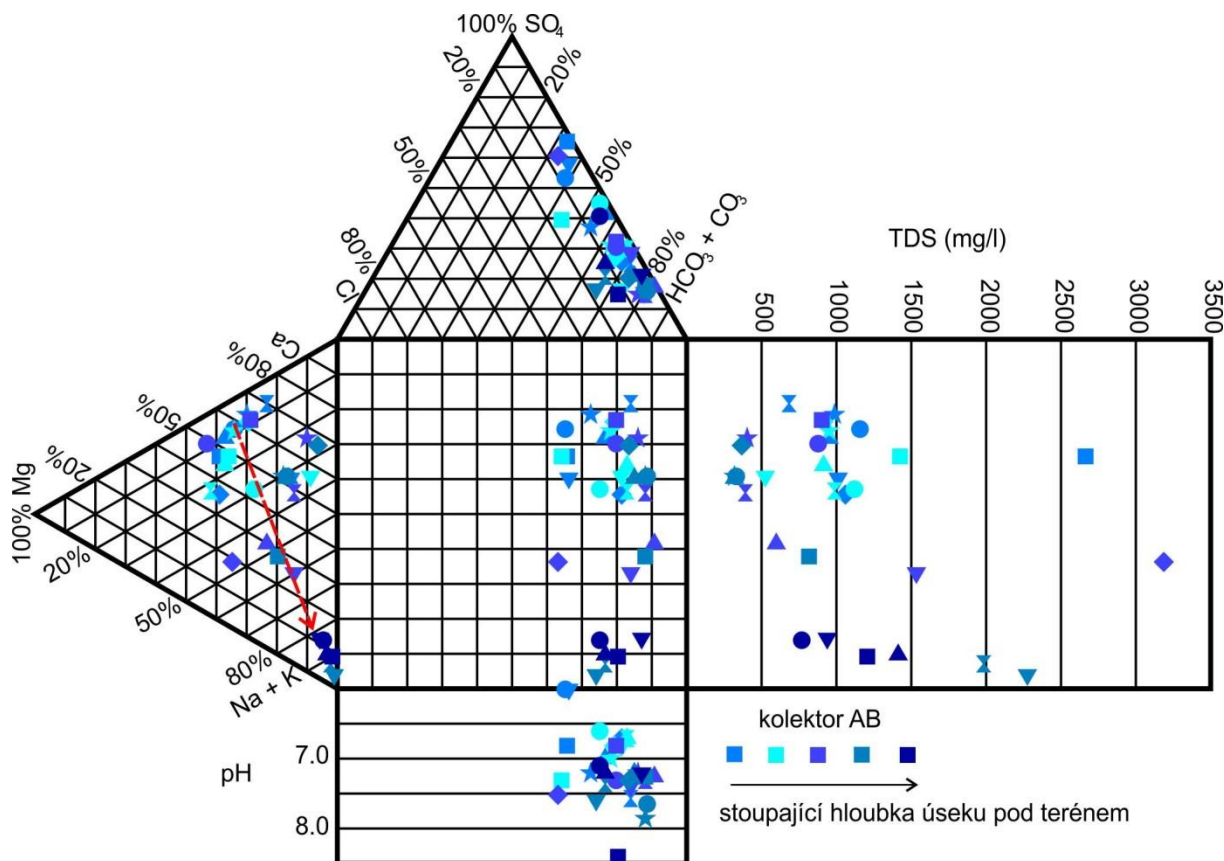
V rámci velkého polygonu bylo k dispozici celkem 32 analýz z vrtů (vrtných intervalů) zasahujících do hloubky větší než 100 m. Středů vzorkovaných intervalů ležely v hloubkách od 70 do 457 m. Průměrná hloubka středů vzorkovaných intervalů byla 189 m.

Obdobně jako u kolektoru A u relativně mělkých vrtů (intervalů) se středem vzorkovaného úseku do 110 m převládají podzemní vody typu Ca-HCO_3 . Na rozdíl od podzemních vod z kolektoru A zde není mezi kationty vápník zcela dominantní, typické zastoupení vápníku je mezi 40 a 70 meq %. Řada vzorků obsahovala vyšší podíl hořčíku v rozmezí od 30 do 45 meq % a sodíku v rozmezí od 15 do 35 meq %. U několika mělkých vrtů mezi anionty převládají sírany (vody typu Ca-SO_4). Celkový obsah rozpuštěných látek se nejčastěji pohybuje kolem hodnoty $1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$,

Se vzrůstající hodnotou střední hloubky vzorkovaného intervalu narůstá, obdobně jako u kolektoru A, poměrné zastoupení sodíku. Podzemní vody typu Na-HCO_3 s výraznou převahou sodíku nad 80 meq % se vyskytují v intervalech, jejichž horní hranice je 300 m pod terénem a níže, střední hloubka těchto intervalů se pohybuje od 320 do 457 m. Podzemní voda z hlubších částí kolektoru AB má obdobný obsah rozpuštěných látek, jako voda z mělkých částí, pohybuje se v rozmezí od $0,7$ do $1,4 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$, s průměrem hodnot cca $1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Pouze u dvou vzorků z hlubších intervalů byla zaznamenána hodnota



TDS $2 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ a $2,3 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Obsahy TDS nad $2,5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ u dvou mělčích vrtů, u kterých současně převládají sírany mezi anionty je pravděpodobně způsoben znečištěním. K výraznému nárůstu celkového obsahu rozpuštěných látek s hloubkou v kolektoru AB nedochází, nebyl zaznamenán ani vzrůst podílu chloridů. Hodnota pH se u vod z kolektoru AB pohybuje nejčastěji v rozmezí od 6,5 do 8.



Obr. 5: Durovův diagram chemického složení podzemních vod v kolektoru AB; velký polygon.

Kolektor BC, C a D

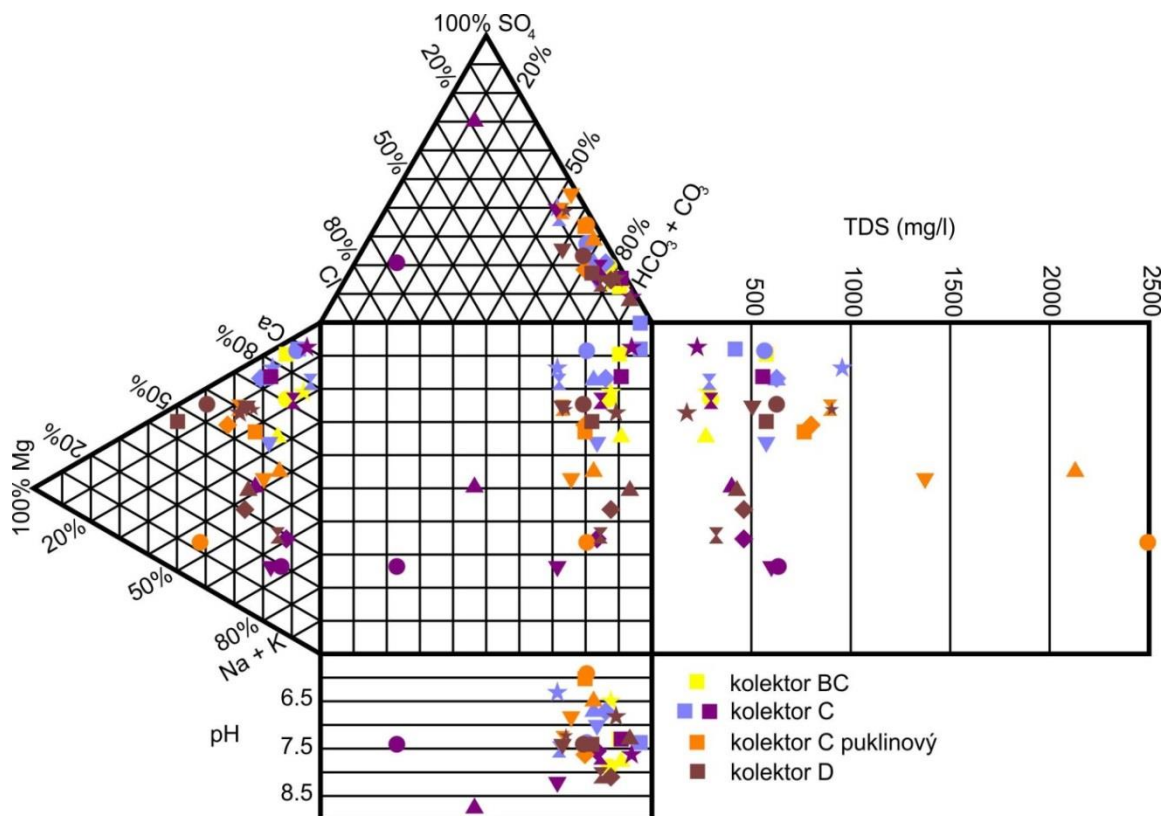
Pro kolektory BC, C a D je pro vrty hlubší než 100 m k dispozici jen velmi malé množství dat, od čtyř do 8 vzorků z jednotlivých kolektorů (stejně členění jak v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**). V výsledky analýz byly proto sloučeny do jednoho Durovova diagramu na Obr. 6.

Podzemní vody z kolektoru BC jsou typu Ca-HCO_3 s celkovým obsahem rozpuštěných látek do $0,6 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Střední hloubka vzorkovaného intervalu se zde pohybovala od 140 do 430 m. Obdobné chemické složení mají také vody z mělčích částí kolektoru C. Ve vodách hlubších vrtů v kolektoru C dochází k nárůstu podílu sodíku, podobně jako u kolektoru A a AB. Hodnota TDS zůstává stejná u všech intervalů z kolektoru C – od $0,3$ do $0,6 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$.

Kolektor C s puklinovou propustností se vyznačuje velkou variabilitou chemického složení, zvláště pak poměrného zastoupení aniontů a TDS.



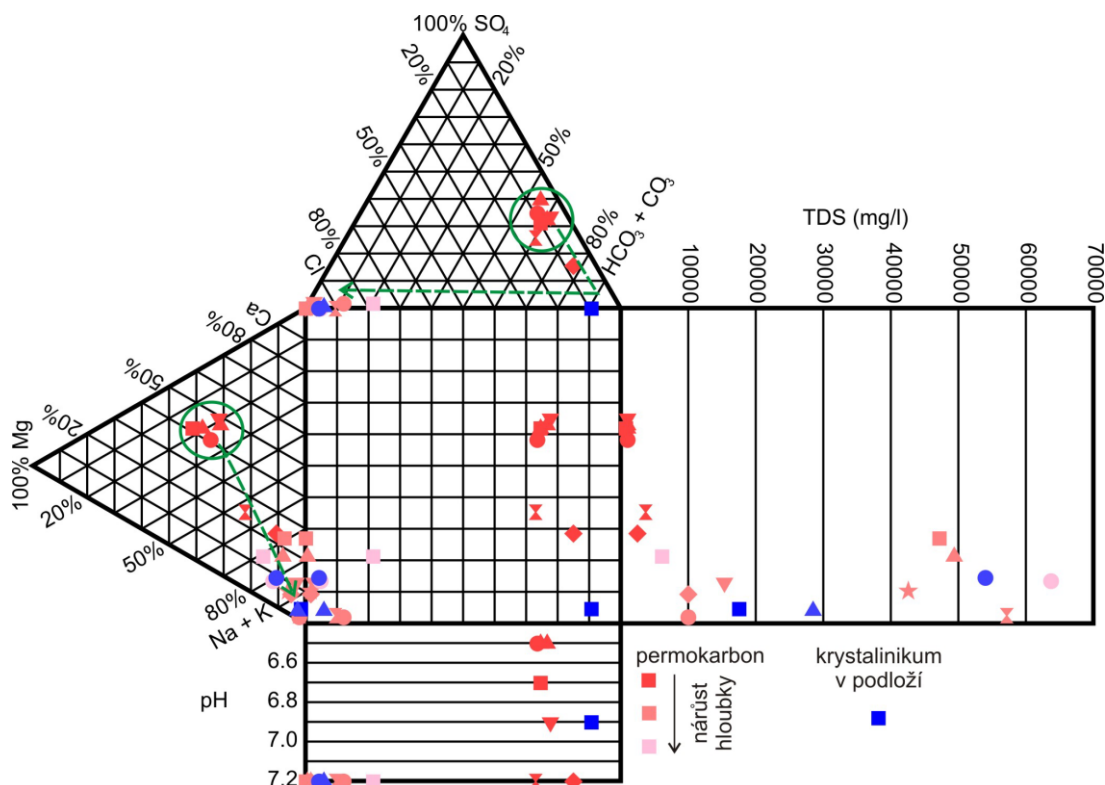
Průměrná hloubka středů vzorkovaných intervalů kolektoru D je pouze 67 metrů, jedná se o poměrně mělké podzemní vody převážně typu Ca-HCO_3 . Podzemní vody z kolektoru D mají ve srovnání s kolektorem BC a C vyšší poměrné zastoupení hořčíku mezi kationty, obdobně jako podzemní vody v kolektoru AB. TDS je v kolektoru D opět do $0,6 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$.



Obr. 6: Durovův diagram chemického složení podzemních vod v kolektoru BC, C a D; velký polygon.

Permokarbon a krystalinikum v podloží

V hodnoceném datovém souboru jsou k dispozici údaje o 16 vrtech (vzorkovaných intervalech) z permokarbonu, dvou vzorkovaných intervalech v granitoidech a jeden ve fylitu. Střední hloubka vzorkovaných intervalů se v permokarbonu pohybuje od 72 do 1230 m. Složení skupiny relativně mělkých vrtů v permokarbonu situovaných v okolí Lovosic (maximální hloubkový dosah otevřeného intervalu 180 m) je v Durovově diagramu na Obr. 7 vyznačeno zelenými kroužky. Podzemní voda z těchto vrtů je typu Ca-HCO_3 . U některých vzorků z této skupiny byl obsah hořčíku a síranů slabě vyšší než $40 \text{ meq}\%$. Pro tuto skupinu je také typický relativně nízký obsah rozpuštěných látek do $1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Se vzrůstající hloubkou vzorkovaných intervalů stoupá u aniontů poměrné zastoupení hydrogenuhličitanů a následně chloridů a u kationtů sodíku. Vývoj chemického složení s hloubkou je naznačen v diagramu zelenou šipkou.



Obr. 7: Durovův diagram chemického složení podzemních vod z permokarbonu a z krystalinika v jeho podloží.

U vrtů se střední hloubkou vzorkovaného intervalu vyšší než 500 m mezi anionty zcela převládají chloridy a mezi kationty sodík. Podzemní vody z těchto intervalů jsou typu Na-Cl. Z hlediska celkového obsahu rozpuštěných látek lze odlišit dvě skupiny; první s obsahy v rozmezí 10 až 18 g·l⁻¹ a druhá s výrazně vyššími hodnotami 40 až 65 g·l⁻¹. Velmi dobrým příkladem změny chemického složení s hloubkou je vrt Br-1 v Brňanech, ve kterém byly v permokarbonu vzorkované 3 intervaly; 440 až 612 m, 615 až 812 m a 887 až 1022 m. S hloubkou odběru klesá obsah vápníku od 3,8 po 0,3 g·l⁻¹. Obsah sodíku naopak roste z 13 na 20 g·l⁻¹, stejně jako obsah hydrogenuhličitanů z 0,05 na 5,4 g·l⁻¹ a TDS ze 47 na 57 g·l⁻¹. Obsah chloridů je prakticky stabilní. Vody z krystalinika (fylit) vzorkované ve stejném vrtu v intervalu 1318 až 1384 m mají výrazně nižší TDS (28 g·l⁻¹) ve srovnání s vodami z nadložního permokarbonu, což je dáno polovičními obsahy sodíku a chloridů oproti vodám z nejbližšího vzorkovaného intervalu v permokarbonu. Tyto dva prvky nicméně mezi ionty převažují a voda je typu Na-Cl.

Dalším etážově vzorkovaným vrtem je vrt Be-1 u Bechlína, kde byly vzorkovány intervaly 810 až 913 m, 1033 až 1151 m a 1204 až 1256 m. S hloubkou odběru dochází k velkému nárůstu TDS a to z 10 na 63 g·l⁻¹, přičemž výrazný nárůst (z 10 na 43 g·l⁻¹) byl zaznamenán mezi prvním a druhým vzorkovaným intervalem (hranice mezi intervaly přibližně v hloubce 1000 m). S nárůstem hloubky stoupaly obsahy u všech hlavních iontů kromě síranů, jejichž podíl na celkovém složení je zanedbatelný. Nejvyšší nárůsty obsahů byly u sodíku a chloridů, jejichž obsahy narostly celkově o 13,5 respektive 25,5 g·l⁻¹. Také u tohoto vrtu byl odebrán vzorek vody z podložních hornin (granity, diority) v intervalu 1226 až



1665 m. Interval svou nejsvrchnější částí (cca 35 m) zasahuje do karbonu, je tedy možné, že z části byla vzorkována voda z permokarbonu. Poměrné zastoupení hlavních iontů bylo ve vzorku vody z krystalinika obdobné (typ Na-Cl), jako u výše položených intervalů v permokarbonu. Obsah rozpuštěných látek byl v krystaliniku ve srovnání s vodami z nadložního permokarbonu nižší – $54 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$, obdobně jako u vrtu Br-1.

3 Monitoring chemického složení podzemních vod ve vrtu LT-1

3.1 Odběry vzorků podzemních vod

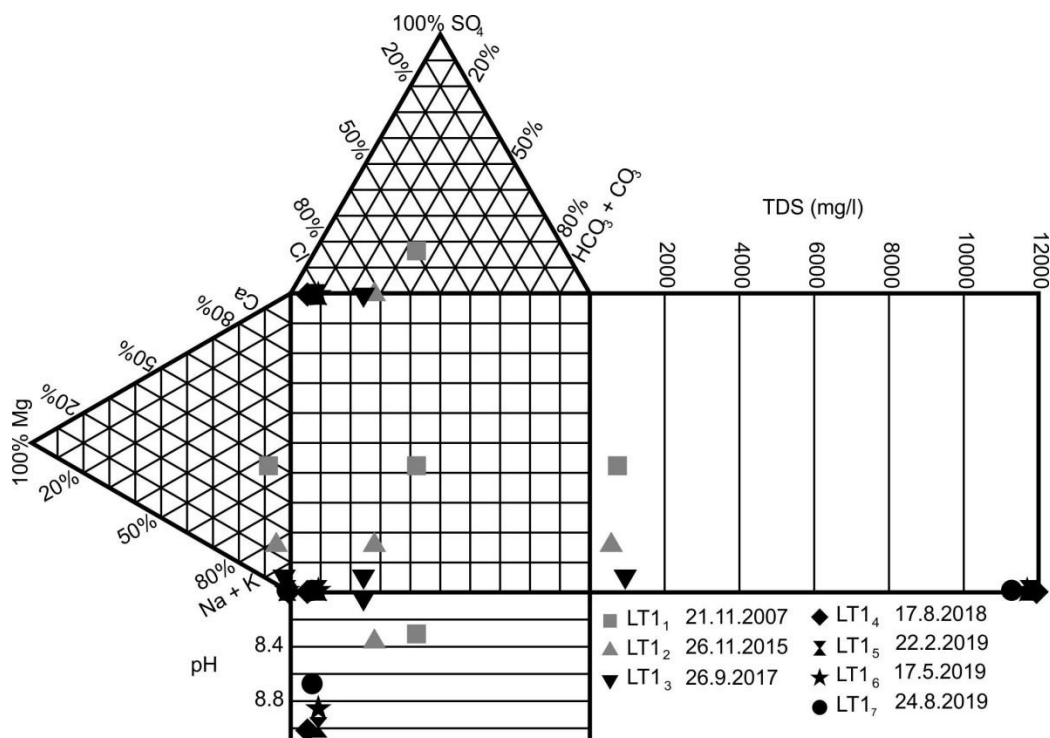
První vzorky podzemní vody z vrtu LT-1 byly odebrány pracovníky firmy GEOMEDIA a francouzské geologické služby BRGM (Sanjuan et al. 2016) před zahájením tohoto projektu. Tyto vzorky, z nichž byla provedena kompletní analýza byly odebrány v listopadu 2007 a 2015 (v následujících obrázcích označeno LT₁ a LT₂). Další vzorek byl odebrán v květnu 2015, analýza ale nebyla úplná. Čerpání v době odběrů bylo krátkodobé, před a po čerpání byl vrt uzavřen.

První vzorek v rámci tohoto projektu byl odebrán v září 2017 (LT₃). Vzorek byl odebrán čerpáním z hloubky 80 m pod terénem pomocí ponorného čerpadla Grundfos MP1. Vrt byl před odběrem po dlouhou dobu tlakově uzavřen. Podmínky odběru byly obdobné jako při předcházejících odběrech v letech 2007 a 2015, délka čerpání byla cca 2 hodiny. Po delším čerpání (cca 200 l vody) v srpnu 2018 byl odebrán vzorek označený jako LT₄, rovněž z hloubky 80 m.

Vrt byl v srpnu 2018 otevřen, aby volně přetékal a bylo umožněno vzorkovat vodu nacházející se ve vrtném stvolu mimo výtlačný dosah ponorného čerpadla Grundfos MP1. V období od října 2018 do února 2019 byla do blízkosti vrtu nainstalována nádrž o objemu 1 m^3 kvůli jímání a registraci odtékající vody. Volný přetok z vrtu byl po odinstalování nádrže ponechán přibližně do května 2019.

Z vrtu s volným přetokem v řádu jednotek až desítek $\text{ml}\cdot\text{min}^{-1}$ byly nadále odebírány vzorky. Jedná se o vzorky LT₅, LT₆ a LT₇. Vzorky byly odebrány v únoru, v květnu a v srpnu 2019. Všechny odběry kromě odběru v květnu 2019 byly realizovány opět z hloubky cca 80 m pomocí čerpadla MP1. Květnový odběr byl proveden inerciálním čerpadlem z hloubky 10 m.

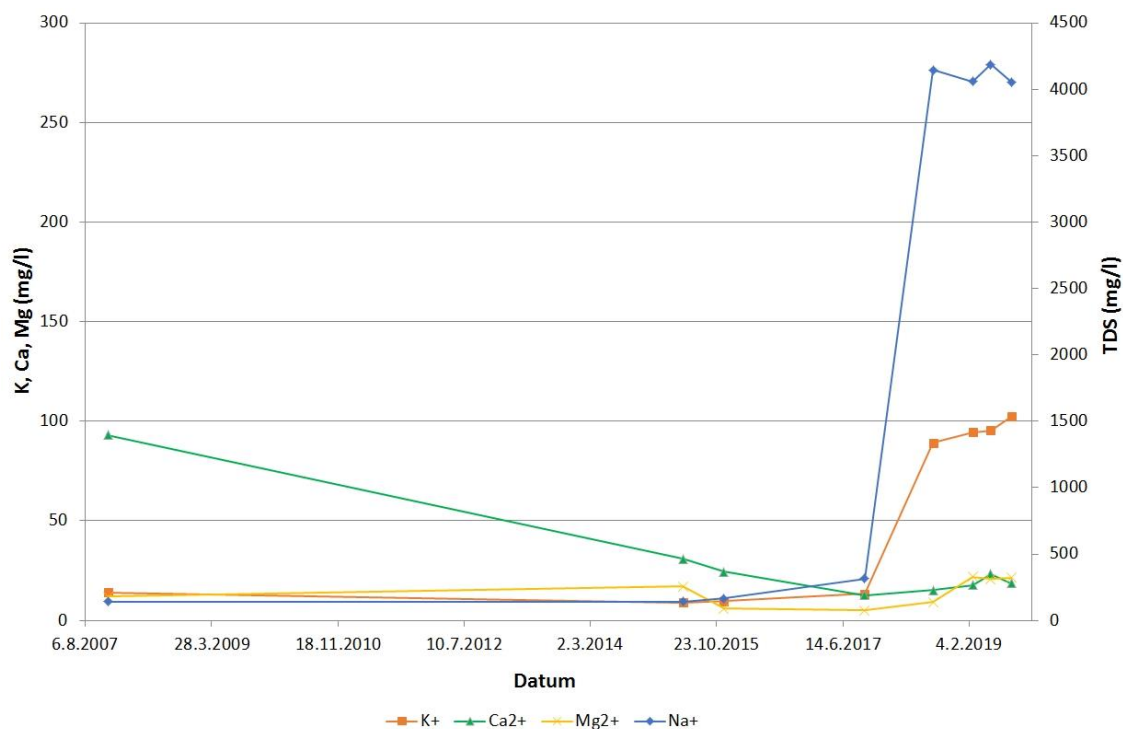
U prvních třech odběrů realizovaných pod odvrtání vrtu a při krátkodobém čerpání (LT₁ až LT₃) je znatelný postupný posun v poměrném zastoupení iontů. Vzorek odebraný po dokončení vrtu v roce 2007 obsahuje výrazný podíl vápníku mezi kationty (40 meq %) a hydrogenuhličitánů (cca 33 meq % mezi anionty). Takové složení lze interpretovat směs vody využívané k výplachu a cirkulačním testům. Při dalších dvou odběrech se postupně zvyšoval podíl sodíku mezi kationty a chloridů mezi anionty (Obr. 8). Ve vzorkované vodě narůstal podíl podzemní vody ze zastižených hlubokých kolektorů. Pro tři první odběry je současně charakteristický relativně nízký obsah rozpuštěných látek (ve srovnání s následujícími vzorky) v rozsahu od 600 po $1000 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ a pH 8,2 až 8,4. Obsah chloridů v těchto vzorcích byl v rozmezí 200 až $400 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, zatímco po ustálení chemického složení byl obsah chloridů 6 až $6,5 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$, tedy $20 \times$ vyšší.



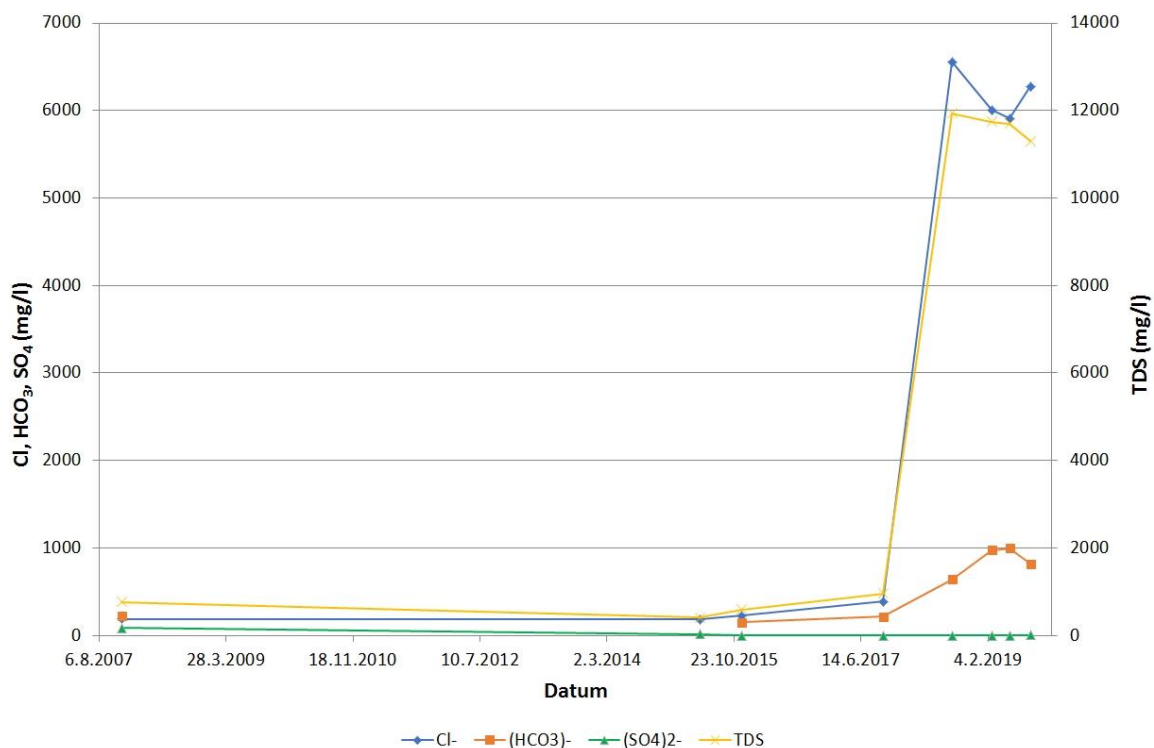
Obr. 8: Durovův diagram chemického složení podzemní vody ve vrtu LT-1.

Podzemní voda z posledních čtyř odběrů (LT₄ až LT₇) je typu Na-Cl s poměrným obsahem sodíku a chloridů nad 90 meq %, celkový obsah rozpuštěných látek je přibližně 12 g·l⁻¹, pH 8,9 až 9,0. Celkový obsah rozpuštěných látek se mezi třetím a čtvrtým odběrem zvýšil 12x. Obsahy hlavních iontů se v průběhu těchto čtyř odběrů měnily minimálně, došlo k relativnímu ustálení chemického složení čerpané vody (Obr. 9, Obr. 10).

Z grafů je kromě výrazného nárůstu obsahů sodíku a chloridů patrný také postupný pokles obsahů vápníku a síranů a nárůst obsahu hydrogenuhličitanů. Také obsahy draslíku se mezi první a druhou skupinou vzorků zvýšily 10x, přesto jsou ale obsahy draslíku ve srovnání se sodíkem minimální.



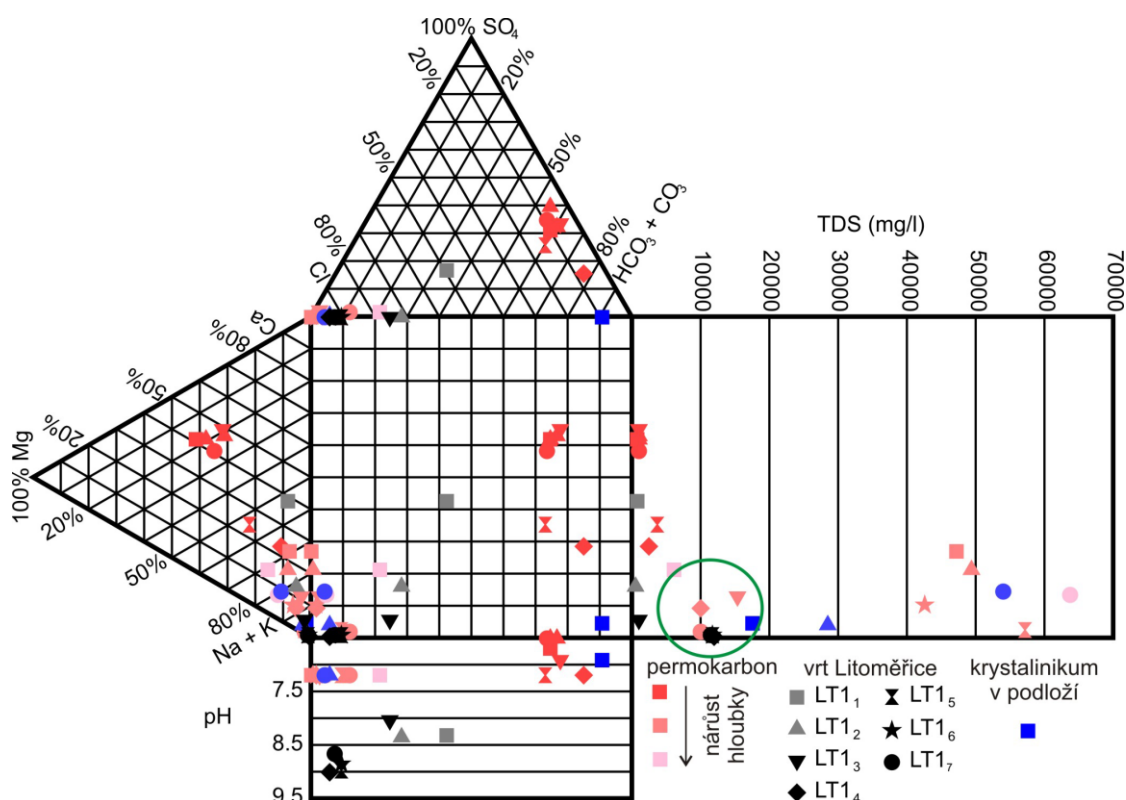
Obr. 9: Vývoj chemického složení hlavních kationtů v podzemní vodě odebírané z vrtu LT-1.



Obr. 10: Vývoj chemického složení hlavních aniontů a TDS v podzemní vodě odebírané z vrtu LT-1.



Složení podzemní vody z vrtu LT-1 bylo srovnáno se složením podzemních vod z hlubokých vrtů v blízkých hydrogeologických rajonech (viz kapitola 2.4). Blízké složení vodám z vrtu LT-1 mají podzemní vody z permokarbonu, z vrtů vzorkovaných v úsecích 810 až 913 m, 593 až 1045 m a 500 až 715 m (zelený kruh na Obr. 11). U těchto vzorků bylo zjištěno nejen obdobné zastoupení hlavních iontů, ale také obdobný obsah rozpuštěných látek. Vrt LT-1 svým otevřeným úsekem v intervalu 852 až 2111 m zasahuje v nejsvrchnější části do permokarbonu – přibližně do hloubky 950 m a svou převážnou částí do hornin krystalinika (svory, fylity). Je tedy možné předpokládat, že do vrtu LT-1 přitéká podzemní voda z báze permokarbonu.



Obr. 11: Durovův diagram chemického složení podzemních vod z vrtu LT-1 a z hlubokých vrtů zasahujících do permokarbonu a okolního krystalinika z okolních hydrogeologických rajonů.

Součástí odběru vzorku podzemní vody v srpnu 2018 a v květnu 2019 byl odběr vzorku pro analýzu složení plynu, který z vrtu po jeho otevření masivně unikal. Výsledky analýzy provedené v laboratořích České geologické služby v Brně jsou uvedeny v Tab. 1. Z výsledků vyplývá jednoznačná převaha metanu, který je zastoupen 84 respektive 71 % v odebraných vzorcích. Mezi plyny se zastoupením nad 0,1 % patří dále dusík, kyslík, etan, CO₂ a argon.



Tab. 1: Procentuální zastoupení plynů ve vzorcích z vrtu LT-1.

	mez detekce	16.8.2018 (%)	14.5.2019 (%)
He	0,003	0,033	0,069
H ₂	0,002	0,004	0,006
CO ₂	0,016	0,055	0,171
Ar	0,008	0,110	0,136
O ₂	0,041	2,253	4,060
N ₂	0,010	12,369	23,378
metan-TCD	0,015	84,408	71,381
CO	0,010	<0,01	0,000
eten	0,00003	0,00017	0,000
etan	0,00004	0,71622	0,638
propen	0,00003	0,00083	0,000
propan	0,00006	0,03437	0,046
isobutan	0,00006	0,00246	0,001
n-butan	0,00003	0,00158	0,003
2,2-DMpropan	0,00011	0,00021	0,000
2-Mbutan	0,01100	<0,011	0,011
n-pentan	0,00002	0,00066	0,001
cyklopentan	0,00003	0,00028	0,000
suma i-C ₆	0,00002	0,00063	0,097
n-hexan	0,00002	0,00035	0,001

3.2 Profilová měření fyzikálně-chemických parametrů ve vrtu LT1

V geotermálním vrtu LT-1 probíhala opakovaně také profilová měření fyzikálně-chemických parametrů podzemních vod. Měření byla realizována multiparametrickou monitorovací sondou YSI řady EXO1. Před měřeními byly všechny měřicí jednotky sondy kalibrovány pomocí kalibračních standardů. Sonda umožňuje současné kontinuální měření 5 parametrů – teploty vody, měrné elektrické vodivosti ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), množství rozpuštěného kyslíku ve vodě ($\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$), pH a oxidačně redukčního potenciálu ORP (mV) a záznam tlaku – aktuální hloubky sondy pod hladinou podzemní vody. Měření probíhala ve dnech 26.9.2017, 16.8.2018, 25.10.2018 a 14.5.2019. V září 2017 a v květnu 2019 byl sledován profil do hloubky přibližně 100 m a v srpnu a říjnu 2018 do hloubky 200 m. Výsledky profilových měření jsou na Obr. 12 až Obr. 15. Ustalování hodnot pH a ORP na rozdíl od dalších veličin trvá delší dobu, při běžném pomalém zapouštění sondy nemusí dojít k ustálení hodnot. Od měření v srpnu 2018 bylo proto zapouštění sondy do vrtu v intervalech 5 až 15 m vždy na několik minut přerušeno a po dosažení ustálení hodnot zapouštění pokračovalo. Hodnoty pH a Eh jsou proto na Obr. 13 až Obr. 15 uvedeny bodově, jedná se však o ustálené hodnoty.

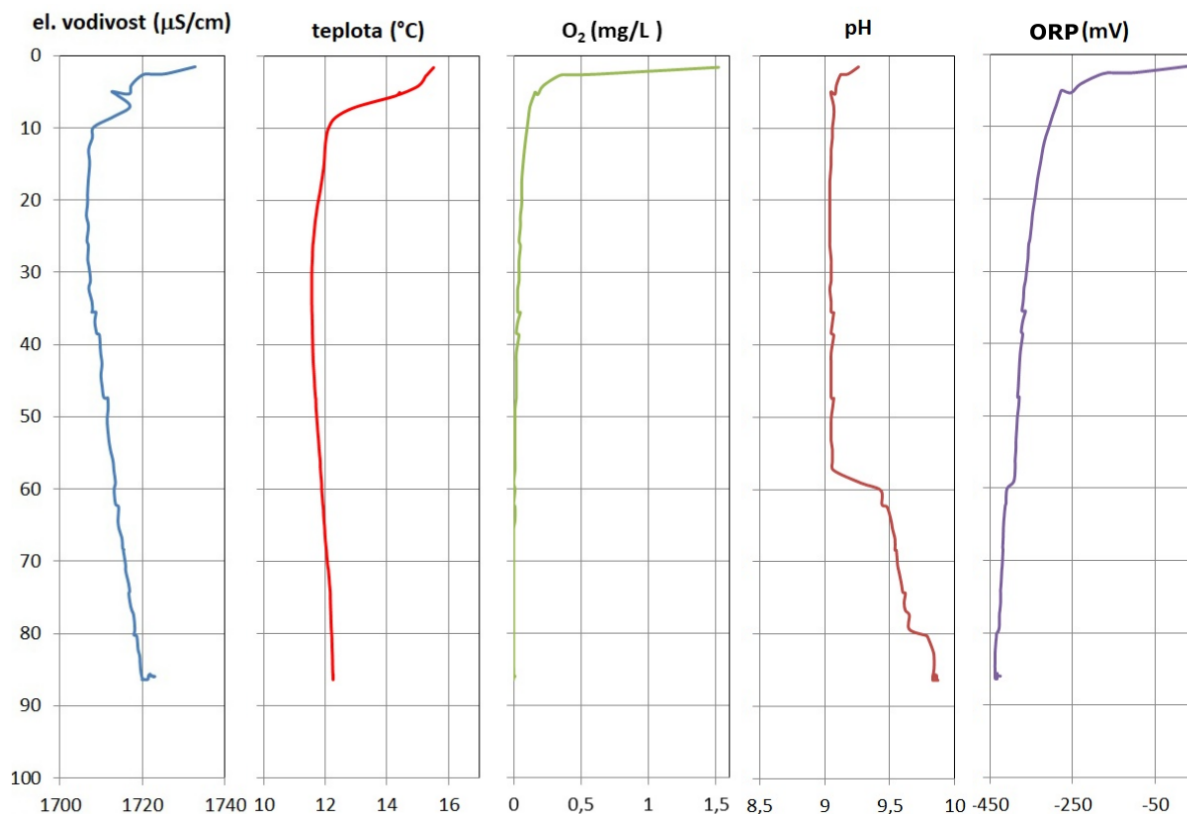


Mimo měření YSI sondou proběhla v únoru 2015, v srpnu 2019 a v květnu 2020 karotážní měření metodou rezistivimetrie (měření odporu ve vrtu), které provedla firma Aquatest a.s. Druhé a třetí měření byla realizována v rámci tohoto projektu. Hloubkový dosah měření byl 1150 m u prvního měření, 1620 m u druhého měření a 1595 m u třetího měření.

Profilová měření YSI sondou

První měření YSI sondou v roce 2017 (Obr. 12) bylo provedeno za situace, kdy byl vrt LT-1 po řadu let uzavřen těsným zhlavím, voda ve vrtu stagnovala a ke slabému pohybu vody ve vrtu docházelo pouze při občasných krátkodobých měřeních (karotáž, měření teploty).

Teplota vody ve vrtu klesla z 15,5 °C při hladině na cca 12 °C po prvních 10 m měření a poté kolísala v rozmezí 11,6 a 12,2 °C (pomalý pokles do hloubky 34 m a poté opětovný nárůst). Měrná elektrická vodivost se v měřeném profilu téměř neměnila (velmi podrobný rozsah měřítka v grafu na Obr. 12), hodnoty byly v rozmezí 1 707 až 1 725 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Tato hodnota odpovídala celkovému obsahu rozpuštěných látek 960 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ v následně odebraném vzorku. Obsah rozpuštěného kyslíku z hodnoty 1,5 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ rychle klesl na 0,2 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ v prvních 5 m vrtu, poté následoval pomalý pokles k nule, které bylo dosaženo přibližně v 50 m hloubky. Hodnota pH byla až do hloubky 57 m stabilní – 9,07, poté skokově narostla na 9,5 (hloubka 62 m) a dále pomalu narůstala až na hodnotu 9,8. Pokles hodnot ORP měl obdobný charakter jako u křivky rozpuštěného kyslíku – prudký pokles z hodnoty +45 mV na hodnotu -280 mV, následovaný pomalým poklesem až na hodnotu -430 mV v hloubce 86 m.

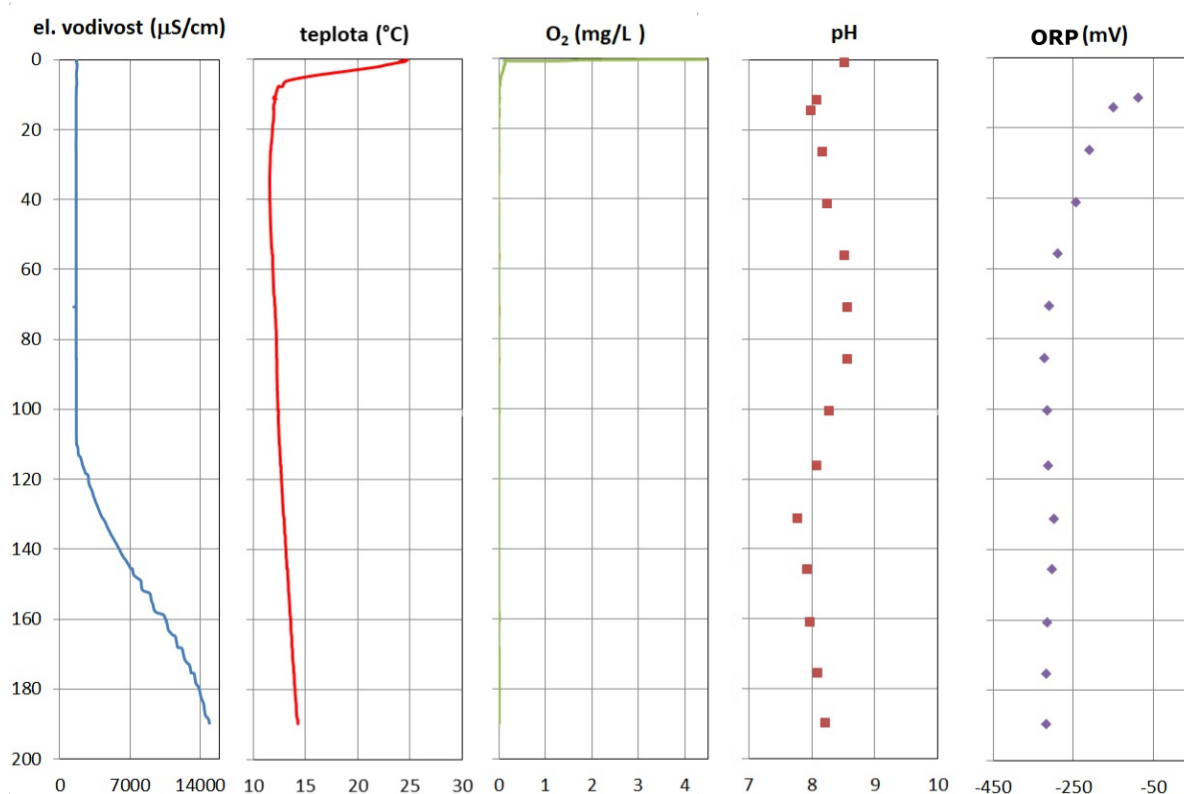


Obr. 12: Profilové měření chemicko-fyzikálních parametrů podzemních vod ve vrtu LT-1 dne 26.9.2017.



Druhé měření bylo realizováno v srpnu roku 2018. Vrt LT-1 byl před měřením uzavřený. Dva měsíce před měřením byl vrt 3 dny otevřený při karotážním měření (12.3., 13.3. a 16.3.2018.).

Ve srovnání s prvním měřením byla teplota vody ve vrtu při hladině výrazně vyšší – 25 °C, poté opět následoval prudký pokles na 12,2 °C v prvních 7 m měření (Obr. 13). Do hloubky 40 m ještě hodnota velmi slabě klesala (11,6 °C) a poté byl zaznamenán pomalý nástup teploty až na 14,2 °C v hloubce 189 m. Hodnoty měrné elektrické vodivosti byly až do hloubky 107 m poměrně konstantní v rozmezí 1 640 až 1 660 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a přibližně odpovídaly hodnotám z prvního měření. Poté nastal velmi prudký nárůst vodivosti, hodnota vzrostla až na 14 960 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ v hloubce 189 m. Nárůst vodivosti byl téměř o řád, hodnoty vzrostly devětkrát. Vysoká hodnota měrné elektrické vodivosti odpovídala vysokému obsahu rozpuštěných látek (TDS). Vzorek odebraný po profilovém měření, pod delším čerpání z hloubky 80 m měl TDS 12 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$. Pokles hodnot rozpuštěného kyslíku by prakticky okamžitý, z hodnoty 4,45 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ na nulové hodnoty v hloubce 7 m. Hodnoty pH kolísaly v rozmezí 7,8 do 8,6. Pokles hodnot ORP byl opět nejvýraznější v prvních metrech vrtu: z +260 mV (hladina) na -150 mV (hloubka 17 m). Další pokles hodnot byl pozvolný – až na hodnotu -318 mV v hloubce 189 m.

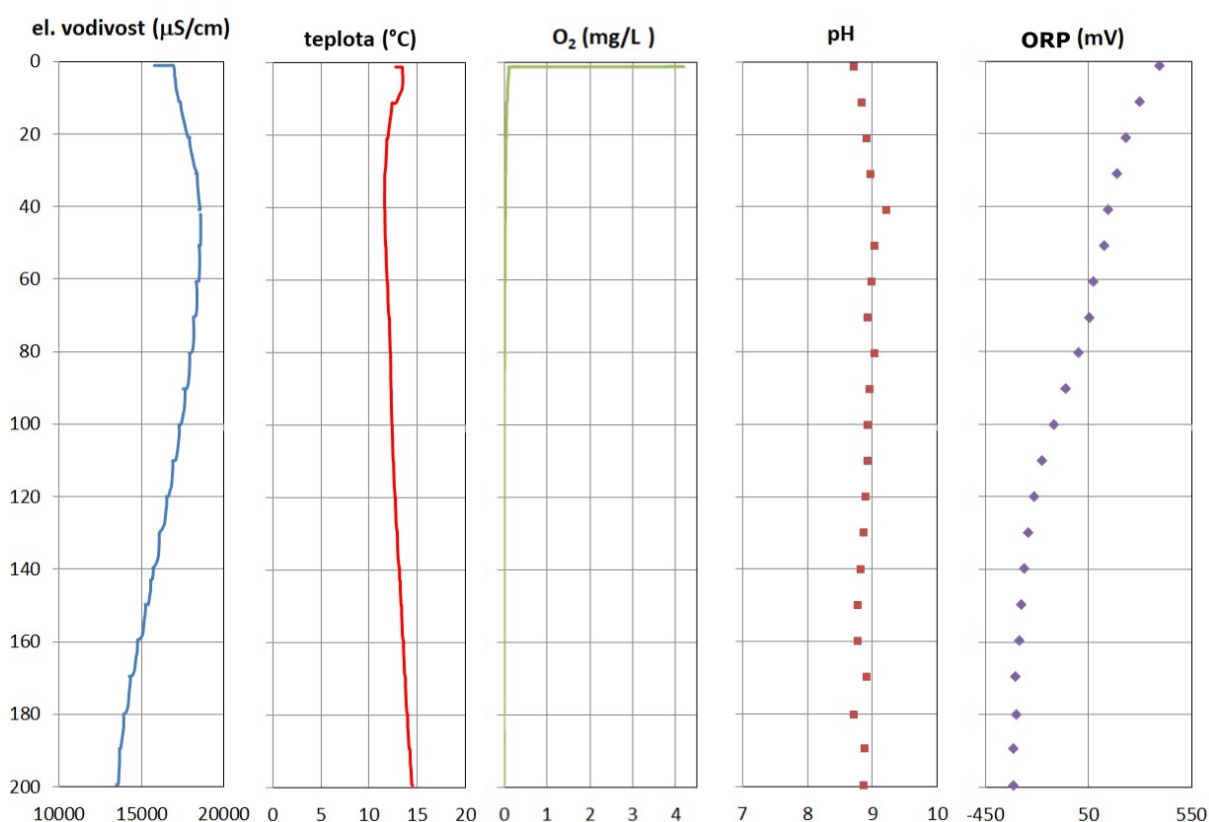


Obr. 13: Profilové měření chemicko-fyzikálních parametrů podzemních vod ve vrtu LT-1 dne 16.8.2018.

Třetí měření v říjnu roku 2018 proběhlo 2 měsíce po otevření vrtu. Při čerpací zkoušce v srpnu 2018 bylo odčerpáno cca 200 l vody.



Teplota vody při hladině vrtu byla při tomto měření blízká teplotě v hlubších částech vrtu, pokles teploty v mělkých částech vrtu byl proto nevýrazný z hodnoty 12,7 °C při hladině na 11,6 °C v hloubce 30 m (Obr. 14). Následoval postupný nárůst až na 14,5 °C v hloubce 199 m. Hodnoty měrné elektrické vodivosti byly vysoké v celém měřeném profilu. Úsek nízkých vodivostí se již neprojevil. Hodnota vodivosti nejprve rostla, z hodnoty 16 800 na hodnotu 18 500 v hloubce 40 m a poté začala opět klesat. Hodnota v hloubce 199 m byla 13 500. Pokles obsahů rozpuštěného kyslíku byl stejně jako v druhém měření velmi rychlý z hodnoty 4,2 mg·l⁻¹ na téměř nulové hodnoty v hloubce 15 m. Hodnota pH byla v celém měřeném profilu v rozmezí od 8,7 do 9,2. Pokles ORP byl oproti předchozím měřením postupný v intervalu 0 až 140 m (+390 mV až -259 mV), poté byl pokles hodnot pozvolný – na -316 mV v hloubce 199 m.



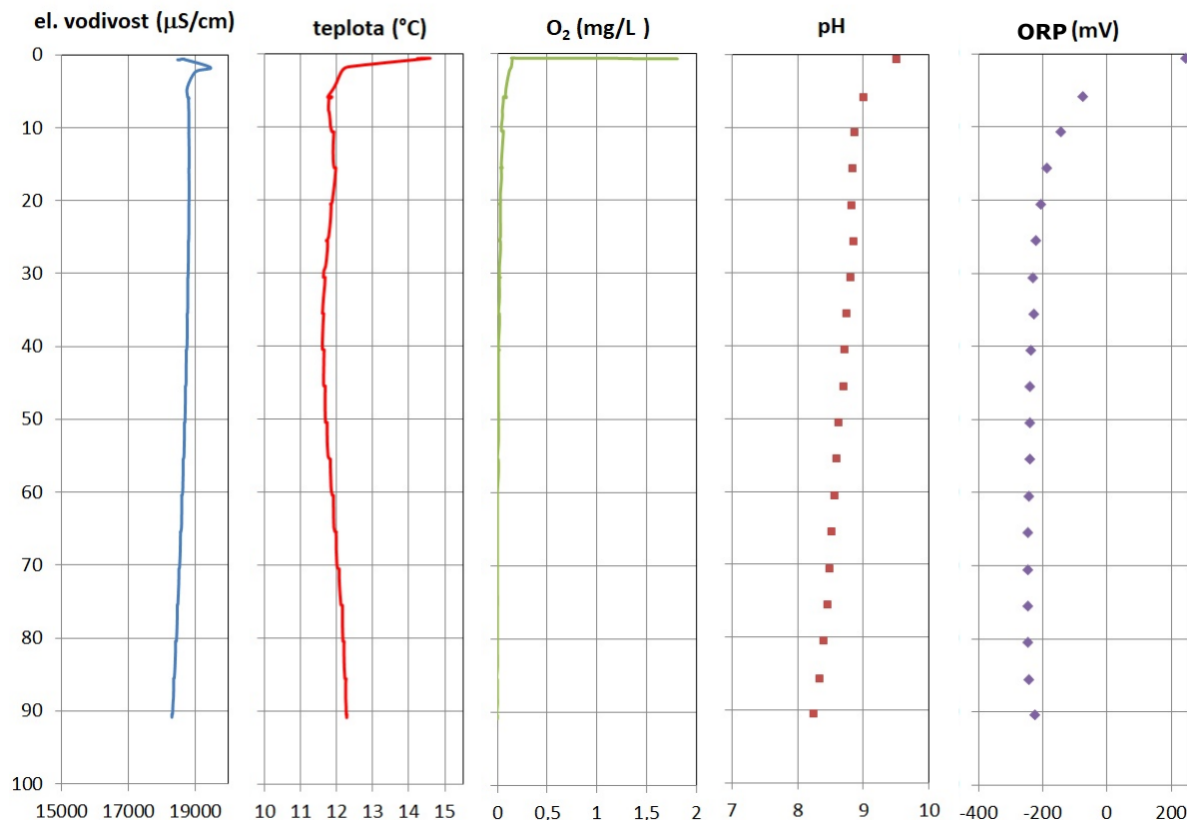
Obr. 14: Profilové měření chemicko-fyzikálních parametrů podzemních vod ve vrtu LT-1 dne 25.10.2018.

Čtvrté, poslední měření v květnu roku 2019 proběhlo po 9 měsících od otevření vrtu.

Teplota klesla z 14,5 °C při hladině vody ve vrtu na 12 °C v prvních 5 metrech měření, po mírném postupném poklesu až na hodnotu 11,6 °C v hloubce 35 m následoval opětový vzestup teploty až na hodnotu 12,3 °C v hloubce 90 m. Hodnoty měrné elektrické vodivosti byly s výjimkou odchylek v prvních několika metrech profilu do hloubky 30 m relativně konstantní (Obr. 15; hodnota přibližně 18 800 μS·cm⁻¹), poté začaly pomalu klesat až k hodnotě 18 300 μS·cm⁻¹ v hloubce 90m. Obsah rozpuštěného kyslíku vykazoval opět rychlý pokles v úvodních metrech a prakticky nulové hodnoty



v hloubce 20 m. Hodnota pH klesala s přibývajícím hloubkou z hodnoty 9,5 na hodnotu 8,2, nejvýraznější pokles byl v prvních 10 m profilu. Také hodnoty ORP klesaly obdobně jako v předchozích měřeních s rychlým poklesem v prvních 20 m měření. Hodnota ORP při hladině byla +245,3 mV, v hloubce 90 m -223 mV.



Obr. 15: Profilové měření chemicko-fyzikálních parametrů podzemních vod ve vrtu LT-1 dne 14.5.2019.

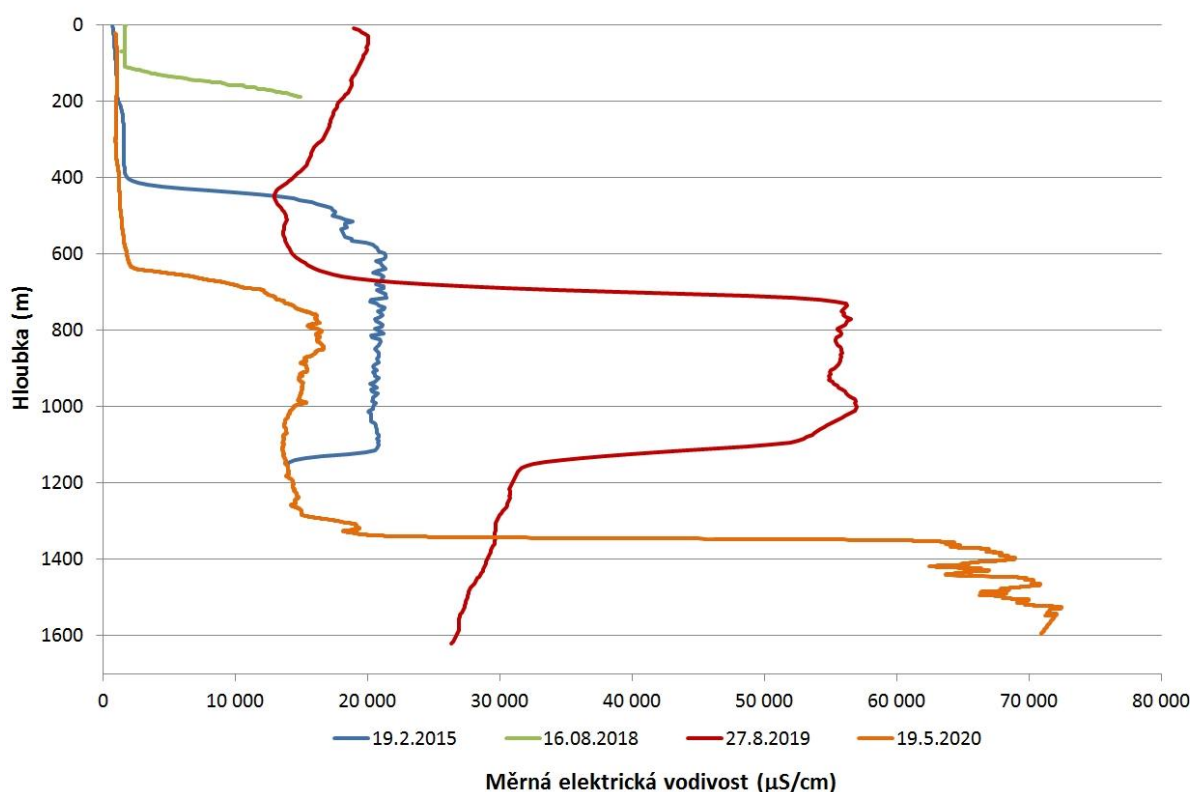
Karotážní měření metodou rezistivimetrie

Měření rezistivimetrie proběhlo v únoru 2015, v srpnu 2019 a v květnu 2020. Spolu se záznamem měrné elektrické vodivosti z YSI sondy ze srpna 2018 jsou výsledky profilových měření znázorněny na Obr. 16. První dvě měření byla realizována ve vnitřní pracovní koloně tyčí, která sahala do hloubky 1800 m. Perforace této kolony byla v intervalu přibližně 1600 až 1700 m. Třetí měření proběhlo po vytěžení vnitřní kolony a vyčištění vrtu. V jeho průběhu byl vyt vystrojen pouze do hloubky 850 m, níže byl vrtný stvol volný.

Při prvním měření v roce 2015 byly hodnoty měrné elektrické vodivosti v hloubkách do 200 m mezi 700 a 1 100 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Poté došlo ke skokovému nárůstu na 1 500 až 1 600 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Další velmi výrazný skokový nárůst byl zaznamenán v intervalu 430 až 480 m, kde se hodnota zvýšila z 1 600 na 17 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, jednalo se tedy o více než desetinásobný nárůst. V intervalu 600 až 1115 m hodnoty vodivosti oscilovaly v intervalu 20 200 až 21 500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. V poslední části křivky rezistivimetrie došlo k prudkému poklesu hodnot až na 13 900 na konci měřeného profilu (1150 m).



Při druhém měření v roce 2019 byla již silně mineralizovaná voda ($20\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) ve svrchní části vrtu (první metry pod hladinou vody ve vrtu). Pokles z $20\,000$ na přibližně $13\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ byl zaznamenán v úseku vrtu do hloubky přibližně 450 m. V úseku 450 až 660 m hodnota vodivosti pozvolna narůstala zpět na hodnotu odpovídající svrchní části vrtu a poté následoval skokový nárůst vodivosti. V hloubce 735 m byla zaznamenána hodnota $56\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Extrémně vysoké hodnoty vodivosti v rozsahu přibližně $55\,000$ až $57\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ pokračovaly v profilu dále až do hloubky 1070 m, kdy hodnoty začaly opět klesat. Pokles byl ale pozvolnější než předchozí nárůst. Hodnota měrné elektrické vodivosti v hloubce 1620 m (konec karotážního měření) byla $26\,500\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.



Obr. 16: Výsledky karotážního měření metodou rezistivimetrie, doplněné o měření měrné elektrické vodivosti sondou YSI ze srpna 2018.

Při třetím měření hodnota měrné elektrické vodivosti v mělkých částech vrtu odpovídala prvnímu měření z roku 2015, pohybovala se kolem hodnoty $1\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a až do hloubky 630 m velmi pomalu stoupala k hodnotě $2\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. V intervalu 630 až 760 m došlo k výraznému nárůstu vodivosti až na hodnotu $16\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. V hloubkovém intervalu 760 až 1280 m hodnoty vodivosti kolísaly v rozsahu 1370 až $1650\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a poté nastal opět prudký nárůst až k velmi vysokým hodnotám – $62\,500$ až $72\,100\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ v intervalu 1350 až 1600 m pod terénem.



Zhodnocení profilových měření

Teplota

Z teplotních měření v hloubkách do 200 m vyplývá, že teplota vody je ve vrtu do hloubky 10 m velmi výrazně ovlivněna teplotou vzduchu. Vliv ročního období sahá do hloubky 30 až 40 m, pod touto úrovní teplota podzemní vody ve vrtu narůstá. Vypočítaný geotermický stupeň pro hloubkový interval 30 (40) až 200 m je 57 m.°C⁻¹ až 58 m.°C⁻¹.

Měrná elektrická vodivost

Hodnota měrné elektrické vodivosti je úměrná celkovému obsahu rozpuštěných látek (TDS) ve vodách a poskytuje informaci o tom, s jakou mineralizací podzemních vod v zastiženém horninovém prostředí je nutné počítat. V profilu vrtu LT-1 byly měřeními zjištěny tři skupiny vod s velmi rozdílnou vodivostí a tím pádem i s celkovým obsahem rozpuštěných látek:

1. Relativně nízce mineralizované vody s měrnou elektrickou vodivostí do 2 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, běžná hodnota kolem 1 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, odpovídají mělkým vodám využívaným k čištění vrtu a testům. Hodnoty nad 1 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ mají vody s velmi nízkým podílem hlubokých podzemních vod.
2. Vysoce mineralizované vody s měrnou elektrickou vodivostí v rozsahu 14 000 až 20 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Nižší hodnoty vodivosti u některých profilových měření jsou pravděpodobně způsobeny mísením s výše uvedenou skupinou vod. Typická měrná elektrická vodivost je zde v rozsahu 17 000 až 20 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Pravděpodobným zdrojem těchto vod je poruchová zóna v ryolitu na kontaktu permokarbonu a podložního krystalinika. Chemické složení vysoce mineralizované skupiny podzemních vod, je popisováno v kapitole 3.1.
3. Extrémně mineralizované vody (solanky) s měrnou elektrickou vodivostí přibližně od 55 000 až po 72 000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Takto vysoké hodnoty vodivosti odpovídají TDS přibližně 30 až 45 g.l⁻¹. Podle pozice zastižených vodivostních rozhraní ve vrtu LT-1 je pravděpodobným zdrojem těchto vod nejhlubší část vrtu v hloubkách pod 1 600 m.

Posun vodivostních rozhraní prezentovaných v grafech na Obr. 12 až Obr. 16 byl ovlivněn technickým stavem vrtu, jeho čištěním a probíhajícími testy.

Po odvrtání a vystrojení byl vrt LT-1 bez přítoku (ústní sdělení J. Burdy). V roce 2007 proběhly ve vrtu cirkulační testy (Laštovka 2007), kdy byla vháněna pravděpodobně povrchová voda do hloubky 1602,3 – 1699,5 m s vydatností 0,5-3 l.s⁻¹. Nejdelší test s vydatností 1 l.s⁻¹ trval 11 dní. Při různých cirkulačních testech byla voda vháněna mezikružím i vnitřní pažnicí a na povrchu byla u vody vytékající pažnicí respektive mezikružím měřena teplota. Je tedy možné předpokládat, že opakovanou cirkulací vody ve vrtu byl vrt až do hloubky cca 1700 m naplněn povrchovou vodou a při cirkulaci došlo k vyčištění vrtu v tomto intervalu od zbytků výplachu.

Při karotážním měření v závěru roku 2007 (Kořalka 2007) je uváděn slabý přetok vody z vrtu cca 8 l.hod⁻¹. Slabý přetok vody z vrtu byl zaznamenán také v průběhu prvních měření v rámci tohoto projektu (září 2017). S jistým odstupem po odvrtání vrtu začala tedy do vrtu přitékat voda z kolektoru, který má vyšší piezometrickou úroveň než je hladina vody ve vrtu (úroveň horní hrany



pažnice). Množství přitékající vody do vrtu bylo omezeno uzavřením vrtu, voda z vrtu volně vytékala pouze v průběhu karotážních a dalších měření ve vrtu.

První karotážní měření metodou rezistivimetrie v únoru 2015 ukázalo relativně nízké hodnoty vodivosti v hloubkách do 200 m (700 až $1\,100\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), které odpovídají reziduu vod z cirkulačních testů. K mírnému nárůstu na $1\,500$ až $1\,600\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ došlo v hloubce přibližně 200 m, zde se již objevil malý podíl více mineralizované vody z hlubších částí vrtu. Při měření YSI sondou v září 2017 byly v celém měřeném profilu zjištěny hodnoty cca $1700\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ do hloubky cca 85 m. Více mineralizovaná voda, která se v roce 2015 nacházela v hloubce pod 200 m, se v září 2017 posunula až k ústí vrtu. Tomu odpovídá také posun mnohem výraznějšího rozhraní v hloubce 430 až 480 m (2015), kde se hodnota zvýšila z $1\,600$ na $17\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ (Obr. 16). Prakticky totožné rozhraní se projevilo v hloubce 107 až 189 m při měření YSI sondou v srpnu 2018 (Obr. 16), hodnota v tomto úseku vzrostla z $1\,660$ na $14\,960\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Rozhraní má prakticky totožný průběh při obou měřeních, posun rozhraní mezi rokem 2015 a srpnem 2018 je přibližně 300 m. To koreluje s výše popsáním posunem rozhraní původně v úrovni 200 m až k ústí vrtu. Vzhledem k uzavření vrtu (voda nemohla z vrtu volně vytékat) byl posun vodivostních rozhraní v letech 2015 až 2018 velmi pomalý.

Po srpnovém měření YSI sondou zůstal vrt LT-1 otevřený, voda mohla z vrtu volně odtékat. To se projevilo při následném měření YSI sondou v říjnu 2018, kdy měrná elektrická vodivost dosahovala ve svrchních částech vrtu hodnot v rozmezí $13\,500$ až $18\,500\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Vodivostní rozhraní indikované v roce 2015 v hloubce 430 až 480 m se posunulo až k ústí vrtu. Vysoké hodnoty vodivosti přibližně $18\,800\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ byly ve svrchní části vrtu zaznamenány také v květnu 2019 (Obr. 15).

Karotážní měření v srpnu 2019 opět potvrdila vysokou vodivost v úvodní části vrtu ($20\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Skokový nárůst vodivosti byl u karotáže v roce 2019 zaznamenán v intervalu 730 až 1070 m, kde byly změřeny extrémní hodnoty měrné elektrické vodivosti (skupina tři výše) rozsahu přibližně $55\,000$ až $57\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, jedná se tedy o přibližně 2 až 3 násobek hodnoty z roku 2015 ve srovnatelném intervalu. Poté začala hodnota vodivosti opět klesat a na konci měřeného intervalu se blížila hodnotám typickým pro vysoce mineralizované vody (skupina dvě viz výše).

Třetí měření metodou rezistivimetrie v květnu 2020 proběhlo po technické úpravě vrtu, vytěžení vnitřní pracovní kolony a po vyčištění vrtu (realizováno v září 2019). Při čištění vrtu byl vrt proplachován kolonou vrtných tyčí spuštěnou do hloubky 1614 m s vydatností $600\ \text{l}\cdot\text{min}^{-1}$. Původní, stratifikovaný profil podzemních vod ve vrtu byl těmito aktivitami nahrazen v intervalu 0 až 1614 m nízce mineralizovanou povrchovou vodou. V lednu 2020 proběhly vodní tlakové zkoušky (VTZ, viz Rukavičková et al. 2020). Při VTZ a následných testech byla do vrtu vtláčena voda z povrchu. Teplotním měřením v průběhu testů bylo zjištěno, že úsek s chladnější vodou injektovanou z povrchu končí v hloubce přibližně 880 m. Voda byla injektována pravděpodobně do širší poruchové zóny v hloubce 900 m. Po ukončení testů byl tedy úsek 0 – 900 m opět zaplněn nízce mineralizovanou povrchovou vodou. Vlivem změny technického stavu vrtu a změny v puklinových systémech, ke které došlo v průběhu testů, byl vrt v době třetích karotážních měření bez přetoku, s hladinou podzemní vody v hloubce 22 m.



Třetí profilové měření metodou rezistivimetrie v květnu 2020 ukázalo výskyt nížce mineralizované vody s minimálním podílem hlubokých vod v intervalu 0 až 630 m ($1\ 000$ až $2\ 000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Následoval úsek silně mineralizovaných vod 700 – 1300 m (1370 až $1650\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) a úsek s extrémně mineralizovanou vodou ($62\ 500$ až $72\ 100\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) v rozsahu cca 1 350 až 1 600 m pod terénem.

Mezi zářím 2019 (výplach vrtu až do hloubky 1614 m) a květnem 2020 se posunula linie extrémně mineralizovaných vod ve volném vrtu až na úroveň 1350 m, tedy minimálně o 250 m výše. Při předchozím měření by zastižen interval těchto vod v pracovní koloně v ostře vymezeném intervalu cca 700 až 1 100 m. Původ extrémně mineralizovaných vod je v hlubokých částech vrtu. Z vývoje křivek lze usuzovat, že přítok těchto vod do vrtu byl vyvolán snížením hladiny vody ve vrtu.

První snížení bylo dočasné – v průběhu čerpací zkoušky v srpnu 2018, kdy byla hladina snížena o 40 m. V průběhu čerpací zkoušky a následné zkoušky stoupací, přitékala extrémně mineralizovaná voda perforací do pracovní kolony a postupně touto kolonou proudila směrem vzhůru. V okamžiku, kdy hladina vody při stoupací zkoušce nastoupala na vyšší úroveň, než je piezometrická úroveň přítoku v hloubce pod 1600 m, přítok extrémně mineralizovaných vod ustal. Do pracovní kolony začala poté přitékat znovu vysoce mineralizovaná voda z hloubek cca 900 m (porucha v ryolitů).

Druhé snížení hladiny bylo trvalé. Po testech v lednu 2020 došlo ke změně tlakových poměrů v horní části vrtu, hladina ve vrtu zaklesla až do hloubky 22 m, což zřejmě opět vyvolalo přítok extrémně mineralizovaných vod ze spodní části vrtu.

Současně od ledna 2020 do karotážních měření v květnu 2020 přitékala do vrtu i silně mineralizovaná voda z hloubky cca 900 m, za toto období se její hranice posunula z 900 na 640 m pod terénem. Tento přítok má vyšší piezometrickou úroveň a před změnami v průběhu testů způsoboval přetok podzemní vody z vrtu.

Obsah rozpuštěného kyslíku

Obsah rozpuštěného kyslíku ve vrtu velmi rychle klesal s hloubkou, velmi prudký pokles byl obvykle zaznamenán v průběhu prvních 5 m měření. Nulové hodnoty obsahu rozpuštěného kyslíku byly zaznamenány od hloubky 7 až 20 m. Nejvyšší míra okysličení byly ve svrchní části vrtu při prvním měření sondou YSI, pravděpodobně kvůli dlouhodobé stagnaci vody ve vrtu.

pH

Vody ve vrtu LT-1 mají zásaditou reakci. Hodnoty pH se v měřených profilech pohybují od 7,8 po 9,8; velmi časté jsou hodnoty mezi 8 a 9.

ORP

Hodnota ORP v měřených profilech obdobně jako obsah rozpuštěného kyslíku rychle klesala v prvních 10 až 20 metrech, poté byly hodnota stabilní nebo klesala jen velmi zvolna. Výjimkou byl relativně pozvolný pokles v intervalu 0 až 140 m (+390 mV až -259 mV) při měření v říjnu roku 2018. Hodnota ORP byla na konci měřených profilů v rozmezí -420 až -220 mV.



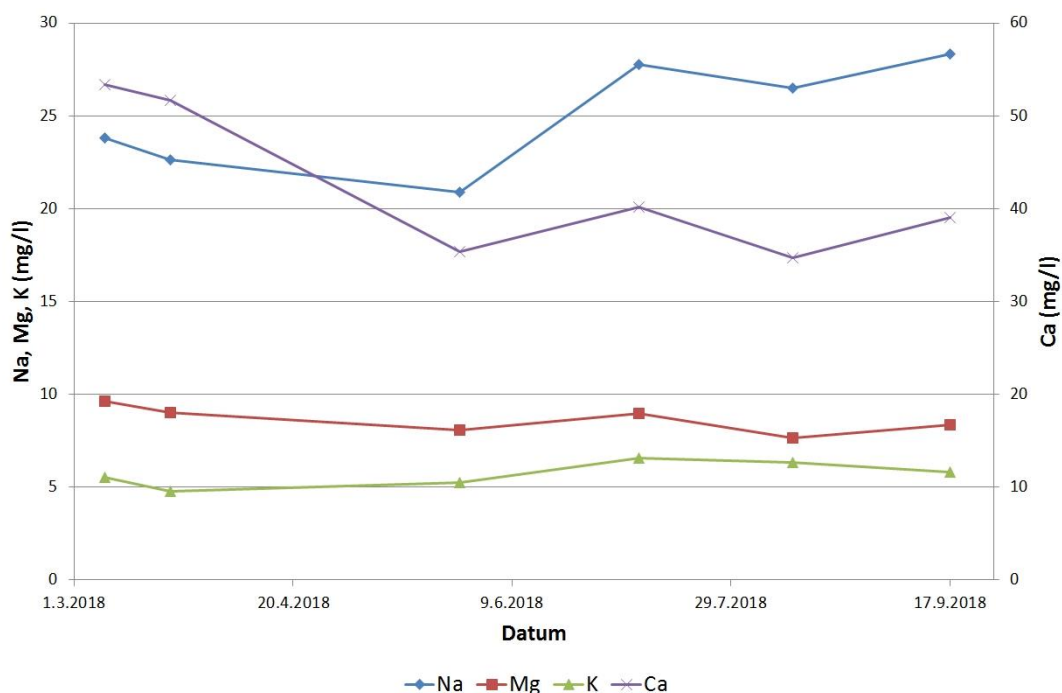
4 Odběry povrchových vod z řeky Labe

Jako cirkulační médium bude v plánovaném hlubokém geotermálním výměníku pravděpodobně využívána voda z blízké řeky Labe. Proto byla pro laboratorní interakční experimenty voda-hornina využívána také voda z Labe. Před zahájením experimentů bylo monitorováno chemické složení povrchové vody v Labi na místě blízkém lokalitě vrtu LT-1. Monitoring probíhal v průběhu roku 2018, celkem bylo odebráno 8 vzorků. Výsledky analýz jsou uvedeny pro hlavní ionty v grafech na Obr. 17 a Obr. 18, samotná data pak v Tab. 2a Tab. 3.

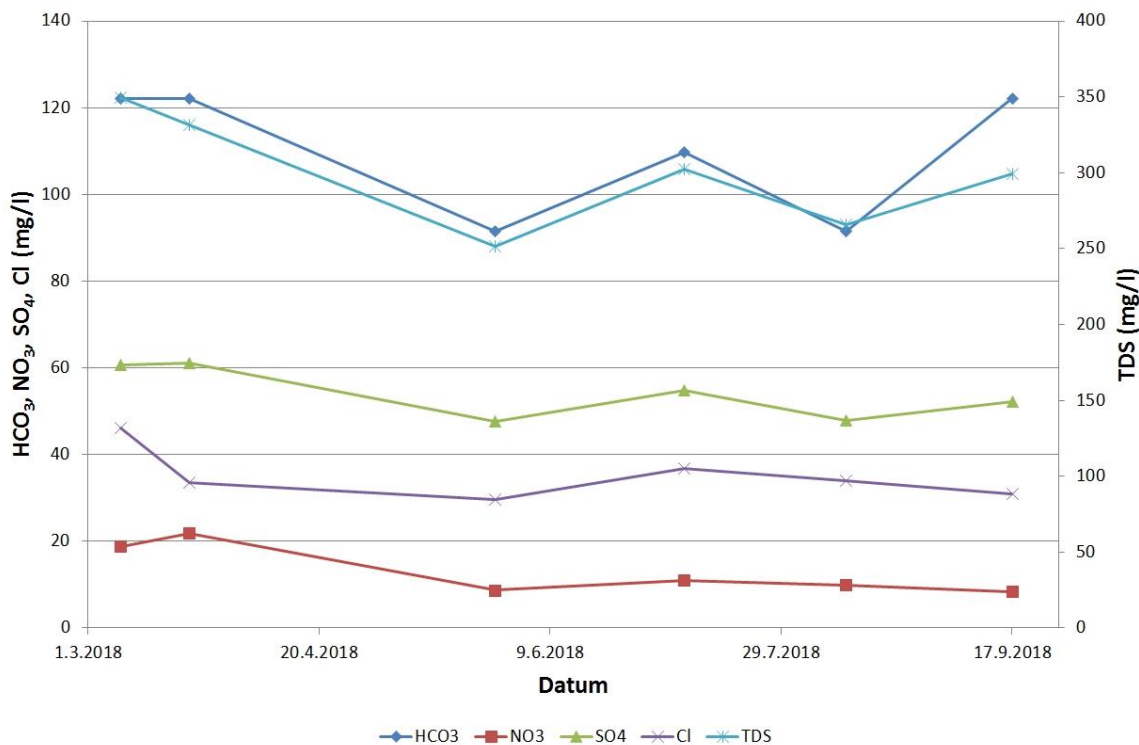
Z grafů je patrné, že k výrazným změnám chemického složení vody v Labi v průběhu roku nedochází. Voda odebraná na konci vzorkování v září 2018 byla proto považována za reprezentativní a byla využívána v následných experimentech.

Současně bylo průměrné složení odebraných vzorků porovnáno s průměrným složením povrchové vody z řeky Labe na profilu provozovaném ČHMÚ mezi obcemi Třeboutice a Křešice (data z let 2003 až 2017). Profil ČHMÚ leží přibližně 4 km proti proudu Labe od pozice LT-1. Srovnání je uvedeno v

Tab. 4. Průměrné hodnoty jsou u hlavních kationtů i aniontů obdobné. Obsahy stanovené z dlouhodobého průměru ČHMÚ jsou ve srovnání s průměrem za rok 2018 mírně vyšší u většiny hlavních iontů s výjimkou sodíku a chlóru. Rozdíly jsou malé, obvykle do 10 až 20 % průměrných hodnot. Jedná se o vody nízké mineralizované s průměrným obsahem rozpuštěných látek okolo 300 mg·l⁻¹. Mezi kationty převládá vápník, mezi anionty převládají hydrogenuhličitan (hydrochemický typ Ca-HCO₃).



Obr. 17: Vývoj chemického složení povrchové vody v Labi, hlavní kationty.



Obr. 18: Vývoj chemického složení povrchové vody v Labi, hlavní anionty a celkový obsah rozpuštěných látek (TDS).

Tab. 2: Chemické složení povrchových vod v řece Labe – 1. část

datum odběru	Li ⁺	NH ₄ ⁺	Na ⁺	Mg ₂ ⁺	Al	K ⁺	Ca ₂ ⁺	Mn ₂ ⁺	Fe	Zn ₂ ⁺
	μg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	μg/l	mg/l	μg/l
8.3.2018	10,50	0,44	23,79	9,64	< 0,20	5,52	53,39	73,00	0,18	14,00
23.3.2018	5,20	< 0,02	22,65	9,00	< 0,20	4,75	51,70	12,00	0,07	13,00
28.5.2018	6,70	< 0,02	20,90	8,05	< 0,20	5,25	35,38	19,00	< 0,05	5,00
8.7.2018	6,30	< 0,02	27,78	8,96	< 0,20	6,56	40,16	17,40	< 0,05	15,00
12.8.2018	10,10	< 0,02	26,50	7,65	< 0,20	6,32	34,68	62,00	< 0,05	26,00
17.9.2018	8,30	0,05	28,35	8,35	< 0,20	5,81	39,08	22,00	< 0,05	5,00

Tab. 3: Chemické složení povrchových vod v řece Labe – 2. část

datum odběru	(HCO ₃) ⁻	(NO ₃) ⁻	F ⁻	SiO ₂	(SO ₄) ₂ ⁻	Cl ⁻	pH	TDS
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		mg/l
8.3.2018	122,00	18,83	0,15	8,80	60,65	46,07	7,13	349,46
23.3.2018	122,00	21,82	0,12	4,60	61,14	33,49	7,70	331,34
28.5.2018	91,50	8,68	0,13	4,20	47,61	29,70	7,49	251,40
8.7.2018	109,80	10,90	0,22	6,30	54,82	36,76	7,51	302,26



12.8.2018	91,50	9,87	0,15	7,30	47,79	33,97	7,93	265,73
17.9.2018	122,00	8,26	0,14	3,90	52,11	31,00	7,58	299,05

Tab. 4: Srovnání průměrných obsahů složek z odebíraných vzorků a průměru ČHMÚ

	Na+	Mg ²⁺	K+	Ca ²⁺	Mn ²⁺	Zn ²⁺	(HCO ₃) ⁻	(NO ₃) ⁻	SiO ₂	(SO ₄) ²⁻	Cl ⁻	pH	TDS
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	μg/l	μg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l		mg/l
průměr ČGS 2018	25,00	8,61	5,70	42,40	34,23	13,00	109,80	13,06	5,85	54,02	35,17	7,56	299,87
průměr ČHMÚ 2003- 2017	20,92	9,16	5,71	51,99	95,04	14,35	117,05	13,55	8,39	61,31	28,89	7,87	317,62

5 Vodní zdroje a hydrogeologické vrtý

Rešerše vodních zdrojů, registrovaných odběrů podzemních vod a vrtů v databázi České geologické služby – Geofond byla provedena s cílem zpracovat podklady pro návrh budoucího plánu monitoringu podzemních vod. Tento monitoring by měl prokázat, že hloubení nových geotermálních vrtů na lokalitě neovlivní kvalitu a kvantitu vodních zdrojů v okolí.

Vzhledem k tomu, že doposud není jasné, zda další vrt či vrtý hloubeny budou a případně v jakém časovém horizontu, není aktuálně možné navrhnout optimální monitoring, protože řada podmínek využití vod se může v průběhu let změnit.

5.1 Vodní zdroje města Litoměřice (PVK Ústecký kraj)

Město Litoměřice je zásobováno ze skupinového vodovodu Litoměřice. Skupinový vodovod Litoměřice zásobuje město Litoměřice, Žalhostice, Píšťany, Třeboutice, Křešice a Záhořany. Hlavním zdrojem pitné vody jsou úpravny vody Malešov a Vrutice zásobované z místních vrtů v křídových kolektorech (Radouň, Čakovice, Střížovice, Hubenov a Vrutice). Vodní zdroje leží cca 10 až 15 km od vrtu LT-1. Tyto zdroje jsou doplněné o podzemní vodu z prameniště Mentaurov, Pokratice, Močidla a Skalice. Tato prameniště se nacházejí severně od města Litoměřice v nadmořské výšce mezi 380 a 480 m n. m., leží tedy o 200 až 300 m výše než ústí vrtu LT-1.

Vlastní užitkový vodovod mají podniky:

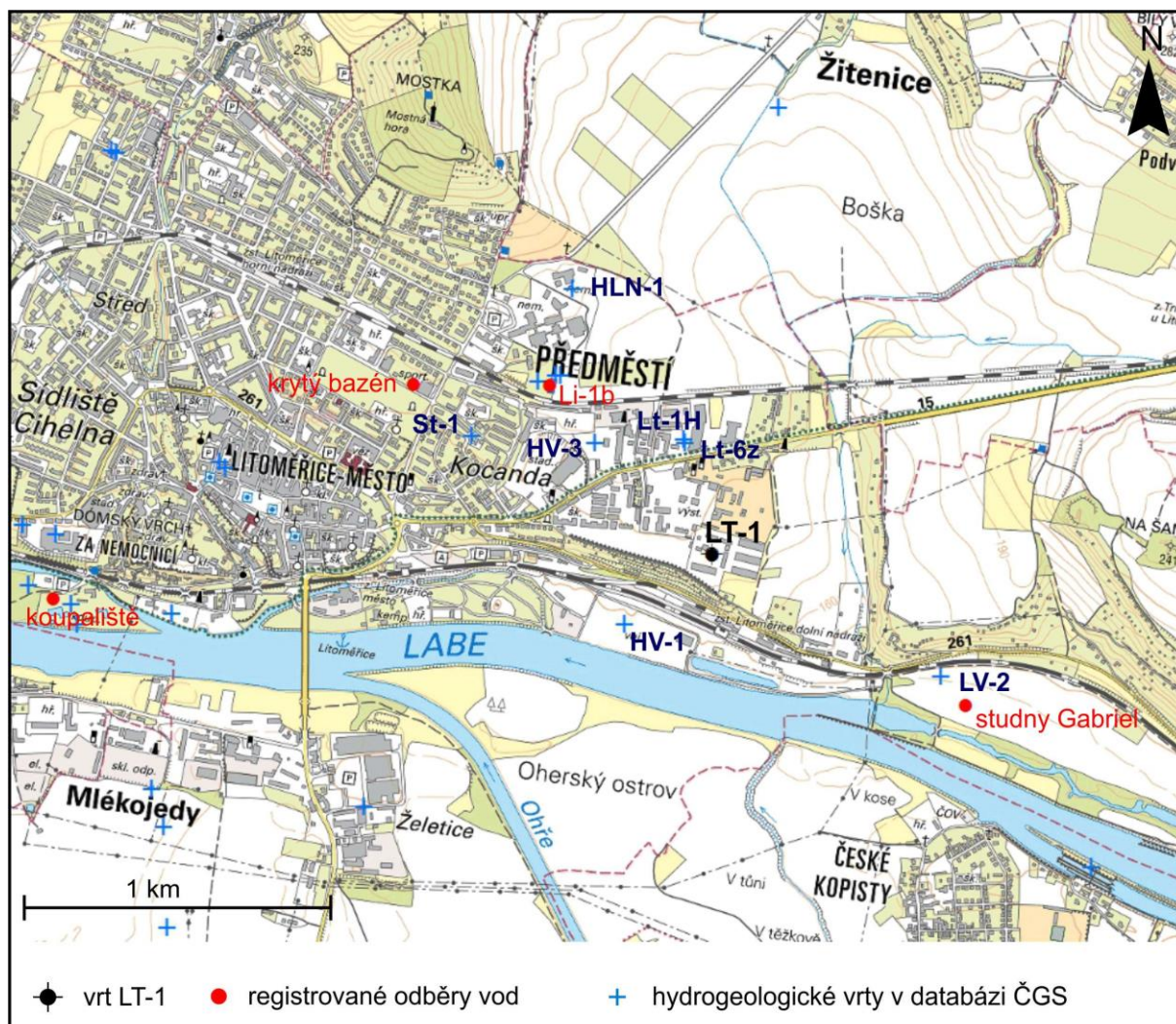
- Mrazírny Litoměřice – vlastní vrt s odběrem cca 115 m³·den⁻¹
- Pivovar Litoměřice – vlastní studna s odběrem cca 300 m³·den⁻¹ (mimo provoz)
- ČSAD Litoměřice – vlastní studna s odběrem cca 18 m³·den⁻¹



5.2 Registrované zdroje podzemních vod v okolí vrtu LT-1

Na území města Litoměřice jsou evidovány celkem 4 zdroje podzemních vod (odběry podzemních vod evidované na základě vyhlášky č. 431/2001 Sb.; jedná se o odběry nad 6000 m³ za rok. nebo 500 m³ za měsíc). Pouze dva z těchto zdrojů jsou aktuálně využívány. Zdroje jsou v následujícím textu seřazeny podle vzdálenosti od vrtu LT-1.

1. Vrt Li-1b poblíž úpravny vody Litoměřice se nachází 800 m sz. od vrtu LT-1. Vydatnost vrtu Li-1b uváděná Plánem vodovodů a kanalizací Ústeckého kraje je 18 l·s⁻¹. Vrt v současné době není využíván, slouží pouze jako pohotovostní. Vrt byl naposledy využíván v roce 2007, kdy byl roční odběr z vrtu 310 tis m³. Průměrné množství odebíraných vod bylo 9,83 l·s⁻¹. Vrt má stanovenou ochranné pásmo 1. Stupně, které je oplocené (rozhodnutí ONV Litoměřice, Vod 2/7/1983). Hloubka vrtu je 186 m, podzemní voda byla jímána z intervalu 40,7 až 184 m. Zdrojem podzemní vody je zde perucko-korycanské souvrství spolu s nadložním izolátorem jizerského až bělohorského souvrství (kolektor AB). V bezprostřední blízkosti vrtu jsou archivem České geologické služby registrovány vrty Li-1 a Li-1a, které mají obdobnou hloubku i rozsah otevřeného intervalu. Hloubka ustálené hladiny u vrtu Li-1b byla 40 m pod terénem.
2. Studny S1a S2 označené jako Gabriel leží na pravém břehu řeky Labe 1000 m vjv. od vrtu LT-1. Studny nejsou aktuálně využívány. Posledním rokem využívání byl rok 2007 s odběrem 6 tis m³. Průměrné množství odebíraných vod bylo 0,19 l·s⁻¹.
3. Vodní zdroj pro krytý plavecký bazén Litoměřice leží 1200 m sz. od vrtu LT-1. Průměrné množství odebíraných vod u tohoto zdroje je 0,928 l·s⁻¹. V letech 2012 až 2018 se množství odebraných vod za rok pohybovalo mezi 28 a 42 tis m³. V posledních letech je odběr přibližně 29 tis m³ za rok. V místě vodního zdroje je v archivu České geologické služby registrována pouze dvojice vsakovacích vrtů do hloubky 78,5 m pro tepelné čerpadlo.
4. Koupaliště Litoměřice na Písečném ostrově (2300 m z. od vrtu LT-1) je zásobováno z pěti vrtů K1, 2, 3, 4 a 5 s průměrným množstvím odebíraných vod 0,623 l·s⁻¹. V letech 2015 až 2018 bylo množství odebraných vod za rok cca 19 tis m³. V okolí koupaliště jsou archivem České geologické služby registrovány vrty LK-1 až LK-3, hluboké cca 25 m, jímající podzemní vodu z intervalu přibližně 12 až 24 pod terénem. Jímána je podzemní voda z puklinového kolektoru C (jizerské souvrství).



Obr. 19: Mapa registrovaných odběrů a hydrogeologických vrtů v okolí vrtu LT-1.

5.3 Hydrogeologické vrtý a studny v databázi České geologické služby

V databázi České geologické služby je kromě výše uvedených vrtů registrováno dalších 7 hydrogeologických vrtů do vzdálenosti 1 km od vrtu LT-1.

1. Na pravém břehu Labe 380 m jz. od vrtu LT-1 se nachází vrt HV-1. Je hluboký 14,9 m a jímá podzemní vodu z intervalu 3,2 až 14,9 m. V otevřeném úseku vrtu převažují kvartérní sedimenty. Ustálená hladina byla v hloubce 0,85 m pod terénem (rok 1972).
2. Dvojice vrtů Lt-1H a Lt-6z leží přibližně 410 m ssz. od vrtu LT-1. Vrt Lt-1H je hluboký 112 m a má otevřený úsek v intervalu 6 až 112 m pod terénem. Lt-6z je hluboký 121 m a má otevřený úsek v hloubce 49 až 121 m. Oba vrtý zasahují do puklinového kolektoru C jizerského a bělohorského souvrství. Vrt Lt-1H měl sloužit jako čerpací vrt pro tepelné čerpadlo s otevřeným systémem, vrt Lt-6z jako vrt zasakovací pro vytápění nově budovaného administrativně skladovacího areálu firmy Hennlich Industrietechnik s.r.o. (Tůma 2000). Jižně a jihovýchodně od těchto vrtů bylo odvrtáno dalších 5 vrtů o hloubce 62 až 64 m, které měly sloužit jako vsakovací vrtý pro srážkové vody z areálu.



3. Vrt HV-3 leží 560 m sz. od vrtu LT-1 v areálu ČSAD. Vrt je hluboký 162 m s otevřeným úsekem 20 až 165 m pod terénem. Vrt zasahuje do perucko-korycanské souvrství i nadložního izolátoru jizerského až bělohorského souvrství.
4. Na pravém břehu Labe poblíž výše zmiňovaných studní Gabriel se nachází vrt LV-2 (cca 890 m jv. od LT-1) hluboký 171 m s otevřeným úsekem 100 až 135 m. Vrt jímá podzemní vodu z perucko-korycanského souvrství kolektoru AB.
5. Vrt St-1 hluboký 65 m jímá v intervalu 20 až 63,5 m podzemní vodu z puklinového kolektoru C jizerského a bělohorského souvrství. Vrt leží 930 m sz. od vrtu LT-1. Vrt byl vyhlouben v roce 2009 pro hotel Labe.
6. Ve vzdálenosti 1 km se nachází hydrogeologický vrt HLN-1 v prostoru nemocnice Litoměřice. Vrt je hluboký 130,5 m a je otevřený v intervalu 56,5 až 124,5 m. Odpovídá puklinovému kolektoru C jizerského a bělohorského souvrství.

Nejbližší registrované vodní zdroje (vrty) leží ve vzdálenosti několika set metrů od vrtu LT-1. Výše uvedené vrty a vodní zdroje jímají vodu z kvartérních křídových sedimentů. Mocnost těchto sedimentů je v místě vrtu LT-1 přibližně 200 m. Báze těchto sedimentů tedy leží dva až tři tisíce metrů nad úrovní plánovaného tepelného výměníku. Vrt LT-1 je cementací zcela odizolován od okolního horninového prostředí do hloubky 850 m. Pokud by došlo k hloubení nových hlubokých vrtů, jejich konstrukce bude obdobná. Vrty budou ležet v blízkosti vrtu LT-1.

Ovlivnění mělkých vrtů (vodních zdrojů) je proto vysoce nepravděpodobné. Nicméně vzhledem k tomu, že ochrana vodních zdrojů je při současné situaci dlouhotrvajícího sucha velmi citlivé téma, bude vhodné v průběhu vrtných prací a následných testů provádět monitoring blízkých vodních zdrojů. Termín realizace nových vrtů není znám. Není proto možné v současné době sestavit plán monitoringu. Stav vodárenských objektů a jejich využívání se může během několika let zcela zásadním způsobem změnit. V současné době se jeví jako vhodný objekt k monitoringu nevyužívaný vodní zdroj Li-1b.



6 Závěr

Při zhodnocení chemických analýz z širšího okolí města Litoměřice se projevila výrazná hydrochemická zonálnost podzemních vod. V mělkých podzemních vodách ve vrtech v kvartéru nebo mělkých částech křídových kolektorů převažují hydrochemické typy Ca-HCO_3 , $\text{Ca-SO}_4\text{-HCO}_3$ a $\text{Ca-HCO}_3\text{-SO}_4$. V okolí terciérních vulkanitů, v lokalitách s výskytem tufů a tufitů se vyskytují podzemní vody s výraznějším zastoupením hořčíku mezi kationty – vody typu Ca-Mg-HCO_3 . Obdobné bylo také chemické složení podzemních vod odebraných z pramenů v okolí Litoměřic při hydrogeologickém mapování (Rukavičková et al. 2020). Celkový obsah rozpuštěných látek (TDS) se v mělkých podzemních vodách pohybuje v rozmezí od 200 do 1100 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

V křídových kolektorech je dominantní typ Ca-HCO_3 s TDS v rozmezí 200 až 1000 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ v kolektorech C a D a v rozmezí 200 až 1500 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ v kolektorech A a B. Výjimečně se vyskytují podzemní vody s celkovým obsahem rozpuštěných látek do 3,5 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. S hloubkou odběru vzorku (otevřeného intervalu vrtu) stoupá podíl sodíku mezi kationty. Podzemní vody v hlubších částech křídových kolektorů jsou typu Na-HCO_3 . Hloubková hranice mezi oběma typy je na lokalitě přibližně 300 m, v závislosti na konkrétních geologických podmínkách.

Také v mělkých částech v permokarbonu převažuje typ Ca-HCO_3 s TDS do 1000 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. U vrtů se střední hloubkou vzorkovaného intervalu vyšší než 500 m mezi anionty zcela převládají chloridy a mezi kationty sodík. Podzemní vody z těchto intervalů jsou typu Na-Cl . Z hlediska celkového obsahu rozpuštěných látek lze odlišit dvě skupiny; první s obsahy v rozmezí 10 až 18 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ a druhá s výrazně vyššími hodnotami 40 až 65 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$. Podzemní voda vzorkovaná z krystalinika pod permokarbonskými sedimenty byla opět typu Na-Cl , s nižším obsahem rozpuštěných látek ve srovnání s nadložními intervaly v permokarbonu.

Opakované odběry vzorků a profilová měření multiparametrickou sondou YSI ukázaly, že před zahájením tohoto projektu a na jeho počátku v roce 2017 byla ve svrchní části vrtu LT-1 směs vody využívaná k výplachu a cirkulačním testům. Podíl podzemní vody vzhledem k uzavření vrtu narůstal velmi pomalu. Celkový obsah rozpuštěných látek byl u těchto vzorků v rozsahu od 600 po 1000 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$.

Po odčerpání většího množství vody z vrtu a v průběhu delšího otevření vrtu (voda z vrtu volně odtékala) se rozhraní silně mineralizovaných vod indikované v roce 2015 v hloubce 430 až 480 m a v srpnu 2018 v hloubce 107 až 189 m posunulo až k ústí vrtu. Další vzorky odebírané z vrtu LT-1 již měly proto relativně stabilní složení. Jednalo se o podzemní vody typu Na-Cl s poměrným obsahem sodíku a chloridů nad 90 meq %, celkový obsah rozpuštěných látek by přibližně 12 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$, pH 8,9 až 9,0. Celkový obsah rozpuštěných látek se oproti prvním vzorkům zvýšil přibližně 12x. Blízké složení vodám z vrtu LT-1 mají podzemní vody z permokarbonu, z vrtů vzorkovaných v úsecích 810 až 913 m, 593 až 1045 m a 500 až 715 m. Je tedy možné předpokládat, že do vrtu LT-1 přitékala a byla vzorkována podzemní voda z báze permokarbonu.

Karotážní měření v srpnu 2019 ukázala další skokový nárůst měrné elektrické vodivosti v intervalu 730 až 1070 m byly změřeny extrémní hodnoty měrné elektrické vodivosti rozsahu přibližně 55 000



až $57\,000\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Tedy přibližně 2 až 3 násobek hodnoty vodivosti vysoce mineralizovaných vod, které se vyskytovaly v horní části vrtu (výše popsané výsledky analýz vzorků podzemní vody). Extrémně mineralizované vody ($62\,500$ až $72\,100\ \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) byly v úseku cca $1\,350$ až $1\,600$ m pod terénem zachyceny i při karotážním měření v květnu 2020. Takto vysoké hodnoty vodivosti odpovídají TDS přibližně 30 až $45\ \text{g}\cdot\text{l}^{-1}$.

Do vrtu LT-1 po jeho otevření přitékala kontinuálně vysoce mineralizovaná podzemní voda pravděpodobně z hloubky cca 900 m, kde se vyskytuje širší porucha v ryolitu na kontaktu permokarbonu a podložního krystalinika. Tento přítok měl vyšší piezometrickou úroveň, než je povrch terénu v okolí vrtu a jeho vlivem voda z vrtu slabě přetékala.

Zdroj extrémně mineralizovaných vod je ve spodní části vrtu v hloubce pod $1\,600$ m. K vyvolání přítoku těchto vod do vrtu bylo nutné snížení hladiny vody ve vrtu při čerpací zkoušce nebo vlivem změny tlakových poměrů po hydraulických testech. Tento přítok má tedy nižší piezometrickou úroveň ve srovnání s přítokem z hloubky 900 m.

Chemické složení povrchové vody v řece Labe poblíž vrtu LT-1 se v průběhu roku zásadním způsobem neměnilo. Průměrné složení odebraných vzorků je srovnatelné s dlouhodobým průměrem stanice ČHMÚ ležící mezi obcemi Třeboutice a Křešice. Rozdíly byly malé, obvykle do 10 až 20% průměrných hodnot. Povrchová voda v Labi je nízce mineralizovaná s průměrným obsahem rozpuštěných látek okolo $300\ \text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Mezi kationty převládá vápník, mezi anionty převládají hydrogenuhličitaný (hydrochemický typ Ca-HCO_3).

Byl zpracován přehled vodních zdrojů města Litoměřice, registrovaných zdrojů podzemních vod na území města a vrtů v databázi České geologické služby do vzdálenosti 1 km od vrtu LT-1. Nejbližší registrované vodní zdroje (vrty) leží ve vzdálenosti několika set metrů od vrtu LT-1. Vodní zdroje jímají vodu z kvartérních křídových sedimentů ležících dva až tři tisíce metrů nad případným tepelným výměníkem. Ovlivnění mělkých vrtů (vodních zdrojů) je proto vysoce nepravděpodobné. Nicméně vzhledem k tomu, že ochrana vodních zdrojů je při současné situaci dlouhotrvajícího sucha velmi citlivé téma, bude vhodné v průběhu vrtných prací a následných testů provádět monitoring blízkých vodních zdrojů.



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



7 Literatura

Domenico P. A., Schwartz F. W. (1998): Physical a chemical hydrogeology, 2nd ed. 824 s. – John Wiley & Sons. New York.

Fischer T., Dědeček P., Holeček J., Rukavičková L., Šafanda J., Řihošek J., Vlček J. (2020): Hydraulic tests in the PVGT-LT1 borehole in Litoměřice, 24-27 January 2020. Internal progress report, RINGEN consortium. 15 p. Prague.

Kořalka S. (2007): Geotermální hlubinný vrt PVGT-LT-1; závěrečná zpráva o karotážním měření třetího a čtvrtého úseku vrtu (850 – 2020 m). MS Aquatest. Praha.

Laštovka F. (2007): Zpráva o průběhu hydrotermálních zkoušek na vrtu PVGTLT – 1. MS GEO – TEN.

Rukavičková L., Řihošek J., Holeček J., Petružálek M., Paleček M. (2020): Hydraulické parametry hornin a hydrogeologické poměry v okolí Litoměřic. MS Česká geologická služba. Praha.

Tůma W., Beran M., Novotná V. (2000): Litoměřice, Hennlich Industrietechnik, závěrečná zpráva o hydrogeologických pracích. MS Česká geologická služba, Geofond. Praha.



ČESKÁ
GEOLOGICKÁ
SLUŽBA