

Využití termometrie pro vyhledávání minerálních pramenů – Mariánské Lázně a Karlovy Vary

DAVID-AARON LANDA, TOMÁŠ VYLITA, PAVEL KALINA, JAKUB MAREŠ, VIKTOR GOLIÁŠ, PETR NAKLÁDAL

Klíčová slova: termometrie – vyhledávání minerálních pramenů – Mariánské Lázně – Karlovy Vary

ABSTRAKT

Termometrie je efektivní a neinvazivní nástroj pro vyhledávání skrytých vývěřů minerálních vod. Účinnost a metodologické přístupy byly ověřeny na dvou záměrně kontrastních lokalitách: v Mariánských Lázních, jež jsou charakteristické pro vývěry studených, na CO₂ bohatých minerálních vod, a v Karlových Varech, známých svými termálními prameny.

V Mariánských Lázních, kde bylo cílem nalézt nové, dosud nepopsané vývěry minerální vody, se metoda pozemní termometrie s využitím termovizní kamery (TIR) ukázala jako vysoce účinná. Termometrický průzkum byl kombinován s následným měřením volného rozpuštěného CO₂ Haertlovým přístrojem, teploty, elektrické konduktivity a hodnoty pH. Na 20 km vodních toků bylo identifikováno 131 teplotních stop, z nichž bylo 14 nových vývěřů minerální vody. Je třeba zdůraznit, že skutečný počet vývěřů ze souboru 131 teplotních stop bude pravděpodobně vyšší díky limitaci měření CO₂ v povrchovou vodou silně ředěných vývěrech.

V Karlových Varech bylo cílem termometrického měření lokalizovat a kvantifikovat tzv. divoké vývěry termální vody s potenciálně maximální teplotou 73,4 °C v korytě řeky Teplé, které ovlivňují ustálený režim karlovarské zřidelní struktury. TIR kamera se na lokalitě ukázala být neúčinnou z důvodu rychlého ředění vývěřů povrchovou vodou. Přistoupilo se proto k bodovému měření teploty od povrchové vody izolovaným teplotním čidlem na dně koryta řeky Teplé v pravidelné síti na ploše 1 300 m². Tento přístup pomohl odhalit 14 divokých vývěřů termy. Průběžně byla s teplotou vody zaznamenávána i elektrická konduktivita a v závěru mapování byla bez úspěchu provedena sumární bilance vydatnosti pramenů za pomoci zařízení FlowTracker z průtoku vody v Teplé. Nakonec byla celková vydatnost divokých vývěřů v zájmové oblasti, tedy v místech pramenů Vřídla, odhadnuta na 2 až 3 l/s. Odhad vychází z dlouhodobých změn tlakových poměrů ve struktuře Vřídla.

Výsledky obou termometrických průzkumů dokládají, že při nastavení vhodného pracovního postupu jde o vysoce všestrannou a účinnou metodu kvalitativního posouzení vývěřů minerálních vod. Pro úspěšnou aplikaci je však vždy nutné metodiku adaptovat na specifické hydrogeologické a hydrologické podmínky dané lokality. Výsledky obou dílčích průzkumů poskytly informace o distribuci minerálních pramenů a budou sloužit jako podklad pro nastavení ochrany zřidelních struktur.

1 ÚVOD

Termometrie se v hydrogeologické praxi nejčastěji využívá pro identifikaci skrytých přítoků podzemních vod do vod povrchových. Jde o alternativu k prostému měření průtoku ve vodoteči, při kterém je předpokládán rozdíl vydatnosti způsobený přítokem podzemní vody. Při termometrii se vychází z toho, že podzemní voda obvykle vykazuje stabilnější hodnotu teploty po celý rok ve srovnání

s kolísavějšími teplotami povrchové vody [1]. Teplota podzemní vody se v přípovrchové zóně horninového prostředí blíží průměrné roční teplotě vzduchu a vzrůstá s hloubkou pod terénem v důsledku geotermálního gradientu. Tento teplotní kontrast vytváří ve vodotečích či recipientech anomálie v místech průniku podzemních vod [2], což lze detekovat pomocí tyčových teploměrů, kamer se snímáním v infračerveném termálním spektru (TIR) či běžnými konduktometry s teplotním čidlem, a to jak povrchovým, tak dálkovým průzkumem Země [3]. Teplotní kontrast lze chápat jako přirozený nekonzervativní stopovač. Jeho výhoda spočívá zejména ve všudypřítomnosti, přirozeném výskytu, neinvazivnosti a snadné detekci, což umožňuje rychlé mapování [4]. Na rozdíl od konzervativních stopovačů, jejichž koncentrace přímo souvisí se směřovacími poměry [5], je kvantitativní interpretace tepelných stop z hlediska stanovení vydatnosti nepřímá a složitá [6]. Změřená teplota stopy je totiž ovlivněna teplotou podzemní vody, povrchové vody, stupněm mísení s povrchovou vodou a výměnou tepla s atmosférou, jež je závislá mj. na tepelné kapacitě vody. Z tohoto důvodu je termometrie považována za kvalitativní či v některých případech semikvantitativní metodu.

Účinnost detekce teplotní stopy přímo souvisí s velikostí teplotního rozdílu (ΔT). Termometrické průzkumy jsou v podmínkách ČR nejúčinnější v zimě (*teplá podzemní voda a studená vodoteč či recipient*). Důležité jsou však i denní výkyvy. Mapování prováděné v noci nebo při úplné oblačnosti minimalizují rušivé účinky [3]. Na detekci má vliv i sezonní variabilita vydatnosti vodních toků, kdy při vyšším průtoku stoupá mez detekce, tj. klesá citlivost. Obecně lze lepších výsledků dosáhnout při bezvětří a v období bez nedávných srážek, které homogenizují teplotu sloupce vody. Na výměnu tepla má vliv kondukce, konvekce, radiace a také transportní procesy, tj. dominantně advekce, kdy dochází k transportu tepla s pohybem podzemní, resp. povrchové vody [6]. Druhým hlavním transportním mechanismem je tepelná disperze, jež vzniká v důsledku rozdílných rychlostí proudění [7]. I přesto, že je v modelech někdy zjednodušována nebo zanedbávána, zejména při nízkých rychlostech proudění, může být disperze důležitá pro přesnou interpretaci transportních procesů tepla [7]. Kombinace těchto procesů určuje velikost, tvar a intenzitu tepelné stopy. Při kvalitativním vyhodnocení se předpokládá, že intenzita a velikost teplotní stopy vypovídají o vydatnosti či teplotě pramene (větší či kontrastnější stopa $\approx$ vyšší vydatnost, resp. teplota vtoku) [6]. Tvar tepelné stopy je ovlivněn směrem proudění a dynamikou míchání [8]. Při kvantifikaci měření je problémem zmíněná nekonzervativnost „stopovače“. Je totiž nutné zvážit mocnost vodního sloupce nad vývěrem, míru míchání, rychlost proudění povrchové vody či vliv atmosférických podmínek. Pro kvantifikaci neexistuje jednotná kalibrace a je nutno každou lokalitu posuzovat individuálně [9, 10].

Zkušenosti s využitím termometrie při vyhledávání skrytých pramenů jsou bohaté jak v zahraničí, tak i v českém prostředí. V oblasti přírodních léčivých zdrojů se však stále nerozšířila do běžné praxe a zkušenosti s její aplikací jsou kusé. Termometrie byla využita např. v rámci mapování tektonické stavby západních Čech, včetně širokého okolí Mariánských Lázní. Úkol probíhal v letech 1984 až 1988 a termometrováno bylo např. Pottovo údolí v Mariánských Lázních [11]. Výsledky však měly sloužit spíše pro ověření hypotézy, že vydatné výrony podzemních vod jsou predisponovány tektonicky, zatímco problematice přírodních léčivých zdrojů se autoři prakticky nevěnovali, a to údajně i z důvodu nízké citlivosti detektorů. V Karlových Varech zase probíhaly tzv. komisní prohlídky za pomoci termometrie v roce 1980 [12], ale účelem nebyla snaha o kvantifikaci měření, nýbrž rekognoskace lokality z důvodu probíhajících sanačních prací. Měření z prohlídek v Karlových Varech nejsou dostupná.

2 CÍLE

Hlavním cílem termometrického průzkumu jak v Mariánských Lázních, tak v Karlových Varech (*Obr. 1*) bylo nalézt dosud neznámé vývěry minerálních vod. Znalost distribuce minerálních pramenů v prostoru je klíčová pro vhodné nastavení preventivní i reparativní ochrany, a to i pro již zachycené a exploatované vývěry. Dílčím cílem bylo popsat specifika využití termometrie při průzkumu vývěrů minerálních vod, přičemž byly záměrně termometrovány dvě kontrastní lokality, aby se ověřila aplikovatelnost v širším spektru podmínek. Oblast Mariánských Lázní je značně prostorově rozsáhlá a charakteristická pro své vývěry studených minerálních vod obohacených o volné rozpuštěné (dále v. r.) CO_2 , zatímco oblast Karlových Varů je úzce omezená a typická pro vývěry vod termálních. Mariánské Lázně byly vybrány proto, že vyhledávání studených minerálních pramenů zvyšuje nároky na použitou techniku, což v konečném důsledku vede k vyšší vypovídající hodnotě výsledků testování termometrie při vyhledávání minerálních pramenů. Podcíle byly pro každou lokalitu stanoveny samostatně.



Obr. 1. Zájmové oblasti s uskutečněným termometrickým průzkumem

Fig. 1. Studied areas with thermometric survey

2.1 Podcíle pro lokalitu Mariánské Lázně

Podcílem bylo nově nalezené vývěry minerální vody využít pro odběr vzorků a díky tomu pochopit prostorové zákonitosti složení. Současná představa o hydrochemické zonaci minerálek vychází pouze z údajů ze zachycených pramenů [13]. Význam nalezení dalších, méně vydatných, nezachycených minerálních pramenů, resp. vývěrů souvisí i s požadavkem Chráněné krajinné oblasti (CHKO) Slavkovský les evidovat a chránit prameny minerálních vod jako celek, bez ohledu na to, zda mají či nemají stanovená ochranná pásma. Bez znalosti lokalizace, fyzikálních a chemických vlastností nelze vyvěrající minerální vody účinně chránit. S tím souvisí i otázka tektonické predispozice chemismu a distribuce pramenů v prostoru.

2.2 Podcíle pro lokalitu Karlovy Vary

Podcílem termometrických měření v Karlových Varech bylo ověřit, zda je v současnosti přirozená i umělá těsnicí vrstva na dně koryta Teplé dostatečně účinná proti divokým vývěrům termy v nejnižších partiích údolí. Kvalita těsnění hrála vždy velkou roli v bezproblémové exploataci Vřídla, a tudíž bylo nutné zřidelní sedimentaci, která tvoří přirozenou těsnicí vrstvu, průběžně doplňovat o další umělé těsnicí prvky tak, aby nedocházelo k nežádoucím průvalům termální vody [14]. Umělé těsnění však nikdy nebylo dokončeno v celém prostoru koryta Teplé v centru vývěrové zóny. Tento prostor je tedy dodnes poznamenán řadou úniků termy i zřidelního plynu přímo do povrchového recipientu [15].

V případě významnějšího porušení těsnění dna koryta v okolí Vřídla nastává pokles vydatnosti nejbližších malých pramenů a dochází k odplynění centra struktury. Výsledek průzkumu bude sloužit jako výchozí materiál pro správce zdejších přírodních léčivých zdrojů.

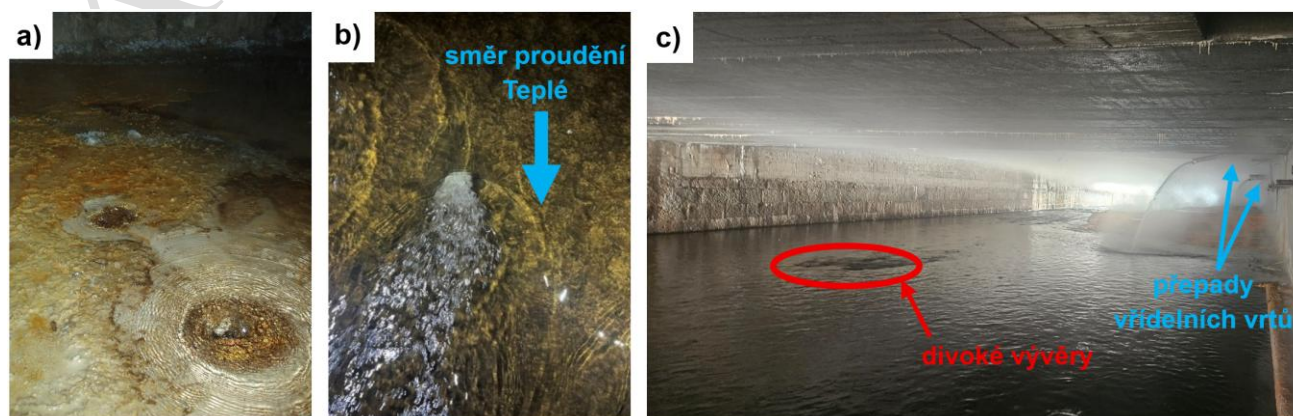
3 ZÁJMOVÉ OBLASTI

3.1 Mariánské Lázně

V Mariánských Lázních a okolí vyvěrá více než 100 minerálních pramenů, přičemž všechny spojuje vysoké proplynění CO_2 , nízká teplota od ± 7 do 12°C a nižší vydatnost od $0,0x$ do $0,x$ l/s. Prameny naopak od sebe odlišuje velmi proměnlivá celková mineralizace v rozmezí od $0,2$ do $12,0$ g/l a chemické složení [13, 16]. Na základě chemického složení lze vyčlenit čtyři hlavní skupiny pramenů s tím, že každá skupina je formována ve specifických litologických poměrech. První skupina je vázána na serpentinit, druhá na amfibolity, třetí pravděpodobně na zasáklou fosilní mineralizaci a čtvrtá je tzv. přechodová, v níž je chemismus ovlivňován kombinovanou litologií, příliš krátkým stykem s podložím nebo litologií, která nemá vyhraněný chemismus [16]. Z těchto obecných znalostí o zřidelní soustavě vycházelo navržení vhodné metodiky pro termometrický průzkum.

3.2 Karlovy Vary

Vývěry karlovarské termy s maximální teplotou $73,4^\circ\text{C}$ a celkovou mineralizací $6,4$ g/l a výrony zřidelního plynu jsou vázány na zhruba $1\,700$ m dlouhou a cca 150 m širokou vývěrovou zónu v granitech. Celková vydatnost zřidelní struktury činí cca 33 l/s. Střed vývěrové zóny z hlediska distribuce vydatnosti termy a zřidelního plynu leží v blízkosti historické pozice Vřídla, jež tvoří asi 95% vydatnosti všech karlovarských pramenů. Všechny termální prameny v Karlových Varech jsou chemicky totožné s výjimkou Hadího a Štěpánčina pramene, které mají nižší mineralizaci. Jednotlivé prameny se od sebe liší pouze teplotou a koncentrací CO_2 [17]. Teplota pramenů je ovlivňována především rychlostí výstupu termy po příhodných diskontinuitách k povrchu a do jisté míry též vzdáleností vývěru od středu struktury. Zcela specifickým jevem jsou ve vývěrové zóně karbonátové zřidelní sedimenty o mocnosti i více než 10 m [14, 18]. V Karlových Varech jsou divoké vývěry (Obr. 2) známy po staletí a měly vždy velký vliv na exploatované prameny. Příčiny divokých vývěrů v důsledku poruch v těsnění koryta jsou jak přírodní (eroze řeky, změny tlaku ve struktuře apod.), tak antropogenní (stavební zásahy, krenotechnické zásahy atd.) [19]. Režim karlovarských pramenů ovlivňují např. slapové síly [20]. Z těchto obecných znalostí o struktuře vycházelo nastavení vhodné metodiky pro termometrické mapování divokých pramenů.



Obr. 2. Divoké vývěry karlovarské termy; a) divoké vývěry ve starém suterénu Vřídla, b) divoké vývěry do koryta Teplé, c) celkový pohled pod přemostění s patrnými divokými vývěry

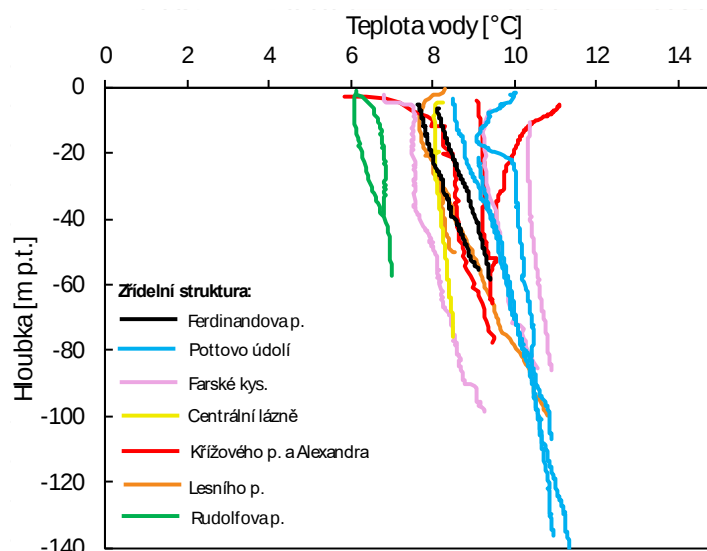
Fig. 2. Untapped „wild“ springs; a) springs in the old basement of the Vřídlo, b) wild springs in the Teplá riverbed, c) general view under the bridge with visible untapped springs

4 METODIKA

Pro účely publikace je za minerální vodu v případě Mariánských Lázní považována ta, která vykazuje koncentrace v. r. $\text{CO}_2 > 1 \text{ g/l}$, tj. jde o kyselku a v případě Karlových Varů ta, jež vykazuje teplotu $> 20^\circ\text{C}$, tj. jde o termu. Teplotní stopou je myšlena jakákoli teplotní anomálie detekovaná termokamerou. Novým nebo divokým vývěrem minerální vody je myšlena teplotní stopa, resp. anomálie, u níž byla identifikována zvýšená koncentrace v. r. CO_2 , tj. detekce přítomnosti Haertlovou třepací aparaturou (dále zkráceně Haertlovým přístrojem) nebo zvýšená teplota o minimálně $\sim 3^\circ\text{C}$ oproti požadované teplotě vody.

4.1 Mariánské Lázně

V zájmové oblasti (*Obr. 4*) byly nejprve dohledány vodoteče ze Základní báze geografických dat České republiky (ZABAGED). Samotný termometrický průzkum probíhal od ledna do března 2023 a k termometrii byla využita TIR kamera FLIR C5 (USA) umožňující měřit v rozsahu -20°C až $+400^\circ\text{C}$ se snímací frekvencí 8,7 Hz a rozlišením 240 x 320 pixelů v základním režimu nastavení, tj. s automatickou kalibrací. Sled činností po identifikaci teplotní stopy neznámého charakteru zahrnoval označení kolíkem, fotodokumentaci, GPS zaměření mobilním telefonem, dále měření konduktivity, teploty, hodnoty pH pomocí přístroje WTW Multi 340i se sondou TetraCon 325 a pH-Electrode SenTix 41 a nakonec vydatnosti a koncentrace v. r. CO_2 Haertlovým přístrojem. Ačkoli byly zaměřeny všechny nalezené teplotní stopy, odběr pro chemickou analýzu probíhal pouze u těch stop, u nichž byla zjištěna přítomnost v. r. CO_2 Haertlovým přístrojem, tedy u nových vývěrů minerální vody. Nejvýznamnějším novým vývěrům minerální vody dle vydatnosti a obsahu v. r. CO_2 byly přiděleny kromě identifikačního čísla i jména v souladu s názvy okolních pramenů. Pro lepší lokalizaci byly teplotní stopy v březnu až dubnu 2023 zaměřeny RTK (Real-Time Kinematic) GPS stanicí. Následně byla provedena interpretace a data konfrontována s teplotami a elektrickými konduktivitami již zachycených minerálních pramenů, a to s vědomím, že teplota vody v exploatovaných „*minerálových*“ vrtech roste s hloubkou průměrně o $1,6^\circ\text{C} / 100 \text{ m}$ (*Obr. 3*) a některé jímací objekty mají přetok, což interpretativnost ještě dále snižuje. Všechny nové vývěry minerální vody byly pravidelně sledovány do července 2024, aby se ověřilo, že nejsou přechodného charakteru.



Obr. 3. Změna teploty vody s hloubkou v exploatovaných vrtech na minerální vodu v jednotlivých zřídelních strukturách Mariánských Lázní (upraveno z [21])

Fig. 3. Change in water temperature with depth in exploited mineral water boreholes in individual spring structures of Mariánské Lázně (adapted from [21])

4.2 Karlovy Vary

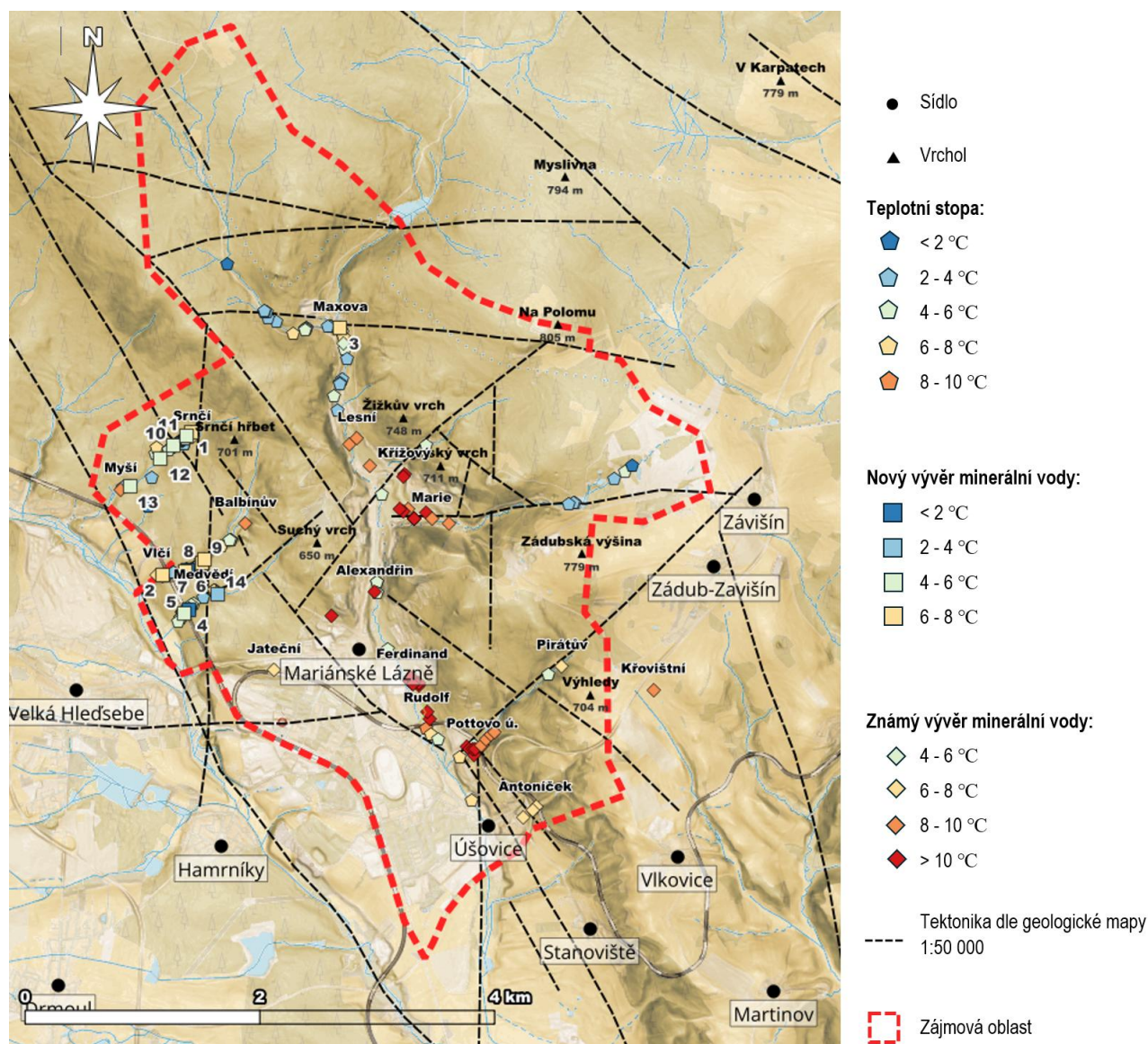
Metodika vyhledávání zdrojů termy byla přizpůsobena menšímu plošnému rozsahu území, vyšší teplotě pramenů a vyšším ředícím poměrům, neboť Teplou protéká cca 1,5 m³/s při vodním sloupci cca 0,4 m, což znemožňuje použití TIR kamery. Bylo využito bodového měření konduktometrem s teplotním čidlem v definované síti. K měření teploty a elektrické konduktivity byl použit přístroj Greisinger (Německo) G 1410, který umožňuje měření teploty od -5,0 do 105,0 °C s přesností ± 0,3 °C. Teplotní čidlo bylo obaleno izolační pěnou tak, aby měřilo pouze teplotu dna koryta Teplé. Termometrické profilování proběhlo na území o ploše cca 1 300 m² dne 11. září 2024. Pro potřeby profilování byla vytvořena pravidelná síť od Janského mostu po Vřídelní lávku, tj. v místech bez dodatečného umělého těsnění. Odstup mezi měřenými body byl 5, resp. 2 či 1 m v místech s očekávanými vývěry termy. V bodech s anomálně vysokou teplotou bylo přesné místo vývěru termy ručně dohledáno a lokalizováno. Následné prostorové vyhodnocení bylo provedeno pomocí metody deterministické interpolace IDW (Inverse Distance Weighting). Tato metodika byla zvolena s vědomím toho, že možný vývěr může být lokalizován i mimo měřené body. Termometrie byla doplněna o měření průtoku Teplé před vtokem a po výtoku ze zájmové oblasti pomocí přístroje FlowTracker. Tato měření měla pomoci bilancovat celkovou vydatnost divokých pramenů.

5 VÝSLEDKY

5.1 Mariánské Lázně

Termometrií 20 km vodních toků v zájmové oblasti bylo nalezeno 14 nových vývěrů minerální vody, přitom celkově bylo zaregistrováno 131 teplotních stop (Obr. 4). Teplotní stopy měly nejčastěji eliptický tvar, který byl protažen ve směru proudění povrchové vody. V případě nových vývěrů minerální vody bylo mnohdy pozorováno vyvěrání nad korytem vodoteče, kdy docházelo k přelivu přes okraj pramenních sedimentů (Obr. 5a). Nové vývěry minerální vody byly nalézány v oblasti nerovnoměrně s tím, že až na jeden výskyt (P013A Chudá) byla lokalizace omezena pouze na její

západní část (Obr. 4). Teplotní stopy se podařilo nalézt i v úplném centru Mariánských Lázní, kde byla na dně částečně vypuštěného Labutího jezírka změřena stopa o teplotě 5 °C a konduktivitě 1 725 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nepodařilo se však změřit obsah v. r. CO_2 Haertlovým přístrojem, tudíž stopa není zařazena mezi nové vývěry minerální vody.



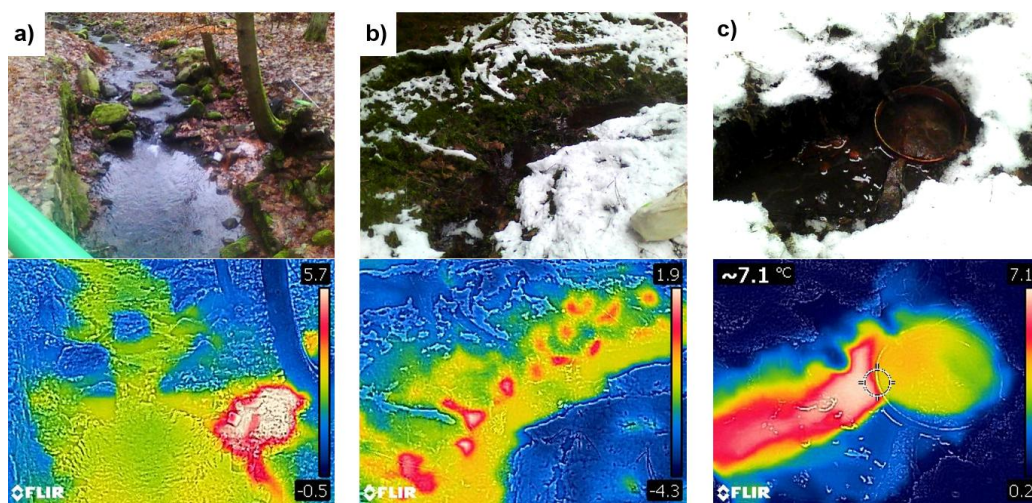
Obr. 4. Termometrické měření v Mariánských Lázních

Fig. 4. Thermometric measurements in Mariánské Lázně

1 = P004/P069 Žabí, 2 = P011, 3 = P013A Chudá, 4 = P035, 5 = P037D Ježčí, 6 = P045A, 7 = P047 Mravenčí, 8 = P053 Šnečí, 9 = P054 Sýkorčí, 10 = P059B, 11 = P067A, 12 = P071, 13 = P073, 14 = P116 (Zdroj: mapový podklad: DMR 5G)

Díky termometrování v mrazech bylo možné lokalizovat teplotní stopy již od 1 °C absolutní teploty (Obr. 5b). Mnohé nové vývěry minerální vody doprovázely okry železa, výrony plynného CO_2 , organoleptické vlastnosti a nezamrzání. Pro všech 14 nových vývěrů minerální vody shodně platí, že vykazují hodnotu pH nižší než 7. U některých teplotních stop nebylo možné měřit hodnoty v. r. CO_2 z důvodu velkého ředění povrchovou vodou. I proto nelze vyloučit, že skutečný počet vývěrů

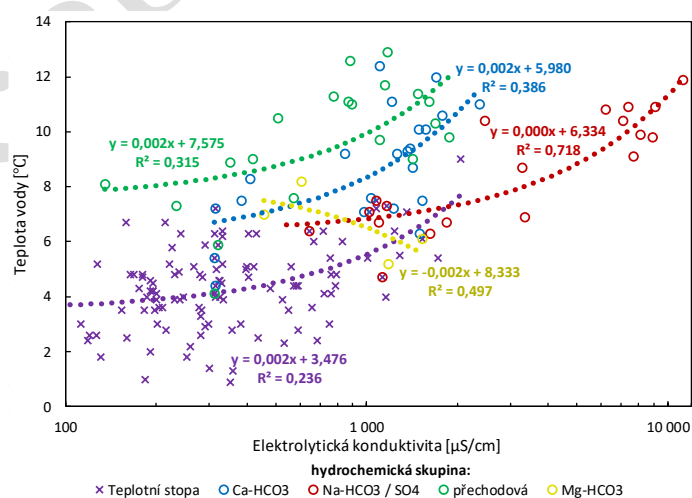
minerálních vod bude vyšší. Celá vývěrová soustava je sice vázána generelně na mariánskolázeňské zlomové pásmo, ale vliv lokální tektoniky na distribuci vývěrů se zjistit nepodařilo (viz Obr. 4).



Obr. 5. Snímky termokamerou; a) Lucčina kyselka, b) drobné vývěry v říční nivě, c) Žabí kyselka vyvěrající mimo jímání

Fig. 5. Thermal camera images; a) Lucčina kyselka, b) small springs in the river floodplain, c) Žabí kyselka springing outside the spring catchment

Doplňkovým měřením konduktivity teplotních stop nebyla zjištěna dobrá korelace s teplotou (Obr. 6 ***Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.***). Mírně lepší korelaci vykazuje soubor dat nových i stávajících vývěrů minerální vody rozdělených do hydrochemických skupin. Obecně však platí, že teplota vody není vhodným prekurzorem pro odhad konduktivity. Nejvyšší koeficient determinace, tj. $R^2 = 0,718$, vykazuje skupina Na-HCO₃ / SO₄, ostatní skupiny mají determinací koeficient výrazně nižší ($R^2 = 0,315$ a $0,386$). Jediná skupina Mg-HCO₃ ($R^2 = 0,497$) vykazuje klesající teplotu s rostoucí konduktivitou. Soubor dat je však omezen pouze na čtyři vývěry. Měřením vydatnosti u nových vývěrů minerální vody bylo zjištěno, že vyšší vydatnost vývěru vede v mrazech k vyšší teplotě vody.



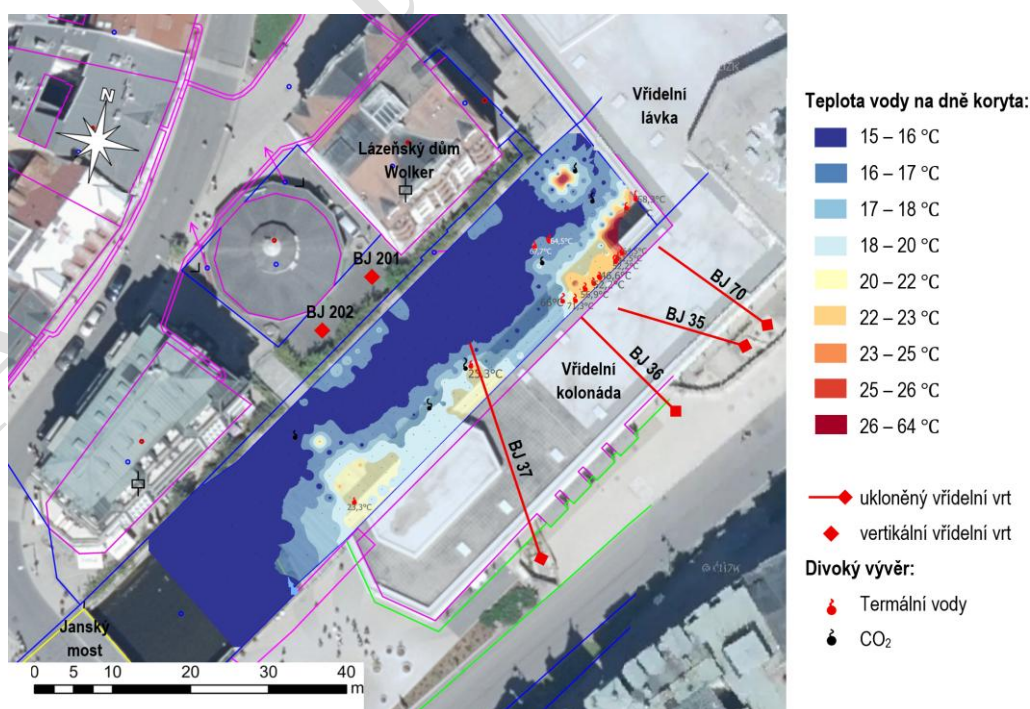
Obr. 6. Vztah teploty vývěru a elektrické konduktivity pro teplotní stopy a všechny známé vývěry (nové i stávající) rozdělené dle hydrochemických skupin v Mariánských Lázních

Fig. 6. Relationship between seepage temperature and conductivity for temperature anomalies and all known seepages (new and existing) divided by hydrochemical groups in Mariánské Lázně

TIR kamera se nad rámec původního záměru ukázala jako vhodná pomůcka pro ověření stavu zachycení vývěru minerální vody. Z Obr. 5c je patrné, že Žabí kyselka, jež byla nově objevena a provizorně zachycena, vyvěrá mimo jímání. Opakovaným sledováním nových vývěrů minerální vody bylo zjištěno, že dochází ke značným sezonním změnám teploty i vydatnosti s tím, že nejnižší teploty jsou zjišťovány v zimě a nejvyšší v létě, zato hodnoty konduktivity a hodnoty pH zůstávají téměř stabilní. Ze 14 nových vývěrů minerální vody jich bylo k chemické analýze odebráno 11 a výsledky analýz budou využity pro budoucí revizi ochranných pásem v rámci CHKO Slavkovský les.

5.2 Karlovy Vary

Termometrický průzkum doplněný o konduktometrii řečiště Teplé v části kolem Vřidelní kolonády prokázal výskyt 14 divokých vývěrů termální minerální vody na ploše 1 300 m². Z hlediska prostorového rozložení jsou divoké vývěry soustředěny při pravém břehu koryta Teplé a jejich nejvyšší koncentrace je v úrovni lázeňského domu Wolker. Ve středu proudnice nebo mimo úsek lázeňského domu Wolker byly zjištěny pouze čtyři vývěry. Fakt, že jsou divoké vývěry nalézány zejména při pravém břehu koryta Teplé naproti domu Wolker, je v souladu s tím, že se současná (BJ 35-37, 70) i historická jímání Vřídla nacházela (a stále nacházejí) právě na pravém břehu. Nejvyšší koncentrace divokých minerálních pramenů je v místech počvy ukloněných jímacích Vřidelních vrtů BJ 35, BJ 36 a BJ 70. Divoký vývěr minerální vody byl nalezen i nad čtvrtým Vřidelním vrtem BJ 37, byť jeho teplota činí pouze 23,3 °C. I přesto, že nebylo možné plně zamezit kontaktu povrchových vod s čidlem na teplotu a konduktivitu, byla nejvyšší zaznamenaná teplota divokého vývěru 71,3 °C a nejvyšší naměřená konduktivita 7 470 µS/cm, což jsou hodnoty téměř totožné s Vřídlem. Nad rámec původního zaměření bylo vizuálně zjištěno šest hlavních míst úniku plynného CO₂ skrz vodní sloupec Teplé.

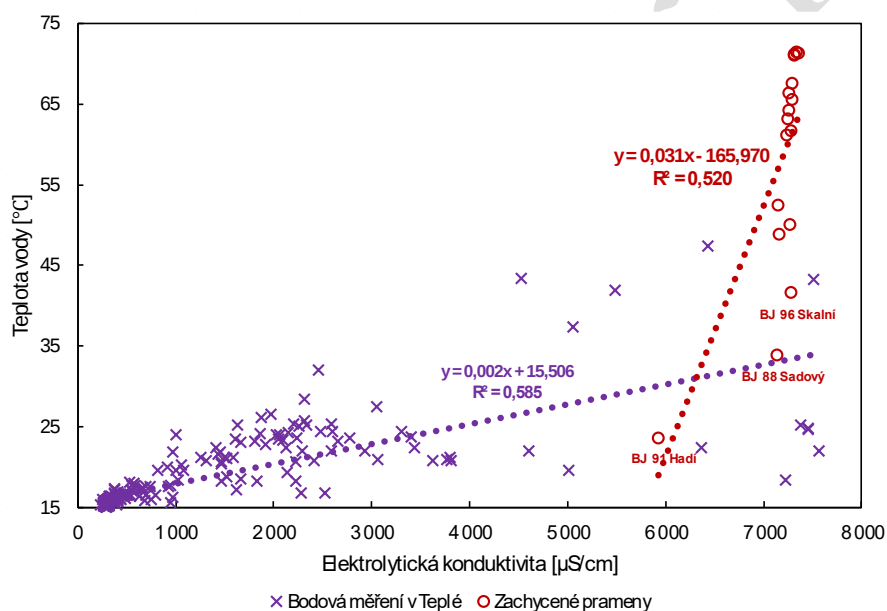


Obr. 7. Termometrické měření v Karlových Varech

Fig. 7. Thermometric measurements in Karlovy Vary

Díky známé dlouhodobé změně vydatnosti struktury a díky tlakovým změnám na regulačních vrtech bylo odhadnuto, že v současné době vyvěrají do koryta Teplé divoké vývěry o sumární vydatnosti ~ 2 až 3 l/s, včetně neznámého množství plynného CO_2 . Sumární vydatnost divokých vývěrů byla pokusně bilancována i pomocí přístroje FlowTracker, ale vzhledem k přesnosti $\pm 10\%$ nepřineslo měření očekávané výsledky.

Analýzou dat byla zjištěna korelace mezi konduktivitou vody v definované síti a teplotou s koeficientem determinace $R^2 = 0,585$. Koeficient je sice velmi podobný i pro již zachycené prameny ($R^2 = 0,520$), rozložení hodnot je však zcela odlišné. Hadí pramen je totiž jediný zachycený pramen, který má zřetelně odlišnou konduktivitu. Jde o nejvzdálenější vývěr od středu struktury, o pramen s nejvyšší koncentrací v. r. CO_2 a je také nejchladnější (Obr. 8). Lze ho tak vyloučit ze souboru dat. Analogicky k divokým vývěrům minerálních vod lze tedy konstatovat, že fakticky teplota vody není vhodným prekurzorem pro určení konduktivity, neboť v případě zamezení ředění Teplou bude konduktivita pro všechny nové divoké vývěry shodná, tj. $\pm 7\,300\ \mu\text{S/cm}$, zatímco teplota vody se bude lišit v závislosti na rychlosti výstupu termy.



Obr. 8. Vztah bodových měření teploty vody na dně řečiště Teplé a zachycených pramenů na elektrické konduktivitě

Fig. 8. Relationship between point measurements of water temperature at the bottom of the Teplá riverbed and captured springs on conductivity

6 DISKUZE

Nastavení metodiky termometrického průzkumu musí reflektovat požadavek na charakter výsledku termometrického průzkumu. Typologie sběru dat v Mariánských Lázních byla přizpůsobena značné rozlehlosti oblasti, zatímco v Karlových Varech vysokému teplotnímu gradientu mezi povrchovou a termální vodou. Obě metodiky se ukázaly být velmi účinné a obě vedly k vyhledání vývěrů minerální vody.

Výsledky průzkumu mají na obou lokalitách přesah do praktické roviny, a to konkrétně v případě Mariánských Lázní pro Agenturu ochrany přírody a krajiny CHKO Slavkovský les, jež se snaží objektivizovat přístup k ochraně i méně významných vývěrových struktur minerálních vod. V případě Karlových Varů jsou zjištění důležitá pro správce přírodních léčivých zdrojů (Správa přírodních léčivých zdrojů a kolonád), který výsledky implementuje do projektu těsnících prací v blízkosti Vřídelní kolonády. Vysoká sumární vydatnost divokých pramenů do koryta řeky Teplé může souviset s nedávnou rekonstrukcí části Vřídelní kolonády v letech 2019 až 2023, jež vlivem tlakových změn divoké vývěry oživila.

Přestože se termometrická měření, ať už pomocí TIR kamery, či teplotní sondou, ukázala být velmi účinným nástrojem pro vyhledávání výronů vody, resp. pro změření v. r. CO₂ vývěrů minerálních vod, je nutné připomenout, že se nepodařilo u všech zjištěných teplotních stop v Mariánských Lázních provést měření Haertlovým přístrojem vlivem nemožnosti odstítnit okolní vodoteče. Celkový počet nových vývěrů minerálních vod v souboru 131 teplotních stop tedy může být vyšší, což je důvod, proč jsou všechny teplotní stopy zahrnuty do výsledků studie. Nepoměr mezi počtem zjištěných teplotních stop a počtem potvrzených minerálních pramenů je způsoben zejména tím, že výrony prostých vod jsou mnohem častější, a to i v podmínkách Mariánských Lázní. A i přesto, že jsou vývěry minerálních pramenů v mrazech obvykle teplejší, bylo postupováno v souladu s metodikou, kdy byly označovány všechny stopy, které převyšují pozadí o ~ 3 °C. Nezachycené výrony totiž mohly být ředěny povrchovou vodou, což identifikaci znesnadňuje. V Karlových Varech bylo limitujícím faktorem měření v síti s odstupem 1 až 5 m, což jistě vedlo k neidentifikaci některých vývěrů vlivem pozice mimo měřený bod. Řešením tohoto problému nebylo kontinuální měření teploty, protože odezva čidla nebyla dostatečně rychlá. Zároveň, a to i přes snahu minimalizovat další rušivé vlivy, je třeba zdůraznit, že v případě Mariánských Lázní nebylo možné docílit zcela shodných meteorologických podmínek, jako jsou denní cykličnost teplot, obleva aj., pro celou dobu termometrického průzkumu.

Srovnání nových výsledků měření s daty z osmdesátých let jak v Mariánských Lázních, tak v Karlových Varech ukazují, že díky moderním technologiím lze zvýšit úspěšnost průzkumu. Zatímco autoři studie realizované v letech 1984 až 1988 v širokém okolí Mariánských Lázní docházejí k rozporuplným výsledkům, průzkum v letech 2023 až 2024 již s úspěchem mnohé vývěry lokalizoval. Tehdejší termometrický průzkum totiž probíhal bez využití TIR kamery, která by celý proces sběru dat zrychlila, zpřesnila a zlevnila. Průzkum v roce 1980 v Karlových Varech byl spíše rekognoskačního charakteru, tudíž závěry jeho autorů jsou pouze kvalitativní – byly např. nalezeny úniky termy po obvodu zárubnic vrtů v řečišti.

Kvantifikace vydatnosti se z termometrických dat ani z doplňkových konduktometrických dat nepodařila. Připomeňme, že v Mariánských Lázních jde o vývěry minerální vody s velmi proměnlivou konduktivitou, ale téměř shodnou teplotou, naopak v Karlových Varech jde o prameny téměř shodné konduktivity, avšak odlišné teploty. A zatímco v Karlových Varech roste s hloubkou jímání minerální vody pouze teplota, v Mariánských Lázních zejména konduktivita, což bylo potvrzeno např. ve Ferdinandově zřídelní struktuře [16]. Skutečnost, že mariánskolázeňské prameny mají podobnou teplotu, by mohla usnadnit kvantifikaci vydatnosti, vyžadovalo by to však ideální podmínky, jež byly zmíněny v úvodu. Následně by bylo možné – v případě paralelního měření konduktivity – dokonce dopočíst konduktivitu vývěru pomocí směšovací rovnice. V rámci studie byl ověřován vztah mezi konduktivitou a teplotou, výsledky jsou však rozporuplné. Korelace mezi konzervativní konduktivitou a nekonzervativní teplotou totiž přináší značná úskalí, a to i přesto, že v podmínkách studie nejde o

dva nezávislé parametry, což dokládají data ze zachycených pramenů (*Obr. 6*). V Karlových Varech je navíc problematická neznámá teplota samotného vývěru do koryta. To je způsobeno odlišnou rychlostí výstupu termy k povrchu, do jisté míry též vzdáleností od centra vývěrové zóny, a tudíž i hloubkou jímání. I proto v případě zachycení malých pramenů vrty (např. Skalní, Mlýnský, Sadový) došlo v minulosti ke zvýšení teploty pramenů, jelikož se vytvořila preferenční cesta, která zkrátila dobu zdržení v horninovém prostředí [17].

7 ZÁVĚR

Výzkum se věnoval využití termometrie jako efektivního nástroje pro vyhledávání vývěrů minerální vody. Tuto metodu však nelze považovat za samonosnou při vyhledávání minerálních pramenů a je vhodné ji rozšířit např. o měření v. r. CO₂ či konduktivity. Termometrie byla aplikována ve dvou kontrastních lokalitách: v Mariánských Lázních s chladnými prameny a v Karlových Varech s prameny termálními. V Mariánských Lázních se TIR kamerou podařilo vyhledat 14 nových, málo vydatných vývěrů minerálních vod. Lze konstatovat, že samotná termometrie netermálních proplyněných pramenů (< 20 °C) jednoznačně neurčí přítomnost vyvěrající minerální vody, na druhé straně v kombinaci s měřením Haertlovým přístrojem, konduktometrem a pH metrem jde o neúčinnější a též nejlevnější způsob vyhledávání i málo vydatných vývěrů kyselých. Nutno podotknout, že termometrie je přirozeně aplikovatelná i pro vyhledávání výronů neminerálních vod. Výsledky budou předloženy Správě CHKO Slavkovský les za účelem evidence a lepší ochrany minerálních vod v oblasti.

Pro průzkum v korytě Teplé v Karlových Varech byla zvolena metoda bodového měření konduktometrem s integrovaným teplotním čidlem v pravidelné síti. Termometrická analýza prokázala výskyt 14 divokých vývěrů termální vody v korytě Teplé na ploše 1 300 m², jež dosahují teplot až 71,3 °C a konduktivity až 7 470 μS/cm. Celková vydatnost divokých vývěrů v zájmovém území byla odhadnuta na ~ 2 až 3 l/s. Výsledky termometrie jsou klíčovým podkladem pro plánované sanační práce v řečišti Teplé. Za žádoucí lze považovat zopakování měření po uskutečnění sanace k ověření její účinnosti.

Termometrie je vhodná pro rychlé mapování interakčních zón podzemních a povrchových vod, zejména díky své neinvazivnosti. Úspěšnost metody závisí na optimálním načasování měření (denní a roční periodičita) a velikosti teplotního rozdílu (ΔT) mezi podzemní a povrchovou vodou. Kvantitativní interpretace tepelných stop z hlediska průtoku je komplikovaná, jelikož teplota je nekonzervativním stopovačem. Pro kvantifikaci je nutná kalibrace pro dané místo a podmínky. Výzkum potvrdil, že i přes obecnou nemožnost kvantifikace je termometrie vhodná pro kvalitativní zhodnocení skrytých pramenů. Aplikace v oblasti minerálních vod, jak ukázaly obě části studie, je velmi efektivní, avšak vyžaduje pečlivé zvážení lokálních podmínek pro volbu správné metodiky. Do budoucna lze očekávat, že se budou zvyšovat citlivost i obnovovací frekvence TIR senzorů, jejich cenová dostupnost, množství přídavných senzorů (hyperspektrálních), zároveň že se zdokonalí algoritmy pro korekci atmosféry, měření emisivity, využití umělé inteligence a machine learningu, resp. že se bude zdokonalovat fúze s daty z DPZ, zejména pomocí dronů, a dojde ke zjednodušení realizace časoprostorového monitorování, což bude umožňovat širší využití v hydrologii i hydrogeologii.

PODĚKOVÁNÍ

Výzkum realizovaný v rámci projektu „Centrum lázeňského výzkumu“ je financován z prostředků Fondu pro spravedlivou transformaci (JTF) prostřednictvím projektu č. CZ.10.01.01/00/22_001/0000261.

LITERATURA

- [1] ANDERSON, M. P. Heat as a Ground Water Tracer [on-line]. *Groundwater*. 2005, 43(6), s. 951–968. ISSN 1745-6584. Dostupné z: <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x>
- [2] CONSTANTZ, J. Heat as a Tracer to Determine Streambed Water Exchanges [on-line]. *Water Resources Research*. 2008, 44(4). [citováno 2025-12-05]. ISSN 1944-7973. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2008WR006996>
- [3] WATTS, C. L., HATCH, C. E., WICKS, R. Mapping Groundwater Discharge Seeps by Thermal UAS Imaging on a Wetland Restoration Site [on-line]. *Frontiers in Environmental Science*. 2023, 10. ISSN 2296-665X. [citováno 2025-12-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.946565>
- [4] MORIDNEJAD, M., SHAMSELDIN, A. Y., MELVILLE, B. W., BAALOUSHA, H. The Potential to Investigate the Interaction of Surface Water and Groundwater in New Zealand Using Remote Sensing Technique. In: *Water New Zealand Annual Conference & Expo* [on-line]. nedatováno. Dostupné z: https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=948
- [5] BANERJEE, D., GANGULY, S. A Review on the Research Advances in Groundwater–Surface Water Interaction with an Overview of the Phenomenon [on-line]. *Water*. 2023, 15(8), 1552. ISSN 2073-4441. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/w15081552>
- [6] DEITCHMAN, R. S., LOHEIDE II, S. P. Ground-Based Thermal Imaging of Groundwater Flow Processes at the Seepage Face [on-line]. *Geophysical Research Letters*. 2009, 36(14). ISSN 1944-8007. [citováno 2025-12-05]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2009GL038103>
- [7] REN, J., CHENG, J., YANG, J., ZHOU, Y. A Review on Using Heat as a Tool for Studying Groundwater–Surface Water Interactions [on-line]. *Environmental Earth Sciences*. 2018, 77(22), 756. ISSN 1866-6299. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7959-4>
- [8] ANTONELLI, M., KLAUS, J., SMETTEM, K., TEULING, A. J., PFISTER, L. Exploring Streamwater Mixing Dynamics via Handheld Thermal Infrared Imagery [on-line]. *Water*. 2017, 9(5), 358. ISSN 2073-4441. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/w9050358>
- [9] MALLAST, U., SCHWONKE, F., GLOAGUEN, R., GEYER, S., SAUTER, M., SIEBERT, C. Airborne Thermal Data Identifies Groundwater Discharge at the North-Western Coast of the Dead Sea [on-line]. *Remote Sensing*. 2013, 5(12), s. 6 361–6 381. ISSN 2072-4292. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/rs5126361>
- [10] SCHMIDT, C., CONANT, B., BAYER-RAICH, M., SCHIRMER, M. Evaluation and Field-Scale Application of an Analytical Method to Quantify Groundwater Discharge Using Mapped Streambed Temperatures [on-line]. *Journal of Hydrology*. 2007, 347(3–4), s. 292–307. ISSN 0022-1694. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.08.022>
- [11] ŠKUTHAN, B., SUCHOMEL, J. *Geofyzikální průzkum mariánskolázeňské zřidelní oblasti v prostoru Pottovo údolí – Prameny – Nová Ves. Závěrečná zpráva. J06648300*. Praha: Geofyzika Brno, závod Brno, 1988.
- [12] VYLITA, B. *Režimní sledování vybraných objektů Karlovy Vary – Vřídlo. Dílčí zpráva 10. N0375005613KH*. Karlovy Vary: Stavební geologie Praha, podnikové ředitelství, 1981.

- [13] DOVOLIL, M. *Hydrogeologie oblasti kyselek v Mariánských Lázních a v jejich širokém okolí. Disertační práce*. Praha: Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, 1959.
- [14] VYLITA, T. Vřídelní kolonáda v Karlových Varech z hledisek balneotechnických a přírodovědných. *Arnika*. 2020, 1, s. 20–25. ISSN 1804-1914.
- [15] VYLITA, B. *Zákonitosti režimu karlovarských terem. Disertační práce*. Praha: Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, 1967.
- [16] LANDA, D.-A. *Hydrochemická zonace minerálních vod v oblasti Mariánských Lázní. Diplomová práce [on-line]*. Praha: Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, 2024. Dostupné z: <https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/194149/120487127.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [17] VYLITA, B. *S geologem po Karlových Varech*. Praha: Ústřední ústav geologický, 1990. ISBN 80-7075-019-7.
- [18] VYLITA, T. Vřídlovce a sintry karlovarských terem. *Arnika*. 2018, 1, s. 8–12. ISSN 1804-1914.
- [19] VYLITA, B., PĚČEK, J. Průzkum karlovarské zřídelní struktury. *Geologický průzkum*. 1981, 23(270), s. 161–164.
- [20] VYLITA, T. *Slapové síly a jejich projevy v režimu minerálních vod. Diplomová práce*. Praha: Univerzita Karlova, Přírodovědecká fakulta, 1986.
- [21] LANDA, D.-A. *Geotermální potenciál minerálních vod v oblasti Mariánských Lázní a jeho využitelnost na vybraných pozemcích. Studie*. Karlovy Vary: Institut lázeňství a balneologie, v. v. i., 2025.

Autoři

Mgr. David-Aaron Landa^{1, 2}

landa@i-lab.cz

RNDr. Tomáš Vylita, PhD.¹

vylita@i-lab.cz

Ing. Pavel Kalina¹

kalina@i-lab.cz

Mgr. Jakub Mareš, PhD.²

maresj15@natur.cuni.cz

doc. Mgr. Viktor Goliáš, PhD.²

wiki@natur.cuni.cz

Mgr. Petr Nakládal²

petr-nakladal@email.cz

¹ Institut lázeňství a balneologie, v. v. i., Karlovy Vary (Česká republika)

² Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha (Česká republika)

APPLICATION OF THERMOMETRY IN THE EXPLORATION OF MINERAL SPRINGS – MARIÁNSKÉ LÁZNĚ AND KARLOVY VARY

LANDA, D.-A.^{1,2}; VYLITA, T.¹; KALINA, P.¹; MAREŠ, J.²; GOLIÁŠ, V.²; NAKLÁDAL, P.²

¹ Institute of Spa and Balneology v. v. i., Karlovy Vary (Czech Republic)

² Faculty of Science, Charles University, Prague (Czech Republic)

Keywords: thermometry – mapping of mineral springs – Mariánské Lázně – Karlovy Vary

Thermometry is a non-invasive technique suitable for detecting hidden mineral water springs. Its applicability was evaluated in two contrasting hydrogeological settings: Mariánské Lázně, characterized by cold, CO₂-rich mineral springs, and Karlovy Vary, dominated by thermal springs.

In Mariánské Lázně, the objective was to identify previously undocumented springs. Ground thermometry with a thermal infrared (TIR) camera proved highly effective. The survey was supplemented by measurements of free dissolved CO₂ (Härtl tube), temperature, electrical conductivity, and pH. A total of 131 thermal anomalies were recorded along 20 km of watercourses, 14 of which were confirmed as new mineral springs. The actual number of springs is likely higher, as CO₂ analyses are limited in springs strongly diluted by surface water.

In Karlovy Vary, the aim was to localize and quantify wild thermal springs (up to 73.4 °C) within the bed of the Teplá River, which influence the equilibrium of the entire spring system. TIR imaging was ineffective due to rapid dilution by river water. Therefore, point temperature measurements were performed in a regular grid over a 1,300 m² area of the riverbed. This approach revealed 14 untapped so-called *wild* thermal springs. Flow balance analyses and electrical conductivity measurements were also carried out. The total discharge of the wild springs was estimated at 2–3 L/s.

The results confirm that thermometry is a flexible and efficient tool for the qualitative assessment of mineral water springs. Methodological adjustments to local hydrogeological and hydrological conditions are essential for reliable outcomes. Both case studies provide data relevant to the protection, exploitation, and rehabilitation of mineral water resources, and demonstrate the potential of thermometry for rapid and effective spring mapping.