

VODOHOSPODÁŘSKÉ TECHNICKO-EKONOMICKE INFORMACE

VTEI / 2024 / 5

TÉMA

Podzemní voda nad zlato

- 4 / Odběry podzemních vod znatelně zmenšují průtoky menších vodních toků v období sucha
- 22 / Problematika starých podzemních vod v hydrogeologických rajonech 4410 Jizerská křída pravobřežní a 4522 Křída Liběchovky a Pšovky
- 48 / Rozhovor s doc. RNDr. Zbyňkem Hrkalem, CSc., hydrogeologem, spisovatelem a popularizátorem hospodaření s vodou

Psali jsme před 60 lety

Ve VTEI č. 6 z roku 1964 psal Ing. Jaroslav Sekera z Odboru vodohospodářských staveb (OVHS) v Kroměříži o novém těsnicím vodárenském materiálu – měkčeném novoduru, PVC. Příspěvek tehdy lektoroval Dr. Ing. J. Kurkat z Pražských vodáren.

V provozu vodovodů, zejména u armatur trubních rozvodných sítí, jsou stále poruchy, které vznikají vadným těsnicím materiálem na šoupátkách, hydrantech, ve spojích apod. Poruchy v netěsnosti hlavních a úsekových šoupátek a hydrantů způsobují vysazení dodávky vody pro obyvatelstvo i průmysl.

Jako těsnicího materiálu se používá kůže a pryže. O náhradě tohoto materiálu uvažovali zaměstnanci OVHS v Kroměříži a navrhli materiál z měkčeného novoduru, PVC. Měkčený novodur v tabulích ve světle žluté barvě je velmi vhodným a odolným těsnicím materiálem a v praxi se osvědčil. Nejběžněji používaná tloušťka ploten pro vodárenské armatury je 3–4 mm. Těsnění se lehce vyřezává, a to dokonce snadněji než z pryžových ploten a kůže. Užívá se ho pro potrubí s rozvodem studené vody i jako těsnění kohoutů (gumiček). Užíváme ho i jako těsnění mezi přírubami.

Používání měkčeného novoduru nám zajišťuje delší trvanlivost a 100% těsnost. OVHS Kroměříž má v zemi zabudované armatury a potrubí s těsněním z měkčeného novoduru již tři roky na velmi choulostivých místech, aniž by se vyskytly jakékoliv poruchy v těsnosti. Úspory, které vznikají z používání tohoto těsnicího materiálu, jsou značné a jsou dlouhodobé. Je to menší počet poruch a menší ztráty vody. Dosáhne se i snížení počtu výkopů při odstraňování poruch.

Měkčený novodur o síle plotny 3–4 mm lze koupit v Sempu. V případě, že by OVHS měkčený novodur nedostaly, může OVHS Kroměříž vypomoci a plotny zajistit u n. p. Fatry Napajedla.

Z archivu VÚV TGM

Redakce VTEI



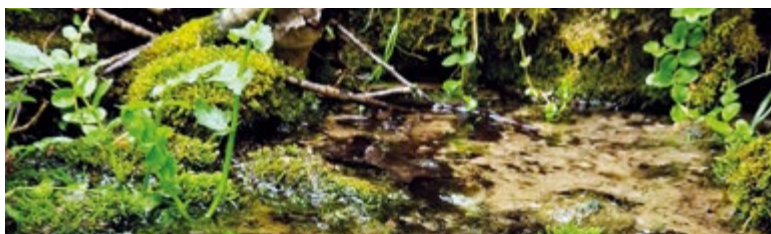
Obsah



3 Úvod

4 Odběry podzemních vod znatelně zmenšují průtoky menších vodních toků v období sucha

Martina Peláková, Pavel Eckhardt



14 Vliv parametrů retenční křivky na účinnost kapilární bariéry

Barbora Krijt, Jiří Mls

22 Problematika starých podzemních vod v hydrogeologických rajonech 4410 Jizerská křída pravobřežní a 4522 Křída Liběchovky a Pšovky

Jakub Mareš, Martin Slavík, Josef Vojtěch Datel

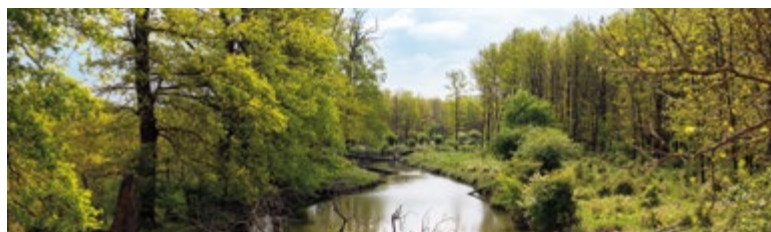


32 Metodika tvorby *Mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu pro Českou republiku*

Jiří Bruthans, Jiří Grundloch, Renáta Kadlecová, Tuna Karatas, Kateřina Šabatová, Radek Vlnas

48 Rozhovor s doc. RNDr. Zbyňkem Hrkalem, CSc., hydrogeologem, spisovatelem a popularizátorem hospodaření s vodou

Pavel Eckhardt



52 Projekt „*Danube Lighthouse Initiative*“

Petr Pavlík, Adam Vizina, Adam Beran

54 Hydrogeologické aspekty vrtů pro tepelná čerpadla

Josef Vojtěch Datel, Svatopluk Šeda, Jiří Čížek



Vážení čtenáři,

než vás v úvodníku provedeme říjnovým číslem VTEI, jež je tematicky zaměřeno na hydrologii a hydrogeologii, rádi bychom vás seznámili s některými novinkami. Časopis od února 2022 vychází nejen v české, ale on-line i v anglické verzi. Tento krok se promítl do zvýšené sledovanosti a citovanosti publikovaných příspěvků a vytvořil i jednu ze základních podmínek pro přijetí VTEI do prestižních bibliografických a citačních databází. V současné době VTEI prochází evaluačním řízením pro přijetí do druhé nejvýznamnější abstraktové a citační databáze recenzované literatury (Scopus) a do databáze Open Access časopisů (DOAJ). Dále pracujeme na vylepšení našeho chatbotu, který je už nějaký čas součástí webu VTEI. Naši snahou je, aby tento AI nástroj uměl pracovat s jednotlivými příspěvky uloženými v PDF i s obrázky. Pro vás čtenáře by to znamenalo možnost vytvořit si z vámi vybraných příspěvků např. stručnou sumarizaci.

A co konkrétně je obsahem našeho říjnového čísla? První odborný příspěvek „Odběry podzemních vod znatelně zmenšují průtoky menších vodních toků v období sucha“ Martiny Pelákové a Pavla Eckhardta upozorňuje na vztah mezi odběry podzemní vody a vysycháním významných vodních toků v obdobích sucha. Článek přináší souhrn nejvíce zasažených významných vodních toků v České republice. Výsledkem publikované analýzy je identifikace 13 lokalit, kde množství odebrané podzemní vody přesahuje 30 % průtoku vodního toku v období sucha.

V pořadí druhý odborný článek Barbory Krijt a Jiřího Mlse „Vliv parametru retenční křivky na účinnost kapilární bariéry“ je zaměřen na výpočet parametru α zvlhčovací větve retenční křivky a na vliv jeho hodnoty na účinnost kapilárních bariér. V této práci autoři srovnávali účinnost několika kapilárních bariér, jež se lišily kapilární vrstvou určenou testovanými volbami parametru α . Ze získaných výsledků je patrné, že co nejpřesnější určení parametru α retenční křivky hraje podstatnou roli pro stanovení efektivity kapilární bariéry.

Třetí odborný příspěvek „Problematika starých podzemních vod v hydrogeologických rajonech 4410 Jizerská křída pravobřežní a 4522 Křída

Liběchovky a Pšovky“ autorů Jakuba Mareše, Martina Slavíka a Josefa Vojtěcha Datla přibližuje projekt zaměřený na stav starých podzemních vod ve vybraných hydrogeologických rajonech. Staré podzemní vody, jež mají zanedbatelné koncentrace tritia, se dají považovat za strategický zdroj, protože jsou méně náchylné k současné kontaminaci. Cílem příspěvku je podat stručnou hydrogeologickou charakteristiku zájmové oblasti, představit dosavadní výsledky po prvním roce řešení projektu „Poznání, kvantifikace a ochrana strategických zdrojů podzemní vody české křídové pánve hlubokého oběhu v hydrogeologických rajonech 4410 a 4522“ a popsat nejistoty stávajících informací.

Poslední odborný článek tohoto čísla popisuje metodiku tvorby *Mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu pro Českou republiku*. Odborná interaktivní mapa je vytvořena na základě použití srážkového normálu a regresních vztahů mezi srážkami a celkovým a základním odtokem. Účelem vytvořené *Mapy zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* je objektivní porovnání zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody v rámci celé republiky. Příspěvek je dílem autorů Jiřího Bruthanse, Jiřího Grundlocha, Renáty Kadlecové, Tyny Karatas, Kateřiny Šabatové a Radka Vlnase.

I v tomto čísle najdete tradiční rozhovor. Tentokrát vyzpovídal Pavel Eckhardt našeho známého hydrogeologa, spisovatele a popularizátora vodního hospodářství Zbyňka Hrkala.

Poslední část říjnového vydání VTEI je věnována informativním příspěvkům, a to projektu „Danube Lighthouse Initiative“ a problematice hydrogeologických aspektů vrtů pro tepelná čerpadla.

Vážení čtenáři, jako vždy vám přejeme příjemné a inspirativní čtení.

Redakce VTEI

Odběry podzemních vod znatelně zmenšují průtoky menších vodních toků v období sucha

MARTINA PELÁKOVÁ, PAVEL ECKHARDT

Klíčová slova: minimální hladina podzemní vody — odběr vody — podzemní voda — průtok — sucho — vodní tok

ABSTRAKT

Článek upozorňuje na vztah mezi odběry podzemní vody a vysycháním významných vodních toků v obdobích sucha. Přináší souhrn nejvíce zasažených významných vodních toků v České republice (ČR). Velké soustředěné odběry podzemních vod mají značný dopad na menší a střední vodní toky.

Filtrem pro výběr nejvýznamnějších vlivů odběrů na průtoky byl podíl odebíraného množství vody a 355denního průtoku odvozeného z období 1931–1960. Vybrány byly vodní toky, u kterých tento podíl přesahoval 30 %. U poloviny takto vybraných případů byl zjištěn vztah, kdy 355denní průtok z období 1931–1960 ponížený o odebírané množství vody je přibližně roven 355dennímu průtoku z období 1991–2020. Případy, kdy zmíněný vztah neplatí, lze zdůvodnit změnami odebíraného množství a snížením hladin podzemních vod i průtoků v širším okolí způsobeným jímáním a využíváním statických zásob podzemních vod. Vliv klimatické změny se u základního odtoku ve studovaných případech pravděpodobně neprojevil.

Z naší analýzy vzešlo 13 případů výrazného ovlivnění průtoků významných vodních toků způsobeného odběry podzemních vod. Zhruba v polovině těchto případů existuje jiný zdroj vody, který by měl být využit, pokud je průtok dotčeného vodního toku na minimu. Další možností je ochrana vodních zdrojů uplatněním institutu minimální hladiny podzemních vod nebo minimálního zůstatkového průtoku.

Srovnání 13 lokalit nejvíce zasažených odběry podzemní vody ukázalo, jaké důsledky má nadměrná exploatace podzemních vod v povodí. V povodích Dědiny, Doubravy, Bělé, Liběchovky, Ústeckého potoka, Blšanky a Jevíčky je odčerpávání podzemní vody významné, ale ještě není zcela změněn hydrologický režim. V dalších případech je situace vážnější, neboť dochází ke značnému vyčerpání širšího území. Poklesy průtoků vodních toků a hladin podzemních vod jsou často patrné i v sousedních povodích. Nejvýraznější dopady na hydrologický režim byly zjištěny u odběrů v povodí Bechyňského potoka, Rakovnického potoka, Pšovky, Blatý, Romže a Svitavy (vodní toky jsou řazeny hydrologicky).

ÚVOD

Projevem změny klimatu je na území ČR setrvalý vzestup průměrné teploty vzduchu během posledních 50 let, přičemž průměrné srážkové úhrny se příliš nemění. Vlivem vyšší teploty dochází, pokud je dostatek srážek, k většímu územnímu výparu, což vede k výraznějšímu suchu v půdě a v povrchových i podzemních vodách. Adaptace na suchu se uskutečňuje prostřednictvím dlouhodobých plánů a opatření i návrhů opatření pro okamžité řešení situace nedostatku vody, jež jsou součástí tzv. suchých plánů podle § 87b vodního zákona. Zdroje

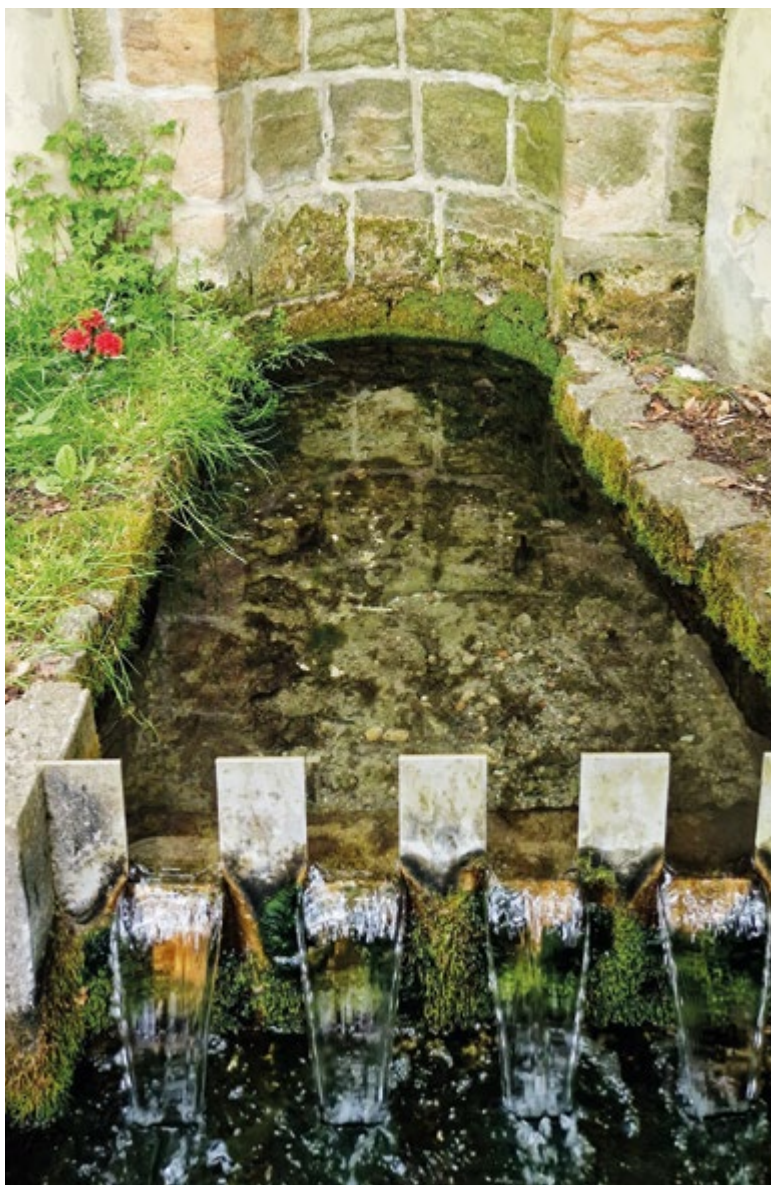
povrchových a podzemních vod jsou omezené, což vyžaduje při suchu koordinaci jejich využívání. Jedním z dlouhodobých adaptačních opatření je umožnění zastupitelnosti zdrojů vody. Větší města (spotřebiště) často disponují více zdroji vzájemně zastupitelnými, ale není to pravidlem.



Obr. 1. Vývěr podzemní vody z křídových pískovců Kokořínska tvořící část průtoku Liběchovky

Fig. 1. Natural spring emerging from the Cretaceous sandstones of the Kokořínsko region forming part of the Liběchovka flow

Odběry povrchové vody bezpochyby zmenšují průtoky ve vodních tocích v úsecích různé délky v závislosti na odlehlosti místa odběru a vypouštění použité (odpadní) vody. Vliv odběrů povrchové vody na jakost vody je také zřejmý a při malých průtocích poměrně zásadní. U odběrů podzemních vod není vliv na průtoky v tocích tak přímočarý, ale je obdobný. K ochuzení průtoků dochází několika způsoby. Zřetelné je to při jímání pramenů, které tvoří nebo tvořily část průtoku nějakého vodního toku. K ochuzení vodních toků dochází i jímáním podzemní vody pomocí vrtů nebo studní, kdy je odebírána podzemní voda tvořící následně v místě drenážní báze zvodněného systému prameny (obr. 1 a 2) či přírny podzemních vod do vodních toků nebo vodních nádrží. Vydatnost pramenů vlivem odběrů z vrtů klesá, někdy dochází k jejich úplnému vymizení, což je popsáno např. u jímacího území Hřensko [1]. Stejně tak dochází k poklesu vývěrů podzemních vod pod hladinami vodních toků nebo nádrží. Další možností zmenšení průtoku vodního toku je jímání podzemních vod v nivě vodního toku s využitím břehové infiltrace.



Obr. 2. Pramen sv. Vojtěcha v křídových pískovcích Kokořínska tvořící část průtoku Liběchovky

Fig. 2. St. Vojtěch spring in the Cretaceous sandstones of the Kokořínsko region forming part of the Liběchovka flow

METODIKA

Z evidovaných odběrů podzemních vod za rok 2021 v ČR [2] byly vybrány největší odběry a porovnány s průtoky ve vodních tocích, na něž mohou mít vliv. Sledovány byly pouze významné vodní toky podle vyhlášky č. 178/2012 Sb. Při porovnání byl uvažován 355denní průtok (Q355d), který reprezentuje situaci malých průtoků. S ohledem na ovlivnění toků samotnými odběry, ale i manipulacemi na nádržích nebo vypouštěním odpadních vod, byly použity hodnoty Q355d z období 1931–1960 [3]. Odběry podzemních vod v masivním měřítku se začaly provádět spíše až od sedmdesátých let 20. století. V rámci povodí jednoho vodního toku s uzavěrovým profilem se známým Q355d byly odběry sdruženy a jejich hodnoty sečteny. U vodárenských odběrů během roku zpravidla nedochází k významnému kolísání. Roční odběr podzemní vody byl přepočítán na průměrný okamžitý odběr. Podílem průměrného odběru podzemní vody a Q355d z období 1931–1960 získáme představu o možném ochuzení průtoku vodního toku odběrem. Volba profilu na vodním toku byla limitována dostupnými daty, tudíž nemusí být ideální z hlediska objektivního hodnocení vlivu odběru na průtok. Největší vliv odběrů na průtoky nastává přirozeně v případech velkých odběrů a malých toků. V tab. 1 jsou uvedeny odběry podzemních vod, u nichž odebrané množství tvoří více než 30 % průtoku Q355d příslušného vodního toku. Ovlivnění průtoků vybraných vodních toků dalšími způsoby, jako jsou odběry povrchových vod, vypouštění odpadních vod a manipulace na nádržích, bylo u vybraných profilů posouzeno a shledáno jako zanedbatelné.

Přírodní a hydrogeologické poměry vybraných vodních toků v souvislosti s příslušnými odběry

Výše popsaným způsobem bylo nalezeno a vybráno 13 vodních toků. Tyto vodní toky leží v nižších nadmořských výškách v širší centrální části ČR od Ústeckého až po Olomoucký a Jihomoravský kraj. Největší počet těchto vodních toků se nachází ve Středočeském kraji. Plochy hydrologických povodí vybraných vodních toků se pohybují od 51 po 384 km².

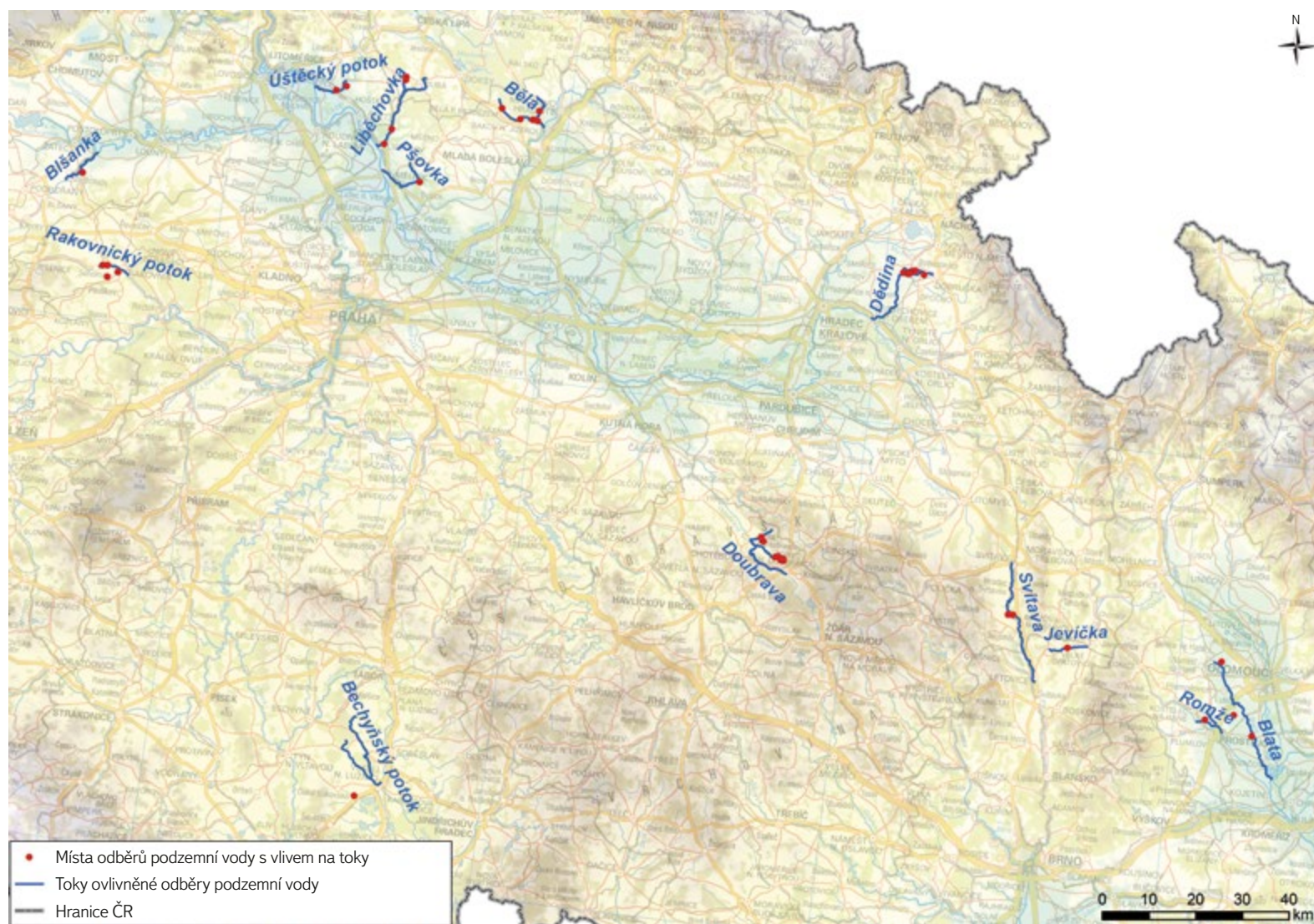
Z hydrogeologického hlediska jsou vybrané odběry podzemní vody umístěny zejména v dobře propustných křídových a kvartérních sedimentech. Naopak zcela zde chybí nejrozšířenější hydrogeologické prostředí v ČR – prostředí hydrogeologického masivu, které většinou neumožňuje soustředěné odběry vyšších vydatností podzemních vod. Z hlediska dotčených hydrogeologických rajonů převažují rajony v české křídové pánvi. Nachází se v nich devět vybraných úseků vodních toků Dědina, Doubrava, Bělá, Pšovka, Liběchovka, Úštěcký potok, Blšanka, Jevíčka a Svitava.

VÝSLEDKY

Mezi odběry podzemních vod ovlivňujícími průtoky vodních toků v naprosté většině převažují odběry vody sloužící k úpravě na vodu pitnou pro veřejné vodovody velkých sídel. Odběry vody pro velká spotřebišť se často soustřeďují na zdroje mimořádně vodné, kde nepůsobí tak zásadní vyčerpání, je však třeba udržovat přiměřenou míru využívání s ohledem na vodní toky a zásoby podzemních vod v místě odběru a okolí.

Tab. 1 obsahuje 13 lokalit v ČR, kde jímání podzemní vody významně ovlivňuje průtok středního nebo menšího vodního toku v období minim. Ve většině případů odebraná podzemní voda putuje do vzdálených spotřebišť v jiných povodích. Pouze ve dvou případech – Rakovnického potoka a Romže – je většina odebrané podzemní vody vrácena do toku vypouštěním odpadní vody v nevelké vzdálenosti cca 5 km pod místem odběru.

Procentuální hodnocení míry vlivu odběrů na průtok v tab. 1 vypovídá rámcově o významu odběrů v jednotlivých lokalitách, ale závisí také na umístění



Obr. 3. Významné ovlivnění průtoků ve vodních tocích způsobené odběry podzemních vod bylo zjištěno na 13 lokalitách v ČR; v mapě je znázorněn vždy ovlivněný úsek vodního toku s příslušnými místy odběrů

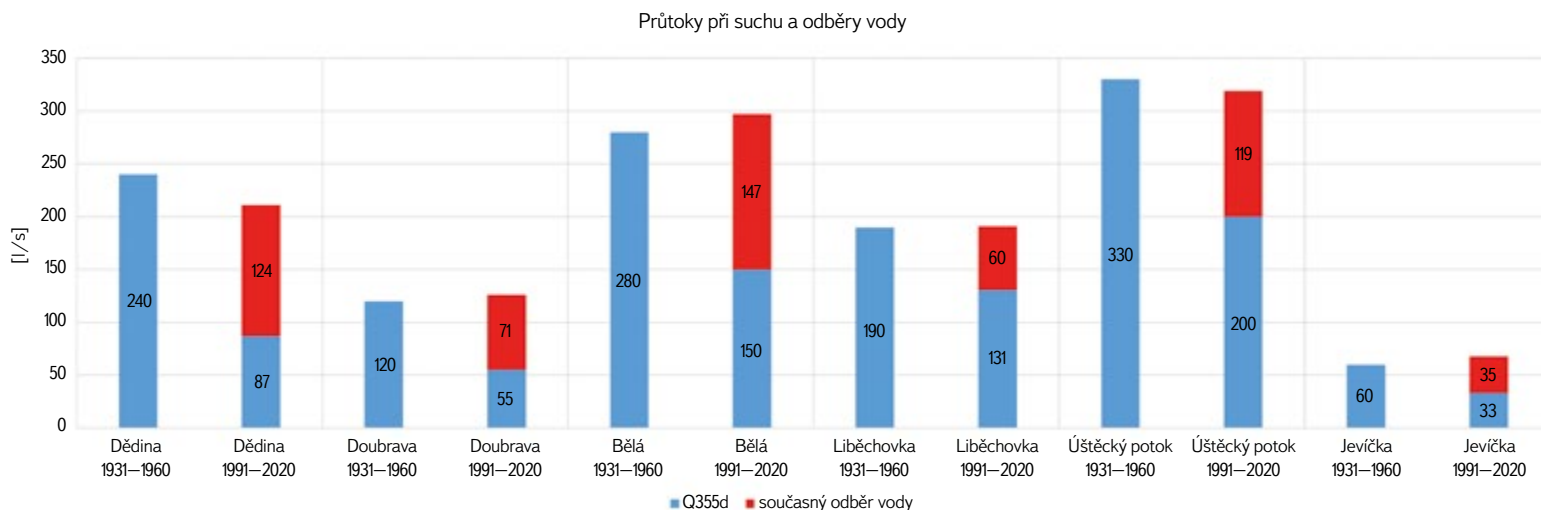
Fig. 3. Significant impacts of groundwater abstractions on stream flows have been identified at 13 locations in the Czech Republic; the map shows each affected watercourse section with the corresponding abstraction sites

profilu na vodním toku. Pro posouzení byly použity profily s dostupnými hodnotami Q355d. Vybrané vodní toky a místa odběrů podzemních vod, jež mají vliv na jejich průtoky, jsou znázorněny v mapce na obr. 3.

Pro další rozbor byly použity také 355denní průtoky odvozené z pozorování ovlivněných průtoků v období 1991–2020. V polovině případů lze vysledovat vztah mezi průměrným odběrem, Q355d z období 1991–2020 a Q355d z období 1931–1960. Součet průměrného odběru a Q355d (1991–2020) v těchto případech přibližně odpovídá Q355d (1931–1960) u vodních toků Dédina, Doubrava, Belá, Rakovnický potok, Liběchovka, Ústěcký potok a Jevíčka, jak je vyobrazeno v grafu na obr. 4. 355denní průtok lze považovat orientačně za úroveň základního odtoku v suchém období. Zmenšení Q355d z období 1991–2020 oproti Q355d z období 1931–1960 tedy přibližně odpovídá velikosti příslušných odběrů podzemní vody.

Proč tomu tak není ve všech případech? Proč jsou odběry u části případů větší než původní základní odtok? Důvodů může být několik:

1. Odběry podzemní vody v menší míře probíhaly již v období 1931–1960. Takovým případem je např. jímací území Březová nad Svitavou, kde bylo jímání podzemní vody I. březovským vodovodem pro Brno zahájeno již v roce 1914 a do roku 1975 bylo odebráno cca 300 l/s [4, 5]. 355denní průtok ve Svitavě z období 1931–1960 tedy není neovlivněný. Podobnými případy jsou jímací území Smržice u Prostějova v povodí Romže využívané od roku 1906, jímací území Holedeč u Blšanky s úpravou vody z roku 1933 zásobující vodou Žatecko, jímací území Vrutice s vodovodem do Litoměřic od roku 1903 nebo jímací území Rakovnický potok, které se stalo hlavním zdrojem vody pro Rakovník v roce 1944.
2. Jímání podzemní vody vyčerpává i zdroje v širším okolí v povodí jiných vodních toků, kterým ubírá průtok. Příkladem jsou jímací území Mělnická Vrutice, Holedeč, Dolní Bukovsko a jímací území v povodí Blatý. Jímáním vody



Obr. 4. Porovnání 355denních průtoků v minulosti a v současnosti. Snížení 355denních průtoků odpovídá ve vybraných povodích odebranému množství podzemní vody.

Případy odběrů přesahujících svým vlivem hranice povodí nejsou znázorněny

Fig. 4. Comparison of 355-day flows, past and present. The reduction in 355-day flows corresponds to the amount of groundwater abstracted in the selected catchments.

Cases of abstraction affecting larger areas across catchment boundaries are not shown

může být vyvolána změna směru proudění podzemní vody, a tím zvětšen rozsah území, odkud podzemní voda odtéká k jímacím objektům. V případě hlubších vrtů mohou být ovlivněny hlubší zvodně, jež se často odvodňují ve velké vzdálenosti od místa odběru do vzdálených vodních toků.

- Podzemní voda může být dočasně čerpána i ze statických zásob, což je popsáno v případech jímacích území Mělnická Vrutice [6], Dolní Bukovsko [7] a Rakovnický potok [8].
- Odběry podzemní vody v období 1991–2020 byly v některých případech menší než v roce 2021, který byl použit pro analýzu. V případě odběrů v povodí Bělé, Blaty, Romže a Jevíčky nárůst odebraného množství vody (do 20 %) pravděpodobně způsobil mírný nesoulad. S mírně sníženými hodnotami odběrů v těchto čtyřech případech se součet odběrů a Q355d (1991–2020) více blíží hodnotě Q355d (1931–1960).
- Odběry podzemní vody v období 1991–2020 byly v některých případech větší než v roce 2021. Mírný pokles odebraného množství vysvětluje mírný nesoulad u hodnot v povodí Dědina na stejném principu, jako je uvedeno v bodě 4. Pokles odběrů pro úpravu vody Malešov zase přispívá k vysvětlení nesouladu u Úštěckého potoka.
- Určitou roli může hrát i vliv klimatické změny. Porovnáním 355denních průtoků z období 1931–1960 a 1991–2020 v profilech neovlivněných významným způsobem odběry povrchových vod, vypouštění a manipulací na nádržích zjistíme, že v části profilů došlo k poklesu (obr. 5). Vyšší teploty v pozdějším období vyvolávají větší evapotranspiraci z povodí, pokud je voda v povrchové vrstvě k dispozici, proto může být odtok z povodí menší. Drobné změny ve srážkových úhrnech v některých částech ČR nemají zásadní vliv na Q355d.
- Hodnoty 355denních průtoků mohou být zatíženy chybou pozorování, vyhodnocování a odvozování průtoků.

Zjištění, že rozdíl mezi současným Q355d a historickým Q355d z období 1931–1960 lze ve všech zkoumaných případech vysvětlit velikostí aktuálních

odběrů a výše zmíněnými důvody 1–5, bylo poměrně překvapivé. Klimatická změna zde podle našich zjištění nehraje významnou roli. Důvodem může být i skutečnost, že období 1931–1960 se řadí k těm spíše sušším.

K oslabení základního odtoku z křídových kolektorů v důsledku klimatické změny nedochází pravděpodobně z toho důvodu, že dotace kolektorů podzemních vod probíhá zejména ze zimních srážek, které nejsou v množství ztenčeny, a z vodních toků v jejich ztrátových úsecích (např. na výchozech kolektorů). Zásoba vody v křídových pískovcových kolektorech je velká a poskytuje celoroční souvislou dotaci vodních toků. Celkový roční odtok u většiny vodních toků v důsledku klimatické změny zmenšen je [9]. Důvodem je zejména zeslabení podpovrchového odtoku ve vegetačním období, kdy je díky vyšší teplotě vzduchu vyšší evapotranspirace.

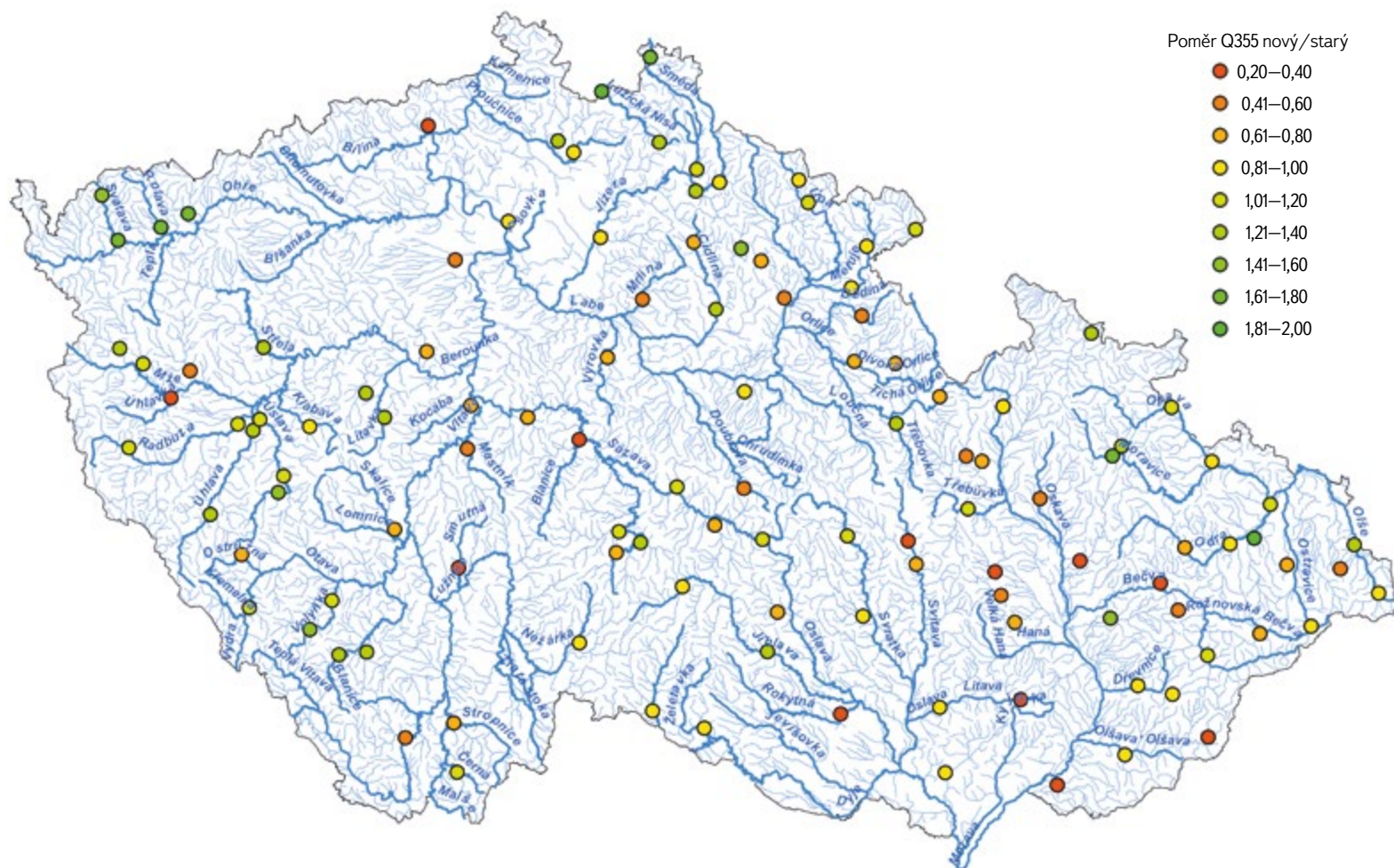
Snížení průtoků vodních toků a hladin podzemních vod způsobené odběry podzemních vod bylo sledováno v uplynulých desetiletích v mnoha lokalitách v ČR. Jedním z nástrojů pro nápravu takových stavů jsou instituty minimální hladiny podzemních vod (MHPV) a minimálního zůstatkového průtoku (MZP), které byly aplikovány úspěšně v několika případech. Např. odběr podzemní vody v jímacím území Podlažice v minulosti značně ovlivňoval průtok vodního toku Žejbro v povodí Chrudimky, a to až do jeho vysychání. Pro jímací území byl zaveden institut minimální hladiny se čtyřmi úrovněmi hladiny podzemní vody v monitorovacím vrtu, podle nichž se řídí možná maximální výše odběru podzemní vody. Vzhledem k tomu, že v oblasti existují další zdroje pitné vody (např. vodní nádrže Seč a Křižanovice na Chrudimce), od zavedení institutu minimální hladiny již k vysychání vodního toku Žejbro nedochází.

Z 13 lokalit jímání podzemní vody, které jsou předmětem naší analýzy, je uplatněn institut minimální hladiny podzemních vod v jímacích územích Litá, Dolní Bukovsko, Mělnická Vrutice a Březová. Pro jímací území Dolní Bukovsko je stanoven i minimální zůstatkový průtok 50 l/s v Bechyňském potoce. Pro jímací území Litá platí omezení čerpání podzemních vod z důvodu ochrany slatinných společenstev pouze pro období 21. března až 15. července. Zavedením těchto limitů se situace většinou mírně zlepšila, nicméně vzhledem k dlouhé době, po kterou jsou již odběry podzemních vod realizovány, není tak dobře znám přirozený stav povrchových a podzemních vod. Málokdo si jej pamatuje, tudíž není nárokován. Stanovení samotné hodnoty minimální hladiny podzemní vody neodpovídá vždy definici stanovené v § 37 vodního zákona: „Minimální hladina podzemních vod je hladina, která ještě umožňuje udržitelné užívání vodních zdrojů

Tab. 1. Nejvýznamnější ovlivnění vodních toků vodárenskými odběry podzemní vody v roce 2021 (seřazené dle hydrologického pořadí)
Tab. 1. Groundwater abstraction in 2021 that greatly affected watercourses (in hydrological order)

Název místa odběru	Kraj	Hydrogeologický rajon (HGR)	Zásobovaná města	Celkový průměrný roční odběr [l/s]	Ovlivněný tok – profil (plocha povodí)	Q355d 1991–2020 [l/s]	Q355d 1931–1960 [l/s]	Podíl odběr/ průtok Q355d 1931–1960 [%]	Možná náhrada zdroje
Litá	HKK	4222 Podorlická křída v povodí Orlice	Hradec Králové	124	Dědina – Mitrov (291 km²)	87	240	52	Orlice – Hradec Králové a další zdroje VSVČ
Studenec	VYS	4320 Dlouhá mez – jižní část	Havlíčkův Brod, Chotěboř, Ždírec, Přibyslav, Hlinsko	71	Doubrava – pod Cerhovkou (101 km²)	55	120	59	VN Hamry
Kladruby, Lhůta		4330 Dlouhá mez – severní část							
Bělá pod Bezdězem a okolí	STC	4410 Jizerská křída pravobřežní	Mladá Boleslav a okolí	147	Bělá – ústí (158 km²)	150	280	52	není
Dolní Bukovsko	JHC	2151 Třeboňská pánev – severní část	Jindřichův Hradec, Veselí n. L., Týn n. Vlt.	97	Bechyňský potok – ústí (128 km²)	68	110	88	částečně VN Římov
Rakovník a okolí	STC	5131 Rakovnická pánev	Rakovník	54	Rakovnický potok – nad Lišanským p. (164 km²)	15	60	90	není
Mělnická Vrutice	STC	4522 Křída Pšovky a Liběchovky	Mělník, Neratovice, Kralupy, Kladno, Slaný	344	Pšovka – ústí (158 km²)	-	190	181	částečně VN Švihov, VN Klíčava
Pavličky	LBK	4522 Křída Pšovky a Liběchovky	Litoměřice (VS Žernoseky)	60	Liběchovka – ústí (157 km²)	131	190	32	(Vrutice a Malešov, Močidla)
Tupadly a Liběchov	STC		Mělník a okolí						(Mělnická Vrutice)
Vrutice a Malešov	ULK	4523 Křída Obrtky a Úštěckého potoka	Litoměřice (VS Žernoseky)	119	Úštěcký p. – ústí (217 km²)	200	330	36	(Pavličky, Močidla)
Holedeč	ULK	4550 Holedeč	Žatec	26	Blšanka – nad Klučeckým p. (384 km²)	65	70	37	VN Žlutice
Velké Opatovice	JHM	4280 Velkoopatovická křída	Boskovice	35	Jevíčka – pod Uhřickým p. (51 km²)	33	60	59	VN Boskovice (nevyužívaný záložní zdroj)
Senice	OLK	1623 Pliopleistocén Blaty	Olomouc	86	Blata – Klopotovice (296 km²)	13	45	191	zdroje skupinového vodovodu v nivě Moravy
Dubany, Hrdibořice			Prostějov						není
Smržice	OLK	1624 Kvartér Valové, Romže a Hané	Prostějov	47	Romže – nad Hloučelou (125 km²)	-	40	118	není
Březovské vodovody	PAK	4232 Ústecká synklinála v povodí Svitavy	Brno	852	Svitava – Rozhraní (223 km²)	185	660	129	VN Vír

Vysvětlení zkratk: Q355d = 355denní průtok; VN = vodní nádrž; VSVČ = Vodárenská soustava východní Čechy; kurzívou jsou údaje odvozené z vlastních dat



Obr. 5. Změna 355denních průtoků v profilech na vodních tocích; barevné body ukazují poměr mezi Q355d z období 1991–2020 a z období 1931–1960

Fig. 5. Change in 355-day flow in stream profiles; coloured points show the ratio between Q355d from 1991–2020 and Q355d from 1931–1960

a která zajistí dosažení dobrého ekologického stavu souvisejících útvarů povrchových vod a vyloučí významné poškození suchozemských ekosystémů.“ Další uplatnění zmíněných institutů MHPV a MZP je na místě v případech odběrů vody nadměrně vytěžujících zdroje, z nichž ty nejvýznamnější jsou uvedeny v tab. 1.

V tab. 1 je také obsažena informace o zásobovaných městech z posuzovaných zdrojů. Jsou uvedena pouze větší sídla, kde je převážné množství vody obvykle spotřebováno. V posledním sloupci tab. 1 jsou navrženy možnosti alternativních vodních zdrojů pro daná spotřebišť. Často jde o vodní nádrže, jež mají dostatečnou kapacitu. Některé zdroje jsou běžně využívány, jiné vzhledem k vyšší ceně za odběr a úpravu povrchové vody pouze doplňkově a další jsou odstaveny z provozu (VN Boskovice). V některých případech žádný další významný zdroj do vodárenské soustavy připojen není, což může být obecně rizikem pro spolehlivé zásobování vodou, ale i pro vodní toky a na vodu vázané ekosystémy, jež mohou být při suchu kvůli velkým nenahraditelným odběrům poškozeny nebo zničeny.

Dostatečné zásoby podzemních vod, které jsou často proklamovány provozovateli vodovodů, nejdou vždy ruku v ruce s dostatečným množstvím vody ve vodních tocích, jak bylo ukázáno na 13 zkoumaných lokalitách. Pro zajímavost je možné zmínit i opačnou situaci, kdy čerpáná podzemní voda po využití vtéká do vodního toku, který není drenážní bází kolektoru podzemní vody, z něhož je čerpána. Projevuje se tedy ve vodním toku nadlepšovací účinek, což je při suchu příznivé.

DISKUZE

V pracích Prchalové [10] a Venery [11] jsou porovnávány odběry podzemní vody s přírodními zdroji podzemních vod, resp. s využitelným množstvím podzemních vod v měřítku hydrogeologických rajonů. Tento článek porovnává odběry podzemní vody s průtoky ve vodních tocích v suchém období, které jsou tvořeny převážně základním odtokem v měřítku povodí o velikosti 51 až 384 km². Podle výsledků studií [10, 11] a tohoto článku se území, kde dochází k nepřiměřeně velkému čerpání podzemních vod, nepřekvapivě v mnoha případech shodují. Vzhledem k rozdílným zkoumaným zdrojům (zásoby podzemních vod a vodní toky) není shoda, pokud je drenážní bází „postiženého“ rajonu velký vodní tok. Na jeho průtok se neprojevuje vliv čerpání podzemních vod významným způsobem, přestože zásoby podzemních vod jsou nadměrně exploatovány. Dále pochopitelně nedochází ke shodě v případech, kdy povodí zkoumaného vodního toku tvoří jen malou část hydrogeologického rajonu (HGR). Na rozdíl od předchozích prací [10, 11] byl identifikován významný vliv odběrů podzemní vody v povodí Bělé v HGR 4410 Jizerská křída pravobřežní, kde jsou zdroje podzemních vod vydatné, nicméně 355denní průtok Bělé při ústí do Jizery je v současnosti zhruba poloviční oproti období před vybudováním skupinového vodovodu pro Mladou Boleslav. Kromě vlivu zvýšení odběrů v posledních letech zde hraje roli i metoda stanovení využitelných zásob pro HGR 4410 v projektu „Rebalance zásob podzemních vod“, ze kterého vychází publikace Venery [11].

Vztahem mezi odběry podzemní vody a průtoky vodních toků se zabývají také jednotlivé podniky Povodí. Ve zprávě státního podniku Povodí Vltavy [12] se uvádí, že hlavním drenážním tokem pro hydrogeologický rajon 2151 je Bechyňský potok a základní odtok je zde výrazně ovlivněn odběrem podzemní vody v Dolním Bukovsku. V HGR 5131 Rakovnická pánev je sledováno v okolí Rakovníku čerpání velkého množství zásob podzemní vody, jež pak nemohou gravitačně odtékat do svých přirozených drenážních bází – Rakovnického potoka a jeho přítoků [8].

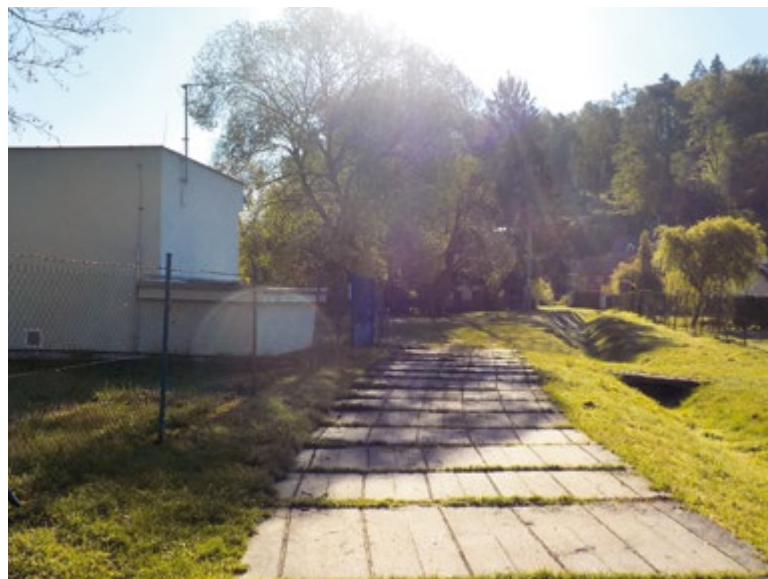
V územní působnosti státního podniku Povodí Ohře jsou zkoumané vodní toky Pšovka, Liběchovka, Úštěcký potok a Blšanka. Právě u těchto vodních toků se periodicky vyskytuje napjatá vodohospodářská bilance [13], tj. průměrné měsíční průtoky klesají pod hodnotu Q355d. Na poklesech vodnosti některých z těchto vodních toků se mimo jiné podílejí nadměrné vodárenské odběry podzemních vod [13]. Největší negativní vliv je zaznamenán na vodním toku Pšovka, kde dochází dlouhodobě v letních měsících k úplnému vysychání části vodního toku [14]. Dále je konstatováno, že vodnost Blšanky je významně ovlivněna odběrem podzemních vod z jímacího území Holedeč [11] v HGR 4550 Holedeč, z kterého je podzemní voda četnými zlomy drénována do Blšanky [14]. Průtoku Liběchovky se věnuje závěrečná zpráva projektu „Rebalance zásob podzemních vod“ [6], v jehož rámci proběhlo měření postupných profilových průtoků. V úseku Liběchovky mezi Chudolazy a Želízy, kde se nachází jímací území Tupadly (obr. 6), docházelo v říjnu 2013 a červnu 2014 k poklesu průtoků Liběchovky o cca 30 l/s. Průměrný měsíční odběr v jímacím území Tupadly byl 33 l/s v říjnu 2013 a 37 l/s v červnu 2014. Aktuální roční průměrný odběr v letech 2021 a 2022 byl 37 a 44 l/s.

Povodí Moravy, s. p., má ve správě zkoumané vodní toky Jevíčka, Blata, Romže a Svitava. Na vodním toku Blata se napjatý bilanční stav objevuje opakovaně od roku 2009. Jedním z důvodů jsou odběry podzemních vod v nivě mezi Moravou, Blatou a Romží [15]. Podobně na vodním toku Svitava je napjatý bilanční stav velmi častý. Hlavní příčinou jsou významné objemy odběrů podzemních vod pro I. a II. březovský vodovod [15]. Kompenzaci odebraného množství vody zajišťuje vodní nádrž Letovice na Křetínce, která však ústí do Svitavy ve vzdálenosti 19 ř. km pod jímacím územím Březová. U vodních toků Jevíčka a Romže není bilanční stav posuzován, nicméně vliv odběrů na Romži v jímacím území Smržice je evidentní, protože systém jímání je založen na břehové infiltraci z Romže. Na vodním toku Romže jsou vybudovány dva umělé stupně, které nadržují vodu pro jímací území Smržice, kde je podél vodního toku Romže vyhloubeno sedm jímacích objektů [16]. Ve Velkých Opatovicích jsou jímáním podchyceny Zámecké prameny napájející vodní tok Jevíčka. Podzemní voda kolektoru B je jímána jednak násoskou zachycující přirozený přeliv pramenů a jednak řadou jímacích vrtů [17].

Zpráva státního podniku Povodí Labe [18] ve vztahu k odběrům podzemních vod v hydrogeologických rajonech 4222 a 4410 konstatuje, že odběry v povodí Dědiny (HGR 4222) a Bělé (HGR 4410) nezpůsobují snížení statických zásob podzemní vody. Zda zmíněné odběry zmenšují průtoky v tocích Dědina a Bělá, není posuzováno. Dále zpráva [18] uvádí, že odběry podzemních vod v povodí Doubravy (HGR 4320 a 4330) nemohou zásadně ohrozit přírodní zdroje útvaru podzemních vod a snížení průtoků v Doubravě způsobené odběry je kompenzováno vodní nádrží Pařížov. Podle našich poznatků není nadlepšování průtoků nádrží Pařížov při suchu očekávatelné vzhledem k úplnému vyprázdňování zásobního prostoru nádrže v uplynulých obdobích sucha. Hlavním účelem nádrže Pařížov je zmírnění průchodu velkých vod a dále mimo jiné i výroba elektrické energie.

Porovnání M-denních průtoků období 1981–2010 a období 1991–2020 poskytuje článek Kukly [19]. Poklesy 355denních průtoků činí průměrně 13,4 % v souboru 304 vodoměrných stanic v ČR. Kukla konstatuje, že obecně bylo období 1981–1990 vodnější než období 2011–2020. Během dlouhotrvajících bezesrážkových období v letech 2014–2019 byla pozorována dlouhodobá období trvání minimálních průtoků. To vysvětluje rozdíl mezi hodnotami 355denních průtoků

v porovnávaných obdobích. Naše porovnání 355denních průtoků z období 1931–1960 a období 1991–2020 ve 129 vodoměrných stanicích ukazuje průměrný pokles o 3 %, vybrány byly stanice s malým ovlivněním průtoků lidskou činností. Při uvážení nepřesností pozorovaných a odvozovaných hodnot lze považovat pokles o 3 % za nepodstatný. Norma ČSN 75 1400 udává orientační hodnotu pravděpodobné chyby hodnot 355denních průtoků 20 %.



Obr. 6. Objekt jímání podzemní vody v Tupadlech v povodí Liběchovky

Fig. 6. Groundwater abstraction facility at Tupadly in the Liběchovka catchment

ZÁVĚR

Výsledkem naší analýzy je identifikace 13 lokalit, kde množství odebrané podzemní vody přesahuje 30 % průtoků vodního toku v období sucha. Tento článek se zabývá pouze zásadními odběry podzemní vody a jejich vlivem na významné vodní toky. Obdobně působí menší odběry podzemní vody na menší vodní toky s lokálním významem. Vysychání vodních toků je již dnes v ČR pozorováno v nejsušších regionech. V případech vodních toků posuzovaných v tomto článku jsou však příčinou silně ochuzených průtoků odběry vody. Řízení míry odběrů z povrchových a podzemních zdrojů je ovlivněno mimo jiné výší poplatků za odebranou vodu, což se projevuje větším tlakem na podzemní vodu, která je v tomto směru podstatně levnější než povrchová voda. V rámci vodárenských soustav často existují zdroje povrchové vody, jejichž větší využívání je možné a podpořilo by jej vyrovnání výše poplatků za odběr podzemní vody a povrchové vody. Jde zejména o vodní nádrže určené k zásobování vodou. Dalším pozitivním efektem většiny těchto vodních nádrží je nadlepšování průtoků ve vodních tocích v obdobích sucha.

V budoucnu s sebou klimatická změna přinese další zvyšování teplot, což se projeví nejvíce u vodních toků, kde je už v současnosti situace napjatá a dochází k vysychání. Je třeba se připravit na problémy a využívat nebo hledat jiné zdroje vody. Už nyní je na místě zajistit možnost využívání existujících nevyužívaných vodních nádrží pro vodárenské účely a zvažovat výstavbu nových vodních nádrží. Výhodou vodních nádrží je, že na rozdíl od kolektorů podzemní vody lze regulovat odtok zadrženého objemu vody. Dalším příspěvkem ke zvětšení zásob podzemních vod, potažmo průtoků vodních toků v období sucha, je podpora infiltrace srážkových vod do horninového prostředí např. pomocí zaskokovacích prvků. Důležitá je také ochrana významných infiltračních území před zastavěním a znečištěním. Průtoky v suchých obdobích lze též posílit odstraněním nevhodných odvodňovacích zařízení jak na zemědělských, tak na lesních



pozemcích. Pokud dlouhodobá koncepční opatření chybějí, vodoprávní úřady musejí v suchých obdobích přistoupit k opatření ve smyslu omezení spotřeby vody domácnostmi, které jsou hlavními konzumenty podzemní vody.

Poděkování

Příspěvek vznikl v rámci řešení projektu „Predikce, hodnocení a výzkum citlivosti vybraných systémů, vlivu sucha a změny klimatu v Česku (PERUN)“ (SS02030040), který je podporován Technologickou agenturou ČR.

Vysvětlení použitých pojmů

- 355denní průtok – průtok, který je v dlouhodobém průměru dosažen či překročen po dobu 355 dní v roce
- Neovlivněný průtok – přirozený průtok, který není ovlivněn manipulacemi na nádržích, odběry vody a vypouštěními
- Základní odtok – jedna ze tří složek celkového odtoku z povodí tvořená vývěrem podzemních vod do vodních toků; dalšími dvěma složkami jsou povrchový odtok a podpovrchový odtok
- Zvodeň – souvislá akumulace podzemních vod v hornině
- Kolektor podzemních vod – propustné horninové prostředí se schopností akumulovat vodu
- Statické zásoby podzemních vod – množství podzemní vody neodtékající z kolektorů do vodních toků nebo jiných kolektorů (pokud jsou čerpány, může docházet k trvalému poklesu hladiny podzemní vody)
- Dynamické zásoby podzemních vod – množství podzemní vody odtékající z kolektorů do vodních toků nebo jiných kolektorů; v přirozených podmínkách odpovídají (v dlouhodobém měřítku) přírodním zdrojům podzemní vody a tvoří základní odtok
- Přírodní (obnovitelné) zdroje podzemní vody – množství vody za přírodních poměrů dlouhodobě doplňované infiltrací do hydrogeologického kolektoru nebo zvodněného systému (definice dle přílohy č. 8 vyhlášky č. 369/2004 Sb.)
- Přírodní zdroje se obvykle stanovují jako hodnota neovlivněného základního odtoku z posuzované hydrogeologické struktury. Základní odtok se v čase přirozeně mění v závislosti na ročním období a počasí v předchozím období. Charakteristickou hodnotou pro dané období může být potom medián nebo průměr základního odtoku.
- Využitelné množství podzemních vod – množství podzemní vody, které je možné racionálně využívat z hydrogeologického kolektoru nebo zvodněného systému, aniž nastane negativní ovlivnění podzemních vod anebo okolního životního prostředí (definice dle přílohy č. 8 vyhlášky č. 369/2004 Sb.)
- Hydrogeologický rajon – území s obdobnými hydrogeologickými poměry, typem zvodnění a oběhem podzemní vody
- Břehová infiltrace – jímání vody z vodního toku vyvolané rozdílem hladin v toku a v místě jímacích objektů podzemní vody v nivě
- Drenážní báze – místo, kde podzemní voda ze zvodnělého systému vlivem gravitace vytéká na zemský povrch
- Evapotranspirace – evaporace a transpirace rostlin, tj. výpar vody z povrchu země a výdej vodní páry povrchem rostlin

Literatura

[1] ECKHARDT, P., POLÁKOVÁ, K. Vývoj vydatnosti pramenů v Česko-saském Švýcarsku. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2014, 56(2), s. 1–4. ISSN 0322-8916.

[2] Ministerstvo zemědělství. *Odběry podzemních vod (za rok 2021)* [on-line]. Dostupné z: <https://www.voda.gov.cz/?page=odbery-podzemnich-vod>

[3] Kolektiv pracovníků Hydrologické služby HMÚ. *Hydrologické poměry Československé socialistické republiky*, díl III. Praha: Hydrometeorologický ústav, 1970.

[4] KRÁSNÝ J. et al. *Podzemní vody České republiky. Regionální hydrogeologie prostých a minerálních vod*. Praha: Česká geologická služba, 2012.

[5] VENERA, Z. et al. *Rebilance zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva. Příloha č. 2/24 Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon 4232 – Ústecká synklinála v povodí Svitavy*. Praha: Česká geologická služba, 2016.

[6] VENERA, Z. et al. *Rebilance zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva. Příloha č. 2/35 Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon 4522 – Křída Liběchovky a Pšovky*. Praha: Česká geologická služba, 2016.

[7] KEPRTOVÁ, Z. et al. *Hodnocení množství a jakosti podzemních vod v dílčím povodí horní Vltavy za rok 2019*. Praha: Povodí Vltavy, státní podnik, 2020.

[8] KEPRTOVÁ, Z. et al. *Hodnocení množství a jakosti podzemních vod v dílčím povodí Berounky za rok 2021*. Praha: Povodí Vltavy, státní podnik, 2022.

[9] KAŠPÁREK, L., KOŽÍN, R. Změny srážek a odtoků na povodích v ČR v období intenzivního oteplování. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2022, 64(2), s. 17–27. ISSN 0322-8916.

[10] PRCHALOVÁ, H., VYSKOČ, P., VIZINA, A., NOVÁKOVÁ, H. Bilance zdrojů podzemní vody a potřeb pro pitné účely v podmínkách klimatické změny. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2022, 64(5), s. 22–31. ISSN 0322-8916.

[11] VENERA, Z. Sucho, podzemní voda a voda v krajině. In: *SUCHO – jak mu předcházet a jak s ním žít, dotační zdroje*. Webinář asociace Národní síť Zdravých měst České republiky, 2020.

[12] KEPRTOVÁ, Z. et al. *Hodnocení množství a jakosti podzemních vod v dílčím povodí horní Vltavy za rok 2021*. Praha: Povodí Vltavy, státní podnik, 2022.

[13] Povodí Ohře, státní podnik. *Plán dílčího povodí Ohře, dolního Labe a ostatních přítoků Labe, část V. Hydrologické extrémy, III. plánovací období (2021–2027)*. [B. m.]: Povodí Ohře, státní podnik, 2021.

[14] POLEDNÍČEK, P. et al. *Vodohospodářská bilance dílčího povodí Ohře, dolního Labe a ostatních přítoků Labe, hodnocení minulého kalendářního roku 2021 – textová část. Zpráva o hodnocení množství a jakosti podzemních vod*. [B. m.]: Povodí Ohře, státní podnik, 2022.

[15] PEŠEK, J. et al. *Vodohospodářská bilance povodí Moravy za rok 2021 – textová část*. Brno: Povodí Moravy, s. p., 2022.

[16] VENERA, Z. et al. *Rebilance zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva. Příloha č. 2/10 Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon 1624 – Kvartér Valové, Romže a Hané*. Praha: Česká geologická služba, 2016.

[17] VENERA, Z. et al. *Rebilance zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva. Příloha č. 2/27 Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon 4280 – Velkoopatovická křída*. Praha: Česká geologická služba, 2016.

[18] ŠRAUT, B. et al. *Zpráva o hodnocení množství a jakosti podzemních vod v územní působnosti Povodí Labe, státní podnik, za rok 2021*. Hradec Králové: Povodí Labe, státní podnik, 2022.

[19] KUKLA, P. Porovnání hydrologických charakteristik M-denních průtoků referenčního období 1981–2010 a uvažovaného referenčního období 1991–2020. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace*. 2022, 64(2), s. 43–47. ISSN 0322-8916.

[20] VENERA, Z. *Rebilance zásob podzemních vod – závěrečná zpráva s přílohami*. Praha: Česká geologická služba, 2016.

Autoři

Ing. Martina Peláková
✉ martina.pelakova@vuv.cz
ORCID: 0000-0003-0485-1542

Mgr. Pavel Eckhardt
✉ pavel.eckhardt@vuv.cz
ORCID: 0000-0002-4218-5344

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2024.07.001

ISSN 0322-8916 © 2024 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

GROUNDWATER ABSTRACTION NOTICEABLY REDUCES THE FLOW OF SOME WATERCOURSES DURING THE DRY SEASON

Keywords: minimum groundwater level — water abstraction — groundwater — flow — drought — watercourse

The paper points out that some significant watercourses dry up during periods of minimal flows due to groundwater abstraction. It provides a summary of the most affected significant watercourses in the Czech Republic. Large concentrated groundwater abstractions have a considerable impact on small and medium-sized watercourses.

To select the most significant effects of abstractions on stream flows we used the ratio of abstractions to 355-day flows derived from the period 1931–1960. Watercourses exceeding 30 % were selected. In half of the selected cases the following relationship was confirmed: the 355-day flow from 1931–1960, reduced by the abstraction rate, is approximately equal to the 355-day flow from 1991–2020. The cases where this relationship does not match can be explained by changes

in abstraction volumes, declining groundwater levels and flows in the wider area due to abstraction and the use of static groundwater reserves. The effect of climate change is unlikely to be present in the baseflow in the cases studied.

Our analysis identified 13 cases where groundwater abstraction is severely affecting the flow of significant watercourses. In about half of these cases, there is an alternative source of water that should be used when the flow of the watercourse is at a minimum. Another way to protect water resources is to apply the minimum groundwater level or minimum residual flow under the Water Act.

A comparison of the thirteen sites most affected by groundwater abstraction showed the consequences of groundwater overexploitation. In the catchments of the Dědina, Doubrava, Bělá, Liběchovka, Úštěcký Brook, Blžanka and Jevíčka, groundwater abstraction is significant, but the hydrological regime has not yet been completely changed. In other cases, the situation is more serious, with substantial depletion over a wider area. Decreases in stream flows and groundwater levels are often felt in neighbouring catchments. According to our findings groundwater abstractions in the catchment areas of the Bechyňský Brook, Rakovnický Brook, Pšovka, Blata, Romže and Svitava have the most significant impact on the hydrological regime.



Vliv parametrů retenční křivky na účinnost kapilární bariéry

BARBORA KRIJT, JIŘÍ MLS

Klíčová slova: kapilární bariéra — numerické modelování — retenční křivka — hydraulické charakteristiky — hystereze

ABSTRAKT

Tato studie je zaměřena na výpočet parametru α zvlhčovací větve retenční křivky a na vliv jeho hodnoty na účinnost kapilárních bariér. Kapilární bariéra je jednoduchou metodou odizolování skládek. Efektivita kapilárních bariér byla testována pomocí numerických modelů, které umožňují větší variabilitu testování oproti fyzikálnímu měření. Díky numerickým modelům bylo možné vyhodnocovat přímý vliv změny parametrů retenčních křivek na fungování kapilárních bariér. Do sestavování numerických modelů byla zahrnuta hystereze retenčních křivek a následně byl vyhodnocen její vliv na shodu výsledků modelů s měřenými daty. Numerické modelování je vhodným a spolehlivým nástrojem při ověřování účinnosti kapilárních bariér. Vzhledem k citlivosti výsledků na parametry úlohy je zapotřebí určit co nejpřesněji všechny nutné vstupní parametry, aby měl výsledný model reálnou vypovídací hodnotu.

ÚVOD

Kapilární bariéra, případně v kombinaci s dalším objektem [1], je efektivním nástrojem využívaným při zakrývání skládek a k ochraně určité oblasti proti proniknutí podzemní vody. Její princip je založen na odlišných hydraulických vlastnostech dvou půdních vrstev, zpravidla různých písků nebo písku a štěrku. Jemnozrnnější nadložní vrstva složená z jemně až střednězrnného písku se nazývá kapilární vrstva. Spodní vrstva skládající se z hrubozrnnějšího materiálu, obvykle střednězrnného štěrku, se nazývá kapilární blok. Rozhraní mezi kapilární vrstvou a kapilárním blokem se označuje jako kapilární rozhraní. Hydraulická vodivost kapilární vrstvy je při určitých tlakových podmínkách vyšší než hydraulická vodivost kapilárního bloku. To platí pro nižší tlakové výšky, při nichž je kapilární blok téměř nepropustný. Díky tomu dochází k odtoku vody kapilární vrstvou spíše než k jejímu proniknutí do kapilárního bloku [2, 3]. V některých případech je pro zvýšení účinnosti nebo pro větší zabezpečení jednoduchá kapilární bariéra doplněna geotextilní vrstvou vloženou na kapilární rozhraní. Takto sestavené kapilární bariéry se nazývají kombinované [4, 5]. Kombinovaná bariéra se používá pro případ selhání jednoduché kapilární bariéry.

Evropská směrnice (*Směrnice Rady 1999/31/ES*) vyžaduje k zakrytí skládek odpadu třídy II použití dvou nezávislých komponent. To se zpravidla zajišťuje umělou a minerální vrstvou. Alternativou je užití umělého těsnění (geotextilie) v kombinaci s kapilární bariérou. V tomto případě se umělá vrstva může umístit nad nebo pod kapilární bariéru, TASI (německá zkratka pro *Technickou direktivu o komunálních skládkách – Technische Anleitung zur Verwertung, Behandlung und sonstigen Entsorgung von Siedlungsabfällen*) však doporučuje vložit umělé těsnění mezi kapilární blok a kapilární vrstvu. Takto vytvořená kombinovaná kapilární bariéra je ve srovnání s klasickým kombinovaným těsněním levnější,

konstrukčně výhodnější a méně náchylná k poškození konsolidací. Zůstává pouze požadavek minimálního sklonu [6–8, 1].

Základem matematického modelu proudění vody v obecně nenasycené zóně je Richardsova rovnice. Rovnice samotná ale nestačí, abychom správně formulovali problém; je třeba dodat dva konstituční vztahy, jimiž jsou hydraulická vodivost a retenční křivka. Vzhledem k tomu, že retenční křivku můžeme v jistém smyslu, tj. při zahrnutí hystereze, považovat za prostou funkci, máme dvě možnosti: difuzní a kapacitní formu Richardsovy rovnice. Většinou bývá vhodnější kapacitní forma, s níž budeme nadále pracovat.

Obecně není retenční křivka jednoduchou funkcí; pro vztah mezi tlakovou výškou a vlhkostí je charakteristická hystereze. Při navrhování a testování kapilárních bariér bývá hystereze zanedbávána [4, 9], podrobnější studie však ukazují, že má nezanedbatelný vliv na jejich účinnost [10–13].

Experimentální stanovení retenční křivky není jednoduché; zpravidla se určuje pouze hlavní drenážní větev. Mnohem náročnější měření zvlhčovací větve nebývá k dispozici. Použijeme-li při modelování proudění drenážní větve retenční křivky, nadhodnotíme účinnost bariéry. Vzhledem k tomu, že k zatěžování kapilárního rozhraní – a k jeho případnému prolomení – dochází při vzrůstající vlhkosti v kapilární vrstvě, je správnější zahrnout do modelu hysterezi. Níže podrobně uvádíme, jakým způsobem jsme do použitých matematických modelů zvlhčovací větve implementovali.

Tato studie se zaměřuje na určení parametru α pro zvlhčovací větve retenční křivky (ozn. α^w) a na jeho vliv na účinnost kapilárních bariér. Kromě standardně využívaného vztahu mezi parametry α zvlhčovací a drenážní větve, $\alpha^w = 2\alpha^d$ [14], bylo využito i analogie na základě výsledků měření drenážní i zvlhčovací větve retenční křivky, které provedla Trpková [15]. Výpočtem parametru α^w se zabývali Likos et al. [16], když z výsledků experimentů se zvlhčovací větví určili van Genuchtenovy parametry α , m a n .

K testování efektivnosti kapilární bariéry při odlišných hodnotách parametru α slouží numerické modelování. Vzhledem k náročnosti experimentálního testování kapilárních bariér se využívá opakovaně prokázané skutečnosti, že matematické modely jsou dostatečně účinné a přesné k tomu, aby spolehlivě simulovaly experimentální měření, viz např. [1, 17–20]. Pomocí separátních modelů pro hlavní drenážní a hlavní zvlhčovací větve retenční křivky bylo dále možné vyhodnotit případný vliv hystereze na fungování kapilárních bariér.

Hydromechanické charakteristiky prostředí

K numerickému modelování proudění vody v kapilárních bariérách užíváme kapacitní formu Richardsovy rovnice ve dvou prostorových proměnných. Využitými konstitučními vztahy jsou hydraulická vodivost $K(h)$ a retenční křivka ve tvaru $\theta(h)$, kde h je tlaková výška a θ je vlhkost.

Richardsova rovnice je pak vyjádřena následovně:

$$C(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(K(h) \frac{\partial}{\partial x_i} (h + x_2) \right) \quad (1)$$

kde:

$C(h) = \partial \theta / \partial h$ [L ⁻¹]	je	kapacitní funkce
t [T]		čas
x_1, x_2 [L]		kartézské souřadnice
osa x_2		orientována svisle vzhůru

Retenční křivka je rovnovážný konstituční vztah udávající hodnotu vlhkosti v závislosti na tlakové výšce. K jejímu vyjádření se obvykle využívá van Genuchtenův vztah [21]:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (-ah)^n)^m} \quad \text{pro } h < 0 \quad \text{a} \quad \theta(h) = \theta_s \quad \text{pro } h \geq 0, \quad (2)$$

kde:

θ_r a θ_s [-]	jsou	reziduální a nasycená vlhkost
a [L ⁻¹], m [-] a n [-]		van Genuchtenovy parametry

Obecně platí $a > 0$, $m \in (1; 0)$ a $n > 1$. Zpravidla navíc předpokládáme $m = 1 - 1/n$. Pro stanovení těchto parametrů z měřených dat retenční křivky slouží program RETC [22].

V numerických simulacích prováděných v rámci této studie byl k vyjádření závislosti hydraulické vodivosti na tlakové výšce použit obvyklý distribuční model:

$$K_s \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \left(\frac{1 - F(\theta)}{1 - F(\theta_s)} \right)^2} \quad [\text{LT}^{-1}] \quad (3)$$

kde:

$$F(\theta) = \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{1/m} \right)^n \quad [-] \quad (4)$$

viz [23, 21].

Do kapacitní formy Richardsovy rovnice vstupuje hydraulická vodivost ve tvaru:

$$K(h) = \frac{K_s}{\sqrt{(1 + (-ah)^n)^m}} \left(1 - \left(1 - \frac{1}{(1 + (-ah)^n)} \right)^m \right)^2, \quad [\text{LT}^{-1}] \quad (5)$$

který dostaneme dosazením vhodné větve retenční křivky (2) do rovnice 3.

Průběh zvlhčování a průběh odvodňování nejsou dány jedinou funkcí. Obecná změna vlhkosti závisí na probíhajícímu procesu (rostoucí nebo klesající tlaková výška) a na hodnotách vlhkosti a tlakové výšky v bodech obratu; zavedení hystereze do matematického modelu proudění znamená ztrátu jednoznačnosti funkce $\theta(h)$. Jednoduchý, a přitom dostatečně spolehlivý model hystereze je prezentován v článku [24]. V modelu je využito zjednodušení $\theta_r^d = \theta_r^w = \theta_r$, $n^d = n^w = n$ a $a^d < a^w$ [25]. Zde a dále horními indexy d a w označujeme drenážní a zvlhčovací větve. Autoři do rovnice 2 také zavádějí nenulovou

vstupní hodnotu vzduchu podle [26], vztah $a^w = 2a^d$ a předpoklad, že během zvlhčovacích fází nedochází k uzavírání vzduchu v pórech, tj. že platí $\theta_r^d = \theta_r^w = \theta_r$. Drenážní, resp. zvlhčovací větve vyšších řádů retenční křivky pak dostávají jednoduchou lineární transformaci založenou pro daný bod obratu na rozdíl hodnot aktuální vlhkosti a vlhkosti dané hlavní drenážní větví pro aktuální tlakovou výšku, resp. na rozdíl hodnot aktuální vlhkosti a vlhkosti dané hlavní zvlhčovací větví pro aktuální tlakovou výšku. Pro potřeby tohoto článku je důležité, že navržená metoda dává v případě hlavní drenážní a hlavní zvlhčovací větve nejen rozdílné vstupní hodnoty vzduchu, ale i rozdílné hodnoty tlakových výšek inflexního bodu obou větví.

V této studii považujeme retenční křivku za jednoznačnou funkci danou hlavní zvlhčovací větví. To odpovídá výše uvedené skutečnosti, že kritickým procesem v kapilární bariéře je rostoucí tlaková výška. Protože v každé fázi reálného procesu je při dané hodnotě tlakových výšek vlhkost rovna nebo vyšší než vlhkost udávaná hlavní zvlhčovací větví, může být hydraulická vodivost kapilární vrstvy daným zjednodušením poněkud podhodnocena, a tím může být podhodnocena i účinnost kapilární bariéry. Porovnání výsledků s experimenty, jež byly k dispozici, však ukazuje velmi dobrou shodu a potvrzuje spolehlivost použité metody. Toto zjištění je navíc v souladu se závěry uvedenými v publikaci [24].

METODIKA

Studované materiály a jejich parametry

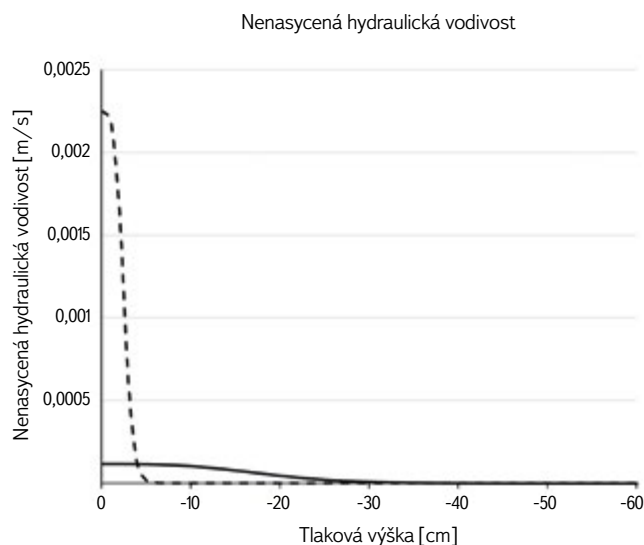
Pro účely této studie byla převzata jedna reálná, dobře zdokumentovaná kapilární bariéra, která slouží jako standard pro srovnání s dalšími variantami, a byl vygenerován jeden hypotetický materiál jako vhodná alternativní kapilární vrstva. Takto získané tři základní materiály, dvě různé kapilární vrstvy a jeden kapilární blok, pak byly využity k vytvoření několika možných variant hlavních zvlhčovacích větví (stále s možností srovnání s měřenou zvlhčovací větví) generovaných podle pravidel uváděných v odborné literatuře. Výchozí materiály kapilární vrstvy a kapilárního bloku byly převzaty z dokumentace experimentálního testování kapilární bariéry provedeného na Ruhrské univerzitě v Bochumi [27] a laboratorního měření použitých materiálů provedeného na Přírodovědecké fakultě UK [1, 28]. Pro kapilární blok jde o homogenní materiál (dále označovaný B_0) s velikostí zrn 2–8 mm. Podle Powersovy klasifikace [29] náleží do kategorie „slabě zaoblený“; částice mají dobře zaoblené hrany a hůře zaoblené vrcholy. Pro kapilární vrstvu se jedná o materiál (dále označovaný L_0) vzniklý v říčním prostředí, z něhož byly vápnité části a větší zrna odstraněny. Podle Powersovy klasifikace náleží do kategorie zaoblený, částice mají zaoblené jak hrany, tak vrcholy.

Pomocí tenzní aparatury navržené podle Havlíčka a Myslivce [30] byly naměřeny drenážní i zvlhčovací větve retenčních křivek u obou materiálů. Díky tomu bylo možné získané charakteristiky použít pro porovnání numerických výsledků s výsledky laboratorních měření ve sklopném žlabu a následně, po potvrzení spolehlivosti numerických simulací, pro vyhodnocení vlivu hystereze při matematickém modelování kapilárních bariér. Hlavní drenážní, resp. hlavní zvlhčovací větve materiálu kapilární vrstvy označujeme nadále L_0^d , resp. L_0^w . Podobně hlavní drenážní větve a hlavní zvlhčovací větve kapilárního bloku označujeme B_0^d a B_0^w .

Pro další studium vlivu parametrů kapilární vrstvy na účinnost bariéry byl pomocí softwaru Rosetta [31] vygenerován vlastní materiál kapilární vrstvy označený L_1 a definovaný souborem parametrů θ_r , θ_s^d , a^d , n^d tak, aby těmito parametry určený materiál svými zrnitostními vlastnostmi odpovídal požadavkům na materiál kapilární vrstvy podle Píchy [2].

Nenasycená hydraulická vodivost testovaných materiálů byla určena pomocí vztahu (5), s nasycenou vodivostí $K_s = 1,18 \times 10^{-4}$ m/s převzatou z materiálu L_0 .

Hydraulické vodivosti materiálů L_1 a B_1 kapilární vrstvy a bloku odpovídající drenážním větvím retenčních křivek jsou uvedeny na obr. 1. V grafu je vidět, jak se obě funkce liší a jak se jejich rozdíl mění s měnící se tlakovou výškou.



Obr. 1. Nenasycená hydraulická vodivost kapilární bariéry. Křivky závislosti nenasycené hydraulické vodivosti na tlakové výšce pro kapilární vrstvu LD a kapilární blok BD.

Data odpovídají drenážní větvi retenční křivky

Fig. 1. Unsaturated hydraulic conductivity of the capillary barrier. The curve of dependence unsaturated hydraulic conductivity on the pressure head for capillary layer LD and capillary block BD. The data correspond to the drainage branch of the retention curve

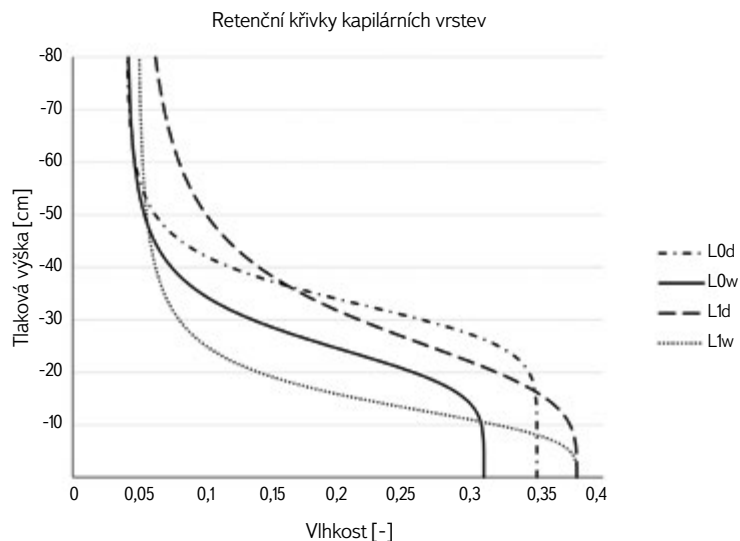
Vzhledem k tomu, že obecně nelze v matematickém modelu kapilární bariéry zanedbat hysterezi a pracovat pouze s hlavní drenážní větví, věnujeme se v této studii podrobněji konstrukci hlavní zvlhčovací větve z obvykle měřených parametrů drenážní větve, konkrétně možnosti změny pouze parametru a [14, 24].

Obecně platí $a^w > a^d$. Byly posuzovány dva základní přístupy pro určení parametrů a^w . V prvním případě byly využity výsledky laboratorního měření z předchozích studií [11] a vyhodnocena vzájemná souvislost parametrů a zvlhčovací a drenážní větve retenční křivky. Z výsledků měření vyplývá přepočtový vztah $a^w = 1,1a^d$ pro kapilární blok a $a^w = 1,4a^d$ pro kapilární vrstvu. Dále byl zkoumán výše citovaný vztah $a^w = 2a^d$ podle Scotta et al. [14].

Vstupní parametry numerických modelů pro drenážní i zvlhčovací větve retenčních křivek studovaných materiálů kapilární bariéry jsou shrnuty v tab. 1.

K získání parametrů a^w a n^w ze známých parametrů a^d a n^d jsme tedy zvolili zjednodušení $n^d = n^w$ navržené ve studii Dohnala et al. [24], kde je porovnáním numerických simulací s experimentálním měřením potvrzena jeho dostatečná přesnost. Z uvedených dat vyplývá, že byly měněny pouze hodnoty parametru a pro zvlhčovací větve retenční křivky. Varianta č. 1 odpovídá použití vztahu $a^w = 2a^d$ podle [14]. Pro variantu č. 2 byly využity přepočtové vztahy $a^w = 1,4a^d$ pro kapilární vrstvu i blok. Ve variantě č. 3 byly uvažovány vztahy $a^w = 1,4a^d$ pro kapilární vrstvu a $a^w = 1,1a^d$ pro kapilární blok. Retenční křivky studovaných materiálů odpovídající zmíněným variantám parametru a^w kapilární vrstvy a kapilárního bloku bariéry jsou graficky znázorněny na obr. 2 a 3. Jsou v nich patrné rozdíly mezi drenážními a zvlhčovacími větvemi.

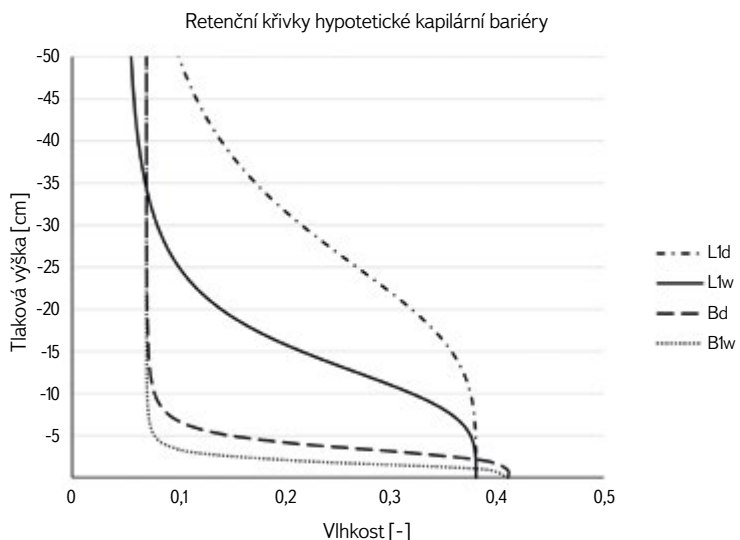
Na obr. 4 jsou pro srovnání vykresleny zvlhčovací větve retenční křivky kapilárního bloku podle změny parametru a^w .



Obr. 2. Hlavní drenážní a hlavní zvlhčovací větve retenčních křivek reálného (L_0)

a vygenerovaného (L_1) materiálu kapilární vrstvy

Fig. 2. Main drainage and main wetting branches of the retention curve of real (L_0) and composed (L_1) capillary-layer materials



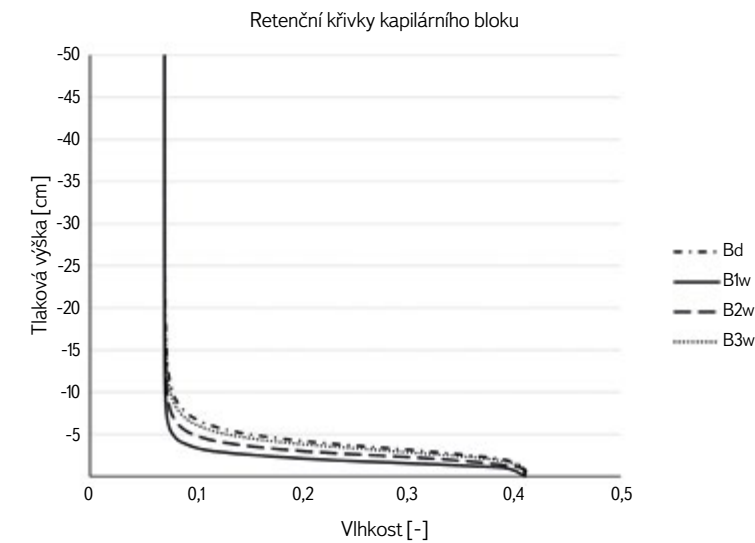
Obr. 3. Hystereze retenčních křivek kapilární vrstvy a kapilárního bloku hypotetické

kapilární bariéry. Křivky L1d a B1d znázorňují drenážní větve retenčních křivek kapilární vrstvy a kapilárního bloku, L1w a B1w zobrazují zvlhčovací větve retenční křivky kapilární vrstvy a kapilárního bloku

Fig. 3. Retention curve hysteresis of capillary layer and capillary block of the hypothetical capillary barrier. Curves L1d and B1d represent the drainage branch of the retention curves of the capillary layer and the capillary block; L1w and B1w depict the wetting branch of the retention curves of the capillary layer and the capillary block

Tab. 1. Parametry testovaných materiálů
Tab. 1. Parameters of the tested materials

	Ks [m/s]	Θr	Θs ^d	Θs ^w	α ^d [cm ⁻¹]	α ^w [cm ⁻¹]	n ^d	n ^w
L_0	1,18E-04	0,04	0,35	0,31	0,03	0,04	7,39	5,24
B_0	2,25E-03	0,07	0,41	0,41	0,29	0,32	4,56	4,17
L_1	1,18E-04	0,048	0,38	0,38	0,037	0,074	3,89	3,89
B_1	2,25E-03	0,07	0,41	0,41	0,29	0,58	4,56	4,56
L_2	1,18E-04	0,048	0,38	0,38	0,037	0,052	3,89	3,89
B_2	2,25E-03	0,07	0,41	0,41	0,29	0,406	4,56	4,56
L_3	1,18E-04	0,048	0,38	0,38	0,037	0,052	3,89	3,89
B_3	2,25E-03	0,07	0,41	0,41	0,29	0,32	4,56	4,56



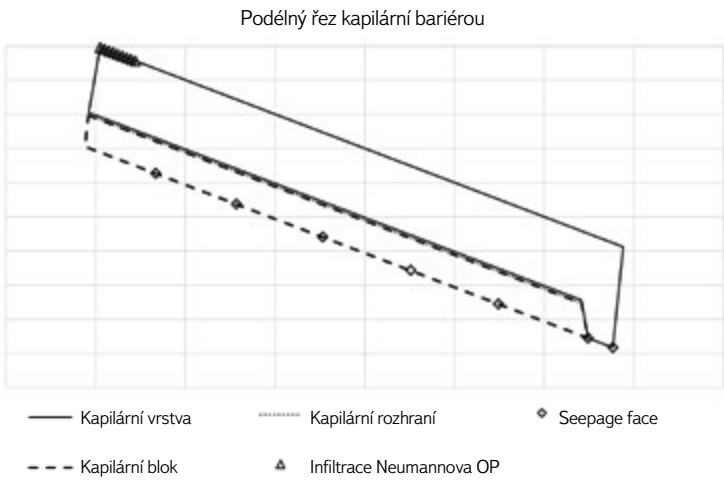
Obr. 4. Retenční křivky kapilárního bloku s odlišnými hodnotami parametru α^w .
Porovnání retenční křivky kapilárního bloku pro drenážní větev BD a tři variant B1w, B2w a B3w pro zvlhčovací větev reflektující změnu parametrem α_w
Fig. 4. Capillary block retention curves with different values for parameter α^w .
Comparison of the capillary block retention curves for draining branch BD and the three variants B1w, B2w and B3w of the wetting branch reflecting the changes in the parameter α_w

Vliv parametru α na modely kapilárních bariér

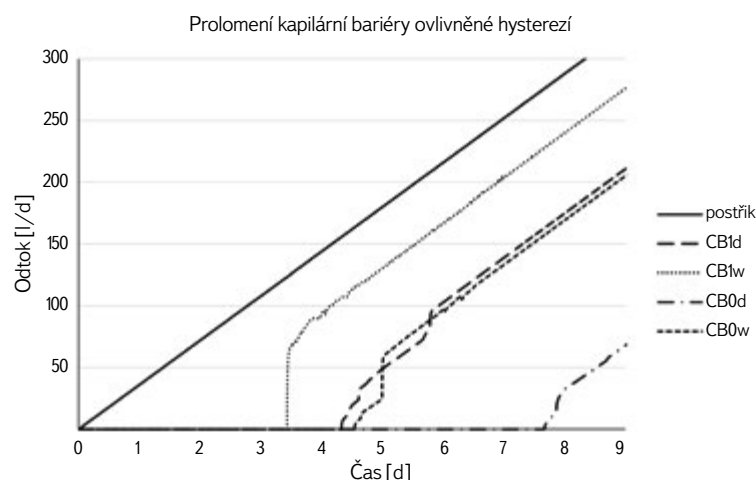
Parametr α můžeme považovat za rozhodující faktor k vyjádření změny retenční křivky při změně procesu z vysoušení na zvlhčování a naopak. Experimentálně naměřená data hlavních zvlhčovacích větví materiálů B_0 a L_0 [1] umožnila určit užitím programu RETC parametry těchto hlavních zvlhčovacích větví. Kromě efektu zavřeného vzduchu byly zaznamenány, oproti příslušné hlavní drenážní větvi, změny nejen parametru α , ale i parametru n . To ovšem mohlo být způsobeno tím, že hlavní drenážní větev nebyla vzata v úvahu. Výzkum procesů, při nichž se opakovaně měnil směr změny vlhkosti [24], ukazuje, že matematický model zahrnující hysterezi užitím parametrů α^d , α^w a n^d dává dostatečně přesnou simulaci procesů zahrnujících oba směry změny vlhkosti.

Jelikož jsme se zaměřovali na vliv volby parametru α^w na účinnost kapilární bariéry, pracovali jsme s numerickými modely několika variant této volby.

Matematické modely byly formulovány ve dvou prostorových proměnných (ve svislém řezu vedeném spádnicí bariéry). K výpočtům byl použit program S2D_dual [32], který řeší kapacitní formu Richardsovy rovnice metodou konečných prvků. Pomocí numerických modelů bylo možné sledovat vývoj vsakujícího se postřiku v prostoru a čase v závislosti na měnících se parametrech. Byl sestaven model kapilární bariéry se základními hodnotami hydromechanických charakteristik. Počáteční tlaková výška byla nastavena na hodnotu -40 cm [1]. Okrajové podmínky se liší podle místa hranice. V místě infiltrace byla nastavena Neumannova okrajová podmínka odpovídající lineárně narůstající hodnotě postřiku, díky čemuž bylo možné porovnávat jednotlivé verze modelů a vyhodnotit čas prolomení kapilární bariéry ovlivněný měnícími se parametry. Odtok z kapilární bariéry byl modelován pomocí okrajové podmínky Seepage face v místech drenáže kapilární bariéry. Na zbývajícím okraji modelované oblasti, jež je reprezentována nepropustnou hranicí, byla nastavena nulová Neumannova okrajová podmínka. Okrajové podmínky jsou graficky znázorněny na obr. 5.

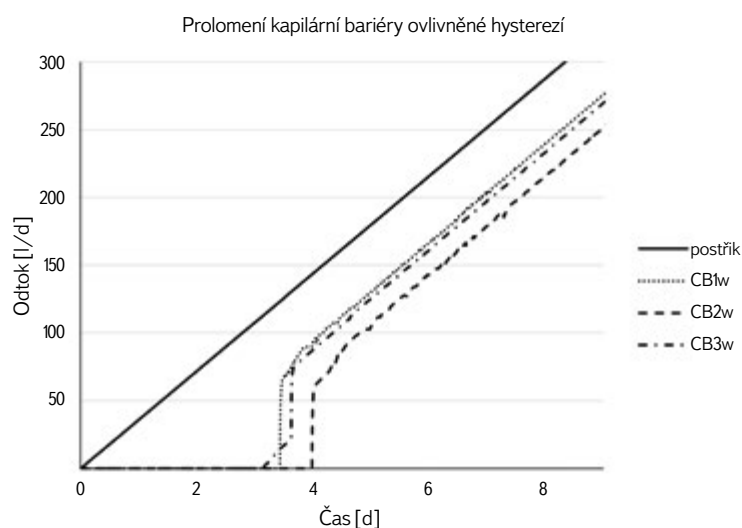


Obr. 5. Řez kapilární bariérou s vyznačenými okrajovými podmínkami pro infiltraci odpovídající nenulové Neumannově okrajové podmínce a okrajová podmínka drenáže z kapilárního bloku Seepage face. Na zbývajícím části hranice je nulová Neumannova okrajová podmínka. Délka kapilární bariéry je 6 m a výška 60 cm
Fig. 5. Section through the capillary barrier with marked boundary conditions for infiltration corresponding to the non-zero Neumann boundary condition and drainage from the capillary block as a Seepage face boundary condition. The remaining part of the boundary is the zero Neumann boundary condition. The length of the capillary barrier is 6 m and the height is 60 cm



Obr. 6. Účinnost kapilární bariéry ovlivněná hystezí. Graf znázorňuje lineárně narůstající postřik stejný pro všechny simulace, odtok z kapilárního bloku CB0d a CB0w pro drenážní a zvlhčovací větev retenční křivky výchozí kapilární bariéry a CB1d a CB1w pro drenážní a zvlhčovací větev retenční křivky varianty 1 hypotetické kapilární bariéry podle Scotta et al. [14]

Fig. 6. Capillary barrier efficiency affected by hysteresis. The graph shows linearly increasing irrigation (the same for all simulations), outflow from capillary block CB0d and CB0w for the drainage and wetting branch of the default capillary barrier retention curve, and CB1d and CB1w for the drainage and wetting branch of the retention curve of variant 1 of the hypothetical capillary barrier according to Scott et al. [14]



Obr. 7. Účinnost kapilární bariéry v závislosti na volbě parametru α^w zvlhčovací větve retenční křivky. Postřik v grafu znázorňuje lineárně narůstající intenzitu postřiku, zvlhčovací křivky 1, 2 a 3 odpovídají odtoku z kapilárního bloku pro tři varianty výpočtu α^w zvlhčovací větve retenční křivky

Fig. 7. Capillary barrier efficiency depending on the choice of parameter α^w of the retention curve wetting branch. Irrigation in the chart shows a linearly increasing intensity of irrigation; wetting curves 1, 2 and 3 correspond to the outflow from the capillary block for three variants of calculation α^w of the wetting branch retention curve

Postřik byl pro všechny počítané varianty totožný, aby bylo možné výstupy mezi sebou porovnávat. Drenážní a zvlhčovací větve retenční křivky byly modelovány jako separátní verze modelů s odlišnými vstupními parametry. Bylo tedy možné vyhodnotit a ověřit vliv hystereze a volby parametru α^w na fungování kapilárních bariér u všech modelovaných variant (obr. 6).

Kromě základní varianty modelu kapilární bariéry pro drenážní větve retenční křivky byly modelovány tři varianty pro zvlhčovací větve retenční křivky. Varianty výpočtu pro různé zvlhčovací větve jsou založeny na měnícím se parametru α^w zvlhčovací větve retenční křivky kapilární vrstvy, případně i bloku. Výsledky jsou znázorněny na obr. 7.

DISKUZE A ZÁVĚR

V této práci jsme srovnávali účinnost několika kapilárních bariér, jež se lišily kapilární vrstvou určenou testovanými volbami parametru α . Vzhledem k tomu, že pro výchozí materiál jsou k dispozici výsledky experimentálních testů, mohli jsme potvrdit, že matematický model bariéry dává dostatečně přesné výsledky už při použití samotné hlavní zvlhčovací větve. Srovnání s experimentálními výsledky dále ukázalo, že v případě účinnosti bariér nelze zanedbat hysterezi a pracovat pouze s drenážní větví kapilární bariéry. Byly tak potvrzeny předchozí experimenty [11, 28].

Série testů zaměřených na odvození hlavní zvlhčovací větve ve známých (tj. měření určených) parametrech hlavní drenážní větve ukázala, že významnou roli v tomto kroku má určení parametru α^w , a že je dokonce možné, jak navrhuje citované publikace, zachovat parametry θ_r^d , n^d , případně i θ_s^d , a hlavní drenážní větve definovat pouze vhodně určeným parametrem α^w . Ukazuje se, že původně navrhovaná a v některých případech osvědčená volba $\alpha^w = 2\alpha^d$ nemusí být tím nejlepším řešením. V případě výchozí bariéry B^0 , L^0 je zřejmé, že takto zvolený parametr α^w by mohl vést k podhodnocení účinnosti bariéry.

Ze získaných výsledků je patrné, že co nejpřesnější určení parametrů retenční křivky hraje podstatnou roli pro stanovení efektivity kapilární bariéry. Pokud máme dva fyzicky existující materiály, kapilární blok a kapilární vrstvu, a chceme zjistit účinnost jimi vytvořené kapilární bariéry, pak se můžeme spolehnout na test provedený matematickým modelem. Pro kapilární blok nám v takovém případě stačí parametry hlavní drenážní větve. Pro kapilární vrstvu, vzhledem k citlivosti výsledku na hodnotu parametru α^w , je vhodné určit parametry hlavní zvlhčovací větve měření. Pokud máme k dispozici jen parametry hlavní drenážní větve, je vhodné použít model hlavní zvlhčovací větve založený na změně pouze parametru α . Výsledky této studie ukazují, že v takovém případě je třeba volit pro α^w vhodnou hodnotu v intervalu $1,1 \alpha^d \leq \alpha^w \leq \alpha^d$.

Poděkování

Projekt „Hydromechanické charakteristiky retenčních křivek a jejich vliv na proudění podzemní vody“ byl financován Grantovou agenturou Univerzity Karlovy pod č. 296215.

Literatura

- [1] TRPKOŠOVÁ, D., MLS, J. The Influence of Artificial Sealing on the Capillary Barrier's Function. *Waste Management*. 2010, 30(1), s. 125–131.
- [2] PÍČHA, P. Laboratory Testing of the Capillary Barrier. *Acta Universitatis Carolinae – Geologica*. 2004, 1–4, s. 29–36.
- [3] MANCARELLA, D., DOGLIONI, A., SIMONE, V. On Capillary Barrier Effects and Debris Slide Triggering in Unsaturated Layered Soils. *Engineering Geology*. 2012, 147–148, s. 14–27.
- [4] STORMONT, J. C. The Effectiveness of Two Capillary Barriers on a 10% Slope. *Geotechnical and Geological Engineering*. 1996, 14(4), s. 243–267.



[5] PARENT, S. É., CABRAL, A. R. Design of Inclined Covers with Capillary Barrier Effect. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2006, 24(3), s. 689–710.

[6] SEHRBROCK, U. Kombi-Kapillardichtung Kostengünstige Dichtungsvariante für ein Tasi Konformes Oberflächenabdichtungssystem. In: *19. Fachtagung – Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen*. Würzburg, 2003.

[7] SEHRBROCK, U. Verbundsysteme aus Kapillarsperre, Dichtungsbahnen und Geotextilien für die Oberflächenabdichtung von Deponien. In: *19. Fachtagung – Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen*. Würzburg, 2005.

[8] WOHNLICH, S., BITOMSKI, K. Kombi-Kapillar-Dichtungs-Systeme zur Oberflächenabdichtung von Deponien und Altlasten. In: *22. Fachtagung Die sichere Deponie, Sicherung von Deponien und Altlasten mit Kunststoffen*. Würzburg, 2006.

[9] OLDENBURG, C. M., PRUESS, K. On Numerical Modeling of Capillary Barriers. *Water Resource Research*. 1993, 29(4), s. 1 045–1 056.

[10] MORRIS, C. E., STORMONT, J. C. Evaluation of Numerical Simulations of Capillary Barrier Field Tests. *Geotechnical and Geological Engineering*. 1998, 16, s. 201–213.

[11] TRPKOŠOVÁ, D., MLS, J. Efficiency of Capillary Barriers in Relation to Retention Curves. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*. 2010, 7(2), s. 201–207.

[12] MLS, J., TRPKOŠOVÁ, D. Modelling Capillary Barriers. In: *WIT Transaction on Engineering Sciences*. 2014, s. 383–393.

[13] ZHAO, Y., WEN, T., SHAO, L. T., CHEN, R., SUN, X., HUANG, L., CHEN, X. Predicting Hysteresis Loops of the Soil Water Characteristic Curve from Initial Drying. *Soil Science Society of America Journal*. 2020, 84(5), s. 1 642–1 649.

[14] SCOTT, P. S., FARQUHAR, G. J., KOUWEN, N. Hysteretic Effects on Net Infiltration. In: *Conference Paper. Advances in Infiltration*, 1983, s. 163–170.

[15] TRPKOŠOVÁ, D., MLS, J. Hydraulické charakteristiky kapilární bariéry ve vztahu k její účinnosti. *Acta Hydrologica Slovaca*. 2008, 9(2), s. 170–178.

[16] LIKOS, W. J., LU, N., GODT, J. W. Hysteresis and Uncertainty in Soil Water – Retention Curve Parameters. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2014, 140(4), 04013050.

[17] NAM, V. T., MIN, K. T., SHIN, H. Using Inverse Analysis to Estimate Hydraulic Properties of Unsaturated Sand from One-Dimensional Outflow Experiments. *Engineering Geology*. 2013, 164, s. 163–171.

[18] GUZMÁN-MARTÍNEZ, J. C., GARCÍA, E. F., VEGA-POSADA, C. A. Effect of Hydro-mechanical Material Parameters on the Capillary Barrier of Reinforced Embankments. *Soil and Foundations*. 2022, 62(1), 101090.

[19] RAHARDJO, H., LEONG, E. C., FREDLUND, D. D. Design and Laboratory Verification of a Physical Model of Sloping Capillary Barrier. *Canadian Geotechnical Journal*. 2011, 41(5), s. 814–830.

[20] SCARFONE, R., WHEELER, S. J., SMITH, C. C. Numerical Modelling of the Application of Capillary Barrier Systems for Prevention of Rainfall-Induced Slope Instability. *Acta Geotechnica*. 2023, 18(1), s. 355–378.

[21] VAN GENUCHTEN, M. T. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980, 44(5), s. 892–898.

[22] VAN GENUCHTEN, M. T., LEU, F. J., YATES, S. R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. *EPA 600/2-91-065*. 1991, 85 s.

[23] MUALEM, Y. A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media. *Water Resources Research*. 1976, 12(3), s. 513–522.

[24] DOHNAL, M., DUŠEK, J., VOGEL, T. The Impact of the Retention Curve Hysteresis on Prediction of Soil Water Dynamics. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2006, 54(3), s. 258–268.

[25] KOOL, J. B., PARKER, J. C. Development and Evaluation of Closed-Form Expressions for Hysteretic Soil Hydraulic – Properties. *Water Resources Research*. 1987, 23(1), s. 105–114.

[26] VOGEL, T., VAN GENUCHTEN, M., ČÍSLEROVÁ, M. Effect of the Shape of the Soil Hydraulic Functions Near Saturation on Variably – Saturated Flow Predictions. *Advances in Water Resources*. 2001, 24(2), s. 133–144.

[27] WOHNLICH, S., *Untersuchungsbericht-Dichtigkeitsnachweis der Kombikapillardichtung (KKD), in 3. Kippinnenversuch*. Bochum, 2006.

[28] MLS, J., TRPKOŠOVÁ, D. On the Reliability of Mathematical Modelling of Capillary Barriers. *International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements*. 2013, 1(4), s. 406–415.

[29] POWERS, M. C. A New Roundness Scale for Sedimentary Particles. *Journal of Sedimentary Research*. 1953, 23(2), s. 117–119.

[30] HAVLÍČEK, J., MYSLIVEC, A. The influence of Saturation and Stratification on the Shearing Properties of Certain Soils. In: *6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1. Toronto: University of Toronto Press, 1965, s. 235–239.

[31] SCHAAP, M. G., LEIJ, H. J., VAN GENUCHTEN, M. T. Rosetta: A Computer Program for Estimating Soil Hydraulic Parameters with Hierarchical Pedotransfer Functions. *Journal of Hydrology*. 2001, 251, s. 163–176.

[32] VOGEL, T. *Documentation of the S2D code – version 2.0*. Praha: CTU, 1999 (internal).

Autoři

Mgr. Barbora Krijt^{1,2}
✉ barbora.krijt@vuv.cz
ORCID: 0000-0002-7678-3369

doc. RNDr. Jiří Mls, CSc.²
✉ jiri.mls@natur.cuni.cz
ORCID: 0000-0001-5598-9432

¹Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha
²Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2024.07.004

ISSN 0322-8916 © 2024 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněně šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

INFLUENCE OF RETENTION CURVE
PARAMETER α ON CAPILLARY
BARRIER EFFICIENCY

KRIJT, B.^{1,2}; MLS, J.²

¹T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague
²Faculty of Science, Charles University, Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics, Prague

Keywords: capillary barrier — numerical modelling — retention curve — hydraulic characteristics — hysteresis

This study was focused on calculation of parameter α of wetting branch of the retention curve and its influence on the functioning of capillary barrier. Capillary barrier is a simply method of a landfill insulation. Principle of the capillary barrier is based on the different hydraulic properties of two inclined layers of soil with different grain sizes. The upper capillary layer consists of fine-grained soil and the bottom capillary block of coarse – grained soil. Under certain pressure conditions the hydraulic conductivity of the capillary layer is higher than the hydraulic conductivity of the capillary block. It follows that the water flows away along the capillary interface between the capillary layer and capillary block.

The capillary barrier unsaturated flow system is based on the Richards equation containing two unknowns. Therefore, it is necessary to supplement it with another equation, which is most often the retention curve. The phenomenon of a different course of the wetting and draying retention curve is called hysteresis. When designing and testing capillary barriers, hysteresis is often neglected [4, 9], but new studies show that it has a significant effect on its effectiveness [10–13]. The correct determination of the retention curves, including its hysteresis, is thus necessary for the subsequent solution of the flow in the unsaturated zone.

The aim of this study was to test the effectiveness of the capillary barrier affected by the changes of retention curve parameters and hysteresis. Numerical

modeling was used to test the effectiveness of the capillary barrier at different values of the parameter α and including the process of the hysteresis. Thanks to the numerical modeling, it was possible to monitor the direct effect of changing parameter α^w on the efficiency of the capillary barrier. Using separate models for the drainage and moistening branches of the retention curve, it was also possible to evaluate the influence of hysteresis on the functioning of capillary barriers.

As a result of compiled numerical models, it was possible to evaluate the effect of a various calculation of the parameter α^w on the effectiveness of capillary barriers. The results of numerical models show a direct influence of the calculation of the parameter α^w on the effectiveness of capillary

barriers. From the outputs of the numerical models, it is evident that determining the parameters of the retention curve as accurately as possible plays a significant role in assessment of the effectiveness of the capillary barriers. Verification of the importance of hysteresis in the design and testing of capillary barriers was included in the numerical models. Numerical models have confirmed previous studies, which point to the fact that neglecting hysteresis, or the wetting branch of the retention curve, will lead to an overestimation of the effectiveness of the capillary barrier.



Problematika starých podzemních vod v hydrogeologických rajonech 4410 Jizerská křída pravobřežní a 4522 Křída Liběchovky a Pšovky

JAKUB MAREŠ, MARTIN SLAVÍK, JOSEF VOJTĚCH DATEL

Klíčová slova: podzemní voda — česká křídová pánev — zdroj pitné vody — datování — tritium — kvantifikace zdrojů vody — ochrana povrchových a podzemních vod — konceptuální model

ABSTRAKT

Článek přibližuje projekt Technologické agentury ČR, který se zabývá problematikou starých podzemních vod v hydrogeologických rajonech 4410 a 4522. Cílem příspěvku je na základě rešerše předchozích prací podat stručnou hydrogeologickou charakteristiku zájmové oblasti, představit dosavadní výsledky po prvním roce řešení projektu a popsat nejistoty stávajících informací. Staré podzemní vody, jež mají zanedbatelné koncentrace tritia, se dají považovat za strategický zdroj, protože jsou méně náchylné k současné kontaminaci. Za účelem kvantifikace využitelného množství těchto vod je pravidelně měřena vydatnost pramenů s nízkou koncentrací tritia. Zároveň byly odebrány vzorky vody z nejvýznamnějších vodárenských zařízení v oblasti. U nich je zjišťováno chemické složení a aktivita tritia a změřeny byly i fyzikálně-chemické parametry. Na základě známých průběhů hladin, litologie a naměřených hodnot byl nastíněn koncepční model proudění této staré vody, který bude s využitím nově získaných poznatků v průběhu projektu nadále ověřován a doplňován. Vzhledem k relativně nízké konduktivitě starých vod se dá očekávat, že se voda infiltrovala v místech bez výchozů vápnatých pískovců, jelikož rozpuštěný karbonát by konduktivitu výrazně zvyšoval. Proto předpokládáme infiltraci v okolí Bezdězu, kde jsou výchozy křemenných pískovců. Odtud voda proudí směrem k pramenům a jímacím objektům, kde se navíc – zejména ve spodních částech blíže k významným drenážním oblastem (vodní tok Jizery, resp. Labe) – může ředit přetokovou vodou z cenomanského kolektoru. Přesto se v oblasti vyskytují místa, která nejsou plně v souladu s tímto předpokladem, a původ těchto vod je také předmětem dalšího výzkumu. Následující fáze projektu se zaměří na detailní analýzu stáří vod pomocí dalších stopovačů, jako jsou freony nebo SF₆. Tyto informace povedou k lepšímu pochopení proudění v nejvýznamnější hydrogeologické struktuře v České republice.

ÚVOD

Česká republika je poměrně bohatá na zdroje podzemní vody. Většina jímané vody má krátkou dobu oběhu (typicky první desítky let). Při potenciální katastrofické události velkého rozsahu nemohou tyto malé vodárenské zdroje sloužit pro zásobování pitnou ani užitkovou vodou.

Fosilní vody, odříznuté od současného hydrologického cyklu, mají obvykle nízkou kvalitu a limitované zásoby, protože se nedoplňují. V části české křídové pánve však existují také aktivně proudící vody s dobou zdržení nejméně 70 let a v některých případech i výrazně více, na což upozornil projekt „*Rebalance zásob podzemních vod*“ [1, 2]. Tyto vody s relativně delší střední dobou zdržení nadále v příspěvku nazýváme „staré vody“. Jmenovitě jde o dva křídové hydrogeologické rajony 4410 Jizerská křída pravobřežní a 4522 Křída Liběchovky a Pšovky.

Tento článek informuje o zpracování hydrogeologické problematiky těchto částí české křídové pánve v rámci projektu č. SS06010268 „*Poznání, kvantifikace a ochrana strategických zdrojů podzemní vody české křídové pánve hlubokého oběhu v hydrogeologických rajonech 4410 a 4522*“.

V rámci projektu bude oblast detailně charakterizována z hydrogeologického hlediska. O těchto vodách existuje relativně malý počet informací, často se jedná o odborné odhady, které je třeba ověřit. Ačkoli jde o významnou akumulaci kvalitních podzemních vod – v oblasti jsou např. významná jímací území Řepín a Bělá –, dosavadní analýzy pocházejí jen z několika pramenů. Nejistoty jsou i kolem využitelného množství těchto vod a místa jejich infiltrace. Cílem projektu je tyto nejistoty odstranit a vyřešit. V současné fázi jsou o zájmové oblasti shromážděny dostupné literární a datové zdroje a je prováděn terénní sběr dat a vzorkování pro již probíhající či dokončené hydrochemické a tritiové analýzy podzemní vody. Cílem článku je na základě rešerše předchozích prací podat stručnou hydrogeologickou charakteristiku zájmové oblasti, představit dílčí výsledky z měření průtoků a odběru vzorků a popsat aktuální nejistoty stávajících informací.

POPIS OBLASTI A METODIKA

Pro získání ucelené představy současného stavu poznání o zájmové oblasti byly doposud shromážděny dostupné relevantní informační zdroje. Jde o stratigrafické korelační řezy, hydraulické modely proudění podzemní vody, hydrochemické rozborů a výsledky datování podzemní vody. V rešeršní části příspěvku představujeme základní koncept proudění podzemní vody zformulovaný v předchozím projektu „*Rebalance zásob podzemních vod*“ [1,2], který bude následně v rámci projektu – s využitím nově získaných dat a poznatků – ověřen, kriticky zhodnocen, případně doplněn či změněn.

Na základě rešerše literatury, archivních dat tritiových analýz [1–3] a měření termometrie [4] byly vybrány objekty (prameny, vrty) pro vzorkování a monitoring (hydrochemické analýzy, datovací techniky, vydatnost).

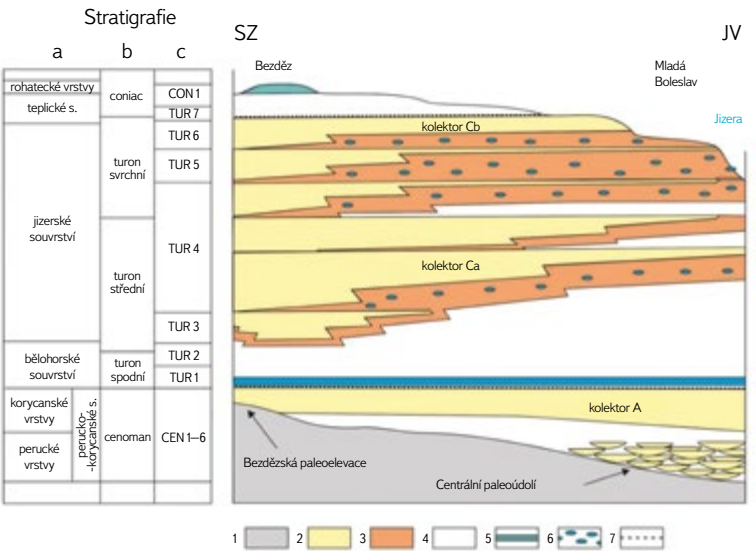
Základní geologická a hydrogeologická charakteristika zájmové oblasti

V tomto oddíle je pro zájmovou oblast (obr. 1) popsána základní geologie a hydrogeologie. Území spadá zčásti do hydrogeologického rajonu 4410 (Jizerská křída pravobřežní), který tvoří přechodní facii mezi většinou písčitém vývojem na ZSZ od Jizery a převážně jílovitým vývojem na VJV od Jizery. Je zde významný výskyt vápnitých a kvádrových pískovců středního až svrchního turonu jizerského souvrství [5, 6]. Druhým hydrogeologickým rajonem v oblasti je 4522 (Křída Liběchovky a Pšovky), který je také hydrogeologicky nejvýznamnějším kolektorem jizerského souvrství, jež se směrem nahoru zhrubuje z vápnitých prachovců a slínovců až po hrubozrnné kvádrové pískovce s polohami slepenců [2]. Třetím rajonem v oblasti je 4720 Bazální křídový kolektor od Hamru po Labe. Z hydrogeologického hlediska však nemusí jít o izolovaný rajon a může docházet k přetokům z horních rajonů do spodního a obráceně skrze izolátory či poloizolátory [7].

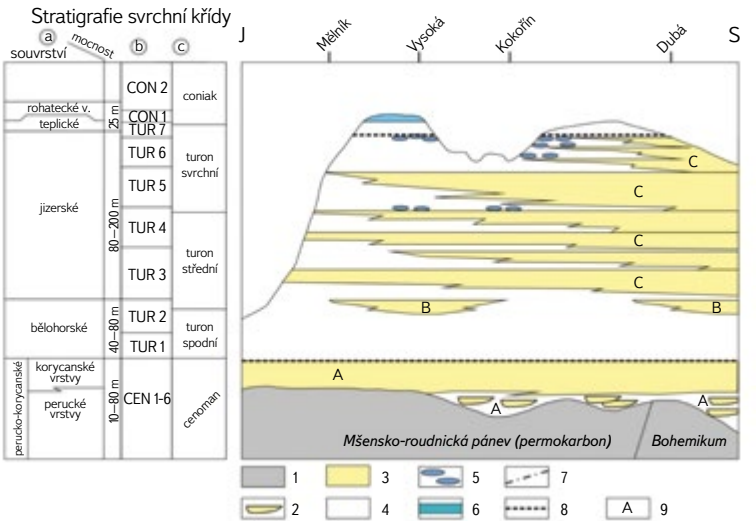


Obr. 1. Mapa zájmové oblasti s vyznačením obou rajonů (červené hranice). V mapě jsou tenkými černými úsečkami znázorněny linie řezů zobrazených na obr. 5 a 6. Upraveno podle mapy.geology.cz
Fig. 1. Map of the area of interest showing the two hydrogeological regions (red borders). The map shows the cross sections (thin black lines) depicted in Figs. 5 and 6. Adapted from mapy.geology.cz

V zájmové oblasti je litostratigraficky vyčleňováno (od nejstarších) perucko-korycanské, bělohorské, jizerské, teplické souvrství a rohatecké vrstvy, a to stář cenoman až coniac. Mladší křídová souvrství se nezachovala. Stratigrafii zájmové oblasti rajonu 4410 v řezu od SZ (Bezděz) k JV (Mladá Boleslav, Jizera) dobře dokumentuje obr. 2, na kterém je uvedeno stratigrafické schéma dle litostratigrafie (souvrství), chronostratigrafie (stář) a genetické stratigrafie [8]. Na obr. 2 jsou taktéž vymezeny kolektory A (cenoman) a C (turon) s rozdělením na subkolektory Ca a Cb (v některých pracích je ještě uváděn i subkolektor Cc [1, 4]). Stratigrafii v rajonu 4522 dobře dokumentuje řez od J k S na obr. 3.



Obr. 2. Stratigrafické schéma a kolektory rajonu 4410 aplikovatelné pro zájmovou oblast. 1 – Horniny podloží křídý; 2 – Pískovce křemenné; 3 – Pískovce vápnité; 4 – Slínovce, jílovce, prachovce; 5 – Mikritické vápence; 6 – Konkrecionální polohy vápenců; 7 – Glaukoniticko-fosfátový horizont na erozivní ploše; a – litostratigrafie [9]; b – chronostratigrafie; c – genetická stratigrafie [8]. Převzato z [1]
Fig. 2. Stratigraphy and aquifers of region 4410. 1 – Cretaceous bedrock; 2 – Quartz sandstone; 3 – Calcareous sandstone; 4 – Marlstone, siltstone, claystone; 5 – Micrite limestone; 6 – Concretion limestone; 7 – Glauconite-phosphate horizon; a – lithostratigraphy [9]; b – chronostratigraphy; c – genetic stratigraphy [8]. Modified after [1]



Obr. 3. Stratigrafické schéma a kolektory rajonu 4522. 1 – Horniny podloží křídý; 2 – Pískovce ve výplni fluvialních koryt; 3 – Pískovce; 4 – Prachovce, jílovce, slínovce; 5 – Polohy vápenců; 6 – Silicifikované slínovce; 7 – Významné tektonické zóny; 8 – Glaukoniticko-fosfátový horizont na erozivní ploše; 9 – Označení kolektoru podzemních vod; a – litostratigrafie [9]; b – genetická stratigrafie [8]; c – chronostratigrafie. Převzato z [2]
Fig. 3. Stratigraphy and aquifers of region 4522. 1 – Cretaceous bedrock; 2 – Fluvial channel sandstone; 3 – Sandstone; 4 – Marlstone, siltstone, claystone; 5 – Limestone; 6 – Silicified claystones; 7 – Tectonic zones; 8 – Glauconite-phosphate horizon; 9 – Aquifers. a – lithostratigraphy [9]; b – genetic stratigraphy [8]; c – chronostratigraphy. Modified after [2]

Perucko-korycanské souvrství (střední až svrchní cenoman) není litologicky homogenní a reprezentuje klastické sedimenty fluvialních, estuarinních a mořských sedimentačních režimů. Z hydrogeologického hlediska jsou důležité mořské křemenné pískovce, jež zde tvoří bazální kolektor označovaný jako A. Jde většinou o napjatý kolektor, který vystupuje na povrch pouze v úzkém pásu podél lužického zlomu. Voda se do něj infiltruje buď přímo v místech výstupu na povrch, nebo přetokem ze svrchnějších kolektorů. Generelní směr proudění vody je od lužického zlomu JJZ směrem k Labi, kde se voda drénuje. Mocnost souvrství je proměnlivá, okolo Bezdězu 10–15 m a směrem k S a JV narůstá.

Bělohorské souvrství (spodní až střední turon, genetická stratigrafie TUR1 a TUR2) bylo v rámci projektu „*Rebalance zásob podzemních vod*“ vymezeno jako pelitický interval (slínovce, prachovité slínovce, vápnité prachovce) v rajonu 4410 s mocností 80–120 m. Pelity jsou interpretovány jako hydrogeologický izolátor A/C [9]. V rajonu 4522 je bělohorské souvrství tvořeno převážně slínovci, na S vápnitými prachovci až prachovci; na povrch vychází pouze v údolí Liběchovky na SZ rajonu 4522 [2].

Hranice mezi bělohorským a nadložním jizerským souvrstvím je konvenčně kladena do úrovně prvního výskytu vápnitých pískovců s polohami konkrecionálních vápenců. Jizerské souvrství (střední až svrchní turon, TUR3 až TUR6) je v zájmové oblasti vyvinuto převážně v křemenných pískovcích a jílovito-vápnitých pískovcích, je plošně nejrozsáhlejší a představuje vodohospodářsky velmi důležitý kolektor podzemních vod označovaný jako kolektor C. Ten je ovšem poměrně rozštěpen a tvoří několik progradčních cyklů TUR3 až TUR6, rozdělených do subkolektorů Ca, Cb, Cc [8]. Toto štěpení je patrnější na V, zatímco na Z rajonu 4410 je jizerské souvrství tvořeno v celé mocnosti téměř výhradně křemennými pískovci kolektoru C (obr. 2). U hranice s rajonem 4521 (na JZ oblasti) se ve spodní části kolektoru C (pod TUR3) vyskytuje v rajonu 4410 anomální vývoj dvou až tří ostře omezených vrstev hrubozrnných pískovců o mocnosti 10–30 m, což zvyšuje celkovou mocnost kolektoru až o 50 m. V rámci celé pánve jde přitom o ojedinělý jev. Báze TUR5 má zvýšené obsahy karbonátu a tvoří regionální izolátor v rámci kolektoru C, přičemž nad izolátorem se místy tvoří zavěšené zvodně. Celková mocnost jizerského souvrství v JZ části rajonu 4410 je okolo 200 m, na SSV se postupně snižuje. V rajonu 4522 je ve spodních až 80 m jizerské souvrství v aleuropelitickém vývoji označované jako izolátor A/C, směrem na sever se tato mocnost snižuje na 10 m a narůstá postupně mocnost křemenných pískovců. V pramenné oblasti Liběchovky je mocnost jizerského souvrství 170 m [2].

Teplické souvrství (svrchní turon až coniac) v izolovaných výskytech překrývá jizerské souvrství v reliktech u Bukovna, Bezdězu a Bakova nad Jizerou. V rajonu 4410 tvoří tmavošedé vápnité jílovce s mocností do 25 m. V horním Pojizeří nebyly zaznamenány rohatecké vrstvy, v okolí Bezdězu se nacházejí jílovité sedimenty označované jako teplické a brezenské souvrství nečleněné. V rajonu 4522 tvoří teplické souvrství velmi omezené relikt prachovců a vápnitých prachovců.

Tektonická deformace oblasti je minimální, s výjimkou S části u lužické zlomové zóny. Obecně jsou křídové vrstvy porušeny zlomovými systémy směru SZ-JV, SSV-JJZ až SV-JZ. V oblasti jižně od Dubé a v okolí Housky se pravděpodobně nachází zlomové porušení na několik oddělených ker. Západní část rajonu 4410 je uložena téměř subhorizontálně, směrem na V s přechodem do mírně ukloněné křídové kry k V a JV. Skrze sedimenty pronikají izolovaná tělesa alkalických vulkanitů, např. Malý a Velký Bezděz.

V zájmovém území se nacházejí dva významné hydrogeologické kolektory: kolektor A (perucko-korycanské souvrství) a kolektor C (jizerské souvrství, dělen na Ca, Cb, Cc). Lokálně se v údolí Strenického potoka vyskytuje i kolektor BC, přecházející laterálně do izolátoru.

Z vodohospodářského hlediska je nejvýznamnější kolektor C, navázaný na pískovce jizerského souvrství, pokrývající skoro celé území rajonu 4410 s výjimkou jeho SZ a J okraje. Zvodněná mocnost kolektoru C je nejvyšší v Z části (170–190 m) a směrem k okrajům rajonu 4410 klesá. Propustnost kolektoru je puklinově-průlinová, obecně směrem k V klesá [1].

Pouhé dělení na kolektory A, C a izolátor B však může být dle aktuálních poznatků příliš zjednodušující [8]. Např. kolektor C je ve skutečnosti ve východní části rajonu 4410 rozdělen polohami prachovců a vápenců na minimálně dva až tři subkolektory Ca, Cb, Cc [1, 8], přičemž bazální artéský subkolektor Ca hydrogeologicky komunikuje s povrchem jen vrty či nevýznamnými netěsnostmi artéského stropu, zatímco střední subkolektor Cb má volnou hladinu a je drénován do povrchových toků. Subkolektor Cc má nesouvislé zvodnění a jde o zavěšenou zvodeň. Tato poměrně složitá situace se projevuje např. tím, že na pravém břehu Jizery je různá úroveň hladiny podzemní vody v závislosti na hloubce vrtů, ačkoli se ve všech případech jedná o „kolektor C“. Mělké vrty (do 50 m) do sekvence TUR5 a TUR6 (subkolektor Cb) mají hladiny blízko terénu, spojené s kvartérním kolektorem jizerských teras. Oproti tomu hluboké vrty (100–150 m) do TUR4 (subkolektor Ca) vykazují hladiny o 5–7 m nad úrovní mělkých vrtů. I když je převážná část oběhu podzemních vod navázána pravděpodobně na subkolektor Cb, v jižní části rajonu 4410 je proudění významné jen v TUR 4 [1]. Tuto značnou prostorovou proměnlivost je tedy třeba zvažovat a rozlišovat, pakliže hovoříme o „kolektoru C“. Schematické geologické řezy na obr. 2 a 3 navíc naznačují, že kolektor C je rozdělen do 5–7 pískovcových vrstev, tudíž těchto subkolektorů může být často ještě více než tři.

Podle archivních analýz tritia [1–3] lze vody s nízkou aktivitou tritia nalézt především v J části rajonu 4410 (jižně od Bělé), a to jak v pramenech, tak ve vrtech. Prameny v povodí Strenického potoka měly hodnoty pod 2 TU, vrty pak pod 1 TU. V povodí Bělé byly nízké hodnoty tritia zjištěny v okolí bělských papíren (2,7 TU), Mukařova a Mnichova Hradiště (pod 4 TU). Dle těchto hodnot (s uvážením doby měření okolo roku 2014 a postupného rozpadu tritia) se jedná o objekty se směsí mladé vody s vodou infiltrovanou před rokem 1950. Obecně jde především o objekty v povodí Strenického potoka (celková vydatnost objektů cca 150 l/s) a Bělé (vydatnost cca 50 l/s). Naopak vyšší hodnoty aktivity tritia (5–7 TU) jsou běžné pro prameny v S a V části rajonu, ale vyskytují se i v povodí Bělé.

V rajonu 4522 v povodí Liběchovky byla aktivita tritia podle archivních analýz velmi proměnlivá od 0,9 do 9,2 TU, ovšem bez vztahu k poloze v povodí. V okolí Nedamova na horní Liběchovce byla zjištěna nízká aktivita tritia v pramenech (pod 4 TU). Pramen s nižší hodnotou tritiové aktivity se nachází také na dolní Liběchovce v Liběchově (Boží voda). V horní části povodí Pšovky byla tritiová aktivita v pramenech okolo 4–6 TU. Nízkou aktivitu tritia měl však pramen Stříbrník (> 10 l/s; 2,8 TU). Nižší aktivitu měly i některé jímané vrty v horní části Řepínského dolu [2, 3]. V tomto rajonu tak část objektů vykazovala značnou střední dobu zdržení s převahou vod infiltrovaných před rokem 1950. Dle archivních ojedinělých analýz pomocí dalších environmentálních stopovačů (radiouhlík, freony, SF₆) se střední doba zdržení vod v oblasti horní Liběchovky a Pšovky pohybuje v řádu vyšších desítek let až přes 100 let. Celkový průtok vod dlouhého oběhu v celé zájmové oblasti byl odhadnut na nejméně 250 l/s [2].

Měření fyzikálně-chemických parametrů a odběr vzorků pro analýzy tritia

Za účelem ověření vydatnosti starých vod bylo v roce 2023 odebráno 11 vzorků pro analýzu přítomnosti tritia ze sledovaných profilů na pramenech, Strenickém potoce a z dalších pramenů. V roce 2024 byla vzorkována největší jímací území. Ve spolupráci s VaK Mladá Boleslav byly odebrány všechny jímací vrty s vyšší vydatností v povodí Bělé (11 vzorků). Tyto vrty jímají celkově asi 140 l/s a minimálně u části vod je podle nízké mineralizace a výjimečně dobré jakosti pravděpodobné, že jde o staré vody. Ve spolupráci s Vodárnami Kladno – Mělník byly odebrány všechny používané vrty v jímacím území Řepínský důl (41 vzorků). Celkové současné jímaní je přibližně 300 l/s a starší studie ukazují, že by se mohlo v některých objektech jednat o staré vody [1, 2]. U všech vzorkovaných objektů byly v terénu v průtočné cele bez kontaktu s atmosférou měřeny fyzikálně-chemické parametry vody – konduktivita, teplota, pH, oxidačně-redukční

potenciál a koncentrace rozpuštěného kyslíku. U části vzorků bylo analyzováno chemické složení. Vzorky určené ke zjišťování aktivity tritia jsou v současné době analyzovány. Sledované objekty jsou uvedeny na mapě v obr. 4.



Obr. 4. Mapa sledovaných objektů (Zdroj: cukz.cz)

Fig. 4. Map of monitored sites (Based on cukz.cz)

Měření průtoků

Během prvního půlroku řešení projektu bylo na základě archivních dat o koncentracích tritia vytipováno deset míst pro monitoring průtoku. Vybraná místa reprezentují prameny s nízkou aktivitou tritia, a tedy vyšším stářím, a dva profily na Strenickém potoce, jež vymezují meziúsek dotovaný výhradně prameny s nízkou aktivitou tritia. Zhruba v měsíčním intervalu byl měřen průtok, a to buď metodou ředění pomocí NaCl s automatickým záznamem konduktivity z použitých konduktometrů WTW, nebo výpočtem z času plnění nádoby o známém objemu. První lokalita monitoringu je na Strenickém potoce v Krnsku před ústím do Jizery. Strenický potok je z většiny dotován základním odtokem z hlubších zón kolektoru C, příp. B, a jeho průtok je relativně stálý v čase. Jde o hlavní tok drénující oblasti s prameny s dlouhou střední dobou zdržení na základě starších analýz aktivity tritia. Během návštěv je tu prováděno měření průtoku metodou ředění za pomoci NaCl.

Druhá lokalita je Strenický potok u obce Cetno, která se nachází nad dvěma prameny vod s nízkou koncentrací tritia. Zde je průtok měřen nárazově metodou ředění. Třetí lokalita je výtok z vodárny u obce Cetno. Tato voda má dle předchozích analýz taktéž nízkou aktivitu tritia. Průtok je tu měřen nárazově metodou ředění. Čtvrtá lokalita je pramen PP0230 monitorovaný v současnosti ČHMÚ v obci Podkován. Tento pramen je jeden z vydatných zdrojů v prameništi Podkován s nízkou aktivitou tritia. Vydatnost prameniště dosahuje za vyšších stavů i 100 l/s. Průtok je tady počítán z času plnění nádoby o známém objemu. Pátá lokalita je Strenický potok nad Podkováňským prameništěm. Při znalosti průtoku Strenického potoka nad a pod prameništěm (rozdíl průtoku z lokalit 1 a 5) je možné určit celkovou vydatnost vod s nízkou koncentrací tritia na Strenickém potoce. Zde je měřen průtok metodou ředění. Šestou lokalitou je Velký pramen v Podkováňském prameništi. Jde o nejvydatnější zdroj v prameništi. Nachází se tu historický přepad ČHMÚ (v minulosti sledován jako PP00229), který však již ČHMÚ nemonitoruje. V rámci projektu je tady průtok měřen metodou ředění.

Sedmá lokalita se nachází u vodního toku Rokytka v blízkosti Bělé pod Bezdězem. Je to oblast s hojným výskytem pramenů, z nichž jeden – pramen Klokočka – má velmi nízkou aktivitu tritia. Průtok je tu počítán z času plnění nádoby o známém objemu. Osmá lokalita je drobný pramen s nízkým obsahem

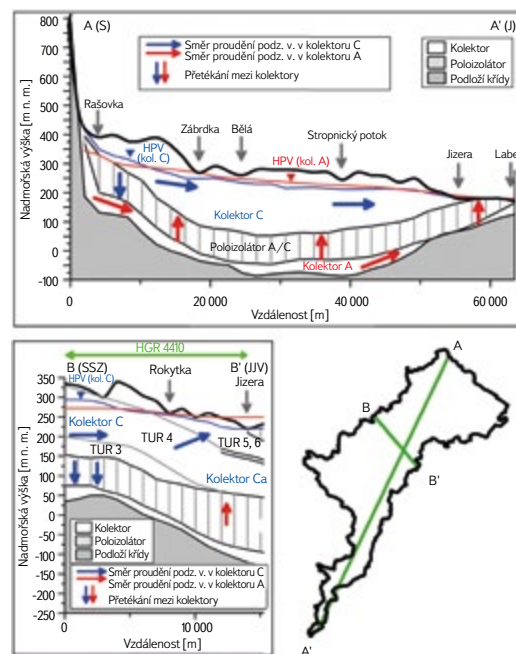
tritia u obce Nedamov na horní Liběchovce. Zde je průtok také počítán z času plnění nádoby o známém objemu. Devátá lokalita je pramenný vodní tok s nízkým obsahem tritia u obce Nedamov na horní Liběchovce. Průtok je měřen nárazově metodou ředění. Desátou lokalitou je pramen Stříbrník poblíž Vojtěchova v Kokořínském dole u Pšovky, který se částečně jímá jako zdroj pitné vody. Tady je průtok na přepadu prameniště počítán z času plnění nádoby o známém objemu a k němu je třeba přičíst jímání množství vody.

VÝSLEDKY

Rešeršní popis současného pohledu na proudění podzemní vody

V tomto rešeršním oddíle popisujeme současný pohled na proudění podzemní vody v zájmové oblasti tak, jak vyplývá z dostupných informačních zdrojů. Tento koncept proudění bude v rámci projektu „Poznání, kvantifikace a ochrana strategických zdrojů podzemní vody české křídové pánve hlubokého oběhu v hydrogeologických rajonech 4410 a 4522“ s využitím nových dat kriticky zhodnocen.

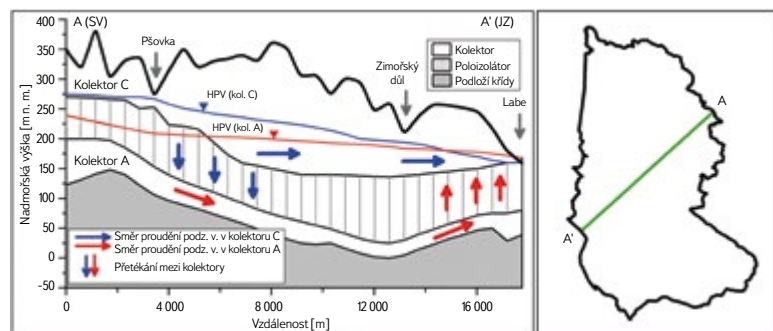
Zkoumané rajony byly podrobně popsány v rámci projektů „Hydrogeologická syntéza české křídové pánve“ [10] a „Rebalance zásob podzemních vod“ [1, 2]. Na jejich základě lze rámcově za oblasti dotace podzemní vody označit oblasti volné hladiny v celém zájmovém území. K nejvyšší dotaci podzemních vod v rajonu 4410 ovšem dochází v horních částech povodí v S, případně SZ části rajonu, kde je také vyšší specifický základní odtok oproti jižním částem. Proudění podzemní vody je následně určeno tokem Jizery s vlivem nehomogenit prostředí a jímání podzemní vody. Pro kolektor A platí, že infiltrace je jen na S podél lužické poruchy, k drenáži dochází podél Labe. Drenáž kolektoru C je zprostředkována do říční sítě (obr. 5), za úplnou drenáž lze považovat pouze oblast Jizery převážně na J v prostoru Sojovic a Čachovic. Dále drenáž probíhá v údolích Zábrdky, Mohelky, Malé Mohelky, Rokytka, Bělá a Strenického potoka. Dílčí odvodnění je zprostředkováno častými a vydatnými puklinovými prameny, zejména v místech křížení zlomů dvou směrů či zlomů křížujících údolí Jizery a jejich přítoků [11, 1].



Obr. 5. Proudění podzemní vody v rajonu 4410, řez S-J (nahore) a SSZ-JJV (vlevo dole) s vyznačením linie obou řezů (vpravo dole). Upraveno dle [1]

Fig. 5. Groundwater flow in region 4410; cross section N-S (top) and NNW-SSE (bottom left) with line markings of both cross sections (bottom right). Modified after [1]

V rajonu 4522 je dotace podzemní vody v celé oblasti, dominantní infiltrace je na S až SV rajonu. Podzemní voda dále proudí směrem k JZ, ve V části rajonu přitéká podzemní voda ze sousedního rajonu 4521 (169 l/s podzemní vody přitéká a 83 l/s z rajonu 4522 odtéká [2]). K drenáži podzemní vody dochází v dolní části Pšovky, na Liběchovce a tokem Labe přes kvartérní štěrkopisky [2; obr. 6]. Od SV k JZ se v rajonu 4522 redukuje mocnost kolektoru C [2], což má za následek velký nárůst průtoku v dolních částech toku Liběchovky a četná prameniště. V různých místech horního toku Pšovky a Liběchovky také vyvěrají významné prameny. To naznačuje přítok starých vod jímáných v Řepínském dole ze SV.



Obr. 6. Proudění podzemní vody v rajonu 4522 v SV-JZ řezu. Upraveno dle [2]

Fig. 6. Groundwater flow in region 4522; cross section NE-SW. Modified after [2]

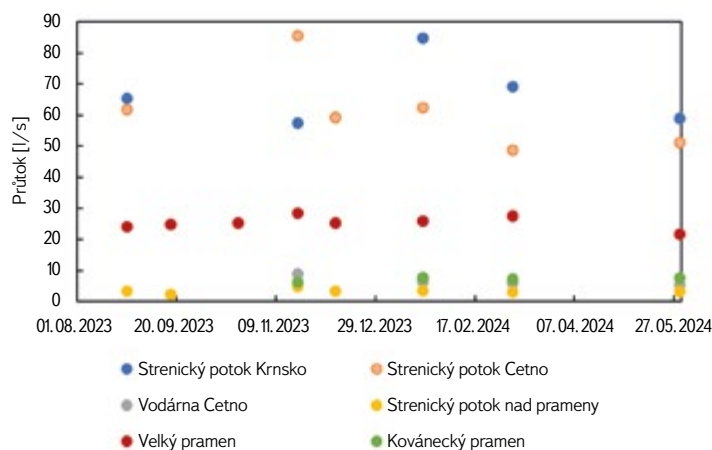
Maximální propustnost hornin je v oblasti drenážních bází, minimální je v meziříčních oblastech, kde jsou nejvyšší mocnosti kolektorů. To naznačuje důležitou roli puklinových systémů v tomto území, nejvíce je propustnost ovlivněna na křížení puklinových pásem směry SZ-JV a SSV-JJZ [1]. Na těchto křížích dochází často k vývěru pramenů, např. v údolí Bělé.

Na SZ rajonu 4410 převažuje propustnost puklinová s významným podílem průlinové propustnosti, směrem k J klesá podíl průlinové propustnosti kvůli přechodu do vápnitofilovitých, slinitých a vápnitých pískovců. Mezi Košateckým potokem a Bělou pod Bezdězem, kde jsou polohy kolektoru C s kvádrovými pískovci o mocnosti až 80 m, je propustnost kolektorů C průlinově-puklinová. V oblastech bez kvádrových pískovců je propustnost kolektoru C téměř výhradně puklinová s vysokou transmisivitou (např. v povodí Bělé s jímácím územím pro Mladou Boleslav), naznačující velký vliv puklin na proudění. Ve výše položených oblastech mezi Pšovkou a Liběchovkou dochází k tvorbě zavěšených zvodní [2], jež dokumentují prameny a studánky (např. Nedvěži).

Měření průtoků

Výsledky měření v oblasti Strenického potoka jsou znázorněny na obr. 7. Přestože jde o poměrně krátké sledované období, je zde vidět, že průtok je relativně stálý v čase (kolísání méně než 1 : 2), což značí, že prameny nereagují na aktuální srážky. To naznačuje delší oběh vody, což je v souladu s předchozím tvrzením, že se jedná o staré vody [1]. Sledování vydatnosti pramenů je zásadní pro kvantifikaci dynamických zdrojů těchto starých vod. Doposud nebyla tato vydatnost na většině zmíněných profilů monitorována.

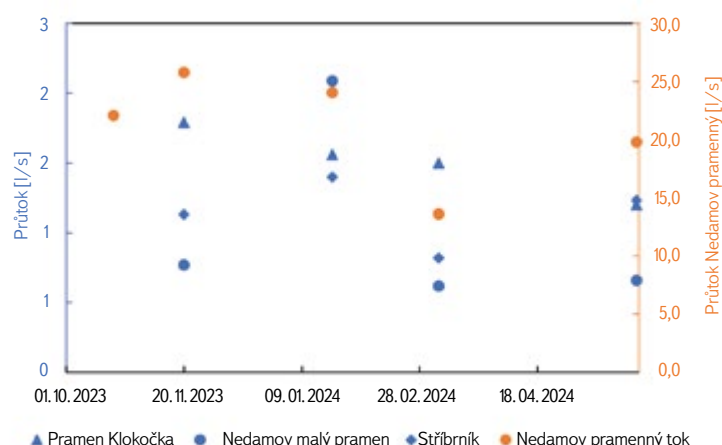
Průtok na první lokalitě na Strenickém potoce v Krnsku se pohybuje v rozsahu od 58 do 85 l/s. Tyto průtoky jsou relativně nízké vůči archivním měřením z minulosti, která ukazovala průtok přes 100 l/s. Strenický potok u obce Cetno má průtok v rozsahu od 49 do 86 l/s. Výtok z vodárny u obce Cetno má průtok od 5 do 9 l/s. Kovánecký pramen má rozsah průtoků od 6 do 8 l/s. Strenický potok nad Podkovářským prameništěm má průtoky pouze mezi 2 a 5 l/s, zatímco Velký pramen od 22 do 28 l/s. Z toho je patrné, že většina vody ve Strenickém potoce pochází z Podkovářského prameniště. Celková vydatnost staré vody v této oblasti je přibližně 65 l/s.



Obr. 7. Výsledky měření průtoku v povodí Strenického potoka

Fig. 7. Discharge measurement in the Strenický potok basin

Výsledky měření průtoků z okolí Rokytky a Kokořínska jsou vidět na obr. 8. Průtok pramene Klokočka se pohybuje okolo 1,5 l/s. Průtok pramenného toku u obce Nedamov dosahuje 14 až 26 l/s. Vydatnost pramene v obci Nedamov činí od 0,5 do 2 l/s a pramene Stříbrník okolo 1 l/s.



Obr. 8. Výsledky měření průtoku na prameni Klokočka a v povodí Pšovky a Liběchovky

Fig. 8. Discharge measurement from Klokočka spring and the Pšovka and Liběchovka basins

Fyzikálně-chemické parametry

Naměřené fyzikálně-chemické parametry uvádí tab. 1. Konduktivita v jímácím území Bělá je nižší než v Řepínském dole. Zatímco v Bělé se pohybuje od 425 do 636 $\mu\text{S}/\text{cm}$, v Řepínském dole je od 498 do 844 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Podle měření Kůrkové [4] má voda pocházející čistě z kvádrových pískovců konduktivitu od 100 do 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, zato voda z vápnitých pískovců má konduktivitu od 400 do 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Voda ve všech měřených objektech tedy pravděpodobně byla alespoň po nějakou dobu v kontaktu s vápnitými pískovci. Teplota podzemní vody je v obou oblastech podobná, od 9,2 do 11,2 $^{\circ}\text{C}$. Všechny sledované objekty mají neutrální pH zhruba 7,2. Některé zdroje mají koncentraci rozpuštěného kyslíku $< 1 \text{ mg}/\text{l}$, což značí anoxické prostředí. Častější výskyt těchto vod je v Řepínském dole. Oxidačně-redukční potenciál měřený kalomelovou elektrodou se pohybuje od -143 do +293 mV. Korelace mezi oxidačně-redukčním

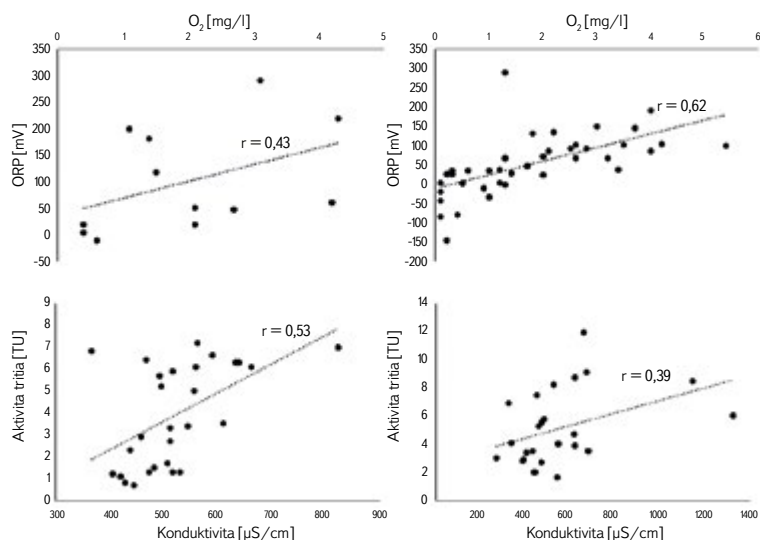
Tab. 1. Naměřené chemické vlastnosti vzorkovaných objektů. Pořadí objektů je v každém jímacím území řazeno od nejnižší po nejvyšší nadmořskou výšku jímacího objektu. Q značí vydatnost (odběr) pro vodárenské využití, v případě pramene Klokočka průměrný průtok

Tab. 1. Chemical properties of sampled sites. The order of the sites in each catchment area is arranged from lowermost to uppermost altitude. Q is abstraction from wells for water supply; for Klokočka spring it is average discharge

	Konduktivita [μS/cm]	T [°C]	O ₂ [mg/l]	pH	Oxidačně-redukční potenciál [mV]	Q [l/s]
Bělá						
KL 4	480	10,3	0,6	7,2	-9	12
KL 1a	447	11,2	0,4	7,3	5	13
KL 16	425	10,8	1,4	7,3	182	20
KL 12	482	10,3	1,5	7,2	119	30
KL 11	507	9,9	1,1	7,2	200	30
KL 10	636	10,3	0,4	7,2	21	25
VMB1	477	9,4	3,1	7,3	293	
KL 7	439	10,5	2,1	7,3	52	28
KL 8	495	9,6	4,2	7,2	63	24
KL 3	579	9,3	2,7	7,2	49	~1
KL 9	477	10,9	2,1	7,2	21	~2
Pramen Klokočka	464	9,2	4,3	7,2	221	1,5
Řepínský důl						
PŠ2	728	10,5	2,1	7,2	87	16
PŠ3	778	10,7	0,2	7,2	-143	
PŠ3A	744	10,8	0,3	7,2	36	7
DV1	695	10,6	2,5	7,2	94	26
DV2	699	9,9	2,2	7,2	137	7
DV14	684	10,5	2,2	7,3	135	12
PŠ5	683	10,4	3,7	7,3	147	54
PŠ5A	687	10,5	3,0	7,3	151	11
DV13	754	9,7	1,3	7,2	292	
S9	686	9,2	0,3	7,2	29	
S10	680	10,3	2,6	7,1	104	12
S4	707	10,6	3,5	7,2	104	41
S1	708	10,5	5,4	7,2	102	20

	Konduktivita [μS/cm]	T [°C]	O ₂ [mg/l]	pH	Oxidačně-redukční potenciál [mV]	Q [l/s]
Ř2 (Z)	703	10,6	4,0	7,2	194	31
Ř2 (V)	694	10,5	1,8	7,2	134	14
S11	717	10,4	4,2	7,2	105	14
S13	759	10,2	3,2	7,2	70	12
S14	803	10,1	2,8	7,2	95	7
S15	837	10,3	2,6	7,1	70	9
S16	844	10,5	3,4	7,1	40	3
S25	769	10,5	1,7	7,2	48	3
S26	751	10,2	2,0	7,1	74	4
S27	728	10,7	0,5	7,2	2	2
DV15	710	11,1	0,1	7,2	-40	8
S28	685	10,7	0,1	7,2	5	5
S29	649	10,3	0,2	7,2	27	13
S30	640	10,4	0,5	7,1	5	8
Ř8A	550	10,4	0,1	7,2	-17	18
Ř8	643	10,7	1,3	7,1	69	3
S20	621	10,3	1,0	7,2	36	16
S21	620	10,2	2,0	7,2	26	
S22	599	10,1	1,2	7,2	40	5
S23	646	10,0	1,4	7,3	31	3
DV17	573	10,3	0,6	7,3	36	9
S7	571	10,3	0,4	7,2	-78	3
S19	498	11,0	0,1	7,2	-83	3
DV5	603	10,5	1,2	7,2	4	6
S8	551	10,6	1,0	7,3	-31	3
DV6	618	10,4	1,3	7,2	0	
Z2	875	11,0	4,0	7,2	88	1
DV7	593	10,6	0,9	7,3	-9	5

potenciálem a rozpuštěným kyslíkem byla $r = 0,57$ (0,43 pro Bělou, resp. 0,62 pro Řepínský důl), což značí střední míru závislosti. Rozsah uvedených konduktivit je v rámci hodnot uvedených pro ostatní objekty ve zbylých částech studovaných rajonů [1, 2].



Obr. 9. Vztahy mezi oxidačně-redukčním potenciálem a množstvím rozpuštěného kyslíku pro jámací území Bělá (vlevo nahoře) a Řepínský důl (vpravo nahoře). Vztahy mezi aktivitou tritia a konduktivitou pro prameny v rajonu 4410 (vlevo dole) a v rajonu 4522 (vpravo dole)

Fig. 9. Relationships between redox potential and amount of dissolved oxygen for Bělá (top left) and Řepínský důl (top right). Relationships between tritium activity and conductivity for springs in region 4410 (bottom left) and region 4522 (bottom right)

DISKUZE

Ve výsledkové části byla popsána stávající představa o proudění podzemní vody v zájmové oblasti tak, jak byla formulována v předchozích pracích [zejména 1, 2, 10] na základě strukturních a hydrogeologických údajů, doplněných o informace z chemismu a kolísání hladin podzemní vody. Jde o základní výsledky analýzy oběhu podzemní vody v zájmové oblasti, které významně přispěly k chápání hydrogeologie regionu.

Přesto v kontextu nízkotritiových vod zbývá řada otázek, na které současné modely nejsou schopny dát odpověď, a je zde řada nesrovnalostí či v některých případech i protichůdných informací. Předchozí analýzy tritia pocházejí jen z omezeného množství objektů, jež zájmovou strukturu odvodňují a které mohou být směsí jak vod starých, tak mlčích mladších vod. Nejistoty jsou i ohledně využitelného množství těchto vod a zejména území, kde se tyto vody tvoří (tedy kde je jejich infiltrační území). Je proto nezbytné stávající konceptuální model proudění ověřit, doplnit a s využitím nových poznatků případně upravit.

Není známo místo infiltrace těchto starých vod. Při odhadovaném průtoku 250–300 l/s (odhad celkové vydatnosti starých vod dle [1, 2]) a infilraci před rokem 1950 je však pro zadržení této vody nutné počítat s objemem pórů nejméně $6 \times 10^8 \text{ m}^3$, což při pórovitosti pískovců cca 10–30 % odpovídá objemu 2–7 km^3 křídových hornin. Objem křídových hornin v zájmové oblasti je vyšší, tudíž předpokládaný objem proudového systému starých vod i infiltrace do křídových hornin jsou realistické.

Za účelem zodpovězení výše popsaných otázek byly v průběhu prvního roku fungování projektu z vybraných objektů odebrány vzorky na analýzu tritia, která – s využitím poměrně malých finančních prostředků – pomůže zprvu rozlišit vodu starou (s nízkými až nulovými hodnotami aktivity tritia) od vody mladé (s vyšší aktivitou tritia, naznačující původ vody infiltrované po roce 1950). Následně bude na

základě četných tritiových analýz vybráno menší množství objektů (vrty, prameny) pro finančně náročnější, avšak přesnější datovací metody např. s využitím radiouhlíku, freonů, SF_6 , ^{85}Kr a ^{39}Ar .

Geologické řezy Uličného et al. [8] poprvé umožnily určit, na které genetické sekvence jsou vázány prameny a jaké horniny jsou vysoce propustné. Podle poloh propustných hornin (zejména pískovců) je tak dobře možné ověřovat hypotézy, které litologie tvoří propustné kolektory, kde může docházet k infiltraci vody atd. Jak ovšem poukazuje Kůrková [4], kolektory vymezené dle těchto řezů nemusejí tvořit čistý pískovec, ale mohou obsahovat i vápnité vrstvy. Tyto vrstvy vápnitého tmelu mohou být mocné jen první decimetry, zatímco velkou většinu mocnosti kolektoru tvoří křemenný pískovec [12]; i tyto tenké vrstvy však mohou stačit ke zvýšení konduktivity vody.

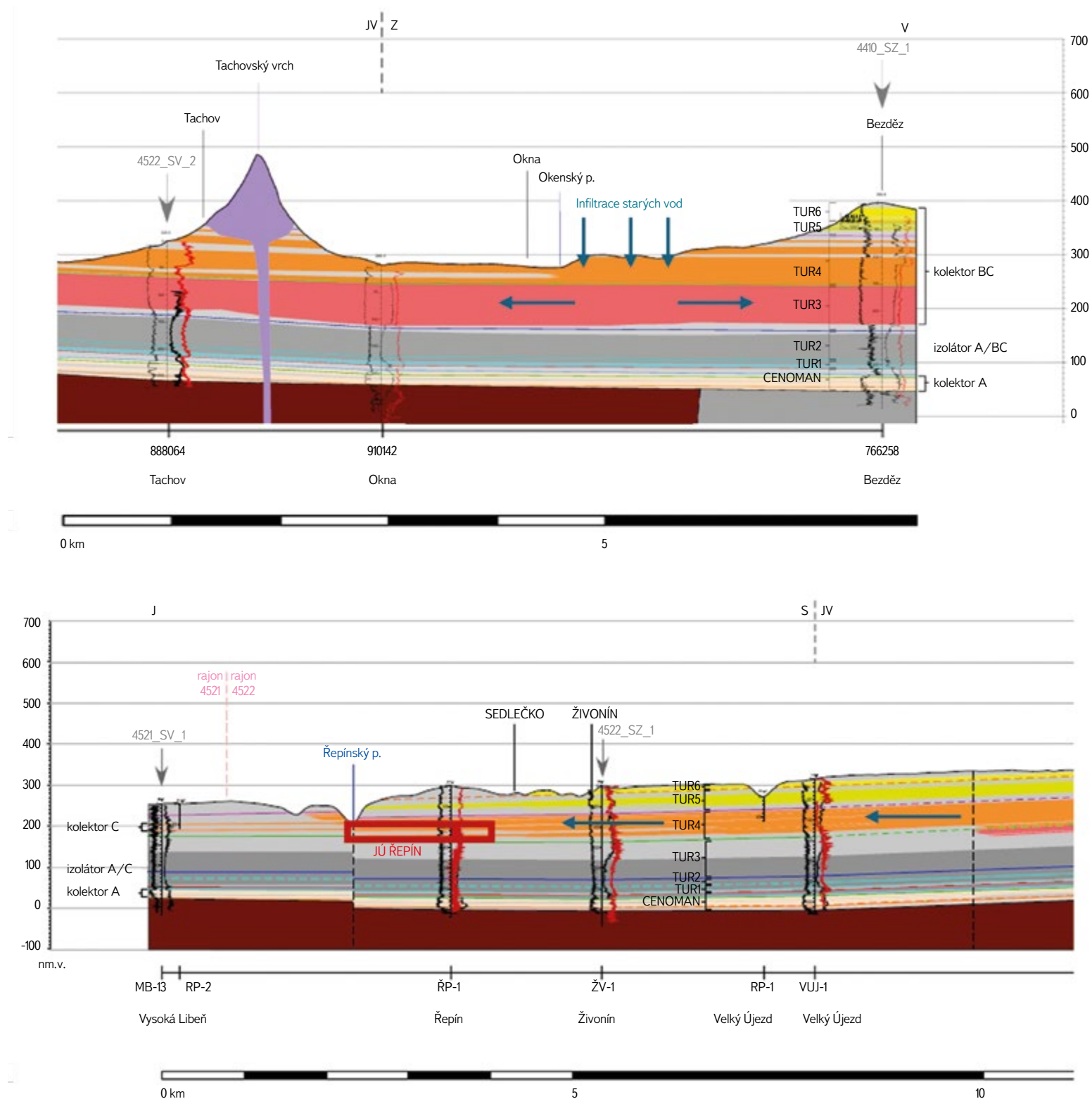
Při pohledu na již dříve naměřená data z pramenů [1, 2, 4] lze vypožorovat slabý trend, kdy s rostoucí aktivitou tritia narůstá konduktivita (obr. 9), tedy voda s delší dobou oběhu má spíše nižší konduktivitu. Pro hydrogeologický rajon 4410 je korelace mezi aktivitou tritia a konduktivitou $r = 0,53$, přičemž prameny s aktivitou tritia pod 3 TU mají průměrnou konduktivitu 468 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (medián 465 $\mu\text{S}/\text{cm}$), zatímco prameny s aktivitou nad 3 TU průměr 564 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (medián 558 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Pro hydrogeologický rajon 4522 je korelace $r = 0,39$ a prameny s aktivitou pod 3 TU mají konduktivitu v průměru 419 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (medián 433 $\mu\text{S}/\text{cm}$), zatímco prameny nad 3 TU mají konduktivitu v průměru 596 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (medián 535 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Pro rajon 4410 se dle Studentova t-testu (hladina významnosti 0,05) jedná o statisticky významný rozdíl ve velikosti konduktivity mezi prameny s aktivitou tritia pod 3 a nad 3 TU.

V povodí Bělé se vyskytují prameny jak s nízkou, tak vysokou konduktivitou, poukazující na drenáž dvou různých vod o odlišném složení, a podle odlišných aktivit tritia i stáří (J. Bruthans, nepublikováno). V tomto kontextu budou ověřovány i hodnoty tritia a konduktivity na nově odebraných jímáných vrtech v Bělé a Řepínském dole, neboť není zcela jasné, zda voda jímáná v těchto jímácích územích je výhradně vodou s původem v turonském kolektoru C, anebo zda nejde – alespoň zčásti na některých jímáných objektech – o přetok z cenomanského kolektoru A. Vody s nízkou aktivitou tritia, a tím dlouhou dobou oběhu, mohou mít původ i v lokálně vyvinutém kolektoru BC (TUR3 a TUR4) u Strenického potoka. V následujících oddílech diskutujeme možné cesty proudění těchto vod.

Pravděpodobné cesty proudění podzemní vody pro rajon 4522

Stará voda v Řepínském dole vykazuje relativně nižší konduktivitu, tudíž se neinfiltrovala přes nenasycenou zónu s obsahem vápnitých pískovců, ale pouze skrze křemenné pískovce. Jako pravděpodobná oblast infiltrace se jeví okolí Bezdězu, kde jsou výchozy křemenného pískovce spojeného kolektoru TUR3 a TUR4 [8; obr. 10], a kde se navíc dle izolinií hladin podzemní vody infiltrační oblast může nacházet, protože hladina podzemní vody je zde mnohem výše než v drenážních oblastech starých vod [2; obr. 11]. Tato voda by následně z východu obtékala elevaci báze kolektoru C a četné zlomy mezi Dubou a Mšenem (zlomové porušení jižně od Dubé) a poté se stáčela JZ směrem do Řepínského dolu (obr. 11). Směrem k Řepíenskému dolu křemenné pískovce TUR3 a TUR4 postupně přecházejí do vápnitých pískovců. To může způsobit navýšení konduktivity vody v Řepínském dole na hodnoty od 400 do 800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (tab. 1), což značí vodu z křemenných pískovců, která prošla vápnitými polohami [4].

Dalším možným zdrojem je přetok vody z cenomanu. Jak je patrné z obr. 6, v oblasti Řepínského dolu (zejména v jeho spodních částech) nastává i při neovlivněných hladinách změna situace, kdy již podle tohoto schématu dochází k přetoku cenomanské vody z kolektoru A skrze poloizolátor A/C do kolektoru C. Pokud by však k přetoku cenomanské vody ve spodních částech jímacího území skutečně docházelo, lze zde očekávat změnu fyzikálně-chemických parametrů, jako je např. snížení množství rozpuštěného kyslíku a snížení redox potenciálu, což však z tab. 1 není patrné. Datování vody z těchto jímáných vrtů tak může tento předpoklad dále podpořit, či vyvrátit.



Obr. 10. Nahoře – Geologický řez okolí Bezdězu se spojitými kolektory TUR4 a TUR3, s naznačením možných směrů proudění vody (modré šipky), směr Z-V. Dole – Geologický řez od Kokořinského dolu k jímacímu území Řepín (červený obdélník) s naznačením možných směrů proudění vody (modré šipky). Upraveno dle [8]

Fig. 10. Top – Geological cross section of the Bezděz area with continuous collectors TUR4 and TUR3, indicating the possible directions of water flow (blue arrows), direction W-E. Bottom – Geological cross-section from Kokořinský důl to the Řepín catchment area (red rectangle) with an indication of possible water flow directions (blue arrows). Modified after [8]



Obr. 11. Modelové izolinie hladiny podzemní vody modelu společnosti PROGEO, s. r. o., s vyznačením pravděpodobného místa infiltrace nízkotritiových vod (modrý ovál) a směrem proudění (modré šipky). Upraveno dle [1]

Fig. 11. Model isolines of the groundwater level from a model from PROGEO, s. r. o., with marking of the probable location of infiltration of low-tritium waters (blue oval) and the direction of water flow (blue arrows). Modified after [1]

Zároveň vyvstává otázka, odkud se bere stará voda z pramene Stříbrník a v prameništi u Nedamova, jelikož dle známých průběhů hladin se v těchto oblastech hladina v kolektoru A nachází níže než v kolektoru C (*obr. 6, obr. 11*), tudíž by zde

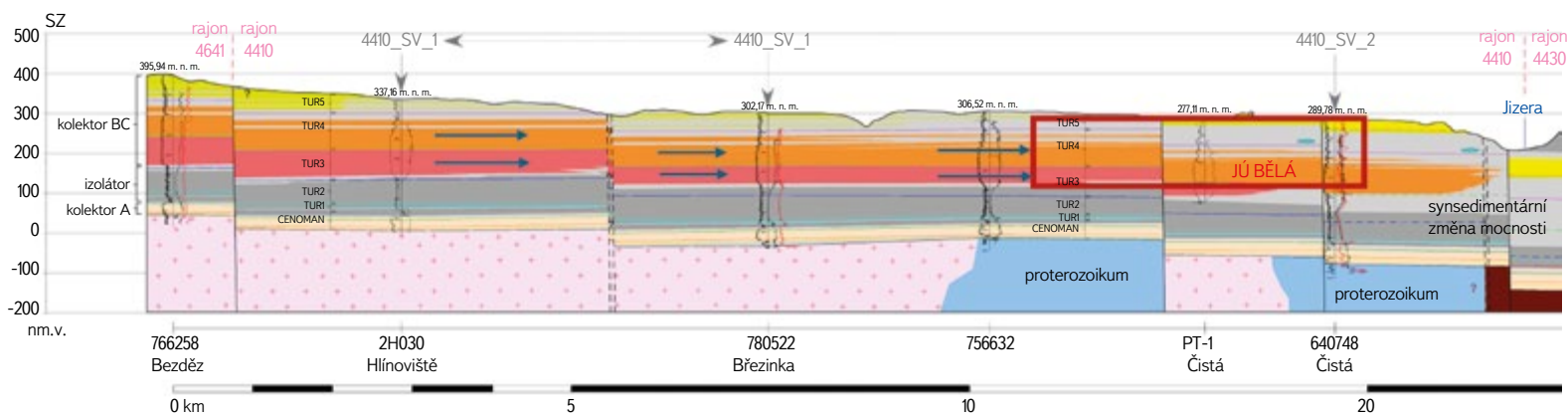
nemělo docházet k přetoku z cenomanského kolektoru. Přitom izohypsy kolektoru C (TUR4) v *obr. 11* nejsou ovlivněny tektonickými poruchami, což je v rozporu s prostorovou proměnlivostí propustnosti hornin ovlivněnou nejvíce křížením puklinových pásem, na něž jsou často navázány ramenní vývěry [1, 2]. Zůstává tak otevřenou otázkou, zda kupř. v oblasti ramene Stříbrník nemůže lokálně docházet k přetokům vody z cenomanu po puklinách.

Pravděpodobné cesty proudění podzemní vody pro rajon 4410

Na základě současných poznatků je možné předpokládat, že stará voda pramenící na Strenickém potoce a jímaná v Bělé přišla do kontaktu s vápnitými polohami pouze po omezenou dobu [4], čili se infiltrovala v místech křemenných pískovců. Oblast infiltrace tak opět i pro povodí Bělé může být v okolí Bezdězu, kde se na povrch dostávají výchozy křemenného pískovce TUR4. Infiltrovaná voda by se dále pohybovala spojeným kolektorem TUR4 a TUR3 a na povrch by se dostávala podél zlomů či v místech vyznívání těchto kolektorů (*obr. 12*). Další možností je přetok z cenomanu, který dle *obr. 5* má v oblasti jímacího území Bělá hladinu podzemní vody na velmi podobné úrovni jako kolektor C, a dle [7] dokonce vyšší.

ZÁVĚR

Cílem představeného projektu je upřesnit a kvantifikovat zdroje vody v rajonech 4410 a 4522, která dle předchozích prací může mít dobu zdržení nejméně 70 let a v některých případech i výrazně více. Místo infiltrace této staré vody je pravděpodobně v okolí Bezdězu, kde jsou výchozy pískovců bez karbonátového tmelu. Tato stará voda pak následně proudí spojeným kolektorem TUR3 a TUR4. Při dané vydatnosti pramenů zaujmají pískovce dostatečný objem pro její akumulaci a dobu zdržení. Za účelem kvantifikace dynamických zdrojů těchto vod probíhá monitoring průtoků na vybraných tocích a pramenech s nízkou koncentrací tritia. Všechny monitorované objekty vykazují stabilitu průtoku v čase, což značí delší oběh bez vlivu lokálních meteorologických podmínek. Vybrané objekty využívané pro hromadné zásobování byly ovzorkovány za účelem zjištění stáří vody na základě aktivity tritia. Podle výsledků budou vybrány objekty, u nichž dojde ke zpřesnění stáří na základě analýzy freonů, SF_6 a dalších datovacích technik. Projekt v tuto chvíli vstupuje do druhého roku řešení. Dále je plánováno průběžné vyhodnocování nově získaných hydrochemických, vodohospodářských a hydrogeologických dat, tvorba příslušných map, řezů a navržení vodárenského využití



Obr. 12. Geologický řez od Bezdězu směrem k jímacímu území Bělá (červený obdélník), s označením možných směrů proudění vody (modré šipky). Upraveno dle [8]

Fig. 12. Geological cross-section from Bezděz towards the Bělá catchment area (red rectangle), with indications of possible water flow directions (blue arrows). Modified after [8]

zdrojů a ochrany hydrogeologické struktury. Detailní průzkum hydrogeologie oblasti povede k aktualizaci konceptuálního modelu proudění vody v obou rajonech, zejména s ohledem na původ vody dlouhého oběhu.

Poděkování

Autoři článku děkují J. Bruthansovi za konzultaci konceptuálního modelu proudění a za pomoc při vzorkování a měření průtoků. Výzkum v rámci projektu č. S506010268 „Poznání, kvantifikace a ochrana strategických zdrojů podzemní vody české křídové pánve hlubokého oběhu v hydrogeologických rajonech 4410 a 4522“ je spolufinancován Technologickou agenturou České republiky.

Literatura

- [1] KŮRKOVÁ, I. et al. *Rebilance zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva, Příloha č. 2/31, Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon 4410 – Jizerská křída pravoběžní*. Praha: Česká geologická služba, 2016.
- [2] KŮRKOVÁ, I., BURDA, J. et al. *Rebilance zásob podzemních vod. Závěrečná zpráva, Příloha č. 2/35, Stanovení zásob podzemních vod. Hydrogeologický rajon 4522 – Křída Liběchovky a Pšovky*. Praha: Česká geologická služba, 2016.
- [3] BRUTHANS, J., KŮRKOVÁ, I., GRUNDLOCH, J., CHURÁČKOVÁ, Z., SLAVÍK, M., KADLECOVÁ, R. *Střední doba zdržení v detailně hodnocených rajonech. Projekt Rebilance zásob podzemních vod, část aktivity 8*. Praha: Česká geologická služba, 2015.
- [4] KŮRKOVÁ, I. *Charakter proudění podzemní vody v silně propustných sedimentech v západní části České křídové pánve. Doktorská disertační práce*. Praha: Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, 2023.
- [5] KLEIN, V. *Stratigrafie a litologie svrchní křídly mezi Jizerou a Labem. Sborník geologických věd. Geologie*. 1966, 11, s. 49–76.
- [6] VALEČKA, J. *Paleogeografie a litofaciální vývoj severozápadní části české křídové pánve. Sborník geologických věd. Geologie*. 1979, 33, s. 47–81.
- [7] ČEPÁK, J. et al. *Závěrečná zpráva o vyhledávacím hydrogeologickém průzkumu v povodí Klokochy a Bělé. Vodní zdroje*. Praha, 1970.
- [8] ULICHÝ, D., ŠPIČÁKOVÁ, L., CAJZ, V., HRONEC, L. *Podklady pro prostorový model hydrogeologicky významných stratigrafických rozhraní ve vybraných hydrogeologických rajonech. Závěrečná zpráva*. Praha: Geofyzikální ústav AV ČR, v. v. i., 2015.
- [9] ČECH, S., KLEIN, V., KRÍŽ, J., VALEČKA, J. *Revision of the Upper Cretaceous Stratigraphy of the Bohemian Cretaceous Basin. Věstník Ústředního ústavu geologického*. 1980, 55(5), s. 277–296.
- [10] HERČÍK, F., NAKLÁDAL, V. *Hydrogeologická syntéza české křídové pánve – Bilanční celek 3*. Praha: Stavební geologie, n. p., 1987.
- [11] HERČÍK, F., VALEČKA, J. *Hydrogeologie české křídové pánve*. Praha: Český geologický ústav, 1999.
- [12] NÁDASKAVY, R., ČECH, S., VALEČKA, J., JANKOVSKÝ, F., PINTÉR, L., ADAMOVIČ, J., ZELENKOVÁ-TRUBAČOVÁ, A. *Závěrečná zpráva průzkumného geologického vrtu 4521_B Kluky*. Praha: Česká geologická služba, 2015.

Autoři

Mgr. Jakub Mareš¹

✉ maresj15@natur.cuni.cz

ORCID: 0000-0002-7190-8214

Mgr. Martin Slavík Ph.D.¹

✉ martin.slavik@natur.cuni.cz

ORCID: 0000-0002-8920-9980

RNDr. Josef Vojtěch Datel Ph.D.²

✉ josef.datel@vuv.cz

ORCID: 0000-0003-1451-0135

¹Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze

²Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2024.07.003

ISSN 0322-8916 © 2024 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

OLD GROUNDWATER IN HYDROGEOLOGICAL REGIONS 4410 AND 4522

MAREŠ, J.¹; SLAVÍK, M.¹; DATEL, J. V.²

¹Faculty of Science, Charles University, Prague

²T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

Keywords: groundwater — Bohemian Cretaceous basin — source of drinking water — dating — tritium — quantification of water sources — protection of surface water and groundwater — conceptual model

The article presents the project of the Technology Agency of the Czech Republic dealing with the hydrogeology of old waters in hydrogeological regions 4410 and 4522. The aim of the paper is to present a brief hydrogeological characterization of the area of interest, to present the results after the first year of the project and to describe the uncertainties of the existing information. Old groundwaters, that have negligible concentrations of tritium, can be considered a strategic resource because they are less susceptible to current contamination. In order to quantify the usable amount of these waters, the discharge of springs with low tritium concentrations is measured regularly. At the same time, water samples have been taken from the most important waterworks in the area. The chemical composition and tritium activity of these waters are determined and physico-chemical parameters have been measured. On the basis of the known groundwater level patterns, lithology and measured values, a conceptual model of the flow pattern of this old water was outlined, which will be further verified and supplemented during the course of the project using the newly acquired knowledge. Due to the relatively low conductivity of the old groundwater, it is expected that the water would have infiltrated in areas where there are no outcrops of calcareous sandstones, as bicarbonates would increase the conductivity significantly. For this reason, we assume that the water infiltrates near Bezděz, where there are outcrops of quartz sandstone. From there, the water flows to springs and waterworks, where, especially in the lower parts closer to the drainage areas (the Jizera and Elbe rivers), it can be further mixed with the overflow water from the Cenomanian aquifer. Nevertheless, there are places in the area that are not fully consistent with this assumption, and the origin of these groundwaters is also the subject of further research. The next phase of the project will focus on a detailed analysis of the age of the waters using other tracers such as freons or SF₆. This information will lead to a better understanding of the groundwater flow in the most important hydrogeological structure in the Czech Republic.

Metodika tvorby *Mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu pro Českou republiku*

JIŘÍ BRUTHANS, JIŘÍ GRUNDLOCH, RENÁTA KADLECOVÁ, TUNA KARATAS, KATEŘINA ŠABATOVÁ, RADEK VLNAS

Klíčová slova: podzemní voda — sucho — zranitelnost — zásoby — specializovaná mapa

ABSTRAKT

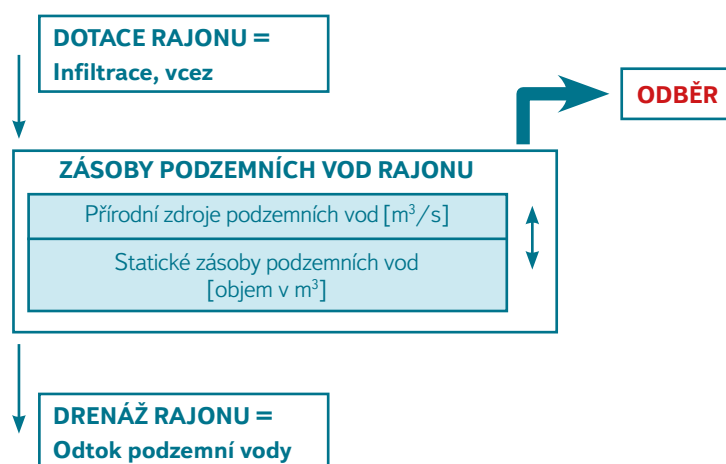
Sucho ovlivňující stav podzemní vody je doposud většinou chápáno jako podmnožina sucha hydrologického. Dopad hydrologického sucha se u podzemní vody projevuje se zpožděním a závisí na jeho délce. V rámci projektu TA ČR „Řízená dotace podzemních vod jako nástroj k omezení dopadů sucha v ČR“ byla sestavena *Mapa zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu*. Interaktivní mapa je vytvořena na základě použití srážkového normálu a regresních vztahů mezi srážkami a celkovým a základním odtokem s použitím indexu BFI a poměru BFI v nejsušším roce za dekádu 2010–2019 k dlouhodobému BFI (index M). Tento přístup zaručuje jednotné zpracování pro celou Českou republiku v měřítku 1 : 50 000 a objektivní porovnání zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu v rámci celé republiky. Dále vychází z evidovaných odběrů podzemní vody a v případě obcí s individuálním zásobováním je odběr vypočítán z počtu obyvatel a celostátní průměrné spotřeby pitné vody na obyvatele. Mapa je sestavena na bilanci přírodních zdrojů a odběrů podzemní vody. Obsahuje šest kategorií a ukazuje, které regiony a oblasti budou mít problém s dostatkem zdrojů podzemní vody v období dlouhodobého sucha. Syntetizuje všechna dostupná režimní a další data k roku 2020 a je navržena tak, aby vrstvy s proměnnými informacemi bylo možné v budoucnu aktualizovat.

Mapa, dostupná na www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu, umožňuje přípravu, návrh a realizaci opatření, která zajistí dostatek zdrojů zejména pitné vody pro obyvatele i v obdobích dlouhodobého sucha.

ÚVOD

Nacházíme se v období klimatické změny, pro kterou jsou typické častější extrémní výkyvy počasí. V letech 2015–2020 probíhalo neobvykle dlouhé období hydrologického sucha v České republice (ČR), jež na velké části jejího území způsobilo pokles hladin podzemní vody a nedostatek zdrojů vody pro obyvatele zejména v menších sídlech. Sucho se na stavu podzemních vod projevuje s velkou setrvačností. Území ČR je téměř ze tří čtvrtin tvořeno horninami, které mají nízkou schopnost akumulovat větší zásoby podzemní vody na víceletá období, a tak většina vody z našeho území odtéká. Zásoby podzemní vody jsou v těchto oblastech závislé na jejich pravidelném každoročním doplňování ze srážek, k čemuž však nedochází vždy ve stejném množství. Mezi hlavní priority státu patří zajištění dostatku zdrojů podzemní vody pro zásobování obyvatel ČR, a to i v období dlouhodobého sucha.

Jedním z cílů projektu ISTA TA ČR č. SS01010208 „Řízená dotace podzemních vod jako nástroj k omezení dopadů sucha v ČR“ byla proto metodika a tvorba *Mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* pro systém operativního řízení Ministerstva životního prostředí.



Obr. 1. Zásoby podzemní vody

Fig. 1. Groundwater resources

Zásoby podzemní vody tvoří objem a tok podzemní vody v hydrogeologickém kolektoru v souladu s vyhláškou č. 369/2004 Sb., o projektování, provádění a vyhodnocování geologických prací, ve znění pozdějších předpisů.

Zásoby podzemní vody zahrnují:

- Množství vody protékající v daném čase (měsíci, roku) kolektorem podzemní vody, tj. přírodní zdroje podzemní vody vyjadřované v objemových jednotkách za jednotku času – obvykle l/s. Velikost těchto přírodních zdrojů kolísá v závislosti na dotaci převážně infiltrací atmosférických srážek, místně i influkcí z povrchových vodních toků. Přírodní zdroje podzemní vody jsou obvykle v dlouhodobějším průměru považovány za rovné základnímu odtoku.
- Objem vody, který vyplňuje póry, dutiny a trhliny v kolektoru, tj. statické zásoby podzemní vody, tedy objem gravitační vody ve zvodněné části kolektoru, vyjadřovaný v objemových jednotkách (m³). Statické zásoby jsou ale jen objemem vody vyplňujícím horninové prostředí. Jediným doplňujícím

se členem jsou přírodní zdroje. Míra poklesu základního odtoku v suchém období (přírodních zdrojů podzemní vody) do určité míry odráží i část statických zásob, protože velikost statických zásob a rychlost uvolňování vody z nich určuje základní odtok v období, kdy potenciální evapotranspirace převládá nad srážkami. Vztah zásob podzemní vody, dotace a drenáže je graficky vyjádřen na obr. 1.

METODIKA

Sestavení *Mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* (dále jen *Mapy zranitelnosti podzemní vody k suchu*) si nevstačí s informacemi o velikosti zdrojů podzemní vody, ale mapa musí zároveň obsahovat informace o velikosti odběrů podzemní vody. V ČR jsou hydrogeologické rajony (HGR) s nejvyššími zdroji podzemní vody často z velké míry využity pro zásobování obyvatel pitnou vodou, takže neplatí, že čím vyšší jsou zdroje podzemní vody, tím nižší je zranitelnost přírodních zdrojů podzemní vody k suchu. Neplatí ani opačné tvrzení. Vždy záleží na rozdílu mezi zdroji podzemní vody a mírou jejich využití a do toho se promítá i různá variabilita doplňování zásob podzemní vody v čase a také množství podzemní vody ve statických zásobách, jež se projeví na rychlosti poklesu základního odtoku v suchém období. Místa odběrů (4 693 lokalit s odběry podzemní vody a 941 s odběry povrchové vody) a vypouštění vody (5 092 lokalit s vypouštěním povrchové vody a 28 lokalit s vypouštěním do podzemní vody), jež podléhají evidenci ve smyslu vyhlášky č. 252/2013 Sb., obsahuje informační systém HEIS (<https://heis.vuv.cz/data/webmap/>) spravovaný VÚV TGM (data k roku 2020). Dále existuje přes 1 000 obcí závislých na individuálním zásobování obyvatel pitnou vodou, kde odběry podzemní vody nepodléhají evidenci, a přitom právě v těchto obcích jsou často problémy se zajištěním dostatku podzemní vody v suchých obdobích. Aby všechny tyto informace bylo možné účelně využít, bylo třeba srovnat zdroje podzemní vody a jejich variabilitu v čase s odběry podzemní vody ze stejného území. V oblasti mimo hlavní kolektory a kvartérní kolektory, které není účelné dělit na menší jednotky, byla použita jako základní jednotka povodí 4. řádu, jichž je v ČR 8 750.

Účelová mapa je zpracována v měřítku 1 : 50 000. Je založena na objektivních režimních datech z databáze (průtoky a srážky) Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ), dostupné na <https://www.chmi.cz/historicka-data>, na údajích o evidovaných odběrech podzemní a povrchové vody a vypouštění z databáze HEIS a na informacích o obcích a jejich částech, které nemají připojení na vodovod dle dostupných *Plánů rozvoje vodovodů a kanalizací* (PRVKUK) pro každý kraj nacházejících se na webových stránkách Ministerstva zemědělství <https://mze.gov.cz/public/portal/mze/voda/vodovody-a-kanalizace/plany-rozvoje-vodovodu-a-kanalizaci> (z roku 2007), na evidenci obyvatel v obcích atd.

Základní typy prostředí

Pro potřeby *Mapy zranitelnosti podzemní vody k suchu* bylo území ČR rozděleno do čtyř základních prostředí, jež mají z hlediska zásob a dotace podzemní vody velmi odlišné vlastnosti:

- A. pánevní a kvartérní kolektory, tedy zvodně s plošně rozsáhlými proudovými systémy obvykle nerespektujícími orografické rozvodnice,
- B. prostředí hydrogeologického masivu, tj. prostředí tvrdých hornin a silně cementovaných sedimentů, kde je využitelný kolektor především v zóně přípovrchového rozpukání a zvětrání hornin, proudění podzemní vody kopíruje spád terénu a respektuje orografické rozvodnice,

- C. nivy řek a menších vodních toků, kde je potenciál indukovaných zdrojů, tedy zdrojů podzemní vody z povrchového toku, z rozsáhlých orografických povodí výše proti proudu, resp. zázemí,
- D. osídlené části obcí s převažujícím individuálním zásobováním podzemní vodou, kde jsou relativně vysoké odběry podzemní vody na jednotku plochy pro potřeby obyvatel.

A) Pánevní a kvartérní kolektory (mimo údolní nivy) byly zpracovány pouze pro vrstvu HGR základní vrstvy. Důvodem je, že bazální křídový kolektor A (sedimenty cenomanu), vyskytující se ve vrstvě hlubinných rajonů v podloží základní vrstvy rajonů, je oproti kolektorům v základní vrstvě méně citlivý na suchu a až na výjimky je jeho využití nízké. Pánevní struktury tvoří obvykle ucelený proudový systém, a proto bylo s HGR zacházeno jako s elementárními jednotkami, tj. výpočet bilance zdrojů podzemní vody byl prováděn pro jednotku – celý rajon a celá jednotka má jednotnou zranitelnost. Do prostředí A patří propustné části české křídové pánve, jihočeské pánve a kvartérní rajony.

B) Do prostředí přípovrchových kolektorů tvrdých hornin a jejich ekvivalentu (hydrogeologický masiv) spadají všechny ostatní oblasti, tj. oblasti v základní vrstvě HGR, kde není přítomen vodohospodářsky významný kolektor. Řadí se sem oblasti vyvěřelých, metamorfovaných a zvrásněných sedimentárních hornin a části české křídové pánve, kde převažují izolátory (propustné jen v přípovrchové zóně), permokarbon, terciér, tj. velká většina území ČR. Jde o oblasti, jež mají omezené statické zásoby podzemní vody, a jsou tedy závislé na každoroční dotaci ze srážek. Na rozdíl od prostředí A se zde obvykle nevyskytují rozsáhlejší zvodně, kde by se depresní kužel šířil laterálně do vzdálenosti stovek a více metrů. V těchto oblastech bylo území rozděleno na jednotlivá povodí 4. řádu.

C) Nivy řek se od ostatních prostředí liší tím, že zdroje podzemní vody na jednotku plochy jsou zde obecně řádově vyšší než v okolních horninách. Prostředí je v hydraulickém kontaktu s povrchovým tokem a zároveň se zde přes fluvialní sedimenty do vodního toku odvodňuje podzemní voda ze základních HGR, proto lze obvykle v nivách získávat řádově vyšší množství podzemní vody než v okolním prostředí základních rajonů. Velké množství jímacích objektů se právě z výše uvedeného důvodu nachází v prostoru říčních či potočních niv.

Plochy niv byly extrahovány z geologických map „GeoČR50“ z vrstvy kvartér, a to polygony s atributem ve sloupci geneze fluvialní nečleněné + sedimenty vodních nádrží. Kontinuální plocha niv získaná tímto způsobem se rozdělila na úseky, v nichž je možné počítat bilanci. V každém z povodí 2. řádu je páteřní vodní tok, který má přítoky z pravé a levé strany. Plocha niv pravostranných a levostranných přítoků byla od nivy páteřního toku oddělena manuálně. Nivy levostranných a pravostranných přítoků byly vymezeny jen v případě, že délka jejich toku přesahovala 9,5 km (kratší segmenty se už svým povodím blížily povodí 4. řádu). Kratší přítoky byly ořezány bufferem 250 m. Následovalo sjednocení jednotlivých ploch niv podle povodí 2. řádu – zvláště hlavní tok v rámci povodí 2. řádu a jeho pravo- a levostranné přítoky (niva hlavního toku a nivy každého jednotlivého přítoku tvoří segmenty). Větší řeky protékající několika povodími 2. řádu (např. Sázava, Vltava) mají nivu kontinuální od pramene až po ústí do většího toku. Menší vodní toky nepřekračující povodí 2. řádu jsou tvořeny též jediným segmentem nivy. Poté byla určena plocha všech segmentů niv a ke každému segmentu nivy se stanovila celková plocha jeho orografického povodí. Ke všem vymezeným segmentům nivy jsou k dispozici dva údaje – plocha segmentu nivy a plocha jeho orografického povodí.

D) Obce s individuálním zásobováním podzemní vodou.

Osídlené části obcí s převahou individuálního zásobování se vymezily následovně. Na základě dostupných plánů PRVKUK a digitalizované vrstvy průběhů vodovodů byly vybrány obce, jež nemají vodovod. Dle překryvu vrstvy obcí pak byly zvoleny ty, které neprotínaly průběh vodovodů. Poté probíhala kontrola získaného výběru obcí podle tabulek a plánů PRVKUK. Ve výsledku vznikla

vrstva obsahující přes 1 726 částí obcí bez hromadného zásobování (z celkem 1 035 obcí). U těchto obcí se určila plocha zastavěné části. Výchozím podkladem je mapa bloků budov (mapa ČR 1 : 50 000) získaná pomocí ortofotomapy s manuálním doplněním zastavěné plochy u vybraných obcí pomocí polygonů v GIS. Následovala kontrola a ověření správnosti rozsahu polygonů a jejich příslušnosti k jednotlivým obcím. Poté se pro jednotlivé obce stanovila plocha zastavěných částí z vymezených polygonů. Pokud obec sestávala z více částí, pracovalo se se všemi částmi dané obce dohromady. Je vhodné poznamenat, že plány PRVKUK pro jednotlivé kraje (veřejně dostupné na webových stránkách příslušných krajů, případně Ministerstva zemědělství) v době zpracování vrstvy zranitelnosti podzemní vody k suchu pocházejí převážně z roku 2007 a poskytují informace o existenci vodovodů ve výhledu k roku 2015.

Výpočetní plošné elementy v prostředích A až D:

- u prostředí A (pánevni a kvartérní HGR) je elementem celý HGR s výjimkou nivy,
- u prostředí B s přípovrchovým kolektorem je elementem povodí 4. řádu s výjimkou nivy,
- u prostředí C, tj. niv menších vodních toků, je elementem celá niva,
- u prostředí D, tj. obcí, je elementem zastavěná oblast dané části obce.

Jednotlivé informační vrstvy a určení základního odtoku

Podklad pro *Mapu zranitelnosti kvantity zdrojů podzemní vody k suchu* sestává z následujících GIS vrstev:

1. dynamické zdroje podzemní vody odpovídající základnímu odtoku v období sucha (l/s/km²),

2. registrované odběry podzemní a povrchové vody (l/s).

Pro všechny typy plošných elementů až na nivy (tj. A, B, D) je za zdroj podzemní vody považován základní odtok. Jen pro nivy, které mají potenciál pro infilukci, je zdroj podzemní vody na jednotku plochy nivy vyšší (viz dále).

Vrstva dotace podzemní vody ze srážek

Dlouhodobý základní odtok – přírodní zdroje podzemní vody separací z hydrogramu

Dotace podzemní vody odpovídá úhrnu srážek očištěného o evapotranspiraci a dočasně zachycenou vodu v půdě a nenasycené zóně. Jelikož skutečnou evapotranspiraci ani zachycené množství vody v nenasycené zóně nelze efektivně určovat na větších plochách, stanovuje se průměrná hodnota dotace podzemní vody ze základního odtoku. Veškerá voda, jež se stala podzemní vodou (dotace), musí totiž dříve nebo později podzemí opustit ve formě základního odtoku. Dále je tedy pracováno se základním odtokem, který odpovídá dotaci podzemní vody za určité časové období. Rovnítko mezi dotací podzemní vody a základním odtokem je nicméně platné pouze pro průměry za delší časová období (několik let), kdy už se změna zásob stane vůči dotaci a odtoku zanedbatelnou.

Pro určení základního odtoku je v ČR používána řada různých metod. Jednou z hlavních, která stále zůstává jakýmsi etalonem pro srovnání s výsledky ostatních metod, je Killeho metoda [1]. Vychází z nejnižších hodnot průměrných denních průtoků na povrchových tocích v jednotlivých měsících z minimálně 10leté časové řady. Výhodou je snadné stanovení, nevýhodou obdržení jediné průměrné hodnoty základního odtoku za dlouhé období. Toto omezení je nepřijatelné zejména v současnosti, kdy se odtok může vlivem klimatické změny poměrně výrazně měnit oproti situaci panující před klimatickou změnou. Na základě Killeho metody byla vytvořena i první mapa podzemního, resp. základního odtoku z ČR [2].

V minulosti byla často používána i metoda Kliner-Kněžek [3]. Ta graficky odvozuje základní odtok z měřených dvojic hladiny podzemní vody ve vrtu a průtoku vodního toku vykreslených do společného grafu. Jejím výhodou je uvažování kolísání hladiny podzemní vody, tedy ukazatele skutečné oscilace zásob podzemní vody. Nevýhodou je naopak značná citlivost výsledků na vybranou dvojici vrtu a profilu na vodním toku. V mnohých oblastech často není vhodný vrt s režimními záměry hladiny podzemní vody odpovídající hodnocené zvodni k dispozici.

V současnosti se pro určení základního odtoku nejvíce používají dva přístupy, oba založené na separaci hydrogramu. První je separace pomocí Eckhardtova filtru [4]. Tento přístup je široce využíván v zahraničí a využívá ho i ČHMÚ pro stanovení přírodních zdrojů podzemní vody v HGR a pro stanovení základního odtoku v povodích a oblastech v rámci hydrologické bilance. Metoda je odvozena z Boussinesqovy rovnice. Eckhardtův filtr denních celkových průtoků má dva parametry: recesní koeficient poklesu průtoku v čase a Base Flow Index (poměr průměrného základního odtoku a průměrného celkového odtoku). Odvození parametrů je časově i metodicky náročné.

Druhým přístupem je separace základního odtoku metodou klouzavých minim [5]. Na data celkového průtoku v denním kroku je aplikováno klouzavé 31denní minimum a získaná řada je poté vyhlazena 31denním klouzavým průměrem. Jediným parametrem je v tomto případě velikost klouzavého okna. Tento postup je inspirován metodou, která se využívá ve Velké Británii (UKIH, viz např. [6]). Jeho výhodou je jednoduchost, a tedy menší časová náročnost.

Základní odtok získaný metodou Eckhardtova filtru představuje v průměru 70–80 % základního odtoku metodou klouzavých minim.

Pro účely *Mapy zranitelnosti podzemní vody k suchu* byl základní odtok jednotlivě separován metodou klouzavých minim z dostupných dat denních průtoků 518 vodoměrných stanic ČHMÚ v období 1981–2019. Na rozdíl od dříve hojně používané Killeho metody [2] umožňuje tento způsob separace stanovit proměnlivou hodnotu základního odtoku v čase s měsíčním rozlišením. To je cenné zejména v současnosti, kdy se odtok může vlivem klimatické změny poměrně výrazně měnit.

Base Flow Index

U každé vodoměrné stanice ČHMÚ byl získán Base Flow Index (BFI) jako podíl průměrného základního odtoku z metody klouzavých minim ku průměrnému celkovému odtoku. BFI tedy ukazuje, jaký podíl z celkového odtoku tvoří v dlouhodobém průměru základní odtok.

Tab. 1 uvádí BFI pro všechny rajony v ČR odvozený ze separace hydrogramu na vodoměrných profilech ČHMÚ. Je zřejmé, že zdaleka nejnižší BFI mají rajony ve flyši a karpatské předhlubni (index 0,3, tj. jen 30 % z celkového odtoku tvoří v dlouhodobém průměru základní odtok, zbytek je rychlý, tj. povrchový a hypodermický odtok). Velká většina rajonů v ČR má BFI mezi hodnotami 0,4 a 0,5, základní odtok zde tedy tvoří 40–50 % celkového odtoku. Jde především o horniny krystalinika, kulmu, části permokarbonu a těch částí křídových rajonů, kde na povrchu převládají izolátory. Následují přechodné oblasti s BFI mezi 0,55–0,65 s horninami křídovými, permokarbonskými a výjimečně krystalinickými. Několik křídových rajonů má BFI 0,7–0,75, což dokumentuje značnou schopnost vyrovnávat odtok.

Extrém pak představuje pás rajonů podél toku Jizery a pravostranných přítoků Labe (povodí Zábřdky, Bělé, Skalského potoka, Košateckého potoka, Pšovky, Liběchovky, Obrtky), tvořený silně propustnými vápnitými pískovci a písčity vápenci, místy až s krasovou propustností [7], jež mají extrémní vyrovnávací schopnost zřejmě díky střídání kvádových a vápnitých pískovců, kde BFI dosahuje anomálně vysokých hodnot 0,75–0,9. Základní odtok zde tvoří 75–90 % celkového odtoku, a rychlý odtok je tedy nevýznamný.

Tab. 1. Hodnoty Base Flow Indexu (BFI) odvozené ze separace hydrogramů na vodních tocích v různých rajonech (HGR)
Tab. 1. Base Flow Index (BFI) values derived from the separation of hydrographs on watercourses in different zones (HGR)

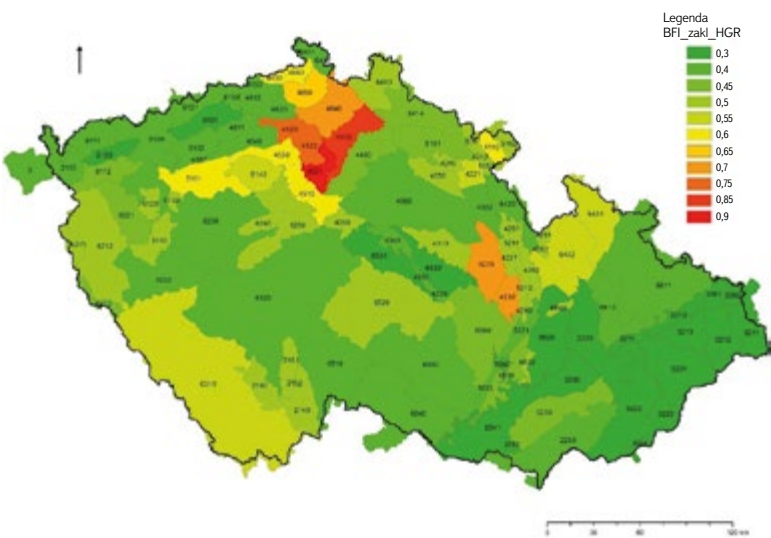
BFI	HGR	Litologie
0,3	2120-2132, 2211-2242, 2261-3224, 6531- 6532, 6620	zejména flyš a předhlubeň, podkrušnohorské pánve, výjimečně krystalinikum a kulm
0,4	2250, 4222, 4320-4340, 4360, 4540-4620, 5221-6111, 6120-6133, 6222-6230, 6320- 6412, 6420, 6510, 6540-6550, 6611-6612	především krystalinikum, permokarbon, kulm a křída s pokryvem izolátorů
0,45	3230, 4430, 5151, 6112, 6213-6221, 6414, 6560-6570	zejména krystalinikum a permokarbon
0,5	1420-1430, 1623, 2140-2160, 4210, 4231, 4240-4262, 4280-4310, 4350, 4420, 5110- 5120, 5132, 5152-5212, 6211-6212, 6240- 6250, 6413, 6520, 6630-6640	jihočeské pánve, kvartér se sprašemi*, křída, krystalinikum, kras
0,55	4221, 5140, 6310, 6431-6432	křída, permokarbon, krystalinikum
0,6	4110, 4510, 4530, 4630, 4660, 5131	především křídové kolektory, výjimečně permokarbon
0,65	4650	křída
0,7	1110-1410, 1510-1622, 1624-1652, 4232, 4270, 4640	kvartér* a křídové kolektory s vysokou vyrovnávací schopností
0,75	4522-4523	křídové kolektory s vysokou vyrovnávací schopností
0,85	4410	křídové kolektory s výjimečně vysokou vyrovnávací schopností
0,9	4521	křídové kolektory s výjimečně vysokou vyrovnávací schopností

Vysvětlivky: *pouze odhadováno, separace hydrogramu v kvartérních rajonech není možná, protože přítoky podzemní vody z kvartérních rajonů jsou mnohem nižší než chyba při stanovení průtoku řeky. Rajony jsou seřazeny podle čísel. Úplné názvy rajonů jsou ve vyhlášce č. 5/2011 Sb., o vymezení hydrogeologických rajonů a útvarů podzemních vod, způsobu hodnocení stavu podzemních vod a náležitostí těchto programů zjišťování a hodnocení stavu podzemních vod, ve znění pozdějších předpisů.

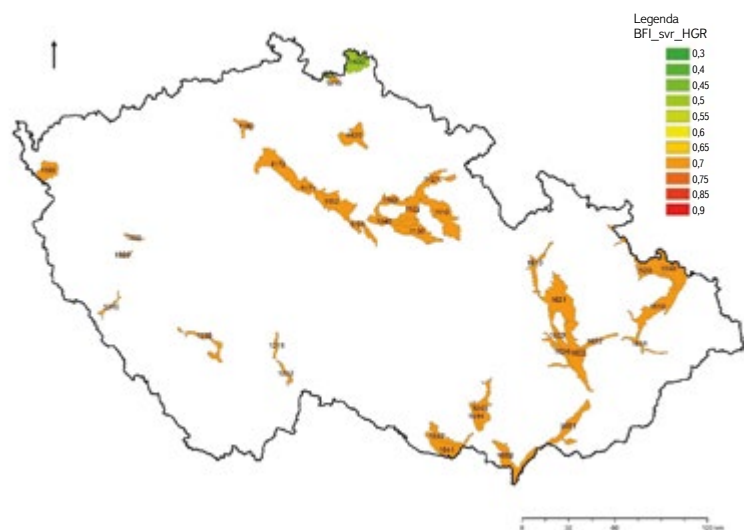
U kvartérních fluvialních štěrkopísků byl BFI pouze kvalifikovaně odhadnut na 0,7 v případě většiny kvartérních rajonů a na 0,5 v případě fluvialních štěrko-písků pokrytých sprašemi. Tento odhad je postaven na skutečnosti, že z kvartér-ních štěrkopísků nenastává povrchový odtok. Ovšem průběhy hladin podzemní vody na vrtech dokumentujících zvedení kvartérních štěrkopísků naznačují pří-tomnost i rychlého odtoku. Skutečný BFI může být vyšší až na hodnotu cca 0,9. Nicméně při použité hodnotě 0,7 zůstávají údaje z *Mapy zranitelnosti podzemní vody k suchu* na bezpečné straně nejistoty, a nižší hodnota je tak při nejistotě žádoucí.

Rajony s nejnižším BFI jsou, jak vyplývá z výše uvedeného, tvořeny horninami s velmi nízkou propustností. Naproti tomu rajony s nejvyšším BFI reprezentují horniny s vysokou propustností a značnou vyrovnávací schopností při deficitu dotace podzemní vody.

Nezávislé zpracování BFI uvádí práce [8], kde jsou uvedeny průměrné hod-noty BFI pro několik skupin hornin a též BFI pro vodoměrné stanice na říční síti.



Obr. 2. Base Flow Index získaný separací hydrogramů z 518 vodních toků v ČR sledovaných ČHMÚ a přiřazený jednotlivým HGR v základní vrstvě (tab. 1)
Fig. 2. Base Flow Index obtained by separating hydrographs from 518 streams in the Czech Republic monitored by the CHMI and assigned to individual HGR in the base layer (Tab. 1)



Obr. 3. Base Flow Index přiřazený jednotlivým HGR ve svrchní vrstvě (tab. 1)

Fig. 3. Base Flow Index assigned to individual HGR in the upper layer (Tab. 1)

Základní odtok – přírodní zdroje podzemní vody v období sucha

Přírodní zdroje podzemní vody pro období sucha byly stanoveny jako průměrný roční základní odtok v nejsušším zaznamenaném roce za desetiletí 2010–2019 na profilu ČHMÚ, pod který dané povodí spadá. Základní odtok získaný tímto způsobem se může zdát nadhodnocený, neboť je známo, že průtoky řady povrchových toků v letních obdobích někdy výrazně klesají.

Definování přírodních zdrojů na základě minimálních průtoků z letního období se však nejeví jako vhodné, protože studie z posledních let ukazují, že za tropických letních teplot dochází i k úplné ztrátě vodnosti povrchových toků nikoli z důvodu extrémního poklesu základního odtoku, nýbrž z důvodu extrémního výparu vody vegetací z nivy a výparu z vodních ploch [9].

Ztráta vodnosti se přitom projevuje pouze v letním období a případně na podzim kvůli poklesu hladiny vody pod dno koryta. Pokud by tyto silné výparem

ovlivněné průtoky byly brány jako hodnoty typické pro sucho, pak by na řadě vodotečí v nižších polohách neexistovaly doslova žádné zásoby podzemní vody (odtok např. pouhých $0,07 \text{ l/s/km}^2$) a sebemenší odběr podzemní vody z těchto rozsáhlých povodí by vedl ke zkrácení, že povodí mají extrémní zranitelnost a jsou přečerpávána. Z průtoků pramenů v těchto povodích je však zjevné, že v době, kdy za letních tropických teplot vzduchu drasticky klesají průtoky povrchových toků, se průtoky pramenů ze stejných povodí nijak nesnižují [10].

V důsledku probíhající klimatické změny již totiž pro vodní toky v nižších polohách ČR neplatí představa, že výpar z nivy toku lze zanedbat, protože je plocha nivy vůči ploše povodí toku velmi malá. V letním bezesrážkovém období tedy neplatí, že průtok toku na profilech ČHMÚ odpovídá základnímu odtoku. Naopak, na tocích Brziny, Loděnice, na Bakovském potoce a Klenici a zřejmě i na mnoha dalších jsou ztráty výparem z nivy toku a vodních ploch tak výrazné (200–250 l/s na plochu povodí vodních toků), že mnohonásobně přesahují zbytkový naměřený odtok z povodí ČHMÚ na uzávěrových profilech toků Brziny, Loděnice, Bakovského potoka a Klenice (0–20 l/s). Velká většina základního odtoku se tak vypařuje a neodtéká. Celkový průtok na profilech ČHMÚ byl v suchých letních obdobích 2018 a 2019 i o dva řády nižší než základní odtok ze stejných povodí před jeho spotřebováním výparem poříční vegetací [9] (obr. 4). Tento fenomén je dobře známý z aridních oblastí, kde také voda z vodních toků masivně výparem mizí, až potoky úplně vyschnou. Na řadě vodních toků v nižších polohách ČR jsou tak i bez odběrů vody v letních obdobích zůstatkové průtoky podkročeny, a to čistě vlivem environmentálních jevů (extrémní teploty, a tedy extrémní výpar). Souhrnná aktualizovaná zpráva o dopadu klimatické změny [11] potvrzuje podstatně větší vliv evapotranspirace (větší spotřebu vody vegetací i v důsledku prodloužení vegetačního období) v důsledku probíhající klimatické změny.

Určitý vliv na výsledky by teoreticky mohlo mít vypouštění z čistíren odpadních vod, které výrazně nadlepšuje průtoky v podmínkách dlouhodobého sucha [12]. Nicméně k výraznému nadlepšení průtoků dochází v době extrémní evapotranspirace z nivy, kdy je velká část základního odtoku pohlcena evapotranspirací v nivě, což naopak vede k extrémnímu podcenění základního odtoku. Vliv těchto procesů na základní odtok je tedy protichůdný s tím, že efekt snížení průtoků evapotranspirací v nivě je obvykle výrazně vyšší.



Obr. 4. Příklady extrémně nízkých průtoků na povrchových tocích s povodím okolo 100 km^2 . Odtok byl přechodně drasticky snížen v důsledku vysoké evapotranspirace podzemní vody z říční nivy v suchých a horkých letních obdobích; a) Brzina (Sedlčansko) 10. červenec 2019, průtok 0 l/s , povodí 133 km^2 ; b) Žehrovka (Březina) 9. červenec 2019, měřený průtok 20 l/s , povodí 90 km^2

Fig. 4. Examples of extremely low flows on surface streams with catchments of about 100 km^2 . Runoff was temporarily drastically reduced as a result of massive evapotranspiration of groundwater from the river floodplain in dry and hot summer periods a) Brzina (Sedlčansko) 10 July 2019, flow rate 0 l/s , river basin 133 km^2 ; b) Žehrovka (Březina) 9 July 2019, measured flow 20 l/s , basin 90 km^2

Tab. 2. Hodnoty indexu M
Tab. 2. M index values

0,3	1651-1652, 2120-2132, 3110, 3224, 4350, 4530-4550, 5140, 6620	podkrušnohorské pánve, nízko položené oblasti ve flyši, křídě, permokarbonu a kulmu
0,35	1623-1644, 2220-2250, 4611-4612, 6540	nízko položené oblasti ve flyši, křídě a krystaliniku, kvartér*
0,4	1110-1622, 3230, 4231-4232, 4280, 4360, 4510, 6240, 6510	nízko položené oblasti v křídě, kvartér*
0,45	2140-2160, 3222-3223, 4521, 4620, 5131-5132, 6230, 6320, 6550, 6630-6640	jihocheské křídové pánve, nízko položené oblasti křídý, permokarbonu a krasu
0,5	2212, 2261-2262, 4270, 4310-4340, 4430, 4522-4523, 5221-5222, 6250, 6413, 6520-6531, 6560-6570	nižší a střední polohy křídý, permokarbonu a krystalinika
0,55	2211, 3112, 3221, 4110-4210, 4240-4250, 6222, 6411-6412, 6612	flyš a střední polohy křídý a krystalinika
0,6	2110, 3211, 4221-4222, 4261-4262, 4291-4292, 4410-4420, 4640, 5110, 5120, 5152, 5211-5212, 6211-6221, 6432, 6611	střední polohy křídý, permokarbonu a krystalinika
0,65	3213, 5161-5162, 6111-6120, 6310, 6420-6431, 6532	vyšší polohy permokarbonu a krystalinika, výjimečně flyš
0,7	4630, 4650-4660, 5151, 6131-6133, 6414	nejvyšší polohy křídý, vyšší polohy permokarbonu a krystalinika

Vysvětlivky: *pouze odhadováno, separace hydrogramu v kvartérních rajonech není možná, viz tab. 1. Rajony byly seřazeny podle jejich čísel, pomlčka mezi čísly znamená rozsah všech rajonů mezi uvedenými čísly.

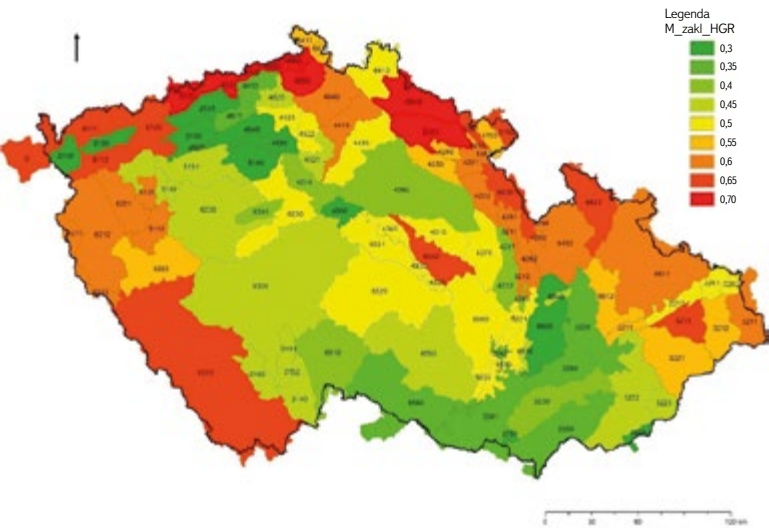
M Index

U každé vodoměrné stanice ČHMÚ se stanovil index M jako podíl průměrného základního odtoku v nejsušším zaznamenaném roce za desetiletí 2010–2019 ku průměrnému dlouhodobému základnímu odtoku. Index M tedy udává, jaký podíl z průměrného základního odtoku tvoří základní odtok v nejsušším roce (tab. 2).

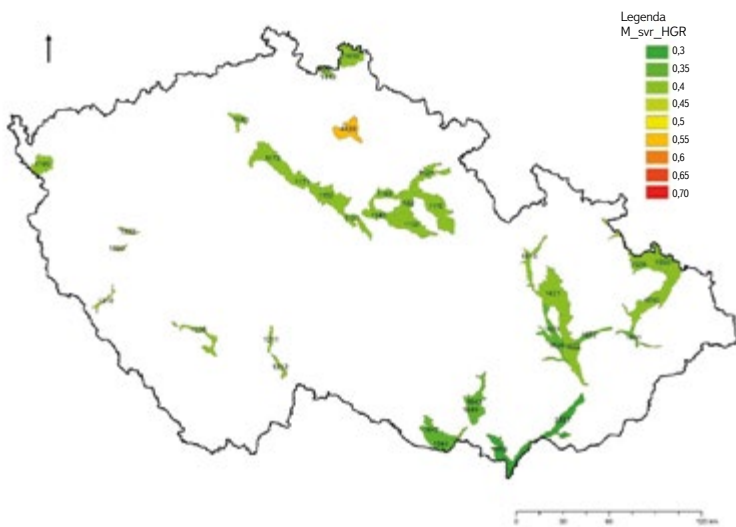
Tab. 2 ukazuje index M pro všechny rajony v ČR odvozený ze separace hydrogramu na vodoměrných profilech ČHMÚ. Nejnižších hodnot dosahuje index M v nejnižších polohách ČR, kde k výraznějšímu doplnění podzemní vody dochází typicky po několika suchých letech. To je i důvodem, proč základní odtok v období sucha dokáže poklesnout např. až na 30 % průměrného základního odtoku na stejné vodoměrné stanici. Naopak v nejvyšších polohách, kde převládá každoroční doplňování nad mnohaletými oscilacemi, je přirozeně pokles základního odtoku v období sucha menší, a to na 70 % hodnoty průměrného základního odtoku. Na rozdíl od BFI, který výrazně souvisí s litologií, je index M ovlivněn především nadmořskou výškou. Vliv litologie je vhodné posoudit v budoucích studiích. Omezený vliv litologie je zřejmý např. u M = 0,45, který mají jak velmi málo propustné horniny flyše, tak i nejpropustnější kolektory v křídě se silnou vyrovnávací schopností. Ukazuje se tak, že vyrovnávací schopnost horninového prostředí má pouze omezený dosah v čase. Např. u HGR 4521 Křída Košateckého potoka je sice porozita schopna pohltit téměř veškerý rychlý odtok a převést ho na odtok základní (BFI 0,9), ale tato porozita již není schopna vyrovnat odtok v řádu několika let, aby odtok mezi suchými a vlhkými lety příliš nekolísal.

Mnohem větší vliv na vyrovnanost odtoku v mnohaletých cyklech tak má pravidelná dotace podzemní vody ze srážek. Ve vyšších nadmořských výškách je dotace podzemní vody pravidelnější, jelikož každý rok se doplní zásoba kapilární vody v půdě, a infiltrovaná voda tak může pokračovat do větších hloubek

a doplnit i podzemní vodu. Naopak v nížinách může deficit půdní vody trvat i několik let a k výraznému doplnění podzemní vody může docházet až po letech (např. po sedmi letech v případě Slánska), kdy už základní odtok stačil klesnout na výrazně podprůměrné hodnoty.



Obr. 5. Index M stanovený separací hydrogramů 518 povrchových vodních toků přiřazený HGR v základní vrstvě
Fig. 5. Index M determined by hydrograph separation from 518 surface streams assigned to HGR in the base layer



Obr. 6. Index M přiřazený jednotlivým HGR ve svrchní vrstvě (tab. 2)
Fig. 6. Index M assigned to individual HGR in the upper layer (Tab. 2)

Odvození základního odtoku ze srážek

Za ideální situace by každá oblast v ČR přináležela danému povodí s vodoměrnou stanicí. Separací hydrogramu na daném vodoměrném profilu ČHMÚ by bylo možné přímo určit jak průměrný základní odtok, tak základní odtok v období sucha. Ve skutečnosti však na téměř polovině území ČR tento přístup nelze využít, protože:

1. mnoho řek pramení v okrajových pohořích a vodoměrné profily ČHMÚ v nížině umístěné na těchto tocích (např. Labe) neodrážejí podmínky tvorby základního odtoku v nížině, ale naopak podmínky převládající ve zdrojové oblasti (výrazně vyšší nadmořské výšky, a tedy i vyšší odtok, než má mezipovodí dané vodoměrné stanice);
2. akumulace kvartérních štěrpkopísků se až na výjimky odvodňují do velkých vodních toků. Základní odtok ze štěrpkopísků nelze určit měřením, protože nárůst průtoku řeky odtokem ze štěrpkopísků je mnohem nižší než chyba měření průtoku velkého povrchového vodního toku.

Pro značnou část území ČR tedy nelze základní odtok určit separací hydrogramu na existujících profilech. Bylo proto nutné základní odtok určit nepřímou z parametrů, jež jsou k dispozici na celé ploše území ČR. Nejvhodnějším parametrem je dlouhodobý průměrný úhrn srážek, který je dostupný v rozlišení 1 km² (30letý srážkový normál, ČHMÚ). Dlouhodobý průměrný úhrn srážek se v prostoru mění plynule bez ostrých přechodů. Je dobře znám relativně těsný vztah mezi dlouhodobým průměrným úhrnem srážek a celkovým odtokem [13].

Těsný vztah mezi průměrným dlouhodobým úhrnem srážek a celkovým odtokem na základě analýzy 65 povodí ČHMÚ je popsán v publikaci [14]. Průměrný celkový odtok lze z průměrných srážek vypočítat podle rovnice:

$$CO_{\text{prům}} = 0,000571 \times (\text{srážky})^2 + 0,132 \times (\text{srážky}) - 170,2 \quad (1)$$

kde:

$CO_{\text{prům}}$ je celkový průměrný odtok (mm/rok)
(srážky) jsou průměrné srážky (mm/rok), přičemž v obou případech jde o dlouholetý průměr

Koeficient determinace byl 0,97, střední kvadratická chyba 7,9 %.

Rovnici nelze využít pro srážky nižší než 450 mm/rok, protože rovnice již nereflektuje korektně vztah srážky-odtok.

Po převedení na jiné jednotky odtoku má rovnice Kašpárka a Datla [14] následující tvar:

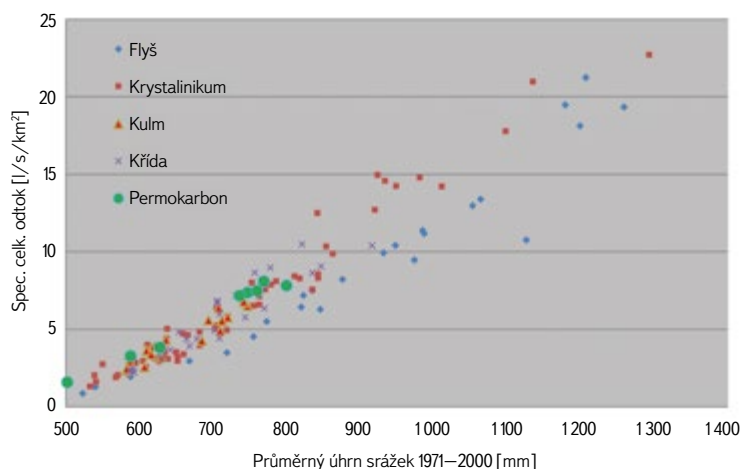
$$CO_{\text{prům}} = 0,0000181 \times (\text{srážky})^2 + 0,00419 \times (\text{srážky}) - 5,397 \quad (2)$$

kde:

$CO_{\text{prům}}$ je celkový průměrný odtok (l/s/km²)
(srážky) jsou průměrné srážky (mm/rok),
opět v dlouholetém průměru

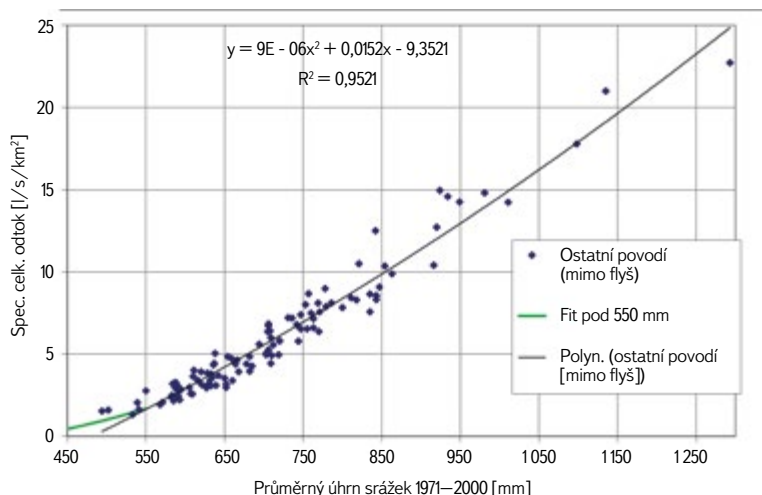
V roce 2011 byl ve spolupráci s R. Vlnasem studován vliv geologie na celkový a základní odtok. Ze sledovaných vodoměrných profilů ČHMÚ byly vyřazeny takové profily, které neměly jednu převládající geologickou jednotku, a dále takové, u nichž bylo zjevné přetékání vody z/do jiných povodí. Výsledných 138 povodí bylo rozděleno do následujících pěti skupin podle geologie: krystalinikum, kulm (spodnokarbonské droby na Moravě), permokarbon, křída, flyš [15].

U celkového odtoku se ukázalo, že s výjimkou flyše mají všechna povodí stejný vztah k dlouhodobému průměrnému úhrnu srážek, který tak lze vyjádřit jednotnou rovnicí. Pouze horniny flyše vykazují nižší odtok při stejném srážkovém úhrnu než skupina všech ostatních hornin (obr. 7). Příčina odlišnosti flyše je zřejmě klimatická, nikoli geologická. Horniny flyše se nacházejí jen v Karpatech na hranici se Slovenskem, zatímco jiné horniny se vyskytují v širším území ČR, tedy s průměrnou polohou až o stovky kilometrů jinde. Flyš je v geograficky odlišné oblasti ve více kontinentálních podmínkách než průměr ostatních povodí. Analýza ukázala, že povodí ČR pro stanovení celkového odtoku stačí členit na pouhé dvě skupiny. Pro všechny rajony s výjimkou flyše lze průměrný celkový odtok určit z průměrných dlouhodobých srážek ze vztahu na obr. 8, zatímco pro rajony flyše je vztah uveden na obr. 9. Porovnání těchto regresních rovnic s rovnicí [13] je uvedeno na obr. 10.

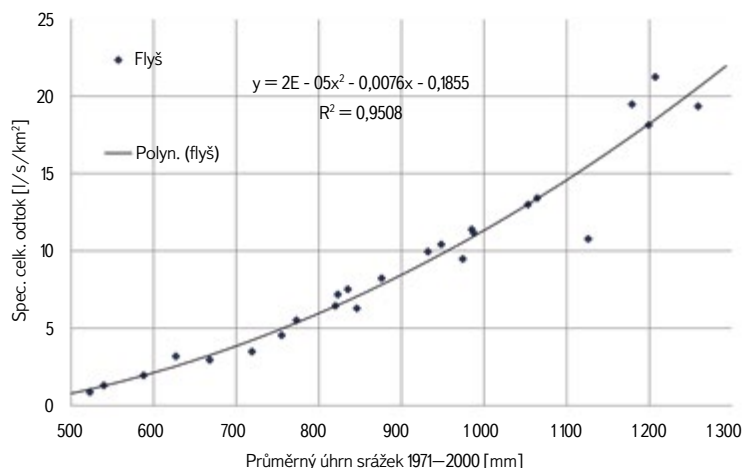


Obr. 7. Vliv srážek a geologie na celkový odtok v povodích sledovaných ČHMÚ [15]
Fig. 7. Influence of precipitation and geology on total flow for catchments monitored by CHMI [15]

Je zřejmé, že srážky velmi dobře determinují celkový odtok. Na geologii nezáleží s výjimkou flyše, jehož povodí vykazují nižší celkový odtok než ostatní povodí [15].



Obr. 8. Vztah mezi průměrným úhrnem srážek a celkovým odtokem pro všechny geologické typy povodí mimo flyš; proložený polynom podceňuje odtok pro srážky pod 550 mm/rok, a proto je nižší srážkový úhrn nahrazen polynomem pro flyš (zelená čára)
Fig. 8. Relationship between mean precipitation and total flow for all geological types of catchments other than flysch; the fitted polynomial underestimates flow for precipitation below 550 mm/year, and therefore for the lower precipitation total it is replaced by a polynomial for flysch (green line)



Obr. 9. Vztah mezi průměrným úhrnem srážek a celkovým odtokem pro flyš
Fig. 9. Relationship between average precipitation and total flow for flysch

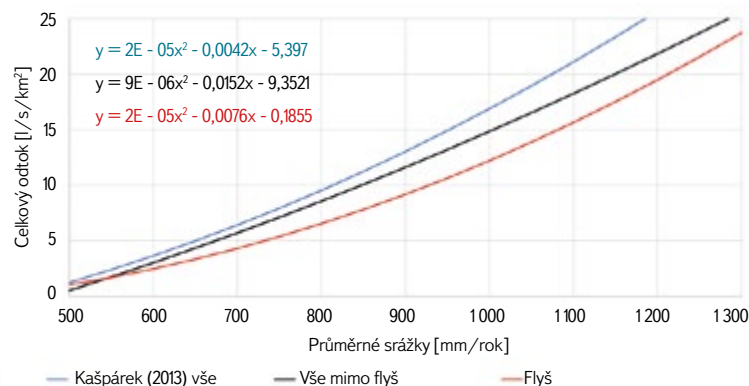
Průměrný základní odtok byl na základě těsných regresních vztahů se srážkami vypočten z následující rovnice:

$$ZO_{\text{prům}} = (a \times (\text{srážky})^2 + b \times (\text{srážky}) - c) \times \text{BFI} \quad (3)$$

kde:

$ZO_{\text{prům}}$ je průměrný základní odtok (l/s/km²)
(srážky) jsou dlouhodobý průměrný úhrn srážek (mm/rok)
BFI je Base Flow Index (bezrozměrný)
a, b, c jsou parametry rovnic (bezrozměrné) (obr. 8, 9)

BFI je pro všechny rajony uveden v tab. 1 a parametry (a, b, c) uvádějí obr. 8 a 9 ve formě regresních rovnic. Podobný postup, tedy získání celkového odtoku ze srážek a poté základního odtoku přenásobením BFI, použili [16].



Obr. 10. Porovnání vztahů pro určení celkového odtoku ze srážek. Je zřejmé, že celkový odtok z flyšových povodí (červeně) je výrazně nižší, než je tomu u ostatních povodí (černě). Modře vztah podle rovnice [16]. Regresní rovnice na obr. 10 uvádí parametry a, b, c ve formě $a \times x^2 + b \times x + c$
Fig. 10. Comparison of relationships for determination of total flow from precipitation. It is clear that the total flow from flysch catchments (red) is significantly lower than that of other catchments (black). In blue relationship according to formula [16]. The regression equation in Fig. 10 shows the parameters a, b, c in the form $a \times x^2 + b \times x + c$

Pro flyš je tedy k výpočtu základního odtoku vždy užitá rovnice:

$$ZO_{\text{prům}} = (2,10^{-5} \times (\text{srážky})^2 + 0,0076 \times (\text{srážky}) - 0,1855) \times \text{BFI daného rajonu} \quad (3a)$$

Pro ostatní rajony v oblasti s normálem srážek nad 550 mm/rok je pro získání základního odtoku užitá rovnice:

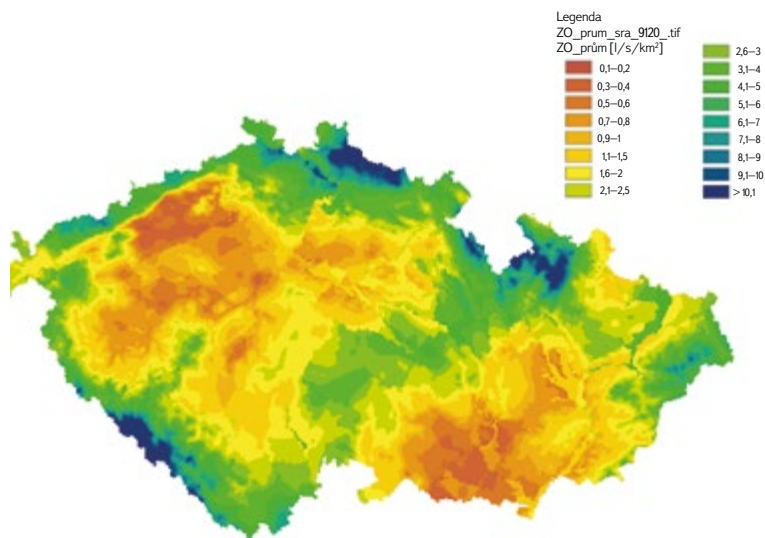
$$ZO_{\text{prům}} = (9,10^{-6} \times (\text{srážky})^2 + 0,0152 \times (\text{srážky}) - 9,3521) \times \text{BFI daného rajonu} \quad (3b)$$

Pro ostatní rajony v oblasti s normálem srážek pod 550 mm/rok je pro získání základního odtoku užitá rovnice:

$$ZO_{\text{prům}} = (2,10^{-5} \times (\text{srážky})^2 + 0,0076 \times (\text{srážky}) - 0,1855) \times \text{BFI daného rajonu} \quad (3c)$$

Výslednou mapu základního odtoku ukazuje obr. 11. Ve vysokém rozlišení je dostupná na https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/. Hodnoty jsou mírně nižší než v mapě podzemního (základního) odtoku Krásného et al. [2], která byla konstruována z dat z šedesátých a sedmdesátých let minulého století (10leté až 12leté řady z 250 vodoměrných stanic) ještě před snížením základního odtoku v důsledku klimatické změny.

Dlouhodobý průměrný základní odtok (obr. 11) je vypočten z dlouhodobého průměrného úhrnu srážek z rovnice 3 (variant 3a, 3b, 3c) a parametrů z tab. 1



Obr. 11. Dlouhodobý průměrný základní odtok (l/s/km²) odvozený ze srážkového normálu 1991–2020 za využití regresních vztahů a BFI indexu pro jednotlivé rajony.

Mapa je dostupná na: https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/

Fig. 11. Long-term average base flow (l/s/km²) derived from precipitation normal 1991–2020 using regression relationships and BFI index for individual zones.

Map is available on: https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/

(l/s/km²). Je dobře patrné, že v kvartérních rajonech je základní odtok vyšší než v řadě okolních rajonů díky vyššímu BFI.

Odvození základního odtoku v období sucha ze srážek

Základní odtok v období sucha byl vypočten podle vzorce:

$$ZO_{\text{sucho}} = ZO_{\text{prum}} \times M \quad (4)$$

kde:

M je index minimálního základního odtoku (bezrozměrný) a je pro všechny rajony uveden v tab. 2 (obr. 5 a 6).

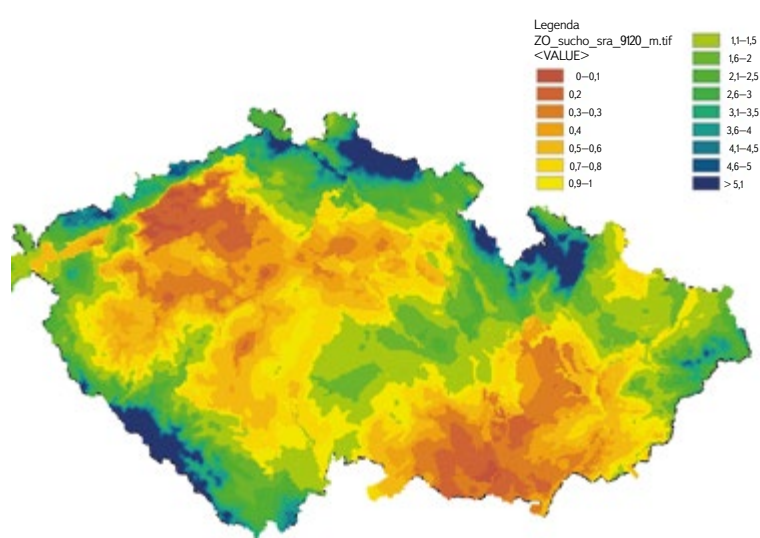
Hranice kategorií barevné škály jsou v mapě ZO_{sucho} jiné než v mapě ZO_{prum} z důvodu optimálního rozlišení hodnot. Mapy jsou si proto podobné. Zobrazené hodnoty v obou mapách se však značně liší (srov. obr. 11 a 12). Hodnoty základního odtoku v období sucha jsou výrazně nižší než průměrný základní odtok, zejména v nižších polohách.

Indexy BFI a M se spolu násobí a jejich součin s průměrným celkovým odtokem udává základní odtok v období sucha. Lze proto očekávat nejnižší základní odtok během sucha v málo propustných horninách v nejnižších nadmořských výškách (např. flyš). Zde může základní odtok v období sucha dosahovat i pouhých 10 % průměrného celkového odtoku dané oblasti.

Odběry a vypouštění podzemní a povrchové vody

Evidované odběry a vypouštění povrchové a podzemní vody (v ročním průměru) byly převzaty z bodové databáze HEIS a následně přepočteny na l/s. Každý bodový údaj je přiřazen danému elementu území. Např. pod jednotlivá povodí 4. řádu nebo pod nivu a pro každý takový element bylo z rozdílu sumy všech odběrů a vypouštění vody vypočteno, kolik vody se z daného elementu celkem odebírá či se do něj vypouští.

Zatímco pro prostředí A i B (rajony a povodí 4. řádu) byly uvažovány jen odběry a vypouštění podzemní vody, pro prostředí C (nivu) byly vedle odběrů



Obr. 12. Základní odtok v období sucha (l/s/km²) generovaný ze srážkového normálu 1991–2020 za využití regresních vztahů a BFI a M indexů pro jednotlivé rajony.

Mapa je dostupná na: https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/

Fig. 12. Base flow in the dry season (l/s/km²) generated from precipitation normal 1991–2020 using regression relationships and BFI and M indices for individual zones.

Map is available on: https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/

a vypouštění podzemní vody uvažovány i odběry a vypouštění povrchové vody. Pro prostředí D (osídlené části obcí s převažujícím individuálním zásobováním) byl uvažován pouze odběr podzemní vody na úrovni počtu obyvatel a průměrné spotřeby na obyvatele v ČR. Jednotlivé odběry a vypouštění vody byly ve výsledné mapě zranitelnosti zobrazeny jako bodové objekty s různým průměrem bodu podle velikosti odběru vody, aby bylo zřejmé, kde přesně v daném elementu dochází k registrovanému odběru nebo vypouštění vody.

Zranitelnost zdrojů podzemní vody k suchu

Výsledná *Mapa zranitelnosti podzemní vody k suchu* byla generována překryvem a kombinováním několika samostatných vrstev informací. Hlavní výhodou tohoto postupu je skutečnost, že daná existující síť elementů umožňuje aktualizovat data např. o změně dotace nebo naopak o změně odběrů a vypouštění vody, což vede ke změně hodnot elementů v mapě zranitelnosti. V budoucnu tak bude možné mapu zranitelnosti aktualizovat. Pro jednotlivé typy prostředí byly dostupné zdroje podzemní vody po odečtení odběrů podzemní vody určeny následujícími způsoby:

Určení zranitelnosti pro povodí 4. řádu a rajony

Pro prostředí A i B (povodí 4. řádu a HGR) byla zranitelnost Bp určena podle vzorce:

$$Bp \text{ (l/s/km}^2\text{)} = (ZO_{\text{sucho}} * Sp - Op + Vp) / Sp \quad (5)$$

kde:

ZO_{sucho}	je	základní odtok v období sucha (l/s/km²)
Op		odběr podzemní vody (l/s)
Vp		vypouštění do podzemní vody (l/s) (velmi výjimečné)
Sp		plocha daného povodí 4. řádu nebo HGR (km²)
Bp		symbol pro zranitelnost území povodí 4. řádu a rajonu

Základní odtok v období sucha (ZO_{sucho}) byl vypočten z rovnice 4 v rozlišení 1 km² a je dostupný na: https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/. Tam, kde proudění podzemní vody v rajonu tvoří ucelený systém (silně propustné zvodně, např. české křídové pánve a jihočeské pánve, javoříčsko-mladečský kras), byla bilance počítána pro celý HGR, protože dělení na části HGR by bylo značně subjektivní. Všude jinde byla bilance počítána v povodí 4. řádu.

Určení zranitelnosti pro nivy

Pro prostředí C (nivy) byla zranitelnost Bn určena podle vzorce:

$$Bn \text{ (l/s/km}^2\text{)} = (ZO_{\text{sucho}} * Sp * K - O + V) / Sn \quad (6)$$

kde:

ZO_{sucho}	je	základní odtok v období sucha (l/s/km ²)
K		koeficient vytižení (bezrozměrný), který byl nastaven na hodnotu 0,5
O		odběr jak povrchové, tak podzemní vody (l/s)
V		vypouštění jak povrchové, tak podzemní vody (l/s)
Sn		plocha segmentu nivy (km ²)
Sp		plocha celého orografického povodí, jehož voda nivním segmentem protéká (km ²)
Bn		symbol pro zranitelnost prostředí nivy

Základní odtok byl vypočten jako průměrná hodnota ze základního odtoku z povodí 4. řádu a HGR v podloží nivy. Jelikož niva je v kontaktu s povrchovým tokem, jsou v tomto případě brány v potaz nejen odběry podzemní vody, ale i odběry a vypouštění povrchové vody. Odběry a vypouštění vody byly uvažovány z celé plochy nivy a též v pásu 250 m okolo (použití bufferu).

Výpočet tedy uvažuje, že v nivě vodního toku je k dispozici 50 % (koeficient vytižení) veškerého základního odtoku v období sucha, vytvářeného v celé ploše orografického povodí daného toku pro indukované zdroje. Jelikož niva tvoří typicky jen několik málo procent plochy vodního toku (cca v průměru 2–5 %), jsou potenciální indukované zdroje z celého povodí na jednotku plochy nivy asi 20násobné než u jiných elementů. Hranice kategorií jsou u nivy proto nastaveny odlišně. Pokud by byl koeficient vytižení K na 100 %, pak by se uvažovala spotřeba veškerého základního odtoku z celého povodí pouze v daném segmentu nivy. Orografické povodí však připadá i segmentům niv dále po proudu, které jsou bilancovány samostatně, a takový postup by mohl vést k přecenění zdrojů podzemní vody.

Určení zranitelnosti pro obce s převládajícím individuálním zásobováním

Odběry podzemní vody pro individuální zásobování nejsou registrovány, ale lze je odvodit z počtu obyvatel dané obce, protože denní průměrná spotřeba vody v ČR se pohybuje podle dostupných údajů okolo 100 l/osobu/den. Individuální odběry podzemní vody v obcích jsou podle zkušeností z let 2015–2020 (hydrologické sucho) zároveň jedny z nejvíce ohrožených suchem. Individuální zdroje vody pro zásobování bývají velmi často mělké a využívají svrchní část přípovrchového kolektoru, který má tu typickou vlastnost, že podzemní vodu lze získat jen z relativně blízkého okolí jímacího objektu. Platí to zejména v zastavěných územích, kde jednotlivé pozemky spolu přímo sousedí a hustota obyvatel je natolik vysoká, že nelze zaručit, že se v dané oblasti vytvoří dostatečná zásoba podzemní vody ze srážek na jednotku plochy. Lze to demonstrovat jednoduchým výpočtem na příkladu spotřeby vody pro zásobování. Typický základní odtok v nižších polohách ČR, kde žije většina obyvatel a kde se nachází většina obcí, nepřesahuje 1–2 l/s/km² [2]. Základní odtok přitom odpovídá průměrné dotaci podzemní vody. Na 1 000 m² pozemku tedy

dotace nepřesahuje 1–2 ml/s, což odpovídá 90–180 l/den. Průměrná spotřeba je 100 l/osoba/den, takže poměrně rozsáhlý pozemek o ploše 1 000 m² je schopen zásobovat vodou v průměru max. 1–2 osoby. Přitom je zjevné, že pozemky jsou často i výrazně menší a žije na nich zpravidla více než 1–2 osoby. Uvedený výpočet vychází z průměrné dlouhodobé dotace ze srážek, nikoli z dotace v období sucha, kdy klesá v nižších nadmořských výškách na polovinu průměrné hodnoty i méně. Z výše uvedeného výpočtu je zcela zjevné, že vysychání studní v letním období je v řadě obcí zákonitě v důsledku probíhající klimatické změny.

Pro prostředí D (obce s převládajícím individuálním zásobováním) byla zranitelnost Bo určena podle vzorce:

$$Bo \text{ (l/s/km}^2\text{)} = (ZO_{\text{sucho}} * So - O * N) / So \quad (7)$$

kde:

ZO_{sucho}	je	základní odtok v období sucha získaný z povodí 4. řádu nebo z hydrogeologického rajonu, na kterém obec leží (l/s/km ²);
So		plocha zastavěné části obce (km ²)
O		průměrná spotřeba vody na obyvatele (0,0011 l/s, což odpovídá 100 l/os/den, a tedy průměrné spotřebě vody na obyvatele v ČR)
N		počet obyvatel dané obce
Bo		symbol pro zranitelnost plochy obce

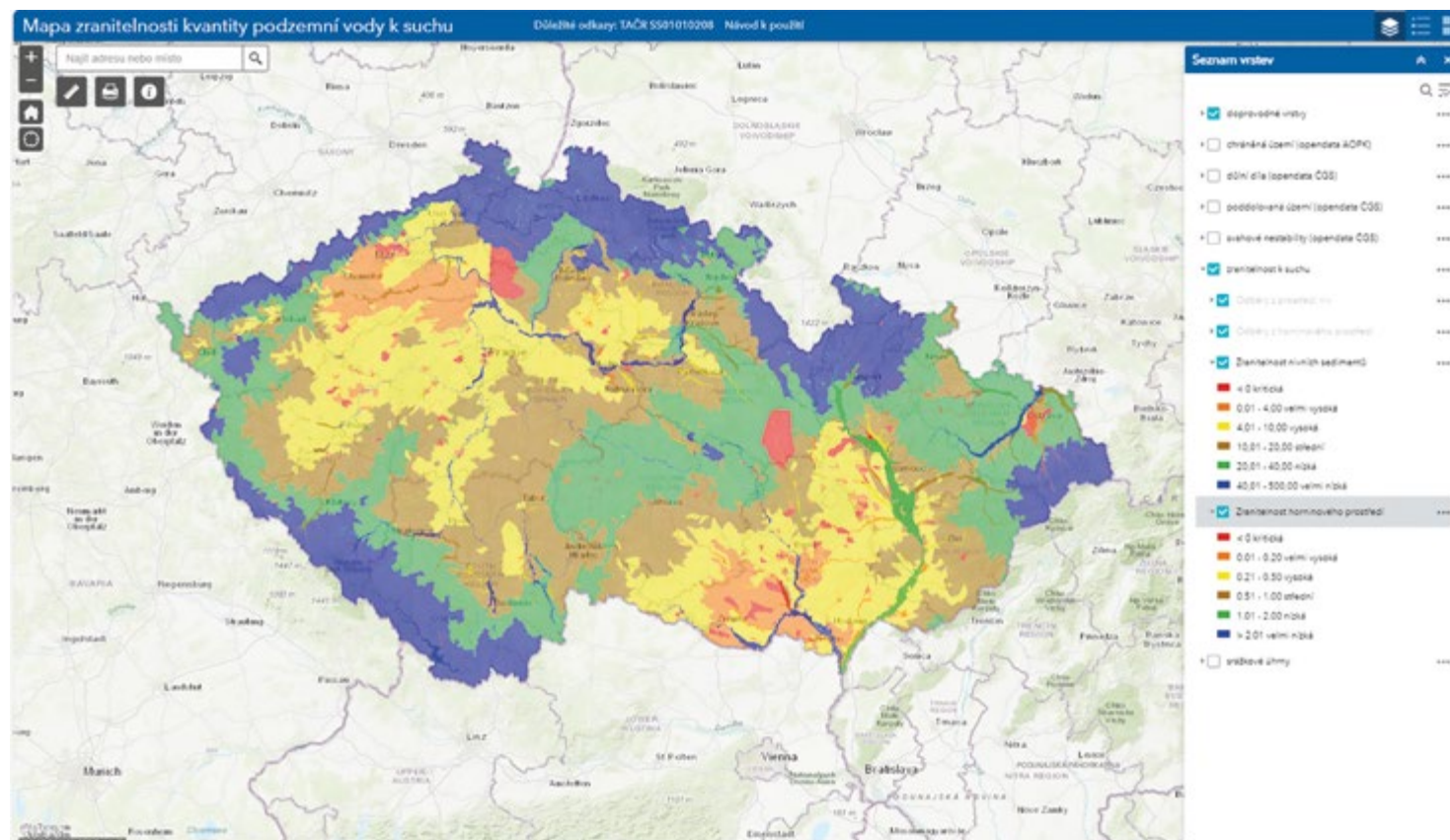
Počet obyvatel obce byl převzat z vrstvy <https://csu.gov.cz/vysledky> (sčítání obyvatel k roku 2020). Případně byla dohledána data na webu statistického úřadu.

V bilanci se tedy předpokládá, že zdrojem podzemní vody pro danou obec je jen voda, která spadne v zastavěné části obce, a že do obce nepřitéká voda z širšího okolí. Dále se předpokládá, že množství podzemní vody, jež se v obci tvoří, je stejné, jako je množství podzemní vody, které se tvoří v průměrné krajině v okolí obce. Oba tyto předpoklady jsou v zásadě nejhorší možnou variantou. Řada obcí má infiltrační zázemí i v širším okolí a podzemní voda do nich přitéká z větších ploch. Nicméně jsou i obce, kde se orografické povodí shoduje s plochou zástavby. V obcích se evidentně tvoří více podzemní vody než v okolní krajině, a to díky mnohem nižší hustotě vegetace a vyššímu podílu nepropustných povrchů, které jsou z významné části drénovány do podzemí (v zástavbě rodinnými domy zpravidla platí povinnost zasakování srážkových vod na vlastním pozemku a voda z významné části nepropustných povrchů se vsakuje). Výsledná bilance proto představuje nejčernější scénář, takže výsledek je na straně bezpečnosti. Skutečná dotace podzemní vody v intravilánu obcí nebyla měřena a jde o jednu z nejdůležitějších neznámých, jež by si zasluhovaly další studium.

VÝSLEDKY – MAPA ZRANITELNOSTI PODZEMNÍ VODY K SUCHU

Kategorie mapy zranitelnosti

Výsledná *Mapa zranitelnosti podzemní vody k suchu* (obr. 13) je dostupná na www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu, mapy průměrného základního odtoku a základního odtoku za sucha jsou dostupné na: https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/



Obr. 13. Výsledná Mapa zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu. Kategorie zranitelnosti jsou stanoveny na základě čísel vyjádřených zbývajících zdrojů podzemní vody v suchém období po odečtení odběrů (l/s/km^2). Pro nivy jsou to hodnoty potenciálních zbývajících zdrojů infiltrace (l/s/km^2)

Fig. 13. Map of the Vulnerability of Natural Groundwater Resources to Drought. Vulnerability categories are determined from the numerical value of remaining groundwater resources in the dry season after subtraction of groundwater abstractions (l/s/km^2). For floodplains, these are the values of potential remaining recharge from streams (l/s/km^2)

Území výše uvedené účelové mapy je rozděleno na plochy v šesti kategoriích, a to kvantitativně podle bilance (zdroje-odběry podzemní vody/plocha území), tj. bilance normalizovaná na jednotku plochy:

- kritická (červeně)
- velmi vysoká (oranžově)
- vysoká (žlutě)
- střední (hnědě)
- nízká (zeleně)
- velmi nízká (modře)

Pro povodí 4. řádu, HGR i zastavěné části obcí platí následující hranice kategorií:

- Kritická zranitelnost (červená barva) má bilanci zápornou, což znamená, že v daném elementu území se spotřebovává v období sucha více podzemní vody, než odpovídá přírodním zdrojům. Přírodní zdroje jsou tedy v období sucha přečerpávány.
- Velmi vysoká zranitelnost (oranžová barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zůstává velmi nízký základní odtok na úrovni nižší než $0,2 \text{ l/s/km}^2$.
- Vysoká zranitelnost (žlutá barva) je pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zůstává nízký základní odtok mezi $0,21\text{--}0,5 \text{ l/s/km}^2$.
- Střední zranitelnost (hnědá barva) platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů v období sucha zůstává základní odtok mezi $0,51\text{--}1 \text{ l/s/km}^2$.

- Nízká zranitelnost (zelená barva) je pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zůstává $1,01\text{--}2 \text{ l/s/km}^2$.
- Velmi nízká zranitelnost platí pro oblasti, kde po odečtení odběrů podzemní vody v období sucha zůstává přes 2 l/s/km^2 .

Pro nivy, jejichž malé ploše přispívá přitékající podzemní voda z širokého okolí z orografického povodí vodního toku (indukované zdroje), jsou hranice kategorií 20krát vyšší.

Zastoupení jednotlivých kategorií zranitelnosti

Závěrem byl proveden výpočet zastoupení kategorií kritické a vysoké zranitelnosti. Pro povodí 4. řádu a HGR je zastoupení vyjádřeno jako podíl plochy daných elementů spadajících do dané kategorie ku ploše ČR ($78\,870 \text{ km}^2$).

HGR zaujímají 16,7 % plochy. U niv jde o plochu niv v dané kategorii ku jejich celkové ploše (činí $5\,584 \text{ km}^2$). U obcí jde o počet obcí v dané kategorii k jejich celkovému počtu s převažujícím individuálním zásobováním (celkem 1 726 obcí).

U HGR a povodí 4. řádu spadají do kritické zranitelnosti 2 % území, do velmi vysoké zranitelnosti 5 % území a do vysoké zranitelnosti 22 % plochy území ČR (tab. 3).

U niv patří do kritické zranitelnosti 3 % území niv, do velmi vysoké zranitelnosti 13 % území niv, do vysoké zranitelnosti pak dalších 17 % území niv.

Nejhroší je situace v obcích s převažujícím individuálním zásobováním, kde pod kritickou zranitelnost spadá 93 % území obcí, dalších 5 % pod velmi vysokou zranitelnost a 2 % pod vysokou zranitelnost.

Tab. 3. Zastoupení kategorií na Mapě zranitelnosti zdrojů podzemní vody k suchu v ČR
 Tab. 3. Representation of categories from Map of Drought Vulnerability of Groundwater Resources in the Czech Republic

Zranitelnost	HGR a povodí 4. řádu zastoupení plochy [%]	Nivy zastoupení plochy [%]	Obce zastoupení počtu [%]
Kritická	2	3	93
Velmi vysoká	5	13	5
Vysoká	22	17	2
Střední	27	25	0
Nízká	25	19	0
Velmi nízká	19	23	0
	100	100	100

SHRNUTÍ A DISKUZE

Zranitelnost zdrojů podzemní vody k suchu určuje nejen velikost přírodních zdrojů podzemní vody, ale i míra jejich současného využívání, protože v HGR s největšími zdroji podzemní vody jsou často i největší odběry podzemní vody. Účelem *Mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* je objektivní porovnání zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody v rámci celého území ČR. Tato mapa je sestavena ve formě bilance přírodních zdrojů a odběrů podzemní vody vycházející z průměrného základního odtoku, základního odtoku v nejsušším roce za desetiletí 2010–2019, údajů HEIS, PRVKUK k roku 2019, počtu obyvatel, srážkových úhrnů za období 1991–2020 atd. Autoři účelové mapy jsou si vědomi, že některé informace z veřejně dostupných zdrojů, např. z PRVKUK, jež se aktualizují ve víceletém časovém horizontu a podle potřeb příslušného kraje, nemusejí odpovídat aktuální situaci. Mapa je navržena tak, aby vrstvy s proměnnými informacemi bylo možné v budoucnu aktualizovat.

U rozsáhlých kolektorů, kde je bilance v celé oblasti vzájemně provázána a nelze oblast smysluplně rozdělit, byl základní jednotkou HGR. Tam, kde jsou rozptýlené zdroje podzemní vody využívající kolektor přípovrchové zóny rozpukání hornin a kde nejvíce hrozí lokální přečerpání zdrojů podzemní vody, byla základním elementem povodí 4. řádu. Zvláště jsou bilancovány říční a potoční nivy, kde je zdrojem i infiltrace vody z vodních toků z rozsáhlých orografických povodí, pod které prostředí nivy spadá.

Celkový dlouhodobý průměrný odtok v ČR těsně koreluje s dlouhodobým průměrným úhrnem srážek. Z dlouhodobého průměrného úhrnu srážek lze proto průměrný celkový odtok poměrně přesně stanovit pro jakékoli místo v ČR. Vliv geologie na celkový odtok se ukazuje jako zanedbatelný.

Naproti tomu pro určení základního odtoku je již vliv geologie velmi zásadní a je nutné uvažovat rozdílné hodnoty BFI pro jednotlivé HGR (viz tab. 1). Poté byl průměrný základní odtok násoben indexem M – tedy poměrem základního odtoku v nejsušším roce za desetiletí 2010–2019 ku dlouhodobému průměru základního odtoku, který je stanoven pro všechny rajony (tab. 2). Tím byl získán

základní odtok v období sucha (přírodní zdroje podzemní vody v období sucha). Na základě vodohospodářské bilance se od základního odtoku v období sucha odečetly odběry podzemní vody a podle výsledného zbývajících odtoku byla kvantitativně určena zranitelnost přírodních zdrojů podzemní vody k suchu. Tento postup uvažuje i uvolňování vody ze statických zásob, protože odtok z oblastí s vyšší storativitou bývá více vyrovnaný, a tak odtok v obdobích sucha klesá méně.

K dispozici jsou rámcové informace o zdrojích podzemní vody z infiltrace, jež zatím nebyla v rozsahu ČR podchycena. Při výpočtech se stanovila i zranitelnost přírodních zdrojů podzemní vody v zastavěné části obcí s individuálním zásobováním podzemní vodou, a to podle počtu obyvatel a zastavěné plochy obce.

Mapa zranitelnosti podzemní vody k suchu je jednotně zpracovaným podkladem, který nepostihuje detaily a specifika konkrétních lokalit, jež nebylo možné ze současných dostupných podkladů určit. Měla by proto být používána jako informační dokument s vědomím, že je potřebná detailní studie upřesňující zdroje podzemní vody pro konkrétní lokalitu včetně nezbytných terénních měření.

V roce 2022 byl prezentován příspěvek *Bilance zdrojů podzemní vody a potřeb pro pitné účely v podmínkách klimatické změny* [17], který uvádí možný dopad klimatické změny na možnosti odběrů podzemní vody pro pitné účely k časové úrovni 2041–2060 a zpracování bilance množství podzemních vod současného stavu, resp. pro 3. cyklus plánů povodí, tedy na základě dat za období 2013–2018 (<https://www.vtei.cz/2022/10/bilance-zdroju-podzemni-vody-a-potreb-pro-pitne-ucely-v-podminkach-klimaticke-zmeny/>). Metodické řešení vychází z postupů vodohospodářské bilance a hodnocení kvantitativního stavu útvarů podzemních vod v souladu s vyhláškou č. 5/2011 Sb., ve znění pozdějších předpisů, s tím, že článek obsahuje tři kategorie – vyhovující, podmíněčně vyhovující a nevyhovující.

Při srovnání obr. 1 v dokumentu [17] s *Mapou zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* některé oblasti odpovídající HGR nebo jejich částem spadají do kategorie kritické až vysoké zranitelnosti horninového prostředí k suchu. Rozdílný metodický postup při hodnocení nivních sedimentů je patrný zejména u svrchních rajonů 1510 Kvartér Odry, 1622 Pliopleistocén Hornomoravského rajonu, 1623 Pliopleistocén Blaty a 1652 Kvartér soutokové oblasti Moravy a Dyje, jež oproti dokumentu [17] náleží k nízké zranitelnosti nivních sedimentů.

Uváděná metodika tvorby interaktivní *Mapy zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* ve srovnání s příspěvkem [17] nepoužívá metodiku hodnocení kvantitativního stavu útvarů podzemních vod a ani predikci množství přírodních zdrojů podzemní vody na území ČR. Vypočítává dlouhodobý základní odtok ze srážek za období 1991–2020, počítá s BFI v nejsušším roce za desetiletí 2010–2019, s povodími 4. řádu, zohledňuje odběry pro individuální zásobování v lokalitách, kde nejsou vodovody, a uvádí bilanci, resp. hodnoty zbývajících specifických přírodních zdrojů v l/s/km² v nejsušším roce pětiletého hydrologického sucha. Škála hodnocení má šest stupňů. Celkově lze konstatovat, že nově vytvořená *Mapa zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* poskytuje podrobnější hodnocení stávajícího stavu a konkrétní údaje o zbytkových přírodních zdrojích podzemní vody oproti dokumentu [17].

ZÁVĚRY

- *Mapa zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu* vychází z objektivních dostupných dat pozorovací sítě ČHMÚ, platných PRVKUK pro jednotlivé kraje k roku 2020, z databáze HEIS a evidence obyvatel.
- Zranitelnost přírodních zdrojů podzemní vody k suchu byla rozdělena do šesti kategorií. Nejzákladnější je kritická zranitelnost, která znamená dočasné přečerpávání zdrojů v období sucha, kdy dotace podzemní vody je nižší než v současnosti využívané množství podzemní vody v daném plošném elementu. Takovým územím by měla být věnována zvýšená

- pozornost. Kategorie velmi vysoké zranitelnosti a vysoké zranitelnosti vymezují oblasti s jen malými rezervami základního odtoku, kde mohou nastat problémy při prohlubování klimatické změny, resp. v období víceletého hydrologického sucha.
- Výše uvedená mapa ukazuje, že území nejvíce ohrožená suchem jsou zastavěné plochy obcí s individuálním zásobováním podzemní vodou, kde pod kritickou zranitelnost spadá 93 % těchto obcí a dalších 5 % pod velmi vysokou zranitelnost. U území niv je kritická zranitelnost jen u 3 % ploch a velmi vysoká u 13 % ploch. U území hydrogeologických rajonů a povodí 4. řádu dosahují oblasti kritické zranitelnosti 2 % ploch a vysoké zranitelnosti 5 % plochy ČR, a zasahují tedy zatím malou část ČR.
 - Mapa je navržena tak, aby vrstvy s proměnnými informacemi bylo možné v budoucnu aktualizovat.
 - Mapa poskytuje zásadní informace pro plánování v oblasti zásobování obyvatel pitnou vodou, cílení dotačních programů zajišťujících zdroje a dalších eliminačních opatření.
 - Tato mapa zranitelnosti je dostupná na www.suchovkrajine.cz/ zranitelnost-k-suchu, mapy průměrného základního odtoku a základního odtoku za sucha pak na: https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/

Poděkování

Článek vznikl na základě výzkumu prováděného v rámci projektu č. S501010208 „Řízená dotace podzemních vod jako nástroj k omezení dopadů sucha v ČR“ financovaného z Programu prostředí pro život Technologické agentury ČR. Za pomoc se zdroji dat děkujeme Ing. A. Vizinovi, Ph.D., a Ing. M. Zrzaveckému a za cenné připomínky k předběžné verzi Mapy zranitelnosti přírodních zdrojů podzemní vody k suchu a metodice děkujeme Ing. L. Kašpárkovi, CSc., RNDr. M. Milickému a RNDr. Z. Herrmannovi.

Literatura

[1] KILLE, K. Das verfahren MoMNO, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe den monatlichen Niedrigwasserabflüsse. Hannover: Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft. 1970, s. 89–95.

[2] KRÁSNÝ, J., KNĚŽEK, M., ŠUBOVÁ, A., DAŇKOVÁ, H., MATUŠKA, M., HANZEL, V. Odtok podzemní vody na území Československa. Praha: Český hydrometeorologický ústav, 1982.

[3] KLINER, K., KNĚŽEK, M. Metoda separace základního odtoku při využití pozorování hladiny podzemní vody. *Vodohospodářský čas.* 1974, 22(5), s. 457–466.

[4] ECKHARDT, K. A Comparison of Baseflow Indices, Which Were Calculated with Seven Different Baseflow Separation Methods. *Journal of Hydrology.* 2008, 352, s. 168–173.

[5] KAŠPÁREK, L., DATEL, J. V. et al. *Metodiky výpočtu přírodních zdrojů.* Česká geologická služba, 2015, s. 26.

[6] AKSOY, H., KURT, I., ERIS, E. Filtered Smoothed Minima Baseflow Separation Method. *Journal of Hydrology.* 2009, 372, s. 94–101.

[7] KŮRKOVÁ, I., BRUTHANS, J., BALÁK, F., SLAVÍK, M., SCHWEIGSTILOVÁ, J., BRUTHANSOVÁ, J., MIKUŠ, P., GRUNDLOCH, J. Factors Controlling Evolution of Karst Conduits in Sandy Limestone and Calcareous Sandstone (Turnov Area, Czech Republic). *Journal of Hydrology.* 2019, 574, s. 1 062–1 073.

[8] KAŠPÁREK, L., VLINAS, R., HANEL, M., PELÁKOVÁ, M. Vztahy mezi základním a celkovým odtokem z povodí v závislosti na hydrogeologickém typu horninového prostředí. *Vodní hospodářství.* 2017, 7, s. 5–11.

[9] BRUTHANS, J., KADLECOVÁ, R., SLAVÍK, M., KRÁLOVÁ, M., FRYČ, T., ČURDA, J. Příčina prudkého snížení průtoků některých vodních toků ve středních Čechách v létě 2019 a extrémně nízkých specifických odtoků: vliv evapotranspirace z přilehlé zóny toku a ploch s mělkou hladinou podzemní vody. *Geoscience Research Report.* 2020, 53.

[10] BRUTHANS, J., KADLECOVÁ, R., NOL, O., GRUNDLOCH, J. Vývoj základního odtoku v různých hydrogeologických strukturách v ČR za suchých a vlhkých období aneb jak nestavět na ovlivněných datech. In: *Sborník semináře Podzemní voda ve vodoprávním řízení XVI – ohlednutí za hydrologickým suchem.* ČSVTS, z. s., 2021. ISBN 978-80-02-02954-0.

[11] TOLASZ, R., DAŇHELKA, J., KINKOR, J., KODEŠ, V., KUBÁT, J., TRNKA, M., ŠTĚPÁNEK, P., ŽALUD, Z. et al. *Aktualizace Komplexní studie dopadů zranitelnosti a zdrojů rizik souvisejících se změnou klimatu v ČR z roku 2015.* [Praha]: Český hydrometeorologický ústav, 2019. 379 s.

[12] FUKSA, J. K. Sucho a vliv čistění odpadních vod na řeky. *Vodní hospodářství.* 2020, 70(4), s. 4–7.

[13] KAŠPÁREK, L., DATEL, J. V. et al. *Rebilance zásob podzemních vod: Základní výchozí data pro zjednodušené stanovení velikosti přírodních zdrojů podzemní vody v 55 hydrogeologických rajonech.* Praha: VÚV TGM, 2014. 33 s.

[14] KAŠPÁREK, L., DATEL, J. V. *Rebilance zásob podzemních vod: metodiky stanovení průměrné hodnoty přírodních zdrojů podzemních vod kvartérních hydrogeologických rajonů.* Praha: VÚV TGM, 2013. 21 s.

[15] BRUTHANS, J., SOUKUP, J. *Vyhodnocení některých parametrů, návrh úprav regionalizace základního odtoku a poznámky k metodice stanovení přírodních zdrojů.* Česká geologická služba, 2011.

[16] KAŠPÁREK, L., KOŽÍN, R., DATEL, J. V., PELÁKOVÁ, M. Odhad přírodních zdrojů podzemní vody v hydrogeologických rajonech v České republice v měnících se klimatických poměrech 1981–2019. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace.* 2022, 64(5), s. 4–13.

[17] PRCHALOVÁ, H., VYSKOČ, P., VIZINA, A., NOVÁKOVÁ, H. Bilance zdrojů podzemní vody a potřeb pro pitné účely v podmínkách klimatické změny. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace.* 2022, 64(5), s. 22–31.

Autoři

Doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.^{1,2}
✉ jiri.bruthans@natur.cuni.cz
ORCID: 0000-0002-4749-0583

Mgr. Jiří Grundloch¹
✉ jiri.grundloch@geology.cz

RNDr. Renáta Kadlecová¹
✉ renata.kadlecova@geology.cz
ORCID: 0009-0003-8986-1455

Mgr. Tuna Karatas²
✉ tuna.karatas@natur.cuni.cz
ORCID: 0000-0002-4046-119X

Mgr. Kateřina Šabatová^{1,2}
✉ katerina.sabatova@geology.cz

Ing. Radek Vlnas³
✉ radek.vlnas@chmi.cz
ORCID: 0009-0008-1196-6261

¹Česká geologická služba, Praha
²Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užitá geofyziky
³Český hydrometeorologický ústav, Praha

Příspěvek prošel recenzním řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2024.07.002

ISSN 0322-8916 © 2024 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

METHODOLOGY FOR CREATING MAPS OF THE VULNERABILITY OF THE QUANTITY OF NATURAL GROUNDWATER RESOURCES TO DROUGHT FOR THE CZECH REPUBLIC

JÍŘÍ BRUTHANS, J.^{1,2}; GRUNDLOCH, J.¹; KADLECOVÁ, R.¹;
KARATAS, T.²; ŠABATOVÁ, K.^{1,2}; VLNAS, R.³

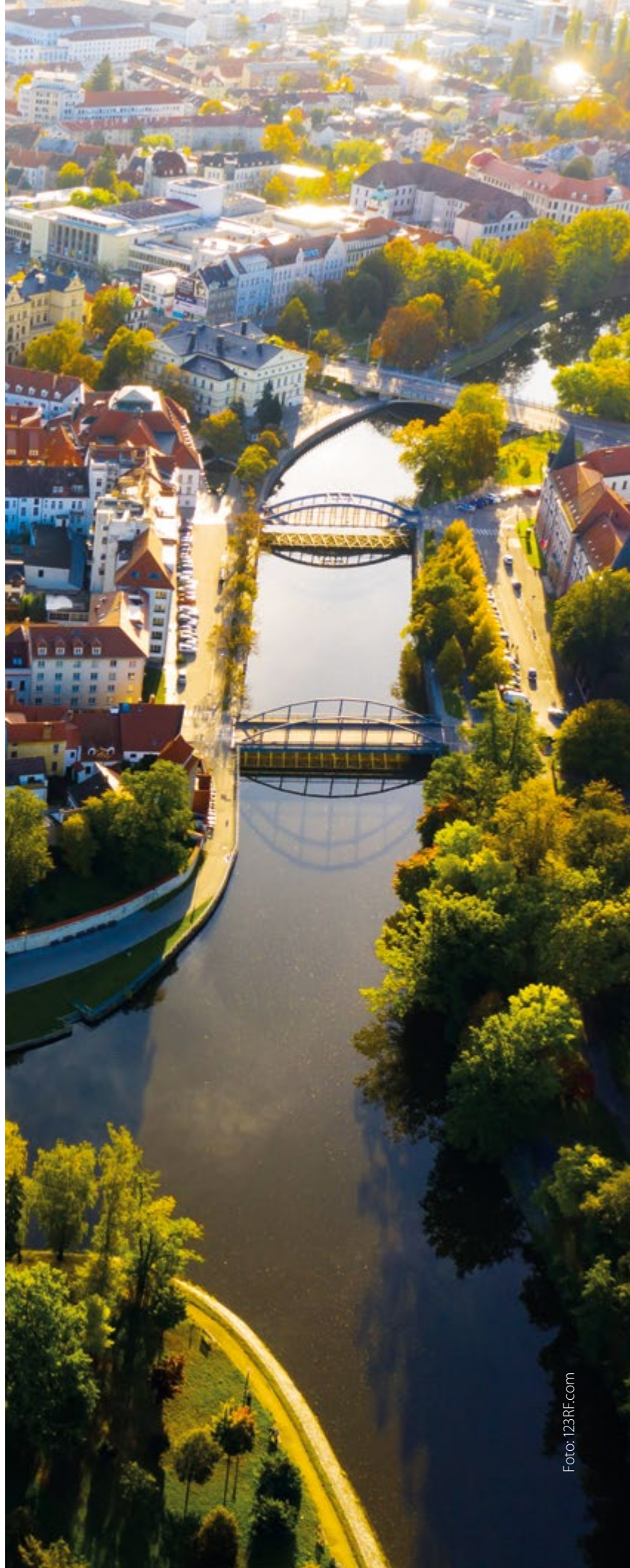
Keywords: groundwater — drought — vulnerability —
groundwater resources — expert map

¹Czech Geological Survey, Prague

²Charles University, Faculty of Science, Geology, Institute of Hydrogeology,
Engineering Geology and Applied Geophysics, Prague

³Czech Hydrometeorological Institute, Prague

The expert interactive *Map of the vulnerability of the quantity of natural groundwater resources to drought for the territory of the Czech Republic* was created as part of the TA CR project No SS01010208 "Controlled Groundwater Recharge as a Tool to Reduce the Impacts of Drought in the Czech Republic." Groundwater drought is still mostly understood as a subset of hydrological drought. The causes, course and appropriate adaptation measures to hydrogeological drought are different. The presented vulnerability map is created on the basis of the use of precipitation normal and regression relationships between precipitation and total and base runoff using the base flow index (BFI) and ratio of BFI in the driest year for the decade 2010–2019 to the long-term average of BFI (M) indices, which guarantees uniform processing for the entire Czech Republic at a scale of 1 : 50,000 and an objective comparison of the vulnerability of natural groundwater resources to drought throughout the country. It is also based on recorded groundwater abstraction and in the case of municipalities with individual supply, the abstraction is calculated from the number of inhabitants and the national average consumption of drinking water per capita. It contains six categories and shows which regions and areas will struggle to have sufficient groundwater resources during periods of prolonged drought. It synthesizes all available regime and other data for 2020 and is designed so that the layers with variable information can be updated in the future. This map is available at www.suchovkrajine.cz/zranitelnost-k-suchu and enables the preparation, design and implementation of measures that will ensure sufficient water resources, especially of drinking water, for the population even in periods of long-term drought. It shows where it is appropriate to direct potential subsidy programs. The following text describes in detail the methodology of creating this map.





Autoři VTEI

Doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D.

PřF UK v Praze

✉ jiri.bruthans@natur.cuni.cz

www.natur.cuni.cz



Doc. RNDr. Jiří Bruthans, Ph.D., je od roku 2004 vysokoškolským učitelem v Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy a od roku 2010 pracuje též na částečný úvazek jako specialista hydrogeolog v České geologické službě. V roce 1999 ukončil na PřF UK magisterské studium, v roce 2006 doktorské studium a v roce 2016 se habilitoval. Profesně se zabývá hydrogeologií (environmentální stopovače, stopovací zkoušky, krasová hydrogeologie, regionální hydrogeologie, základní odtok, dynamické zdroje podzemní vody) a interakcemi procesů v exogenní geologii (faktory ovlivňující erozi, zvětrání, vznik porozity atd.). Jako hlavní řešitel nebo člen řešitelského týmu se podílel a podílí na řešení řady výzkumných projektů.

Mgr. Barbora Krijt

VÚV TGM, v. v. i., Praha

✉ barbora.krijt@vuv.cz

www.vuv.cz



Mgr. Barbora Krijt je od roku 2014 zaměstnankyní VÚV TGM, v. v. i., na Oddělení hydrauliky jako výzkumný pracovník. Vystudovala Přírodovědeckou fakultu Univerzity Karlovy v Praze. V roce 2010 dokončila bakalářský obor Geologie a v roce 2013 magisterský obor Aplikovaná geologie se zaměřením na hydrogeologii. Nyní je studentkou doktorského oboru Hydrogeologie. Zaměřuje se na řešení hydrogeologické a hydrologické problematiky a jejich interakce pomocí numerických modelů proudění vody a transportu látek.

Mgr. Jakub Mareš

PřF UK v Praze

✉ maresj15@natur.cuni.cz

www.ag.natur.cuni.cz



Jakub Mareš je zaměstnancem Ústavu hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy. Vystudoval obor Aplikovaná geologie – specializace Hydrogeologie na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy. Na stejné fakultě studuje doktorský studijní program Aplikovaná geologie. Profesně se zabývá zejména hydrogeologií krasových oblastí a zvětráváním. Jako hlavní řešitel nebo člen řešitelského týmu se podílí či podílel na řešení několika výzkumných projektů.

Ing. Martina Peláková

VÚV TGM, v. v. i., Praha

✉ martina.pelakova@vuv.cz

www.vuv.cz



Ing. Martina Peláková vystudovala obor Krajinné inženýrství na České zemědělské univerzitě v Praze. Od roku 2002 pracuje ve VÚV TGM, v. v. i., kde se hned na počátku svého působení začala zabývat vyhodnocením kulminačních průtoků v nepozorovaných profilech malých a středních vodních toků při povodni v srpnu 2002. Dále se věnovala vlivu klimatické změny na vodní toky a možnostem kompenzace vlivu klimatické změny vodními nádržemi (tzv. lokalitami pro akumulaci povrchových vod). Podílela se na hydrologické části projektu „*Rebalance zásob podzemních vod*“. Po schválení novely vodního zákona v roce 2020 se věnuje plánům pro zvládání sucha a stavu nedostatku vody. Zpracovává také hydrologické studie vodních toků a nádrží na různých místech ČR.



Zambie, vyschlé rameno řeky Luangwa
na hranicích s Malawi, 2022

Rozhovor s doc. RNDr. Zbyňkem Hrkalem, CSc., hydrogeologem, spisovatelem a popularizátorem hospodaření s vodou

Říjnové číslo časopisu VTEI je zaměřeno zejména na podzemní vodu a hospodaření s ní. Propagaci tohoto tématu jsme tedy probrali s kolegou, který se věnuje výzkumu v oblasti podzemních vod, dlouhodobě přednáší hydrogeologii na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze a tématem hospodaření s vodou se zabývá i ve svých publikacích. „Hlavním problémem ve světě není fyzický nedostatek vody, nýbrž chudoba, nevzdělanost a ekonomická zaostalost,“ říká doc. RNDr. Zbyněk Hrkál, CSc.

Pane docente, dlouhodobě se věnujete popularizaci hydrogeologie a hospodaření s vodou. Proč právě této problematice?

Začnu trochu oklikou. Již od roku 1928 se používá aforismus „publish, or perish“, což lze přeložit tak trochu pateticky – publikuj, nebo zemři. Mimo jiné i z tohoto důvodu se v poslední době vyvíjí na vědce stále větší tlak na publikování výsledků jejich výzkumů. Množství a především kvalita článků se stává nejen kritériem kvality jejich práce, ale i odborné úrovně instituce, kde pracují.

Uvedu jeden klasický příklad. Roberta Kocha, německého lékaře a mikrobiologa, nositele Nobelovy ceny za fyziologii a lékařství, zná ve světě snad každý. Byl to přece on, kdo objevil bakterii cholery. Ona to však není úplně pravda. Koch skutečně jako první publikoval výsledky původu této smrtonosné bakterie a získal tak nehynoucí slávu. Jenže již roku 1854, 30 let před ním, izoloval původce cholery – *Vibrio cholerae* – italský anatom Filippo Pacini. Ten ale se svým objevem zůstal v laboratoři a zemřel v chudobě a zapomenutí. Určité satisfakce se mu dostalo až v nedávné době.

Z toho lze odvodit významný závěr: vědecký pracovník, který si své výsledky, byť možná geniální, nechává tzv. v šuplíku, je pro pracoviště, ale i celkově pro společnost takřka k ničemu.

To však mluvíte o odborných publikacích, já měl spíše na mysli ty populárně-vědecké, určené nejširší čtenářské obci. Je to náročné, posunout se z odborné pozice výzkumníka na úroveň srozumitelnou pro běžného laika?

Ne každý špičkový odborník – a nyní mluvím obecně, nezáleží na oboru – je schopen své výsledky podat srozumitelně. Může mít na svém seznamu desítky publikací v nejprestižnějších odborných časopisech, ale když má zprostředkovat výsledky své práce běžným lidem, nikdo mu nerozumí. Najít kompromis mezi odborným jazykem a vyjádřením srozumitelným pro laika je nesmírně těžké. Nesmí totiž dojít k tzv. vulgarizaci odborného textu, čehož jsme bohužel v našich médiích velmi často svědky. Novináři si přečtou odborný článek, a aniž mu porozumí, převedou ho podle svého názoru do tzv. lidového jazyka. Výsledek je pro čtenáře „zabalen“ do atraktivní grafické podoby a populární článek dostane i provokativní název. Výsledek je odstrašujícím případem toho, jak by se mělo pracovat s odbornou literaturou. Jenže špatný je i opačný příklad, kdy se pera ujme věhlasný odborník, jenž své čtenáře zavalí smrtí odborných, často zcela zbytečných termínů. Výsledek je sice odlišný od prvního zmiňovaného případu, ale efekt má podobný. Dokázat psát odborný text, aby byl nejen srozumitelný, ale především čtivý a zajímavý pro laika neznalého daného oboru, je nesmírně náročné. S trochou nadsázky bych řekl, že jde o samostatnou, naprosto specifickou literární

disciplínu. O to náročnější je to v případě hydrogeologie, protože předmět našeho výzkumu, podzemní voda, není – až na vzácné výjimky – vidět.

Ale vy se jí již řadu let věnujete...

Zatím mi vyšlo deset knih, přičemž ty nejčtenější jsou právě z kategorie vědecko-populární. V nich se snažím vyvracet řadu zažitých mýtů, které novináři neustále oživují, jako například strašení populace, že na planetě dojde voda. Někdy mi připadá, že je to boj s větrnými mlýny. Mohu donekonečna zdůrazňovat, že voda na Zemi nikdy nedojde, jen se nám přemístí z jednoho kouta na druhý, případně změni své skupenství. Druhý den si ale otevřu noviny a čtu opět titulek s podobným katastrofickým názvem.

Proto mě popularizace výsledků naší vědecké práce baví a naplňuje. Z ohlasů čtenářů svých knih i posluchačů mediálních vystoupení vidím, že moje myšlenky dopadají na úrodnou půdu. Za tři knihy jsem již dostal různé prestižní literární ceny, všechny se dobře prodávají a jejich dramatizace z úst mistra svého oboru herce Tomáše Töpfera měly v pořadu Meteor v Českém rozhlase sledovanost přes 200 000 posluchačů.

Na čem nyní pracujete?

Co se týče mé popularizační činnosti, dosavadním vrcholem je asi filmový projekt *Water Stories*. Podle svých knih jsem sepsal scénář filmového dokumentu, který prezentuje vodu jako jeden z nejvýznamnějších fenoménů formujících lidskou civilizaci. Realizace filmu se ujalo studio Twinstars filmaře Steva Lichtaga, který se světově proslavil svými dokumenty o mořském životě. Velkoryse koncipovaný filmový dokument *Water Stories* zavede diváka v osmi dílech do různých koutů planety (Čína, Sahara, Nepál, Dubaj, Izrael...). Průvodcem seriálu bude ambasádorka programu OSN Cíle udržitelného rozvoje Tatána Kuchařová. Generálním partnerem filmu se stal National Geographic, který bude film i distribuovat ve své síti.



Namibie, s ženami kmene Herero, 2017

Z čeho vycházíte, jaká byla vaše profesní dráha?

Svou odbornou kariéru jsem začínal v tehdejším Ústředním ústavu geologickém v Praze. Pak jsem odešel do Francie, kde jsem po dva roky působil ve společnosti BRGM v Orléans a později ve firmě ANTEA. Po návratu do Čech jsem začal pracovat na své alma mater, Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy, a učit tam hydrogeologii a problematiku vodního hospodářství. Pedagogická činnost mi však nebránila účasti na zahraničních projektech, pro svého bývalého francouzského zaměstnavatele jsem vedl projekty v Kazachstánu a na Sibiři, pracovně jsem navštívil Indii, Nepál, Kyrgyzstán, Izrael a řadu dalších, převážně rozvojových zemí. Na Karlově univerzitě jsem dodnes, nicméně hlavní úvazek mám v současnosti ve Výzkumném ústavu vodohospodářském.

Z jakých dalších zemí bychom si v rámci hospodaření s vodou mohli brát příklad?

Jednoznačně bychom se měli nechat inspirovat Izraelem. Obdivuhodná je rychlost vyvíjení nových vodohospodářských technologií a jejich zavádění do praxe. Díky nim se Izrael stal prvním státem na planetě, který přestal být závislý na atmosférických srážkách. I kdyby hypoteticky přestalo pršet, Izraelci dokážou s vodou neuvěřitelně šetřit, vodu umějí téměř donekonečna recyklovat a v krajním případě si ji levně vyrobí z nevyčerpatelného zdroje, kterým je moře. Když tedy mám v Čechách na návštěvě své izraelské kolegy a hovořím o našich problémech se suchem, většinou se shovívavě usmívají. Izrael demonstruje mou dlouhodobě prezentovanou myšlenku, že všechny otázky spojené s nedostatkem vody jsou v současné době technicky řešitelné. Tím hlavním problémem není fyzický nedostatek vody, ale chudoba, nevzdělanost a ekonomická zaostalost.

Co téma umělé a břehové infiltrace, kterému se dlouhodobě věnujete?

To je jedno z témat, jež přesně souvisí s předchozí otázkou. Jedná se o technologii, která simuluje a intenzifikuje přírodní proces přeměny povrchové vody v kvalitnější vodu podzemní. Již na počátku dvacátého století jsme byli celosvětovými průkopníky tohoto vodárenského procesu v oblasti Káraného. V roce 1968 jsme původní proces břehového zasakování doplnili o dnes dokonale fungující systém umělé infiltrace. Tehdy bylo naše vodní hospodářství na světové špičce v tomto oboru. Od té doby však vznikají jen opakující se přípravné studie, ale k realizaci podobného projektu zatím nedošlo.

Zabýváte se i studiem výskytu mikropolutantů v podzemních vodách, jakými jsou například léčiva a mikroplasty. Jaké jsou poslední poznatky v tomto směru?

Je to pravda, problematika přítomnosti farmak a v poslední době i mikroplastů především v pitných vodách se v poslední době stala mou hlavní aktivitou. Je to po dlouhé době skutečná nová vodohospodářská výzva, protože díky skokovému rozvoji analytické chemie se před námi otevřely dveře do zcela neznámého světa. Před několika lety jsme neměli ani tušení, že ve vodním prostředí se mohou vyskytovat specifické látky v koncentracích desítek nanogramů na litr, což při hrubém přirovnání představuje kapku v plaveckém bazénu. Nyní již víme o desítkách léčiv, jež jsou zcela běžně přítomny ve všech evropských řekách a představují jakési „přirozené“ pozadí. Tyto látky pronikají do podzemních vod a nacházíme je i ve vodách pitných. Problém spočívá v tom, že se jedná o otázku interdisciplinární. Vodohospodář může detailně popsat chování těchto látek ve vodním i horninovém prostředí, charakterizovat jejich přeměny v dceřiné produkty, ale nakonec vždy naráží na limity vlastních znalostí. Položí si otázku, na kterou neumí odpovědět. Ta zní: jsou koncentrace látek, jež jsem tak detailně popsal, nebezpečné pro lidské zdraví? Máme k dispozici stovky

vědeckých studií o negativních dopadech na rybí populace a na vodu vázané ekosystémy. O tom, jak tyto specifické mikropolutanty působí na lidský organismus, však dosud víme jen pramálo.

Kde vidíte budoucnost svého oboru?

Jednoznačně v interdisciplinaritě. Máme před sebou řadu otázek, v mnoha případech velmi zásadního charakteru, jejichž řešení si bude vyžadovat změnu zážitých vědeckých postupů. Bude nezbytné propojovat vědní disciplíny, jejichž spolupráce byla až do nedávna považována za absurdní. Vědec bude muset dosažené výsledky řadit do co nejširšího kontextu, a to včetně často opomíjeného ekonomického. Osobně jsem přesvědčen, že zcela nový svět se před námi může otevřít například propojením medicíny a hydrogeologie. Jako inspiraci mohu zmínit studie z Japonska a USA, kde spolupráce mezi hydrogeology a lékaři prokázala statisticky významný dopad zvýšených obsahů lithia v pitných vodách na snížení zločinnosti. Tento kov, běžně používaný v psychiatrické praxi, totiž snižuje agresivitu. Můžeme navázat na dlouhodobě úspěšnou spolupráci s lékaři v oblasti minerálních vod. Ovšem v problematice mikropolutantů se podle mého názoru skrývá spousta objevů, které mohou posunout lidské znalosti možná až nečekaným směrem.

Pane docente, srdečně vám děkuji za rozhovor.

Mgr. Pavel Eckhardt

Doc. RNDr. Zbyněk Hrkal, CSc.

Doc. RNDr. Zbyněk Hrkal, CSc., narozen 1. března 1957 v Praze, vystudoval obor hydrogeologie na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze a frankofonní kulturu na Pedagogické fakultě Univerzity Karlovy. Po absolutoriu v roce 1981 nastoupil do Ústředního ústavu geologického v Praze, kde se zabýval hydrogeologickou problematikou úložišť jaderného odpadu.



V roce 1991 odešel do Francie, kde pracoval nejprve ve francouzské geologické službě BRGM se sídlem v Orléans a později v její privatizované filiálce, firmě ANTEA. Hlavním cílem jeho práce byla aplikace GIS při řešení hydrogeologických problémů.

Po návratu v roce 1992 nastoupil jako pedagog a vědecký pracovník na katedru hydrogeologie Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze, kde se v roce 2003 habilitoval. Paralelně s akademickým působením pokračoval ve spolupráci s firmou ANTEA na zahraničních zakázkách, ekologických auditech na řece Irtyš v Kazachstánu v oblasti Ústí Kamenogorskú a Semipalatinskú a později i v Rusku v okolí Omsku. V dalších letech vedl projekty zaměřené na problematiku minerálních vod Borjomi v Gruzii a pro mezinárodní skupinu IDS na Ukrajině. V rámci projektů rozvojové pomoci působil v Nepálu, Indii, Saudské Arábii, na palestinském území na Západním břehu Jordánu a v dalších zemích.

V roce 2003 přešel jako vědecký pracovník do Výzkumného ústavu vodohospodářského, kde vedl oddělení hydrogeologie. Svou pedagogickou aktivitu na Karlově univerzitě, ale i na francouzských univerzitách, si však zachoval dodnes. Profesionálně se dlouhodobě zaměřuje na dvě oblasti – problematiku umělé infiltrace a otázky mikropolutantů v povrchových a podzemních vodách, především pak léčiv a mikroplastů. V tomto kontextu vedl řadu domácích (TA ČR), ale i zahraničních projektů (Horizon a Interreg).





Projekt „*Danube Lighthouse Initiative*“

Dostupná a kvalitní voda je přírodním zdrojem nezbytným pro život, blahobyt a sociální prosperitu. Po desetiletích intenzivního využívání, znečišťování a socioekonomického tlaku jsou evropské sladké vody a moře vystaveny riziku degradace svých ekosystémů. To je třeba vnímat nejen jako potenciální dramatickou ztrátu z ekonomického hlediska, ale znamená to také nepředvídatelné ekologické, společenské a kulturní škody.

Evropská komise na tuto výzvu reagovala vytvořením výzkumné a inovační mise „*Obnova našich oceánů, moří a vod do roku 2030*“ s cílem poskytnout k obnově, ochraně a zachování oceánů, moří a sladkých vod systémový přístup. V letech 2022–2025 probíhá vývojová a pilotní fáze, během níž byly spuštěny čtyři tzv. *Lighthouse iniciativy*. Projekt „*Danube Lighthouse Initiative*“ (zkráceně „*DALIA*“), financovaný Evropskou unií v rámci programu *Horizon Europe* s celkovou dotací € 8 499 236, má za cíl významnou měrou přispět ke zlepšení stavu povodí Dunaje. Povodí, kde žije téměř 80 milionů lidí, se rozkládá na území 19 evropských zemí, což je výjimečné i ve světovém měřítku.

Konsorcium projektu vede maďarské Generální ředitelství OVF pro vodní hospodářství a skládá se z 22 členských institucí celkem z devíti evropských zemí (z toho osm je z EU). Konsorcium vyvíjí integrovaný nástroj ke zlepšení rozhodovacích mechanismů a k efektivnější obnově sladkovodních a přechodových ekosystémů v povodí Dunaje. Zapojuje se rovněž do spolupráce se širší sítí

souvisejících misí a projektů národních i financovaných EU. V rámci pracovních balíčků se věnuje celkem devíti pilotním lokalitám odrážejícím rozličné problémy Dunaje a jeho přítoků. Jde např. o znečištění vnosem mikropolutantů, komunálního odpadu, změnou přirozených fyzikálních parametrů toku (např. teploty), nebo o udržení minimálního zůstatkového průtoku.

Integrovaný webový nástroj bude těžit ze znalostí a zkušeností přenesených z jednotlivých pilotních lokalit, rozmístěných podél toku až po deltu na hranici Rumunska a Ukrajiny. V této oblasti, biosférické rezervaci UNESCO, je výzkum orientován na transport a akumulaci sedimentu a na redukcí vnosu komunálního odpadu, zejména plastů. S podobným problémem se potýká také pilotní oblast na řece Bodrog v Maďarsku, kde se ke kontaminaci mikro- i makroplasty přidává rovněž dědictví v podobě toxické zátěže z dřívější důlní činnosti.

Na Slovensku je hydrologie Dunaje ovlivněna postupy hospodaření s dešťovou vodou ve venkovských oblastech. Podceňovaný dopad eroze vede k redukcí vodních zdrojů v horních partiích. Vysychání pramenišť a drobných vodních toků během opakujícího se dlouhotrvajícího sucha ovlivňuje celkové průtoky řek v oblasti.

V dolní části Dunaje je v popředí zájmu říční konektivita umožňující migraci jeseterů. V rámci projektu bude navržena strategie, která pomůže jeseterům projít proti proudu Železných vrat I a II. To zahrnuje speciální řešení pro každou



vodní elektrárnu a sledování pohybu a chování jeseterů s pomocí ultrazvuku. Monitorování bude prováděno třemi pevně umístěnými branami a loděmi na více než 700 říčních kilometrech.

Další demonstrační oblast na levém břehu Dunaje zahrnuje přírodní park Begečka Jama a odvodňovací systém Begeč-Gložan. Znečišťující látky ze zemědělství a odpadních vod ohrožují stabilitu místního ekosystému. Pro sekundární čištění odpadních vod se zde používá vybudovaný mokřadní systém, který funguje jako biofiltr k odstranění znečišťujících látek a patogenů. To spolu s pečlivým monitorováním má za cíl zlepšit environmentální zdraví oblasti.

Řešitelský tým oddělení hydrologie (Ing. Adam Vizina, Ph.D., Ing. Adam Beran, Ph.D., a Ing. Petr Pavlík) se na projektu podílí zejména výzkumem v pilotním povodí Dyje se zvláštním důrazem na lokalitu Soutok. Na tomto území v současné době probíhá komplexní revitalizační opatření *Obnova přirozeného vodního režimu revitalizační soustavy v EVL Soutok-Podluží*, jehož záměrem je zlepšení vodního režimu v EVL Soutok-Podluží. Zahrnuje celkem 14 zásahů, z nichž rozsahem nejvýznamnější je stavba příčného objektu – klapkového jezu, který umožní podstatné navýšení odpuštěného množství vody do lužního lesa prostřednictvím stávajících nápuštných objektů. Pilotní lokalita je v kontextu navržených úprav studována a hodnocen je její charakter i s výhledem na simulované scénáře klimatické změny.

Tým v rámci projektu vyvíjí robustní on-line nástroj pro výpočet a srovnání minimálního zůstatkového průtoku – MEFC – a podílí se na úlohách hydrologického modelování v kontextu scénářů vývoje budoucího klimatu. Rovněž koordinuje vznik souhrnné zprávy o realizovaných technických opatřeních v pilotních lokalitách a propojuje činnosti souvisejících projektů.

V době vzniku článku (červen 2024) probíhala soutěž – výzva *DALIA Rivers Revived*. Šlo o otevřenou výzvu pro přidružené regiony v rámci projektu „Dunajský region Water Lighthouse Action“. Podrobné informace o projektu lze nalézt na stránkách <https://dalia-danube.eu/>.

Autoři

Ing. Petr Pavlík
✉ petr.pavlik@vuv.cz

Ing. Adam Vizina, Ph.D.
✉ adam.vizina@vuv.cz

Ing. Adam Beran, Ph.D.
✉ adam.beran@vuv.cz

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

Informativní článek, který nepodléhá recenznímu řízení.

ISSN 0322-8916 © 2024 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněn šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0

Hydrogeologické aspekty vrtů pro tepelná čerpadla

V posledních letech došlo k významným legislativním a metodickým změnám ve výstavbě a využívání zemních tepelných čerpadel (TČ). Použití TČ se stalo velmi rozšířeným řešením pro vytápění objektů všech druhů od rodinných domů po průmyslové objekty. Tento příspěvek se týká zemních TČ (typ země-voda a voda-voda), jež využívají mělkou geotermální energii, získávanou zejména prostřednictvím vrtů.

TČ odnímá teplo z geologického prostředí (z hornin nebo podzemní vody) a převádí ho na vyšší teplotní hladinu použitelnou pro vytápění a ohřev teplé vody. Primární okruh TČ typu země-voda tvoří nejčastěji vrt, může se však jednat i o plošné kolektory uložené mělce pod terénem (nebo jiná řešení); v případě TČ typu voda-voda jde pak o soustavu odběrné a vsakovací studny (jedné nebo více).

Metodický pokyn Ministerstva pro místní rozvoj

Roku 2023 byl zákonem č. 19/2023 Sb., změněn energetický zákon č. 458/2000 Sb. Výsledkem těchto změn je mj. významné zjednodušení a zrychlení procesu povolování zemních TČ typu země-voda. V červenci 2023 vyšel metodický pokyn Ministerstva pro místní rozvoj (MMR) s názvem *Umístění, povolení a užívání tepelných čerpadel* [1].

Podle tohoto pokynu vrt pro systém země-voda nenaplnňuje definici stavby podle stavebního zákona č. 283/2021 Sb., vrty tedy podle tohoto zákona nevyžadují žádné povolení. Samotné TČ je považováno za výrobek a jeho instalace není předmětem územního ani stavebního řízení.

Jelikož realizace těchto vrtů (s průměrnou hloubkou 100–200 m) znamená nemalé riziko pro ovlivnění přirozených poměrů podzemní vody v území (takto hluboký vrt obvykle prochází přes několik zvodnělých kolektorů) a těchto vrtů se každoročně realizuje velké množství po celé ČR, je z hydrogeologického hlediska velmi problematické, aby tyto vrty nepodléhaly žádnému schvalovacímu a dokumentačnímu procesu.

K realizaci těchto – většinou hlubokých – vrtů je však stále třeba povolení podle vodního zákona, tedy získání souhlasu příslušného vodoprávního úřadu dle § 17, odst. 1, písmeno g), vodního zákona č. 254/2001 Sb. Hlavním podkladem pro ně je odborné vyjádření držitele osvědčení odborné způsobilosti pro hydrogeologii (zákon č. 62/1988 Sb.) [2] a stanovisko správce povodí. V současné době je vodoprávní úřad jediným orgánem, který se vyjadřuje k záměru vrtu pro TČ typu země-voda. Jeho úloha při ochraně přirozených vodních poměrů v území je tedy naprosto klíčová.

Nová příručka Ministerstva životního prostředí a České asociace hydrogeologů

V reakci na tuto novou situaci byla ve spolupráci Ministerstva životního prostředí a České asociace hydrogeologů (ČAH) vydána *Příručka pro projektování, povolování a realizaci vrtů pro tepelná čerpadla systémů „země x voda“ a „voda x voda“* [3], jež má napomoci ke kvalitnějšímu navrhování, projektování a realizaci vrtů pro TČ. Materiál je určen pro vodoprávní, stavební a další úřady posuzující a povolující tyto vrty a dále pro realizační a průzkumné firmy.

Problematickou se podrobně zabývají i Semíková et al. [4], tato starší metodika však odráží tehdejší legislativní stav.

Příručka MŽP a ČAH má dvě základní části:

- projektování, povolování a realizace vrtů pro TČ typu země-voda,
- projektování, povolování a realizace jímacích a vsakovacích objektů pro TČ typu voda-voda.

Obě části rozebírají problematiku projektování a umísťování vrtů, jejich konstrukční parametry a specifické podmínky jejich provádění, postup povolování vrtů a rizika pro útvary povrchových a podzemních vod i způsoby prevence těchto rizik. Příručka se vyjadřuje také k otázkám posuzování vlivu těchto záměrů na životní prostředí podle zákona č. 100/2001 Sb. (EIA).

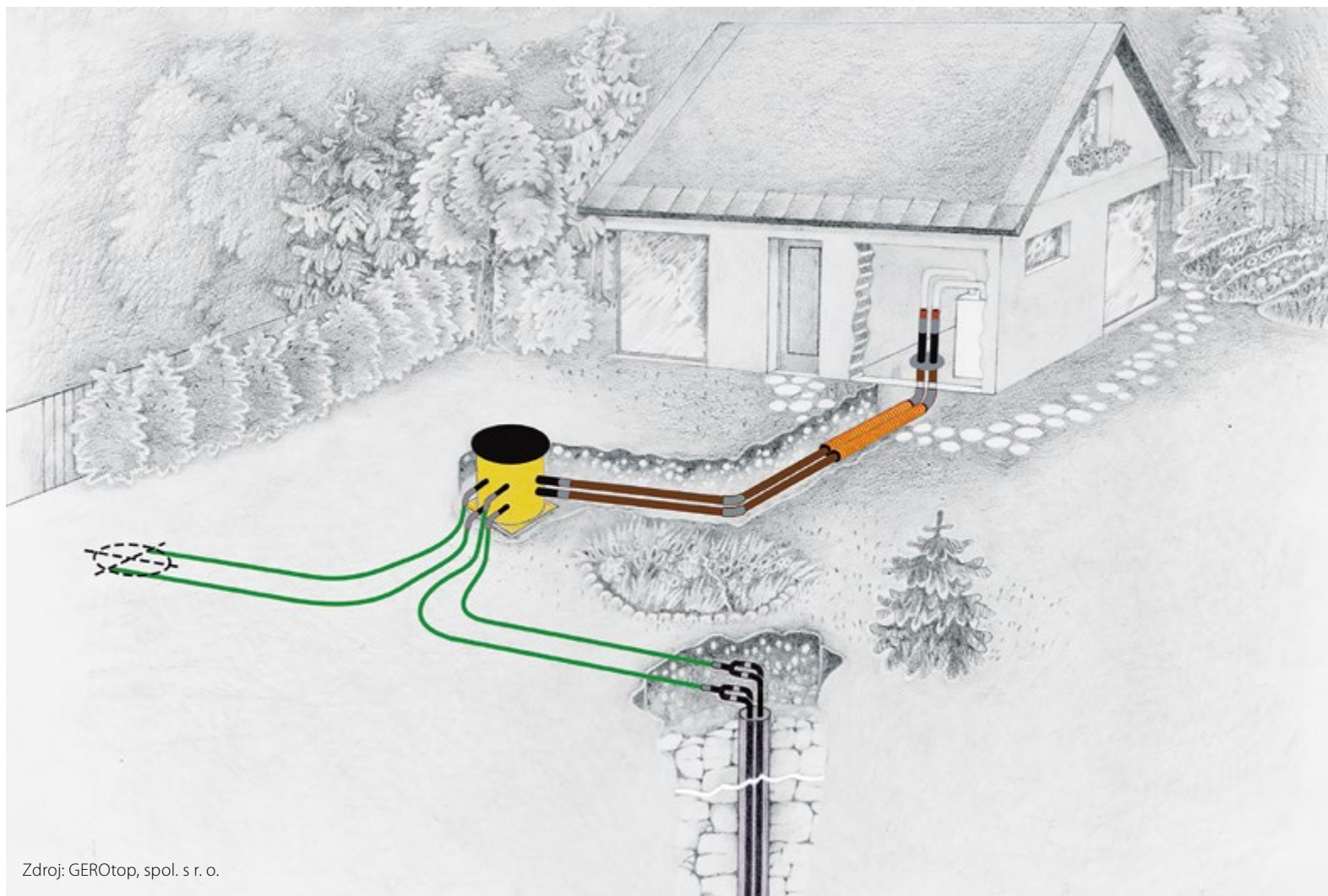
Tepelná čerpadla typu země-voda

Riziko vrtů realizovaných pro TČ typu země-voda spočívá především v nebezpečí narušení přirozené hydrogeologické stratifikace horninového prostředí, tj. v propojování několika zvodnělých kolektorů, které jsou často využívány jako zdroje vody pro lidskou potřebu. Jejich nesprávným provedením tedy hrozí riziko zmenšení přírodních zdrojů podzemní vody a dopady na okolní jímací objekty hromadného i individuálního zásobování. Zásadním požadavkem je proto odborné posouzení vlivu vrtů na vodní režim území (viz přílohy č. 7 a č. 11 vyhlášky č. 183/2021 Sb.). Doporučuje se vyhotovení hydrogeologického řezu územím s vyznačením zvodnělých kolektorů a izolátorů a dále návrh takových parametrů těsnění vrtného stvolu, aby byly vrty pro TČ ke svému okolí pokud možno intaktní a především nepropojovaly přirozeně oddělené zvodně. K tomu v praxi často dochází, ať už nevhodně navrženou konstrukcí vrtů, nebo nekvalitním provedením těsnící konstrukce vrtu. Problémem bývá často nedostatečný vrtný průměr, kdy smyčky vertikální sondy primárního okruhu vyplní vrtný otvor a zůstane nedostatečný prostor pro funkční tlakové těsnění stvolu vrtu.

Tepelná čerpadla typu voda-voda

Druhá část příručky se týká zemních TČ typu voda-voda, jejichž podstatou je odběr podzemní vody, odebrání jejího tepla a navrácení ochlazené vody zpět do horninového prostředí. Systém se tedy obvykle skládá z odběrné a vsakovací studny (vrtané či kopané). U tohoto řešení nedošlo k žádným zásadním změnám, studny či vrty jsou vodní díla a jsou budovány v rámci stavebního zákona č. 283/2021 Sb., jako tzv. ostatní stavby. Odběr a vsakování vody je nakládáním s podzemní vodou, jež povoluje příslušný vodoprávní úřad na základě vyjádření osoby s odbornou způsobilostí v hydrogeologii (§ 9, odst. 1 vodního zákona), stanoviska správce povodí a dalších podkladů.

Při realizaci studní lze postupovat i přes mezistupeň průzkumných hydrogeologických vrtů podle zákona č. 62/1988 Sb., v případech, kdy v lokalitě chybí dostatek podkladů pro řádné navržení a vyprojektování vodního díla. I k nim je však předem nutný souhlas vodoprávního úřadu podle § 17, odst. 1, písmeno i) vodního zákona.



Zdroj: GEROTop, spol. s r. o.

Poděkování

Příspěvek vznikl s podporou České asociace hydrogeologů (www.cah-uga.cz), odboru geologie Ministerstva životního prostředí a Technologické agentury ČR v rámci financování výzkumného projektu č. SS02030027 „Vodní systémy a vodní hospodářství v ČR v podmínkách změny klimatu (Centrum Voda)“.

Literatura

[1] MINISTERSTVO PRO MÍSTNÍ ROZVOJ. *Umístění, povolení a užívání tepelných čerpadel. Metodický pokyn pro stavební úřady*. Praha: Ministerstvo pro místní rozvoj, odbor stavebního řádu, 2023. Dostupné z: <https://mmr.gov.cz/cs/ministerstvo/stavebni-pravo/stanoviska-a-metodiky/uzemni-rozhodovani-a-stavebni-rad/umisteni-povoleni-a-uzivani-tepelnych-čerpadel>

[2] ŠEDA, S. *Úloha hydrogeologa v projektování, povolování a realizaci vrtů pro tepelná čerpadla typu země-voda a voda-voda*. Seminář České asociace hydrogeologů a Výzkumného ústavu vodohospodářského T. G. Masaryka. Praha, červen 2023.

[3] ŠEDA, S., DATEL, J. V., ČÍŽEK, J. *Příručka pro projektování, povolování a realizaci vrtů pro tepelná čerpadla systémů „země x voda“ a „voda x voda“*. Praha: Česká asociace hydrogeologů pro Ministerstvo životního prostředí, 2023. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/prehled_vyzkumnych_metodik

[4] SEMÍKOVÁ, H., NOVÁK, P., VANĚČEK, M. *Metodika geologických průzkumných prací pro budování tepelných čerpadel pro využití energetického potenciálu podzemních vod a horninového prostředí*. Pardubice: WATRAD Pardubice pro Ministerstvo životního prostředí, 2020. Dostupné z: https://www.mzp.cz/cz/prehled_vyzkumnych_metodik

Autoři

RNDr. Josef Vojtěch Datel, Ph.D.¹

✉ josef.datel@vuvv.cz

RNDr. Svatopluk Šeda²

✉ seda@fingeo.cz

RNDr. Jiří Čížek³

✉ cizek.j@opv.cz

¹Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

²FINGEO, s. r. o., Choceň

³Ochrana podzemních vod, s. r. o., Praha

Informativní článek, který nepodléhá recenznímu řízení.

ISSN 0322-8916 © 2024 Autoři. Tuto práci je kdokoli oprávněně šířit a využívat za podmínek licence CC BY-NC 4.0



VTEI/2024/5

Od roku 1959

VODOHOSPODÁŘSKÉ
TECHNICKO-EKONOMICKÉ INFORMACE
WATER MANAGEMENT
TECHNICAL AND ECONOMICAL INFORMATION

Odborný dvouměsíčník specializovaný na výzkum v oblasti vodního hospodářství.
Je uveden v Seznamu recenzovaných neimpaktovaných periodik vydávaných v ČR.

Ročník 66



VTEI.cz

Vydává: Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka,
veřejná výzkumná instituce, Podbabská 2582/30, 160 00 Praha 6

Redakční rada:

Ing. Libor Ansorge, Ph.D., RNDr. Jan Daňhelka, Ph.D., doc. Ing. Michaela Danáčová, Ph.D.,
doc. Dr. Ing. Pavel Fošumpaur, doc. Ing. Silvie Heviánková, Ph.D., Mgr. Róbert Chriateľ,
Mgr. Vít Kodeš, Ph.D., Ing. Jiří Kučera, PharmD. Markéta Marvanová, Ph.D., BCGP, BCPP, FASCP,
Ing. Martin Pavel, Ing. Jana Poárová, Ph.D., Mgr. Hana Sezimová, Ph.D.,
Dr. Ing. Antonín Tůma, Mgr. Lukáš Záruba, Ing. Marcela Zrubková, Ph.D.

Vědecká rada:

prof. Ing. Martin Hanel, Ph.D., prof. RNDr. Bohumír Janský, CSc.,
prof. Ing. Radka Kodešová, CSc., RNDr. Petr Kubala, Ing. Tomáš Mičaník, Ph.D.,
Ing. Michael Trnka, CSc., Dr. rer. nat. Slavomír Vosíka

Šéfredaktor:

Ing. Josef Nistler (josef.nistler@vuv.cz)

Odborné redaktorky:

Mgr. Zuzana Řehořová (zuzana.rehorova@vuv.cz)
Mgr. Hana Beránková (web) (hana.berankova@vuv.cz)

Zdroje fotografií tohoto čísla:

VÚV TGM, 123RF.com, doc. RNDr. Jan Unucka, Ph.D., Ing. Martina Peláková,
umělá inteligence

Grafická úprava, sazba, tisk:

ABALON s. r. o., www.abalon.cz

Náklad 400 ks. Časopis VTEI vychází od roku 2022 v anglické mutaci,
která je k dispozici na <https://www.vtei.cz/en/>

Příští číslo časopisu vyjde v prosinci. Pokyny autorům časopisu jsou uvedeny na www.vtei.cz

CC BY-NC 4.0

ISSN 0322-8916

ISSN 1805-6555 (on-line)

MK ČR E 6365



BŘEZNÁ

Řeka Březná je nejvýznamnějším přítokem Moravské Sázavy. Její prameniště se studánkou se nachází v Hanušovické vrchovině v masivu Jeřábu (1 103 m n. m.) v sedle směrem k vrchu Bouda (956 m n. m.). Jedním z pramenů je i tzv. Rudolfův pramen, jenž bývá též nazýván pramen Leopolda Grabnera. Délka toku činí necelých 32 km a plocha povodí 130 km². Do Moravské Sázavy se Březná vlévá coby její levostranný přítok na okraji obce Hoštejn nedaleko železničního koridoru a přibližně kopíruje historickou zemskou hranici mezi Čechami a Moravou. Protéká mimo jiné obcemi Moravský Karlov, Štíty a Drozdovská Pila. Typické pro její údolí jsou náhony, které se soustřeďují zejména do úseku mezi Drozdovskou Pilou a Hoštejnem. V samotné obci Drozdovská Pila byly mlýny a náhony zakládány již v 17. století brzy po vzniku obce (první záznamy o ní pocházejí z roku 1633). Z dalších dochovaných mlýnů lze vzpomenout Karlovský mlýn a níže po toku Panský a Kuhnův mlýn. Naproti tomu z Valentova nebo Felzmanova mlýna se dochovaly jen skromné pozůstatky a ruiny. V obci Hoštejn nalezneme na výrazném odlesněném kopci trosky středověkého hradu (první zmínka o něm je z roku 1267) a památník dostavby železnice Praha – Olomouc (1845). Údolí Březné patří mezi jedno z nejhezčích v rámci celého povodí Moravy. Ze zajímavostí živé a neživé přírody můžeme zmínit hadcové bory s výskytem zakrslých forem rostlin (tzv. nanismus). V jehličnatých porostech na povodí lze poměrně často spatřit jedli bělokorou (*Abies alba*). Mezi bezesporu vzácné a zajímavé zástupce zdejší fauny patří čáp černý (*Ciconia nigra*), jeřáb popelavý (*Grus grus*) nebo rys ostrovid (*Lynx lynx*).

Text a fotografii dodal doc. RNDr. Jan Unucka, Ph.D.

**VÝZKUMNÝ ÚSTAV
VODOHOSPODÁŘSKÝ
T.G. MASARYKA**

veřejná výzkumná instituce

VTEI.cz