

# Odhad přírodních zdrojů podzemní vody v hydrogeologických rajonech v České republice v měnících se klimatických poměrech 1981–2019

LADISLAV KAŠPÁREK, ROMAN KOŽÍN, JOSEF V. DATEL, MARTINA PELÁKOVÁ

**Klíčová slova:** hydrogeologický rajon – zdroj podzemní vody – odtok podzemní vody

## SOUHRN

V České republice (dále ČR) v rámci regionálního hydrogeologického průzkumu byly už v roce 1965 vymezeny hydrogeologické rajony. Hydrogeologický rajon (HGR) je definován jako celek s obdobnými hydrogeologickými poměry, vymezený tektonicky a geologicky, na jehož území převládá určitý typ zvodnění a oběhu podzemní vody. V několika časových etapách byly hranice HGR upravovány a postupně byly různými postupy určovány jejich číselné hydrogeologické charakteristiky, z nichž jedním ze základních údajů je velikost přírodních zdrojů podzemní vody. Přírodní zdroje jsou dynamickou složkou podzemních vod a vyjadřují se v  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Přírodní zdroje jsou dány dotací vody do zvodněného systému (srážky, přetoky podzemní vody z jiných kolektorů, přirozená infiltrace povrchové vody apod.). Pokud je HGR hydrogeologicky uzavřený, lze dlouhodobý průměr jeho dotace ze srážek i dlouhodobý průměr základního odtoku použít jako odhad přírodního zdroje podzemních vod. V rámci projektu „Rebilance zásob podzemních vod“ byly zpracovány odhady přírodních zdrojů podzemní vody ve 152 hydrogeologických rajonech v ČR, které jsou uvedeny ve zprávě [1]. Přírodní zdroje byly stanoveny několika odlišnými postupy s využitím dat z období 1971–2010, případně 2000–2010.

Vzhledem k intenzivnímu zvyšování průměrných ročních teplot vzduchu na území ČR po roce 1980 a se zvláštním zřetelem k suchému období 2014–2019 jsme pro současný odhad přírodních zdrojů podzemní vody v HGR použili data z období 1981–2019. Použitý postup výpočtu vycházel ze stanovení celkového odtoku z HGR a jeho přepočtu na základní odtok pomocí baseflow indexu (BFI), jehož regionální zpracování obsahuje studie [2]. Pro stanovení celkového odtoku byly použity dvě alternativy výpočtu: podle bilančního rozdílu mezi srážkou a odhadnutým územním výparem a podle regresního vztahu mezi srážkou a odtokem. Oba typy vztahů jsme odvodili z výsledků sledování průtoků ve vodoměrných stanicích ČHMÚ a podle pozorování srážkoměrných a klimatických stanic. Pro každý HGR byl použit vztah odvozený z dat povodí, ve kterých rajon leží a s nimiž sousedí, s přihlédnutím k orografické podobnosti rajonu a povodí. Pro HGR byly vypočteny dlouhodobé průměry srážek a teplot. Podle nich byly interpolací nebo extrapolací podle uvedených vztahů stanoveny dlouhodobé průměrné výšky celkového odtoku.

Výsledky výpočtů ukázaly, že postup založený na regresním odhadu výšky odtoku podle výšky srážek poskytuje odhady v průměru o 5 až 6 % větší než postup využívající odhad výparu.

Obě alternativy výpočtu při porovnání s přecházejícími výsledky z projektu „Rebilance zásob podzemních vod“ vykazují podle dlouhodobých průměrů pokles průměrného základního odtoku, a tedy i průměrné dotace podzemních vod v období 1981–2019 oproti období 1971–2010 v rozmezí cca 7 až 12 %, což lze přisoudit při téměř nezměněné průměrné srážce zvýšení průměrné teploty mezi porovnávanými obdobími o cca 0,4 °C. Zjištěné změny v přírodních zdrojích podzemních vod za obě období

vykazují regionální rozdíly, dané nezahrnutými hydrogeologickými charakteristikami. Vzhledem k tomu, že výsledky nebyly získány stejnými metodami, jejich použití pro vzájemné porovnání je limitované. Změny výsledků pro jednotlivé HGR jsou charakterizovány tím, že 61 %, resp. 72 % případů se pohybuje v rozmezí intervalu  $\pm 20$  % podle použité metody.

## ÚVOD

Stanovení využitelného množství podzemní vody pro odběry je jedním ze základních úkolů hydrogeologického průzkumu. Hlavní součástí těchto bilančních prací je ocenění velikosti zdrojů podzemní vody v rámci vymezeného bilančního hydrogeologického celku. Pro tyto účely byly vymezeny hydrogeologické rajony (HGR) jako základní bilanční celky využívané pro stanovení velikosti zdrojů podzemní vody. Území ČR je rozděleno do celkem 152 HGR.

Velikost zdrojů podzemní vody je určena prostorově (v optimálním případě se týká hydrogeologické struktury s uzavřeným oběhem podzemní vody, jež obsahuje jak plochy infiltrace, tak drenáže) a časově (jednak ve smyslu časového intervalu, např. hydrologického roku, a jednak ve smyslu časové proměnnosti tvorby zdrojů podzemní vody v důsledku časového kolísání hydrologických parametrů).

Rozlišují se tři typy zdrojů podzemních vod: přírodní, indukované a umělé. Přírodní zdroje se tvoří za přírodních, vesměs neovlivněných podmínek v určitém hydrogeologickém celku v definovaném časovém období. Za antropogenně změněných podmínek mohou vznikat zdroje indukované (např. břeňová infiltrace v blízkosti odběrných objektů) a zdroje umělé (např. umělé zasakování vody do podzemních struktur).

Článek se týká přírodních zdrojů podzemní vody v jednotlivých HGR, které se tvoří v ploše těchto rajonů. Byly použity hydrologické bilanční přístupy, jež vycházejí z faktu, že infiltrované srážky jsou hlavním zdrojem tvorby podzemních vod. Přírodní zdroje podzemních vod coby dynamické složky jejich zásob jsou stanoveny procesem hydrologického bilancování jako časoprostorově definovaný základní odtok. Je třeba vnímat limity použitých hydrologických metod, které z principu nemohou zahrnout přetoky mezi kolektory, a indukované zdroje podzemních vod, jež se projevují např. v kvartérních rajonech (vliv břeňové infiltrace či probíhající drenáže z podložních jednotek apod.).

Velikost přírodních zdrojů podzemní vody lze odhadovat pomocí kombinace různých metod, které lze rozdělit do tří základních skupin: podle velikosti infiltrace, podle podzemního průtoku příslušným kolektorem a podle množství vody, jež se z tohoto systému odvodňuje.

Suché období 2014–2019 významným způsobem zasáhlo do velikosti zdrojů podzemní vody, jak je v tomto období dokladováno snižováním hladin

podzemní vody v rámci monitoringu podzemních vod v celostátní síti ČHMÚ. V projektu „*Rebilance zásob podzemních vod*“ (2011–2016) byly provedeny odhady přírodních zdrojů podzemní vody ve všech 152 HGR na základě vstupních hydrologických dat za období 1971–2010, s komparativním využitím dílčích údajů za období 2000–2010. Stanovení tedy nezahrnovalo následující období sucha. V současné době již bylo možné přistoupit k novému bilančnímu odhadu založenému na datech z období 1981–2019 a výsledky se pokusit porovnat s předchozími výstupy projektu „*Rebilance...*“.

Přímému srovnání dosažených výsledků za obě období však brání různé metodické přístupy, které byly zvoleny ke stanovení přírodních zdrojů v jednotlivých HGR v projektu „*Rebilance...*“. To souviselo s různou úrovní a množstvím dostupných dat, s nimiž bylo nutno v různých rajonech počítat. Jak vyplývá ze zprávy [3], podrobnější přístup byl zvolen v 55 definovaných rajonech, kde byla využita i měřená data. Pro stanovení přírodních zdrojů byly zvoleny odvozené regresní vztahy mezi srážkou a výškou odtoku a mezi srážkou a základním odtokem, případně bilanční přístup za využití bilanční rovnice včetně stanovení výparu. Finálně uvedené přírodní zdroje byly pak výsledkem individuálního posouzení dosažených výsledků různými metodami podle specifické situace každého rajonu.

V dalších 30 rajonech byly zpracovány podrobné hydrologické bilanční modely a pro stanovení základního odtoku využity jejich výstupy. V dalších sedmi HGR nebylo možné stanovit přírodní zdroje podzemních vod především kvůli masivnímu antropogennímu postižení území, vesměs těžbou surovin. Zbývalo tedy 60 rajonů, kde byl základní odtok odhadnut pomocí zvolených hydrologických přístupů. Ve 31 rajonech vzniklých rozdělením starších rajonů byla pro stanovení základního odtoku použita metoda analogonů a rozdělení srážek v ploše rajonů a u zbývajících 29 rajonů byly využity původní hodnoty z roku 2006, přepracované na průměry a na období 1981–2010. Použité postupy jsou podrobně popsány ve zprávě [1].

Jak je uvedeno dále, nové výsledky dosažené na základě odvozených bilančních a regresních vztahů tak nejsou zcela srovnatelné se staršími údaji, aby bylo možné čísla za obě období mechanicky položit vedle sebe a porovnávat je. Jejich komparaci lze provést pouze individuálně v rámci jednotlivých rajonů.

## METODIKA

Jednou ze základních metod stanovení dotace podzemních vod je využití modelu hydrologické bilance, který umožňuje vypočítat časový průběh dotace podzemních vod. Parametry modelu se standardně kalibrují podle dat z povodí vodoměrných stanic tak, aby se odtok modelovaný podle srážek a teplot vzduchu co nejvíce blížil odtoku pozorovanému. Kromě případů, kdy se HGR shoduje s povodím vodoměrné stanice, se pro odhad odtoku z HGR využívají výsledky modelování povodí, do nichž HGR zasahuje, a z blízkých povodí s obdobným hydrogeologickým charakterem. Při tomto postupu jsou do modelu hydrologické bilance přeneseny parametry a vstupní veličiny – srážky a teploty vzduchu – vyhodnocené pro plochu HGR. Popsaný postup je poměrně složitý a pracný, obvykle vyžaduje výpočet více variant řešení, jejich posouzení a výběr výsledného odhadu.

Pokud není účelem odhadu dotace podzemních vod její časový průběh, ale jen dlouhodobý roční průměr, lze místo přenosu modelového řešení využít informací získaných z bilančních vztahů z povodí, v nichž HGR leží, a sousedních povodí. Výpočet vychází ze stanovení celkového odtoku z HGR a jeho přepočtu na základní odtok pomocí baseflow indexu BFI. Pro stanovení celkového odtoku byly použity dvě alternativy výpočtu: podle bilančního rozdílu mezi srážkou a odhadnutým územním výparem a podle regresního vztahu mezi srážkou a odtokem.

## ODVOZENÍ VZTAHŮ PRO ODHAD PRŮMĚRNÉ ROČNÍ ODTOKOVÉ VÝŠKY

### Výpočet odtoku jako rozdílu srážky a územního výparu

Použitý postup výpočtu dlouhodobých průměrů dotace podzemních vod v HGR využívá základních vztahů hydrologické bilance, podle které je dlouhodobý průměr celkového odtoku  $R$  [mm.rok<sup>-1</sup>] rozdílem mezi dlouhodobým průměrem srážky  $P$  [mm.rok<sup>-1</sup>] a dlouhodobým průměrem územního výparu  $E$  [mm.rok<sup>-1</sup>]. V bilanční rovnici dlouhodobých průměrů z několika desetiletí, pomineme-li změnu zásob vody, platí:

$$R = P - E \quad (1)$$

Aplikovat tuto rovnici (1) na hydrologická povodí vodoměrných stanic lze za předpokladu, že povodí je nejen morfologicky, ale i hydrogeologicky uzavřené, tj. neexistují přítoky ani odtoky vody mezi sousedními povodími. Územní výpar je pak možné odhadovat jako rozdíl mezi pozorovanou srážkou a odtokem vypočítaným ze sledovaných průtoků. Pokud rozdíl  $P - R$  vybočuje z regionální úrovně, zvětšení signalizuje odtok mimo závěrový profil a zmenšení přítok podzemní vody ze sousedního povodí či kolektoru.

Veličinou, která je považována za horní mez územního výparu, je potenciální evapotranspirace PET. Pro její výpočet jsme použili rovnici

$$PET = 37,9 \cdot T + 289,4 \quad (2)$$

kde PET je průměrná roční potenciální evapotranspirace [mm.rok<sup>-1</sup>]  
T průměrná teplota vzduchu [°C]

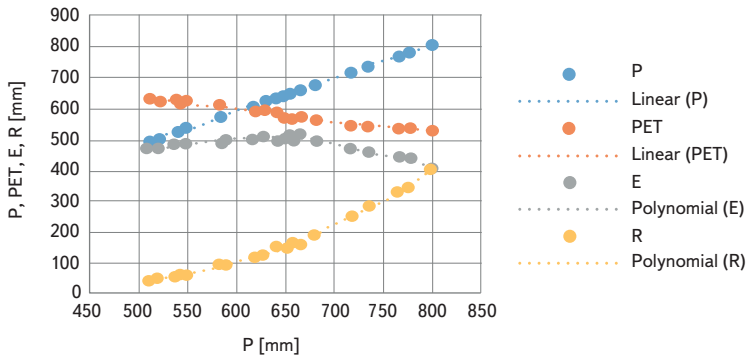
Rovnici (2) při aplikaci metody výpočtu územního výparu podle Oudina [4] doporučili pro území ČR Beran a kol. ve studii [5].

Potenciální evapotranspirace podle tohoto vztahu při zvyšování teploty vzduchu lineárně stoupá. Vzhledem k tomu, že vztah mezi teplotou vzduchu a srážkami má většinou lineární průběh, je i pokles potenciální evapotranspirace se vzrůstající srážkou obvykle lineární. Ukazuje to *obr. 1*, na kterém jsou zobrazeny průběhy bilančních veličin v závislosti na srážce. Průběh územního výparu vyneseno proti srážce je nelineární a ukazuje, že v intervalu srážek menších než cca 600 mm (kde srážka je menší než potenciální evapotranspirace) se výpar se srážkou zvětšuje a je limitován srážkou. Nad uvedenou mezí pro zvyšující se srážky výpar klesá, převažuje vliv poklesu potenciální evapotranspirace odpovídající poklesu teploty vzduchu. Popsaná proměna je plynulá a projevuje se zakřivením vztahu mezi srážkou a odtokem.

Na *obr. 1* uvedené průběhy slouží jako příklad. Použitá data pocházejí ze souboru povodí vodoměrných stanic z povodí Svratky nad přítokem Svitavy. Výsledky z jiných povodí mají obdobný průběh, oblast změny trendu územního výparu je většinou v intervalu průměrných ročních srážek 600 až 700 mm.

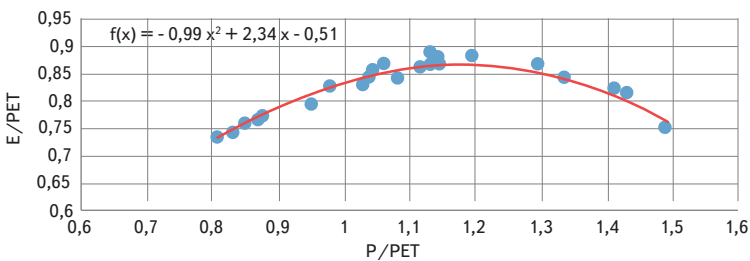
Pro regionální analýzy byl vyvinut postup, v němž jsou použity z hlediska vlivu teploty vzduchu, resp. potenciální evapotranspirace relativní veličiny. Výpar je charakterizován poměrem  $E/PET$ , takže jej odhadujeme jako procentní podíl potenciální evapotranspirace. Proměnlivost poměru  $E/PET$  v závislosti na srážce odpovídá výše popsanému souhrnnému vlivu srážek a teplot na velikost územního výparu. Poměr  $E/PET$  se při zvyšování srážky zvětšuje až do oblasti, ve které je pro výpar dostatečná teplota, a pak klesá, neboť klesající teplota vzduchu výpar omezuje. Jako nezávisle proměnnou lze použít poměr  $P/PET$ , viz [6]. Příklad takového zpracování je na *obr. 2*. Tento typ korelační analýzy jsme použili pro odhad průměrného výparu a podle něj vypočítali odečtením od srážky odhad průměrné roční výšky odtoku. Pro analytické vyjádření korelačního vztahu mezi  $P/PET$  a  $E/PET$  jsme ve většině povodí využili polynom druhého stupně.





Obr. 1. Dlouhodobé roční průměry bilančních veličin vynesené proti průměrné roční srážce, příklad odvozený z dat pozorování povodí vodoměrných stanic v povodí Svatky nad přítokem Svitavy

Fig. 1. Long-term annual averages of balance variables plotted against average annual precipitation, an example derived from observed data from water gauging stations in the Svatka basin above the Svitava tributary



Obr. 2. Příklad vztahu mezi poměrem E/PET a poměrem P/PET, data z pozorování povodí vodoměrných stanic v povodí Svatky nad přítokem Svitavy

Fig. 2. Example of the relationship between E/PET ratio and P/PET ratio, observed data from water gauging stations in the Svatka basin above the Svitava tributary

## Regresní vztah odtoku a srážky

Pro vyjádření vztahu mezi průměrnou dlouhodobou roční výškou srážek  $P$  [mm] a průměrnou dlouhodobou výškou odtoku  $R$  [mm] se vhodnou ukázala nelineární závislost – polynom druhého stupně, viz obr. 1.

$$R = a \cdot P^2 + b \cdot P + c \quad (3)$$

Parametry  $a$ ,  $b$ ,  $c$  vztahu (3) popisují tvar funkce  $R = f(P)$  odpovídající tomu, že územní výpar dosahuje maxima v oblasti, kde je pro něj optimální kombinace výšky srážek a teploty. Nelineární průběhy závislosti odtoku na srážce jsou zřetelně patrné při analýze dat s velkým rozsahem srážek. Při analýze lokálních dat s menším rozsahem srážek poskytuje použitelné výsledky i proložení lineární funkcí.

## Postup výběru dat pro odvozování vztahu pro odhad průměrné roční odtokové výšky pro jednotlivé hydrogeologické rajony

Až na několik výjimek byly pro všechny HGR použity oba výše popsané postupy. Parametry vztahů jsme odvodili z výsledků pozorování průtoků ve vodoměrných stanicích ČHMÚ a podle pozorování srážkoměrných stanic a klimatických stanic v povodí a jejich okolí. Zpracovány byly měsíční řady, průměrné měsíční průtoky byly doplněny o užívání vod a manipulace nádrží. Z měsíčních řad byly vypočteny dlouhodobé roční průměry odtoku, srážek a teplot na ploše povodí vodoměrných stanic. Byla použita data z let 1981–2019 s podmínkou, že v tomto období existuje

vyhodnocené pozorování průtoků minimálně po dobu 18 let. Při zpracování byly vyloučeny ojedinělé případy, v nichž relace srážek a teplot vzduchu nebo relace srážek a odtoku zcela očividně vybočovaly z rozmezí dat v sousedních povodích. Po této redukci obsahoval použitý soubor data pro povodí 395 vodoměrných stanic.

Výběr stanic pro odvození vztahů byl ovlivněn i tím, jaká data a jak spolehlivá pro území v okolí konkrétního HGR a jeho okolí existují. Pro několik HGR se nepodařilo nalézt data umožňující použít vztah mezi poměrem  $E/PET$  a poměrem  $P/PET$ , takže výsledkem jsou jen odhady odtoku podle srážkoodtokového vztahu.

Pro jednotlivé hydrogeologické rajony byl výběr povodí vodoměrných stanic, ze kterých byly oba výše popsané typy vztahů odvozeny, usměrňován na jedné straně snahou vystihnout regionální odlišnosti hydrologického a hydrogeologického režimu, na druhé straně potřebou alespoň minimálního počtu případů, jež umožňují korelační vztah odhadnout.

Zvláštní pozornost bylo třeba věnovat několika případům s velmi malými srážkami na HGR, menšími než minimální srážky v souboru dat z povodí použitých pro odvození vztahu. Odvozený analytický vztah pak sloužil pro extrapolaci a bylo třeba uvážit i jiné typy vztahu než standardní polynom druhého stupně.

Při výpočtech byly průběžně porovnávány odhady celkového odtoku stanoveného oběma popsanými postupy. V některých případech byly identifikovány značně vybočující výsledky a byla hledána pravděpodobná příčina vybočení. Zde byly používány i vztahy mezi srážkami a teplotami vzduchu, podle nichž se ukázal odhad srážek pro několik malých povodí nepřesný. Ojediněle byla data z vybočujících případů z odvozování vztahů vyloučena.

Pro dedukci dlouhodobých průměrů dotace podzemních vod v hydrogeologickém rajonu předpokládáme, že bilanční vztah, odvozený na pozorovaných povodích v oblasti, kde se nachází HGR, s přijatelnou mírou shody vystihuje bilanci v ploše rajonu.

Dosazením průměrných ročních srážek a průměrných ročních teplot vzduchu, vypočítaných z pozorování srážkoměrných a klimatických stanic pro plochu HGR, do vztahů sestavených pro oblast, v níž HGR leží, jsme získali odhad celkového průměrného ročního odtoku z HGR.

## Přepočítání průměrné roční odtokové výšky pro jednotlivé hydrogeologické rajony na průměrnou roční výšku odtoku podzemní vody

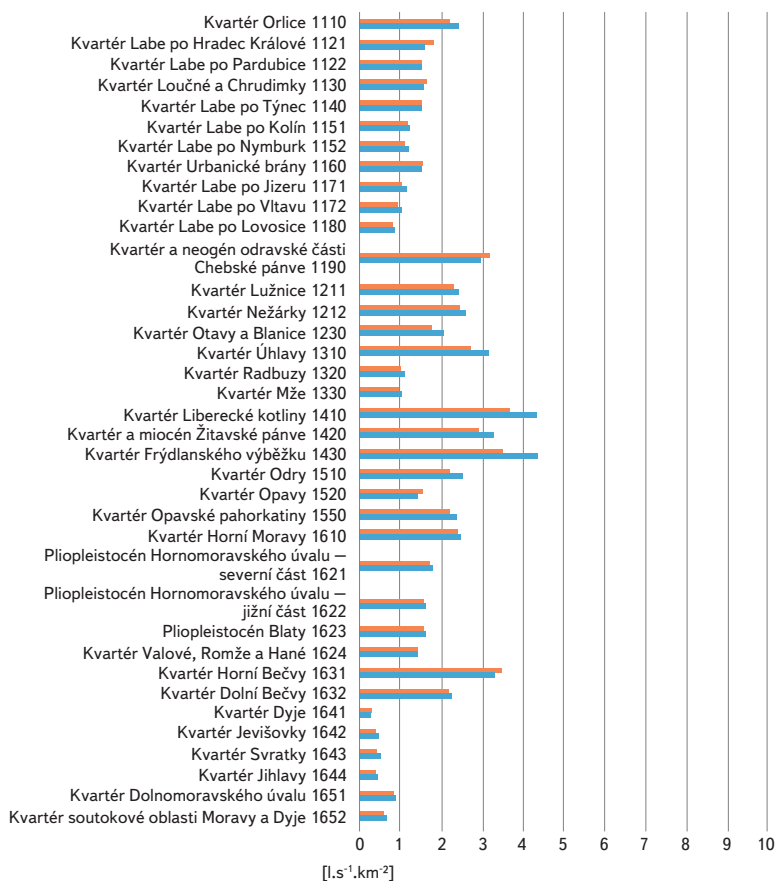
Z odhadu odtoku  $R$  byl pro každý hydrologický rajon podle rovnice

$$R_z = R \cdot BFI \quad (4)$$

vypočítán dlouhodobý průměr základního odtoku  $R_z$ , který v dlouhodobém průměru při zanedbání změn zásob vody odpovídá průměrné dotaci podzemních vod ze srážek. Nezahrnuje případné přetoky vody mezi HGR. Hodnoty indexu BFI (base-flow indexu, tj. poměru mezi základním a celkovým odtokem) byly převzaty z článku [2]. Pro několik HGR byly odvozeny z pozorovaných řad průměrných denních průtoků ve vodoměrných stanicích, jejich povodí leží v příslušném HGR nebo má podobné hydrogeologické charakteristiky. Postup stanovení je popsán v citovaném článku.

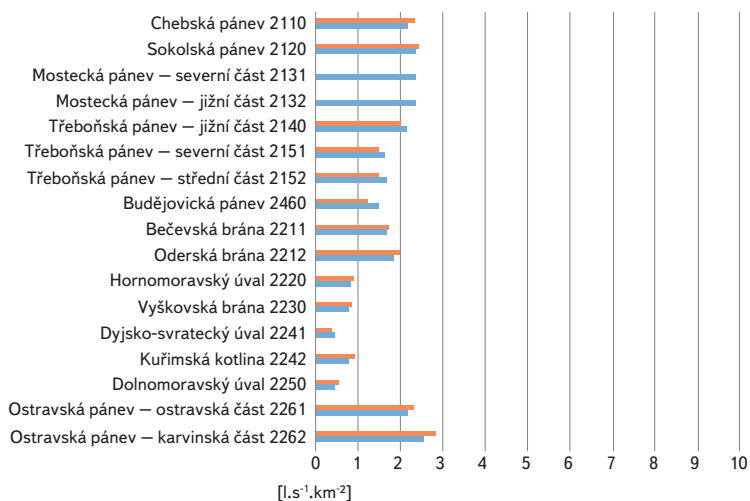
## VÝSLEDKY VÝPOČTŮ

Pro výsledné zobrazení byly průměrné roční výšky odtoku z HGR přepočítány na průměrné specifické odtoky podzemní vody z HGR [ $l \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$ ]. Tyto hodnoty jsou zaznamenány na obr. 3–8, v členění podle typu hydrogeologických struktur. Pro výpočet založený na odhadu odtoku jako rozdílu srážky a výparu jsou znázorněny v mapce na obr. 9. Vzhledem k překryvům na ní nejsou vyneseny plochy kvarterních HGR.



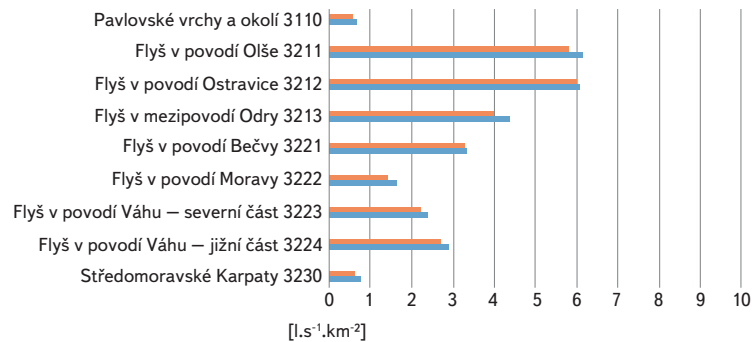
Obr. 3. Specifické odtoky podzemní vody z hydrogeologických rajonů – kvartérní útvary; modře jsou znázorněny odhady podle srážkoodtokového vztahu, červeně na základě odhadu odtoku jako rozdílu srážky a výparu

Fig. 3. Specific groundwater outflows from hydrogeological zones – Quaternary formations; estimates based on the precipitation-runoff relationship are shown in blue, and estimates based on runoff as the difference between precipitation and evaporation are shown in red



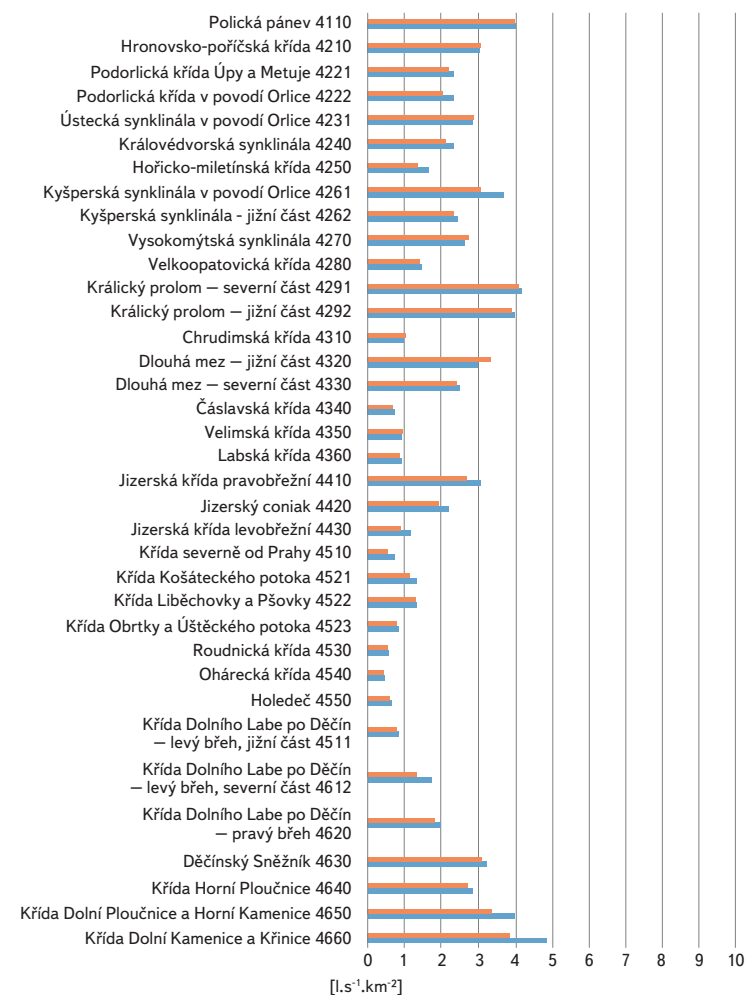
Obr. 4. Specifické odtoky podzemní vody z hydrogeologických rajonů – terciérní a křídové útvary pánví; modře jsou znázorněny odhady podle srážkoodtokového vztahu, červeně na základě odhadu odtoku jako rozdílu srážky a výparu

Fig. 4. Specific groundwater outflows from hydrogeological zones – Tertiary and Cretaceous basin formations; estimates based on the precipitation-runoff relationship are shown in blue, and estimates based on runoff as the difference between precipitation and evaporation are shown in red



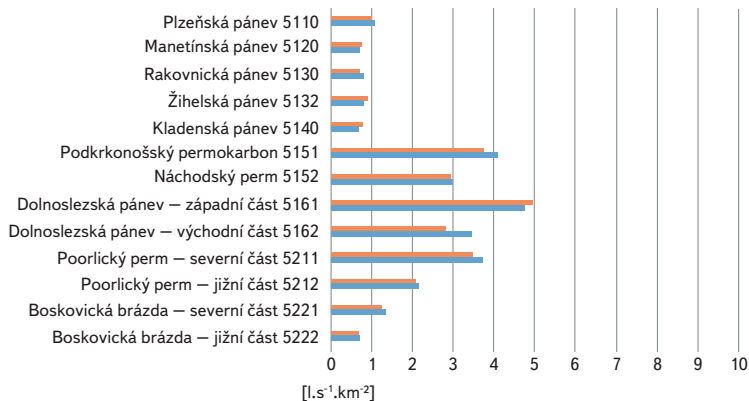
Obr. 5. Specifické odtoky podzemní vody z hydrogeologických rajonů – flyšové sedimenty; modře jsou znázorněny odhady podle srážkoodtokového vztahu, červeně na základě odhadu odtoku jako rozdílu srážky a výparu

Fig. 5. Specific groundwater outflows from hydrogeological zones – Flysch sediments; estimates based on the precipitation-runoff relationship are shown in blue, and estimates based on runoff as the difference between precipitation and evaporation are shown in red

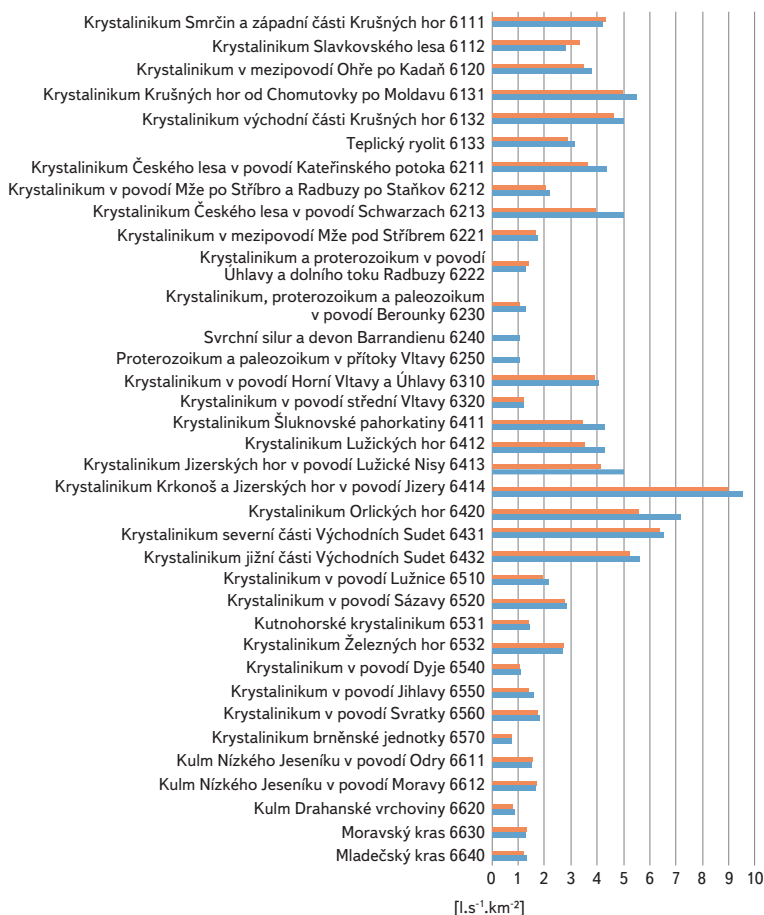


Obr. 6. Specifické odtoky podzemní vody z hydrogeologických rajonů – svrchnokřídové sedimenty; modře jsou znázorněny odhady podle srážkoodtokového vztahu, červeně na základě odhadu odtoku jako rozdílu srážky a výparu

Fig. 6. Specific groundwater outflows from hydrogeological zones – Upper Cretaceous sediments; estimates based on the precipitation-runoff relationship are shown in blue, and estimates based on runoff as the difference between precipitation and evaporation are shown in red

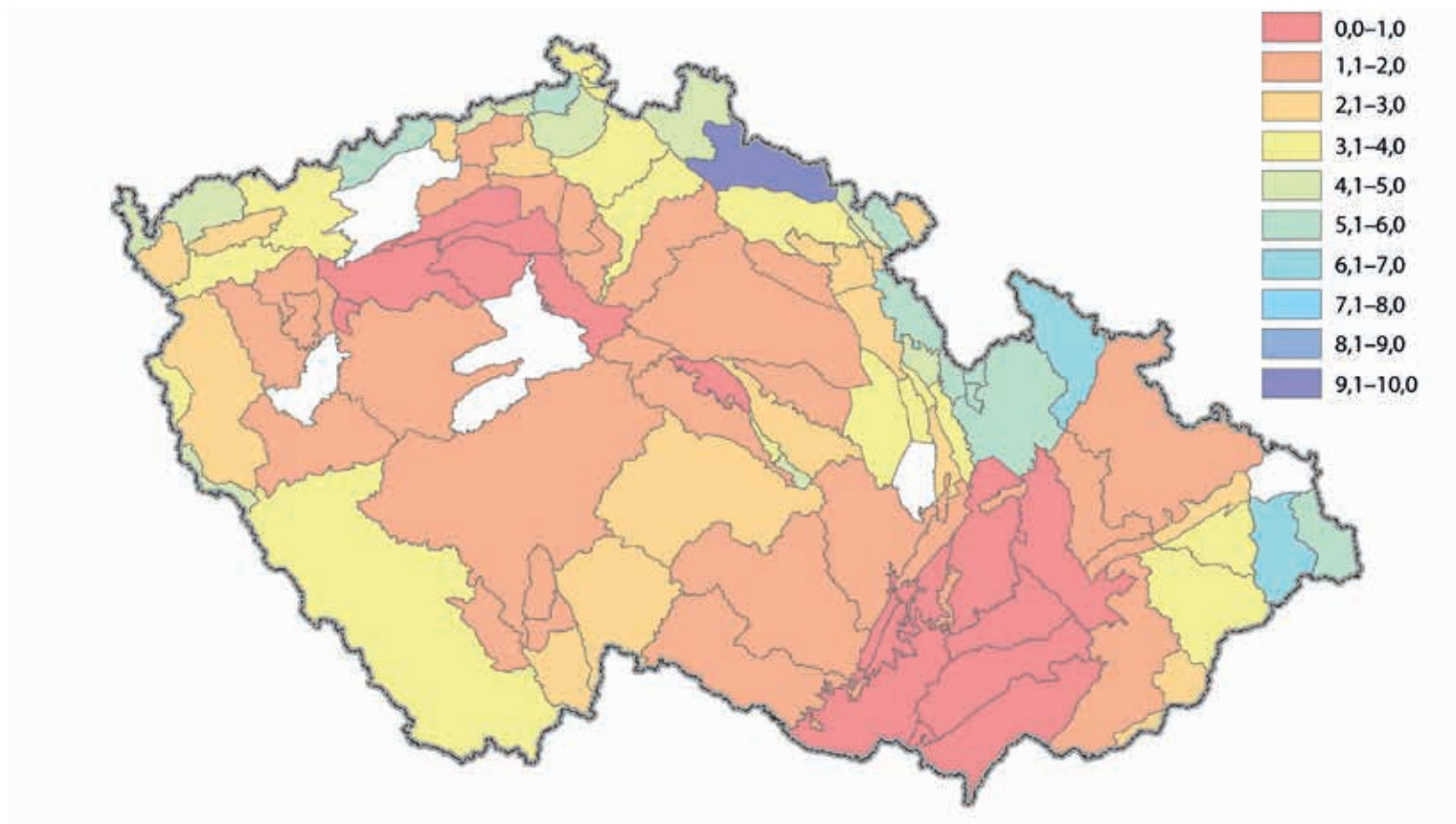


Obr. 7. Specifické odtoky podzemní vody z hydrogeologických rajonů – permokarbon limnických pánví a brázd; modře jsou znázorněny odhady podle srážkoodtokového vztahu, červeně na základě odhadu odtoku jako rozdílu srážky a výparu  
 Fig. 7. Specific groundwater outflows from hydrogeological zones – Permocarbon limnic basins and furrows; estimates based on the precipitation-runoff relationship are shown in blue, and estimates based on runoff as the difference between precipitation and evaporation are shown in red



Obr. 8. Specifické odtoky podzemní vody z hydrogeologických rajonů v prostředí hydrogeologického masivu; modře jsou znázorněny odhady podle srážkoodtokového vztahu, červeně na základě odhadu odtoku jako rozdílu srážky a výparu  
 Fig. 8. Specific groundwater outflows from hydrogeological zones in a hydrogeological massif; estimates based on the precipitation-runoff relationship are shown in blue, and estimates based on runoff as the difference between precipitation and evaporation are shown in red





Obr. 9. Odhady specifického základního odtoku podzemní vody stanoveného na základě odhadu odtoku (rozdíl srážek a výparu) v  $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ; pro nevybarvené HGR nejsou k dispozici potřebná data

Fig. 9. Estimates of specific base flow of groundwater determined from runoff estimates (difference between precipitation and evaporation) in  $\text{l}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$ ; no results for uncolored zones from previous overall assessment

Tab. 1. Porovnání vypočítaných charakteristik za celý soubor zpracovaných HGR

Tab. 1. Comparison of calculated characteristics for the whole set of processed zones

|  | <b>R = f(P)</b> | <b>R = P - E</b> | <b>Rozdíl</b> | <b>%</b> |
|--|-----------------|------------------|---------------|----------|
| Součet odtoků podzemní vody $Q_z$ [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ] | 193             | 182              | -1,1          | -5,5     |
| Průměr výšek celkového odtoku R [mm]                                   | 181,4           | 169,8            | -11,6         | -6,4     |
| Průměr výšek základního odtoku $R_z$ [mm]                              | 76,8            | 72,2             | -4,6          | -6,0     |

## POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ PODLE POUŽITÝCH POSTUPŮ ODHADU

V tab. 1 jsou porovnány charakteristiky vypočítané z celého souboru zpracovaných HGR. Je zřejmé, že postup založený na regresním odhadu výšky odtoku podle výšky srážek poskytuje odhady v průměru o 5 až 6 % větší než postup využívající odhad výparu. Odchyly v jednotlivých HGR jsou v rozmezí 19,8 až 22,8 %. Rozdíl výsledků použitých postupů patrně odpovídá tomu, že parametry použitých vztahů se odhadují v alternativních postupech podle shody odlišných veličin. V postupu založeném na odhadu územního výparu je navíc využita průměrná teplota vzduchu, což také může ovlivňovat výsledné hodnoty.

## POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ S ODHADY Z PROJEKTU „REBILANCE ZÁSOB PODZEMNÍCH VOD“

V rámci projektu „Rebilance...“ byly zpracovány odhady přírodních zdrojů podzemní vody ve 152 hydrogeologických rajonech v ČR, které jsou uvedeny ve zprávě [1]. Přírodní zdroje byly stanoveny několika odlišnými postupy s využitím dat z období 1971–2010, případně 2000–2010.

Tab. 2. Celkové rozdíly mezi daty z projektu „Rebalance...“ a daty získanými z regresního vztahu  $R = f(P)$ Tab. 2. Overall differences between data from the „Rebalance...“ project and data obtained from the regression relationship  $R = f(P)$ 

|  | <b>Rebalance</b> | <b>R = f(P)</b> | <b>Rozdíl</b> | <b>%</b> |
|--|------------------|-----------------|---------------|----------|
| Součet odtoků podzemní vody $Q_z$ [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] | 207              | 193             | -1,4          | -6,8     |
| Průměr výšek celkového odtoku R [mm]                     | 189,4            | 181,4           | -8,0          | -4,2     |

Tab. 3. Celkové rozdíly mezi daty z projektu „Rebalance...“ a daty získanými z bilančního vztahu  $R = P - E$ Tab. 3. Overall differences between data from the „Rebalance...“ project and data obtained from the  $R = P - E$  balance relationship

|  | <b>Rebalance</b> | <b>R = P - E</b> | <b>Rozdíl</b> | <b>%</b> |
|--|------------------|------------------|---------------|----------|
| Součet odtoků podzemní vody $Q_z$ [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] | 207              | 182              | -2,5          | -11,9    |
| Průměr výšek celkového odtoku R [mm]                     | 189,4            | 169,8            | -19,6         | -10,3    |

Tab. 4. Rozdíly dlouhodobých průměrů srážek a teplot mezi dvěma hodnocenými obdobími 1971–2010 a 1981–2019

Tab. 4. Differences in long-term averages of precipitation and temperature between the two assessed periods 1971–2010 and 1981–2019

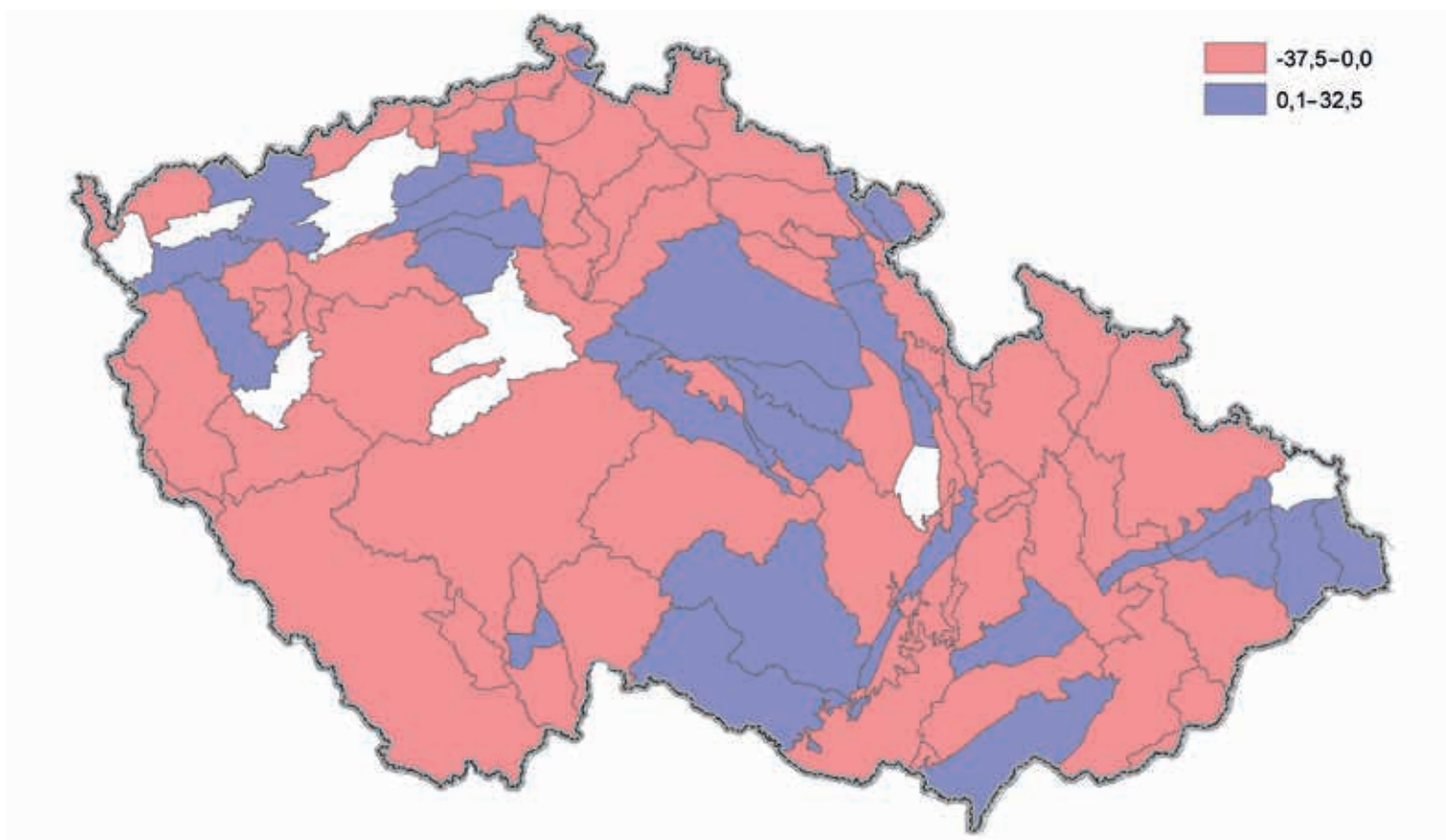
|  | <b>1971–2010</b> | <b>1981–2019</b> | <b>Rozdíl</b> | <b>%</b> |
|--|------------------|------------------|---------------|----------|
| Průměrná srážka na ploše HGR [mm . rok <sup>-1</sup> ] | 685,6            | 674,5            | -11,0         | -1,6     |
| Průměrná teplota na ploše HGR [°C]                     | 8,0              | 8,4              | 0,4           |          |

Při porovnání souhrnných výsledků provedených výpočtů s odpovídajícími hodnotami z předcházejícího zpracování v tab. 2–4 vyplývá, že ačkoli byly v nově použitém období 1981–2019 atmosférické srážky na území HGR menší průměrně jen o 1,6 %, odtok podzemní vody poklesl podle výpočtů srážkoodtokových vztahů průměrně o 6,8 %, podle vztahů založených na odhadu územního výparu o 11,9 %. Poklesy průměrné výšky celkového odtoku R o 8–19,6 mm se přijatelně shodují s výsledkem z článku [7], v němž je uvedena relace mezi oteplením o 1 °C a zmenšením výšky odtoku v rozmezí 15–45 mm. Tomu pro oteplení 0,4 °C odpovídá rozmezí 6–18 mm. Oteplení o 0,4 °C nastalo v povodí Labe po Děčín a Dyje po Dolní Věstonice, v povodí horní Moravy a v povodí Odry bylo menší.

Mapka na obr. 10 ukazuje oblasti, v nichž aplikace odhadu přírodních zdrojů podzemní vody postupem založeným na výpočtu průměrného odtoku z povodí podle rozdílu srážky a výparu vede k hodnotám větším, resp. menším než odpovídající údaje z výše uvedeného předcházejícího zpracování.

Obě alternativy výpočtu při porovnání s předcházejícími výsledky z projektu „Rebalance zásob podzemních vod“ vykazují podle dlouhodobých průměrů pokles průměrného základního odtoku, a tedy i průměrné dotace podzemních vod v období 1981–2019 oproti období 1971–2010 v rozmezí cca 7–12 %, což lze přisoudit při téměř nezměněné průměrné srážce zvýšení průměrné teploty o cca 0,4 °C. V plošném zobrazení převažují oblasti s poklesem. Při využívání výsledků je třeba vzít v úvahu, že porovnávané hodnoty nebyly získány shodným metodickým postupem a odhady pro jednotlivé HGR jsou zatíženy i nejistotou stanovení vstupních veličin.





Obr. 10. Rozdíly mezi odhady specifického základního odtoku podzemní vody stanoveného na základě odhadu odtoku jako rozdílu srážky a výparu a výsledků předcházejícího souhrnného zpracování vyjádřené v procentech; pro nevybarvené HGR nejsou z předcházejícího zpracování výsledky

Fig. 10. Differences of the estimate of specific base flow of groundwater determined from the estimate of runoff as the difference of precipitation and evaporation from the results of the previous overall assessment, expressed as a percentage; no results for uncoloured zones from the previous overall assessment

## ZÁVĚR

Popsaný postup zpracování odhaduje přírodní zdroje HGR odpovídající dotaci odtokového režimu ze srážek, nezahrnuje dotaci z vodních toků v kvartérních rajonech ani případné přetoky podzemní vody mezi rajony a kolektory. Odhad vychází ze stanovení celkového odtoku z HGR a jeho přepočtu na základní odtok pomocí baseflow indexu BFI. Pro stanovení celkového odtoku byly použity dvě alternativy výpočtu: podle regresního vztahu mezi srážkou a odtokem a podle bilančního rozdílu mezi srážkou a odhadnutým územním výparem. Postup založený na regresním odhadu výšky odtoku podle výšky srážek poskytuje odhady v průměru o 5–6 % větší než postup využívající odhad výparu.

Obě alternativy výpočtu při porovnání s předcházejícími výsledky z projektu „Rebilance zásob podzemních vod“ vykazují podle dlouhodobých průměrů pokles průměrného základního odtoku, a tedy i průměrné dotace podzemních vod v období 1981–2019 oproti období 1971–2010 v rozmezí cca 7–12 %, což lze přisoudit při téměř nezměněné průměrné srážce zvýšení průměrné teploty o cca 0,4 °C. Změny přírodních zdrojů podzemní vody vykazují regionální rozdíly. Vzhledem k tomu, že výsledky použité pro porovnání nebyly získány stejnými metodami, pohybují se změny pro jednotlivé HGR v rozmezí  $\pm 20$  %, a to u 61 %, resp. 72 % případů.

## Poděkování

Článek vznikl v rámci projektu „PERUN, aktivity 1.3 – Hodnocení stavu a vývoje přírodních zdrojů podzemních vod“. Projekt je financován Technologickou agenturou ČR.

## Literatura

- [1] KAŠPÁREK, L., DATEL, J. V. a kol. *Metodika a výsledky zpracování podkladů pro hodnocení kvantitativního stavu útvarů podzemních vod. Zpráva z projektu Rebilance zásob podzemních vod*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2013. 24 s.
- [2] KAŠPÁREK, L., VLNAS, 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.
- [3] Kašpárek, L., Datel, J. V. a kol. *Základní výchozí data pro zjednodušené stanovení velikosti přírodních zdrojů podzemní vody v 55 hydrogeologických rajonech. Zpráva z projektu Rebilance zásob podzemních vod*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 2014. 45 s.
- [4] OUDIN, L., HERVIEU, F., MICHEL, C., PERRIN, C., ANDRÉASSIAN, V., ANCTIL, F., LOUMAGNE, C. Which Potential Evapotranspiration Input for a Lumped Rainfall-Runoff Model? Part 2 – Towards a Simple and Efficient Potential Evapotranspiration Model for Rainfall-Runoff Modelling. *Journal of Hydrology*. 2005, 303(1–4), s. 290–306.
- [5] BERAN, A., HORÁČEK, S., HANEL, M. Zjednodušení metody výpočtu potenciální evapotranspirace v nové verzi modelu BILAN. *Vodohospodářské technicko-ekonomické informace, Mimořádné číslo*. 2011, III., příloha *Vodního hospodářství*. 2011, 11, s. 17–19.
- [6] KAŠPÁREK, L., NOVICKÝ, O. *Hodnocení a modelování srážkoodtokových vlastností povodí. Dílčí výzkumná zpráva*. Praha: VÚV TGM, v. v. i., 1999. 47 s.
- [7] 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.

## Autoři

### Ing. Ladislav Kašpárek, CSc.

✉ ladislav.kasperek@vuv.cz  
ORCID: 0000-0002-8394-9136

### Ing. Roman Kožín

✉ roman.kozin@vuv.cz  
ORCID: 0000-0002-5773-6567

### RNDr. Josef Vojtěch Datel, Ph.D.

✉ josef.datel@vuv.cz  
ORCID: 0000-0003-1451-0135

### Ing. Martina Peláková

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

Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka, Praha

Příspěvek prošel lektorským řízením.

DOI: 10.46555/VTEI.2022.07.003  
licence: CC BY-NC 4.0

## ESTIMATION OF NATURAL GROUNDWATER RESOURCES IN HYDROGEOLOGICAL ZONES IN THE CZECH REPUBLIC UNDER CHANGING CLIMATIC CONDITIONS 1981–2019

**KAŠPÁREK, L.; KOŽÍN, R.; DATEL, J. V.; PELÁKOVÁ, M.**

T. G. Masaryk Water Research Institute, Prague

**Key words:** hydrogeological zone – groundwater source – groundwater outflow

In the Czech Republic, hydrogeological zones were defined as early as 1965 as a part of the regional hydrogeological survey. A hydrogeological region (HGR) is defined as a unit with a similar hydrogeological conditions, defined tectonically and geologically, in whose territory a certain type of aquifer and groundwater circulation prevails. The boundaries of HGRs have been modified over time and their numerical hydrogeological characteristics have been determined by various methods, one of the basic characteristics is the amount of natural groundwater resources. Natural resources are the dynamic component of groundwater and are expressed in  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . The natural resources are determined by the recharge of water to the aquifer system (precipitation, groundwater overflows from other aquifers, natural infiltration of surface water, etc.). If the HGR is hydrogeologically closed, the long-term average of its recharge from precipitation and the long-term average of baseflow can be used as an estimate of the natural groundwater resource. In the „Groundwater Rebalance Project”, estimates of the natural groundwater resources in 152 hydrogeological zones in the Czech Republic were processed and are presented in the report [1]. The natural resources were determined by several different methods using data from 1971–2010 and 2000–2010, respectively.

Due to the intensive increase in the average annual air temperatures in the Czech Republic after 1980 and with special consideration of the dry period 2014–2019, we used data from the period 1981–2019 for the current estimation of natural groundwater resources in the hydrogeological zones. The applied method of calculation was based on the determination of the total runoff from the hydrogeological zone and its conversion to baseflow using the baseflow index (BFI), the regional elaboration of which is included in the study [2]. Two calculation alternatives were used to determine the total runoff: by the balance difference between rainfall and the estimated evapotranspiration and by the regression relationship between rainfall and runoff. Both types of relationships were derived from the results of observations of flows at the CHMI water gauging stations and from observations at rainfall and climate stations. For each hydrogeological zone, a relationship derived from data of the basins in which the zone lies and with which it is adjacent was used, taking into account the orographic similarity of the zone and the basin. Long-term averages of precipitation and temperature were calculated for the hydrogeological zones. According to these relationships, long-term average total runoff were determined by interpolation or extrapolation.

The results of the calculations showed that the method based on the regression of runoff on rainfall gives estimates on average 5 to 6 % greater than the method using evaporation estimates. Both calculation alternatives, when compared to the previous results from the „Groundwater Rebalance Project”, show a decrease in average baseflow, and corresponding decrease in average groundwater recharge, of approximately 7 to 12 % during the 1981–2019 period compared to the 1971–2010 period. The decrease can be attributed to an increase in average air temperature of approximately 0.4 °C between the compared periods, with nearly unchanged average precipitation. The observed changes in natural groundwater resources over the two periods show regional differences due to the hydrogeological characteristics not included. As the results were not obtained by the same methods, their use for intercomparison is limited. The results for the hydrogeological regions show changes in the interval  $\pm 20$  % for 61 % and 72 % of the cases, respectively, depending on the method used.