

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Vědy o Zemi



Jiří Sůsa

Základní odtok: příklad povodí potoka Mastník na Sedlčansku

Baseflow: the example of the Mastník stream basin in the Sedlčany region

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Mgr. Martin Slavík, Ph.D.

Praha, 2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 30. 7. 2024

Jiří Sůsa

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé práce Martinu Slavíkovi za veškeré rady a poznatky, které mi během psaní bakalářské práce poskytl. Také mu děkuji za ochotu a čas, který věnoval společným konzultacím a za trpělivost věnovanou opravám textu. Děkuji své rodině, přítelkyni a přátelům, kteří mi byli po dobu mého studia oporou.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá základním odtokem jakožto jednou ze složek podílejících se na celkovém odtoku, který je v hydrogeologii vymezován pro jednotlivá povodí i jiné bilanční oblasti. V rešeršní části je definován samotný pojem základního odtoku, včetně vysvětlení termínu specifický základní odtok. Jsou objasněny skutečnosti, proč je důležité základní odtok určovat, či na základě čeho se vymezuje. Největší pozornost je poté věnována metodám, pomocí kterých se základní odtok určuje. Pět metod je představeno blíže, několik dalších je poté popsáno v menším detailu. Závěr rešeršní části se prostřednictvím vybraných studií zaměřuje na velikost základního odtoku na území České republiky a faktory, které ho ovlivňují. Pro potřeby praktické části práce byla vybrána konkrétní oblast, a sice povodí potoka Mastník. V rámci této lokality byl s použitím několika předem vybraných metod určován základní odtok. Výsledné hodnoty jsou následně porovnány mezi sebou a také se studii a publikacemi uvedenými v rešeršní části, a to z hlediska jejich výstupů pro studované povodí. Rozdíly ve výsledcích jsou následně analyzovány a podrobeny diskusi.

Klíčová slova: základní odtok, base flow index, metody určování základního odtoku, povodí potoka Mastník

Abstract

This bachelor thesis focuses on baseflow as one of the components contributing to the total outflow, which is determined in hydrogeology for individual basins and other balance areas. In the literature review part, the concept of baseflow itself is defined, including an explanation of the term specific baseflow. It is explained why it is important to determine the baseflow and on what basis it is defined. Most attention is then given to the methods by which the baseflow is determined. Five methods are presented in more detail and several others are then described in less detail. Finally, the review part, through selected studies, focuses on the magnitude of the baseflow in the Czech Republic and the factors that influence it. For the purpose of the practical part of the thesis, a specific area was chosen, namely it was the basin of the Mastník stream. Within this locality, the baseflow was determined by using several selected methods. The results are then compared with each other and also with studies and publications mentioned in the review part, in terms of their outputs for the studied basin. Differences in the results are then analyzed and discussed.

Key words: baseflow, base flow index, methods of determining baseflow, Mastník stream basin

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Základní odtok.....	2
2.1 Base flow index.....	3
2.2 Index M.....	3
2.3 Metody určování základního odtoku.....	3
2.3.1 Killeho metoda.....	4
2.3.2 Castanyho metoda.....	6
2.3.3 Eckhardtův filtr.....	6
2.3.4 Metoda klouzavých minim.....	8
2.3.5 Určení základního odtoku ze srážek, celkového odtoku a BFI.....	8
2.3.6 Ostatní metody.....	10
2.4 Velikost základního odtoku v České republice.....	13
3 Popis studované oblasti a metodika určení základního odtoku.....	21
3.1 Studovaná oblast.....	21
3.1.1 Velikost základního odtoku ve studované oblasti.....	22
3.2 Použitá data a jejich zpracování.....	23
3.3 Metodika výpočtů základního odtoku.....	24
4 Výsledky a jejich srovnání dle jednotlivých metod.....	26
4.1 Srovnání výsledků.....	27
5 Diskuse.....	29
6 Závěr.....	32
7 Seznam použité literatury.....	34
8 Seznam obrázků.....	39
9 Seznam tabulek.....	40

1 Úvod

Základní odtok v hydrogeologii představuje významnou veličinu. Jedná se o důležitou složku celkového odtoku a vodní bilance. Je definován jako ta část celkového odtoku, která je tvořená dotací z podzemních vod (Kessl a Kněžek, 2000) a představuje dynamickou složku podzemních vod. Jeho sledování a určování má velký význam zejména ve vodohospodářství, z hlediska stanovení využitelných zásob podzemní vody. Dále jeho význam může spočívat například při monitoringu extrémních hydrologických situací, jako jsou povodně či sucho. Například během suchých období, kdy převládá výpar nad srážkami, je základní odtok do určité míry určen i rychlostí uvolňování vody ze statických zásobáren podzemní vody a jejich velikostí. Pokles základního odtoku v suchých obdobích tak může odrážet i změny ve statických zásobách podzemní vody (Bruthans et al., 2023).

Hlavní nevýhodou základního odtoku z hlediska jeho určování je nemožnost ho měřit přímo. Jeho hodnota se dá pouze systematicky odvozovat, například na základě dat o průtocích povrchových vodních toků (Eckhardt, 2005). Stanovuje se výpočtem pomocí konkrétních nepřímých metod (Kněžek, 1988). Počátky vývoje těchto metod sahají patrně již do poloviny 20. století. Od té doby toto odvětví hydrologie zabývající se základním odtokem a jeho určováním zaznamenalo významný rozvoj. Postupem času byly vymyšleny nové metody či se zdokonalovaly ty stávající. Jednotlivé metody často nesou jména svých autorů či jsou pojmenované podle hlavního principu, na kterém fungují. Tyto metody mají každá své výhody i nevýhody, přičemž výsledky základního odtoku získané z jednotlivých metod se mohou zásadně lišit.

Cílem rešeršní části této bakalářské práce je představení vybraných metod využívaných k určování základního odtoku. Součástí toho je popsání principů, na základě kterých jednotlivé metody základní odtok určují, a jsou popsány jejich výhody a nevýhody. Dílčím cílem je představení nejdůležitějších publikací a studií, které se v minulosti zabývaly velikostí základního odtoku na území České republiky a jeho prostorovou i časovou proměnlivostí. Praktická část je věnována povodí potoka Mastník, kde zejména v suchých obdobích roku je základní odtok relativně nízký. Cílem praktické části je pomocí čtyř zvolených metod určit základní odtok v zájmové oblasti, získané výsledky srovnat mezi sebou i s dostupnými, již dříve stanovenými hodnotami základního odtoku, a případné rozdíly diskutovat.

2 Základní odtok

Základní odtok je jednou ze složek celkového odtoku. Termínem odtok je myšleno množství vody, které odteče z dané plochy za určité časové období (Kříž, 1983). Celkový odtok z povodí, který je reprezentován průtokem v závěrovém profilu hlavního toku povodí, se skládá z několika dílčích typů odtoku (Olmer et al., 1972; Kříž, 1983):

- 1) povrchový odtok – voda tekoucí po zemském povrchu, nevsakuje se, také označován jako „ron“
- 2) hypodermický odtok – odtok vody z podpovrchové vrstvy půdy, z nenasycené zóny (nad hladinou podzemní vody)
- 3) základní odtok – odtok z nasycené zóny, příspěvek podzemní vody do celkového odtoku

V praxi je samostatné vyčlenění povrchového a hypodermického odtoku velmi složité, proto se často v rámci celkového odtoku zjednodušeně vymezují pouze dvě složky – odtok základní a "přímý", který právě dva zmiňované typy slučuje (Krásný et al., 1982).

Základní odtok tvoří tu část odtoku, která pochází z podzemní vody (Hall, 1968) a je dynamickou veličinou. Z dlouhodobého hlediska (ve víceletém průměru) je obvykle považován za rovný přírodním zdrojům podzemní vody (Prchalová a Olmer, 2001). To, jakou měrou se podílí na celkové hydrologické bilanci v povodí, je dáno mnoha faktory, ať už jsou to geologické či hydrogeologické poměry dané oblasti (Krásný et al., 1982), topografie, klima (Lacey a Grayson, 1998) či například evapotranspirace (Bruthans et al., 2020).

Podíl přímého a základního odtoku na celkovém odtoku je proměnlivý v čase i prostoru (Wittenberg a Sivapalan, 1999), přičemž základní odtok se podílí větší měrou zejména při nízkých vodních stavech (Chow et al., 1988; Smakhtin, 2001) a při vodních stavech nejnižších je dokonce celkový odtok tvořen převážně základním odtokem (Castany et al., 1970). Nicméně základní odtok často významně přispívá do průtoku povrchových toků nejen v období nízkých vodních stavů, ale i během povodní (Wittenberg, 2003), jak bylo opakovaně prokázáno pomocí stopovacích látek (např. Chapman a Maxwell, 1996).

Základní odtok jako takový se uvádí v jednotkách m^3/s či l/s . V praxi se však pro jeho kvantifikaci více využívá veličina od něj odvozená – specifický základní odtok, uváděný v jednotkách l/s/km^2 . Jedná se o podíl prostého základního odtoku (v l/s) a rozlohy oblasti (v km^2), pro kterou je základní odtok počítán. Nejčastěji se určuje na úrovni povodí vodních toků

či hydrogeologických rajonů. Například všechny mapové výstupy publikací, které jsou popsány dále v podkapitole 2.4, zobrazují právě hodnoty specifického základního odtoku.

2.1 Base flow index

Base flow index (BFI) je důležitý parametr, který nám říká, jakou měrou se z dlouhodobého hlediska podílí základní odtok na celkovém odtoku. Uvádí se jako desetinné číslo nebo v procentech. Získá se jako podíl základního odtoku a celkového odtoku za stejné časové období. BFI je široce používaný parametr, protože je pokládán za dobrý ukazatel vlivu geologie na odtok (Smakhtin, 2001). Na území České republiky nabývá BFI hodnot zhruba od 0,3 do 0,9 (Bruthans et al., 2023).

2.2 Index M

Index M vyjadřuje poměr základního odtoku v nejsušším roce za určité časové období (například desetiletí) ku dlouhodobému průměrnému základnímu odtoku za totožný časový interval (Bruthans et al., 2023). Podobně jako BFI se vždy určuje pro časovou řadu minimálně několika let. Index M je uváděn jako desetinné číslo nebo v procentech. Z daného časového období se vybere nejsušší rok, pro něj se určí průměrný základní odtok a ten se vydělí dlouhodobým průměrným základním odtokem. Platí tedy, že čím nižší hodnoty index M dosahuje, tím je pokles základního odtoku v suchém období oproti dlouhodobému průměru základního odtoku výraznější. Vyšší hodnota indexu značí naopak méně výrazný pokles. Na území České republiky nabývá hodnot zhruba od 0,3 do 0,7. Narozdíl od BFI nemá takový vliv litologie jako spíše nadmořská výška. Nejnižších hodnot nabývá index M v nejnižších polohách, nejvyšších hodnot naopak ve vyšších nadmořských výškách, kde jsou každoročně vyšší srážkové úhrny. U nás jde např. o pohoří Krkonoše, Šumava či Krušné Hory (Bruthans et al., 2023).

2.3 Metody určování základního odtoku

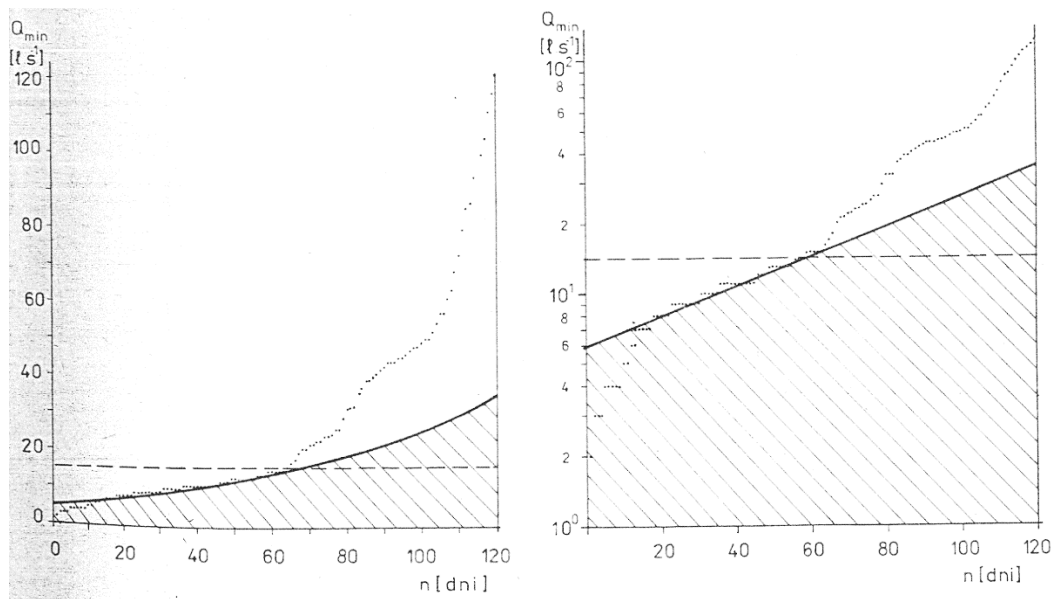
Základní odtok nejde měřit přímo, nelze jej přímo pozorovat. K jeho určení se využívají různé metody, nejčastěji pracující s nízkými či nejnižšími hodnotami celkového odtoku, respektive

průtoku povrchových toků. V následujících podkapitolách jsou popsány metody určování základního odtoku, které se určitým způsobem vztahují k praktické části této bakalářské práce.

2.3.1 Killeho metoda

Jednou z hlavních a nejpoužívanějších metod určování základního odtoku je či ještě do nedávné doby byla metoda vyvinutá v roce 1970 Němcem Konradem Killem. Ta vychází z nejmenších hodnot průměrných denních průtoků na povrchových vodních tocích v jednotlivých měsících za minimálně desetileté časové období. Sám autor ovšem doporučuje použít data z delšího časového úseku.

Principem Killeho metody (1970) je určení dlouhodobého základního odtoku z minimálních měsíčních průtoků. Pro každý měsíc sledovaného období se určí nejmenší průměrný denní průtok. Tyto hodnoty se následně seřadí vzestupně a vynesou do pravoúhlé sítě/grafu s lineárním rozdělením souřadnic. Spodní část takto vynesené množiny bodů lze proložit dělicí přímkou, která odděluje základní odtok od celkového. Ten základní představuje plocha pod přímkou (Fendeková, 1986) a lze ho vypočítat dosazením střední pořadové hodnoty minimálních měsíčních průtoků do parametrů rovnice proložené vyrovnávací přímkou. Jelikož ve valné většině případů mají hodnoty minimálních měsíčních průtoků asymetrické rozdělení početnosti, Kille (1970) graf přetransformoval do semilogaritmického měřítka, přičemž hodnoty na ose x (dny) jsou v původních lineárních souřadnicích, zatímco hodnoty na ose y (min. měsíční průtoky) v těch logaritmických (příklad grafů v lineárních i semilogaritmických souřadnicích na obr. 1). V tomto grafu následně zpracovatel vymeze kvazilineární úsek, čímž do této metody vstupuje jediný subjektivní krok. Tímto úsekem se opět proloží vyrovnávací přímkou, která podobně jako v grafu lineárním odděluje základní odtok od toho celkového. Následným přepočítáním logaritmických hodnot vyrovnávací přímkou zpět do lineárního měřítka vznikne v původním grafu exponenciála, která v horní části množiny probíhá mezi původními hodnotami měsíčních minim a pomyslně prodlouženou dělicí přímkou. K výsledné hodnotě základního odtoku lze poté dospět zprůměrováním hodnot průtoků těchto dvou částí grafu, tedy dolní části množiny s přímkou a horní části s exponenciálou (Fendeková a Fendek, 1999).



Obr. 1: Seřazení minimálních měsíčních hodnot průměrných denních průtoků Q_{min} (vlevo) a jejich zobrazení v semilogaritmickém grafu (vpravo). Převzato od Fendekové (1986).

Metoda později doznala několika modifikací. Například Krásný et al. (1982) v práci věnující se odtoku podzemní vody na území bývalého Československa upravili metodu tak, že nepoužili kombinaci přímky ve spodní části grafu a exponenciály v horní části. Vycházeli pouze z exponenciály vzniklé napříč celou množinou hodnot v lineární soustavě po převedení vyrovnávací přímky vybraným kvazilineárním úsekem v semilogaritmickém grafu (Fendeková a Fendek, 1999). Pomocí této exponenciální křivky následně vymezovali hodnoty základního odtoku. Tento způsob se později stal velmi uznávaným a řada dalších autorů (např. Kříž, 1983; Hanzel et al., 1984; Fendeková, 1986) se k němu ve svých pracích přiklonila spíše než k původní Killeho metodě.

Killeho metoda má celou řadu výhod. Jak uvádí Krásný et al. (1982), jsou to zejména jednoduchost a dostupnost potřebných dat, jejich poměrně rychlé zpracování, možnost charakterizace podzemního odtoku na regionální úrovni a objektivní proces zpracování, čímž je zajištěno obdržení stejných či nepříliš odlišných výsledků nezávisle na zpracovateli. Dle Kadlecové a Olmera (2013) se také jedná o metodu velmi osvědčenou, přinášející reprezentativní výsledky. Nevýhodou metody je poté získání pouze jedné výsledné hodnoty za dlouhé časové období (Bruthans et al., 2023), je tedy vhodná jen pro vymezování dlouhodobých průměrných hodnot základního odtoku. Killeho metoda bývá také nazývána jako Metoda minimálních měsíčních průtoků.

2.3.2 Castanyho metoda

Další metodou je Castanyho metoda (1970). Podobně jako Killeho metoda je i tato pojmenovaná po svém autorovi a pochází z přelomu 60. a 70. let minulého století. Vstupními daty jsou opět průměrné denní průtoky z minimálně desetiletého kontinuálního měření na příslušném vodním toku. Nejprve se pro každý rok vyhledá období 30 po sobě jdoucích dnů s nejnižšími průměrnými denními průtoky a z těchto hodnot se vypočítá aritmetický průměr. Ten představuje průměrný odtok v období nejnižšího stavu v roce (Castany et al., 1970; Krásný et al., 1982). Za dlouhodobý základní odtok se poté považuje hodnota mediánu z takto vypočítaných aritmetických průměrů z celé časové řady.

Pro rychlejší získání výsledného základního odtoku lze použít jednodušší variantu této metody. Pro všechny měsíce časové řady se z údajů o průměrných denních průtocích spočítá průměrný měsíční průtok. Následně se vybere nejnižší průměrný měsíční průtok v každém roce. Z takto určených hodnot z celého sledovaného období se vypočítá prostý aritmetický průměr a tím se získá hodnota základního odtoku. I pro tuto jednodušší variantu platí podmínka vstupních dat z minimálně 10letého období. Castanyho metoda slouží, podobně jako Killeho, pro určení dlouhodobé průměrné hodnoty základního odtoku. Výhodou je jednoduchost a nenáročnost na vstupní data. Castanyho metodě se někdy říká také Metoda stanovení základního odtoku na základě nejnižších průtoků v povrchových tocích.

2.3.3 Eckhardtův filtr

Eckhardtova metoda je jednou z velmi využívaných v zahraničí i u nás. Jako většina ostatních metod pracuje s průměrnými denními průtoky určitého časového období. Poprvé její princip popsal Eckhardt v roce 2005. V podstatě se jedná o zautomatizovanou separaci základního odtoku z hydrogramu pomocí předem nastavených algoritmů. Eckhardtův filtr patří mezi tzv. digitální filtry, které umožňují separaci signálu o rozdílné frekvenci. V principu tak jde o odfiltrování vysokofrekvenčního signálu v celkovém odtoku a tím oddělení rychlého od základního odtoku (Arnold a Allen, 1999).

Eckhardt (2005) přišel se způsobem, pomocí kterého se z hydrogramu dají vyčlenit odtok základní a odtok přímý jako samostatné složky. Vycházel z předpokladu, že odtok vody z kolektoru je lineárně závislý na množství zásob podzemní vody (Kadlecová et al., 2010). Filtr má 2 parametry: recesní koeficient poklesu průtoku v čase α a BFI_{max} . Zatímco recesní koeficient lze objektivně stanovit analýzou výtokových čar, posouzení BFI_{max} , který je dán

hydrologickými, hydrogeologickými či morfologickými vlastnostmi daného prostředí (Eckhardt, 2005), je poněkud komplexnější a vnáší do metody jistou míru subjektivity. Odvození obou těchto parametrů je poměrně náročné jak z hlediska metodického, tak i časového (Bruthans et al., 2023). Vztah pro vyčlenění základního odtoku (rovnice 1) Eckhardt definoval následovně:

$$b_t = \frac{(1 - BFI_{\max}) \times \alpha \times b_{t-1} + (1 - \alpha) \times BFI_{\max} \times Q_t}{1 - \alpha \times BFI_{\max}} \quad (1)$$

kde: b – základní odtok (m^3/s)

t – časový krok (např. den), pro který je základní odtok počítán

BFI_{\max} – maximální hodnota base flow indexu

α – recesní koeficient podzemní vody

Q_t – celkový odtok (m^3/s)

Eckhardt (2005) nebyl zdaleka prvním, kdo přišel s principem separace hydrogramu podle předem definovaného algoritmu. Hned se třemi metodami přišli Pettyjohn a Henning (1979). Lyne a Hollick (1979) vyvinuli metodu založenou na separaci elektrického signálu o různé frekvenci, díky čemuž byli schopni vymezit základní odtok vůči přímému. Tuto metodu posléze využili a případně zdokonalili např. Chapman (1991) či Arnold a Allen (1999). Boughton (1993) přišel s filtrem, který pracuje s hladinou podzemní vody. Eckhardtův filtr se od řady předchozích jednoparametrových filtrů liší zejména tím, že obsahuje parametry dva.

Metodu v současnosti využívá např. Český hydrometeorologický ústav (ČHMÚ) pro stanovování přírodních zdrojů podzemních vod (Bruthans et al., 2023). Narozdíl od většiny ostatních metod se jedná o metodu poněkud subjektivní, jelikož nastavený parametr BFI_{\max} pro výpočet se může lišit v závislosti na volbě jednotlivých uživatelů. Nicméně např. Kadlecová et al. (2010) uvádí, že se jedná o metodu objektivní, jelikož oba parametry jsou předem dané: recesní koeficient vyplývá z časové řady celkového odtoku a BFI_{\max} z vlastností prostředí. Posouzení objektivnosti metody je tedy závislé na úhlu pohledu. Nespornou výhodou je dobré

časové rozlišení této metody (Kadlecová a Olmer, 2013). Díky zpracování dat o průměrných denních průtocích lze obdržet statistické charakteristiky celé časové řady základního odtoku.

2.3.4 Metoda klouzavých minim

Další hojně využívanou metodou (zejména v poslední době) je metoda klouzavých minim (Kašpárek a Datel, 2015), někdy také nazývána Kašpárkova metoda, která opět využívá data o průměrných denních průtocích. Na tyto hodnoty je aplikováno klouzavé minimum, které je následně vyhlazeno klouzavým průměrem. Celkový aritmetický průměr vypočítaný ze všech klouzavých průměrů představuje hodnotu základního odtoku za dané časové období. Jediný parametr, který zde uživatel určuje, je velikost klouzavého období (Bruthans et al., 2023). V současnosti se nejvíce využívá aplikace klouzavých oken o délce jednoho měsíce, tedy 30 dní.

Metoda je velmi objektivní, jelikož jediným parametrem, který volí zpracovatel, je právě zmiňovaná délka klouzavého období, metoda je jednoduchá a relativně rychle zpracovatelná. Další výhodou, například oproti starším metodám Killeho či Castanyho, které určují pouze dlouhodobé průměry základního odtoku, je možnost využití metody pro stanovení proměnlivosti základního odtoku na měsíční bázi. Bruthans et al. (2023) uvádí, že tato skutečnost může být v současnosti velmi cenná, jelikož hodnoty odtoku mohou vinou častějších klimatických změn výrazně kolísat v daleko kratším čase.

Inspiraci pro tento postup našli Kašpárek a Datel. (2015) ve Velké Británii, kde její variantu využívá např. UKIH („United Kingdom Institute of Hydrology“). Jedním z prvních, kdo princip této metody popsal, byl H. Aksoy (2009). U nás v současnosti Kašpárkovu metodu hojně využívá pro své účely Výzkumný ústav vodohospodářský T. G. Masaryka (VÚV TGM), použita byla například i pro výpočet základního odtoku ve studentských pracích Knödl (2021) a Nymisy (2023).

2.3.5 Určení základního odtoku ze srážek, celkového odtoku a BFI

Poslední popsanou metodou, respektive spíše celým komplexním postupem získání základního odtoku, je princip, který je popsán Bruthansem et al. (2023) a který byl využit k tvorbě map průměrného základního odtoku pro období 1991–2020, základního odtoku v období sucha a

mapy zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu (více viz podkapitola 2.4). Tyto mapy jsou volně přístupné na webovém portálu České geologické služby (ČGS).

Při tvorbě map se vycházelo z předpokladu, že existuje těsný vztah mezi celkovým odtokem z povodí a průměrným dlouhodobým úhrnem srážek (Kašpárek a Datel, 2014). Nejdříve byl metodou klouzavých minim (Kašpárkovou metodou) separován základní odtok. Bruthans et al. (2023) však uvádí, že pouze tímto způsobem nelze získat zcela přesné a reprezentativní hodnoty pro celé území ČR, proto bylo zapotřebí vyvinutí komplexnějšího způsobu/vztahu. Ze základního odtoku získaného metodou klouzavých minim byl stanoven BFI pro jednotlivé rajony ČR a poté bylo využito těsného regresního vztahu mezi srážkami a celkovým odtokem. Ten je popsán přiloženou rovnicí 2. Hodnoty průměrných srážkových úhrnů byly vzaty z let 1971–2000 (Bruthans et al., 2023).

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

kde: $ZO_{\text{prům}}$ – průměrný základní odtok (l/s/km²)

(srážky) – dlouhodobý průměrný úhrn srážek (mm/rok)

BFI – base flow index získaný pomocí metody klouzavých minim

a, b, c – bezrozměrné parametry rovnic udávající vztah mezi průměrným úhrnem srážek a celkovým odtokem

Touto rovnicí lze získat regionálně proměnný průměrný základní odtok. Je třeba doplnit, že toto je obecná podoba rovnice. Bruthans et al. (2023) dále vymezili tři skupiny oblastí, na které byly samostatně aplikovány tři sady různých parametrů. Jednalo se o rajony: a) flyše; b) mimo flyš se srážkovým úhrnem nad 550 mm/rok; c) mimo flyš se srážkovým úhrnem pod 550 mm/rok. Pro varianty b) a c) se použila empirická data a pro variantu a) byla rovnice upravena do podoby: $ZO_{\text{prům}} = (2 \times 10^{-5} \times (\text{srážky})^2 + 0,0076 \times (\text{srážky}) - 0,1855) \times \text{BFI}$. Oblasti s horninami flyše se ukázaly být problematické z důvodu vykazování nižších hodnot odtoku při stejném srážkovém úhrnu oproti ostatním typům hornin, proto nemohl být vztah celkového odtoku a srážek vyjádřen pro všechny typy hydrogeologických rajonů (z hlediska geologie) jednotně. Příčinu této odlišnosti flyše lze hledat spíše v klimatických poměrech než v geologických,

jelikož se flyšové horniny vyskytují pouze v Karpatech na hranicích se Slovenskem, zatímco ostatní typy hornin se vyskytují na daleko rozsáhlejší území v rámci ČR (Bruthans et al., 2023).

Pro potřeby mapy základního odtoku za sucha posloužil index M (podíl základního odtoku v nejsušším roce a dlouhodobého základního odtoku). Nejsušší rok byl hledán v období 2010 až 2019. Jako dlouhodobý základní odtok se pro jednotlivé oblasti využily výsledky metody klouzavých minim a z nich byl poté stanoven index M pro každou vodoměrnou stanici ČHMÚ. Výsledná mapa je poté kombinací regresních vztahů srážek s celkovým odtokem, BFI a právě M indexů jednotlivých hydrogeologických rajonů (Bruthans et al., 2023).

2.3.6 Ostatní metody

Metod určování základního odtoku existuje mnohem více. V menším detailu než v předchozích podkapitolách je řada z nich popsána na následujících řádcích. Tyto metody se přímo nevztahují k mé praktické části práce.

Metody separace (rozčlenění) hydrogramu patří mezi nejstarší. Jsou založené na předpokladu, že průtok v určitém profilu vodního toku je tvořen všemi dílčími typy odtoku – povrchovým, hypodermickým i podzemním (Kliner et al., 1978). Základním principem metody je rozdělení hydrogramu horizontální čarou spojující počátek průtokové vlny a její konec. Průtokovou vlnu zde představuje oblast dočasného zvýšení a následného snížení průtoku povrchového toku. Plocha nad dělicí čarou představuje přímý odtok, zatímco plocha pod čarou odpovídá hledanému základnímu odtoku. V průběhu 2. poloviny minulého století bylo vyvinuto několik variant (např. Natermann, 1951; Wundt, 1958; Kudelin, 1960), které se liší ve způsobu vyčlenění hledaného základního odtoku z průtokové křivky v hydrogramu. Některé alternativy například pracují s konstruovanou dělicí čarou zohledňující tvar průtokové vlny. Kudelinova (1960) modifikace vycházela také z určité závislosti celkového odtoku na sezonalitě klimatu a z existence vyšší průtokové vlny v jarním období. Pro všechny varianty metody platí, že mohou být velmi pracné a také subjektivní, díky čemuž se dnes prakticky již nevyužívají.

Metoda Klinera a Kněžka (1974) je založena na předpokladu závislosti výšky hladiny podzemní vody a výšky hladiny v povrchovém toku. Vynesením hodnot této dvojice veličin spolu s hodnotami průtoků lze následně pomocí obalové čáry ve výsledném grafu vyčlenit jednotlivé typy odtoků, včetně základního. U nás se jedná o metodu velmi rozšířenou, doposud

jí bylo pokryto přibližně tři čtvrtiny území ČR (Kliner a Kněžek, 1974). Jejimi výhodami jsou objektivita a obdržení reprezentativních výsledků i při aplikaci na krátké časové úseky. Metoda se však nedá využít pro každé povodí, je vhodnější pro ta s menší rozlohou, a také se nelze obejít bez přítomnosti použitelného pozorovacího vrtu v povodí (Kadlecová a Olmer, 2013).

Metoda hydrologické bilance vychází z obecné rovnice hydrologické bilance, která obsahuje řadu členů (Kadlecová a Olmer, 2013), jež lze shrnout pod pojmy: atmosférické srážky, evapotranspirace, přímý odtok, přítoky povrchových i podzemních vod. Některé lze pro zjednodušení zanedbat. Jde o metodu poměrně jednoduchou, ovšem její nevýhodou je požadavek na územní i časovou srovnatelnost a poměrně obtížná stanovitelnost základních členů rovnice – srážek, evapotranspirace a přímého odtoku. Reprezentativní výstupy lze získat pouze za předpokladu, je-li hydrogeologické povodí srovnatelné s hydrologickým (Kadlecová et al., 2010).

Metoda proudu představuje nenáročnou alternativu určení dynamické části zdrojů podzemních vod v místech vodárenského využití (Kadlecová et al., 2010). Vztahy, které definoval Kliner et al. (1978), vycházejí z Darcyho filtračního zákona a mají tuto podobu:

$$Q_d = i \times k_f \times F \quad \text{nebo} \quad Q_d = i \times k_t \times b \quad (3)$$

kde: Q_d – průtok podzemní vody

i – střední sklon hladiny podzemní vody

k_f – koeficient hydraulické vodivosti

k_t – koeficient transmisivity

F – střední hodnota průtočného profilu (m^2)

b – šířka průtočného profilu (m)

Platí, že průtok vody daným profilem kolísá v závislosti na sezónních výkyvech srážek, evapotranspirace či podzemního odtoku. Z tohoto důvodu není vhodné použití metody pro časové období kratší 10 let. Metoda je také vhodná pouze pro prostředí s jednoduchými okrajovými a geologickými podmínkami, pro které lze přesněji stanovit vstupní údaje (Kliner

et al., 1978). Kněžek (1988) dále uvádí, že metodu lze aplikovat pouze pro oblasti s jednoduchými přírodními poměry, k nimž neřadí např. území hydrogeologických masívů.

Metoda postupných profilových průtoků (PPP) je poměrně ojedinělým případem, jelikož pomocí ní lze získat prostorové rozložení základního odtoku v povodí či v jiné studované oblasti. Princip, jak ho vypracoval Slepíčka (1962), spočívá v grafické interpretaci – aplikaci čar PPP. Ty vyjadřují, jak se vlivem všech souhrnných faktorů ovlivňujících hydrologický režim daného povodí mění průtok vodního toku směrem od pramene k ústí. V reálných přírodních podmínkách není vývoj průtoků v podélném profilu toku rovnoměrný, čáry PPP tak nikdy nemohou mít přímkový charakter, nýbrž výsledkem jsou vždy křivky nepravidelného tvaru. Metoda tak zobrazuje ty úseky, ve kterých dochází k přítoku podzemní vody do povrchového toku (tj. základní odtok). Jistou nevýhodou metody je, že je aplikovatelná pouze při delších časových úsecích beze srážek, kdy primární vliv na průtok má podzemní voda a řada ostatních faktorů je zanedbatelná. Tato metoda je náročná časově i na provedení, protože vyžaduje opakované terénní měření průtoků povrchových toků (Kadlecová et al., 2010).

Plotnikovova metoda byla vyvinuta v Rusku již koncem 50. let minulého století. Empirický bilanční vztah, který Plotnikov (1959) definoval, vychází z průměrných atmosférických srážek a odhadu jejich infiltrace na daném území a má tuto podobu:

$$Q_z = 1000 \times S \times F \times a \quad (4)$$

kde: Q_z – základní odtok

S – roční úhrn atmosférických srážek (mm)

F – infiltrační plocha (km²)

a – součinitel infiltrace (podíl infiltrovaných atmosférických srážek k celkovému ročnímu srážkovému úhrnu)

Problematickým prvkem vztahu je součinitel infiltrace, který je značně proměnný v čase i prostoru, jelikož závisí na řadě faktorů, jako jsou např. propustnost povrchu, klima, vegetace,

tvar reliéfu apod. (Kadlecová et al., 2010). Odhadování tohoto koeficientu může být hrubé a subjektivní, což je nevýhodou této metody.

Metoda GROUND, neboli „separation of GROUNDwater runoff“, jak ji vymyslel Jain (1997), je empiricky odvozeným principem pro oddělení základního odtoku od přímého. Jako řada dalších metod používá data o průměrných denních průtocích, aplikovatelná je i na krátké časové řady. Vstupním parametrem algoritmu, který metoda využívá, je koeficient přírůstku základního odtoku, vnitřními parametry jsou poté přírůstek základního odtoku a logická proměnná. Zpracovatel jako výsledek obdrží dvě řady středních denních průtoků – jedna reprezentuje přímý odtok, druhá reprezentuje odtok základní. Dle Kulhavého et al. (2001) je metoda GROUND spíše vhodná pouze pro separaci přímého odtoku od základního, jelikož vliv na celkový odtok mají i atmosférické jevy, na které základní odtok nemusí reagovat hned a jeho přesné vymezení může být nedostatečně spolehlivé a odpovídající.

Metoda MGPM („modifikovaná graficko-početní metoda) pracuje opět s průměrnými denními průtoky a podobně jako předchozí metoda i s předpokladem, že zřetelnější odtokové vlny mají příčinu v určité srážkové epizodě. Nástrojem metody je algoritmus, který z celkového odtoku separuje tu část, která přímo reaguje na příčinnou srážku. Výpočetní vztah hledá pomocí prvních derivací podle času směrnice úseků v jednotlivých intervalech, které jsou poté rozříděny do kategorií podle znaménka směrnice. Tím se určí uzlové body průběhu základního odtoku a ten je následně aproximován přechodovou parabolou. Metoda vychází ze skutečnosti, že základní odtok je tlumen půdním a horninovým prostředím, jeho průběh je relativně plynulý a závisí na dlouhodobějším vývoji hydrologické bilance v dané oblasti (Kulhavý et al., 2001). Další analogií s metodou GROUND je výhoda aplikovatelnosti i na kratší časové řady, nevýhodou je vhodnost použití pouze pro plošně malá povodí.

2.4 Velikost základního odtoku v České republice

Tato podkapitola je věnována základnímu odtoku na našem území a několika pracím hydrogeologů a hydrogeologických institucí, kteří se v minulosti základním odtokem zabývali z hlediska jeho velikosti, jeho odlišnosti pro jednotlivá území, určování řídicích faktorů pro jeho výsledné hodnoty atd.

První významnou prací je publikace z první poloviny 80. let minulého století „Odtok podzemní vody na území Československa“ (Krásný et al., 1982), která vyšla pod záštitou ČHMÚ. Celý

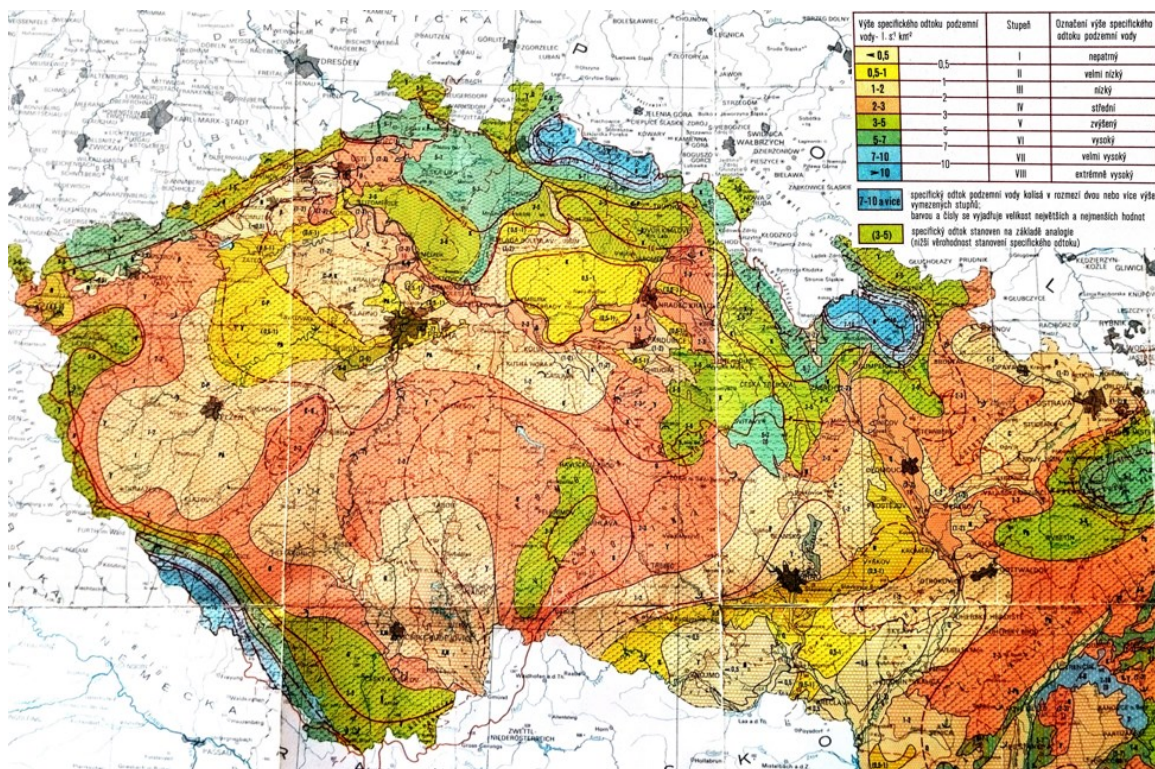
projekt byl součástí mezinárodního hydrologického programu UNESCO na téma „Mapování podzemního odtoku střední a východní Evropy“ a zúčastnily se jej i další státy bývalého východního bloku. Výsledkem takřka desetiletého sběru a zpracování dat byla 50stránková publikace, shrnující činnost hydrogeologických i hydrologických pracovníků, použitou metodiku, regionální vymezení základního odtoku atd. a hlavně také „Mapa odtoku podzemní vody ČSSR“ (měřítko 1:1 000 000), která je vůbec jedním z prvních kartografických vyjádření základního odtoku na světě, hovoříme-li o zpracování celého státního území.

Pro finální kvantifikaci základního odtoku neboli „podzemního“, jak Krásný et al. (1982) uvádí, posloužila autorskému kolektivu metoda Killeho (její detailnější popis v kapitole 2.3.1), která pracuje s daty o průměrných denních průtocích vodních toků, konkrétně s nejnižšími měsíčními průtoky. K tomuto účelu posloužily údaje z přibližně 250 vodoměrných stanic nacházejících se na území tehdejšího Československa. Je nutné zmínit, že výsledné hodnoty v této mapě nejsou uvedeny jako dlouhodobý průměrný základní odtok, ale jsou převedeny na dlouhodobý specifický odtok podzemní vody (tedy specifický základní odtok). Jeho hodnoty, stupně a označení, jak je autoři vymezili, jsou uvedeny v následující tabulce (tab. 1):

Tab. 1: Klasifikace dlouhodobého specifického odtoku podzemní vody dle Krásného et al. (1982).

Výše specifického odtoku podzemní vody (l/s/km²)	Stupeň	Označení specifického odtoku podzemní vody
<0,5	I	nepatrný
0,5–1	II	velmi nízký
1–2	III	nízký
2–3	IV	střední
3–5	V	zvýšený
5–7	VI	vysoký
7–10	VII	velmi vysoký
>10	VIII	extrémně vysoký

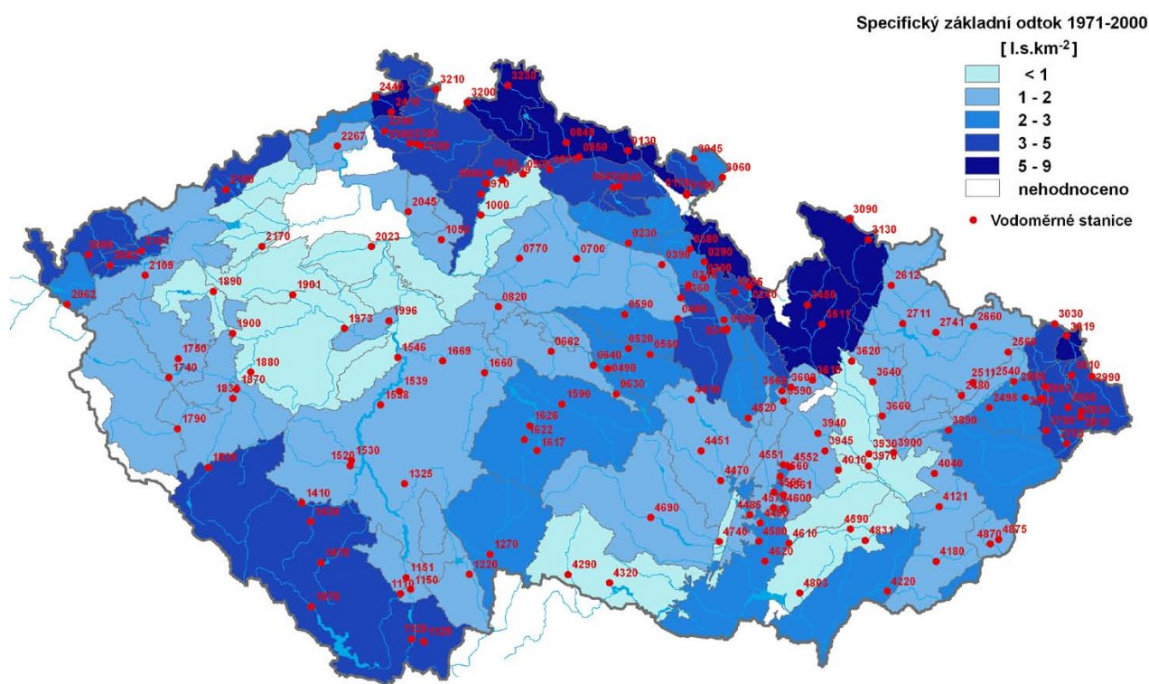
Hlavní náplní mapy (viz obr. 2) je kromě průměrného specifického podzemního odtoku také zobrazení vymezených zvodněných systémů – kolektorů. Typické hydrogeologické vlastnosti, dané typy horninového prostředí v jednotlivých kolektorech, jsou hlavními určujícími faktory pro tvorbu podzemního odtoku (Krásný et al., 1982). Těmi dalšími jsou např. faktory klimatické či morfologické, ovšem v našich podmínkách považují autoři tohoto projektu za primárně rozhodující právě hydrogeologické činitele.



Obr. 2: Výsledná mapa odtoku podzemní vody ČSSR (s výřezem na ČR). Ofoceno z Krásného et al. (1982).

Vlnas (2011) na začátku minulé dekády publikoval práci „Návrh metodiky stanovení přírodních zdrojů podzemních vod z průtoků povrchových toků“, ve které pro separaci základního odtoku vycházel z metody Eckhardtova filtru. V příspěvku vyčíslil základní odtok pro vodoměrné stanice a následně hodnoty přepočtl na úroveň hydrogeologických rajonů nebo jiných bilančních územních jednotek. Součástí jeho práce bylo nejdříve stanovení obou vstupních parametrů pro Eckhardtův algoritmus (viz podkapitola 2.3.3) – recesního koeficientu poklesu průtoku v čase α a BFI_{max} . Ty byly určeny celkem pro 161 vodoměrných stanic ČHMÚ.

Sledovaným obdobím byly roky 1971–2010. Recesní koeficient byl odvozen objektivně analýzou výtokových čar za nízkých průtoků. Parametr BFI_{max} byl odhadnut podle hydrologických, hydrogeologických a morfologických charakteristik daných bilančních celků a následně doladěn tak, aby odpovídal podmínkám časového průběhu separovaného základního odtoku. To v praxi znamená, že v období nízkých průtoků se základní odtok musí co nejvíce blížit celkovému a v době zvýšených průtoků ho nesmí překračovat (Vlnas, 2011). Výsledná mapa specifického základního odtoku dle Vlnase (2011) je na následujícím obrázku (obr. 3).



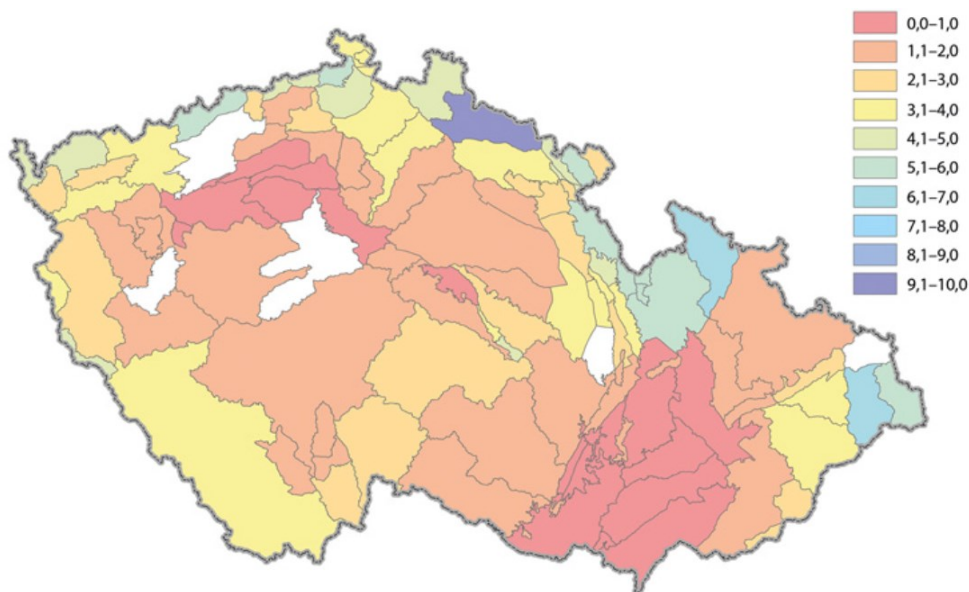
Obr. 3: Průměrný specifický základní odtok v hydrogeologických rajonech v letech 1971–2010. Převzato od Vlnase (2011).

Významným projektem, který se v relativně nedávné době zabýval velikostí základního odtoku také vzhledem k aktuální klimatické změně, byla studie „Odhad přírodních zdrojů podzemní vody v hydrogeologických rajonech v České republice v měnících se klimatických poměrech 1981–2019“ (Kašpárek et al., 2022). Jednou z hlavních motivací studie bylo mj. srovnání výsledků s o několik let staršími výstupy projektu „Rebilance zásob podzemních vod“, který probíhal pod záštitou České geologické služby v letech 2011–2016. Rozdíl byl v použitých datech, konkrétně v jejich časovém rozsahu. Zatímco pro projekt ČGS byly použity údaje z období 1971–2010, studie z roku 2022 využila data z let 1981–2019, díky čemuž byly

výsledky výrazněji ovlivněny aktuálně probíhající klimatickou změnou a globálním trendem zvyšování průměrných teplot vzduchu.

Jako hlavní bilanční územní celky pro stanovování množství využitelných zásob podzemní vody slouží v České republice tzv. hydrogeologické rajony. Ty jsou definovány jako oblasti s obdobnými hydrogeologickými poměry, výrazným geologickým a tektonickým vymezením, s podobným oběhem podzemní vody a určitým typem zvodnění (Kašpárek et al., 2022). V současnosti je na našem území vymezeno celkem 152 hydrogeologických rajonů. Kašpárkova studie měla za úkol pro tyto rajony určit změnu ve velikosti zdrojů podzemní vody vzhledem ke změnám stavů vodních toků, jejichž příčinu lze hledat v nárůstu průměrné teploty na území ČR za sledované období (od roku 1981). Důrazný zřetel autoři v tomto ohledu kladou na mimořádně suché období let 2014–2019.

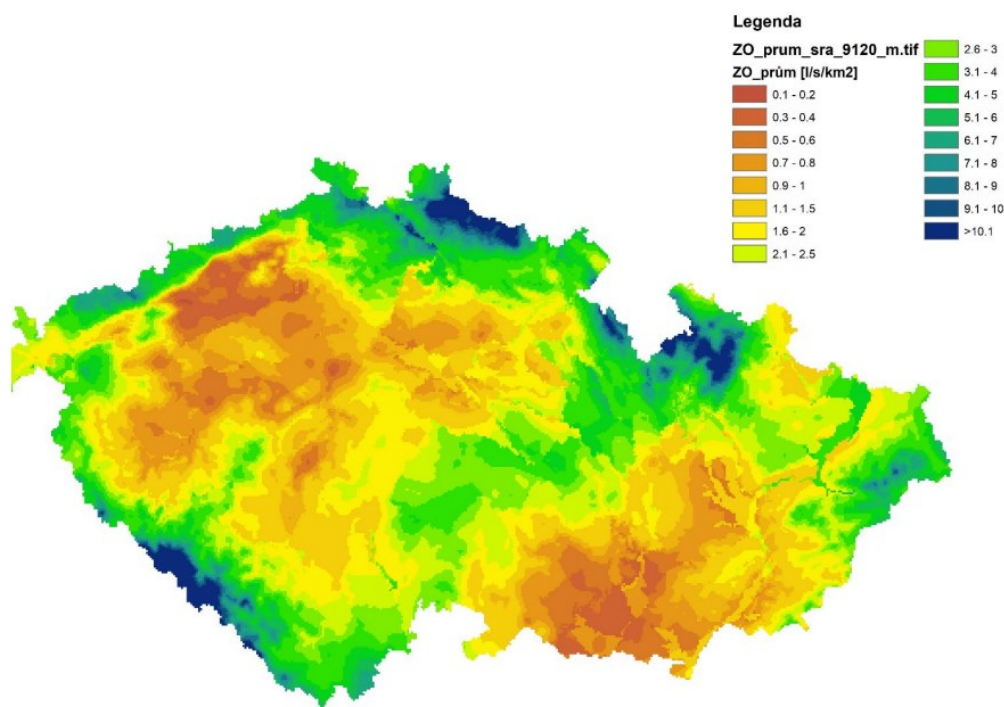
Kašpárek et al. (2022) uvádí jako jednu ze základních metod stanovení dotace podzemních vod využití modelu hydrologické bilance, který je kalibrován podle údajů z vodoměrných stanic ČHMÚ a podle teplot vzduchu, aby se modelovaný odtok co nejvíce blížil odtoku pozorovanému. Pro stanovení celkového odtoku byly použity dva principy: bilanční rozdíl mezi srážkou a odhadnutým územním výparem a regresní vztah mezi srážkou a odtokem. Přepočít z celkového na základní odtok proběhl za pomoci BFI, jehož hodnoty pro jednotlivé geologické rajony z většiny převzali autoři z jedné ze svých předchozích prací (Kašpárek et al., 2017). Hodnoty průměrných základních odtoků byly podobně jako ve výše popsané práci Krásného et al. (1982) převedeny na průměrné specifické základní odtoky (viz obr. 4). Z výsledného porovnání studie s projektem „Rebilance zásob podzemních vod“ vyplývalo, že hodnoty průměrného základního odtoku v období 1981–2019 poklesly oproti období 1971–2010 zhruba o 7–12 %. Jelikož se průměrné srážky od roku 1971 prakticky nezměnily, lze tuto skutečnost přisoudit zejména zvýšení průměrné teploty o 0,4 °C (Kašpárek et al., 2022), díky čemuž se významně zvýšil vliv evapotranspirace.



Obr. 4: Odhady specifického základního odtoku (v l/s/km²) podzemní vody stanoveného z rozdílu srážek a výparu. Převzato od Kašpárka et al. (2022).

Další významnou studií, která reflektovala vliv mimořádně suchého období v 2. polovině minulé dekády na základní odtok, byla práce „Mapy intenzity dotace podzemní vody a zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu pro ČR“ (Bruthans et al., 2023). Hlavním přínosem příspěvku bylo představení nových hydrogeologických mapových výstupů pro celé území Česka. Jednalo se o mapy: I) průměrného základního odtoku (obr. 5); II) základního odtoku v suchém období; III) zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu.

Pro potřeby separace základního odtoku a následné tvorby map (metodika blíže popsána v podkapitole 2.3.5) bylo využito Kašpárkovy metody s 30denním klouzavým oknem (detailněji v podkapitole 2.3.4). Data o průměrných denních průtocích poskytlo celkem 518 vodoměrných stanic ČHMÚ (Bruthans et al., 2023).



Obr. 5: Dlouhodobý průměrný (specifický) základní odtok pro období 1991–2020 odvozen ze srážkového normálu, regresních vztahů srážek a celkového odtoku a BFI. Upraveno dle Bruthanse et al. (2023).

V současnosti jedny z nejucelenějších a veřejnosti volně přístupných informací o území ČR, z hlediska nejen základního odtoku, poskytují webové služby ČGS. Součástí nich jsou mapové aplikace věnované poměrům geologickým, hydrogeologickým, půdním, geochemickým, geofyzikálním a řadě dalších. V hydrogeologické sekci lze najít například souhrnnou hydrogeologickou mapu v měřítku 1:50 000, mapy celkové hydrogeologické i vrtné prozkoumanosti našeho území a mimo několika dalších i mapovou aplikaci věnující se podzemní vodě. Ta zobrazuje hydrogeologické rajony tak, jak byly jejich hranice vymezeny naposledy v roce 2005, dále hydrogeologické mapy v rastrové podobě a také vrstvy dlouhodobého průměrného základního odtoku přírodních zdrojů podzemních vod a hodnoty základního odtoku za sucha. Jako poslední vrstvu zde lze najít výše popsanou práci Bruthanse et al. (2023), tedy mapu zranitelnosti kvantity přírodních zdrojů podzemní vody k suchu v ČR (ČGS, 2024c).

Všechny zmíněné publikace ve svých výstupech používají specifický základní odtok jakožto vhodnou veličinu pro kvantifikaci odtoku podzemní vody. Existuje řada faktorů, které tento typ odtoku ovlivňují. Dle Krásného et al. (1982) mají na výši základního odtoku na našem území

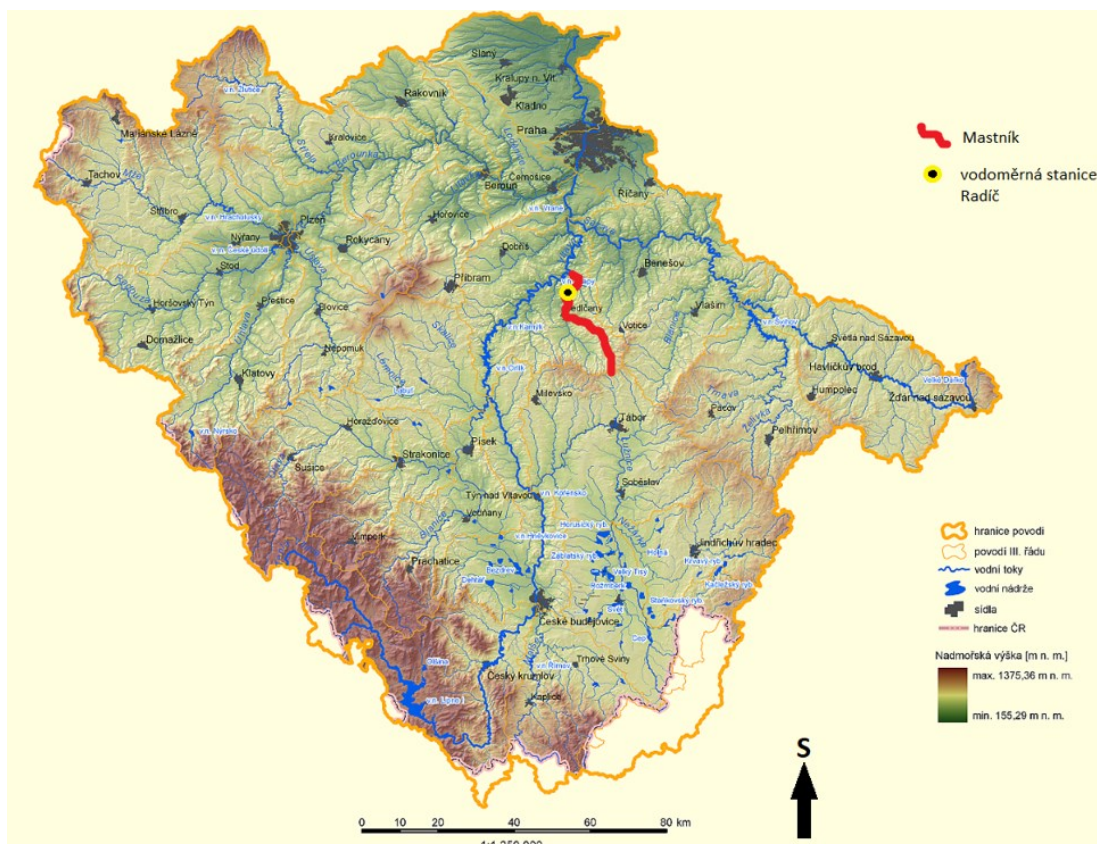
v různé míře vliv tyto 4 základní faktory: geologicko-strukturní, hydrogeologické, geograficko-morfologické a klimatické, přičemž za primárně rozhodující faktor považují právě strukturně geologické poměry. Ty určují nejen výskyt a plošné zastoupení zvodněných systémů, které mají zásadní vliv na tvorbu a rozdělení podzemního odtoku, ale v našich podmínkách ovlivňují i další faktory jako například morfologii a následně i klima. Proto Krásný et al. (1982) využili k regionálnímu popisu odtoku podzemní vody na území bývalého ČSSR strukturně geologické členění našeho území. Základní odtok dále ovlivňují vzájemné vztahy faktorů jako jsou topografie, půdní poměry či vegetační poměry vztažené ke geologii (Lacey a Grayson, 1998). V minulosti byl také popsán těsný vztah průměrných srážek a odtoku (např. Kašpárek a Datel, 2013). Prokázán je také vliv evapotranspirace, zejména v letních měsících, kdy se neustále rostoucí průměrné teploty vzduchu projevují snižováním hodnot specifického odtoku a celkové vodnosti vodních toků (Bruthans et al., 2020). Ze studií Bruthanse a Soukupa (2011) a Bruthanse et al. (2023) vyplývá, že základní specifický odtok záleží v České křídové pánvi na litologii a na velikosti srážek a evapotranspirace, zatímco v prostředí hydrogeologického masivu (tzv. hard rock) téměř nezávisí na petrologii a je téměř výhradně funkcí množství srážek a evapotranspirace.

Celkový rozsah hodnot průměrného specifického základního odtoku na území ČR uvádí zmíněné studie prakticky totožný. Od nejnižších hodnot blížících se 0 l/s/km² po hodnoty nejvyšší, které překračují 10 l/s/km². Platí, že největší základní odtok lze najít v oblastech vyšších nadmořských výšek s většími srážkovými úhrny a nižší teplotou vzduchu (a tedy nižší evapotranspirací). Nejmenší základní odtok je naopak v nížinných sušších oblastech s nižšími srážkami a vyšší teplotou vzduchu. Například dle mapy Krásného et al. (1982) najdeme nejnižší specifický základní odtok (pod 0,5 l/s/km²) na jihu Moravy na Znojemsku a Hodonínsku či v oblasti severočeské hnědouhelné pánve. Nejvyšší základní odtok (nad 10 l/s/km²) se poté nachází ve vyšších polohách největších českých pohoří (Krkonoše, Šumava, Hrubý Jeseník). Prakticky stejný trend rozložení specifického základního odtoku vykazují i mapy ČGS vycházející z Bruthanse et al. (2023), ovšem z nich lze vyčíst vzrůst plošného zastoupení relativně sušších oblastí (oblastí s nižšími hodnotami specifického základního odtoku).

3 Popis studované oblasti a metodika určení základního odtoku

3.1 Studovaná oblast

Potok Mastník, o celkové délce 49,5 km, se nachází na jihu Středočeského kraje. Jedná se o pravostranný přítok řeky Vltavy, do které ústí v obci Nová Živohošť, konkrétně se vlévá přímo do vodní nádrže Slapy. Jeho pramen se nachází zhruba 7 km jihovýchodně od města Sedlec-Prčice, u obce Střeziměř, v nadmořské výšce 597,6 m n.m. Potok dále teče na sever, kolem obce Heřmaničky, kde se stáčí severozápadním směrem. Dále protéká obcemi Vojkov, Kosova Hora a ve městě Sedlčany se stéká se Sedleckým potokem, který je se svými 22,3 km jeho nejdelším přítokem. Z největšího města v povodí proudí opět severním směrem, protéká obcemi Osečany, Radíč, kolem obce Poličany a poté se v nadmořské výšce 215,4 m n.m. vlévá do Vltavy, na jejím 105,1. říčním km. Celková plocha povodí činí 331,5 km² (VÚV TGM). Pro potřeby této bakalářské práce byly využity údaje z vodoměrné stanice ČHMÚ v obci Radíč. Průběh potoka s vyznačením vodoměrné stanice viz obr. 6.



Obr. 6: Povodí Vltavy s vyznačeným potokem Mastník a poloha vodoměrné stanice v obci Radíč. Upraveno dle VÚV TGM (2024).

Z geologického hlediska se oblast povodí potoka Mastník nachází z větší části na hlubinných vyvřelých horninách střeďočeského plutonického komplexu. Nejčastějším typem hornin jsou granity a granodiority, které jsou často prostoupeny také žilnými horninami (Culek, 1996). Vůbec nejrozsáhlejším horninovým typem je granit sedlčanského typu, tvořený biotitem a amfibolem. Do západní části povodí zasahují metamorfity (např. metaprachovec, amfibolit), v jižní části převažuje pararula. Severně od Sedlčan lze najít další celky granitů až granodioritů, např. maršovického či benešovského typu. Přimo u ústí potoka do Vltavy najdeme celek proterozoických drob, prachovců a břidlic (ČGS, 2024a).

Půdní pokryv lze označit v celém povodí za velmi jednotvárný. Na naprosté většině území se vyskytuje kambizem, nejběžnější půdní typ v celé ČR. Jejich vznik a výskyt je vázán na svažitě podmínky členitého reliéfu pahorkatin, vrchovin a hornatin, což sledovanému povodí odpovídá. V oblasti lze najít zejména dva subtypy kambizemí. Tím prvním je kambizem modální, která vzniká ze středně těžkých a lehčích středních substrátů. Druhým subtypem je kambizem dystrická, která se vyznačuje vysokou nasyceností hliníkem, jehož obsah je větší než 30 % (ČGS, 2024b).

Celé povodí se nachází v hydrogeologickém rajonu č. 6320 – Krystalinikum v povodí Střední Vltavy (horniny krystalinika, proterozoika a paleozoika). Jeho celková rozloha je 5 727,3 km² (ČGS, 2024c).

3.1.1 Velikost základního odtoku ve studované oblasti

Tato podkapitola je věnována velikosti základního odtoku v mnou studované oblasti podle studií, které zmiňují a blíže popisují v podkapitole 2.4. Všechny tyto práce uvádí hodnoty specifického základního odtoku v celé ČR, v oblasti povodí potoka Mastník nevyjímaje. Hodnoty se však liší v závislosti na použitých metodách určení základního odtoku a roli také hraje (z hlediska dostupných a použitých dat) odlišná doba, ve které byly jednotlivé studie publikovány.

Dle mapy odtoku podzemní vody na území ČSSR (Krásný et al., 1982) povodí spadá do oblasti 2–3 l/s/km², což značí střední výši specifického základního odtoku. Ze všech zmíněných prací se jedná o hodnotu největší. Jelikož se jedná o publikaci více než 40 let starou, výsledek není nijak postižen současnou klimatickou změnou, kterou některé studie z podkapitoly 2.4 již reflektují, jelikož používají daleko mladší data zahrnující období i posledních let. Například

Kašpárek et al. (2022) již uvádí hodnotu specifického základního odtoku menší – celý hydrogeologický rajon Krystalinikum v povodí Střední Vltavy spadá do kategorie 1,1–2 l/s/km², přičemž průměr se pohybuje okolo hodnoty 1,2 l/s/km². Dle Krásného et al. (1982) by tak povodí již spadalo do kategorie značící nízké hodnoty specifického základního odtoku (viz také tab. 1).

Mapa podzemní vody na webu ČGS přináší daleko komplexnější zobrazení regionálního rozdělení specifického základního odtoku. Dle mapy základního průměrného odtoku za období 1991–2020, která vychází z Bruthanse et al. (2023), spadá studované povodí hned do 4 kategorií, jejichž celkový rozsah je 0,81–2,50 l/s/km². Přes 10 % plochy povodí leží v kategorii 0,81–1,00 l/s/km². Největší podíl zaujímá kategorie 1,01–1,50 l/s/km² – cca 40 % plochy povodí. Jedna třetina povodí spadá do intervalu 1,51–2,00 l/s/km² a zbylých zhruba 15 % náleží kategorii 2,01–2,50 l/s/km². Mapa ČGS také zahrnuje vrstvu průměrného základního odtoku v období sucha, opět vycházející z Bruthanse et al. (2023). Dle ní patří oblast povodí Mastníku také do 4 kategorií, jejichž hodnoty spadají do intervalu 0,21–1,00 l/s/km². Necelých 5 % rozlohy povodí náleží nejnižším hodnotám, tedy 0,21–0,40 l/s/km². Hned dvě třetiny území spadají do kategorie 0,41–0,80 l/s/km², přičemž polovina z toho náleží kategorii 0,41–0,60 l/s/km² a druhá polovina je v rozsahu 0,61–0,80 l/s/km². Necelých 30 % poté leží v intervalu 0,81–1,00 l/s/km² (ČGS, 2024c). Dle Vlnase (2011) spadá celý hydrogeologický rajon Krystalinikum v povodí Střední Vltavy do kategorie 1–2 l/s/km².

3.2 Použitá data a jejich zpracování

Pro potřeby praktické části jsem použil data z portálu ČHMÚ (2024), konkrétně údaje o průměrných denních průtocích z vodoměrné stanice v obci Radíč z období 1. listopadu 1983 až 31. října 2023. Tato stanice se nachází na 8. říčním km, nadmořská výška nuly vodočtu je 294,4 m n. m., plocha povodí po tuto stanici činí 268,6 km² (ČHMÚ, 2024). Základní odtok dle všech níže popsaných metodik jsem vypočítal s použitím programu Microsoft Excel, jedinou výjimkou byla metoda Eckhardtova filtru, kterou jsem určil pomocí volně dostupného webu SepHydro – Hydrograph Separation Tool (SepHydro, 2024).

3.3 Metodika výpočtů základního odtoku

Pro stanovení hodnoty základního odtoku ve studovaném povodí jsem použil celkem 4 metody: Killeho, Castanyho, Eckhardtův filtr a metodu klouzavých minim (tzv. „Kašpárkova metoda“). V případě výpočtů pomocí Killeho metody jsem využil modifikace jejího původního principu dle Krásného (1982), která spočívá v proložení přímky semilogaritmickým grafem a jejím následném převedení zpět do grafu v lineárním měřítku. Dosazením střední pořadové hodnoty minimálních měsíčních průtoků do parametrů rovnice přímky jsem získal výsledný základní odtok pro celé období 1983–2023.

V případě Castanyho metody jsem využil obou jejích variant. Nejdříve té původní, kde jsem základní odtok určil jako medián z průměrných hodnot průtoků z 30 po sobě jdoucích dní s nejnižším celkovým odtokem v každém roce časové řady. Tuto variantu označuji jako Castany I. Kromě této varianty jsem aplikoval i variantu Castany II, v jejímž případě se jedná o jednodušší verzi metody, která počítá pouze s nejnižšími průměrnými měsíčními průtoky pro každý rok.

Ke stanovení základního odtoku za pomoci dvouparametrového Eckhardtova filtru jsem použil volně dostupný web SepHydro – Hydrograph Separation Tool (SepHydro, 2024). Jeho jediné omezení spočívá v množství dat, které uživatel může do výpočetního softwaru nahrát. Nutným krokem bylo používaná data o průměrných denních průtocích rozdělit na 2 poloviny – období 1983–2003 a období 2003–2023. Výsledný základní odtok celé studované časové řady představuje průměr obou hodnot obdržných za dvě dvacetiletá období. Vstupní parametry filtru jsem nastavil tak, jak je pro moji studovanou oblast, respektive konkrétně pro vodoměrnou stanici v Radíči, odvodil Vlnas (2011): recesní koeficient $\alpha = 0,978$; $BFI_{\max} = 0,3$. Bruthans et al. (2023) stanovili o několik let později hodnotu BFI pro oblast povodí Mastníku o desetinu vyšší – 0,4. Tato hodnota neplatí jen pro vodoměrnou stanici, ale pro celý hydrogeologický rajon č. 6320.

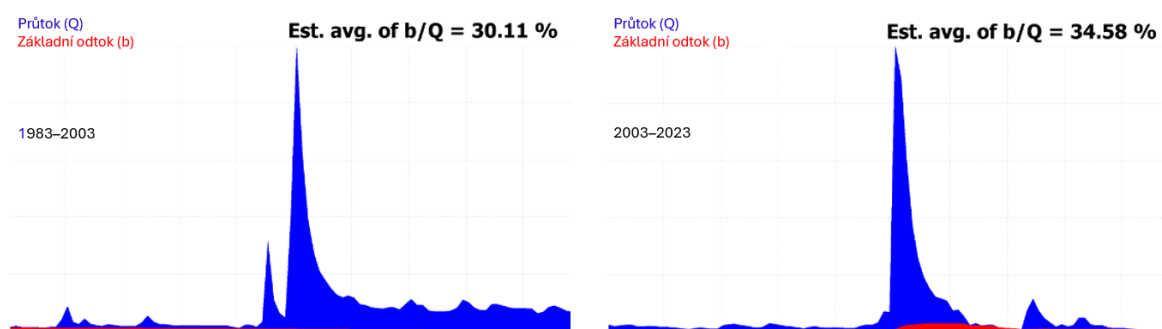
Čtvrtým a posledním použitým způsobem určení základního odtoku byla metoda klouzavých minim (Kašpárkova metoda), která data vyhodnocuje způsobem klouzavých průměrů z předtím určených klouzavých minim. Délku klouzavého okna jsem zvolil 30 dní. Vycházel jsem z prací Aksoye et al. (2009), Kašpárka et al. (2015) a také z Bruthanse et al. (2023), kteří pro výpočty vystředěných klouzavých průměrů využili právě takto dlouhé období.

Pro výpočet BFI a specifického základního odtoku dle všech metod jsem potřeboval údaje o celkovém odtoku a rozloze povodí. Celkový odtok jsem určil z celé časové řady průměrných

denních průtoků jako jejich aritmetický průměr. Jeho hodnota činí 1,146 m³/s. Pro stanovení specifického základního odtoku jsem u všech použitých metod počítal s hodnotou 268,63 km² jakožto s rozlohou povodí po vodoměrnou stanici v Radíči, ze které jsem čerpal data o průměrných denních průtocích.

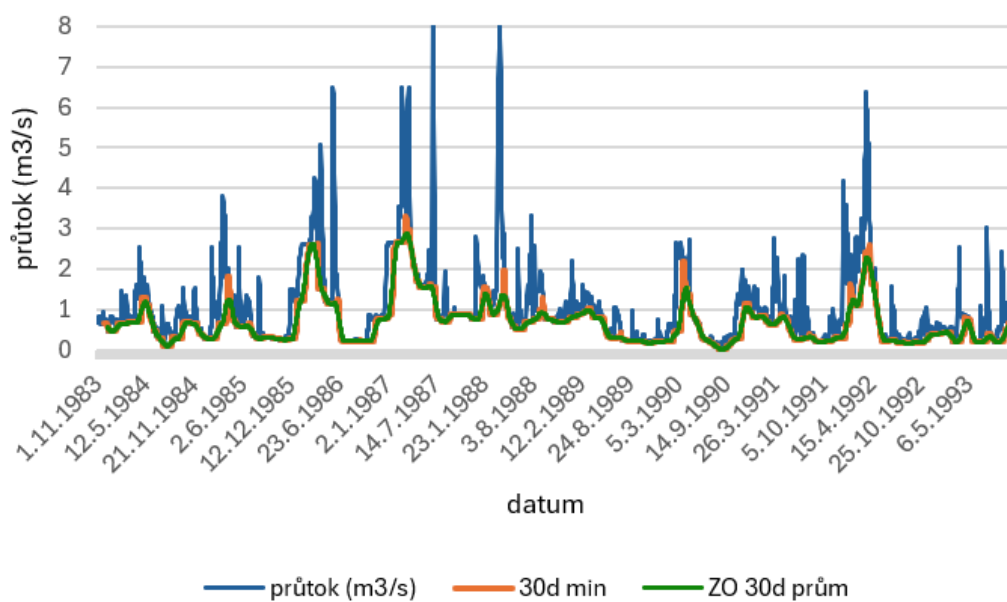
4 Výsledky a jejich srovnání dle jednotlivých metod

Základní odtok v zájmovém povodí potoka Mastník jsem určil pomocí 4 různých metod (viz podkapitola 3.3). V případě Castanyho jsem použil dvě různé alternativy této metody (Castany I a II). V příložené tabulce (tab. 2) jsou uvedeny výsledné hodnoty základního odtoku (ZO), specifického základního odtoku (SZO) a base flow indexu (BFI). Použitím Killeho metody, respektive její modifikace dle Krásného et al. (1982), byl dosažen základní odtok $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$, specifický základní odtok vyšel $1,71 \text{ l/s/km}^2$ a BFI $0,40$. U původní Castanyho metody (Castany I) vyšly vůbec nejnižší hodnoty. Základní odtok činí $0,24 \text{ m}^3/\text{s}$, specifický základní odtok $0,89 \text{ l/s/km}^2$ a BFI se rovná $0,21$. Jednodušší variantou Castanyho metody (Castany II) bylo dosaženo výsledků: $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$ – základní odtok, $1,15 \text{ l/s/km}^2$ – specifický základní odtok a $0,27$ – BFI. Za pomoci Eckhardtova filtru (obr. 7) jsem došel k základnímu odtoku $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$, specifickému základnímu odtoku $1,23 \text{ l/s/km}^2$ a BFI $0,29$.



Obr. 7: Náhled separace hydrogramu Eckhardtovým filtrem, vlevo pro data o průměrných denních průtocích z období 1983–2003, vpravo pro data z období 2003–2023. V obou případech zobrazena pouze část zdrojové datové sady omezená intervalem kolem lokálního maxima. Upraveno dle webu SepHydro (2024).

Poslední aplikovanou metodou byla metoda klouzavých minim (Kašpárkova), pomocí které jsem dosáhl hodnoty základního odtoku $0,60 \text{ m}^3/\text{s}$, specifického základního odtoku $2,22 \text{ l/s/km}^2$ a BFI $0,52$. Tato metoda spolu s Eckhardtovým filtrem umožňují sledovat i vývoj základního odtoku v čase. Příklady toho v příložených grafech (obr. 7 a 8).



Obr. 8: Vývoj základního odtoku v čase podle Kašpárkovy metody klouzavých minim. Modrá barva představuje průměrné denní průtoky, oranžová 30denní minima a zelená 30denní klouzavé průměry, které jsou rovny základnímu odtoku. Graf zobrazuje pro ilustraci prvních 10 let z celkem 40leté sledované časové řady.

Tab. 2: Výsledné hodnoty základního odtoku (ZO), specifického základního odtoku (SZO) a BFI v povodí potoka Mastník dle jednotlivých metod.

Metoda	ZO (m ³ /s)	SZO (l/s/km ²)	BFI
Kille	0,460	1,714	0,402
Castany I	0,238	0,886	0,208
Castany II	0,310	1,154	0,271
Eckhardtův filtr	0,331	1,232	0,289
Kašpárek	0,595	2,215	0,519

4.1 Srovnání výsledků

Aby bylo porovnání výsledků jednotlivých metod co nejvíce reprezentativní, je vhodné mnou použité metody srovnat nejen mezi sebou, ale také je postavit proti výsledkům vybraných studií

z podkapitoly 2.4, jejichž výsledky pro studovanou oblast povodí Mastníku jsou dále shrnuty v podkapitole 3.1.1. Jelikož tyto práce užívají pro kvantifikaci množství podzemní vody podílející se na celkovém odtoku parametr specifického základního odtoku, pro vzájemné srovnávání ho využiji i já.

Z tabulky (tab. 2) vyplývá, že nejvyšších hodnot všech výsledných parametrů bylo dosaženo použitím metody klouzavých minim (Kašpárek). Samozřejmě platí, že čím vyšší je hodnota ZO, tím jsou i vyšší hodnoty SZO a BFI. Výsledky metody klouzavých minim jsou v porovnání s některými studii z podkapitoly 2.4 poměrně nadhodnocené. Hodnota SZO (2,22 l/s/km²) je nejvíce srovnatelná s prací Krásného et al. (1982), která uvádí hodnotu SZO pro oblast středních Čech 2–3 l/s/km². Žádnou další metodou již nebylo dosaženo hodnoty přesahující 2 l/s/km². Druhého největšího SZO jsem dosáhl metodou Killeho (1,71 l/s/km²). Výsledek odpovídá všem studiím kromě Krásného et al. (1982), do jehož rozsahu hodnot 2–3 l/s/km² již nespadá žádná z použitých metod. Hodnotu BFI stanoveného z výsledného ZO Killeho metody (0,40) lze po zaokrouhlení na jedno desetinné místo považovat za shodnou s tou, jak ji pro celý hydrogeologický rajon č. 6320 určili Bruthans et al. (2023). Výsledný SZO získaný Eckhardtovým filtrem (1,23 l/s/km²) lze nejvíce připodobnit výstupu Kašpárka et al. (2022), kteří pro celý hydrogeologický rajon č. 6320 stanovil interval SZO 1,1–2 l/s/km², přičemž průměr pro celý rajon se pohybuje okolo hodnoty 1,2 l/s/km². To se takřka přesně shoduje s výsledkem právě Eckhardtova filtru. Nejnižších a nejvíce podhodnocených výsledků bylo dosaženo Castanyho metodou, konkrétně Castanym I (0,89 l/s/km²). BFI stanovený pomocí této metody (0,21) je dokonce o 3 desetiny menší než jeho hodnota určená z výsledného ZO metody klouzavých minim (0,52). Jednodušším Castanym II jsem obdržel výsledný SZO (1,15 l/s/km²) nejpodobnější tomu získanému pomocí Eckhardtova filtru (1,23 l/s/km²). Tato hodnota spadá jak do intervalu Kašpárka et al. (2022), tak odpovídá například i hodnotám, které pro celý hydrogeologický rajon vymezil Vlnas (2011). Na závěr bych dodal, že výsledky všech metod jsou v uvedeném rozsahu specifického základního odtoku dle map ČGS, které vycházejí z Bruthanse et al. (2023). Jak uvádím v podkapitole 3.1.1, průměrný základní odtok v oblasti povodí potoka Mastník se pohybuje v rozmezí 0,81–2,50 l/s/km², čemuž odpovídá nejnižší (0,89 l/s/km² – Castany I) i nejvyšší (2,22 l/s/km² – Kašpárek) hodnota spočítaného SZO.

Index M stanovený způsobem popsáním v kapitole 2.2 dle metody klouzavých minim vyšel 0,34. Dle údajů Bruthanse et al. (2023) takováto hodnota z hlediska litologie obecně odpovídá krystaliniku, nízko položeným oblastem ve flyši či určitým oblastem v křídě. Pro celý hydrogeologický rajon 6320 ovšem Bruthans et al. (2023) uvádí hodnotu vyšší, a sice 0,45.

5 Diskuse

Doposud byla vyvinuta celá řada metod určování základního odtoku (ZO). Velmi časté jsou metody, které pro výpočty využívají údaje o denních průtocích, což je jejich výhodou díky poměrně nízké náročnosti na vstupní data – data o denních průtocích jsou ze zákona od roku 2018 poskytována veřejnosti v České republice zdarma. Některé metody slouží pro určení dlouhodobého průměru ZO. Mezi ně řadíme například metody Killeho a Castanyho, které poskytují pouze jeden výsledek/číslo za určité (i delší) časové období. Jiné metody zase nabízejí i konkrétnější pohled na vývoj ZO v čase, například metoda Eckhardtova filtru či metoda klouzavých minim, pomocí které lze stanovit proměnlivost ZO v řádu měsíců. (obr. 8).

Některé metody a principy jsou označovány jako ryze objektivní, čímž je myšleno, že každý uživatel by při použití stejné metodiky a stejných dat měl dospět vždy ke stejnému, výjimečně jen nepatrně odlišnému, výsledku (například kvůli zaokrouhlování). Mezi takové metody patří Castanyho metoda, dále mezi ně lze zařadit například i metodu klouzavých minim. Druhá jmenovaná posloužila pro tvorbu hydrogeologických map ČGS. Killeho metoda je obecně považována spíše za objektivní, nicméně její postup zahrnuje určení kvazilineárního úseku v grafu, který zpravidla nemusí být různými hodnotiteli zvolen stejně, což poté může vést k mírně odlišným výsledkům. Naopak za poněkud subjektivní metodu považují Eckhardtův filtr, jelikož zahrnuje dva vstupní parametry, z nichž jeden (BFI_{max}) je přímo závislý na volbě uživatele a na datech či podkladech, ze kterých daný uživatel vychází. Nicméně je tato metoda v současnosti velmi uznávaná, u nás ji například využívá ČHMÚ.

Některé metody jsou náročné na výpočet i vstupní data. Mezi ně patří například metoda postupných profilových průtoků (PPP) či starší metody separace hydrogramu, které se kvůli své pracnosti a míře vnesené subjektivity dnes již prakticky nevyužívají. Pro všechny mnou použité metody pro výpočet ZO v povodí Mastníku (metoda Killeho, Castanyho, Eckhardtův filtr a Kašpárkova metoda) platí opak, tedy jednoduchost, relativně malá časová náročnost výpočtu a nenáročnost na data (všechny používají údaje o průměrných denních průtocích).

ZO se dá počítat na úrovni jednotlivých povodí, ale bylo provedeno hned několik regionálních určení ZO, i v rámci celé České republiky. V 80. letech takto vznikla první mapa odtoku podzemní vody pro naše území, respektive tehdy ještě pro celé Československo (Krásný et al., 1982). V nedaleké minulosti proběhly studie, které již reflektují i současnou klimatickou změnu odrážející se v poklesu ZO v čase (např. Kašpárek et al., 2022; Bruthans et al., 2023; Nymša, 2023). Ve vztahu k uvažování velikosti ZO je současnou klimatickou změnu obzvláště nutno

brát v potaz. Velmi dobrým ukazatelem poklesu ZO i v krátkém časovém úseku je index M (Bruthans et al., 2023). Pokles ZO v suchém období také lze dobře pozorovat pomocí metod poskytujících pohled na jeho vývoj v čase – metoda klouzavých minim a Eckhardtův filtr. Díky časovému rozlišení těchto metod jsou v jejich grafických výstupech nižší hodnoty ZO vlivem sucha velmi dobře ilustrovány (viz obr. 7 a 8).

Jednotlivé metody nemusí a zpravidla nedávají stejné výsledné hodnoty. Ty se mohou lišit jen nepatrně, ale také někdy i poměrně dost výrazně, vždy v závislosti na použitých a srovnávaných metodách. V mém případě se ZO pro povodí Mastníku pohyboval v rozmezí 0,24–0,60 m³/s, přičemž nejmenšího výsledku jsem dosáhl oběma variantami Castanyho metody. To může být způsobeno tím, že Castanyho princip pracuje pouze s nejnižšími hodnotami průtoků v rámci období jednoho měsíce a vůbec nezohledňuje zbytek roku, kde mohou být průtoky daleko vyšší než v nejsušším období jednotlivých roků sledované časové řady. Nejvyšší základní odtok mi vyšel dle Kašpárkovy metody klouzavých minim, která oproti tomu pracuje nejen s nejsuššími obdobími jednotlivých roků, ale zohledňuje i více vodná období, která pak pouze zmírňuje klouzavými minimy a průměry.

Zatímco jsem počítal ZO čtyřmi metodami, například Kadlecová et al. (2010) ve své publikaci, kde určovali ZO v hydrogeologickém rajonu č. 4232 (Ústecká synklinála v povodí Svitavy), využili hned 8 různých způsobů. Rozsah výsledných hodnot byl podstatně větší než v mém případě. Nejnižší výsledek udávala, stejně jako u mě, Castanyho metoda – 0,31 m³/s a nejvyšší výsledek byl obdržen použitím metody Plotnikovy – 1,59 m³/s. Bez použití Plotnikovy metody by se však interval znatelně zmenšil, dokonce by byl menší než ten můj, jelikož druhý největší výsledek udával ve studii Kadlecové et al. (2010) Eckhardtův filtr – 0,63 m³/s. Zajímavé je také srovnání právě metody Eckhardta a Killeho. Zatímco mně vyšel ZO podle Killeho vyšší než separací Eckhardtovým filtrem, u Kadlecové et al. (2010) tomu bylo přesně naopak. Výsledný ZO získaný Eckhardtem v mém případě představoval zhruba 70 % hodnoty ZO dle Killeho. U Kadlecové však ZO podle Eckhardta (0,63 m³/s) nabylo hodnoty cca o 15 % větší než ten získaný Killeho metodou (0,54 m³/s). Bruthans et al. (2023) dále uvádí, že metodou Eckhardtova filtru lze získat hodnotu představující 70–80 % základního odtoku vypočítaného metodou klouzavých minim. Můj výsledek Eckhardtova filtru tento předpoklad však zdaleka nenaplnil, jelikož hodnota 0,33 m³/s je téměř dvakrát menší než hodnota 0,60 m³/s získaná Kašpárkovou metodou. Tento nesoulad diskutuji níže.

Vlastní implementaci Eckhardtova filtru považuji za poněkud diskutabilní. Vstupní parametry této metody jsem nastavil tak, jak byly určeny Vlnasem (2011) přímo pro vodoměrnou stanici

v obci Radíč, která je součástí studovaného povodí. Při recesním koeficientu $\alpha = 0,978$ a BFI_{max} byl můj výsledný ZO $0,33 \text{ m}^3/\text{s}$. Při zachování stejného recesního koeficientu a zvýšení BFI_{max} na $0,4$, tedy hodnotu, kterou pro celý hydrogeologický rajon zahrnující i povodí Mastníku stanovili Bruthans et al. (2023), se však zvýšil na hodnotu $0,43 \text{ m}^3/\text{s}$. Při použití $BFI_{max} = 0,5$, tedy BFI získaný pomocí mnou počítané Kašpárkovy metody, se dokonce hodnota ZO zvýšila na $0,53 \text{ m}^3/\text{s}$, čímž by výsledek převyšoval ten získaný Killeho metodou ($0,46 \text{ m}^3/\text{s}$). Zde by už platila návaznost se studií Kadlecové et al. (2010), kterým také vyšel ZO Eckhardtovým filtrem vyšší než Killeho metodou. Výsledek, který jsem obdržel s $BFI_{max} = 0,4$, by také splňoval předpoklad Bruthanse et al. (2023) o tom, že Eckhardtův filtr představuje 70–80 % metody klouzavých minim, konkrétně se jedná cca o 72 % výsledné hodnoty dle Kašpárka. Při $BFI_{max} = 0,5$ je to dokonce bezmála 90 %. Eckhardtův filtr je tedy na parametr BFI_{max} velmi citlivý, a i na mém praktickém příkladu se ukazuje jeho značná míra subjektivity. Pro jeho optimální nastavení je třeba také brát v potaz uvažované území. Jedním dechem tak nutno dodat, že $BFI_{max} = 0,3$ byl Vlnasem (2011) určen přímo pro vodoměrnou stanici ležící na Mastníku, zatímco $BFI_{max} = 0,4$ byl Bruthansem et al. (2023) vymezen pro celý hydrogeologický rajon, tedy mnohem rozsáhlejší území, a také se nejednalo přímo o BFI_{max} , pouze o průměrný BFI.

S vynecháním dnes již nepoužívané Castanyho metody, kterou jsem obdržel nejnižší a poměrně podhodnocené výsledky ZO, zbylé tři metody (Killeho, Eckhardtova a Kašpárkova) vykazují rozsah hodnot specifického základního odtoku (SZO) $1,23\text{--}2,22 \text{ l/s/km}^2$. Tento rozptyl, získaný použitím pouhých tří metod, se může jevit jako poměrně výrazný, je však nutné tyto hodnoty také uvažovat v kontextu celkového rozsahu hodnot SZO na území ČR. Dle map ČGS tento rozsah činí v dlouhodobém průměru na naprosté většině našeho území $0,1\text{--}10,1 \text{ l/s/km}^2$. Rozdíl výsledného ZO získaného třemi různými metodami tak činí zhruba 10 % celkového rozsahu ZO na území ČR. I proto by při kvantifikaci ZO měla vždy být uvažována použitá metoda. Pokud jsou hodnoty ZO využity například jako vstupní data pro různé hydrologické či hydrogeologické modely, vždy by se měla uvést použitá metoda a v případě, že jsou například srovnávány výsledky mezi jednotlivými povodími, je vhodné použít pro každou oblast stejnou metodiku, jelikož aplikovaná metoda přímo determinuje, každá svým vlastním způsobem a podle vlastních pravidel, výslednou hodnotu ZO.

6 Závěr

Základní odtok představuje důležitou veličinu, zejména z hlediska určování využitelných zásob podzemní vody. Metod pro jeho kvantifikaci existuje celá řada. Některé metody disponují několika výhodami, mezi které patří jednoduché a rychlé zpracování, nenáročnost na data, poměrně detailní časové rozlišení, objektivita apod. Jiné metody jsou naopak náročnější na zpracování či poskytují pouze jednu výslednou hodnotu za delší časové období nebo je jejich výsledek subjektivně ovlivněn. V rešeršní části této závěrečné práce se věnuji detailnímu představení několika těchto metod. Popsán je hlavně jejich princip, na kterém fungují, data, která využívají, a jejich výhody a nevýhody. V menším detailu poté popisují řadu několika dalších metod, které buď nejsou tak využívány či se využívaly v minulosti. Dále je součástí teoretické části přiblížení několika regionálních studií a publikací, které se zabývají určením základního odtoku dle popsaných metod na území ČR a které popisují faktory ovlivňující velikost základního odtoku.

Ačkoliv metod neexistuje málo, v současnosti se ve větším používá pouze několik z nich. Od 70. let používaná Killeho metoda je uznávána dodnes, i když se od jejího širšího využití již pomalu upustilo. Hojně využívaná je naopak metoda Eckhardtova filtru, a to jak u nás (např. Českým hydrometeorologickým ústavem), tak i v zahraničí. Na našem území se v poslední době také významně rozšířila tzv. Kašpárkova metoda klouzavých minim, která je inspirována principem používaným ve Velké Británii. Hodnota specifického základního odtoku se na naprosté většině území ČR pohybuje v rozmezí zhruba 0,1–10 l/s/km². Jeho velikost ovlivňuje řada faktorů, mezi které patří geologické a hydrogeologické poměry jednotlivých oblastí, jejich morfologie, pedologie či klima – především srážky a evapotranspirace.

V praktické části jsem pomocí 4 různých metod detailně popsaných v teoretické části (metoda Killeho, metoda Castanyho, Eckhardtův filtr a tzv. Kašpárkova metoda klouzavých minim) určil velikost základního odtoku, specifického základního odtoku a base flow indexu ve studovaném povodí potoka Mastník. Výsledné hodnoty specifického základního odtoku se pohybují v rozmezí 0,89–2,22 l/s/km². Tyto hodnoty nepatří v rámci ČR mezi výrazně podprůměrné ani nadprůměrné. Vlastní výsledky jsem následně také porovnal s výstupy publikací zmíněných již v rešeršní části, které se z většiny zabývaly určením základního odtoku na úrovni hydrogeologických rajonů. Poměrně velký rozsah získaných hodnot základního odtoku v mé praktické části potvrzuje fakt, že různé metody neudávají zcela totožné výsledky a hodnota základního odtoku je vždy dána mj. i použitou metodou, jelikož každá z nich funguje na, ať už

více či méně, odlišných principech. Vždy, když jsou používána data o základním odtoku či se základní odtok určuje, by tedy měl být brán zřetel na to, jaká metoda byla využita.

7 Seznam použité literatury

Aksoy, H., Kurt, I., Eris, E. (2009): Filtered smoothed minima baseflow separation method. *Journal of Hydrology*, 372(1), s. 94–101. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.03.037>.

Arnold, J. G., Allen, P. M. (1999): Validation of automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from stream flow records. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 35, s. 411–424.

Boughton W. C. (1993): A hydrograph-based model for estimating water yield of ungauged catchments. *Institute of Engineers Australia National Conference*. Publ. 93/14, s. 317–324.

Bruthans, J., Kadlecová, R., Slavík, M., Králová, M., Fryč, T., Čurda, J. (2020): Příčina prudkého snížení průtoku některých menších toku ve středních Čechách v létě 2019 a extrémně nízkých specifických odtoku: vliv evapotranspirace z příbřežní zóny toku a ploch s mělkou hladinou podzemní vody. *Zprávy o geologických výzkumech*, 5301, s. 47–54.

Bruthans, J., Grundloch, J., Kadlecová, R., Karatas, T., Šabatová, K., Vlnas, R. (2023): Mapy intenzity dotace podzemní vody a zranitelnosti kvantit přírodních zdrojů podzemní vody k suchu pro ČR. ČGS, Praha, 30 s.

Bruthans, J., Soukup, J. (2011): Vyhodnocení některých parametrů, návrh úprav regionalizace základního odtoku a poznámky k metodice stanovení přírodních zdrojů. MS ČGS, Praha.

Castany, G., Margat, J. A., Albinet, M. (1970): Evaluation rapide des resource en eaux d'une region. *Simposio internacional sobre aguas Subterráneas de Palermo*, Asociación internacional de Hidrogeólogos, Ente de Desarrollo Agrícola, Palermo, 462–682 s.

Chapman, T. G. (1991): Comment on “Evaluation of automated techniques for base flow and recession analyses” by R. J. Nathan and T. A. McMahon. *Water Resources Research*, 27(7), s. 1783–1784. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/91WR01007>.

Chapman, T. G., Maxwell, A.I. (1996): Baseflow Separation – Comparison of Numerical Methods with Tracer Experiments, *Hydrology and Water Resources Symposium 1996: Water and the Environment; Preprints of Papers*, s. 539–545. Dostupné z: <https://doi.org/10.3316/informit.360361071346753>.

Chow, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W. (1988): *Applied Hydrology*. McGraw-Hill Book Company, New York.

Culek, M., Grulich, V., Povolný, D. (1996): *Biogeografické členění České republiky*. Enigma, Praha, 347 s. ISBN 80-85368-80-3.

ČGS (2024a): *Geologická mapa 1:50 000* [online]. Webové aplikace ČGS, Praha. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/geo/> [cit. 2024-5-4].

ČGS (2024b): *Půdní mapa 1:50 000* [online]. Webové aplikace ČGS, Praha. Dostupné z: <https://mapy.geology.cz/pudy/> [cit. 2024-5-4].

ČGS (2024c): *Podzemní voda – rajony, základní odtok a zranitelnost* [online]. Webové aplikace ČGS, Praha. Dostupné z: https://mapy.geology.cz/hydro_rajony/ [cit. 2024-5-12].

ČHMÚ (2024): *Data průměrných denních průtoků vody* [online]. ČHMÚ, Praha. Dostupné z: <https://isvs.chmi.cz/ords/f?p=11002:HOME:15843325741537:::::> [cit. 2024-5-19].

Eckhardt, K. (2005): How to construct recursive digital filters for baseflow separation, *Hydrological Processes*, 19(2), s. 507–515. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/hyp.5675>.

Fendeková, M. (1986): *Hydrológia pre geológov*. Vysokoškolské skriptá. Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského. 120 s.

Fendeková, M., Fendek, M. (1999): Killeho metóda – Teória a prax. *Podzemná voda*, roč. V, č. 2, SAH, Bratislava, s. 77–87.

Hall, F. R. (1968): Base-Flow Recessions – A Review. *Water Resources Research*, 4(5), s. 973–983. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/WR004i005p00973>.

Hanzel, V., Gazda, S., Vaškovský, I. (1984): *Hydrogeológia južnej časti Vysokých Tatier a ich predpolia*. 1. vyd. Bratislava: Geologický Ústav Dionýza Štúra (Západné Karpaty).

Jain, S. K. (1997): *Evaluation of catchment management strategies by modelling soil erosion/ water quality in EPIC supported by GIS*. M. Sc. Thesis, National University of Ireland, Department of Engineering Hydrology, Galway.

Kadlecová, R., Herrmann, Z., Kašpárek, L., Vlnas, R., Frydrych, V., Stibitz, M., Slavík, J., Milický, M., Olmer, M. et al. (2010): *Oceňování velikosti zdrojů podzemních vod*. Sborník geologických věd, řada HIG. ČGS, Praha, 77 s. ISBN: 978-80-7075-656-X.

Kadlecová, R., Olmer, M. (2013): Metody stanovení množství přírodních zdrojů podzemních vod v ČR. Vodohospodářský portál [online]. Dostupné z: <https://www.vakinfo.cz/metody-stanoveni-mnozstvi-prirodnich-zdroju-podzemnich-vod-v-cr/> [cit. 2024-6-17]

Kašpárek, L., Datel, J. V. (2013): Rebilance zásob podzemních vod: metodiky stanovení průměrné hodnoty přírodních zdrojů podzemních vod kvartérních hydrogeologických rajonů. VÚV TGM, 21 s.

Kašpárek, L., Datel, J. V. (2014): Rebilance zásob podzemních vod: Základní výchozí data pro zjednodušené stanovení velikosti přírodních zdrojů podzemní vody v 55 hydrogeologických rajonech. MS VÚV TGM, 33 s.

Kašpárek, L., Datel, J. V. (2015): Metodiky výpočtů přírodních zdrojů. MS ČGS, 26 s.

Kašpárek, L., Kožín, R., Datel, J. V., Peláková, M. (2022): Odhad přírodních zdrojů podzemní vody v hydrogeologických rajonech v České republice v měnících se klimatických poměrech 1981–2019. VTEI 2022/5. Dostupné z: <https://doi.org/10.46555/VTEI.2022.07.003>.

Kašpárek, L., Vlnas, R., Hanel, M., Peláková, M. (2017): Vztahy mezi základním a celkovým odtokem z povodí v závislosti na hydrogeologickém typu horninového prostředí. Vodní hospodářství 7, s. 5–11.

Kessl, J., Kněžek, M. (2000): Metody výpočtu základního odtoku. Sborník Hydrologické dny 2000, Nové podněty a vize pro příští století. II. díl., ČHMÚ, Praha, s. 337-346.

Kille, K. (1970): Das Verfahren MoMnQ, ein Beitrag zur Berechnung der mittleren langjährigen Grundwasserneubildung mit Hilfe der monatlichen Niedrigwasserabflüsse, Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, s. 89–95. Dostupné z: <https://doi.org/10.1127/zdgg/120/1970/89>.

Kliner, K., Kněžek, M. (1974): Metoda separace podzemního odtoku při využití pozorování hladiny podzemní vody. Vodohospodářský časopis, roč. 22, č. 5, Bratislava, s. 457–466.

Kliner, K., Kněžek, M., Olmer, M. (1978): Využití a ochrana podzemních vod. Státní zemědělské nakladatelství, Praha.

Kněžek, M. (1988): Podzemní složka odtoku. Práce a studie VÚV TGM, seš. 171, Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 61 s.

Knódl, V. (2021): Vliv evapotranspirace z říční nivy na vysychání říčky Brziny a snižování hladiny podzemní vody. Bakalářská práce. Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha, 65 s.

Krásný, J., Kněžek, M., Šubová, A., Daňková, H., Matuška, M., Hanzel, V. (1982): Odtok podzemní vody na území Československa. ČHMÚ, Praha, 50 s.

Kříž, H. (1983): Hydrologie podzemních vod. Academia, Praha, 292 s.

Kudelin, B. I. (1960): Principy regional'noj ocenki estestvennykh resursov podzemnykh vod. Izdat Moskovskogo Universiteta, Moskva.

Kulhavý, Z., Doležal, F., Soukup, M. (2001): Separace složek drenážního odtoku a její využití při klasifikaci existujících drenážních systémů. Vědecké práce VÚMOP, Praha, s. 29–52.

Lacey, G. C., Grayson, R. B. (1998): Relating baseflow to catchment properties in south-eastern Australia. *Journal of Hydrology*, 204(1), s. 231–250. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00124-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00124-8).

Lyne, V. D., Hollick, M. (1979): Stochastic time-variable rainfall runoff modeling. *Hydrology and Water Resources Symposium*, Institution of Engineers Australia, Perth, s. 89–92.

Natermann, E. (1951): Die Linie des langfristigen Grundwassers (AuL) und die Trockenwetterabflusslinie (TWL). *Wasserwirtschaft* 41, Sonderheft 12–14.

Nymša, Z. (2023): Vybraná problematika hydrologie a hydrogeologie třeboňské pánve. Diplomová práce. Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova, Praha, 58 s.

Olmer, M., Zajíčková L., Hlavatá J., Svobodová, M. (1972): Podzemní odtok v povodí Labe, Moravy a Odry. In: Kněžek, M. a kol.: Výzkum metod členění složky podzemních vod v povrchovém odtoku. VÚV TGM, Praha.

Pettyjohn W. A., Henning, R. (1979): Preliminary estimate of ground-water recharge rates, related streamflow and water quality in Ohio: Ohio State University Water Resources Center Project Completion Report Number 552.

Plotnikov, I. A. (1959): Ocenka zapasov podzemnih vod. Gosgeoltehzdat, Moskva

Prchalová, H., Olmer, M. (2001): Bilance podzemních vod jako nástroj vodohospodářského plánování. Sborník geologických věd, řada HIG. ČGS, Praha, s. 55–62.

SepHydro (2024): SepHydro – Hydrograph (Baseflow) Separation Tool [online]. Dostupné z: <https://sephydro.hydrotools.tech/pageMain.php> [cit. 2024-6-2].

Slepička, F. (1962): Geohydraulické příčiny hysterezí v prostorovém režimu oběhu vody a vyčleňování jejich účinku v malém povodí. Sborník hydrologické konference, ÚHH-SAV, Smolenice.

Smakhtin, V. U. (2001): Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240(3), s. 147–186. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00340-1](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00340-1).

Vlnas, R. (2011): Návrh metodiky stanovení přírodních zdrojů podzemních vod z průtoků povrchových toků. Výstup projektu SP/2E1/153/07, ČHMÚ, Praha.

VÚV TGM (2024): Digitální báze vodohospodářských dat (DIBAVOD), charakteristiky toků a povodí ČR [online]. VÚV TGM, Praha. Dostupné z: <https://www.dibavod.cz/24/charakteristiky-toku-a-povodi-cr.html> [cit. 2024-6-27].

Wittenberg, H. (2003): Effects of season and man-made changes on baseflow and flow recession: case studies. *Hydrological Processes*, 17(11), s. 2113–2123. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/hyp.1324>.

Wittenberg, H., Sivapalan, M. (1999): Watershed groundwater balance estimation using streamflow recession analysis and baseflow separation. *Journal of Hydrology*, 219(1), s. 20–33. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00040-2](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00040-2).

Wundt, W. (1958): Die mittleren Abflusshohen und Abflussspenden des Winters, des Sommers und des Jahres in der Bundesrepublik Deutschland. *Forch, Zur deutsch. Landeskunde*, Band 105.

8 Seznam obrázků

Obr. 1: Seřazení minimálních měsíčních hodnot průměrných denních průtoků a jejich zobrazení v semilogaritmickém grafu.

Obr. 2: Mapa odtoku podzemní vody ČSSR (s výřezem na ČR).

Obr. 3: Průměrný specifický základní odtok v hydrogeologických rajonech v letech 1971–2010.

Obr. 4: Odhady specifického základního odtoku podzemní vody stanoveného z rozdílu srážek a výparu.

Obr. 5: Dlouhodobý průměrný (specifický) základní odtok pro období 1991–2020 odvozen ze srážkového normálu, regresních vztahů srážek a celkového odtoku a BFI.

Obr. 6: Povodí Vltavy s vyznačeným potokem Mastník a poloha vodoměrné stanice v obci Radíč.

Obr. 7: Náhled separace hydrogramu Eckhardtovým filtrem.

Obr. 8: Vývoj základního odtoku v čase podle Kašpárkovy metody klouzavých minim.

9 Seznam tabulek

Tab. 1: Klasifikace dlouhodobého specifického odtoku podzemní vody.

Tab. 2: Výsledné hodnoty základního odtoku, specifického základního odtoku a BFI v povodí potoka Mastník dle jednotlivých metod.